



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ**



Κοκκόλης Δημήτριος

Επιβλέπων: Στέργιος Μαυρομάτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

Copyright © Δημήτρης Κοκκόλης, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Copyright © Δημήτρης Κοκκόλης, 2025

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing, and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author. Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization. (L. 5343/1932, Article 202).

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα μιας απαιτητικής αλλά και εποικοδομητικής πορείας προπτυχιακών σπουδών. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Στέργιο Μαυρομάτη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. που μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αλλά και φλέγον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ακλόνητη εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βασίλη Ματράγκο, Υποψήφιο Διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την βοήθεια του στο σκέλος της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων και των αποτελεσμάτων τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη, την υπομονή και τη συμπαράσταση τους σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα σε αυτό το ταξίδι.

ΤΙΤΛΟΣ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την κρισιμότητα διαφόρων παραμέτρων στη διαδικασία ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων με απώτερο στόχο την κατανόηση της επιρροής τους για διαφορετικά τυπικά σενάρια. Επιπλέον, εξετάζεται η δυνατότητα προτυποποίησης της διαδικασίας ως προς τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία της ανακατασκευής. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αρχικά, παρατέθηκαν οι διάφορες μέθοδοι αποτύπωσης και συλλογής δεδομένων που αξιοποιούνται τόσο στην Ελλάδα, όσο και διεθνώς. Στη συνέχεια, αναλύθηκε το σκέλος της ανακατασκευής ενός ατυχήματος, δηλαδή, η διαδικασία επεξεργασίας των συλλεχθέντων δεδομένων από τη σκηνή του ατυχήματος, με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό κρίσιμων παραμέτρων. Τέτοιες παράμετροι μεταξύ άλλων είναι η ταχύτητα πρόσκρουσης, η γωνία πλαγιολίσθησης, το μέγεθος της παραμόρφωσης κ.α. Επιλέχθηκαν επτά στον αριθμό τυπικά σενάρια οδικών ατυχημάτων για να ερευνηθεί ο βέλτιστος τρόπος ανακατασκευής τους με βάση τις ιδιαιτερότητες της κάθε περίπτωσης.

Τα σενάρια αυτά είναι τα εξής :

- Μετωπική σύγκρουση
- Πλαγιομετωπική σύγκρουση
- Νωτομετωπική σύγκρουση
- Εκτροπή οχήματος εκ της οδού
- Ανατροπή οχήματος
- Σύγκρουση οχήματος με πεζό
- Σύγκρουση οχήματος σε σταθερό αντικείμενο

Τέλος, με βάση τη δημιουργία μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης διερευνήθηκε η δυνατότητα προσδιορισμού της ταχύτητας πρόσκρουσης θεωρώντας μεταξύ άλλων γνωστή την παραμόρφωση του οχήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ουσιαστική συμβολή στη σύνταξη ολοκληρωμένων οδηγιών **ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων.**

TITLE: INVESTIGATION OF CRITICAL PARAMETERS IN THE ROAD ACCIDENT RECONSTRUCTION PROCESS

Abstract

This thesis investigates the criticality of various parameters in the field of road accident reconstruction, with the ultimate goal of understanding their influence across different typical scenarios. In addition, it examines the potential for standardization in determining key parameters during the accident reconstruction process.

To achieve these objectives, the various methods of data recording and collection used both in Greece and internationally were first presented. Subsequently, the reconstruction phase of an accident was analyzed — that is, the process of processing the data collected from the accident scene in order to determine the critical parameters of road accidents. Such parameters include, among others, the impact speed, the yaw angle, etc.

Seven representative road accident scenarios were selected to investigate the optimal reconstruction approach based on the specific characteristics of each case. These scenarios are as follows:

- Head-on collision
- Side-impact collision
- Rear-end collision
- Run-off-road accident
- Vehicle rollover
- Collision between a vehicle and a pedestrian
- Collision of a vehicle with a fixed object

Finally, based on the development of linear regression models, the possibility of determining the impact speed was investigated, assuming, among other factors, that the vehicle deformation is known.

This thesis constitutes a substantial contribution to the development of comprehensive guidelines for **road accident reconstruction**.

Περιεχόμενα

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	11
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	12
1.3.1 Στατιστικά οδικών ατυχημάτων στην Ελλάδα	12
1.3.2 Στατιστικά οδικών ατυχημάτων διεθνώς	14
1.4 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	16
1.4.1 Γιατί αφορά τον πολιτικό μηχανικό?	16
1.4.2 Οδηγός	18
1.4.3 Όχημα.....	18
1.4.4 Οδός	20
1.4.5 Ασφαλές Σύστημα και Εύκολα Κατανοητή Οδός: Αρχές Ανθρωποκεντρικού Σχεδιασμού	21
1.4.6 Συμπεράσματα	22
1.5 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	23
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	24
2.1 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	24
2.1.1 Μέθοδοι αποτύπωσης	24
2.1.2 Συμπεράσματα	27
2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	28
2.2.1 Εισαγωγή	28
2.2.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα	28
2.2.3 Γωνία πλαγιοδρόμησης	33
2.2.4 Δυναμική ανάλυση και διατήρηση ενέργειας.....	40
2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (ΔV).....	44
2.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία	44
2.3.2 Ιστορική εξέλιξη της μεθόδου	45
2.3.3 Μέθοδος CRASH3	46
2.4 ΘΕΩΡΙΑ ΩΘΗΣΗΣ-ΟΡΜΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΜΑΖΩΝ	48
2.4.1 Εισαγωγικά στοιχεία	48
2.4.2 Μοντέλο Brach	49
2.4.3 Πλευρικές συγκρούσεις και συντελεστής αναλογίας ώθησης.....	51

2.5 ΙΧΝΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ	51
2.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία	51
2.5.2 Τυπολογία	52
2.6 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ-ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	54
2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΜΑΖΑΣ.....	56
2.8 ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	61
2.8.1 Εισαγωγικά στοιχεία	61
2.8.2 Event data recorder (EDR)	62
2.9 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΤΡΟΠΗ	63
2.9.1 Εισαγωγή.....	63
2.9.2 Φάσεις οδικού ατυχήματος με ανατροπή	64
2.9.3 Στάδια ανακατασκευής οδικού ατυχήματος με ανατροπή.....	65
2.9.4 Απλοποιημένη Θεώρηση Ατυχήματος με Ανατροπή	69
2.10 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΖΟ	71
2.10.1 Εισαγωγή.....	71
2.10.2 Ανάλυση τόπου ατυχήματος	72
2.10.3 Μέθοδοι ανακατασκευής σύγκρουσης οχήματος-πεζού	74
2.11 ΣΥΝΟΨΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	81
3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	82
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	82
3.2 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ	82
3.2.1 Μετωπική σύγκρουση	82
3.2.2 Πλαγιομετωπική σύγκρουση.....	83
3.2.3 Νωτομετωπική σύγκρουση	83
3.2.4 Εκτροπή οχήματος εκ της οδού.....	83
3.2.5 Ανατροπή οχήματος.....	84
3.2.6 Σύγκρουση οχήματος με πεζό	84
3.2.7 Σύγκρουση οχήματος σε σταθερό αντικείμενο.....	84
3.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	85
3.4 ΤΥΠΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	87
3.4.1 1 ^ο Τυπικό Παράδειγμα: διερεύνηση δυνατότητας ακινητοποίησης οχήματος προ πρόσκρουσης σε άλλο	87
3.4.2 2 ^ο Τυπικό Παράδειγμα: προσδιορισμός ταχύτητας πρόσκρουσης σε εκτροπή οχήματος.....	90
3.4.3 3 ^ο Τυπικό Παράδειγμα: προσδιορισμός ταχύτητας ανατροπής οχήματος.....	92

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	94
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	94
4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	94
4.3 ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ (MULTIPLE LINEAR REGRESSION – MLR)	94
4.4 ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ	95
4.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	95
4.5.1 Συντελεστές β _i	96
4.5.2 Έλεγχος t-test	96
4.5.3 Τιμή σημαντικότητας p-value	96
4.5.4 Μέτρα προσαρμογής	97
4.5.5 Κριτήριο καλής προσαρμογής R ² – Adjusted R ²	98
4.5.6 Εκτιμητής Διόγκωσης της Διακύμανσης (Variance Inflation Factor-VIF).....	98
5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	99
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	99
5.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	100
5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	100
6 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ	104
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	104
6.2 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ FORD	104
6.2.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	104
6.2.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	105
6.2.3 Τελική μορφή μοντέλου	106
6.2.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF	106
6.3 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ TOYOTA	107
6.3.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	107
6.3.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	108
6.3.3 Τελική μορφή μοντέλου	108
6.3.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF	109
6.4 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ CHEVROLET	109
6.4.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	109
6.4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	110
6.4.3 Τελική μορφή μοντέλου	110
6.4.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF	111
6.5 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ HONDA.....	111

6.5.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	111
6.5.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	112
6.5.3 Τελική μορφή μοντέλου.....	112
6.5.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF	113
6.6 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ HYUNDAI.....	113
6.6.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης	113
6.6.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	114
6.6.3 Τελική μορφή μοντέλου.....	114
6.6.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF	115
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	115
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	115
7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Διεθνώς περίπου 1,2 εκατομμύρια άνθρωποι αποβιώνουν ετησίως σε οδικά δυστυχήματα, αριθμός που αυξάνεται εκθετικά αν ληφθούν υπόψιν τα οδικά ατυχήματα με τραυματισμό (WHO, 2023). Οι θάνατοι από οδικά ατυχήματα αποτελούν μία από τις πιο τραγικές συνέπειες της οδικής κυκλοφορίας, προκαλώντας βαθύ ανθρώπινο και κοινωνικό πόνο. Κάθε θάνατος στον δρόμο δεν είναι απλώς ένας αριθμός στα στατιστικά, αλλά μια απώλεια που αφήνει πίσω της οικογένειες, φίλους και ολόκληρες κοινότητες σε θλίψη. Οι κοινωνικές συνέπειες είναι τεράστιες, καθώς οι οικογένειες συχνά αντιμετωπίζουν ψυχολογικά τραύματα, οικονομική ανασφάλεια και κοινωνική απομόνωση. Παράλληλα, τα κράτη και η κοινωνία εν γένει επιβαρύνονται με σημαντικό οικονομικό κόστος, τόσο λόγω της ιατρικής περίθαλψης και της απώλειας παραγωγικότητας, όσο και εξαιτίας της ανάγκης για ενίσχυση των μηχανισμών πρόληψης και αποκατάστασης. Η μείωση των θυμάτων των οδικών ατυχημάτων αποτελεί, επομένως, όχι μόνο ζήτημα οδικής ασφάλειας, αλλά και ουσιαστική κοινωνική προτεραιότητα. Η οδική ασφάλεια έχει καθοριστική σημασία, καθώς στοχεύει ακριβώς στην πρόληψη των οδικών ατυχημάτων και στη μείωση των θυμάτων και των συνεπειών τους. Μέσα από τη συστηματική μελέτη των παραγόντων που οδηγούν στα ατυχήματα —όπως η συμπεριφορά των οδηγών, οι οδικές υποδομές, τα οχήματα και οι περιβαλλοντικές συνθήκες— επιδιώκεται η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών πρόληψης και παρέμβασης.

Η οδική ασφάλεια αποτελεί αυτόνομο επιστημονικό πεδίο, το οποίο συνδυάζει γνώσεις από την μηχανική, τη φυσική, τα μαθηματικά, την ψυχολογία, την ιατρική, την κοινωνιολογία και την πολιτική των μεταφορών. Με επιστημονικές μεθόδους, έρευνες και στατιστική ανάλυση, μελετώνται οι αιτίες των ατυχημάτων και προτείνονται τεκμηριωμένα μέτρα για τη βελτίωση της ασφάλειας στους δρόμους — από τον σχεδιασμό ασφαλέστερων οδών μέχρι την εκπαίδευση των οδηγών και την εφαρμογή αποτελεσματικής νομοθεσίας. Έτσι, η οδική ασφάλεια δεν είναι απλώς ζήτημα συμπεριφοράς, αλλά μια ολοκληρωμένη επιστήμη ζωτικής σημασίας για την κοινωνία.

Η ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων παίζει κομβικό ρόλο στο πλαίσιο της οδικής ασφάλειας, καθώς συμβάλλει στην εις βάθος κατανόηση των μηχανισμών που οδήγησαν σε ένα συμβάν και, κατ' επέκταση, στην πρόληψη παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον. Μέσα από τη λεπτομερή ανάλυση παραμέτρων όπως η ταχύτητα, η τροχιά των οχημάτων, οι συνθήκες οδοστρώματος, η ορατότητα και η ανθρώπινη αντίδραση, οι ειδικοί μπορούν να αναπαραστήσουν το ατύχημα και να εντοπίσουν τα κρίσιμα αίτια που το προκάλεσαν.

Η ανακατασκευή δεν έχει μόνο δικαστική αξία —όπως η απόδοση ευθυνών— αλλά κυρίως επιστημονική και εκπαιδευτική. Τα ευρήματά της χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των υποδομών, την αναθεώρηση κανονισμών, την ανάπτυξη προτύπων ασφάλειας οχημάτων και τη διαμόρφωση πολιτικών πρόληψης. Επιπλέον, αποτελεί σημαντικό εργαλείο στην έρευνα οδικής ασφάλειας, καθώς παρέχει πραγματικά

δεδομένα που βοηθούν στη βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης ατυχημάτων και της κατανόησης της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο οδικό περιβάλλον. Συνολικά, η ανακατασκευή λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ της θεωρητικής γνώσης και της πρακτικής εφαρμογής για ασφαλέστερους δρόμους.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση και αξιολόγηση των μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων, στα οποία εμπλέκεται ένα ή περισσότερα οχήματα. Τα υπό εξέταση ατυχήματα περιλαμβάνουν περιπτώσεις σύγκρουσης (μετωπικής, νωτομετωπικής ή πλευρικής), εκτροπής του οχήματος από την οδό (με ή χωρίς ανατροπή), καθώς και πρόσκρουσης σε πεζό ή σταθερό αντικείμενο.

Στόχος είναι η ανάλυση της δυνατότητας αξιοποίησης κρίσιμων στοιχείων, όπως για παράδειγμα τα ίχνη πέδησης και ολίσθησης των ελαστικών στο οδόστρωμα, τα οποία αποτελούν θεμελιώδη αποδεικτικά δεδομένα για όλες τις μεθόδους ανακατασκευής. Μέσα από τη συγκριτική μελέτη των διαθέσιμων μεθόδων, επιδιώκεται η εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με την αποδοτικότητά τους, καθώς και η πρόταση τρόπων βελτίωσής τους, ώστε να ενισχυθεί η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων — τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποιοτικό επίπεδο.

Τέλος, μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, διερευνάται η δυνατότητα εκτίμησης της πλέον κρίσιμης παραμέτρου στην διαδικασία ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων, αυτή της ταχύτητας πρόσκρουσης.

1.3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Στα εδάφια που ακολουθούν, παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά στοιχεία οδικών ατυχημάτων, τα οποία αναδεικνύουν τη σημασία της περαιτέρω διερεύνησής τους, με στόχο τη σημαντική μείωση της συχνότητάς τους. Η βελτιστοποίηση των μεθόδων ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων συμβάλλει ουσιαστικά στην ακριβέστερη ανίχνευση και κατανόηση των αιτιών που τα προκάλεσαν, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη λήψη στοχευμένων και αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης.

1.3.1 Στατιστικά οδικών ατυχημάτων στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ), εντός των ελληνικών συνόρων το έτος 2022 καταγράφηκαν 10.487 οδικά ατυχήματα που είχαν ως αποτέλεσμα τον τραυματισμό ή τον θάνατο ατόμων. Συνολικά, κατά το ίδιο έτος 654 άτομα έχασαν τη ζωή τους, εκ των οποίων το 70,9% αφορούσε οδηγούς

οχημάτων. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι τύποι συγκρούσεων και ο αριθμός τους για το έτος 2021.

Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση των ατυχημάτων, η «σύγκρουση μεταξύ κινούμενων οχημάτων» κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό, με 62,4% του συνόλου, ενώ ο κυριότερος τύπος σύγκρουσης είναι η «πλαγιομετωπική», με ποσοστό 40,5%. Η δεύτερη σημαντικότερη κατηγορία αφορά την «παράσυρση πεζού ή ζώου» (15,2%), ενώ ακολουθεί η «εκτροπή ή ανατροπή οχήματος» (13,3%).

Αναφορικά με τους νεκρούς, η κατηγορία «σύγκρουση μεταξύ κινούμενων οχημάτων» παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό, 35,6% (233 νεκροί), και ακολουθεί η «εκτροπή/ανατροπή οχήματος» με 27,1% (177 νεκροί). Σε επίπεδο τύπου σύγκρουσης, ο μεγαλύτερος αριθμός νεκρών καταγράφεται στην «παράσυρση πεζού», με 114 νεκρούς (17,4% του συνόλου), ενώ ακολουθεί η «πλαγιομετωπική σύγκρουση», με 112 νεκρούς (17,1%). Τα παραπάνω στοιχεία συνοψίζονται και αποτυπώνονται στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί.

Περιγραφή κατηγορίας και τύπου πρώτης σύγκρουσης		Ατυχήματα	%	Νεκροί	%
Γενικό σύνολο		10.487	100,0	654	100,0
Σύγκρουση μεταξύ κινούμενων οχημάτων (Σύνολο)		6.547	62,4	233	35,6
Σύγκρουση μεταξύ κινούμενων οχημάτων	Μετωπική	419	4,0	61	9,3
	Πλαγιομετωπική	4.245	40,5	112	17,1
	Πλάγια	944	9,0	21	3,2
	Νωτομετωπική (από πίσω)	935	8,9	37	5,7
	Σύγκρουση με τρένο	4	0,0	2	0,3
Πρόσκρουση οχήματος (Σύνολο)		846	8,1	126	19,3
Πρόσκρουση οχήματος σε	Σταθμευμένο όχημα	173	1,6	6	0,9
	Όχημα που πραγματοποιεί στάση	87	0,8	6	0,9
	Όχημα που πραγματοποιεί διακοπή πορείας	47	0,4	1	0,2
	Στύλο ή δένδρο	216	2,1	55	8,4
	Κτίσμα ή άλλο σταθερό αντικείμενο	323	3,1	58	8,9
Παράσυρση (Σύνολο)		1.590	15,2	116	17,7
Παράσυρση	Πεζού	1.561	14,9	114	17,4
	Ζώου	29	0,3	2	0,3
Εκτροπή/Ανατροπή (Σύνολο)		1.391	13,3	177	27,1
Εκτροπή / Ανατροπή	Εκτροπή στο αντίθετο ρεύμα	37	0,4	6	0,9
	Εκτροπή προς τα δεξιά	533	5,1	53	8,1
	Εκτροπή προς τα αριστερά	303	2,9	52	8,0
	Ανατροπή στην οδό	390	3,7	27	4,1
	Ανατροπή εκτός οδού	127	1,2	39	6,0
	Πυρκαγιά	1	0,0	0	0,0
Άλλο		113	1,1	2	0,3

Σημείωση: Τυχόν διαφορές στα σύνολα του πίνακα οφείλονται σε στρογγυλοποιήσεις

Πίνακας 1.1 : Οδικά ατυχήματα και νεκροί ανά κατηγορία και τύπο σύγκρουσης (ΕΛΣΤΑΤ, 2022)

1.3.2 Στατιστικά οδικών ατυχημάτων διεθνώς

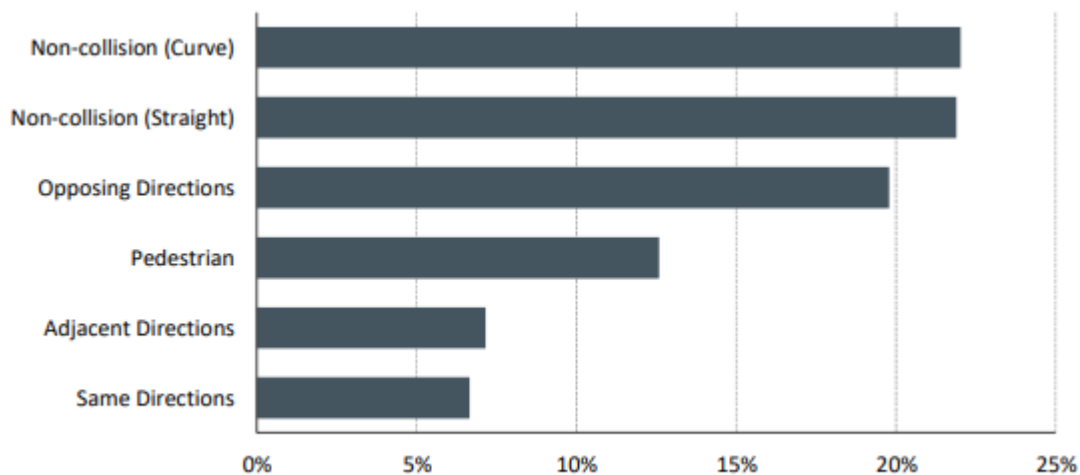
Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία οδικών ατυχημάτων που καταγράφηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής για το έτος 2023 (nsc, 2025), οι θάνατοι που σχετίζονται με οδικά ατυχήματα οφείλονται συχνότερα σε συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων, σε σύγκριση με οποιονδήποτε άλλο τύπο συμβάντος. Παρά το γεγονός αυτό, τα ατυχήματα αυτής της κατηγορίας αντιπροσώπευαν λιγότερο από το ήμισυ του συνολικού αριθμού θανάτων (43%). Οι συγκρούσεις μεταξύ οχήματος και σταθερού αντικειμένου αποτέλεσαν τη δεύτερη συχνότερη κατηγορία, με ποσοστό άνω του 26% των θανάτων, ενώ ακολούθησαν τα ατυχήματα με παράσυρση πεζών και τα ατυχήματα χωρίς σύγκρουση, όπως οι εκτροπές και οι ανατροπές οχημάτων.

Παρότι οι συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων αντιστοιχούσαν σε λιγότερο από το ήμισυ των θανατηφόρων οδικών ατυχημάτων, ο συγκεκριμένος τύπος ατυχήματος συγκέντρωσε το 79% των τραυματισμών, το 74% των ατυχημάτων με τραυματισμούς και το 72% του συνολικού αριθμού συμβάντων. Αντίθετα, τα ατυχήματα με εμπλοκή ενός μόνο οχήματος — τα οποία περιλαμβάνουν συγκρούσεις με σταθερά αντικείμενα, παρασύρσεις πεζών καθώς και ατυχήματα χωρίς σύγκρουση — παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερα ποσοστά θανατηφόρων περιστατικών σε σχέση με τις λιγότερο σοβαρές κατηγορίες ατυχημάτων. Συνολικά, οι τρεις αυτές κατηγορίες ατυχημάτων αντιστοιχούσαν στο 53% των θανάτων και στο 53% των θανατηφόρων ατυχημάτων, ενώ συνέβαλαν μόλις κατά 25% ή λιγότερο στους τραυματισμούς, στα ατυχήματα με τραυματισμούς και στο σύνολο των καταγεγραμμένων ατυχημάτων. Όσον αφορά τις συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων, οι συγκρούσεις υπό γωνία κατέγραψαν τον υψηλότερο αριθμό θανάτων, με περίπου 8.700 νεκρούς το 2023, αποτελώντας την πλέον θανατηφόρα υποκατηγορία ατυχημάτων σύγκρουσης.

Επιπλέον, σε έρευνα του Γραφείου Οικονομικών Ερευνών Υποδομών και Μεταφορών της κυβέρνησης της Αυστραλίας το έτος 2023, εξήχθησαν κάποια ιδιαίτερα ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία όσον αφορά τα τροχαία ατυχήματα διαφόρων κατηγοριών. Οι θάνατοι που προήλθαν από οδικά ατυχήματα στα οποία εμπλεκόταν ένα όχημα είναι περισσότεροι από αυτούς στα οποία εμπλεκόνταν περισσότερα οχήματα. Πιο συγκεκριμένα, την πενταετία 2017-2021 απεβίωσαν κατά μέσο όρο ανά έτος 653 άτομα από οδικά δυστυχήματα με ένα όχημα εμπλεκόμενο σε σύνολο 1154 θανάτων κατά μέσο όρο ετησίως. Επίσης, επιμερίζοντας τις παραπάνω κατηγορίες ακόμα περισσότερο, προκύπτει ότι τα οδικά ατυχήματα εκτροπής από την οδό είναι τα πιο θανατηφόρα. Όσον αφορά τη γεωμετρία της οδού, τα ατυχήματα κατανέμονται σχεδόν ισομερώς μεταξύ εκείνων που συμβαίνουν σε καμπύλα τμήματα και εκείνων που λαμβάνουν χώρα σε ευθύγραμμα τμήματα. Το συνολικό τους ποσοστό ανέρχεται περίπου στο 44%, ενώ ακολουθούν οι μετωπικές συγκρούσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστό περίπου 20%.

Σε άλλη έρευνα (Andry Rakotonirainy et al.,2014) στο Queensland της Αυστραλίας, αναδεικνύεται η αυξημένη επικινδυνότητα των καμπύλων στα υπό εξέταση οδικά τμήματα. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι το 63,44% των θανατηφόρων οδικών ατυχημάτων στο Queensland έλαβαν χώρα σε καμπύλα τμήματα (Queensland Transport, 2006). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν σε ατυχήματα σε καμπύλα τμήματα οδών είναι η υπερβολική ταχύτητα, η

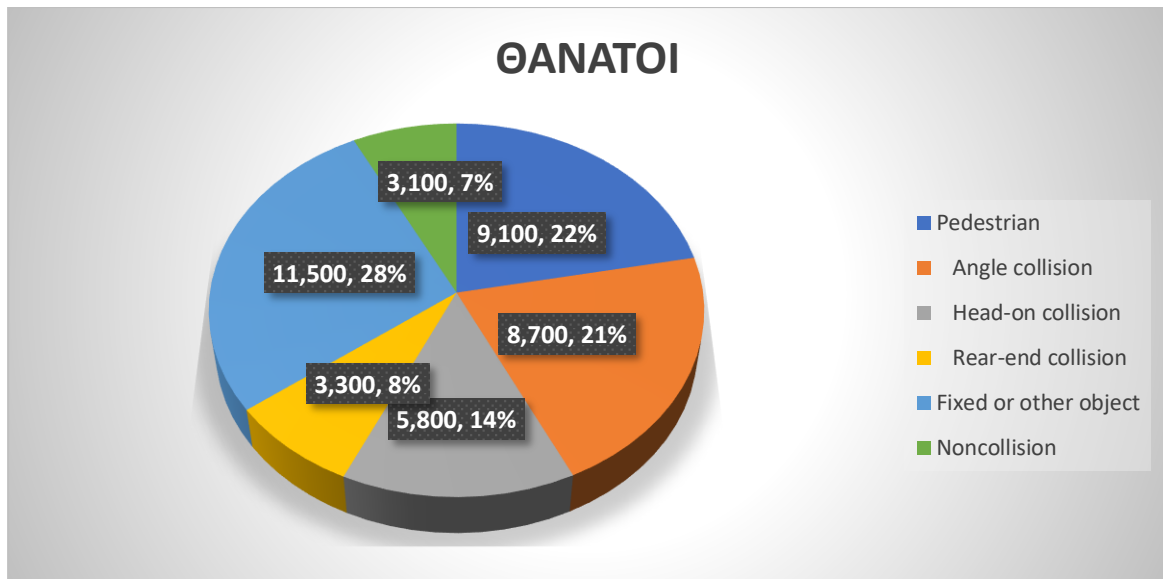
γεωμετρία της οδού και η λανθασμένη εκτίμηση του οδηγού. Άλλοι παράγοντες περιλαμβάνουν την κατάσταση του οδοστρώματος(υγρό-στεγνό), την οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ, την κατάσταση των ελαστικών ή του συστήματος πέδησης, την κόπωση ή την απόσπαση της προσοχής του οδηγού και την ανεπάρκεια ορατότητας. Στο Διάγραμμα 1.1 απεικονίζεται η ποσοστιαία κατανομή των θανατηφόρων ατυχημάτων στην Αυστραλία για την πενταετία 2017-2021 ενώ στα διαγράμματα 1.2 και 1.3 αποτυπώνονται τα οδικά ατυχήματα και οι θάνατοι στις Η.Π.Α. ταξινομημένα κατά είδος ατυχήματος.



Διάγραμμα 1.1 : Ποσοστό θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων στην Αυστραλία ταξινομημένα κατά το είδος τους, 2017-2021 (BITRE, 2023)



Διάγραμμα 1.2 : Αριθμός και ποσοστό οδικών ατυχημάτων στις Η.Π.Α. το 2023 ταξινομημένων κατά τύπο ατυχήματος.



Διάγραμμα 1.3 : Αριθμός και ποσοστό θανάτων στις Η.Π.Α. το 2023 ταξινομημένα ανά κατηγορία οδικού ατυχήματος.

1.4 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

1.4.1 Γιατί αφορά τον πολιτικό μηχανικό?

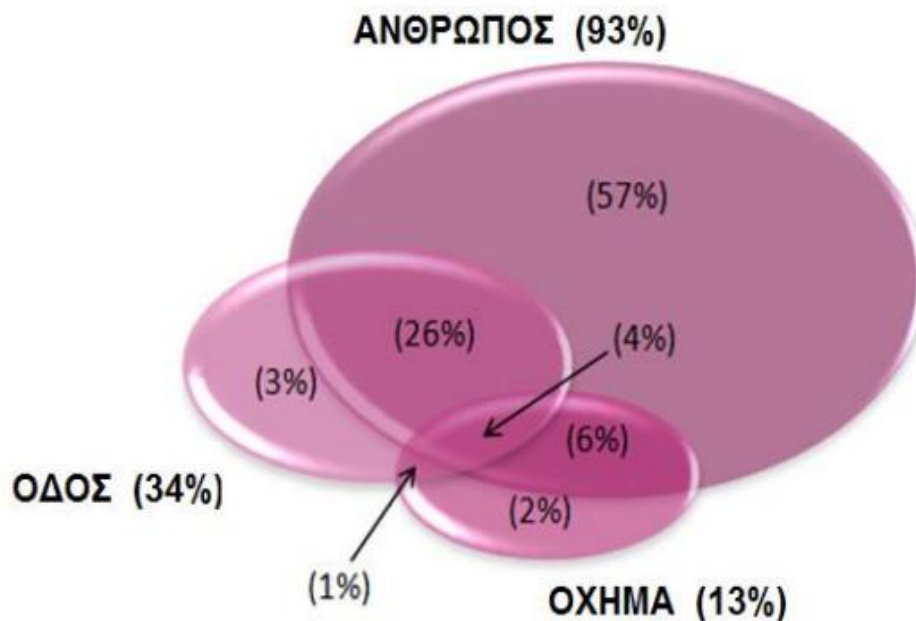
Η υπαιτιότητα ενός οδικού ατυχήματος, όπως είναι γνωστό, μπορεί να αποδοθεί σε έναν από τους τρεις παρακάτω παράγοντες ή σε συνδυασμό αυτών:

Χρήστης οδού

Όχημα

Οδός

Στο σχήμα 1.1 φαίνονται τα ποσοστά υπαιτιότητας των παραπάνω στην πρόκληση οδικών ατυχημάτων.



Σχήμα 1.1 : Ποσοστά υπαιτιότητας ανθρώπινου παράγοντα, οδού, οχήματος στην πρόκληση οδικών ατυχημάτων (Treat et. al., 1979)

Ο πολιτικός μηχανικός, και ειδικότερα ο συγκοινωνιολόγος μηχανικός, συνδέεται άρρηκτα με το αντικείμενο της ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων, καθώς διαθέτει την απαραίτητη τεχνική γνώση και μεθοδολογική κατάρτιση για την ανάλυση των φυσικών, γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων που επηρεάζουν τον μηχανισμό ενός ατυχήματος. Η διαδικασία ανακατασκευής δεν αποτελεί απλώς μια διερεύνηση των συνθηκών πρόσκρουσης, αλλά απαιτεί κατανόηση της δυναμικής του οχήματος, των χαρακτηριστικών της οδού και της αλληλεπίδρασης με τον ανθρώπινο παράγοντα, στοιχεία που αποτελούν βασικά αντικείμενα έρευνας στην οδική ασφάλεια.

