

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών **Εργαστήριο Οχημάτων**

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΡΟΧΑΙΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία **Κωνσταντίνος Αναγνωστόπουλος**

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Η σελίδα αυτή είναι επίτηδες κενή

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους όλους τους συναδέλφους του εργαστηρίου οχημάτων της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., οι οποίοι με στήριξαν και μου παρείχαν κάθε βοήθεια και συμβουλή για την εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Ιδιαιτέρως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ.-Μηχ. Βόσου Κλειώ, η οποία με την επιμονή της και την καθοδήγησή της με οδήγησε στο επιθυμητό αποτέλεσμα, μια πλήρως τεκμηριωμένη επιστημονική Διπλωματική Εργασία.

Τέλος, μέσα από την καρδιά μου, ευχαριστώ τους γονείς μου που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου βήμα και απόφαση, και όλη την οικογένειά μου που πιστεύουν στις δυνατότητές μου.

Περίληψη

Η ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος είναι ένα πρόβλημα το οποίο απασχολεί τους μηχανικούς, ήδη, από τη δεκαετία του '70 και στόχος της είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών που οδήγησαν σε ένα τροχαίο ατύχημα. Μια τυπική περίπτωση τροχαίου ατυχήματος είναι η σύγκρουση ενός οχήματος με ένα δεύτερο. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να προσδιοριστούν οι αρχικές ταχύτητες των εν λόγω οχημάτων, αλλά και άλλα μεγέθη, όπως οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται σε κάθε όχημα, το ποσοστό κατά το οποίο οι τροχοί είναι κλειδωμένοι, ο συντελεστής τριβής των τροχών με το οδόστρωμα κ.α.

Η ανακατασκευή ενός τροχαίου ατυχήματος, συνήθως, πραγματοποιείται υπολογιστικά. Για την αριθμητική προσομοίωση και την επίλυση του προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές θεωρίες, από τις οποίες η πρώτη βασίζεται στην ενέργεια που απορροφάται από τα οχήματα κατά τη σύγκρουση και υπολογίζεται από την παραμόρφωση που υφίστανται αυτά σε συνδυασμό με τη θεωρία της ώθησης-ορμής και η δεύτερη στις εξισώσεις της αρχής διατήρησης ορμής στο καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων. Οι θεμελιωτές αυτών των θεωριών είναι ο R. McHenry και ο R. Brach κατά αντιστοιχία. Στη θεωρία που βασίζεται στη διατήρηση ενέργειας (R. McHenry) οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την επίλυση του προβλήματος είναι οι συντελεστές στιβαρότητας (stiffness coefficients) των οχημάτων, το μέτρο και η διεύθυνση της δύναμης κρούσης που αναπτύσσεται κατά τη σύγκρουση (Principal Direction of Force – PDOF), καθώς και το σημείο στο οποίο επιδρά αυτή (Point of Impact - POI). Παράμετροι όπως άδηλες απώλειες (αύξηση θερμοκρασία κατά τη σύγκρουση, ήχος κ.α.), ανωμαλίες εδάφους, ελλιπή δεδομένα σύγκρουσης, καθιστούν, πολλές φορές, την άμεση επίλυση του προβλήματος αδύνατη. Επιπλέον, η γνώση αυτών των παραμέτρων δεν μπορεί να εξαλείψει το σφάλμα μεταξύ της υπολογιστικής επίλυσης και των πραγματικών δεδομένων. Οι δύο βασικές θεωρίες στις οποίες βασίζεται η ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος και οι παράμετροι που τις επηρεάζουν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Οι συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων διαφέρουν ανάλογα με το όχημα αλλά και την πλευρά του οχήματος. Ο προσδιορισμός των συντελεστών αυτών γίνεται με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων πολλαπλών δοκιμών σύγκρουσης των οχημάτων με σταθερούς ή κινητούς απαραμόρφωτους ανασχετήρες. Τις δοκιμές αυτές έχουν αναλάβει να πραγματοποιήσουν υπηρεσίες υπεύθυνες για την ασφάλεια των επιβατών και τις λειτουργίες των συστημάτων των οχημάτων σε συνθήκες σύγκρουσης. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA - Αμερική) και European New Car Assessment Program (EuroNCAP - Ευρώπη). Η NHTSA κατά τη διάρκεια ανάπτυ-ξης των θεωριών, αρχικά, και αλγορίθμων κατόπιν, για την ανακατασκευή τροχαίου ατυ-χήματος κατασκεύασε μια βάση δεδομένων δώδεκα συγκρούσεων δυο οχημάτων, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση και τη βελτίωση των εν λόγω παραμέτρων. Η

ελεύθερη πρόσβαση στη βάση δεδομένων της NHTSA επιτρέπει την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ο οποίος για κάθε όχημα μπορεί να προσδιορίζει τις σταθερές στιβαρότητας της κάθε πλευράς του οχήματος, με την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των καταγεγραμμένων δοκιμών είναι επαρκής. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αυτή η βάση δεδομένων και γίνεται η ανάλυση των συγκρούσεων που περιέχει.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προήλθαν από την επίλυση των δοκιμών RICSAC με γνωστές τις σταθερές στιβαρότητας επιλύοντας μόνο τη φάση της σύγκρουσης (Collision Phase) με χρήση αλγορίθμου που βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκε η ορθότητα του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.

Στο Κεφάλαιο 5, επιλύθηκαν οι δοκιμές RICSAC και για τη φάση μετά της σύγκρουσης (Post-Collision Phase) ενώ στο Κεφάλαιο 6 μία από τις δώδεκα δοκιμές, συγκεκριμένα η 7, επιλύθηκε με άγνωστες τις σταθερές στιβαρότητας. Επίσης, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης με τα πραγματικά και αναφέρονται τα μειονεκτήματα του αλγορίθμου με στόχο την βελτίωσή του. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την ανάπτυξη και τη χρήση του αλγορίθμου.

Εν συντομία, ο συγκεκριμένος αλγόριθμός αναπτύχθηκε σε δύο υπορουτίνες, η πρώτη επιλύει τη φάση της σύγκρουσης (Collision Phase) κατά την οποία τα οχήματα βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους και η δεύτερη τη φάση μετά τη σύγκρουση κατά την οποία τα δύο οχήματα κινούνται και δεν βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους (Post-Collision Phase). Η επίλυση των φάσεων έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτήν της εξέλιξης του χρόνου σε αντίθεση με άλλους αλγορίθμους ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος που βρίσκονται στη βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτόν, απαιτείται η εκτίμηση των αρχικών ταχυτήτων των οχημάτων και η λύση ανανεώνεται με την χρήση γενετικού αλγορίθμου, έως ότου βρεθεί η βέλτιστη. Η εκτίμηση της βέλτιστης λύσης γίνεται μέσω του μηδενισμού της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο μηδενισμός της αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται την ακινητοποίηση και των δύο οχημάτων στα ακριβή μετρούμενα σημεία στάθμευσης.

Συνεπώς, μέσω του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, γίνεται εφικτή η ανακατασκευή οποιουδήποτε τροχαίου ατυχήματος, με την προϋπόθεση ότι ο αριθμός των δοκιμών σύγκρουσης σε ανασχετήρες, για τα οχήματα που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο ατύχημα, είναι επαρκής, και ταυτόχρονα υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση των εξισώσεων. Σε διαφορετική περίπτωση τα δεδομένα που λείπουν θα πρέπει να εκτιμηθούν. Τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι το ποσοστό πέδησης των τροχών, η γωνία σύγκρουσης των οχημάτων κ.α..

Summary

Traffic accident reconstruction is a problem that concerns engineers since the 70's and, in its typical form, it refers to the collision of two vehicles. In this case, the initial velocities of these vehicles must be determined, such as the forces applied to each vehicle, the rate at which the wheels are locked, the coefficient of friction between the wheels and the road surface, etc.

Traffic accident reconstruction is commonly solved computationally. For the numerical simulation and the solution of the problem, two basic approaches have been developed, the first one is based on the energy absorbed by the vehicles during the collision and it is calculated through the deformation of the vehicles, combined with the impulse momentum theory and the second one is based on the equations of the momentum conservation principle at the Cartesian coordinate plane. The founders of these theories are R. McHenry and R. Brach respectively. In energy conservation theory, the main parameters influencing the solution of the problem are the determination of magnitude and direction of the force of impact (Principal Direction of Force – PDOF), as well as the point of impact (POI). Parameters such as latent energy loss (increment of temperature due to collision, sound etc.), ground anomalies, unknown collision data, often render the right solution of the problem impossible. However, knowing these parameters cannot eliminate the error between the computational solution and the actual data. These two main theories on which traffic accident reconstruction is based and the parameters affecting them, are presented in detail in Chapter 2 of this Diploma Thesis.

The Stiffness Coefficients, which differ depending on the vehicle and also on the vehicle side, play an important role in traffic accident reconstruction models. The determination of these coefficients is achieved by exploiting the results of multiple collision tests of vehicles on fixed or moving rigid barriers. These tests have been undertaken by services responsible for passengers' safety and vehicle operation systems in collision situations. Such services are the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA - USA) and the European New Car Assessment Program (EuroNCAP - Europe). NHTSA, during the development of theories initially, and then the algorithms, for the reconstruction of a road accident, constructed a twelve vehicle collision database, which was used to evaluate and improve these parameters. Free access to the NHTSA database allows the development of an algorithm which for each vehicle can determine the stiffness coefficients of each side of the vehicle, provided that the number of recorded tests is sufficient. Chapter 3 presents this database and analyzes the collisions.

Chapter 4 presents the results obtained by solving the RICSAC tests with known stiffness coefficients solving only the Collision Phase. In this way, the correctness of the algorithm developed was tested.

In Chapter 5, RICSAC tests are solved also for the Post-Collision Phase, as well as in Chapter 6 one of the twelve tests was solved with unknown stiffness coefficients. The results of the computational simulation and the actual results compared and the disadvantages of the algorithm are listed with the aim of improving it. Finally, Chapter 7 summarizes the main conclusions drawn during the development of the algorithm, but also from its use.

In this Diploma Thesis, an Accident Reconstruction Algorithm was developed which is based on the McHenry model (Deformation Energy Theory and Impulse - Momentum Theory) and used for the reconstruction of the twelve recorded vehicle to vehicle collision tests. In short, this algorithm is developed into two subroutines, the first solving the collision phase in which the vehicles are in contact with each other, and the second the post-collision phase in which the two vehicles are moving and are not in contact with each other. The solution of these phases has the same direction as the evolution of time as opposed to other traffic accident reconstruction algorithms retrieved in the literature. In this way, it is necessary to estimate the initial speeds of the vehicles and the solution is altered using genetic algorithm until the optimal is found. The optimum solution is evaluated by zeroing the objective function. Zeroing the objective function causes both vehicles to stop at the exact measured parking points.

Consequently, through the algorithm developed in this Diploma Thesis, any traffic accident reconstruction, involving vehicle collision is possible with a fair accuracy, provided that the number of crash tests for the vehicles involved in the accident is adequate, but also the necessary data to solve the equations are available, otherwise these will have to be estimated. Such data may be the percentage of braking of the wheels, the angle of collision of the vehicles, etc.

Περιεχόμενα

Περίληψηi
Summaryiii
Περιεχόμεναν
Κατάλογος Σχημάτωννii
Κατάλογος Πινάκων
1. Εισαγωγή1
2. Αριθμητικές Μέθοδοι Ανακατασκευής Τροχαίου Ατυχήματος
2.1. Γενικά3
2.2. Προσομοίωση τροχιών οχημάτων πριν και μετά τη σύγκρουση4
2.2.1. Γενικά για τη μοντελοποίηση των τροχιών οχημάτων4
2.2.2. Προσδιορισμός τροχιών από τις δυνάμεις των ελαστικών
2.3. Προσομοίωση σύγκρουσης οχημάτων6
2.3.1. Μοντέλο επίπεδης κρούσης (Planar Impact Model)7
2.3.2. Μοντέλο διατήρησης της ενέργειας (McHenry Model)9
2.3.2.1. Διεύθυνση Δύναμης και Συντελεστές Διόρθωσης Ενέργειας14
2.3.2.2. Προσδιορισμός των συντελεστών στιβαρότητας
2.3.2.3. Απορροφούμενη ενέργεια κατά την παραμόρφωση19
3. Βάσεις δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων21
3.1. NHTSA και Euro NCAP23
3.2. Οι δοκιμές RICSAC23
3.2.1. Ανάλυση των δοκιμών RICSAC24
4. Υπολογισμός μεταβολής ταχύτητας κατά τη σύγκρουση με χρήση της ενέργειας
παραμόρφωσης27
4.1. Περιγραφή μεθόδου27
4.2. Αρχικός υπολογισμός ενέργειας παραμόρφωσης - Raw energy28
4.3. Συμπεράσματα για τις δοκιμές RICSAC37
5. Αλγόριθμος ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων
5.1. Περιγραφή αλγορίθμου και Τρόπος Χρήσης39
5.2. Χρήση του αλγορίθμου για την ανακατασκευή των δοκιμών RICSAC44

5.3.	Αποτελέσματα	45
5.4.	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	85
6. Xp	ήση του αλγορίθμου σε δοκιμή RICSAC με άγνωστους τους συντελεστές	
στιβαρά	οτητας των οχημάτων	89
6.1.	Προσδιορισμός των συντελεστών στιβαρότητας των οχημάτων	89
6.2.	Επίλυση της δοκιμής 7	90
6.3.	Παρατηρήσεις – Σύγκριση	91
7. Συ	μπεράσματα	93
Βιβλιογ	ραφία	95
Παράρτ	ημα Α – RICSAC Data	97
Παράρτ	ημα Β – Ρυθμίσεις γενετικού αλγορίθμου	109

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Συνισταμένη δύναμη ασκούμενη στον τροχό αντίρροπη της ταχύτητας6
Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της σύγκρουσης οχημάτων
Σχήμα 3. Κεντροειδές παραμορφωμένης επιφάνειας9
Σχήμα 4. Απεικόνιση των οχημάτων σύμφωνα με την αρχή της μοντελοποίησης του
McHenry10
Σχήμα 5. Γραφική αναπαράσταση μη κεντρικής σύγκρουσης σε κάτοψη
Σχήμα 6. α) Γραφική αναπαράσταση της διεύθυνσης των δυνάμεων που υφίστανται σε
κάθε όχημα κατά την σύγκρουση υπό γωνία Ψ και β) Γραφική αναπαράσταση της
δύναμης και της παραμόρφωσης σε απομονωμένο όχημα
Σχήμα 7. Προσδιορισμός συμβόλων που εμφανίζονται στο VDI. (Page CDC, n.d.)15
Σχήμα 8. α) Αναλογία αριθμών σε μοίρες , β) παράδειγμα σειράς αριθμών και
χαρακτήρων για μία συγκεκριμένη παραμόρφωση15
Σχήμα 9. Αναπαράσταση σύγκρουσης οχήματος με ανασχετήρα και προσδιορισμός της
κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας στην επιφάνεια του ανασχετήρα
Σχήμα 10. Γραμμή απεικόνισης της αναλογίας ταχύτητας – παραμόρφωσης18
Σχήμα 11. Γραμμή απεικόνισης της αναλογίας δύναμης – παραμόρφωσης
Σχήμα 12. Γραφική απεικόνιση υπολογισμού της παραμόρφωσης μέσω των μεγεθών C _i .
Σχήμα 13. Κατηγοριοποίηση των δοκιμών RICSAC σε 4 κατηγορίες βάση γωνίας
σύγκρουσης
Σχήμα 14. Διάγραμμα ροής υπολογισμού της διαφοράς ταχύτητας των οχημάτων κατά
την φάση σύγκρουσης (Collision Phase)27
Σχήμα 15. Διάγραμμα τιμών ενέργειας παραμόρφωσης, χωρίς συντελεστή διόρθωσης,
για κάθε δοκιμή
Σχήμα 16. Τιμή του πρώτου συντελεστή διόρθωσης (Ε _{f.1}) συναρτήσει του PDOF για το
τεστ 8
Σχήμα 17. Τιμή του δεύτερου συντελεστή διόρθωσης (Ε _{f.2}) συναρτήσει του PDOF για το
τεστ 8
Σχήμα 18. Τιμή του τρίτου συντελεστή διόρθωσης (Ε _{f.3}) συναρτήσει του PDOF για το
τεστ 8
Σχήμα 19. Τιμή του τέταρτου συντελεστή διόρθωσης (Ε _{f.4}) συναρτήσει του PDOF για το
τεστ 8
Σχήμα 20. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση
με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία IC1
Σχήμα 21. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύνκριση
με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία ΙC2
Σχήμα 22. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύνκοιση
με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία ΙC3
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Σχήμα 23. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση
με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία ΙC436
Σχήμα 24. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου40
Σχήμα 25. Αποστάσεις μετρούμενων και υπολογισθέντων σημείων για τον ορισμό της
αντικειμενικής συνάρτησης42
Σχήμα 26. Τετράπλευρο ορισμού των οριακών τιμών του σημείου εφαρμογής της
δύναμης45
Σχήμα 27. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 145
Σχήμα 28. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεσ τ 146
Σχήμα 29. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 247
Σχήμα 30. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 248
Σχήμα 31. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 249
Σχήμα 32. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 250
Σχήμα 33. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τέταρτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 251
Σχήμα 34. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 352
Σχήμα 35. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεσ τ 353
Σχήμα 36. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεσ τ 354
Σχήμα 37. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 455
Σχήμα 38. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 456
Σχήμα 39. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 457
Σχήμα 40. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 458
Σχήμα 41. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 5
Σχήμα 42. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 560

Σχήμα 43. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 561
Σχήμα 44. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 662
Σχήμα 45. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 663
Σχήμα 46. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 664
Σχήμα 47. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 665
Σχήμα 48. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 7
Σχήμα 49. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 767
Σχήμα 50. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 768
Σχήμα 51. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 769
Σχήμα 52. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 870
Σχήμα 53. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 871
Σχήμα 54. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 872
Σχήμα 55. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 873
Σχήμα 56. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 974
Σχήμα 57. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 975
Σχήμα 58. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 976
Σχήμα 59. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για
το τεστ 1077
Σχήμα 60. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεσ τ 1078
Σχήμα 61. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή
βελτιστοποίηση για το τεστ 1079

Σχήμα 62. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για	
το τεστ 1180)
Σχήμα 63. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή	
βελτιστοποίηση για το τεστ 1182	1
Σχήμα 64. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή	
βελτιστοποίηση για το τεστ 1182	2
Σχήμα 65. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για	
το τεστ 1283	3
Σχήμα 66. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή	
βελτιστοποίηση για το τεστ 1284	1
Σχήμα 67. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή	
βελτιστοποίηση για το τεστ 1285	5
Σχήμα 68. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ακριβή βελτιστοποίηση για	
το τεστ 7 με άγνωστους τους συντελεστές στιβαρότητας90)

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ονόματα και VDI των οχημάτων , για κάθε δοκιμή RICSAC
Πίνακας 2. Συντελεστές στιβαρότητας σε κάθε δοκιμή RICSAC για κάθε όχημα25
Πίνακας 3. Σύγκριση τιμών διαφοράς ταχύτητας για τις δύο εκτιμήσεις των PDOF και τις
υπολογισθείσες από τα επιταχυνσιόμετρα
Πίνακας 4. Τιμές συντελεστών διόρθωσης (1, 2 & 3) για κάθε εκτιμώμενη γωνία30
Πίνακας 5. Τιμές 4 ^{ου} συντελεστή διόρθωσης για κάθε δοκιμή RICSAC
Πίνακας 6. Ελάχιστο σφάλμα διαφοράς ταχύτητας για κάθε όχημα και κάθε τεστ για
τους συντελεστές διόρθωσης 1 και 2 (E _{f,1} & E _{f,2})
Πίνακας 7. Ελάχιστο σφάλμα διαφοράς ταχύτητας για κάθε όχημα και κάθε τεστ για
τους συντελεστές διόρθωσης 3 και 4 (E _{f,3} & E _{f,4})
Πίνακας 8. Ελάχιστο, μέγιστο και μέσο σφάλμα για τους τρεις συντελεστές διόρθωσης
από το δείγμα των 12 RICSAC τεστ
Πίνακας 10. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
1
Πίνακας 11. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 1
Πίνακας 12. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
2
Πίνακας 13. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 2
Πίνακας 14. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 2
Πίνακας 15. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 250
Πίνακας 16. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τέταρτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 2
Πίνακας 17. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
3
Πίνακας 18. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 3
Πίνακας 19. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 3
Πίνακας 20. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης νια το τεστ
4
Πίνακας 21. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης νια
το τεστ 4

Πίνακας 22. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 4
Πίνακας 23. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 4
Πίνακας 24. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
5
Πίνακας 25. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 560
Πίνακας 26. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 5
Πίνακας 27. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
6
Πίνακας 28. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 6
Πίνακας 29. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 6
Πίνακας 30. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 6
Πίνακας 31. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
7
Πίνακας 32. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 7
Πίνακας 33. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 7
Πίνακας 34. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 7
Πίνακας 35. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
8
Πίνακας 36. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 8
Πίνακας 37. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 8
Πίνακας 38. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 8
Πίνακας 39. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
9
Πίνακας 40. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 9

Πίνακας 41. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 976
Πίνακας 42. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
10
Πίνακας 43. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 10
Πίνακας 44. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 10
Πίνακας 45. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
11
Πίνακας 46. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 11
Πίνακας 47. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 11
Πίνακας 48. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ
12
Πίνακας 49. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για
το τεστ 12
Πίνακας 50. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης
για το τεστ 12
Πίνακας 51. Σύγκριση μετρούμενων και υπολογισθέντων αρχικών ταχυτήτων και μεταξύ
τους σφάλμα86
Πίνακας 52. Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε τεστ
Πίνακας 53. Συντελεστές στιβαρότητας για κάθε όχημα και για κάθε ταχύτητα
μηδενικής παραμόρφωσης
Πίνακας 54. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 7
με άγνωστους τους συντελεστές στιβαρότητας90
Πίνακας 55. Αρχικές ταχύτητες οχημάτων για κάθε έναν συνδυασμό ταχυτήτων
μηδενικής παραμόρφωσης91

1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της Ελληνικής Αστυνομίας, ο αριθμός των τροχαίων ατυχημάτων στην Ελλάδα το έτος 2016 είχε υπερβεί τις έντεκα χιλιάδες (11.000), ενώ το έτος 2017 τις δέκα χιλιάδες (10.000). Επίσης, σύμφωνα με τη βάση δεδομένων της Ευρωπαϊκής Ένωσης «CARE» (Community database on Accidents on the Roads in Europe), από το έτος 2006 έως το 2017, ο αριθμός των ατυχημάτων στην Ευρώπη έχει μειωθεί σημαντικά, περίπου από ένα εκατομμύριο τριακόσιες χιλιάδες (1.300.000) σε ένα εκατομμύριο εκατό χιλιάδες (1.100.000). Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, το έτος 2006 ο αριθμός των ατυχημάτων με ύπαρξη τραυματισμού, ήταν δεκαέξι χιλιάδες εννιακόσια δέκα τέσσερα (16.914) ενώ το έτος 2015 ήταν ένδεκα χιλιάδες εφτακόσια πενήντα δύο (11.752), δηλαδή παρουσίασε μείωση περίπου 30%. Αντίστοιχα, τα θανατηφόρα τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα το έτος 2006 ήταν σε χίλια εξακόσια πενήντα εφτά (1.657) και το έτος 2015 ήταν εφτακόσια ενενήντα τρία (793), δηλαδή μειώθηκαν περίπου 52%. Ακόμα, σημαντικό είναι ότι σε ποσοστό 46% του συνολικού αριθμού των ατυχημάτων το έτος 2015 υπήρχε η συμμετοχή επιβατικού οχήματος. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, ο αριθμός των ατυχημάτων που περιλάμβανε επιβατικό όχημα το έτος 2006, ήταν εφτακόσια εβδομήντα δύο (772), ενώ το έτος 2015 ήταν τριακόσια δέκα τέσσερα (314), δηλαδή μειώθηκαν περίπου 59% ("Annual Accident Report 2017," 2017).

