

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

<<ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ>>

2016-2018

---

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΚΥΚΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

---

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανου Ε. Μανιού



Επιβλέπων:

Λαγαρός Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων:

Νασιόπουλος Ηλίας, CEO Green Innovation & Vehicle Engineering 'GIVE'

Αθήνα, Μάρτιος 2018

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού διατμηματικού προγράμματος «Υπολογιστική Μηχανική» με στόχο την εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα βελτιστοποίησης τοπολογίας στην κατασκευή του πλαισίου ενός πρότυπου ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νικόλαο Λαγαρό για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου ώστε να έχω την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα.

Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Ηλία Νασιόπουλο και την εταιρία «GIVE» για την πολύτιμη καθοδήγηση και την εμπειρία που αποκόμισα μέσα από τη συνεργασία μας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη και να ευχηθώ καλή δύναμη σε όλους τους νέους ανθρώπους που προσπαθούν και επιχειρούν κάτω από δύσκολες συνθήκες.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

Στέφανος Μανιός

---

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**


---

<b>1</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>9</b>
1.1	Σύγχρονες τεχνικές σχεδιασμού και βελτιστοποίηση .....	9
1.2	Από την ιδέα στην πράξη.....	9
1.3	Στόχος της διπλωματικής εργασίας .....	10
1.4	Δομή της διπλωματικής εργασίας .....	11
<b>2</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ &amp; ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΥΚΛΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>12</b>
2.1	Ανασκόπηση εργασιών στον τομέα της βελτιστοποίησης τοπολογίας .....	12
2.1.1	Δομή των εργασιών .....	12
2.2	Καθορισμός του χωρίου σχεδιασμού .....	13
2.2.1	Καθορισμός του δίκυκλου οχήματος.....	13
2.2.2	Καθορισμός του πλαισίου .....	13
2.2.3	Διαφορετικοί τύποι πλαισίων.....	15
2.2.4	Σχεδιαστικοί περιορισμοί του πλαισίου .....	20
2.2.4.1	Περιοχή σχεδιασμού (design area).....	20
2.2.4.2	Περιοχή μη σχεδιασμού (non-design area) .....	21
2.3	Συνθήκες φόρτισης της κατασκευής.....	21
2.3.1	Στατικά φορτία .....	22
2.3.2	Δυναμικά & Αεροδυναμικά φορτία.....	22
2.3.2.1	Διαμήκης μεταφορά βάρους .....	24
2.3.2.2	Πλευρική μεταφορά βάρους .....	24
<b>3</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>26</b>
3.1	Βελτιστοποίηση .....	26
3.1.1	Κατηγορίες βελτιστοποίησης κατασκευών .....	26
3.2	Βελτιστοποίηση Τοπολογίας .....	27
3.3	Μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης .....	27
3.3.1	Μεταβλητές σχεδιασμού.....	28
3.3.2	Αντικειμενική συνάρτηση .....	28
3.3.3	Συναρτήσεις περιορισμών .....	29
3.4	Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης .....	29
3.4.1	Ιστορική αναδρομή της μεθόδου SIMP .....	30
3.4.2	Δομή της μεθόδου SIMP.....	31
3.4.3	Διατύπωση της μεθόδου SIMP .....	32
3.4.4	Συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση της μεθόδου SIMP .....	32
3.5	Καθορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας .....	33

3.6	Επιλογή της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος .....	34
3.6.1	Βελτιστοποίηση τοπολογίας με χρήση του OptiStruct .....	34
3.6.2	Διατυπώσεις που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό OptiStruct.....	34
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΚΥΚΛΟΥ.....	35
4.1	Εισαγωγή.....	35
4.2	Γραφικός και μηχανολογικός σχεδιασμός .....	35
4.3	Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων .....	37
4.3.1	Δομική δυσκαμψία του πλαισίου .....	37
4.3.2	Επιλογή φορτίων για τον υπολογισμό των στατικών παραμορφώσεων .....	39
4.3.3	Επαλήθευση στρεπτικής φόρτισης.....	39
4.4	Βελτιστοποίηση τοπολογίας πλαισίου .....	40
4.4.1	Καθορισμός των περιοχών σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού .....	40
4.4.2	Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.....	42
4.4.3	Καθορισμός των περιορισμών.....	42
4.4.4	Επίλυση του προβλήματος .....	43
4.4.5	Αποτελέσματα .....	44
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ   ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	47
5.1	Εισαγωγή.....	47
5.2	Βελτίωση της κατανομής τύπου σκακιέρας (Checkerboard).....	47
5.3	Ελάχιστο/Μέγιστο μέγεθος κατασκευαστικών μελών (Min/Max member size) .....	47
5.4	Συμμετρία κατασκευής (Symmetry construction).....	48
5.5	Εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών .....	48
5.5.1	Επιλογή μοντέλου για την εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών .....	48
5.5.2	Εφαρμογή όλων των κατασκευαστικών περιορισμών στο μοντέλο .....	49
5.5.3	Ανάλυση ευαισθησίας ελαχίστου/μεγίστου κατασκευαστικού μέλους .....	50
5.5.4	Ανάλυση της κατασκευαστικής δομής της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης .....	52
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ   ΕΜΦΩΛΕΥΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ....	54
6.1	Εισαγωγή.....	54
6.2	Διατύπωση της μεθόδου βελτιστοποίησης grsm .....	54
6.3	Περιορισμοί της εξωτερικής βελτιστοποίησης .....	55
6.4	Διατύπωση του μοντέλου βελτιστοποίησης .....	57
6.4.1	Περιγραφή της λειτουργίας των αρχείων TCL & BATCH .....	59
6.5	Αποτελέσματα του εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης .....	60
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	63

---

<b>7.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>63</b>
<b>7.2 Κατασκευαστική διαδικασία πλαισίου.....</b>	<b>63</b>
7.2.1 Συγκόλληση Κόκκων με Ψεκασμό .....	64
7.2.2 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (SLS) .....	64
7.2.3 Παραδείγματα από τη βιομηχανία.....	65
<b>7.3 Συμπεράσματα διαδικασίας ανάπτυξης πλαισίου δίκυκλου οχήματος.....</b>	<b>66</b>
<b>7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....</b>	<b>67</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>68</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Μηχανικά μέρη του δίκυκλου οχήματος .....	13
Εικόνα 2: Πλαίσιο μηχανής και περιφερειακά εξαρτήματα .....	14
Εικόνα 3: Σύνδεση πλαισίου (κόκκινο) και υποπλασίου (μαύρο) .....	14
Εικόνα 4: Πλαίσιο Moped ‘Indigan Trail Roller’ .....	15
Εικόνα 5: Πλαίσιο ‘Vespa’ .....	15
Εικόνα 6: Πλαίσιο Single Cradle .....	16
Εικόνα 7: Πλαίσιο Double Cradle .....	16
Εικόνα 8: Πλαίσιο Diamond ‘Honda CBR 250 R’ .....	17
Εικόνα 9: Πλαίσιο Trellis ‘2003 Ducati Multistrada’ .....	17
Εικόνα 10: Πλαίσιο Backbone .....	18
Εικόνα 11: Πλαίσιο Beam ‘Yamaha YZF R1’ .....	18
Εικόνα 12: Πλαίσιο Monocoque Kawasaki Ninja ZX 14R / ZZR1400 .....	19
Εικόνα 13: Πλαίσιο Omega ‘Harley Davidson V-rod by SBAY COMPANY’ .....	19
Εικόνα 14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίκυκλου οχήματος .....	20
Εικόνα 15: Μεταξόνιο και απόσταση πλαισίου από το έδαφος .....	20
Εικόνα 16: Διάταξη ανάρτησης και σημεία άρθρωσης .....	21
Εικόνα 17: Θέση του κινητήρα & των στοιχείων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας ...	21
Εικόνα 18 Επιβολή στατικών φορτίων .....	22
Εικόνα 19: Επίδραση αεροδυναμικών δυνάμεων & ροπών .....	23
Εικόνα 20: Άξονες περιστροφής (Roll, Pitch, Yaw) .....	23
Εικόνα 21: Επιτάχυνση οχήματος – Ανάπτυξη δυνάμεων (Lift & Squat) .....	24
Εικόνα 22: Φρενάρισμα οχήματος – Ανάπτυξη δυνάμεων (Dive & Lift) .....	24
Εικόνα 23: Στροφή οχήματος -Ανάπτυξη πλευρικής δύναμης (Lateral) .....	25
Εικόνα 24: Κατηγορίες βελτιστοποίησης κατασκευών .....	27
Εικόνα 25 : Διάγραμμα βελτιστοποίησης τοπολογίας ηλεκτρικού ποδηλάτου .....	34
Εικόνα 26 : Πρωτότυπο σχέδιο ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος G.I.V.E .....	35
Εικόνα 27: Αρχικό τρισδιάστατο σχέδιο του χωριού σχεδιασμού (graphic design) .....	36
Εικόνα 28: Τελικό τρισδιάστατο σχέδιο του χωριού σχεδιασμού (engineering design) .....	36
Εικόνα 29: Στρεπτική φόρτιση πλαισίου .....	37
Εικόνα 30: Πλευρική φόρτιση πλαισίου .....	38
Εικόνα 31: Διαμήκης φόρτιση πλαισίου .....	38
Εικόνα 32: Φόρτιση υπό το βάρος του οδηγού .....	38
Εικόνα 33: Επαλήθευση προσεγγίσεων στρεπτικής φόρτισης .....	40
Εικόνα 34: Περιοχές σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού πλαισίου δίκυκλου .....	40
Εικόνα 35: Αφαίρεση περιοχών σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού .....	41
Εικόνα 36: Τελικό χωρίο σχεδιασμού και σημεία προσάρτησης υποπλασίου .....	42
Εικόνα 37: Εισαγωγή τοπικού Σ.Σ στη κατεύθυνση στροφής του άξονα διεύθυνσης .....	43
Εικόνα 38: Τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης .....	43
Εικόνα 39: Αναπαράσταση προσάρτησης υποπλασίου στο κύριο πλαίσιο .....	44
Εικόνα 40: Μονοδιάστατα στοιχεία CROD .....	44
Εικόνα 41: Μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης .....	45
Εικόνα 42: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης μάζας (Min total mass) .....	45
Εικόνα 43: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης (Min weighted compliance & Mass fraction 15%) .....	46
Εικόνα 44: Ορισμός ενός επιπέδου συμμετρίας της κατασκευής .....	48

Εικόνα 45: Σύγκριση μετατοπίσεων για την επιβολή πλευρικής φόρτισης μεταξύ των λύσεων min Mass (αριστερά) και min Weighted compliance (δεξιά).....	49
Εικόνα 46: Σύγκριση μετατοπίσεων για την επιβολή στρεπτικής φόρτισης μεταξύ των λύσεων min Mass (αριστερά) και min Weighted compliance (δεξιά) .....	49
Εικόνα 47: Μοντέλο πλαισίου (2) υστέρα από την εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών.....	50
Εικόνα 48: Σύγκριση μοντέλων #1 (αριστερά) , #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά), πλαγιά όψη.....	51
Εικόνα 49: Σύγκριση μοντέλων #1 (αριστερά) , #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά), πρόσοψη.....	51
Εικόνα 50: Σύγκριση μοντέλων #1 αριστερά , #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά) πλαγιά όψη, πλάγια - πίσω όψη.....	52
Εικόνα 51: Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο .....	52
Εικόνα 52:Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο .....	53
Εικόνα 53: Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο .....	53
Εικόνα 54: Διάγραμμα ροής της μεθόδου (GRSM).....	55
Εικόνα 55:Μπαταρία 18650 Li-Ion.....	55
Εικόνα 56: Καθορισμός πακέτου μπαταριών .....	56
Εικόνα 57:Όρια τοποθέτησης του πακέτου των μπαταριών .....	57
Εικόνα 58: Αρχική θέση τοποθέτησης του πακέτου των μπαταριών .....	57
Εικόνα 59: Διάγραμμα ροής-μεθοδολογία της διαδικασίας εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης .....	58
Εικόνα 60: Διάγραμμα-εφαρμογή του εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης.....	58
Εικόνα 61: Διάγραμμα της λειτουργίας των αρχείων TCL & BATCH.....	59
Εικόνα 62: Αναπαράσταση σχεδιασμού και τοποθέτησης του πακέτου μπαταριών .....	60
Εικόνα 63: Αποτελέσματα εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης, μετατόπιση ανά συνθήκη φόρτισης (αριστερά) και αντικειμενική συνάρτηση με πολυώνυμο παρεμβολής (δεξιά).....	60
Εικόνα 64: Πλαίσιο εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης με τοποθέτηση του πακέτου των μπαταριών.....	62
Εικόνα 65: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας κατασκευαστικής μεθόδου ‘Συγκόλλησης Κόκκων με Ψεκασμό.....	64
Εικόνα 66: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας κατασκευαστικής μεθόδου ‘Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με Λείζερ’ .....	65
Εικόνα 67: Μοντέλο ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος ‘APWorks-Light Rider’ .....	65
Εικόνα 68: Μοντέλο ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος ‘Divergent 3D- Dagger ‘ .....	66

---

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ**

---

(1).....	28
(2).....	31
(3).....	31
(4).....	32
(5).....	56

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

---

Πίνακας 1: Συνθήκες φόρτισης πλαισίου .....	39
Πίνακας 2: Σύγκριση αρχικού σχεδιασμού με εισαγωγή υποπλασίου .....	41
Πίνακας 3: Σύγκριση τιμών δυσκαμψίας ανάλογα με το όριο πυκνότητας των στοιχείων ...	50
Πίνακας 4: Σύγκριση μοντέλων ελαχίστου/μεγίστου κατασκευαστικού μέλους.....	51
Πίνακας 5: Προδιαγραφές μπαταρίας (18650).....	56
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά πακέτου μπαταριών (18650) .....	56
Πίνακας 7: Ανάλυση αποτελεσμάτων εμφωλευμένης βελτιστοποίησης.....	61
Πίνακας 8: Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης και καμπύλης παρεμβολής.....	61



# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η μηχανική είναι η επιστήμη στην οποία οι αρχές που διέπουν τη φύση χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την κατασκευή χρήσιμων αντικειμένων και εξαρτημάτων. Ο μηχανικός προσπαθεί να αναλύσει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η φύση και τις εκάστοτε συνθήκες που περιβάλλουν την κατασκευή ώστε αυτή να ικανοποιεί πλήρως το σκοπό της. Χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό κρίσης, εμπειρίας, τεχνικών μοντελοποίησης κλπ. ο μηχανικός παίρνει σχεδιαστικές αποφάσεις με στόχο να τον οδηγήσουν στο βέλτιστο σχεδιαστικό αποτέλεσμα.

Ωστόσο, όταν η ύπαρξη μεγάλου αριθμού μεταβλητών πρέπει να προσαρμοστεί με πολλούς αντικρουόμενους στόχους ή και περιορισμούς, αυτό το είδος βελτιστοποίησης που βασίζεται στην εμπειρία υπολείπεται της αναγνώρισης του βέλτιστου σχεδιασμού. Οι αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα περίπλοκες ώστε να καθοριστεί διαισθητικά το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Αυτό το κενό έρχεται να καλύψει ένα πλήθος μαθηματικών προσεγγίσεων που πλέον υλοποιούνται με τη χρήση Η/Υ. Μέσα από την εφαρμογή αυτών των μεθόδων και της δυνατότητας επεξεργασίας των συγχρόνων Η/Υ συστημάτων, ο μηχανικός μπορεί να αξιολογήσει περισσότερους σχεδιαστικούς συνδυασμούς για την εύρεση του καλύτερου, σύμφωνα πάντοτε με τα κριτήρια που έχει καθορίσει

Επιπλέον, γίνεται χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων που επιτρέπουν στον υπολογιστή να αναζητεί πιο γρήγορα και αποτελεσματικά το βέλτιστο προσφέροντας ταχύτερη ανάπτυξη σε όλους τους τομείς χρήσης της βελτιστοποίησης.

## 1.2 ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΔΕΑ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

Κάθε σπουδαίο αποτέλεσμα προέρχεται από μια αρχική ιδέα, άλλοτε μικρή και απλή άλλοτε μεγάλου όγκου και σύνθετη. Η ιδέα υπό μελέτη στην παρούσα εργασία είναι η ανάπτυξη μια ηλεκτροκίνητης και φιλικής προς το περιβάλλον μηχανής με χρήση καινοτόμων σχεδιαστικών εργαλείων. Εκκίνηση της διαδικασίας πραγματοποίησης αυτής είναι η κατασκευή του πλαισίου (βασικότερου δομικού στοιχείου) με χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Η βελτιστοποίηση έρχεται να απαντήσει στο ερώτημα της αρχικής δομής του πλαισίου αυξάνοντας ταυτόχρονα τις επιδόσεις του οχήματος. Με χρήση των σύγχρονων τεχνικών βελτιστοποίησης επιδιώκεται η μείωση του βάρους του πλαισίου άρα και συνολικά του οχήματος.

Τα σύγχρονα ηλεκτροκίνητα οχήματα παρόλο που πετυχαίνουν υψηλές επιδόσεις και συναγωνίζονται τα αντίστοιχα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσεως, δεν έχουν καταφέρει να μειώσουν ακόμα τους δείκτες του συνολικού τους βάρους και κόστους. Η αιτία για την αύξηση των δύο σημαντικών δεικτών είναι η χρήση μεγάλου αριθμού μπαταριών. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg) των μπαταριών αλλά στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις των εφαρμογών.

Παρόλο που οι δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των μπαταριών ακολουθούν ραγδαίους ρυθμούς εξέλιξης, η μείωση βάρους σε ένα ηλεκτρικό όχημα παίζει καθοριστικό

ρόλο. Πρώτον θα του επιτρέψει να καταναλώσει μικρότερο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας την εμβέλεια κίνησης του και δεύτερον να μειώσει τη χρήση μεγάλου αριθμού μπαταριών που αποτελεί τον κύριο ανασταλτικό παράγοντα για την κατασκευή και συντήρησή του.

Η μείωση του βάρους του πλαισίου (μείωση αδρανειακών μαζών) έχει επίσης θετικό αντίκτυπο στην βελτίωση της επιτάχυνσης αλλά και του φρεναρίσματος. Επιπλέον, είναι ορατή η συνεισφορά στον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου και τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών, δηλαδή στην ανάπτυξη ενός πιο φιλικού προς το περιβάλλον οχήματος.

Η δομή αυτής της ιδέας μπορεί να χαρακτηριστεί ως συνθέτη και αυτό διότι αντιπροσωπεύει όχι μόνο την έρευνα και ανάπτυξη αλλά και την επιμονή για δημιουργία εντός των ελληνικών συνόρων. Αρωγοί στην υλοποίηση της είναι το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και η νεοφυής επιχείρηση GIVE (Green Innovation & Vehicle Engineering).

Η εταιρία έχει ως στόχο την κατασκευή μιας τέτοιας μηχανής που θα καλύψει τις ανάγκες για έξυπνη, άνετη και οικολογική μετακίνηση μέσα στον αστικό κλοιό και ταυτόχρονα θα ενισχύσει το προφίλ και την ανάπτυξη της ελληνικής αυτοκινητοβιομηχανίας.

### 1.3 ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης τοπολογίας για την ανάπτυξη του πλαισίου (chassis) ενός πρωτότυπου ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος. Η μελέτη του πλαισίου αναπτύσσεται με γνώμονα τη μείωση του βάρους και την ταυτόχρονη διατήρηση των επιδόσεων της κατασκευής (χειρισμός και ασφάλεια) [1] και αποσκοπεί στην εύρεση μιας πραγματικής και κατασκευάσιμης λύσης.

Το σημείο εκκίνησης αυτής της μελέτης είναι ένα τρισδιάστατο χωρίο υλικού (3d design domain) [2] π.χ αλουμινίου, με διαστάσεις που καθορίζονται από τον αρχικό σχεδιασμό του οχήματος. Παράλληλα λαμβάνονται υπόψη διαφορετικά σενάρια στατικών και δυναμικών φορτίσεων (multiple load cases) όπου σε συνδυασμό με συγκεκριμένους περιορισμούς (εργονομικούς, γεωμετρικούς, κατασκευαστικούς, κλπ.) αναζητείται το βέλτιστο και επιθυμητό αποτέλεσμα.

Για την υλοποίηση του στόχου αυτού η εργασία αναλύεται στις επιμέρους ενότητες:

- Ανασκόπηση των εργασιών και ανάλυση των σύγχρονων τάσεων πάνω στην τεχνολογία της βελτιστοποίησης τοπολογίας.
- Καθορισμός του προς λύση προβλήματος τοπολογίας.
- Επίλυση του προβλήματος με χρήση απλών παραδοχών και τεχνικών βελτιστοποίησης.
- Επίλυση του προβλήματος με εισαγωγή φίλτρων και κατασκευαστικών περιορισμών
- Επίλυση του προβλήματος με ανάπτυξη μοντέλου 'batch' , εμφωλευμένης δομής βελτιστοποίησης.

## 1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Παρατίθεται η δομή της εργασίας όπως αυτή κατανέμεται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

1° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΥΚΛΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΚΥΚΛΟΥ

5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | ΕΜΦΩΛΕΥΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΥΚΛΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Ο τομέας της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι πλέον σχετικά ώριμος αν σκεφτεί κανείς ότι διανύει ήδη την τρίτη δεκαετία από τη στιγμή που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά η μέθοδος SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) στα τέλη της δεκαετίας του '80 [3]. Παρόλα αυτά η έμπρακτη εφαρμογή των μεθόδων αυτών με ταυτόχρονη κατασκευή και χρήση των παραγόμενων αποτελεσμάτων δείχνει να ισχυροποιείται την τελευταία πενταετία συμβαδίζοντας και με την ανάπτυξη των εκτυπωτών τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας η χρήση τέτοιων μεθόδων κερδίζει διαρκώς έδαφος χρόνο με το χρόνο καθώς δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να κατασκευάσουν βελτιστοποιημένες λύσεις όσον αφορά την αντοχή, το βάρος και κυρίως το κόστος. Τυπικά παραδείγματα συναντώνται στον μηχανοκίνητο αθλητισμό π.χ Formula 1, στις σύγχρονες μεγάλες κατασκευές π.χ γέφυρες αλλά και στον κλάδο της εμβιομηχανικής π.χ πρόσθετα μέλη.

Η μελέτη των πιο προσφάτων εργασιών δίνει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την υλοποίηση και την εκτέλεση των μεθόδων στην σύγχρονη βιομηχανία. Οι εργασίες που μελετηθήκαν αφορούν τη βελτιστοποίηση ενός συγκεκριμένου μηχανολογικού εξαρτήματος (πλαίσιο) και ως επί των πλείστων θέτουν σαν κύριο στόχο την μείωση της ενέργειας παραμόρφωσης με ταυτόχρονη ικανοποίηση περιορισμών όπως είναι η δομική δυσκαμψία της κατασκευής και το επιθυμητό εναπομένον ποσοστό όγκου ή ποσοστό μάζας.

