



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Οχημάτων

Διπλωματική εργασία

Δημήτριος Χριστοδούλου

**Σύγκριση μεθόδων βελτιστοποίησης συστήματος ανάρτησης
και ελαστικών επισώτρων φορτηγού οχήματος**

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Δ. Κουλοχέρης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση του μη γραμμικού συστήματος της ανάρτησης ενός βαρέος οχήματος, με σκοπό την βελτίωση συγκεκριμένων διαστάσεων της δυναμικής του συμπεριφοράς, όπως η άνεση των οδηγού και το κράτημα του οχήματος. Διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης υλοποιήθηκαν έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά τους στόχους του προβλήματος της βελτιστοποίησης υιοθετήθηκαν, τόσο μονοκριτηριακές όσο και πολυκριτηριακές. Ένα μοντέλο Bicycle Car χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις αλλά και στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ως διεγέρσεις χρησιμοποιήθηκαν 2 είδη εγκάρσιων εμποδίων και ένα τυχαίο προφίλ δρόμου, το οποίο υλοποιήθηκε με βάση την οδηγία ISO 8608. Τα αποτελέσματα της εργασίας συγκρίθηκαν τόσο ως προς τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης όσο και ως προς σημαντικά μεγέθη της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος.

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα και τους στόχους της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, αναλύονται διεξοδικά οι μέθοδοι βελτιστοποίησης, οι οποίες υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, αναλύεται η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων, μια αιτιοκρατική μέθοδος, καθώς και προτείνεται ένας αλγόριθμος υβριδικής βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται εκτενής αναφορά στα υπολογιστικά μοντέλα που προσομοιώνουν τις κάθετες ταλαντώσεις των οχημάτων. Η ανάλυση όλων των διαθέσιμων μοντέλων της βιβλιογραφίας ενισχύεται με την παράθεση των εξισώσεων κίνησης που τα διέπουν καθώς και με αντίστοιχα σχήματα.

Στο Κεφάλαιο 4, παραθέτονται οι διεγέρσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα αναλύονται οι τρόποι υλοποίησης ενός εγκάρσιου εμποδίου (σαμαράκι) και τυχαίων προφίλ δρόμου, βασιζόμενοι στην οδηγία ISO 8608.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας που διενεργήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Παράλληλα, γίνεται αξιολόγηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων τόσο ως προς την βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος, υπό την επίδραση διαφόρων διεγέρσεων, όσο και ως προς την αποδοτικότητα των διάφορων μεθόδων βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκαν.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρατίθενται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική αυτή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτρη Κουλοχέρη, ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο και με την καθοδήγηση του με οδήγησε με ασφάλεια προς την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Παπαϊωάννου, για τη συνεχή καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις διορθώσεις σε όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας, αλλά και την Δρ. Κλειώ Βόσσου για τις πολύτιμες συμβουλές της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου αλλά και τους φίλους μου που μου στάθηκαν σε όλη την διάρκεια της φοίτησής μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.

SUMMARY

The aim of this thesis is to optimize the non-linear suspension system of a heavy vehicle in order to improve certain aspects of its dynamic behaviour such as the ride comfort and the holding of the vehicle. Various optimization methods were implemented in order to achieve the optimum results. Different approaches regarding the objectives of the optimization problem were adopted, Single-Objective and Multi-Objective. A Bicycle Car Model was excited and optimized with three different road profiles: two road bumps and a random road profile based on the ISO 8608 regulation. The results were compared in terms of the various optimization methods as well as of important quantities of the vehicle's dynamical behaviour.

In Chapter 1, an introduction in the subject and the goals of this thesis are outlined.

In Chapter 2, the theory of applied optimization methods are discussed. Three specific methods are displayed: genetic algorithms, a deterministic method and finally an algorithm of their hybridization.

In Chapter 3, the vehicle models used to simulate the vertical vibrations of motion are outlined. The analysis of all the available models in the literature is enhanced by appropriate figures and the equations of motion of each model.

In Chapter 4, the road excitations used in this thesis are analysed. Specifically, the different implementations of a road bump are discussed, as well as the implementation of random road profiles based on the ISO 8608 regulation.

In Chapter 5, the results of this thesis are illustrated, regarding not only the improvement of the dynamical behaviour of the vehicle, but also the efficiency of the different implemented optimization methods.

Finally, in Chapter 6, the conclusions of this thesis are presented and guide lines for future work are given.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
SUMMARY	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	17
2.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	17
2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ	17
2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	18
2.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού.....	18
2.3.2 Συνάρτηση Στόχου.....	18
2.3.3 Συναρτήσεις Περιορισμών	18
2.3.4 Κριτήρια Τερματισμού	18
2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	18
2.4.1 Αιτιοκρατικές Μέθοδοι	19
2.4.2 Στοχαστικές Μέθοδοι.....	19
2.5 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ (GENETIC ALGORITHMS).....	19
2.5.1 Ιστορική Αναδρομή.....	19
2.5.2 Περιγραφή του Αλγορίθμου	20
2.5.3 Κωδικοποίηση Μεταβλητών	21
2.5.4 Επιλογή Γονέων	22
2.5.4.1 Αναλογική Επιλογή.....	22
2.5.4.2 Γραμμική Επιλογή	22
2.5.4.3 Επιλογή με Διαγωνισμό.....	22
2.5.5 Διασταύρωση	22
2.5.5.1 Μονού Σημείου (Single-Point Crossover).....	23
2.5.5.2 Διπλού Σημείου (Two-Point Crossover)	23
2.5.5.3 «Κόψε – Ράψε» (Cut and Splice Method)	23
2.5.6 Μετάλλαξη	24
2.6 ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ (GRADIENT-BASED METHOD)	24
2.6.1 Ιστορική Εξέλιξη	24
2.6.2 Περιγραφή του Αλγορίθμου	24
2.7 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ (CONSTRAINT OPTIMIZATION).....	25
2.7.1 Θανατική Ποινή (Death Penalty).....	26
2.7.2 Στατική Ποινή (Static Penalty).....	26
2.7.3 Δυναμική Ποινή (Dynamic Penalty).....	26
2.7.4 Προσαρμοστική Ποινή (Adaptive Penalty).....	26
2.7.5 Συνθήκες ΚΚΤ (KKT Conditions)	26
2.8 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (HYBRID OPTIMIZATION)	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	29
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	29
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	29
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ.....	30
3.3.1 Παθητικές Αναρτήσεις.....	31
3.3.2 Ημιενεργητικές Αναρτήσεις.....	31
3.3.3 Ενεργητικές Αναρτήσεις	31
3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	32
3.4.1 Quarter Car Model.....	32
3.4.2 Bicycle Car Model	33
3.4.3 Half Car Model.....	34
3.4.4 Full Car Model.....	36
3.4.5 Τροποποιήσεις στο Κλασσικό Μοντέλο Παθητικής Ανάρτησης.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΡΟΦΙΛ ΔΡΟΜΟΥ.....	39
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	39
4.2 ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ.....	39
4.2.1 Γενικά.....	39
4.2.2 Μετρητική Αλυσίδα.....	40
4.2.3 Διαδικασία Γένεσης Προφίλ.....	41
4.3 ΤΥΧΑΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΔΡΟΜΟΥ.....	42
4.3.1 Γενικά.....	42
4.3.2 Κατηγοριοποίηση Προφίλ – ISO 8608	42
4.3.3 Μαθηματική Υλοποίηση Προφίλ Δρόμου	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	47
5.1 ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ.....	47
5.1.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού.....	48
5.1.2 Αρχικές Τιμές	48
5.1.3 Όρια Μεταβλητών	49
5.1.4 Περιορισμοί.....	49
5.1.5 Επιβολή Ποινής.....	49
5.1.6 Αντικειμενικές Συναρτήσεις	50
5.1.6.1 Μονοκριτηριακές Συναρτήσεις.....	50
5.1.6.2 Πολυκριτηριακές Συναρτήσεις.....	50
5.1.7 Καθορισμός Παραμέτρων Μεθόδων Βελτιστοποίησης.....	51
5.1.8 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση.....	52
5.1.8.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1 ^ο : Τυπική Απόκλιση της Επιτάχυνσης του Σώματος	53
5.1.8.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2 ^ο : Τυπική Απόκλιση της Διαδρομής της Οπίσθιας Ανάρτησης	55
5.1.8.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3 ^ο : Τυπική Απόκλιση της Συμπίεσης του Οπίσθιου Ελαστικού .	57
5.1.9 Ισορροπημένη Πολυκριτηριακή Προσέγγιση	58
5.1.9.1 Αποτελέσματα Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	60
5.1.10 Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση	62
5.1.10.1 Αποτελέσματα Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	63
5.1.11 Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων μέσω Τιμής Fitness.....	65
5.1.12 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης.....	70
5.2 ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ ΥΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΕ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	73

5.2.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού.....	73
5.2.2 Αρχικές Τιμές.....	74
5.2.3 Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού.....	74
5.2.4 Περιορισμοί – Ποινές.....	74
5.2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση.....	74
5.2.5.1 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση.....	74
5.2.5.2 Πολυκριτηριακή – Ψευδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση.....	75
5.2.6 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Προσέγγισης.....	76
5.2.6.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1 ^ο : Τυπική Απόκλιση της Επιτάχυνσης του Σώματος.....	76
5.2.6.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2 ^ο : Διαδρομή Συστημάτων Ανάρτησης.....	78
5.2.6.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3 ^ο : Συμπίεση των Ελαστικών.....	80
5.2.7 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	82
5.2.8 Αποτελέσματα Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	84
5.2.9 Ανάλυση Αποτελεσμάτων με βάση την Αντικειμενική Συνάρτηση.....	85
5.2.10 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης.....	89
5.3 ΤΥΧΑΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΔΡΟΜΟΥ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ C.....	92
5.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού.....	92
5.3.2 Αρχικές Τιμές.....	92
5.3.3 Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού.....	92
5.3.4 Περιορισμοί – Ποινές.....	93
5.3.5 Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	93
5.3.5.1 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση.....	93
5.3.5.2 Πολυκριτηριακή / Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση.....	93
5.3.6 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Προσέγγισης.....	95
5.3.6.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1 ^ο : Επιτάχυνση Σώματος.....	95
5.3.6.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2 ^ο : Διαδρομή της Ανάρτησης.....	97
5.3.6.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3 ^ο : Συμπίεση Ελαστικών.....	99
5.3.7 Αποτελέσματα Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	101
5.3.8 Αποτελέσματα Ψεύδο-Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης.....	103
5.3.9 Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μέσω Τιμής Fitness.....	104
5.3.1 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης.....	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΚΩΔΙΚΕΣ.....	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	119

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	21
ΣΧΗΜΑ 2.2: SINGLE POINT CROSSOVER	23
ΣΧΗΜΑ 2.3: TWO-POINT CROSSOVER	23
ΣΧΗΜΑ 2.4: CUT AND SPLICE METHOD	23
ΣΧΗΜΑ 2.5: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ.....	24
ΣΧΗΜΑ 2.6: ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	25
ΣΧΗΜΑ 2.7: ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	27
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ	29
ΣΧΗΜΑ 3.2: ΕΛΙΚΟΕΙΔΗ ΕΛΑΤΗΡΙΑ	30
ΣΧΗΜΑ 3.3: ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	30
ΣΧΗΜΑ 3.4: ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ	31
ΣΧΗΜΑ 3.5: ΗΜΙΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ	31
ΣΧΗΜΑ 3.6: ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ	32
ΣΧΗΜΑ 3.7: QUARTER CAR MODEL	33
ΣΧΗΜΑ 3.8: BICYCLE CAR MODEL.....	33
ΣΧΗΜΑ 3.9: HALF CAR MODEL	35
ΣΧΗΜΑ 3.10: FULL CAR MODEL	36
ΣΧΗΜΑ 3.11: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ BICYCLE CAR MODEL.....	38
ΣΧΗΜΑ 4.1: ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	40
ΣΧΗΜΑ 4.2: ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ ΜΕ ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ	40
ΣΧΗΜΑ 4.3: ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ.....	40
ΣΧΗΜΑ 4.4: Ύψος ΤΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ	41
ΣΧΗΜΑ 4.5: ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ (ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΕΜΠΟΔΙΟ).....	42
ΣΧΗΜΑ 4.6: ΠΡΟΦΙΛ ΔΡΟΜΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ (ISO 8608)	45
ΣΧΗΜΑ 4.7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΠΡΟΦΙΛ ΔΡΟΜΩΝ (ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ A-D).....	45
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ	48
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	59
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	62
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΩΜΑΤΟΣ	71
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	72
ΣΧΗΜΑ 5.6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	72
ΣΧΗΜΑ 5.7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ	72
ΣΧΗΜΑ 5.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ	73
ΣΧΗΜΑ 5.9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ FITNESS	87
ΣΧΗΜΑ 5.10: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΣΩΜΑΤΟΣ	90
ΣΧΗΜΑ 5.11: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	90
ΣΧΗΜΑ 5.12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	91
ΣΧΗΜΑ 5.13: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ	91
ΣΧΗΜΑ 5.14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ.....	92
ΣΧΗΜΑ 5.15: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ FITNESS.....	106
ΣΧΗΜΑ 5.16: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΩΝ ΣΩΜΑΤΟΣ	109
ΣΧΗΜΑ 5.17: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	109
ΣΧΗΜΑ 5.18: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΡΟΧΩΝ	110
ΣΧΗΜΑ 5.19: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ	110
ΣΧΗΜΑ 5.20: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ	111

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΜΕΓΕΘΗ ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΣΤΟ QUARTER CAR MODEL	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ BICYCLE CAR MODEL	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ HALF CAR MODEL	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ FULL CAR MODEL.....	37
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΣΤΟ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ BICYCLE CAR MODEL.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ISO 8608.....	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΌΡΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΛΥΣΗΣ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ.....	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ– ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.26: ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.27: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FITNESS ΜΟΝΟΚΡΙΤΗΡΙΑΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.28: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ – ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FITNESS ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.29: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FITNESS ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ	66
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.30: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ.....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.31: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ FITNESS (BEST FITNESS)	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.32: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS)	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.33: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS) (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.34: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – BEST FITNESS	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.35: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ- BEST FITNESS	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.36: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.37: ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.38: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.39: ΌΡΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.40: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.41: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	75

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.42: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.43: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	75
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.44: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ –ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.45: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.46: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	77
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.47: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.48: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.49: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	79
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.50: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.51: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – 3 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.52: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	81
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.53: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	82
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.54: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.55: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.56: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.57: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.58: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ – ΜΟΝΟΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.59: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ –ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.60: ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ: ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.61: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ (BEST FITNESS)	87
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.62: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS).....	88
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.63: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS)	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.64: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (BEST FITNESS)	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.65: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.66: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.67: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.68: ΟΡΙΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.69: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	93
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.70: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	94
/ΠΙΝΑΚΑΣ 5.71: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.72: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.73: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.74: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.75: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.76: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.77: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ– ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	98
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.78: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο	98
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.79: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	99
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.80: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	100
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.81: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΣΕΝΑΡΙΟ 3 ^ο	100
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.82: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	101
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.83: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.84: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ – ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.85: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.86: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ – ΨΕΥΔΟ- ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.87	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.88: ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ – ΜΟΝΟΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.89: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.90: ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ – ΨΕΥΔΟ-ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.91: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ FITNESS (BEST FITNESS)	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.92: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS).....	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.93: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ (BEST FITNESS)	108

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.94: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (BEST FITNESS)	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.95: ΜΕΓΕΘΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ – ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΛΥΣΗ)	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.96: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ –ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΛΥΣΗ.....	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

Για πάνω από έναν αιώνα τα οχήματα εδάφους έχουν διαδραματίσει καίριο ρόλο στην ζωή και στην εξέλιξη του ανθρώπου. Τα οχήματα έγιναν το μέσο, στο οποίο βασίστηκε ο άνθρωπος για την μετακίνηση του, την μεταφορά προϊόντων και εν τέλει την ανάπτυξή του. Η μετακίνηση του ατόμου πλέον δεν είναι δέσμια της απόστασης, πράγμα το οποίο οδήγησε στην άρση του απομονωτισμού και στην διεύρυνση των οριζόντων των μελών της κοινωνίας καθώς η επικοινωνία και η ανταλλαγή ιδεών διευκολύνθηκε. Η μεταφορά αγαθών επέτρεψε την άνθιση του εμπορίου μεταξύ απομακρυσμένων περιοχών και οδήγησε σε ανάπτυξη ολόκληρων παραγωγικών κλάδων. Μέχρι και σήμερα η μεταφορά προϊόντων γίνεται σε μεγάλο βαθμό με χερσαία βαρέα οχήματα καθώς προτιμώνται από τα αντίστοιχα εναέρια. Όσον αφορά τα επιβατικά οχήματα, έχουν κυριαρχήσει πλήρως στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Χρησιμοποιούνται ως το κατεξοχήν μέσο μετακίνησης τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες αποστάσεις. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι απαιτήσεις που εγείρονται από το κοινωνικό σύνολο είναι υπέρογκες, καθώς υπάρχει ζήτηση για συνεχή βελτίωση των οχημάτων. Εν μέσω τόσων πολλών απαιτήσεων, είναι λογικό η μελέτη των οχημάτων να καταλαμβάνει σημαντική θέση τόσο στον τομέα της έρευνας όσο και σ αυτόν της βιομηχανίας. Μεγάλο κομμάτι της εν λόγω έρευνας εστιάζεται στις κάθετες ταλαντώσεις κατά την διάρκεια της κίνησης του οχήματος, καθώς σε αυτές συναντώνται δυο από τις βασικότερες συνιστώσες της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος: η άνεση των επιβατών και το κράτημα του οχήματος. Η πρώτη επηρεάζεται από τις διάφορες κάθετες δονήσεις που προκαλούνται εξαιτίας του εκάστοτε οδοστρώματος, και η δεύτερη αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα της ασφάλειας του οχήματος.

Η ικανοποίηση των προαναφερθέντων απαιτήσεων αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της συνεχούς προσπάθειας του ανθρώπου να βελτιώσει χαρακτηριστικά της ζωής του. Η βελτιστοποίηση ως έννοια υπάρχει από τις απαρχές του ανθρώπινου είδους και ενώ αρχικά ήταν συνώνυμη της επιβίωσης του ανθρώπου, στη συνέχεια υπηρετεί την ανάγκη του είδους για καλύτερη ποιότητα ζωής. Σήμερα, η βελτιστοποίηση ,ορισμένη πλέον μαθηματικά, εμπλέκεται σε όλους τους τομείς της έρευνας και της βιομηχανίας. Ο τομέας της Μηχανικής των Οχημάτων (Automotive Engineering) δε θα μπορούσε να αποτελέσει εξαίρεση.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια μελέτη γύρω από την εξισορρόπηση των διαφόρων αναγκών της κατασκευής οχημάτων, μέσω της βελτιστοποίησης παραμέτρων των υποσυστημάτων ενός οχήματος, με απώτερο σκοπό την συνολική βελτίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

2.1 Γενικά – Ιστορική Αναδρομή

Από την αρχή του πολιτισμού, ο άνθρωπος έχει την τάση να βελτιώνει χαρακτηριστικά της ζωής του. Τα κίνητρα του ποικίλουν ανάλογα με την ιστορική περίοδο εστίασης. Οι πρώτοι άνθρωποι ανακάλυψαν την φωτιά, έτσι ώστε να είναι σε θέση να επιβιώσουν και αργότερα τα πρώτα όπλα με σκοπό να διευκολυνθεί το κυνήγι και συνεπώς η εξασφάλιση της καθημερινής τροφής τους. Αργότερα, έχοντας διαφυλάξει την επιβίωση του, σειρά είχε η βελτίωση της ποιότητας ζωής του, ανακαλύπτοντας διάφορα εργαλεία και εκσυγχρονίζοντας τις μεθόδους κυνηγιού και καλλιέργειας της γης. Η συνεχής αυτή προσπάθεια για βελτίωση, επεκτάθηκε σε όλους τους τομείς της ζωής όπως στον τομέα της παραγωγής, της οικονομίας, αλλά ακόμα και της κοινωνικής ζωής και της καθημερινότητας. Η ιστορία βρίθκει από αντίστοιχα παραδείγματα με χαρακτηριστικά αυτών να είναι η καλλιέργεια της γης με ζώα και μηχανήματα, η ανάπτυξη των συγκοινωνιών, η βιομηχανική επανάσταση κ.α. Γίνεται κατανοητό ότι η βελτιστοποίηση, ως τάση, υπάρχει έμφυτη στον άνθρωπο, όπως και σε άλλα έμβια όντα, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση μπορεί να ορισθεί ως η διαδικασία μέσω της οποίας κάτι (διαδικασία, προϊόν, μέθοδος) αλλάζει έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατόν αποδοτικότερο, περισσότερο λειτουργικό, εξυπηρετώντας καλύτερα τους σκοπούς του.

Η ιστορία της Βελτιστοποίησης ως μαθηματική διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε 3 περιόδους σύμφωνα με το βιβλίο «Encyclopedia of Optimization». Η πρώτη εκτείνεται μέχρι τον 19^ο αιώνα, κατά την οποία δεν υπήρχε κάποια γενικευμένη μέθοδος ελαχιστοποίησης / μεγιστοποίησης συναρτήσεων, αλλά μόνο διαδικασίες οι οποίες αφορούσαν την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Η δεύτερη περίοδος εγκαινιάζεται με την διατύπωση της γενικής μεθόδου εύρεσης τοπικού ελαχίστου / μεγίστου συνεχών συναρτήσεων μέσω του μηδενισμού της πρώτης παραγώγου από το P.D Fermat. Στο θεώρημα αυτό, στηρίχθηκαν ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίες χρησιμοποιούν την πρώτη παράγωγο ως κατευθυντήρια δύναμη τους. Σπουδαίοι μαθηματικοί όπως οι Gauss, Torricelli, L'Huillier κ.α, ασχολήθηκαν ενεργά με τον κλάδο και έθεσαν τις βάσεις για την επανάσταση που βρισκόταν στα σκαριά, διαμορφώνοντας το μαθηματικό υπόβαθρο, το οποίο ήταν απαραίτητο για τους μεταγενέστερους ερευνητές. Η Τρίτη περίοδος αρχίζει περίπου το 1947 με την διατύπωση της θεωρίας του γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming), και συνεχίστηκε με την ανάπτυξη των πρώτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, η οποία οδήγησε σε ραγδαία εξέλιξη του τομέα της βελτιστοποίησης. Το 1951 ο A.W Tucker με τον μαθητή του H.W Kuhn δημοσιεύουν τις περίφημες συνθήκες βελτιστοποίησης, οι οποίες πήραν το όνομα τους (Kuhn-Tucker Conditions). Το 1954 γίνεται η πρώτη προσπάθεια συνδυαστικής βελτιστοποίησης από τους L.R Ford και D.R Fulkerson μέσω των δικτύων ροής (Flow Charts). Το 1955 είναι μια χρονιά ορόσημο για τον κλάδο καθώς αρχίζει η μελέτη στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Από τότε και στο εξής η βελτιστοποίηση γνωρίζει διαρκή ανάπτυξη, η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επανάσταση στον κλάδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών όπως προαναφέρθηκε. Η συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική δύναμη των τελευταίων, δίνει ολοένα και περισσότερες δυνατότητες για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων με εκπληκτικά αποτελέσματα. Η βελτιστοποίηση αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών, ανεξαρτήτως τομέα.

2.2 Μαθηματικός Ορισμός

Ένα γενικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \underset{x}{\text{minimize}} && f(x) \\
& \text{subject to} && g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\
& && h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, p
\end{aligned} \tag{1}$$

Όπου:

- x : διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού
- $f(x)$: συνάρτηση στόχου (objective function),
- $g_i(x) \leq 0$: συνάρτηση περιορισμών ανισότητας,
- $h_i(x) = 0$: συνάρτηση περιορισμών ισότητας,

με αντίστοιχο τρόπο ορίζεται και το πρόβλημα μεγιστοποίησης.

2.3 Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αποτελείται από συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι οποιασδήποτε μεθόδου. Αυτές είναι οι εξής:

- Μεταβλητές Σχεδιασμού
- Συνάρτηση Στόχου
- Συναρτήσεις Περιορισμών
- Κριτήρια Τερματισμού

2.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού

Πρόκειται για τις παραμέτρους που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Ο καθορισμός τους αποτελεί το πρώτο και βασικότερο βήμα σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης.

2.3.2 Συνάρτηση Στόχου

Πρόκειται για μια συνάρτηση, μέσω της οποίας κρίνεται μια λύση. Αποτελεί το «μέτρο» βελτιστοποίησης του προβλήματος. Ανάλογα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται καλείται συνάρτηση fitness είτε αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή ουσιαστικά «λύνει» το εκάστοτε πρόβλημα, για παράδειγμα σε ένα πρόβλημα ρευστοδυναμικής η συνάρτηση στόχου περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, ενώ σε ένα πρόβλημα δυναμικής συμπεριφοράς οχημάτων περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του οχήματος.

2.3.3 Συναρτήσεις Περιορισμών

Οι συναρτήσεις περιορισμών περιλαμβάνουν τόσο περιορισμούς των μεταβλητών σχεδιασμού όσο και περιορισμούς που αφορούν το πρόβλημα συνολικότερα. Οι συναρτήσεις αυτές «καθοδηγούν» το πρόβλημα προς την βέλτιστη λύση. Χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: ισότητας και ανισότητας.

2.3.4 Κριτήρια Τερματισμού

Μια τελευταία ομάδα παραμέτρων, οι οποίες συναντώνται σε κάθε αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι τα κριτήρια σύγκλισης. Πρόκειται για συνθήκες οι οποίες εφόσον ικανοποιηθούν τερματίζουν τον αλγόριθμο, καθώς «επιβεβαιώνουν» την ύπαρξη βέλτιστης λύσης. Τέτοια κριτήρια συνήθως αποτελούν η ελάχιστη διαφορά των τιμών της συνάρτησης στόχου και των περιορισμών (Tolerances), αριθμός συγκεκριμένων αξιολογήσεων, μέγιστος επιτρεπόμενος υπολογιστικός χρόνος κ.α.

2.4 Κατηγοριοποίηση Μεθόδων Βελτιστοποίησης

Η συνεχής εξέλιξη του κλάδου της μαθηματικής βελτιστοποίησης προσφέρει τον πολυσχιδή διαχωρισμό των χρησιμοποιούμενων μεθόδων βασισμένο σε διάφορα στοιχεία της διαδικασίας επίλυσης για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Οι βασικοί διαχωρισμοί που έχουν γίνει είναι ανάλογα:

- με τον υπολογισμό των παραγώγων της αντικειμενικής συνάρτησης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και της τάξης αυτών. Υπάρχουν, συνεπώς, μέθοδοι μηδενικής τάξης, όπου ουσιαστικά δεν γίνεται χρήση παραγώγων, και αντίστοιχα πρώτης, δεύτερης και ανώτερης τάξης, όπου χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες παράγωγοι,
- με τη μορφή του πεδίου ορισμού των λύσεων τους σε συνεχείς και διακριτές. Στην πρώτη κατηγορία, οι μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος προέρχονται από σετ πραγματικών τιμών συνεχούς διαστήματος, ενώ στην δεύτερη κατηγορία οι μεταβλητές λαμβάνουν τιμές από ένα διακριτό πεδίο ορισμού, όπως για παράδειγμα το σύνολο των ακέραιων αριθμών.
- με το πλήθος των πιθανών λύσεων που χειρίζεται ταυτόχρονα ένας αλγόριθμος. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι χειρίζονται μεμονωμένες λύσεις ως επί το πλείστον. Αντίθετα, πληθυσμούς υποψήφιας λύσεων χρησιμοποιούν οι στοχαστικές μέθοδοι.

2.4.1 Αιτιοκρατικές Μέθοδοι

Οι αιτιοκρατικές ή ντετερμινιστικές μέθοδοι (deterministic methods) χρησιμοποιούν τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης. Μέσω αυτών, η υποψήφια πιθανή λύση ανανεώνεται βηματικά, «οδηγώντας» την διαδικασία σε σημεία μηδενικής παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης (τοπικά ή ολικά ακρότατα). Η κατηγορία αυτή βασίζεται στο θεώρημα του P.D. Fermat που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Πρόκειται για μεθόδους, οι οποίες συγκλίνουν σε μικρό αριθμό βημάτων, είναι σε θέση να χειρίζονται μεγάλο πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού. Το βασικό μειονέκτημα των ντετερμινιστικών μεθόδων είναι ότι εγκλωβίζονται συχνά σε τοπικά ακρότατα, αδυνατώντας να εντοπίσουν το ζητούμενο ολικό. Χαρακτηριστικές παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος της απότομης καθόδου, η μέθοδος Newton, η συζυγής μέθοδος.

2.4.2 Στοχαστικές Μέθοδοι

Οι στοχαστικές μέθοδοι (stochastic methods) στηρίζονται στην δημιουργία τυχαίων πιθανών λύσεων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, εντοπίζεται «τυχαία» η βέλτιστη λύση. Χρησιμοποιούνται για την επίλυση δύσκολων και δύσκαμπτων προβλημάτων καθώς κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι δεν παγιδεύονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα. Ένα μειονέκτημα τους είναι ο αυξημένος υπολογιστικός χρόνος που απαιτούν για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ακριβώς λόγω της τυχαιότητας του αλγορίθμου. Στις μεθόδους αυτές εντάσσονται η πλειοψηφία των «Εξελικτικών Τεχνικών», όπου για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης μοντελοποιούν και «μιμούνται» κάποιο φαινόμενο φυσικό, κοινωνικό είτε βιολογικό. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά περιβάλλοντα που επιδεικνύουν. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται μέθοδοι όπως οι Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolutionary Strategies), οι αποικίες μυρμηγκιών (Ant Colonies) και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), στους οποίους θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια της εργασίας.

Στην παρούσα εργασία, έγινε χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων: μιας στοχαστικής (Γενετικοί Αλγόριθμοι), μιας αιτιοκρατικής (Μέθοδος Βασισμένη στις Παραγώγους) και τέλος ενός συνδυασμού των δυο προαναφερθέντων (Υβριδική Βελτιστοποίηση).

2.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

2.5.1 Ιστορική Αναδρομή

Το 1831, ο Charles Darwin σαλπάρει με την φρεγάτα Beagle ως άμισθος φυσιοδίφης για ένα υπερπόντιο ταξίδι συλλογής δειγμάτων, το οποίο κράτησε 5 χρόνια. Οι εμπειρίες και οι παρατηρήσεις που συνέλλεξε

ο Darwin στην διάρκεια αυτού του ταξιδιού, αποτέλεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη της θεωρίας της εξέλιξης, η οποία αναλύθηκε στο βιβλίο του με τίτλο «On the origins of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life». Ο Darwin εισήγαγε την έννοια της φυσικής επιλογής, η οποία ήρθε να ανατρέψει τις ήδη υπάρχουσες θεωρίες σχετικά με την προέλευση των ειδών (Lamarck κα). Η φυσική επιλογή δρα με σκοπό να διατηρήσει και να συσσωρεύσει ελάσσονες γενετικές μεταλλάξεις, οι οποίες έχουν ευεργετικά αποτελέσματα σε κάποιο είδος και συμβάλλουν αποφασιστικά στην επιβίωση του. Για παράδειγμα, έστω ότι μελετάται ένα συγκεκριμένο είδος έμβιου οργανισμού. Ένα από τα μέλη του πληθυσμού του αναπτύσσει ένα λειτουργικό πλεονέκτημα, το οποίο απουσιάζει από τα υπόλοιπα μέλη. Οι απόγονοι του κληρονομούν το χαρακτηριστικό αυτό και με τη σειρά τους και μεταφέρουν το χαρακτηριστικό στους δικούς τους απογόνους. Τα κατώτερα άτομα του πληθυσμού, δηλαδή αυτά που δεν φέρουν το εν λόγω πλεονέκτημα, σταδιακά θα εκλείψουν με αποτέλεσμα τα ανώτερα είδη να αποτελέσουν ολόκληρο τον πληθυσμό του είδους. Συνεπώς φυσική επιλογή ονομάζεται η διατήρηση ενός λειτουργικού χαρακτηριστικού, το οποίο επιτρέπει στο είδος να επιβιώσει με μεγαλύτερη άνεση.

Έναν αιώνα αργότερα, το 1950 ο Alan Turing εμπνευσμένος από τη θεωρία της εξέλιξης πρότεινε την «Μηχανική Μάθηση» (Machine Learning). Η υπολογιστική προσομοίωση της εξέλιξης ξεκίνησε το 1954 με το έργο του Nils Aall Barricelli, ο οποίος χρησιμοποίησε τον υπολογιστή στο Ινστιτούτο Προηγμένων Ερευνών στο Princeton του New Jersey. Η δημοσίευση του όμως δεν γίνει ευρέως γνωστή. Ξεκινώντας το 1957, ο Αυστραλός γενετιστής Alex Fraser δημοσίευσε μια σειρά εγγράφων για την προσομοίωση της τεχνητής επιλογής των οργανισμών με πολλαπλές θέσεις που ελέγχουν ένα μετρήσιμο χαρακτηριστικό τους. Οι προσομοιώσεις του Fraser έχουν ενσωματωθεί πλέον σε όλες τις παραλλαγές των σύγχρονων Γενετικών Αλγορίθμων. Άλλοι αξιοσημείωτοι ερευνητές που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη των Γενετικών Αλγορίθμων είναι μεταξύ άλλων οι Bremermann, George Friedman, Richard Friedberg. Ουσιαστικά οι γενετικοί αλγόριθμοι ήρθαν στο προσκήνιο μέσω του έργου του John Holland στις αρχές του 1970 και έμεινε γνωστός για το ομώνυμο θεώρημα σχημάτων του (Holland's Schema Theorem). Στα τέλη του 1980 η General Electric λανσάρει το πρώτο πακέτο γενετικών αλγορίθμων, ένα mainframe βασισμένο στο σχεδιασμό βιομηχανικών διεργασιών.

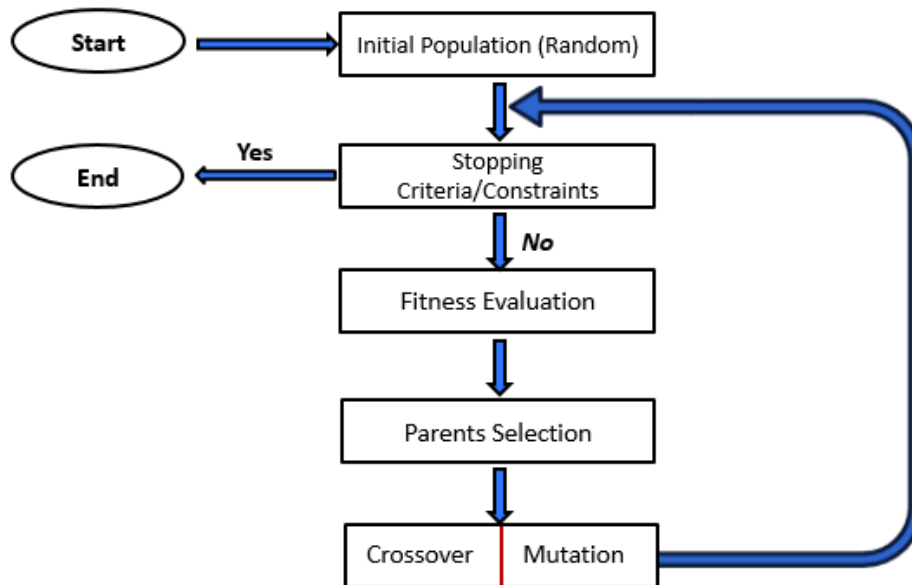
2.5.2 Περιγραφή του Αλγορίθμου

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν μια στοχαστική μέθοδο, η οποία διαχειρίζεται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων. Αρχικά δημιουργείται ένας πληθυσμός τυχαίων ατόμων. Τα άτομα αυτά αξιολογούνται και ιεραρχούνται σύμφωνα με την συνάρτηση fitness που επιλύει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, μέσω διαδικασιών επιλογής που θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα, επιλέγεται ορισμένος αριθμός ατόμων, που ονομάζονται γονείς. Οι γονείς στη συνέχεια θα «αναπαραχθούν», μέσω ειδικής διαδικασίας που ονομάζεται «Διασταύρωση». Μέσω της διαδικασίας της επιλογής, εξασφαλίζεται ότι τα δυνατότερα χαρακτηριστικά της παρούσας γενιάς θα μεταφερθούν στην επόμενη, η οποία είναι το αποτέλεσμα της διασταύρωσης.