Οι μεγάλοι αυτοί αριθμοί τροχαίων ατυχημάτων, παρόλη τη μείωση που παρουσιάζουν, θέτουν το ζήτημα της ανάπτυξης ασφαλέστερων οχημάτων για τη μετακίνηση των επιβατών. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος και τη βελτίωση της ασφάλειας των επιβατών, είναι απαραίτητη η γνώση και η κατανόηση των συνθηκών σύγκρουσης, ανατροπής και άλλων συμπεριφορών των οχημάτων. Εμπειρικά και μέσω πολλαπλών δοκιμών σύγκρουσης των οχημάτων σε ανασχετήρες, οι αυτοκινητοβιομηχανίες βελτιώνουν τη δομή και τα υλικά του οχήματος για την αύξηση της ασφάλειας του οδηγού. Όμως η σύγκρουση μεταξύ δύο οχημάτων σε συνθήκες οδικής κυκλοφορίας διαφέρει σε σχέση με τις πραγματοποιούμενες δοκιμές. Σε μία πραγματική σύγκρουση, λαμβάνουν χώρα πολλά τυχαία γεγονότα, τα επηρεάζουν απρόβλεπτοι παράγοντες (όπως ο καιρός, διαφορετικά είδη δρόμων/ οδοστρώματος κ.α.), με αποτέλεσμα η γνώση ή ο ακριβής καθορισμός όλων των συνθηκών σύγκρουσης να καθίσταται αδύνατη. Έτσι, η υπολογιστική ανακατασκευή των τροχαίων ατυχημάτων με στόχο τον προσδιορισμό των συνθηκών σύγκρουσης καθίσταται καίρια. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των συνθηκών σύγκρουσης συνεισφέρει σημαντικά και στην επίλυση θεμάτων διαμάχης μεταξύ των επιβατών. Στην γενική μορφή της ανακατασκευής ατυχήματος, ο κύριος στόχος της, είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών σύγκρουσης ενός οχήματος με εμπόδιο, πεζό, ή κάποιο άλλο όχημα.

Οι δύο κύριες υπηρεσίες οι οποίες ειδικεύονται στις δοκιμές σύγκρουσης οχημάτων σε ανασχετήρες (Crash Tests), είναι η Euro NCAP (European New Car Assessment Program) στην Ευρώπη και η NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) στην Αμερική. Η NHTSA είναι η πρώτη η οποία πραγματοποίησε δοκιμές σύγκρουσης όχηματος με όχημα για την επαλήθευση αλγορίθμων ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων. Δύο σημαντικά λογισμικά που αναπτύχθηκαν για την ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος είναι, το SMAC (Simulation Model of Automobile Collision) και το CRASH, τα οποία είναι πλήρους κλίμακας λογισμικά προσομοίωσης ανακατασκευής. Σήμερα, το πιο διαδεδομένο και πλήρες λογισμικό ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία, ασχολείται με τους τρόπους και τα μαθηματικά μοντέλα, με τα οποία μπορεί να επιτευχθεί μια ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος που περιλαμβάνει σύγκρουση δύο οχημάτων. Στόχος της είναι η κατασκευή ενός πρώιμου αλγορίθμου ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος βασισμένου στον υπολογισμό της ενέργειας παραμόρφωσης κατά τη σύγκρουση. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος προσομοίωσης σύγκρουσης μεταξύ δύο οχημάτων. Κατά τη μελέτη του υπό ανάπτυξη αλγορίθμου διαπιστώθηκε ότι η επίδοσή του εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων και στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του τροχαίου ατυχήματος (γωνία σύγκρουσης, λειτουργία πέδησης, κ.α.). Στην περίπτωση που τα δεδομένα είναι ελλιπή, είναι απαραίτητη η εκτίμησή τους βάσει εμπειρίας, για την επίτευξη μια σωστά τοποθετημένης προσομοίωσης. Για τη μείωση της υποκειμενικής επέμβασης του χρήση στον αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την εκτίμηση άγνωστων δεδομένων.

Αριθμητικές Μέθοδοι Ανακατασκευής Τροχαίου Ατυχήματος 2.1. Γενικά

Η ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος αναφέρεται στην εκτίμηση των αρχικών συνθηκών σύγκρουσης δύο οχημάτων με δεδομένες τις τελικές συνθήκες, δηλαδή τις συνθήκες κατά την ακινητοποίησή τους. Οι πρώτες αναφορές για την προσομοίωση της σύγκρουσης δύο μαζών εμφανίζονται τον 17° αιώνα στους νόμους του Νεύτωνα. Οι πιο πρόσφατες θεωρίες, που επικεντρώνονται στο πρόβλημα της σύγκρουσης οχημάτων ξεκινούν την δεκαετία του εβδομήντα (Neades, 2011).

Σύμφωνα με τις σύγχρονες θεωρίες, η σύγκρουση μεταξύ δύο οχημάτων χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση αναφέρεται στις συνθήκες και το χρονικό διάστημα πριν τη σύγκρουση (pre-collision phase), η δεύτερη φάση αναφέρεται στις συνθήκες κατά τη σύγκρουση (collision phase) (στιγμιαία ή χρονικά εξαρτημένη), δηλαδή όσο τα δύο οχήματα βρίσκονται σε επαφή, και η τρίτη φάση στις συνθήκες και το χρονικό διάστημα μετά τη σύγκρουση (post-collision phase) και μέχρι την ακινητοποίησή τους (Neades, 2011).

Οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα διαφέρουν κυρίως ως προς την αντιμετώπιση της δεύτερης φάσης, δηλαδή, αυτή της σύγκρουσης (collision phase) και είναι δύο. Η πρώτη βασίζεται αποκλειστικά στις εξισώσεις ορμής και η δεύτερη στην ενέργεια που απορροφάται, λόγω της παραμόρφωσης των οχημάτων σε συνδυασμό με τη θεωρία διατήρησης της ορμής. Οι δύο αυτές θεωρίες είναι εξίσου σημαντικές, αφού σε αυτές βασίστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος. Το πρώτο μοντέλο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μοντέλο Planar Impact Mechanics (PIM) όπως ονομάστηκε από τον Brach και οι κύριοι εκπρόσωποί του είναι ο R. Brach και ο H. Ishikawa, και το δεύτερο ως McHenry Model όπως ονομάστηκε από τον ίδιο τον McHenry και βασίζονται αντίστοιχα στις δύο θεωρίες (Neades, 2011).

Για τις φάσεις πριν και μετά τη σύγκρουση, όπου τα δύο οχήματα δεν είναι σε επαφή και σε κάθε όχημα ασκούνται μόνο δυνάμεις από την επαφή ελαστικών – οδοστρώματος, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι υπολογίζουν την αρχική ταχύτητα της εκάστοτε φάσης με δεδομένα τα αρχικά και τελικά σημεία θέσης της φάσης, τον συντελεστή τριβής ελαστικών – οδοστρώματος και το ποσοστό κατά το οποίο ο κάθε τροχός είναι μπλοκαρισμένος. Τέτοιες τεχνικές βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα και διαγράμματα τα οποία υπολογίζουν, σύμφωνα με την περιστροφή που υφίσταται το όχημα και την απόσταση που αυτό διένυσε, τις αρχικές εγκάρσιες και διαμήκεις ταχύτητες (B. G. McHenry, 2001). Επίσης, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές οι οποίες βασίζονται στα ίχνη που αφήνουν τα ελαστικά στο οδόστρωμα, για την εκτίμηση της τροχιάς και κατ' επέκταση για τον υπολογισμό των αρχικών ταχυτήτων (Franck & Franck, 2010).

Στα επόμενα κεφάλαια (2.3.1 & 2.3.2) αναπτύσσονται λεπτομερώς οι μέθοδοι που περιγράφουν τις τρεις φάσεις της σύγκρουσης, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

2.2. Προσομοίωση τροχιών οχημάτων πριν και μετά τη σύγκρουση

2.2.1. Γενικά για τη μοντελοποίηση των τροχιών οχημάτων

Οι δύο φάσεις πριν και μετά τη σύγκρουση (Pre/Post Collision Phases), παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες, οι οποίες έχουν ως συνέπεια αντίστοιχη ανάλυση και επίλυση όμοιων εξισώσεων κίνησης. Στην πράξη, η προσομοίωση και των δύο φάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τον ίδιο αλγόριθμο. Σε αυτό το σημείο, χρειάζεται να επισημανθεί ότι, η χρήση ενός αλγορίθμου για τη φάση πριν τη σύγκρουση, απαιτείται σε περίπτωση που το όχημα μεταβάλλει την ταχύτητά του απρόβλεπτα και δεν κινείται με σταθερή ταχύτητα και τροχιά. Αν μέχρι τη στιγμή της σύγκρουσης δεν λαμβάνει χώρα κάποιο απρόβλεπτο συμβάν, τότε η χρήση ενός αλγορίθμου για τον υπολογισμό της τροχιάς δεν είναι απαραίτητη δεδομένου ότι η γνώση της ταχύτητας και μόνον αυτής είναι αρκετή.

Οι πρώτες μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν, είχαν ως στόχο τον υπολογισμό της αρχικής ταχύτητας της εκάστοτε φάσης. Πρότειναν δηλαδή, μία επίλυση αντίστροφα στον χρόνο. Όπως είναι φυσικό, οι μαθηματικές εξισώσεις κίνησης δεν επιτρέπουν την αντίστροφη επίλυσή τους ως προς τον χρόνο και για αυτόν τον λόγο, οι πρώτες μεθοδολογίες και αλγόριθμοι βασίστηκαν σε πειραματικά δεδομένα. Από τα πειραματικά δεδομένα, προέκυψαν καμπύλες οι οποίες αναφέρονται στη δύναμη και τη μεταβολή της ταχύτητας κατά την κίνηση του οχήματος στο οδόστρωμα, και είναι συναρτήσεις πολλών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα της απόστασης που διένυσε το όχημα, της γωνίας του διανύσματος της ταχύτητας ως προς τον διαμήκη άξονα του οχήματος, το ποσοστό κατά το οποίο οι τροχοί είναι κλειδωμένοι και άλλων (B. G. McHenry, 2001)(R. R. Mchenry, 1975).

Η επίλυση με χρήση αυτών των μεθοδολογιών, δεν απαιτεί ούτε έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό της τροχιάς που διέγραψε το όχημα. Για τον λόγο αυτόν έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται στα ίχνη που αφήνουν τα ελαστικά στο οδόστρωμα κατά την ολίσθηση. Τέτοιες μεθοδολογίες μπορούν να δώσουν πολύ ακριβή αποτελέσματα, όμως ίχνη των ελαστικών στο οδόστρωμα δεν υπάρχουν πάντα και συγκεκριμένα τα τελευταία έτη με τη χρήση του ABS γίνονται όλο και πιο σπάνια (Franck & Franck, 2010).

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες της αντίστροφης επίλυσης ως προς τον χρόνο. Αντ' αυτών αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος ευθείας επίλυσης ως προς τον χρόνο των εξισώσεων κίνησης του οχήματος. Αυτός ο αλγόριθμος έχει ως στόχο την παρατήρηση και τον άμεσο προσδιορισμό της τροχιάς. Το μειονέκτημά του είναι ότι για την επίτευξη του στόχου (τον προσδιορισμό της ακριβούς τροχιάς) απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός της αρχικής ταχύτητας (μέτρο και διεύθυνση διανύσματος). Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των τροχιών του οχήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα η αρχική και τελική θέση και γωνία του οχήματος. Ως στόχος προσδιορίζεται η επίτευξη της τελικής θέσης και του προσανατολισμού του οχήματος. Οπότε λύνοντας παραμετρικά τις εξισώσεις κίνησης για τις τιμές του διανύσματος της ταχύτητας, ένας μοναδικός συνδυασμός των παραμέτρων της αρχικής ταχύτητας (μέτρο και διεύθυνση) μπορεί να φέρει ως αποτέλεσμα τη γνωστή τελική θέση του οχήματος ή τουλάχιστον την τελική θέση με το μικρότερο σφάλμα σε σχέση με την πραγματική τελική.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν το πρόβλημα της κίνησης του οχήματος για τις δύο όμοιες φάσεις της ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος και ο τρόπος επίλυσής τους.

2.2.2. Προσδιορισμός τροχιών από τις δυνάμεις των ελαστικών

Αρχικά, είναι απαραίτητη η γνώση της αρχικής ταχύτητας, γραμμικής και περιστροφικής, καθώς και του ποσοστού επιβράδυνσης κάθε μπλοκαρισμένου τροχού. Το ποσοστό επιβράδυνσης ενός μπλοκαρισμένου τροχού, αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως Rolling Resistance (RR) και ορίζεται ως το ποσοστό της διαμήκους δύναμης τριβής που αναπτύσσεται στον τροχό, συνεπώς η τιμή του συντελεστή αυτού κυμαίνεται από μηδέν έως ένα (0 – 1). Όταν η τιμή είναι ίση με μηδέν ο τροχός κυλίεται χωρίς καμία αντίσταση, ενώ όταν είναι ίση με ένα, ο τροχός είναι πλήρως μπλοκαρισμένος και ολισθαίνει. Καθ΄ όλη τη διάρκεια και των τριών φάσεων της σύγκρουσης θεωρείται ότι οι τροχοί, παραμένουν σε ευθεία διεύθυνση, παράλληλοι με τον διαμήκη άξονα του οχήματος (Das & Redrouthu, 2014).

Συνεπώς, οι δύο δυνάμεις που ασκούνται στους τροχούς περιγράφονται από τις Εξισώσεις (1) και (2).

$$F_L{}^i = \mu m_t{}^i g cos(a^i) RR \tag{1}$$

$$F_C^{\ i} = \mu m_t^{\ i} gsin(a^i) \tag{2}$$

Όπου,

F∟ είναι η διαμήκης συνιστώσα της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται στα ελαστικά, Fc η εγκάρσια συνιστώσα της δύναμης,

μο συντελεστής τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος,

g η επιτάχυνση της βαρύτητας,

 m_t το βάρος που ασκείται στον τροχό,

RR (rolling resistance) ο συντελεστής του ποσοστού κατά το οποίο είναι μπλοκαρισμένος ο τροχός και

αⁱ η γωνία που προσδιορίζει την κατεύθυνση της δύναμης στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων του οχήματος (Σχήμα 1).

Ο εκθέτης i = [1,4] αναφέρεται στους τέσσερις τροχούς του οχήματος,

Η γωνία αⁱ προσδιορίζεται από το γεγονός ότι το διάνυσμα της δύναμης που ασκείται σε έναν τροχό λόγω ολίσθησης, είναι αντίρροπο με το διάνυσμα της συνισταμένης ταχύτητας του υπό μελέτη τροχού. Η συνισταμένη ταχύτητα που έχει κάθε τροχός προκύπτει γεωμετρικά από τον συνδυασμό της διαμήκους, εγκάρσιας και περιστροφικής ταχύτητας του οχήματος στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1) για έναν μεμονωμένο τροχό (Reed, 1983).





Με βάση τα παραπάνω, η δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση του οχήματος είναι γνωστή. Για κάθε μικρό χρονικό βήμα Δt, επιλύονται οι εξισώσεις που προκύπτουν από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων και υπολογίζεται η επιβράδυνση του οχήματος τόσο για τη γραμμική όσο και για την περιστροφική κίνηση. Με τη χρήση μιας μεθόδου αριθμητική ολοκλήρωσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση της μεθόδου του τραπεζίου), γίνεται πλέον υπολογισμός της ταχύτητας και, στη συνέχεια, της θέσης του οχήματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το όχημα ακινητοποιηθεί πλήρως, δηλαδή έως ότου το U_i γίνει πολύ μικρό (μικρότερο του 10⁻²).

$$U_{i+1} = U_i + a_i \cdot \Delta t$$
$$X_{i+1} = X_i + U_i \cdot \Delta t$$

2.3. Προσομοίωση σύγκρουσης οχημάτων

Αρχικά, και τα τρία μοντέλα προσομοίωσης της σύγκρουσης οχημάτων, θεωρούν τα οχήματα ως επίπεδα τετράπλευρα παραλληλόγραμμα, χωρίς να υπάρχει καμία επίδραση σε αυτά στην τρίτη κατακόρυφη διάσταση, το ύψος.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των τριών μοντέλων, είναι ότι στα μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία της διατήρησης της ορμής (PIM), απαιτείται η γνώση των ακριβών τιμών των ταχυτήτων μετά τη σύγκρουση (post-collision velocity) ώστε να υπολογιστούν οι ταχύτητες ακριβώς πριν τη στιγμή της σύγκρουσης (pre-collision velocity), μετά την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης της ορμής. Αντίθετα, στο μοντέλο του McHenry, μπορεί να γίνει εκτίμηση της διαφοράς ταχύτητας πριν και μετά τη σύγκρουση (ΔV) με δεδομένη μόνο την παραμόρφωση του κάθε οχήματος, ώστε να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια που αποσβαινύθηκε. Αυτή η διαφορά είναι και ένα πλεονέκτημα της μεθόδου του McHenry, αφού σε πολλά ατυχήματα δεν επαρκούν τα δεδομένα για την επίλυση των εξισώσεων ορμής (Neades, 2011), ενώ υπάρχουν δεδομένα για την παραμόρφωση των οχημάτων. Στο μοντέλο του McHenry έχουν βασιστεί και δύο από τα πρώτα λογισμικά ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων, το SMAC (Simulation Model of Automobile Collision) και το CRASH. Τα λογισμικά αυτά είναι πλήρους κλίμακας και χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στις τρέχουσες εκδόσεις τους.

2.3.1. Μοντέλο επίπεδης κρούσης (Planar Impact Mechanics)

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν δύο μοντέλα προσομοίωσης τα οποία έχουν κοινή αφετηρία όσον αφορά στον καθορισμό του προβλήματος και κοινή αντιμετώπιση όσον αφορά στον τρόπο επίλυσης των εξισώσεων. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2) παρουσιάζονται οι βασικές αρχές τοποθέτησης του προβλήματος και των συντεταγμένων για την ανάλυση των εξισώσεων που ακολουθούν.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της σύγκρουσης οχημάτων.

Τα δύο μοντέλα χρησιμοποιούν τις δύο εξισώσεις διατήρησης της ορμής, κατά τον άξονα x και y και δύο εξισώσεις διατήρησης της στροφορμής, μία για κάθε όχημα, είτε στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων είτε στο σωματόδετο κατά το οποίο οι άξονες t και n τέμνονται στο σημείο στο οποίο υφίσταται η δύναμη. Προκύπτει, λοιπόν, ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων (Εξισώσεις 3 – 6) με έξι αγνώστους.

$$m_1(V_{1n} - V_{10n}) + m_2(V_{2n} - V_{20n}) = 0$$
(3)

$$m_1(V_{1t} - V_{10t}) + m_2(V_{2t} - V_{20t}) = 0$$
⁽⁴⁾

(c)

$$m_1 k_1^{2} (\omega_1 - \omega_{10}) + \alpha_1 m_1 (V_{1n} - V_{10n}) - b_1 m_1 (V_{1t} - V_{10t}) = 0$$

$$m_2 k_2^{\ 2}(\omega_2 - \omega_{20}) + \alpha_2 m_2 (V_{2n} - V_{20n}) - b_2 m_2 (V_{2t} - V_{20t}) = 0$$
⁽⁶⁾

Όπου α και b οι αποστάσεις του σημείου σύγκρουσης των δύο οχημάτων από τα κέντρα μάζας τους. Οι δείκτες n και t αναφέρονται στην κάθετη και στην παράλληλη στην επιφάνεια συνιστώσα, αντίστοιχα. Για τη μεταφορά του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων (n, t) στο αδρανειακό (x, y), χρησιμοποιείται η γωνία μεταφοράς με το σύμβολο (Γ) (Raymond M. Brach, 1983)(Ishikawa, 1993).

Οι δύο επιπλέον εξισώσεις, οι οποίες ακολουθούν, αποτελούν τη διαφορά μεταξύ των μοντέλων του Brach και του Ishikawa.

Ο Brach χρησιμοποιεί έναν συντελεστή «επαναφοράς» (restitution coefficient), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής τελικής ταχύτητας προς τη σχετική αρχική ταχύτητα για την κάθετη συνιστώσα στην επιφάνεια σύγκρουσης. Από τον ορισμό αυτού του συντελεστή προκύπτει η Εξίσωση (7). Η δεύτερη απαιτούμενη Εξίσωση (8) προκύπτει από τον λόγο της ώθησης της εφαπτομενικής συνιστώσας προς την ώθηση της κάθετης συνιστώσας στο επίπεδο της σύγκρουσης, προσομοιάζοντας με συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο οχημάτων (Raymond M. Brach, 1983).

$$e_n = \frac{V_{1n} - V_{2n}}{V_{10n} - V_{20n}} \tag{7}$$

$$\mu = {P_t / P_n} = \frac{(V_{1t} - V_{10t})}{(V_{1n} - V_{10n})} = \frac{(V_{2t} - V_{20t})}{(V_{2n} - V_{20n})}$$
(8)

Ο Ishikawa χρησιμοποιεί τον ίδιο συντελεστή «επαναφοράς» για την κάθετη συνιστώσα στην επιφάνεια σύγκρουσης, όμως για τη δεύτερη εξίσωση, χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό συντελεστή «επαναφοράς» ο οποίος αυτή τη φορά αναφέρεται στην εφαπτομενική συνιστώσα στην επιφάνεια σύγκρουσης (Ishikawa, 1993).

$$e_t = \frac{V_{1t} - V_{2t}}{V_{10t} - V_{20t}} \tag{9}$$

Μια ακόμη διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι η εκτίμηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης. Το μοντέλο του Brach λαμβάνει αυτό το σημείο είτε ως το κεντροειδές της παραμορφωμένης επιφάνειας ή κατά μήκος της μέγιστης παραμόρφωσης, ενώ το μοντέλο του Ishikawa, απαιτεί μια καλή εκτίμηση της ώθησης κατά τους δύο άξονες (x και y) και της γωνιακής ταχύτητας, αντικείμενα τα οποία εξαρτώνται από την λύση του προβλήματος (R.M. Brach & Brach, 2005).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΡΟΧΑΙΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Σχήμα 3. Κεντροειδές παραμορφωμένης επιφάνειας.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3) διακρίνεται ο τρόπος κατά τον οποίο προσδιορίζεται μια παραμορφωμένη επιφάνεια, και ορίζεται το κεντροειδές της παραμορφωμένης επιφάνειας, κατά το οποίο τα αθροίσματα των εμβαδών σε κάθε κατεύθυνση (x,y) είναι ίσα. Δηλαδή, κατά την κατεύθυνση x το άθροισμα του E1 και E3 είναι ίσο με το άθροισμα E2 και E4 και κατά την κατεύθυνση y το άθροισμα E1 και E2 είναι ίσο με το άθροισμα E3 και E4.

Αρχικά, η εκτίμηση αυτή του Ishikawa, απαιτεί τον προσδιορισμό της παραμορφωμένης επιφάνειας, ως μια ευθεία γραμμή με την εξίσωση:

Ax + By + C = 0, στο σύστημα συντεταγμένων του οχήματος.