#### 2.1.1 Δομή των εργασιών

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος που τίθεται στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα πλήθος εργασιών πάνω στην ανάπτυξη ηλεκτρικών ποδηλάτων και μοτοποδηλάτων. Η δομή των εργασιών αναπτύσσεται σε τέσσερις ενότητες:

- i. Καθορισμός του χωρίου σχεδιασμού
- ii. Καθορισμός των συνθηκών φόρτισης
- iii. Καθορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας
- iv. Επιλογή της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος

## 2.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΩΡΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

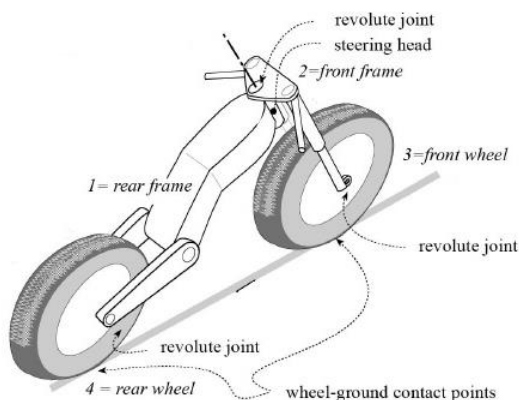
Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 1 το σημείο εκκίνησης της μελέτης είναι ένα τρισδιάστατο χωρίο, για τον λεπτομερή καθορισμό του οποίου εκλαμβάνονται οι σχεδιαστικοί περιορισμοί που αναλύονται στη συνέχεια. [2]

### 2.2.1 Καθορισμός του δίκυκλου οχήματος

Για να γίνει αντιληπτό το χωρίο σχεδιασμού που μελετάτε είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η θέση του σε σχέση με τα υπόλοιπα μηχανικά μέλη του συστήματος που καλείται δίκυκλο όχημα. Αν και τα οχήματα αυτά αποτελούνται από μεγάλη ποικιλία μηχανικών εξαρτημάτων, από αυστηρά κινηματική άποψη και θεωρώντας ότι οι αναρτήσεις είναι άκαμπτες, το δίκυκλο όχημα μπορεί να καθοριστεί απλά ως ένας χωρικός μηχανισμός τεσσάρων άκαμπτων σωμάτων:

- 1) το πίσω συγκρότημα (πλαίσιο, σέλα, δεξαμενή και σύστημα μετάδοσης κίνησης)
- 2) το εμπρόσθιο συγκρότημα (το πιρούνι, η κεφαλή διεύθυνσης και το τιμόνι)
- 3) ο εμπρός τροχός
- 4) ο πίσω τροχός

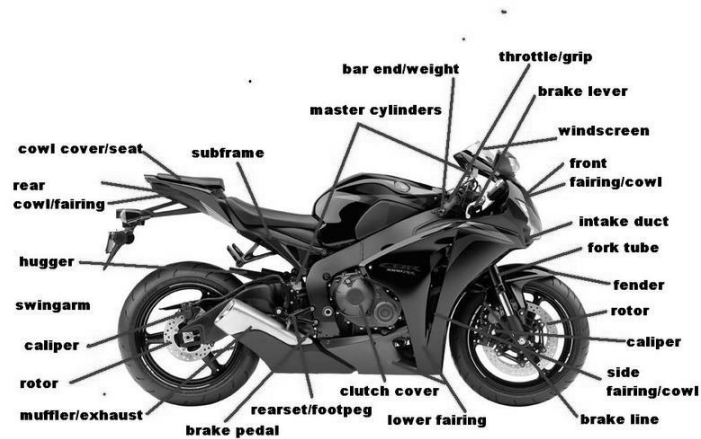
Αυτά τα άκαμπτα σώματα συνδέονται με τρεις περιστρεφόμενες αρθρώσεις (revolute joints) τον άξονα διεύθυνσης και τους δύο άξονες των τροχών και βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος (wheel-ground contact points).



Εικόνα 1: Μηχανικά μέρη του δίκυκλου οχήματος

### 2.2.2 Καθορισμός του πλαισίου

Το πλαίσιο ενός οχήματος λειτουργεί ως η κοινή βάση επί της οποίας τα διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα και μέρη μπορούν συνδεθούν πάνω.



Εικόνα 2: Πλαίσιο μηχανής και περιφερειακά εξαρτήματα

Σε αυτά εντάσσονται:

- ο κινητήρας που ως επί το πλείστον τοποθετείται εσωτερικά του πλαισίου
- ο βραχίονας ταλάντωσης που συνδέεται με τον κοχλία περιστροφής (επιτρέποντας την κίνηση της ανάρτησης) στο πίσω μέρος
- το τιμόνι και ο άξονας διεύθυνσης που συνδέονται στο μπροστινό μέρος του πλαισίου
- η δεξαμενή καυσίμου στο επάνω μέρος
- άλλα μηχανολογικά εξάρτημα (σύστημα ψύξης ,ηλεκτρικό σύστημα, κλπ.)

Το πλαίσιο συνεισφέρει επίσης στην προστασία των πιο ευαίσθητων τμημάτων του οχήματος σε περίπτωση πρόσκρουσης.

Σε αρκετούς τύπους πλαισίων παρατηρείται η χρήση μια μικρότερης ξεχωριστής δομής που συνδέεται με το κυρίως πλαίσιο. Πρόκειται για το υποπλαίσιο (subframe) που χρησιμοποιείται για την στήριξη του καθίσματος του αναβάτη.



Εικόνα 3: Σύνδεση πλαισίου (κόκκινο) και υποπλασίου (μαύρο)

Τέλος, ένα πλαίσιο θα πρέπει να έχει χαμηλό βάρος αλλά ταυτόχρονα να είναι αρκετά ανθεκτικό ώστε στηρίζει όλα τα περιφερειακά εξαρτήματα και να παρέχει την απαραίτητη δομική δυσκαμψία και ασφάλεια ως προς την χρήση του.

Παρουσιάζονται μερικοί τύποι βασικών πλαισίων όπως αυτοί χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία δίκυκλων οχημάτων έως σήμερα:

### 2.2.3 Διαφορετικοί τύποι πλαισίων

- Πλαίσιο Moped

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από ένα κύριο χαλύβδινο σωλήνα χωρίς να σχηματίζει κλειστό γεωμετρικό σχήμα. Ο σχεδιασμός του πλαισίου και η θέση οδήγησης που προσφέρει επιλέγονται για οχήματα με χαμηλή τελική ταχύτητα έχοντας ως στόχο την επίτευξη χαμηλού κόστους, υψηλής λειτουργικότητας και εύκολης πρόσβασης.



Εικόνα 4: Πλαίσιο Moped 'Indigan Trail Roller'

- Πλαίσιο Scooter

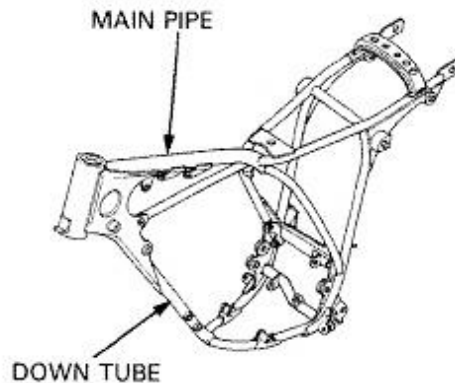
Ο κλασικός σχεδιασμός πλαισίου σκούτερ αναλύεται σε δύο επίπεδα. Στο πρώτο βρίσκεται η θέση του αναβάτη ενώ στο δεύτερο το δάπεδο που χρησιμοποιείται ως στήριξη για τα ποδιά. Ο σχεδιασμός αυτός καθιερώθηκε διότι οι κινητήρες σκούτερ και το σύστημα μετάδοσης κίνησης συνδέονται στον πίσω άξονα ή κάτω από το κάθισμα. Με αυτόν τον τρόπο το πλαίσιο περικλείει και προστατεύει τα μηχανολογικά εξάρτημα και προσφέρει υψηλή λειτουργικότητα και εύκολη πρόσβαση στον αναβάτη.



Εικόνα 5: Πλαίσιο 'Vespa'

- Πλαίσιο Single Cradle

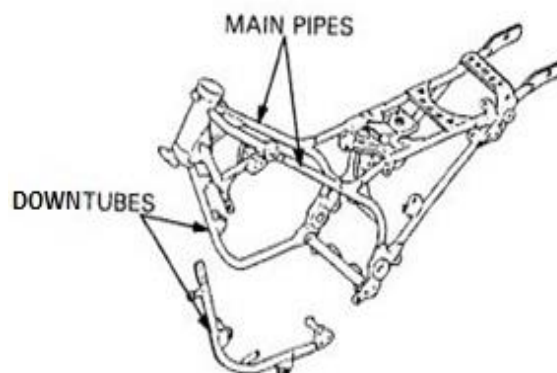
Το πλαίσιο Single Cradle αποτελείται από ένα ενιαίο χαλύβδινο σωλήνα που εκτείνεται από το σημείο στήριξης του άξονα διεύθυνσης και στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο μικρότερους σωλήνες που περιβάλλουν και στηρίζουν τον κινητήρα. Τα πλαίσια αυτού του τύπου έχουν χαμηλό κόστος, υψηλή αντοχή και χρησιμοποιούνται σε δίκυκλα οχήματα για εκτός δρόμου χρήση.



Εικόνα 6: Πλαίσιο Single Cradle

- Πλαίσιο Double Cradle

Το πλαίσιο Double Cradle αποτελείται από δύο σωλήνες που εκτείνονται από το σημείο στήριξης του άξονα διεύθυνσης με κατεύθυνση προς το πίσω μέρος του οχήματος. Προσφέρει καλύτερη στήριξη και αποτελεί εξέλιξη του πλαισίου Single Cradle. Τα σύγχρονα πλαίσια Double Cradle έχουν χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή, κατασκευάζονται από χάλυβα ή αλουμίνιο και χρησιμοποιούνται σε εκτός δρόμου δίκυκλα οχήματα π.χ KTM 250 SXF.

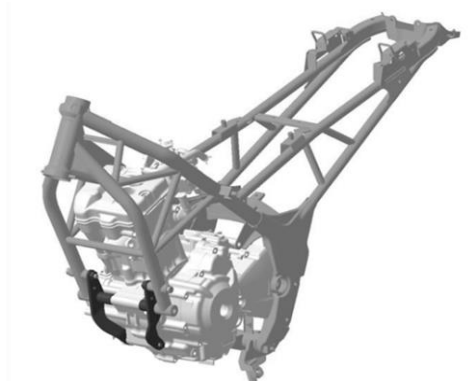


Εικόνα 7: Πλαίσιο Double Cradle



- Πλαίσιο Diamond

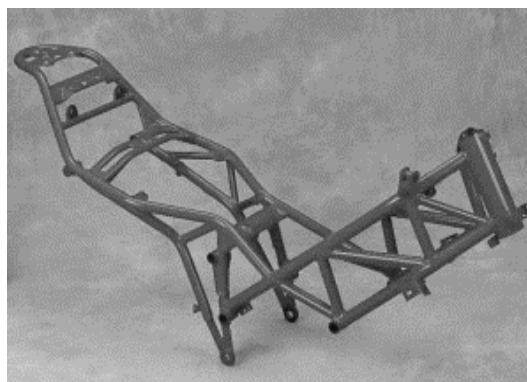
Το πλαίσιο Diamond έχει ως βασικό χαρακτηριστικό τον τρόπο στήριξης του κινητήρα ο οποίος είναι αναρτημένος και δεν περικλείεται εξ ολοκλήρου από αυτό. Ο σχεδιασμός του πλαισίου είναι απλός, εύκολα κατασκευάσιμος και χρησιμοποιείται κυρίως σε εκτός δρόμου δίκυκλα οχήματα.



Εικόνα 8: Πλαίσιο Diamond 'Honda CBR 250 R'

- Πλαίσιο Trellis

Το πλαίσιο Trellis συνδέει τον άξονα διεύθυνσης με τον άξονα του βραχίονα περιστροφής χρησιμοποιώντας μεταλλικούς σωλήνες που σχηματίζουν τριγωνικό χωροδικτύωμα. Χρησιμοποιώντας τις αρχές που διέπουν τις μεταλλικές κατασκευές, το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από στρογγυλά ή οβάλ μεταλλικά σωληνοειδή τμήματα που συγκολλούνται μεταξύ τους. Ένα καλά σχεδιασμένο πλαίσιο Trellis παρέχει υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος, απλοποιεί την τοποθέτηση του κινητήρα και των εξαρτημάτων και παρέχει καλή πρόσβαση σε εργασίες συντήρησης.



Εικόνα 9: Πλαίσιο Trellis '2003 Ducati Multistrada'

- Πλαίσιο Backbone

Το πλαίσιο Backbone αποτελείται από μια κυρία ισχυρή μεταλλική δομή που συνδέει τις περιοχές πρόσδεσης της εμπρός και πίσω ανάρτησης. Ο κινητήρας όπως και στο πλαίσιο Diamond είναι αναρτημένος προσφέροντας ευκολία τόσο στην τοποθέτηση όσο και συντήρησή του. Τα πλαίσια αυτού του τύπου έχουν απλό σχεδιασμό, κατασκευασιμότητα και χαμηλό κόστος.



Εικόνα 10: Πλαίσιο Backbone

- Πλαίσιο Perimeter/Beam/Twin Spar

Το πλαίσιο Perimeter ακολουθεί τη φιλοσοφία του πλαισίου Trellis και περιβάλλει τον κινητήρα περιμετρικά. Τα πλαίσια αυτού του τύπου κατασκευάζονται από συμπιεσμένο (πρεσαριστό) χάλυβα ή αλουμίνιο και διακρίνονται για τις υψηλές τιμές δομικής δυσκαμψίας. Χρησιμοποιούνται τόσο σε εμπορικά δίκυκλα οχήματα με υψηλή ισχύ κινητήρα αλλά και σε αγωνιστικά δίκυκλα οχήματα με επιπρόσθετη χρήση τιτάνιου και ινών άνθρακα για την κατασκευή τους.



Εικόνα 11: Πλαίσιο Beam 'Yamaha YZF R1'

- Πλαίσιο Monocoque

Το πλαίσιο Monocoque αποτελείται από μια ενιαία δομή με πολλαπλές λειτουργίες. Η δομή περιβάλλει και στηρίζει εξωτερικά τα κύρια μηχανολογικά εξαρτήματα και ταυτόχρονα λειτουργεί σαν στήριξη της θέσης του αναβατή και της δεξαμενή καυσίμου. Τα πλαίσια αυτού του τύπου έχουν υψηλότερες τιμές δομικής δυσκαμψίας σε σχέση με τα πλαίσια Perimeter και ιδιαίτερα χαμηλό βάρος. Λόγω της χρήσης υλικών υψηλού κόστους αλλά και των σύνθετων τεχνικών κατασκευής (δημιουργία καλουπιών) έχουν χαμηλά ποσοστά παραγωγής και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ειδικά αγωνιστικά δίκυκλα οχήματα.



Εικόνα 12: Πλαίσιο Monocoque Kawasaki Ninja ZX 14R / ZZR1400

- Πλαίσιο Omega

Το πλαίσιο Omega αποτελείται από μια ιδιαίτερη δομή (ωμέγα δομή) που περιβάλλει τον κινητήρα και συγκρατεί το εμπρός και το πίσω μέρος του δίκυκλου οχήματος. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πλαισίων είναι η χρήση ενός βοηθητικού βραχίονα που υποστηρίζει το τιμόνι, ενώ η κινηματική αλυσίδα της διεύθυνσης αποτελείται από ένα πλήθος αξόνων και σφαιρικών αρθρώσεων και όχι από το συνηθισμένο άξονα διεύθυνσης.



Εικόνα 13: Πλαίσιο Omega 'Harley Davidson V-rod by SBAY COMPANY'

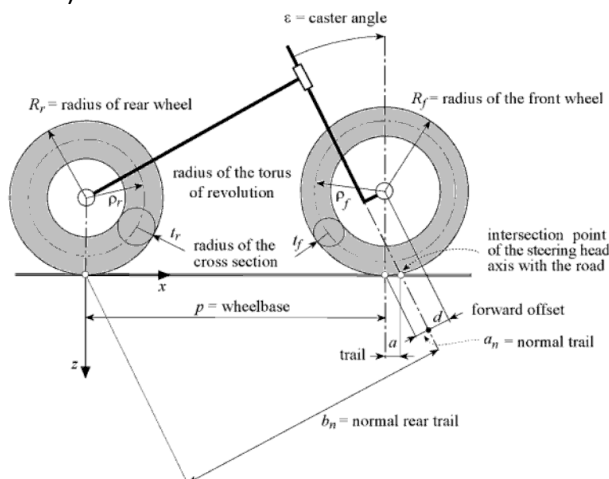
## 2.2.4 Σχεδιαστικοί περιορισμοί του πλαισίου

Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί είναι οι παράγοντες εκείνοι που επηρεάζουν άμεσα τη δυνατότητα υλοποίησης της κατασκευής. Οι περιορισμοί εμπεριέχουν τις συναρτήσεις που διέπουν τη φυσική του προβλήματος και την οποία η κατασκευή καλείται να τηρεί. Βάσει των σχεδιαστικών περιορισμών το χωρίο χωρίζεται σε δυο μεγάλες περιοχές.

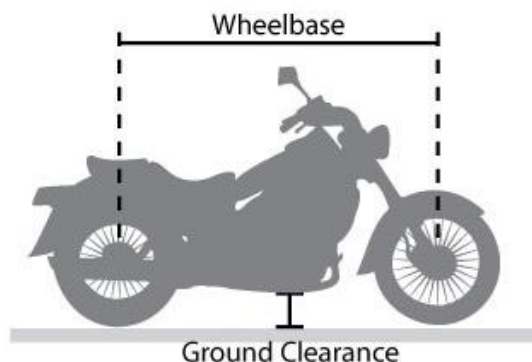
### 2.2.4.1 Περιοχή σχεδιασμού (design area)

Είναι η περιοχή στην οποία θα αναζητηθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος και δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να εξαντλήσει κάθε πιθανό σενάριο για την εύρεση αυτής. Οι κύριοι περιορισμοί που διέπουν την περιοχή αυτή είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίκυκλου οχήματος:

- η διάμετρος των τροχών (μπροστά και πίσω)
- οι συντεταγμένες των κέντρων περιστροφής των τροχών (μπροστά και πίσω)
- η γωνιά caster ( $\epsilon$ )
- το ίχνος (normal trail | normal rear trail)
- η απόσταση του πλαισίου από το έδαφος (ground clearance)
- το μεταξόνιο (wheelbase)



Εικόνα 14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίκυκλου οχήματος

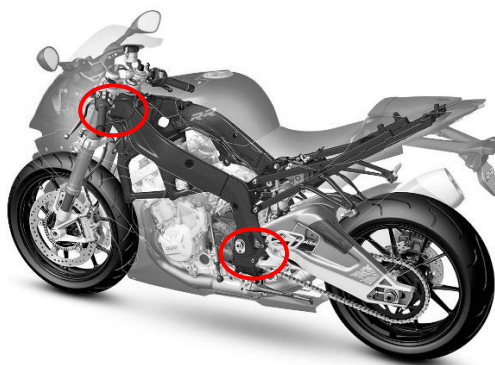


Εικόνα 15: Μεταξόνιο και απόσταση πλαισίου από το έδαφος

#### 2.2.4.2 Περιοχή μη σχεδιασμού (non-design area)

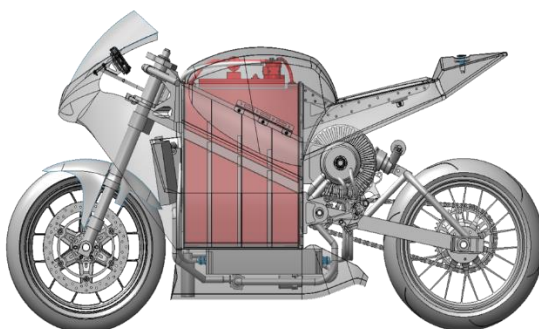
Είναι η περιοχή εκείνη του χωρίου στην οποία δεν υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης. Συνήθως η περιοχή ή περιοχές αυτές έρχονται σε επαφή με αλλά μηχανολογικά μέρη (περιοχή σύνδεσης) ή εσωκλείουν χρήσιμα μηχανολογικά εξαρτήματα. Οι κύριοι περιορισμοί που διέπουν την περιοχή αυτή στην παρούσα μελέτη είναι τα σημεία σύνδεσης του πλαισίου με την ανάρτηση και το τιμόνι αλλά και η περιοχή τοποθέτησης των στοιχείων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

- η διάταξη της ανάρτησης, σημεία άρθρωσης & περιστροφής (swing arm & steering column)



Εικόνα 16: Διάταξη ανάρτησης και σημεία άρθρωσης

- η θέση του κινητήρα & των στοιχείων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 17: Θέση του κινητήρα & των στοιχείων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας

### 2.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Κάθε μηχανολογικό εξάρτημα και κατασκευή έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να λειτουργεί με ασφάλεια κάτω από συγκεκριμένο αριθμό και τύπο φορτίσεων. Ο ακριβής καθορισμός των φορτίων που δέχεται το εξάρτημα σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την εύρυθμη και ομαλή λειτουργία του. Το πλαίσιο του δίκυκλου οχήματος καταπονείται από αρκετά φορτία το μέγεθος των οποίων αυξάνεται σημαντικά

ανάλογα με τις οδηγικές συνήθειες, τον τύπο του οδοστρώματος και την τεχνική του αναβάτη [4]. Τα φορτία αυτά είναι:

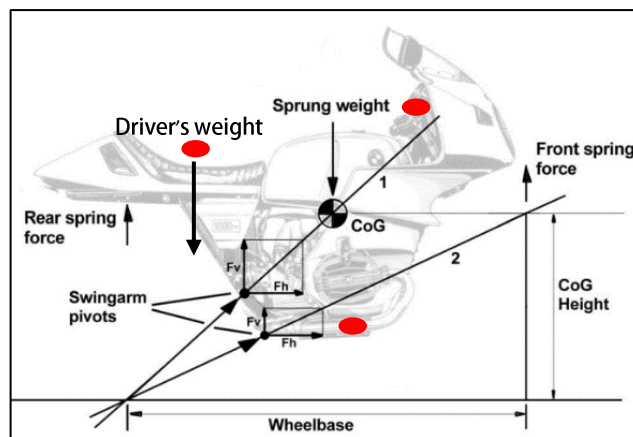
- Στατικά
- Δυναμικά
- Αεροδυναμικά
- Δρόμου (κατάσταση & κλίση οδοστρώματος)
- Χρήσης (πτώση & σύγκρουση)

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν φορτία που προέρχονται από τις τρεις πρώτες κατηγορίες καθώς και από συνδυασμό αυτών.