Επιπλέον, ο συγκοινωνιολόγος μηχανικός διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αξιοποίηση των πορισμάτων της ανακατασκευής ατυχημάτων για τη διαμόρφωση εφαρμόσιμων μέτρων βελτίωσης της οδικής ασφάλειας, μέσω προτάσεων ανασχεδιασμού της υποδομής, βελτιστοποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και ανάπτυξης προληπτικών πολιτικών.

Κατά συνέπεια, η εμπλοκή του πολιτικού μηχανικού στη διαδικασία αυτή είναι καθοριστική τόσο για τη διερεύνηση των αιτίων όσο και για τη διαμόρφωση τεκμηριωμένων προτάσεων αποτροπής παρόμοιων συμβάντων στο μέλλον.

Πιο συγκεκριμένα, η ανίχνευση και ανάλυση των αιτίων που οδήγησαν είτε σε σύγκρουση είτε σε απώλεια ελέγχου του οχήματος από τον οδηγό, καθώς και η καταγραφή της πορείας του οχήματος κατά τη διάρκεια του συμβάντος, παρέχουν τη δυνατότητα βελτίωσης του σχεδιασμού των γεωμετρικών στοιχείων της οδού και του παρόδιου περιβάλλοντος. Επιπλέον, συμβάλλουν στην ορθή και εμπειριστατωμένη εφαρμογή συστημάτων αναχαίτισης (στηθαίων ασφαλείας), με απώτερο σκοπό την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας.

1.4.2 Οδηγός

Όσον αφορά τον **ανθρώπινο παράγοντα ενός ατυχήματος (οδηγός)** το λάθος είναι σε πολλές περιπτώσεις αναπόφευκτο και δεν μπορεί να εξαλειφθεί η πιθανότητα του. Για παράδειγμα, πέρα από την υπερβολική ταχύτητα, δύο παράγοντες που διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην ικανότητα ενός οδηγού να αποφύγει ένα ατύχημα είναι η πίεση χρόνου που του ασκείται και η εμπειρία του. Σχετικά πρόσφατη έρευνα (Dadvar et al., 2020), που εξέτασε την επίδραση της πίεσης χρόνου στον οδηγό και τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά οδήγησης, έδειξε ότι η ανεπαρκής ή υπερβολική χρήση του συστήματος πέδησης μπορεί να οδηγήσει σε ολέθριες συνέπειες. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρία σενάρια: χωρίς χρονική πίεση, μέτρια χρονική πίεση και υψηλή χρονική πίεση, και τα αποτελέσματα ταξινομήθηκαν σε διάφορες κατηγορίες, όπως το φύλο του οδηγού, το ιστορικό οδήγησης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Το κύριο συμπέρασμα της έρευνας είναι αναμενόμενο: όσο αυξάνεται η χρονική πίεση που ασκείται στον οδηγό, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα με την οποία κινείται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα απώλειας ελέγχου του οχήματος και εμπλοκής σε οδικό ατύχημα.

Επιπλέον, σε άλλη έρευνα που διεξήχθη από την Toyota στην Ιαπωνία (Yuji Hisaoka et al., 1999), με βάση σχετικό μοντέλο διερευνήθηκε η σημασία της οδηγικής εμπειρίας στην ικανότητα του οδηγού να χειρίζεται το όχημα τόσο σε συνθήκες αργής και σταθερής ταχύτητας, όσο και σε “επιθετικά” σενάρια οδήγησης σε ορεινό οδικό τμήμα με διαδοχικές καμπύλες μεταβαλλόμενης καμπυλότητας. Στο πλαίσιο της διερεύνησης της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω δυναμικής ανάλυσης, εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα: Οι πιο άπειροι οδηγοί αντιμετώπιζαν μεγαλύτερη δυσκολία στην διατήρηση της επιθυμητής πορείας του οχήματος με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην ταχύτητα του οχήματος τους σε αντίθεση με τους πιο έμπειρους οδηγούς που φρέναραν, επιτάχυναν και προέβαιναν σε ελιγμούς πιο ομαλά. Συνεπώς, στο πλαίσιο του σχεδιασμού οδών, ο συγκοινωνιολόγος μηχανικός καλείται να συμβάλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση ενός ασφαλούς οδηγικού περιβάλλοντος.

1.4.3 Όχημα

Σε ό,τι αφορά τον παράγοντα του οχήματος, ο ρόλος του μελετητή της οδού εστιάζει κυρίως στην αντίδραση και συμπεριφορά του οχήματος υπό συνθήκες απώλειας ελέγχου ή πρόσκρουσης, καθώς και στην αλληλεπίδραση αυτής της συμπεριφοράς με τα χαρακτηριστικά της οδού. Ο σχεδιασμός της οδού, παρότι δεν μπορεί να επηρεάσει άμεσα τα μηχανολογικά χαρακτηριστικά του οχήματος, οφείλει να λαμβάνει υπόψη τη δυναμική του, τις δυνατότητες πέδησης, τις τροχιές σε περίπτωση εκτροπής και τα όρια σταθερότητας, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες θανατηφόρων εκβάσεων.

Σε έρευνα των Kano et al. (2000) πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση με σκοπό τη διερεύνηση της ευστάθειας ενός οχήματος κατά τη διάρκεια πέδησης εντός καμπύλης οδού. Εξετάστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροπή περί τον κάθετο άξονα (yaw moment) και, κατ' επέκταση, τη σταθερότητα της πορείας του οχήματος όταν δέχεται πλευρικές και διαμήκεις δυνάμεις. Οι παράγοντες που μελετήθηκαν ήταν:

- A. Ο βαθμός συμβολής της μεταβολής της γωνίας ολίσθησης του ελαστικού λόγω αλλαγής στη γωνία διεύθυνσης.
- B. Ο βαθμός συμβολής των μεταβολών στην καμπυλότητα του ελαστικού.
- Γ. Ο βαθμός συμβολής των μεταβολών στο κατακόρυφο φορτίο.
- Δ. Ο βαθμός συμβολής των μεταβολών στη μακροσκοπική δύναμη του ελαστικού.

Από την ανάλυση προέκυψε ότι ο παράγοντας του κατακόρυφου φορτίου (Γ) έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στους ελιγμούς του οχήματος, σε ποσοστό περίπου 50%, αναδεικνύοντας τη σημασία της κατανομής των φορτίων και της κατάστασης των ελαστικών στη διατήρηση του ελέγχου κατά την πέδηση σε καμπύλα τμήματα οδών.

Πέραν της απώλειας ελέγχου, κρίσιμη για την ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων είναι και η συμπεριφορά του οχήματος κατά τη σύγκρουση. Η κινηματική του οχήματος και η ενεργειακή απόκριση των επιμέρους συστημάτων κατά τη στιγμή της πρόσκρουσης αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία τόσο για την ανάλυση των αιτιών του ατυχήματος όσο και για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι κατασκευαστικές παράμετροι του οχήματος επηρεάζουν τη σοβαρότητα των συνεπειών.

Η δομή του αμαξώματος και η ικανότητα απορρόφησης κινητικής ενέργειας μέσω ζωνών παραμόρφωσης (crumple zones) αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη σοβαρότητα της πρόσκρουσης. Ο σωστός σχεδιασμός των περιοχών ελεγχόμενης παραμόρφωσης έχει ως σκοπό τη μετατροπή μέρους της κινητικής ενέργειας σε πλαστική παραμόρφωση του μεταλλικού κελύφους, ελαττώνοντας έτσι τις δυνάμεις που μεταφέρονται στον θάλαμο επιβατών. Παράλληλα, τα ενεργητικά και παθητικά συστήματα ασφάλειας — όπως το ABS (Anti-lock Braking System), το ESC (Electronic Stability Control), οι αερόσακοι, και οι ζώνες ασφαλείας με προεντατήρες συμβάλλουν καθοριστικά στη διατήρηση του ελέγχου του οχήματος και στη μείωση των επιπτώσεων της σύγκρουσης.

Από την πλευρά της μηχανικής, η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος σε συνθήκες πρόσκρουσης είναι ουσιώδης για τη διαμόρφωση ασφαλέστερου οδικού περιβάλλοντος. Ο σχεδιασμός συστημάτων αναχαίτισης οχημάτων (ΣΑΟ) βασίζεται στη γνώση της ενέργειας πρόσκρουσης και του τύπου της κινηματικής αλληλεπίδρασης μεταξύ οχήματος και εμποδίου. Για παράδειγμα, η πλάγια πρόσκρουση (side impact) ή η πλάγια εκτροπή σε εμπόδιο απαιτεί διαφορετικά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά στηθαίων σε σχέση με μια μετωπική πρόσκρουση, καθώς οι συνθήκες κατανομής φορτίου και ροπών είναι διαφορετικές.

Επιπλέον, η κατάσταση των ελαστικών, οι αναρτήσεις και το κέντρο βάρους του οχήματος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη δυναμική αντίδραση τόσο πριν όσο και μετά τη σύγκρουση. Οχήματα με υψηλό κέντρο βάρους, όπως τα SUV ή τα φορτηγά, εμφανίζουν αυξημένη πιθανότητα ανατροπής κατά τη διάρκεια πλευρικής πρόσκρουσης ή απότομου ελιγμού. Αυτός ο παράγοντας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαμόρφωση της γεωμετρίας της οδού αλλά και του παρόδιου περιβάλλοντος με την έννοια της προστασίας από πλευρικά εμπόδια.

Συνολικά, ο παράγοντας του οχήματος αποτελεί κρίσιμο στοιχείο τόσο για την πρόληψη όσο και για την ανάλυση και ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων. Η κατανόηση της δυναμικής, της κατασκευής και της ενεργειακής συμπεριφοράς του

οχήματος επιτρέπει στον ερευνητή οδικών ατυχημάτων να αξιολογήσει με ακρίβεια τις αιτίες της σύγκρουσης, να εκτιμήσει την ταχύτητα πρόσκρουσης, και να συμβάλει στη βελτίωση του οδικού σχεδιασμού προς ενίσχυση της ασφάλειας των χρηστών. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος και της κίνησης του υπό διαφορετικά σενάρια και συνθήκες λειτουργίας θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

1.4.4 Οδός

Όσον αφορά την οδό καθαυτή, πέρα από όσα προαναφέρθηκαν σχετικά με τη συσχέτιση οδού–οδηγού, ο γεωμετρικός σχεδιασμός σε συνδυασμό με την επιλογή των ΣΑΟ και την κατακόρυφη και οριζόντια σήμανση της, αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την οδική ασφάλεια. Στοιχεία όπως οι διαμήκεις και εγκάρσιες κλίσεις (επικλίσεις), οι νησίδες, τα πλάτη των λωρίδων, οι ακτίνες καμπύλων τμημάτων και τα μήκη ορατότητας συμβάλλουν ουσιαστικά στη διαμόρφωση ενός ασφαλούς και εύκολα αντιληπτού οδικού περιβάλλοντος.

Η ποιότητα και τα φυσικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος συνδέονται επίσης άμεσα με την πιθανότητα πρόκλησης οδικών ατυχημάτων. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι η τραχύτητα του οδοστρώματος, η οποία εκφράζεται μέσω του δείκτη IRI (International Roughness Index). Σύμφωνα με έρευνα των Anastasopoulos et al. (2012), αποδείχθηκε ότι αύξηση του δείκτη IRI συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας ατυχήματος σε ποσοστό 95,7% στα οδικά τμήματα που εξετάστηκαν. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι αυξημένο βάθος αυλάκωσης (rut depth) συσχετίζεται με αύξηση των ατυχημάτων στο 94,3% των περιπτώσεων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το εύρημα ότι, με την αύξηση της τραχύτητας, παρατηρείται μείωση των ατυχημάτων με ένα εμπλεκόμενο όχημα, αλλά αύξηση των συγκρούσεων πολλαπλών οχημάτων (καραμπόλες), γεγονός που αποδίδεται στη διαταραχή της δυναμικής ισορροπίας των οχημάτων σε συνθήκες χαμηλής ποιότητας οδοστρώματος (Haryati Yaacob et al., 2016).

Ένα ακόμη φαινόμενο που επηρεάζει σημαντικά την ασφάλεια είναι οι αυλακώσεις (rutting) που αναπτύσσονται με το πέρασμα του χρόνου από τη διέλευση βαρέων οχημάτων. Οι αυλακώσεις μπορούν να προκαλέσουν απώλεια πρόσφυσης, ιδιαίτερα σε συνθήκες βροχόπτωσης, ενώ επιπλέον αποσπούν την προσοχή του οδηγού ο οποίος προσπαθεί να τις αποφύγει. Είναι επομένως επιτακτική η ανάγκη τακτικής και προληπτικής συντήρησης του οδοστρώματος, πριν φτάσει στο τέλος του λειτουργικού χρόνου ζωής του.

Εξίσου κρίσιμη είναι η τριβή του οδοστρώματος, δηλαδή η αντίσταση που ασκείται στην κίνηση του οχήματος και ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τη διατήρηση της ευστάθειάς του. Πέραν των χαρακτηριστικών του ελαστικού, των καιρικών συνθηκών (π.χ. βροχή, πάγος, ρύπανση) και της ταχύτητας του οχήματος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η μακροτραχύτητα και η μικροτραχύτητα του οδοστρώματος, οι οποίες καθορίζουν την πραγματική επιφάνεια επαφής και την ικανότητα αποστράγγισης. Ο ανεπαρκής συνδυασμός αυτών μπορεί να οδηγήσει σε υδρολίσθηση (aquaplaning) ή σε απώλεια ελέγχου κατά την πέδηση.

1.4.5 Ασφαλές Σύστημα και Εύκολα Κατανοητή Οδός: Αρχές Ανθρωποκεντρικού Σχεδιασμού

Στο χώρο των μεταφορών τις τελευταίες δεκαετίες, άρχισε να υιοθετείται η έννοια του ασφαλούς συστήματος στο πλαίσιο της οδικής ασφάλειας. Η ανάγκη για μια διαφορετική προσέγγιση στο ζήτημα της οδικής ασφάλειας κρίθηκε απαραίτητη, όταν κατέστη σαφές από την επιστημονική κοινότητα ότι η απαίτηση ασφαλούς συμπεριφοράς από τους χρήστες της οδού δεν αρκούσε για να επιφέρει περαιτέρω πρόοδο στη μείωση των θανατηφόρων οδικών ατυχημάτων και των σοβαρών τραυματισμών. Η υιοθέτηση ενός ασφαλούς συστήματος ξεκινά με την αποδοχή της εγκυρότητας μιας απλής ηθικής επιταγής: Κανένας άνθρωπος δεν πρέπει να σκοτωθεί ή να τραυματιστεί σοβαρά ως αποτέλεσμα οδικού ατυχήματος (Wegman et al., 2006).

Η οικοδόμηση ενός ασφαλούς συστήματος είναι μια ολιστική, μακροπρόθεσμη διαδικασία που απαιτεί την ευαισθητοποίηση όχι μόνο των χρηστών της οδού, αλλά όλων όσων εμπλέκονται στο σχεδιασμό, την κατασκευή, τη συντήρηση, τη διαχείριση ή τη χρήση της οδικής κυκλοφορίας οι οποίοι πρέπει να ενεργούν υπεύθυνα για την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας. Η εμπειρία των πρωτοπόρων χωρών και πόλεων που έχουν ξεκινήσει να εφαρμόζουν το συγκεκριμένο σύστημα, έρχεται να επιβεβαιώσει ότι ένα ασφαλές σύστημα βασίζεται στην κοινή ευθύνη για την καλύτερη επίδοση της οδικής ασφάλειας.

Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι έξι βασικές αρχές που διέπουν ένα ασφαλές οδικό σύστημα:

- i. Οι άνθρωποι κάνουν λάθη που μπορούν να οδηγήσουν σε οδικά ατυχήματα.
- ii. Οι θάνατοι και οι τραυματισμοί είναι μη-αποδεκτοί σε ένα ασφαλές οδηγικό περιβάλλον.
- iii. Η πρόληψη των ατυχημάτων είναι κρίσιμης σημασίας
- iv. Το ανθρώπινο σώμα έχει περιορισμένη φυσική ικανότητα να ανταπεξέλθει στις δυνάμεις σύγκρουσης που προκύπτουν κατά τα οδικά ατυχήματα.
- v. Υπάρχει κοινή ευθύνη μεταξύ εκείνων που σχεδιάζουν, κατασκευάζουν, διαχειρίζονται, χρησιμοποιούν το οδικό δίκτυο και το όχημα, και παρέχουν φροντίδα μετά την σύγκρουση για την πρόληψη σοβαρών τραυματισμών ή θανάτων.
- vi. Όλα τα μέρη του συστήματος πρέπει να ενισχύονται ούτως ώστε να μεγιστοποιούνται οι επιδόσεις και τα αποτελέσματά τους. Ωστόσο, ακόμα και αν ένα μέρος του συστήματος αποτύχει, οι χρήστες της οδού εξακολουθούν να προστατεύονται.

Συνεπώς, ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συστήματος οδικών μεταφορών μέσω της προσέγγισης του ασφαλούς συστήματος, έχει ως στόχο να προωθεί την ασφαλή οδική συμπεριφορά όσον αφορά τον χρήστη της οδού, αλλά συγχρόνως να μετριάξει τις

συνέπειες που προκύπτουν από το ανθρώπινο σφάλμα και έχουν ως αποτέλεσμα την πρόκληση οδικών ατυχημάτων.

Επιπροσθέτως, ο σχεδιασμός των οδών και του συστήματος της κυκλοφορίας πρέπει να γίνεται με γνώμονα την αρχή της εύκολα κατανοητής οδού (SER - Self-Explaining Road). Σε οδούς σχεδιασμένες σύμφωνα με τις αρχές της εύκολα κατανοητής οδού ο χρήστης έχει την κατάλληλη συμπεριφορά με βάση τον αντιληπτό σχεδιασμό χωρίς συνειδητή επεξεργασία της απαιτούμενης συμπεριφοράς (Βαρδάκη, 2025). Στο πλαίσιο της βιώσιμης ασφάλειας, η εύκολα κατανοητή οδός ενσωματώνει στοιχεία ομοιογένειας, αναγνωρισιμότητας και συνέπειας. Οι οδηγοί αντιλαμβάνονται παρόμοιες κυκλοφοριακές συνθήκες με παρόμοιο τρόπο, γεγονός που προάγει την ασφαλή και ομαλή ροή κυκλοφορίας. Παράμετροι όπως η γεωμετρία των καμπυλών, η ορατότητα, η διατομή και η σήμανση πρέπει να συνδυάζονται ώστε να παρέχουν σαφείς οπτικές ενδείξεις για το επιθυμητό επίπεδο ταχύτητας και τις απαιτούμενες ενέργειες του οδηγού. Ενδεικτικά, η ομαλή μετάβαση από υπεραστικό σε αστικό περιβάλλον πρέπει να υποστηρίζεται από σταδιακή μεταβολή της γεωμετρίας, της σήμανσης και των οπτικών εντυπώσεων, αποτρέποντας την ασυνέχεια στην αντίληψη του χρήστη. Ο σχεδιασμός, επομένως, δεν αποσκοπεί μόνο στην τήρηση γεωμετρικών προδιαγραφών, αλλά στη δημιουργία ενός οδικού περιβάλλοντος που, μέσω της ίδιας της μορφής του, «καθοδηγεί» τον οδηγό προς ασφαλείς αποφάσεις. Μια τέτοια οδός είναι, ουσιαστικά, «διδασκτική» και «συγχωρητική», προσαρμοσμένη στις γνωστικές και φυσικές δυνατότητες του ανθρώπου, και επομένως σύμφωνη με τις αρχές του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού.

1.4.6 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, αναφορικά με την ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων, πέρα από την αναμφισβήτητη συνεισφορά του ανθρώπινου παράγοντα, το όχημα καθώς και το οδικό περιβάλλον αποτελούν ιδιαίτερα κρίσιμες παραμέτρους. Οι δύο αυτοί παράγοντες, είτε ανεξάρτητα, είτε σε συνδυασμό, δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς σε πολλές περιπτώσεις, παρότι επηρεάζουν άμεσα τα αποτελέσματα της αναπαράστασης ενός ατυχήματος. Η ενσωμάτωσή τους στις αναλυτικές μεθόδους αναπαράστασης οδικών ατυχημάτων επιτρέπει την πιο ακριβή ανασύσταση των συνθηκών του συμβάντος, παρέχοντας έγκυρα και αξιόπιστα δεδομένα για τον πραγματογνώμονα και τον μελετητή (Sergei Entiukov et al., 2017). Σε αυτό το πλαίσιο, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η διερεύνηση οδικών ατυχημάτων μέσω της εξέτασης παραμέτρων από την αλληλεπίδραση του συστήματος όχημα – οδός.

1.5 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με γνώμονα τα παραπάνω, η διάρθρωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

Στο 1ο κεφάλαιο πραγματοποιείται εισαγωγή στο αντικείμενο της ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων, επεξηγείται ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται βασικά εισαγωγικά στοιχεία και στατιστικά οδικών ατυχημάτων ενώ τεκμηριώνεται η αναγκαιότητα της έρευνας προς όφελος της οδικής ασφάλειας.

Στο 2ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων αποτύπωσης και ανακατασκευής, καθώς και των θεμελιώδη εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό κρίσιμων μεγεθών.

Στο 3ο κεφάλαιο, για επτά τυπικές κατηγορίες οδικών ατυχημάτων, παρατίθενται οι κρίσιμες παράμετροι ανακατασκευής και προτείνεται μεθοδολογία εκτίμησης τους. Στη συνέχεια, επιλύονται τρία χαρακτηριστικά παραδείγματα με χρήση του μοντέλου σημειακής μάζας, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητά του στην ανακατασκευή ατυχημάτων.

Στο 4ο κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της στατιστικής μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης.

Στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων από δοκιμές συγκρούσεων, τα οποία αξιοποιούνται για την ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου.

Στο 6ο κεφάλαιο πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των δεδομένων, με χρήση μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης, για πέντε ευρέως διαδεδομένες μάρκες οχημάτων, με στόχο την εκτίμηση της ταχύτητας σύγκρουσης, όταν είναι γνωστά μεγέθη όπως το βάθος παραμόρφωσης του οχήματος, το βάρος, το πλάτος, το μήκος και η χρονολογία κατασκευής του.

Στο 7ο κεφάλαιο εξάγονται τα συνολικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά ευρήματα των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης. Τέλος, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω εμβάθυνση.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη βιβλιογραφία, όπου παρατίθενται όλες οι πηγές που αξιοποιήθηκαν για τη σύνταξη και τεκμηρίωσή της.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

2.1.1 Μέθοδοι αποτύπωσης

Για να επιτευχθεί η αναπαράσταση ενός οδικού ατυχήματος με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί πλήρης και λεπτομερής καταγραφή όλων των σχετικών στοιχείων, καθώς και ακριβής αποτύπωση της σκηνής του ατυχήματος. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το θεμέλιο της αξιόπιστης ανακατασκευής, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται επί τόπου καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την εγκυρότητα των συμπερασμάτων που θα εξαχθούν στη συνέχεια.

Στο άρθρο “An Overview of Traffic Accident Investigation Using Different Techniques” (Shireen Ibrahim Mohammed, 2023) παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων μεθόδων αποτύπωσης και διαχείρισης της σκηνής ενός οδικού ατυχήματος. Σύμφωνα με τη συγγραφέα, οι επιμέρους μέθοδοι τεκμηρίωσης μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής βασικές κατηγορίες:

2.1.1 i) Μέθοδος συντεταγμένων

Είναι η πιο βασική εκ των μεθόδων που θα ακολουθήσουν λόγω της απλότητας της. Χρειάζεται η δημιουργία ενός συστήματος συντεταγμένων ως προς ένα σημείο αναφοράς στο πεδίο του ατυχήματος. Από το σημείο αναφοράς σχεδιάζεται μια ευθεία αναφοράς και έπειτα με μετροταινία μετριοούνται οι παράλληλες αποστάσεις όλων των εμπλεκόμενων στοιχείων στο ατύχημα από την ευθεία αναφοράς. Στην συνέχεια, εκτός πεδίου πλέον, σχεδιάζονται σε κατάλληλη κλίμακα όσα μετρήθηκαν ώστε να υπάρξει η επιθυμητή ανάλυση. Η παραπάνω μέθοδος είναι γραφική και ακολουθούν τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της.

Θετικά

- Απλή και εύκολη στην εφαρμογή, δεν απαιτεί εξειδικευμένο ή ακριβό εξοπλισμό.
- Επιτρέπει άμεση αποτύπωση των αποστάσεων των στοιχείων της σκηνής.
- Κατάλληλη για μικρής κλίμακας ατυχήματα ή σε περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση σε σύγχρονα μέσα.
- Ως γραφική μέθοδος, δεν χρειάζεται λογισμικό ή υπολογιστική επεξεργασία.

Αρνητικά

- Η ασφάλεια προσωπικού και διερχόμενων οδηγών στο σημείο της σκηνής δεν είναι εγγυημένη.

- Η ακρίβεια των μετρήσεων περιορίζεται λόγω χειροκίνητης καταγραφής.
- Η πληρότητα των στοιχείων μπορεί να επηρεαστεί από εμπόδια ή δυσκολίες στο πεδίο.
- Απαιτεί δύο έως τρία άτομα στο πεδίο για να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις.
- Η μέθοδος δεν ενδείκνυται για σύνθετα συμβάντα με πολλαπλά εμπλεκόμενα οχήματα ή με ευρύ χώρο εκδήλωσης του ατυχήματος.

2.1.1 ii) Μέθοδος με χρήση γεωδαιτικού σταθμού (Total Station)

Η χρήση γεωδαιτικού σταθμού για την μέτρηση αποστάσεων αλλά και οριζόντιων-κατακόρυφων γωνιών είναι μια αξιόπιστη μέθοδος ανάλυσης ενός οδικού ατυχήματος. Αφού γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις τα δεδομένα για να γίνει η ανακατασκευή του ατυχήματος εισάγονται σε H/Y . Τα προτερήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής :

Θετικά

- Σημαντικά μειωμένος χρόνος μετρήσεων σε σχέση με την μέθοδο συντεταγμένων
- Χρειάζονται μόνο δύο άτομα
- Επιτρέπει την χρήση της οδού πιο γρήγορα και δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από διερχόμενα οχήματα
- Είναι ασφαλής για τους μελετητές
- Μικρή πιθανότητα σφάλματος και μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων

Αρνητικά

- Απαιτείται εκπαίδευση στην χρήση του γεωδαιτικού σταθμού
- Υψηλότερο κόστος εξοπλισμού σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο

2.1.1 iii) Μέθοδος Φωτογραμμετρίας

Η μέθοδος αυτή υλοποιείται είτε με την λήψη φωτογραφιών από κοντινή απόσταση είτε με την λήψη αεροφωτογραφιών από μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV ή drone). Στην πρώτη περίπτωση οι μετρήσεις γίνονται από φωτογραφίες ενώ στην δεύτερη οι λήψεις επεξεργάζονται από κατάλληλο λογισμικό [π.χ. SfM (Structure from Motion)] όπου προκύπτει μια τρισδιάστατη αναπαράσταση της σκηνής του ατυχήματος. Συνολικά, η μέθοδος της φωτογραμμετρίας συνοψίζεται σε τρία βήματα : την λήψη φωτογραφιών του οδικού ατυχήματος στο πεδίο, την εισαγωγή τους σε κατάλληλο λογισμικό και τέλος την επεξεργασία των μετρήσεων για την ανακατασκευή της σκηνής του ατυχήματος.

Θετικά

- Μειωμένος χρόνος στο πεδίο
- Μικρό κόστος

- Απαίτηση ενός ατόμου χωρίς ιδιαίτερη εκπαίδευση για την λήψη των φωτογραφιών
- Ικανοποιητική ακρίβεια
- Ρεαλιστική απεικόνιση εμπλεκόμενων οχημάτων
- Ευελιξία χρήσης
- Καταγραφή πολλών δεδομένων που μπορεί να χρειαστούν σε μεταγενέστερο χρόνο
- Διατήρηση στοιχείων που με το πέρασ του χρόνου εξασθενούν
- Ασφάλεια του μελετητή

Αρνητικά

- Απαιτείται αυξημένος χρόνος ανάλυσης στο γραφείο
- Ο φωτισμός στο πεδίο μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε κάποιες περιπτώσεις
- Δυσκολία σε αποτύπωση μεγάλης έκτασης συμβάντων
- Εκπαιδευτικό χάσμα μεταξύ πεδίου-γραφείου
- Δυσκολία αξιοποίησης στοιχείων για δικαστικούς λόγους
- Οι λεπτομέρειες ενδέχεται να μην φαίνονται επαρκώς στις φωτογραφίες και επομένως να απαιτείται βελτίωση τους (μεγέθυνση)

2.1.1 iv) Μέθοδος σάρωσης

Οι μετρήσεις με την χρήση σάρωσης μέσω λείζερ είναι ένας πολύ αξιόπιστος τρόπος υψηλής ακρίβειας για την λήψη πληθώρας δεδομένων από έναν μόνο ερευνητή σε ένα οδικό ατύχημα. Με την χρήση σάρωσης λείζερ μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα της σκηνής του ατυχήματος με χρήση κατάλληλων λογισμικών τύπου CAD.

Θετικά

- Τρισδιάστατη απεικόνιση με ασφάλεια
- Ταχεία αποκατάσταση της κυκλοφορίας
- Ανεξάρτητη του φωτισμού
- Δυνατότητα καταγραφής μεγάλου όγκου μετρήσεων με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο
- Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόληψη ατυχημάτων
- Πιο ακριβής μέθοδος σε σχέση με την αντίστοιχη φωτογραμμετρική

Αρνητικά

- Οι καιρικές συνθήκες δύναται να αποτελέσουν εμπόδιο
- Απαιτεί εκτεταμένη εκπαίδευση και στην συλλογή και στην επεξεργασία των δεδομένων
- Μεγάλο κόστος εξοπλισμού
- Ανακρίβεια μετρήσεων σε συγκεκριμένες μη αντανakλαστικές επιφάνειες.

Ειδική περίπτωση

Στα πλαίσια της αποτύπωσης ενός οδικού ατυχήματος και πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση που ένα όχημα εκτραπεί της πορείας του και βρεθεί εντός υγρού στοιχείου (π.χ. λίμνη, θάλασσα) ή οπουδήποτε αλλού που η προσβασιμότητα κάνει την διεξαγωγή μετρήσεων δύσκολη, υπάρχει μεθοδολογία που μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να βρεθεί η απόσταση που διένυσε το όχημα εκτός δρόμου (R. W. Rivers, 2011). Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην αρχή των όμοιων τριγώνων και αποτελεί λύση σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμο αποστασιόμετρο (laser) ή κάποια άλλη προηγμένη μέθοδος. Η εν λόγω μεθοδολογία έχει ως εξής : Σχηματίζεται μια γραμμή στο έδαφος ΒΔ στην οποία η ευθεία (ΒΑ) η οποία ζητείται, να είναι κάθετη [σημείο Β (οριογραμμή οδού), σημείο Α (τελική θέση οχήματος)]. Στη συνέχεια, σημειώνεται το μέσο της γραμμής ΒΔ ως Γ ώστε $BΓ = ΓΔ$. Από το Δ χαράζεται κάθετη στην ΓΔ ευθεία ως η νοητή προέκταση της ΑΓ και σημειώνεται αυτό το σημείο ως Ε. Λόγω όμοιων τριγώνων, $ΔΕ = ΑΒ$ η οποία είναι η ζητούμενη απόσταση όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση μεθόδου ειδικής περίπτωσης όπου όχημα εξετράπη της πορείας του και κατέληξε σε μη προσβάσιμο σημείο (R. W. Rivers, 2011)

2.1.2 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, υπάρχει πληθώρα μεθόδων για την πραγματοποίηση μετρήσεων στο πεδίο και την επεξεργασία τους ώστε να αναπαραχθεί αξιόπιστα ένα οδικό ατύχημα. Όμως, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, οι περισσότερες δεν είναι ευρέως διαδεδομένες με αποτέλεσμα να μην αξιοποιούνται επαρκώς ή και καθόλου σε πολλές χώρες. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα, η πλέον διαδεδομένη πρακτική είναι η χρήση μετροταινίας μέσω της μεθόδου των συντεταγμένων. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται είναι περιορισμένες και αφορούν τις θέσεις των οχημάτων που ενεπλάκησαν στο

ατύχημα, το μήκος των ιχνών πέδησης και πληροφορίες για στοιχεία της οδού όπως σηματοδότες, διαγραμμίσεις κλπ. Σε ότι αφορά την μέτρηση κατά μήκος ή εγκάρσιων κλίσεων, η συγκεκριμένη μέθοδος αδυνατεί να δώσει αποτελέσματα ενώ και γενικότερα η ακρίβεια της μεθόδου δεν ανήκει στα κύρια προτερήματα της σε αντίθεση με την ταχύτητα και την ευκολία της (Ναναδάκης, 2012).