Στη συνέχεια, ενεργούν άλλες διαδικασίες του αλγορίθμου όπως η μετάλλαξη και ο ελιτισμός. Οι απόγονοι τελικά αξιολογούνται και ιεραρχούνται με τη σειρά τους μέσω της fitness. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου οι περιορισμοί και τα κριτήρια τερματισμού, τα οποία ορίστηκαν από τον προγραμματιστή ικανοποιηθούν. Στο τέλος της διαδικασίας έχει εντοπιστεί, τις περισσότερες φορές, το επιθυμητό ολικό ελάχιστο / μέγιστο. Ακολουθεί βηματική και σχηματική απεικόνιση του αλγορίθμου.

- **Βήμα 1°:** Αρχικοποίηση Πληθυσμού (Τυχαίες Τιμές).
- **Βήμα 2°:** Αξιολόγηση Μελών Πληθυσμού μέσω Συνάρτησης Fitness.
- **Βήμα 3°:** Επιλογή γονέων από τον υπάρχοντα Πληθυσμό.

- **Βήμα 4°:** Αναπαραγωγή γονέων μέσω της Διασταύρωσης.
- **Βήμα 5°:** Μετάλλαξη παιδιών μέσω της Μετάλλαξης.
- **Βήμα 6°:** Έλεγχος Κριτηρίων Σύγκλισης και Περιορισμών
 - Αν ικανοποιούνται τότε εφαρμόζεται το Βήμα 7°
 - Σ' αντίθετη περίπτωση, επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το Βήμα 2° μέχρι ότου να ικανοποιηθεί το Βήμα 6°
- **Βήμα 7°:** Τέλος της Διαδικασίας.



Σχήμα 2.1: Αλγόριθμος Γενετικού Αλγορίθμου

Στις επόμενες υποενότητες, θα αναλυθούν περαιτέρω οι διάφορες ειδικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη διαδικασία βελτιστοποίησης με Γενετικούς Αλγορίθμους

2.5.3 Κωδικοποίηση Μεταβλητών

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε μεθόδου βελτιστοποίησης αποτελεί η κωδικοποίηση των διαφόρων μεταβλητών. Όλες οι περαιτέρω διαδικασίες του εκάστοτε αλγορίθμου δομούνται βάσει της κωδικοποίησης αυτής. Στους Γενετικούς Αλγορίθμους η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται είναι είτε δυαδική είτε πραγματική. Η πρώτη, και κλασσική, μορφή των αλγορίθμων ακολουθούσε την δυαδική κωδικοποίηση, για αυτό το λόγο η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα βασιστεί σε αυτήν. Η πραγματική κωδικοποίηση εμφανίστηκε σε μεταγενέστερες μορφές του αλγορίθμου.

Αν θεωρήσουμε \vec{x} το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού με N συνιστώσες $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_N)$, η δυαδική κωδικοποίηση απαιτεί τον καθορισμό ενός κατώτατου και ανώτατου ορίου $(x_{i,L}, x_{i,U})$ δυαδικών ψηφίων ανά μεταβλητή i , $i \in N$. Το πλήθος n_i καθορίζει την ακρίβεια διακριτοποίησης της i -οστής μεταβλητής, που δίνεται από την σχέση

$$\delta x_i = \frac{x_i - x_{i,L}}{2^{n_i - 1}} \quad (2)$$

Μετά τον καθορισμό όλων των κωδικοποιήσεων, διαμορφώνεται το χρωμόσωμα (ενιαία δυαδική συστοιχία) το οποίο αποτελείται από όλα τα επιμέρους δυαδικά string. Παραδείγματος χάρη, έστω ότι έχουμε 4 μεταβλητές σχεδιασμού ($N=4$) και αντίστοιχα $n_1=4$, $n_2=5$, $n_3=4$ και $n_4=6$, ένας πιθανός συνδυασμός χρωμοσωμάτων είναι ο ακόλουθος:

$$\begin{cases} x_1 = 0100 \\ x_2 = 10110 \\ x_3 = 1001 \\ x_4 = 011001 \end{cases} \quad (3)$$

$$x = 0100|10110|1001|011001 \quad (4)$$

2.5.4 Επιλογή Γονέων

Η επιλογή των γονέων (selection) αποτελεί την πρώτη διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου με σκοπό την μετέπειτα αναπαραγωγή τους.

2.5.4.1 Αναλογική Επιλογή

Αξιολόγηση όλων των μελών του πληθυσμού και ανάθεση στο καθένα μιας τιμής fitness.

- Κανονικοποίηση του συνόλου των τιμών.
- Ταξινόμηση των νέων τιμών με φθίνουσα σειρά.
- Υπολογισμός συσσωρευτικών τιμών fitness
- Επιλογή τυχαίου αριθμού R μεταξύ 0 και 1.
- Επιλογή όλων των ατόμων, των οποίων η συσσωρευτική τιμή είναι μεγαλύτερη του R.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιλεγθεί ο απαραίτητος αριθμός των γονέων. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται «αναλογική επιλογή» (fitness proportional selection).

2.5.4.2 Γραμμική Επιλογή

Μια άλλη μέθοδος επιλογής γονέων είναι η «γραμμική επιλογή» (linear selection). Σύμφωνα μ' αυτήν, τα μέλη του πληθυσμού ταξινομούνται καθαρά με βάση την τιμή fitness και επιλέγονται τα μ πρώτα άτομα. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται τα άτομα τα οποία φέρουν τις πιο δυνατές λύσεις, ενώ εκείνα με ασθενέστερα χαρακτηριστικά παραμερίζονται και τελικά εκλείπουν. Όμως και στις δυο προαναφερθείσες μεθόδους εγκυμονεί ο κίνδυνος της επικράτησης μια συγκριτικά καλύτερης λύσης πρόωρα στον αλγόριθμο με αποτέλεσμα την παγίδευση της μεθόδου σε τοπικό ακρότατο.

2.5.4.3 Επιλογή με Διαγωνισμό

Στην «επιλογή με διαγωνισμό» (tournament selection), επιλέγεται τυχαία κάθε φορά ένας αριθμός ατόμων, τα οποία διαγωνίζονται με βάση την τιμή fitness για να επιλεγθούν ως γονείς. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των «διαγωνιζομένων», τα αδύναμα μέλη του πληθυσμού έχουν λιγότερες πιθανότητες να επιλεγούν για την μετέπειτα διασταύρωση. Το τελευταίο κομμάτι της διαδικασίας επιλογής είναι ο ελιτισμός (elitism). Η διαδικασία αυτή μεταφέρει αυτούσια τα πρώτα n άτομα με τις ισχυρότερες τιμές fitness στην επόμενη γενιά (ο αριθμός n επιλέγεται από τον χρήστη). Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται ότι τα ισχυρότερα χαρακτηριστικά ενός πληθυσμού θα κληρονομηθούν αυτούσια στην επόμενη γενιά, αποφεύγοντας το στάδιο της διασταύρωσης, κατά την οποία κάποιο ευεργετικό χαρακτηριστικό μπορεί να χαθεί. Το στοιχείο του ελιτισμού επηρεάζει σαφώς την διαδικασία επίλυσης, καθώς η επιλογή μεγάλου αριθμού ελιτισμού, μπορεί να επιφέρει την πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου σε τοπικό ελάχιστο.

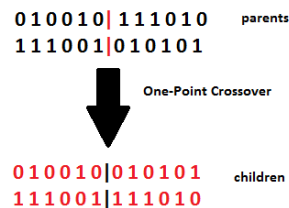
2.5.5 Διασταύρωση

Η διασταύρωση (Crossover) αποτελεί την δεύτερη κατά σειρά διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου. Τα άτομα που έχουν επιλεγθεί κατά την προηγούμενη διαδικασία διασταυρώνονται με διάφορες μεθόδους,

έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι απόγονοι τους, οι οποίοι αποτελούν την νέα γενιά του Γενετικού Αλγορίθμου. Αρχικά η κωδικοποίηση των μεταβλητών ήταν αποκλειστικά δυαδική, έτσι αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές διασταύρωσης για δυαδικές μεταβλητές. Οι πιο διαδεδομένες είναι η διασταύρωση απλού (single-point crossover) και διπλού σημείου (two-points crossover).

2.5.5.1 Μονού Σημείου (Single-Point Crossover)

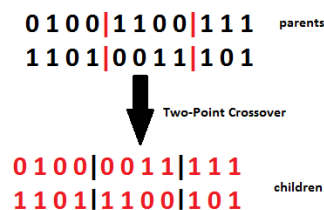
Οι δυο επιλεγμένοι απόγονοι χωρίζονται σε ένα επιλεγμένο σημείο (στο σχήμα 1.2 έχει επιλεγεί το τέλος του 6^{ου} bit). Οι δυο απόγονοι προκύπτουν από την σύνθεση των δυο γονέων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 .



Σχήμα 2.2: Single Point Crossover

2.5.5.2 Διπλού Σημείου (Two-Point Crossover)

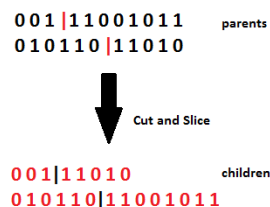
Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 δυο απόγονοι δημιουργούνται με τον διαχωρισμό των γονέων σε δυο σημεία και την μεταξύ τους σύνθεση. Η αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται και στη διασταύρωση ενός σημείου.



Σχήμα 2.3: Two-Point Crossover

2.5.5.3 «Κόψε – Ράψε» (Cut and Splice Method)

Μια άλλη μέθοδος είναι η λεγόμενη «Κόψε - Ράψε» (cut and splice method). Σε αυτή τη μέθοδο, οι δυο γονείς έχουν διαφορετικό «σημείο διασταύρωσης», το οποίο οδηγεί τα παιδιά στο να μην έχουν το ίδιο μήκος χρωμοσώματος (Σχήμα 1.4).



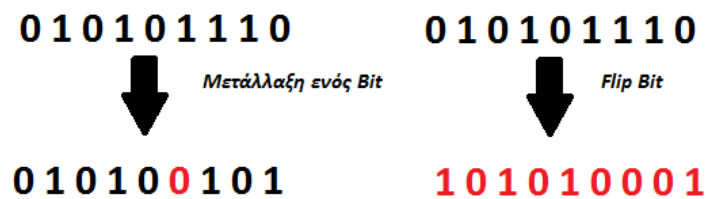
Σχήμα 2.4: Cut and Splice Method

Αργότερα υλοποιήθηκαν και άλλες μέθοδοι διασταύρωσης που αφορούν δυαδική αλλά και πραγματική κωδικοποίηση μεταβλητών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα: «διακριτή διασταύρωση», «ομοιόμορφη διασταύρωση», «διασταύρωση τριών γονέων» κα .

2.5.6 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη (mutation) αποτελεί την τρίτη, και τελευταία, κατά σειρά διαδικασία του γενετικού αλγορίθμου. Χρησιμοποιείται με σκοπό να διατηρήσει την γενετική ποικιλομορφία των πληθυσμών από γενιά σε γενιά. Η μετάλλαξη μεταβάλλει μια ή περισσότερες τιμές γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής μια λύση μπορεί να αλλάξει τελείως, με αποτέλεσμα ο Γενετικός Αλγόριθμος να είναι σε θέση να εντοπίσει καλύτερη λύση. Η μετάλλαξη συμβαίνει κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας σύμφωνα με μια πιθανότητα μετάλλαξης, η οποία ορίζεται από τον χρήστη. Συνήθως η τιμή της πιθανότητας αυτής είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε να μην ενισχύεται υπερβολικά η τυχαιότητα του αλγορίθμου. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι μετάλλαξης είναι οι εξής:

- **Μετάλλαξη ενός Bit:** η τιμή ενός ή περισσότερων bit αλλάζει σε τυχαίες θέσεις του χρωμοσώματος (Σχήμα 03).
- **«Flip Bit»:** ο τελεστής μετάλλαξης αλλάζει τις τιμές όλων των bit του επιλεγμένου χρωμοσώματος.
- **Ομοιόμορφη:** ένα χρωμόσωμα παράγει έναν απόγονο. Η μέθοδος επιλέγει τυχαία από το διάστημα των μεταβλητών μια συνιστώσα και παράγει το διάστημα του απογόνου το οποίο διαφέρει από του γονέα εξαιτίας της επιλεγμένης συνιστώσας, η οποία έχει «μεταλλαχθεί». Η νέα συνιστώσα είναι ισοπίθανα το άνω ή το κάτω όριο της μεταβλητής σχεδιασμού.



Σχήμα 2.5: Μέθοδοι Μετάλλαξης

2.6 Αιτιοκρατική Μέθοδος (Gradient-Based Method)

2.6.1 Ιστορική Εξέλιξη

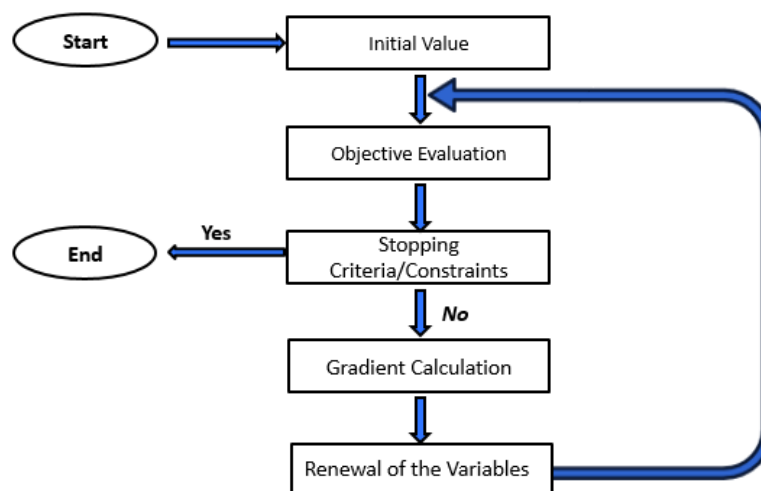
Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι ξεκινούν την ιστορία τους με την διατύπωση του θεωρήματος των στάσιμων σημείων από τον Pierre D. Fermat. Το θεώρημα αυτό αποτελεί ουσιαστικά μια μέθοδο εύρεσης τοπικών μεγίστων/ελαχίστων διαφορίσιμων συναρτήσεων. Μέσω του θεωρήματος του Fermat αποδεικνύεται ότι κάθε τοπικό μέγιστο αποτελεί στατικό σημείο, δηλαδή σημείο όπου η παράγωγος της συνάρτησης είναι ίση με μηδέν. Το θεώρημα αυτό αποτέλεσε μόνο την αρχή. Ο Newton και ο Leibnitz ανέπτυξαν την μαθηματική ανάλυση που αποτελεί την βάση του Λογισμού των Μεταβολών (Calculation of Variations).

Έτσι, τον 19^ο αιώνα οι πρώτοι αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αρχίζουν να εμφανίζονται, ενώ πολλοί μεγάλοι μαθηματικοί και επιστήμονες ανέπτυξαν περαιτέρω τον Λογισμό των Μεταβολών (Weierstrass, Steiner, Hamilton κα). Το 1806 ο Legendre παρουσιάζει την μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων και τελικά το 1847 ο Cauchy παρουσιάζει την μέθοδο βασισμένη στις παραγώγους. Έναν αιώνα αργότερα το 1951 ο H.W. Kuhh και ο A.D. Tucker θέτουν τις συνθήκες βελτιστοποίησης για μη γραμμικά προβλήματα, ενώ λίγα χρόνια πριν είχε αναπτυχθεί η μέθοδος Simplex. Τα επόμενα χρόνια, εξαιτίας και της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι μέθοδοι έγιναν γρηγορότερες και πιο αποτελεσματικές.

2.6.2 Περιγραφή του Αλγορίθμου

Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι εξετάζουν μια υποψήφια λύση σε κάθε επανάληψη. Αρχικά, ο χρήστης δίνει μια αρχική τιμή, η οποία αποτελεί ένα πιθανό συνδυασμό λύσεων. Η συνολική αυτή λύση αξιολογείται σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση που περιγράφει το εκάστοτε πρόβλημα. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Εφόσον αυτοί παραβιάζονται τότε αναζητείται η επόμενη πιθανή λύση. Οι τιμές των μεταβλητών ανανεώνονται σύμφωνα με τις παραγώγους τις αντικειμενικής συνάρτησης. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος καθοδηγεί την μέθοδο στην προσέγγιση ακροτάτων. Στην επόμενη επανάληψη, η νέα λύση επαναξιολογείται μέχρις ότου επιτευχθεί η ικανοποίηση τόσο των περιορισμών όσο και των κριτηρίων σύγκλισης. Ακολουθεί βηματική και σχηματική αναπαράσταση του αλγορίθμου.

- **Βήμα 1^ο**: Αρχική Λύση δοσμένη από το χρήστη.
- **Βήμα 2^ο**: Αξιολόγηση λύσης από την Αντικειμενική Συνάρτηση.
- **Βήμα 3^ο**: Έλεγχος Περιορισμών και Κριτηρίων Σύγκλισης.
 - I. Αν ικανοποιούνται τότε εφαρμόζεται το Βήμα 7^ο
 - II. Σ' αντίθετη περίπτωση, επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το Βήμα 2^ο μέχρι ότου να ικανοποιηθεί το Βήμα 3^ο
- **Βήμα 4^ο**: Υπολογισμών Μερικών Παραγώγων Αντικειμενικής Συνάρτησης.
- **Βήμα 5^ο**: Ανανέωση Μεταβλητών Σχεδιασμού μέσω των Παραγώγων
- **Βήμα 6^ο**: Επιστροφή στο Βήμα 2^ο.



Σχήμα 2.6: Αιτιοκρατική Μέθοδος

2.7 Βελτιστοποίηση με Περιορισμούς (Constraint Optimization)

Τα περισσότερα ρεαλιστικά προβλήματα βελτιστοποίησης περιλαμβάνουν ένα πλήθος περιορισμών, οι οποίοι πρέπει να ικανοποιηθούν, έτσι ώστε η βελτιστοποίηση να θεωρηθεί επιτυχημένη. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν είτε απευθείας τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος είτε τις εμπεριέχουν έμμεσα, καθώς τα υπό περιορισμό μεγέθη έχουν προέλθει εξ αυτών. Οι περισσότερες μέθοδοι λειτουργούν ορθότερα εφόσον αντιμετωπίζουν ένα «ελεύθερο» πρόβλημα (unconstrained problem), έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες μετατρέπουν ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε ελεύθερο. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή της επιβολής ποινής (penalty function). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αλλάζει, και ονομάζεται επαυξημένη (augmented). Στην αρχική προστίθενται όροι ποινής, οι οποίοι «τιμωρούν» την συνάρτηση κάθε φορά που ένας περιορισμός παραβιάζεται. Όταν ο περιορισμός ικανοποιηθεί ο αντίστοιχος όρος ποινής

μηδενίζεται. Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορα είδη συναρτήσεων ποινών, κάποιες από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του προβλήματος που θα λυθεί στην παρούσα εργασία.

2.7.1 Θανατική Ποινή (Death Penalty)

Πρόκειται ίσως για την πιο απλή μέθοδο αλλά και την πιο «απόλυτη». Εδώ όταν η λύση δεν ικανοποιεί τους δοθέντες περιορισμούς τότε απλά απορρίπτεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται ίση με ∞ .

2.7.2 Στατική Ποινή (Static Penalty)

Σε αυτή τη μέθοδο το επίπεδο παραβίασης του κάθε περιορισμού είναι αδιάφορο, καθώς επιβάλλεται μια σταθερή (στατική) ποινή για κάθε περιορισμό που παραβιάζεται.

2.7.3 Δυναμική Ποινή (Dynamic Penalty)

Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιείται κυρίως στους γενετικούς αλγόριθμους. Οι τιμές ποινής, σε αυτήν την περίπτωση, εξαρτώνται από τον τρέχοντα αριθμό γενιάς.

2.7.4 Προσαρμοστική Ποινή (Adaptive Penalty)

Στις μεθόδους αυτής της κατηγορίας, οι παράμετροι ποινής ανανεώνονται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου βασισμένες σε πληροφορίες που συγκεντρώνουν από το πρόβλημα.

2.7.5 Συνθήκες KKT (KKT Conditions)

Όπως αναφέρθηκε, οι μέθοδοι επιβολής ποινής εφαρμόζονται τόσο σε στοχαστικές όσο και σε ντετερμινιστικές μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές εμφανίζουν διάφορα προβλήματα και συνεπώς έχουν εν μέρει αντικατασταθεί από άλλες μεθόδους που επικεντρώνονται στην επίλυση των εξισώσεων Karush - Kuhn - Tucker ή KKT συνθηκών. Οι συνθήκες αυτές είναι αναγκαίες για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με περιορισμούς. Αν το πρόβλημα είναι κυρτό, τότε οι συνθήκες KKT θεωρούνται αναγκαίες και ικανές.

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot G_i(x^*) = 0 \quad (5)$$

$$G_i(x^*) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \quad (6)$$

$$G_i(x^*) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \quad (7)$$

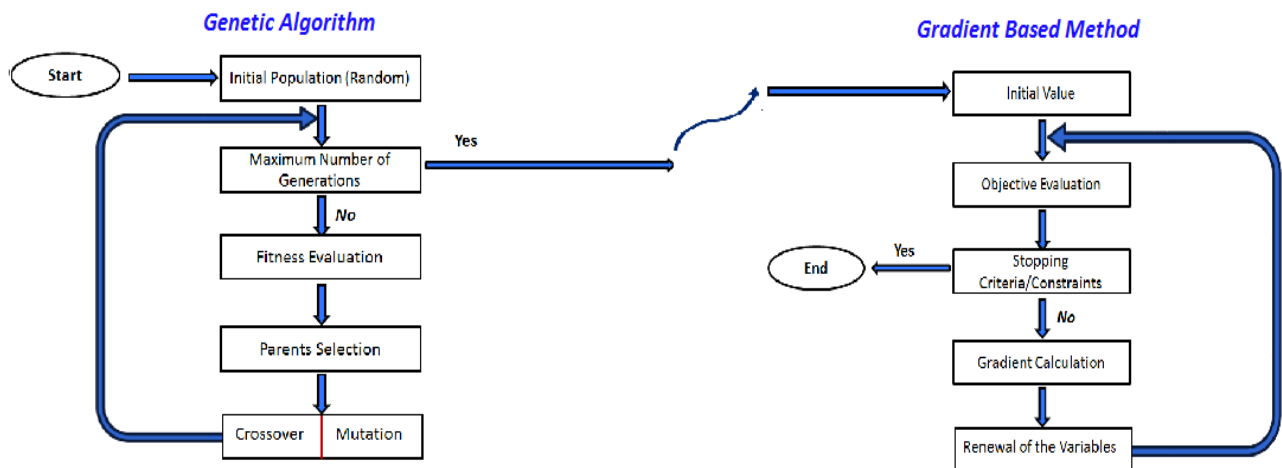
$$\lambda_i \cdot G_i(x^*) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \quad (8)$$

$$\lambda_i \geq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m \quad (9)$$

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει την ακύρωση των παραγώγων μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης και των ενεργών περιορισμών σε ένα υποψήφιο σημείο λύσης. Για να ακυρωθούν οι παράγωγοι, οι τελεστές Lagrange λ_i είναι απαραίτητοι έτσι ώστε να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ των αποκλίσεων των μεγεθών της αντικειμενικής συνάρτησης και των παραγώγων των περιορισμών. Από τις δυο τελευταίες εξισώσεις, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ο πολλαπλασιαστής Lagrange των περιορισμών οι οποίοι ικανοποιούνται τίθενται ίσοι με 0, καθώς μόνο οι ενεργοί περιορισμοί λαμβάνουν μέρος σε αυτή τη «διαδικασία ακύρωσης». Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν μέθοδοι οι οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση τόσο των συναρτήσεων ποινών όσο και την επίλυση των εξισώσεων KKT.

2.8 Υβριδική Βελτιστοποίηση (Hybrid Optimization)

Μια νέα τάση έχει αναπτυχθεί στον χώρο της Βελτιστοποίησης τα τελευταία χρόνια, όπως και σε άλλους επιστημονικούς τομείς: η Υβριδοποίηση των Μεθόδων. Κατά την τελευταία, δυο ή περισσότερες μέθοδοι, τεχνικές, αλγόριθμοι συνδυάζονται με σκοπό να λυθεί το ίδιο πρόβλημα. Ο συνδυασμός τους μπορεί να σημαίνει είτε την ταυτόχρονη, είτε την σειριακή (η μια μετά την άλλη) χρήση τους, ακόμα και την εναλλαγή τους κατά την διάρκεια επίλυσης του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό, τα πλεονεκτήματα των εκάστοτε μεθόδων επιστρατεύονται συνδυαστικά, έτσι ώστε να βρεθεί η καλύτερη δυνατή λύση.



Σχήμα 2.7: Υβριδική Βελτιστοποίηση

Όσο αφορά την βελτιστοποίηση, κατά την υβριδοποίηση χρησιμοποιούνται συνήθως μια στοχαστική μέθοδος και στη συνέχεια μια αιτιοκρατική. Η στοχαστική μέθοδος επιστρατεύεται πρώτη έτσι ώστε να εντοπιστεί το πεδίο των βέλτιστων λύσεων και στη συνέχεια η αιτιοκρατική εντοπίζει την βέλτιστη λύση. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι συνήθως χρησιμοποιούνται στο πρώτο σκέλος ενώ στο δεύτερο και τελικό στάδιο συναντούμε ένα πλήθος διαφορετικών αιτιοκρατικών μεθόδων όπως η μέθοδος της απότομης καθόδου, η μέθοδος Newton κ.α. Η διαδικασία έχει ως εξής: αρχικά ενεργοποιείται ο Γενετικός Αλγόριθμος και επενεργεί για μικρό αριθμό γενεών αλλά με αυξημένο μέγεθος υποψήφιου πληθυσμού. Έτσι ο αλγόριθμος σαρώνει ένα αρκετά ευρύ πεδίο του χώρου λύσεων και αναζητά την υποψήφια λύση. Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο Αιτιοκρατικός Αλγόριθμος. Η τελική λύση του Γενετικού, αποτελεί το σημείο εκκίνησης του Αιτιοκρατικού. Η μέθοδος αυτή «αντιστρέφει» το μειονέκτημα των Αιτιοκρατικών αλγόριθμων. Πλέον η «παγίδευση» του σε «τοπικό» ακρότατο είναι θεμιτή καθώς κατά πάσα πιθανότητα εξαιτίας του Γενετικού που προηγήθηκε, το εν λόγω ακρότατο είναι Ολικό. Υπάρχουν και άλλες παραλλαγές του αλγορίθμου που αναλύθηκε όμως η παρούσα είναι η πιο συνηθισμένη. Ακολουθεί βηματική και σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας.

- Βήμα 1^ο: Τυχαία Αρχικοποίηση Πληθυσμού
- Βήμα 2^ο: Έναρξη Γενετικού Αλγορίθμου.
- Βήμα 3^ο: Τελική Λύση Γ.Α. → Αρχική Λύση Αιτιοκρατικής Μεθόδου.
- Βήμα 4^ο: Έναρξη Α.Μ.
- Βήμα 5^ο: Τελική Λύση Α.Μ. → Βέλτιστη Λύση Προβλήματος Βελτιστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Υπολογιστικά Μοντέλα Οχημάτων

3.1 Γενικά

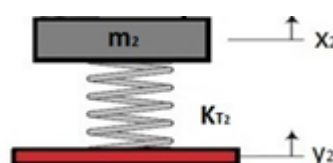
Η υπολογιστική προσομοίωση αποτελεί σήμερα αναπόσπαστο κομμάτι της ερευνητικής διαδικασίας. Αποτελεί το κύριο εργαλείο των ερευνητών, καθώς μέσω αυτής είναι σε θέση να υλοποιούν νέες ιδέες και μεθόδους και να εξετάζουν την ορθότητα τους. Βασικό κομμάτι της προσομοίωσης είναι η μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος που εξετάζεται. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν συνήθως την μαθηματική έκφραση του κάθε προβλήματος και συγκεκριμένα τις εξισώσεις οι οποίες το διέπουν. Τα μοντέλα διαφέρουν ως προς το βαθμό ακρίβειας τους, καθώς το καθένα εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς: για αρχικές δοκιμές χρησιμοποιούνται απλά μοντέλα, έτσι ώστε να αποκτηθεί μια γενική εικόνα αναφορικά με τη συμπεριφορά του προβλήματος, ενώ όταν επιζητείται ακρίβεια υπολογισμών, επιστρατεύονται πολυπλοκότερα μοντέλα. Συνήθως, όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του μοντέλου, το τελευταίο προσομοιάζει ορθότερα το πρόβλημα που αναπαρίσταται, καθώς μειώνεται ο αριθμός των παραδοχών που λαμβάνονται. Όσον αφορά τον τομέα του Automotive Engineering, η υπολογιστική προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των διαφόρων οχημάτων αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της ερευνητικής διαδικασίας. Έχει αναπτυχθεί πλήθος μοντέλων διαφορετικών βαθμών ελευθερίας, τα οποία προσομοιάζουν ένα όχημα με διάφορους τρόπους και αφορούν την συμπεριφορά του οχήματος σε σχέση με τις κάθετες διεγέρσεις που δέχονται τα ελαστικά του οχήματος εξαιτίας του δρόμου. Τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν συνήθως τρία υποσυστήματα:

- ένα το οποίο περιγράφει το/τα ελαστικά,
- ένα το οποίο περιγράφει το σύστημα ανάρτησης που χρησιμοποιείται και
- ένα για το κυρίως σώμα του οχήματος.

Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των διαφόρων μοντέλων που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, με τις παραδοχές οι οποίες τα διέπουν, και παρατίθενται οι βασικές εξισώσεις κίνησης του οχήματος ανά περίπτωση.

3.2 Σύστημα Ελαστικών

Το ελαστικό αποτελεί το πρώτο υποσύστημα ενός ολοκληρωμένου μοντέλου οχήματος. Πρόκειται για ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας μοντελοποίησης καθώς αποτελεί την άμεση επαφή του οχήματος με το δρόμο, δηλαδή τη διέγερση. Το ελαστικό παραλαμβάνει τα φορτία από το δρόμο και τα μεταφέρει προς το επόμενο σύστημα, το σύστημα ανάρτησης. Συνήθως μοντελοποιείται με ένα σύστημα ελατηρίου – αποσβεστήρα. Στην παρούσα εργασία, ο αποσβεστήρας παραλήφθηκε, καθώς η απόσβεση είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν του συστήματος ανάρτησης, ενώ ταυτόχρονα το μέτρο ελαστικότητας είναι αρκετά μεγαλύτερο. Συνεπώς η παράβλεψη της απόσβεσης του ελαστικού επιφέρει στην πραγματικότητα μικρές αποκλίσεις. Έτσι η δύναμη η οποία παραλαμβάνεται από το σύστημα της ανάρτησης είναι της μορφής $F_{tire} = k_t \cdot (x - y)$, όπου k_t είναι η σκληρότητα του ελατηρίου του ελαστικού, x είναι η μετατόπιση της μη αναρτημένης μάζας m και y είναι η διέγερση που δέχεται το όχημα.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο Ελαστικού

3.3 Σύστημα Ανάρτησης

Πρόκειται ίσως για το σημαντικότερο σύστημα ενός υπολογιστικού μοντέλου, και αυτό το οποίο επιδέχεται τις μεγαλύτερες αλλαγές καθώς υπάρχει πληθώρα συστημάτων στην βιβλιογραφία. Στην πραγματικότητα το σύστημα αυτό αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των τροχών και του σώματος του οχήματος και επιτρέπει την σχετική κίνηση μεταξύ αυτών. Η ανάρτηση συνεισφέρει στο κράτημα του οχήματος αλλά και στην ομαλή μετάβαση των φορτίων στο κυρίως σώμα του οχήματος και στους επιβάτες, και συνεπώς συνδέεται άμεσα με την άνεση των επιβατών. Οι δυο αυτοί στόχοι της ανάρτησης έρχονται συχνά σε αντιπαράθεση, οπότε η σωστή επιλογή των παραμέτρων της ανάρτησης κρίνεται αναγκαία, ανάλογα με τους στόχους που τίθενται από τον ερευνητή. Στην αντιπαράθεση και το συμβιβασμό των προαναφερθέντων αναγκών του οχήματος, έχει βασιστεί και το μεγαλύτερο μέρος της παρούσας εργασίας.

Βασικό εξάρτημα των αναρτήσεων αποτελούν τα ελατήρια. Τα ελατήρια αποθηκεύουν δυναμική ενέργεια όταν παραμορφώνονται, την οποία έχει μετατρέψει από κινητική, κατά τη μη ομαλή κίνηση του οχήματος. Τα ελατήρια, κατά την κίνηση, συμβάλλουν στη μόνιμη επαφή των τροχών με το οδόστρωμα.



Σχήμα 3.2: Ελικοειδή Ελατήρια

Τα είδη ελατηρίων που υπάρχουν σε αναρτήσεις είναι τα ελικοειδή ελατήρια, τα ημι-ελλειπτικά ελατήρια (σούστες), οι στρεπτικές δοκοί και ορισμένα πνευματικά συστήματα. Λόγω της μειωμένης σκληρότητας τους τα ελικοειδή ελατήρια συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με κάποια αντιστρεπτική ράβδο. Η ράβδος αυτή, συνδέει τους τροχούς του ίδιο άξονα και περιορίζει τις κλίσεις του οχήματος.

Όσον αφορά τον αποσβεστήρα του οχήματος, μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε θερμική. Χρησιμοποιείται για να μειώνει τις ταλαντώσεις του οχήματος και να αυξάνει τις δυνάμεις που ασκούνται στον τροχό, ώστε να βελτιώνεται η πρόσφυση. Οι αποσβεστήρες σε συνδυασμό με τα ελατήρια και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης καθορίζουν την οδική συμπεριφορά του οχήματος, δηλαδή την άνεση που προσφέρει το όχημα στους επιβάτες, καθώς και τη δυνατότητα να επιταχύνεται κατά τον εγκάρσιο και διαμήκη άξονά του.

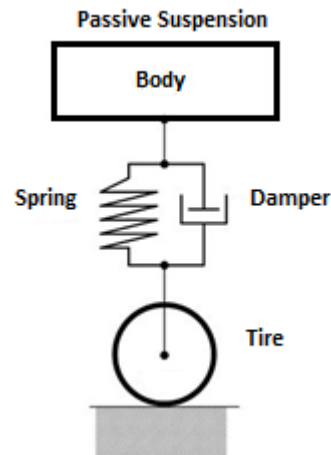


Σχήμα 3.3: Αποσβεστήρας Ανάρτησης

Οι αναρτήσεις που χρησιμοποιούνται σε οχήματα χωρίζονται σε παθητικές, ημι-ενεργητικές και ενεργητικές, ανάλογα με την δυνατότητα τους να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους κατά την διάρκεια κίνησης του οχήματος.

3.3.1 Παθητικές Αναρτήσεις

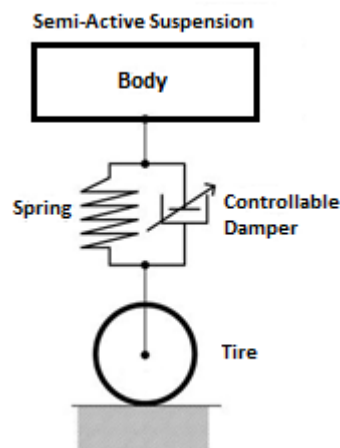
Οι παθητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των οχημάτων, τα χαρακτηριστικά τους (μέτρο ελαστικότητας, απόσβεση) είναι σταθερά και ανεξάρτητα των συνθηκών οδήγησης. Οι αναρτήσεις αυτές αποτελούν έναν συμβιβασμό μεταξύ άνεσης και επιδόσεων.



Σχήμα 3.4: Παθητική Ανάρτηση

3.3.2 Ημιενεργητικές Αναρτήσεις

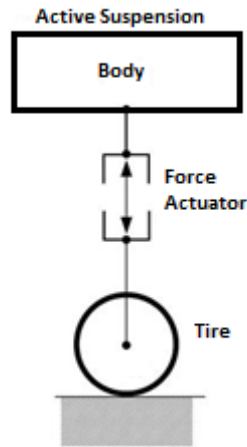
Οι ημι-ενεργητικές αναρτήσεις δίνουν στον οδηγό την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ ορισμένων ρυθμίσεων, επηρεάζοντας δυναμικά τα χαρακτηριστικά της ανάρτησης. Συνήθως οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν μεταβολές στον συντελεστή απόσβεσης είτε επεμβαίνοντας στην γεωμετρία του αποσβεστήρα, είτε με τη χρήση μαγνητοροϊκών υγρών.



Σχήμα 3.5: Ημιενεργητική Ανάρτηση

3.3.3 Ενεργητικές Αναρτήσεις

Οι ενεργητικές αναρτήσεις χρησιμοποιούν αισθητήρες και επενεργητές ώστε να μεταβάλλουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος καθώς και την ενέργεια του συστήματος ανάρτησης, με σκοπό την βελτίωση της οδικής συμπεριφοράς ανάλογα με τις στιγμιαίες απαιτήσεις του οχήματος.