Κατά το μήκος της παραπάνω ευθείας γραμμής βρίσκεται το σημείο εφαρμογής της δύναμης και προσδιορίζεται από τις εξισώσεις (10) και (11):

$$X_p = \frac{Bmk^2\omega - CP_x}{AP_x + BP_y} \tag{10}$$

$$Y_p = \frac{-Amk^2\omega - CP_y}{AP_x + BP_y} \tag{11}$$

Όπου, ω η γωνιακή ταχύτητα του οχήματος, P_x και P_y οι συνιστώσες της ώθησης στο σύστημα συντεταγμένων του οχήματος (Ishikawa, 1993).

Στην βιβλιογραφία δεν υπάρχουν αναφορές ότι κάποια μέθοδος υπολογισμού του σημείου εφαρμογής της δύναμης (POI) είναι πιο ακριβής από τις υπόλοιπες, όμως ο προσδιορισμός του σημείου εφαρμογής με την μέθοδο του Ishikawa πρακτικά δεν είναι εύχρηστος, αφού τα μεγέθη, που απαιτούνται για την τοποθέτηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης (ω, P_x, P_y), εξαρτώνται από αυτό (Neades, 2011).

2.3.2. <u>Μοντέλο διατήρησης της ενέργειας (McHenry Model)</u>

Η βάση του μοντέλου του McHenry είναι η θεώρηση του οχήματος ως ένα σύστημα μαζών συνδεόμενων με ελατήριο (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Απεικόνιση των οχημάτων σύμφωνα με την αρχή της μοντελοποίησης του McHenry.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4) διακρίνονται τα δύο οχήματα με το συμβολισμό M1 και M2 (διάκριση των δύο μαζών), τα οποίο κινούνται κατά τους βαθμούς ελευθερία X1 και X2. Οι συμβολισμοί K1 και K2, αναφέρονται στη σταθερά στιβαρότητας του ελατηρίου με το οποίο προσομοιώνεται το σώμα του οχήματος. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι μονοδιάστατο (οι βαθμοί ελευθερία X1 και X2 ανάγονται στον βαθμό ελευθερίας X), όμως μπορεί να επεκταθεί και στις δύο διαστάσεις. Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα μαζών, δίνονται από τις Εξισώσεις (12), για το Όχημα 1, και (13) για το Όχημα 2:

$$M_1 \ddot{X}_1 = -\left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}\right) \cdot (X_1 - X_2)$$
(12)

$$M_2 \ddot{X}_2 = \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}\right) \cdot (X_1 - X_2)$$
(13)

Στις παραπάνω Εξισώσεις (12) και (13) οι χρησιμοποιούμενοι συμβολισμοί είναι οι εξής:

 M_1 , M_2 οι μάζες των οχημάτων 1 και 2 αντίστοιχα

*K*₁, *K*₂ οι σταθερές των ελατηρίων

 X_1 , X_2 οι μετατοπίσεις που υφίστανται στην κάθε μάζα

 \ddot{X}_1,\ddot{X}_2 οι επιταχύνσεις που υφίστανται στην κάθε μάζα

Για την επίλυση των Εξισώσεων (12) και (13) ορίζεται το μέγεθος της σχετικής μετατόπισης, δ, δηλαδή η μεταξύ των δύο μαζών διαφορά μετατόπισης όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις.

 $\delta = X_1 - X_2$ και $\dot{\delta}_0 = \dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}$, (ο δείκτης Ο αναφέρεται στις αρχικές συνθήκες, δη-λαδή τις συνθήκες τη στιγμή ακριβώς πριν τη σύγκρουση των μαζών).

Οπότε, οι Εξισώσεις (12) και (13) παίρνουν την μορφή

$$\ddot{\delta} + \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}\right) \cdot \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2}\right) \cdot \delta = 0 \tag{14}$$

Επιλύοντας την Εξίσωση (14) με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της σχετικής μετατόπισης προκύπτει:

$$\delta_{max} = \left(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}\right) \sqrt{\frac{(K_1 + K_2) \cdot M_1 M_2}{K_1 K_2 \cdot (M_1 + M_2)}}$$
(15)

Θέτοντας ως $\delta_1 = X_1 - X$ και $\delta_2 = X - X_2$, συνεπάγεται από την ισορροπία δυνάμεων ότι:

$$K_1\delta_1 = K_2\delta_2 \tag{16}$$

και εξ' ορισμού ότι:

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta \tag{17}$$

Οπότε η επίλυση των Εξισώσεων (16) και (17), ως προς δ₁, δίνει:

$$\delta_1 = \left(\frac{K_2}{K_1 + K_2}\right)\delta\tag{18}$$

Το μέγεθος $\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}$, εκφράζει τη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο μαζών, ως προς τις αρχικές συνθήκες. Λύνοντας την Εξίσωση (15) ως προς $\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}$ προκύπτει:

$$\left(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}\right) = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2) \cdot K_1 K_2 \cdot \delta^2_{max}}{M_1 M_2 \cdot (K_1 + K_2)}}$$
(19)

Αντικαθιστώντας στην Εξίσωση (19) τις Εξισώσεις (16) - (18), η Εξίσωση (19) παίρνει τη μορφή

$$(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}) = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2) \cdot (K_1 \delta_1^2 + K_2 \delta_2^2)}{M_1 M_2}}$$
 (20)

Η δυναμική ενέργεια που απορροφά κάθε ελατήριο υπολογίζεται ως:

$$E_1 = \frac{1}{2} K_1 {\delta_1}^2$$
 (21)

$$E_2 = \frac{1}{2} K_2 {\delta_2}^2$$
 (22)

Τελικά, η Εξίσωση (20), σύμφωνα με τις Εξισώσεις (21) και (22), γίνεται:

$$(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}) = \sqrt{\frac{(M_1 + M_2) \cdot 2(E_1 + E_2)}{M_1 M_2}}$$
 (23)

Σύμφωνα με τη θεωρία της Αρχής Διατήρησης της Ορμής, σε κάθε κρούση δύο μαζών υπάρχει μια στιγμή κατά την οποία οι δύο μάζες έχουν ίδια-κοινή ταχύτητα (Common Velocity) η οποία συμβολίζεται με V_c. Αυτή η ταχύτητα εκφράζεται ως:

$$V_C = \frac{M_1 \dot{X}_{10} + M_2 \dot{X}_{20}}{M_1 + M_2} \tag{24}$$

Οπότε η διαφορά ταχύτητας που υφίσταται στο κάθε όχημα μεμονωμένα, στη διάρκεια της σύγκρουσης (Collision Phase) είναι:

$$\Delta V_1 = \dot{X}_{10} - V_C = \left(\frac{M_2}{M_1 + M_2}\right) \cdot \left(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}\right)$$
(25)

$$\Delta V_2 = V_C - \dot{X}_{10} = \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2}\right) \cdot \left(\dot{X}_{10} - \dot{X}_{20}\right)$$
(26)

Χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (23), (25) και (26), τελικά, η διαφορά ταχύτητας για τις δύο μάζες μεταξύ των στιγμών πριν την σύγκρουση και μετά τη σύγκρουση (Collision Phase) είναι:

$$\Delta V_1 = \sqrt{\frac{2(E_1 + E_2)}{M_1 \left(1 + \frac{M_1}{M_2}\right)}}$$
(27)

$$\Delta V_2 = \sqrt{\frac{2(E_1 + E_2)}{M_2 \left(1 + \frac{M_2}{M_1}\right)}}$$
(28)

Οι παραπάνω Εξισώσεις (27) και (28) αναφέρονται στην διαφορά ταχύτητας που υφίσταται σε κάθε μάζα λόγω της σύγκρουσης. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις έχουν ισχύ μόνο όταν η διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας πριν τη σύγκρουση του ενός σώματος περνά από το κέντρο μάζας του άλλου σώματος και αντίστοιχα πρέπει να ισχύει το ίδιο και για την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας του δεύτερου σώματος. Αυτή η σύγκρουση ονομάζεται Κεντρική Σύγκρουση (Central Collision).

Όμως σε ένα πραγματικό πρόβλημα όπου τα σώματα τα οποία συγκρούονται είναι δύο οχήματα, είναι σχεδόν αδύνατον να υφίσταται σε αυτά μια κεντρική σύγκρουση. Σε μία μη κεντρική σύγκρουση, ποσοστό της κινητικής ενέργειας λόγω της ευθύγραμμης κίνησης μετατρέπεται σε ενέργεια λόγω περιστροφικής κίνησης του υπό μελέτη οχήματος, δηλαδή το όχημα μετά τη σύγκρουση περιστρέφεται γύρω από το κέντρο μάζας του, αλλά η διαφορά ταχύτητας που δημιουργείται στο όχημα προκύπτει πάντοτε μικρότερη από την αντίστοιχη στην περίπτωση της κεντρικής σύγκρουσης. Συγκεκριμένα στις εξισώσεις, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συντελεστή με το σύμβολο (γ), ο οποίος έχει θετική τιμή και μέγιστη το ένα (1).

Η τιμή του συντελεστή γ εξαρτάται από τον μοχλοβραχίονα (h) που δημιουργεί το διάνυσμα της δύναμης που ασκείται στο όχημα σε σχέση με το κέντρο μάζας του, και την ακτίνα (k) της ροπής αδρανείας του οχήματος, η οποία προκύπτει από την εξίσωση k =

 $\sqrt{\frac{I}{M}}$, όπου Ι η ροπή αδρανείας του οχήματος ως προς το κέντρο μάζας του και Μ η μάζα του. Η εξίσωση του συντελεστή γ είναι:

$$\gamma = \frac{k^2}{k^2 + h^2} \tag{29}$$

Όμοια με την παραπάνω ανάλυση από την οποία προέκυψαν οι Εξισώσεις (27) και (28) με τις οποίες προσδιορίζεται το ποσοστό κατά το οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα των δύο οχημάτων, οι εξισώσεις που προκύπτουν σε μία μη κεντρική σύγκρουση είναι οι εξής:

$$\Delta V_{1} = \sqrt{\frac{2\gamma_{1}(E_{1} + E_{2})}{M_{1}\left(1 + \frac{\gamma_{1}M_{1}}{\gamma_{2}M_{2}}\right)}}$$
(30)

$$\Delta V_{2} = \sqrt{\frac{2\gamma_{2}(E_{1} + E_{2})}{M_{2}\left(1 + \frac{\gamma_{2}M_{2}}{\gamma_{1}M_{1}}\right)}}$$
(31)

Παράλληλα, από τις εξισώσεις της αρχής διατήρησης της ορμής προκύπτει η μεταβολή της περιστροφικής ταχύτητας σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\Delta \Omega_1 = \frac{h_1}{k_1^2} \Delta V_1 \tag{32}$$

$$\Delta \Omega_2 = \frac{h_2}{k_2^2} \Delta V_2 \tag{33}$$

Αξιοσημείωτο είναι ότι, η Κεντρική Σύγκρουση είναι μια υποκατηγορία της παραπάνω αφού για $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$ προκύπτουν οι παραπάνω εξισώσεις της κεντρικής σύγκρουσης. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5) παρουσιάζεται μια μη κεντρική σύγκρουση μαζί και τα μεγέθη που αναφέρθηκαν σε κάτοψη (R. R. Mchenry, 1976).



Σχήμα 5. Γραφική αναπαράσταση μη κεντρικής σύγκρουσης σε κάτοψη.

Η διεύθυνση και η φορά του διανύσματος της διαφοράς ταχύτητας είναι η ίδια με αυτή της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την σύγκρουση, η οποία αναλύεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2.3.2.1.

2.3.2.1. Διεύθυνση Δύναμης και Συντελεστές Διόρθωσης Ενέργειας

Ένα από τα κύρια στοιχεία του μοντέλου του McHenry και γενικότερα των μεθόδων ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος, είναι η εκτίμηση της διεύθυνσης των δυνάμεων που επιδρούν στο κάθε όχημα. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις αυτές είναι ίσες και αντίθετες. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6), καθώς και μεμονωμένα για το κάθε όχημα. Η διεύθυνση της δύναμης συμβολίζεται με το γράμμα «α», το οποίο αναφέρεται στη γωνία που σχηματίζει η δύναμη με τον διαμήκη άξονα του οχήματος. Αυτήν τη διεύθυνση έχει και το διάνυσμα διαφοράς ταχύτητας (ΔV) για τις συνιστώσες των x και y αξόνων.



Σχήμα 6. α) Γραφική αναπαράσταση της διεύθυνσης των δυνάμεων που υφίστανται σε κάθε όχημα κατά την σύγκρουση υπό γωνία Ψ και β) Γραφική αναπαράσταση της δύναμης και της παραμόρφωσης σε απομονωμένο όχημα.

Για την καταγραφή της διεύθυνσης της δύναμης και της περιοχής στην οποία παραμορφώθηκε το όχημα, έχει αναπτυχθεί μια κωδικοποίηση με την ονομασία VDI (Vehicle Deformation Index). Το VDI παρέχει πληροφορίες για το σημείο στο οποίο βρίσκεται η παραμόρφωση, δηλαδή την πλευρά και τα τμήματα του οχήματος τα οποία επηρεάζει η παραμόρφωση. Στην αρχή αυτού του αλφαριθμητικού κωδικού βρίσκεται ένας αριθμός από μηδέν έως έντεκα (0 ÷ 11) ο οποίος πληροφορεί για την κατεύθυνση της δύναμης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε αριθμός από μηδέν έως έντεκα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη γωνία και προφανώς πρόκειται για μια εκτίμηση, αφού ο προσδιορισμός της δύναμης είναι και βασικό ζητούμενο της ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος. Αυτός ο τρόπος προσδιορισμού της παραμόρφωσης σε ένα όχημα προκύπτει από την ταξινόμηση παραμόρφωσης σύγκρουσης (Collision Deformation Classification). Η σειρά των γραμμάτων αναφέρεται σε περιοχές του οχήματος, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Προσδιορισμός συμβόλων που εμφανίζονται στο VDI. (Page CDC, n.d.)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 8) παρουσιάζεται η αναλογία των αριθμών σε μοίρες γωνίας (εντός της παρένθεσης) καθώς και ένα παράδειγμα έκφρασης ενός παραμορφωμένου οχήματος στη σειρά αριθμών που αναφέρθηκε (Page CDC, n.d.).



Σχήμα 8. α) Αναλογία αριθμών σε μοίρες , β) παράδειγμα σειράς αριθμών και χαρακτήρων για μία συγκεκριμένη παραμόρφωση.

Η διεύθυνση της δύναμης είναι σημαντική, διότι καταδεικνύει τη διεύθυνση της μεταβολής ταχύτητας, αλλά και γιατί παρέχει πληροφορίες για τον τρόπο κατά τον οποίο προκλήθηκε η παραμόρφωση. Επίσης, είναι γνωστό ότι η κάθετη στην επιφάνεια του οχήματος συνιστώσα είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση του οχήματος ενώ η παράλληλη στην επιφάνεια συνιστώσα σχετίζεται άμεσα με άδηλες απώλειες (θερμότητα λόγω τριβών κ.α.). Ο συσχετισμός των άδηλων απωλειών με την παράλληλη στην επιφάνεια συνιστώσα της δύναμης, οδήγησαν στη χρήση συγκεκριμένων συντελεστών με το όνομα «Συντελεστές Διόρθωσης Ενέργειας» (Energy Adjustment Factors) (Neades, 2011).

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικοί συντελεστές διόρθωσης ενέργειας, παρόμοιας, όμως, λογικής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις των συντελεστών διόρθωσης ενέργειας με το σύμβολο (E_f) που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια έρευνας της ανακατασκευής ατυχήματος όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

$$E_{f,1} = 1 + tan^2(a) \tag{34}$$

$$E_{f,2} = 1 + \mu_v \tan(a)$$
 (35)

$$E_{f,3} = \frac{1}{\cos(a)} \tag{36}$$

$$E_{f,4} = 1 + \tan(PDOD) \cdot \tan(a) \tag{37}$$

Ο πρώτος και ο δεύτερος συντελεστής διόρθωσης ενέργειας, εξισώσεις (34) και (35), προτάθηκαν από τον McHenry, με χρονολογική σειρά. Η τιμή του τελεστή μ_ν, στην εξίσωση (35), κυμαίνεται από 0.44 έως 0.55. Ο τρίτος συντελεστής διόρθωσης ενέργειας, εξίσωση (36), προτάθηκε από τον AG. Fonda και ο τέταρτος και πιο πρόσφατος, εξίσωση (37), από τον D. Vangi, κατά το έτος 2009 (Neades, 2011). Το μέγεθος PDOD (Principal Direction Of Deformation) αναφέρεται στην μέση γωνία που σχηματίζει η παραμορφωμένη επιφάνεια σε σχέση με την ευθεία κάθετη στην επιφάνεια πριν την παραμόρφωση.

Η τιμή τους κυμαίνεται από ένα έως δύο [1÷2] και «διορθώνουν» την τιμή της ενέργειας σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση (38) (Neades, 2011).

$$E = E_{raw} \cdot E_{f,i} \tag{38}$$

Όπου E_{raw} είναι η ενέργεια που υπολογίζεται αποκλειστικά από την παραμόρφωση του οχήματος και τους συντελεστές στιβαρότητας του οχήματος, δηλαδή δεν απαιτείται η γνώση των ταχυτήτων κίνησης ή της γεωμετρίας σύγκρουσης.

Υπάρχουν αναφορές για την ακρίβεια αυτών των συντελεστών όπως για παράδειγμα, η δεύτερη διατύπωση του McHenry αναφέρεται και από τον ίδιο ότι είναι πιο ακριβής από την πρώτη. Όσον αφορά στη διατύπωση που περιλαμβάνει τον ορισμό του μεγέθους PDOD, αναφέρεται πως είναι η πιο ακριβής δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη την κατεύθυνση κατά την οποία παραμορφώθηκε το όχημα (Neades, 2011)

2.3.2.2. Προσδιορισμός των συντελεστών στιβαρότητας

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.3.2 ο προσδιορισμός των συντελεστών στιβαρότητας των οχημάτων για την πλευρά της σύγκρουσης, είναι ένα σημαντικό υποπρόβλημα της ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος.

Οι συντελεστές στιβαρότητας (Stiffness Coefficients) υπολογίζονται έπειτα από μεγάλο αριθμό πειραματικών μετρήσεων που λαμβάνουν χώρα από υπηρεσίες υπεύθυνες για τη διεξαγωγή δοκιμών σύγκρουσης (Crash Tests). Τέτοιες υπηρεσίες είναι η Euro NCAP (The European New Car Assessment Program), η NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) και άλλες, οι οποίες έχουν ως στόχο την εξακρίβωση της ασφάλειας του οδηγού σε συνθήκες σύγκρουσης (Niehoff, 2005).

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων της NHTSA δεδομένου ότι μόνο αυτή παρέχει ανοιχτή πρόσβαση στα δεδομένα της και στα αποτελέσματα των δοκιμών σύγκρουσης. Επιπλέον, πρόκειται για τη βάση δεδομένων η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη αλγορίθμων ανακατασκευής καθώς η NHTSA τη δεκαετία του 1970 πραγματοποίησε ειδικές δοκιμές σύγκρουσης με στόχο την αξιολόγηση και τη βαθμονόμηση των αλγορίθμων ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων. Η βάση δεδομένων των συγκεκριμένων τροχαίων ατυχημάτων παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3.

Γενικά, η βάση δεδομένων της NHTSA παρέχει όλες τις πληροφορίες για τον υπολογισμό των συντελεστών στιβαρότητας μεγάλου αριθμού οχημάτων και για κάθε πλευρά αυτών. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία του προσδιορισμού τους, όπως αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Η εκτίμηση των συντελεστών στιβαρότητας δεν πραγματοποιείται με βάση τη θεωρία του McHenry, ότι η δύναμη είναι γραμμικά ανάλογη της μέσης παραμόρφωσης του οχήματος αλλά με βάση την αρχή του Campbel. Σύμφωνα με αυτή, όταν πρόκειται για μία δοκιμή σύγκρουσης οχήματος σε απαραμόρφωτο και ακίνητο ανασχετήρα, η ταχύτητα σύγκρουσης είναι γραμμικά ανάλογη της μέσης παραμόρφωσης. Αυτή η ταχύτητα αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως EBS (Equivalent Barrier Speed) (Kubiak, Wozniak, Jablonski, Ozuna, & De La Fuente, 2014). Επειδή πραγματοποιούνται κάποιες δοκιμές κατά τις οποίες η επιφάνειες του οχήματος και του ανασχετήρα δεν είναι απόλυτα παράλληλες, χρησιμοποιείται η συνιστώσα της ταχύτητας η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια του ανασχετήρα (V_{eff}) όπως φαίνεται στην παρακάτω Εξίσωση (39) και σχήμα (Σχήμα 9) (Neptune & Flynn, 1998).



Σχήμα 9. Αναπαράσταση σύγκρουσης οχήματος με ανασχετήρα και προσδιορισμός της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας στην επιφάνεια του ανασχετήρα.

$$V_{eff} = V_{lin} cos(a) \tag{39}$$

Για τις πλευρές και το πίσω μέρος του οχήματος, χρησιμοποιούνται ειδικά κατασκευασμένα οχήματα, τα οποία φέρουν πολύ στιβαρούς δυεισδυτές (σχεδόν απαραμόρφωτους), οι οποίοι συγκρούονται με το ακίνητο υπό μελέτη όχημα. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και αναλύσεις με τις οποίες μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές στιβαρότητας που προέκυψαν από δοκιμές στις οποίες παραμορφώθηκαν σημαντικά οι ανασχετήρες, όμως η NHTSA δεν παρέχει πάντοτε τους αντίστοιχους συντελεστές στιβαρότητας των ανασχετήρων παρ' όλο που υπάρχουν εκτιμήσεις γι' αυτούς (Neptune & Flynn, 1994).



Σχήμα 10. Γραμμή απεικόνισης της αναλογίας ταχύτητας – παραμόρφωσης.
Στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 10) αποτυπώνονται οι συντελεστές b_0 και b_1 , όπου b_0 η ταχύτητα μηδενικής παραμόρφωσης και b_1 η κλίση της καμπύλης ταχύτητας – παραμόρφωσης. Οι συντελεστές στιβαρότητας του οχήματος προκύπτουν σύμφωνα με τις παρακάτω Εξισώσεις (40) και (41).

$$A = \frac{b_0 b_1 M}{L} \tag{40}$$

$$B = \frac{b_1^2 M}{L} \tag{41}$$

Όπου Μ η μάζα του οχήματος και L το μήκος της παραμορφωμένης επιφάνειας (Kubiak et al., 2014).

Για τον προσδιορισμό της τιμής των συντελεστών στιβαρότητας του οχήματος μέσω αυτής της μεθοδολογίας, είναι χρήσιμο και πιο ακριβές να γίνει χρήση των συντελεστών στιβαρότητας των ανασχετήρων, όμως ειδικά όταν πρόκειται για απαραμόρφωτους ανασχετήρες, είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ταχύτητας μέχρι την οποία το όχημα δεν υφίσταται μόνιμη παραμόρφωση (b0). Όταν όμως είναι γνωστοί οι συντελεστές στιβαρότητας των ανασχετήρων, η ισότητα των δυνάμεων επιτρέπει τον υπολογισμό και των δύο συντελεστών b0 και b1 (συνεπώς και των Α και Β) χωρίς να γίνει καμία εκτίμηση.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, αναπτύχθηκε αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει τους συντελεστές στιβαρότητας του ζητούμενου οχήματος. Ως δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο λαμβάνονται (α) το όνομα του μοντέλου, (β) η κατασκευαστική εταιρία, (γ) η χρονολογία έκδοσης και (δ) ο αριθμός του μοντέλου (ο αριθμός του μοντέλου είναι μοναδικός για κάθε συγκεκριμένο μοντέλο κάθε κατασκευαστή ανεξάρτητα της χρονολογίας πρώτης κυκλοφορίας του). Ο αλγόριθμος σαρώνει όλη τη βάση δεδομένων της NHTSA, με σκοπό να εντοπιστούν οι δοκιμές σύγκρουσης για το συγκεκριμένο όχημα, με μια απόκλιση χρονολογίας που ορίζεται από τον χρήστη. Στην συνέχεια, γίνονται αποδεκτές οι δοκιμές σύγκρουσης οι οποίες αναφέρονται σε 1) σύγκρουση οχήματος με απαραμόρφωτο και σταθερό ανασχετήρα και 2) κινούμενο και απαραμόρφωτο δυεισδυτή (Impactor), με ακίνητο όχημα ότι πρόκειται για την οπίσθια ή πλαϊνή πλευρά του οχήματος.