Αφού συλλεχθούν όσα περισσότερα δεδομένα είναι δυνατόν στο πεδίο με οποιαδήποτε εκ των παραπάνω μεθόδων, ακολουθεί η εκτενής επεξεργασία τους με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών, υπολογισμών και τεχνικών αναλύσεων. Σε θεωρητικό επίπεδο, η περαιτέρω ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω δυναμικής ανάλυσης είτε με ανάλυση σημειακής μάζας οι οποίες θα αναπτυχθούν παρακάτω.

2.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

2.2.1 Εισαγωγή

Στη δυναμική ανάλυση, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις δυνάμεις, τις ροπές και τις ταχύτητες που ασκούνται στο όχημα και στα επιμέρους χαρακτηριστικά του, καθώς και στη γεωμετρία της οδού, προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του οχήματος σε διάφορα σενάρια. Επειδή όμως η αναλυτική αντιμετώπιση ενός τέτοιου συστήματος είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη επιλέγονται συνήθως απλουστευμένες προσεγγίσεις της, οι οποίες επιτρέπουν την εξαγωγή εξίσου αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Μία τέτοια απλουστευμένη προσέγγιση αποτελεί και η ανάλυση σημειακής μάζας στην οποία το όχημα προσομοιώνεται ως υλικό σημείο, αγνοώντας λεπτομερή χαρακτηριστικά του αμαξώματος και των συστημάτων του. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί, πως ενώ και στις δύο προσεγγίσεις η αντιμετώπιση του οχήματος διαφέρει, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και όλα τα σχετικά δεδομένα του ατυχήματος επεξεργάζονται με παρόμοιο τρόπο.

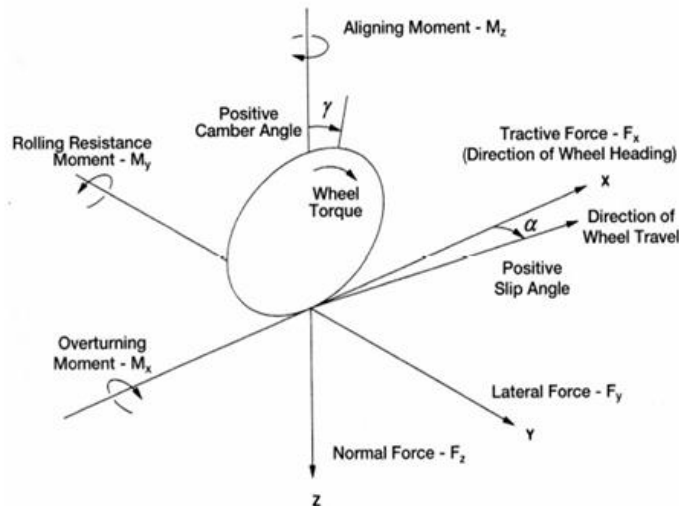
2.2.2 Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα

Σε ένα όχημα το οποίο προσομοιώνεται με στερεό άκαμπτο σώμα (υλικό σημείο) στο οποίο δεν υφίστανται κινήσεις μεταξύ των τμημάτων του, ασκούνται μόνο εξωτερικές δυνάμεις οι οποίες μπορούν να είναι οι εξής :

- Αεροδυνάμεις οι οποίες είναι η μετωπική αντίσταση, η δυναμική άνωση και η πλευρική αντίσταση.
- Η δύναμη του βάρους του.

- Δύναμη επαφής μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος.
- Δυνάμεις συγκρούσεων σε περίπτωση που υπάρξει σύγκρουση.

Όσον αφορά την ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι δυνάμεις στα ελαστικά των αυτοκινήτων. Στο Σχήμα 2.2 εικονίζονται οι δυνάμεις και ροπές που επιδρούν σε ένα σύστημα συντεταγμένων με κέντρο τον άξονα ενός ελαστικού.



Σύστημα συντεταγμένων του άξονα του ελαστικού

Σχήμα 2.2 : Δυνάμεις και ροπές στα ελαστικά των οχημάτων (Ναναδάκης, 2012)

Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται η επιρροή των εξ επαφής δυνάμεων μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος.

2.2.2 i) Αντίσταση κύλισης

Κατά την κύλιση ενός τροχού παράλληλα και αντίθετα στην διεύθυνση της κύλισης αναπτύσσεται μία οριζόντια δύναμη που ονομάζεται αντίσταση κύλισης. Η δύναμη αυτή δημιουργείται λόγω της ανομοιόμορφης παραμόρφωσης του ελαστικού στην επιφάνεια επαφής του με το οδόστρωμα. Επιπλέον, τα αίτια της δημιουργίας της είναι το κάθετο φορτίο που παραλαμβάνει καθώς και η κύλιση καθαυτή. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της αντίστασης κύλισης ποικίλλουν και μπορεί να είναι η κατασκευή του ελαστικού ή το υλικό κατασκευής αυτού, η τραχύτητα της ασφάλτου του οδοστρώματος, η ταχύτητα, το φορτίο που αναλαμβάνει ο τροχός, η θερμοκρασία και πίεση του ελαστικού κ.α. Αλγεβρικά, η αντίσταση κύλισης ενός τροχού (F_k) ορίζεται ως το γινόμενο του συντελεστή αντίστασης κύλισης (f_k) επί το φορτίο που αναλαμβάνει. Οι τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης κυμαίνονται από 0,001-0,30 και γενικά παίρνει μικρότερες τιμές σε σκληρές, λείες και στεγνές επιφάνειες. Ενδεικτικά, σε ασφαλτικό οδόστρωμα παίρνει τιμές 0,01-0,02 ενώ σε χωματόδρομο παίρνει τιμές 0,04-0,08. Όσο μεγαλύτερο το κάθετο φορτίο που αναλαμβάνει ο τροχός, τόσο μεγαλύτερο το αποτύπωμα του ελαστικού, ενώ λόγω της κύλισης διαφοροποιούνται οι τάσεις στην επιφάνεια επαφής του τροχού με τις μεγαλύτερες

τιμές να εμφανίζονται στο μπροστά τμήμα. Μέσω της αλληλεπίδρασης των διαμοριακών δυνάμεων ανάμεσα σε ελαστικό και οδόστρωμα εμφανίζεται ο μηχανισμός της πρόσφυσης στο εμπροσθεν τμήμα ενώ σε αντιστοιχία στο οπίσθιο τμήμα της επιφάνειας επαφής προκύπτει ο μηχανισμός της υστέρησης. Στα δύο παραπάνω φαινόμενα οφείλεται η δημιουργία της δύναμης της τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Στον πίνακα 2.1 που ακολουθεί φαίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης για διαφορετικές επιφάνειες κύλισης.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΥΛΙΣΗΣ	f_k
Σκυρόδεμα, Άσφαλτος	0.01-0.02
Χωματόδρομος	0.04-0.08
Χαλαρή άμμος	0.15-0.30
Τροχός σε Σιδηροτροχιά	0.001-0.002

Πίνακας 2.1 : Χαρακτηριστικές τιμές συντελεστή αντίστασης κύλισης (Gillespie T.D., 1992)

2.2.2 ii) Τριβή μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος

Προκειμένου ένα όχημα να μπορεί είτε να επιταχύνει είτε να επιβραδύνει ικανοποιητικά, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Η τριβή αποτελεί την δύναμη που αντιτίθεται στην τάση του οχήματος να ολισθήσει σε οποιαδήποτε στιγμή της κίνησης του (κίνηση με προωθητική ροπή, τροχοπέδηση). Εάν το όχημα κινείται σε ευθεία ή σε καμπύλη με μικρή ταχύτητα, η τριβή συμπίπτει με το διαμήκη άξονα του ελαστικού. Όσο η ταχύτητα αυξάνεται επί καμπύλης τροχιάς του οχήματος, τόσο αναπτύσσεται εγκάρσια τριβή η οποία είναι κάθετη στο διαμήκη άξονα του ελαστικού με φορά προς το εσωτερικό της καμπύλης λόγω της πλευρικής επιτάχυνσης-φυγόκεντρου δύναμης. Τότε, η διεύθυνση της ταχύτητας του ελαστικού σχηματίζει γωνία α με το διαμήκη άξονα του, η οποία ονομάζεται γωνία πλαγιοδρόμησης του ελαστικού.

2.2.2 iii) Διαμήκης δύναμη τριβής

Η διαμήκης δύναμη τριβής στον τροχό στην περίπτωση που υφίσταται κίνηση του οχήματος υπό προωθητική ροπή -εάν ο τροχός είναι κινητήριο- προκύπτει αφαιρώντας από την κινητήρια δύναμη την αντίσταση κύλισης. Εάν ο τροχός δεν είναι κινητήριο, τότε, η τριβή έχει το αντίθετο πρόσημο της αντίστασης κύλισης. Στην περίπτωση της κίνησης υπό πέδηση, η τριβή κάθε τροχού ισούται με τη δύναμη επιβράδυνσης του τροχού αυτού. Σε κατάσταση πέδησης, εάν οι οπίσθιοι τροχοί ολισθήσουν πριν τους μπροστινούς δημιουργείται αστάθεια στην κίνηση του οχήματος ικανή να περιστρέψει το όχημα γύρω από το κέντρο βάρους του (yaw). Στα νεότερα οχήματα η κατανομή της δύναμης επιβράδυνσης στους μπροστά και πίσω τροχούς γίνεται σε ποσοστό 70/30 μέσω του συστήματος EBD (Electronic Brake-force Distribution).

2.2.2 iv) Εγκάρσια δύναμη τριβής

Η εγκάρσια δύναμη τριβής στο ελαστικό ενός οχήματος εμφανίζεται όταν ο τροχός υπόκειται σε πλευρική ολίσθηση σε σχέση με το επίπεδο κύλισης, δηλαδή όταν η διεύθυνση της ταχύτητας κύλισης αποκλίνει από τη διεύθυνση του επιβαλλόμενου διανύσματος ταχύτητας. Η δύναμη αυτή είναι υπεύθυνη για τη διατήρηση της πορείας του οχήματος κατά τη στροφή και εξαρτάται άμεσα από τη γωνία πλαγιοδρόμησης (slip angle) και τον συντελεστή τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Για μικρές γωνίες ολίσθησης, η εγκάρσια δύναμη αυξάνεται σχεδόν γραμμικά, έως ότου φτάσει τη μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο όριο πρόσφυσης του ελαστικού. Πέρα από αυτό το σημείο, η αύξηση της γωνίας ολίσθησης προκαλεί μείωση της εγκάρσιας δύναμης και απώλεια πλευρικού ελέγχου. Στα σύγχρονα οχήματα, η διαχείριση της εγκάρσιας δύναμης υποστηρίζεται από ηλεκτρονικά συστήματα ευστάθειας (ESP/ESC), τα οποία επεμβαίνουν αυτόματα σε περιπτώσεις υπερστροφής ή υποστροφής (θα εξεταστούν στην πορεία της εργασίας), ρυθμίζοντας τις δυνάμεις πέδησης σε επιμέρους τροχούς ώστε να διατηρείται η επιθυμητή τροχιά.

2.2.2 v) Συντελεστές τριβής

Σε κάθε διεύθυνση που αναπτύσσεται δύναμη τριβής, υφίσταται και ο αντίστοιχος συντελεστής τριβής. Επομένως υπάρχουν δύο συντελεστές τριβής ένας εφαπτομενικός κατά την διαμήκη διεύθυνση της τριβής και ένας εγκάρσιος.

$$\text{Εφαπτομενικός συντελεστής τριβής} \quad f_T = \frac{U}{P} \quad (2.1)$$

$$\text{Εγκάρσιος συντελεστής τριβής} \quad f_r = \frac{S}{P} \quad (2.2)$$

P : κάθετη δύναμη (N)

S : εγκάρσια δύναμη τριβής (N)

U : εφαπτομενική δύναμη τριβής (N)

Οι συντελεστές τριβής δεν είναι σταθεροί, μειώνονται όσο αυξάνεται το κάθετο φορτίο και εξαρτώνται από πληθώρα παραμέτρων όπως τη μορφή της επιφάνειας επαφής, την ταχύτητα του ελαστικού και την θερμοκρασία. Διολίσθηση τροχού ορίζεται κατά την επιβράδυνση του το ποσοστό ακινητοποίησης του (κλείδωμα τροχού). Για παράδειγμα 0% διολίσθηση αντιστοιχεί σε ελεύθερη κίνηση του τροχού ενώ 100% διολίσθηση σημαίνει ότι ο τροχός ολισθαίνει χωρίς να περιστρέφεται. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο εφαπτομενικός συντελεστής τριβής συμβολίζεται ως f_{Tmax} και συνδέεται με τη μέγιστη δύναμη τριβής, δηλαδή εμφανίζεται όταν υπάρχει η μέγιστη δύναμη πέδησης στον τροχό, ενώ $f_{t,g}$ είναι η τιμή που αντιστοιχεί σε πλήρη ολίσθηση του τροχού. Ομοίως, f_{Rmax} είναι η μέγιστη τιμή του εγκάρσιου συντελεστή τριβής και $f_{r,g}$ ο εγκάρσιος συντελεστής τριβής σε συνθήκες πλήρους ολίσθησης. Για κάθε τύπου ελαστικά θεωρείται ότι ισχύει $f_{Rmax} = 0,925 f_{Tmax}$ ενώ σε υψηλές ταχύτητες ισχύει

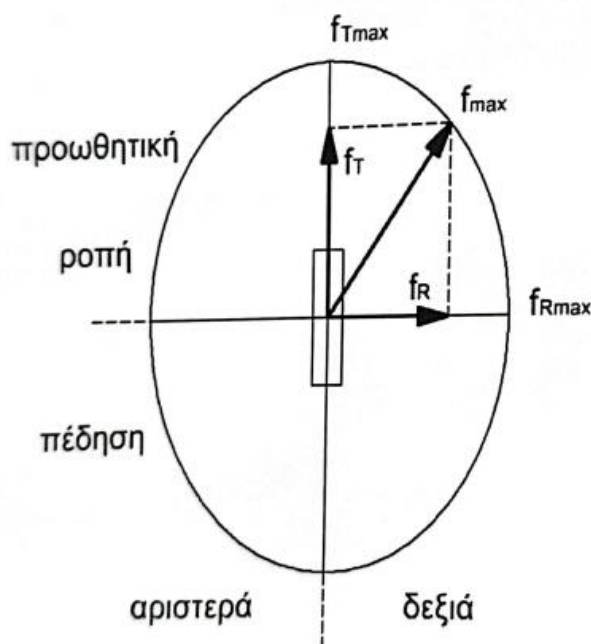
$f_{Rmax} = f_{Tmax}$. Στην περίπτωση που ένα όχημα κινείται σε καμπύλη και υπάρχει ταυτόχρονη συνύπαρξη των εγκάρσιων και εφαπτομενικών συντελεστών τριβής η σχέση που οφείλει να ικανοποιείται είναι η εξής :

$$\left(\frac{f_T}{f_{Tmax}}\right)^2 + \left(\frac{f_R}{f_{Rmax}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.3)$$

f_T : απαιτούμενος εφαπτομενικός συντελεστής τριβής

f_R : απαιτούμενος εγκάρσιος συντελεστής τριβής

Οπότε, κατά την κίνηση οχήματος σε καμπύλο τμήμα οδού, προκειμένου ο κάθε τροχός να μην ολισθήσει είτε σε σενάριο πέδησης είτε σε σενάριο προωθητικής ροπής, είναι υποχρεωτικό η αναπτυσσόμενη τριβή σε κάθε διεύθυνση να είναι μικρότερη της μέγιστης και ταυτόχρονα το διανυσματικό άθροισμα τους να βρίσκεται εντός της παρακάτω έλλειψης (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Έλλειψη ορίων διανυσματικού αθροίσματος τριβών, (Μαυρομάτης, 2023)

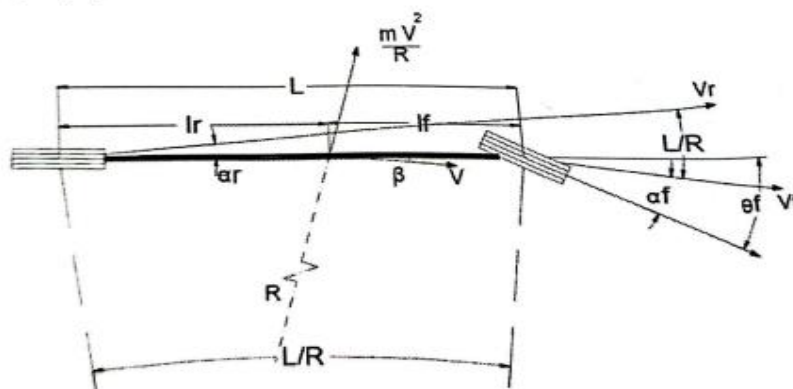
2.2.3 Γωνία πλαγιοδρόμησης

Γωνία πλαγιοδρόμησης ή πλαγιολίσθησης a_f (μπροστά τροχοί) και a_r (πίσω τροχοί) ενός ελαστικού είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διαμήκου άξονα του ελαστικού και της διεύθυνσης της ταχύτητας σε αυτό. Η γωνία πλαγιοδρόμησης οχήματος (yaw angle), αποτελεί κρίσιμο μέγεθος στην ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων διότι καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια του οχήματος. Η παράμετρος αυτή συνδέεται άμεσα με την ευστάθεια και τον έλεγχο του οχήματος. Επιπλέον, σε καμπύλα οδικά τμήματα, η αύξηση της γωνίας πλαγιοδρόμησης αντανακλά την απώλεια πρόσφυσης και την έναρξη φαινομένων υπερστροφής ή υποστροφής.

2.2.3 i) Μοντέλο κίνησης οχήματος προσομοιωμένο με δίτροχο σε καμπύλη

L : μήκος μεταξόνιου οχήματος (m)

R : ακτίνα κυκλικού τόξου (m)



Σχήμα 2.4 : Όχημα προσομοιωμένο με δίτροχο σε καμπύλη, (Μαυρομάτης, 2023)

Οι σχέσεις που συνδέουν τις γωνίες πλαγιοδρόμησης των τροχών με τη γωνία στροφής του εμπρόσθιου τροχού του οχήματος και τη γωνία πλαγιοδρόμησης του οχήματος, είναι:

$$\text{Γωνία στροφής ελαστικού} \quad \theta_f = \frac{L}{R} \frac{200}{\pi} + a_f - a_r \quad (2.4)$$

$$\text{Γωνία πλαγιοδρόμησης οχήματος} \quad \beta = \frac{l_r}{R} \frac{200}{\pi} - a_r \quad (2.5)$$

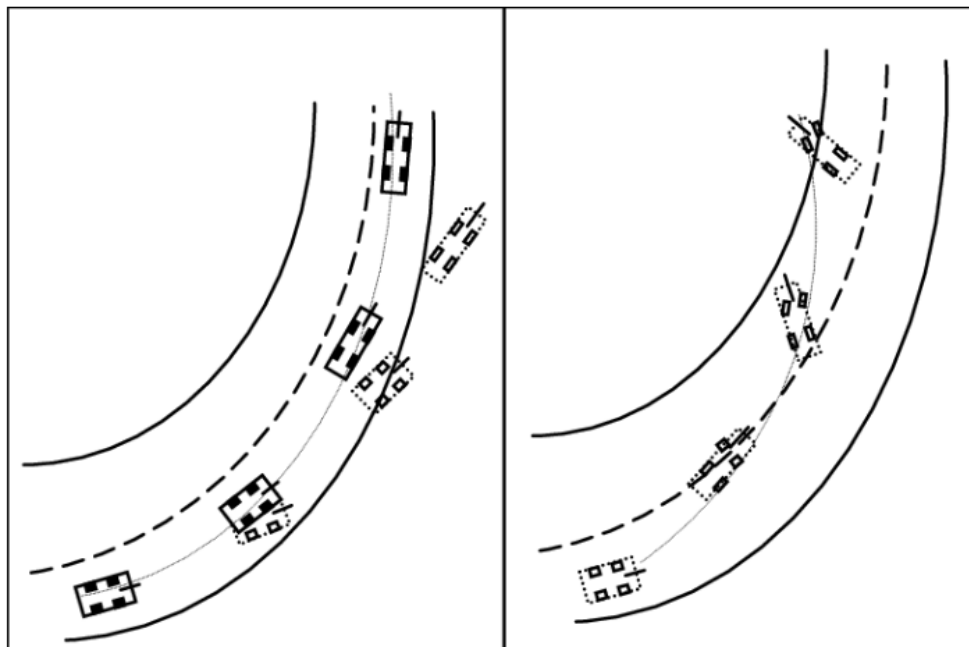
Όπου:

- Το εμπρόσθιο και οπίσθιο ελαστικό παρουσιάζουν τιμές ταχύτητας και γωνία πλαγιοδρόμησης V_f , a_f , V_r , a_r .

- Η γωνία στροφής του οχήματος θ χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα είναι L/R με $R \gg L$
- Η φυγόκεντρη επιτάχυνση (V^2 / R) στο όχημα, εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους του σε αποστάσεις l_f και l_r από τον εμπρόσθιο και οπίσθιο τροχό αντίστοιχα.
- Η γωνία πλαγιοδρόμησης του οχήματος β είναι η γωνία που σχηματίζουν ο διαμήκης άξονας του οχήματος με την διεύθυνση της ταχύτητας του.

2.2.3 ii) Υπερστροφή -Υποστροφή οχήματος σε καμπύλη (Oversteer-Understeer)

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η υποστροφή και υπερστροφή οχήματος σε καμπύλη, ενώ ακολουθεί περιγραφή του τι δημιουργεί το εν λόγω φαινόμενο.



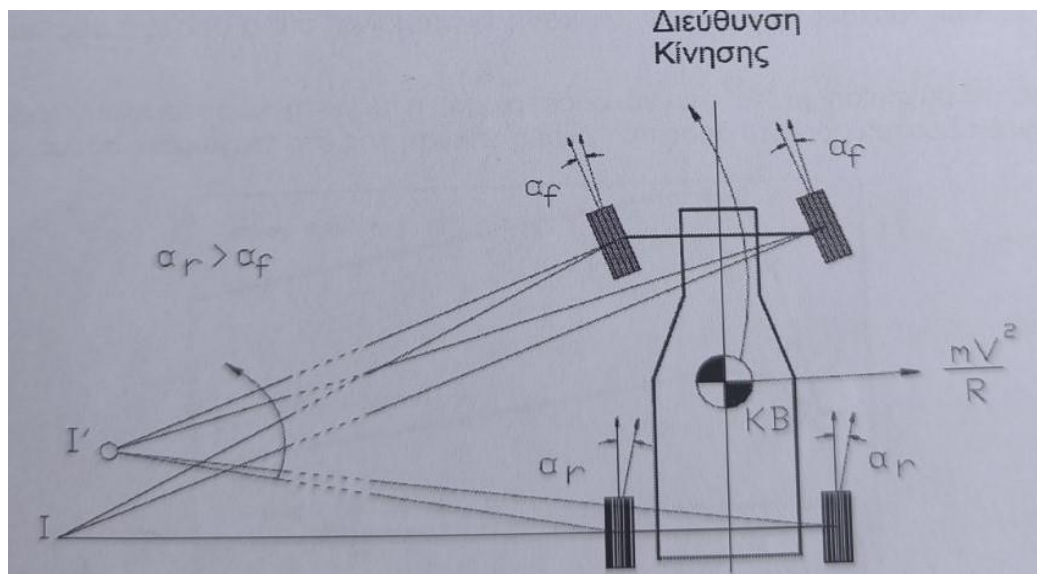
(a) Understeering (b) oversteering

Σχήμα 2.5 : Υποστροφή και Υπερστροφή οχήματος σε καμπύλη, (Y. Samim Unlusoy et Gokhan Tekin, 2010)

- $af < ar$

Οι γωνίες πλαγιοδρόμησης των εμπρόσθιων τροχών είναι μικρότερες από αυτές των οπίσθιων με αποτέλεσμα το όχημα να τείνει να κινηθεί προς το εσωτερικό της καμπύλης. Μία ενδεχόμενη αύξηση της ταχύτητας κίνησης του οχήματος αυξάνει την

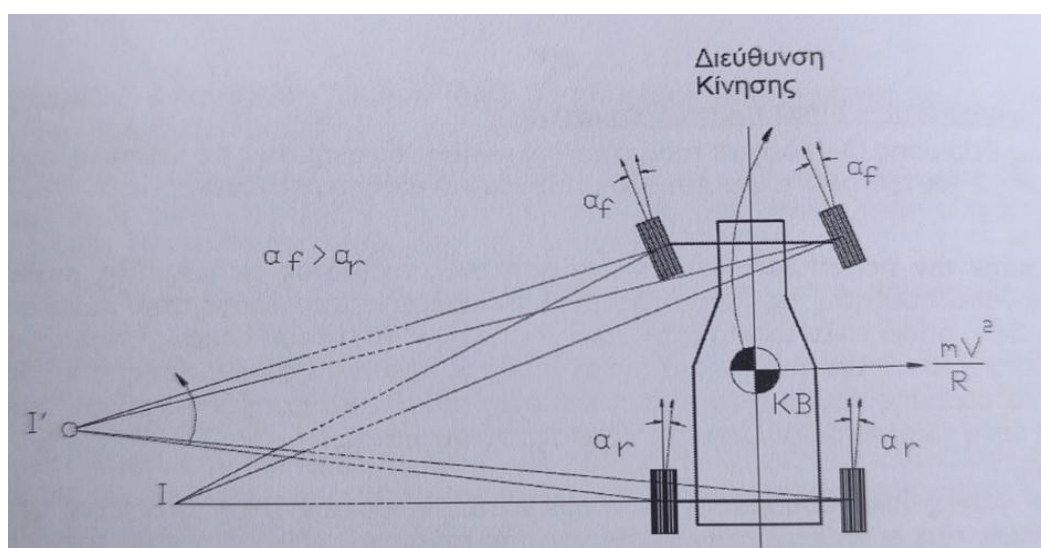
πλευρική επιτάχυνση με αποτέλεσμα το φαινόμενο να επιδεινώνεται (Σχήμα 2.6). Η μοναδική λύση στην **υπερστροφή** είναι η μείωση της γωνίας στροφής των εμπρόσθιων τροχών.



Σχήμα 2.6 : Υπερστροφή οχήματος κατά την κίνηση του σε καμπύλη (Μαυρομάτης, 2023)

- $\alpha_f > \alpha_r$

Οι γωνίες πλαγιοδρόμησης των εμπρόσθιων τροχών είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των οπίσθιων με αποτέλεσμα το όχημα να τείνει να διαγράφει τροχιά με ακτίνα καμπυλότητας αυξημένη σε σχέση με αυτήν της οδού. Έτσι η επιρροή της πλευρικής επιτάχυνσης είναι μικρότερη και η διόρθωση της πορείας του οχήματος είναι ευκολότερη για τον οδηγό στο φαινόμενο της **υποστροφής** (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7 : Υποστροφή οχήματος κατά την κίνηση του σε καμπύλη (Μαυρομάτης, 2023)

$$- \alpha f = \alpha r$$

Όταν οι γωνίες πλαγιοδρόμησης των εμπρόσθιων τροχών είναι ίσες με αυτές των οπίσθιων παρά την αύξηση της πλευρικής επιτάχυνσης, τότε δεν απαιτείται διόρθωση της πορείας του οχήματος. Αυτό συμβαίνει διότι οποιαδήποτε αύξηση στην ταχύτητα του αυτοκινούμενου εντός μίας καμπύλης σταθερής ακτίνας δεν διαφοροποιεί την γωνία απόκλισης των τροχών η οποία είναι συνάρτηση αποκλειστικά της ακτίνας R και του μήκους L του μεταξονίου.

2.2.3 iii) Εκτίμηση γωνίας πλαγιοδρόμησης εάν δεν είναι γνωστή

Η ακριβής εκτίμηση της γωνίας πλαγιοδρόμησης επιτρέπει την αναπαράσταση της πορείας του οχήματος πριν και κατά τη διάρκεια του ατυχήματος, προσδιορίζοντας το σημείο έναρξης της απώλειας ελέγχου και τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος. Ιδιαίτερα σε καμπύλα τμήματα, όπου οι φυγόκεντρες δυνάμεις και η εγκάρσια τριβή παίζουν καθοριστικό ρόλο, η γωνία πλαγιοδρόμησης αποτελεί δείκτη του βαθμού εκμετάλλευσης της πλευρικής πρόσφυσης των ελαστικών και, επομένως, βασικό στοιχείο για την εκτίμηση της ταχύτητας, της πορείας και της κινηματικής συμπεριφοράς του οχήματος κατά την εξέλιξη του συμβάντος.

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν δύο τρόποι με τους οποίους το παραπάνω κατέστη δυνατό μέσα από τις εξής δύο έρευνες :

- ‘Estimation of Vehicle Side-Slip Angle Using an Artificial Neural Network’ Daniel Chindamo and Marco Gadola, 2018
- ‘Vehicle Sideslip Estimation Design, implementation, and experimental validation’ Håvard Fjær Grip, Lars Imsland et al., 2009

Στην πρώτη έρευνα, γίνεται απόπειρα εκτίμησης της πλευρικής ολίσθησης ενός οχήματος με την βοήθεια ενός απλού τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Artificial Neural Network, ANN). Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο είναι είδος υπολογιστικού μοντέλου εμπνευσμένο από τους νευρώνες του ανθρώπινου εγκεφάλου. Έχει σχεδιαστεί για να αναγνωρίζει πρότυπα, να μαθαίνει από δεδομένα και να λαμβάνει αποφάσεις.

Βασικές Έννοιες των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANNs)

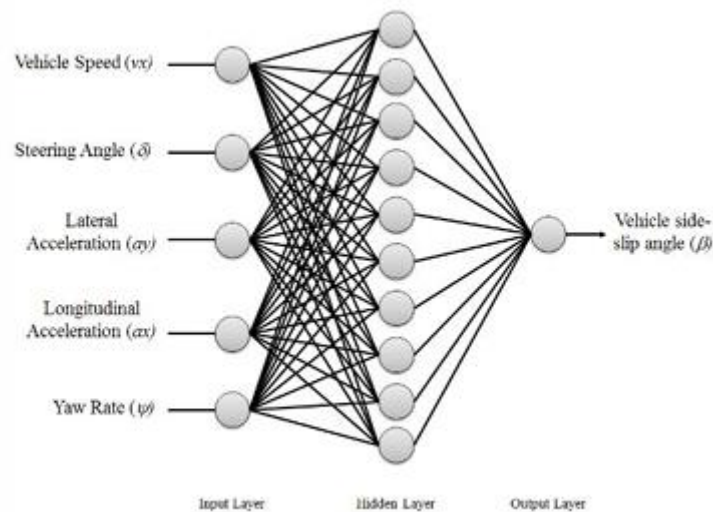
Νευρώνες: Οι βασικές μονάδες των ANNs, παρόμοιες με τους βιολογικούς νευρώνες. Κάθε νευρώνας λαμβάνει εισόδους, τις επεξεργάζεται και μεταβιβάζει την έξοδο σε άλλους νευρώνες.