### 2.3.1 Στατικά φορτία

Ως στατικά φορτία ορίζονται τα φορτία που παραμένουν αναλλοίωτα σε σχέση με το χρόνο και τις συνθήκες λειτουργίας του εξαρτήματος. Τα στατικά φορτία που αναπτύσσονται στο πλαίσιο οφείλονται στην επίδραση της βαρύτητας και χαρακτηρίζονται ως αναρτώμενο βάρος [4]. Το αναρτώμενο βάρος χωρίζεται σε δυο κατηγορίες:

- Βάρος αναβάτη (Driver's weight) με επιμερισμό του φορτιού σε κορμό - χέρια - πόδια
- Βάρος οχήματος (Sprung weight) που στηρίζεται από το σύστημα ανάρτησης επαυξημένο κατά το  $\frac{1}{2}$  του βάρους του συστήματος ανάρτησης με σημείο επιβολής το κέντρο βάρους (CoG)



Εικόνα 18 Επιβολή στατικών φορτίων

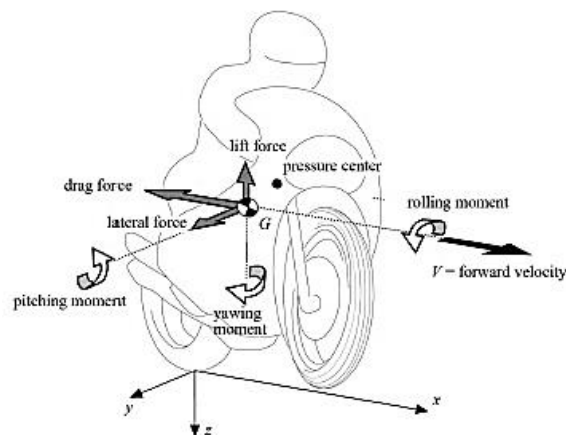
### 2.3.2 Δυναμικά & Αεροδυναμικά φορτία

Δυναμικά είναι τα φορτία των οποίων το μέτρο, η διεύθυνση ή/και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Τα δυναμικά φορτία μπορεί να οφείλονται σε:

- περιστροφική κίνηση του ελαστικού
- κίνηση οχήματος
- λειτουργία κινητήρα

Τα αεροδυναμικά φορτία αναπτύσσονται λόγω της κίνησης του οχήματος κάτω από την επίδραση του αέρα. Συγκεκριμένα η αεροδυναμική επίδραση επενεργεί στο κέντρο βάρους (CoG) του οχήματος και αναπαρίσταται με τρεις δυνάμεις και τρεις ροπές [4]:

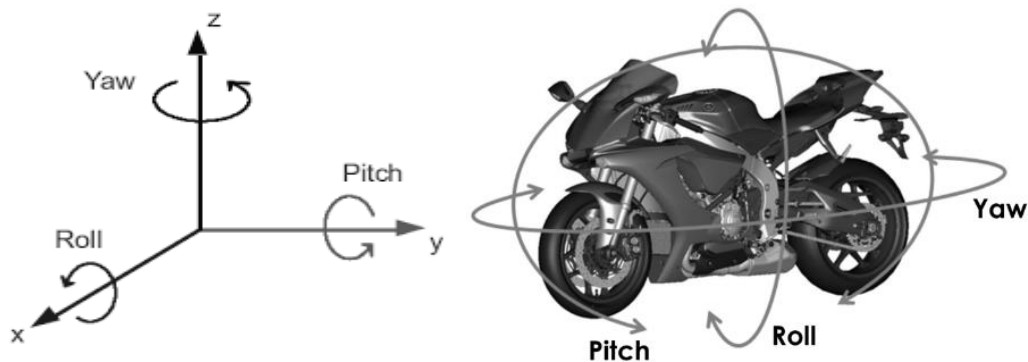
- δύναμη οπισθέλκουσας (αντίθετη με την κίνηση προς τα εμπρός)
- δύναμη ανύψωσης (τείνει να ανυψώνει το όχημα)
- πλευρική δύναμη (ωθεί το όχημα σε πλευρική κίνηση)
- ροπή στον πλευρικό άξονα
- ροπή εκτροπής
- ροπή στον διαμήκη άξονα



Εικόνα 19: Επίδραση αεροδυναμικών δυνάμεων & ροπών

Για να γίνει κατανοητή η κινηματική του οχήματος και η ανάπτυξη των δυνάμεων πάνω σε αυτό θα πρέπει να οριστούν οι τρεις βασικοί άξονες περιστροφής του . Αυτοί είναι:

- ο άξονας διατοιχισμού/διαμήκης [roll axis-x]
- ο άξονας πρόνευσης/πλευρικός [pitch axis-y]
- ο άξονας εκτροπής/κάθετος [yaw axis-z]



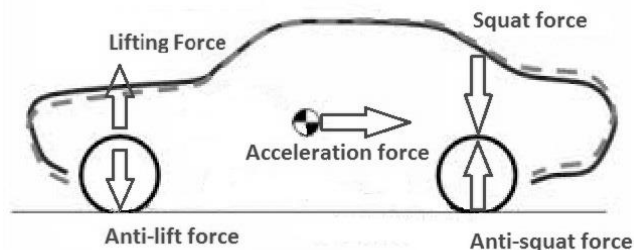
Εικόνα 20: Άξονες περιστροφής (Roll, Pitch, Yaw)



Κατά μήκος αυτών των αξόνων γίνεται η μεταφορά βάρους (load transfer) που οφείλεται στο συνδυασμό των δυναμικών και αεροδυναμικών φορτίων. Τα φορτία από τη μεταφορά βάρους προστίθενται στα στατικά και με αυτόν τον τρόπο γίνεται ο υπολογισμός των συνολικών δυνάμεων που διέπουν την κατασκευή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται με βάση το ανάλογο του αυτοκινήτου. Με τον ίδιο τρόπο αναπτύσσονται και οι δυνάμεις στο δίκυκλο όχημα που μελετάτε στην παρούσα εργασία.

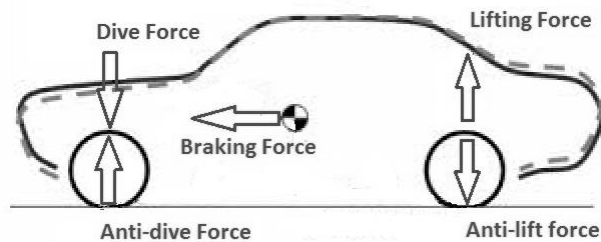
### 2.3.2.1 Διαμήκης μεταφορά βάρους

- Η επιτάχυνση (acceleration) του οχήματος ενεργοποιεί την μεταφορά βάρους (weight load transfer) από το μπροστινό μέρος του οχήματος προς το πίσω. Επακόλουθο αυτής είναι η δημιουργία δυνάμεων ανύψωσης (Lifting forces) στο μπροστινό μέρος και δυνάμεων καθίζησης (Squat forces) στο πίσω.



Εικόνα 21: Επιτάχυνση οχήματος – Ανάπτυξη δυνάμεων (Lift & Squat)

- Η διαδικασία του φρεναρίσματος (braking) του οχήματος ενεργοποιεί την μεταφορά βάρους (weight load transfer) από το πίσω μέρος του οχήματος προς το μπροστινό. Επακόλουθο αυτής είναι η δημιουργία δυνάμεων καθίζησης (Dive forces) στο μπροστά και δυνάμεων ανύψωσης (Lifting forces) στο πίσω μέρος



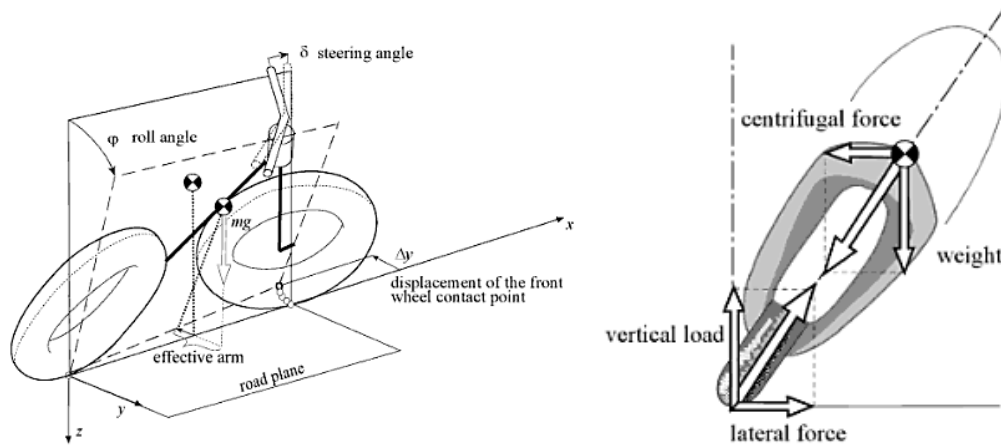
Εικόνα 22: Φρενάρισμα οχήματος – Ανάπτυξη δυνάμεων (Dive & Lift)

### 2.3.2.2 Πλευρική μεταφορά βάρους

- Η διαδικασία στροφής του οχήματος η οποία ξεκινάει από την μετατόπιση του τιμονιού κατά γωνιά  $\delta$  (deg) έχει ως αποτέλεσμα την πλευρική μετατόπιση του μπροστινού



σημείου επαφής με το έδαφος (front contact point) και ως εκ τούτου την ανάπτυξη πλευρικών δυνάμεων στο σημείο επαφής του ελαστικού με το έδαφος.



Εικόνα 23: Στροφή οχήματος -Ανάπτυξη πλευρικής δύναμης (Lateral)

## 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

### 3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Ο όρος "βελτιστοποίηση" ήταν πάντα ένας από τους πιο δημοφιλείς όρους, λόγω του γεγονότος ότι αντανακλά την επιθυμία να επιτευχθεί ένας συγκεκριμένος στόχος χρησιμοποιώντας τις λιγότερες πιθανές πηγές [5]. Προέρχεται από τον όρο 'βέλτιστος' που αποτελεί τον υπερθετικό βαθμό του επιθέτου 'αγαθός', δηλαδή 'άξιος'. Συναντάται καθημερινά σε μια πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών όπως για παράδειγμα τη βέλτιστη διαδρομή για τις ανάγκες της καθημερινότητας του ατόμου μέχρι τη δημιουργία του σύμπαντος και την εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη γη.

Στον τομέα της μηχανικής των κατασκευών ο προαναφερθείς όρος επικεντρώνεται στην περιοχή του βέλτιστου σχεδιασμού, δηλαδή στο σχεδιασμό ο οποίος ικανοποιεί τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια, όπως είναι συνήθως το κόστος και το βάρος της κατασκευής.

Η περιοχή της βελτιστοποίησης μηχανολογικών κατασκευών έχει τεράστια πρακτική αξία σε πολλούς διαφορετικούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορική και η διαστημική βιομηχανία, η ναυπηγική βιομηχανία και γενικά ο χώρος των κατασκευών.

#### 3.1.1 Κατηγορίες βελτιστοποίησης κατασκευών

Η βελτιστοποίηση κατασκευών χωρίζεται γενικά σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

i) Τη βελτιστοποίηση των μεγεθών των διατομών (**Sizing optimization**)

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης των μεγεθών των διατομών ενός φορέα συγκεκριμένης τοπολογίας και σχήματος είναι το πρώτο πρόβλημα βελτιστοποίησης με το οποίο ασχολήθηκαν εκτενώς οι ερευνητές. Στην αρχή ως παράμετροι σχεδιασμού χρησιμοποιούνταν οι διαστάσεις των διατομών δικτυωτών κατασκευών ή πλαισίων και αργότερα τα πάχη πλακών και κελυφών. Η συνθηθέστερη αντικειμενική συνάρτηση για τέτοια προβλήματα ήταν και παραμένει το βάρος της κατασκευής, το οποίο ζητείται να ελαχιστοποιηθεί υπό κάποιους περιορισμούς (π.χ. στις τάσεις κάποιων μελών, στις μετατοπίσεις κάποιων κόμβων, κ.α.).

ii) Τη βελτιστοποίηση του σχήματος (**Shape optimization**)

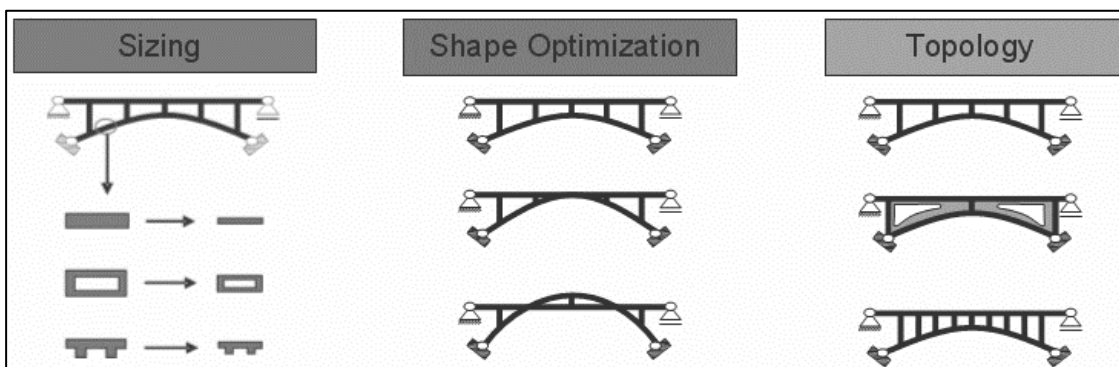
Η βελτιστοποίηση σχήματος (Shape optimization) είναι ένα σχετικά καινούργιο πεδίο έρευνας στον χώρο του βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών. Με τη βελτιστοποίηση σχήματος, μεταβάλλονται το εσωτερικό και το εξωτερικό περίγραμμα της κατασκευής ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή κατανομή των τάσεων στο εσωτερικό της. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του σχήματος των κατασκευών είναι ιδιαίτερα δύσκολο, καθώς η γεωμετρία και το μοντέλο ανάλυσης μεταβάλλονται συνεχώς, σε αντίθεση με το πρόβλημα της βελτιστοποίησης διατομών και ιδιοτήτων υλικών, όπου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους κάποιου φορέα συγκεκριμένου σχήματος και τοπολογίας. Συνήθως η βελτιστοποίηση του σχήματος μίας κατασκευής είναι το δεύτερο στάδιο του βέλτιστου σχεδιασμού της, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι έχει προηγηθεί ένα πρώτο στάδιο όπου έχει

ευρεθεί η τοπολογία της κατασκευής, είτε αυτόματα μέσω κάποιου αλγόριθμου βελτιστοποίησης, είτε εμπειρικά από τον σχεδιαστή.

iii) Τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας (**Topology optimization**)

Είναι η πλέον συνήθης μορφή βελτιστοποίησης κατασκευών. Σε αυτή οι μεταβλητές πυκνότητας μπορούν να πάρουν την τιμή 0 ή 1 και έτσι να αφαιρεθεί ή να διατηρηθεί υλικό από τον καθορισμένο χώρο προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του προβλήματος.

Σήμερα υπάρχει η τάση ένα γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης να εντοπίζεται αρχικά ως πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης τοπολογίας και στη συνέχεια ως πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου σχήματος ή εύρεσης των βέλτιστων διατομών.



Εικόνα 24: Κατηγορίες βελτιστοποίησης κατασκευών

### 3.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Στον σχεδιασμό των κατασκευών είναι απαραίτητο να καθορισθεί μία όσο το δυνατό καλύτερη τοπολογία (topology). Η τοπολογία μίας κατασκευής συνήθως είναι προκαθορισμένη από τις απαιτήσεις του προβλήματος και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς ή προέρχεται από κάποιο αρχικό σχεδιασμό του μηχανικού. Η βελτιστοποίηση αυτής της τοπολογίας είναι μια μαθηματική διαδικασία που αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης κατανομής του υλικού μιας κατασκευής, με ταυτόχρονη ικανοποίηση των συνθήκων στήριξης και των φορτίων της. Υλοποιείται με τον συνδυασμό πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση και μαθηματικών προγραμματιστικών τεχνικών για την επίλυση. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται είτε στον υπολογισμό παραγώγων (gradient-based), όπως είναι η Optimality Criteria (OC) και η Method of Moving Asymptotes (MMA) είτε και όχι (non gradient based), όπως για παράδειγμα είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA). Εκτενέστερη αναφορά στην βελτιστοποίηση τοπολογίας και στα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται γίνεται στη συνέχεια της εργασίας.

### 3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Τα προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών χαρακτηρίζονται από μία ευρεία γκάμα τύπων αντικειμενικής συνάρτησης και συναρτήσεων περιορισμών, οι οποίες συνήθως είναι έμμεσες ή πεπλεγμένες μη γραμμικές συναρτήσεις, μεγάλου βαθμού μη γραμμικότητας ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού [6]. Αυτές οι συναρτήσεις είναι συνήθως ασυνεχείς και μη κυρτές (non-convex) με αποτέλεσμα τα προβλήματα αυτά να εμφανίζουν συχνότατα

πολλά τοπικά ελάχιστα. Λόγω των εγγενών δυσχερειών των προβλημάτων αυτών, ακόμα και η εύρεση ενός τοπικού ελαχίστου δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση για τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Η σωστή μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό και κρίσιμο βήμα για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού. [6] Η γενική μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \{x\} &= [x_1, \dots, x_n]^T : \text{μεταβλητές σχεδιασμού} \\ \min / \max f(x) &: \text{αντικειμενική συνάρτηση} \\ \text{subject to} & \\ h_i(x) &= 0, i = 1, \dots, m : \text{ισοτικοί περιορισμοί} \\ g_j(x) &\leq 0, j = m + 1, \dots, l : \text{ανισοτικοί περιορισμοί} \\ x &\in R^n \end{aligned} \quad (1)$$

### 3.3.1 Μεταβλητές σχεδιασμού

Οι παράμετροι εκείνες οι οποίες όταν λάβουν συγκεκριμένη τιμή καθορίζουν πλήρως έναν σχεδιασμό, ονομάζονται μεταβλητές σχεδιασμού. Οι μεταβλητές σχεδιασμού ενδέχεται να είναι είτε συνεχείς, είτε διακριτές οπότε επιτρέπεται να λάβουν συγκεκριμένες και μόνον τιμές. Η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού με τις οποίες περιγράφονται διαστάσεις διατομών, σταθερές υλικών, παράμετροι σχήματος και τοπολογίας, είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων βελτιστοποίησης. Ο μηχανικός με την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού καθορίζει εκ των προτέρων σε ποια τμήματα της κατασκευής θα γίνουν βελτιωτικές παρεμβάσεις και με ποιόν τρόπο θα πραγματοποιηθούν οι μετατροπές στα τμήματα αυτά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η ανεξαρτησία των μεταβλητών σχεδιασμού είναι σημαντικός παράγοντας και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή τους. Είναι πιθανό αν δεν ληφθεί η απαραίτητη μέριμνα, να επιλεγούν μεταβλητές σχεδιασμού εξαρτημένες η μία από την άλλη, με αποτέλεσμα το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος να γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκο.

### 3.3.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Ένας σχεδιασμός μπορεί να είναι εφικτός ή μη εφικτός. Σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν πολλοί εφικτοί σχεδιασμοί, εκ των οποίων κάποιοι υπερτερούν έναντι άλλων και ένας μόνο από αυτούς αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Για να γίνει αυτού του είδους η διάκριση μεταξύ καλού και ακόμη καλύτερου σχεδιασμού, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός κριτηρίου για τη σύγκριση και την αξιολόγηση των σχεδιασμών. Το κριτήριο αυτό είναι μια συνάρτηση η οποία λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε σχεδιασμό. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση και είναι εξαρτημένη από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Στα προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών, χαρακτηριστικά παραδείγματα αντικειμενικών συναρτήσεων είναι η ελαχιστοποίηση του

βάρους, των τάσεων ,των μετατοπίσεων και της ενέργειας παραμόρφωσης, η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας κ.α.

### 3.3.3 Συναρτήσεις περιορισμών

Σχεδιασμός μιας κατασκευής ονομάζεται ένα πλήρως ορισμένο σύστημα, δηλαδή ένα σύστημα του οποίου οι μεταβλητές σχεδιασμού έχουν λάβει συγκεκριμένες τιμές. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, ως σχεδιασμός μπορεί να θεωρηθεί και ένα αυθαίρετα ορισμένο ή ακόμη και ένα φανταστικό σύστημα, όπως λόγου χάρη μια κατασκευή της οποίας κάποια μέλη έχουν αρνητικό εμβαδόν ή κάποιες κυκλικές διατομές έχουν αρνητική ακτίνα.

Κάθε απαίτηση του σχεδιαστή εισάγεται στο μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης με τη μορφή ανισοτήτων και ισοτήτων οι οποίες ονομάζονται περιορισμοί. Κάθε τέτοια παράσταση πρέπει να είναι εξαρτώμενη τουλάχιστον από μία μεταβλητή σχεδιασμού του προβλήματος, καθώς μόνον τότε έχει νόημα η ύπαρξή της στο μαθηματικό μοντέλο. Στην περίπτωση που ένας σχεδιασμός, δηλαδή μια συγκεκριμένη τιμή των μεταβλητών σχεδιασμού δεν πληρεί κάποιον ή κάποιους από τους περιορισμούς του προβλήματος τότε ονομάζεται ανέφικτος (infeasible), ενώ σε αντίθετη περίπτωση όταν δηλαδή πληρούνται όλοι ανεξαιρέτως οι περιορισμοί - ονομάζεται εφικτός (feasible) [7]. Ένας εφικτός σχεδιασμός δεν είναι φυσικά πάντοτε βέλτιστος, είναι όμως σίγουρα υλοποιήσιμος.

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται σε προβλήματα κατασκευών χρησιμεύουν γενικά για την επιβολή των απαιτήσεων ασφαλείας, λειτουργικότητας αλλά και κατασκευαστικών πολλές φορές απαιτήσεων και περιορίζουν τελικά σημαντικά τον χώρο των αποδεκτών λύσεων. Οι συναρτήσεις περιορισμών αφορούν δε συνήθως τάσεις και μετατοπίσεις, οι οποίες τις περισσότερες φορές δεν πρέπει να υπερβαίνουν κάποια άνω όρια. Συνηθέστερα, πραγματοποιείται για κάθε συγκεκριμένο σχεδιασμό και υπό τα φορτία σχεδιασμού μία αρχική επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, από τα αποτελέσματα της οποίας ελέγχονται οι περιορισμοί του προβλήματος.

## 3.4 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες [6]:

i) Τις μαθηματικές ή αιτιοκρατικές μεθόδους

Οι μαθηματικές μέθοδοι προέρχονται από τις επιστημονικές περιοχές των οικονομικών μαθηματικών και της επιχειρησιακής έρευνας και ήταν οι πρώτες που εφαρμόστηκαν σε προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού κατασκευών. Οι σημαντικότερες από τις μεθόδους αυτές είναι:

- Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming – LP)
- Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming – NLP)
- Ακέραιος Προγραμματισμός (Integer Programming – IP)
- Γεωμετρικός Προγραμματισμός (Geometric Programming – GP)
- Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming – DP)

ii) Τις εξελικτικές ή δαρβίνειες μεθόδους

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν μηχανισμούς εμπνευσμένους από εξελικτικές διαδικασίες της φύσης όπως τις παρουσίασε πρώτος ο Κάρολος Δαρβίνος. Ο αρχικός πληθυσμός επιλέγεται με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλων γενετικών μηχανισμών όπως είναι η Επιλογή (Selection), ο Ανασυνδυασμός (Recombination) και η Μετάλλαξη (Mutation), ο πληθυσμός εξελίσσεται κινούμενος σε όλο και καλύτερες περιοχές του χώρου αναζήτησης και μέσω της αρχής της επικράτησης του ισχυρότερου (Survival of the fittest) επιτυγχάνεται ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης. Οι σημαντικότερες από τις μεθόδους αυτές είναι:

- Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GA).
- Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies – ES).
- Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming –EP)
- Γενετικός Προγραμματισμός (Genetic Programming – GP)
- Προγραμματισμός της Γονιδιακής Έκφρασης (Gene Expression Programming)
- Διαφορική Εξέλιξη (Differential Evolution)
- Νευροεξέλιξη (Neuroevolution)

Μία επίσης τυχηματική αλλά διαφορετικής δομής τεχνική είναι η μέθοδος της Προσομοίωσης Ανόπτησης (Simulated Annealing). Η μέθοδος αυτή ακολουθεί τους τυχηματικούς νόμους που διέπουν την κίνηση των μορίων στο εσωτερικό ενός μεταλλικού σώματος κατά τη σταδιακή ψύξη αυτού. Τα μόρια κινούνται ώστε να εντοπιστεί η κατάσταση με την ελάχιστη δυνατή δυναμική ενέργεια για την τρέχουσα θερμοκρασία, ώστε τελικά στην χαμηλότερη θερμοκρασία να επιτευχθεί η ελάχιστη όλων των δυνατών ενεργειακά καταστάσεων.

#### 3.4.1 Ιστορική αναδρομή της μεθόδου SIMP

Η σημερινή πιο δημοφιλής μέθοδος αριθμητικής βελτιστοποίησης τοπολογίας βασισμένη στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FE) είναι η μέθοδος SIMP [3], η οποία αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '80. Μερικές φορές εμφανίζεται επίσης με τους εξής ορισμούς “material interpolation”, “artificial material”, “power law”, or “density” method, αλλά ο όρος “SIMP” χρησιμοποιείται πλέον καθολικά. Ο όρος “SIMP” σε ελεύθερη μετάφραση αποδίδεται ως η Στερεή Ισοτροπική Υλική μέθοδος με Ποινή για ενδιάμεσες πυκνότητες. Η βασική ιδέα αυτής της προσέγγισης προτάθηκε από τον Bendsoe (1989) [3], ενώ ο όρος “SIMP” σχεδιάστηκε αργότερα από τον συγγραφέα και εισήχθη για πρώτη φορά σε μια εργασία του Rozvany et al. (1992) [8].