2.3.2.3. Απορροφούμενη ενέργεια κατά την παραμόρφωση

Στις παραπάνω Εξισώσεις (30) – (33), απαιτείται η γνώση της ενέργειας που απορροφήθηκε κατά τη σύγκρουση. Ο προσδιορισμός αυτής της ενέργειας, είναι ένα από τα κύρια στοιχεία του μοντέλου του McHenry. Σύμφωνα με το μοντέλο του McHenry, η δύναμη που επιφέρει παραμόρφωση σε μια πλευρά ενός οχήματος είναι ανάλογη της μέσης παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 11) (Neades, 2011).



Σχήμα 11. Γραμμή απεικόνισης της αναλογίας δύναμης – παραμόρφωσης.

Οι συντελεστές Α και Β ονομάζονται συντελεστές στιβαρότητας του οχήματος (Stiffness Coefficients) και έχουν σταθερή τιμή για το εκάστοτε όχημα και την εκάστοτε πλευρά κάθε οχήματος.

Η τιμή της ενέργειας που απορροφήθηκε κατά τη σύγκρουση υπολογίζεται αριθμητικά, αφού η παραμόρφωση του οχήματος (C_i) προσδιορίζεται από 2, 4 ή 6 μετρήσεις για κάθε παραμορφωμένη επιφάνεια. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 12), φαίνεται ο τρόπος που μετράται η παραμόρφωση και στη συνέχεια η Εξίσωση (42) για τον υπολογισμό της ενέργειας παραμόρφωσης.



Σχήμα 12. Γραφική απεικόνιση υπολογισμού της παραμόρφωσης μέσω των μεγεθών Ci.

Οι μετρήσεις του βάθους εισχώρησης είναι πάντα ισαπέχουσες κατά (Ι) και η ενέργεια παραμόρφωσης προσδιορίζεται για το κάθε όχημα με χρήση της Εξίσωσης (42).

$$E = \frac{L}{(n-1)} \left(\frac{A\eta}{2} + \frac{B\kappa}{6} + \frac{(n-1)A^2}{2B} \right)$$
(42)

Όπου,

n το πλήθος των μετρήσεων παραμόρφωσης (C_i)

L το συνολικό μήκος της παραμορφωμένης επιφάνειας

$$\eta = \sum_{1}^{n-1} (C_i + C_{i+1})$$
$$\kappa = \sum_{1}^{n-1} (C_i^2 + C_i C_{i+1} + C_{i+1}^2)$$

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τον υπολογισμό της ενέργειας που απορροφάται, είναι οι ανακριβείς εκτιμήσεις των συντελεστών στιβαρότητας των οχημάτων οι οποίοι προσδιορίζονται πειραματικά, μέσω πολλαπλών ελεγχόμενων δοκιμών σύγκρουσης (crash-tests) στην υπό μελέτη πλευρά, η αβεβαιότητα στον καθορισμό της μέγιστης ταχύτητας σύγκρουσης που δεν προκαλεί πλαστική παραμόρφωση και λόγω της γραμμικής αναλογίας που προτάθηκε από τον Campbell η οποία δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

3. Βάσεις δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων

3.1.NHTSA και Euro NCAP

Η NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), είναι η Αμερικάνικη υπηρεσία του υπουργείου μεταφορών, υπεύθυνη για την ασφάλεια των επιβατών, των πεζών και γενικότερα τη μείωση των οδικών ατυχημάτων. Ιδρύθηκε στις 31 Δεκεμβρίου του 1970 και το έργο της συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Η NHTSA εκδίδει κανονισμούς για τις προδιαγραφές που απαιτείται να ικανοποιεί κάθε όχημα, ελέγχει την εισαγωγή οχημάτων στην Αμερική, εκτελεί δοκιμές σύγκρουσης με ανδρείκελα (ανθρωπομορφικές κούκλες) με στόχο την εξακρίβωση της ασφάλειας των επιβατών και κυρίως, καταγράφει όλα τα δεδομένα από τις δοκιμές σύγκρουσης και από πραγματικά ατυχήματα που λαμβάνουν χώρα στις ΗΠΑ.

To 1979, η NHTSA δημιούργησε το NCAP (New Car Assessment Program), το οποίο έχει ως στόχο την ενθάρρυνση των κατασκευαστών για τη δημιουργία οχημάτων που θα παρέχουν στους επιβάτες μεγαλύτερη ασφάλεια. Πρόκειται για μία σειρά από δοκιμές σύγκρουσης οχημάτων με ανασχετήρες μέσω των οποίων εξακριβώνεται η ασφάλεια των επιβατών. Κάθε όχημα για να πωληθεί στην αγορά απαιτείται να πληροί προδιαγραφές οι οποίες εξακριβώνονται μέσω των δοκιμών του NCAP. Η πρώτη δοκιμή ευθείας σύγκρουσης με ταχύτητα 25 mph έλαβε χώρα στις 21 Μαΐου του 1979 (Wikipedia, 2013)

Έπειτα από το NCAP της NHTSA, η Ευρωπαϊκή Ένωση το έτος 1997 δημιουργεί το αντίστοιχο πρόγραμμα δοκιμών σύγκρουσης με την ονομασία Euro NCAP (ή E-NCAP). Η E-NCAP, εκτός από τη διεκπεραίωση των δοκιμών σύγκρουσης, ταξινομεί τα οχήματα σε κατηγορίες ασφάλειας για τους επιβάτες, από το ένα έως το πέντε με το σύμβουλο του αστεριού (πέντε αστέρια θεωρείται το πιο ασφαλές) (Wikipedia, 2009).

Τα δύο αυτά προγράμματα παρουσιάζουν διαφορές στις δοκιμές σύγκρουσης των οχημάτων με ανασχετήρες (διαφορετικές ταχύτητες και γωνίες σύγκρουσης), στον αριθμό των ειδών των δοκιμών σύγκρουσης (η Ε-ΝCAP πραγματοποιεί και δοκιμή σύγκρουσης οχήματος με πεζό), αλλά και στις προδιαγραφές που απαιτείται να πληροί το όχημα.

3.2.Οι δοκιμές RICSAC

Οι δοκιμές RICSAC (Report Input for Computer Simulation of Automobile Collisions) είναι δώδεκα καταγεγραμμένες δοκιμές σύγκρουσης μεταξύ δύο οχημάτων πραγματοποιημένες από την NHTSA. Τα στοιχεία των δοκιμών και τα αποτελέσματά τους συλλέχθηκαν από τους Jones και Baum για την αξιολόγηση των αλγορίθμων ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων. Για την πραγματοποίηση των συγκεκριμένων δοκιμών, εγκαταστάθηκαν στα οχήματα μετρητικά όργανα και υπό την παρακολούθηση κάμερας καταγράφηκαν οι αρχικές ταχύτητες των οχημάτων, οι διαφορές ταχυτήτων πριν και μετά τη

σύγκρουση και οι παραμορφώσεις του κάθε οχήματος σύμφωνα με τον τρόπο που περιγράφθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, καταγράφηκαν οι συντεταγμένες των κέντρων μάζας των οχημάτων τη στιγμή της σύγκρουσης και οι θέσεις στις οποίες τα οχήματα ακινητοποιούνται καθώς και όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τα οχήματα, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Α – RICSAC Data. Οι μετρήσεις των ταχυτήτων σε κάθε δοκιμή για κάθε όχημα ήταν σημαντικές και απαραίτητες, ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των αλγορίθμων ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος που ξεκίνησαν να αναπτύσσονται τη δεκαετία του 1970 (Jones & Baum, 1978).

Οι δοκιμές RICSAC, παρά τη λεπτομερή καταγραφή των στοιχείων τους, περιλαμβάνουν σφάλματα και ανακρίβειες οι οποίες στην πορεία έγιναν αντιληπτές. Ένα παράδειγμα τέτοιας ανακρίβειας αποτελεί, η τοποθέτηση επιταχυνσιόμετρου σε σημείο διαφορετικό από το κέντρο μάζας του οχήματος με αποτέλεσμα κατά την ολοκλήρωση της καμπύλης της επιτάχυνσης (Simpson 1/3) να υπολογίζεται εσφαλμένη τιμή της μεταβολής της ταχύτητας ΔV (McHenry & McHenry, 1997). Επίσης, η διάρκεια της σύγκρουσης και το γεγονός ότι το ποσοστό των μπλοκαρισμένων τροχών (Rolling Resistance) καταγράφθηκε εμπειρικά και τυχαία για κάθε τροχό, χωρίς καμία μέτρηση δημιουργούν περεταίρω ανακρίβειες (Struble, 2017). Επιπλέον στις δοκιμές 1, 2, 8, 9 και 10 πραγματοποιήθηκαν παραπάνω από μία δοκιμή σύγκρουσης.

Η μέθοδος Simpson 1/3, είναι αριθμητική μέθοδος υπολογισμού οριοθετημένων ολοκληρωμάτων. Το ολοκλήρωμα (Ι) μια καμπύλης-συνάρτησης (f(x)) με την μέθοδο Simpson 1/3 υπολογίζεται από την εξίσωση (43).

$$I = (b-a)\frac{f(x_0) + 4\sum_{i=1,3,5}^{n-1}[f(x_i)] + 2\sum_{i=2,4,6}^{n-2}[f(x_i)] + f(x_n)}{3n}$$
(43)

Όπου,

α και b τα όρια του ολοκληρώματος και

η ο αριθμός των διαστημάτων ίσου μήκους.

Για τους παραπάνω λόγους, πραγματοποιήθηκαν διορθώσεις στις συγκεκριμένες δοκιμές, όπως αναγωγές των εσφαλμένων ΔV στα κέντρα μάζας των οχημάτων. Παρόλο που οι δοκιμές RICSAC παρουσιάζουν αδυναμίες και κάποια δεδομένα τους είναι εσφαλμένα είναι ιδιαίτερα σημαντική η συνεισφορά τους στην ανάπτυξη των αλγορίθμων ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος.

3.2.1. Ανάλυση των δοκιμών RICSAC

Αρχικά, να αναφερθεί ότι και για τις δώδεκα δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν έξι επιβατικά οχήματα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1), αναφέρονται τα οχήματα που συμμετείχαν στην κάθε δοκιμή καθώς και το VDI (Vehicle Deformation Index) όπως μετρήθηκε κατά τη διεξαγωγή αυτών και όπως εκτιμήθηκε σε επόμενες μελέτες (Jones & Baum, 1978).

Test	Vehicle	Vahiela Nama	VDI	VDI	
No	No	Venicie Name	(Measured)	(Estimated)	
1	1	Chevrolet Chevette	11FZEM2	12FDEW3	
1	2	Ford Pinto	01RDEW3	13RDEW3	
2	1	Chevrolet Chevette	11FDEW2	12FDEW3	
2 2		Ford Pinto	02RDEW4	02RYEW5	
2	1	Ford Torino	12FZEW1	12FZEW2	
5	2	Ford Pinto	06BZEW1	06BYEW2	
4	1	Ford Torino	12FZEW3	12RFEW2	
4	2	Ford Pinto	05BYEW5	06BDEW4	
L	1	Ford Torino	12FZEW1	12RFEW2	
5	2	Honda Civic	05BDEW8	06BYEW5	
6	1	Chevrolet Chevette	11FZEW1	12FDEW3	
6	2	Volkswagen Rabbit	02RDEW3	01RDEW5	
7	1	Chevrolet Chevette	11FDEW2	11FDEW2	
,	2	Volkswagen Rabbit	02RDEW4	01RDEW4	
Q	1	Chevrolet Chevette	12FDEW1	11FDEW3	
0	2	Volkswagen Rabbit	03RYEW2	02RDEW3	
	1	Honda Civic	11FDEW2	11LFEE2	
9	2	Ford Torino	02RFEW2 03RPEW1	02RYEW3	
10	1	Honda Civic	10FDEW2	11LFDE3	
10	2	Ford Torino	01RFEW2	02RYEW3	
11	1	Chevrolet Vega	12FYEW3	12FYEW3	
11	2	Ford Torino	12FYEW3	12FYEW2	
12	1	Chevrolet Vega	12FDEW4	12FDEW4	
12	2	Ford Torino	12FYEW4	12LFEW3	

Πίνακας 1. Ονόματα και VDI των οχημάτων , για κάθε δοκιμή RICSAC.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) προβάλλονται οι τιμές των συντελεστών στιβαρότητας (Α & Β) που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε όχημα (Neades, 2011).

Test No	Vehicle No	A [N/cm]	B [N/cm²]
1	1	624	23
L	2	246	46
2	1	624	23
2	2	246	46
	1	624	23
5	2	684	28
	1	624	23
4	2	684	28
5	1	624	23

Πίνακας 2. Συντελεστές στιβαρότητας σε κάθε δοκιμή RICSAC για κάθε όχημα.

	2	641	26
c	1	624	23
O	2	246	46
	1	624	23
/	2	246	46
0	1	624	23
8	2	251	35
0	1	528	32
9	2	251	35
10	1	528	32
10	2	251	35
11	1	454	30
11	2	624	23
12	1	454	30
12	2	624	23

Για τα συγκεκριμένα έξι οχήματα όταν ξεκίνησαν οι δοκιμές RICSAC είχαν, ήδη, πραγματοποιηθεί αρκετές δοκιμές σύγκρουσης ώστε να μπορεί να υπάρχει ικανοποιητική εκτίμηση των συντελεστών στιβαρότητας (Α και Β).

Επειδή παίζει ρόλο η πλευρά πρόσκρουσης των οχημάτων κατά την κατάστρωση των δοκιμών RICSAC επελέγησαν τέσσερεις αρχικές θέσεις οχημάτων με διαφορετικές γωνίες σύγκρουσης. Έτσι, οι 12 δοκιμές χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες (Impact Configurations – IC) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Κατηγοριοποίηση των δοκιμών RICSAC σε 4 κατηγορίες βάση γωνίας σύγκρουσης.

Στο Παράρτημα Α – RICSAC Data, παρουσιάζονται τα υπόλοιπα δεδομένα των συγκρούσεων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Υπολογισμός μεταβολής ταχύτητας κατά τη σύγκρουση με χρήση της ενέργειας παραμόρφωσης

Για την ανάλυση των δοκιμών RICSAC αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος ο οποίος αναφέρεται αποκλειστικά στη φάση σύγκρουσης των οχημάτων (Collision Phase). Στόχος είναι να εξακριβωθεί η ακρίβεια των υπολογισμών των διαφορών ταχυτήτων για κάθε όχημα και οι παράμετροι που τις επηρεάζουν.

4.1.Περιγραφή μεθόδου

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ενέργειας παραμόρφωσης, βασίζεται στις Εξισώσεις (30) – (38) και (42), και πραγματοποιήθηκε με σκοπό την σύγκριση των τεσσάρων συντελεστών διόρθωσης ενέργειας (E_f), ως προς την ακρίβεια των διαφορών ταχυτήτων (ΔV) που υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (32) και (33). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 14), παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος τα δεδομένα, οι εξισώσεις και τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.



Σχήμα 14. Διάγραμμα υπολογισμού της διαφοράς ταχύτητας των οχημάτων κατά την φάση σύγκρουσης (Collision Phase).

Στο διάγραμμα του παραπάνω σχήματος (Σχήμα 14), διακρίνονται με πράσινο χρώμα τα δεδομένα του προβλήματος τα οποία είναι οι συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων, τα μεγέθη παραμόρφωσης των οχημάτων (μήκος παραμόρφωσης και μήκη μέτρησης παραμορφωμένης επιφάνειας) καθώς και το σημείο εφαρμογής της δύναμης (POI) και η διεύθυνσή της (PDOF). Με μπλε χρώμα διακρίνονται τα μεγέθη που υπολογίζονται από τις εξισώσεις και είναι η ενέργεια παραμόρφωσης για κάθε όχημα (Raw Energy), ο συντελεστής διόρθωσης ενέργειας για κάθε όχημα (Energy Factor), και η συνολική αποσβαινούμενη ενέργεια (Total Energy). Η διαφορά ταχύτητας που υφίστανται τα οχήματα κατά τη φάση της σύγκρουσης, διακρίνεται με πορτοκαλί χρώμα και είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

4.2. Αρχικός υπολογισμός ενέργειας παραμόρφωσης - Raw energy

Αρχικά, υπολογίστηκε η καθαρή ενέργεια παραμόρφωσης (Raw Energy), μέσω της Εξίσωσης (42), για κάθε όχημα από την παραμόρφωση που έχει υποστεί. Από τις τιμές των ενεργειών που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 15), διακρίνεται πως υπάρχει μια αναλογία αρχικής ταχύτητας (οι αρχικές ταχύτητες αναφέρονται στον Πίνακας 55) και συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης (το άθροισμα των ενεργειών των δύο οχημάτων), και πώς έχουν διαμορφωθεί επίπεδα ενέργειας (συνολικής ή μεμονωμένα για κάθε όχημα) για κάθε IC, όπως για παράδειγμα στην τέταρτη κατηγορία (IC-4).





Αναλυτικότερα, απαιτείται η εξακρίβωση του σημείου εφαρμογής της δύναμης το οποίο λαμβάνεται ως το μέσο των ορίων της παραμόρφωσης για κάθε συνιστώσα x και γ. Από αυτό και την κατεύθυνση της δύναμης προκύπτει ο μοχλοβραχίονας, ο οποίος είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό του ΔV, όπως φαίνονται τα μεγέθη στο αντίστοιχο σχήμα (Σχήμα 2). Το σημείο αυτό δεν είναι το πραγματικό, όμως θεωρήθηκε μια ικανοποιητική εκτίμηση, αφού τα όρια της παραμόρφωσης δεν είναι πολύ μεγάλα σε όλες τις δοκιμές (από 76 cm έως 200 cm, με εξαίρεση τις παραμορφώσεις των δεύτερων οχημάτων στις δοκιμές 2 και 7). Αναμένεται σημαντικότερα σφάλματα να προέλθουν από την εκτίμηση του PDOF όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Neades, 2011).

Παρουσιάζεται παρακάτω σε πίνακα (Πίνακας 3) η σύγκριση των μετρούμενων ΔV με αυτά που υπολογίστηκαν από τις Εξισώσεις (30) και (31), ανά κατηγορία για δύο ξεχωριστές εκτιμήσεις των PDOF που έγιναν. Η μία κατά τη διεξαγωγή των RICSAC και η δεύτερη κατά τη διόρθωση αυτών για τη χρήση του λογισμικού SMAC (Jones & Baum, 1978). Η εκτιμήσεις που έγιναν κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών RICSAC από τους Jones & Baum θα αναφέρονται ως «μετρούμενα - Measured», ενώ από το λογισμικό SMAC ως «εκτιμώμενα - Estimated».

Το λογισμικό SMAC (Simulation Model for Automobile Collisions) αναπτύχθηκε κυρίως για την ανακατασκευή τροχαίων ατυχημάτων, όμως χρησιμοποιήθηκε και για την διόρθωση των εσφαλμένων μετρήσεων στις δοκιμές RICSAC, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3.2. Για αυτόν τον λόγο θεωρείται πως οι εκτιμήσεις των PDOF που έγιναν μέσω του προγράμματος SMAC είναι πιο ακριβείς.

Πίνακας 3.	Σύγκριση τ	τιμών	διαφοράς	ταχύτητας	για τις	δύο	εκτιμήσεις	των PDOF	και τις	υπολογισύ	<i>θείσες</i>
από τα επι	ταχυνσιόμε	ετρα.									

			ΔV1 (m/s)		ΔV₂(m/s)				
IC	Test No.	RICSAC	Measured PDOF	Estimated PDOF	RICSAC	Measured PDOF	Estimated PDOF		
	1	5.45	4.95	5.59	6.97	7.42	8.37		
1	2	8.76	8.85	9.87	-	13.28	14.81		
-	6	4.11	5.28	5.80	5.31	8.65	9.50		
	7	5.36	7.51	7.35	7.37	10.64	10.41		
	3	4.24	2.81	2.81	7.06	4.46	4.46		
2	4	8.35	6.18	7.09	9.92	9.65	11.07		
	5	7.28	6.03	6.89	11.22	10.96	12.54		
	8	6.83	4.70	4.14	4.78	4.47	3.94		
3	9	9.56	5.44	5.44	3.97	2.50	2.50		
	10	15.69	5.00	6.48	6.30	2.44	3.16		
4	11	10.72	9.48	9.48	7.01	5.94	5.94		
-	12	17.92	11.67	11.67	11.80	8.10	8.10		

Συνολικά, στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 3), παρατηρείται ότι σε κάποιες δοκιμές υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε κάποιες άλλες όχι, σε σύγκριση των δύο διαφορετικών PDOF. Οι διαφορές αυτές δεν ξεπερνούν τις δύο μονάδες (2 m/s), ενώ στις δοκιμές 2, 4, 5 και 10 παρουσιάζονται διαφορές μεγαλύτερες της μιας μονάδας (1 m/s). Η χρήση του διορθωμένου PDOF δεν συνεπάγεται ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα. Παρατηρείται όμως ότι στις περισσότερες δοκιμές, οι τιμές των ΔV είναι μικρότερες από τις μετρούμενες και για αυτόν τον λόγο γίνεται η χρήση του συντελεστή διόρθωσης ενέργειας που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3.2.1.

Για τις δύο εκτιμήσεις των PDOF που έχουν γίνει παρουσιάζονται υπό μορφή πίνακα οι τιμές τις οποίες λαμβάνει ο κάθε συντελεστής, με τη διαφορά ότι στον τέταρτο συντελεστή (E_{f,4}) συμμετέχει και η διεύθυνση της παραμόρφωσης (PDOD).

	EF				
PDOF (Deg)	1	2	3		
-60 / -30 / 30 / 60 / 150	1.33	1.26	1.15		
0 / 90 / 180	1	1	1		

Πίνακας 4. Τιμές συντελεστών διόρθωσης (1, 2 & 3) για κάθε εκτιμώμενη γωνία.

			EF 4								
IC	Test No	Vehi	cle 1	Vehicle 2							
	Test No.	Measured	Estimated	Measured	Estimated						
		PDOF	PDOF	PDOF	PDOF						
	1	1.14	1.00	1.01	1.00						
1	2	1.12	1.00	1.01	1.01						
-	6	1.02	1.00	1.03	1.03						
	7	1.04 1.04		1.11	1.11						
	3	1.00	1.00	1.00	1.00						
2	4	1.00	1.00	1.29	1.00						
	5	1.00	1.00	1.30	1.00						
	8	1.00	1.01	1.00	1.04						
3	9	1.05	1.05	1.07	1.07						
	10	1.03	1.03	1.09	1.09						
4	11	1.00	1.00	1.00	1.00						
-	12	1.00	1.00	1.00	1.00						

Από τους παραπάνω Πίνακες (Πίνακας 4 και Πίνακας 5), παρατηρείται ότι δεν γίνεται να μηδενιστεί το σφάλμα των ΔV για τα συγκεκριμένα PDOF που έχουν εκτιμηθεί. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 16, Σχήμα 17, Σχήμα 18, Σχήμα 19), παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων οι τιμές που παίρνουν οι τέσσερις συντελεστές διόρθωσης ενέργειας, συναρτήσει του PDOF.



Σχήμα 16. Τιμή του πρώτου συντελεστή διόρθωσης (E_{f,1}) συναρτήσει του PDOF για το τεστ 8.