Στρώματα: Τα ANNs αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα νευρώνων:

- **Στρώμα Εισόδου:** Λαμβάνει τα αρχικά δεδομένα.
 - **Κρυφά Στρώματα:** Ενδιάμεσα στρώματα που επεξεργάζονται τα δεδομένα μέσω διαφόρων μετασχηματισμών.
 - **Στρώμα Εξόδου:** Παράγει το τελικό αποτέλεσμα ή πρόβλεψη.
- Βάρη και Μεροληψίες:** Παράμετροι που προσαρμόζονται κατά την εκπαίδευση για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στις προβλέψεις.

Συναρτήσεις Ενεργοποίησης: Μαθηματικές συναρτήσεις που καθορίζουν την έξοδο ενός νευρώνα βάσει της εισόδου του.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ένα πολύ απλό μοντέλο (5 νευρώνες εισόδου, 10 ενδιάμεσοι-κρυφοί, 1 εξόδου) είναι γιατί βρέθηκε πως σε περίπτωση αύξησης των νευρώνων, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων παραμένει στα ίδια επίπεδα, ενώ ο χρόνος που τρέχει το πρόγραμμα αυξάνεται δραστικά. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε μέσω του προσομοιωτικού προγράμματος CarSim. Τα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας ήταν ενθαρρυντικά και συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.2). Επιπλέον, παρατίθεται σχεδιάγραμμα του υπολογιστικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 : Σχήμα μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, (Daniel Chindamo and Marco Gadola, 2018)

Test	Speed [km/h]	μ	Mean Error [%]
DLC	30	1	1.75
DLC	60	1	1.92
DLC	90	1	4.85
DLC	30	0.7	1.55
DLC	60	0.7	1.63
DLC	90	0.7	4.96
DLC	30	0.4	2.12
DLC	40	0.4	2.67
DLC	50	0.4	3.32
SS	30	1	1.98
SS	60	1	1.95
SS	90	1	3.60
SS	30	0.7	1.88
SS	60	0.7	2.98
SS	90	0.7	3.58
SS	30	0.4	1.76
SS	40	0.4	2.15
SS	50	0.4	15.78

DLC: double lane change, διπλή αλλαγή λωρίδας

SS: step steer, βήμα στροφής

μ : συντελεστής τριβής

Πίνακας 2.2 : Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας νευρωνικού δικτύου, (Daniel Chindamo and Marco Gadola, 2018)

Συμπερασματικά, όπως αναφέρουν οι ερευνητές, αυτή η μέθοδος επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει καλύτερα τη συμπεριφορά του οχήματος και να κατανοήσει τα κρίσιμα σημεία σχετικά με τη σταθερότητα και την ενεργητική ασφάλεια, ακόμη και όταν η άμεση μέτρηση της γωνίας πλευρικής ολίσθησης δεν είναι διαθέσιμη.

Στη δεύτερη έρευνα, που επίσης πραγματοποιείται το ίδιο αντικείμενο, δηλαδή την εκτίμηση της πλευρικής ολίσθησης ενός οχήματος, γίνεται αναφορά στα συστήματα ασφαλείας ενός αυτοκινήτου όπως τα ABS (anti-lock braking system) και το ESC (electronic stability system). Το πρώτο αποτρέπει την ακινητοποίηση των τροχών κατά την πέδηση, ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την σταθερότητα του οχήματος σε πλευρική ολίσθηση. Υπάρχει πληθώρα επιπρόσθετων συστημάτων και όλα για να λειτουργούν αποδοτικά βασίζονται σε πληροφορίες που λαμβάνονται από διάφορους αισθητήρες με τους οποίους είναι εξοπλισμένα τα αυτοκίνητα. Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν ποσότητες όπως η γωνία του τιμονιού, οι γωνιακές ταχύτητες των τροχών, η πλευρική επιτάχυνση και ο ρυθμός περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα του οχήματος.

Η μελέτη εστιάζει στη γωνία μεταξύ του προσανατολισμού του οχήματος και της κατεύθυνσης που κινείται, στο κέντρο βάρους του οχήματος που όπως ήδη ειπώθηκε, ονομάζεται **γωνία πλαγιοδρόμησης**. Όταν το όχημα κινείται φυσιολογικά, δηλαδή με ασφάλεια, η γωνία αυτή είναι της τάξης των δύο μοιρών κατά απόλυτη τιμή, και μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς με την βοήθεια κάποιου γραμμικού δυναμικού μοντέλου. Το ζήτημα, σύμφωνα πάντα με την γνώμη των ερευνητών, τίθεται όταν το όχημα κινείται στα όρια του, δηλαδή η επαφή του τροχού με το οδόστρωμα βρίσκεται σε οριακή κατάσταση, οπότε η γωνία πλευρικής ολίσθησης παίρνει μεγαλύτερες τιμές και η συμπεριφορά του οχήματος γίνεται μη γραμμική. Η ακριβής εκτίμηση της γωνίας πλευρικής ολίσθησης του οχήματος έχει τη δυνατότητα να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων συστημάτων ασφαλείας αυτοκινήτων και να βελτιώσει τους υπάρχοντες αλγόριθμους που χρησιμοποιούν πληροφορίες για τη γωνία πλευρικής ολίσθησης του οχήματος, όπως το ESC.

Ο στόχος αυτού του άρθρου είναι να αναπτύξει έναν παρατηρητή πλαγιολίσθησης οχήματος που λαμβάνει υπόψη τις μη γραμμικότητες του συστήματος, τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην θεωρητική ανάλυση. Οι στόχοι σχεδιασμού περιλαμβάνουν τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας σε σύγκριση με το Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (EKF), προκειμένου να καταστεί ο παρατηρητής κατάλληλος για εφαρμογή σε ενσωματωμένο υλικό, και τη μείωση του αριθμού των παραμέτρων ρύθμισης επίσης συγκριτικά με το EKF. Το Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (EKF) είναι μια προηγμένη έκδοση του Φίλτρου Kalman, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος από μια σειρά θορυβωδών μετρήσεων. Το EKF έχει σχεδιαστεί ειδικά για να χειρίζεται μη γραμμικά συστήματα, καθιστώντας το ένα ισχυρό εργαλείο σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ρομποτικής, της πλοήγησης και των συστημάτων ελέγχου.

Βασικά Χαρακτηριστικά του EKF:

Μη Γραμμικά Συστήματα: Σε αντίθεση με το τυπικό Φίλτρο Kalman, το οποίο περιορίζεται σε γραμμικά συστήματα, το EKF μπορεί να χειριστεί μη γραμμικότητες γραμμικοποιώντας το σύστημα γύρω από την τρέχουσα εκτίμηση.

Εκτίμηση Κατάστασης: Παρέχει μια εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος (π.χ. θέση, ταχύτητα) βάσει θορυβωδών μετρήσεων αισθητήρων.

Το EKF λειτουργεί σε δύο κύρια βήματα, την πρόβλεψη και την ενημέρωση.

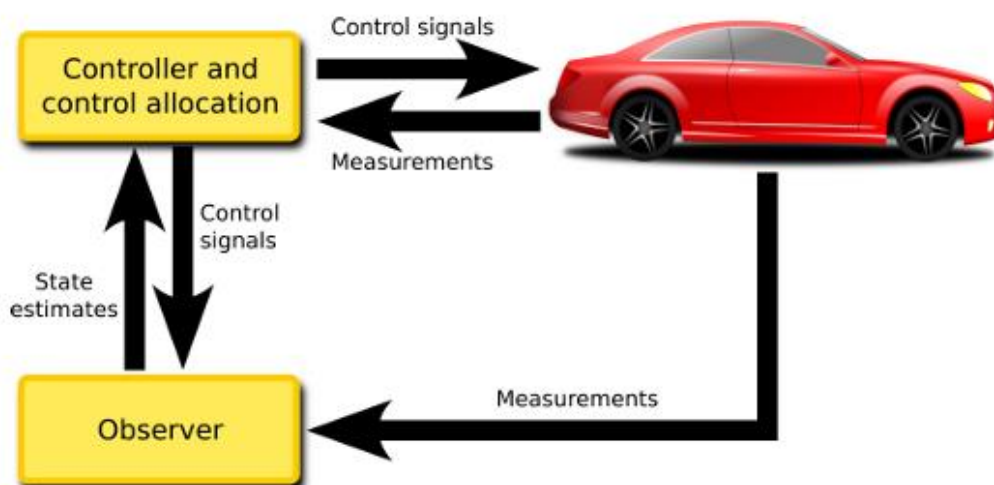
Πρόβλεψη: Προβλέπει την επόμενη κατάσταση του συστήματος βάσει της τρέχουσας κατάστασης και ενός μαθηματικού μοντέλου.

Ενημέρωση: Ενημερώνει την εκτίμηση της κατάστασης χρησιμοποιώντας τις νέες μετρήσεις και την προβλεπόμενη κατάσταση.

Πίνακας Συνοχής: Το EKF διατηρεί έναν πίνακα συνοχής που αντιπροσωπεύει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση της κατάστασης, ο οποίος ενημερώνεται σε κάθε βήμα.

Οι μελετητές οπότε, δημιουργούν ένα μοντέλο, με μία κοινή διάταξη συνδετήρων και λαμβάνοντας υπόψιν ένα μοντέλο οχήματος όπου η κατακόρυφη και οριζόντια ταχύτητα στο κέντρο βάρους του σώματος δίνεται από τις γνωστές εξισώσεις κίνησης (θα αναφερθούν στην συνέχεια). Επιπλέον, λαμβάνουν υπόψη και μοντελοποιούν την τριβή μεταξύ οδού-τροχού ενώ εκτιμούν την κατακόρυφη επιτάχυνση, την οριζόντια ταχύτητα, την κατακόρυφη ταχύτητα, τις κλίσεις και επικλίσεις της οδού. Τέλος, βάση των παραπάνω και άλλων παραμέτρων, διεξάγουν πειραματικές δοκιμές του μοντέλου που περιεγράφηκε περιληπτικά και φαίνεται στο σχήμα, εξάγοντας συμπεράσματα, πάντα συγκριτικά με τα EKF τα οποία είναι : ο Nonlinear Variable Structure Observer (NVSO) αποδίδει εξίσου καλά με το EKF, ενώ επιτυγχάνει σημαντική μείωση στον χρόνο εκτέλεσης. Η μείωση είναι πιθανό να είναι ακόμη πιο σημαντική σε παραγωγικό υλικό με μικροεπεξεργαστή σταθερού σημείου, καθώς οι υπολογισμοί αποτελούνται κυρίως από λειτουργίες κινητής υποδιαστολής. Το NVSO βασίζεται σε μη γραμμική ανάλυση, η οποία συμβάλλει στην κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών του παρατηρητή, του EKF και εναλλακτικών σχεδιασμών με παρόμοιες διαμορφώσεις αισθητήρων. Ο αριθμός των κερδών του παρατηρητή στο NVSO είναι μικρότερος από τον αριθμό των ρυθμιζόμενων στοιχείων στο EKF. Οι εκτιμήσεις του παρατηρητή είναι συνήθως υψηλής ποιότητας. Ωστόσο όπως συμπεραίνουν, ο σχεδιασμός είναι ευαίσθητος σε σφάλματα στο μοντέλο τριβής, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια σταθερών ελιγμών, και η ακρίβεια του μοντέλου τριβής εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τα ελαστικά. Η πλήρης, συστηματική ανάλυση της απόκρισης του παρατηρητή σε διάφορες αβεβαιότητες μοντέλου και ανακρίβειες αισθητήρων είναι δύσκολο έργο και δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί. Επιπλέον, παραμένουν προβλήματα σε ορισμένες καταστάσεις που αφορούν επιφάνειες χαμηλής τριβής. Αυτά τα προβλήματα μπορούν σε μεγάλο βαθμό να αποδοθούν στη δυσκολία διάκρισης της μηδενικής γωνίας κλίσης από τη χαμηλή τριβή. Η μέθοδος του NVSO για τον συνδυασμό εκτίμησης τριβής και εκτίμησης γωνίας κλίσης είναι μια αδυναμία στον παρόντα σχεδιασμό, και η προσέγγιση της επιλεκτικής μείωσης της γωνίας κλίσης βάσει διαφόρων κριτηρίων είναι πιθανό να χρειαστεί αναθεώρηση και βελτίωση πριν το NVSO φτάσει σε ποιότητα παραγωγής. Το EKF είναι γενικά καλύτερο στο να

διακρίνει αυτόματα τα σενάρια χαμηλής τριβής και μηδενικής γωνίας κλίσης, δίνοντας του πλεονέκτημα σε ορισμένες καταστάσεις, και υποδηλώνοντας ότι υπάρχει ακόμη περιθώριο για βελτίωση του NVSO. Το μοντέλο NVSO φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 : Η σχέση μεταξύ του οχήματος, ενός παρατηρητή και ενός ελεγκτή. Ο παρατηρητής συνδυάζει μετρήσεις από το όχημα με ένα δυναμικό μοντέλο, ώστε να παρέχει εκτιμήσεις των μη μετρούμενων μεγεθών στον ελεγκτή, (Håvard Fjær Grip et al., 2009)

2.2.4 Δυναμική ανάλυση και διατήρηση ενέργειας

2.2.4 i) Εισαγωγικά στοιχεία

Από πολλούς ερευνητές η αποτύπωση και η ανακατασκευή ενός οδικού ατυχήματος θεωρούνται ταυτόσημα αντικείμενα (Pankaj Shrivastava et al., 2023). Στην πραγματικότητα, η αποτύπωση οδικών ατυχημάτων αφορά την συλλογή στοιχείων και την καταγραφή τους από τον ερευνητή με τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν, ενώ η ανακατασκευή του ατυχήματος είναι η επεξεργασία των παραπάνω πληροφοριών ώστε να βρεθεί τι ακριβώς διαδραματίστηκε στη διάρκεια του ατυχήματος με αριθμητική ακρίβεια (Bohan, 2009). Για παράδειγμα, διαφέρει η έκφραση ‘το όχημα ολίσθησε έως ότου συγκρούστηκε στο στηθαίο ασφαλείας’ από την έκφραση ‘το όχημα ολίσθησε για 20 μέτρα προτού συγκρουστεί πλαγιομετωπικά υπό γωνία 35 grad στο στηθαίο ασφαλείας’, με την δεύτερη φράση να είναι το ζητούμενο της ανακατασκευής σε αντίθεση με την πρώτη που είναι πολύ γενική και αόριστη. Για να γίνει εμπεριστατωμένα η αναπαράσταση ενός οδικού ατυχήματος, ο πραγματογνώμονας θα

κάνει χρήση νόμων φυσικής και κατάλληλων εξισώσεων ώστε να βγάλει όσο το δυνατόν περισσότερα και ακριβέστερα αποτελέσματα γίνεται.

Η ανακατασκευή ενός οδικού ατυχήματος χωρίζεται σε δύο είδη, αυτή που βασίζεται στην τροχιά (πριν την σύγκρουση ή πρόσκρουση) και αυτή που βασίζεται στην ζημιά (μετά την σύγκρουση ή πρόσκρουση). Ο συνδυασμός των δύο είναι αυτός που δίνει τα πιο ακριβή αποτελέσματα. Η βασική αρχή όπως θα γίνει κατανοητό παρακάτω από τους νόμους του Νεύτωνα και τις εξισώσεις διατήρησης ενέργειας, είναι πως η αρχική ενέργεια του συστήματος είναι ίση με την τελική. Αξίζει να αναφερθεί, πως ενώ οι τιμές των ενεργειών είναι ίσες στην αρχή και στο τέλος, δεν γίνεται για παράδειγμα η τελική ενέργεια να ξαναμετατραπεί σε κινητική. Παραδείγματα σεναρίων που η ενέργεια δεν μπορεί να ξαναγίνει κινητική είναι όταν ένα όχημα φρενάρει, ολισθαίνει, πλαγιολισθαίνει, ανατρέπεται, συγκρούεται και ούτω καθεξής.

2.2.4 ii) Βασικές φυσικές αρχές ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων

Η αναπαράσταση οδικού ατυχήματος βασίζεται σε τρεις νόμους της φυσικής, οι οποίοι δύνανται να χρησιμοποιηθούν από τον ερευνητή για τον καθορισμό παραμέτρων, όπως οι αρχικές ταχύτητες και οι ταχύτητες μετά τη σύγκρουση. Αυτοί οι νόμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά (εάν μόνο μία μεταβλητή είναι άγνωστη) ή συνδυαστικά (εάν είναι άγνωστες περισσότερες μεταβλητές).

1^{ος} Νόμος του Νεύτωνα

Κάθε αντικείμενο που βρίσκεται σε κατάσταση ομαλής κίνησης τείνει να παραμείνει σε αυτήν την κατάσταση, εκτός εάν ασκηθεί επάνω του μια εξωτερική δύναμη.

2^{ος} Νόμος του Νεύτωνα

Η σχέση μεταξύ της μάζας ενός αντικειμένου «m», της επιτάχυνσής του «a» και της εφαρμοζόμενης δύναμης «F» είναι « $F = m \times a$ ». Η επιτάχυνση και η δύναμη είναι διανύσματα σε αυτόν τον νόμο και η φορά του διανύσματος δύναμης είναι η ίδια με την φορά του διανύσματος επιτάχυνσης. «F» είναι η δύναμη που ασκείται, «m» η μάζα του σώματος και «a» είναι η επιτάχυνση του σώματος λόγω της ασκούμενης δύναμης.

3^{ος} Νόμος του Νεύτωνα

Η δράση και η αντίδραση είναι ίσες και αντίθετες, δηλαδή όταν δύο σώματα αλληλεπιδρούν, η δύναμη που ασκείται από το πρώτο σώμα στο δεύτερο σώμα είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη που ασκείται από το δεύτερο σώμα στο πρώτο.

Ο Νεύτωνας όρισε τη σύγκρουση σε δύο φάσεις: τη φάση συμπίεσης και τη φάση αποκατάστασης. Σε περίπτωση πλήρους πρόσκρουσης, στο τέλος της φάσης συμπίεσης, οι ταχύτητες και των δύο οχημάτων στο σημείο ώθησης είναι ίδιες. Λόγω της ελαστικότητας των οχημάτων, τα δύο οχήματα θα διαχωριστούν ξανά.

Αρχή Διατήρησης Ενέργειας

Η διατήρηση της ενέργειας δηλώνει ότι η ποσότητα ενέργειας σε ένα κλειστό σύστημα είναι σταθερή, ανεξάρτητα από τις αλλαγές στη μορφή αυτής της ενέργειας. Η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί. Επομένως, η κινητική ενέργεια πριν από την πρόσκρουση ισούται με την κινητική ενέργεια μετά την πρόσκρουση, εκτός από την απώλεια ενέργειας.

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2 = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \cdot m_j \cdot v_j'^2 + EnergyLoss \quad (2.6)$$

όπου: m = η συνολική μάζα των σωμάτων

v = οι ταχύτητες των σωμάτων

i και j = τα σώματα που εμπλέκονται στη σύγκρουση

Η ενέργεια μπορεί να χαθεί (απορροφηθεί ή μετατραπεί) κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης λόγω:

- Παραμόρφωσης των οχημάτων
- Περιστροφής του οχήματος
- Τριβής μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος
- Ήχου από την πρόσκρουση

Η απώλεια ενέργειας λόγω παραμόρφωσης είναι πιο σημαντική από τις άλλες τιμές, καθώς το μέγεθός της είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις άλλες απώλειες. Οι λοιπές απώλειες είναι δύσκολο να προσδιοριστούν λόγω άγνωστων παραμέτρων (π.χ. διάρκεια πρόσκρουσης, ροπές αδράνειας του οχήματος, κέντρο βάρους του οχήματος). Δεδομένου ότι είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους μικρότερες, τις περισσότερες φορές παραμελούνται. Μία παράμετρος, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για τον ορισμό της απώλειας ενέργειας παραμόρφωσης, είναι η ταχύτητα ισοδύναμου ενέργειας (Equivalent Energy Speed-EES). Αποτελεί την ταχύτητα με την οποία, αν το όχημα προσέκρουε μετωπικά σε ένα ακίνητο, άκαμπτο εμπόδιο, θα υφίσταντο το ίδιο επίπεδο παραμόρφωσης με αυτό που προκλήθηκε στο πραγματικό ατύχημα. Υπάρχουν βάσεις δεδομένων δοκιμών σύγκρουσης (π.χ. η βάση δεδομένων του NCAP) από τις οποίες μπορεί κανείς να προμηθευτεί την EES.

Αρχή Διατήρησης της Ορμής

Η ορμή είναι προϊόν αδράνειας και ταχύτητας. Κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε σύγκρουσης, η ορμή διατηρείται ως συνέπεια του 3ου νόμου του Νεύτωνα - του νόμου της δράσης-αντίδρασης. Η ορμή είναι η τάση ενός αντικειμένου σε κίνηση να παραμένει σε κίνηση. Έτσι, η συνολική ορμή πριν από μια σύγκρουση είναι πάντα ίση με τη συνολική ορμή μετά από μια σύγκρουση.

$$\sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{v}_i = \sum_{j=1}^n m_j \cdot \vec{v}_j'$$

Ένας χρήσιμος τρόπος αύξησης της εφαρμοσιμότητας της προαναφερθείσας εξίσωσης είναι η χρήση της έννοιας της ελαστικότητας. Η ελαστικότητα είναι ένα μέτρο της αναλογίας μεταξύ του διαχωρισμού και της τελικής ταχύτητας. Μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0 (πλαστική σύγκρουση, χωρίς διαχωρισμό) και 1 (πλήρως ελαστική σύγκρουση).

Αρχή Διατήρησης Στροφορμής

Η στροφορμή είναι η τάση ενός περιστρεφόμενου αντικειμένου να συνεχίζει να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα γύρω από τον ίδιο άξονα περιστροφής.

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{M}_{Res} \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} d(\vec{r} \times m\vec{v}) = \int_{t_1}^{t_2} d\vec{L} \quad (2.8)$$

Γενικά ισχύει :

Εαρχής = Ετέλους

E : η συνολική ενέργεια του συστήματος

Όταν ένα όχημα βρίσκεται σε κίνηση, διαθέτει κινητική ενέργεια :

$$KE = 1 / 2 \cdot mV^2 \quad (2.9)$$

όπου m η μάζα του οχήματος (σε kg) και V η ταχύτητα του (σε m/s). Όπως παρατηρούμε από την εν λόγω εξίσωση, όταν η ταχύτητα του οχήματος διπλασιάζεται, η κινητική ενέργεια του τετραπλασιάζεται.

Επιπλέον, η δύναμη που ασκείται μέσω του μη αναστρέψιμου έργου της τριβής υπολογίζεται από τον τύπο **Ework = mgfd** (2.10) όπου :

m: η μάζα του οχήματος (kg)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s²)

f: συντελεστής τριβής μεταξύ ρόδας και οδοστρώματος (αδιάστατος)

d: απόσταση για την οποία το όχημα ολισθαίνει (σε m)

Ework: έργο λόγω ολίσθησης (σε J)

Συνδυάζοντας της παραπάνω σχέσεις έχουμε πως :

$$\text{Εαρχής} = \text{Ετέλους}$$

$$\text{KE} = \text{Ework}$$

$$1/2 \cdot mV^2 = mgfd$$

$$V = (2gfd)^{1/2} \quad (2.11)$$

Άρα, μετρώντας την απόσταση για την οποία το όχημα ολίσθησε μέσω των ιχνών των ελαστικών του, μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του οχήματος ακριβώς πριν αρχίσει να ολισθαίνει.

Στην περίπτωση που υπάρχει και πρόσκρουση σε σταθερό εμπόδιο,

$$\text{KE} = \text{Εολίσθησης} + \text{Επρόσκρουσης} \quad (2.12)$$

$$1/2 mV^2 = mgfd + Kx \quad (2.13)$$

Με:

K = συντελεστής πρόσκρουσης που λαμβάνει τιμές από 0 (τέλεια πλαστική πρόσκρουση) έως 1 (τέλεια ελαστική πρόσκρουση). Στην πράξη, οι τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,1 και 0,4.

χ = βάθος θλίψης της έμπροσθεν όψης του οχήματος. Εάν η σχέση αυτή λυθεί ως προς την ταχύτητα προκύπτει ότι :

$$V^2 = 2gfd + 2xK / m \quad (2.14)$$

Τέλος, στο ίδιο σενάριο πρόσκρουσης οχήματος με άκαμπτο εμπόδιο (πχ. τοίχος), η επιβράδυνση του οχήματος είναι:

$$a = V^2 / 2x \quad (2.15)$$

2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (ΔV)

2.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Πληθώρα ερευνών έχει δείξει πως η μεταβολή της ταχύτητας (ΔV) είναι κρίσιμη παράμετρος στην ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων. Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως το μέτρο της απότομης αλλαγής ταχύτητας του οχήματος και των επιβατών, χρησιμεύοντας ως βασικός δείκτης για την εκτίμηση της σοβαρότητας της σύγκρουσης (O'Neill et al., 1996 ; Prasad & Rathi, 2012). Κάθε όχημα πριν από τη σύγκρουση διαθέτει κινητική ενέργεια ενώ κατά την διάρκεια αυτής μέρος της απορροφάται από τη μόνιμη παραμόρφωση του οχήματος (συνθλίψεις), ενώ το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα, ήχο και κίνηση των επιβατών. Το μέγεθος της απορροφούμενης

ενέργειας αποτελεί ένδειξη της σοβαρότητας της σύγκρουσης (Eck & Zador, 1994). Για την εκτίμηση της μεταβολής ταχύτητας, υπάρχουν ποικίλοι τρόποι όπως έχει ήδη αναλυθεί σε άλλες ενότητες. Η μέθοδος που παρουσιάζει την μεγαλύτερη ακρίβεια είναι ευθεία συνάρτηση της ακρίβειας των μετρήσεων, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται μόνο σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Επιπλέον, εάν παρέχονται δεδομένα από το όχημα κατά την διάρκεια της σύγκρουσης η ποσότητα αυτή είναι γνωστή όμως δεν είναι πάντα διαθέσιμα τέτοια δεδομένα. Στην προκειμένη θα διερευνηθεί μια ενεργο-κεντρική μέθοδος που αφορά τις παραμορφώσεις που υφίστανται τα εμπλεκόμενα σε ένα συμβάν οχήματα αφού συγκρουστούν. Το παραπάνω πραγματοποιείται με μετρήσεις που αφορούν το βάθος και πλάτος της παραμόρφωσης των αμαξωμάτων των εμπλεκόμενων οχημάτων.

2.3.2 Ιστορική εξέλιξη της μεθόδου

Αφετηρία για την ανάπτυξη της μεθόδου αποτέλεσε η προσπάθεια για μείωση των οδικών ατυχημάτων στις ΗΠΑ το 1960. Η μελέτη φωτογραφιών των ατυχημάτων για να προσδιοριστεί η σφοδρότητα τους, δεν ενείχε αρκετή ακρίβεια οπότε αυτό δημιούργησε το έναυσμα για την εξεύρεση μίας ακριβέστερης μεθόδου. Με την εμφάνιση των υπολογιστών αναπτύχθηκαν τα λογισμικά SMAC και CRASH (Calspan Reconstruction of Accident Speeds on the Highway) για να βοηθήσουν τον πραγματογνώμονα στο έργο της ανακατασκευής. Το πρώτο ήταν ιδιαίτερα δαπανηρό ενώ το δεύτερο βασιζόταν στην θεωρία του Campbell που περιληπτικά αναφερόταν σε γραμμικότητα μεταξύ της παραμόρφωσης ενός οχήματος λόγω σύγκρουσης και της ταχύτητας του. Στην συνέχεια, ο Campbell δημιούργησε την εξίσωση $V = b_0 + b_1 C$ όπου b_0 η οριακή ταχύτητα πρόσκρουσης ενός οχήματος χωρίς να υποστεί παραμόρφωση και b_1 η σταθερά ελατηρίου του οχήματος. Επιπροσθέτως, ο Campbell ανέπτυξε την ιδέα ότι η απορροφούμενη ενέργεια σύγκρουσης είναι ανάλογη της έκτασης της παραμόρφωσης. Με γνώμονα τα παραπάνω, το λογισμικό CRASH ρυθμίστηκε ως εργαλείο στατιστικής στο Cornell Aeronautical Lab (McHenry, 2001). Το 1977 κυκλοφόρησε η δεύτερη έκδοση του λογισμικού το CRASH2. Τέλος, το 1982 κυκλοφόρησε η τρίτη έκδοση CRASH3 ακολουθούμενη από πληθώρα παρόμοιων λογισμικών εκ των οποίων κανένα δεν είναι εξίσου διαδεδομένο. Η National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) εμπλούτιζε συνεχώς την αρχαιοθήκη της με πειραματικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων με αποτέλεσμα το 1990 το CRASH3 να γίνεται όλο και πιο ακριβές ελαχιστοποιώντας το εύρος σφαλμάτων. Πάνω σε αυτό βασίστηκε το λογισμικό WinSmash της Microsoft το οποίο χρησιμοποιεί η NHTSA πλέον.

2.3.3 Μέθοδος CRASH3

Η τελευταία σχέση στην οποία βασίζεται η μέθοδος αποτελεί παραλλαγή της σχέσης του Campbell που προαναφέρθηκε και είναι η εξής :

$$\sqrt{\frac{2E_C}{w}} = d_0 + d_1 C \quad (2.16)$$

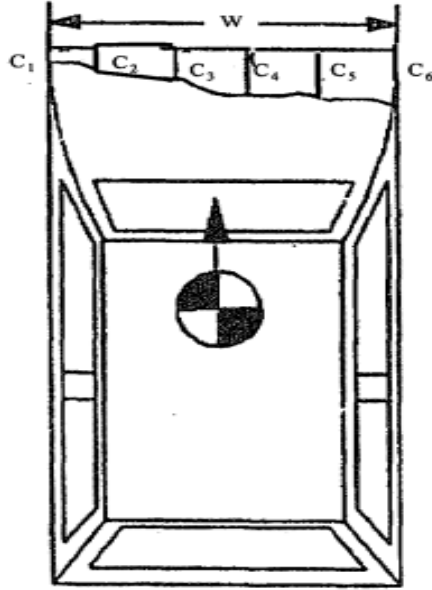
E_C : Ενέργεια σύγκρουσης (J)

w : Μονάδα πλάτους παραμορφωμένου πλαισίου οχήματος (m)

C : Μόνιμη παραμόρφωση (m), (μετριέται κάθετα από και προς την κανονική μη παραμορφωμένη επιφάνεια)

d_0, d_1 : συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης (αδιάστατοι), (προσδιορίζονται πειραματικά ενώ διαφέρουν από όχημα σε όχημα καθώς και μεταξύ έμπροσθεν, πλαϊνού και πίσω τμήματος του οχήματος).

Η μόνιμη παραμόρφωση μετριέται ως εξής : χρησιμοποιούνται 6 ισοκατανεμημένες μετρήσεις της παραμορφωμένης επιφάνειας που εξετάζεται όπως εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.10). Οι μετρήσεις γίνονται στο ύψος των προφυλακτήρων του οχήματος και κάθετα στην παραμορφωμένη επιφάνεια. Ως παραμόρφωση λογίζεται τόσο η ζημιά που προκαλείται μέσω επαφής, όσο και αυτή που προκαλείται από δυνάμεις επαφής σε παρακείμενες περιοχές. Εάν η παραμόρφωση δεν είναι ομοιόμορφη, κάτι που είναι σύνηθες, ειδικά σε πλευρικές συγκρούσεις, τότε οι μετρήσεις γίνονται στον σκελετό του οχήματος σε κοντινή απόσταση στο δάπεδο. Χρήζει αναφοράς πως, όταν ένα όχημα συγκρουστεί με στενό αντικείμενο ή είναι μικρή η επιφάνεια επαφής των εμπλεκόμενων οχημάτων η εν λόγω μέθοδος δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί. Επιπλέον, δεν εφαρμόζεται εάν η παραμορφωμένη επιφάνεια δεν είναι κοντά στο ύψος των προφυλακτήρων.