Σχήμα 3.6: Ενεργητική Ανάρτηση

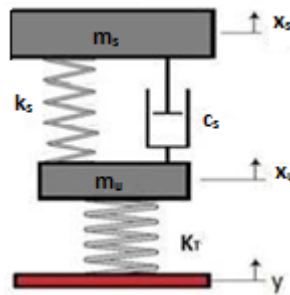
3.4 Ανάλυση Μοντέλων Οχημάτων

Τα μοντέλα οχημάτων αποτελούν ουσιαστικά μαθηματικές αναπαραστάσεις των κάθετων κινήσεων του οχήματος. Προσομοιάζουν είτε ένα μέρος του οχήματος είτε ολόκληρο. Τα πιο συνηθισμένα, και αυτά που θα αναλυθούν παρακάτω περιλαμβάνουν μοντελοποίηση του $\frac{1}{4}$ του οχήματος (Quarter Car Model), του $\frac{1}{2}$ του οχήματος (Bicycle Car/Half Car Model) και τέλος ολόκληρου του οχήματος (Full Car Model). Σε μια υπολογιστική προσομοίωση, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων διαδραματίζει καίριο ρόλο, έτσι ώστε το πείραμα να προσεγγίζει την πραγματικότητα. Η αξιοπιστία της προσομοίωσης εν τέλει εξαρτάται και από την πολυπλοκότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται. Έτσι με ένα Quarter Car Model τα αποτελέσματα θα είναι αρκούτως αξιόπιστα αλλά για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής προσομοίωσης απαιτείται η χρήση του Full Car Model. Η επιλογή ενός τέτοιου μοντέλου έχει ως μειονεκτήματα όμως την πολυπλοκότητα των εξισώσεων προς επίλυση, όπως θα γίνει φανερό σε επόμενη ενότητα, αλλά και τον αρκετά αυξημένο υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για τα λύση του. Τελικά το πιο συνετό θα ήταν να πραγματοποιηθούν αρχικές προσομοιώσεις με ένα σχετικά απλό μοντέλο, έτσι ώστε να υπάρξουν προκαταρκτικά αποτελέσματα, τα οποία θα οδηγήσουν το πείραμα προς το καλύτερο δυνατό σενάριο το οποίο θα δοκιμαστεί σε ένα πιο περίπλοκο μοντέλο.

Ακολουθεί πλήρης ανάλυση των διαφόρων μοντέλων καθώς και η παράθεση των βασικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση το σύστημα ανάρτησης θα θεωρείται παθητικό με γραμμικά στοιχεία (ελατήρια, αποσβεστήρες). Εξειδικευμένες αναλύσεις που αφορούν την μη γραμμικότητα των στοιχείων θα ακολουθήσουν σε επόμενη ενότητα. Για την κατάστρωση των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Lagrange, και η παράθεση τους θα γίνει με την μορφή εξισώσεων και όχι πινάκων καθώς με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιήθηκαν σε όλο το εύρος της εργασίας.

3.4.1 Quarter Car Model

Το μοντέλο αυτό, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξέταση και την βελτιστοποίηση της κάθετης κίνησης του σώματος του οχήματος (body bounce), αποτελείται από δυο μάζες: την μη αναρτημένη m_1 (μάζα ενός τροχού) και την αναρτημένη μάζα m . Η τελευταία αποτελεί την μάζα του οχήματος (1/4 της ολικής). Επιπλέον όπως φαίνεται και στο Σχήμα 06 υπάρχει το σύστημα ανάρτησης που αποτελείται από ένα γραμμικό ελατήριο (k_s) και έναν γραμμικό αποσβεστήρα (c_s). Τέλος το ελαστικό μοντελοποιείται με ένα γραμμικό ελατήριο σταθεράς k_t .



Σχήμα 3.7: Quarter Car Model

Εξισώσεις Δυναμικής Συμπεριφοράς

Μετατόπιση Σώματος:

$$m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot (x_s - x_u) + c_s \cdot (\dot{x}_s - \dot{x}_u) = 0 \tag{1}$$

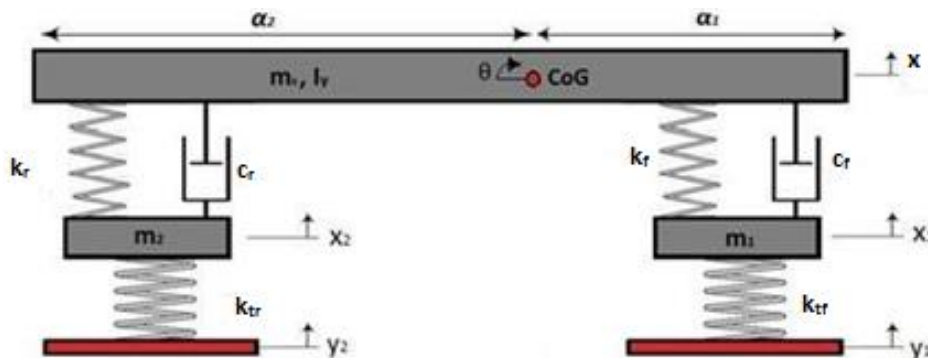
Μετατόπιση Τροχού:

$$m_u \cdot \ddot{x}_u - k_s \cdot (x_s - x_u) - c_s \cdot (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + k_t \cdot (x_u - y) = 0 \tag{2}$$

Πίνακας 3.1: Μεγέθη Εμπλεκόμενα στο Quarter Car Model

Εμπλεκόμενα Μεγέθη	
Σύμβολο	Περιγραφή
m_s	Αναρτημένη Μάζα (Σώμα) (kg)
m_u	Μη Αναρτημένη Μάζα (kg)
k_u	Σκληρότητα Ελαστικού (N/m)
c_u	Απόσβεση Ελαστικού (N·s/m)
k_s	Σκληρότητα Ελατηρίου Ανάρτησης (N/m)
C_s	Απόσβεση Ανάρτησης (N·s/m)

3.4.2 Bicycle Car Model



Σχήμα 3.8: Bicycle Car Model

Η χρήση του μοντέλου αυτού επιτρέπει την εξέταση όχι μόνο των κάθετων μετατοπίσεων του οχήματος αλλά και την μελέτη των φαινομένων καλπασμού που προκαλούνται. Περιλαμβάνει τον εμπρόσθιο και τον οπίσθιο τροχό του οχήματος καθώς και το σώμα αυτού. Αποτελεί ουσιαστικά το 1/2 του οχήματος. Το κυρίως σώμα του οχήματος μοντελοποιείται σαν μια άκαμπτη ράβδος με μάζα ίση με το 1/2 της συνολικής του οχήματος, ενώ χρησιμοποιείται επίσης η ροπή αδράνειας καλπασμού ίση με την μισή της συνολικής

αντίστοιχα. Το μοντέλο διαθέτει 4 βαθμούς ελευθερίας όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα: την μετατόπιση του σώματος x , την μετατόπιση των μη αναρτημένων μαζών x_1 και x_2 και την γωνία καλπασμού θ .

Πίνακας 3.2: Εμπλεκόμενα Μεγέθη στο Bicycle Car Model

Εμπλεκόμενα Μεγέθη	
Σύμβολο	Περιγραφή
m	Αναρτημένη Μάζα (Σώμα) (kg)
I_z	Ροπή Αδράνειας Καλπασμού (kg·m ²)
$a_{1,2}$	Αποστάσεις από Κέντρο Μάζας (m)
$m_{f,r}$	Μη Αναρτημένη Μάζα (Εμπρός/Πίσω) (kg)
$K_{tf,tr}$	Σκληρότητα Ελαστικού (Εμπρός/Πίσω) (N/m)
$K_{f,r}$	Σκληρότητα Ελατηρίου Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (N·s/m)
$C_{f,r}$	Απόσβεση Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (N·s/m)

Εξισώσεις Δυναμικής Συμπεριφοράς

Μετατόπιση Σώματος:

$$m \cdot \ddot{x} + c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) + c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) + k_f \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta) + k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) = 0 \quad (3)$$

Γωνία Καλπασμού:

$$I_z \cdot \ddot{\theta} - a_1 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) - a_2 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) - a_1 \cdot k_f \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta) + a_2 \cdot k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) = 0 \quad (4)$$

Μετατόπιση Εμπρόσθιου Τροχού:

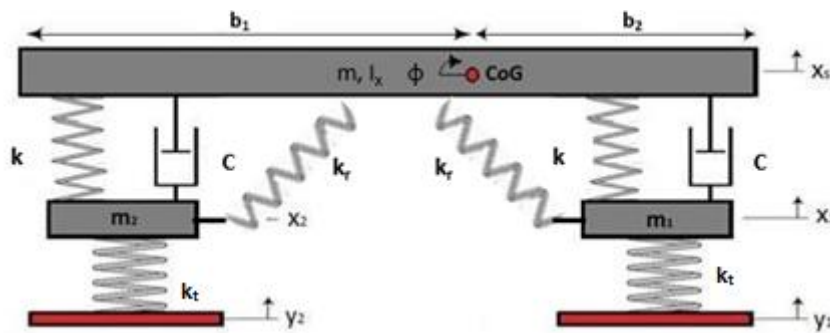
$$m_f \cdot \ddot{x}_1 - c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) - k_f \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta) + k_{tf} \cdot (x_1 - y_1) = 0 \quad (5)$$

Μετατόπιση Οπίσθιου Τροχού:

$$m_r \cdot \ddot{x}_2 - c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) - k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) + k_{tr} \cdot (x_2 - y_2) = 0 \quad (6)$$

3.4.3 Half Car Model

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την μελέτη των φαινομένων εκτροπής. Σε αυτή την περίπτωση μοντελοποιείται είτε ο εμπρόσθιος είτε ο οπίσθιος άξονας με τους αντίστοιχους τροχούς. Το μοντέλο περιλαμβάνει 4 βαθμούς ελευθερίας: την μετατόπιση του σώματος x , τις μετατοπίσεις των δυο τροχών (είτε οπίσθιων είτε εμπρόσθιων) και την γωνία εκτροπής ϕ . Το επιπλέον στοιχείο που εισάγεται σε αυτό το μοντέλο είναι η αντιστρεπτική δοκός, η οποία μοντελοποιείται σαν ελατήριο σκληρότητας k_R . Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο θα είναι διαφορετικό ανάλογα με το αν θα επιλέξουμε το εμπρόσθιο ή το οπίσθιο σύστημα λόγω των διαφορετικών συστημάτων ανάρτησης και κατανομής μαζών. Έτσι τα δυο συστήματα που περιλαμβάνονται σε αυτό το μοντέλο όπως και το σύστημα του ελαστικού θεωρούνται ίδια (για αυτό το λόγο δεν έχουμε διαφορετικές παραμέτρους- ελατήρια, αποσβέσεις κλπ.).



Σχήμα 3.9: Half Car Model

Πίνακας 3.3: Εμπλεκόμενα Μεγέθη στο Half Car Model

Εμπλεκόμενα Μεγέθη	
Σύμβολο	Περιγραφή
m	Αναρτημένη Μάζα (Σώμα) (kg)
I_x	Ροπή Αδράνειας Εκτροπής (kg·m ²)
$b_{1,2}$	Αποστάσεις από άξονα (m)
$m_{1,2}$	Μη Αναρτημένη Μάζα Τροχός 1,2 (kg)
k_t	Σκληρότητα Ελαστικού Τροχός 1,2 (N/m)
k	Σκληρότητα Ελατηρίου Ανάρτησης Τροχός 1,2 (N/m)
c	Απόσβεση Ανάρτησης Τροχός 1,2 (N·s/m)
k_R	Σκληρότητα Αντιστρεπτικής Δοκού (N/m)

Εξισώσεις Δυναμικής Συμπεριφοράς

Μετατόπιση Σώματος

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi}) + c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi}) + k \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi) + k \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \phi) = 0 \quad (7)$$

Γωνία Εκτροπής

$$I_x \cdot \ddot{\phi} + b_1 \cdot c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi}) - b_2 \cdot c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi}) + b_1 \cdot k \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi) - b_2 \cdot k \cdot (x - x_2 + b_2 \cdot \phi) + k_R \cdot \phi = 0 \quad (8)$$

Μετατόπιση Τροχού #1

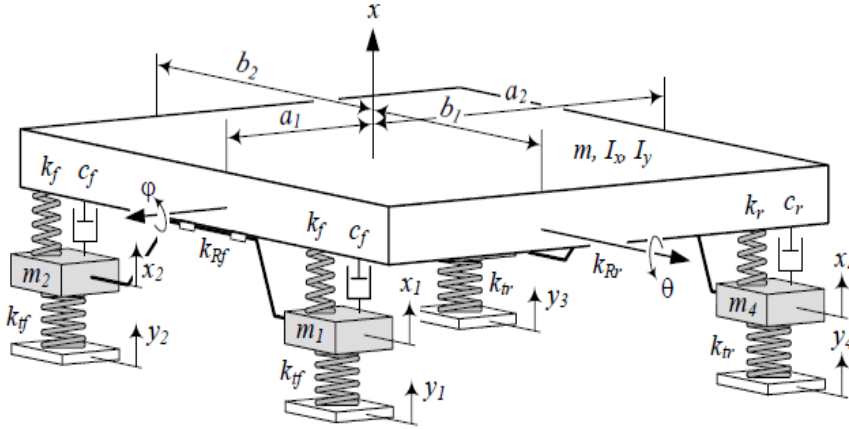
$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 - c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi}) - k \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi) + k_t \cdot (x_1 - y_1) = 0 \quad (9)$$

Μετατόπιση Τροχού #2

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 - c \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi}) - k \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \phi) + k_t \cdot (x_2 - y_2) = 0 \quad (10)$$

3.4.4 Full Car Model

Το μοντέλο αυτό εξετάζει το σύνολο του οχήματος και όλα τα φαινόμενα που προαναφέρθηκαν (εκτροπή, καλπασμός, κάθετη κίνηση σώματος κλπ). Έχει 7 βαθμούς ελευθερίας: την μετατόπιση του σώματος x , την γωνία καλπασμού θ , την γωνία εκτροπής ϕ και τις μετατοπίσεις των 4 τροχών x_1, x_2, x_3, x_4 .



Σχήμα 3.10: Full Car Model

Εξισώσεις Δυναμικής Κατάστασης

Μετατόπιση Σώματος:

$$\begin{aligned}
 m \cdot \ddot{x} + c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) + c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) + & \quad (11) \\
 + c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) + c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) + k_f \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) + \\
 + k_f \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) + k_r \cdot (x - x_3 - b_1 \cdot \phi + a_2 \cdot \theta) \\
 + k_r \cdot (x - x_4 + b_2 \cdot \phi + a_2 \cdot \theta) = 0
 \end{aligned}$$

Γωνία Εκτροπής

$$\begin{aligned}
 I_x \cdot \ddot{\phi} + b_1 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) - b_2 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) - & \quad (12) \\
 - b_1 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) + b_2 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) + \\
 + b_1 \cdot k_f \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) - b_2 \cdot k_f \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) - \\
 - b_1 \cdot k_r \cdot (x - x_3 - b_1 \cdot \phi + a_2 \cdot \theta) + b_2 \cdot k_r \cdot (x - x_4 + b_2 \cdot \phi + a_2 \cdot \theta) + \\
 + k_R \cdot (\phi - \frac{x_1 - x_2}{w}) = 0
 \end{aligned}$$

Γωνία Καλπασμού

$$\begin{aligned}
 I_y \cdot \ddot{\theta} - a_1 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) - a_1 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\phi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) + & \quad (13) \\
 + a_2 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) + a_2 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2 \cdot \dot{\phi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) - \\
 - a_1 \cdot k_f \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) - a_1 \cdot k_f \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \phi - a_1 \cdot \theta) +
 \end{aligned}$$

$$+a_2 \cdot k_r \cdot (x - x_3 - b_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \theta) + a_2 \cdot k_r \cdot (x - x_4 + b_2 \cdot \varphi + a_2 \cdot \theta) = 0$$

Μετατόπιση Τροχού #1

$$m_f \cdot \ddot{x}_1 - c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{\varphi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) - k_f \cdot (x - x_1 + b_1 \cdot \varphi - a_1 \cdot \theta) - k_R \cdot \frac{1}{w} \cdot \left(\varphi - \frac{x_1 - x_2}{w} \right) + k_{tf} \cdot (x_1 - y_1) = 0 \quad (14)$$

Μετατόπιση Τροχού #2

$$m_f \cdot \ddot{x}_2 - c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 - b_2 \cdot \dot{\varphi} - a_1 \cdot \dot{\theta}) - k_f \cdot (x - x_2 - b_2 \cdot \varphi - a_1 \cdot \theta) - k_R \cdot \frac{1}{w} \cdot \left(\varphi - \frac{x_1 - x_2}{w} \right) + k_{tf} \cdot (x_2 - y_2) = 0 \quad (15)$$

Μετατόπιση Τροχού #3

$$m_r \cdot \ddot{x}_3 - c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_3 - b_1 \cdot \dot{\varphi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) - k_r \cdot (x - x_3 - b_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \theta) + k_{tr} \cdot (x_3 - y_3) = 0 \quad (16)$$

Μετατόπιση Τροχού #4

$$m_r \cdot \ddot{x}_4 - c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_4 + b_2 \cdot \dot{\varphi} + a_2 \cdot \dot{\theta}) - k_r \cdot (x - x_4 + b_2 \cdot \varphi + a_2 \cdot \theta) + k_{tr} \cdot (x_4 - y_4) = 0 \quad (17)$$

$$w = b_1 + b_2 \quad (18).$$

Πίνακας 3.4: Εμπλεκόμενα Μεγέθη στο Full Car Model

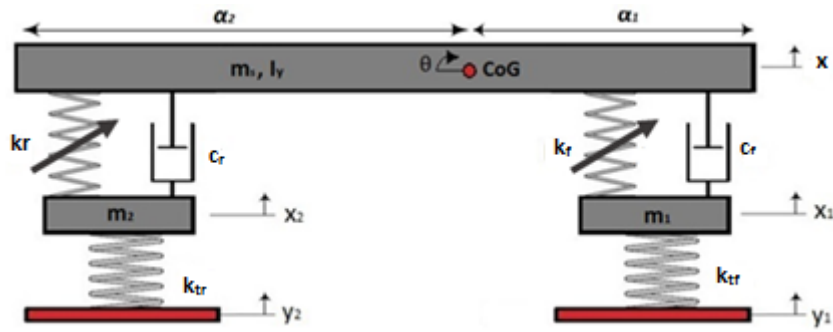
Εμπλεκόμενα Μεγέθη	
Σύμβολο	Περιγραφή
m	Αναρτημένη Μάζα (Σώμα) (kg)
I _x	Ροπή αδράνειας Εκτροπής (kg·m ²)
I _y	Ροπή αδράνειας Καλπασμού (kg·m ²)
a _{1,2}	Αποστάσεις από Κέντρο Μάζας (m)
b _{1,2}	Αποστάσεις από άξονα (m)
M _{f,r}	Μη Αναρτημένη Μάζα Τροχός 1,2 (kg)
k _{tf,tr}	Σκληρότητα Ελαστικού Τροχός 1,2 (N/m)
K _{f,r}	Σκληρότητα Ελατηρίου Ανάρτησης Τροχός 1,2 (N/m)
C _{f,r}	Απόσβεση Ανάρτησης Τροχός 1,2 (N·s/m)

3.4.5 Τροποποιήσεις στο Κλασικό Μοντέλο Παθητικής Ανάρτησης

Στις προηγούμενες, οι παράμετροι που εμπλέκονται στις εξισώσεις θεωρούνται γραμμικοί. Όμως στην πραγματικότητα οι αποσβεστήρες και τα ελατήρια που χρησιμοποιούνται στις αναρτήσεις οχημάτων είναι κατά κόρον μη γραμμικά. Έτσι για το υπόλοιπο της εργασίας αυτής τα ελατήρια των συστημάτων ανάρτησης θα θεωρούνται μη γραμμικά. Η μη γραμμικότητα υπεισέρχεται στις εξισώσεις δυναμικής κατάστασης με τον μη γραμμικό όρο που εισάγεται στην δύναμη του ελατηρίου της ανάρτησης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$F_{spring} = k_{linear} \cdot x + k_{nonlinear} \cdot x^3 \quad (16)$$

Όπου x είναι η συνολική διαδρομή του ελατηρίου και k_{linear}, k_{nonlinear} είναι οι σταθερές του μη γραμμικού ελατηρίου. Το μοντέλο Bicycle Car που αναλύθηκε στην ενότητα 3.4.2 παρατίθεται ξανά, με προσθήκη τους μη γραμμικούς όρους στις εξισώσεις που προηγήθηκαν.



Σχήμα 3.11: Τροποποιημένο Bicycle Car Model

Πίνακας 3.5: Εμπλεκόμενα Μεγέθη στο Τροποποιημένο Bicycle Car Model

Εμπλεκόμενα Μεγέθη	
Σύμβολο	Περιγραφή
m	Αναρτημένη Μάζα (Σώμα) (kg)
I _z	Ροπή Αδράνειας Καλπασμού (kg·m ²)
a _{1,2}	Αποστάσεις από Κέντρο Μάζας (m)
m _{f,r}	Μη Αναρτημένη Μάζα (Εμπρός/Πίσω) (kg)
K _{tf,tr}	Σκληρότητα Ελαστικού (Εμπρός/Πίσω) (N/m)
K _{f,r}	Σκληρότητα Γραμμικού Ελατηρίου Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (N/m)
C _{f,r}	Απόσβεση Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (N·s/m)
k _{nf,nr}	Σκληρότητα Μη Γραμμικού Ελατηρίου Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (N/m)

Εξισώσεις Δυναμικής Κατάστασης

Μετατόπιση Σώματος:

$$m \cdot \ddot{x} + c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) + c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) + k_f(x - x_1 - a_1 \cdot \theta) + k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) - k_{nf} \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta)^3 - k_{nr} \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta)^3 = 0 \quad (17)$$

Γωνία Καλπασμού:

$$I_z \cdot \ddot{\theta} - a_1 \cdot c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) - a_2 \cdot c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) - a_1 \cdot k_f \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta) + a_2 \cdot k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) - a_1 \cdot k_{nf} \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta)^3 + a_2 \cdot k_{nr} \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta)^3 = 0 \quad (19)$$

Μετατόπιση Εμπρόσθιου Τροχού:

$$m_f \cdot \ddot{x}_1 - c_f \cdot (\dot{x} - \dot{x}_1 - a_1 \cdot \dot{\theta}) - k_f \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta) - k_{nf} \cdot (x - x_1 - a_1 \cdot \theta)^3 + k_{tf} \cdot (x_1 - y_1) = 0 \quad (20)$$

Μετατόπιση Οπίσθιου Τροχού:

$$m_r \cdot \ddot{x}_2 - c_r \cdot (\dot{x} - \dot{x}_2 + a_2 \cdot \dot{\theta}) - k_r \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta) - k_{nr} \cdot (x - x_2 + a_2 \cdot \theta)^3 + k_{tr} \cdot (x_2 - y_2) = 0 \quad (21)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Προφίλ Δρόμου

4.1 Γενικά

Με τον όρο Προφίλ Δρόμου ονομάζουμε ένα δισδιάστατο κομμάτι από μια επιφάνεια δρόμου, θεωρημένο πάνω σε μια φανταστική γραμμή. Τα προφίλ κατά μήκος του κάθετου άξονα δείχνουν την ανύψωση και την κορυφή (peak) του δρόμου όπως επίσης τις αυλακώσεις που υπάρχουν και άλλες διαταραχές. Τα διαμήκη προφίλ (longitudinal profiles) δείχνουν το βαθμό σχεδίασης του δρόμου και την σκληρότητα του. Ένα προφίλ δρόμου είναι δυνατό να μετρηθεί πάνω σε οποιαδήποτε συνεχή φανταστική γραμμή πάνω στο επίπεδο. Το ίδιο προφίλ δρόμου είναι δυνατόν να προκύψει από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μόνο στην περίπτωση που η φανταστική γραμμή πάνω στην οποία επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις είναι η ακριβώς ίδια. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι σε ένα συγκεκριμένο δρόμο αντιστοιχούν πολλά διαφορετικά προφίλ ανάλογα με την γραμμή που επιλέγεται προς μέτρηση. Συνήθως επιλέγεται μια μέση γραμμή, η οποία ακολουθεί την γενική γεωμετρία του δρόμου. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη ακρίβεια τότε μετρούνται δυο γραμμές, μια για κάθε τροχό του οχήματος (αριστερό – δεξί).

Τα περισσότερα από αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ισχύουν για την γένεση προφίλ με μετρήσεις. Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία αφορά την υπολογιστική γένεση προφίλ δρόμου. Πρακτικά, με αυτή τη μέθοδο επιλέγεται πάλι μια γραμμή του υποτιθέμενου δρόμου ο οποίος θεωρείται ομοιόμορφος σε όλο το πλάτος του. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με κυμαινόμενα επίπεδα δυσκολίας. Υπάρχουν προφίλ που στηρίζονται σε απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρόμου όπως για παράδειγμα ένα εγκάρσιο εμπόδιο ή ένα κράσπεδο, είτε σε αρμονικές συναρτήσεις. Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει από απλές ημιτονοειδείς καμπύλες μέχρι περίπλοκα αθροίσματα ημιτόνων/συνημίτωνων, τα οποία συνθέτουν τελικά τυχαία προφίλ δρόμου. Τέλος, η γένεση τυχαίων προφίλ δρόμων μέσω του υπολογισμού του Power Spectral Density (PSD) αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο, η οποία θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας και βασίζεται στην οδηγία ISO 8608.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθούν δυο διαδικασίες γένεσης προφίλ δρόμου, οι οποίες καλύπτουν και τις δυο προαναφερθείσες κατηγορίες.

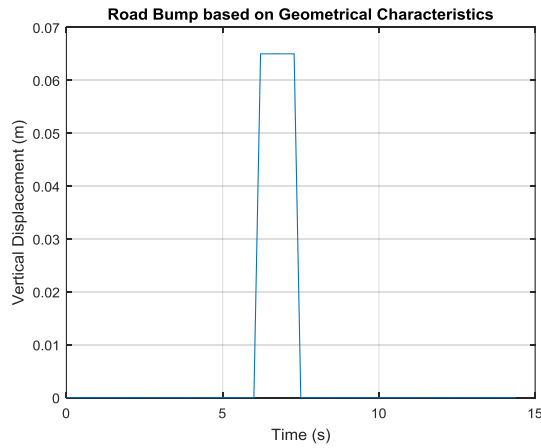
4.2 Εγκάρσιο Εμπόδιο

4.2.1 Γενικά

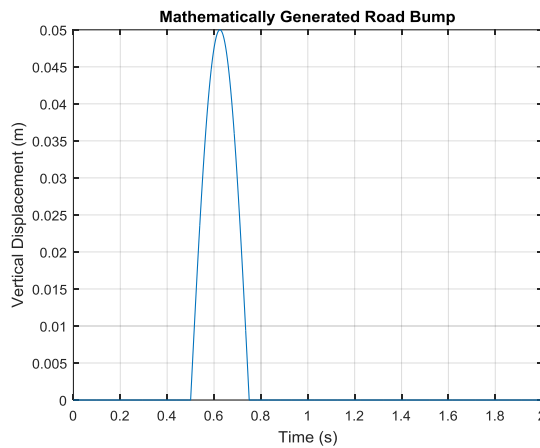
Στην πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε, επιλέχθηκε η γένεση προφίλ δρόμου βασισμένη σε εγκάρσια εμπόδια. Ένας εγκάρσιο εμπόδιο είναι δυνατόν να παρασταθεί με τρεις τρόπους. Ο πρώτος αφορά την γεωμετρική κατασκευή του (Σχήμα 3.1). Το εγκάρσιο εμπόδιο αποτελείται ουσιαστικά από 3 επιφάνειες: μια κεκλιμένη για το ανέβασμα, μια επίπεδη και άλλη μια κεκλιμένη για το κατέβασμα. Τα απαραίτητα μεγέθη (γωνίες, μήκη, προσκείμενες και κάθετες πλευρές) είτε μετρήθηκαν είτε προέκυψαν από τα υπόλοιπες παραμέτρους. Ο δεύτερος αφορά την μαθηματική αναπαράσταση του εμποδίου με τριγωνομετρικές συναρτήσεις και ανάλογη ρύθμιση των διαστάσεων του (Σχήμα 3.2)

Ο τρίτος τρόπος αποτελεί αναπαράσταση του εμποδίου σύμφωνα με την ανύψωση ενός από τους τροχούς του οχήματος. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν με έναν αισθητήρα ύψους ο οποίος τοποθετήθηκε στον οπίσθιο δεξιό τροχό του οχήματος. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας. Συνολικά εξετάστηκαν 28 σετ μετρήσεων για διάφορα εγκάρσια εμπόδια εντός της Πολυτεχνειούπολης. Για την

συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το φορτηγό που διαθέτει το Εργαστήριο Οχημάτων του Ε.Μ.Π, ένα Atego 815 της Daimler Chrysler κατηγορίας N2. Ο χώρος στον οποίο έλαβαν χώρα τα πειράματα είναι ο περιφερειακός δρόμος εντός Πολυτεχνειούπολης. Μετρήθηκαν διαφορετικά εγκάρσια εμπόδια και μετά από κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν σε επόμενο στάδιο της εργασίας.



Σχήμα 4.1: Εγκάρσιο Εμπόδιο με Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά



Σχήμα 4.2: Εγκάρσιο Εμπόδιο με Τριγωνομετρικές Συναρτήσεις

4.2.2 Μετρητική Αλυσίδα



Σχήμα 4.3: Μετρητική Αλυσίδα

Η μετρητική αλυσίδα του εργαστηρίου περιλαμβάνει την ακόλουθη διάταξη: το όχημα του εργαστηρίου περιλαμβάνει ένα πλήθος διαφορετικών αισθητήρων, οι οποίοι μετρών διαφορετικά μεγέθη της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Έτσι, υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα, τα οποία μετρούν τις κάθετες επιταχύνσεις του σώματος και των διάφορων τροχών, strain gauges, τα οποία μετρούν

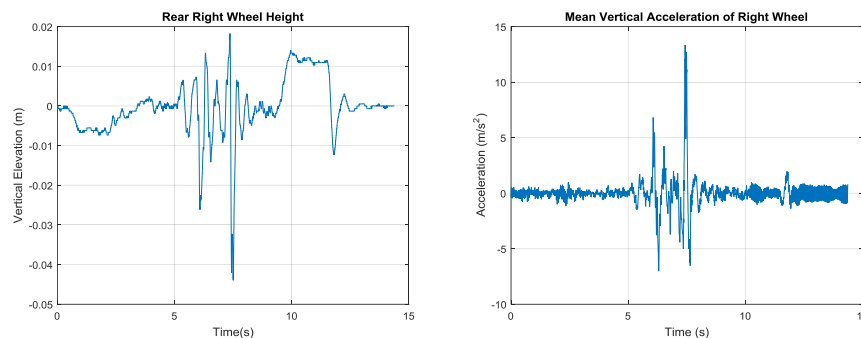
καταπονήσεις του οχήματος καθώς και αισθητήρες ύψους, οι οποίοι μετρούν διαφορές ύψους ανάμεσα στο δρόμο και σε προκαθορισμένα σημεία του οχήματος. Όλοι αυτοί οι αισθητήρες καταλήγουν μέσω συνδέσεων και καλωδιώσεων στον ενισχυτή MGC-plus, ο οποίος βρίσκεται συνδεδεμένος στην καμπίνα του οδηγού του φορτηγού. Ο ενισχυτής αυτός μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά μέσω διαφόρων μετατροπών και η καταγραφή των τιμών των μετρούμενων μεγεθών πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού Catman 5.0.

4.2.3 Διαδικασία Γένεσης Προφίλ

Από το σετ δεδομένων που προκύπτει για κάθε εγκάρσιο εμπόδιο ανακτώνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Ο χρόνος του πειράματος μετρούμενος σε δευτερόλεπτα
- Το ύψος του κέντρου του τροχού από το έδαφος
- Οι κάθετες επιταχύνσεις του άξονα

Μέσω των επιταχύνσεων που μετρήθηκαν προκύπτει η μέση επιτάχυνση του άξονα. Η προσεκτική ανάγνωση και προσαρμογή των διαγραμμάτων του ύψους του τροχού αλλά και των επιταχύνσεων επιτρέπουν τον καθορισμό των χρόνων έναρξης και τερματισμού του περάσματος του οχήματος από το εγκάρσιο εμπόδιο.

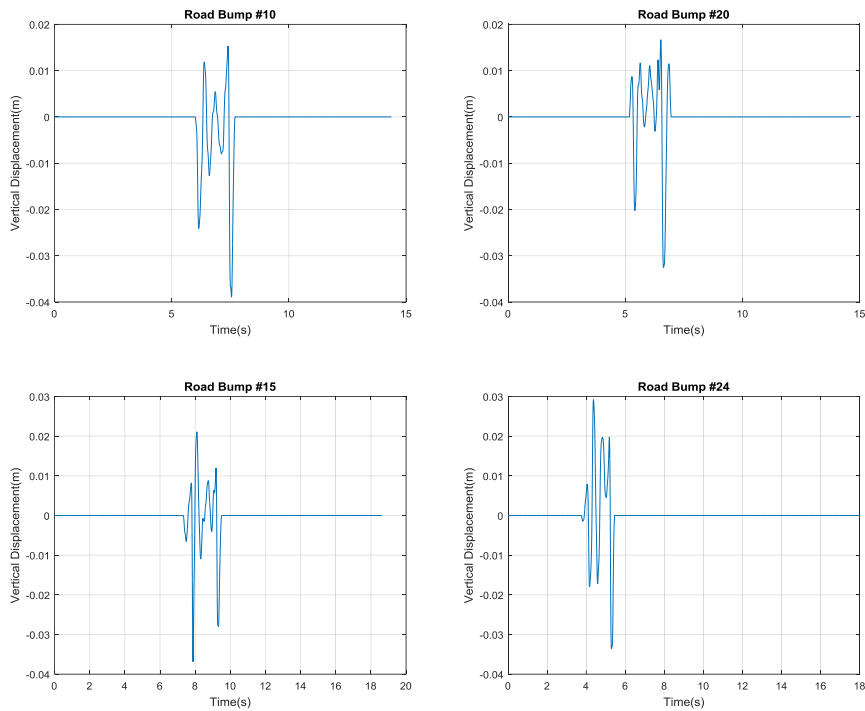


Σχήμα 4.4: Ύψος Τροχού και Κάθετες Επιταχύνσεις

Μετά τον καθορισμό των χρόνων έναρξης και τερματισμού η διέγερση περιορίζεται εντός του επιλεγμένου διαστήματος. Για τα υπολογιστικά μοντέλα Quarter Car και Half Car η διέγερση αυτή θα ήταν αρκετή, καθώς το πρώτο εξετάζει μόνο ένα τροχό του οχήματος ενώ η δεύτερη εξετάζει το ίδιο σύστημα (εμπρός/οπίσθιο). Όμως για τα μοντέλα Bicyclic και Full είναι απαραίτητο να προσαρμοστεί το προφίλ και για το σύστημα των εμπρόσθιων τροχών. Από τις μετρούμενες τιμές της διαμήκου ταχύτητας (longitudinal velocity), για το διάστημα ενδιαφέροντος υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του οχήματος. Διαπιστώνοντας ότι κατά την κίνηση του φορτηγού ο οπίσθιος τροχός ξεκινά την ανάβαση στο εγκάρσιο εμπόδιο όταν ο εμπρόσθιος έχει μόλις κατέβει, για να βρούμε τη χρονική υστέρηση του οπίσθιου τροχού. Εφόσον καθοριστεί, με απλή προσαρμογή προκύπτει και το αντίστοιχο προφίλ για τον εμπρόσθιο τροχό. Τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι ο καθορισμός της πρώτης παραγώγου της διέγερσης. Λόγω της μη ύπαρξης αισθητήρα ταχύτητας, αποφασίστηκε να γίνει αριθμητική ολοκλήρωση των δεδομένων της επιτάχυνσης που πάρθηκαν από την μετρητική αλυσίδα. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης Simpson $\frac{1}{3}$.

$$\int_a^b f(x)dx \cong \frac{b-a}{6} \cdot [f(a) + 4 \cdot f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b)] \quad (1)$$

Τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ήταν η επεξεργασία των διεγέρσεων για εξομάλυνση των μετρήσεων με διάφορα φίλτρα. Κάποιες από τις τελικές διεγέρσεις ακολουθούν στο Σχήμα



Σχήμα 4.5: Διάφορες Διεγέρσεις (Εγκάρσιο Εμπόδιο)

4.3 Τυχαίο Προφίλ Δρόμου

4.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, η υπολογιστική γένεση προφίλ δρόμου αποτελεί σημαντικό κομμάτι της βιβλιογραφίας. Οι μέθοδοι αυτές, επιτρέπουν την αναπαράσταση οποιουδήποτε δρόμου, είτε με τεχνικές που αφορούν τα γεωμετρικά στοιχεία του δρόμου (κλίση, μήκος κλπ.), είτε με μαθηματικές τεχνικές, οι οποίες προσομοιάζουν το προφίλ του δρόμου με διάφορα σετ συναρτήσεων. Στην πρώτη κατηγορία, για παράδειγμα, εντάσσεται η κατασκευή του εγκάρσιου μειωτήρα ταχύτητας σύμφωνα με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην δεύτερη υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στην γένεση τυχαίων προφίλ δρόμου. Μια μέθοδος, απλή στην εφαρμογή της, είναι το άθροισμα ημιτονοειδών καμπύλων με διαφορετικές συχνότητες και διαφορετικά πλάτη. Μία άλλη εναλλακτική, η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα στην παρούσα εργασία, εμπεριέχει τον υπολογισμό Φασματικών Πυκνοτήτων (Power Spectral Density – PSD). Τα τυχαία προφίλ δημιουργούνται βάσει κανονισμών ISO και συγκεκριμένα με βάση την οδηγία ISO 8608.