Σχήμα 17. Τιμή του δεύτερου συντελεστή διόρθωσης (E_{f.2}) συναρτήσει του PDOF για το τεστ 8.



Σχήμα 18. Τιμή του τρίτου συντελεστή διόρθωσης (E_{f,3}) συναρτήσει του PDOF για το τεστ 8.



Σχήμα 19. Τιμή του τέταρτου συντελεστή διόρθωσης (Ε_{j.4}) συναρτήσει του PDOF για το τεστ 8.

Τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 16, Σχήμα 17, Σχήμα 18, Σχήμα 19) παρουσιάζουν τον τρόπο μεταβολής του συντελεστή διόρθωσης της ενέργειας συναρτήσει της διεύθυνσης της δύναμης για τη δοκιμή 8. Αυτή η δοκιμή επιλέχθηκε γιατί εμπεριέχει όλες τις δυνατές τιμές των συντελεστών Ef1, Ef2 και Ef3 όλων των δοκιμών, δηλαδή είναι ακριβείς υποπεριοχές των παραπάνω γραφημάτων. Για τον συντελεστή διόρθωσης Ef4, τα διαγράμματα για κάθε δοκιμή διαφέρουν, όμως ποιοτικά είναι ίδια. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι ότι όσο αυξάνεται η γωνία της δύναμης του πρώτου οχήματος, η γωνία της δύναμης του δεύτερου οχήματος μειώνεται, δηλαδή οι δύο καμπύλες κινούνται ανάποδα σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 41, παρ' όλο που φαίνεται να ταυτίζονται (Σχήμα 16, Σχήμα 17 και Σχήμα 18).

$$\pi = \Psi - \alpha_1 - \alpha_2 \tag{44}$$

Οπότε, στους παρακάτω Πίνακες (Πίνακας 6 & Πίνακας 7) καταγράφεται η γωνία PDOF για την οποία προκύπτει το μικρότερο σφάλμα σε σχέση με τις μετρημένες τιμές, καθώς και η τιμή του σφάλματος αυτού ως ποσοστό %.

Πίνακας 6. Ελάχιστο σφάλμα διαφοράς ταχύτητας για κάθε όχημα και κάθε τεστ για τους συντελεστές διόρθωσης 1 και 2 (E_{f,1} & E_{f,2})

			Energy F	actor 1		Energy Factor 2					
IC	RICSAC	Veł	nicle 1	Veh	icle 2	Veh	icle 1	Vehi	Vehicle 2		
	test no.	PDOF	Error ∆V (%)	PDOF	Error ΔV (%)	PDOF	Error ΔV (%)	PDOF	Error ΔV (%)		
	1	-36	0.03	6	0.58	-32	0.21	8	0.17		
1	2	-45	0.07	0	-	-42	0.04	0	-		
-	6	-60	31.79	0	34.96	-60	31.06	0	34.27		
	7	-60	10.26	0	12.72	-60	9.75	0	14.72		
	3	10	0.13	180	14.98	8	0.09	178	17.48		
2	4	10	10.74	170	40.29	10	10.16	170	39.56		
	5	6	20.19	170	23.89	1	19.62	170	23.29		
	8	-45	23.80	49	0.07	-12	29.17	78	3.70		
3	9	-45	27.12	45	19.32	-19	35.39	71	28.47		
	10	-45	50.32	45	39.59	-23	56.36	67	46.93		
4	11	0	10.31	-9	14.06	0	9.15	-9	12.94		
4	12	0	34.13	-9	30.56	3	33.32	-6	29.71		

Πίνακας 7. Ελάχιστο σφάλμα διαφοράς ταχύτητας για κάθε όχημα και κάθε τεστ για τους συντελεστές διόρθωσης 3 και 4 (E_{f,3} & E_{f,4})

			Energy	Factor 3		Energy Factor 4				
IC	RICSAC test no.	Vehicle 1		Veh	icle 2	Ver	nicle 1	Vehicle 2		
1		PDOF	Error ΔV (%)	PDOF	Error ∆V (%)	PDOF	Error ΔV (%)	PDOF	Error ΔV (%)	
	1	3	0.07	11	0.13	4	0.05	14	0.10	
4	2	-27	0.03	0	-	-19	0.11	0	-	
T	6	-37	31.98	0	35.14	-31	32.06	0	35.22	
	7	-60	10.42	0	12.06	-60	10.05	0	15.06	
	3	-60	0.08	180	14.16	-60	0.00	178	18.11	
2	4	10	9.34	170	38.52	8	8.28	170	37.18	
	5	10	18.78	170	22.43	10	17.91	170	21.53	

3	8	7	31.06	86	6.27	0	31.06	87	6.27
	9	-4	37.96	78	31.32	-3	37.97	81	31.33
	10	-12	58.23	45	49.20	-9	58.68	78	49.75
4	11	-45	10.63	-9	14.37	-12	8.67	-9	12.49
	12	0	34.30	-8	30.74	0	32.42	-7	28.76

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8), ελέγχεται κάθε μία τιμή των συντελεστών ώστε να προσδιοριστεί ο συντελεστή με το μικρότερο σφάλμα, ο συντελεστής με το μέσο σφάλμα και ο συντελεστής με το μέγιστο σφάλμα, με στόχο να εξακριβωθεί ο βέλτιστος.

Πίνακας 8. Ελάχιστο, μέγιστο και μέσο σφάλμα για τους τρεις συντελεστές διόρθωσης από το δείγμα των 12 RICSAC τεστ.

EF	1				2		3			4		
DDOE	Error (%)											
PDOF	min	max	mean									
Meas.	8.57	67.95	32.58	8.35	63.25	31.68	8.01	62.06	30.57	8.06	63.98	29.97
Estim.	8.56	81.11	32.03	8.56	76.63	31.73	8.56	70.03	31.30	8.56	61.97	31.17

Όπως παρατηρείται, οι διαφορές είναι μικρές και δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος σε σχέση με την ποιότητα του κάθε συντελεστή διόρθωσης. Η τιμή του μικρότερου σφάλματος κυμαίνεται από 8.06% έως 8.56%, του μέγιστου σφάλματος από 61.97% έως 81.11% και του μέσου σφάλματος από 29.97% έως 32.58%. Παρ' όλα αυτά, το κύριο συμπέρασμα από τους Πίνακες Πίνακας 6, Πίνακας 7 και Πίνακας 8 είναι ότι, οι εκτιμήσεις για την τιμή της γωνίας PDOF είναι ανακριβείς και απαιτείται λεπτομερέστερη διερεύνησή τους.

Τέλος, για να διευκρινιστεί πόση παραπάνω ενέργεια απαιτείται για τον υπολογισμό της ακριβούς διαφοράς ταχύτητας, πραγματοποιείται ο αντίστροφος υπολογισμός της Εξίσωσης (30), δηλαδή η εξίσωση λύνεται ως προς το άθροισμα των ενεργειών (E1+E2) και όχι ως προς την διαφορά ταχύτητας, και παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 20, Σχήμα 21, Σχήμα 22 και Σχήμα 23).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΡΟΧΑΙΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Σχήμα 20. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία IC1.



Σχήμα 21. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία IC2.



Σχήμα 22. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία IC3.



Σχήμα 23. Διάγραμμα υπολογισθείσας ενέργειας από δεδομένη τιμή ΔV σε σύγκριση με την καθαρή ενέργεια απορρόφησης για την κατηγορία IC4.

Τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 20, Σχήμα 21, Σχήμα 22 και Σχήμα 23), δίνουν την πληροφορία του ποσού των άδηλων απωλειών. Το ποσό ενέργειας το οποίο δεν εξαρτάται από τη μόνιμη παραμόρφωση των οχημάτων (άδηλες απώλειες), είναι η διαφορά των δύο πρώτων μπαρών (μπλε και κόκκινη) με την τρίτη μπάρα (πορτοκαλί). Αυτή η παρατήρηση αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση όπου οι δύο πρώτες μπάρες (μπλε και κόκκινη) είναι ίσες, αλλά ποιοτικά ισχύει.

4.3.Συμπεράσματα για τις δοκιμές RICSAC

Συγκεντρωτικά από το Κεφάλαιο 4.2, γίνεται κατανοητό ότι είναι αδύνατον για τις δώδεκα δοκιμές RICSAC να επιτευχθεί μηδενικό σφάλμα του ΔV και για τα δύο οχήματα. Στα διαγράμματα αντίστροφου υπολογισμού της Εξίσωσης (30) (Σχήμα 20, Σχήμα 21, Σχήμα 22 και Σχήμα 23), διακρίνεται ότι οι δύο πρώτες μπάρες (μπλε και κόκκινη) δεν είναι ίσες μεταξύ τους. Αυτό συνεπάγεται ότι για την επίτευξη της ακριβούς τιμής του ΔV1 απαιτείται διαφορετικό ποσό συνολικής ενέργειας, απ' ότι για την επίτευξη της ακριβούς τιμής του ΔV2. Οι δύο πρώτες μπάρες (μπλε και κόκκινη) θα έπρεπε να είναι ίσες τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά για την επίτευξη μηδενικού σφάλματος ΔV για κάθε όχημα. Απεναντίας, στις δοκιμές 2, 6 και 7, η καθαρή συνολική ενέργεια (Raw Energy – πορτοκαλί μπάρα) υπερβαίνει την επιθυμητή και για τα δύο οχήματα. Οπότε, η χρήση ενός συντελεστή διόρθωσης ενέργειας τείνει να αυξήσει το σφάλμα του ΔV.

Το γεγονός ότι η απώλεια ενέργειας δεν είναι ίδια σε κάθε όχημα οφείλεται στο ότι για κάθε όχημα κατά τη σύγκρουση οι άδηλες απώλειες είναι διαφορετικές. Αυτές οι άδηλες απώλειες, είναι άμεσα συσχετιζόμενες με τις δυνάμεις που ασκούνται στα ελαστικά κατά τη φάση σύγκρουσης και οι δυνάμεις αυτές είναι η κύρια πηγή των απωλειών. Η ίδια ομοιότητα παρουσιάζεται και στην εξίσωση ώθησης η οποία είναι:

$$\Delta V2 = \Delta V1 \frac{m_1}{m_2} \tag{45}$$

Επίσης, παρατηρείται (πιο έντονα στις δοκιμές 11 και 12) ότι η γωνία της δύναμης (PDOF) έχει μικρή διακύμανση (από μηδέν έως εννέα μοίρες), με αποτέλεσμα να ισχύει το ίδιο και για τον συντελεστή διόρθωσης ενέργειας. Οπότε, η τιμή του συντελεστή διόρθωσης ενέργειας, δεν είναι ποτέ επαρκής για την επίτευξη της συνολικής αποσβαινούμενης ενέργειας. Ακόμα, η Εξίσωση (44) δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στη μέση γωνία σύγκρουσης (Ψ). Για αυτούς του λόγους, θα γίνει χρήση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους γωνιών σύγκρουσης (PDOF1 & PDOF2) για κάθε όχημα, χωρίς δηλαδή να ικανοποιείται η ισότητα της Εξίσωσης (45).

Οπότε, η επαλήθευση του αλγορίθμου ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος μέσω της διαφορά ταχύτητας (ΔV), δηλαδή της μετρούμενης και αυτής που υπολογίζει ο αλγόριθμος, καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη. Επίσης, δεν φαίνεται ότι κάποιος από τους τέσσερις συντελεστές διόρθωσης Ef μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τους υπόλοιπους, και για αυτόν τον λόγο, στη συνέχεια, θα γίνει χρήση μόνο του πρώτου Ef1.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, οι δοκιμές RICSAC χρησιμοποιήθηκαν για την κατανόηση, την ανάπτυξη και την επαλήθευση του αλγορίθμου ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων που αναπτύχθηκε στα πλαίσιά της. Επιλέχθηκε τα πιθανά σφάλματα των μετρήσεων να αγνοηθούν. Επίσης, δεν θεωρήθηκε συνετό να γίνει η χρήση των επανεκτιμωμένων μεγεθών, αφού και ο αλγόριθμος ανακατασκευής που αναπτύχθηκε έχει ως δεδομένα επαλήθευσης τις αρχικές ταχύτητες και τα σημεία όπου τα οχήματα ακινητοποιήθηκαν, για τα οποία δεν υπάρχουν αναφορές ότι περιέχουν σφάλματα. Αναμένεται ότι τα σφάλματα θα προέλθουν από τους ανακριβείς συντελεστές στιβαρότητας (Α και Β) και τα ποσοστά μπλοκαρισμένων τροχών.

5. Αλγόριθμος ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων 5.1. Περιγραφή αλγορίθμου και Τρόπος Χρήσης

Το μαθηματικό μοντέλο του συγκεκριμένου αλγορίθμου βασίζεται στο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον McHenry. Η λογική βασίζεται, επίσης, στον υπολογισμό της μεταβολής ταχύτητας κατά τη σύγκρουση (ΔV) και οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της παραμείνουν ίδιες (Εξισώσεις (30) – (33)). Η κύρια διαφορά είναι η «κατεύθυνση» κατά την οποία επιλύεται το πρόβλημα, σε σχέση με άλλους αλγορίθμους ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος, όπως είναι ο αλγόριθμος DAMAGE, το οποίο βασίζεται εξ' ολοκλήρου στο μοντέλο του McHenry. Ο αλγόριθμος DAMAGE, υπολογίζει τις ταχύτητες μετά τη σύγκρουση, ώστε να προσδιοριστεί η αρχική ταχύτητα μέσω της διαφοράς ταχύτητας ΔV που έχει υπολογιστεί για τη φάση της σύγκρουσης. Πρόκειται, δηλαδή, για μια ανάστροφη επίλυση ως προς τον χρόνο (Inverse Solution). Αντίθετα, στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, είναι σημαντικό να γίνει μια εκτίμηση της αρχικής ταχύτητας ή ενός εύρος τιμών αυτής. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιείται το μοντέλο του McHenry και η επίλυση εξελίσσεται παράλληλα με τον χρόνο του προβλήματος (Forward Solution). Δηλαδή, έπειτα από την εκτίμηση της αρχικής ταχύτητας (τέλος Pre-Collision Phase), υπολογίζεται η διαφορά ταχύτητας (ΔV) η οποία αναφέρεται στη φάση της σύγκρουσης (Collision Phase), έπειτα η ταχύτητα τη στιγμή που τα δύο οχήματα παύουν να βρίσκονται σε επαφή (αρχή Post-Collision Phase) και τέλος τα σημεία ακινητοποίησης των οχημάτων (πέρας Post-Collision Phase).

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 24), παρουσιάζεται το διάγραμμα του αλγορίθμου. Με γαλάζιο χρώμα διακρίνονται οι είσοδοι στον αλγόριθμο, με πράσινο ανοιχτό οι πράξεις των εξισώσεων σύμφωνα με το μοντέλο του McHenry, και με μπεζ χρώμα ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Το έντονο βέλος δηλώνει την έναρξη του αλγορίθμου.



Σχήμα 24. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου.

Περιεκτικά, στο διάγραμμα (Σχήμα 24) οι είσοδοι (δεδομένα) στον αλγόριθμο είναι οι συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων (A,B), η γεωμετρία και το βάρος τους καθώς και οι μετρήσεις της παραμόρφωσης που έχουν υποστεί τα οχήματα. Οι συντελεστές στιβαρότητας μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση της βάσης δεδομένων που περιέχει δοκιμές σύγκρουσης των οχημάτων σε ανασχετήρες, αν δεν είναι γνωστοί. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση ενός βελτιστοποιητή (στην παρούσα Διπλωματική Εργασία επιλέχθηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος ο οποίος είναι διαθέσιμος στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab [®] (Optimizer) στα εύρη τιμών των παραμέτρων που έχουν οριστεί από τον χρήστη (κυρίως για την αρχική ταχύτητα) και επιλύονται οι εξισώσεις όμοια με τη χρονική σειρά που πραγματοποιήθηκε η σύγκρουση (Pre-Collision, Collision, Post-Collision Phases). Από τα σημεία ακινητοποίησης των οχημάτων ανανεώνεται η λύση μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (Fitness Function).

Το μπεζ μπλοκ (Optimizer), αναφέρεται αποκλειστικά στον εξελικτικό αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης που ορίστηκε στη συνέχεια. Ένας εξελικτικός αλγόριθμος, όπως είναι ο γενετικός αλγόριθμος, έχει ως στόχο την εύρεση τιμών των παραμέτρων που έχουν τεθεί από τον χρήση, για τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση έχει την βέλτιστη τιμή της, ελάχιστη στην προκειμένη περίπτωση. Ονομάζεται εξελικτικός, γιατί ο τρόπος παραγωγής λύσεων, μοιάζει με τον τρόπο εξέλιξης των ειδών και συνεπώς, η ονοματολογία των στοιχείων που τον απαρτίζουν, είναι η παρακάτω.

Κάθε συνδυασμός τιμών των μεταβλητών σχεδίασης με τις οποίες επιλύει το πρόβλημα ο αλγόριθμος, ονομάζεται «άτομο». Ο αλγόριθμος αποθηκεύει ένα πλήθος ατόμων το οποίο ονομάζεται «γενιά». Για την εύρεση νέας πιθανής βέλτιστης λύσης, ο αλγόριθμος δεν εφαρμόζει σειριακή δοκιμή των πιθανών λύσεων, αλλά υπολογιστικές τεχνικές οι οποίες ονομάζονται «διασταύρωση» και «μετάλλαξη». Από τη διασταύρωση προκύπτει ένα νέο άτομο το οποίο προέρχεται από τον συνδυασμό δύο άλλων (είτε συναρτησιακά είτε από ψηφιακή κωδικοποίηση τεχνικές) και από τη μετάλλαξη προκύπτει ένα νέο άτομο το οποίο προέρχεται από τη διαφοροποίηση κάποιων παραμέτρων ενός άλλου. Η πρώτη γενιά, αλλά και τα υπόλοιπα άτομα τα οποία δεν προέρχονται από τη διασταύρωση ή τη μετάλλαξη, δημιουργούνται τυχαία με τη χρήση υπολογιστικής γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

Σημαντική διαφορά του παρόντος αλγορίθμου σε σύγκριση με το μοντέλο του McHenry, είναι η χρήση της υπορουτίνας για τον υπολογισμό των τροχιών που διαγράφουν τα δύο οχήματα. Αυτή η υπορουτίνα βασίζεται στην αναλυτική επίλυση των εξισώσεων κίνησης και όχι σε πειραματικά δεδομένα όπως οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για τα μοντέλα ανακατασκευής τροχαίων ατυχημάτων. Στο Κεφάλαιο 2.2.2 παρουσιάστηκε η διαδικασία κι οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των τροχιών μετά τη σύγκρουση των οχημάτων.

Ο στόχος που τίθεται στον συγκεκριμένο αλγόριθμο είναι τα δύο οχήματα να ακινητοποιηθούν στα σημεία που έχουν μετρηθεί έχοντας παράλληλα τον ορθό προσανατολισμό. Για να επιτευχθεί η σωστή γωνία, επιλέγεται ως δεύτερο σημείο κάθε οχήματος το μέσο του εμπρόσθιου μετατροχίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, στα μετρούμενα σημεία προστίθεται ένα επιπλέον σημείο το οποίο προέρχεται από το σημείου του κέντρου μάζας του οχήματος, τη γωνία που έχει το όχημα τη στιγμή που ακινητοποιήθηκε (στο σταθερό σύστημα συντεταγμένων) και την απόσταση του κέντρο μάζας από το εμπρός μετατρόχιο όπως φαίνεται στις παρακάτω Εξισώσεις (46) και (47) των συντεταγμένων.

$$X_{\alpha} = X_{CG} + \alpha \cos \Psi \tag{46}$$

$$Y_{\alpha} = Y_{CG} + \alpha \sin \Psi \tag{47}$$

Επομένως, ο στόχος έχει γίνει σαφής και μπορεί να γραφτεί σαν μια αντικειμενική συνάρτηση. Πρόκειται για τέσσερα (4) σημεία τα οποίο έχουν ληφθεί από μετρήσεις κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών και τα αντίστοιχα 4 σημεία τα οποία υπολογίζονται από τον αλγόριθμο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 25), αντιστοιχίζοντας αυτά τα οχτώ σημεία, προκύπτουν τέσσερις αποστάσεις. Το άθροισμα των τεσσάρων αυτών αποστάσεων αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 25. Αποστάσεις μετρούμενων και υπολογισθέντων σημείων για τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οπότε η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$Fval = a + b + c + d \tag{48}$$

Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι το ζητούμενο. Εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μηδενιστεί τότε η υπολογισμένη τελική θέση ταυτίζεται με τη μετρούμενη. Η αντικειμενική συνάρτηση δεν μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την τροχιά που διαγράφει το όχημα. Για παράδειγμα, ένα όχημα μπορεί να έχει διανύσει σε ευθεία τροχιά 50 μέτρα και η αντικειμενική συνάρτηση να έχει τιμή 0.2, ένα δεύτερο όχημα να διανύσει 20 μέτρα και η αντικειμενική συνάρτηση να έχει τιμή 0.1. Δεν συνεπάγεται ότι το δεύτερο όχημα έχει υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια από το πρώτο. Ο μηδενισμός της αντικειμενικής συνάρτησης σημαίνει ότι οι τελικές θέσεις των οχημάτων ταυτίζονται αλλά όχι απαραίτητα ότι ταυτίζονται και οι τροχιές τους, συνεπώς η ανακατασκευή δεν είναι απαραίτητα ακριβής. Η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, αναμένεται να δώσει πιο γρήγορα και σαφή αποτελέσματα για την επιθυμητή ακρίβεια των παραμέτρων, σε σύγκριση με την παραμετρική ανάλυση τυχαίων ή σειριακών συνδυασμών των παραμέτρων. Στο Παράρτημα Β – Ρυθμίσεις γενετικού αλγορίθμου, φαίνονται οι ρυθμίσεις του Γενετικού Αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις επιλύσεις.

Οπότε, για να οριστεί πλήρως η χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και μια ενδεικτική τιμή αυτών για την επισήμανση των σημαντικών ψηφίων κάθε μιας από τις εννέα παραμέτρους.

V1	V2	PDOF1	PDOF2	Xpoi1	Ypoi1	Xpoi2	Ypoi2	Са
[m/s]	[m/s]	[Deg]	[Deg]	[m]	[m]	[m]	[m]	
5.46	7.85	45.4	-1.2	1.54	0.24	1.24	0.85	1.02

Πίνακας 9. Ενδεικτικές τιμές των εννέα παραμέτρων βελτιστοποίησης.

Οι εννέα παράμετροι αναφέρονται στις αρχικές ταχύτητες των οχημάτων (V), στη διεύθυνση των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε όχημα (PDOF), στα σημεία στα οποία ασκούνται οι δυνάμεις (Xpoi, Ypoi) και στον συντελεστή (C_a) κατά τον οποίο η ώθηση του ενός οχήματος διαφέρει σε αναλογία από την ώθηση του δευτέρου, όπως παρατηρήθηκε στο Κεφάλαιο 4.3. Τελικά, στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, για να επιτευχθεί μια πιο ακριβής λύση και για τα δύο οχήματα, η εξίσωση ώθησης πολλαπλασιάζεται με αυτόν τον συντελεστή, ο οποίος κυμαίνεται από την τιμή 0.7 έως 1.4 όπως παρατηρείται από τα σχήματα υπολογισμού της απαιτούμενης ενέργειας (Σχήμα 20, Σχήμα 21, Σχήμα 22 και Σχήμα 23). Η εξίσωση της ώθησης γίνεται:

$$\Delta V2 = \Delta V1 \frac{m_1}{m_2} C_a \tag{49}$$

Παρά όλα αυτά, ο Γενετικός Αλγόριθμός πολλές φορές αδυνατεί να βρει μια ικανοποιητική λύση. Αυτό διακρίνεται κυρίως από τις τροχιές που διαγράφουν τα οχήματα. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι γνωστό ότι ένα όχημα δεν περιστρέφεται μετά τη σύγκρουση αλλά το αποτέλεσμα του αλγορίθμου δείχνει ότι περιστρέφεται. Ακόμα, σύνηθες είναι, το εύρος τιμών των παραμέτρων βελτιστοποίησης να είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δοθεί μια λογική λύση και να χρειαστεί να προσαρμοστεί βάσει εμπειρίας ώστε τα οχήματα να κινηθούν προς την επιθυμητή κατεύθυνση και με την περιστροφή που απαιτείται. Για τους λόγους αυτούς, μπορεί να πραγματοποιηθούν πολλαπλοί κύκλοι βελτιστοποίησης, μέχρις ότου βρεθεί μια λογική λύση τροχιών. Ο αριθμός των πραγματοποιούμενων κύκλων βελτιστοποίησης ορίζεται από τον χρήστη κατόπιν επισκόπησης των αποτελεσμάτων.