Σχήμα 2.10 : Ενδεικτικές παραμορφώσεις στην εμπρόσθια επιφάνεια του οχήματος κατά το πλάτος του, (Καπέτης, 2019)

Εάν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις τότε η ενέργεια σύγκρουσης είναι υπολογίσιμο μέγεθος με χρήση των παρακάτω σχέσεων :

$$E_c = d_0^2 K_1 + d_0 d_1 K_2 + d_1^2 K_3 \quad (2.17)$$

$$\text{με : } K_1 = w/2, K_2 = w[C_1 + 2(C_2 + C_3 + C_4 + C_5) + C_6] / 10,$$

$$K_3 = w^1[C_1^2 + 2(C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + C_5^2) + C_6^2 + C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_4 + C_4 C_5 + C_5 C_6] / 30$$

Όπου w το πλάτος της παραμορφωμένης επιφάνειας (σε m) και C_j οι μετρήσεις του βάθους της παραμόρφωσης με $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (σε m).

Η σχέση που συνδέει την **συνολική** ενέργεια σύγκρουσης E_c με την μεταβολή της ταχύτητας ΔV είναι η εξής: $m_i \Delta V_i = \sqrt{2m_e E_c}$, $i = 1, 2$ (2.18)

$$\text{Όπου } m_e = \gamma_1 m_1 \gamma_2 m_2 / (\gamma_1 m_1 + \gamma_2 m_2), \gamma_i = k_i^2 / (k_i^2 + h_i^2) \text{ και } k_i = \sqrt{\frac{J_i}{m_i}}$$

k_i : ακτίνα εκτροπής της περιστροφής ενός οχήματος

h_i = κάθετη απόσταση μεταξύ κέντρου μάζας ενός οχήματος και της κύριας διεύθυνσης της δύναμης σύγκρουσης (principal direction of force-pdf)

J_i = ροπή αδράνειας γύρω από τον άξονα του εκάστοτε οχήματος

Για να ισχύουν οι παραπάνω εξισώσεις, υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις που οφείλουν να πληρούνται ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι ορθά. Τέτοιες προϋποθέσεις είναι :

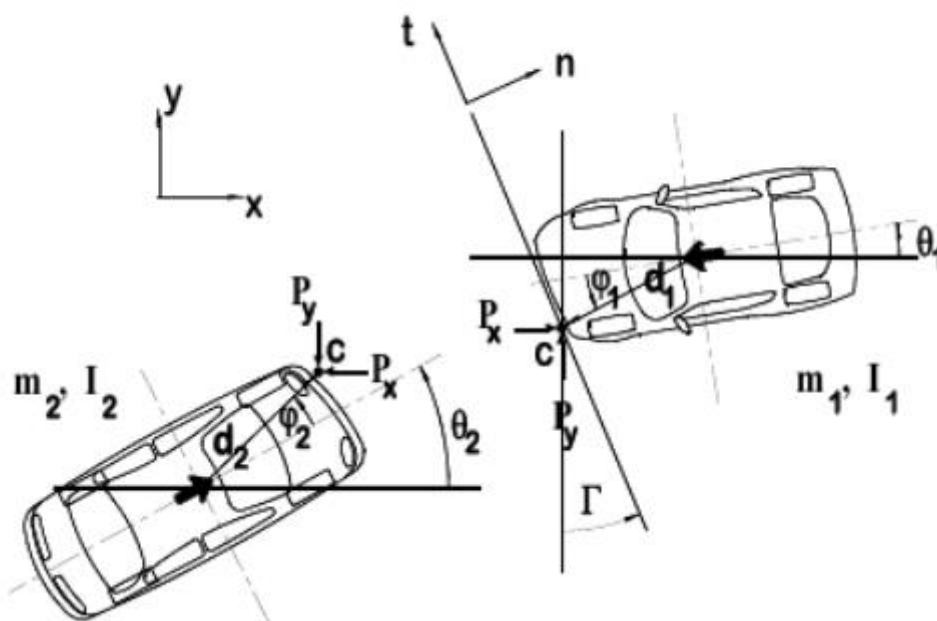
- Ισότητα μεταξύ ενέργειας σύγκρουσης και απώλειας ενέργειας κατά την σύγκρουση
- Μέση ή υψηλή ταχύτητα κίνησης των οχημάτων
- Πλήρης ανελαστικότητα σύγκρουσης
- Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στα οχήματα θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις δυνάμεις σύγκρουσης μεταξύ τους
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν η απώλεια ενέργειας που σχετίζεται με τις αλλαγές στις σχετικές εφασπτομενικές ταχύτητες

Επειδή τα παραπάνω δεν είναι δυνατόν να ισχύουν σε όλες τις περιπτώσεις, υφίσταται ένας ακόμα τρόπος να υπολογιστεί η μεταβολή ταχύτητας ΔV μέσω της θεωρίας ώθησης-ορμής.

2.4 ΘΕΩΡΙΑ ΩΘΗΣΗΣ-ΟΡΜΗΣ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΜΑΖΩΝ

2.4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η εν λόγω θεωρία αποτελεί ουσιαστικά ειδική περίπτωση της γενικευμένης θεωρίας ώθησης-ορμής και μπορεί να ονομαστεί θεωρία ώθησης-συγκρούσεων. Σε ένα οδικό ατύχημα, όταν δύο οχήματα έρθουν σε επαφή, η δύναμη επαφής τους υπερिशύει των υπόλοιπων δυνάμεων του συστήματος για το μικρό χρονικό διάστημα που βρίσκονται σε επαφή. Το παρακάτω σχήμα αποτελεί ένα διάγραμμα ελευθέρου σώματος δύο οχημάτων την στιγμή της σύγκρουσης τους, θεωρώντας πως αποτελεί στιγμιαίο γεγονός (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11 : Μοντέλο επίπεδης σύγκρουσης κατά Brach, (Καπέτης, 2019)

Το Επίπεδο Μοντέλο Σύγκρουσης χρησιμοποιεί τα παρακάτω γεωμετρικά μεγέθη για την ανάλυση του: α) Αποστάσεις d_1 και d_2 οι οποίες εκφράζουν την απόσταση του κέντρου μάζας κάθε οχήματος από το σημείο σύγκρουσης του.

β) Γωνίες θ_1 και θ_2 , οι οποίες εκφράζουν την κατεύθυνση των οχημάτων ως προς τον άξονα x και μετρούνται από τον θετικό ημιάξονα x με αντιωρολογιακή φορά, όπως φαίνεται στο σχήμα

γ) Γωνίες ϕ_1 και ϕ_2 , οι οποίες είναι οι γωνίες που σχηματίζουν οι αποστάσεις d_1 και d_2 με τον άξονα x του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων.

δ) Η γωνία Γ που σχετίζεται με την στροφή μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων (n, t) με το καρτεσιανό (x, y) και είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας σύγκρουσης με τον y άξονα.

2.4.2 Μοντέλο Brach

Το μοντέλο του Brach βασίζεται σε ένα σύστημα 6 εξισώσεων με ισάριθμους αγνώστους. Όμως, επειδή παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, επιλέγεται μία ελαφρώς πιο απλοποιημένη εκδοχή του, επίσης ενός συστήματος 6 εξισώσεων με 6 αγνώστους. Από τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει πως $mV - mU = P$ δηλαδή πως τελική ορμή μείον την αρχική ορμή ισούται με την ώθηση αμέσως μετά την σύγκρουση. Εάν εφαρμοστεί η παραπάνω θεμελιώδης σχέση για κάθε ένα εκ των οχημάτων και στις δύο διευθύνσεις, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$m_1 V_{1n} - m_1 u_{1n} = P_n \quad (2.18)$$

$$m_1 V_{1t} - m_1 u_{1t} = P_t \quad (2.19)$$

$$m_2 V_{2n} - m_2 u_{2n} = -P_n \quad (2.20)$$

$$m_2 V_{2t} - m_2 u_{2t} = -P_t \quad (2.21)$$

Στην συνέχεια αφού οι άγνωστοι είναι περισσότεροι από τις εξισώσεις είναι δυνατόν να πάρουμε επιπλέον σχέσεις από :

$$\text{Τον συντελεστή αποκατάστασης } e = -\left(\frac{V_{2n}-V_{1n}}{u_{2n}-u_{1n}}\right) \quad (2.22)$$

Την σχέση μεταξύ αξονικής και εφαπτομενικής ώθησης: $P_t = \mu P_n$ (2.23)
όπου μ ένας λόγος ωθήσεων που μπορεί να πάρει είτε αρνητικές είτε θετικές τιμές και του οποίου η χρησιμότητα θα αναφερθεί στην επόμενη υποενότητα (2.4.3).

Συμπληρωματικά, η απώλεια κινητικής ενέργειας είναι :

$$\begin{aligned} \Delta K &= K_{\text{τελ}} - K_{\text{αρχ}} = \\ &= \frac{1}{2} m_1 (u_{1n}^2 + u_{1t}^2) + \frac{1}{2} m_2 (u_{2n}^2 + u_{2t}^2) - \frac{1}{2} m_1 (V_{1n}^2 + V_{1t}^2) - \frac{1}{2} m_2 (V_{2n}^2 + V_{2t}^2) \\ &= \frac{1}{2} \bar{m} (u_{2n} - u_{1n})^2 (1 + e) [(1 - e) + 2\mu r - (1 + e)\mu^2] \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$r = \frac{u_{2t} - u_{1t}}{u_{2n} - u_{1n}} \quad (2.25)$$

με

Μία κρίσιμη παράμετρος της ανακατασκευής όπως έχει προαναφερθεί είναι η μεταβολή της ταχύτητας ΔV που με την συγκεκριμένη μέθοδο ορίζεται ως εξής :

$$\Delta V_i = \frac{\bar{m}(u_{2n}-u_{1n})}{m_i} \cdot (1 + e) \cdot \sqrt{1 + \mu^2} \quad , i = 1,2 \quad \text{με} \quad \bar{m} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.25)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις η μάζα είναι σε kg και οι ταχύτητες σε m/s.

2.4.3 Πλευρικές συγκρούσεις και συντελεστής αναλογίας ώθησης

Η σχέση μεταξύ μ και μ_0 (κρίσιμος συντελεστής αναλογίας ώθησεων) μπορεί να περιγράψει περαιτέρω μία σύγκρουση. Πιο συγκεκριμένα, το μ παίρνει τιμές από 0 έως μ_0 . Στην περίπτωση που $\mu = 0$, τότε έχουμε ελάχιστες απώλειες ενώ όσο η τιμή αυξάνεται και πλησιάζει το μ_0 αυτές μεγιστοποιούνται. Όταν $\mu < \mu_0$ τότε είναι αυτονόητο πως αντιμετωπίζουμε μία πλευρική σύγκρουση καθώς τα οχήματα συνεχίζουν να ολισθαίνουν επί της επιφάνειας επαφής τους κατά την διάρκεια της. Εάν $\mu = \mu_0$ η ολίσθηση αυτή παύει να υφίσταται ενώ αν και ο συντελεστής αποκατάστασης $e = 0$ τότε τα σώματα έχουν κοινή ταχύτητα, δηλαδή παραμένουν ενωμένα μετά την σύγκρουση. Αυτό είναι κάτι που παρατηρείται σε περιπτώσεις ατυχημάτων που έγιναν με υψηλές ταχύτητες. Εάν τα μεγέθη που αναφέρθηκαν σε αυτή την ενότητα μαζί με τις αρχικές ταχύτητες είναι γνωστά μπορούν να βρεθούν οι τελικές ταχύτητες των οχημάτων με χρήση των παραπάνω τύπων. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις ανακατασκευής, είναι πιο βολικό να λύνεται το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή ο προσδιορισμός των αρχικών ταχυτήτων για γνωστές τελικές ταχύτητες. Όμως, απαιτείται προσοχή σε περιπτώσεις τροχαίων ατυχημάτων που δεν ισχύουν οι συνθήκες κοινής ταχύτητας γιατί κατά το αντίστροφο πρόβλημα εμφανίζονται όροι που περιέχουν τον όρο $1/e$ και απειρίζονται όταν $e=0$. Συμπερασματικά, σε τυπικές εφαρμογές οι εξισώσεις επιλύονται με χρήση επαναληπτικής μεθόδου.

2.5 ΙΧΝΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ

2.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Τα ίχνη των ελαστικών στο οδόστρωμα είναι εκ των κρισιμότερων αποδεικτικών στοιχείων για την διαλεύκανση του τι συνέβη σε ένα οδικό ατύχημα. Με την βοήθεια τους, εξάγονται δεδομένα ως προς την κίνηση του οχήματος, την ταχύτητα, την κατεύθυνση αλλά και το βάρος του (O'Hara and Osterburg, 1960). Μπορεί να υπολογιστεί με ένα εκ των παρακάτω ή συνδυασμό τους:

1. Σημάδια ολίσθησης
2. Σημάδια εκτροπής
3. Ζημιά στο όχημα
4. Μαρτυρίες

Για την αξιοποίηση των ιχνών ολίσθησης, που αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τρόπο εκτίμησης της ταχύτητας, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την απόσταση που το όχημα ολίσθαινε, τον συντελεστή τριβής, την κλίση-επίκλιση της οδού, τον αριθμό των τροχών που φρέναραν, και το αν το όχημα είχε επαφή με αντικείμενο ή άλλο όχημα προτού ολισθήσει. Η διατήρηση τους κρίνεται ως ζωτικής σημασίας, καθώς μετά το

πέρα ολίγων ωρών ξεκινούν να ξεθωιάζουν οπότε τα αποτελέσματα με το πέρας του χρόνου γίνονται ολοένα και λιγότερο ακριβή. Τα ίχνη των ελαστικών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ίχνη επιτάχυνσης, ίχνη πέδησης και ίχνη ολίσθησης κάθε μία εκ των οποίων θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω.

Ίχνη επιτάχυνσης

Τα ίχνη επιτάχυνσης είναι σκουρότερα όταν πρωτοεμφανίζονται και στην πορεία τους μικραίνουν και γίνονται πιο ισχνά αφού η τριβή μεταξύ του τροχού και του οδοστρώματος αυξάνεται.

Ίχνη πέδησης

Τα ίχνη φρεναρίσματος είναι ουσιαστικά αντίστροφα από τα σημάδια επιτάχυνσης των ελαστικών. Ξεκινούν πιο ανοιχτά και στην συνέχεια γίνονται εντονότερα όσο θερμαίνεται δηλαδή ο τροχός, μέχρι να έρθει το όχημα σε πλήρη ακινησία. Εξαρτώνται όπως και τα προηγούμενα από τον συντελεστή τριβής μεταξύ τροχού και οδοστρώματος. Δημιουργούνται όταν το όχημα φρενάρει απότομα με αποτέλεσμα οι τροχοί να ολισθαίνουν επί του οδοστρώματος. Χωρίζονται σε τρεις φάσεις, την αρχική που δεν είναι εύκολα διακριτή και που οι τροχοί απλώς ‘καθαρίζουν’ την οδό, την δεύτερη χρονικά που οι τροχοί ξεκινούν να θερμαίνονται και αφήνουν σημάδια πέδησης και την τελευταία όπου προκύπτουν μαύρα ίχνη από την απότομη παύση κίνησης των σε ήδη υψηλή θερμοκρασία τροχών. Όλα τα παραπάνω στάδια παρέχουν σημαντικά δεδομένα στον ερευνητή για την εξέλιξη ενός ατυχήματος.

Ίχνη ολίσθησης-εκτροπής σε στροφή γύρω από τον κάθετο άξονα του οχήματος

Όταν οι κινητήριοι τροχοί ενός αυτοκινήτου στρίβουν ενώ ταυτόχρονα περιστρέφονται με απώλεια τριβής, δημιουργούνται τα συγκεκριμένα σημάδια ελαστικών (yaw marks). Μπορούν να δημιουργηθούν από όλους τους τροχούς ενός αυτοκινήτου με διαφορές μεταξύ τους ως προς την τροχιά, την κατεύθυνση τους και την ‘ένταση’ τους.

2.5.2 Τυπολογία

Πρόκειται για τη μαθηματική σχέση που δείχνει την απόσταση για την οποία ολισθαίνει ένα όχημα μέχρι να έρθει πλήρως σε στάση. Προκύπτει με χρήση Νευτώνειας Φυσικής και θεώρηση του οχήματος ως σημειακή μάζα. Για να εφαρμοσθεί ο παρακάτω τύπος που βρέθηκε στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ορισμένες προϋποθέσεις :

- 1) Το όχημα να ολισθαίνει σε ευθεία γραμμή χωρίς εμπόδια.
- 2) Ο συντελεστής τριβής f_T να παραμένει σταθερός και αμετάβλητος.
- 3) Σταθερή επιβράδυνση έως να μηδενιστεί η ταχύτητα.
- 4) Οδόστρωμα χωρίς κλίση.

Ο τύπος είναι ο εξής :

$$d = \frac{V^2}{2f_T g} \quad (2.26)$$

Όπου:

- d : η απόσταση που ολισθαίνει το όχημα σε m
- V : η αρχική ταχύτητα του οχήματος σε m/s
- f_T : ο συντελεστής τριβής μεταξύ λάστιχου-οδοστρώματος (αδιάστατος)
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($= 9,81 \text{ m/s}^2$)

Βάση των προϋποθέσεων για την εφαρμογή του τύπου, εξάγεται το συμπέρασμα πως είναι περισσότερο θεωρητικός, καθώς οι προϋποθέσεις αυτές είναι δύσκολο να συνυπάρχουν όλες στην πράξη και άρα ο τύπος υπόκειται σε διορθώσεις ώστε να χρησιμοποιηθεί σωστά σε κάθε περίπτωση.

Ο συντελεστής τριβής f_T περιγράφηκε από τον τύπο (2.1).

Ο συντελεστής τριβής επηρεάζεται από την κλίση της οδού και τροποποιείται ως εξής: $f_T = f_{T_baseline} + s/100$ (2.27)

Όπου, $f_{T_baseline}$ = Συντελεστής τριβής για επίπεδη επιφάνεια

s = ποσοστό κλίσης (%). Θετικός αριθμός υποδηλώνει ανωφέρεια, ενώ αρνητικός αριθμός υποδηλώνει κατωφέρεια.

Ο παραπάνω τύπος πηγάζει από τις εξισώσεις ισορροπίας (2^{ος} νόμος Νεύτωνα) κατά την εφαπτομενική διεύθυνση μιας σημειακής μάζας σε ένα επίπεδο τμήμα οδού με συντελεστή τριβής f μεταξύ τους.

Εάν η οδός έχει κλίση, το διάγραμμα ελευθέρου σώματος είναι ίδιας μορφής αλλά έχοντας λάβει υπόψη την γωνία s της κλίσης που έχει η οδός με το επίπεδο (χ άξονας) (Peter Chen,2020).

$$V = (2 d a)^{1/2} \quad (\text{σε m/s}) \quad (2.28)$$

Όπου:

a : επιβράδυνση οχήματος επί κλίσης $a = f_T \cdot g = (f_{T_baseline} + s/100) \cdot g$

Επιπλέον, ο συντελεστής τριβής λαμβάνει τιμές από 0,65-0,90 για όχημα κινούμενο επί στεγνού οδοστρώματος (R. Limpert,1994). Στην πραγματικότητα, για να είναι ο συντελεστής τριβής πλήρως αμετάβλητος θα πρέπει και οι 4 τροχοί να έχουν ακινητοποιηθεί και η χρήση των φρένων να είναι η μέγιστη δυνατή και συνεχής τόσο από το όχημα όσο και από τον οδηγό. Απαιτείται επομένως μείωση του συντελεστή τριβής εάν κάποιος τροχός δεν συμμετέχει στην ολίσθηση ή εάν τα φρένα δεν έχουν ενεργοποιηθεί στο 100% των δυνατοτήτων τους. Σε αυτή την περίπτωση, προστίθεται ως υπορίζη ποσότητα στον αρχικό τύπο μία μεταβλητή n ίση με το ποσοστό απόδοσης του φρεναρίσματος. Όσον αφορά την επιβράδυνση, συνήθως δεν είναι σταθερή ειδικά στην αρχή και στο τέλος της χρήσης του συστήματος πέδησης, παρόλα αυτά δεν επηρεάζονται σημαντικά τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τον τύπο. Εάν το

φρενάρισμα είναι ιδιαιτέρως σύνθετο, τότε η ανάλυση θα γίνει τμηματικά σε επιμέρους τμήματα που το καθένα έχει παρόμοια επιβράδυνση. Όταν το όχημα δεν κινείται συνεχή ευθύγραμμη τροχιά, αλλά βγει εκτός των ορίων του οδοστρώματος, τότε η ταχύτητα ισούται με την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των ταχυτήτων σε κάθε τμήμα με διαφορετικό συντελεστή τριβής που κινήθηκε το όχημα. Μικρή απόκλιση από ευθεία γραμμή δεν ακυρώνει την χρήση του τύπου αλλά σε περίπτωση πλήρους απώλειας ελέγχου του οχήματος, ανατροπής κ.τ.λ. ο τύπος δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί. Τέλος, ο τύπος και τα αποτελέσματα του είναι ανεξάρτητα της μάζας του οχήματος και της θερμοκρασίας.

2.6 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ-ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Η επιτάχυνση και επιβράδυνση ενός οχήματος μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε μεταβαλλόμενη. Στην περίπτωση της μεταβαλλόμενης, θεωρούμε πως υπάρχει γραμμικότητα χάριν απλοποίησης. Με γνώμονα τις εξισώσεις της κινηματικής, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν η απόσταση που το όχημα διανύει σε κάθε περίπτωση, ο χρόνος έως ότου ακινητοποιηθεί ή η ταχύτητα με την οποία κινείται το όχημα, αναλόγως το ποια μεγέθη από τα παραπάνω είναι γνωστά ή άγνωστα στον πραγματογνώμονα κατά την ανακατασκευή ενός ατυχήματος.

Εξισώσεις σταθερής επιτάχυνσης-επιβράδυνσης

- $V = V_0 + at$ (2.29)

- $D = V_0 t + \frac{at^2}{2}$ (2.30)

Εξισώσεις γραμμικά μεταβαλλόμενης επιτάχυνσης-επιβράδυνσης

- $a = \frac{a_2 - a_1}{t_s} t + a_1$ (2.31)

- $V = \int a dt = \frac{a_2 - a_1}{2t_s} t^2 + a_1 t + V_0$ (2.32)

- $D = \int V dt = \frac{a_2 - a_1}{6t_s} t^3 + \frac{a_1 t^2}{2} + V_0 t$ (2.33)

Εάν $t = t_s$ τότε :

- $V(t_s) = \frac{a_2 + a_1}{2} t_s + V_0$ (2.34)

- $D(t_s) = \frac{a_2 + 2a_1}{6} t_s^2 + V_0 t_s$ (2.35)

Όπου :

α : επιτάχυνση (-α επιβράδυνση) (m/sec²)

a_1 : αρχική επιτάχυνση

a_2 : τελική επιτάχυνση

V_0 : αρχική ταχύτητα (m/sec)

t : χρόνος (σε δευτερόλεπτα)

V : ταχύτητα του οχήματος στο χρόνο t (σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα)

D : διανυόμενο διάστημα από το όχημα σε χρόνο t (σε μέτρα)

t_s : χρόνος μεταβολής επιτάχυνσης από a_1 σε a_2

Η ακινητοποίηση ενός οχήματος διακρίνεται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση (Φ1) περιλαμβάνει την οπτική επαφή με ενδεχόμενο σημείο κινδύνου, τη λήψη πληροφοριών για αυτό το σημείο, τη μεταβίβαση της πληροφορίας στον εγκέφαλο και την επεξεργασία της από αυτόν, την λήψη απόφασης είτε για αντίδραση (πχ πέδηση) είτε για συνέχιση της πορείας, την εντολή από τον εγκέφαλο στο νευρικό και μυϊκό σύστημα για ενεργοποίηση σωματικών κινήσεων, ανασήκωση ποδιού από το γκάζι και πίεση ποδόπληκτρου πέδησης. Άρα, συνολικά, αφορά το μήκος που διανύεται κατά το χρόνο αντίληψης-αντίδρασης. Η δεύτερη φάση (Φ2) αποτελείται από το μήκος που διανύεται κατά το χρόνο έναρξης ενεργοποίησης του συστήματος πέδησης με αυξανόμενη ένταση έως την πλήρη ενεργοποίηση ($D_{\text{braking activation}}$) και η τελευταία φάση (Φ3) περιγράφεται ως το μήκος που διανύεται κατά το χρόνο αμιγούς πέδησης με σταθερή επιβράδυνση ($D_{\text{deceleration}}$).

Οι εξισώσεις που ισχύουν για τις παραπάνω φάσεις είναι οι εξής :

- Φ1

$$\alpha = 0$$

$$V_{\Phi 1} = V_0 \quad (2.36)$$

$$D_{\Phi 1} = V_0 t_{\text{perception reaction}} \quad (2.37)$$

- Φ2

α : γραμμικά μεταβαλλόμενη ($\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \alpha$)

$$V_{\Phi 2} = V_0 - \frac{1}{2} \alpha t_{\text{braking activation}} \quad (2.38)$$

$$D_{\Phi 2} = V_0 t_{\text{braking activation}} - \frac{1}{6} \alpha t_{\text{braking activation}}^2 \quad (2.39)$$

- Φ3

α = σταθερή

$$V_{\Phi 3} = V_{\Phi 2} - \alpha t_{\text{deceleration}} = V_0 - \frac{1}{2} \alpha t_{\text{braking activation}} - \alpha t_{\text{deceleration}} (=0 \text{ σε περίπτωση πλήρους στάσης}) \quad (2.40)$$

$$D \Phi 3 = V \Phi 2 t_{\text{deceleration}} - \frac{1}{2} a t_{\text{deceleration}}^2 = V_0 t_{\text{deceleration}} - \frac{1}{2} a t_{\text{deceleration}} t_{\text{breaking activation}} - \frac{1}{2} a t_{\text{deceleration}}^2 \quad (2.41)$$

Ο συνολικός χρόνος πέδησης μέχρι την πλήρη στάση είναι :

$$t_{\text{total}} = t_{\text{perception reaction}} + t_{\text{breaking activation}} + t_{\text{deceleration}} \quad (2.42)$$

Το αντίστοιχο διάστημα είναι :

$$D_{\text{total}} = V_0 t_{\text{total}} - \frac{1}{6} a t_{\text{breaking activation}}^2 - \frac{1}{2} a t_{\text{deceleration}} t_{\text{breaking activation}} - \frac{1}{2} a t_{\text{deceleration}}^2 \quad (2.43)$$

2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΜΑΖΑΣ

Το μοντέλο σημειακής μάζας και η τυπολογία που το συνοδεύει αποτελεί την προτεινόμενη μέθοδο ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων. Στην ενότητα 2.5 έγινε μία πρώτη νύξη των σχέσεων του εν λόγω μοντέλου όσον αφορά την αξιοποίηση των ιχνών των ελαστικών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι σχέσεις που βασίζονται στο μοντέλο σημειακής μάζας.

1. Ταχύτητα ολίσθησης

Η Εξίσωση 2.28, προκειμένου η ταχύτητα ολίσθησης να είναι σε km/h, παίρνει τη μορφή:

$$V = \sqrt{254 d f_T} \quad (2.44)$$

Η ταχύτητα ολίσθησης έως πλήρη ακινησία σε κλίση δίδεται από την εξίσωση:

$$V = \sqrt{254 d (f_T + s/100)} \quad (2.45)$$

Ο αντίστοιχος χρόνος δίδεται από την Εξίσωση:

$$t = \frac{V}{a} = \frac{V}{g f_T} = \sqrt{\frac{2d}{g f_T}} \quad (2.46)$$

Ολίσθηση έως στάση (ή πρόσκρουση) επί διαφόρων επιφανειών ή με συνδυασμό απωλειών ταχύτητας δίδεται από τις σχέσεις:

$$V = \sqrt{254[(f_1 d_1) + (f_2 d_2) + \dots + (\text{ταχύτητα πρόσκρουσης})]} \quad (2.47)$$

$$\text{Συνδυασμός ταχυτήτων : } V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.48)$$

Για τα παραπάνω όπου:

d: απόσταση ολίσθησης (m)

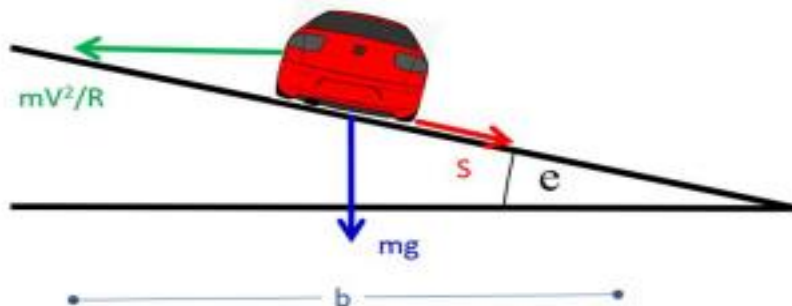
$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$

s: κλίση οδού (%)

f_T : διαμήκης συντελεστής τριβής

2. Κίνηση οχήματος σε καμπύλη τροχιά

Όταν ένα όχημα κινείται σε καμπύλο οδικό τμήμα με επίκλιση e , οι δυνάμεις που του ασκούνται είναι το βάρος του, η φυγόκεντρος δύναμη και η εγκάρσια τριβή (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 : Δυνάμεις που ασκούνται στην εγκάρσια διεύθυνση κατά την κίνηση οχήματος σε δεξιόστροφη καμπύλη (Μαυρομάτης, 2025)

Βασική προϋπόθεση για τη μελέτη των συνθηκών ολίσθησης του, αποτελεί ο καθορισμός της τιμής σχεδιασμού των συντελεστών τριβής (Μαυρομάτης, 2025). Για την επίτευξη αυτού, ασπάζεται συντηρητική προσέγγιση σύμφωνα με την οποία οι τροχοί ακινητοποιούνται πλήρως σε ευθύγραμμη τροχιά.

Οπότε, για να μελετηθούν οι συνθήκες ολίσθησης σε ευθύγραμμη τροχιά, θέτουμε συντηρητικά $f_{T_{max}} = f_{Tg}$, ενώ αν κινείται σε κυκλική τροχιά θέτουμε $f_{R_{max}} = 0,925 f_{T_{max}} = 0,925 f_{Tg}$.

Όπου f_{Tg} συντελεστής εφαπτομενικής τριβής με ακινητοποιημένους τροχούς.

Για κίνηση σημειακού οχήματος μάζας m σε καμπύλη, από ισορροπία στην εγκάρσια διεύθυνση του προκύπτει :

$$\frac{mV^2}{R} \cos e = mg \sin e + S \quad (2.49)$$

καθώς οι δυνάμεις που του ασκούνται είναι το ίδιο βάρος του, η φυγόκεντρος και η εγκάρσια τριβή.

Αφού όπως προαναφέρθηκε η τριβή είναι το γινόμενο f_R επί την κάθετη δύναμη (σχέση 2.2) η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$\frac{mV^2}{R} \cos e = mg \sin e + f_R (mg \cos e + \frac{mV^2}{R} \sin e) \quad (2.50)$$

Υποθέτοντας πως $e \ll$ δηλαδή $\cos e \cong 1$ και $\sin e \cong e$ προκύπτει :

$$R_{min} = \frac{V^2}{g(f_R + e)} \quad (2.51)$$

Για ταχύτητα σε km/h ισχύει:

$$R_{min} = \frac{V^2}{127(f_R + e)} \quad (2.52)$$

Και άρα η ταχύτητα ολίσθησης σε καμπύλη τροχιά είναι:

$$V = \sqrt{127R(f_R + e)} \quad (\text{km/h}) \quad (2.53)$$

Η ακτίνα R της τροχιάς του οχήματος μπορεί να προκύψει και από τη μέτρηση των χορδών c και την κάθετη απόσταση M μεταξύ χορδής – τόξου στο μέσο του πρώτου ως εξής:

$$R = c^2 / 8M + M / 2 \quad (\text{m}) \quad (2.54)$$

Για τις παραπάνω σχέσεις ισχύουν :

$$g = 9.81 \text{ m/ sec}^2$$

m : μάζα οχήματος (kg)

e: επίκλιση οδού (%/100)

S: εγκάρσια δύναμη τριβής (N)

f_R : συντελεστής εγκάρσιας τριβής

Rmin: ακτίνα κυκλικού τόξου (m)

V: ταχύτητα οχήματος (m/sec)

3. Επιβράδυνση οχήματος μέχρι πλήρους στάσης – Ταχύτητα πρόσκρουσης

Με βάση την Εξίσωση (2.43) που περιγράφει το συνολικό μήκος πέδησης D_{total} που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα, δεδομένου ότι:

- για επιβατηγά οχήματα ισχύει ότι $t_{braking activation} = 0,2-0,4$ δευτερόλεπτα.