Μέχρι το 1989 γινόταν χρήση μόνο ακέραιων τιμών ως σχεδιαστικές μεταβλητές για προβλήματα δομικής βελτιστοποίησης. Στην εργασία του εκείνου του έτους, ο Bendsoe πρότεινε μια μέθοδο για τη συνεχή μεταβολή των μεταβλητών σχεδιασμού, η οποία είχε ως αποτέλεσμα μια μη διακριτή λύση. Για να ληφθεί μια μη διακριτή λύση που προσεγγίζει μια διακριτή λύση, το υποκείμενο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της ανάλυσης της δομής άλλαξε για να δώσει μικρότερη επίδραση στις ενδιάμεσες τιμές των μεταβλητών. Αυτός ο τύπος σχήματος ονομάστηκε αργότερα στερεό ισότροπο υλικό με ποινή (SIMP).

Ο Buhl et al. 2000 [8] χρησιμοποίησε την προσέγγιση SIMP μαζί με τη μέθοδο μετακίνησης ασύμπτωτων (MMA) για να ελαχιστοποιήσει τις διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις των γεωμετρικά μη γραμμικών δομών που υπόκεινται σε περιορισμούς όγκου.

Το 2001, ο Rietz [8] έδειξε πως η λειτουργία ποινής στη μέθοδο SIMP ήταν επαρκής για να δώσει διακριτές λύσεις κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Το 2001, ο Stolpe και ο Svanberg [8] συζήτησαν σχετικά με τη χρήση μιας συνεχούς μεθόδου με στόχο να αυξήσουν προσδευτικά την παράμετρο ποινής στη μέθοδο SIMP. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με την εφαρμογή αυτή αποφεύγονται πολλά τοπικά ελάχιστα που μπορούν να επιτευχθούν όταν χρησιμοποιείται μια σταθερή τιμή της παραμέτρου ποινής αλλά η όλη διαδικασία λειτουργεί εις βάρος του αυξημένου υπολογιστικού κόστους. Βρήκαν επίσης συγκεκριμένα παραδείγματα όπου η λύση περιέχει ενδιάμεσες πυκνότητες ανεξάρτητα από το μέγεθος της παραμέτρου ποινής.

Το 2001, ο Sigmund [8] δημοσίευσε έναν ελεύθερα διαθέσιμο κώδικα βελτιστοποίησης τοπολογίας γραμμένο σε κώδικα MatLab .Ο κώδικας βασίστηκε στη διατύπωση SIMP και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση βασισμένη στην εμφωλευμένη ανάλυση και σχεδίαση, Nested Analysis and Design (NAND) για την ενημέρωση της δομής χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική μέθοδο για τη σύγκλιση με τα δεδομένα κριτήρια βέλτιστου, optimality criteria (OC) για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (compliance) που υπόκειται σε πρόβλημα με περιορισμό όγκου.

Ο Rozvany το 2001 [8] παρουσίασε ένα ιστορικό άρθρο σχετικά με τη μέθοδο SIMP και τα πλεονεκτήματά της έναντι άλλων προσεγγίσεων για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας.

Ένα παράδειγμα βιομηχανικής εφαρμογής της μεθόδου SIMP δίδεται από τους Sardan et al. 2008 [9] όπου παρουσίασαν τη βελτιστοποίηση των συγκρατητικών μηχανισμών Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) για εφαρμογή στην κατασκευή νανοσωλήνων άνθρακα.

Ο Niu et al. το 2011 [9] εξέτασε την εφαρμογή τόσο της εξωτερικής όσο και της μη-μηδενικής μετατόπισης στη δομή. Εδώ η δυσκαμψία της δομής μετράτε από μια λειτουργία που διαφέρει από την κλασσική αντικειμενική συνάρτηση (compliance), έτσι για να αντιμετωπιστεί η κατάσταση αυτή απαιτούνται επιπλέον τεχνικές. Αυτό είναι ένα πρωταρχικό παράδειγμα της δύναμης και της ευελιξίας της μεθόδου SIMP. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της τοπολογίας μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας ένα γενικό λογισμικό μαθηματικού προγραμματισμού που έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει τέτοιους περιορισμούς. [9]

### 3.4.2 Δομή της μεθόδου SIMP

Η μέθοδος SIMP θεωρεί την παρακάτω σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και των πυκνοτήτων  $x$  ενός πεπερασμένου στοιχείου.

$$E_e(x_e) = x_e^p E_e \quad (2)$$

Επομένως η σχέση μεταξύ του κλασσικού μητρώου δυσκαμψίας (δηλαδή του μητρώου δυσκαμψίας για πυκνότητα ίση με 1) και του τρέχοντος είναι η ακόλουθη

$$K_e = x_e^p K_e^0 \quad (3)$$

Όπου  $K_e^0$  είναι το κλασικό μητρώο δυσκαμψίας και  $p$  είναι μια δύναμη της οποίας η τιμή εξαρτάται από το πρόβλημα. Η δύναμη αυτή χρησιμοποιείται επειδή στο πρόβλημα βελτιστοποίησης θέλουμε να αποφύγουμε τα  $x$  να παίρνουν τιμές ανάμεσα στα μηδέν και ένα. Θέλουμε είτε να έχουμε πλήρες υλικό (1), είτε καθόλου (0). Επομένως με χρήση της δύναμης  $p$  αν το  $x$  πάρει τιμή ανάμεσα στο μηδέν και ένα τότε ο αριθμός που προκύπτει είναι πολύ μικρός επομένως κάνει το υλικό σε εκείνο το στοιχείο πολύ εύκαμπτο οπότε δεν συμφέρει να τοποθετηθεί τμήμα από τον επιτρεπόμενό του όγκο σε τέτοιες τιμές  $x$  που δεν συμβάλουν ιδιαίτερα στην συνολική δυσκαμψία. [10]

### 3.4.3 Διατύπωση της μεθόδου SIMP

Η κυρία διατύπωση της βελτιστοποίησης τοπολογίας για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης βασιζόμενη στην μέθοδο (SIMP)

$$\text{Objective: } \min C = U^T K U = \sum_{i=1}^N u^i k^i u^i = \sum_{i=1}^N (x^i)^p u_i k_0 u^i$$

$$\text{Subject to: } V = \sum_{i=1}^N x^i v^i \leq V_0 - V^* \text{ or}$$

$$VOF = \frac{\sum_{i=1}^N x^i v^i}{V_0 -} \leq \frac{V_0 - V^*}{V_0}$$

$$K U = F \quad (4)$$

$$k^i = (x^i)^p$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} < 1$$

Όταν η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρωθεί (επίτευξη σύγκλισης), τα υπολειπόμενα στοιχεία παρέχουν τη βέλτιστη κατανομή υλικού. Το 'optimality criterion' χρησιμοποιείται ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης και η ανοχή της σύγκλισης ορίζεται στο 0,005. [11]

### 3.4.4 Συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση της μεθόδου SIMP

Η SIMP είναι μια λογικά αυστηρή gradient based μέθοδος για βελτιστοποίηση τοπολογίας, η οποία συνήθως δίνει μια λύση κοντά στο σωστό ολικό βέλτιστο, εάν το πρόβλημα είναι αρχικά κυρτό (π.χ. σε προβλήματα ενέργειας παραμόρφωσης) και ο συντελεστής ποινής  $p$  αυξηθεί σταδιακά ξεκινώντας από τη μονάδα [3]. Ωστόσο, η SIMP χρησιμοποιείται στην πράξη για εξαιρετικά περίπλοκα μη κυρτά προβλήματα και ως εκ τούτου, δεν είναι γενικά εφικτό να εξασφαλιστεί ένα γενικό βέλτιστο, κάτι που ισχύει για όλες gradient based μεθόδους.

Η SIMP απαιτεί σχετικά λίγες επαναλήψεις και είναι κατάλληλη για συνδυασμό ενός ευρέος φάσματος περιορισμών σχεδιασμού, πολλαπλών συνθηκών φόρτισης, multi-physics προβλημάτων και εξαιρετικά μεγάλων (συχνά τρισδιάστατων) συστημάτων. Τέλος, χρησιμοποιείται εκτενώς σε εμπορικά λογισμικά (commercial software) για βιομηχανικό σχεδιασμό.



Να σημειωθεί ότι οι διαφορετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και σε μια διαδικασία σχεδιασμού συνιστάται οι σχεδιαστές να βασίζονται σε περισσότερες από μία τεχνικές. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση τοπολογίας και τοπομετρίας είναι κατάλληλες για ένα στάδιο πρώιμης ανάπτυξης, το αποτέλεσμα του οποίου θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω της βελτιστοποίησης μεγέθους και σχήματος. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι τεχνικές δεν παράγουν το σχήμα του τελικού προϊόντος, αλλά δίνουν χρήσιμες συμβουλές στον σχεδιαστή ενόψει της εξέλιξης του προϊόντος και της μηχανικής. [1]

### 3.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τοπολογίας καθορίζεται πλήρως ορίζοντας τις μεταβλητές σχεδιασμού, την αντικειμενική συνάρτηση και τις συναρτήσεις των περιορισμών. Εφόσον η τελική βέλτιστη λύση που θα προκύψει από τη μελέτη προχωρήσει στο στάδιο παραγωγής είναι απαραίτητο να εισαχθούν στο πρόβλημα και κατασκευαστικοί περιορισμοί που θα δράσουν καταλυτικά στην κατασκευή αυτής. Συνοπτικά η δομή των προβλημάτων που μελετήθηκαν μέσα από τις αντίστοιχες εργασίες βελτιστοποίησης τοπολογίας για την ανάπτυξη πλαισίων δίκυκλων οχημάτων είναι η κάτωθι:

#### Αντικειμενική συνάρτηση:

- Minimizing compliance
- Minimizing strain energy
- Maximizing global stiffness

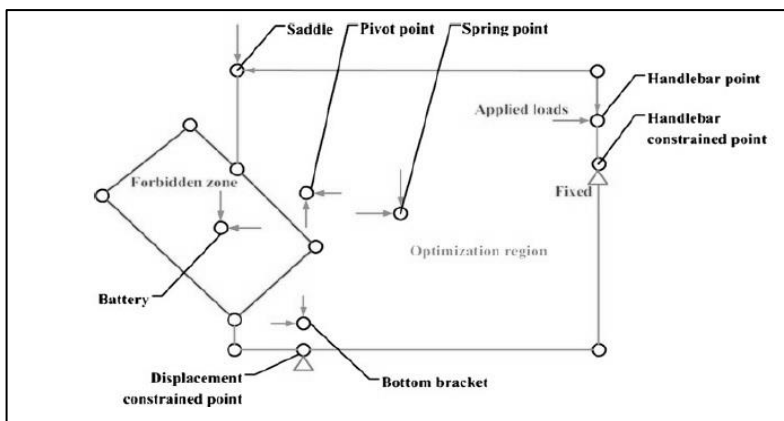
#### Περιορισμοί:

- Structural stiffness
  - Global bending stiffness of the structure
  - Global torsional stiffness of the structure
  - Global longitudinal stiffness of the structure
  - Local stiffness of the suspensions, engine, and gearbox joints
  - Modal response of the structure
  - Crash linearization [4]
- Volume fraction
- Mass fraction

#### Κατασκευαστικοί περιορισμοί:

- Minimum member size control
- Extrusion constraint [11]
- Symmetry constraint [2]

Στο στάδιο αυτό ο μηχανικός-μελετητής αποτυπώνει σε ένα διάγραμμα το χωρίο σχεδιασμού και τις συνθήκες φόρτισης από το πρόβλημα που πρόκειται να επιλυθεί ώστε να υπάρξει λεπτομερής εποπτεία αυτού. [11] [12]



Εικόνα 25 : Διάγραμμα βελτιστοποίησης τοπολογίας ηλεκτρικού ποδηλάτου

### 3.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

#### 3.6.1 Βελτιστοποίηση τοπολογίας με χρήση του OptiStruct

Για την μελέτη και ανάπτυξη του πλαισίου με εφαρμογή της βελτιστοποίησης τοπολογίας στην παρούσα εργασία έγινε χρήση των λογισμικών HyperMesh & OptiStruct της εταιρίας Altair. Το τρισδιάστατο χωρίο αρχικά διακριτοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού HyperMesh, στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των φορτίων και των συνοριακών συνθήκων και τέλος το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε με χρήση του λογισμικού OptiStruct.

Το λογισμικό OptiStruct χρησιμοποιεί για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας τη μέθοδο SIMP (solid isotropic material or microstructure with penalization) και δίνει τη δυνατότητα επιλογής αλγορίθμου μεταξύ των MFD (Method of Feasible Directions), SQP (Sequential quadratic programming) και DUAL.

#### 3.6.2 Διατυπώσεις που χρησιμοποιούνται στο λογισμικό OptiStruct

Τέλος παρατίθενται μερικές ακόμη διατυπώσεις για τη λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας όπως αυτές αναγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού OptiStruct [13].

- Minimize (total / regional) volume/ mass fraction with constrained displacements
- Minimize (weighted / total / regional) compliance with constrained (total / regional) volume / mass fraction
- Maximize (weighted) frequency with constrained (total / regional) volume / mass fraction
- Minimize (total / regional) volume / mass fraction with constrained frequencies
- Minimize combined compliance and frequencies with constrained (total / regional) volume / mass fraction
- Minimize (total / regional) volume/ mass fraction with stress constraints (VM stress overall)

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΚΥΚΛΟΥ

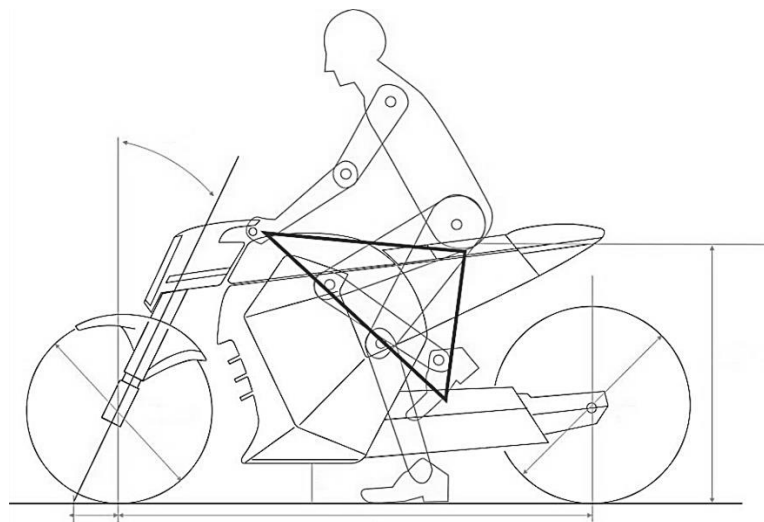
### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο καθορίζεται το προς λύση πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας. Αρχικά, το δίκυκλο όχημα μοντελοποιείται με χρήση τρισδιάστατων σχεδιαστικών λογισμικών με σκοπό να οριστεί το χωρίο σχεδιασμού. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των συνθηκών φόρτισης της κατασκευής και εισαγωγή των αντίστοιχων δυνάμεων και ροπών στο λογισμικό προσομοίωσης (HyperMesh). Τέλος, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας με χρήση απλών παραδοχών και τεχνικών βελτιστοποίησης με χρήση του λογισμικού (OptiStruct). Συγκεκριμένα τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Γραφικός σχεδιασμός (Graphic design)
- Μηχανολογικός σχεδιασμός (Engineering design)
- Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite element analysis)
- Βελτιστοποίηση τοπολογίας (Topology optimization)

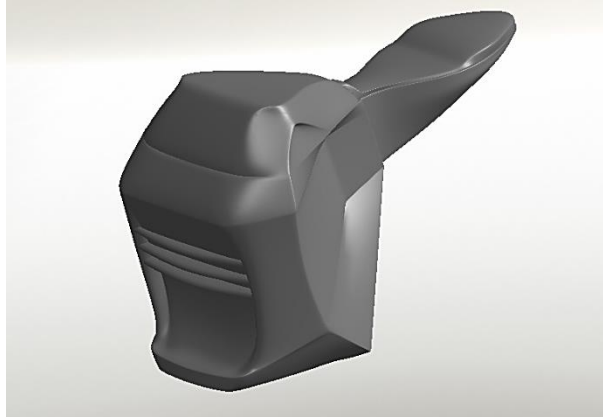
### 4.2 ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Σε αυτό το στάδιο καθορίζεται το χωρίο σχεδιασμού το οποίο χρησιμοποιείται ως έναρξη για την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας και απορρέει από το βασικό σχεδιασμό του δίκυκλου οχήματος. Κατά το σχεδιασμό ο μηχανικός (engineer) έρχεται σε συνεργασία με τον σχεδιαστή (designer) ώστε το αποτέλεσμα που θα προκύψει να τηρεί όλους τους μηχανολογικούς και εργονομικούς περιορισμούς και ταυτόχρονα να είναι καλαίσθητο.



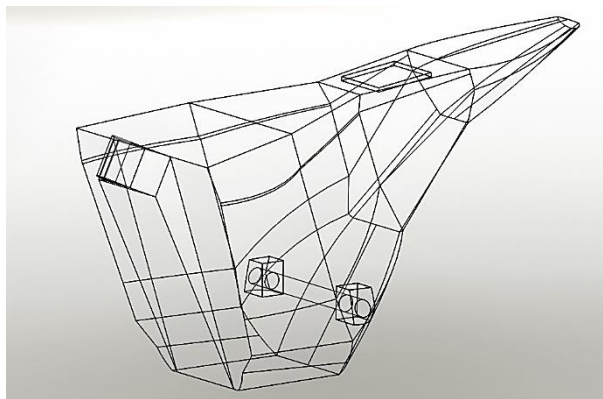
Εικόνα 26 : Πρωτότυπο σχέδιο ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος G.I.V.E

Εφόσον καθοριστεί το αρχικό τρισδιάστατο σχέδιο (graphic design) στο αντίστοιχο λογισμικό, αυτό εισάγεται σε CAD λογισμικό (engineering design) ώστε να αναλυθεί και να βελτιωθεί με βάση τα μηχανολογικά του χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 27: Αρχικό τρισδιάστατο σχέδιο του χωριού σχεδιασμού (graphic design)

Ο μηχανικός αφαιρεί από το αρχικό σχέδιο όλα τα μηχανολογικά εξαρτήματα που δεν χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και εξομαλύνει την τελική γεωμετρία από σύνθετες επιφάνειες, καμπύλες και γωνίες που δυσχεραίνουν την διακριτοποίηση του χωριού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιπροσθέτως, σχεδιάζει τα σημεία επιβολής των συνοριακών συνθήκων και φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν στο στάδιο της ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis).



Εικόνα 28: Τελικό τρισδιάστατο σχέδιο του χωριού σχεδιασμού (engineering design)

### 4.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

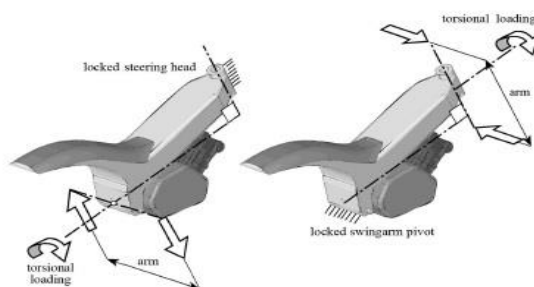
Η ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί το υπόβαθρο της βελτιστοποίησης τοπολογίας και περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Διακριτοποίηση της γεωμετρίας (mesh generation)
- Εισαγωγή συνοριακών συνθηκών και φορτίων (boundary conditions & loads)
- Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού (material property)
- Καθορισμός των παραμέτρων και του βήματος επίλυσης (load step)

#### 4.3.1 Δομική δυσκαμψία του πλαισίου

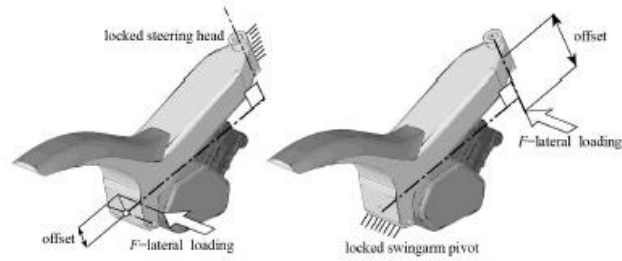
Έπειτα από την ολοκλήρωση της δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος ακολουθεί η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών και φορτίσεων που διέπουν την κατασκευή. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι τέσσερις κύριες συνθήκες φόρτισης της κατασκευής που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. [4]. Οι συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης αναφέρονται εκτενώς στην βιβλιογραφία αλλά και σε πληθώρα πειραματικών εργασιών σχετικά με την κατασκευή πλαισίων δίκυκλων οχημάτων. Συνεπώς, η επιλογή και χρήση τους κρίνεται απαραίτητη κατά το σχεδιασμό κάθε νέου πλαισίου τέτοιου τύπου.

- Η **στρεπτική φόρτιση (torsional load)** του πλαισίου μετράτε ως επί το πλείστον με τον κινητήρα τοποθετημένο (σε αυτή τη περίπτωση δεν θεωρείται ο κινητήρας εφόσον αυτός τοποθετείται στο εσωτερικό του πίσω τροχού του οχήματος). Υπολογίζεται εφαρμόζοντας ένα ζεύγος δυνάμεων (ροπή) γύρω από τον άξονα διεύθυνσης (steering head) του οχήματος περιορίζοντας ταυτόχρονα όλους τους βαθμούς ελευθέριας του άξονα περιστροφής (swing arm).



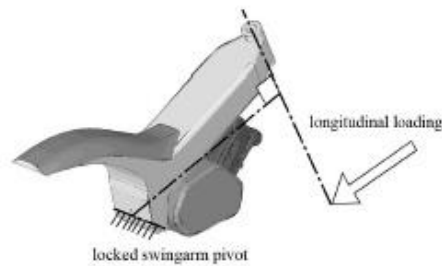
Εικόνα 29: Στρεπτική φόρτιση πλαισίου

- Η **πλευρική φόρτιση (lateral load)** μπορεί να αναπαρασταθεί από την αναλογία μεταξύ της δύναμης που εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα περιστροφής και της μετρούμενης πλευρικής παραμόρφωσης προς αυτή την κατεύθυνση. Η δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί με μια μετατόπιση (offset) για να αποφευχθεί τυχόν στρεπτική παραμόρφωση.



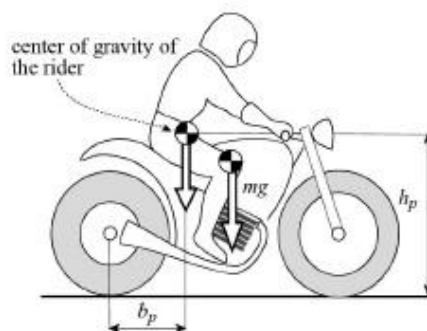
Εικόνα 30: Πλευρική φόρτιση πλαισίου

- Η **διαμήκης φόρτιση (longitudinal load)** υπολογίζεται εφαρμόζοντας δύναμη στην κάθετη κατεύθυνση του άξονα διεύθυνσης συγκρατώντας σταθερό τον άξονα περιστροφής.



Εικόνα 31: Διαμήκης φόρτιση πλαισίου

- Η **φόρτιση υπό το βάρος του αναβάτη (driver's weight)** υπολογίζεται ως το 100% του συνολικού βάρους του αναβάτη και εφαρμόζεται με μια κάθετη δύναμη στο κάθισμα του οχήματος.