4.3.2 Κατηγοριοποίηση Προφίλ – ISO 8608

Οι βασικές έννοιες που εμπεριέχονται στην οδηγία ISO 8608 είναι η χωρική συχνότητα, το προφίλ δρόμου και οι φασματικές πυκνότητες. Η χωρική συχνότητα ορίζεται ως κύκλοι ανά μέτρο (cycles/meter), σε αντίθεση με τη συνηθισμένη μονάδα μέτρησης το Hertz (κύκλοι/δευτερόλεπτο). Το προφίλ δρόμου εδώ είναι οι διαφοροποιήσεις στο ύψος της επιφάνειας του δρόμου, μετρούμενες κατά μήκος μιας πορείας, παράλληλα με το δρόμο. Η χρήση του ISO 8608 βασίζεται στην υπόθεση ότι ένας δεδομένος δρόμος έχει ίσες στατιστικές ιδιότητες σε όλο το εύρος που θα κατηγοριοποιηθεί. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση η επιφάνεια του δρόμου είναι ένας συνδυασμός ενός μεγάλου αριθμού από μεγαλύτερα και μικρότερα περιοδικά σωμαράκια με διαφορετικά πλάτη. Ο συνδυασμός είναι ίδιος σε οποιαδήποτε σημείο κατά μήκος του δρόμου. Η οδηγία ISO 8608 περιγράφει τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται

για τη γένεση τυχαίων προφίλ δρόμου με δυο διαφορετικές διαδικασίες από δεδομένα που μετρήθηκαν επί τόπου.

Η πρώτη περιλαμβάνει την περιγραφή του προφίλ σκληρότητας του δρόμου μέσω του υπολογισμού του PSD της κάθετης μετατόπισης G_d , συναρτήσει τόσο της χωρικής συχνότητας n , όσο και της γωνιακής χωρικής ταχύτητας Ω . Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τον υπολογισμό του PSD των επιταχύνσεων $G_a(n)$ και $G_a(\Omega)$ του προφίλ, όσον αφορά την μεταβολή την κλίσης ανά μονάδα καλυπτόμενης επιφάνειας. Το πέρασμα από την πρώτη στην δεύτερη μέθοδο είναι άμεσο, καθώς το PSD των κάθετων μετατοπίσεων συνδέονται με τα αντίστοιχα των επιταχύνσεων με τους παρακάτω τύπους:

$$G_a = (2 \cdot \pi \cdot n)^4 \cdot G_d(n) \quad (2)$$

$$G_a = \Omega^4 \cdot G_d(\Omega) \quad (3)$$

Η οδηγία ISO 8608, με σκοπό την διευκόλυνση της σύγκρισης των διαφορετικών προφίλ σκληρότητας δρόμων, προτείνει μια κατηγοριοποίηση, η οποία βασίζεται στις φασματικές πυκνότητες, υπολογιζόμενες με τυπικές τιμές: για την χωρική συχνότητα $n_0=0.1$ cycles/m και για τη χωρική γωνιακή συχνότητα $\Omega_0=1$ rad/m.

Υποθέτοντας τιμές για τα μεγέθη αναφοράς $G_d(n_0)$ και $G_d(\Omega_0)$ οι οποίες καθορίζονται από την οδηγία και φαίνονται στον Πίνακα 1, αναγνωρίζονται 8 κατηγορίες προφίλ δρόμου (κατηγορίες A-H). Συγκρίνοντας τις τιμές του PSD των διαφορετικών κατηγοριών, εύκολα γίνεται κατανοητό ότι η κατηγορία A περιλαμβάνει δρόμους πολύ καλής ποιότητας με μικρό επίπεδο σκληρότητας, ενώ κατά συνέπεια η κατηγορία H αναφέρεται σε δρόμους με ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα σκληρότητας και συνεπώς περιλαμβάνει δρόμους πολύ χαμηλής (φτωχής) ποιότητας. Υπολογιστικά, η οδηγία ISO 8608 ορίζει ότι η σκληρότητα των προφίλ δρόμου μπορεί να καθοριστεί με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-2} \quad (4)$$

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-2} \quad (5)$$

όπου οι τιμές των $G_d(n_0)$ και $G_d(\Omega_0)$ πρέπει να παρθούν από τον Πίνακα 1, ανάλογα με το προφίλ που επιθυμεί ο χρήστης.

Πίνακας 4.1: ISO 8608

Road Class	$G_d(n_0)(10^{-6} \text{ m}^3)$		$G_d(\Omega_0)(10^{-6} \text{ m}^3)$	
	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
A	-	32		2
B	32	128	2	8
C	128	512	8	32
D	512	2048	32	128
E	2048	8192	128	512
F	8192	32768	512	2048
G	32768	131072	2048	8192
H	131072	-	8192	-

4.3.3 Μαθηματική Υλοποίηση Προφίλ Δρόμου

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, δημιουργήθηκαν, σύμφωνα με τα πρότυπα που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τεχνητά προφίλ δρόμου διαφόρων κατηγοριών με βάση μια στοχαστική

αναπαράσταση που βασίζεται στα PSD των κάθετων μετατοπίσεων, οι οποίες λαμβάνονται μέσω του Μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης συσχετισμού της στοχαστικής διαδικασίας που περιγράφει το προφίλ του δρόμου.

Αρχίζοντας από ένα συνεχές προφίλ δρόμου, η τιμή του PSD για μια συγκεκριμένη τιμή της χωρικής συχνότητας n , η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα διάστημα Δn , ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2}{\Delta n} \quad (6)$$

, όπου Ψ_x^2 είναι η μέση τιμή των τετραγώνων της συνιστώσας του σήματος για την χωρική συχνότητα n , μέσα στο διάστημα Δn .

Στη συνέχεια το σήμα του προφίλ διακριτοποιείται και έτσι περιγράφεται ως μια σειρά σημείων ανύψωσης, τα οποία είναι διαταγμένα ομοιόμορφα στο χώρο. Εάν υποθεθεί ότι το μήκος του προφίλ δρόμου είναι L και η περίοδος δειγματοληψίας είναι B , τότε η μέγιστη θεωρητική χωρική συχνότητα δειγματοληψίας είναι $n_{\max}=1/B$ και η μέγιστη ενεργή χωρική συχνότητα δειγματοληψίας είναι $n_{\text{eff}}=n_{\max}/2$, και μέσα στο πεδίο της συχνότητας, οι διακριτοποιημένες τιμές της χωρικής συχνότητας n_i καταναμημένες με βήμα $\Delta n=1/L$. Η γενική χωρική συχνότητα n_i μπορεί να θεωρηθεί ως $i \cdot \Delta n$ και η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί ως:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Psi_x^2(i \cdot \Delta n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (7)$$

, όπου το $i=0$ έως $N=n_{\max}/\Delta n$.

Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το φορτηγό που διαθέτει το Εργαστήριο Οχημάτων του Ε.Μ.Π, ένα Atego 815 της Daimler Chrysler κατηγορίας N2. Ο χώρος στον οποίο έλαβαν χώρα τα πειράματα είναι η εσωτερική κυκλική διαδρομή εντός Πολυτεχνειούπολης. Μετρήθηκαν πολλοί διαφορετικοί εγκάρσιοι μειωτήρες ταχύτητας και μετά από κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν σε επόμενο στάδιο της εργασίας.

Εάν το προφίλ του δρόμου περιγράφεται μέσα από μια απλή αρμονική συνάρτηση σύμφωνα με

$$h(x) = A_i \cdot \cos(2\pi n_i x + \varphi) = A_i \cdot \cos(2\pi i \Delta n \cdot x + \varphi) \quad (8)$$

, όπου τα A_i είναι τα πλάτη, n_i είναι η χωρική συχνότητα και φ είναι η γωνία φάσης. Είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι η μέση τιμή των τετραγώνου αυτού του αρμονικού σήματος είναι ίση με :

$$\Psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2} \quad (9)$$

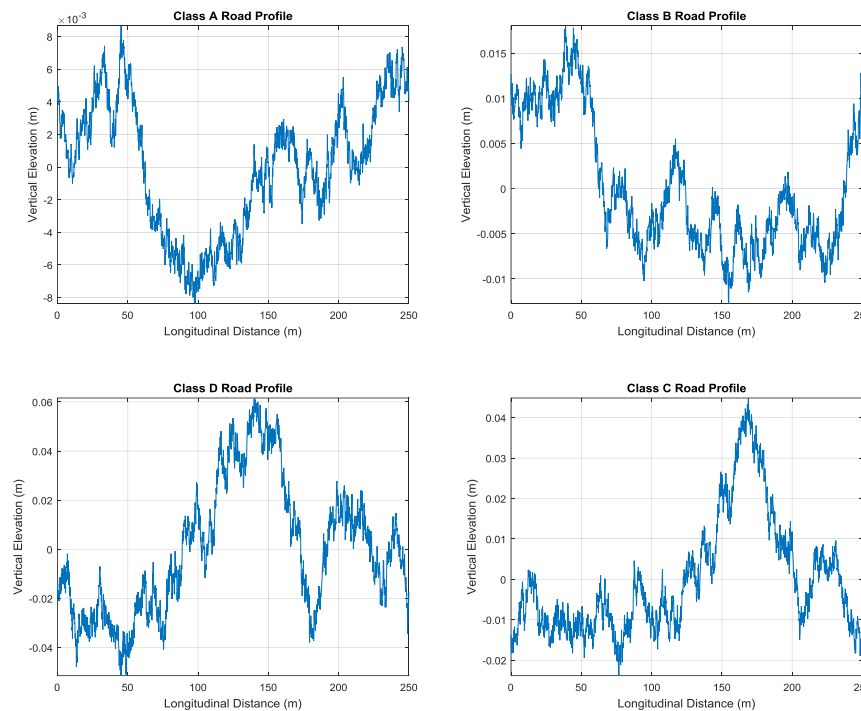
Και τελικά προκύπτει ότι

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n} \quad (10)$$

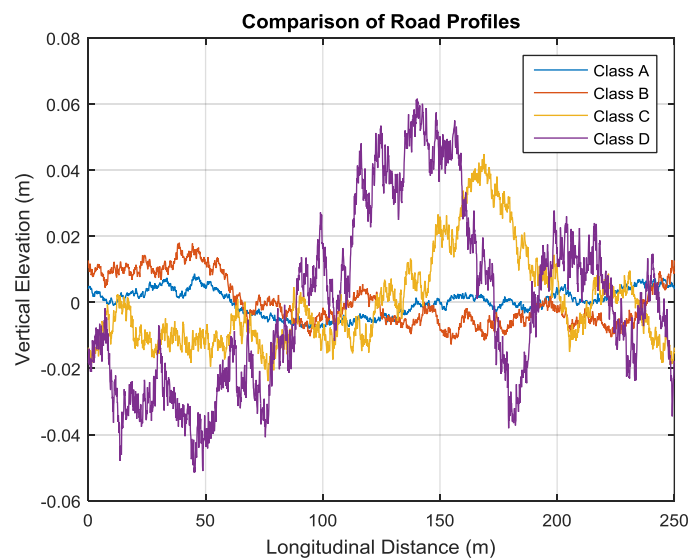
Άρα, εφόσον γνωρίζουμε την συνάρτηση των Φασματικών Πυκνοτήτων των κάθετων μετατοπίσεων G_d και υποθέτοντας μια τυχαία γωνία φάσης φ_i , η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα τεχνητό προφίλ δρόμου οποιασδήποτε κατηγορίας. Το προφίλ περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{2\Delta n G_d(i\Delta n)} \cdot \cos(2\pi \Delta n x + \varphi) \quad (11)$$

Με βάση την ανωτέρω διαδικασία δημιουργήθηκαν προφίλ δρόμων που αντιστοιχούν στις κατηγορίες A-D, τα οποία παρουσιάζονται σε ξεχωριστά διαγράμματα αλλά και συγκριτικά. Οι τιμές για τις Φασματικές Πυκνότητες επιλέχθηκαν τυχαία εντός των αποδεκτών διαστημάτων ανά περίπτωση. Επιλέχθηκε μήκος δρόμου $L=250$ m και διάστημα χωρικών συχνοτήτων από $0.004-4$ m^{-1} .



Σχήμα 4.6: Προφίλ Δρόμων Διάφορων Κατηγοριών(ISO 8608)



Σχήμα 4.7: Σύγκριση Διαφορετικών Προφίλ Δρόμων (Κατηγορίες A-D)

Ειδικά από το τελευταίο διάγραμμα γίνεται εμφανής η διαφορά των κατηγοριών των προφίλ. Το προφίλ A πρόκειται για δρόμο υψηλής ποιότητας, στον οποίο το όχημα δεν αντιμετωπίζει κάποια ακραία διέγερση. Αυτό αλλάζει όσο η κατηγορία αυξάνεται με αποτέλεσμα στον κατηγορίας D δρόμο, η ποιότητα του δρόμου να γίνεται πολύ κακή, με τις ακραίες δονήσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7, να λαμβάνουν χώρα σε όλο το μήκος του δρόμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Διαδικασία Βελτιστοποίησης και Αποτελέσματα

Το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε στην συγκεκριμένη εργασία αφορούσε την βελτιστοποίηση παραμέτρων ενός βαρέος οχήματος ως προς την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά του υπό την επίδραση διαφόρων διεγέρσεων. Το όχημα, το οποίο μοντελοποιήθηκε ως Bicycle Car Model (Κεφάλαιο 3^ο) διεγέρθηκε με ένα εγκάρσιο εμπόδιο (σαμαράκι) και με ένα τυχαίο προφίλ δρόμου κατηγορίας C (Κεφάλαιο 4^ο). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν δυο κεντρικοί άξονες όσον αφορά την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός οχήματος: η άνεση των επιβατών και το κράτημα του οχήματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός βαρέος οχήματος, έτσι ο όρος άνεση επιβατών αναφέρεται κυρίως στον οδηγό, αλλά και στην ασφάλεια του μεταφερόμενου φορτίου. Οι δυο αυτοί άξονες βρίσκονται σε σύγκρουση καθώς είναι δύσκολο να καλύπτονται και οι δυο σε μεγάλο βαθμό. Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε είχε ως στόχο την εξισορρόπηση τους και την εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των παραμέτρων της ανάρτησης και του ελαστικού έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Η βελτιστοποίηση ορίστηκε τόσο ως πρόβλημα ενός στόχου (μονοκριτηριακό) όσο και ως πρόβλημα πολλών στόχων (πολυκριτηριακό). Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης τα οποία αφορούν:

- α) τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος,
- β) την επιλογή των αρχικών τιμών,
- γ) τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού,
- δ) τους περιορισμούς και τις ποινές που επιβλήθηκαν στο πρόβλημα
- ε) τις αντικειμενικές συναρτήσεις που επιλέχθηκαν και τέλος
- στ) τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μέθοδο βελτιστοποίησης.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα δομηθεί ως εξής: για κάθε διεγερση, θα γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων για τα μονοκριτηριακά προβλήματα, και θα ακολουθήσει αντίστοιχη ανάλυση για τα πολυκριτηριακά. Τέλος θα παρουσιαστεί μια διαφορετική προσέγγιση η οποία αποσκοπεί στην καλύτερη απόδοση των μεθόδων βελτιστοποίησης. Στο τέλος κάθε ενότητας, θα γίνεται η σύγκριση των τριών τρόπων προσέγγισης και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η σύγκριση που θα ακολουθήσει σε κάθε υποπερίπτωση βασίζεται στην ποσοστιαία μεταβολή σημαντικών μεγεθών της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος, στις βέλτιστες μεταβλητές σχεδιασμού και τέλος στις μεταβολές των αντικειμενικών συναρτήσεων κατά περίπτωση.

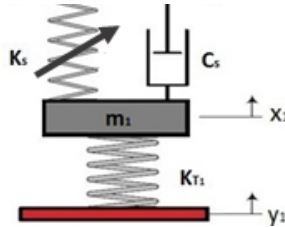
Τα προβλήματα της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος όπως και όλες οι μέθοδοι βελτιστοποίησης υλοποιήθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab R2016. Στο κομμάτι της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένα το Matlab Optimization Toolbox.

5.1 Εγκάρσιο Εμπόδιο

Για την διερεύνηση του προβλήματος με την διεγερση του εγκάρσιου εμποδίου, αρχικά επιλύθηκαν τα διάφορα μονοκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις προαναφερθείσες αντικειμενικές συναρτήσεις που αφορούν ξεχωριστά την επιτάχυνση του σώματος, τη διαδρομή της ανάρτησης και την εκτροπή του ελαστικού. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες που περιλαμβάνουν τόσο τις βέλτιστες μεταβλητές σχεδιασμού κατά περίπτωση όσο και τις επί τοις εκατό

μεταβολές σε σημαντικά μεγέθη της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Στο πρώτο κομμάτι, αναλύεται η μονοκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος Βελτιστοποίησης, και στη συνέχεια η πολυκριτηριακή. Στο τελευταίο κομμάτι της διαδικασίας πραγματοποιείται μια δοκιμή για την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης. Ακολουθεί η πλήρης διαδικασία επίλυσης του προβλήματος.

5.1.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού



Σχήμα 5.1: Μοντέλο Ανάρτησης και Ελαστικού

Οι μεταβλητές σχεδιασμού αφορούν παραμέτρους της ανάρτησης και του ελαστικού. Το μοντέλο της ανάρτησης είναι μια παθητική ανάρτηση με την προσθήκη ενός μη γραμμικού όρου στο ελατήριο της, η οποία αναλύθηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Συνεπώς, οι μεταβλητές σχεδιασμού που επιλέχθηκαν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος είναι οι εξής:

- γραμμικοί και μη γραμμικοί όροι ελατηρίων των συστημάτων ανάρτησης (εμπρός/πίσω),
- οι γραμμικοί αποσβεστήρες των συστημάτων ανάρτησης (εμπρός/πίσω), και
- ο συντελεστής σκληρότητας του εμπρόσθιου ελαστικού.

Πίνακας 5.1: Μεταβλητές Σχεδιασμού

Μεταβλητές Σχεδιασμού	
K_f, k_r	Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) (N/m)
C_f, C_r	Γραμμικός Όρος Απόσβεσης (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) (N·s/m)
K_{fn}, k_{rn}	Μη Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) (N/m)
K_{tf}	Σκληρότητα Ελαστικού (N/m)

5.1.2 Αρχικές Τιμές

Πίνακας 5.2: Πειραματικές Τιμές των Μεγεθών

Πειραματικές Τιμές	
$K_{f,r}$ (N/m)	165000
$C_{f,r}$ (N·s/m)	15399
K_{tf} (N/m)	$1.5 \cdot 10^6$

Οι αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν προέκυψαν από προηγούμενα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οχημάτων του ΕΜΠ. Έτσι προέκυψαν οι τιμές του Πίνακα 4.2.

Για την εύρεση της αρχικής τιμής για τον μη γραμμικό όρο του ελατηρίου των αναρτήσεων, πραγματοποιήθηκε προσέγγιση της καμπύλης της πειραματικής γραμμικής δύναμης του ελατηρίου με

πολύωνυμο 3^{ου} βαθμού, λαμβάνοντας τελικά τις κάτωθι τιμές τόσο για τον μη γραμμικό όσο και τον μη γραμμικό όρο.

Πίνακας 5.3: Αρχικές Τιμές Μεταβλητών Σχεδιασμού

Αρχικές Τιμές	
$K_{f,r}$ (N/m)	38000
$C_{f,r}$ (N·s/m)	15399
K_{fn}, k_{rn}	$1.98 \cdot 10^7$
K_{tf} (N/m)	$1.5 \cdot 10^6$

5.1.3 Όρια Μεταβλητών

Τα όρια των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στις αρχικές τιμές που προηγήθηκαν, καθώς και στη βιβλιογραφία. Τα όρια αυτά έχουν ως στόχο να δώσουν τον απαραίτητο «χώρο» στις μεθόδους βελτιστοποίησης ώστε να εντοπίσουν την βέλτιστη λύση. Τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 5.4: Όρια Μεταβλητών

Μεταβλητές Σχεδιασμού	Κάτω Όρια	Άνω Όρια
k_f, k_r (N/m)	10^4	10^5
c_f, c_r (N·s/m)	10^4	$6 \cdot 10^4$
k_{fn}, k_{rn} (N/m ³)	10^6	$9 \cdot 10^7$
k_{tf} (N/m)	$8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$

5.1.4 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί που τέθηκαν στο πρόβλημα αφορούν την δυναμική συμπεριφορά του οχήματος, και εμπεριέχουν τόσο όρους οι οποίοι βρίσκονται στην αντικειμενική συνάρτηση όσο και άλλα μεγέθη που αφορούν την μη γραμμικότητα της ανάρτησης. Οι τιμές και τα είδη των περιορισμών προέρχονται είτε από την βιβλιογραφία, είτε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας. Ο στόχος των περιορισμών είναι να οδηγήσουν τις μεθόδους σε αποτελέσματα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, τα οποία παράλληλα θα εξασφαλίζουν τόσο την άνεση των επιβατών (rms επιτάχυνσης) όσο και το κράτημα του οχήματος (διαδρομή ανάρτησης και εκτροπή ελαστικού).

Πίνακας 5.5: Περιορισμοί Προβλήματος

Περιορισμοί	Τιμές
RMS Επιτάχυνσης Σώματος (m/s ²)	0.5 / 2
Διαδρομή Ανάρτησης (Εμπρός/Πίσω) (m)	0.09
Συμπίεση Ελαστικού (Εμπρός Πίσω) (m)	0.05
Ποσοστό Μη Γραμμικής Δύναμης Ελατηρίου (Εμπρός/Πίσω)	10÷30%

5.1.5 Επιβολή Ποινής

Στους Γενετικούς Αλγορίθμους χρησιμοποιήθηκε η επιβολή Θανατικής Ποινής στα μέλη του πληθυσμού τα οποία δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Αντίθετα στην αιτιοκρατική εφαρμόζονται οι συνθήκες ΚΚΤ.

$$fitness = \begin{cases} \infty, & \text{if constraints violated} \\ else \\ fitness \end{cases} \quad (1)$$

5.1.6 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούν βασικό κομμάτι όλων των μεθόδων βελτιστοποίησης καθώς εκείνες καθοδηγούν το πρόβλημα προς τη βέλτιστη λύση. Για την καλύτερη διερεύνηση του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε αλλά και για τον εντοπισμό της καλύτερης δυνατής λύσης δοκιμάστηκαν διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες εμπλέκουν άμεσα είτε έμμεσα τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η διαδικασία η οποία υλοποιήθηκε αποσκοπεί στην ικανοποίηση διαφορετικών πτυχών της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βαρέος οχήματος μέσω της εύρεσης του κατάλληλου συνδυασμού των παραμέτρων της ανάρτησης και του ελαστικού. Η βελτιστοποίηση που ακολουθεί ορίστηκε τόσο ως πρόβλημα ενός στόχου (μονοκριτηριακό), όσο και ως πρόβλημα πολλών στόχων (πολυκριτηριακό). Όλες οι συναρτήσεις αφορούν δυναμικά μεγέθη των κάθετων ταλαντώσεων του οχήματος, κυρίως δε επιταχύνσεις και μετατοπίσεις. Συνήθως χρησιμοποιείται η επιτάχυνση του σώματος και ειδικά η τιμή RMS (root mean square) της καθώς αποτελεί δείκτη για την άνεση του οδηγού και την ασφάλεια του φορτίου. Συνηθισμένη επίσης είναι και η χρήση των μεγίστων ορισμένων δυναμικών μεγεθών όπως για παράδειγμα της δύναμης των ελαστικών ή της δύναμης των ελατηρίων της ανάρτησης. Στη συγκεκριμένη εργασία οι τυπικές αποκλίσεις των διαφόρων μεγεθών κρίθηκαν ότι παριστάνουν πιο ρεαλιστικά το πρόβλημα, διότι απεικονίζουν ορθότερα τις μεταβολές των μεγεθών αναφορικά με τη διέγερση.

5.1.6.1 Μονοκριτηριακές Συναρτήσεις

Κάθε μια από τις συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν αποσκοπεί σε διαφορετικό στόχο της ανάλυσης της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος: Η πρώτη αποτελεί μέτρο της άνεσης του οδηγού και την ασφάλεια του φορτίου, η δεύτερη ρυθμίζει την σωστή λειτουργία της ανάρτησης, ενώ η τελευταία αποσκοπεί στην διασφάλιση του κρατήματος του οχήματος. Συνεπώς, προέκυψαν οι ακόλουθες τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις ενός στόχου

- **Άνεση Οδηγού / Ασφάλεια Φορτίου**
 $f_1 = Ride Comfort \quad (2)$

- **Διαδρομή Οπίσθιου Συστήματος Ανάρτησης**
 $f_2 = Rear Suspension Travel \quad (3)$

- **Συμπίεση Οπίσθιου Ελαστικού**
 $f_3 = Rear Tire Deflection \quad (4)$

5.1.6.2 Πολυκριτηριακές Συναρτήσεις

Η μονοκριτηριακή προσέγγιση δεν εξασφαλίζει την ικανοποίηση όλων των αντικρουόμενων στόχων της βελτιστοποίησης ενός φυσικού προβλήματος όπως είναι η βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός οχήματος. Έτσι στη συνέχεια ακολουθείται μια πολυκριτηριακή προσέγγιση του ίδιου προβλήματος. Ως στόχοι της βελτιστοποίησης ορίστηκαν οι εξής τρεις: η άνεση του οδηγού και η ασφάλεια του φορτίου, η διαδρομή της ανάρτησης και η εκτροπή του ελαστικού.

$$fitness = \begin{cases} Ride Comfort \\ Rear Suspension Travel \\ Rear Tire Deflection \end{cases} \quad (5)$$

5.1.7 Καθορισμός Παραμέτρων Μεθόδων Βελτιστοποίησης

Λόγω της πολυπλοκότητας που εμφανίζει το πρόβλημα υλοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, μια στοχαστική (Genetic Algorithms) μια αιτιοκρατική (Gradient Based) και η υβριδοποίηση τους (Hybrid Optimization). Έτσι, μέσα από πληθώρα αποτελεσμάτων και τη σύγκριση τους θα διασφαλιστεί η καθολικότητα της βέλτιστης λύσης που θα εντοπιστεί. Όσον αφορά τους Γενετικούς Αλγορίθμους δοκιμάστηκαν διάφορες παραμετροποιήσεις του αλγορίθμου της MATLAB. Τέτοιες παραμετροποιήσεις περιλάμβαναν κλιμακούμενο αριθμό πληθυσμού έτσι ώστε να διευρυνθεί το πεδίο αναζήτησης λύσεων, αλλαγή στις συναρτήσεις επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης και μεταβλητό αριθμό πληθυσμού ελίτ. Όλες αυτές οι επιλογές είχαν ως στόχο την εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού, ο οποίος θα οδηγήσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα.

Πίνακας 5.6: Παράμετροι Γενετικού Αλγορίθμου

Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)	
Όνομα	Επιλογή
Πληθυσμός	200/1000
Ανοχή Fitness	10^{-6}
Ανοχή Περιορισμών	10^{-4}
Αριθμός Αδρανών Γενιών	20
Συνάρτηση Διασταύρωσης	Δυο – Σημείων
Συνάρτηση Μετάλλαξης	Προσαρμογής
Συνάρτηση Επιλογής	Ρουλέτα
Πληθυσμός Ελίτ ανά γενιά	2

Πίνακας 5.7: Αιτιοκρατική Μέθοδος

Αιτιοκρατική Μέθοδος (Gradient Based Method)	
Όνομα	Επιλογή
Αλγόριθμος	Active-Set
Ανοχή Fitness	10^{-6}
Ανοχή Περιορισμών	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	2000

Πίνακας 5.8: Παράμετροι Υβριδικής Βελτιστοποίησης

Υβριδική Βελτιστοποίηση (Hybrid Optimization)	
Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithm)	
Όνομα	Επιλογή
Πληθυσμός	200/1000
Ανοχή Fitness	10^{-6}
Ανοχή Περιορισμών	10^{-4}
Αριθμός Αδρανών Γενιών	20
Συνάρτηση Διασταύρωσης	Δυο – Σημείων
Συνάρτηση Μετάλλαξης	Προσαρμογής
Συνάρτηση Επιλογής	Ρουλέτα
Πληθυσμός Ελίτ ανά γενιά	2
Αριθμός Γενιών	10
Αιτιοκρατική Μέθοδος (Gradient Based Method)	
Αλγόριθμος	Active-Set
Ανοχή Fitness	10^{-6}
Ανοχή Περιορισμών	10^{-4}
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	2000

Πίνακας 5.9: Σενάρια Βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν

Πίνακας Περιπτώσεων	
Όνομασία	Περιγραφή
GA_200	Γενετικός Αλγόριθμος με Πληθυσμό 200
GA_1000	Γενετικός Αλγόριθμος με Πληθυσμό 1000
FminCon	Αιτιοκρατική Μέθοδος
Hyb_200_10	Υβριδικός Αλγόριθμος- Πληθυσμός 200 –Γενιές 5
Hyb_1000_2	Υβριδικός Αλγόριθμος- Πληθυσμός 1000–Γενιές 2
Hyb_1000_10	Υβριδικός Αλγόριθμος- Πληθυσμός 1000–Γενιές 10

Πιο συγκεκριμένα, στην ντετερμινιστική μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος «active-set» της FminCon στο περιβάλλον της MATLAB. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στις συνθήκες ΚΚΤ. Επιπλέον, ορίστηκε μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων 2000. Και στις δυο περιπτώσεις αλγορίθμων, οι ανοχές στην Fitness Function τέθηκαν στο 10^{-6} ενώ για τους περιορισμούς στο 10^{-4} . Τέλος στην υβριδική μέθοδο, ο Γενετικός Αλγόριθμος επιστρατεύεται για 10 γενιές στην γενική περίπτωση, με σταθερές τιμές για τους περιορισμούς και τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού, τα οποία περιεγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα, ενώ στη συνέχεια η ντετερμινιστική μέθοδος ενεργεί σε μια στενή περιοχή (90-110% της τελικής τιμής του Γ.Α.), με περιορισμούς υπολογισμένους σύμφωνα με την τελική τιμή του Γενετικού Αλγορίθμου.

Οι πίνακες 4.6-4.9 παρουσιάζουν τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μέθοδο βελτιστοποίησης.

5.1.8 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση

Τρία σενάρια δημιουργήθηκαν, το καθένα με την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση που περιγράφεται παρακάτω. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις αυτές περιλαμβάνουν τις τυπικές αποκλίσεις της επιτάχυνσης του σώματος, της διαδρομής της οπίσθιας ανάρτησης και τις εκτροπές του οπίσθιου ελαστικού αντίστοιχα.

- **Σενάριο 1^ο: Άνεση Οδηγού και Ασφάλεια Φορτίου (Case 1)**

$$f_1 = var(acc_{body}) \quad (5)$$

- **Σενάριο 2^ο: Διαδρομή Οπίσθιου Συστήματος Ανάρτησης (Case 2)**

$$f_2 = var(rear\ suspension\ travel) = var(x_{body} + a_2 \cdot \theta - x_{rear}) \quad (6)$$

- **Σενάριο 3^ο: Συμπίεση Οπίσθιου Ελαστικού (Case 3)**

$$f_3 = var(rear\ tire\ deflection) = var(x_{rear} - y_2) \quad (7)$$

5.1.8.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1^ο : Τυπική Απόκλιση της Επιτάχυνσης του Σώματος

$$f_1 = var(acc_{body})$$

(8)

Πίνακας 5.10: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς των Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 1^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς											
	Αρχικές Τιμές	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.6277	0.4691	-25.27	0.4262	-32.11	0.3887	-38.07	0.4026	-35.86	0.4621	-26.38
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.024	4.82	0.026	14.91	0.027	17.98	0.028	22.37	0.025	10.09
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.026	10.30	0.026	9.44	0.026	12.02	0.026	11.59	0.025	8.58
Maximum (x1) (m)	0.016	0.016	-0.97	0.016	-1.30	0.016	-1.79	0.016	-1.06	0.016	-0.74
Maximum (x2) (m)	0.016	0.016	-1.55	0.016	-1.62	0.016	-1.84	0.016	-1.49	0.016	-1.58
Tire Force Front (N)	8611	7504	-12.86	6836	-20.61	6332	-26.46	6498	-24.53	7668	-10.94
Tire Force Rear (N)	10537	8086	-23.26	7881	-25.21	7342	-30.32	7722	-26.72	7779	-26.18

Πίνακας 5.11: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 1°

Μεταβλητές Σχεδιασμού						
	Αρχικές Τιμές	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	38000	10631	16369	10928	18618	38731
Cf (N·s/m)	15399	12380	10212	9081	9079	11848
Kr (N/m)	38000	12665	12196	11808	11747	22355
Cr (N·s/m)	15399	10396	10093	9166	9628	9392
Kfn (N/m³)	19800000	13557580	1281787	8199775	2689374	1278678
Kfr (N/m³)	19800000	2597805	6347780	1536280	1327338.4	3336615
Ktf (N/m)	1500000	2366297	2461153	2850337	2214256	2297382

Πίνακας 5.12: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 1°

	Time(s)
GA_200	8020
GA_1000	47340
Hyb_1000_10	37000
Hyb_200_10	10460
FminCon	6100

Από τον πίνακα 4.10 φαίνεται η προσπάθεια του αλγορίθμου να ικανοποιήσει τον μοναδικό του στόχο, δηλαδή την άνεση του οδηγού και την ασφάλεια του φορτίου. Η τιμή του RMS της επιτάχυνσης σώματος δέχεται μεγάλες μειώσεις στις τιμές της, ενώ εξίσου σημαντικές μειώσεις υπάρχουν και στις δυνάμεις των ελαστικών. Αντίθετα η διαδρομή των δυο συστημάτων ανάρτησης αυξάνεται, έτσι ώστε το κράτημα του οχήματος να βελτιωθεί και η μετατόπιση των τροχών να παραμείνει στα ίδια επίπεδα. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης απέδωσαν όπως αναμενόταν. Όσο ο πληθυσμός των γενετικών αλγορίθμων αυξάνεται, μεγαλύτερο πεδίο του χώρου πιθανών λύσεων σαρώνεται και κατά συνέπεια εντοπίζεται συνολικά καλύτερη λύση. Όσον αφορά τις μεταβλητές σχεδιασμού σε όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση την αιτιοκρατική, οι γραμμικοί παράμετροι των αναρτήσεων λαμβάνουν παραπλήσιες τιμές, ενώ παρατηρούνται διαφορές στις μη γραμμικές παραμέτρους, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί από το μεγάλο περιθώριο που δόθηκε στις αντίστοιχες μεταβλητές σχεδιασμού. Τέλος, στο κομμάτι του υπολογιστικού χρόνου, οι μέθοδοι με τον μεγαλύτερο πληθυσμό προς εξέταση χρειάστηκαν αρκετά περισσότερο χρόνο για την επίλυση του προβλήματος. Έτσι, ενώ τα αποτελέσματα της υβριδικής βελτιστοποίησης με πληθυσμό 1000 απέδωσαν καλύτερα αποτελέσματα, χρονικά καλύτερη θεωρείται η λύση της υβριδικής βελτιστοποίησης με πληθυσμό 200 καθώς στο 30% του χρόνου εντόπισε μια παραπλήσια λύση.