- $t_{perception-reaction} = 0,5-2,5$ δευτερόλεπτα.

μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$t_{braking activation}=0 \quad (2.56)$$

Άρα καθώς $D\Phi=0$, το απαιτούμενο μήκος πέδησης μέχρι πλήρους στάσης προκύπτει από το άθροισμα δύο επιμέρους μηκών: του διαστήματος που διανύει το όχημα κατά το χρόνο αντίληψης αντίδρασης του οδηγού έως τη στιγμή που αρχίζει η διαδικασία πέδησης με ακινητοποιημένους τροχούς και της απόστασης που διανύει το όχημα έως την πλήρη στάση του (μήκος αμιγούς πέδησης).

Πιο συγκεκριμένα, στη φάση επιβράδυνσης του οχήματος με βάση την Νευτώνεια φυσική ισχύει:

$$V = \frac{dD}{dt} \quad (2.57)$$

$$\alpha = \frac{dV}{dt} \quad (2.58)$$

$$dD = \frac{V dV}{\alpha} \quad (2.59)$$

όπου :

α : επιτάχυνση - επιβράδυνση (m/ sec²)

V: ταχύτητα (m/sec)

t: χρόνος (sec)

D: διάστημα (m)

Σε ευθύγραμμη κεκλιμένη οδό κλίσης s (σε ποσοστό %) από την εξίσωση ισορροπίας κατά την επιβράδυνση οχήματος εξάγεται πως:

$$m\alpha = mg \sin \theta + mg f_T \cos \theta + A_d \quad (2.60)$$

Αφού $\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta \approx s \left(\frac{\%}{100} \right)$, $\cos \theta \approx 1$ ισχύει:

$$\alpha = g(f_T + s) + \frac{A_d}{m} \quad (2.61)$$

Όπου : m = μάζα οχήματος (kg)

α : επιτάχυνση (-α επιβράδυνση) (m/ sec²)

$s = \tan \theta$ = κλίση οδού (-s σε κατωφέρεια) (%/100)

A_d = αεροδυναμική εμπρόσθια αντίσταση (N)

f_T = διαμήκης συντελεστής τριβής

g = επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/ sec²)

ο συνδυασμός (2.60) και (2.62) δίνει:

$$\text{Μήκος πέδησης} = V_0 t_{\text{perception-reaction}} + \frac{1}{g} \int_{V_0}^0 \frac{V}{f_T + \frac{s}{100} + \frac{A_d}{mg}} dV \quad (2.62)$$

Καθώς η λύση της παραπάνω εξίσωσης αποτελεί σύνθετη διαδικασία, η επιρροή της μετωπικής αντίστασης στην παραπάνω εξίσωση μπορεί να παραληφθεί ενσωματώνοντας μια μέση επιβράδυνση, όπου, θεωρώντας υγρό οδόστρωμα, ο συντελεστής διαμήκους τριβής f_T σε επίπεδο οδόστρωμα λαμβάνεται ως εξής:

$$f_T = a_{\text{average}}/g \quad (2.63)$$

όπου :

a_{average} : μέση τιμή επιβράδυνσης (m/ sec²)

άρα προκύπτει:

$$\text{Μήκος πέδησης} = \frac{V_0 t_{\text{perception-reaction}}}{3.6} + \frac{\left(\frac{V_0}{3.6}\right)^2}{2(a_{\text{average}} + g \frac{s}{100})} \quad (2.64)$$

Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι σε μήκος D' επί της αμιγούς πέδησης,

$$\text{με } D' < \text{Μήκος επιβράδυνσης} - \frac{V_0 t_{\text{perception-reaction}}}{3.6} \quad (2.65)$$

το όχημα έχει ταχύτητα πρόσκρουσης V_D , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$V_{D'} = 3.6 \sqrt{\frac{V_o^2}{3.6^2} - 2(a_{average} + g \frac{s}{100})D'} \quad (2.66)$$

Όπου:

V_o : αρχική ταχύτητα οχήματος (km/h)

$V_{D'}$: ταχύτητα πρόσκρουσης (km/h)

D' : μήκος επί της αμιγούς πέδησης, στο οποίο το όχημα έχει ταχύτητα $V_{D'}$ (m)

s : κλίση οδού [(+) ανωφέρεια, (-) κατωφέρεια] (%)

Εάν το όχημα κινείται σε καμπύλη τροχιά, θα πρέπει μέσω της έλλειψης των ορίων διανυσματικού αθροίσματος τριβών να προσδιοριστεί η απομείωση της διαμήκους τριβής λόγω απαίτησης εγκάρσιας τριβής (Σχήμα 2.3).

Στην ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων, συνήθως ζητείται η αρχική ταχύτητα του οχήματος (πλήρης στάση), ή εφόσον υπάρχει, η ταχύτητα πρόσκρουσης .

2.8 ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

2.8.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Μέχρι στιγμής τα εργαλεία ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων που έχουν αναφερθεί εμπίπτουν στην κατηγορία των συμβατικών μεθόδων. Πέραν όμως από αυτές, συναντώνται πιο εξελιγμένες μορφές ανακατασκευής ατυχημάτων που επιστρατεύουν την χρήση εξειδικευμένων λογισμικών για να διευκολυνθεί το έργο του πραγματογνώμονα, να επιταχυνθεί αλλά και να αυξηθεί η ακρίβεια του. Γενικά, υπάρχουν 5 μέθοδοι ανακατασκευής ενός οδικού ατυχήματος (Pankaj Shrivastava et al., 2023). Η πρώτη σχετίζεται με τυπολογία και εξισώσεις οι οποίες παρατέθηκαν ήδη. Η δεύτερη μέθοδος είναι πειραματική και αφορά δοκιμές πραγματικού οχήματος (true vehicle test) που γίνονται σύμφωνα με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από την σκηνή του ατυχήματος. Η τρίτη μέθοδος αξιοποιεί βάσεις δεδομένων σχετικές με το είδος του ατυχήματος, των εμπλεκόμενων οχημάτων ή και των τραυματισμών που υπήρξαν. Τέτοιες βάσεις δεδομένων είναι η NHTSA (National Highway Traffic Safety), RICSAC (Research Input for Computer Simulation of Automobiles Collisions), IIHS (Insurance Institute for Highway Safety), AHEAD (Aggregated Homologation proposal for the Event data recorder for Automated Driving), CIREN (Crash Injury Research Engineering Network), GIDAS (German In-Depth Accident Study), CCIS

(Co-operative Crash Injury Study) και άλλες (Böhm et al., 2020; Pinter and Szalay, 2018; Vangi et al., 2018; Bhuvanesh et al., 2015; Prasad et al., 2014) Η τέταρτη μέθοδος χρησιμοποιεί υπολογιστικά προγράμματα για την ανακατασκευή ατυχημάτων και εντάσσεται στην κατηγορία της προηγμένης ανακατασκευής τα θετικά της οποίας αναφέρθηκαν παραπάνω. Παραδείγματα τέτοιων προγραμμάτων είναι τα εξής : PC-Crash, Virtual Crash, HVE-3D, V-SIM, MADYMO, CarMaker, Simpack, AnalyzerPro, PC-RECT,(photogrammetry),EDVDS (Engineering Dynamics Vehicle Dynamics Simulator), MATLAB (based on Brach's model), Computer Reconstruction of Automobile Speed on the Highway (CRASH, CRASH2, or CRASH3) and SMAC (based on McHenry model), Finite Element Method (LS DYNA, Abaqus FEA#, or Ansys#), CARAT κ.α.. Η πέμπτη και τελευταία μέθοδος- που και αυτή με τη σειρά της εμπίπτει στην κατηγορία των εξελιγμένων μεθόδων- βασίζεται σε δεδομένα που λαμβάνονται από το 'μαύρο κουτί' ενός αυτοκινήτου εφόσον είναι εξοπλισμένο με τέτοιο και το οποίο ονομάζεται EDR (Event Data Recorder).

2.8.2 Event data recorder (EDR)

Το EDR είναι μια λειτουργία ή συσκευή που είναι εγκατεστημένη σε ένα μηχανοκίνητο όχημα και καταγράφει τεχνικές πληροφορίες για το όχημα και τους επιβάτες για μια πολύ σύντομη περίοδο πριν, κατά τη διάρκεια και μετά από μια σύγκρουση, αποκλειστικά με σκοπό την παρακολούθηση και αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων ασφαλείας του οχήματος.

Μία μονάδα EDR μπορεί να καταγράψει:

- πληροφορίες, αλλά μόνο μετά από κάποιο συμβάν όπως μια σύγκρουση
- πληροφορίες δυναμικής του οχήματος και κατάσταση συστημάτων για περίπου 5 δευτερόλεπτα πριν από μια σύγκρουση
- συγκεκριμένες λειτουργικές πράξεις του οδηγού για περίπου 5 δευτερόλεπτα πριν από μια σύγκρουση
- τη σοβαρότητα της σύγκρουσης του οχήματος
- πληροφορίες που σχετίζονται με τη χρήση και την ενεργοποίηση συστημάτων συγκράτησης
- δεδομένα μετά τη σύγκρουση, όπως την ενεργοποίηση ενός συστήματος αυτόματης ειδοποίησης σύγκρουσης (Automatic Collision Notification - ACN) (https://crashdatagroup.com/pages/edr-explained?srsId=AfmBOoql0RhUujEBKgE_na99zH_2i1zin0qR14SZ8PaAN14WTG0-7ani).

Όταν τα δεδομένα του EDR είναι ελλιπή -για οποιονδήποτε λόγο- και εξετάζουμε σενάριο που αφορά σύγκρουση οχημάτων μεταξύ τους είτε πλαγιομετωπικά είτε μετωπικά ο ερευνητής μπορεί να προσεγγίσει την ανακατασκευή του ατυχήματος με εναλλακτικούς τρόπους όπως αυτόν που ακολουθεί (Inhwan Han,2017). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται βασίζεται στην βελτιστοποίηση δεδομένων που παρέχονται από το

EDR του ενός εκ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων. Μπορεί να εφαρμοστεί όταν είναι γνωστές οι ταχύτητες πριν και μετά την σύγκρουση ενός εκ των δύο οχημάτων ενώ του άλλου παραμένουν άγνωστες. Επιλέχθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης Evolutionary (Γενετικός Αλγόριθμος) καθώς δίνει την χαμηλότερη τιμή E συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους που αξιολογήθηκαν (GRG Nonlinear, Simplex LP). Το E δίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί και αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ των δεδομένων EDR και της ταχύτητας μετά την πρόσκρουση, η οποία αποκτάται από το μοντέλο σύγκρουσης άκαμπτου σώματος. Τα t και n αντιστοιχούν στις εφαπτομενικές και κάθετες διευθύνσεις αντίστοιχα, ενώ τα μεγέθη με εκθέτη data λήφθηκαν μέσω του EDR.

$$\epsilon = \frac{1}{2}m(V_t - V^{data}_t)^2 + \frac{1}{2}m(V_n - V^{data}_n)^2 + \frac{1}{2}I(\omega - \omega^{data})^2 \quad (2.67)$$

Όπου:

V: ταχύτητα (km/h)

I: ροπή αδράνειας (kg m²)

ω : γωνιακή ταχύτητα (rad/s)

Η επαλήθευση για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου έγινε με δύο τρόπους, με δεδομένα συγκρούσεων από δοκιμές και με δεδομένα από πραγματικές περιπτώσεις ατυχημάτων. Η μέθοδος κρίθηκε αναποτελεσματική όταν άγνωστη ήταν η ταχύτητα του οχήματος που εμβολιζόταν στην πλαγιομετωπική περίπτωση. Εν κατακλείδι, αποδείχθηκε αξιοπιστία της μεθόδου με μικρές αποκλίσεις αν και το σφάλμα μεγάλωνε με χρήση του μοντέλου της σημειακής μάζας αντί του μοντέλου σύγκρουσης άκαμπτου σώματος (Inhwan Han, 2017).

2.9 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΤΡΟΠΗ

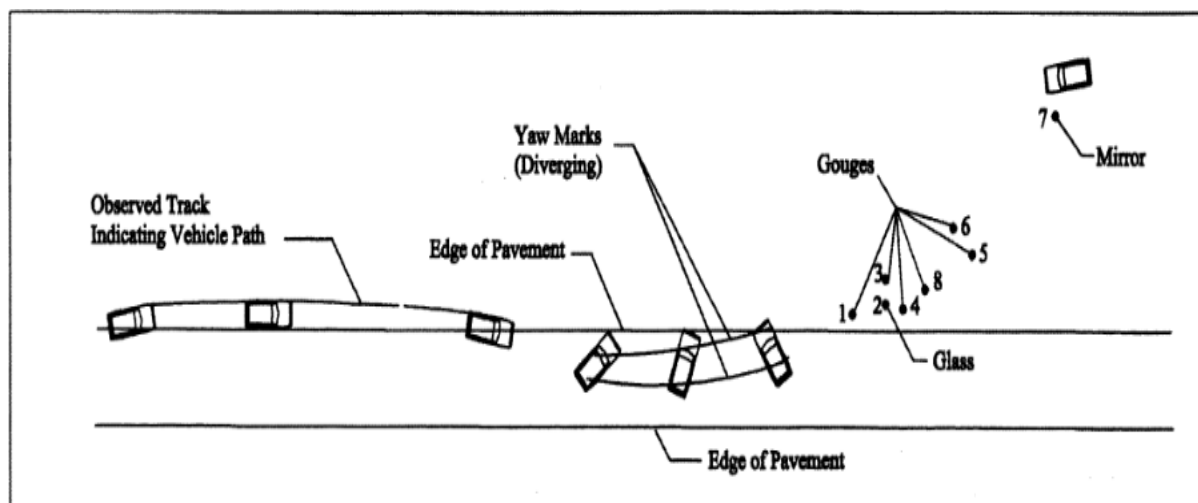
2.9.1 Εισαγωγή

Τα συγκεκριμένα ατυχήματα φέρουν ιδιαίτερη δυσκολία στην ανακατασκευή τους για τον πραγματογνώμονα λόγω του πόσο απρόβλεπτα συμπεριφέρεται το όχημα όταν χάνεται ο έλεγχος του και ανατρέπεται (Steven E. Meyer et al., 2000). Τα φορτηγά και γενικά τα βαρέως τύπου οχήματα είναι πιο επιρρεπή σε ανατροπή λόγω του αυξημένου ύψους του κέντρου βάρους τους και της κατανομής του φορτίου τους. Για να υπάρξει μέτρο σύγκρισης, ένα φορτηγό σε συνθήκες φόρτωσης έχει όριο ανατροπής 0,27g – 0,40g ενώ η αντίστοιχη τιμή ενός επιβατικού οχήματος είναι τα 1,2g σύμφωνα με έρευνες (Μαυρομάτης, 2023). Ως όριο ανατροπής ορίζεται η μέγιστη πλευρική

επιτάχυνση που μπορεί να ασκηθεί σε ένα κινούμενο όχημα χωρίς αυτό να ανατραπεί. Επιπλέον, με τον όρο ανατροπή οχήματος αναφερόμαστε στην μετάβαση του οχήματος σε μία ασταθή κατάσταση κατά την οποία ένας εκ των τεσσάρων τροχών ανασηκώνεται από το οδόστρωμα.

2.9.2 Φάσεις οδικού ατυχήματος με ανατροπή

Η ανατροπή γενικότερα χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Υφίσταται η φάση πριν την απώλεια ελέγχου (pretrip phase), η φάση όπου ο έλεγχος χάνεται (trip phase) και η φάση της ανατροπής (rollover phase). Μία ενδεικτική τροχιά ενός οχήματος σε κατάσταση απώλειας ελέγχου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13 : Τροχιά οχήματος κατά τις φάσεις ενός οδικού ατυχήματος με ανατροπή (S. E. Meyer et al, 2000).

Φάση πριν την απώλεια ελέγχου

Η φάση αυτή χαρακτηρίζεται από ίχνη πλαγιολίσθησης των τροχών στο οδόστρωμα μέχρι το σημείο της ανατροπής. Περιγράφεται ως ένας εκτός δρόμου ελιγμός που συνοδεύεται από έναν διορθωτικό ελιγμό επαναφοράς στον δρόμο με χρήση του τιμονιού. Τα παραπάνω οδηγούν σε απώλεια ελέγχου λόγω πλαγιολίσθησης και τελικά σε ανατροπή. Η έναρξη της ανατροπής ορίζεται ως το σημείο κατά μήκος της διαδρομής όπου το κέντρο βάρους του οχήματος βρίσκεται πάνω από το σημείο επαφής του ελαστικού ή του τροχού με την επιφάνεια του εδάφους. (Orlowski et al., 1989). Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του κέντρου μάζας ταχύτητας και του άξονα κατεύθυνσης του οχήματος λέγεται γωνία εκτροπής. Μία εκ των μεθόδων για ανακατασκευή της ταχύτητας του οχήματος στην αρχή αυτής της φάσης, είναι η διαίρεση της τροχιάς του οχήματος σε επιμέρους τμήματα και η εύρεση της ταχύτητας σε κάθε τμήμα ως η ταχύτητα του προηγούμενου αφαιρώντας την απώλεια ενέργειας

λόγω ολίσθησης. Αυτή η διαδικασία ξεκινάει αντίστροφα, δηλαδή από το τέλος της εν λόγω φάσης και όπως είναι λογικό απαιτεί γνώση των συνθηκών του οχήματος και του οδοστρώματος κατά μήκος της τροχιάς. Αμελείται πιθανή αλληλεπίδραση με αντικείμενα εκτός δρόμου καθώς και αεροδυναμικές δυνάμεις, ώστε η ταχύτητα του οχήματος να αλλάζει μόνο εξαιτίας δυνάμεων τριβής μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος. Το έργο των δυνάμεων αυτών ισούται με την μεταβολή της κινητικής ενέργειας για δεδομένη απόσταση. Επιπροσθέτως, στην επιβράδυνση του οχήματος παίζουν ρόλο οι κλίσεις του οδοστρώματος.

Φάση απώλειας ελέγχου

Η φάση αυτή ξεκινά όταν οι πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα υπερκερνούν την ικανότητα του να διατηρεί και τους τέσσερις τροχούς του στο οδόστρωμα, δηλαδή υπάρχει ανύψωση τροχού (Martinez et al., 1996). Σε πραγματικές συνθήκες, αυτό μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες, όπως οι προσκρούσεις σε κράσπεδα, οι συγκρούσεις με εδαφικές ανωμαλίες, οι απότομες αλλαγές στις ιδιότητες του εδάφους, καθώς και όταν τα ελαστικά βυθίζονται στο έδαφος εάν το όχημα βρεθεί εκτός επιφάνειας δρόμου από την προηγούμενη φάση που περιγράψαμε.

Φάση ανατροπής

Τέλος, έχουμε την φάση της ανατροπής καθαυτής, όπου το όχημα αναποδογυρίζει για άγνωστο αριθμό φορών έως ότου σταματήσει η οποιαδήποτε κίνηση του οριστικά. Για να ανακατασκευαστεί λεπτομερώς αυτή η φάση είναι κρίσιμο να βρεθεί η ταχύτητα στο τέλος της προηγούμενης φάσης, η απόσταση που διένυσε το όχημα αναποδογυρίζοντας καθώς και ο αριθμός των φορών που αναποδογύρισε.

2.9.3 Στάδια ανακατασκευής οδικού ατυχήματος με ανατροπή

Το έργο του πραγματογνώμονα αν και συνολικά περίπλοκο μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους στάδια για να διευκολυνθεί η αναπαράσταση του οδικού ατυχήματος. Αυτά τα στάδια είναι τα εξής (Steven E. Meyer et al., 2000):

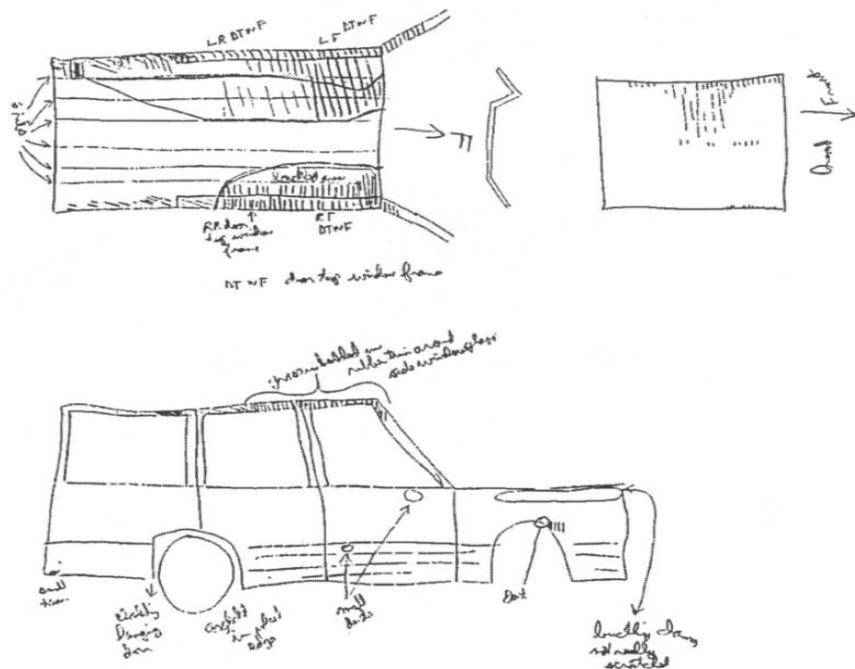
- **Συλλογή πληροφοριών και στοιχείων από το σημείο του ατυχήματος**, όπως για παράδειγμα μήκος, καμπυλότητα και φυσικές ιδιότητες από ίχνη ελαστικών στο οδόστρωμα, έδαφος, κλίσεις οδοστρώματος, θραύσματα του οχήματος κλπ. Οι τρόποι συλλογής πληροφοριών για ένα ατύχημα με ανατροπή δεν διαφέρουν από αυτούς που έχουμε ήδη αναφέρει γενικά και αφορούν πρωτίστως την αποτύπωση του τροχαίου ατυχήματος.
- **Σχεδίαση τροχιάς οχήματος πριν την ανατροπή**, δηλαδή αφού έχουν συλλεγεί όλα τα απαραίτητα στοιχεία ακολουθεί η αντιστοίχιση των ιχνών των ελαστικών που έχουν καταγραφεί στα σωστά ελαστικά του αυτοκινήτου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας οφείλει να φαντάζει λογικό ως προς την τροχιά και ως προς όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην διαδικασία όπως η κατεύθυνση και ο ρυθμός περιστροφής του οχήματος. Εάν δεν ισχύουν τα

παραπάνω, τότε κατά πάσα πιθανότητα υπήρξε κάποιο λάθος στην αντιστοίχιση των ελαστικών με τα ίχνη που έχουν αφήσει. Η παραπάνω διαδικασία τελικά επιτρέπει στον μελετητή να γνωρίζει τον προσανατολισμό του οχήματος ακριβώς προτού ανατραπεί το οποίο με την σειρά του μπορεί να απαντήσει στο κρίσιμο ερώτημα του εάν το όχημα ανετράπη από την πλευρά του οδηγού ή του συνοδηγού.

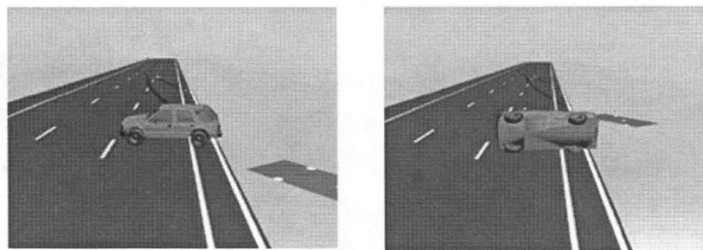
- Μέσω της ανάλυσης και χαρτογράφησης της σκηνής του ατυχήματος, είναι διαθέσιμες αρχικές εκτιμήσεις ως προς τον μηχανισμό της εκτροπής. Στοιχεία όπως βαθουλώματα σε κάποια ζάντα, ένα χτύπημα στο πεζοδρόμιο ή μια απότομη αλλαγή εδάφους π.χ. λακκούβα στο οδόστρωμα θεωρούνται καίρια για τον **προσδιορισμό και κατηγοριοποίηση του σημείου που χάθηκε ο έλεγχος**. Ο μελετητής οφείλει επίσης να σχεδιάσει το σημείο αυτό για να μπορέσει να ακολουθήσει η ανάλυση της ανατροπής με ακρίβεια. Αξίζει να αναφερθεί, πως σε αυτό το στάδιο της ανακατασκευής, το σημείο που βρέθηκε πως χάθηκε ο έλεγχος θεωρείται ακόμα προκαταρκτικό καθώς ακόμα δεν έχει πραγματοποιηθεί επισκόπηση του οχήματος που να συνάδει με ότι έχει διαπιστωθεί μέχρι στιγμής από τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν.
- Η **επιθεώρηση, ανάλυση και καταγραφή των στοιχείων του οχήματος όπως σημάδια, βαθουλώματα, γρατζουνιές, απόντα εξαρτήματα και άλλα**, θεωρείται καίρια για την πρόοδο της ανακατασκευής του τροχαίου και γενικότερα αλλά και στην προκειμένη που υπάρχει και ανατροπή. Η επιθεώρηση ξεκινά με την καταγραφή των μοτίβων των χτυπημάτων στο εξωτερικό του οχήματος, της κατάσταση των τζαμιών του, το ποια κομμάτια του έχουν αποκολληθεί καθώς και την κατάσταση του κάθε ελαστικού και της αντίστοιχης ζάντας του. Οι ζημιές που κατεγράφησαν από τον πραγματογνώμονα είναι σημαντικό να συγκριθούν με φωτογραφίες από τον τόπο του ατυχήματος ώστε να εξακριβωθεί πως πρόκεινται όλα για χτυπήματα-σημάδια που προκαλέστηκαν κατά το ατύχημα και όχι μεταγενέστερα όπως για παράδειγμα κατά την φόρτωση και μεταφορά του οχήματος από την οδική βοήθεια στο συνεργείο. Επακολούθως, ο πραγματογνώμονας οφείλει να διαχωρίσει τη ζημιά που έχει υποστεί το όχημα σε άμεση και εμμέσως προκαλούμενη (για παράδειγμα ένα βαθούλωμα στον προφυλακτήρα κατά πάσα πιθανότητα είναι άμεσο ενώ ένα χτύπημα στην μετόπη θα μπορούσε κάλλιστα να προκαλέστηκε από την παραμόρφωση του προφυλακτήρα που με την σειρά του χτύπησε το ψυγείο). Επιπλέον, είναι σημαντική η καταγραφή των διευθύνσεων των δυνάμεων πρόσκρουσης που βοηθά στην κατανόηση του προσανατολισμού του οχήματος αλλά και η εύρεση συντριμμίων του εδάφους που έχουν προσκολληθεί σε σημεία που το όχημα έχει υποστεί χτυπήματα ώστε να συγκριθούν με όσα έχουν διαπιστωθεί στην σκηνή του ατυχήματος. Με την συμβολή όλων των παραπάνω είναι ζωτικής σημασίας να δημιουργηθεί διάγραμμα με όλα τα σημάδια που φέρει το εμπλεκόμενο όχημα και τον τύπο, την διεύθυνση και το μοτίβο τους (καμπύλα, μακριά, κοντά). Οι γρατζουνιές επιβάλλεται να κατηγοριοποιηθούν αναλόγως τη μορφή τους -δηλαδή όσες προκαλέστηκαν από ξύσιμο στην ασφαλτο θα είναι παρόμοιας μορφής μεταξύ τους- και να διαχωριστούν και σε οικογένειες όπου ως ξεχωριστή οικογένεια

γρατζουνιών ορίζονται οι γρατζουνιές που συνέβησαν σε κάθε περιστροφή του οχήματος (Martinez et al., 1996)

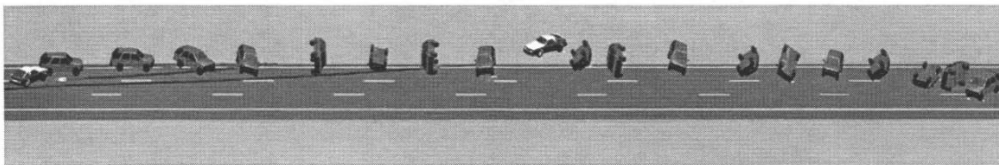
- Η **καταγραφή των τραυματισμών των επιβαινόντων** είναι εξίσου σημαντική καθώς οι νόμοι της φυσικής μας λένε πως αναλόγως των διευθύνσεων των δυνάμεων και χτυπημάτων που δέχεται το όχημα παρόμοιες δυνάμεις θα δεχθούν και τα φυσικά πρόσωπα που βρίσκονται εντός αυτού δημιουργώντας ένα προβλέψιμο μοτίβο του πως θα κινηθούν σε κάθε τούμπα κλπ.
- Η **απλοποίηση των ομάδων γρατζουνιών και η σειρά με την οποία συνέβησαν** είναι προφανές επακόλουθο των προηγούμενων βημάτων ώστε ο πραγματογνώμονας να διαπιστώσει των αριθμών των στροφών του οχήματος και τον προσανατολισμό τους. Αυτό μπορεί να συμβεί με ευκολία με χρήση ενός σχεδιαστικού προγράμματος CAD, όπου κάθε layer θα έχει διαφορετικό χρώμα και θα απεικονίζει διαφορετική ομάδα γρατζουνιών.
- Επόμενο βήμα είναι η **αντιστοίχιση των διαγραμμάτων οχήματος και σκηνής ατυχήματος** για την εξακρίβωση και επαλήθευση όσων συμπερασμάτων είχαν εξαχθεί μέχρι στιγμής από τον ερευνητή. Σε αυτό το στάδιο επίσης, μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο ένα τρισδιάστατο μοντέλο αυτοκινήτου.
- Πλέον, μπορούν να εφαρμοσθούν κλασσικές τεχνικές ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων δουλεύοντας από το σημείο ηρεμίας και προς τα πίσω για να γίνει **ποσοτικοποίηση των ταχυτήτων και απωλειών ενέργειας της εκάστοτε φάσης του ατυχήματος**. Πιο συγκεκριμένα, από τα διαγράμματα του προηγούμενου βήματος είναι πλέον γνωστή η απόσταση για την οποία το όχημα περιστρεφόταν. Επιπλέον, θέτοντας τον κατάλληλο συντελεστή τριβής περιστροφής μπορεί να βρεθεί η ταχύτητα του οχήματος ακριβώς πριν ανατραπεί. Οι αποδεκτές τιμές του συντελεστή επιβράδυνσης μετά την απώλεια του ελέγχου του αυτοκινήτου βάση ερευνών κυμαίνονται από 0,4-0,6. Έχοντας βρει την παραπάνω ταχύτητα μπορεί να βρεθεί και η ταχύτητα την στιγμή που χάθηκε ο έλεγχος αξιοποιώντας κατάλληλο συντελεστή τριβής σε συνδυασμό με τα ίχνη εκτροπής στο οδόστρωμα. Επιπροσθέτως, προσομοιωτικά λογισμικά ανακατασκευής τροχαίων (π.χ. EDSVS-Engineering Dynamics Single Vehicle Simulator) μπορούν να δώσουν αξιόλογες εκτιμήσεις για αλλαγές στην πλοήγηση, στο φρενάρισμα και στην ταχύτητα του οχήματος κατά την φάση πριν την απώλεια του ελέγχου.
- Μετά το πέρας της ανακατασκευής, το μόνο που απομένει είναι η παρουσίαση των συμπερασμάτων του πραγματογνώμονα με τρόπο εμπεριστατωμένο και κατανοητό, ειδικά λόγω της περίπλοκης φύσης των ατυχημάτων με ανατροπή. **Άρα είναι κομβικής σημασίας η παρουσίαση με χρήση διαγραμμάτων ή τρισδιάστατων εργαλείων που απεικονίζουν την σκηνή του ατυχήματος.**



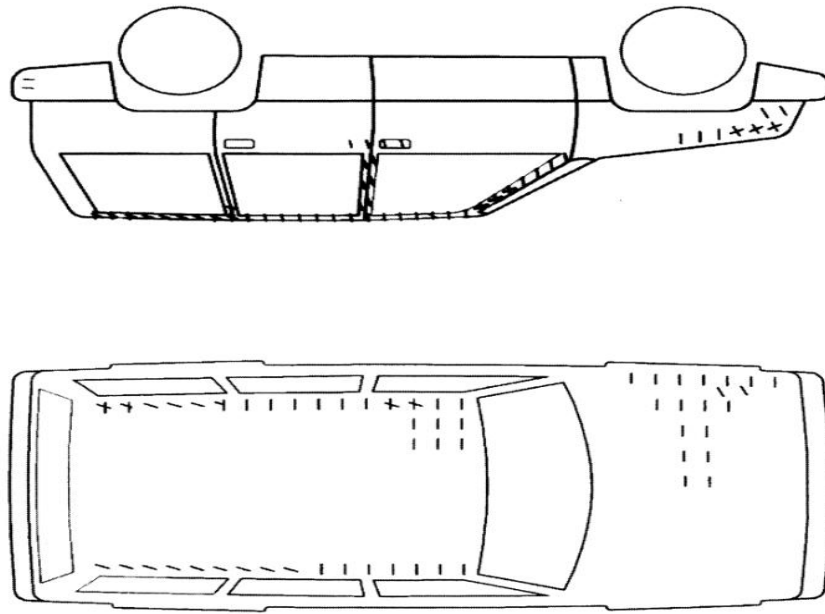
Σχήμα 2.14 : Παράδειγμα σημειώσεων στο πεδίο (S. E. Meyer et al, 2000).