Εικόνα 32: Φόρτιση υπό το βάρος του οδηγού

Οι τιμές δυσκαμψίας των πλαισίων των σύγχρονων δίκυκλων οχημάτων (σπορ μηχανές 1000 cc.) κυμαίνονται στις περιοχές [4]:

- στρεπτική δυσκαμψία πλαισίου (torsional frame stiffness):  $Kt_f = 3 - 7 \text{ kNm/}^\circ$
- πλευρική δυσκαμψία πλαισίου (lateral frame stiffness):  $K_f = 1- 3 \text{ kN/mm}$
- διαμήκης δυσκαμψία πλαισίου (longitudinal frame stiffness):  $Kz_f = 5 - 10 \text{ kN/mm}$

#### 4.3.2 Επιλογή φορτίων για τον υπολογισμό των στατικών παραμορφώσεων

Καθώς η δυσκαμψία εξαρτάται μόνο από εγγενείς ιδιότητες του πλαισίου, για απλούστευση των υπολογισμών των στατικών παραμορφώσεων κάτω από τις προαναφερθείσες συνθήκες φόρτισης, γίνεται χρήση μοναδιαίων δυνάμεων και ροπών, δηλαδή 1000 N για τις δυνάμεις και 1000 Nm ( $10^6 \text{ Nmm}$ ) για τις ροπές [14]. Η επιλογή των τιμών αυτών επαληθεύεται και στην περίπτωση των δίκυκλων (super motard) όπου η τιμή της μέγιστης ροπής στρέψης για δοκιμές στο εργαστήριο επιλέχθηκε στα 500 Nm για το πλαίσιο και 1000 Nm για το πλαίσιο με αναρτώμενο κινητήρα [15]. Το μέσο βάρος του αναβάτη υπολογίζεται στα 80Kg.

Οι τιμές των μέγιστων παραμορφώσεων αναγράφονται ομαδοποιημένες στον παρακάτω πίνακα με την υπόθεση των τιμών δυσκαμψίας που αναφέρονται στην βιβλιογραφία και των μοναδιαίων δυνάμεων και ροπών που επιλέχθηκαν για απλούστευση των υπολογισμών.

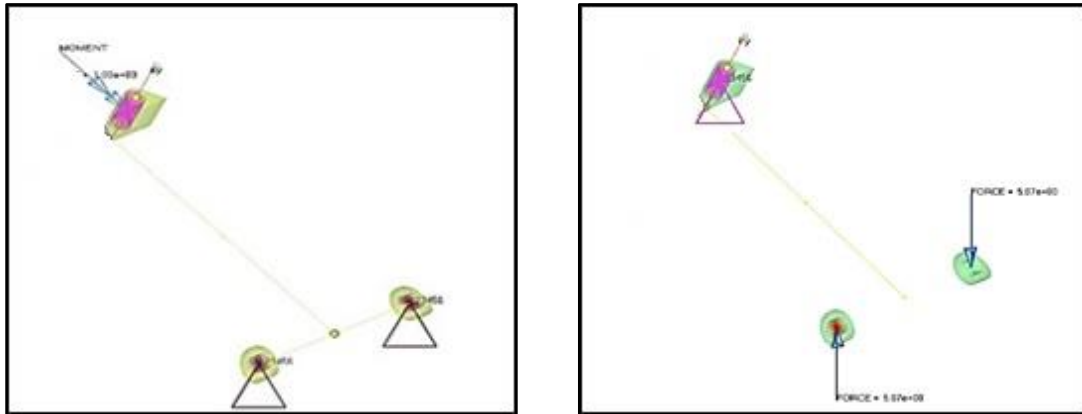
Load Case	Force [N]	Torque [Nmm]	Max Displacement [mm]	Max Angle [deg]	Mean Stiffness [N/mm] or [Nmm/deg]
Torsional	-	1,00E+06	5,24E-01	2,00E-01	5,00E+06
Lateral	1,00E+03	-	5,00E-01	-	2,00E+03
Longitudinal	1,00E+03	-	1,33E-01	-	7,50E+03
Driver's Weight	8,00E+02	-	1,20E+00	-	1,00E+03

Πίνακας 1: Συνθήκες φόρτισης πλαισίου

#### 4.3.3 Επαλήθευση στρεπτικής φόρτισης

Τέλος στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής στρεπτικής φόρτισης στο πλαίσιο με σκοπό την επαλήθευση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων. Τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος (βλ. εικόνα 33) παρουσιάζουν την επιβολή του φορτιού με εφαρμογή ροπής (αριστερά) και ζεύγους δυνάμεων (δεξιά) με χρήση διαφορετικών συνθηκών στήριξης του πλαισίου.

Τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων εμφανίζουν απόλυτη ταύτιση συνεπώς αποδεικνύεται ότι και τα δύο μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου. Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιείται και η επαλήθευση για την περίπτωση της πλευρικής φόρτισης.



Εικόνα 33: Επαλήθευση προσεγγίσεων στρεπτικής φόρτισης

#### 4.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

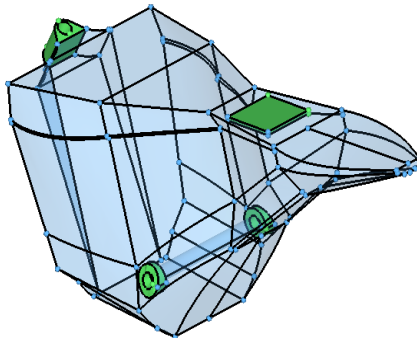
Στο υποκεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία της βελτιστοποίησης τοπολογίας στο πλαίσιο του δίκυκλου οχήματος. Ο καθορισμός και η επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης τοπολογίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Καθορισμός των περιοχών σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού (design and non-design area)
- Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (objective function)
- Καθορισμός των περιορισμών (constraints)
- Επίλυση του προβλήματος (solve)

##### 4.4.1 Καθορισμός των περιοχών σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι περιοχές σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού. Δηλαδή οι περιοχές του πλαισίου στις οποίες θα επιλυθεί το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τοπολογίας αλλά και αυτές που δεν θα συμπεριληφθούν στη λύση. Ουσιαστικά οι περιοχές μη σχεδιασμού αποτελούν περιοχές σύνδεσης του πλαισίου με τα υπόλοιπα λειτουργικά μέρη του οχήματος, όπως είναι ο άξονας διεύθυνσης, ο άξονας περιστροφής της ανάρτησης και το κάθισμα του αναβάτη. Συνεπώς στις περιοχές αυτές δεν μπορεί να διερευνηθεί η πιθανή αφαίρεση μάζας για λόγους λειτουργικότητας και εργονομίας.

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζεται με γαλάζιο χρώμα η περιοχή σχεδιασμού και με πράσινο χρώμα οι περιοχές μη-σχεδιασμού του πλαισίου.

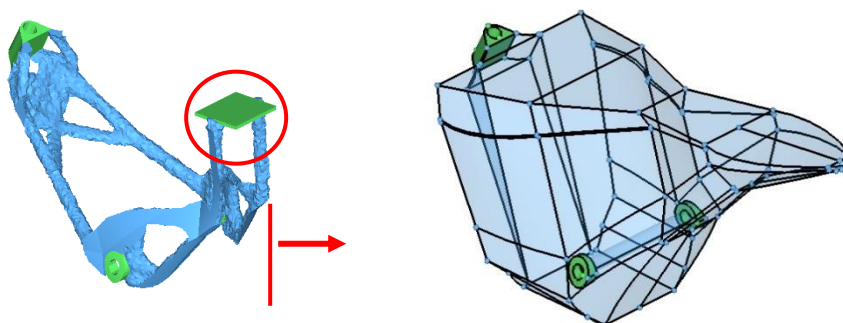


Εικόνα 34: Περιοχές σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού πλαισίου δίκυκλου



Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας σε αρχικό στάδιο έδειξε ότι το βάρος του αναβάτη δεν μεταβάλλει σημαντικά την τελική λύση ενώ παράλληλα δημιουργεί συνθέτες επιφάνειες που δυσχεραίνουν την κατασκευή και αυξάνουν το κόστος παραγωγής του πλαισίου. Ακόμη γίνεται αντιληπτό ότι η περιοχή σχεδιασμού που αναπτύσσεται πίσω από το κάθισμα μέχρι το πίσω άκρο του πλαισίου δεν συμμετέχει καθόλου στη λύση.

Δίνεται με αυτό το τρόπο η δυνατότητα να απλουστευτεί η αρχική γεωμετρία του πλαισίου μέσω της αφαίρεσης της συγκεκριμένης περιοχής μη σχεδιασμού αλλά και την μείωση της συνολικής περιοχής σχεδιασμού που δεν χρησιμοποιείται.



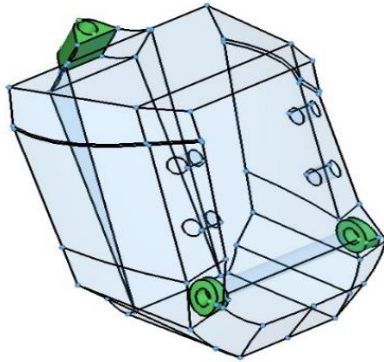
Εικόνα 35: Αφαίρεση περιοχών σχεδιασμού και μη-σχεδιασμού

Η μεταβολή του αρχικού σχεδίου έχει πολλαπλά οφέλη. Αρχικά διευκολύνει την διακριτοποίηση της κατασκευής αλλά και την ταχύτητα επίλυσης του προβλήματος εφόσον μειώνεται ο αριθμός των στοιχείων και των βαθμών ελευθερίας κατά 27%. Επιπροσθέτως, επιδρά στη μείωση του συνολικού βάρους κατά 26,7% προτού εφαρμοστεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Design	Nodes	Elements	Degrees of Freedom	Mass of the design area[kg]
Initial	107.461	574.303	325.617	403
With Subframe	78.378	420.061	236.826	295
Difference	-27,1%	-26,8%	-27,2%	-26,7%

Πίνακας 2: Σύγκριση αρχικού σχεδιασμού με εισαγωγή υποπλασίου

Η σύνδεση του καθίσματος του αναβάτη και του πλαισίου γίνεται πλέον με την εισαγωγή ενός υποπλασίου (subframe) το οποίο προσαρτάται στο πίσω μέρος του κυρίως πλαισίου. Στην εικόνα 36 διακρίνονται οι τέσσερις σπές στήριξης του υποπλασίου τοποθετημένες συμμετρικά πάνω από τον άξονα περιστροφής της ανάρτησης.



Εικόνα 36: Τελικό χωρίο σχεδιασμού και σημεία προσάρτησης υποπλασίου

Το υποπλαίσιο μπορεί να συνδεθεί με το κυρίως πλαίσιο με χρήση συγκόλλησης, συνεπώς οι συγκεκριμένες οπές δεν λαμβάνονται σαν περιοχές μη σχεδιασμού εφόσον η αφαίρεση υλικού από την γύρω περιοχή δεν δημιουργεί κατασκευαστικό ή εργονομικό πρόβλημα.

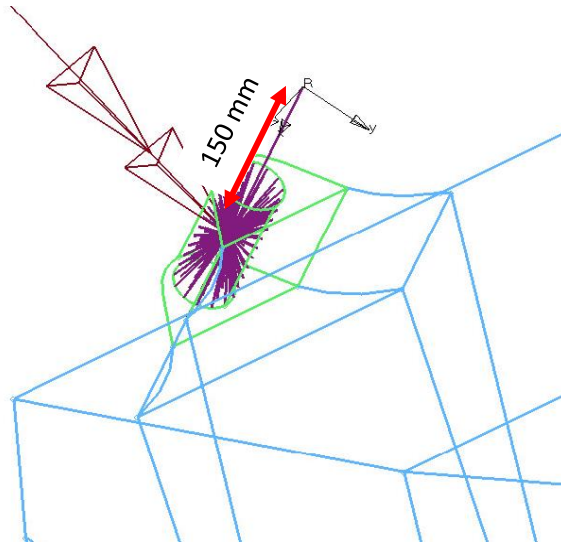
#### 4.4.2 Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης

Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης αναζητάτε μέσα από την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγεται η ελαχιστοποίηση της συνολικής μάζας (total mass) και της σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης (min weighted compliance). Με τη χρήση της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνονται σαν περιορισμοί τα τέσσερα σενάρια φόρτισης (load cases) που αναλύονται στη συνέχεια, ενώ με τη χρήση της δεύτερης αντικειμενικής λαμβάνεται και το ποσοστό εναπομένουσας μάζας (mass fraction).

#### 4.4.3 Καθορισμός των περιορισμών

Για να επιτευχθεί σύγκλιση του προβλήματος βελτιστοποίησης στη λύση πρέπει ταυτόχρονα με την διαδικασία ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης να καθοριστούν περιορισμοί που αντιβαίνουν στη μείωση αυτή. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι περιορισμοί που χρησιμοποιούνται κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις μετατοπίσεις λόγω των φορτίσεων, δηλαδή τη στρεπτική, πλευρική και διαμήκης (torsional, lateral & longitudinal displacements) και υπό το βάρος του οδηγού (seat deflection). Ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει περιορισμούς που αφορούν τη μάζα και τον όγκο ή ποσοστό της μάζας ή του όγκου (mass, volume, mass fraction, volume fraction).

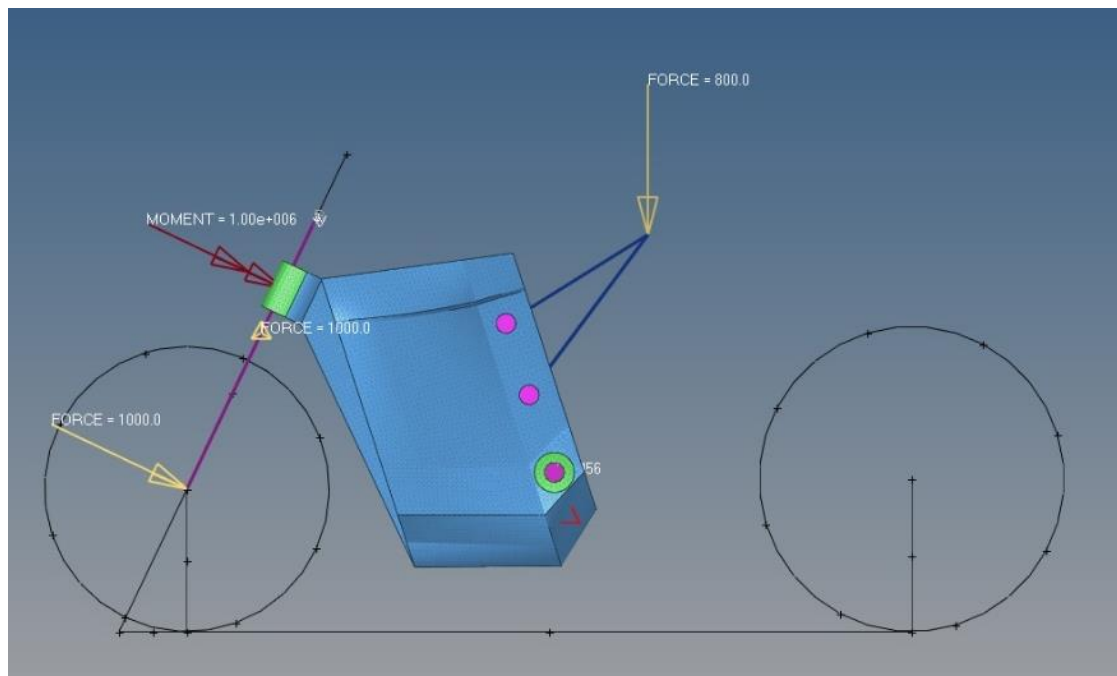
Στην παρακάτω εικόνα αναλύεται ο περιορισμός που επιβάλλεται λόγω της στρεπτικής φόρτισης που ασκείται στον άξονα διεύθυνσης. Στο μοντέλο προσομοίωσης του οχήματος γίνεται εισαγωγή ενός νέου τοπικού συστήματος συντεταγμένων ώστε να μπορέσει να εισαχθεί ο περιορισμός μετατόπισης στη σωστή κατεύθυνση η οποία δεν συμπίπτει με τους άξονες του καθολικού συστήματος. Ο καινούργιος κόμβος που καθορίζει το τοπικό σύστημα συντεταγμένων επιλέγεται σε ακτίνα 150 mm από το σημείο εφαρμογής της ροπής και μπορεί να στραφεί μέχρι και 0,2 deg ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός της αντίστοιχης στρεπτικής δυσκαμψίας.



Εικόνα 37: Εισαγωγή τοπικού  $\Sigma.\Sigma$  στη κατεύθυνση στροφής του άξονα διεύθυνσης

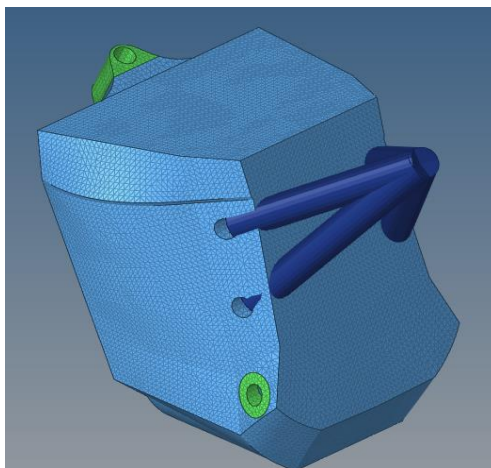
#### 4.4.4 Επίλυση του προβλήματος

Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης διαμορφώνεται ως εξής:



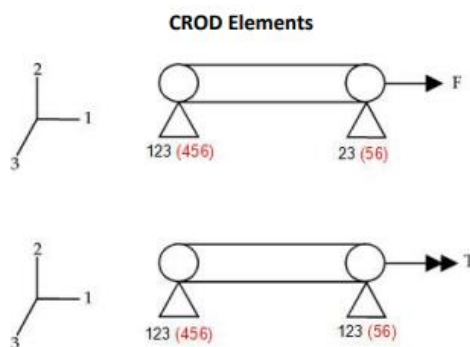
Εικόνα 38: Τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης

Το κομμάτι του υποπλασίου έχει αντικατασταθεί με τέσσερις χαλύβδινες ράβδους κυκλικής διατομής. Οι ράβδοι αναπαρίστανται με χρήση μονοδιάστατων στοιχείων (1D elements-CROD).



Εικόνα 39: Αναπαράσταση προσάρτησης υποπλασίου στο κύριο πλαίσιο

Τα στοιχεία αυτά υποστηρίζουν μόνο αξονική φόρτιση (θλίψη και εφελκυσμό) χωρίς να κάμπτονται. Συνεπώς, η κάθετη φόρτιση υπό το βάρος του οδηγού μεταφέρεται εξ'ολοκλήρου στο κυρίως πλαίσιο.

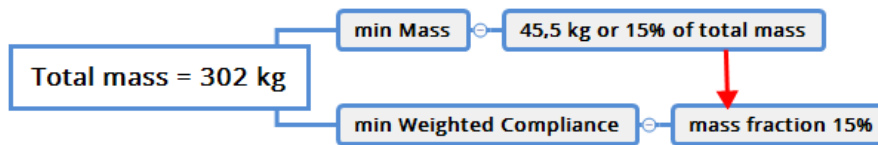


Εικόνα 40: Μονοδιάστατα στοιχεία CROD

#### 4.4.5 Αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης για τις δύο διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις που περιγράφονται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.2.

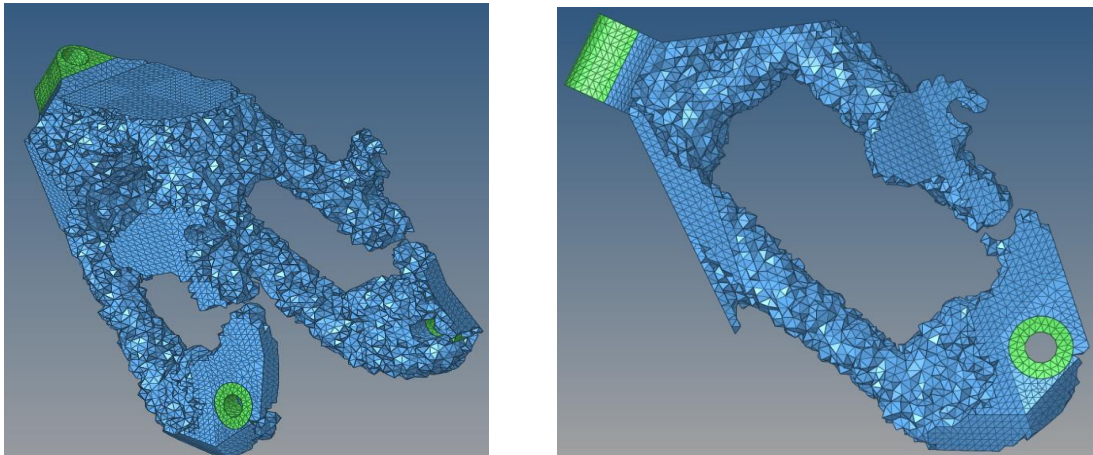
Αρχικά επιλύεται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μάζας μέσα από το οποίο καθορίζεται μια αρχική τιμή ελάχιστης μάζας ώστε να τηρούνται οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί. Η λύση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται σαν επιπρόσθετος περιορισμός (άνω όριο ποσοστού εναπομένουσας μάζας) στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης η οποία δίνει μια καινούργια λύση με προσανατολισμό την διατήρηση υψηλής τιμής δυσκαμψίας της κατασκευής. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 41: Μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης

- Min total mass
  - subject to**
  - Torsional stiffness
  - Lateral stiffness
  - Longitudinal stiffness
  - Driver's Weight stiffness
  - Resultant mass=45,5 kg**

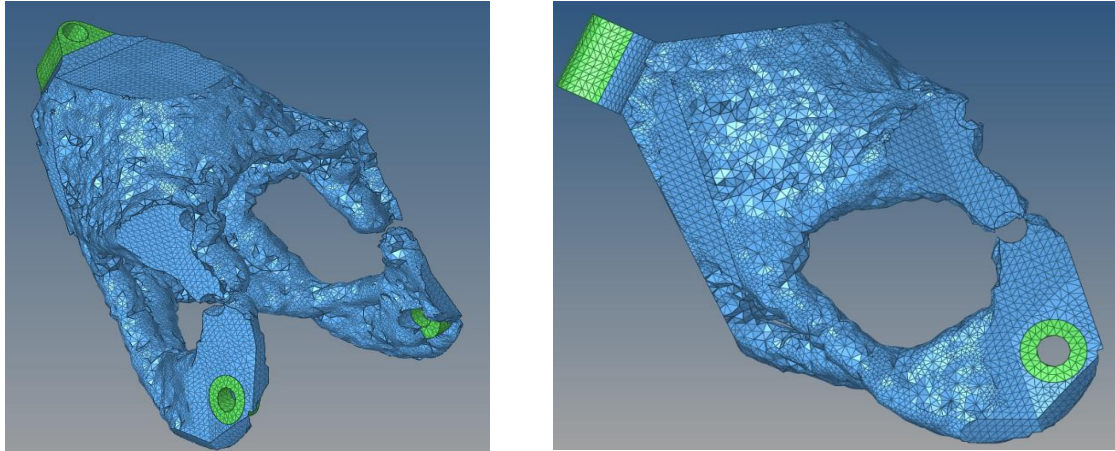
Η λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της μάζας παραπέμπει σε πλαίσιο τύπου double cradle ή diamond που χρησιμοποιείται κυρίως σε εκτός δρόμου δίκυκλα οχήματα. Παρατηρείται ότι το πλαίσιο σχηματίζεται από τέσσερα όμοια κατασκευαστικά μέλη που παραπέμπουν σε σωλήνες κυκλικής διατομής.



Εικόνα 42: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης μάζας (Min total mass)

- Min Weighted Compliance
  - subject to**
  - Torsional stiffness
  - Lateral stiffness
  - Longitudinal stiffness
  - Driver's Weight stiffness
  - Mass fraction 15%
  - Resultant mass=45,5 kg**

Η λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης παραπέμπει σε ένα πλαίσιο τύπου perimeter/beam που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στη σύγχρονες μηχανές υψηλού κυβισμού..