5.2.Χρήση του αλγορίθμου για την ανακατασκευή των δοκιμών RICSAC

Αρχικά, χρειάζεται να επισημανθεί ότι για την ανακατασκευή των δοκιμών RICSAC, οι συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων (A, B) ήταν γνωστοί από την βιβλιογραφία (Neades, 2011) και παρατίθενται στον Πίνακας 2. Επίσης, σε όλες τις δοκιμές RICSAC, δεν υπολογίζεται η φάση πριν την σύγκρουση (Pre-Collision Phase) αλλά μόνο η ταχύτητα ακριβώς πριν τη στιγμή της σύγκρουσης, αφού κανένα γεγονός δεν λαμβάνει χώρα πριν τη σύγκρουση το οποίο να προκαλεί μεταβολή της ταχύτητας σε μέτρο και διεύθυνση.

Ακόμα, για την καλύτερη κατανόηση και την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές σειρές κύκλων βελτιστοποίησης. Η πρώτη σειρά, η οποία θα ονομάζεται στο εξής **Ταχεία Βελτιστοποίηση - ΤΒ**, χρησιμοποιεί μόνον τέσσερις (4) παραμέτρους βελτιστοποίησης (αρχικές ταχύτητες και διευθύνσεις δυνάμεων και για τα δύο οχήματα) και μικρό χρονικό βήμα ολοκλήρωσης (10⁻² sec) στην υπορουτίνα υπολογισμού των τροχιών. Η δεύτερη, θα ονομάζεται στο εξής **Ακριβής Βελτιστοποίηση - ΑΒ**, και χρησιμοποιεί και τις εννέα (9) παραμέτρους βελτιστοποίησης όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.1. Επίσης, στην υπορουτίνα υπολογισμού των τροχιών, χρησιμοποιήθηκε μικρότερο χρονικό βήμα ολοκλήρωσης (10⁻⁴ sec) για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Η ΤΒ αποτελεί ένα πολύ καλό και γρήγορο εργαλείο του συγκεκριμένου αλγορίθμου ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος, γιατί μπορεί να επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς, όμως, μεγάλη ακρίβεια. Ικανοποιητικά αποτελέσματα θεωρούνται αυτά που έχουν μια καλή εκτίμηση των αρχικών ταχυτήτων και κυρίως λογικές τροχιές που διαγράφουν τα οχήματα μετά την σύγκρουση. Η ΑΒ, χρησιμοποιείται έπειτα από μία μόνο χρήση της ΤΒ, «στενεύοντας» τα όρια των παραμέτρων βελτιστοποίησης και εισάγοντας νέες, με στόχο την όσο το δυνατόν πιο ακριβή ανακατασκευή. Ο κύριος λόγος για τον οποίο ορίστηκαν οι δύο διαφορετικές σειρές βελτιστοποίησης (ΤΒ και ΑΒ), είναι γιατί, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.1, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να «εγκλωβιστεί» σε τοπικό βέλτιστο το οποίο, αποτελεί μη ικανοποιητική λύση και για την αποφυγή μιας τέτοιας λύσης να απαιτείται πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Οπότε, σε αυτήν την περίπτωση είναι προτιμότερο να περιοριστεί ο υπολογιστικός χρόνος όσο το δυνατόν περισσότερο, ακόμα και αν τα αποτελέσματα της ΤΒ δεν είναι ικανοποιητικά.

Όσον αφορά τις οριακές τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης, για τις αρχικές ταχύτητες τέθηκε ένα εύρος 10 m/s από τις γνωστές τιμές (η μικρότερη τιμή δεν μπορεί να είναι αρνητική αλλά μηδέν). Το εύρος των τιμών των διευθύνσεων των δυνάμεων (PDOF1 & PDOF2), ελήφθη από την Εξίσωση (40) χωρίς όμως να είναι αναγκαίο να ικανοποιείται η συνθήκη της ισότητας. Τα σημεία της σύγκρουσης (PIO1 & POI2) βρίσκονται εντός του ορθογωνίου παραλληλογράμμου με κέντρο το μέσο της παραμορφωμένης επιφάνειας και στις δύο διευθύνσεις (x, y) και ακμές ίσες η μία με Ι/2 και η δεύτερη με το μισό της μέσης τιμής των γειτονικών μετρημένων παραμορφώσεων C_i, δηλαδή $\frac{C_i+C_{i+1}}{4}$, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 26) το γραμμοσκιασμένο τετράπλευρο. Για την ένατη παράμετρο, το εύρος τιμής της έχει επεξηγηθεί στο Κεφάλαιο 4.3.



Σχήμα 26. Τετράπλευρο ορισμού των οριακών τιμών του σημείου εφαρμογής της δύναμης.

5.3.Αποτελέσματα

<u>Δοκιμή 1</u>

Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 27), διακρίνονται οι τροχιές των δύο οχημάτων καθώς και τα σημεία ακινητοποίησης τα οποία, σχεδόν, συμπίπτουν με τα πειραματικά. Αυτό συνεπάγεται ότι η προσομοίωση είναι αρκετά ακριβής, το οποίο άλλωστε φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
7.11	7.24	-4.2	48.7	0.203

Πίνακας 10. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 1.

Στην **ακριβή βελτιστοποίηση,** πραγματοποιήθηκε μόνον ένας κύκλος αφού όπως φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δεν έχει ενδιαφέρον να μειωθεί περισσότερο.



RICSAC-Test-1: EF=1 | PDOF1=-1.3 Deg | PDOF2=59.7 Deg

Σχήμα 28. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 1.

Τα δύο οχήματα ακινητοποιούνται με πολύ μεγάλη ακρίβεια στα μετρούμενα σημεία (και για τα τέσσερα σημεία το σύνολο του σφάλματος είναι 0.075 m) σύμφωνα με τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τον λόγο αυτόν, θεωρείται ότι η ανακατασκευή πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
6.78	5.74	-1.3	59.7	2.48	0.76	0.38	0.81	0.97	0.075

Πίνακας 11. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 1.

<u>Δοκιμή 2</u>

Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,



Σχήμα 29. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 2.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 29), διακρίνεται για το δεύτερο όχημα (πράσινο) ότι απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την εγκάρσια διεύθυνση μετά την σύγκρουση (Post-Collision Velocity), καθώς και μεγαλύτερη περιστροφή κατά την ωρολογιακή φορά. Ενώ, για το πρώτο όχημα (μπλε) απαιτείται μικρότερη περιστροφή αφού έχει διαγράψει περισσότερο από 180° κατά την ωρολογιακή φορά. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12), διακρίνεται και η υψηλή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία δείχνει την ανεπαρκή ανακατασκευή.

u	ας 12. δελιίοι	ες τιμες των π	αραμετρων της ταχ	είας θελιτοτολοτησι	<i>γ</i> ς για το τέστ 2.
	V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
	13.42	11.11	-19.9	44.8	3.421

Πίνακας 12. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 2.

Στην ακριβή βελτιστοποίηση,

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 30. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 2.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 30), διακρίνεται πως το δεύτερο όχημα (πράσινο) έχει ακινητοποιηθεί με μεγάλη ακρίβεια στα μετρούμενα σημεία, όμως για το πρώτο όχημα δεν διορθώθηκε η περιστροφή που διαγράφει μέχρι την ακινητοποίηση. Η καλύτερη προσέγγιση φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 13) σε σύγκριση με την αντίστοιχη στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
12.52	14.21	-18.6	46.9	2.44	0.72	0.26	0.39	1.13	2.421

Πίνακας 13. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 2.

Δεύτερος κύκλος βελτιστοποίησης:

Για την επίτευξη της μείωσης της περιστροφής του πρώτου οχήματος (μπλε), περιορίζονται τα όρια των παραμέτρων που αφορούν τη διεύθυνση της δύναμης (PDOF) και το σημείο εφαρμογής αυτής (POI), γίνεται δηλαδή ένας εμπειρικός έλεγχος του μοχλοβραχίονα.



Σχήμα 31. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 2.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 31), παρατηρείται πως το πρώτο όχημα (μπλε) τείνει πλέον να ακινητοποιηθεί στα μετρούμενα σημεία, και η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται σημαντικά όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
13.52	13.77	-9.1	48.3	2.29	0.11	0.31	0.47	0.99	0.881

Πίνακας 14. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 2.

Τρίτος κύκλος βελτιστοποίησης:

Ένας τελευταίος κύκλος ώστε να επιτευχθεί μια πιο ακριβής ακινητοποίηση του πρώτου οχήματος στα μετρούμενα σημεία.



Σχήμα 32. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 2.

Το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 32) σχεδόν ταυτίζεται με το σχήμα του προηγούμενου κύκλου (Σχήμα 31).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
15.44	13.44	-9.2	49.1	2.29	0.11	0.46	0.65	0.99	0.882

Πίνακας 15. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 2.

Επίσης, παρ' όλο που οι τιμές των αρχικών ταχυτήτων διαφέρουν σε σύγκριση με τον δεύτερο κύκλο βελτιστοποίησης, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι σχεδόν ίδια. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης του πρώτου οχήματος (POI1) «κινήθηκε» προς την παραμορφωμένη επιφάνεια μικρότερου εμβαδού.



Τέταρτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Οι τροχιές των δύο οχημάτων φαίνονται λογικές χωρίς όμως να είναι σίγουρο ότι είναι οι πραγματικές, αφού διακρίνεται να υπάρχει επαφή κατά τη φάση μετά την σύγκρουση.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
15.44	14.62	-11.2	45.6	2.34	-0.01	0.37	0.48	1.00	0.053

Πίνακας 16. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τέταρτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 2.

Το σημείο εφαρμογής της δύναμης για το πρώτο όχημα (POI1) βρίσκεται εντός της παραμορφωμένης επιφάνειας, όμως είναι αρκετά μακριά από το μέσο της παραμορφωμένης επιφάνειας.





Σχήμα 34. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 3.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 34), διακρίνεται ότι, το πρώτο όχημα χρειάζεται να κινηθεί σε ευθεία τροχιά ενώ το δεύτερο να περιστραφεί περισσότερο κατά την αντιωρολογιακή φορά. Οι αποστάσεις που διανύουν τα οχήματα είναι πολύ μεγάλες, οπότε ακόμα και μια καλή ανακατασκευή ενδέχεται να δώσει αρκετά μεγάλη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
8.15	1.73	10.0	180.0	15.035

 <i> </i>			<u></u>	a a manual ava Ral		
1 11 V(XK(X(17. BEALLOIE	$1111 \times (100)$	ασαμετοων τ	<i>חר ומצצומר סצו</i>	(1010)(0)(0)(0)(0)(0)(0)	VIA IO IEOL 5.

Στην **ακριβή βελτιστοποίηση,**

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 35), παρατηρείται ότι το δεύτερο όχημα (πράσινο) ακινητοποιείται με καλή ακρίβεια στα μετρούμενα σημεία, όμως το πρώτο όχημα (μπλε) ακινητοποιείται με αντίθετη γωνία, πολύ κοντά στην επιθυμητή θέση.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.13	1.74	9.9	178.6	2.48	0.47	-2.19	0.17	1.01	0.407

Πίνακας 18. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 3.



Δεύτερος κύκλος βελτιστοποίησης:



Η προσπάθεια σε αυτόν τον κύκλο βελτιστοποίησης για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τον πρώτο κύκλο ακριβής βελτιστοποίησης, δεν είναι αρκετά σημαντική. Γι' αυτόν τον λόγο και δεν θα γίνει νέος, αλλά θεωρούμε αρκετά καλή την τιμή της αντικειμενικής συνάρτηση αφού και η απόσταση που διανύουν τα δύο οχήματα είναι πολύ μεγάλη.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.13	1.46	10.8	178.6	2.46	0.51	-2.06	0.16	1.07	0.361

Πίνακας 19. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 3.

Το γεγονός ότι το πρώτο όχημα (μπλε) θα έπρεπε να ακινητοποιηθεί με αρνητική γωνία, δεν συμπίπτει με τα λογικά όρια των παραμέτρων που έχουν τεθεί.
<u>Δοκιμή 4</u>



Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,

Σχήμα 37. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 4.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 37) παρατηρείται ότι το όχημα 1 (μπλε) απαιτείται να περιστραφεί περισσότερο, ενώ το όχημα 2 (πράσινο) απαιτείται να περιστραφεί λιγότερο, αφού στο τελευταίο τμήμα της κίνησής του κινείται «με την όπισθεν», πράγμα που μάλλον δεν συμβαίνει όπως φαίνεται από τις τελικές μετρούμενες θέσεις.

•	· · ·		· ·	
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
8.15	1.73	10.0	180.0	15.035

Πίνακας 20. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 4.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 38) φαίνεται ότι διορθώθηκε η τροχιά του δεύτερου οχήματος (πράσινο), παρ' όλα αυτά απαιτείται κι άλλος κύκλος βελτιστοποίησης για να μειωθεί περαιτέρω η αντικειμενική συνάρτηση.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
16.48	2.25	0.0	178.5	2.41	0.43	-2.15	-0.19	0.74	9.391

Πίνακας 21. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 4.





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 39), το όχημα 2 (πράσινο) ακινητοποιείται με καλή ακρίβεια στα μετρούμενα σημεία, όμως στο όχημα 1 (μπλε) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια ταχύτητα και περιστροφή μετά τη σύγκρουση.

Πίνακας 22.	Βέλτιστες	τιμές των πι	χραμέτρων ι	ης δεύτερης	ακριβής βε	λτιστοποίησης για	ι το τεστ 4.
-------------	-----------	--------------	-------------	-------------	------------	-------------------	--------------

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
16.07	2.32	-9.0	177.0	2.20	0.13	-1.98	-0.15	0.71	5.297



Τρίτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Παρατηρείται ότι και το πρώτο όχημα (μπλε) τείνει να ακινητοποιηθεί στα επιθυμητά σημεία. Όμως, τα σημεία εφαρμογής της δύναμης δεν θα μπορούσαν να είναι τα πραγματικά αφού είναι εκτός των ορίων της παραμορφωμένης επιφάνειας.

Πίνακας 23. Ε	βέλτιστες τιμές των	παραμέτρων τη	ς τρίτης ακρ	ιβής βελτιστοποί	ησης για το τεστ 4
---------------	---------------------	---------------	--------------	------------------	--------------------

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
15.66	0.13	-14.2	178.4	2.00	0.00	-2.00	-0.20	0.68	2.832

<u>Δοκιμή 5</u>



Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,

Σχήμα 41. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 5.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 41) παρατηρείται ότι το όχημα 1 (μπλε) θα πρέπει να κινηθεί ευθύγραμμα χωρίς περιστροφή, ενώ για το όχημα 2 (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη περιστροφή και εγκάρσια ταχύτητα μετά τη σύγκρουση.

 ,	-,-,-,-,-,-			1, 1
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
17.19	1.89	10.0	180.0	50.855

Πίνακας 24. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 5.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Το πρώτο όχημα (μπλε) ακινητοποιείται στα επιθυμητά σημεία με πολύ μεγάλη ακρίβεια, όμως στο δεύτερο όχημα απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια και περιστροφική ταχύτητα. Συνολικά, αυτό σημαίνει, μεγαλύτερο ΔV2.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
17.02	0.47	9.4	179.9	2.49	0.42	-2.02	-0.20	1.05	7.954

Πίνακας 25. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 5.





Είναι αδύνατον να επιτευχθεί η ακριβής ακινητοποίηση του δεύτερου οχήματος (πράσινο). Για αυτόν τον λόγο υπάρχει η υποψία ότι απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια απ' αυτήν που έχει υπολογιστεί.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
17.02	0.26	9.8	180.0	2.50	0.44	-1.92	-0.20	1.07	7.922

Πίνακας 26. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 5.





Σχήμα 44. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 6.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 44) παρατηρείται ότι το πρώτο όχημα (μπλε) περιστρέφεται περισσότερο από το επιθυμητό και σταθμεύει με γωνία περίπου 180° διαφορά από την μετρούμενη.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
16.23	10.61	-14.7	30.6	2.683

Πίνακας 27. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 6.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Δεν ήταν επιτυχής η διόρθωση του πρώτου οχήματος.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
15.66	9.96	-12.8	24.9	2.50	0.72	-0.35	0.67	1.08	2.790

Πίνακας 28. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 6.

Γίνεται προσπάθεια να διορθωθεί η στροφή.





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 46) διακρίνεται ότι οι τροχιές των δύο οχημάτων έχουν διορθωθεί σε μεγάλο βαθμό.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
10.75	9.26	0.0	26.5	2.49	0.20	-0.44	0.77	0.97	1.182

Πίνακας 29. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 6.



Τρίτος κύκλος βελτιστοποίησης:

Σχήμα 47. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 6.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 47) διακρίνεται ότι περιθώριο βελτίωσης υπάρχει μόνο στην τροχιά του δεύτερου οχήματος (πράσινο), παρ' όλα αυτά η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 30) θεωρείται ικανοποιητική.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
10.83	9.28	0.8	24.7	2.45	0.21	-0.34	0.77	0.96	0.268

Πίνακας 30. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 6.





Σχήμα 48. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 7.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 48) διακρίνεται ότι το πρώτο όχημα (μπλε) σταθμεύει πολύ κοντά στα επιθυμητά σημεία, όμως από την τροχιά που διαγράφει γίνεται αντιληπτό ότι περιστρέφεται 360°, γεγονός το οποίο δεν αναφέρεται στην βιβλιογραφία. Το δεύτερο όχημα (πράσινο) περιστρέφεται λιγότερο από το επιθυμητό. Παρ΄ όλα αυτά, η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 31), δεν είναι σημαντικά μεγάλη παρά το γεγονός ότι η ανακατασκευή είναι λανθασμένη.

 ,	- ,		,	1)1
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
19.66	11.78	-22.8	60.0	2.453

Πίνακας 31. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 7.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 49) διακρίνεται ότι η τροχιά του δεύτερου οχήματος (πράσινο) διορθώθηκε σημαντικά, όμως όχι η τροχιά του πρώτου οχήματος (μπλε). Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 32) μειώθηκε.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
19.72	15.51	-26.0	32.3	2.45	0.32	-0.89	0.56	1.32	0.725

Πίνακας 32. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 7.





Η προσαρμογή των ορίων του σημείου εφαρμογής της δύναμης για το πρώτο όχημα (POI1) είχε ως αποτέλεσμα τη λογική τροχιά που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 50).

Πίνακας 33. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων τη	ς δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 7
---	--

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
13.65	15.92	-1.5	32.0	2.48	0.06	-0.66	0.66	1.24	0.464



Τρίτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 51) διακρίνεται ότι έχει επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια των τροχιών καθώς και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτηση είναι μικρή όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 34).

Πίνακας 34. Βέλτιστες τιμές τω	ν παραμέτρων της τρίτης	ακριβής βελτιστοποίησης για τ	το τεστ 7.
--------------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
13.33	15.25	-1.46	30.5	2.51	0.07	-0.91	0.65	1.25	0.123





Σχήμα 52. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 8.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 52) διακρίνεται ότι το πρώτο όχημα (μπλε) διαγράφει μια αρκετά λογική τροχιά, ενώ στο δεύτερο όχημα (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια και περιστροφική ταχύτητα.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
6.32	6.72	-33.5	48.3	1.260

Πίνακας 35. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 8.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 53. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 8.

Όμοια με την ταχεία βελτιστοποίηση, δεν διακρίνεται κάποια βελτίωση παραπάνω σχήμα (Σχήμα 53).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
5.95	5.13	-35.1	64.3	2.44	-0.85	0.28	0.90	0.90	1.252

Πίνακας 36. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 8.



Σχήμα 54. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 8.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 54) διακρίνεται η βελτίωση της τροχιάς του δεύτερου οχήματος (πράσινο), όμως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτηση στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 37) δεν είναι αρκετά μικρή, δεδομένου της απόστασης που διανύουν τα δύο οχήματα.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
5.71	7.95	-39.9	70.9	2.29	-1.14	-0.18	0.76	1.20	0.537

Πίνακας 37. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 8.

Τρίτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 55. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην τρίτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 8.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται σημαντικά όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 38).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
5.70	7.37	-39.95	72.66	2.31	-1.16	-0.15	0.68	1.24	0.296

Πίνακας 38. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της τρίτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 8.



<u>Δοκιμή 9</u> Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,

Σχήμα 56. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 9.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 56) παρατηρείται ότι το πρώτο όχημα (μπλε) περιστρέφεται περίπου 180° περισσότερο από το επιθυμητό, ενώ για το δεύτερο όχημα (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια και περιστροφική ταχύτητα. Επίσης, διακρίνεται ότι τα δύο οχήματα κατά την διαγραφή των τροχιών τους, βρίσκονται σε επαφή. Αυτό γίνεται σαφές από τις κλίσεις που έχουν οι τροχιές των κέντρων μάζας στην αρχή τους.

,	, , ,		, , , , ,				
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]			
6.59	9.36	-45.0	14.4	7.890			

Πίνακας 39. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 9.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 57. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 9.

Οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με αυτές της ταχείας βελτιστοποίησης.

Πίνακας 40. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 9.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
6.49	10.44	-45.0	19.4	1.74	-0.11	1.66	0.97	1.32	7.641





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 58) παρατηρείται ότι η περιστροφή του πρώτου οχήματος έχει διορθωθεί αρκετά, όμως η στάθμευσή του απέχει πολύ από τα επιθυμητά σημεία. Για το δεύτερο όχημα (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια και περιστροφική ταχύτητα και το γεγονός ότι τα δύο οχήματα είναι σε επαφή κατά τη διαγραφή των τροχιών ισχύει και πάλι.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.48	9.44	-20.0	15.9	1.90	-0.02	1.66	0.95	1.04	15.523

Πίνακας 41. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 9.

Ενώ πραγματοποιήθηκαν και άλλοι κύκλοι βελτιστοποίησης δεν θα παρουσιαστούν, αφού οι παρατηρήσεις είναι παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν και θεωρήθηκε ότι για λογικές τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος αδυνατεί να αναδείξει μια λογική ή μια ακριβής λύση.

<u>Δοκιμή 10</u>



Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,

Σχήμα 59. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 10.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 59) παρατηρείται ότι το πρώτο όχημα (μπλε) περιστρέφεται περισσότερο από το επιθυμητό, ενώ για το δεύτερο όχημα (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια και περιστροφική κίνηση κατά την ωρολογιακή φορά.

 ,	-,,,			1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
6.80	11.37	-45.0	17.9	13.139

Πίνακας 42. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 10.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 60. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 10.

Οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με αυτές της ταχείας βελτιστοποίησης.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Са	Fitness Function [m]
7.89	10.63	-45.0	17.3	1.70	-0.24	1.78	0.95	0.77	12.991

Πίνακας 43. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 10.