Three dimensional computer models can be presented in storyboard fashion showing individual critical touchdown points, an overview showing the entire trajectory of the vehicle, or computer animation.



Σχήμα 2.15 : Παράδειγμα τρισδιάστατης απεικόνισης του ατυχήματος (S. E. Meyer et al, 2000).

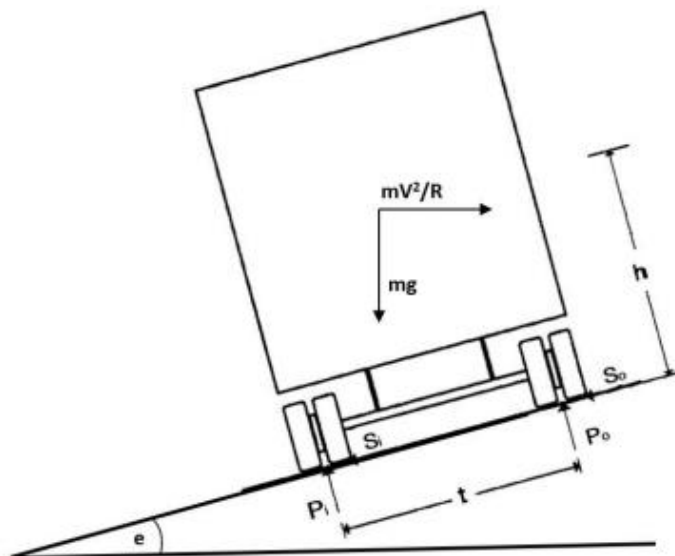


Σχήμα 2.16 : Παράδειγμα διαγράμματος γρατζουνιών (S. E. Meyer et al, 2000).

2.9.4 Απλοποιημένη Θεώρηση Ατυχήματος με Ανατροπή

Στην παρούσα ενότητα, κατά την κίνησή οχήματος σε καμπύλη τροχιά, δίδεται η μεθοδολογία προσδιορισμού της ταχύτητας ανατροπής του ή καλύτερα της ταχύτητας μετάβασης του οχήματος σε μία ασταθή κατάσταση κατά την οποία ένας εκ των τεσσάρων τροχών ανασηκώνεται από το οδόστρωμα.

Έστω ένα άκαμπτο όχημα (δεν λαμβάνονται υπόψιν οι αναρτήσεις), τότε οι δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι πέραν του βάρους του (mg) και της φυγόκεντρου ($\frac{mv^2}{R}$) κάθετη και εγκάρσια δύναμη τόσο στους εξωτερικούς στην καμπύλη τροχούς όσο και στους εσωτερικούς.



Σημείωση. Κίνηση σε αριστερόστροφη καμπύλη.

P_i (N), S_i (N): κάθετη και εγκάρσια δύναμη στους εσωτερικούς στην καμπύλη τροχούς.

P_o (N), S_o (N): κάθετη και εγκάρσια δύναμη στους εξωτερικούς στην καμπύλη τροχούς.

Σχήμα 2.17 : Δυνάμεις που ασκούνται σε όχημα κινούμενο σε καμπύλο οδικό τμήμα (Μαυρομάτης, 2023).

Το όχημα δεδομένης της επιρροής της φυγόκεντρης δύναμης, τείνει να ανατραπεί προς την εξωτερική στην καμπύλη πλευρά των τροχών. Τη στιγμή που αποκολλώνται οι εσωτερικοί προς την καμπύλη τροχοί, η κάθετη δύναμη στους εσωτερικούς τροχούς (P_i) μηδενίζεται και η εξίσωση ροπών γύρω από τους εξωτερικούς τροχούς δίνει:

$$\frac{mv^2}{R} h \cos e - \frac{mv^2}{R} \frac{t}{2} \sin e - mgh \sin e - mg \frac{t}{2} \cos e = 0 \quad (2.68)$$

Όπου :

m: μάζα οχήματος (kg)

V: ταχύτητα οχήματος (m/sec)

R: ακτίνα κυκλικού τόξου (m)

h: ύψος του κέντρου βάρους της ολικής μάζας του οχήματος (m)

e: επίκλιση οδοστρώματος (%/100)

t: πλάτος άξονα (m)

g: επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/ sec²)

Αν λύσουμε την παραπάνω σχέση (2.68) ως προς την πλευρική επιτάχυνση και θεωρήσουμε πως η επίκλιση είναι πολύ μικρή άρα $\cos e = 1$ και $\sin e = e$ προκύπτει η σχέση συσχέτισης ακτίνας κυκλικού τόξου με ταχύτητα ανατροπής :

$$\frac{V^2}{gR} = \frac{\left(\frac{t}{2} + he\right)}{\left(h - \frac{t}{2}e\right)} \quad (2.70)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η ταχύτητα ανατροπής που είναι το πιο σύνηθες ζητούμενο.

2.10 ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΖΟ

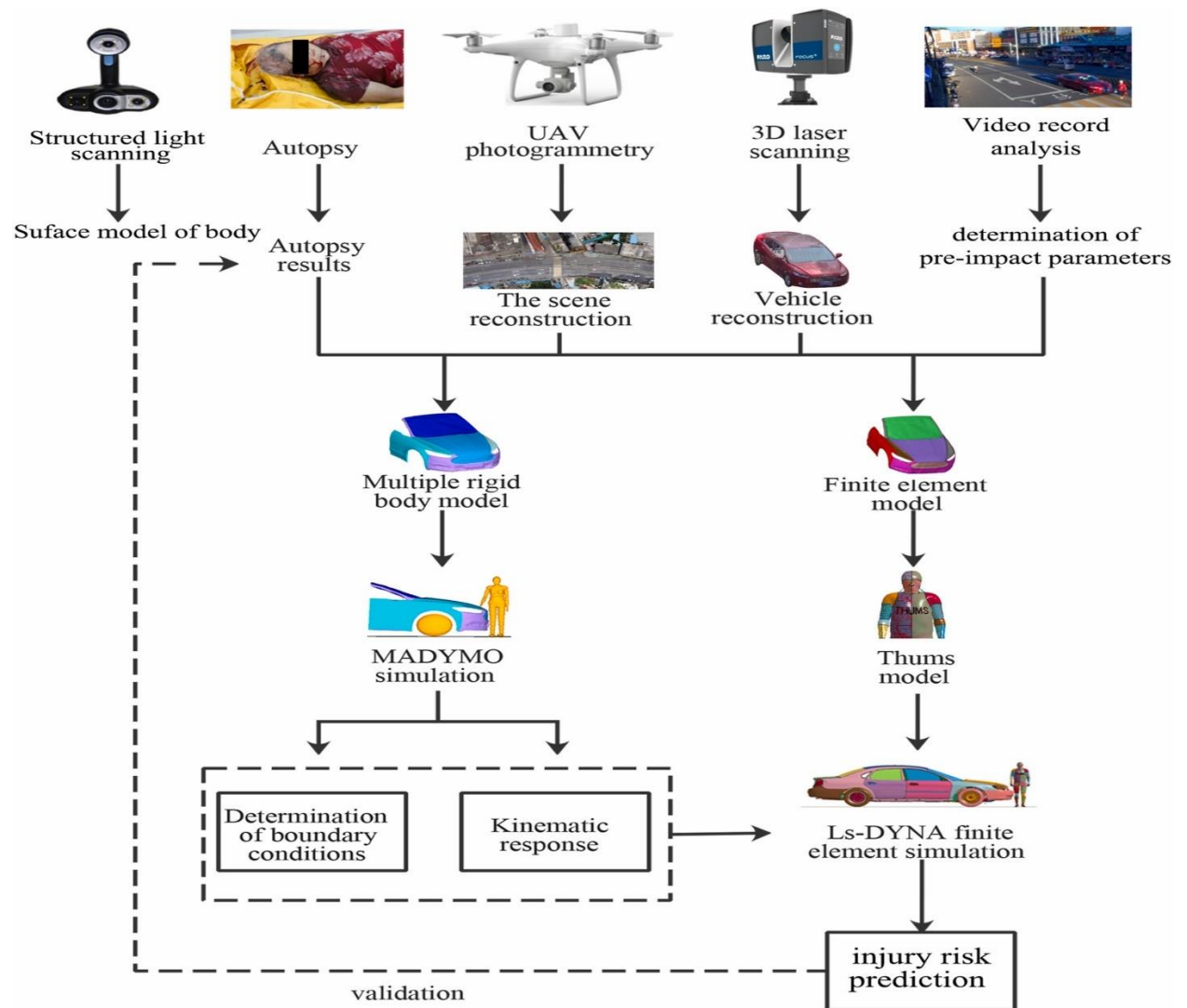
2.10.1 Εισαγωγή

Τα οδικά ατυχήματα που αφορούν στους πιο ευάλωτους χρήστες της οδού, οι οποίοι είναι οι πεζοί, αποτελούν ιδιαίζουσες περιπτώσεις ως προς την ανακατασκευή τους. Καταρχάς, ο πεζός με το όχημα έχουν σημαντική διαφορά ως προς την μάζα τους και ως προς την ταχύτητα τους. Ως συνέπεια αυτού, η ταχύτητα του πεζού λογίζεται συνήθως ως αμελητέα σε σχέση με αυτή του οχήματος, ενώ η κατεύθυνση της κίνησης του μετά την σύγκρουση κατά κύριο λόγο είναι ίδια με αυτή του οχήματος. Σε γενικές γραμμές, η κίνηση του πεζού χαρακτηρίζεται από εναέρια τροχιά με πρόσκρουση στο οδόστρωμα ακολουθούμενη από αναπηδήσεις ή/και ολίσθηση σε αυτό. Κρίσιμα μεγέθη αποτελούν η ταχύτητα πρόσκρουσης αλλά και η επιφάνεια επαφής του οχήματος με τον πεζό σε σχέση με το κέντρο βάρους του. Σε περίπτωση που το κέντρο βάρους του πεζού βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια επαφής με το όχημα, τότε συνήθως έχουμε εκτίναξη του πεζού (forward projection) ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα κινηθεί προς τα πίσω το σώμα του ερχόμενο κατά πάσα πιθανότητα σε επαφή με κάποιο άλλο σημείο του οχήματος, όπως για παράδειγμα ο ανεμοθώρακας (παρμπρίζ), (wrap pedestrian collision). Στη συνέχεια, αναλόγως την επιτάχυνση ή συνηθέστερα επιβράδυνση του οχήματος, υπάρχουν υποκατηγορίες στο παραπάνω. Εάν το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα, μπορεί ο πεζός μετά την αρχική του επαφή με το παρμπρίζ να χτυπήσει στην οροφή του οχήματος και να εκτιναχθεί προς τα πίσω (roof vault), ενώ στο σενάριο επιβράδυνσης του οχήματος, θα πέσει προς τα εμπρός από το καπό του οχήματος χτυπώντας με σφοδρότητα στο οδόστρωμα λόγω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του οχήματος σε δική του βάση της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας. Σε άλλη περίπτωση, όπου το όχημα δεν μεταβάλλει την ταχύτητα του ή επιταχύνει, ενδέχεται να παραμείνει στο καπό του οχήματος για αυτό το χρονικό διάστημα (carry category). Τέλος, αν η επαφή με το όχημα δεν γίνει μετωπικά, θα συγκρουστεί με κάποιο τμήμα-άκρη του οχήματος και έπειτα θα πέσει στο έδαφος (fender vault). Στο κομμάτι της ανάλυσης και ανακατασκευής ενός ατυχήματος, όπου εμπλέκεται πεζός, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν και η ορατότητα ή απροσεξία πεζού

ή/και οδηγού. Στην προκειμένη, θα αναλυθούν και αξιολογηθούν τρόποι και μέθοδοι ανάλυσης και ανακατασκευής ενός τέτοιου οδικού ατυχήματος.

2.10.2 Ανάλυση τύπου ατυχήματος

Όσον αφορά την επεξεργασία και ανακατασκευή του σημείου ατυχήματος, κρίνεται αδιαμφισβήτητη ως βέλτιστη η χρήση συνδυασμού εξελιγμένων εργαλείων για την πληρέστερη απεικόνιση του τι πραγματικά συνέβη. Η ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται σε οδικά ατυχήματα είναι κρίσιμη για κάθε είδους ανάλυση και αξιολόγηση. Όπως είναι λογικό, συχνά εντοπίζονται σφάλματα στην καταγραφή στοιχείων που αφορούν την τοποθεσία του ατυχήματος, τα στοιχεία των θυμάτων, τις πληροφορίες για τα εμπλεκόμενα οχήματα, αλλά και τις συνθήκες του δρόμου και του περιβάλλοντος (Ahmed et al., 2019). Η παρουσία τέτοιων ανακρίβειών μπορεί να υπονομεύσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παραδοσιακές μέθοδοι επιτόπιας τεκμηρίωσης, όπως οι απλές φωτογραφίες, η χρήση μετροταινίας και η οπτική παρατήρηση, αποδείχθηκαν ανεπαρκείς για την πλήρη ανακατασκευή ενός ατυχήματος. Σε έρευνα των Kramnik et al. το 2020, συγκρίθηκαν διαφορετικές τεχνικές συλλογής δεδομένων και αναδείχτηκε ότι η χρήση Επίγειων Σαρωτών Λέιζερ (TLS) και Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου σε σχέση με τις χειρωνακτικές μεθόδους, ενώ επιτρέπει και την καταγραφή τρισδιάστατων μοντέλων που λειτουργούν ως μόνιμα αρχεία της σκηνής του ατυχήματος, παρέχοντας πληροφορίες και οπτικές και διαστασιολογικές. Αντίστοιχα, σε άλλη έρευνα, δοκιμάστηκε η φωτογραμμετρική απεικόνιση με UAV σε προσομοιωμένο εξωτερικό εγκληματολογικό χώρο, αποδεικνύοντας τα οφέλη της τεχνολογίας αυτής στην τεκμηρίωση σκηνών εγκλημάτων ή ατυχημάτων (Urbanova et al., 2017). Σε πραγματικές περιπτώσεις, οι Buck et al. το 2013 χρησιμοποίησαν σάρωση 3D με λέιζερ για την ανακατασκευή δύο οδικών ατυχημάτων και κατάφεραν να διαπιστώσουν αν οι θάνατοι των θυμάτων ήταν αποτέλεσμα δυστυχήματος ή εγκληματικής ενέργειας. Επιπλέον, οι Li et al. το 2017 σχεδίασαν ένα πειραματικό πρωτόκολλο εφαρμογής της τεχνολογίας 3D σάρωσης για την ανακατασκευή σκηνών οδικών ατυχημάτων. Προγενέστερες έρευνες έχουν ήδη καταδείξει πως οι γεωχωρικές τεχνικές είναι ακριβείς, αποτελεσματικές και ταχύτερες στην καταγραφή των κρίσιμων δεδομένων που απαιτούνται για τη διερεύνηση οδικών ατυχημάτων (Jinming Wang et al., 2022). Ακολουθεί διαγραμματική απεικόνιση ανακατασκευής οδικού ατυχήματος οχήματος-πεζού με χρήση πολλαπλών τεχνολογιών για το βέλτιστο αποτέλεσμα (Διάγραμμα 2.1).



Διάγραμμα 2.1 : Διάγραμμα ροής που απεικονίζει τη διαδικασία ψηφιακής ανακατασκευής οδικού ατυχήματος μέσω πολύ-τεχνολογικής προσέγγισης (Jinming Wang et al., 2022).

Η μεθοδολογία που απεικονίζεται παραπάνω, συνδυάζει φωτογραμμετρία με UAV, επίγεια σάρωση με λέιζερ (TLS), αποτύπωση με γεωδαιτικό σταθμό και εγκληματολογικά εργαλεία για τη συλλογή, επεξεργασία και οπτικοποίηση των δεδομένων της σκηνής του ατυχήματος. Κάθε τεχνολογία παρέχει διαφορετικού τύπου δεδομένα, ενισχύοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου ανακατασκευής.

Μία προσέγγιση σαν και αυτή περιγράφεται από την διεθνή βιβλιογραφία ως αποτελεσματική για την ανακατασκευή ενός οδικού ατυχήματος μεταξύ ενός επιβατικού οχήματος και ενός πεζού. Και ενώ όπως προαναφέρθηκε, η συλλογή πληροφοριών από το ατύχημα με χρήση πολλαπλών εξελιγμένων τεχνολογιών είναι η πληρέστερη, στο κομμάτι της ανακατασκευής υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες που μπορούν να ακολουθηθούν και που παρουσιάζουν ακριβή αποτελέσματα.

2.10.3 Μέθοδοι ανακατασκευής σύγκρουσης οχήματος-πεζού

Οι μέθοδοι ανακατασκευής των εν λόγω ατυχημάτων μπορούν να χωρισθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την πολυπλοκότητα τους. Η πρώτη αφορά τις υπολογιστικές-αναλυτικές μεθοδολογίες που χαρακτηρίζονται ως "απλές", η δεύτερη κατηγορία χαρακτηρίζεται μέτριας πολυπλοκότητας και η τρίτη και πιο σύνθετη κατηγορία είναι αυτή που χρησιμοποιεί τρισδιάστατα μοντέλα για την ανακατασκευή στα οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά παρακάτω (J. P. Depriester et al., 2005).

2.10.3 i) Αναλυτικές-υπολογιστικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας, πηγάζουν από θεμελιώδεις σχέσεις της μηχανικής και της φυσικής. Τα μοντέλα είναι δισδιάστατα και θεωρούν ότι οι δυνάμεις ασκούνται στο κέντρο βάρους του πεζού. Θα αναφερθούν δύο ευρέως διαδεδομένα μοντέλα, το Fall and Slide και το Fall,bouncing,sliding του Searle ενώ υπάρχουν και άλλα όπως εξισώσεις από τους Rau et al., Toor and Araszewski, Simms et al.. Οι εκάστοτε μαθηματικές σχέσεις είναι οι εξής :

$$D_2 + D_3 = V_p(t_p) \sqrt{\frac{2H_2}{g}} + \frac{V_p^2(t_p)}{2\mu_p g} \quad (2.71)$$

$$V_p(t_v) = \frac{\sqrt{2\mu_p g [(D_2 + D_3) - \mu_p H_2]}}{\cos(\theta) + \mu_p \sin(\theta)} \quad (2.72)$$

Στις παραπάνω όπως και σε εκείνες που ακολουθούν στην επόμενη παράγραφο $V_p(t_p)$ είναι η ταχύτητα εκτόξευσης του πεζού (km/h), D_2 και D_3 οι αποστάσεις που βρίσκεται στον αέρα και στην συνέχεια σε επαφή με το έδαφος αντίστοιχα (m), H_2 η κάθετη απόσταση μεταξύ επαφής με το όχημα και πρώτης επαφής με το έδαφος (m), μ_p ο συντελεστής τριβής του πεζού με το έδαφος (αδιάστατος) και θ (deg) η γωνία εκτόξευσης του πεζού.

Από την άλλη, οι σχέσεις για το μοντέλο του Searle είναι :

$$\min\{V_p(t_v)\} = \frac{\sqrt{2\mu_p g [(D_2 + D_3) - \mu_p H_2]}}{\sqrt{1 + \mu_p^2}} \quad (2.73)$$

$$\max\{V_p(t_v)\} = \sqrt{2\mu_p g [(D_2 + D_3) - \mu_p H_2]} \quad (2.74)$$

Η ταχύτητα του οχήματος την στιγμή της πρόσκρουσης (m/s) είναι:

$$V_0 = \frac{1}{PE} V_p(t_p) \quad (2.75)$$

και PE (Projection efficiency) είναι ποσοστό που αναφέρεται στην αποδοτικότητα της εκτόξευσης του πεζού.

Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, μπορούν να προκύψουν είτε από εμπειρικές σχέσεις και πειραματικά δεδομένα, είτε από στατιστικά μοντέλα. Ακολουθούν σχέσεις των προαναφερθέντων για λόγους πληρότητας, στα οποία δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω :

$$\text{Σχέση εμπειρικού μοντέλου Toor και Araszewski : } V_0 = 8.25 D_t^{0.61} \quad (2.76)$$

$$\text{Σχέση εμπειρικού μοντέλου Rau et al. : } V_t = 0.0052 V_0^2 + 0.0783 V_0 \quad (2.77)$$

$$\text{Σχέση στατιστικού μοντέλου Simms et al. : } V_0 = \frac{m_v}{m_v + m_p} C [D_t - S_0]^D \quad (2.78)$$

Όπου:

V_0 : ταχύτητα πρόσκρουσης οχήματος (m/s)

D_t : απόσταση ανάμεσα σημείου πρόσκρουσης-σημείου ηρεμίας πεζού (m)

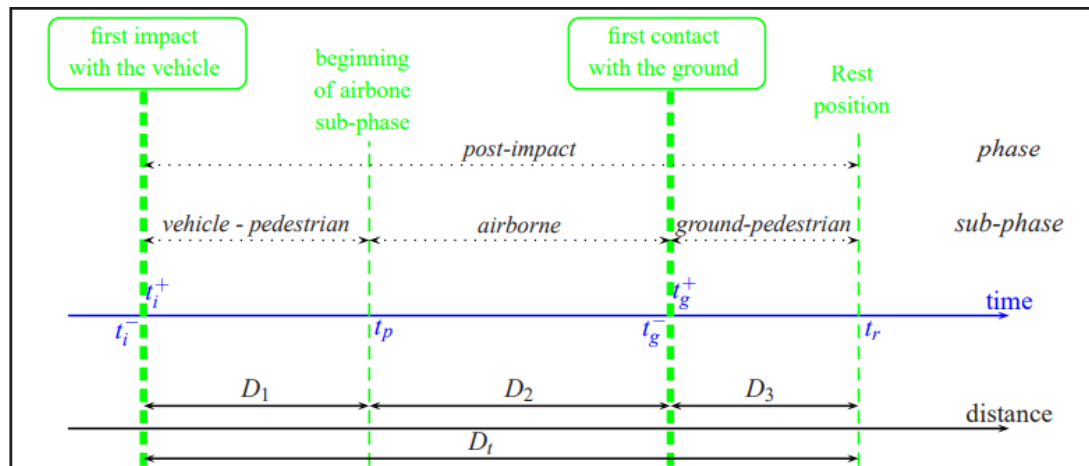
V_t : ταχύτητα εκτόξευσης του πεζού (m/s)

m_v : μάζα οχήματος (kg)

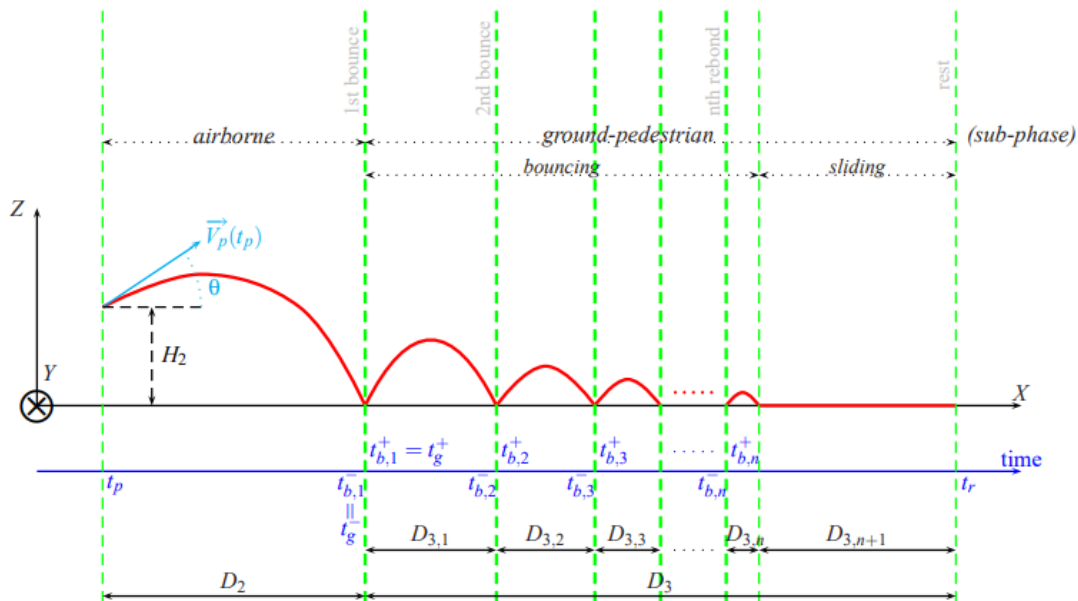
m_p : μάζα πεζού (kg)

S_0 : διόρθωση αρχικής απόστασης (π.χ. λόγω απόστασης αντίδρασης ή μήκος βήματος του πεζού) (m)

C: εμπειρική σταθερά (αδιάστατη)



Σχήμα 2.18 : Σχηματική αναπαράσταση της φάσης πρόσκρουσης και της φάσης μετά την πρόσκρουση που αντιστοιχεί σε τροχιά τύπου περιτύλιξης : φάσεις, υποφάσεις, γεγονότα, χρόνος και απόσταση (J. P. Depriester et al., 2005).



Σχήμα 2.19 : Αναπαράσταση της τροχιάς του κέντρου βάρους του πεζού στο μοντέλο του Searle με τίτλο «πτώση, αναπήδηση και ολίσθηση» (J. P. Depriester et al., 2005).

2.10.3 ii) Υβριδικά-μεσαίας πολυπλοκότητας μοντέλα

Σε αυτήν την κατηγορία, εντάσσονται μοντέλα πιο εξελιγμένα από αυτά της πρώτης, τα οποία αξιολογούνται ως πιο αποτελεσματικά και χρηστικά σε μία ανακατασκευή, ειδικά αν συνδυαστούν με κάποιο μοντέλο προσομοίωσης της 3^{ης} κατηγορίας. Θα αναφερθούν δύο παραδείγματα, το μοντέλο Wood (Wood's Single Segment Model-SSM) και ένα υβριδικό μοντέλο (Wrap collisions). Το **μοντέλο Wood** αντιμετωπίζει

τον πεζό ως δισδιάστατο μοντέλο και υποθέτει δύο προσκρούσεις, μία αρχική στο κάτω μέρος του σώματος του και μία δευτερεύουσα στην περιοχή της κεφαλής. Επιπλέον, βασίζεται εν μέρη σε τυπολογία του μοντέλου του Searle το οποίο αποτελεί απόδειξη του ότι ενώ υπάρχουν πολλαπλά μοντέλα τα περισσότερα έχουν κοινές θεμελιώδεις βάσεις και σχετίζονται μεταξύ τους. Η συνολική εναέρια τροχιά που διανύει ο πεζός είναι :

$$D_t = \frac{V_p^2(t_p)(\cos(\theta) + \mu_p \sin(\theta))^2}{2\mu_p g} \quad (2.79)$$

$$-\frac{k^2 \theta(t_p^-)}{h} + \mu_p (H_2) \quad \text{με}$$

$$\theta(t_p^-) = f(\theta(t_p^-), V_0, m_v, m_p, \alpha, h, dh, bw, g)$$

Όπου k = ακτίνα της ροπής αδράνειας του τμήματος (m) και h = κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του πεζού και του ανώτερου σημείου επαφής στο εμπρόσθιο μέρος του οχήματος (m). Οι όροι $V_p(t_p)\cos(\theta)$, $V_p(t_p)\sin(\theta)$, $\theta(t_p^-)$ σε m/s και H_2 σε μέτρα είναι συναρτήσεις της μάζας του οχήματος, της γεωμετρίας του τμήματος του πεζού, της θέσης της δευτερεύουσας πρόσκρουσης, του ρυθμού φρεναρίσματος του οχήματος, της ταχύτητας πρόσκρουσης V_0 , η παράμετρος α αντιστοιχεί στη γωνία του καπό, το d_h εκφράζει την απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του τμήματος και της κορυφής, ενώ το bw αντιπροσωπεύει το μισό πλάτος του τμήματος.

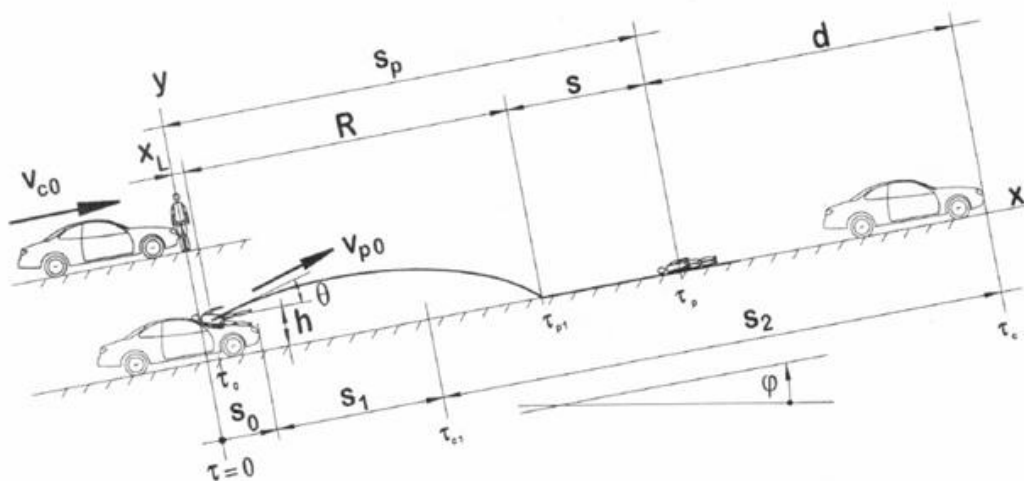
Εν συνεχεία θα εξεταστεί το **υβριδικό μοντέλο συγκρούσεων με περιτύλιξη (wrap collisions)** το οποίο προφανώς αντλεί στοιχεία από την προαναφερθείσα τυπολογία καθώς προκύπτει και αυτό κατά κύριο λόγο από πειραματικά στοιχεία. Ο τύπος της αρχικής ταχύτητας του οχήματος u_{c0} και της απόστασης προώθησης του πεζού s_p (m) είναι ο εξής :

$$u_{c0} = c_w \sqrt{s_p} \frac{m}{s} \quad (\text{m/s}) \quad (2.80)$$

με c_w μια σταθερά με μέση τιμή ίση με 3,6 και κατώτατη και ανώτατη τιμή ίση με 2,5 και 4,5 αντίστοιχα. Εάν ο πεζός είναι παιδί, μπορούν να βρεθούν οριακές τιμές της αρχικής ταχύτητας του οχήματος για $c_c=2,03$ και $c_c=3,90$. Ομοίως για ένα ενήλικο, οι αντίστοιχες τιμές είναι $c_a=1,95$, $c_a=3,77$. Η απόσταση προώθησης του πεζού ισούται με:

$$s_p = x_L + R + s \quad (\text{m}) \quad (2.81)$$

όπου x_L η απόσταση όπου υπάρχει επαφή πεζού-οχήματος (m), R η απόσταση που διαγράφει εναέρια τροχιά (m) και s η απόσταση όπου ολίσθησης ή και αναπήδησης του (m). Εάν έχουμε σύγκρουση με αποκλειστικά εμπρόσθια προώθηση του πεζού τότε $x_L=0$. Ακολουθεί σχετικό σχήμα ώστε τα παραπάνω να γίνουν πιο κατανοητά (Σχήμα 2.20).