Εικόνα 43: Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης (Min weighted compliance & Mass fraction 15%)

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή κατασκευαστικών περιορισμών και τεχνικών βελτίωσης της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ 4.). Στόχος της εφαρμογής των τεχνικών είναι η επίτευξη μιας κατασκευάσιμης λύσης καθώς και η μείωση του συνολικού κόστους και χρόνου με σκοπό το πλαίσιο να ενταχθεί σε γραμμή παραγωγής. Συγκεκριμένα στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εφαρμογή των ακόλουθων τεχνικών:

- Βελτίωση της κατανομής τύπου σκακιέρας (Checkerboard)
- Ελάχιστο/Μέγιστο μέγεθος κατασκευαστικών μελών (Min/Max member size)
- Συμμετρία κατασκευής (Symmetry construction)

### 5.2 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΣΚΑΚΙΕΡΑΣ (CHECKERBOARD)

Η κατανομή υλικού σε μορφή σκακιέρας (checkerboard) συναντάται στη βελτιστοποίηση τοπολογίας συνεχών δομών ιδιαίτερα κατά τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων πρώτης τάξης. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση της τελικής λύσης μέσα από την εμφάνιση μη βέλτιστων μικροδομών (υπολογιστικός θόρυβος) που συντελεί στη μείωση της κατασκευασιμότητας. [16]

Έχει αποδειχθεί ότι προκαλείται από σφάλματα στη δομή των πεπερασμένων στοιχείων και συνδέεται με την εξάρτηση της λύσης από το υπολογιστικό πλέγμα. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται τεχνικές για την επίτευξη ανεξάρτητων του πλέγματος λύσεων όπως είναι :

- Perimeter control method
- Mesh independent filtering
- Density slope control.

### 5.3 ΕΛΑΧΙΣΤΟ/ΜΕΓΙΣΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ (MIN/MAX MEMBER SIZE)

Η επιλογή του ελάχιστου και μέγιστου μεγέθους των κατασκευαστικών μελών δίνει τη δυνατότητα επίτευξης κατασκευάσιμων λύσεων πλήρως ανεξαρτητοποιημένων από το υπολογιστικό πλέγμα, τις μικροδομές ή αντίστοιχα τις μεγάλες συγκεντρώσεις υλικού που είναι αδύνατο να κατασκευαστούν και εκτοξεύουν το κόστος κατασκευής.

Το ελάχιστο μέγεθος του κατασκευαστικού μέλους (MINDIM) για τα τρισδιάστατα στοιχεία (3D elements) επιλέγεται ως ο μέσος όρος της κυβικής ρίζας του όγκου των στοιχείων. Στη πράξη η μεταβλητή (MINDIM) συνήθως επιλέγεται μεταξύ τριών και δώδεκα φορές μεγαλύτερη από το μέσο μέγεθος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την διακριτοποίηση της κατασκευής [13].

Το μέγιστο μέγεθος του κατασκευαστικού μέλους (MAXDIM) πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο από το (MINDIM) κάτι που ισοδυναμεί με έξι φορές



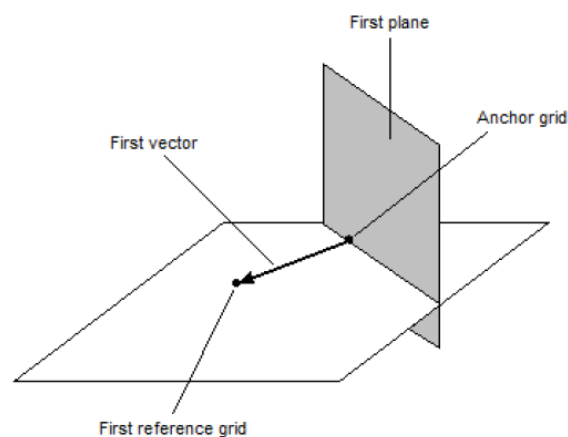
μεγαλύτερο από το μέσο μέγεθος των στοιχείων του υπολογιστικού πλέγματος. Τέλος, το MAXDIM πρέπει να είναι μικρότερο από το ήμισυ του πλάτους του λεπτότερου τμήματος της περιοχής σχεδιασμού [13].

#### 5.4 ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (SYMMETRY CONSTRUCTION)

Είναι συχνά επιθυμητό να παραχθεί μια κατασκευή που έχει συμμετρία. Δυστυχώς, ακόμη και αν το χωρίο σχεδιασμού αλλά και οι οριακές συνθήκες είναι συμμετρικές, οι συμβατικές μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας δεν εγγυώνται έναν τέλεια συμμετρικό σχεδιασμό.

Χρησιμοποιώντας τους περιορισμούς συμμετρίας στην βελτιστοποίηση τοπολογίας, μπορούν να επιτευχθούν συμμετρικές κατασκευές ανεξάρτητα από το αρχικό υπολογιστικό πλέγμα, τις οριακές συνθήκες και τα φορτία. Η συμμετρία μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα επίπεδο, σε δύο ορθογώνια επίπεδα ή σε τρία ορθογώνια επίπεδα. Στο πρόβλημα που μελετάται θα διερευνηθεί η συμμετρία ως προς ένα επίπεδο.

Για να οριστεί η συμμετρία σε ένα επίπεδο, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα πλέγμα άγκυρας (anchor grid) και ένα πλέγμα αναφοράς (reference grid). Το πρώτο διάνυσμα (first vector) διατρέχει το πλέγμα άγκυρας μέχρι το πλέγμα αναφοράς ενώ το επίπεδο συμμετρίας είναι κάθετο στο το εν λόγω διάνυσμα και διέρχεται από το πλέγμα άγκυρας [13].



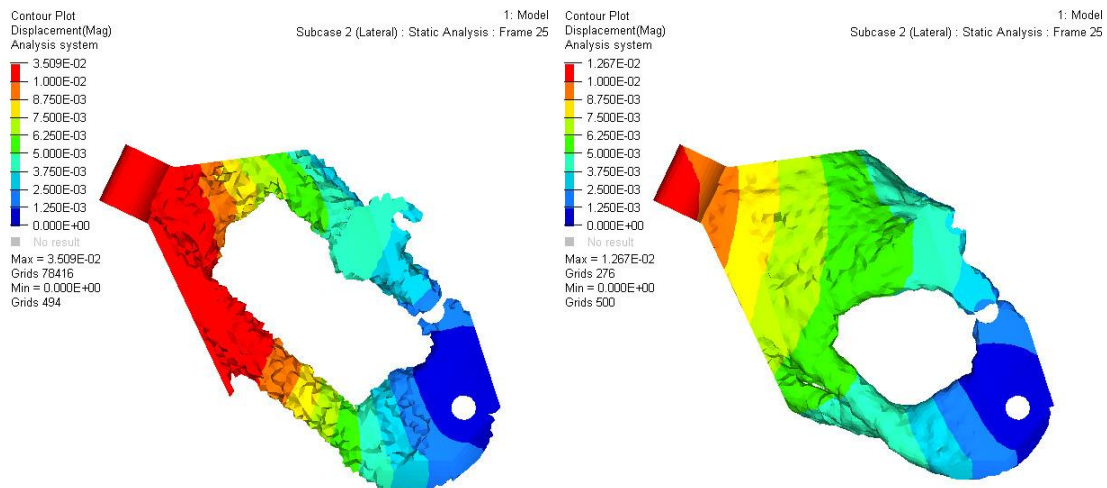
Εικόνα 44:Ορισμός ενός επιπέδου συμμετρίας της κατασκευής

### 5.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

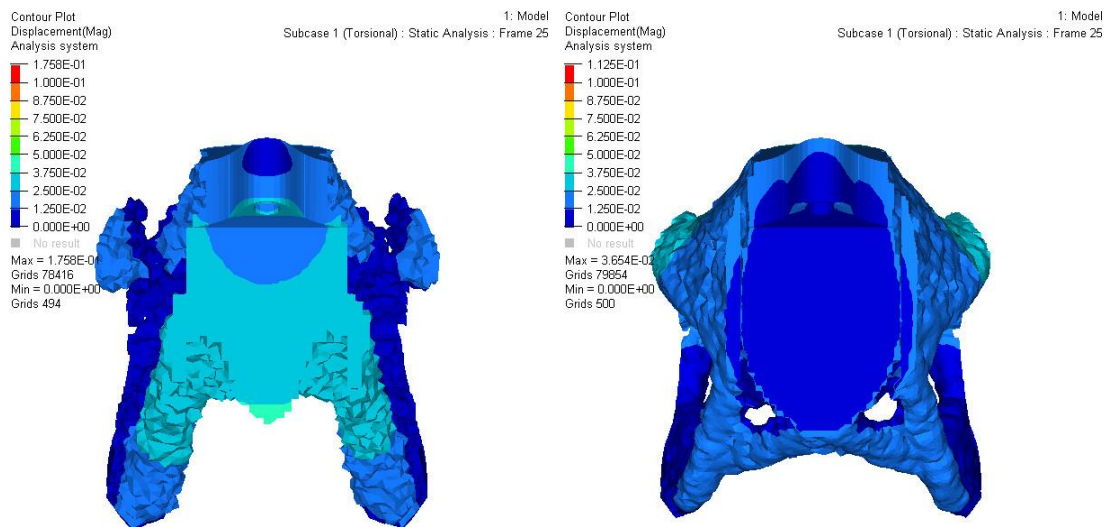
#### 5.5.1 Επιλογή μοντέλου για την εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών

Για την εφαρμογή των ανωτέρων κατασκευαστικών περιορισμών επιλέχθηκε η λύση του προβλήματος μέσω της ελαχιστοποίησης της σταθμισμένης ενέργειας παραμόρφωσης καθώς αυτή παρουσιάζει υψηλότερες τιμές δυσκαμψίας σε σύγκριση με τη λύση της ελαχιστοποίησης της συνολικής μάζας.





Εικόνα 45: Σύγκριση μετατοπίσεων για την επιβολή πλευρικής φόρτισης μεταξύ των λύσεων *min Mass* (αριστερά) και *min Weighted compliance* (δεξιά)



Εικόνα 46: Σύγκριση μετατοπίσεων για την επιβολή στρεπτικής φόρτισης μεταξύ των λύσεων *min Mass* (αριστερά) και *min Weighted compliance* (δεξιά)

### 5.5.2 Εφαρμογή όλων των κατασκευαστικών περιορισμών στο μοντέλο

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών. Οι περιορισμοί που εφαρμόζονται στο μοντέλο είναι οι παρακάτω:

- Checkerboard control
- Min member size=30
- Symmetry constraint

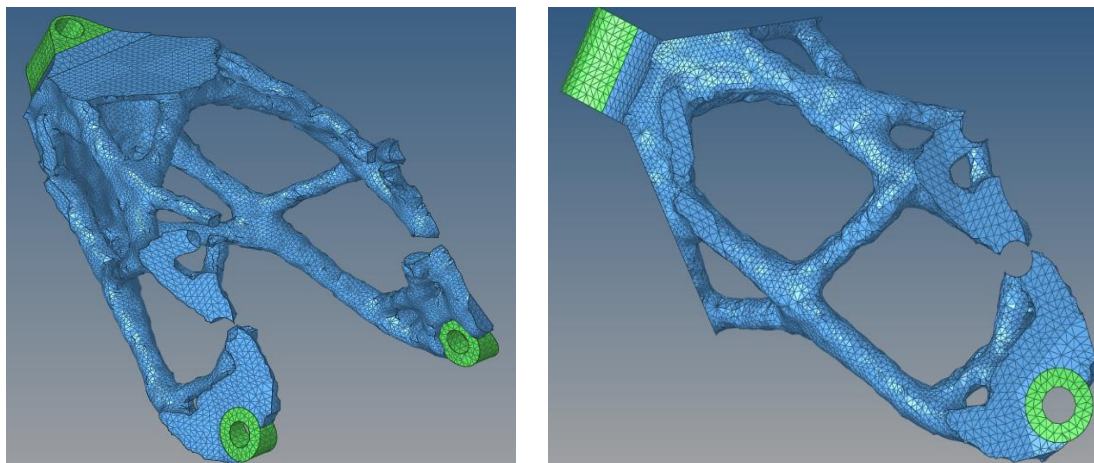
Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το κατώφλι πυκνότητας (density threshold) του αποτελέσματος της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών και στη συνέχεια μέσα από την δημιουργία ενός μοντέλο καινούργιας ανάλυσης (reanalysis) να αποφασίσει για το τελικό βέλτιστο σχεδιασμό.

Στον πίνακα που ακολουθεί επιλέγονται τρία διαφορετικά σενάρια της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης με διαφορετικό κατώφλι πυκνότητας. Η αρχική τιμή ορίζεται στο 0,1 ενώ στα επόμενα δυο βήματα διπλασιάζεται κάθε φορά. Υστέρα από την δημιουργία του αντίστοιχου μοντέλου από κάθε ένα από τα τρία σενάρια ακολουθεί καινούργια προσομοίωση ώστε να εξετασθεί αν η λύση ικανοποιεί τα όρια δυσκαμψίας που έχουν τεθεί κατά τον σχεδιασμό.

Model #	Density threshold	Resultant mass [kg]	Torsional Stiffness [kNmm/deg]	Lateral Stiffness [kN/mm]	Longitudinal Stiffness [kN/mm]
1	0,1	22,6	7,97E+05	31,87	12,11
2	0,2	18,0	5,02E+05	15,68	5,95
3	0,4	12,1	2,00E+05	10,06	4,32

Πίνακας 3: Σύγκριση τιμών δυσκαμψίας ανάλογα με το όριο πυκνότητας των στοιχείων

Συγκρίνοντας τις τιμές δυσκαμψίας για τα παραπάνω σενάρια με διαφορετικό κατώφλι πυκνότητας των εναπομένοντων στοιχείων του πλαισίου παρατηρείται ότι το σενάριο υπ' αριθμόν 2 ικανοποιεί τα ελάχιστα όρια τιμών δυσκαμψίας που αναφέρονται στην παράγραφο 4.3.1. Σημειώνεται ότι, η τιμή δυσκαμψίας για τη φόρτιση υπό το βάρος του οδηγού είναι αμελητέα και παραλείπεται από τη σύγκριση.



Εικόνα 47: Μοντέλο πλαισίου (2) υστέρα από την εφαρμογή των κατασκευαστικών περιορισμών

### 5.5.3 Ανάλυση ευαισθησίας ελαχίστου/μεγίστου κατασκευαστικού μέλους

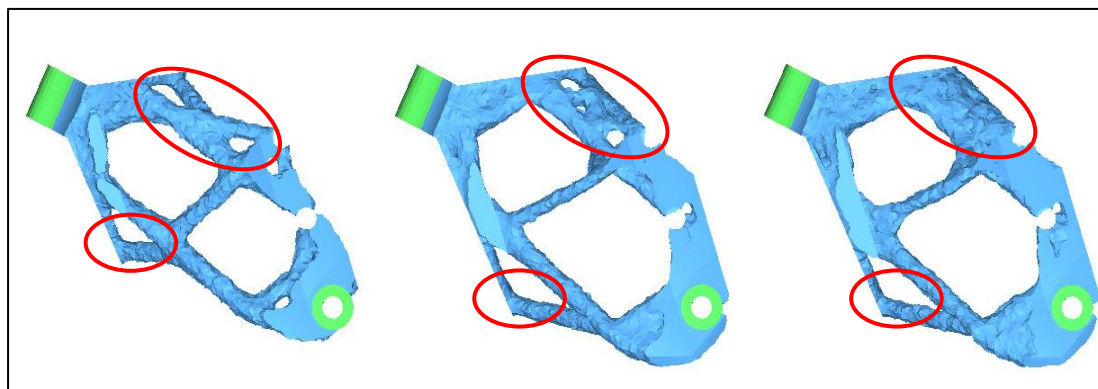
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση τριών μοντέλων με διαφορετικές παραμέτρους κατασκευαστικού μέλους με σκοπό να διερευνηθεί η επίπτωση των παραμέτρων αυτών στην τελική λύση. Το όριο πυκνότητας στοιχείων ορίζεται ίσο με 0.2 ώστε

να ικανοποιούνται οι περιορισμοί δυσκαμψίας βλ. παράγραφο 5.5.2. Τα τρία μοντέλα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

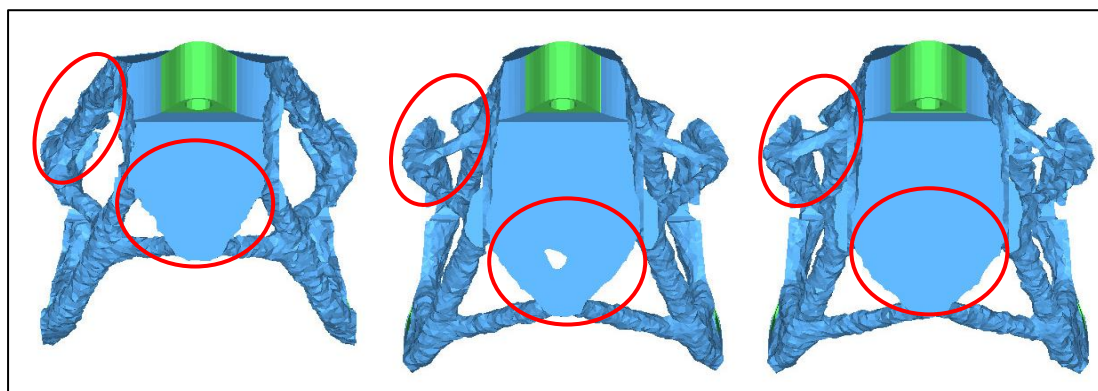
Model #	Min member size	Max member size	Mass [kg]
1	30	-	18,0
2	30	60	20,3
3	20	40	20,5

Πίνακας 4: Σύγκριση μοντέλων ελαχίστου/μεγίστου κατασκευαστικού μέλους

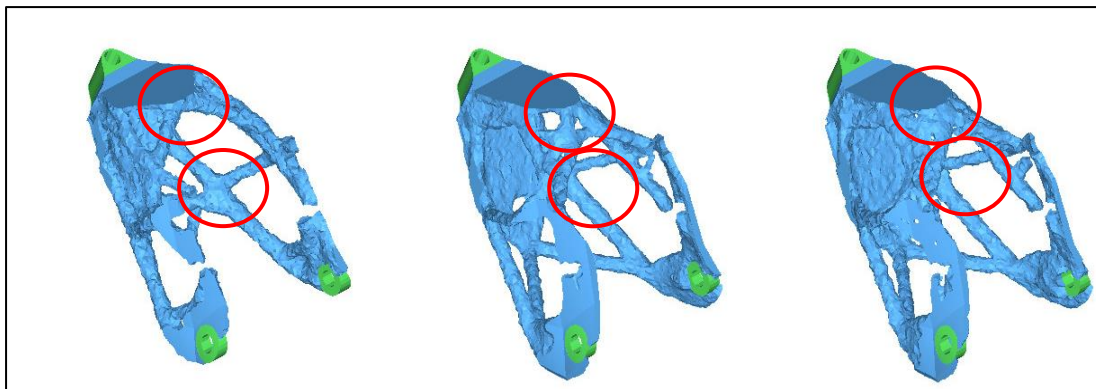
Η σύγκριση των τριών μοντέλων παρουσιάζεται στα ακόλουθα σχήματα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η εισαγωγή και του μέγιστου κατασκευαστικού μέλους στους περιορισμούς επηρεάζει αισθητά τη πολυπλοκότητα της λύσης σε σύγκριση με την εφαρμογή μόνο του ελαχίστου κατασκευαστικού μέλους. Το πλαίσιο που δημιουργείται διαφέρει αισθητά ως προς τον τρόπο δόμησης αλλά και τη συνολική του μάζα παρουσιάζοντας αύξηση του βάρους κατά δύομιση κιλά. Οι κύριες διαφορές των μοντέλων επισημαίνονται πάνω στα σχήματα (κόκκινη περιοχή). Ακόμη, παρατηρείται ότι η αλλαγή των ορίων των κατασκευαστικών μελών από [30-60] σε [20-40] δεν επηρεάζει αισθητά τη μορφή του τελικού πλαισίου καθώς δημιουργούνται παρόμοια πλαίσια με σχεδόν ίσες μάζες.



Εικόνα 48: Σύγκριση μοντέλων #1 (αριστερά), #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά), πλαγιά όψη



Εικόνα 49: Σύγκριση μοντέλων #1 (αριστερά), #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά), πρόσοψη



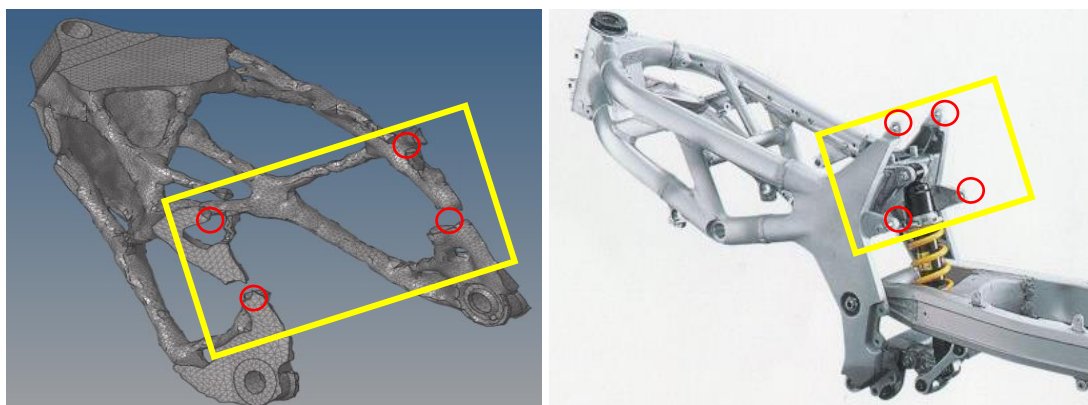
Εικόνα 50: Σύγκριση μοντέλων #1 αριστερά , #2 (κέντρο) & #3 (δεξιά) πλαγιά όψη, πλάγια - πίσω όψη

Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά των τριών μοντέλων παρατηρείται ότι η εισαγωγή και του μέγιστου κατασκευαστικού μέλους στους περιορισμούς δεν βελτιώνει τη δομή και το βάρος του πλαισίου, συνεπώς γίνεται επιλογή του μοντέλου #1 ως βέλτιστο. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στο εξής ως κύριο μοντέλο αυτής της εργασίας.

#### 5.5.4 Ανάλυση της κατασκευαστικής δομής της λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης

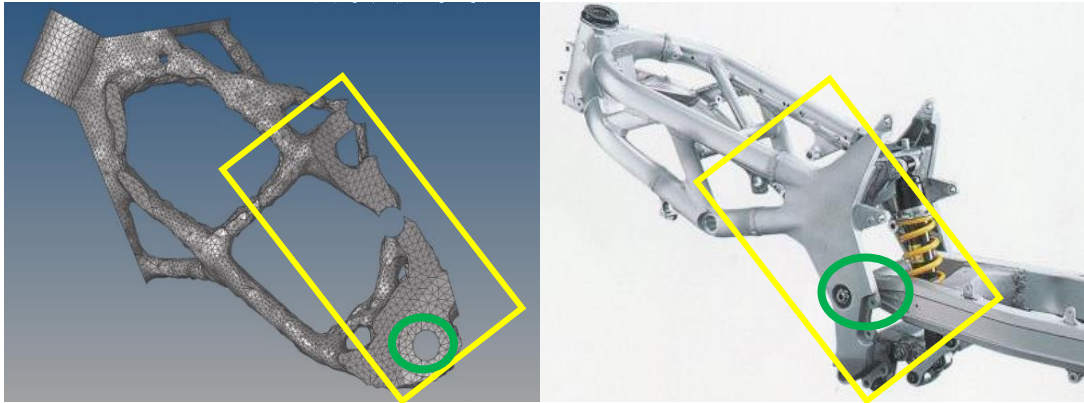
Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση της δομής του πλαισίου όπως αυτό διαμορφώθηκε από τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας με τη δομή πλαισίου που συναντάται σε πληθώρα δίκυκλων οχημάτων (τυπικό βιομηχανικό πλαίσιο δίκυκλου οχήματος). Τα αποτελέσματα της σύγκρισης εμφανίζουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ των δυο πλαισίων και αναλύονται αναλυτικά για κάθε ένα από τα παρακάτω σχήματα.