5.1.8.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2^ο: Τυπική Απόκλιση της Διαδρομής της Οπίσθιας Ανάρτησης

$$f_2 = \text{var}(\text{rear suspension travel}) = \text{var}(x_{\text{body}} + a_2 \cdot \theta - x_{\text{rear}}) \quad (9)$$

Πίνακας 5.13: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης – Σενάριο 2^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς											
	Αρχικές Τιμές	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body}) (m/s²)	0.6277	0.4691	-25.27	0.6109	-2.68	0.6810	8.48	0.4026	-35.86	0.4735	-24.57
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.026	12.28	0.025	10.53	0.023	0.88	0.022	-4.39	0.026	14.91
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.018	-24.89	0.017	-27.47	0.015	-34.76	0.018	-24.89	0.025	5.58
Maximum (x1) (m)	0.016	0.016	-0.97	0.016	-1.29	0.016	-1.39	0.016	-1.06	0.016	-1.26
Maximum (x2) (m)	0.016	0.016	-1.55	0.016	-0.66	0.016	-0.93	0.016	-1.49	0.016	-1.64
Tire Force Front (N)	8611	7504	-12.86	7315	-15.04	7926	-7.95	6498	-24.53	7142	-17.06
Tire Force Rear (N)	10537	8086	-23.26	11615	10.23	12222	15.98	7722	-26.72	8492	-19.41

Πίνακας 5.14: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 2°

Μεταβλητές Σχεδιασμού						
	Αρχικές Τιμές	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	38000	11245	10103	13306	22061	31711
Cf (N·s/m)	15399	11101	11960	14086	15644	10714
Kr (N/m)	38000	12229	10527	9750	12304	22351
Cr (N·s/m)	15399	20867	23113	27090	22224	11479
Kfn (N/m³)	19800000	5339128	1904472	3413310	6275414	1150813
Kfr (N/m³)	19800000	7208179	2280300	2884616	4716280	3309070
Ktf (N/m)	1500000	2817099	2360969	2828033	2714294	2606485

Πίνακας 5.15: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 2°

	Time(s)
GA_200	7205
GA_1000	35000
Hyb_1000_10	36500
Hyb_200_10	5620
FminCon	11600

Στην περίπτωση της μονοκριτηριακής συνάρτησης της διαδρομής της οπίσθιας ανάρτησης, παρατηρούνται μειώσεις στις τιμές του στόχου σταθερά τις τάξεις του 20% σε όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση την αιτιοκρατική μέθοδο. Η έλλειψη των υπολοίπων στόχων του προβλήματος φαίνεται ειδικά στις περιπτώσεις των γενετικών αλγορίθμων με πληθυσμό 1000, στις οποίες οι τιμές τόσο του RMS της επιτάχυνσης όσο και των δυνάμεων των ελαστικών δέχονται ανεπαισθητες μειώσεις ή και αυξήσεις. Το σετ των λύσεων αυτών δεν θεωρούνται ικανοποιητικά καθώς αποτυγχάνουν να δώσουν λύσεις οι οποίες ικανοποιούν την πλειονότητα των απαιτήσεων που τέθηκαν στην παρούσα εργασία.

5.1.8.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3^ο: Τυπική Απόκλιση της Συμπίεσης του Οπίσθιου Ελαστικού

$$f_3 = \text{var}(\text{rear tire deflection}) = \text{var}(x_{\text{rear}} - y_2)$$

(10)

Πίνακας 5.16: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 3^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς											
	Αρχικές Τιμές	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body}) (m/s²)	0.6277	0.4861	-22.56	0.4365	-30.46	0.4085	-34.93	0.4350	-30.70	0.4700	-25.13
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.026	13.16	0.027	17.54	0.028	22.37	0.026	14.04	0.026	14.91
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.026	12.45	0.025	7.73	0.026	11.16	0.026	12.88	0.025	5.58
Maximum (x1) (m)	0.016	0.016	-1.29	0.016	-1.66	0.016	-1.71	0.016	-1.69	0.016	-1.29
Maximum (x2) (m)	0.016	0.016	-1.81	0.016	-1.86	0.016	-1.88	0.016	-1.94	0.016	-1.62
Tire Force Front (N)	8611	7598	-11.76	6950	-19.28	6699	-22.20	7181	-16.60	7110	-17.42
Tire Force Rear (N)	10537	7942	-24.63	7709	-26.84	7328	-30.45	7303	-30.69	8486	-19.47

Πίνακας 5.17: Μεταβλητές Σχεδιασμού – Σενάριο 3^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού						
	Αρχικές Τιμές	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	38000	66773	42838	42807	48661	31688
Cf (N·s/m)	15399	11033	10038	9145	10542	10714
Kr (N/m)	38000	26831	10450	9879	11900	22177
Cr (N·s/m)	15399	10113	10074	9102	9088	11479
Kfn (N/m³)	19800000	7692696	2968006	3038192	6358651	1186127
Kfr (N/m³)	19800000	2142693	9686170	2446770	3088758	3467630
Ktf (N/m)	1500000	2832304	2980393	2919465	3091307	2552661

Πίνακας 5.18: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 3^ο

	Time(s)
GA_200	7181
GA_1000	36200
Hyb_1000_10	25700
Hyb_200_10	6013
FminCon	12580

Πρωταρχικός στόχος του τρίτου σεναρίου ήταν η συμπίεση του οπίσθιου ελαστικού. Σε όλες τις μεθόδους βελτιστοποίησης που εξετάστηκαν παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις των τιμών των δυνάμεων των ελαστικών. Το μέγεθος αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο την συμπίεση των ελαστικών, που αποτελεί τον αποκλειστικό στόχο αυτού του σεναρίου, αλλά εμπλέκει άμεσα και την σκληρότητα του ελαστικού, η οποία είναι μια από τις μεταβλητές σχεδιασμού προς βελτιστοποίηση. Επίσης, παρατηρούνται εξίσου σημαντικές μειώσεις και στην τιμή του RMS της επιτάχυνσης. Αυτό, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι δυο στόχοι συνδέονται στενά. Καθαρά όσον αφορά την βελτιστοποίηση, η υβριδική μέθοδος με πληθυσμό 1000 αλλά και ο γενετικός αλγόριθμος με πληθυσμό 1000 έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα με αντίστοιχες μειώσεις στις δυνάμεις τόσο του εμπρόσθιου όσο και του οπίσθιου ελαστικού, σε αντίθεση με την υβριδική μέθοδο με πληθυσμό 200. Όμως εάν ληφθεί υπόψη και ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης τότε ίσως προτιμηθεί η υβριδική μέθοδος με τον μικρότερο πληθυσμό καθώς μειώνει τον ζητούμενο χρόνο στο 23% και στο 16% του χρόνου αντίστοιχα.

5.1.9 Ισορροπημένη Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση ίσως δεν επαρκεί για να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Έτσι ακολουθείται η λογική βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων, έτσι ώστε να καλυφθούν ικανοποιητικά όλες οι απαιτήσεις το προβλήματος. Οι στόχοι της βελτιστοποίησης ορίστηκαν ως η ένωση αυτών των τριών μονοκριτηριακών προβλημάτων, δηλαδή:

- Άνεση Επιβατών
- Διαδρομή Ανάρτησης
- Εκτροπή Ελαστικού

Η αντικειμενική συνάρτηση η οποία επιλέχθηκε είναι η ακόλουθη:

$$\text{fitness} = w_1 \cdot a \cdot \text{var}(\text{acc}_{\text{body}}) + w_2 \cdot b \cdot \text{var}(\text{suspension travel}_R) + w_3 \cdot c \cdot \text{var}(\text{tire deflection}_R) \quad (11)$$

Όπως φαίνεται στην εξίσωση 11 υπάρχουν τρεις ομάδες παραμέτρων: οι τυπικές αποκλίσεις των στόχων της βελτιστοποίησης, οι Συντελεστές Ισορροπίας a , b , c και οι συντελεστές βαρύτητας w_i .

Οι συντελεστές ισορροπίας αποτελούν σταθερές οι οποίες εξισορροπούν τις διαφορές στις τάξεις μεγέθους μεταξύ των τριών εμπλεκόμενων δυναμικών μεγεθών της συνάρτησης Fitness και μετατρέπουν ουσιαστικά το πρόβλημα σε ένα ισότιμο πρόβλημα 3 στόχων. Οι τιμές τους είναι οι κάτωθι:

Συντελεστές Ισορροπίας
$a=1$
$b=5 \cdot 10^4$
$c=10^7$

Σχήμα 5.2: Συντελεστές Ισορροπίας

Οι συντελεστές βαρύτητας, δίνουν την δυνατότητα να δημιουργηθούν διάφορα σενάρια (Cases), στην κάθε μια από τις οποίες ένας από τους τρεις όρους έχει μια σχετική προτεραιότητα. Το άθροισμα τους, σε κάθε σενάριο ισούται με ένα και ουσιαστικά ορίζουν το ποσοστό συμμετοχής του κάθε στόχου στην συνάρτηση Fitness. Παρήχθησαν τρία διαφορετικά σενάρια, στα οποία οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας ανά περίπτωση απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.19: Συντελεστές Βαρύτητας και Σενάρια

Συντελεστές Βάρους	Balanced C1	Balanced C2	Balanced C3
W_1	0.5	0.25	0.25
W_2	0.25	0.5	0.25
W_3	0.25	0.25	0.5

5.1.9.1 Αποτελέσματα Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$\text{fitness} = w_1 \cdot a \cdot \text{var}(\text{acc}_{\text{body}}) + w_2 \cdot b \cdot \text{var}(\text{suspension travel}_R) + w_3 \cdot c \cdot \text{var}(\text{tire deflection}_R) \quad (12)$$

Πίνακας 5.20: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Πολυκριτηριακό Σενάριο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
Γενετικός Αλγόριθμος - Πληθυσμός: 200	Αρχικές Τιμές	Case 1	%	Case 2	%	Case 3	%
RMS(acc _{body}) (m/s ²)	0.6277	0.437	-30.31	0.565	-10.02	0.460	-26.65
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.026	15.79	0.026	14.04	0.026	11.84
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.024	3.43	0.019	-18.88	0.024	3.43
Maximum (x1) (m)	0.016	0.016	-1.72	0.016	-1.72	0.016	-1.56
Maximum (x2) (m)	0.016	0.016	-1.79	0.016	-1.54	0.016	-1.73
Tire Force Front (N)	8611	6723	-21.93	7230	-16.03	6989	-18.83
Tire Force Rear (N)	10537	8146	-22.69	10431	-1.01	8361	-20.65

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
FminCon	Αρχικές Τιμές	Case 1	%	Case 2	%	Case 3	%
RMS(acc _{body}) (m/s ²)	0.6277	0.566	-9.81	0.514	-18.11	0.494	-21.32
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.028	20.61	0.029	25.00	0.028	21.05
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.023	-0.43	0.024	4.29	0.028	20.60
Maximum (x1) (m)	0.016	0.016	0.30	0.016	0.07	0.016	1.83
Maximum (x2) (m)	0.016	0.016	-0.14	0.016	-0.13	0.016	1.49
Tire Force Front (N)	8611	7593	-11.82	7037	-18.28	9019	4.74
Tire Force Rear (N)	10537	10071	-4.43	9945	-5.62	12704	20.56

Πίνακας 5.21: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων– Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
Γενετικός Αλγόριθμος - Πληθυσμός: 200	Αρχικές Τιμές	Case 1	Case 2	Case 3
<i>Kf (N/m)</i>	38000	20170	38408	19398
<i>Cf (N·s/m)</i>	15399	10000	11125	10830
<i>Kr (N/m)</i>	38000	10000	14889	13440
<i>Cr (N·s/m)</i>	15399	11144	18464	11492
<i>Kfn (N/m³)</i>	19800000	1000000	7390436	8246099
<i>Kfr (N/m³)</i>	19800000	1000000	4977341	2946414
<i>Ktf (N/m)</i>	1500000	2917550	2968435	2805600

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
FminCon	Αρχικές Τιμές	Case 1	Case 2	Case 3
<i>Kf (N/m)</i>	38000	78498	30789	10000
<i>Cf (N·s/m)</i>	15399	10467	10001	10445
<i>Kr (N/m)</i>	38000	27684	55924	59482
<i>Cr (N·s/m)</i>	15399	14447	13472	10000
<i>Kfn (N/m³)</i>	19800000	19802890	19801900	19831048
<i>Kfr (N/m³)</i>	19800000	19788110	19811269	19809457
<i>Ktf (N/m)</i>	1500000	1515451	1491363	1462760

Πίνακας 5.22: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

		Time(s)
Balanced C1	GA_200	8150
	FminCon	5800
Balanced C2	GA_200	7325
	FminCon	5562
Balanced C3	GA_200	9033
	FminCon	6900

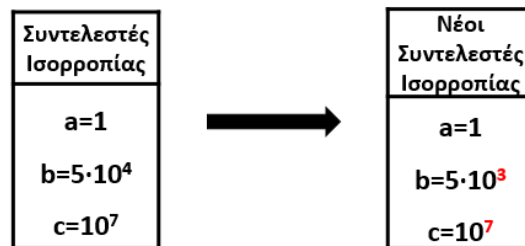
Στα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής συνάρτησης γίνεται εμφανής η προσπάθεια των μεθόδων Βελτιστοποίησης να ισορροπήσουν ανάμεσα στους τρεις στόχους που έχουν ορισθεί. Θετικότερα αποτελέσματα, δίνει το πρώτο σενάριο στο οποίο η υψηλότερη τιμή των συντελεστών βαρύτητας δίνεται στον όρο της επιτάχυνσης. Το δεύτερο σενάριο με υψηλότερη τιμή βαρύτητας στον όρο της διαδρομής της ανάρτησης φαίνεται να δίνει αποτελέσματα τα οποία δεν ικανοποιούν συγκριτικά με τα υπόλοιπα δυο σενάρια. Με βάση τα αποτελέσματα των περιπτώσεων C1 και C3 ενισχύεται και το συμπέρασμα ότι ο πρώτος και τρίτος στόχος συνδέονται άμεσα καθώς υπάρχουν αντίστοιχες μειώσεις και στις δυο περιπτώσεις. Όσον αφορά την αιτιοκρατική μέθοδο, συμπεραίνεται ότι δεν ήταν ικανή να αποδώσει καθώς και στις τρεις περιπτώσεις απέτυχε να καλύψει τους στόχους που είχαν τεθεί. Ειδικά στην περίπτωση C3 δεν ικανοποίησε τον πρωταρχικό στόχο της βελτιστοποίησης.

5.1.10 Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση τόσο των βέλτιστων λύσεων στο μονοκριτηριακό πρόβλημα όσο και στο πολυκριτηριακό, καθώς και τον αυξημένο υπολογιστικό χρόνο στην εύρεση της λύσης, ορίστηκε μια νέα αντικειμενική συνάρτηση για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ουσιαστικά, γίνεται προσπάθεια να βελτιωθούν τα αποτελέσματα μέσω μια διαφορετικής αντικειμενικής συνάρτησης που αποτελεί μια Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση. Από τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις γίνεται κατανοητό ότι ο όρος της άνεσης των επιβατών αποτελεί τον κύριο στόχο της βελτιστοποίησης, καθώς τόσο όταν αποτελούσε το μοναδικό στόχο της αντικειμενικής συνάρτησης (Case 1), όσο και όταν είχε το μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στο πολυκριτηριακό πρόβλημα (Balanced C1), απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Έτσι στην νέα προσέγγιση η τυπική απόκλιση της επιτάχυνσης αποτελεί τον κύριο στόχο της βελτιστοποίησης ενώ οι άλλοι δύο στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν στην πολυκριτηριακή μέθοδο χρησιμοποιούνται στην νέα αντικειμενική συνάρτηση ως συναρτήσεις ποινής (δευτερεύοντες στόχοι). Πιο συγκεκριμένα η νέα αντικειμενική συνάρτηση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$fitness = w_1 \cdot a \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot [b \cdot var(suspension\ travel_R) + c \cdot var(tire\ deflection_R)] \quad (13)$$

Οι συντελεστές ισορροπίας που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα έχουν ως στόχο την διατήρηση της τάξης των τριών στόχων στο ίδιο επίπεδο έτσι ώστε να διατηρείται η ισορροπημένη κατανομή των μεγεθών. Στη νέα προσέγγιση οι συντελεστές ισορροπίας υποβιβάζουν την τάξη των δευτερευόντων στόχων κατά μια, έτσι ώστε να διατηρηθεί ο χαρακτήρας της ποινής που τους δόθηκε.



Σχήμα 5.3: Συντελεστές Ισορροπίας

Οι επιμέρους όροι της αντικειμενικής συνάρτησης καταλαμβάνουν διαφορετικό ποσοστό της συνολικής τιμής Fitness.

$$term_1 = w_1 \cdot a \cdot var(acc_{body}) = 0.65 \div 0.80 \cdot fitness \quad (14)$$

$$term_2 = w_2 \cdot b \cdot var(suspension\ travel_R) = 0.10 \div 0.15 \cdot fitness \quad (15)$$

$$term_3 = w_3 \cdot c \cdot var(tire\ deflection_R) = 0.10 \div 0.15 \cdot fitness \quad (16)$$

Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 14-16, οι όροι 2 και 3 λειτουργούν τελικά ως ποινές στην λύση, παρόλο που αποτελούν ενεργούς στόχους της βελτιστοποίησης. Έτσι στις ήδη υπάρχουσες ποινές (Θανατική Ποινή, KKT συνθήκες) προστίθενται και δυο νέες ποινές οι οποίες επιβάλλονται σταθερά στην τιμή της συνάρτησης Fitness. Με τον τρόπο αυτό οι όροι 2, 3 καθοδηγούν την λύση σε καλύτερη περιοχή λύσεων ανεξάρτητα με την ικανοποίηση των αρχικών περιορισμών του προβλήματος. Η λύση, με την βοήθεια των όρων ποινής αποφεύγει τα τοπικά ελάχιστα και οδηγείται στην εύρεση του ζητούμενου ολικού ελαχίστου.

5.1.10.1 Αποτελέσματα Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$fitness = w_1 \cdot a \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot [b \cdot var(suspension\ travel_R) + c \cdot var(tire\ deflection_R)] \quad (17)$$

Πίνακας 5.23: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Αρχικές Τιμές	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_2	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.6277	0.4324	-31.11	0.397	-36.77	0.420	-33.06
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.027	16.23	0.026	14.91	0.027	19.30
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.025	8.58	0.025	9.01	0.025	7.73
Maximum (x1)(m)	0.016	0.016	-1.04	0.016	-1.47	0.016	-1.20
Maximum (x2)(m)	0.016	0.016	-1.44	0.016	-1.71	0.016	-1.50
Tire Force Front(N)	8611	6767	-21.41	6486	-24.68	6444	-25.16
Tire Force Rear(N)	10537	8145	-22.70	7444	-29.36	8167	-22.49
	Αρχικές Τιμές	Hyb_1000_10	%	Hybrid_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.6277	0.388	-38.20	0.4160	-33.72	0.4515	-33.72
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.027	18.42	0.027	18.86	0.027	19.74
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.026	11.50	0.026	12.02	0.027	13.73
Maximum (x1)(m)	0.016	0.016	-1.80	0.016	-1.72	0.016	-1.72
Maximum (x2)(m)	0.016	0.016	-1.87	0.016	-1.82	0.016	-1.82
Tire Force Front(N)	8611	6287	-26.99	6414	-25.51	7011	-25.51
Tire Force Rear(N)	10537	7380	-29.96	7763	-26.33	8610	-26.33

Πίνακας 5.24: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	Αρχικές Τιμές	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_2
Kf (N/m)	38000	13355	11497	10360
Cf (N·s/m)	15399	10008	10007	9182
Kr (N/m)	38000	13387	10203	15626
Cr (N·s/m)	15399	10503	10026	10612
Kfn ((N/m³))	19800000	4455700	1638000	22882790
Kfr (N/m³)	19800000	1032500	3185100	4414266
Ktf (N/m)	1500000	2253900	2612000	2298360
	Αρχικές Τιμές	Hyb_1000_10	Hybrid_200_10	FminCon
Kf (N/m)	38000	11063	15217	10514
Cf (N·s/m)	15399	9058	9162	10096
Kr (N/m)	38000	12742	27880	27052
Cr (N·s/m)	15399	9338	9787	10615
Kfn ((N/m³))	19800000	5149110	19653000	19716000
Kfr (N/m³)	19800000	1743004	19641000	19842000
Ktf (N/m)	1500000	2831782	2857615	1580300

Πίνακας 5.25: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

	Time(s)
GA_200	8500
GA_1000	22900
Hyb_1000_2	17500
Hyb_1000_10	27600
Hyb_200_10	3500
FminCon	6000

Σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ο πρωταρχικός στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης: οι μειώσεις στην τιμή RMS της επιτάχυνσης του σώματος είναι σημαντικές και τελικά οι τιμές της βρίσκονται κοντά στα αποδεκτά όρια άνεσης. Οι δυνάμεις των ελαστικών έχουν μειωθεί αισθητά, σε ένα ποσοστό της τάξης του 25% στις περισσότερες περιπτώσεις. Για άλλη μια φορά οι διαδρομές των αναρτήσεων αυξάνονται, συμβάλλοντας έτσι στο καλύτερο κράτημα του οχήματος και στην διατήρηση των μετατοπίσεων των τροχών στα ίδια επίπεδα. Η καλύτερη λύση σύμφωνα με τα μεγέθη δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος είναι αυτή της υβριδικής μεθόδου με πληθυσμό 1000 αλλά με μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Η περισσότερο συμφέρουσα από άποψη χρόνου είναι η υβριδική μέθοδος με πληθυσμό 200 όπου τα αποτελέσματα της δεν είναι εξίσου ικανοποιητικά, αλλά και είναι αποδεκτά. Τέλος σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού βρίσκονται στα ίδια επίπεδα, γεγονός που φανερώνει ότι όλες οι μέθοδοι εντόπισαν αντίστοιχες λύσεις που ανήκουν στην ίδια ευρύτερη οικογένεια λύσεων.

5.1.11 Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων μέσω Τιμής Fitness

Η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται στην σύγκριση των εξής σεναρίων:

Πίνακας 5.26: Εξεταζόμενα Σενάρια

Σενάριο	Περιγραφή
Case 1	Μονοκριτηριακή-Επιτάχυνση
Case 2	Μονοκριτηριακή-Διαδρομή Ανάρτησης
Case 3	Μονοκριτηριακή-Εκτροπή Ελαστικού
Balanced C1	Πολυκριτηριακή –Max Βάρος: Επιτάχυνση
Balanced C2	Πολυκριτηριακή –Max Βάρος: Διαδρομή Ανάρτησης
Balanced C3	Πολυκριτηριακή –Max Βάρος: Εκτροπή Ελαστικού
Pseudo	Ψεύδο-Πολυκριτηριακή

Πίνακας 5.27: Προσαρμοσμένα Αποτελέσματα – Συνάρτηση Fitness Μονοκριτηριακά Προβλήματα

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 1					
	GA_200	GA_1000	HY_1000_10	HY_200_10	FminCon
f1	0.2174	0.1817	0.1487	0.1595	0.2097
f2	0.831	0.799	0.792	0.791	0.974
f3	0.189	0.159	0.101	0.184	0.182
fp	0.3637	0.33035	0.2976	0.3235	0.39385

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 2					
	GA_200	GA_1000	HY_1000_10	HY_200_10	FminCon
f1	0.3471	0.4057	0.4993	0.4896	0.2339
f2	0.606	0.602	0.594	0.23	0.803
f3	0.433	0.733	0.55	0.53	0.307
fp	0.4333	0.5366	0.53565	0.4348	0.39445

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 3					
	GA_200	GA_1000	HY_1000_10	HY_200_10	FminCon
f1	0.2419	0.2	0.1714	0.194	0.2344
f2	1.016	0.889	0.921	0.984	0.804
f3	0.23	0.1978	0.187	0.167	0.321
fp	0.43245	0.3717	0.3627	0.38475	0.39845

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης γενικά αλλά και ειδικά της νέας αντικειμενικής συνάρτησης που δοκιμάστηκε, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων και επιμέρους σύγκριση των διαφόρων μεθόδων. Για να συγκριθούν απευθείας οι διάφορες συναρτήσεις (βλ. Πίνακα 4.6), έγινε αναγωγή όλων των κατηγοριών στην συνάρτηση της Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής. Έτσι αρχικά υπολογίστηκαν οι επιμέρους όροι της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε περίπτωση και στη συνέχεια προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να

απεικονίζουν την τιμή που θα είχαν εφόσον το πρόβλημα λυνόταν με την Ισορροπημένη Πολυκριτηριακή Μέθοδο.

Από τους πίνακες 4.27 προκύπτει το συμπέρασμα ότι ανεξαρτήτως υπολογιστικού χρόνου τα σετ βέλτιστων τιμών που αποδίδουν τις καλύτερες λύσεις σύμφωνα με τις τιμές Fitness για τα μονοκριτηριακά προβλήματα, είναι αυτά τα οποία προέκυψαν από την Υβριδική Μέθοδο με τον μεγαλύτερο πληθυσμό στον Γενετικό Αλγόριθμο (1000) και το μεγαλύτερο αριθμό γενιών επίδρασης (10) ενώ στην δεύτερη περίπτωση η αιτιοκρατική μέθοδος έδωσε την καλύτερη τιμή Fitness. Εάν εξεταστούν οι τρεις περιπτώσεις φαίνεται από τους όρους της αντικειμενικής συνάρτησης ότι η κάθε μια έχει προσεγγίσει διαφορετική περιοχή λύσεων. Το σενάριο 2, το οποίο περιλαμβάνει μόνο την διαδρομή της ανάρτησης ως στόχο βελτιστοποίησης φαίνεται ότι έχει εντοπίσει μια σαφώς λιγότερο αποδοτική περιοχή λύσεων.

Πίνακας 5.28: Αποτέλεσμα – Συνάρτηση Fitness Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Balanced						
	Balanced C1		Balanced C2		Balanced C3	
	GA_200	FminCon	GA_200	FminCon	GA_200	FminCon
f1	0.2084	0.3207	0.3378	0.2933	0.2242	0.244
f2	0.6986	0.8824	0.6587	0.8264	0.7638	1.021
f3	0.1294	0.7286	0.3467	1.4101	0.2577	1.12
fp	0.3112	0.5631	0.500475	0.705775	0.37585	0.87625

Στον πίνακα 4.28 γίνεται εμφανής η υπεροχή του Σεναρίου I της Πολυκριτηριακής προσέγγισης, επιβεβαιώνοντας ότι η επιτάχυνση είναι ο όρος με την μεγαλύτερη επιρροή στο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε. Ενδιαφέρον στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι ντετερμινιστική μέθοδος έχει εντοπίσει τελείως διαφορετική περιοχή λύσεων από τις υπόλοιπες μεθόδους, πιθανότατα έχοντας παγιδευτεί σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Σε αυτό το σετ τρεξιμάτων (εν τη απουσία Υβριδικών Βελτιστοποιήσεων) και ανεξαρτήτως υπολογιστικού χρόνου, τα καλύτερα αποτελέσματα παραδόθηκαν από τον Γενετικό Αλγόριθμο με το μεγαλύτερο πληθυσμό (1000).

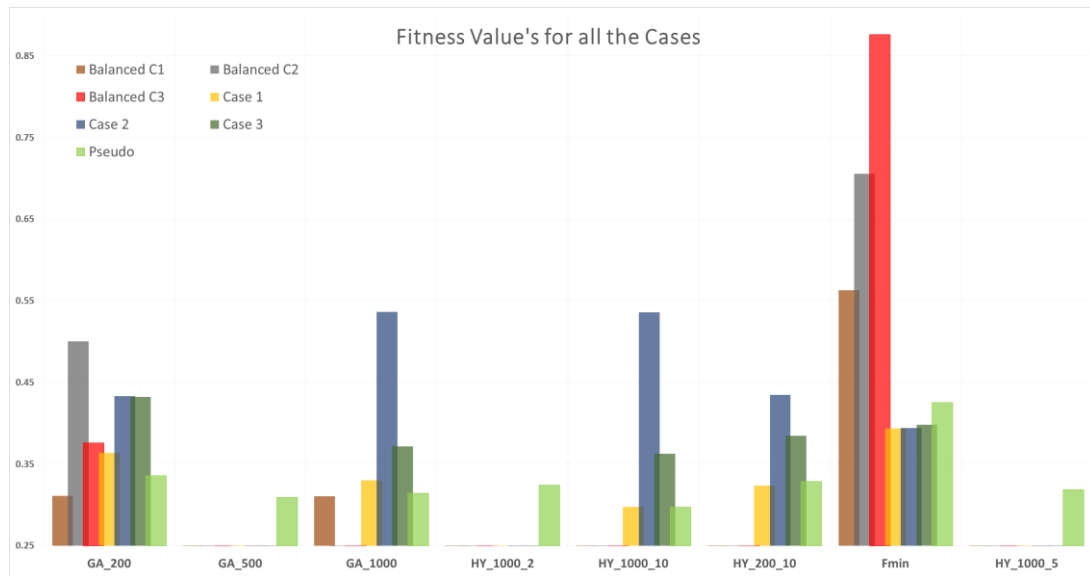
Πίνακας 5.29: Προσαρμοσμένα Αποτελέσματα Ψεύδο-Πολυκριτηριακής σε Συνάρτηση Fitness Πολυκριτηριακής

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Pseudo						
	GA_200	GA_1000	HY_1000_2	HY_1000_10	HY_200_10	FminCon
f1	0.1845	0.1741	0.1741	0.1508	0.1699	0.2007
f2	0.0764	0.0772	0.0757	0.0782	0.0862	0.0845
f3	0.021	0.0138	0.0192	0.0105	0.0114	0.0455
fp	0.1166	0.1098	0.110775	0.097575	0.10935	0.1328

Τα αποτελέσματα των διάφορων αλγορίθμων για την Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Συνάρτηση συνηγορούν ότι σε όλες τις περιπτώσεις η λύση βρίσκεται στην ίδια περιοχή υποψήφιας λύσεων. Για άλλη μια φορά η Υβριδική Μέθοδος του μεγαλύτερου πληθυσμού και των περισσότερων γενιών επίδρασης (10) εντόπισε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Φυσικά, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση των διαφόρων μεγεθών της δυναμικής συμπεριφοράς αλλά και του υπολογιστικού χρόνου σε προηγούμενη ενότητα, η

αναμφίβολα καλύτερη λύση του Υβριδικού, ίσως υπολείπεται κάποιων άλλων, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου που απαιτεί.

Πίνακας 5.30: Σύγκριση Τιμών Αντικειμενικών Συναρτήσεων



Συγκρίνοντας τις προσαρμοσμένες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων στο πιο πάνω διάγραμμα γίνεται κατανοητό ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, το μονοκριτηριακό σενάριο της επιτάχυνσης και η ψευδο-πολυκριτηριακή μέθοδος αποδίδουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Αντιθετα, τα πιο αδύναμα σενάρια είναι το μονοκριτηριακό σενάριο της διαδρομής της ανάρτησης και το Ισορροπημένο Πολυκριτηριακό με έμφαση ,πάλι, στη διαδρομή της ανάρτησης. Στη συνέχεια θα συγκριθούν τα καλύτερα αποτελέσματα από κάθε διαφορετικό σενάριο, έτσι ώστε να εξαχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Πίνακας 5.31: Σύγκριση Συνάρτηση Fitness (Best Fitness)

Σύγκριση Best Fitness							
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced-C1	Balanced-C2	Balanced-C3	Pseudo
	Hyb_1000_10	FminCon	Hyb_1000_10	GA_200	GA_200	GA_200	Hyb_1000_10
f1	0.1487	0.2339	0.1714	0.2084	0.3378	0.2242	0.1508
f2	0.792	0.803	0.921	0.6986	0.6587	0.7638	0.782
f3	0.101	0.307	0.187	0.1294	0.3467	0.2577	0.105
fp	0.2976	0.39445	0.3627	0.3112	0.500475	0.37585	0.29715

Συγκριτικά, φαίνεται στον πίνακα 4.31 ότι η Ψευδο-Πολυκριτηριακή Μέθοδος όσον αφορά το κομμάτι της αντικειμενικής Συνάρτησης απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα από τις υπόλοιπες μεθόδους. Παρατηρώντας τις επιμέρους τιμές των μεγεθών σε κάθε περίπτωση, γίνεται κατανοητό ότι ο αλγόριθμος βρίσκεται στην ίδια περιοχή υποψήφια λύσεων σε όλες τις περιπτώσεις. Όμως η μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δίδεται από την τελευταία προσέγγιση, κάτι το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά πάσα πιθανότητα αυτό είναι το Ολικό Ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος.

Πίνακας 5.32: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness)

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Αρχικές Τιμές	Case 1	%	Case 2	%	Case 3	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.6277	0.3887	-38.07	0.4735	-24.57	0.4085	-34.93
Suspension Travel Front (m)	0.033	0.027	17.98	0.026	14.91	0.028	22.37
Suspension Travel Rear (m)	0.028	0.026	12.02	0.025	5.58	0.026	11.16
Maximum (x1)(m)	0.016	0.016	-1.79	0.016	-1.26	0.016	-1.71
Maximum (x2)(m)	0.016	0.016	-1.84	0.016	-1.64	0.016	-1.88
Tire Force Front(N)	8611	6332	-26.46	7142	-17.06	6699	-22.20
Tire Force Rear(N)	10537	7342	-30.32	8492	-19.41	7328	-30.45

Πίνακας 5.33: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness) (Συνέχεια)

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Αρχικές Τιμές	Balanced C1	%	Balanced C2	%	Balanced C3	%	Pseudo	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.6277	0.437	-30.31	0.565	-10.02	0.460	-26.65	0.388	-38.20
Suspension Travel Front (m)	0.033	0.026	15.79	0.026	14.04	0.026	11.84	0.027	18.42
Suspension Travel Rear (m)	0.028	0.024	3.43	0.019	-18.88	0.024	3.43	0.026	11.50
Maximum (x1)(m)	0.016	0.016	-1.72	0.016	-1.72	0.016	-1.56	0.016	-1.80
Maximum (x2)(m)	0.016	0.016	-1.79	0.016	-1.54	0.016	-1.73	0.016	-1.87
Tire Force Front(N)	8611	6723	-21.93	7230	-16.03	6989	-18.83	6287	-26.99
Tire Force Rear(N)	10537	8146	-22.69	10431	-1.01	8361	-20.65	7380	-29.96

Πίνακας 5.34: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Best Fitness

Σύγκριση Μεταβλητών Σχεδιασμού (Best Fitness)							
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced C1	Balanced C2	Balanced C3	Pseudo
Kf (N/m)	10928	31711	42807	20170	38408	19398	11063
Cf (N·s/m)	9081	10714	9145	10000	11125	10830	9058
Kr (N/m)	11808	22351	9879	10000	14889	13440	12742
Cr (N·s/m)	9166	11479	9102	11144	18464	11492	9338
Kfn (N/m³)	8199775	1150813	3038192	1000000	7390436	8246099	5149110
Kfr (N/m³)	1536280	3309070	2446770	1000000	4977341	2946414	1743004
Ktf (N/m)	2850337	2606485	2919465	2917550	2968435	2805600	2831782

Πίνακας 5.35: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου- Best Fitness

	Time(s)
Case 1	37000
Case 2	11600
Case 3	25700
Balanced C1	8150
Balanced C2	7325
Balanced C3	9033
Pseudo	27600

Τα αποτελέσματα των πινάκων 5.32-5.33 με τα δυναμικά μεγέθη αυξάνουν την ισχύ των συμπερασμάτων από τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Πράγματι οι σημαντικότερες μειώσεις λαμβάνουν χώρα στα αποτελέσματα της Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Μεθόδου. Όσον αφορά και τον υπολογιστικό χρόνο η τελευταία «συμφέρει» καθώς λύνει ουσιαστικά το ίδιο πρόβλημα σε σημαντικά λιγότερο υπολογιστικό χρόνο με συνολικά καλύτερα αποτελέσματα από τις μεθόδους με το αντίστοιχο μέγεθος πληθυσμού.