Σχήμα 61. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 10.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 61) παρατηρείται ότι η περιστροφή του πρώτου οχήματος (μπλε) διορθώθηκε σημαντικά, όμως απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια ταχύτητα. Η τροχιά του δεύτερου οχήματος (πράσινο) δεν διορθώθηκε.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
12.89	11.85	-20.0	16.8	1.74	-0.27	2.01	0.90	1.13	17.535

Πίνακας 44. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 10.

Όπως και στο τεστ 9, σε επόμενους κύκλους βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν, δεν έγινε δυνατή η διόρθωση των τροχιών των δύο οχημάτων.





Σχήμα 62. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 11.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 62) παρατηρείται ότι πρώτο όχημα (μπλε) κινείται σε μια λογική τροχιά, ενώ το δεύτερο όχημα θα πρέπει να κινηθεί σχεδόν ευθεία.

,	, , ,		, 1	171
V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
6.59	7.83	3.9	0.0	2.653

Πίνακας 45. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ταχείας βελτιστοποίησης για το τεστ 11.

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:





Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 63) διακρίνεται μια μικρή διόρθωση της τροχιάς του δεύτερου οχήματος, όμως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 46) δεν είναι ικανοποιητικά μικρή.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
7.49	6.49	4.0	0.0	1.67	-0.21	2.40	-0.26	0.74	1.533

Πίνακας 46. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 11.



Σχήμα 64. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 11.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 47) παρατηρείται η σημαντική μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, όμως το σημείο εφαρμογής της δύναμης του πρώτου οχήματος (POI1) βρίσκεται οριακά εντός της παραμορφωμένης επιφάνειας. Παρ' όλα αυτά, στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 64) διακρίνεται ότι οι τροχιές των δυο οχημάτων είναι αρκετά ακριβείς.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.05	6.95	0.3	-6.7	1.67	-0.08	2.08	-0.25	0.80	0.119

Πίνακας 47. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 11.

<u>Δοκιμή 12</u>

Στην **ταχεία βελτιστοποίηση**,



Σχήμα 65. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ταχεία βελτιστοποίηση για το τεστ 12.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 65) παρατηρείται ότι στο δεύτερο όχημα (πράσινο) απαιτείται μεγαλύτερη εγκάρσια ταχύτητα.

Πίνακας 48. Βέλτιστες τιμές των	[,] παραμέτρων της ταχείας	βελτιστοποίησης για το τεστ 12.
---------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Fitness Function [m]
8.81	9.96	8.8	0.0	2.507

Πρώτος κύκλος βελτιστοποίησης:



Σχήμα 66. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην πρώτη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 12.

Οι παρατηρήσεις είναι οι ίδιες με την ταχεία βελτιστοποίηση.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.82	7.75	6.8	0.0	1.72	-0.13	2.08	-0.21	0.72	1.762

Πίνακας 49. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της πρώτης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 12.



Σχήμα 67. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην δεύτερη ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 12.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 67) παρατηρείται ότι οι τροχιές των δύο οχημάτων είναι αρκετά λογικές και τα σημεία ακινητοποίησης αρκετά ακριβή σε σχέση με τα καταγεγραμμένα. Όμως, το σημείο στάθμευσης του κέντρου μάζας του δεύτερου οχήματος απέχει αρκετά από το επιθυμητό και για αυτόν τον λόγο παρουσιάζεται η αρκετά αυξημένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 50).

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
8.90	8.18	6.5	-8.9	1.76	-0.14	2.16	-0.18	0.78	0.437

Πίνακας 50. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της δεύτερης ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 12.

5.4. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Αρχικά, ο κύριος στόχος της ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος είναι ο προσδιορισμός των αρχικών ταχυτήτων των οχημάτων. Για αυτόν τον λόγο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 51) οι αρχικές ταχύτητες των οχημάτων που υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο σε σύγκριση με τις μετρούμενες, το σχετικό και το απόλυτο σφάλμα για το εκάστοτε όχημα. (Jones & Baum, 1978)

Test	V1i [m/s]	V2i [m/s]	V1i,opt [m/s]	V2i,opt [m/s]	AEr(V1i) [m/s]	AEr(V2i) [m/s]	REr(V1i) [%]	REr(V2i) [%]
1	8.86	8.86	6.78	5.74	2.08	3.12	23.48	35.21
2	14.08	14.08	15.44	14.62	-1.36	-0.54	-9.66	-3.84
3	9.50	0.00	8.13	1.46	1.37	-1.46	14.42	-
4	17.31	0.00	15.66	0.13	1.65	-0.13	9.53	-
5	17.78	0.00	17.02	0.26	0.76	-0.26	4.27	-
6	9.61	9.61	10.83	9.28	-1.22	0.33	-12.70	3.43
7	13.00	13.00	13.33	15.25	-0.33	-2.25	-2.54	-17.31
8	9.28	9.28	5.70	7.37	3.58	1.91	38.58	20.58
9	9.50	9.50	8.48	9.44	1.02	0.06	10.74	0.63
10	14.92	14.92	12.89	11.85	2.03	3.07	13.61	20.58
11	9.10	9.11	8.05	6.95	1.05	2.16	11.54	23.71
12	14.08	14.08	8.90	8.18	5.18	5.90	36.79	41.90

Πίνακας 51. Σύγκριση μετρούμενων και υπολογισθέντων αρχικών ταχυτήτων και μεταξύ τους σφάλμα.

Επίσης, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 52), παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων, με στόχο να συγκριθεί η βέλτιστη λύση που υπολογίστηκε από τον αλγόριθμο, σε σχέση με τις αρχικές ταχύτητες που υπολογίστηκαν.

Test	1	2	3	4	5	6
Fval [m]	0.075	0.053	0.361	2.832	7.922	0.268
Test	7	8	9	10	11	12

Πίνακας 52. Τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε τεστ.

Για την επίτευξη των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε δοκιμή που φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα (Πίνακας 52), δεν πραγματοποιήθηκε ίδιος αριθμός κύκλων βελτιστοποίησης για κάθε δοκιμή. Στην δοκιμή RISCSAC 1 πραγματοποιήθηκε μόνον ένας κύκλος ακριβούς βελτιστοποίησης (το ελάχιστο) ενώ στην δοκιμή RICSAC 2 τέσσερις (το μέγιστο), στις δοκιμές RICSAC 3, 5, 9, 10, 11 και 12 πραγματοποιήθηκαν 2 κύκλου ακριβούς βελτιστοποίησης και στις δοκιμές RICSAC 4, 6, 7 και 8 τρεις κύκλοι ακριβούς βελτιστοποίησης.

Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου ακριβούς βελτιστοποίησης (ΑΒ) προς τον αριθμό ατόμων, δηλαδή η μέση τιμή του χρόνου επίλυσης ενός ατόμου, εξαρτάται κυρίως από την απόσταση που διανύουν τα δύο οχήματα κατά τη φάση μετά τη σύγκρουση (Post-Collision Phase). Αυτό ισχύει με την προϋπόθεση ότι το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης (Δt) παραμένει σταθερό, καθώς και οι υπόλοιπες ρυθμίσεις του Γενετικού Αλγορίθμου. Όπως είναι φυσικό, στις δοκιμές 11 και 12 στις οποίες οι γωνίες διεύθυνσης της δύναμης (PDOF1 & PDOF2) έχουν μικρά εύρη τιμών (εννέα μοίρες), ο Γενετικός Αλγόριθμος τερματίζεται από την μη ικανοποίηση της συνθήκης ανοχών των τιμών-λύσεων (Constrain Tolerance). Για τη σύγκριση των χρόνων περάτωσης σε κάθε δοκιμή, η δοκιμή πέντε (5) στην οποία ένα ή και τα δύο οχήματα διανύουν την μεγαλύτερη απόσταση κατά τη φάση μετά τη σύγκρουση, ο χρόνος περάτωσης ενός κύκλου ακριβούς βελτιστοποίησης (AB) σε έναν πυρήνα επεξεργασίας για δύο χιλιάδες γενιές (2000 Generations) των εκατό ατόμων (100 Population Number), ήταν περίπου πέντε ώρες και τριάντα λεπτά (5.5 h) σε έναν μέσων δυνατοτήτων προσωπικό Η/Υ.

Επίσης, από τους παραπάνω Πίνακες (Πίνακας 51 και Πίνακας 52), γίνεται κατανοητό ότι η μικρή τιμή (σχεδόν μηδέν) της αντικειμενικής συνάρτησης, δεν συνεπάγεται την ακριβή αρχική ταχύτητα. Για παράδειγμα στη δοκιμή ένα (1), η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι 0.075 m, όμως τα σχετικά σφάλματα των αρχικών ταχυτήτων είναι 23.48% και 35.21% για τα δύο οχήματα αντιστοίχως.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5.3, σε κάθε επόμενο κύκλο βελτιστοποίησης, προσαρμόζεται το εύρος της τιμής του σημείου εφαρμογής της δύναμης (POI). Η μετακίνηση αυτού του σημείου δεν έχει σημαντική συνεισφορά στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά σε συνδυασμό με τη μεταβολή της γωνίας της δύναμης γίνεται η επίτευξη της ανακατασκευής ατυχήματος. Τη μεγαλύτερη συμβολή την έχει η γωνία της δύναμης, αφού στην Εξίσωση (30), από την οποία υπολογίζεται η διαφορά ταχύτητας κατά τη φάση της σύγκρουσης, εμπεριέχεται, στον όρο της ενέργειας μέσω του συντελεστή διόρθωσης, στον όρο του συντελεστή (γ) αλλά και στην διεύθυνση της μεταβολής ταχύτητας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον το σημείο εφαρμογής της δύναμης μεταβάλλεται αρκετά σε ορισμένες δοκιμές (Δοκιμή 2, 4 και 8). Η μεγάλη μεταβολή του σημείου εφαρμογής της δύναμης επιφέρει έμμεσα μεγάλες διαφορές στην ενέργεια και στον μοχλοβραχίονα και αυτές με τη σειρά τους στη διαφορά ταχύτητας που υπολογίζεται. Στο σύνολο, με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατό να επιτευχθεί η μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης, όμως η αρχική ταχύτητα που θα υπολογιστεί, μπορεί να απέχει από την πραγματική.

6. Χρήση του αλγορίθμου σε δοκιμή RICSAC με άγνωστους τους συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων

6.1. Προσδιορισμός των συντελεστών στιβαρότητας των οχημάτων

Για τη χρήση του αλγορίθμου σε δοκιμή για την οποία οι συντελεστές στιβαρότητας (Α, Β) είναι άγνωστοι, γίνεται μια παραμετρική ανάλυση με στόχο τον μηδενισμό της αντικειμενικής συνάρτησης όπως έγινε στο Κεφάλαιο 5. Πραγματοποιούνται πολλοί κύκλοι βελτιστοποίησης με διαφορετικές τιμές των συντελεστών στιβαρότητας των εμπλεκόμενων οχημάτων. Οι συντελεστές στιβαρότητας μεταβάλλονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις (40) και (41) του Κεφαλαίου 2.3.2.2. Η παράμετρος που διαφοροποιεί τους συντελεστές στιβαρότητας είναι η ταχύτητα που επιφέρει μηδενική παραμόρφωση στο όχημα (b₀). Από την εκτίμηση του b0 και τις δοκιμές που βρίσκονται στη βάση δεδομένων της NHTSA, προκύπτει με τη σειρά της η κλίση της καμπύλης παραμόρφωσης (b₀) με τον τρόπο που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.3.2.2.

Γνωρίζοντας ότι ο συντελεστής b₀ κυμαίνεται από 3 – 7 mph (Neptune & Flynn, 1994), πραγματοποιήθηκαν είκοσι πέντε (25) σειρές βελτιστοποίησης με σκοπό να προσδιοριστεί η τιμή του συντελεστή b₀ (για κάθε όχημα), για την οποία προκύπτει η μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτηση. Η συγκεκριμένη ανάλυση έλαβε χώρα για τη δοκιμή RICSAC 7. Πραγματοποιήθηκε μόνο ένα κύκλος βελτιστοποίησης για κάθε συνδυασμό, το οποίο συνεπάγεται ότι περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας (Πίνακας 53) στον οποίο δίνονται οι συντελεστές στιβαρότητας που προέκυψαν για κάθε τιμή του b₀.

b0	(mph)	3	4	5	6	7
Veh 1	A (N/m)	25437	32705	39367	45424	50875
	B (N/m²)	472206 439023		407064	376330	346819
Veh 2	A (N/m)	14868	17937	20062	21244	21483
	B (N/m²)	324722	290247	259306	231898	208023

Πίνακας 53. Συντελεστές στιβαρότητας για κάθε όχημα και για κάθε ταχύτητα μηδενικής παραμόρφωσης.

Για κάθε έναν συνδυασμό των συντελεστών στιβαρότητας του πρώτου οχήματος και του δεύτερου οχήματος, πραγματοποιήθηκε ένας κύκλος βελτιστοποίησης. Οι ρυθμίσεις του γενετικού αλγορίθμου ήταν ίδιες με αυτές της ακριβούς βελτιστοποίησης (AB) όπως αναφέρθηκαν και στο Κεφάλαιο 5. Ο συνδυασμός από τον οποίο προέκυψε η βέλτιστη τιμή αντικειμενική συνάρτηση είναι ο εξής:

Όχημα 1:

b0 = 5 mph A = 39367 N/m $B = 407064 N/m^2$

Όχημα 2:

b0 = 3 mph A = 14868 N/m $B = 324722 N/m^2$

6.2. Επίλυση της δοκιμής 7

Με τον ίδιο τρόπο που επιλύθηκε η δοκιμή 7 στο Κεφάλαιο 5.2 επιλύθηκε για τις παραπάνω τιμές των συντελεστών στιβαρότητας. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μόνον ένας κύκλος βελτιστοποίησης με τις ρυθμίσεις της ΑΒ. Δεν χρειάστηκε άλλος κύκλος βελτιστοποίησης, αφού τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.



Σχήμα 68. Αρχική διάταξη οχημάτων και τροχιά αυτών στην ακριβή βελτιστοποίηση για το τεστ 7 με άγνωστους τους συντελεστές στιβαρότητας.

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 68) παρατηρείται πως και τα δύο οχήματα έχουν διαγράψει λογικές τροχιές και ακινητοποιούνται στα επιθυμητά σημεία, όπως άλλωστε φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 54).

Πίνακας 54. Βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της ακριβής βελτιστοποίησης για το τεστ 7 με άγνωστους τους συντελεστές στιβαρότητας.

V1 [m/s]	V2 [m/s]	PDOF1 [Deg]	PDOF2 [Deg]	Xpoi1 [m]	Ypoi1 [m]	Xpoi2 [m]	Ypoi2 [m]	Ca	Fitness Function [m]
11.98	11.96	-2.2	39.7	2.44	0.07	-1.33	0.63	1.22	0.095
6.3. Παρατηρήσεις – Σύγκριση

Κατά την εύρεση του συνδυασμού των συντελεστών στιβαρότητας, παρατηρήθηκε μια σημαντική λεπτομέρεια. Για κάθε μια βέλτιστη λύση που πραγματοποιήθηκε, δηλαδή για κάθε ένα συνδυασμό των πέντε (5) ταχυτήτων μηδενικής παραμόρφωσης του πρώτου οχήματος με τις πέντε (5) ταχύτητες μηδενικής παραμόρφωσης του δεύτερου οχήματος, σύνολο εικοσιπέντε (25) κύκλοι προσομοίωσης, οι αρχικές ταχύτητες που προέκυψαν δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Εξίσου όμως σημαντικό είναι ότι όλες οι τιμές είναι πολύ κοντά στις μετρούμενες (13 m/s το πρώτο όχημα και 13 m/s το δεύτερο όχημα). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 55) παρουσιάζονται οι τιμές των αρχικών ταχυτήτων για κάθε έναν κύκλο βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε.

Both Vehi- cles' Initial Velocities [m/s]		Veh1 b0 [m/s]					
		3	4	5	6	7	
	3	(13.04 , 15.56)	(13.48 , 12.73)	(11.98 , 11.96)	(13.33 , 13.18)	(12.32 , 13.03)	
Veh2	4	(13.61 , 15.88)	(12.65 , 13.46)	(12.84 , 13.30)	(12.66 , 13.38)	(13.26 , 13.33)	
b0	5	(13.04 , 13.76)	(13.83 , 14.79)	(12.49 , 12.37)	(12.84 , 13.57)	(12.47 , 12.91)	
[m/s]	6	(13.05 , 13.89)	(13.85 , 14.94)	(12.84 , 14.02)	(12.43 , 12.31)	(12.83 , 13.71)	
	7	(12.88 , 13.04)	(13.04 , 14.66)	(12.84 , 13.75)	(13.55 , 15.11)	(12.31 , 12.26)	

Πίνακας 55. Αρχικές ταχύτητες οχημάτων για κάθε έναν συνδυασμό ταχυτήτων μηδενικής παραμόρφωσης.

Επίσης, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν ήταν σε κανέναν κύκλο σημαντικά μεγάλη. Συγκεκριμένα, σε κανένα τεστ, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν ξεπέρασε την τιμή των 1,5 m.

Σε σύγκριση με την ανακατασκευή του τεστ 7 που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 5.2, για την επίτευξη της σχεδόν ίδιας τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης χρειάστηκε να προσαρμοστεί το σημείο εφαρμογής της δύναμης του δεύτερου οχήματος (POI2) περισσότερο απ' ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση. Αυτό συνεπάγεται ότι η βέλτιστη λύση βρέθηκε με ικανοποιητική ακρίβεια για την αρχική εκτίμηση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του δεύτερου οχήματος, δηλαδή το σημείο αυτό περιορίστηκε στα όρια τα οποία είχαν τεθεί εξαρχής στο εύρος του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 5. Αντίθετα, στην προσομοίωση του ίδιου κεφαλαίου, το σημείο εφαρμογής της δύναμης θα μπορούσε να απέχει αρκετά από την αρχική εκτίμηση.

Τέλος, θεωρείται σημαντικό να προκύπτουν ίσες οι αρχικές ταχύτητες από τον αλγόριθμο όταν οι μετρούμενες είναι ίσες. Επίσης, είναι λογικό οι αρχικές ταχύτητες να προκύπτουν μικρότερες από τις μετρούμενες, εφόσον υπάρχουν άδηλες απώλειες. Οπότε, πιο ακριβής θεωρείται η ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος για την οποία:

 τα σημεία εφαρμογής της δύναμης δεν μετατοπίζονται περισσότερο από τις αρχικές εκτιμήσεις που έχουν τεθεί για κάθε όχημα, υπάρχει σωστή αναλογία μεταξύ των αρχικών ταχυτήτων των δύο οχημάτων αλλά και μικρότερες τιμές από τις πραγματικές.

7. Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά, από τη διερεύνηση των δοκιμών RICSAC και την ανακατασκευή αυτών που πραγματοποιήθηκαν στα Κεφάλαια (4 και 5) αντίστοιχα, μπορεί να αξιολογηθεί ο αλγόριθμος ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Ο αλγόριθμος, έχει τη δυνατότητα να παράγει ένα αρκετά αξιόπιστο αποτέλεσμα, με το ελάττωμα, όμως, ότι απαιτείται η καθοδήγηση του χρήστη και η επιβολή νέας επίλυσης – κύκλος βελτιστοποίησης. Όπως διαπιστώθηκε στο Κεφάλαιο 5, όλες οι δοκιμές (εκτός της πρώτης) απαιτούν περισσότερους από έναν κύκλους βελτιστοποίησης, γεγονός που καθιστά το σύνολο χρόνου περάτωσης της ανακατασκευής τροχαίου ατυχήματος, αρκετά μεγάλο. Όμως, το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό ώστε να θεωρηθεί επιτυχής η ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος.

Στο Κεφάλαιο 4 μελετήθηκε η επίδραση που έχουν οι συντελεστές διόρθωσης ενέργειας (Energy Factors) στη μεταβολή ταχύτητας του κάθε οχήματος κατά την φάση της σύγκρουσης (Collision Phase). Το αποτέλεσμα δεν ήταν σαφές και δεν έγινε εμφανές ότι κάποιος από τους τέσσερις συντελεστές διόρθωσης ενέργειας είναι πιο ακριβής από τους υπόλοιπους. Από τα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 4, γίνεται αντιληπτό ότι είναι απαραίτητη η χρήση ενός συντελεστή διόρθωσης της ενέργειας, αφού η απαιτούμενη ενέργεια είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίζεται από την παραμόρφωση των οχημάτων.

Ακόμα, στο Κεφάλαιο 5 διακρίνεται ότι στις δοκιμές 8, 9 και 10 η τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αρκετά υψηλή (0.296, 15.523 και 17.535 αντίστοιχα) ιδιαίτερα στις δοκιμές 9 και 10. Επομένως, η ανακατασκευή δεν κρίνεται επιτυχής. Αυτό συνάγεται και από το γεγονός ότι τα δύο οχήματα βρίσκονται σε επαφή και κατά τη διάρκεια της διαγραφής των τροχιών τους όπως διακρίνεται και από τα σχήματα στα αντίστοιχα αποτελέσματα (Σχήμα 52 – Σχήμα 61). Οπότε διακρίνεται άμεσα η αδυναμία του αλγορίθμου για ανακατασκευή δοκιμών με γωνία σύγκρουσης ενενήντα μοιρών (90° – IC3) και χρήζει βελτίωσης.

Στο Κεφάλαιο 6, πραγματοποιήθηκε ανακατασκευή της δοκιμής 7 υπολογίζοντας μέσω της βάσης δεδομένων της NHTSA τους συντελεστές στιβαρότητας των οχημάτων. Τα αποτελέσματα ήταν περισσότερο ικανοποιητικά απ' ότι στην ανακατασκευή της δοκιμής 7 έχοντας δεδομένους τους συντελεστές στιβαρότητας. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι για κάθε ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος είναι σημαντική η ύπαρξη επαρκών δοκιμών σύγκρουσης των οχημάτων σε ανασχετήρες για την επίτευξη των τροχιών που διαγράφουν τα οχήματα. Στην συγκεκριμένη ανάλυση φάνηκε, επίσης, ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης (POI) δεν χρειάζεται να μετατοπιστεί για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, αλλά η αρχική εκτίμηση ως το κεντροειδές της παραμορφωμένης επιφάνειας, είναι ικανοποιητική.

Συνοπτικά, το γεγονός ότι υπάρχουν άδηλες απώλειες, συνεπάγεται ότι μια ακριβής ανακατασκευή τροχαίου ατυχήματος έχει ως αποτέλεσμα αρχικές ταχύτητες μικρότερες των πραγματικών. Αυτό προκύπτει, δεδομένου, ότι η συνολική ενέργεια απόσβεσης (δηλαδή η ενέργεια συμπεριλαμβανομένων των άδηλων απωλειών) θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από την υπολογισμένη. Συνεπώς, επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο οι διαφορές ταχυτήτων που υπολογίζονται κατά τη φάση της σύγκρουσης και οι αρχικές ταχύτητες των οχημάτων. Για να συμπεριληφθεί ένα μέρος αυτών των άδηλων απωλειών (απώλειες λόγω ολίσθησης των ελαστικών κατά τη φάση της σύγκρουσης), μπορεί η επίλυση της φάση της σύγκρουσης να γίνει χρονικά και όχι στιγμιαία όπως αναφέρει το μοντέλο του McHenry. Με δεδομένα την παραμόρφωση των οχημάτων και τους συντελεστές στιβαρότητας αυτών, μπορεί να υπολογιστεί η μέση δύναμη που υφίσταται στα οχήματα, συνεπώς και η επιβράδυνση – επιτάχυνση που υφίσταται σε αυτά κατά τη φάση της σύγκρουσης. Η αδυναμία αυτής της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι ότι δεν είναι γνωστή η χρονική διάρκεια της επαφής κατά τη σύγκρουση δύο οχημάτων. Παρ' όλα αυτά είναι γνωστό ότι δύο οχήματα κατά τη σύγκρουση είναι σε επαφή περίπου 200 msec. (Jones & Baum, 1978)

Τέλος, ως μελλοντική εργασία προτείνεται ο χωρισμός της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιήθηκε σε δύο μέρη, μία για κάθε όχημα και η κατάστρωση του μετώπου Pareto των βέλτιστων λύσεων.