Στις εικόνες 51 & 52 παρατηρείται η δημιουργία των δομών στήριξης του υποπλασίου (κίτρινη περιοχή) με τα τέσσερα σημεία ανάρτησης (κόκκινη περιοχή) τα οποία εμφανίζουν συμμετρία και τοπική συγκέντρωση υλικού (ενισχυμένη δομή) η οποία τα συνδέει με την έδραση του άξονα περιστροφής της ανάρτησης (πράσινη περιοχή).



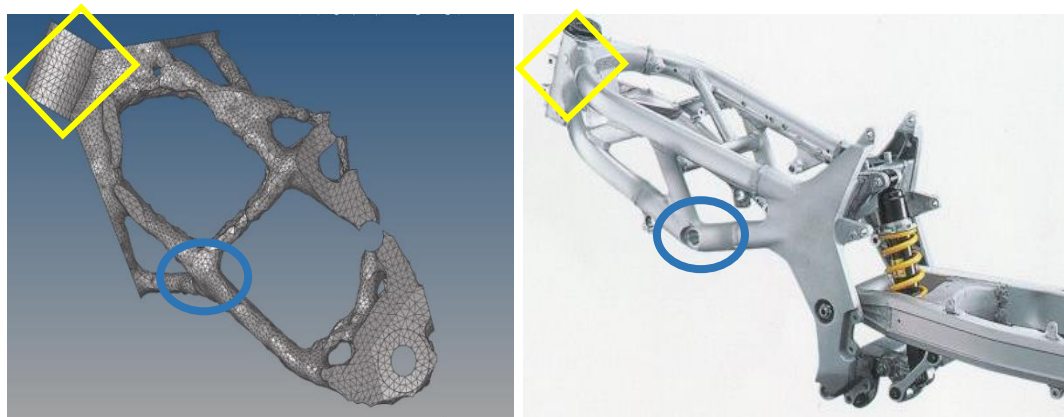
Εικόνα 51: Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο





Εικόνα 52: Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο

Στην εικόνα 53 παρατηρείται η δημιουργία άνω και κάτω στήριξης της περιοχής έδρασης του άξονα διεύθυνσης (κίτρινη περιοχή) καθώς και ομοιότητα στη δομή του χωροδικτύωματος (μπλε περιοχή).



Εικόνα 53: Σύγκριση λύσης με βιομηχανικό πλαίσιο

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ | ΕΜΦΩΛΕΥΜΕΝΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναζητείτε το βέλτιστο σχήμα και η βέλτιστη τοποθέτηση του πακέτου των μπαταριών μέσα στο πλαίσιο του δίκυκλου οχήματος όπως αυτό περιγράφεται στο κεφάλαιο 5. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται ένα σύνθετο μοντέλο εμφωλευμένης βελτιστοποίησης. Η ελαχιστοποίηση της συνολικής μάζας του πλαισίου ορίζεται σαν εσωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης και η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των μετατοπίσεων των τεσσάρων συνθηκών φόρτισης σαν εξωτερική.

Το μοντέλο δημιουργήθηκε με χρήση του λογισμικού Hyperstudy ενώ κάθε εσωτερική βελτιστοποίηση επιλύεται με το OptiStruct. Το λογισμικό αντλεί πληροφορίες από το κατασκευαστικό μοντέλο και το μοντέλο βελτιστοποίησης που περιέχονται στο αντίστοιχο αρχείο fem, καθώς και από τα αρχεία batch και tcl που διέπουν την διαδικασία βελτιστοποίησης.

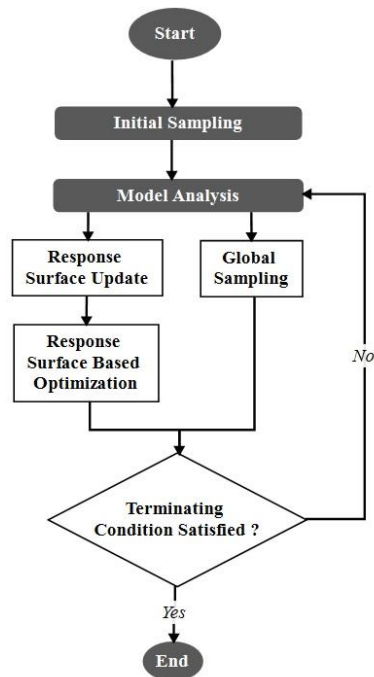
### 6.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ GRSM

Η εξωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης βασίζεται στην μέθοδο GRSM (Global Response Surface Method) [17]. Η μέθοδος GRSM έχει τη δυνατότητα εύρεσης καθολικών ελαχίστων/μεγίστων (global search method) και είναι ανεξαρτητοποιημένη από φαινόμενα τοπικών ελαχίστων/μεγίστων (local minima/maxima) όπως αυτά συναντώνται στις μεθόδους βελτιστοποίησης 'gradient based'. Επειδή στις μεθόδους αυτές υπάρχει ισχυρή σύνδεση από τον αρχικό σχεδιασμό, γεγονός που ενισχύει την πιθανότητα εγκλωβισμού της λύσης σε τοπικό επίπεδο, η GRSM χρησιμοποιεί μια προσέγγιση 'multi-start', δηλαδή ένα αρχικό δείγμα με  $N$  το πλήθος σχεδιασμών ώστε να ξεπεράσει το εμπόδιο αυτό.

Στην επίλυση του παρόντος προβλήματος ο αριθμός δειγμάτων επιλέγεται ίσος με  $N=7$ , πρόκειται ουσιαστικά για μια διαδικασία DOE (Design of Experiment) η οποία παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για την κατασκευή της αρχικής επιφάνειας απόκρισης (initial response surface). Η μέθοδος GRSM κατασκευάζει επιφάνειες απόκρισης από ένα μικρό εύρος σημείων γεγονός που τις επιτρέπει να παραμένει αποτελεσματική ακόμη και σε προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού.

Από την επίλυση του πρώτου βήματος επανάληψης η μέθοδος χρησιμοποιεί τα βέλτιστα σημεία ώστε να κατασκευάσει ένα νέο DOE και εν συνεχεία η επιφάνεια απόκρισης ενημερώνεται με τα καινούργια σημεία σχεδιασμού. Η διαδικασία εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι το τερματισμό της.

Η μέθοδος GRSM ανήκει στην κατηγορία της εξερευνητικής βελτιστοποίησης (exploratory optimization). Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος δεν εμφανίζει τα τυπικά αριθμητικά χαρακτηριστικά σύγκλισης που παρατηρείται σε άλλους αλγόριθμους, όπως τα συστήματα με βάση την κλίση (gradient based). Συνεπώς η κατάσταση τερματισμού καθορίζεται από την επίτευξη του μέγιστου αριθμού βημάτων (αξιολόγηση των σχεδιασμών) που έχουν καθοριστεί από το χρήστη.



Εικόνα 54: Διάγραμμα ροής της μεθόδου (GRSM)

### 6.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος καθορισμού των περιορισμών της εξωτερικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα ο πρώτος περιορισμός αφορά το συνολικό όγκο μετρούμενο σε λίτρα (lt) που καλύπτουν οι μπαταρίες ώστε το όχημα να ικανοποιεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί κατά το σχεδιασμό. Οι προδιαγραφές αφορούν την ταχύτητα κίνησης, την μέγιστη αυτονομία και την τάση λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα του δίκυκλου οχήματος. Οι μπαταρίες που επιλέχθηκαν για χρήση στο όχημα είναι οι '18650' ιόντων λιθίου με δυνατότητα επαναφόρτισης. Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων (π.χ Tesla Model S) με αξιόλογα αποτελέσματα.



Εικόνα 55: Μπαταρία 18650 Li-Ion

Στους παρακάτω πίνακες αναγράφονται τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας καθώς και του πακέτου των μπαταριών. Ο συνολικός όγκος του πακέτου αποτελεί τον πρώτο περιορισμό της εξωτερικής βελτιστοποίησης.

ΜΠΑΤΑΡΙΑ 18650		
Τάση	3.6	V
Χωρητικότητα	3.4	Ah
Διάμετρος	18.15	mm
Ύψος	65.3	mm
Βάρος	47.5	g

Πίνακας 5: Προδιαγραφές μπαταρίας (18650)

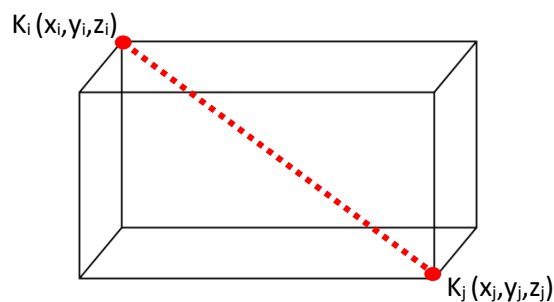
ΠΑΚΕΤΟ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ 18650		
Αριθμός μπαταριών/ πακέτο	504	-
Τάση	150	V
Χωρητικότητα	40	Ah
Βάρος	23.9	Kg
Όγκος	10.84	lt

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά πακέτου μπαταριών (18650)

Ο συνολικός όγκος του πακέτου των μπαταριών εισάγεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης με την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{battery\ pack} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (5)$$

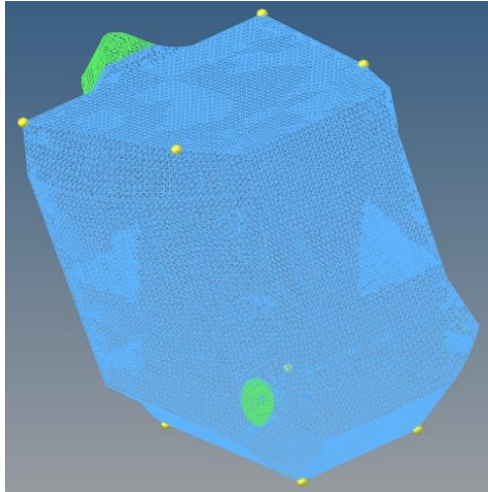
Ο δεύτερος περιορισμός συνδέεται με τη τοποθέτηση του πακέτου μπαταριών μέσα στο πλαίσιο. Η τοποθέτηση του πακέτου γίνεται από τον καθορισμό των συντεταγμένων των δύο κορυφών του  $K_i$  και  $K_j$  (βλ. εικόνα 56). Το πακέτο έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου και πρέπει να περιβάλλεται εξολοκλήρου από το πλαίσιο για λόγους εργονομίας και ασφάλειας. Επιπροσθέτως, η τοποθέτηση του πακέτου πρέπει να είναι συμμετρική ως προς τον διαμήκη άξονα του πλαισίου ώστε να υπάρχει ισόποση κατανομή του βάρους των μπαταριών.



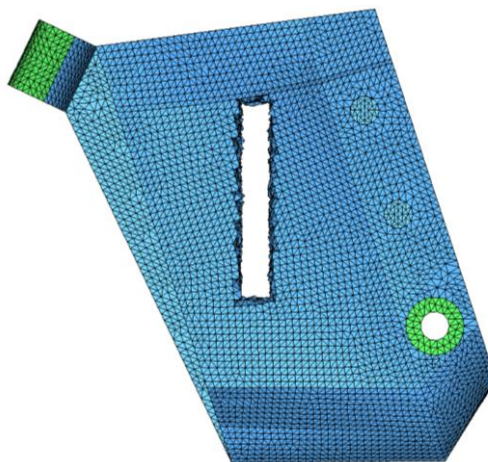
Εικόνα 56: Καθορισμός πακέτου μπαταριών



Στην εικόνα 57 διακρίνονται με κίτρινο χρώμα οι συντεταγμένες του χωρίου σχεδιασμού μέσα στις οποίες θα πρέπει να περιέχεται το πακέτο των μπαταριών ενώ στην εικόνα 58 διακρίνεται το αρχικό σχήμα του πακέτου όπως αυτό λαμβάνεται κατά την έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης.



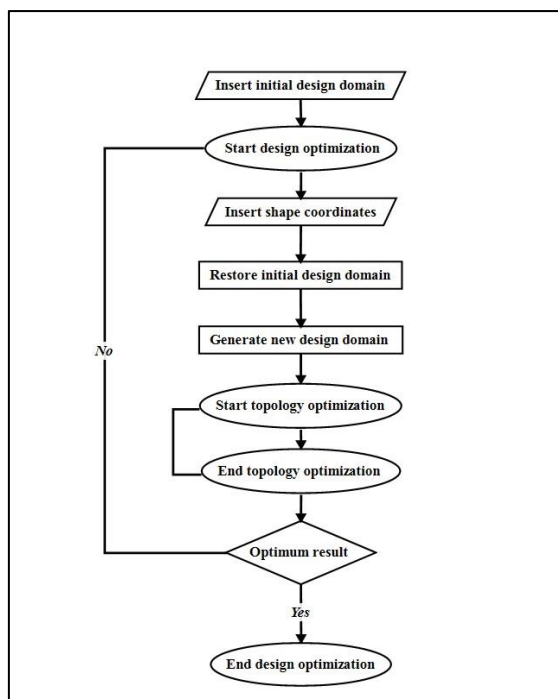
Εικόνα 57: Όρια τοποθέτησης του πακέτου των μπαταριών



Εικόνα 58: Αρχική θέση τοποθέτησης του πακέτου των μπαταριών

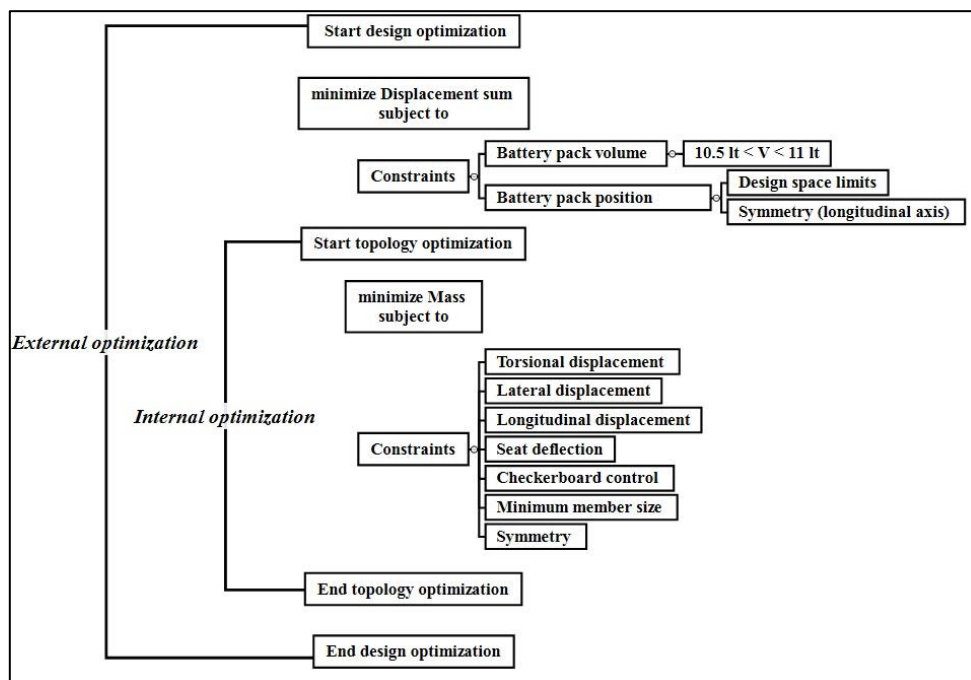
#### 6.4 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται η διατύπωση του εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης καθώς και τα αναλυτικά βήματα που ακολουθούνται για τον καθορισμό του όγκου και της θέσης του πακέτου μέχρι την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος. Για την ευκολότερη κατανόηση και εποπτεία η διαδικασία παρουσιάζεται μέσα από δύο διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα ροής (εικόνα 59) διατυπώνεται η μεθοδολογία της διαδικασίας της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης (εσωτερική και εξωτερική) και ο τρόπος με τον οποίο αναδιαμορφώνεται το αρχικό χωρίο σχεδιασμού σε κάθε επανάληψη.



Εικόνα 59: Διάγραμμα ροής-μεθοδολογία της διαδικασίας εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης

Στο δεύτερο διάγραμμα (εικόνα 60) γίνεται επεξήγηση των βημάτων που ακολουθούνται από τον αλγόριθμο για την εφαρμογή του πλαισίου του δίκυκλου οχήματος συγκεκριμένα.



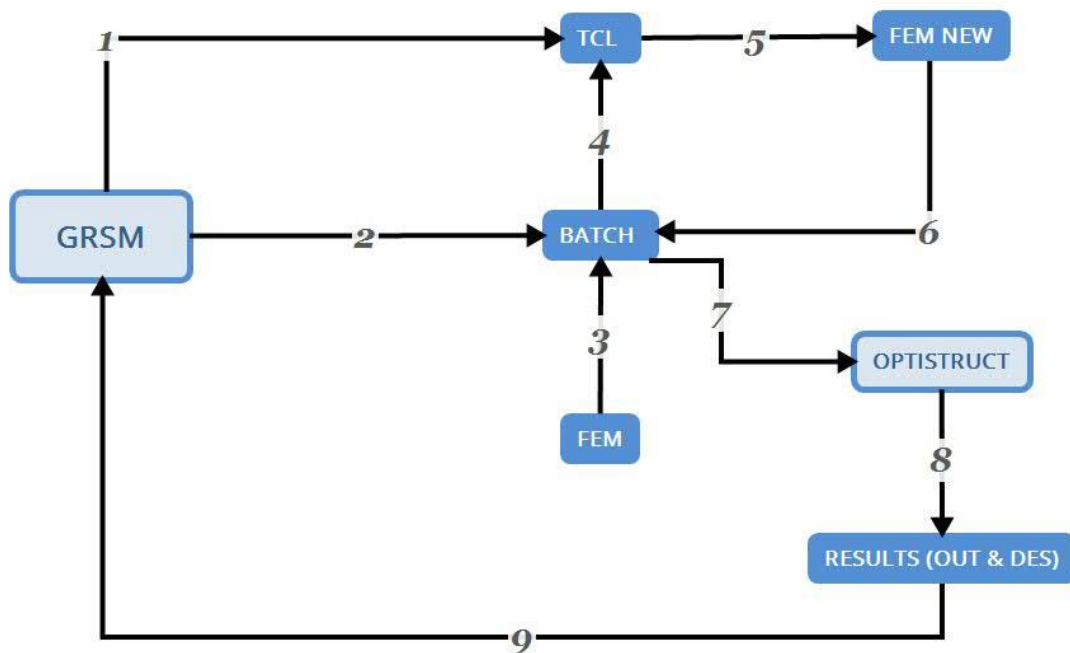
Εικόνα 60: Διάγραμμα-εφαρμογή του εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης

## 6.4.1 Περιγραφή της λειτουργίας των αρχείων TCL &amp; BATCH

Η διαδικασία της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα η εξωτερική βελτιστοποίηση (GRSM) βασίζεται κυρίως σε δύο αρχεία κώδικα. Στην παράγραφο αυτή αναλύεται σε εννέα βήματα ο τρόπος με τον οποίο τα δύο αρχεία συντονίζουν την διαδικασία της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης.

Στο πρώτο βήμα καλείται το αρχείο TCL με κύρια λειτουργία το σχηματισμό του νέου πακέτου των μπαταριών σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Στο δεύτερο βήμα καλείται το αρχείο BATCH το οποίο αντλεί πληροφορίες από το αρχείο FEM (τρίτο βήμα) σχετικά με τη δομή του χωρίου σχεδιασμού, το υπολογιστικό πλέγμα, τις συνοριακές συνθήκες και την εσωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης. Στο τέταρτο βήμα το αρχείο BATCH καλεί το αρχείο TCL το οποίο δημιουργεί το ανανεωμένο αρχείο FEM, δηλαδή το FEM εκείνο στο οποίο έχουν αφαιρεθεί στοιχεία σύμφωνα με την γεωμετρία του καινούργιου πακέτου μπαταριών (πέμπτο βήμα). Το καινούργιο αρχείο FEM χρησιμοποιείται από το αρχείο BATCH (έκτο βήμα) και ξεκινά η εσωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση του OptiStruct (έβδομο βήμα). Στο όγδοο βήμα δημιουργούνται τα αρχεία αποτελεσμάτων OUT και DES που περιλαμβάνουν πληροφορία για τις μετατοπίσεις, τη μάζα και το βέλτιστο σχεδιασμό. Τέλος στο ένατο βήμα τα αποτελέσματα εισάγονται πίσω στην αρχή της διαδικασίας ώστε να αποφασιστεί η συνέχεια ή ο τερματισμός της.

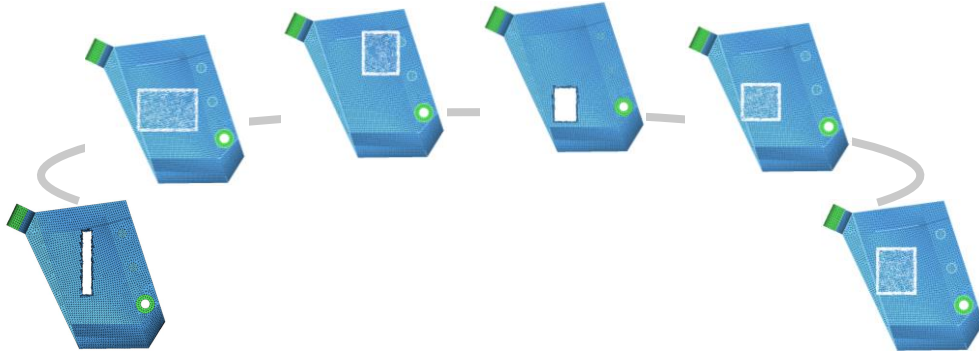
Τα παραπάνω εννέα βήματα καθώς και η σύνδεση των διαφορετικών αρχείων αναλύονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Εικόνα 61: Διάγραμμα της λειτουργίας των αρχείων TCL & BATCH

## 6.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΜΦΩΛΕΥΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

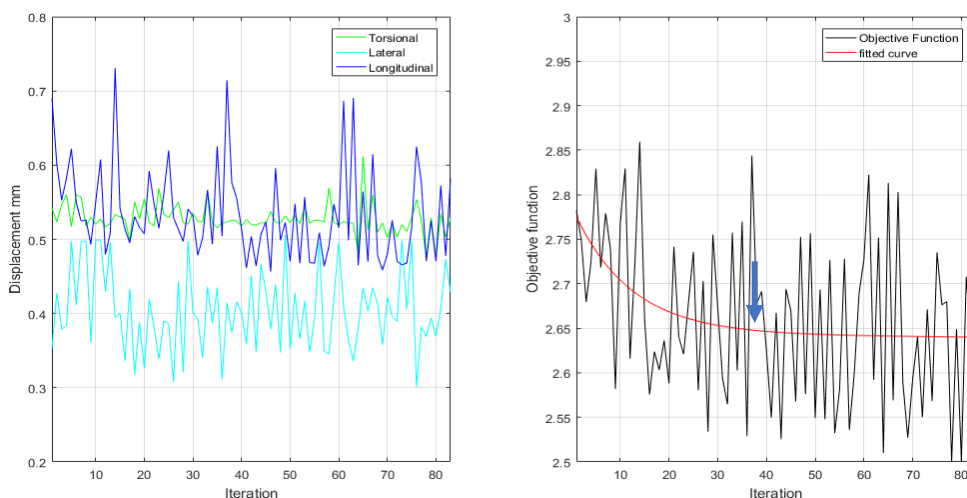
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίλυση του εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης. Στην εικόνα 62 παρουσιάζονται οι διαφορετικοί σχεδιασμοί και οι αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης του πακέτου μπαταριών από την αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης (αρχικοποίηση) μέχρι το τέλος (βέλτιστος σχεδιασμός). Σημειώνεται ότι, στα μοντέλα όπου το περίγραμμα του πακέτου εμφανίζεται με λευκό χρώμα το πακέτο περικλείεται εξ' ολοκλήρου από το χωριό σχεδιασμού.