5.1.12 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης

Πίνακας 5.36: Παράμετροι Αναρτήσεων και Ελαστικού

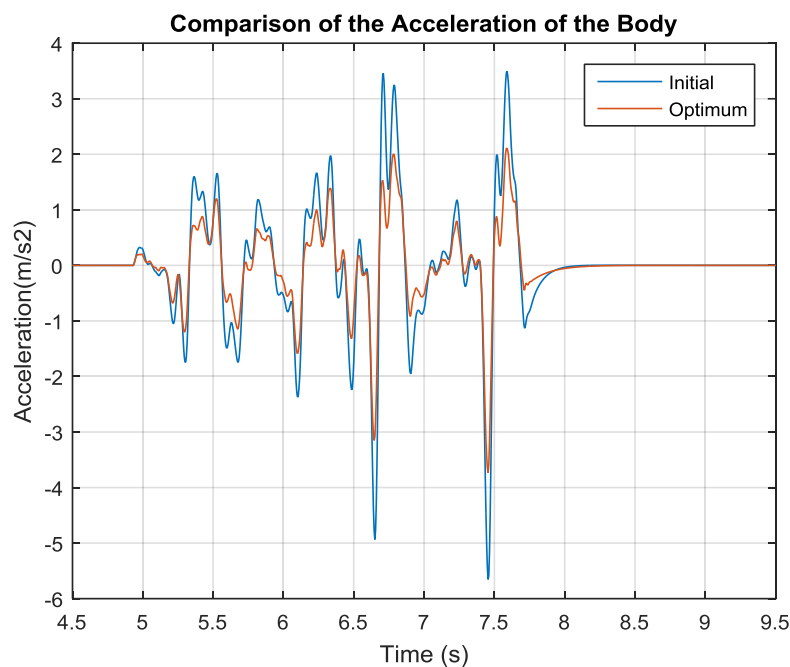
Μεταβλητές Σχεδιασμού	Βέλτιστη Λύση
Kf (N/m)	11063
Cf (N·s/m)	9058
Kr (N/m)	12742
Cr (N·s/m)	9338
Kfn (N/m³)	5149110
Kfr (N/m³)	1743004
Ktf (N/m)	2831782

Οι παράμετροι της εμπρόσθιας και οπίσθιας ανάρτησης αλλά και του εμπρόσθιου ελαστικού, οι οποίες προέκυψαν μέσα από τη διαδικασία της Βελτιστοποίησης είναι οι ακόλουθες.

Πίνακας 5.37: Δυναμικά Μεγέθη Βέλτιστου Μοντέλου

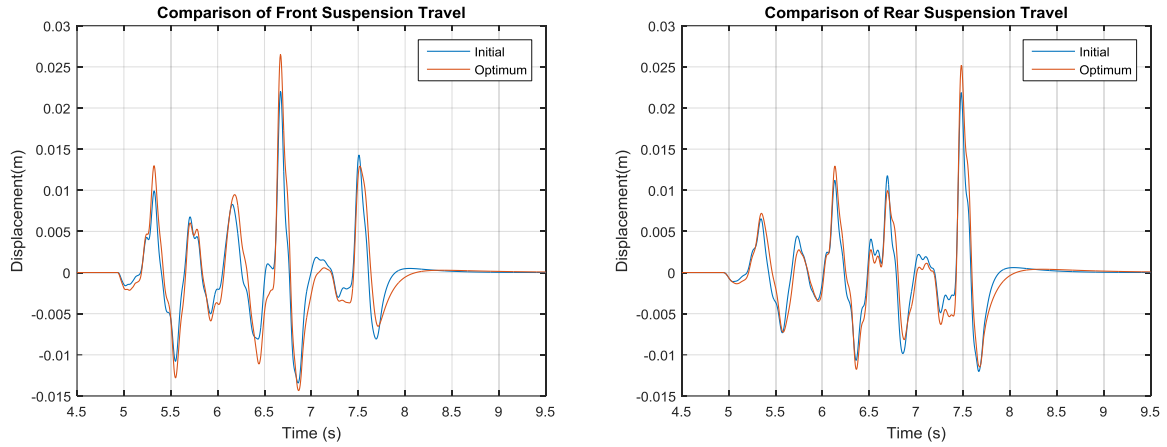
Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς	Αρχικές Τιμές	Βέλτιστες Τιμές	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.6277	0.388	-38.20
Suspension Travel Front (m)	0.023	0.027	18.42
Suspension Travel Rear (m)	0.023	0.026	11.50
Maximum (x1)(m)	0.016	0.016	-1.80
Maximum (x2)(m)	0.016	0.016	-1.87
Tire Force Front(N)	8611	6287	-26.99
Tire Force Rear(N)	10537	7380	-29.96

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα δυναμικών μεγεθών του οχήματος όπως η επιτάχυνση σώματος, η διαδρομή της ανάρτησης, οι δυνάμεις στα ελαστικά κ.α.



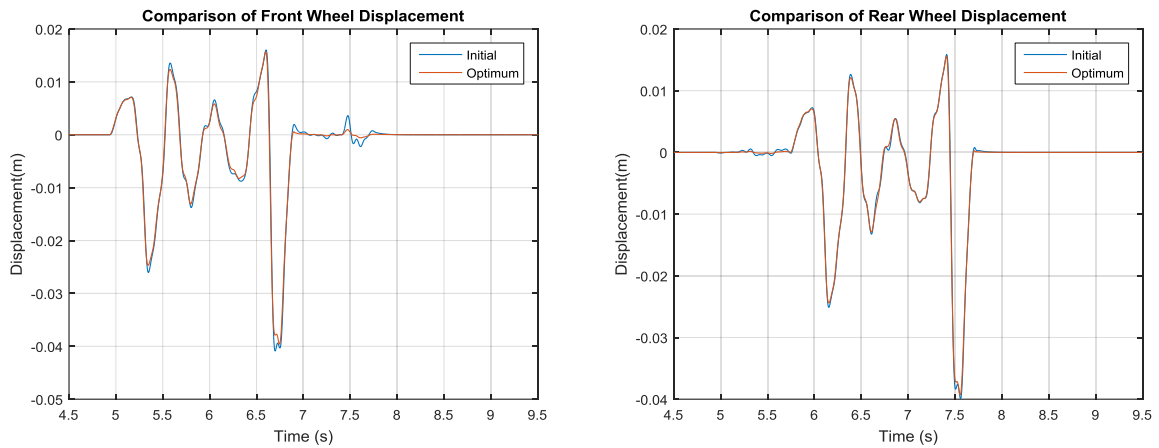
Σχήμα 5.4: Σύγκριση Επιτάχυνσης Σώματος

Στο Σχήμα 4.4 είναι εμφανής η μείωση των επιταχύνσεων του σώματος σε όλο το μήκος του προφίλ. Τα ακρότατα της συνάρτησης της επιτάχυνσης έχουν μειωθεί κατά πολύ, εξασφαλίζοντας ένα άνετο ταξίδι για τους επιβάτες. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από την τιμή του RMS της επιτάχυνσης του σώματος, η οποία αποτελεί τον κύριο δείκτη της άνεσης. Η τιμή του ($0.388 m/s^2$) προσεγγίζει τα αποδεκτά όρια για την άνεση του επιβάτη ($0.35 m/s^2$).

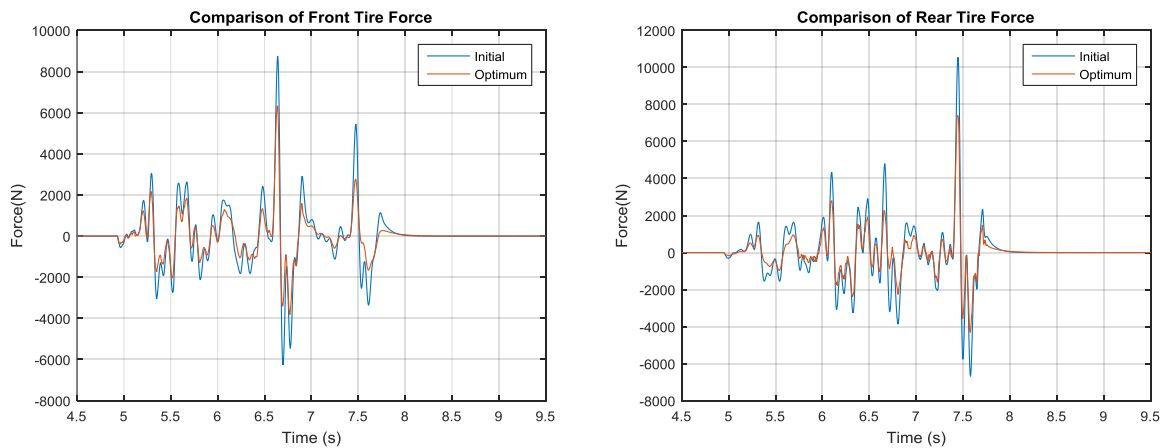


Σχήμα 5.5: Σύγκριση Διαδρομών Αναρτήσεων

Στα διαγράμματα της διαδρομής των δυο συστημάτων αναρτήσεων, είναι εμφανής η αύξηση των τιμών των μεγίστων τους. Με τον τρόπο αυτό, η ανάρτηση συμβάλλει αποτελεσματικότερα στο κράτημα του οχήματος και συντηρεί τις μετατοπίσεις των τροχών στα ίδια. Όσον αφορά τις μετατοπίσεις των τροχών όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα οι μεταβολές στο προφίλ τους είναι μικρές, και πιθανότατα αν εξεταστεί κάποιο άλλο μέγεθος που τις αφορά, όπως η τυπική απόκλιση τους, μπορεί να παρατηρηθούν ουσιαστικές διαφορές.

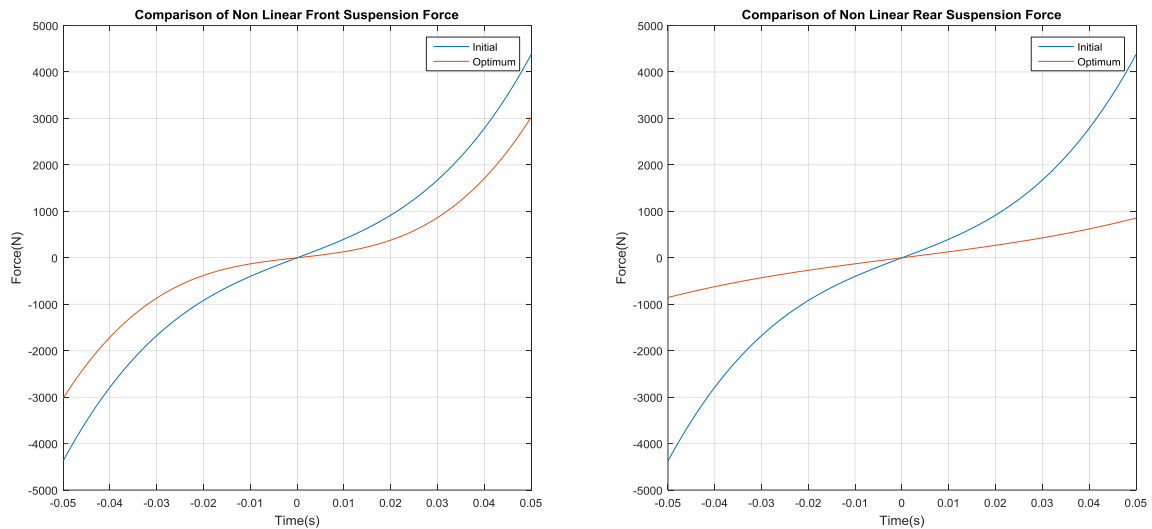


Σχήμα 5.6: Σύγκριση Μετατοπίσεων Τροχών



Σχήμα 5.7: Σύγκριση Δυνάμεων Ελαστικών

Όσον αφορά τις δυνάμεις των ελαστικών, παρατηρούνται σημαντικές μειώσεις σε όλο το προφίλ. Στις δυνάμεις των ελαστικών εμπλέκεται τόσο η συμπίεση των ελαστικών, η οποία αποτελεί τον τρίτο στόχο της βελτιστοποίησης, όσο και ο συντελεστής σκληρότητας των ελαστικών (k_t), ο οποίος αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού του προβλήματος. Με τις μειώσεις αυτές, ενισχύεται το κράτημα του οχήματος και εν τέλει αυξάνεται η ασφάλεια που προσφέρει.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση Μη Γραμμικών Δυνάμεων Ελατηρίων

Τόσο στο εμπρόσθιο όσο και στο οπίσθιο σύστημα ανάρτησης σύμφωνα με τα σχήματα διαπιστώνεται ότι η βελτιστοποίηση τείνει να «μαλακώσει» την ανάρτηση, κάτι το οποίο φαίνεται από το μειωμένο εύρος της μη γραμμικής δύναμης του ελατηρίου. Έτσι διασφαλίζεται η άνεση του οδηγού και η ασφάλεια του μεταφερόμενου φορτίου. Στο οπίσθιο σύστημα η ανάρτηση γίνεται σχεδόν γραμμική.

5.2 Εγκάρσιο Εμπόδιο Υλοποιημένο με Μαθηματική Συνάρτηση

Η προσπάθεια για επαλήθευση της ορθότητας της ψεύδο-πολυκριτηριακής προσέγγισης οδήγησε στην εφαρμογή της μεθόδου και σε ένα δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στο νέο πρόβλημα η διέγερση θεωρητικά παραμένει ένας εγκάρσιο εμπόδιο, όμως αυτή τη φορά είναι υλοποιημένος με μια μαθηματική συνάρτηση ημιτόνου. Επίσης, η παραμετροποίηση των αλγορίθμων έγινε με ορθότερα κριτήρια, οδηγώντας σε ένα πιο στιβαρό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η ανάλυση που έπεται, δομείται κατά αντίστοιχο τρόπο με την προηγούμενη ενότητα, αλλά παραλείπονται οι σχετικές επεξηγήσεις για αποφυγή της επαναληψιμότητας.

5.2.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού

Πίνακας 5.38: Μεταβλητές Σχεδιασμού

Μεταβλητές Σχεδιασμού	
K_f, k_r	Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) (N/m)
C_f, C_r	Γραμμικός Όρος Απόσβεσης (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) ($N*s/m$)
K_{fn}, k_{rn}	Μη Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρόσθιος/Οπίσθιος) (N/m)

Οι μεταβλητές σχεδιασμού αφορούν αποκλειστικά μεγέθη των συστημάτων ανάρτησης καθώς η σκληρότητα του ελαστικού θεωρείται σταθερή πλέον και ίση με $4 \cdot 10^4$ N/m.

5.2.2 Αρχικές Τιμές

Σε αυτό το πρόβλημα οι αρχικές τιμές παραλείφθηκαν, έτσι ώστε ειδικά ο γενετικός αλγόριθμος να είναι «ελεύθερος» να ψάξει σε όσο το δυνατόν πιο τυχαίο πεδίο λύσης. Στην ντετερμινιστική μέθοδο ως αρχικές τιμές ορίστηκαν οι μέσες τιμές των άνω και κάτω ορίων των μεταβλητών σχεδιασμού.

5.2.3 Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού

Τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδιασμού ορίστηκαν με βάση τις τιμές των πραγματικών παραμέτρων της ανάρτησης του φορτηγού οχήματος του Εργαστηρίου αλλά και με βάση την βιβλιογραφία. Αποτελούν τον παράγοντα ο οποίος εγγυάται τον ρεαλισμό των αποτελεσμάτων καθώς όλες οι τιμές που επιλέχθηκαν βρίσκουν εφαρμογή σε βαρέα οχήματα της βιομηχανίας.

Πίνακας 5.39: Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού

Μεταβλητές Σχεδιασμού	Κάτω Όρια	Άνω Όρια
k_f, k_r (N/m)	$3.2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^5$
c_f, c_r (N·s/m)	$2 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^4$
k_{fn}, k_{rn} (N/m ³)	$5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^8$

5.2.4 Περιορισμοί – Ποινές

Οι περιορισμοί που τέθηκαν στο πρόβλημα μειώθηκαν συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Ο περιορισμός σχετικά με την άνεση των επιβατών παρέμεινε, καθώς η τελευταία αποτελεί τον βασικό στόχο όλης της βελτιστοποίησης, και προστέθηκαν όροι που αφορούν το ποσοστό της μη γραμμικής δύναμης του ελατηρίου των συστημάτων ανάρτησης. Όσον αφορά την επιβολή ποινών, στο κομμάτι των γενετικών αλγορίθμων διατηρείται η θανατική ποινή, ενώ η αιτιοκρατική μέθοδος εμπεριέχει την επίλυση των συνθηκών ΚΚΤ.

Πίνακας 5.40: Περιορισμοί Προβλήματος

Περιορισμοί	Τιμές
RMS Επιτάχυνσης Σώματος(m/s ²)	0.90
Ποσοστό μη Γραμμικότητας της Δύναμης του Ελατηρίου(Εμπρός/Πίσω)(%)	10÷30

5.2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που επιλέχθηκαν ακολουθούν την λογική του προηγούμενου προβλήματος και επικεντρώνονται στους αντίστοιχους στόχους: στην άνεση των επιβατών, στην διαδρομή της ανάρτησης και στην εκτροπή του ελαστικού. Στην προσπάθεια υλοποίησης ενός περισσότερο ρεαλιστικού προβλήματος πλέον εξετάζονται μεγέθη που αφορούν τόσο στο εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης όσο και στο οπίσθιο. Έτσι οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

5.2.5.1 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση

Σενάριο 1^ο: Άνεση Επιβατών (Case 1)

$$f_1 = var(acc_{body}) \tag{18}$$

Σενάριο 2^ο: Διαδρομή Συστημάτων Ανάρτησης (Case 2)

$$f_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(\text{suspension travel}_f) + \text{var}(\text{suspension travel}_R) \right) = \quad (19)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{body} - a_1 \cdot \theta - x_{front}) + \text{var}(x_{body} + a_2 \cdot \theta - x_{rear}) \right)$$

Σενάριο 3^ο: Εκτροπή Οπίσθιου Ελαστικού (Case 3)

$$f_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(\text{tire deflection}_F) + \text{var}(\text{tire deflection}_R) \right) = \quad (20)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{front} - y_1) + \text{var}(x_{rear} - y_2) \right)$$

5.2.5.2 Πολυκριτηριακή – Ψευδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

$$f_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(\text{tire deflection}_F) + \text{var}(\text{tire deflection}_R) \right) = \quad (21)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{front} - y_1) + \text{var}(x_{rear} - y_2) \right)$$

Πίνακας 5.41: Συντελεστές Ισορροπίας

Συντελεστές Ισορροπίας	Τιμή
W_1	1
W_2	10^4
W_3	10^5

Και στις δυο προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια αντικειμενική συνάρτηση. Εμπεριέχει και τους τρεις στόχους της βελτιστοποίησης (άνεση επιβατών, διαδρομή αναρτήσεων και εκτροπή ελαστικών). Η διαφορά μεταξύ των δυο έγκειται στους συντελεστές που πλαισιώνουν τις τυπικές αποκλίσεις των στόχων. Η διεξαγωγή προσομοιώσεων οδήγησε στην επιλογή των τιμών των κάτωθι συντελεστών. Στην περίπτωση της Ψεύδο- Πολυκριτηριακής έγινε με τον υποβιβασμό μιας τάξης των συντελεστών ισορροπίας.

Πίνακας 5.42: Συντελεστές Ισορροπίας – Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Συνάρτηση

Συντελεστές Ισορροπίας	Τιμή
W_1	1
W_2	10^3
W_3	10^4

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια εν τη απουσία αρχικών τιμών ως βάση της σύγκρισης, τα διάφορα δυναμικά μεγέθη θα συγκρίνονται με την λιγότερο αποδοτική λύση ανά περίπτωση.

Πίνακας 5.43: Περιγραφή Σεναρίων

	Περιγραφή
Case 1	Μονοκριτηριακή-Επιτάχυνση
Case 2	Μονοκριτηριακή-Διαδρομή Ανάρτησης
Case 3	Μονοκριτηριακή-Εκτροπή Ελαστικού
Balanced C1	Πολυκριτηριακή –Max Βάρος: Επιτάχυνση
Pseudo	Ψεύδο-Πολυκριτηριακή

5.2.6 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Προσέγγισης

5.2.6.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1^ο: Τυπική Απόκλιση της Επιτάχυνσης του Σώματος

$$f_1 = var(acc_{body})$$

(22)

Πίνακας 5.44: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφορά Βέλτιστων Λύσεων –Σενάριο 1^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Βάση Σύγκρισης	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%
RMS(acc_{body}) (m/s²)	0.682	0.631	-7.54	0.561	-17.78	0.450	-34.01	0.682	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0244	0.0253	3.69	0.0369	51.20	0.0403	65.52	0.0244	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0377	0.0376	-0.29	0.0268	-28.94	0.0383	1.60	0.0377	0.00
Maximum (x1) (m)	0.0542	0.0552	1.80	0.0501	-7.68	0.0501	-7.63	0.0542	0.00
Maximum (x2) (m)	0.0501	0.0521	3.98	0.0530	5.72	0.0525	4.64	0.0501	0.00
Tire Force Front (N)	3833	4085	6.58	2249	-41.31	2991	-21.97	3833	0.00
Tire Force Rear (N)	3275	3061	-6.53	3750	14.49	2610	-20.31	3275	0.00
Non Linear % F	19	11	-	12	-	29	-	19	-
Non Linear % R	24	27	-	30	-	29	-	24	-

Πίνακας 5.45: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 1^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
Kf (N/m)	102620	34479	43094	105019
Cf (N·s/m)	6950	2000	2050	5890
Kr (N/m)	32352	74939	33652	58027
Cr (N·s/m)	2083	5112	2272	2155
Kfn (N/m³)	19712392	3429023	10899783	40817968
Kfr (N/m³)	8584193	44702359	9193798	13036970

Πίνακας 5.46: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 1^ο

	Time(s)
GA_200	886
GA_1000	9488
Hyb_1000_10	5030
Hyb_200_10	1364

Η υβριδική μέθοδος με μέγεθος πληθυσμού 200 δίνει την λιγότερη ικανοποιητική λύση. Έτσι χρησιμοποιείται σαν βάση σύγκρισης με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Έτσι παρατηρούνται σημαντικά μειούμενες τιμές στην επιτάχυνση, και σε κάποιες περιπτώσεις και στις δυνάμεις των ελαστικών. Στις διαδρομές των αναρτήσεων παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στις τιμές ανά περίπτωση. Όσον αφορά το κομμάτι της βελτιστοποίησης όσο αυξάνεται το μέγεθος του πληθυσμού, τα αποτελέσματα βελτιώνονται. Τα καλύτερα αποτελέσματα δίδονται από την υβριδική βελτιστοποίηση με το μεγαλύτερο πληθυσμό (1000). Συγκρίνοντας τις δυο επικρατέστερες μεθόδους (GA_1000-Hyb_1000_10) με βάση τον υπολογιστικό χρόνο, η υβριδική μέθοδος υπερτερεί του γενετικού αλγορίθμου μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο κατά 45% περίπου.

5.2.6.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2^{ου}: Διαδρομή Συστημάτων Ανάρτησης

$$f_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(var(suspension\ travel_f) + var(suspension\ travel_R) \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(var(x_{body} - a_1 \cdot \theta - x_{front}) + var(x_{body} + a_2 \cdot \theta - x_{rear}) \right) \quad (23)$$

Πίνακας 5.47: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 2^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Βάση Σύγκρισης	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%
RMS(acc_{body}) (m/s²)	0.994	0.989	-0.49	0.994	0.00	0.980	-1.39	0.908	-8.62
Suspension Travel Front (m)	0.0251	0.0302	20.46	0.0251	0.00	0.0259	3.31	0.0255	1.77
Suspension Travel Rear (m)	0.0213	0.0198	-7.19	0.0213	0.00	0.0209	-1.84	0.0224	5.15
Maximum (x1) (m)	0.0553	0.0529	-4.28	0.0553	0.00	0.0546	-1.15	0.0543	-1.81
Maximum (x2) (m)	0.0519	0.0517	-0.41	0.0519	0.00	0.0519	0.03	0.0520	0.15
Tire Force Front (N)	4168	4682	12.33	4168	0.00	3957	-5.07	3571	-14.32
Tire Force Rear (N)	3276	3559	8.66	3276	0.00	3364	2.69	3384	3.32
Non Linear % F	23	22	-	23	-	13	-	30	-
Non Linear % R	15	16	-	15	-	18	-	14	-

Πίνακας 5.48: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 2^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
Kf (N/m)	83283	51337	57879	38952
Cf (N·s/m)	6635	9696	8759	8003
Kr (N/m)	70210	36651	36934	47540
Cr (N·s/m)	9091	8757	9376	8286
Kfn (N/m³)	25658496	24799170	13059738	25615202
Kfr (N/m³)	34199024	13665315	18379364	16019698

Πίνακας 5.49: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 2^ο

	Time(s)
GA_200	737
GA_1000	9398
Hyb_1000_10	4611
Hyb_200_10	858

Για μια ακόμα φορά φαίνεται η απουσία της επιτάχυνσης του σώματος από την αντικειμενική συνάρτηση, καθώς οι μέθοδοι δεν επιφέρουν κάποια σημαντική μείωση, ειδικά αν οι τιμές αυτές συγκριθούν με την προηγούμενη περίπτωση. Γίνεται προσπάθεια μείωσης της διαδρομής των αναρτήσεων, ενώ οι δυνάμεις των ελαστικών κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα. Παρατηρώντας τον πίνακα των μεταβλητών σχεδιασμού γίνεται κατανοητό ότι σε κάθε υποψήφια λύση αντιστοιχεί μια διαφορετική ανάρτηση, σε κάποιες περιπτώσεις σκληρότερη ενώ σε άλλες πιο μαλακή

5.2.6.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3^{ου}: Συμπύεση των Ελαστικών

$$f_3 = \frac{1}{2} \cdot (\text{var}(\text{tire deflection}_F) + \text{var}(\text{tire deflection}_R)) = \frac{1}{2} \cdot (\text{var}(x_{\text{front}} - y_1) + \text{var}(x_{\text{rear}} - y_2)) \quad (24)$$

Πίνακας 5.50: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 3^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Σημείο Αναφοράς	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.520	0.637	22.48	0.520	0.00	0.529	1.65	0.556	6.99
Suspension Travel Front (m)	0.0360	0.0326	-9.27	0.0360	0.00	0.0378	5.19	0.0370	2.88
Suspension Travel Rear (m)	0.0317	0.0254	-20.09	0.0317	0.00	0.0307	-3.31	0.0286	-10.04
Maximum (x1)(m)	0.0503	0.0511	1.58	0.0503	0.00	0.0501	-0.45	0.0498	-0.94
Maximum (x2)(m)	0.0526	0.0520	-1.27	0.0526	0.00	0.0518	-1.56	0.0520	-1.20
Tire Force Front(N)	2226	2936	31.88	2226	0.00	2853	28.16	2515	12.98
Tire Force Rear(N)	3537	3381	-4.41	3537	0.00	3006	-15.01	3569	0.92
Non Linear % F	16	27	-	16	-	21	-	30	-
Non Linear % R	29	29	-	29	-	30	-	30	-

Πίνακας 5.51: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – 3^ο Σενάριο

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
Kf (N/m)	41279	33114	47186	37028
Cf (N·s/m)	3632	2139	2203	2092
Kr (N/m)	77718	65367	57595	67512
Cr (N·s/m)	4319	3661	2713	4211
Kfn ((N/m³))	14386651	4946342	8536345	11109471
Kfr (N/m³)	50016808	26855482	26196703	34724906

Πίνακας 5.52: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 3^ο

	Time(s)
GA_200	766
GA_1000	10510
Hyb_1000_10	4776
Hyb_200_10	850

Στην περίπτωση αυτή οι δυνάμεις των ελαστικών λαμβάνουν μικρότερες τιμές συγκριτικά με προηγούμενα αποτελέσματα. Οι τιμές του RMS της επιτάχυνσης του σώματος λαμβάνουν επίσης μειωμένες τιμές ενισχύοντας το συμπέρασμα ότι οι δυο αυτοί στόχοι συνδέονται.

5.2.7 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$fitness = w_1 \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(suspension\ travel_F) + var(suspension\ travel_R)) + w_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(tire\ deflection_F) + var(tire\ deflection_R)) \quad (25)$$

Πίνακας 5.53: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Βάση Σύγκρισης	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.666	0.666	0.00	0.611	-8.24	0.589	-11.57	0.635	-4.60
Suspension Travel Front (m)	0.0283	0.0283	0.00	0.0333	17.65	0.0312	10.05	0.0307	8.51
Suspension Travel Rear (m)	0.0331	0.0331	0.00	0.0266	-19.61	0.0291	-12.07	0.0283	-14.66
Maximum (x1)(m)	0.0531	0.0531	0.00	0.0515	-2.98	0.0517	-2.66	0.0519	-2.35
Maximum (x2)(m)	0.0513	0.0513	0.00	0.0522	1.67	0.0514	0.09	0.0506	-1.50
Tire Force Front(N)	3704	3704	0.00	3096	-16.43	2802	-24.36	3270	-11.72
Tire Force Rear(N)	2805	2805	0.00	2785	-0.72	3105	10.68	2937	4.69
Non Linear % F	17	17	-	13	-	24	-	21	-
Non Linear % R	15	15	-	30	-	29	-	29	-

Πίνακας 5.54: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
Kf (N/m)	81307	46116	42377	63116
Cf (N· s/m)	5431	4129	4002	3645
Kr (N/m)	57264	45371	60069	66731
Cr (N· s/m)	2877	5301	3693	2753
Kfn ((N/m³))	21216839	6236207	13615162	17849873
Kfr (N/m³)	9520792	27273147	28552367	34725336

Πίνακας 5.55: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

	Time(s)
GA_200	840
GA_1000	9566
Hyb_1000_10	4674
Hyb_200_10	923

Στην περίπτωση αυτή και οι τρεις στόχοι έχουν την ίδια βαρύτητα στην αντικειμενική συνάρτηση. Η υβριδική μέθοδος με τον μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού παραδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα, με το γενετικό αλγόριθμο με το μικρότερο μέγεθος πληθυσμού να παραδίδει τα λιγότερο αποδεκτά. Οι διαδρομές των αναρτήσεων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα ενώ οι διαφοροποιήσεις στις δυνάμεις των ελαστικών είναι της τάξης των 500 N

5.2.8 Αποτελέσματα Ψεύδο-Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$fitness = w_1 \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(suspension\ travel_F) + var(suspension\ travel_R)) + w_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(tire\ deflection_F) + var(tire\ deflection_R)) \quad (26)$$

Πίνακας 5.56: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Ψεύδο- Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς									
	Βάση Σύγκρισης	GA_200	%	GA_1000	%	Hyb_1000_10	%	Hyb_200_10	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.605	0.605	0.00	0.587	-2.96	0.538	-11.03	0.538	-11.07
Suspension Travel Front (m)	0.0381	0.0381	0.00	0.0402	5.45	0.0376	-1.39	0.0259	-31.91
Suspension Travel Rear (m)	0.0240	0.0240	0.00	0.0232	-3.15	0.0288	20.14	0.0356	48.44
Maximum (x1)(m)	0.0500	0.0500	0.00	0.0497	-0.64	0.0499	-0.24	0.0538	7.46
Maximum (x2)(m)	0.0520	0.0520	0.00	0.0528	1.56	0.0524	0.67	0.0516	-0.91
Tire Force Front(N)	3556	3556	0.00	3070	-13.67	2433	-31.59	2829	-20.45
Tire Force Rear(N)	2549	2549	0.00	2944	15.52	3367	32.11	3154	23.72
Non Linear % F	23	23	-	16	-	16	-	27	-
Non Linear % R	30	30	-	30	-	30	-	14	-

Πίνακας 5.57: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Ψευδο- Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Μεταβλητές Σχεδιασμού				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
Kf (N/m)	59559	49457	37635	43581
Cf (N· s/m)	2414	2164	2096	5312
Kr (N/m)	58680	56541	65343	45694
Cr (N· s/m)	3901	6281	4616	1910
Kfn ((N/m³))	12524503	5722890	5090016	24217170
Kfr (N/m³)	43357952	43972949	33229220	5894464

	Time(s)
GA_200	767
GA_1000	9740
Hyb_1000_10	4540
Hyb_200_10	1123

5.2.9 Ανάλυση Αποτελεσμάτων με βάση την Αντικειμενική Συνάρτηση

Για την εξακρίβωση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, η οποία περιεγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην περίπτωση αυτή οι βέλτιστες λύσεις όλων των διαθέσιμων αποτελεσμάτων ανάχθηκαν στην τιμή της ισορροπημένης πολυκριτηριακής μεθόδου.

Πίνακας 5.58: Προσαρμοσμένα Αποτελέσματα στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση – Μονοκριτηριακή Προσέγγιση

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 1				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.3802	0.3145	0.2024	0.4451
f2	0.995	1.206	1.42	0.857
f3	0.5315	0.27	0.259	0.502
fp	1.9067	1.7905	1.8814	1.8041

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 2				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.9844	0.9879	0.9605	0.7921
f2	0.5745	0.504	0.509	0.536
f3	0.734	0.82	0.735	0.609
fp	2.2929	2.3119	2.2045	1.9371

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 2				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.9844	0.9879	0.9605	0.7921
f2	0.5745	0.504	0.509	0.536
f3	0.734	0.82	0.735	0.609
fp	2.2929	2.3119	2.2045	1.9371

Στους πίνακες 5.58 φαίνεται η υπεροχή των υβριδικών μεθόδων, καθώς και στα τρία σενάρια έχουν εντοπίσει τις καλύτερες λύσεις. Το 1^ο σενάριο που εμπεριέχει μόνο την επιτάχυνση του σώματος δίνει συνολικά καλύτερα αποτελέσματα. Εξετάζοντας τους επί μέρους όρους της τιμής Fitness φαίνεται ότι το σενάριο 1 έχει πετύχει σημαντικές μειώσεις στον όρο της επιτάχυνσης, αλλά και στον όρο της συμπίεσης των ελαστικών, ενώ αντίθετα παρουσιάζει αυξημένες τιμές όσον αφορά τη διαδρομή των αναρτήσεων. Στο σενάριο 2, το οποίο εμπεριέχει μόνο τη διαδρομή των αναρτήσεων, παρατηρούνται τιμές για τον συγκεκριμένο όρο μειωμένες στο μισό. Τέλος, φαίνεται ότι οι διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης δεν έχουν εντοπίσει την ίδια οικογένεια υποψήφιων λύσεων καθώς υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές των όρων της αντικειμενικής συνάρτησης.

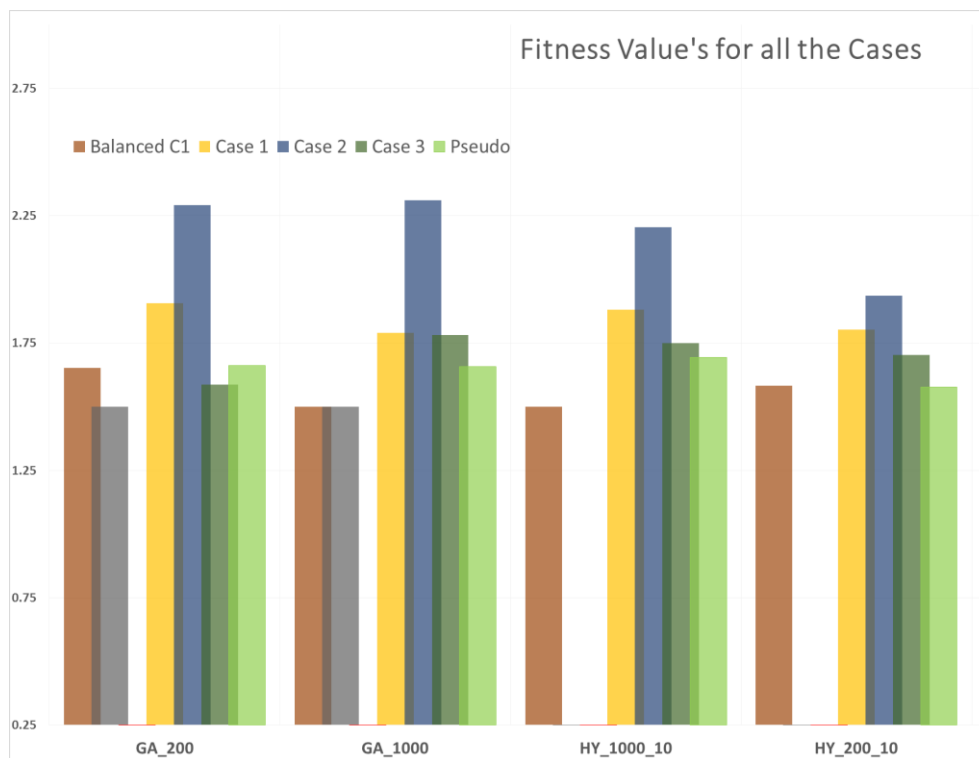
Πίνακας 5.59: Προσαρμοσμένα Αποτελέσματα στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση –Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Balanced				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.4318	0.3734	0.3466	0.3876
f2	0.7885	0.7839	0.8532	0.854
f3	0.432	0.3434	0.2994	0.341
fp	1.6523	1.5007	1.4992	1.5826

Πίνακας 5.60: Προσαρμοσμένα Αποτελέσματα στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση: Ψευδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Pseudo				
	GA_200	GA_1000	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.3655	0.345	0.2901	0.2758
f2	0.9695	0.994	1.155	0.963
f3	0.3275	0.318	0.249	0.338
fp	1.6625	1.657	1.6941	1.5768

Στους πίνακες 5.59-5.60 διαπιστώνεται και σε αυτές τις περιπτώσεις η υπεροχή των υβριδικών μεθόδων. Στην ισορροπημένη πολυκριτηριακή είναι εμφανής η προσπάθεια εξισορρόπησης των τριών στόχων, συμπέρασμα που ενισχύεται από τις μειωμένες τιμές που εμφανίζει ακόμα και ο δεύτερος στόχος, σε σχέση με τις αντίστοιχες μονοκριτηριακές. Όσον αφορά την ψεύδο- ολυκριτηριακή προσέγγιση, ο υποβιβασμός της τάξης των δυο στόχων γίνεται εμφανής, καθώς οι τιμές των αντίστοιχων όρων της αντικειμενικής συνάρτησης έχουν αυξημένες τιμές.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση Τιμών Fitness

Από τους πίνακες αλλά και το διάγραμμα που προηγήθηκαν, φαίνεται ότι και σε αυτό το πρόβλημα το δεύτερο σενάριο, στο οποίο η αντικειμενική συνάρτηση εμπλέκει μόνο τη διαδρομή των δυο συστημάτων ανάρτησης αποδίδει τα λιγότερο αποδεκτά αποτελέσματα.