Βιβλιογραφία

Annual Accident Report 2017. (2017).

- Brach, R. M. (1983). Impact Analysis of Two-Vehicle Collisions. *SAE Technical Paper* 830468.
- Brach, R. M., & Brach, M. . (2005). *Vehicle Acident Analysis and Reconstruction Methods*. Warrendale, Pennsylvania: SAE International.
- Das, S., & Redrouthu, B. (2014). Tyre modelling for rolling resistance, 61. Retrieved from http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/200040/200040.pdf
- Franck, H., & Franck, D. (2010). *Mathematical Methods for Accident Reconstruction*.
- Ishikawa, H. (1993). Impact model for accident reconstruction~Normal and tangential restitution coefficients. *SAE Technical Paper 930654*. https://doi.org/10.4271/930654
- Jones, I., & Baum, A. (1978). Research input for computer simulation of automobile collisions, volume IV. *Staged Collision Reconstructions*.
- Kubiak, P., Wozniak, M., Jablonski, R., Ozuna, G., & De La Fuente, P. (2014).
 Determination of Energy Deformation with using NHTSA Stiffness Coefficient.
 International Journal of Engineering and Innovative Technology, 4(4), 188–193.
 Retrieved from http://www.ijeit.com/Vol 4/Issue 4/IJEIT1412201410_28.pdf

Mchenry, B. G. (2001). The algorithms of crash, 1–37.

- McHenry, B., & McHenry, R. (1997). A reevaluation of the reference set of full scale crash tests. *Ricsac-97, 970961*, 1–18. https://doi.org/10.4271/970961
- Mchenry, R. R. (1975). A Comparison of Results Obtained With Different Analytical Techniques for Reconstruction of Highway Accidents. *Sae*. https://doi.org/10.4271/750893

Mchenry, R. R. (1976). User's Manual for the Crash Computer Program.

- Neades, J. G. J. (2011). (TEZ) Developments in Road Vehicle Crush Analysis for Forensic Collision Investigation, (March), 247.
- Neptune, J. a., & Flynn, J. E. (1994). A Method for Determining Accident Specific Crush Stiffness Coefficients. *SAE Technical Paper 940913*, (41 2). https://doi.org/10.4271/940913
- Neptune, J. a, & Flynn, J. E. (1998). SAE TECHNICAL A Method for Determining Crush Stiffness Coefficients from Offset Frontal and Side Crash Tests. *Engineering*, (724), 71–87. https://doi.org/10.4271/980024

Niehoff, P. (2005). The accuracy of energy-based crash reconstruction techniques using

event data recorder measurements.

Page CDC. (n.d.). Collision Deformation Classification Location of Damage, 1–6.

Reed, W. S. (1983). Automobile Accident Reconstruction by Dynamic Simulation, (2).

- Struble, J. D. (2017). Crush Energy and Stiffness in Side Impacts, 88–106. https://doi.org/10.4271/2017-01-1415
- Wikipedia. (2009). Euro-NCAP. *Philosophy, 100,* 1–2. Retrieved from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Euro_NCAP&oldid=854490775%22%0A
- Wikipedia. (2013). National Highway Traffic Safety Administration. Https://En.Wikipedia.Org/w/Index.Php?Title=National_Highway_Traffic_Safety_Ad ministration&oldid=862108532, 1–7. https://doi.org/10.1016/S0196-0644(97)70145-8

Παράρτημα Α – RICSAC Data

Τεστ 1

%% Recons put File RICSAC-Te %Vehicle	structio est-1 1 Defor	on Accid	lent Data Paramet	a In- ers	%% Vehicle Chevrolet Chevette 1900	1 Data %Manifacturer %Model Year	Name
11F	VDI			010	2000		
1.17	Ld [n	n]			2096	%Weight [Kg]	
0.36	Dd [n	n]			5.41	%Length[m]	
0.10 0	.14	0.18	0.26	0.31	1.96	%Width[m]	
0.38 C1	L-C6[m]	/ -			1.29	%a[m]	
62400.0)	A [N/m]			2.95	%Wheelbase[m]	
230000.0)	B [N/m]			1.57	%'Irack[m]	
					5054	%Inertia[Kg*m^2]	
o	0				2.51	%CgF'[m]	
%Vehicle 01R	2 Defoi VDI	rmation I	Paramet	ers	2.90	%CgR[m]	
2.88	Ld [n	n]			%% Vehicle	2 Data	
0.55	Dd [n	n]			Ford	%Manifacturer Name	
0.01 0	.30	0.27	0.30	0.23	Pinto	%Model	
0.10 CI	L-C6[m]	/ -			1900	Year	
24600.0)	A [N/m]			1 2 0 0		
460000.0	J	B [N/m]			1398	%Weight [Kg]	
	+ / a . 1 1	1 d a d a a a 🗖	N = + =		4.45	SLength[m]	
%% ACC1Q€	ent/Coll	LISION L	Jata		\bot · / \bot		
Tire-Road	a Fricti	lon Coei	_		1.17	ča[m] °uh selbess [m]	
0.87					2.39		
° Calliaia	Deeit				1.42	⁶ IIdCK[III]	
V1 [m]	JII POSILU Zi [m]		~ 1		2009	SINEICIA[KG^N Z]	
~T[III] 1		-30 00	9]		2.12	°CGF[III]	
-3.29 V2[m] V	0.30 72[m]				2.33	2CGK[III]	
	1 CO	PSIZ[De	9]				
0.00 -	-1.00	90.00					
Post Dos	nitiona						
V1[m] V	/1 [m]	DGT1 [De	ad				
_0 73 _	-0 30	_1 50	-91				
V2[m] V	72 [m]		ad				
2 20	0 76	105 00	-91				
2.29	0.70	100.00					
% ROllinc	n Resist	ance Fo	or Each M	Wheel			
0.01 0	.01	0.20	0.20				
0.01 0	.01	0.20	0.20				
	=						

Τεστ 2			
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-2 %Vehicle 1 Deformation Parameters 11F VDI	%% Vehicle Chevrolet Chevette 1900	1 Data %Manifacturer %Model Year	Name
1.92 Ld [m] 0.00 Dd [m] 0.01 0.06 0.09 0.18 0.30 0.42 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m]	2096 5.41 1.96 1.33 2.95 1.57 5054 2.51	<pre>%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CqF[m]</pre>	
%Vehicle 2 Deformation Parameters 02R VDI	2.90	%CgR[m]	
3.01 Ld [m] 0.35 Dd [m] 0.17 0.58 0.60 0.54 0.25 0.00 C1-C6[m] 24600.0 A [N/m] 460000 0 B [N/m]	<pre>% Vehicle Ford Pinto 1900 1397</pre>	2 Data %Manifacturer Name %Model Year %Weight [Kg]	
460000.0 B [N/m] %% Accident/Collision Data Tire-Road Friction Coef 0.87	4.45 1.71 1.19 2.39 1.42 2658	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kgtm^2]	
%Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] -3.41 2.59 -30.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 0.00 0.00 90.00	2.12	%CgF[m] %CgR[m]	
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 3.35 2.87 55.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 7.19 3.81 134.00			
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.50 0.02 0.20 0.20 0.02 0.02 0.20 0.20			

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΡΟΧΑΙΟΥ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟΥ ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τεστ 3		
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-3 %Vehicle 1 Deformation Parameters 12F VDI	%% Vehicle Ford Torino 1900	e 1 Data %Manifacturer Name %Model Year
0.76 Ld [m] 0.56 Dd [m] 0.05 0.05 0.04 0.04 0.05 0.06 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m]	2244 5.41 1.96 1.42 3.00 1.60 5413 2.51	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]
%Vehicle 2 Deformation Parameters 06B VDI	2.90	%CgR[m]
0.76 Ld [m] 0.13 Dd [m] 0.17 0.17 0.15 0.13 0.10 0.08 C1-C6[m] 68400 0 A [N/m]	%% Vehicle Ford Pinto 1900	e 2 Data %Manifacturer Name %Model Year
280000.0 B [N/m]	1415 4.45	%Weight [Kg] %Length[m]
%% Accident/Collision Data Tire-Road Friction Coef 0.87	1.71 0.95 2.39 1.42 2692	%Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2]
%Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 0.00 0.00 0.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 4.57 0.67 10.00	2.12 2.33	%CgF[m] %CgR[m]
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 33.95 0.61 -4.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 55.32 -1.95 -19.00		
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.09 0.09 0.01 0.01 0.10 0.10		

Τεστ 4		
%% Reconstruction Accident Data Input File	%% Vehicle	e 1 Data
RICSAC-Test-4	Ford	%Manifacturer Name
%Vehicle 1 Deformation Parameters	Torino	%Model
	1900	Year
1.05 La [m]	2259	%Weight [Kg]
0.41 Dd [m]	5.41	%Length[m]
0.16 0.20 0.25 0.32 0.38 0.46 C1-C6[m]	1.96	%Width[m]
62400.0 A [N/m]	1.42	
230000.0 B [N/m]	3.00	SwileeiDase[m]
	5447	SILACK[III] SIDertia[Katm^2]
	2 51	PCar[m]
%Vahiela 2 Deformation Parameters	2.90	%CaB[m]
	2.50	
	%% Vehicle	e 2 Data
1.06 Ld [m]	Ford	%Manifacturer Name
-0.23 Dd [m]	Pinto	%Model
0.91 0.81 0.74 0.61 0.50 0.38 C1-C6[m]	1900	Year
68400.0 A [N/m]		
280000.0 B [N/m]	1447	%Weight [Kg]
.,.	4.45	%Length[m]
%% Accident/Collision Data	1.71	%Width[m]
Tire Deed Fristian Coof	0.90	%a[m]
Tire-Road Friction Coer	2.39	%Wheelbase[m]
0.87	1.42	%Track[m]
	2752	<pre>%Inertia[Kg*m^2]</pre>
%Collision Positions	2.12	%CgF[m]
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg]	2.33	%CgR[m]
0.00 0.00 1.00		
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]		
5 00 1 04 10 00		
3.00 1.04 10.00		
0/Deet Deettiere		
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg]		
13.05 16.61 137.50		
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]		
19.48 19.05 88.00		
% ROlling Resistance For Each Wheel		
0.01 0.01 0.20 0.20		
0.01 0.01 0.20 0.20		

Τεστ 5		
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-5 %Vehicle 1 Deformation Parameters 12F VDI	%% Vehicle Ford ⁹ Torino 1900 3	1 Data %Manifacturer Name %Model Year
0.85 Ld [m] 0.52 Dd [m] 0.04 0.04 0.05 0.05 0.06 0.07 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m]	2086 5.41 1.96 1.42 3.00 1.60 5031 2.51	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]
%Vehicle 2 Deformation Parameters	2.90	%CgR[m]
1.35 Ld [m] -0.04 Dd [m] 0.91 0.93 0.80 0.58 0.34 0.15 C1-C6[m] 64100.0 A [N/m]	%% Vehicle Honda Civic 1900	2 Data %Manifacturer Name %Model Year
260000.0 B [N/m] %% Accident/Collision Data Tire-Road Friction Coef 0.87	1147 4.06 1.54 0.97 2.21 1.30 1484	<pre>%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2]</pre>
%Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 0.00 0.00 0.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 4.54 1.04 10.00	1.93 2.13	%CgF[m] %CgR[m]
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 73.64 0.00 3.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 17.34 11.89 282.00		
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.20 0.20 0.20 0.20 0.01 1.00		

Τεστ 6		
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-6 %Vehicle 1 Deformation Parameters	%% Vehicle Chevrolet Chevette 1900	1 Data %Manifacturer Name %Model Year
1.38 Ld [m] 0.25 Dd [m] 0.01 0.01 0.03 0.04 0.04 0.06 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m]	1950 5.41 1.96 1.29 2.84 1.57 4903 2.51	<pre>%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]</pre>
%Vehicle 2 Deformation Parameters 02R VDI	2.90	%CgR[m]
1.96 Ld [m] -0.08 Dd [m] 0.10 0.30 0.45 0.49 0.43 0.21 C1-C6[m] 24600.0 A [N/m]	%% Vehicle Volkswagen Rabbit 1900	<pre>2 Data %Manifacturer Name %Model Year</pre>
460000.0 B [N/m]	1190 4.45	%Weight [Kg] %Length[m]
%% Accident/Collision Data Tire-Road Friction Coef 0.87	1.71 1.01 2.39 1.40 2263	<pre>%Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2]</pre>
%Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 0.00 0.00 0.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 3.38 0.81 120.00	2.12 2.33	%CgF[m] %CgR[m]
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 18.29 3.35 15.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 6.10 6.40 242.00		
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.20 0.20 0.01 0.01 0.20 0.20		

Τεστ 7			
%% Reconstruction Accident Data Input File	%% Vehicle Chevrolet	1 Data %Man ⁺	ifacturer Name
RICSAC-Test-7	Chevette	%Mode	
%Vehicle 1 Deformation Parameters	1900	Year	-
11F VDI			
1.68 Ld [m]	1678	%Weight	[Ka]
0.10 Dd [m]	5 41	%Length[[lig]
	1 96	%Width[m	,, n]
	1 29	%a[m]	.]
62400.0 A [N/m]	2 84	%Wheelba	se[m]
230000.0 B [N/m]	1 57	& Track [m	
	4047	%Inertia	·] [Ka*m^2]
	2 51	%CaF[m]	
%Vahiela 2 Deformation Darameters	2.91	۶Cgr[m]	
%Venicie z Deformation Parameters	2.50	%CGI([III]	
O2R VDI	88 Vehicle	2 Data	
2.76 Ld [m]	Volkswagen	z Data	& Manifacturor
-0.22 Dd [m]	Name		onaniiiactaitti
0.00 0.28 0.45 0.53 0.54 0.20 C1-C6[m]	Rabbit	&Model	
24600 0 A [N/m]	1900	Year	
460000 P[N/m]	1900	1041	
	1184	%Weight	[Ka]
	4.45	%Length[ml
%% Accident/Collision Data	1.71	%Width[m	n]
Tire-Road Friction Coef	1.01	%a[m]	•]
0.87	2 39	%Wheelba	se[m]
	1.40	%Track[m	n]
% Collision Positions	1467	%Inertia	.] [Ka*m^2]
	2.12	%CaE[m]	
XI[m] YI[m] PSII[Deg]	2.33	%CaR[m]	
0.00 0.00 0.00	2.00	00910[]	
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]			
3.26 1.05 120.00			
%Post Positions			
25.76 5.55 16.50			
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]			
6.98 12.62 262.00			
% ROlling Resistance For Fach Wheel			
0.01 0.01 1.00 0.20			

Τεστ 8			
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-8 %Vehicle 1 Deformation Parameters 12F VDI	%% Vehicle Chevrolet Chevette 1900	1 Data %Manifacturer %Model Year	Name
1.85 Ld [m] 0.00 Dd [m] 0.07 0.09 0.00 0.00 0.00 0.00 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m]	2031 5.41 1.96 1.41 2.95 1.57 4899 2.51	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]	
%Vehicle 2 Deformation Parameters 03R VDI 2.15 Ld [m] 0.38 Dd [m] 0.16 0.21 0.23 0.15 0.11 0.02 C1-C6[m]	2.90 %% Vehicle Chevrolet Chevette	<pre>%CgR[m] 2 Data %Manifacturer %Model </pre>	Name
25100.0 A [N/m] 250000.0 B [N/m] %% Accident/Collision Data	1900 2136 5.41 1.96	Year %Weight [Kg] %Length[m] %Width[m]	
Tire-Road Friction Coef 0.87 %Collision Positions	1.40 2.84 1.57 5152 2.51	<pre>%a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]</pre>	
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] -3.32 0.98 0.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 0.00 0.58 90.00	2.90	%CgR[m]	
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] -0.15 3.35 46.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 1.98 6.40 141.00			
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.20 0.20 0.01 0.01 0.20 0.20			

%% Reconstruction Accident Data Input File	%% Vehicle	1 Data
RICSAC-Test-9	Honda	%Manifacturer Name
%Vehicle 1 Deformation Parameters	Civic	%Model
11F VDI	1900	Year
1.26 ld[m]	1000	
	1023	%Weight [Kg]
	4.06	SLengtn[m]
0.13 0.15 0.32 0.19 0.19 0.24 C1-C6[m]	1.54	
52800.0 A [N/m]	0.94	od [III] SWhoolbaso[m]
320000.0 B [N/m]	1 30	%WHEelDase[m] %Track[m]
	1323	%Inertia[Kg*m^2]
	1.93	%CaF[m]
%Vehicle 2 Deformation Parameters	2.13	%CaB[m]
		0.91.[]
	%% Vehicle	2 Data
1.38 La [m]	Ford	Manifacturer Name
1.73 Dd [m]	Torino	%Model
0.20 0.12 0.12 0.08 0.07 0.04 C1-C6[m]	1900	Year
25100.0 A [N/m]		
250000.0 B [N/m]	2222	%Weight [Kg]
	5.41	%Length[m]
%% Accident/Collision Data	1.96	%Width[m]
Tire-Boad Friction Coef	1.38	%a[m]
	3.00	%Wheelbase[m]
0.87	1.60	%Track[m]
	5359	%Inertia[Kg*m^2]
%Collision Positions	2.51	°CGF[m]
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg]	2.90	
0.00 0.00 0.00		
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]		
2.60 -1.80 90.00		
% Pact Desitions		
1.22 10.82 104.00		
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]		
-1.52 15.09 152.00		
% ROlling Resistance For Each Wheel		
0.20 0.20 0.01 0.01		
0 10 0 01 0 20 0 20		
0.10 0.01 0.20 0.20	l	

Τεστ 10		
%% Reconstruction Accident Data Input File	%% Vehicle	1 Data
RICSAC-Test-10	Honda	%Manifacturer Name
%Vehicle 1 Deformation Parameters	Civic	%Model
	1900	Year
	1010	
	1046	%Weight [Kg]
-0.07 Da [m]	4.06	%Lengtn[m]
0.18 0.26 0.36 0.23 0.18 0.23 C1-C6[m]	1.54	«Width[m]
52800.0 A [N/m]	2 21	od[III] %Whoolbaso[m]
320000.0 B [N/m]	1 30	%WHEELDASE[m] %Track[m]
	1352	%Inertia[Ka*m^2]
	1.93	%CaF[m]
%Vehicle 2 Deformation Parameters	2.13	%CgR[m]
		5
1.25 Id [m]	%% Vehicle	2 Data
1.55 LU [III]	Ford	%Manifacturer Name
	Torino	%Model
0.23 0.17 0.15 0.13 0.11 0.01 C1-C6[m]	1900	Year
25100.0 A [N/m]		
250000.0 B [N/m]	2141	%Weight [Kg]
	5.41	%Length[m]
%% Accident/Collision Data	1.96	%Width[m]
Tire-Road Friction Coef	1.40	
0.87	3.00	%Wheelbase[m]
0.07	5162	SILdCK[III] STRORtio[Katm^2]
%Collicion Desitions	2 51	% INCLUZA [NG N Z] % CaF[m]
	2.90	%CaB[m]
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg]	2.50	0091([m]
0.00 0.00 0.00		
X2[m] Y2[m] PSI2[Deg]		
2.59 -1.80 90.00		
%Rest Positions		
X1[m] Y1[m] PSI1[Deg]		
1 52 13 11 87 00		
$V_2[m] = V_2[m] = P_{12}[D_{03}]$		
Λ_{2}		
0.00 30.33 120.30		
% ROIling Resistance For Each Wheel		
0.20 0.20 0.20 0.01		
0.10 0.10 0.01 0.20		

Τεστ 11

%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-11 %Vehicle 1 Deformation Parameters 12F VDI	%% Vehicle Chevrolet Vega 1900	1 Data %Manifacturer Nam %Model Year	ne
0.83 Ld [m] -0.32 Dd [m] 0.56 0.51 0.47 0.43 0.38 0.32 C1-C6[m] 45400.0 A [N/m] 300000.0 B [N/m]	1379 4.45 1.71 1.25 2.46 1.40 2624 2.12	<pre>%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m]</pre>	
%Vehicle 2 Deformation Parameters 12F VDI 0.82 Ld [m] -0.33 Dd [m] 0.75 0.67 0.58 0.47 0.36 0.28 C1-C6[m]	2.12 2.33 %% Vehicle Ford Torino 1900	<pre>%Cgr[m] %CgR[m] 2 Data %Manifacturer Name %Model Year</pre>	
62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m] %% Accident/Collision Data Tire-Road Friction Coef 0.87	2200 5.41 1.96 1.38 3.00 1.60	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m]	
%Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 4.79 -1.22 171.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 0.00 0.00 0.00	5305 2.51 2.90	<pre>%Inertia[Kg*m^2] %CgF[m] %CgR[m]</pre>	
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 7.80 -1.95 170.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 2.62 0.12 0.00			
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.10 0.10 0.01 0.01 0.20 0.20			

Τεστ 12			
%% Reconstruction Accident Data Input File RICSAC-Test-12 %Vehicle 1 Deformation Parameters	%% Vehicle Chevrolet Vega 1900	e 1 Data %Manifacturer Nar %Model Year	ne
12F VDI 0.81 Ld [m] 0.07 Dd [m] 0.98 0.88 0.75 0.66 0.50 0.36 C1-C6[m] 45400.0 A [N/m] 300000.0 B [N/m]	1420 4.45 1.71 1.20 2.46 1.40 2700	%Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m] %Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2]	
%Vehicle 2 Deformation Parameters	2.12 2.33	%CgF[m] %CgR[m]	
12F VDI 0.72 Ld [m] -0.27 Dd [m] 1.00 0.84 0.73 0.60 0.49 0.38 C1-C6[m] 62400.0 A [N/m] 230000.0 B [N/m] %% Accident/Collision Data Tire-Road Eriction Coef	%% Vehicle Ford Torino 1900 2046 5.41 1.96 1.41	<pre>% 2 Data %Manifacturer Name %Model Year %Weight [Kg] %Length[m] %Width[m] %a[m]</pre>	
0.87 %Collision Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 4.79 -1.22 171.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 0.00 0.00 0.00	3.00 1.60 4925 2.51 2.90	%Wheelbase[m] %Track[m] %Inertia[Kg*m^2] %CgF[m] %CgR[m]	
%Rest Positions X1[m] Y1[m] PSI1[Deg] 6.80 -1.68 118.00 X2[m] Y2[m] PSI2[Deg] 2.07 0.79 -12.00			
% ROlling Resistance For Each Wheel 0.01 0.01 0.20 0.20 0.01 0.01 0.20 0.20			

Παράρτημα Β – Ρυθμίσεις γενετικού αλγορίθμου

Οι ρυθμίσεις στην οικογένεια "Default properties", αναφέρονται στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του γενετικού αλγορίθμου του λογισμικού Matlab.

Set properties	
Display	'iter'
MaxGenerations	2000
PopulationSize	100
UseParallel	1
Default properties	
ConstraintTolerance	0.00
CreationFcn	[function_handle]
CrossoverFcn	[function_handle]
CrossoverFraction	0.80
EliteCount	'0.05*PopulationSize'
FitnessLimit	-Inf
FitnessScalingFcn	@fitscalingrank
FunctionTolerance	0.00
HybridFcn	[]
InitialPopulationMatrix	[]
InitialPopulationRange	[]
InitialScoresMatrix	[]
MaxStallGenerations	50.00
MaxStallTime	Inf
MaxTime	Inf
MutationFcn	{1X3 cell}
NonlinearConstraintAlgorithm	'auglag'
OutputFcn	[]
PlotFcn	[]
PopulationType	'doubleVector'
SelectionFcn	[function_handle]
UseVectorized	0