Εικόνα 62: Αναπαράσταση σχεδιασμού και τοποθέτησης του πακέτου μπαταριών

Στα διαγράμματα που ακολουθούν διακρίνονται οι τιμές μετατόπισης που αντιστοιχούν στις συνθήκες φόρτισης (στρεπτική, πλευρική και διαμήκης) για κάθε ένα από τους σχεδιασμούς του πακέτου (αριστερά). Σημειώνεται ότι, η μετατόπιση λόγω της φόρτισης υπό το βάρος του οδηγού παραλείπεται εφόσον παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά.

Στο δεύτερο διάγραμμα (δεξιά) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης (άθροισμα των μετατοπίσεων) η οποία σταδιακά μειώνεται. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 6.2 η καμπύλη της αντικειμενικής συνάρτησης δεν αναμένεται να έχει μορφή παρόμοια με αυτή που εμφανίζεται στις 'gradient based' μεθόδους λόγω της επιλογής των αντίστοιχων δειγμάτων κάθε φορά. Για την ευκολότερη εποπτεία της συμπεριφοράς της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται χρήση μιας πολυωνυμικής συνάρτησης (πολυώνυμο παρεμβολής).



Εικόνα 63: Αποτελέσματα εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης, μετατόπιση ανά συνθήκη φόρτισης (αριστερά) και αντικειμενική συνάρτηση με πολυώνυμο παρεμβολής (δεξιά).

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα επίπεδα μάζας των σχεδιασμών της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης για την επανάληψη 36 και συνολικού χρόνου 30 ωρών - μπλε βέλος (αρχικοποίηση και τελικό αποτέλεσμα) τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τοπολογίας όπως αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4, δηλαδή κοντά στα 45,5 kg. Το ποσοστό αύξησης της μάζας από τον αρχικό σχεδιασμό μέχρι το βέλτιστο είναι θετικό και ισούται με 1,2% ταυτόχρονα όμως το ποσοστό αλλαγής του αθροίσματος των μετατοπίσεων δηλαδή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται κατά 9,35%. Δηλαδή ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για μια μικρή αύξηση της μάζας, μειώνει σημαντικά το άθροισμα των μετατοπίσεων ή αυξάνει σημαντικά την δυσκαμψία του πλαισίου.

Πακέτο Μπαταριών	Μάζα πλαισίου [kg]	Ποσοστό αλλαγής μάζας [%]	Άθροισμα μετατοπίσεων [mm]	Ποσοστό αλλαγής μετατόπισης [%]
Αρχικό	43,84	+1,2	2.78	-9,35
Τελικό	44,37		2.52	

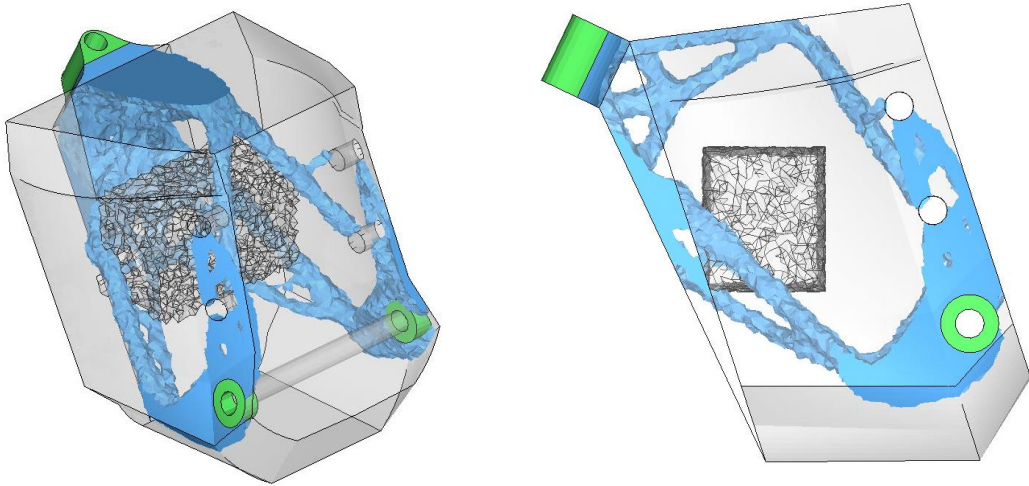
Πίνακας 7: Ανάλυση αποτελεσμάτων εμφωλευμένης βελτιστοποίησης

Είναι εξίσου σημαντικό να συγκριθεί το ποσοστό αλλαγής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το ποσοστό από τις τιμές της καμπύλης παρεμβολής και αυτό ώστε να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης όχι μόνο μεταξύ των ακραίων σχεδιασμών (χειρίστος - βέλτιστος) αλλά και των ενδιάμεσων σχεδιασμών που διαμορφώνουν την καμπύλη παρεμβολής. Εδώ παρατηρείται ότι το ποσοστό αλλαγής μειώνεται στο μισό, 4,69% σε σχέση με το αρχικό 9,35% εξακολουθώντας ωστόσο να είναι κατά απόλυτη τιμή τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το ποσοστό αύξησης της μάζας.

Άθροισμα μετατοπίσεων - τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης [mm]	Ποσοστό αλλαγής μετατόπισης [%]	Άθροισμα μετατοπίσεων - τιμές της καμπύλης παρεμβολής [mm]	Ποσοστό αλλαγής μετατόπισης [%]
2.78	-9,35	2.77	-4,69
2.52		2.64	

Πίνακας 8: Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης και καμπύλης παρεμβολής

Το τελικό βέλτιστο αποτέλεσμα συμπεριλαμβανομένης της μορφής και τοποθέτησης του πακέτου των μπαταριών παρουσιάζεται στην εικόνα 64. Συγκεκριμένα διακρίνονται, η περιοχή μη-σχεδιασμού (πράσινο χρώμα), η περιοχή σχεδιασμού (γκρι-διαφανές χρώμα), το τελικό σχέδιο του πλαισίου (γαλάζιο χρώμα) και το πακέτο των μπαταριών (γκρι-διαφανές χρώμα) το οποίο βρίσκεται εσωτερικά του πλαισίου.



Εικόνα 64: Πλαίσιο εμφωλευμένου μοντέλου βελτιστοποίησης με τοποθέτηση του πακέτου των μπαταριών

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται σύγχρονες κατασκευαστικές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί το συγκεκριμένο πλαίσιο. Διατυπώνονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά το σχεδιασμό και τη διαδικασία βελτιστοποίησης καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά σε δύο κατασκευαστικές μεθόδους που εφαρμόζονται στη σύγχρονη βιομηχανία καθώς και παρουσίαση πραγματικών κατασκευασμένων πλαισίων. Στη συνέχεια, γίνεται αποτίμηση της συνολικής διαδικασίας ανάπτυξης του πλαισίου και επισημαίνονται σημαντικά συμπεράσματα με στόχο την επιτάχυνση της διαδικασίας ενώ στην τελευταία παράγραφο επισημαίνονται περαιτέρω τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης.

### 7.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύονται σύγχρονες κατασκευαστικές μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί το πλαίσιο απευθείας από την διαδικασία βελτιστοποίησης χωρίς επανασχεδιασμό. Πρόκειται για μεθόδους προσθετικής κατασκευής που παρέχουν τη δυνατότητα υψηλής κατασκευαστικής ακρίβειας και δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετρικών αντικειμένων.

Ο όρος Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing) ή εναλλακτικά Στρωματική Κατασκευή (Layer Manufacturing) καθιερώθηκε σταδιακά για την περιγραφή αυτής της σχετικά νέας ομάδας κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής, γιατί προσδιορίζει το ουσιαστικό κοινό γνώρισμα όλων αυτών των τεχνολογιών, το οποίο είναι η κατασκευή αντικειμένων μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού [18]. Αναλόγως της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών υλικά (φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά ή χαρτί) σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα), τα οποία διαμορφώνονται συνήθως σε λεπτά επίπεδα που προστίθενται σταδιακά μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.

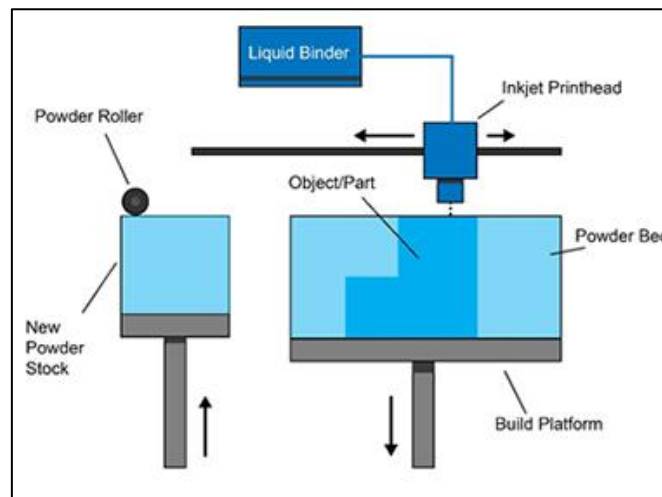
Στις πιο γνωστές τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής συγκαταλέγονται η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SL), η Κατασκευή με Εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modelling -FDM), η Συγκόλληση Κόκκων με Ψεκασμό (Powder Bed Inkjet Printing), η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λείζερ (Selective Laser Sintering - SLS), η Κατασκευή με Πολλαπλό Ψεκασμό (Multi-jet Modelling - MJM) και η Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing - LOM).



### 7.2.1 Συγκόλληση Κόκκων με Ψεκασμό

Στην μέθοδο Συγκόλλησης Κόκκων με Ψεκασμό (Powder Bed Inkjet Printing), ένα αντικείμενο κατασκευάζεται από τη συγκόλληση κόκκων σκόνης (powder) μαζί με ένα ρευστό συγκολλητικό παράγοντα. Η διαδικασία ξεκινά με την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος σκόνης πάνω στην πλατφόρμα στην οποία εξελίσσεται η διαδικασία παραγωγής. Εφόσον έχει δημιουργηθεί το πρώτο στρώμα από τα σωματίδια σκόνης ξεκινάει η διαδικασία επιλεκτικού ψεκασμού του συγκολλητικού παράγοντα, συνδέοντας τα σωματίδια της σκόνης μαζί και σχηματίζοντας ένα επίπεδο. Με το τέλος της διαδικασίας ψεκασμού η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω και επικαλύπτεται με το δεύτερο στρώμα σκόνης (βλ. εικόνα 65). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθούν όλα τα επίπεδα του αντικειμένου από κάτω προς τα πάνω και απαιτεί αρκετό χρόνο.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή, από μέταλλα (ανοξείδωτο χάλυβα) και κράματα νικελίου (Inconel) μέχρι γύψο, PMMA και άμμο πυριτίου υψηλής θερμοκρασίας για χύτευση καλουπιών.



Εικόνα 65: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας κατασκευαστικής μεθόδου 'Συγκόλλησης Κόκκων με Ψεκασμό

### 7.2.2 Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λέιζερ (SLS)

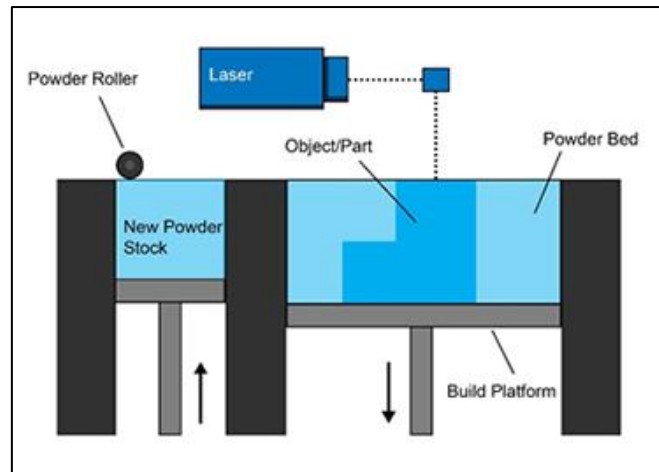
Στη μέθοδο της Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με Λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS) ακολουθείται η διαδικασία της Συγκόλλησης Κόκκων με Ψεκασμό με κύρια διαφορά ότι εδώ χρησιμοποιείται ένα υψηλής ισχύος λέιζερ CO<sub>2</sub> προκειμένου να μπορεί να κατεργαστεί μια ποικιλία υλικών σε μορφή κόκκων.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο έχουν δοκιμαστεί διάφορα υλικά όπως νάιλον, γυαλί, ελαστομερή, συνθετικά κεριά, κεραμικά καθώς και συγκεκριμένα κράματα μετάλλων. Η κατασκευή ενός αντικειμένου με χρήση SLS πραγματοποιείται μέσω της επαναληπτικής απόθεσης στρώσεων κόκκων πρώτης ύλης και της επιλεκτικής θέρμανσης τους με λέιζερ



προκειμένου να προκληθεί η κατά τόπους συσσωμάτωση/συγκόλληση των σωματιδίων της πρώτης ύλης (βλ. εικόνα 66).

Τέλος επισημαίνεται ότι, ανάλογα με το υλικό διαφέρει η ισχύς του λέιζερ, ενώ για κάποια υλικά μπορεί να απαιτηθεί περαιτέρω κατεργασία σκλήρυνσης.



Εικόνα 66: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας κατασκευαστικής μεθόδου ‘Επιλεκτικής Συσσωμάτωσης με Λέιζερ’

### 7.2.3 Παραδείγματα από τη βιομηχανία

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται δύο παραδείγματα πλαισίων δίκυκλων ηλεκτρικών οχημάτων που έχουν κατασκευαστεί με μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Πρόκειται για το ηλεκτρικό δίκυκλο ‘Light Rider’ (βλ. εικόνα 67) της εταιρίας APWorks (Airbus Group) το οποίο θεωρείται ως το πρώτο πλαίσιο στο κόσμο που κατασκευάστηκε με μέθοδο προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιώντας κόκκους διαμέτρου 30 μm ενώ για τη διαδικασία βελτιστοποίησης έγινε χρήση του OrtiStruct .

Το υλικό κατασκευής του πλαισίου ‘Scalmalloy’ έχει πυκνότητα  $2,67 \text{ g/cm}^3$  και όριο αντοχής σε εφελκυσμό 520 Μpa. Η χρήση του υλικού σε συνδυασμό με τον βέλτιστο σχεδιασμό έχει σαν αποτέλεσμα το συνολικό βάρος του οχήματος να μην ξεπερνά τα 35 kg ενώ το βάρος του πλαισίου τα 6 kg.



Εικόνα 67: Μοντέλο ηλεκτρικού δίκυκλου οχήματος ‘APWorks-Light Rider’

Το δεύτερο παράδειγμα, είναι το δίκυκλο 'Dagger' (βλ. εικόνα 68) της εταιρίας Divergent 3D. Πρόκειται για ένα δίκυκλο βασισμένο στο μοντέλο 'H2' της εταιρίας Kawasaki με τη διαφορά ότι τα μη μηχανικά μέρη όπως είναι το πλαίσιο έχουν κατασκευαστεί με τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και συγκεκριμένα με χρήση 50% ινών άνθρακα.



Εικόνα 68: Μοντέλο δίκυκλου οχήματος 'Divergent 3D- Dagger'

Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι ικανές να παράξουν ρεαλιστικά μηχανολογικά εξαρτήματα διατηρώντας υψηλές τιμές αντοχής. Με την εξέλιξη των τεχνολογιών αυτών αναμένεται η μείωση του απαιτούμενου χρόνου παραγωγής καθώς και μείωση του κόστους, παράγοντες που προσωρινά αποτελούν τροχοπέδη για την εισαγωγή τους σε γραμμή παραγωγής.

### 7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΔΙΚΥΚΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Η διαδικασία ανάπτυξης του πλαισίου όπως αυτή περιγράφεται στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας ξεκινά από το σχεδιασμό του χωρίου σχεδιασμού, την επιλογή των κατάλληλων συντομικών συνθηκών και φορτίσεων και καταλήγει στην δημιουργία του μοντέλου βελτιστοποίησης και την επιβολή των κατασκευαστικών περιορισμών. Είναι πολύ σημαντικό η διαδικασία να στηριχτεί σε ένα σωστό αρχικό σχέδιο του χωρίου σχεδιασμού το οποίο απαλλαγμένο από σύνθετα γεωμετρικά σχήματα θα επιταχύνει την ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και ταυτόχρονα τη βελτιστοποίηση τοπολογίας. Συνεπώς, ο σωστός αρχικός σχεδιασμός του χωρίου έχει άμεση επίδραση στην διαδικασία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης αφού ιδιαίτερα στην περίπτωση της βελτιστοποίησης μπορεί να 'καθοδηγήσει' τη λύση στο επιθυμητό αποτέλεσμα μέσα από την αφαίρεση υλικού σε συγκεκριμένες περιοχές.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει κατά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η επιλογή του βέλτιστου αποτελέσματος. Η μέθοδος βελτιστοποίησης τοπολογίας S.I.M.P λειτουργεί διαχωρίζοντας τις πυκνότητες των στοιχείων σε τιμές κοντά στο 0 ή στο 1. Το λογισμικό δίνει επιπρόσθετα στο χρήστη τη δυνατότητα να καθορίσει αυτός το κατώφλι επιτρεπόμενης ελάχιστης πυκνότητας και να επιλέξει μέσα από ένα πολύ μεγάλο αριθμό βέλτιστων σχεδιασμών. Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητη η διαδικασία δεύτερης ανάλυσης διατηρώντας τις αρχικές συντομικές συνθήκες και φορτίσεις και εισάγοντας τον αντίστοιχο τελικό σχεδιασμό ανάλογα με το επιθυμητό κατώφλι πυκνότητας. Η επιλογή του τελικού σχεδιασμού θα πρέπει να ικανοποιεί τα κριτήρια δυσκαμψίας που έχουν επιλεγεί κατά την αρχική ανάλυση.

Τέλος, σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας αποτελεί και ο επανασχεδιασμός της τελικής λύσης ώστε να μπορεί να κατασκευασθεί με τις υπάρχουσες κατασκευαστικές μεθόδους. Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης τοπολογίας δίνει συχνά περίπλοκες δομές και γεωμετρικά σχήματα που δεν μπορούν να κατασκευασθούν με τις συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους. Ο σχεδιαστής καλείται βασιζόμενος στο αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης να επανασχεδιάσει τη λύση ώστε να είναι κατασκευάσιμη και στη συνέχεια να προβεί σε καινούργια ανάλυση αυτής ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια αντοχής της κατασκευής.

#### 7.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η δημιουργία του μοντέλου της εμφωλευμένης βελτιστοποίησης έδωσε χρήσιμα αποτελέσματα σχετικά με την τοποθέτηση του πακέτου των μπαταριών μέσα στο χωρίο σχεδιασμού. Οι περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν συνδέονται περισσότερο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πακέτου και λιγότερο με τα δυναμικά χαρακτηριστικά ολόκληρου του δίκυκλου οχήματος. Μια ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντικά έρευνα είναι η ενσωμάτωση και χρήση περισσότερων περιορισμών που θα προέλθουν από τη δυναμική ανάλυση και οδηγική συμπεριφορά ολόκληρου του δίκυκλου οχήματος. Η θέση του κέντρου βάρους CoG, ο αεροδυναμικός συντελεστής κτλ. είναι τέτοιοι περιορισμοί, που συνδέονται άμεσα με την οδηγική συμπεριφορά και τις επιδόσεις του οχήματος.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία δεν περιορίζεται μόνο στην εφαρμογή του πλαισίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε και η εφαρμογή της μεθόδου στην βέλτιστη τοποθέτηση και τοπολογία και άλλων κρίσιμων εξαρτημάτων και μηχανισμών του οχήματος. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ο βραχίονας περιστροφής της πίσω ανάρτησης (swing arm). Η τοποθέτηση, ο σχεδιασμός και το βάρος του βραχίονα επηρεάζουν αισθητά την κινηματική της ανάρτησης (squat & dive), δηλαδή συνολικά την συμπεριφορά του δίκυκλου οχήματος.

Καταλήγοντας, τονίζεται ότι η εργασία θέτει τη βάση για την ανάπτυξη μιας πιο συνθέτης διαδικασίας βελτιστοποίησης με εφαρμογή σε αρκετούς τομείς και στάδια της ανάπτυξης οχημάτων και κατασκευών. Ο μελλοντικός στόχος που πρέπει να τεθεί είναι η περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου με χρήση περισσότερων περιορισμών και ταυτόχρονη μείωση του συνολικού απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου (30 ωρών) ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως από την βιομηχανία οχημάτων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] M. Cavazzuti and L. Splendi, "STRUCTURAL OPTIMIZATION OF AUTOMOTIVE CHASSIS:THEORY, SET UP, DESIGN," in *PICOF*, Palaiseau,Paris,France, 2012.
- [2] M. Cavazzuti, A. Baldini, E. Bertocchi, Dario Costi, E. Torricelli and P. Moruzzi, "High performance automotive chassis design: A topology optimization based approach," *Struct Multidisc Optim*, vol. 44, pp. 45-56, July 2011.
- [3] M. P. BENDSOOE and N. KIKUCHI, "GENERATING OPTIMAL TOPOLOGIES IN STRUCTURAL DESIGN USING A HOMOGENIZATION METHOD," in *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING*, vol. 71, Lyngby, Denmark & Michigan,USA, 1988, pp. 197-224.
- [4] V. Cossalter, *Motorcycle Dynamics (Second Edition)*, 2006.
- [5] D. T. Venetsanos, *DEVELOPMENT OF METHODS FOR TOPOLOGY AND SHAPE OPTIMIZATION OF MECHANICAL STRUCTURES .PhD diss.*, National Technical University of Athens, 2010.
- [6] Ε. Ε. Πλεύρης, *ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΞΕΛΙΞΗΣ. Master Thesis.*, National Technical University of Athens, 2001.
- [7] A. R. Parkinson, R. J. Balling και J. D. Hedengren, *Optimization Methods for Engineering Design (Applications and Theory)*, Provo, Utah, United States: Brigham Young University, 2013.
- [8] A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari και A. H. Alavi, *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*, Waltham, MA, USA: Elsevier, 2013.
- [9] P. A. Browne, *Topology Optimization of Linear Elastic Structures.PhD diss.*, Bath: University of Bath, 2013.
- [10] Γ. ΚΑΖΑΚΗΣ, *ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ: ΘΕΩΡΗΣΗ ΜΑΖΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΚΑΙ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ. Master Thesis.*, National Technical University of Athens, 2016.
- [11] D. Xiao, X. Liu, W. Du, J. Wang and T. He, "Application of topology optimization to design an electric bicycle main frame," *Struct Multidisc Optim*, vol. 46, pp. 913-929, 8 May 2012.
- [12] C.-F. Wu, C.-Y. Wu, M.-L. Lu and Y.-M. Lin, "A Study on Computer Aided Optimization Design for the Frame Form Generation of Electric Bicycle".
- [13] A. E. Inc., *HyperWorks OptiStruct User's Guide*, Troy, Michigan, USA: Altair Engineering Inc., 2017.

- 
- [14] J. L. i. Moré, *Comparison between a tubular frame and a beam frame .Master thesis.*, Departmenti di Ingegneria Meccanica, Milano, 2011.
- [15] M. Boccione, F. Cheli, M. Pezzola and R. Viganò, "Static and dynamic properties of a motorcycle frame: experimental and numerical approach," in *Computational Methods and Experimental Measurements XII*, vol. 41, Wessex-UK , Naples-Italy, WIT Press, 2005, pp. 517-526.
- [16] Zhou, M.; Shyy, Y.K; Thomas, H.L., "Checkerboard and minimum member size control in topology optimization," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, p. 152–158, 2001.
- [17] J. Pajot, «Optimal Design Exploration Using Global Response Surface Method:Rail Crush,» Altair, 2013.
- [18] I. Gibson , D. W. Rosen και B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- [19] P. Zeleny and M. Cadek, "Topology optimization of a bicycle part," *MM Science Journal*, p. 696, September 2015.