Πίνακας 5.61: Σύγκριση Τιμών Αντικειμενικών Συναρτήσεων (Best Fitness)

Σύγκριση Best Fitness					
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced	Pseudo
	Hyb_1000_10	Hyb_200_10	Hyb_200_10	Hyb_1000_10	Hyb_200_10
f1	0.3145	0.7921	0.4042	0.3466	0.2758
f2	1.206	0.536	0.8685	0.8532	0.963
f3	0.27	0.609	0.315	0.2994	0.338
fp	1.7905	1.9371	1.5877	1.4992	1.5768

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.61 η ισορροπημένη πολυκριτηριακή προσέγγιση δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Στο πρώτο σενάριο ενώ ο όρος της επιτάχυνσης είναι αρκετά μειωμένος, ο όρος της διαδρομής των αναρτήσεων είναι πολύ υψηλός και τελικά είναι αυτός ο οποίος αυξάνει σημαντικά την τελική τιμή της Fitness. Στις υπόλοιπες δυο μονοκριτηριακές περιπτώσεις επίσης φαίνεται η μείωση στους όρους-στόχους, όμως η απουσία τόσο περιορισμών όσο και των αντίστοιχων όρων στην αντικειμενική συνάρτηση συντελεί στην αύξηση των υπόλοιπων όρων. Η ισορροπημένη πολυκριτηριακή εξυπηρετεί τον σκοπό της καθώς στις αντίστοιχες τιμές φαίνεται η προσπάθεια εξισορρόπησης των τριών στόχων. Τέλος η ψεύδο-πολυκριτηριακή αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ γίνονται διακριτοί οι ρόλοι κάθε στόχου στην τελική τιμή Fitness: η επιτάχυνση ως πρωταρχικός στόχος του προβλήματος μειώνεται σημαντικά, περισσότερο από ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις, ενώ στους εναπομείναντες δυο όρους (στόχους/ποινές) παρατηρείται μείωση, σε σαφώς μικρότερα επίπεδα.

Πίνακας 5.62: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness)

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς (Best Fitness)											
	Αρχικές Τιμές	Case 1	%	Case 2	%	Case 3	%	Balanced	%	Pseudo	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.908	0.450	-50.44	0.908	0.00	0.637	-29.85	0.589	-35.13	0.538	-40.75
Suspension Travel Front (m)	0.0255	0.0403	58.04	0.0255	0.00	0.0326	27.84	0.0312	22.35	0.0259	1.57
Suspension Travel Rear (m)	0.0224	0.0383	70.98	0.0224	0.00	0.0254	13.39	0.0291	29.91	0.0356	58.93
Maximum (x1)(m)	0.0543	0.0501	-7.73	0.0543	0.00	0.0511	-5.89	0.0517	-4.79	0.0538	-0.92
Maximum (x2)(m)	0.0520	0.0525	0.96	0.0520	0.00	0.0520	0.00	0.0514	-1.15	0.0516	-0.77
Tire Force Front(N)	3571	2991	-16.24	3571	0.00	2936	-17.78	2802	-21.53	2829	-20.78
Tire Force Rear(N)	3384	2610	-22.87	3384	0.00	3381	-0.09	3105	-8.24	3154	-6.80
Non Linear % F	30	29	-	30	-	27	-	24	-	27	-
Non Linear % R	14	29	-	14	-	29	-	29	-	14	-

Πίνακας 5.63: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness)

Σύγκριση Μεταβλητών Σχεδιασμού (Best Fitness)					
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced C1	Pseudo
Kf (N/m)	43094	38952	41279	42377	43581
Cf (N· s/m)	2050	8003	3632	4002	5312
Kr (N/m)	33652	47540	77718	60069	45694
Cr (N· s/m)	2272	8286	4319	3693	1910
Kfn ((N/m³))	10899783	25615202	14386651	13615162	24217170
Kfr (N/m³)	9193798	16019698	50016808	28552367	5894464

Πίνακας 5.64: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου (Best Fitness)

	Time(s)
Case 1	5030
Case 2	858
Case 3	766
Balanced	4674
Pseudo	1123

Οι συγκρίσεις των δυναμικών μεγεθών ενισχύουν τα προηγούμενα συμπεράσματα. Στο πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει ξεκάθαρη βέλτιστη λύση όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη περίπτωση διέγερσης. Έτσι το μονοκριτηριακό σενάριο της επιτάχυνσης δίνει σημαντικά μειωμένο όρο για την επιτάχυνση και το σενάριο των διαδρομών των συστημάτων ανάρτησης δίνει αντίστοιχα μειούμενο όρο για την διαδρομή της ανάρτησης. Οι δυο πολυκριτηριακές περιπτώσεις πετυχαίνουν σημαντικές μειώσεις στα περισσότερα μετρούμενα μεγέθη. Σε συνδυασμό με τις συγκρίσεις των τιμών Fitness συμπεραίνεται ότι το αποτέλεσμα της ισορροπημένης πολυκριτηριακής αποδίδει εν τέλει καλύτερα. Όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο όμως, η ψεύδο-πολυκριτηριακή προσέγγιση υπερτερεί σημαντικά της ισορροπημένης ($\sim \frac{1}{4}$ του αντίστοιχου χρόνου). Η ψεύδο-πολυκριτηριακή μέθοδος εντόπισε την λύση με μικρότερο μέγεθος πληθυσμού (200) και συνεπώς χρειάστηκε σαφώς λιγότερο χρόνο για να συγκλίνει. Συνολικά ως βέλτιστη λύση επιλέγεται και πάλι η Ψεύδο-Πολυκριτηριακή.

5.2.10 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης

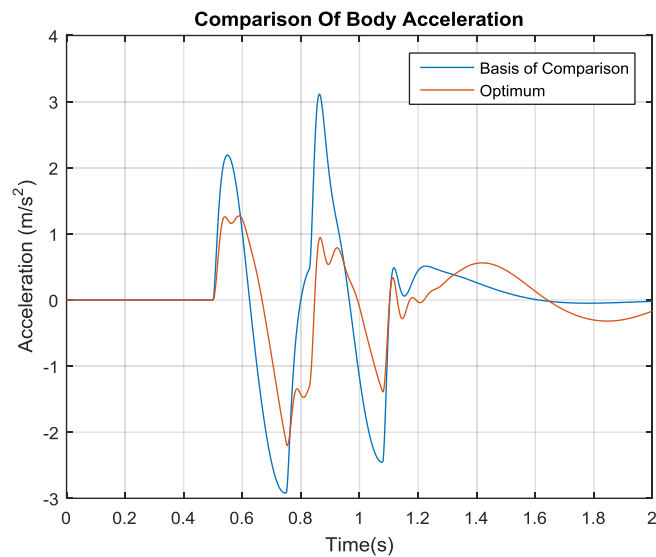
Πίνακας 5.65: Παράμετροι Βέλτιστου Μοντέλου Οχήματος

Μεταβλητές Σχεδιασμού	Βέλτιστη Λύση
Kf (N/m)	59559
Cf (N· s/m)	2414
Kr (N/m)	58680
Cr (N· s/m)	3901
Kfn (N/m³)	12524503
Kfr (N/m³)	43357952

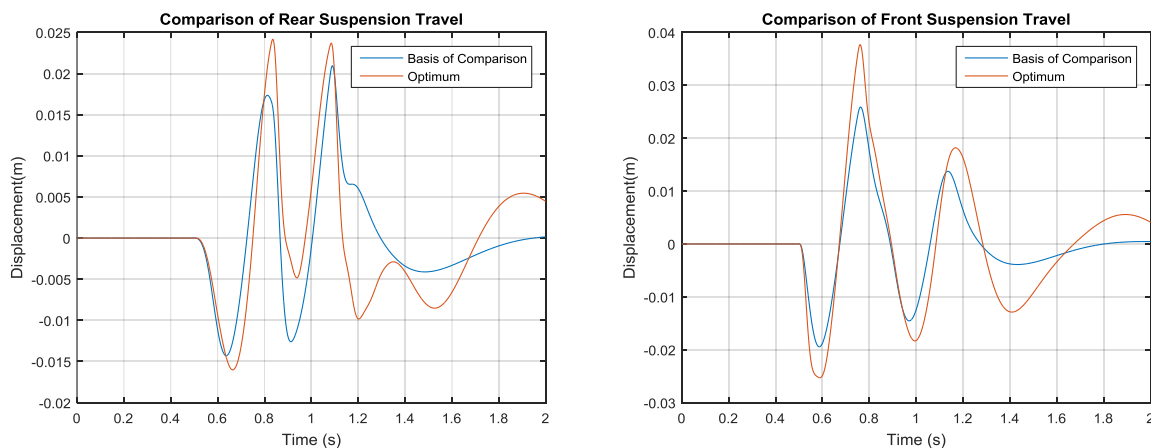
Στη συνέχεια αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος, μέσα από πίνακες σημαντικών μεγεθών αλλά και με την συνοδεία των ανάλογων διαγραμμάτων.

Πίνακας 5.66: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστου Μοντέλου Οχήματος

Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς	Σημείο Αναφοράς	Βέλτιστες Τιμές	%
RMS(acc_{body}) (m/s^2)	0.979	0.538	-38.49
Suspension Travel Front (m)	0.026	0.0259	45.55
Suspension Travel Rear (m)	0.021	0.0356	15.38
Maximum (x1) (m)	0.055	0.0538	-8.28
Maximum (x2) (m)	0.052	0.0516	-0.77
Tire Force Front (N)	3956	2829	-11.97
Tire Force Rear (N)	3363	3154	-25.06
Non Linear % F	13	27	-
Non Linear % R	18	14	-



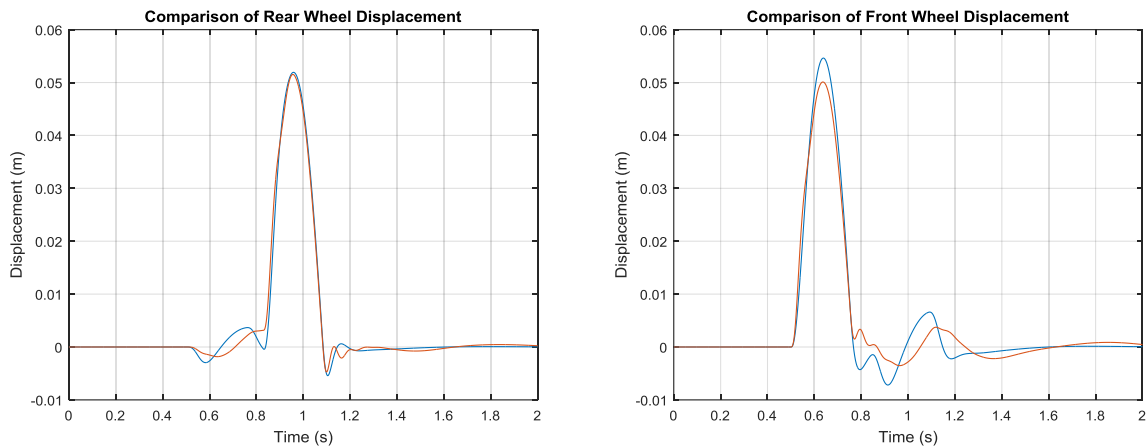
Σχήμα 5.10: Σύγκριση Επιταχύνσεων Σώματος



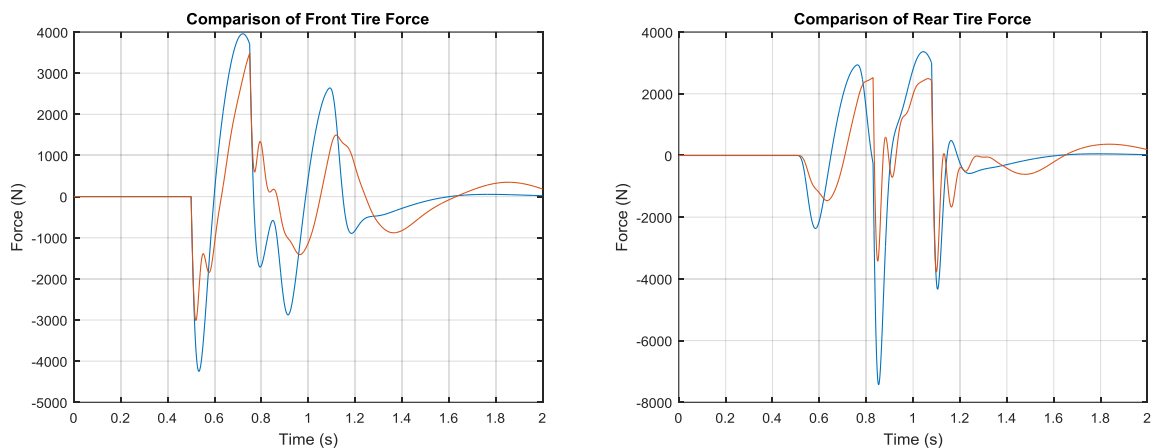
Σχήμα 5.11: Σύγκριση Διαδρομών Αναρτήσεων

Εμφανείς είναι οι μειώσεις στο προφίλ των επιταχύνσεων, συμπέρασμα που ενισχύεται και από την τιμή RMS της επιτάχυνσης του σώματος, η οποία προσεγγίζει τιμές αποδεκτές από την βιβλιογραφία για την άνεση του οδηγού.

Όσον αφορά τα σχήματα της σύγκρισης των διαδρομών των αναρτήσεων, παρατηρούνται αυξήσεις στο προφίλ. Η βάση της σύγκρισης όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο είναι η δεύτερη μονοκριτηριακή προσέγγιση, δηλαδή εκείνη που περιλαμβάνει μόνο το συγκρινόμενο μέγεθος των διαγραμμάτων. Έτσι είναι λογικές οι αυξήσεις του βέλτιστου μοντέλου, αφού συγκρίνεται με τις μικρότερες τιμές των διαδρομών των αναρτήσεων που προέκυψαν από την ανάλυση.



Σχήμα 5.12: Σύγκριση Μετατοπίσεων Τροχών



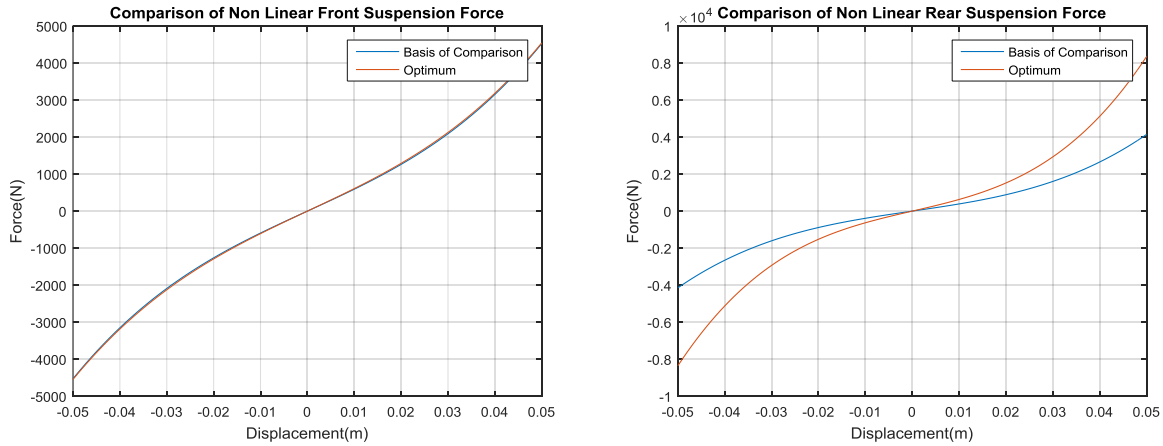
Σχήμα 5.13: Σύγκριση Δυνάμεων Ελαστικών

Στις μετατοπίσεις των τροχών, οι διαφορές των δυο προφίλ είναι μικρές. Ίσως με την μελέτη κάποιου άλλου μεγέθους όπως της τυπικής απόκλισης των μετατοπίσεων, οι διαφορές να ήταν περισσότερο εμφανείς. Η μετατόπιση των τροχών παραμένει στα ίδια περίπου επίπεδα, κυρίως επειδή οι διαδρομές των αναρτήσεων αυξάνονται.

Όσον αφορά τις δυνάμεις των ελαστικών, παρατηρούνται σχετικές μειώσεις σε όλο το προφίλ. Ειδικά τα μέγιστα και ελάχιστα του προφίλ έχουν μειωθεί σημαντικά τόσο στο εμπρόσθιο όσο και στο οπίσθιο ελαστικό. Με τις μειώσεις αυτές, ενισχύεται το κράτημα του οχήματος και εν τέλει αυξάνεται η ασφάλεια που προσφέρει.

Όσον αφορά το εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης, παρατηρείται ότι οι δυο μέθοδοι απέδωσαν σχεδόν την ίδια ανάρτηση, αναφερόμενοι στις παραμέτρους του ελατηρίου. Στην οπίσθια, η διαφορά είναι

εμφανής: η βέλτιστη λύση προσπαθεί να σκληρύνει την ανάρτηση έτσι ώστε να ενισχύσει το κράτημα του οχήματος αλλά και τη γενικότερη ασφάλεια του ως προς τους κραδασμούς, που δημιουργούνται λόγω του οδοστρώματος.



Σχήμα 5.14: Σύγκριση Μη-Γραμμικών Δυνάμεων Ελατηρίων Αναρτήσεων

5.3 Τυχαίο Προφίλ Δρόμου Κατηγορίας C

Η τελευταία περίπτωση διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα τυχαίο προφίλ κατηγορίας C, το οποίο υλοποιήθηκε με βάση τον κανονισμό ISO 8608, που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή των παραμέτρων έγινε με βάση την λογική του κεφαλαίου 5.2, προσαρμοσμένες όμως στις ανάγκες του διαφορετικού είδους διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε. Για λόγους πληρότητας ακολουθεί η ανάλυση του προβλήματος.

5.3.1 Μεταβλητές Σχεδιασμού

Οι μεταβλητές σχεδιασμού αφορούν αποκλειστικά μεγέθη των συστημάτων ανάρτησης καθώς η σκληρότητα του ελαστικού θεωρείται σταθερή πλέον και ίση με $4 \cdot 10^5$.

Πίνακας 5.67: Μεταβλητές Σχεδιασμού

Μεταβλητές Σχεδιασμού	
K_f, k_r	Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρός/Οπίσθιος) (N/m)
C_f, C_r	Γραμμικός Όρος Απόσβεσης (Εμπρός/Οπίσθιος) (N·s/m)
K_{fn}, k_{rn}	Μη Γραμμικός Όρος Ελατηρίου (Εμπρός/Οπίσθιος) (N/m)

5.3.2 Αρχικές Τιμές

Σε αυτό το πρόβλημα οι αρχικές τιμές παραλείφθηκαν, έτσι ώστε ειδικά ο γενετικός αλγόριθμος να είναι «ελεύθερος» να ψάξει σε όσο το δυνατόν πιο τυχαίο πεδίο λύσης. Στην ντετερμινιστική μέθοδο ως αρχικές τιμές ορίστηκαν οι μέσες τιμές των άνω και κάτω ορίων των μεταβλητών σχεδιασμού.

5.3.3 Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού

Τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδιασμού ορίστηκαν με βάση τις τιμές των πραγματικών παραμέτρων της ανάρτησης του φορτηγού οχήματος του Εργαστηρίου αλλά και με βάση την

βιβλιογραφία. Αποτελούν τον παράγοντα ο οποίος εγγυάται τον ρεαλισμό των αποτελεσμάτων καθώς όλες οι τιμές που επιλέχθηκαν βρίσκουν εφαρμογή σε βαρέα οχήματα της βιομηχανίας.

Πίνακας 5.68: Όρια Μεταβλητών Σχεδιασμού

Μεταβλητές Σχεδιασμού	Κάτω Όρια	Άνω Όρια
$k_f, k_r (N/m)$	$6.0 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^5$
$c_f, c_r (N \cdot s/m)$	$7.0 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^4$
$k_{fn}, k_{rn} (N/m^3)$	$1.0 \cdot 10^6$	$6.0 \cdot 10^9$

5.3.4 Περιορισμοί – Ποινές

Πίνακας 5.69: Περιορισμοί Προβλήματος

Περιορισμοί	Τιμές
RMS Επιτάχυνσης Σώματος(m/s^2)	0.90
Ποσοστό μη Γραμμικότητας της Δύναμης του Ελατηρίου(Εμπρός/Πίσω)(%)	10÷30

Οι περιορισμοί που τέθηκαν στο πρόβλημα μειώθηκαν συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Ο περιορισμός σχετικά με την άνεση των επιβατών παρέμεινε, καθώς η τελευταία αποτελεί τον βασικό στόχο όλης της βελτιστοποίησης, και προστέθηκαν όροι που αφορούν το ποσοστό της μη γραμμικής δύναμης του ελατηρίου των συστημάτων ανάρτησης. Όσον αφορά την επιβολή ποινών, στο κομμάτι των γενετικών αλγορίθμων διατηρείται η θανατική ποινή, ενώ η αιτιοκρατική μέθοδος εμπεριέχει την επίλυση των συνθηκών ΚΚΤ.

5.3.5 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που επιλέχθηκαν ακολουθούν την λογική του προηγούμενου προβλήματος και επικεντρώνονται στους αντίστοιχους στόχους: στην άνεση των επιβατών, στην διαδρομή της ανάρτησης και στην εκτροπή του ελαστικού. Στην προσπάθεια υλοποίησης ενός περισσότερο ρεαλιστικού προβλήματος πλέον εξετάζονται μεγέθη που αφορούν τόσο στο εμπρόσθιο σύστημα ανάρτησης όσο και στο οπίσθιο. Έτσι οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

5.3.5.1 Μονοκριτηριακή Προσέγγιση

- **Σενάριο 1^ο: Άνεση Επιβατών (Case 1)**

$$f_1 = \text{var}(acc_{body}) \quad (27)$$

- **Σενάριο 2^ο: Διαδρομή Οπίσθιου Συστήματος Ανάρτησης (Case 2)**

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(suspension\ travel_f) + \text{var}(suspension\ travel_R) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{body} - a_1 \cdot \theta - x_{front}) + \text{var}(x_{body} + a_2 \cdot \theta - x_{rear}) \right) \end{aligned} \quad (28)$$

- **Σενάριο 3^ο: Εκτροπή Οπίσθιου Ελαστικού (Case 3)**

$$\begin{aligned} f_3 &= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(tire\ deflection_F) + \text{var}(tire\ deflection_R) \right) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{front} - y_1) + \text{var}(x_{rear} - y_2) \right) \end{aligned} \quad (29)$$

5.3.5.2 Πολυκριτηριακή / Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στις δύο περιπτώσεις είναι

$$fitness = w_1 \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(suspension\ travel_F) + var(suspension\ travel_R)) + w_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(tire\ deflection_F) + var(tire\ deflection_R)) \quad (30)$$

Πίνακας 5.70: Συντελεστές Ισορροπίας – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Συντελεστές Ισορροπίας	Τιμή
W_1	1
W_2	10^5
W_3	10^5

/Πίνακας 5.71: Συντελεστές Ισορροπίας – Ψευδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Συντελεστές Ισορροπίας	Τιμή
W_1	1
W_2	10^4
W_3	10^4

Και στις δυο προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια αντικειμενική συνάρτηση. Εμπεριέχει και τους τρεις στόχους της βελτιστοποίησης (άνεση επιβατών, διαδρομή αναρτήσεων και εκτροπή ελαστικών). Η διαφορά μεταξύ των δυο έγκειται στους συντελεστές που πλαισιώνουν τις τυπικές αποκλίσεις των στόχων. Η διεξαγωγή προσομοιώσεων οδήγησε στην επιλογή των τιμών των κάτωθι συντελεστών. Στην περίπτωση της Ψεύδο- Πολυκριτηριακής έγινε με τον υποβιβασμό μιας τάξης των συντελεστών ισορροπίας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια εν τη απουσία αρχικών τιμών ως βάση της σύγκρισης, τα διάφορα δυναμικά μεγέθη θα συγκρίνονται με την λιγότερο αποδοτική λύση ανά περίπτωση.

Πίνακας 5.72: Περιγραφή Σεναρίων

Σενάριο	Περιγραφή
Case 1	Μονοκριτηριακή-Επιτάχυνση
Case 2	Μονοκριτηριακή-Διαδρομή Ανάρτησης
Case 3	Μονοκριτηριακή-Εκτροπή Ελαστικού
Balanced C1	Πολυκριτηριακή –Max Βάρος: Επιτάχυνση
Pseudo	Ψεύδο-Πολυκριτηριακή

5.3.6 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Προσέγγισης

5.3.6.1 Αποτελέσματα Σεναρίου 1^{ου}: Επιτάχυνση Σώματος

$$f_1 = \text{var}(\text{acc}_{\text{body}})$$

(31)

Πίνακας 5.73: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 1^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Βάση Σύγκρισης	GA_200	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.626	0.465	-25.75	0.439	-29.88	0.626	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0048	0.0048	-0.77	0.0055	15.16	0.0048	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0050	0.0079	56.72	0.0081	60.69	0.0050	0.00
Maximum (x1)(m)	0.0202	0.0190	-6.01	0.0184	-8.79	0.0202	0.00
Maximum (x2)(m)	0.0192	0.0189	-1.58	0.0188	-1.97	0.0192	0.00
Tire Force Front(N)	2641	2122	-19.62	1885	-28.60	2641	0.00
Tire Force Rear(N)	4344	4039	-7.02	4065	-6.42	4344	0.00
Non Linear % F	34	29		25		34	
Non Linear % R	39	28		16		39	

Πίνακας 5.74: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 1^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	103571	150205	130426
Cf (N· s/m)	14994	6887	10062
Kr (N/m)	79443	110817	133809
Cr (N· s/m)	14999	7319	15000
Kfn (N/m³)	1443629905	1038518152	3000498987
Kfr (N/m³)	754801871	721287429	3000498551

Πίνακας 5.75: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 1^ο

	Time(s)
GA_200	11500
Hyb_200_10	13800
FminCon	13850

Στο πρώτο σενάριο, η αντικειμενική συνάρτηση πέτυχε τον σκοπό της και οι μειώσεις στα μεγέθη της επιτάχυνσης είναι σημαντικές. Επίσης και οι τιμές των δυνάμεων των ελαστικών έχουν μειωθεί σημαντικά (διαφορά 400-500 N ανά περίπτωση). Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι η αιτιοκρατική μέθοδος δεν εντόπισε λύση η οποία να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, καθώς το ποσοστό της μη γραμμικής δύναμης στα δυο συστήματα αναρτήσεων (34% και 39%) υπερβαίνει το επιτρεπτό (30%). Όσον αφορά τις υπόλοιπες μεθόδους η υβριδική έχει αποδώσει καλύτερα από τους γενετικούς αλγόριθμους με αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος.

5.3.6.2 Αποτελέσματα Σεναρίου 2^{ου}: Διαδρομή της Ανάρτησης

$$f_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(\text{suspension travel}_f) + \text{var}(\text{suspension travel}_R) \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\text{var}(x_{body} - a_1 \cdot \theta - x_{front}) + \text{var}(x_{body} + a_2 \cdot \theta - x_{rear}) \right) \quad (32)$$

Πίνακας 5.76: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 2^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Σημείο Αναφοράς	GA_200	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc _{body})(m/s ²)	0.591	0.608	2.80	0.583	-1.39	0.591	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0056	0.0042	-23.81	0.0043	-21.92	0.0056	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0050	0.0053	6.28	0.0055	9.85	0.0050	0.00
Maximum (x1)(m)	0.0196	0.0198	0.88	0.0197	0.32	0.0196	0.00
Maximum (x2)(m)	0.0191	0.0189	-1.22	0.0189	-1.17	0.0191	0.00
Tire Force Front(N)	2283	2861	25.33	2715	18.93	2283	0.00
Tire Force Rear(N)	4279	4535	5.98	4381	2.38	4279	0.00
Non Linear % F	43	27		29		43	
Non Linear % R	39	24		29		39	

Πίνακας 5.77: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων– Σενάριο 2^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	103571	150205	130426
Cf (N· s/m)	14994	6887	10062
Kr (N/m)	79443	110817	133809
Cr (N· s/m)	14999	7319	15000
Kfn (N/m³)	1443629905	1038518152	3000498987
Kfr (N/m³)	754801871	721287429	3000498551

Πίνακας 5.78: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 2^ο

	Time(s)
GA_200	13000
Hyb_200_10	19000
FminCon	11300

Αναφορικά με τις μεθόδους βελτιστοποίησης , η αιτιοκρατική έχει δώσει τα λιγότερο αποδεκτά αποτελέσματα. Έχει πετύχει τις μεγαλύτερες τιμές για τις διαδρομές των αναρτήσεων, που είναι και ο μοναδικός στόχος του προβλήματος αλλά και έχει αποτύχει να εντοπίσει λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, αφού και σε αυτή την περίπτωση τα ποσοστά των μη γραμμικών δυνάμεων των αναρτήσεων υπερβαίνουν το όριο που τέθηκε στο πρόβλημα.

5.3.6.3 Αποτελέσματα Σεναρίου 3^{ου}: Συμπύεση Ελαστικών

$$f_3 = \frac{1}{2} \cdot (\text{var}(\text{tire deflection}_F) + \text{var}(\text{tire deflection}_R)) = \frac{1}{2} \cdot (\text{var}(x_{\text{front}} - y_1) + \text{var}(x_{\text{rear}} - y_2)) \quad (33)$$

Πίνακας 5.79: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 3^ο

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Σημείο Αναφοράς	GA_200	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.610	0.441	-27.67	0.466	-23.61	0.610	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0049	0.0065	31.72	0.0057	14.46	0.0049	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0051	0.0077	51.71	0.0079	55.62	0.0051	0.00
Maximum (x1)(m)	0.0200	0.0185	-7.73	0.0188	-6.25	0.0200	0.00
Maximum (x2)(m)	0.0192	0.0189	-1.53	0.0187	-2.68	0.0192	0.00
Tire Force Front(N)	2547	1954	-23.27	1993	-21.74	2547	0.00
Tire Force Rear(N)	4270	4050	-5.14	4053	-5.08	4270	0.00
Non Linear % F	39	18		21		39	
Non Linear % R	40	20		29		40	

Πίνακας 5.80: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Σενάριο 3^ο

Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	68435	150205	123211
Cf (N· s/m)	7000	6887	13589
Kr (N/m)	121393	110817	139491
Cr (N· s/m)	7002	7319	14573
Kfn (N/m³)	276827214	1038518152	3000368295
Kfr (N/m³)	522659179	721287429	3000832348

Πίνακας 5.81: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Σενάριο 3^ο

	Time(s)
GA_200	10085
Hyb_200_10	13333
FminCon	13000

Στο τρίτο μονοκριτηριακό σενάριο επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα των προηγούμενων περιπτώσεων διέγερσης ότι οι στόχοι της άνεσης και της συμπίεσης του ελαστικού συνδέονται, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση που περιλαμβάνει μόνο τον τελευταίο επιφέρει εξίσου σημαντικές μειώσεις και στην τιμή RMS της επιτάχυνσης. Στην περίπτωση αυτή, μελετώντας μόνο τις μεταβολές των μεγεθών δυναμικής συμπεριφοράς (πίνακας 5.79), φαίνεται ότι ο γενετικός αλγόριθμος απέδωσε καλύτερα από την υβριδική μέθοδο, και σε λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, καθώς έχει πετύχει σημαντικές μειώσεις στα εμπλεκόμενα μεγέθη. Τέλος, η αιτιοκρατική μέθοδος δεν κατάφερε να ικανοποιήσει για μια ακόμα φορά όλους τους περιορισμούς του προβλήματος.

5.3.7 Αποτελέσματα Ισοροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$fitness = w_1 \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(suspension\ travel_F) + var(suspension\ travel_R)) + w_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(tire\ deflection_F) + var(tire\ deflection_R)) \quad (34)$$

Πίνακας 5.82: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Σημείο Αναφοράς	GA_200	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.625	0.475	-23.96	0.446	-28.60	0.625	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0048	0.0046	-4.54	0.0057	17.82	0.0048	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0050	0.0079	59.54	0.0076	52.30	0.0050	0.00
Maximum (x1)(m)	0.0202	0.0189	-6.18	0.0184	-8.63	0.0202	0.00
Maximum (x2)(m)	0.0192	0.0188	-2.26	0.0188	-2.03	0.0192	0.00
Tire Force Front(N)	2636	2130	-19.21	1908	-27.63	2636	0.00
Tire Force Rear(N)	4337	4072	-6.11	4103	-5.39	4337	0.00
Non Linear % F	38	29		30		38	
Non Linear % R	38	16		25		38	

Πίνακας 5.83: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	128142	79748	121673
Cf (N·s/m)	9551	7328	14836
Kr (N/m)	68926	81090	149839
Cr (N·s/m)	7793	7742	14991
Kfn (N/m³)	1372880108	823452030	3000574934
Kfr (N/m³)	201278605	472978192	3000162617

Πίνακας 5.84: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου – Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

	Time(s)
GA_200	10500
Hyb_200_10	14000
FminCon	14000

Τα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης συνηγορούν στην προσπάθεια εξισορρόπησης των τριών ίσων στόχων του προβλήματος. Τόσο στους γενετικούς αλγόριθμους όσο και στην υβριδική μέθοδο οι στόχοι της επιτάχυνσης και της συμπίεσης των ελαστικών έχουν υποστεί σημαντικές μειώσεις όμως οι τιμές των μέγιστων των διαδρομών των αναρτήσεων παρέμειναν σε υψηλά επίπεδα. Αντίθετα στην αιτιοκρατική μέθοδος παρατηρείται σαφής μείωση του δεύτερου στόχου, σε βάρος όμως των άλλων δυο. Η αιτιοκρατική μέθοδος για μια ακόμα φορά δεν εντόπισε λύση που να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος, ενισχύοντας το συμπέρασμα της πιθανής παγίδευσης σε τοπικά ελάχιστα.

5.3.8 Αποτελέσματα Ψεύδο-Ισορροπημένης Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

$$fitness = w_1 \cdot var(acc_{body}) + w_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(suspension\ travel_F) + var(suspension\ travel_R)) + w_3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (var(tire\ deflection_F) + var(tire\ deflection_R)) \quad (35)$$

Πίνακας 5.85: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων – Ψεύδο- Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς							
	Σημείο Αναφοράς	GA_200	%	Hyb_200_10	%	FminCon	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.607	0.459	-24.39	0.447	-26.47	0.607	0.00
Suspension Travel Front (m)	0.0051	0.0055	8.60	0.0067	31.21	0.0051	0.00
Suspension Travel Rear (m)	0.0050	0.0079	58.96	0.0074	47.49	0.0050	0.00
Maximum (x1) (m)	0.0199	0.0186	-6.45	0.0185	-6.98	0.0199	0.00
Maximum (x2) (m)	0.0192	0.0187	-2.23	0.0189	-1.41	0.0192	0.00
Tire Force Front (N)	2485	1922	-22.65	1985	-20.11	2485	0.00
Tire Force Rear (N)	4287	4076	-4.92	4093	-4.52	4287	0.00
Non Linear % F	41	18		14		41	
Non Linear % R	39	29		28		39	

Πίνακας 5.86: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων – Ψεύδο- Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Μεταβλητές Σχεδιασμού			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
Kf (N/m)	120450	66212	120348
Cf (N· s/m)	7365	7108	12708
Kr (N/m)	101929	128161	140485
Cr (N· s/m)	7363	7348	15000
Kfn (N/m ³)	547545946	244528195	3000416171
Kfr (N/m ³)	660590553	912948157	3000323284

Πίνακας 5.87

	Time(s)
GA_200	13000
Hyb_200_10	14500
FminCon	12640

Η μειωμένη τάξη των δυο εκ των τριών στόχων του προβλήματος φαίνεται στον πίνακα 5.85. Η τιμή RMS της επιτάχυνσης δέχεται σημαντικές μειώσεις σε όλες τις περιπτώσεις ενώ οι τιμές των μεγεθών που εμπλέκουν τους υπόλοιπους στόχους δέχονται πιο περιορισμένες μειώσεις. Συγκριτικά με την ισορροπημένη πολυκριτηριακή προσέγγιση οι τιμές των μεγεθών της δυναμικής συμπεριφοράς κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Όσον αφορά τις μεθόδους βελτιστοποίησης η υβριδική μέθοδος φαίνεται να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τους γενετικούς αλγορίθμους σε αντίστοιχο υπολογιστικό χρόνο, ενώ η αιτιοκρατική μέθοδος δίνει τα λιγότερα αποδεκτά αποτελέσματα.

5.3.9 Ανάλυση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων Μέσω Τιμής Fitness

Για την εξακρίβωση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, η οποία περιεγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην περίπτωση αυτή οι βέλτιστες λύσεις όλων των διαθέσιμων αποτελεσμάτων ανάχθηκαν στην τιμή της ισορροπημένης πολυκριτηριακής μεθόδου.

Στις τρεις μονοκριτηριακές περιπτώσεις φαίνεται η επίδραση του μοναδικού όρου στην αντικειμενική συνάρτηση σε κάθε περίπτωση. Έτσι στο πρώτο σενάριο έχουν εντοπιστεί οι περιοχές όπου ο όρος της επιτάχυνσης είναι μικρότερος, στο δεύτερο οι περιοχές όπου ο όρος της διαδρομής της ανάρτησης είναι μικρότερος κ.ο.κ. Εμφανής είναι επίσης η εξάρτηση του πρώτου και του τρίτου στόχου για άλλη μια φορά, καθώς οι μειώσεις στα σενάρια 1 και 3 είναι αντίστοιχες (όσον αφορά τον όρο της επιτάχυνσης και της συμπίεσης των ελαστικών). Η αιτιοκρατική μέθοδος σύμφωνα με τις τιμές των πινάκων 5.77 έχει εντοπίσει διαφορετική περιοχή λύσεων από τις υπόλοιπες μεθόδους, το οποίο σε συνδυασμό με τις ποσοστιαίες μεταβολές των μεγεθών δυναμικής συμπεριφοράς (πίνακες 5.73, 5.76, 5.79) ενισχύει το συμπέρασμα ότι η αιτιοκρατική μέθοδος έχει πιθανότατα παγιδευτεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

Και στις δυο πολυκριτηριακές προσεγγίσεις φαίνεται η υπεροχή της υβριδικής μεθόδου. Η αιτιοκρατική μέθοδος και σε αυτή την περίπτωση δεν έχει εντοπίσει την ίδια οικογένεια λύσεων, καθώς οι επί μέρους όροι της τιμής fitness είναι και στις δυο περιπτώσεις αρκετά αυξημένοι σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Πίνακας 5.88: Προσαρμογή Αποτελεσμάτων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση – Μονοκριτηριακή Προσέγγιση

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 1			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
f1	0.2165	0.1931	0.3927
f2	0.452	0.46	0.321
f3	0.326	0.239	0.445
fp	0.9945	0.8921	1.1587

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 2			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
f1	0.3696	0.3401	0.3497
f2	0.309	0.3	0.366
f3	0.446	0.419	0.398
fp	1.1246	1.0591	1.1137

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Case 3			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
f1	0.195	0.2175	0.3727
f2	0.517	0.476	0.329
f3	0.291	0.3	0.431
fp	1.003	0.9935	1.1327

Πίνακας 5.89: Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Προσέγγισης

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Balanced			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
f1	0.2261	0.1994	0.3911
f2	0.449	0.446	0.318
f3	0.325	0.295	0.451
fp	1.0001	0.9404	1.1601

Πίνακας 5.90: Προσαρμογή Αποτελεσμάτων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση – Ψεύδο-Πολυκριτηριακή Προσέγγιση

Αναγωγή Λύσεων στην Πολυκριτηριακή Συνάρτηση Pseudo			
	GA_200	Hyb_200_10	FminCon
f1	0.2111	0.1996	0.3692
f2	0.49	0.477	0.333
f3	0.301	0.292	0.424
fp	1.0021	0.9686	1.1262



Σχήμα 5.15: Σύγκριση Τιμών Fitness

Πίνακας 5.91: Σύγκριση Τιμών Fitness (Best Fitness)

Σύγκριση Best Fitness					
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced	Pseudo
	Hyb_200_10	Hyb_200_10	Hyb_200_10	Hyb_200_10	Hyb_200_10
f1	0.1931	0.3401	0.2175	0.1994	0.1996
f2	0.46	0.3	0.476	0.446	0.477
f3	0.239	0.419	0.3	0.295	0.292
fp	0.8921	1.0591	0.9935	0.9404	0.9686

Συγκρίνοντας τις διάφορες προσεγγίσεις, από τον πίνακα 5.90 γίνεται κατανοητή η υπεροχή του 1ου σεναρίου της μονοκριτηριακής προσέγγισης, που περιλάμβανε μόνο τον όρο της επιτάχυνσης στην αντικειμενική συνάρτηση. Συγκρίνοντας τους τρεις όρους της αντικειμενικής συνάρτησης, παρατηρείται ότι η Case 1 έχει την μικρότερη τιμή τόσο για τον όρο της επιτάχυνσης όσο και για τη συμπίεση του ελαστικού, γεγονός που όχι μόνο εξισορροπεί την αυξημένη τιμή του δεύτερου στόχου αλλά εξασφαλίζει την μικρότερη τιμή fitness συνολικά. Όσον αφορά τις πολυκριτηριακές προσεγγίσεις, τόσο η ισορροπημένη όσο και η ψεύδο-πολυκριτηριακή, παρουσιάζουν πιο ισορροπημένες λύσεις από τα μονοκριτηριακά σενάρια, βρίσκοντας όμως συνολικά μεγαλύτερες τιμές fitness από την Case 1.

Από τον πίνακα 5.91 φαίνεται ότι όσον αφορά τα μεγέθη δυναμικής συμπεριφοράς, οι μειώσεις τόσο στο πρώτο μονοκριτηριακό σενάριο όσο και στα δυο πολυκριτηριακά είναι αντίστοιχες. Το μονοκριτηριακό πετυχαίνει μεγαλύτερες μειώσεις στην επιτάχυνση σε σχέση με τα άλλα, εμφανίζει αντίστοιχες μειώσεις στην συμπίεση των ελαστικών όμως έχει μεγαλύτερες αυξήσεις στις διαδρομές των αναρτήσεων. Στον πίνακα 5.92 φαίνονται οι μεταβλητές σχεδιασμού των προβλημάτων. Ενώ σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των αποσβέσεων βρίσκονται στην ίδια περιοχή (≈ 7500), στις σταθερές των ελατηρίων υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις. Ειδικά στους μη γραμμικούς όρους, το εύρος των τιμών είναι αρκετά μεγάλο, γεγονός το οποίο εξηγείται από τα πολύ ανοικτά όρια που τέθηκαν στο πρόβλημα. Όσον αφορά τέλος τον υπολογιστικό χρόνο, όλες οι περιπτώσεις κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα.

Πίνακας 5.92: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness)

Ποσοστιαία Μεταβολή Μεγεθών Δυναμικής Συμπεριφοράς											
	Σημείο Αναφοράς	Case 1	%	Case 2	%	Case 3	%	Balanced	%	Pseudo	%
RMS(acc_{body})(m/s^2)	0.583	0.439	-24.64	0.583	0.00	0.466	-20.04	0.446	-23.43	0.447	-23.39
Suspension Travel Front (m)	0.0043	0.0055	27.99	0.0043	0.00	0.0057	30.50	0.0057	30.77	0.0067	53.93
Suspension Travel Rear (m)	0.0055	0.0081	45.85	0.0055	0.00	0.0079	43.24	0.0076	37.14	0.0074	33.51
Maximum (x1) (m)	0.0197	0.0184	-6.47	0.0197	0.00	0.0188	-4.70	0.0184	-6.40	0.0185	-5.94
Maximum (x2) (m)	0.0189	0.0188	-0.61	0.0189	0.00	0.0187	-1.36	0.0188	-0.50	0.0189	-0.08
Tire Force Front (N)	2715	1885	-30.56	2715	0.00	1993	-26.58	1908	-29.72	1985	-26.89
Tire Force Rear (N)	4381	4065	-7.20	4381	0.00	4053	-7.48	4103	-6.33	4093	-6.57
Non Linear % F	0.29	0.25	-	0.29	-	0.21	-	0.30	-	0.14	-
Non Linear % R	0.29	0.16	-	0.29	-	0.290	-	0.25	-	0.28	-

Πίνακας 5.93: Μεταβλητές Σχεδιασμού Βέλτιστων Λύσεων (Best Fitness)

Μεταβλητές Σχεδιασμού					
	Case 1	Case 2	Case 3	Balanced	Pseudo
Kf (N/m)	93827	150205	150205	79748	66212
Cf (N· s/m)	7169	6887	6887	7328	7108
Kr (N/m)	85041	110817	110817	81090	128161
Cr (N· s/m)	7196	7319	7319	7742	7348
Kfn (N/m³)	772980993	1038518152	1038518152	823452030	244528195
Kfr (N/m³)	246486208	721287429	721287429	472978192	912948157

Πίνακας 5.94: Σύγκριση Υπολογιστικού Χρόνου (Best Fitness)

	Time(s)
Case 1	13800
Case 2	19000
Case 3	13333
Balanced	14000
Pseudo	14500

5.3.1 Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Βέλτιστης Λύσης

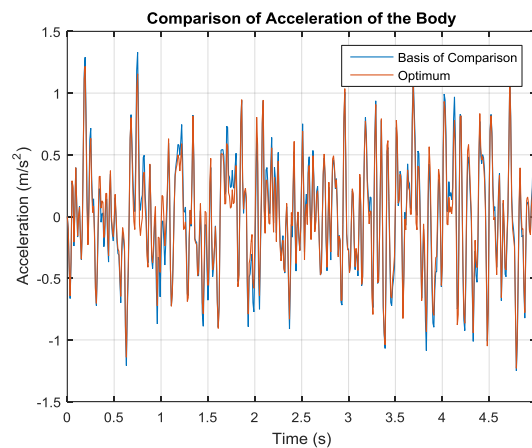
Ακολουθεί ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της βέλτιστης λύσης όπως αυτή προέκυψε από την προηγούμενη ενότητα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μονοκριτηριακή προσέγγιση της επιτάχυνσης του σώματος του οχήματος. Στους πίνακες 5.94, 5.95 παρατίθενται οι βασικοί παράμετροι του βέλτιστου μοντέλου οχήματος όπως και οι ποσοστιαίες μεταβολές στις τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Τέλος στα σχήματα 4.16-4.20 απεικονίζονται σημαντικά μεγέθη της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος, όπως επιταχύνσεις, μετατοπίσεις, δυνάμεις κλπ. Στα σχήματα που ακολουθούν εμφανίζεται το ήμισυ του εξεταζόμενου προφίλ για μεγαλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5.95: Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς – Βέλτιστη Λύση)

Μεγέθη Δυναμικής Συμπεριφοράς	Σημείο Αναφοράς	Βέλτιστες Τιμές	%
RMS(acc_{body})(m/s²)	0.583	0.439	-24.64
Suspension Travel Front (m)	0.0043	0.0055	27.99
Suspension Travel Rear (m)	0.0055	0.0081	45.85
Maximum (x1)(m)	0.0197	0.0184	-6.47
Maximum (x2)(m)	0.0189	0.0188	-0.61
Tire Force Front(N)	2715	1885	-30.56
Tire Force Rear(N)	4381	4065	-7.20
Non Linear % F	0.29	0.25	-
Non Linear % R	0.29	0.16	-

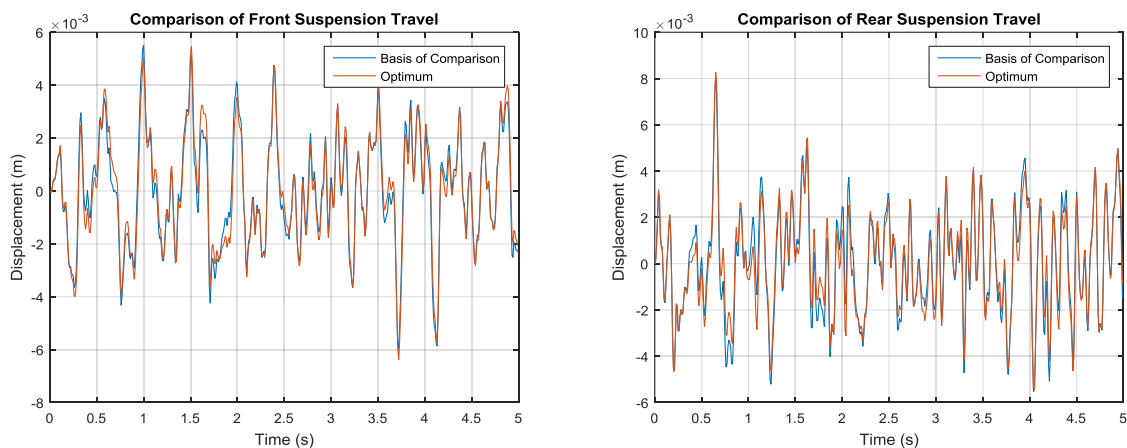
Πίνακας 5.96: Παράμετροι Μοντέλου Οχήματος –Βέλτιστη Λύση

Μεταβλητές Σχεδιασμού	Βέλτιστη Λύση
K_f (N/m)	93827
C_f (N·s/m)	7169
K_r (N/m)	85041
C_r (N·s/m)	7196
K_{fn} (N/m ³)	772980993
K_{rn} (N/m ³)	246486208



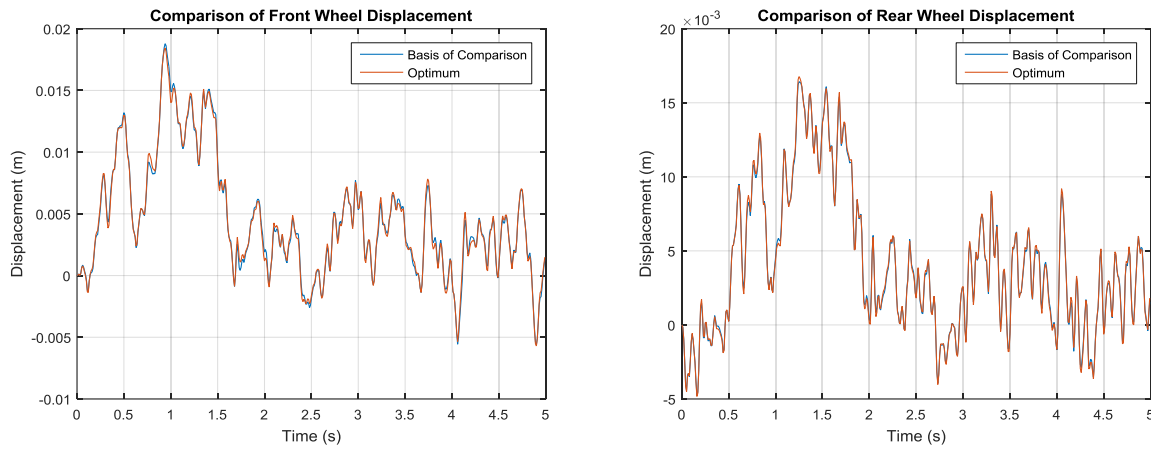
Σχήμα 5.16: Σύγκριση Επιταχύνσεων Σώματος

Στο προφίλ της επιτάχυνση, όπως και στα υπόλοιπα σχήματα, οι διαφορές μεταξύ των δυο σεναρίων είναι μικρές. Στο συγκεκριμένο σχήμα τα μέγιστα των επιταχύνσεων έχουν μειωθεί. Εάν εξεταστούν άλλα τυπικά μεγέθη που αφορούν την επιτάχυνση όπως η τιμή RMS και η τυπική απόκλιση τους, οι διαφορές είναι αισθητές.



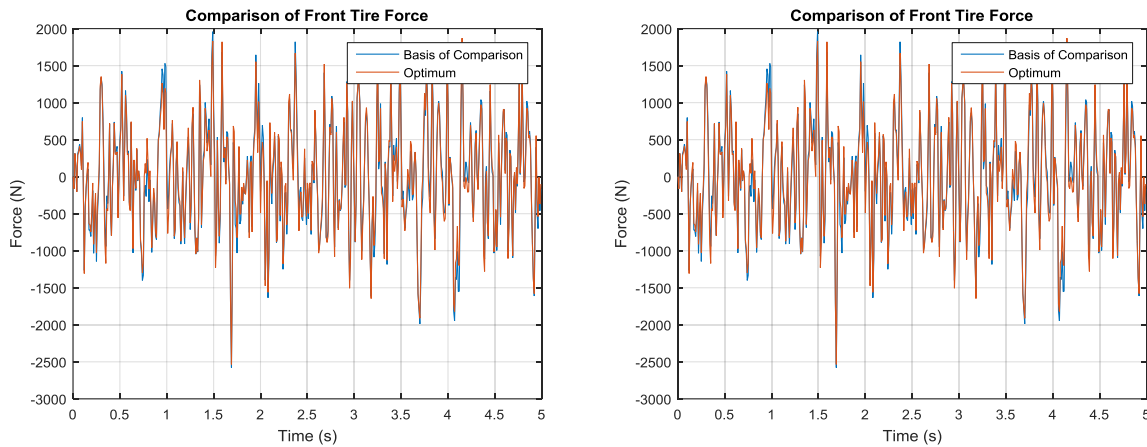
Σχήμα 5.17: Σύγκριση Διαδρομών Αναρτήσεων

Το προφίλ τόσο της εμπρόσθιας όσο και της οπίσθιας ανάρτησης είναι αντίστοιχο στις δυο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Ωστόσο οι διαφορές στις κορυφές των δυο καμπυλών είναι εμφανείς, με την βέλτιστη λύση να μειώνει τις κορυφές του προφίλ.



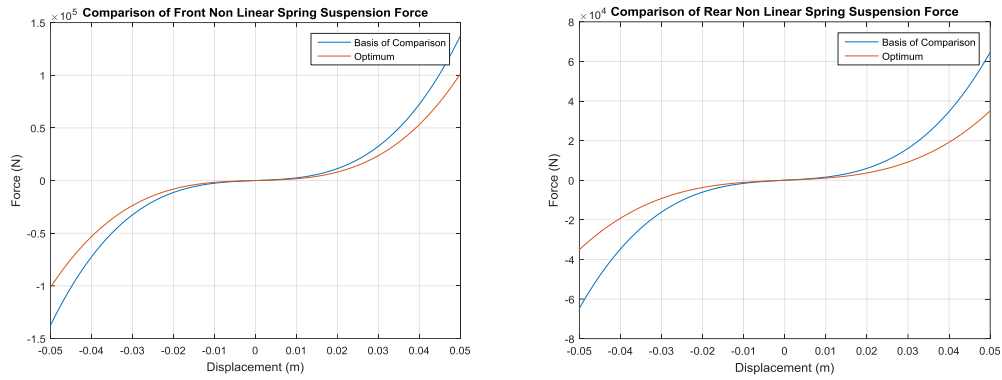
Σχήμα 5.18: Σύγκριση Μετατοπίσεων Τροχών

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις των τροχών οι διαφορές των δυο προφίλ είναι αμελητέες. Η βέλτιστη λύση κατά τον πίνακα 5.95 πετυχαίνει μείωση της τάξης του 7% στην μέγιστη τιμή της μετατόπισης του εμπρόσθιου τροχού, ενώ η τιμή του οπίσθιου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Ίσως η εξέταση ενός άλλου μεγέθους όπως η τυπική απόκλιση να έδινε μια πιο καθαρή εικόνα των πιθανών μεταβολών.



Σχήμα 5.19: Σύγκριση Δυνάμεων Ελαστικών

Όσα προαναφέρθηκαν ισχύουν και στην περίπτωση των δυνάμεων των ελαστικών. Τα δυο προφίλ ακολουθούν αντίστοιχη μορφή με κάποιες μειώσεις στις διάφορες κορυφές των δυο καμπυλών. Σε αυτό το πρόβλημα όπως και στο προηγούμενο, έγινε εμφανής η απουσία της σταθεράς του ελαστικού ως μεταβλητή σχεδιασμού, καθώς υπήρχαν σαφώς μειώσεις αλλά δεν ήταν αντίστοιχες των μειώσεων της πρώτης περίπτωσης που εξετάστηκε.



Σχήμα 5.20: Σύγκριση Μη Γραμμικών Δυνάμεων Ελατηρίων Ανάρτησης

Στα σχήματα των μη γραμμικών δυνάμεων, τόσο στην εμπρόσθια ανάρτηση όσο και στην οπίσθια η βέλτιστη λύση τείνει να «μαλακώσει» την ανάρτηση. Έτσι ενισχύεται η άνεση του οδηγού και η ασφάλεια του μεταφερόμενου φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός βαρέος οχήματος και η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της ανάρτησης και σε περιπτώσεις και του ελαστικού με διάφορες μεθόδους οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, πρέπει να τονιστεί ότι οι βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση διέγερσης αφορούν αποκλειστικά την συγκεκριμένη διέγερση και σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί συνολική λύση για την κατασκευή ενός οχήματος. Για την εξαγωγή ενός τέτοιου συμπεράσματος, οι επιμέρους βέλτιστες λύσεις θα πρέπει να συγκριθούν υπό διαφορετικές διεγέρσεις και μετά από κατάλληλες συγκρίσεις να προκύψει η επιλογή της εκείνης που συμπεριφέρεται καλύτερα συνολικά.

Όσον αφορά τις μεθόδους βελτιστοποίησης, η αιτιοκρατική μέθοδος, όταν ενήργησε εξ' ολοκλήρου μόνη της, έδωσε στις περισσότερες περιπτώσεις τα λιγότερο αποδεκτά αποτελέσματα, ενώ στο προφίλ δρόμου κατηγορίας C, απέτυχε να εντοπίσει λύση που να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος. Είναι πιθανή η παγίδευση της μεθόδου σε τοπικά ακρότατα, αδυνατώντας να εντοπιστεί η βέλτιστη πιθανή λύση. Αντίθετα, όταν η αιτιοκρατική μέθοδος ενήργησε στα πλαίσια της υβριδικής μεθόδου έδωσε πολύ ικανοποιητικές λύσεις, αξιοποιώντας την λύση που εντόπισε σωστά ο γενετικός αλγόριθμος που προηγήθηκε. Όσον αφορά τους τελευταίους, οι περιπτώσεις με τον μεγαλύτερο εξεταζόμενο πληθυσμό έδωσαν συνολικά καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα οι γενετικοί αλγόριθμοι με πληθυσμό 1000 υπερτερούν σημαντικά των αντίστοιχων με πληθυσμό 200. Οι πρώτοι έχουν εντοπίσει την περιοχή των πιθανών λύσεων που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα, πράγμα λογικό αφού σε κάθε γενιά τους εξετάζουν πολύ μεγάλο πληθυσμό υποψηφίων λύσεων. Το μειονέκτημα τους όμως είναι ο αυξημένος υπολογιστικός χρόνος που χρειάζονται για να συγκλίνουν στην λύση, καθιστώντας τους ίσως μη συμβατούς/πρακτικούς σε προβλήματα αυξημένης πολυπλοκότητας.

Αναφορικά με τις διάφορες προσεγγίσεις που υλοποιήθηκαν, οι τρεις μονοκριτηριακές προσεγγίσεις έδειξαν ότι δεν επαρκούν για να καλύψουν όλους τους στόχους του προβλήματος. Ειδικά η περίπτωση της διαδρομής της ανάρτησης παρέδωσε λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες τις εξεταζόμενες διεγέρσεις. Αντίθετα οι υπόλοιποι δυο στόχοι, η άνεση του οδηγού και η συμπίεση των ελαστικών συνδέονται καθώς η ύπαρξη του ενός εκ των δύο στόχων στην αντικειμενική συνάρτηση, είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις στα μεγέθη δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος που τους εμπλέκουν. Η ισορροπημένη πολυκριτηριακή προσέγγιση απέδωσε όπως αναμενόταν, εξισορροπώντας τους τρεις αντικρουόμενους στόχους του προβλήματος. Επιπρόσθετα, η ψεύδο-πολυκριτηριακή προσέγγιση ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις, και εν τέλει πέτυχε τον στόχο της δηλαδή την εύρεση καλύτερης λύσης. Ειδικά στην πρώτη περίπτωση, όπως έδειξε η ανάλυση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, η ψεύδο-πολυκριτηριακή προσέγγιση εντόπισε το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης. Στην τρίτη περίπτωση εντόπισε λύση ανάλογη των βέλτιστων όχι όμως την βέλτιστη, ενώ τέλος στην δεύτερη περίπτωση, σύμφωνα πάλι με την ανάλυση των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, δεν εντόπισε το ολικό ελάχιστο αλλά από άποψη υπολογιστικού χρόνου έδειξε ότι εντόπισε εφάμιλλη λύση με την βέλτιστη μειώνοντας τον χρόνο στο $\frac{1}{4}$. Εν τέλει η «σύγκρουση» των δυο κύριων στόχων της βελτιστοποίησης, της άνεση και του κρατήματος γίνεται ξεκάθαρη στα αποτελέσματα, και φαίνεται ότι δε μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα σε μεγάλο βαθμό.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια εις βάθος μελέτη της βελτιστοποίησης της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Όμως υπάρχουν ακόμα περιθώρια επέκτασης και μελλοντικής έρευνας. Αρχικά η βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες

διεγέρσεις με σκοπό την εξαγωγή μιας συνολικά βέλτιστης λύσης που να εξυπηρετεί το όχημα σε αρκετές διαφορετικές συνθήκες δρόμου. Η επέκταση αυτή θα ενισχύσει και τα συμπεράσματα ως προς τη λειτουργία και την απόδοση της ψεύδο-πολυκριτηριακής προσέγγισης που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία. Επιπρόσθετα, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός της μη γραμμικής ανάρτησης που προέκυψε, και η εύρεση του κατάλληλου υλικού και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που την διέπουν. Τέλος, προτείνεται η επέκταση των μεθόδων βελτιστοποίησης, με χρήση εξελιγμένων τεχνικών, όπως εκπαίδευσης πολυωνύμων και βελτιστοποίηση με υποβοηθούμενους εξελικτικούς αλγόριθμους όπως και μελέτης και υλοποίησης νευρωνικών δικτύων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικες

Παρατίθενται οι κώδικες για την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος (Bicycle Car Model).

Κυρίως Πρόγραμμα

```
%% Bicycle Car Model

% close all
% clear all
% clc

%% Globalization

%%Data Input and Parameters
variables=input('Case ');
model=Input(variables);
id=model.bump.id;
str=strcat('samaraki_',id);
par=parameters(model);
[t,wrh,chsrh,chvel,accd]=exper_data(id);

%% Road Profile

st=model.bump.start_time;
en=model.bump.end_time;
[bump,t]=excitation(t,chvel,wrh,accd,par,st,en);

%% Ode 45 Model Solution

y=zeros(4,1);
ydot=zeros(4,1);
initial=[y ydot];
[T,x]=ode45(@bicycle,t,initial,[],par,t,bump);

%% Acceleration Computation
acc=acceleration(t,x,par,bump);
```

Επίλυση Μοντέλου

```
function dxdt=bicycle(time,x,par,T,bump)

bump_f=interp1(T,bump(:,1),time);
bump_r=interp1(T,bump(:,2),time);
bump_vf=interp1(T,bump(:,3),time);
bump_vr=interp1(T,bump(:,4),time);
```

```

dxdt=zeros(8,1);

dxdt(1)=x(2);
dxdt(3)=x(4);
dxdt(5)=x(6);
dxdt(7)=x(8);

%Body Bounce
dxdt(2)=-par(8)/par(1)*(x(2)-x(6)-par(3)*x(4))-par(10)/par(1)*(x(2)-
x(8)+par(4)*x(4))...
    par(9)/par(1)*(x(1)-x(7)+par(4)*x(3))...
    -par(15)/par(1)*(x(1)-x(5)-par(3)*x(3))^3-par(16)/par(1)*(x(1)-
x(7)+par(4)*x(3))^3;

%Body Pitch
dxdt(4)=par(3)*par(8)/par(2)*(x(2)-x(6)-par(3)*x(4))-
par(4)*par(10)/par(2)*(x(2)-x(8)+par(4)*x(4))...
    +par(3)*par(7)/par(2)*(x(1)-x(5)-par(3)*x(3))-par(4)*par(9)/par(2)*(x(1)-
x(7)+par(4)*x(3))...
    +par(15)*par(3)/par(2)*(x(1)-x(5)-par(3)*x(3))^3-
par(16)*par(4)/par(2)*(x(1)-x(7)+par(4)*x(3))^3;
%Wheel Hop 1
dxdt(6)=par(8)/par(5)*(x(2)-x(6)-par(3)*x(4))+par(7)/par(5)*(x(1)-x(5)-
par(3)*x(3))...
    -par(11)/par(5)*(x(5)-bump_f)-par(13)/par(5)*(x(6)-
bump_vf)+par(15)/par(5)*(x(1)-x(5)-par(3)*x(3))^3;
%Wheel Hop 2
dxdt(8)=par(10)/par(6)*(x(2)-x(8)+par(4)*x(4))+par(9)/par(6)*(x(1)-
x(7)+par(4)*x(3))...
    -par(12)/par(6)*(x(7)-bump_r)-par(14)/par(6)*(x(8)-
bump_vr)+par(16)/par(6)*(x(1)-x(7)+par(4)*x(3))^3;

```

Υπολογισμός Επιταχύνσεων

```

function acc=acceleration(t,x,par,bump)

acc=zeros(length(t),4);

%Body Bounce
acc(:,1)=-par(8)/par(7)*(x(:,2)-x(:,6)-par(7)*x(:,4))-par(10)/par(1)*(x(:,2)-
x(:,8)+par(4)*x(:,4))...
    -par(7)/par(1)*(x(:,1)-x(:,5)-par(3)*x(:,3))-par(15)/par(1)*(x(:,1)-
x(:,5)-par(3)*x(:,3)).^3-par(16)/par(1)*(x(:,1)-x(:,7)+par(4)*x(:,3)).^3;

%Body Pitch
acc(:,2)= par(4)*par(10)/par(2)*(x(:,2)-x(:,8)+par(4)*x(:,4))...
    +par(3)*par(7)/par(2)*(x(:,1)-x(:,5)-par(3)*x(:,3))-
par(4)*par(9)/par(2)*(x(:,1)-x(:,7)+par(4)*x(:,3))...
    +par(15)*par(3)/par(2)*(x(:,1)-x(:,5)-par(3)*x(:,3)).^3-
par(16)*par(4)/par(2)*(x(:,1)-x(:,7)+par(4)*x(:,3)).^3;
%Wheel Hop 1
acc(:,3)=par(8)/par(7)*(x(:,2)-x(:,6)-par(3)*x(:,4))+par(7)/par(5)*(x(:,1)-
x(:,5)-par(3)*x(:,3))...
    -par(11)/par(5)*(x(:,5)-bump(:,1))-par(13)/par(5)*(x(:,6)-
bump(:,3))+par(15)/par(5)*(x(:,1)-x(:,5)-par(3)*x(:,3)).^3;
%Wheel Hop 2
acc(:,4)=par(10)/par(6)*(x(:,2)-x(:,8)+par(4)*x(:,4))+par(9)/par(6)*(x(:,1)-
x(:,7)+par(4)*x(:,3))...
    -par(12)/par(6)*(x(:,7)-bump(:,2))-par(14)/par(6)*(x(:,8)-
bump(:,4))+par(16)/par(6)*(x(:,1)-x(:,7)+par(4)*x(:,3)).^3;

```

Υπορουτίνα Παραμέτρων

```
function par=parameters(model)

par=zeros(1,14);
%Parameters
par(1)=model.mass.m;% m(kg)
W=par(1)*9.81/4.44822;
Iy=(0.22*W-235)*1.355818;
par(2)=Iy;%Iy(kg/m^2)
par(3)=model.dimensions.a1;%a1(m)
par(4)=model.dimensions.a2;%a2(m)
par(5)=model.mass.mf;%mf(kg)
par(6)=model.mass.mr;%mr(kg)
par(7)=model.suspension.kf;%kf(N/m)
par(8)=model.suspension.cf;%cf(Ns/m)
par(9)=model.suspension.kr;%kr(N/m)
par(10)=model.suspension.cr;%cr(Ns/m)
par(11)=model.tyre.ktf;%ktf(N/m)
par(12)=model.tyre.ktr;%ktr(N/m)
par(13)=model.tyre.ctf;
par(14)=model.tyre.ctr;
par(15)=model.suspension.kfn;
par(16)=model.suspension.krn;
```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Shirahatti, A., Prasad, P. S. S., Panzade, P., & Kulkarni, M. M. (2008), “Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30(1), 66-76. [2] Cebon D. (1999), *Handbook of Vehicle-Road Interaction*, Swets & Zeitlinger, Lisse, the Netherlands.
- [2] Gündoğdu, Ö. (2007), “Optimal seat and suspension design for a quarter car with driver model using genetic algorithms”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(4), 327-332..
- [3] Özcan, D., Sönmez, Ü., & Güvenç, L. (2013), “Optimization of the Nonlinear Suspension Characteristics of a Light Commercial Vehicle”, *International Journal of Vehicular Technology*, 2013. [5] Koulocheris D. (2007), “Optimum Dynamic performance of a tank vehicle”, *International Review of Mechanical Engineering (I.RE.ME)*, vol.1, pp. 218-224.
- [4] Sun, L., Cai, X., & Yang, J. (2007), “Genetic algorithm-based optimum vehicle suspension design using minimum dynamic pavement load as a design criterion”, *Journal of Sound and Vibration*, 301(1), 18-27.
- [5] Le, T. D., & Ahn, K. K. (2013), “Experimental investigation of a vibration isolation system using negative stiffness structure”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 70, pp 99-112.
- [6] Georgiou, G., Verros, G., & Natsiavas, S. (2007), “Multi-objective optimization of quarter-car models with a passive or semi-active suspension system”, *Vehicle System Dynamics*, 45(1), pp 77-92. [8] Koulocheris D., Dertimanis V (2008), “Calculation of a fixed-tank vehicle optimum dynamic performance”, *Procedia Social and Behavioral Sciences* 48, pp. 2230-2240.
- [7] Yu, H., & Yu, N. (2003), “Application of Genetic Algorithms to Vehicle Suspension Design”, The Pennsylvania State University, University park, 1-9. [10] Koulocheris D., Papaioannou G. (2014), “Experimental Evaluation of Vertical Wheel Loads of a Truck Through Measuring the Shear Strains”, 6th International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering, Athens, 9-12 July, vol 1 pp 184-190
- [8] Imine, H., Delanne, Y., & M'sirdi, N. K. (2005), “Road profile inputs for evaluation of the loads on the wheels”, *Vehicle System Dynamics*, 43(sup1), pp 359-369.
- [9] Agostinacchio, M., Ciampa, D., & Olita, S. (2014), “The vibrations induced by surface irregularities in road pavements—a Matlab® approach”, *European Transport Research Review*, 6(3), pp 267-275.
- [10] Koulocheris D., Papaioannou G. (2015), “Dynamic Analysis of the Suspension System of a Heavy Vehicle through Experimental and Simulation Procedure”, *Proceedings of the 25th International Automotive Conference “Science and Motor Vehicles” (25thJUMV)*, Beograd, Serbia, 14-15 April 2015.
- [11] Jazar, R. N. (2013), *Vehicle dynamics: theory and application*, Springer Science & Business Media.
- [12] Mike Blundell, Damian Harty (2004), *Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics*, Elsevier Butterworth Heinemann, New York
- [13] Alkhatib, R., Jazar, G. N., & Golnaraghi, M. F. (2004), “Optimal design of passive linear suspension using genetic algorithm”, *Journal of Sound and vibration*, 275(3), pp 665-691.
- [14] Cui, Y., Kurfess, T. R., & Messman, M. (2010), “Testing and modelling of nonlinear properties of shock absorbers for vehicle dynamics studies”, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, October 20-22, 2010, Vol. 2, pp. 20-22.
- [15] Ibrahim, R. A. (2008), “Recent advances in nonlinear passive vibration isolators”, *Journal of Sound and Vibration*, 314(3), pp 371-452.
- [16] Floudas, C. A., & Pardalos, P. M. (2001). *Encyclopedia of optimization*. Springer Science & Business Media.
- [17] Γιαννάκογλου, Κ. Χ. (2006). Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική. Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ.
- [18] Κουλοχέρης Δ.Β. (2010). Βελτιστοποίηση Συστημάτων. Εργαστήριο Οχημάτων Ε.Μ.Π.