Σχήμα 2.20 : Απεικόνιση αποστάσεων, χρονικών στιγμών και λοιπών μεταβλητών σε πρόσκρουση οχήματος-πεζού. (Ναναδάκης, 2012)

Η εναέρια τροχιά του πεζού έχει εύρος :

$$R = u_{p0} \cos \theta \tau_R - \frac{1}{2} g \sin \varphi \tau_R^2 \quad (2.82)$$

u_{p0} : ταχύτητα προώθησης πεζού (m/s)

θ : γωνία προώθησης πεζού (συνήθεις τιμές μεταξύ 0 και 15 μοιρών)

τ_R : χρόνος τροχιάς πεζού (sec)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81m/ sec²)

φ : κλίση οδοστρώματος (deg)

Επιπροσθέτως, ο χρόνος τροχιάς του πεζού (σε sec) δίνεται από την σχέση :

$$\tau_R = u_{p0} \sin \theta / g \cos \varphi \quad (2.83)$$

Την χρονική στιγμή πριν την πρόσκρουση με το έδαφος οι συνιστώσες της ταχύτητας τροχιάς (σε m/sec) ισούνται με :

$$u_{pRx} = u_{p0} \cos \theta - g \tau_R \sin \varphi \quad (2.84)$$

$$u_{pRy} = u_{p0} \sin \theta - g \tau_R \cos \varphi \quad (2.85)$$

Η ταχύτητα στην αρχή της απόστασης ολίσθησης, s , σε m/sec, εάν θεωρήσουμε ανελαστική σύγκρουση με το έδαφος ισούται με :

$$u'_{pRx} = -f_p u_{pRy} + u_{pRx} \quad (2.86)$$

με f_p να είναι ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας πεζού-εδάφους. Η παραπάνω φυσική μεταβλητή προσδιορίζεται πειραματικά και εξαρτάται τόσο από τον ρουχισμό όσο και από το είδος του εδάφους. Η μέση τιμή που λαμβάνει είναι $f_p = 0,58$ με απόκλιση $s_f = 0.1$ και άνω και κάτω όρια στα $\pm 3s_f$.

Τέλος, η διαφορά d (σε μέτρα), μεταξύ της συνολικής διανυόμενης απόστασης του οχήματος και της απόστασης προώθησης του πεζού είναι :

$$d = u_{c0}\tau_0 + u'_{c0}(\tau_{c1} - \tau_0) + \frac{a_2}{2}(\tau_c - \tau_{c1})^2 - s_p \quad (2.87)$$

Εάν είναι γνωστή ποσότητα η απόσταση d κάτι που είναι σύνηθες σε τέτοια ατυχήματα, ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία για να βρεθεί η ταχύτητα του οχήματος.

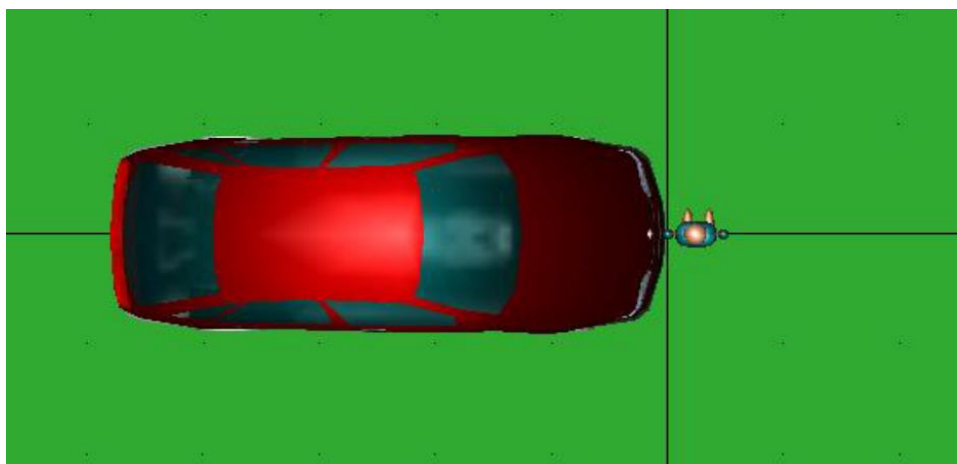
2.10.3 iii) Μοντέλα προσομοίωσης υψηλής πολυπλοκότητας

Σε αυτήν την τρίτη και τελευταία κατηγορία, θα εξεταστούν τα μοντέλα προσομοίωσης Madymo και PC-Crash για την ανακατασκευή ενός οδικού ατυχήματος μεταξύ επιβατικού οχήματος και πεζού. Κύρια διαφορά σε σχέση με τους προηγούμενους τρόπους ανακατασκευής, αποτελεί πως ο πεζός αντιμετωπίζεται ως ένα σύστημα πολλαπλών υπό-σωμάτων συνδεδεμένων μεταξύ τους με αρθρώσεις. Όσες περισσότερες αρθρώσεις, τόσο αναλυτικότερο το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Παρόλα αυτά, οι παράμετροι που εισάγονται πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά για να έχουν νόημα τα τελικά αποτελέσματα ενώ καταναλώνουν πολύ χρόνο (Jean-Philippe Depriester et al., 2005). Η λογική πίσω από τα δύο μοντέλα είναι παρόμοια, οπότε θα επεξηγηθούν ταυτοχρόνως. Ως πρώτο μέλημα του ερευνητή λογίζεται -όπως προαναφέρθηκε- η επιλογή και **εισαγωγή κατάλληλων παραμέτρων**. Κάποιες από αυτές μπορούν να επιλεγούν πειραματικά, άλλες από βάσεις δεδομένων, μαρτυρίες από τον τόπο του ατυχήματος ή μέσω της χρήσης εξισώσεων που περιεγράφηκαν. Ακολουθεί πίνακας των διαφόρων μεταβλητών-παραμέτρων που απαιτούνται (Πίνακας 2.3).

ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ				
Παράμετρος	Κατώτατη τιμή	Μέση τιμή	Ανώτατη τιμή	Μονάδα
Ύψος πεζού (Ανδρας)	1,58	1,7	1,82	m
Ύψος πεζού (Γυναίκα)	1,49	1,6	1,7	m
Βάρος πεζού (Ανδρας)	58,6	75	95,8	kg
Βάρος πεζού (Γυναίκα)	48,1	59	77	kg
Μάζα οχήματος	885	1330	1910	kg
Ύψος καπό	0,6	0,71	0,82	m
Μήκος καπό	0,83	0,92	1,01	m
Γωνία πεζού	0°	45°	90°	-
Ταχύτητα πεζού	0	2	4	km/h
Θέση ως προς επιμήκη άξονα	-0,5	0	0,5	m
Συντελεστής τριβής πεζού-εδάφους	0,4	0,5	0,6	-

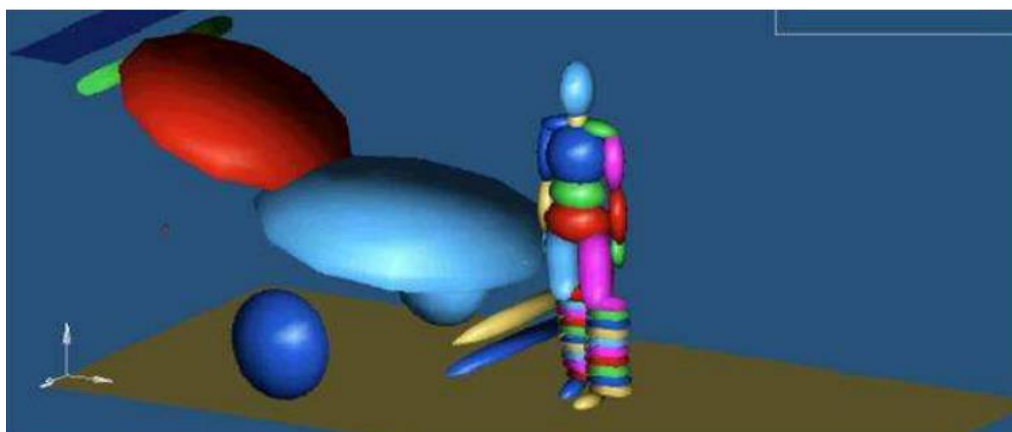
Πίνακας 2.3 : Παράμετροι που επελέγησαν σε ανακατασκευή με το πρόγραμμα PC-Crash (Francisco Martínez et al., 2016)

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ του πεζού και του εδάφους είναι πάντα μια άγνωστη παράμετρος. Μια λογική τιμή για μπετόν και άσφαλτο κυμαίνεται από 0,4 έως 0,65 (Fricke, 1990). Έπειτα ακολουθεί η φάση της **επιλογής κρίσιμων παραμέτρων**. Το εκάστοτε λογισμικό πραγματοποιεί προσομοιώσεις τυπικών σεναρίων έως ότου καταλήξει στο ποιες παράμετροι λογίζονται ως κρίσιμες.

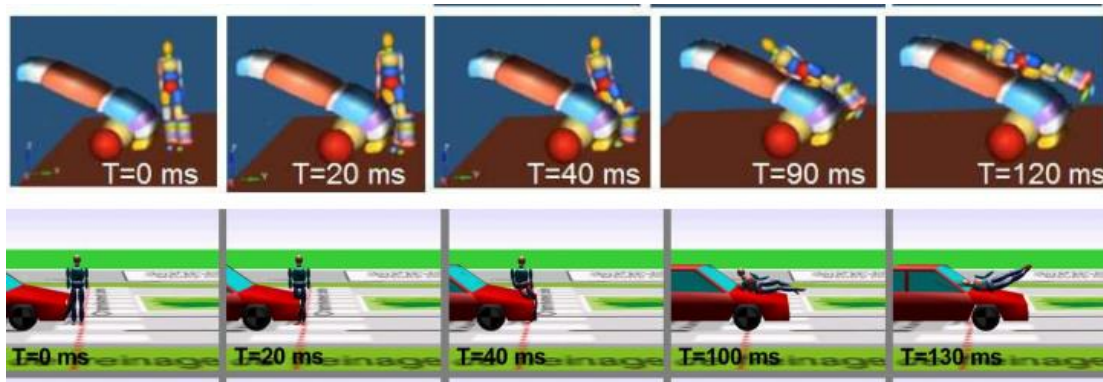


Σχήμα 2.21 : Κάτοψη τυπικής διάταξης πρόσκρουσης (Francisco Martínez et al., 2016)

Στην συνέχεια, με δοκιμές που πραγματοποιούν τα προγράμματα, βρίσκονται τα ζητούμενα όπως για παράδειγμα η ταχύτητα του οχήματος τις διάφορες χρονικές στιγμές του ατυχήματος. Όσο πιο ακριβή είναι τα δεδομένα που θα εισαχθούν, τόσο πιο έγκυρα θα είναι τα αποτελέσματα για αυτό και είναι τόσο σημαντική η συλλογή πληροφοριών από τον τόπο του ατυχήματος. Τέλος, σημαντική είναι η επαλήθευση των αποτελεσμάτων βάση άλλων καταγεγραμμένων ατυχημάτων σε βάσεις δεδομένων (λ.χ. NHTSA). Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από τα μοντέλα Madymo και PC-Crash.



Σχήμα 2.22 : Γενική απεικόνιση μοντέλου Madymo (Jean-Philippe Depriester et al., 2005)



Σχήμα 2.22 : Απεικόνιση προσομοίωσης πραγματικών ατυχημάτων (1^η σειρά Madymo, 2^η σειρά PC-Crash) (Jean-Philippe Depriester et al., 2005)

2.11 ΣΥΝΟΨΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη διαδικασία ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων. Αρχικά, παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης που εφαρμόζονται για τη συλλογή δεδομένων από τον τόπο του συμβάντος. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν τα θεμελιώδη μεγέθη που διέπουν τη δυναμική συμπεριφορά των οχημάτων, όπως οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα όχημα-οδός, οι συντελεστές τριβής και η γωνία πλαγιοδρόμησης. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι αρχές διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, καθώς και η Νευτώνεια φυσική που αποτελούν τη θεωρητική βάση των μεθόδων ανακατασκευής.

Ακολούθως, παρουσιάστηκαν ενεργειακές μέθοδοι εκτίμησης κρίσιμων μεγεθών, όπως η θεωρία ώθησης-συγκρούσεων και η μέθοδος Crash3, ενώ αναπτύχθηκαν οι κινηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των οχημάτων πριν, κατά και μετά τη σύγκρουση. Εξετάστηκε επίσης η σημασία των ιχνών των ελαστικών στο οδόστρωμα για την εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων, καθώς και το μοντέλο της σημειακής μάζας, μαζί με τις θεμελιώδεις σχέσεις που το διέπουν. Επιπλέον, έγινε αναφορά σε σύγχρονα εργαλεία και λογισμικά ανακατασκευής που συνεισφέρουν ουσιαστικά στο έργο του πραγματογνώμονα.

Τέλος, αναλύθηκαν διεξοδικά δύο κατηγορίες οδικών ατυχημάτων, τα ατυχήματα ανατροπής και σύγκρουσης με πεζό, όπου παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι προσέγγισης και εκτίμησης των κρίσιμων μεγεθών της ανακατασκευής τους. Μέσω των παραπάνω, προσδιορίστηκαν οι βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν τη διαδικασία ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων, οι οποίες θα αποτελέσουν αντικείμενο κατηγοριοποίησης και περαιτέρω διερεύνησης στο επόμενο στάδιο της εργασίας.

3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με γνώμονα το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα εξεταστεί ο βέλτιστος συνδυασμός μεθόδων ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων σε επτά τυπικά σενάρια. Προς επίτευξη μίας επιτυχημένης διερεύνησης, αρχικά θα αναφερθούν κρίσιμες παράμετροι κάθε σεναρίου και στην συνέχεια θα υπάρξει περαιτέρω ανάπτυξη και εξέταση του με ποιον τρόπο λαμβάνονται οι ακριβέστερες τιμές για τις εν λόγω παραμέτρους. Τα τυπικά σενάρια τα οποία θα εξεταστούν είναι τα εξής :

- Μετωπική σύγκρουση
- Πλαγιομετωπική σύγκρουση
- Νωτομετωπική σύγκρουση
- Εκτροπή οχήματος εκ της οδού
- Ανατροπή οχήματος
- Σύγκρουση οχήματος με πεζό
- Σύγκρουση οχήματος σε σταθερό αντικείμενο

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως δύναται να προκύψει συνδυασμός των παραπάνω σεναρίων ή αύξηση του αριθμού των εμπλεκόμενων οχημάτων ή και τα δύο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, εφαρμόζεται είτε συνδυασμός των τρόπων ανακατασκευής του κάθε τυπικού σεναρίου, είτε επαναληπτική-αλυσιδωτή διαδικασία κάποιας μεθόδου ή και τα δύο.

3.2 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ

Τα μεγέθη που ακολουθούν χαρακτηρίζονται ως κρίσιμα για την αποτύπωση και ανακατασκευή ενός οδικού ατυχήματος. Ορισμένα είναι κοινά σε όλα τα τυπικά σενάρια και άλλα διαφέρουν ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε περίπτωσης. Οι παρακάτω παράμετροι έχουν προκύψει έπειτα από ενδελεχή έρευνα της διεθνούς βιβλιογραφίας και των διαφόρων μεθόδων ανακατασκευής που έχουν αναπτυχθεί στις προηγούμενες ενότητες.

3.2.1 Μετωπική σύγκρουση

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Ίχνη πέδησης (εάν υφίστανται)
- Ίχνη εγκοπών στο οδόστρωμα (εάν υφίστανται)
- Εύρος πεδίου θραυσμάτων

- Θέση ηρεμίας των οχημάτων σε σχέση με αυτό της πρόσκρουσης
- Παραμόρφωση των οχημάτων (βάθος παραμόρφωσης)
- Γωνία πρόσκρουσης
- Βαθμός επαλληλίας οχημάτων (εάν υφίσταται)
- Ταχύτητα των οχημάτων ακριβώς πριν και ακριβώς μετά την σύγκρουση

3.2.2 Πλαγιομετωπική σύγκρουση

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Ίχνη πέδησης στο οδόστρωμα (εάν υφίστανται)
- Ίχνη πλαγιολίσθησης στο οδόστρωμα (εάν υφίστανται)
- Ίχνη εγκοπών στο οδόστρωμα (εάν υφίστανται)
- Εύρος πεδίου θραυσμάτων
- Τελικές θέσεις οχημάτων
- Βάθος και πλάτος παραμόρφωσης οχημάτων
- Κατεύθυνση κύριας διεύθυνσης σύγκρουσης (PDOF)
- Ταχύτητες των οχημάτων τη στιγμή της σύγκρουσης και μετά από αυτήν
- Διεύθυνση κίνησης των οχημάτων (γωνία πρόσκρουσης)

3.2.3 Νωτομετωπική σύγκρουση

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Σημεία επαφής οχημάτων
- Θέσεις τελικής ηρεμίας
- Ίχνη πέδησης ή απουσία αυτών
- Ίχνη πρόσκρουσης και παραμορφώσεων
- Εύρος πεδίου θραυσμάτων
- Βάθος και πλάτος παραμόρφωσης οχημάτων
- Μεταβολή ταχύτητας (ΔV)
- Γωνία και θέση πρόσκρουσης
- Βαθμός επαλληλίας οχημάτων

3.2.4 Εκτροπή οχήματος εκ της οδού

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Σημείο εξόδου από την οδό
- Τροχιά οχήματος έως την τελική θέση ηρεμίας
- Ίχνη τροχών και ολίσθησης
- Κλίση, επίκλιση οδού.
- Τελική θέση ηρεμίας οχήματος
- Ταχύτητα οχήματος πριν την έξοδο
- Γωνία εξόδου και διεύθυνση κίνησης

- Δράσεις/δυνάμεις μεταξύ ελαστικών και επιφάνειας (συντελεστής τριβής)

3.2.5 Ανατροπή οχήματος

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Σημείο έναρξης της ανατροπής
- Ίχνη επαφής με το έδαφος κατά τις ανατροπές
- Αριθμός και σειρά ανατροπών
- Θέση τελικής ηρεμίας
- Παραμορφώσεις οροφής και πλευρικών επιφανειών
- Ταχύτητα οχήματος κατά την έναρξη της ανατροπής
- Γωνία και κατεύθυνση κίνησης κατά την ανατροπή
- Ύψος κέντρου βάρους οχήματος
- Πλάτος άξονα οχήματος
- Επίκλιση και ακτίνα οδού

3.2.6 Σύγκρουση οχήματος με πεζό

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Σημείο πρώτης επαφής
- Απόσταση ρίψης (throw distance)
- Τελική θέση πεζού
- Ίχνη επαφής στο όχημα (bumper, καπό, παρμπρίζ)
- Εύρος πεδίου θραυσμάτων/αντικειμένων
- Ταχύτητα οχήματος κατά την πρόσκρουση
- Απόσταση και τροχιά ρίψης
- Χαρακτηριστικά πεζού
- Ύψος του προφυλακτήρα του οχήματος (ειδικά σε σχέση με το κέντρο μάζας του πεζού)
- Γωνία πρόσκρουσης και τύπος αλληλεπίδρασης (wrap, forward projection)

3.2.7 Σύγκρουση οχήματος σε σταθερό αντικείμενο

Κρίσιμες παράμετροι αποτύπωσης και ανακατασκευής

- Σημείο πρόσκρουσης στο αντικείμενο
- Θέση τελικής ηρεμίας
- Ίχνη πρόσκρουσης/επαφής στο αντικείμενο
- Ταχύτητα πρόσκρουσης οχήματος
- Βάθος και έκταση παραμόρφωσης
- Ενέργεια απορρόφησης κατά τη σύγκρουση
- Γωνία πρόσκρουσης

3.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

Στο σκέλος της αποτύπωσης ενός οδικού ατυχήματος, δηλαδή της συλλογής δεδομένων από τον τόπο που έλαβε χώρα αυτό, δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των τυπικών σεναρίων ως προς το ποια μέθοδος δύναται να ακολουθηθεί. Οφείλουν να χρησιμοποιηθούν όλες οι διαθέσιμοι μέθοδοι για να ληφθούν όσα περισσότερα δεδομένα γίνεται. Για παράδειγμα, αξιόπιστη είναι η χρήση γεωδαιτικού σταθμού που έχει την ικανότητα να μετρά και γωνίες πέρα από αποστάσεις, σε συνδυασμό με λήψη φωτογραφιών τόσο από κοντινή απόσταση όσο και από μη-επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV). Επιπροσθέτως, είναι αυτονόητο πως μείζονος σημασίας είναι οι μαρτυρίες των εμπλεκόμενων και λοιπών παρευρισκόμενων στο σημείο, καθώς και ενδεχόμενο υλικό από κάμερες κυκλοφορίας.

Όσον αφορά το σκέλος της ανακατασκευής, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαφορετικού υπόβαθρου που μπορούν να ακολουθηθούν.

Στη μετωπική σύγκρουση, η ενδεδειγμένη μέθοδος είναι η μέθοδος Crash 3 η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι η απορροφηθείσα ενέργεια κατά την πρόσκρουση συσχετίζεται άμεσα με το βαθμό παραμόρφωσης του οχήματος. Εφόσον είναι διαθέσιμοι οι συντελεστές ακαμψίας για το συγκεκριμένο μοντέλο οχήματος, η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής της ταχύτητας (ΔV), η οποία με τη σειρά της σε συνδυασμό με τη διατήρηση της ορμής (θεωρία ώθησης-συγκρούσεων), δίνει τις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων πριν τη σύγκρουση. Σε περίπτωση ύπαρξης καταγραφέα συμβάντων (EDR), οι υπολογισμοί μπορούν να επιβεβαιωθούν ή να διορθωθούν.

Αντίστοιχα, σε πλαγιομετωπική σύγκρουση (τύπου T-bone), απαιτείται η ίδια μεθοδολογία σε περισσότερους του ενός άξονες, καθώς οι δυνάμεις που ασκούνται δεν περιορίζονται στον διαμήκη άξονα. Η χρήση ενός μοντέλου πολλαπλών κατευθύνσεων παραμόρφωσης σε συνδυασμό με δυναμική ανάλυση επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση της μεταβληθείσας κινητικής κατάστασης των οχημάτων. Η θεωρία ώθησης-συγκρούσεων εφαρμόζεται πλέον σε δύο διαστάσεις και μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητική εκτίμηση της ταχύτητας προ σύγκρουσης. Επιπλέον μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα το μοντέλο σημειακής μάζας.

Στις νωτομετωπικές συγκρούσεις (rear-end), η μέθοδος της παραμόρφωσης παραμένει εξίσου εφαρμόσιμη, με τον πρόσθετο έλεγχο της ύπαρξης ιχνών πέδησης ή ολίσθησης, που σε συνδυασμό με την ανάλυση φρεναρίσματος, μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση της αρχικής ταχύτητας του οχήματος που προκάλεσε τη σύγκρουση. Η χρήση του μοντέλου σημειακής μάζας με γνωστές ποσότητες τον συντελεστή τριβής του

οδοστρώματος και την απόσταση πέδησης είναι κρίσιμη σε αυτό το σενάριο, ιδιαίτερα όταν η παραμόρφωση είναι ελαφριά ή οι παραμορφώσεις των οχημάτων δεν είναι επαρκείς για να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση εκτροπής οχήματος εκτός οδού χωρίς σύγκρουση, η προτεινόμενη προσέγγιση είναι η κινηματική ανάλυση της τροχιάς με την μέθοδο της σημειακής μάζας που αναλύθηκε και των εξισώσεων κίνησης, εφόσον υπάρχουν στοιχεία όπως ίχνη πέδησης. Η προσομοίωση της τροχιάς με κατάλληλα λογισμικά όπως το PC-Crash, αποδίδει εξαιρετικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα όταν η επιφάνεια κύλισης είναι ανομοιογενής ή υπάρχει έντονη κλίση. Σε περιπτώσεις όπου η εκτροπή καταλήγει σε πρόσκρουση με σταθερό εμπόδιο, τότε επανέρχεται η ενεργειακή ανάλυση για την εκτίμηση της κινητικής ενέργειας του οχήματος.

Η ανατροπή οχήματος απαιτεί πιο εξειδικευμένη προσέγγιση και δεν επιδέχεται εφαρμογή της μεθόδου παραμόρφωσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η ανάλυση της τροχιάς του κέντρου βάρους του οχήματος σε σχέση με τα σημεία επαφής κατά την ανατροπή όπως παρατέθηκε στην πρότερη αντίστοιχη ενότητα. Η χρήση μοντέλων όπως αυτό του Searle και η δυναμική προσομοίωση περιστροφικών κινήσεων, επιτρέπουν την εκτίμηση της ταχύτητας πριν την απώλεια ευστάθειας, ενώ σε συνδυασμό με την καταγραφή του μήκους ανατροπής και του πλήθους των περιστροφών, προκύπτει ικανοποιητική εκτίμηση της αρχικής ταχύτητας.

Για τη σύγκρουση οχήματος με πεζό, η προτεινόμενη μέθοδος είναι αυτή της απόστασης εκτίναξης του πεζού (throw distance), η οποία βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις μεταξύ ταχύτητας πρόσκρουσης και απόστασης μεταφοράς του σώματος. Ο συνδυασμός των εξισώσεων που δόθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα μαζί με κάποιο προσομοιωτικό πρόγραμμα (π.χ. Madymo) κρίνεται ως βέλτιστος.

Τέλος, στη σύγκρουση οχήματος με σταθερό αντικείμενο, η μέθοδος παραμόρφωσης προσφέρει και πάλι τον πιο άμεσο και ρεαλιστικό τρόπο εκτίμησης της ενέργειας που απορροφήθηκε, ειδικά όταν η σύγκρουση είναι μετωπική και πλήρους επικάλυψης, η μετατροπή του βάθους παραμόρφωσης σε κινητική ενέργεια, και στη συνέχεια σε ταχύτητα πρόσκρουσης, θεωρείται βέλτιστη προσέγγιση. Αν η πρόσκρουση δεν οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση, τότε οι μέθοδοι κινηματικής ή ανάλυσης τροχιάς σημειακής μάζας είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της ταχύτητας πριν το συμβάν. Σε όλα τα σενάρια, η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων ενισχύεται όταν χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία μεθόδους και τα αποτελέσματα διασταυρώνονται, ενώ η χρήση σύγχρονων εργαλείων προσομοίωσης και δεδομένων από EDR συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση της αβεβαιότητας.

3.4 ΤΥΠΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν τυπικά παραδείγματα οδικών ατυχημάτων με τη μέθοδο της σημειακής μάζας. Η εν λόγω μέθοδος αποτελεί μια απλουστευμένη προσέγγιση της ανακατασκευής ενός οδικού ατυχήματος όμως τα αποτελέσματα που εξάγονται δεν παύουν να είναι ακριβή. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε ποικίλα σενάρια οδικών ατυχημάτων όπως θα φανεί παρακάτω.

3.4.1 1^ο Τυπικό Παράδειγμα: διερεύνηση δυνατότητας ακινητοποίησης οχήματος προ πρόσκρουσης σε άλλο

Εκφώνηση

Καταγραφικό σύστημα σε αυτοκινητόδρομο κατέγραψε το εξής περιστατικό:

Όχημα κινείται με ταχύτητα 120km/h στην ίδια λωρίδα κυκλοφορίας με άλλο που προπορεύεται αλλά είναι ακινητοποιημένο.

Τη στιγμή που ο οδηγός του οχήματος που έπεται βρίσκεται σε απόσταση 110m αρχίζει ελιγμό έκτακτης πέδησης στον οποίο ο χρόνος αντίληψης αντίδρασης για την ενεργοποίησή του συστήματος πέδησης θεωρείται 2sec. Η επιβράδυνση μετρήθηκε 3,5m/ sec². Η κλίση της οδού στην περιοχή είναι s=4%

Να προσδιοριστεί η ταχύτητα πρόσκρουσης.

Αν το όχημα διαθέτει εξελιγμένο σύστημα υποβοήθησης του οδηγού (ADAS), όπου ο χρόνος αντίληψης αντίδρασης για την ενεργοποίηση του συστήματος πέδησης είναι 1.00sec, ποια πρέπει να είναι η επιβράδυνση του κινούμενου οχήματος προκειμένου οριακά να αποφευχθεί η σύγκρουση;

Τα παραπάνω ερωτήματα να απαντηθούν και στην περίπτωση κίνησης του οχήματος εντός κυκλικού τόξου ακτίνας R=400m και επίκλισης e=7%.

Λύση

Στο κινούμενο όχημα η διαδικασία αμιγούς πέδησης αρχίζει 2sec αφότου ο οδηγός αντιλαμβάνεται το ακινητοποιημένο όχημα. Κατά συνέπεια, το μήκος αμιγούς πέδησης μέχρι το σημείο σύγκρουσης (D') είναι:

$$D' = \text{Μήκος πέδησης(διατιθέμενο)} - \frac{V_0 t_{\text{perception_reaction}}}{3.6} \quad (2.65)$$

Αντικαθιστώντας:

Μήκος πέδησης(διατιθέμενο) = 110m

$$V_0 = 120 \text{ km/h}$$

$$t_{\text{perception_reaction}} = 2 \text{ sec}$$

$$\text{Προκύπτει πως } D' = 110 - \frac{120 \cdot 2}{3.6} = 43,3 \text{ m}$$

Η ταχύτητα πρόσκρουσης δίνεται από τη σχέση (2.66) και είναι:

$$V_{D'} = 3,6 \sqrt{\frac{V_0^2}{3.6^2} - 2 \left(a_{\text{average}} + g \frac{s}{100} \right) D'}$$

Αντικαθιστώντας:

$$V_0 = 120 \text{ km/h}$$

$$a_{\text{average}} = 3.5 \text{ m/sec}^2$$

$$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$$

$$s = 4$$

$$D' = 43,3 \text{ m}$$

$$\text{Προκύπτει πως: } V_{D'} = 3,6 \sqrt{\frac{120^2}{3.6^2} - 2 \left(3,5 + 9,81 \frac{4}{100} \right) 43,3} = 100,16 \text{ km/h}$$

Για να αποφευχθεί οριακά η σύγκρουση πρέπει μήκος πέδησης(διατιθέμενο) = μήκος πέδησης = 110m.

Το μήκος πέδησης δίνεται από την εξίσωση (2.64) και είναι:

$$\text{μήκος πέδησης} = \frac{V_0 t_{\text{perception_reaction}}}{3.6} + \frac{\left(\frac{V_0}{3,6} \right)^2}{2 \left(a_{\text{average}} + g \frac{s}{100} \right)}$$

Αντικαθιστώντας τα ίδια δεδομένα με προηγουμένως και με $t_{\text{perception_reaction}} = 1 \text{ sec}$,

$$110 = \frac{120 \cdot 1}{3.6} + \frac{\left(\frac{120}{3,6} \right)^2}{2 \left(a_{\text{average, ADAS}} + 9,81 \frac{4}{100} \right)}$$

$$\text{προκύπτει } a_{\text{average, ADAS}} = 6,85 \text{ m/sec}^2$$

Στο σενάριο κίνησης του οχήματος εντός κυκλικού τόξου υφίσταται τριβή και στην εγκάρσια διεύθυνση σε αντίθεση με την κίνηση σε ευθεία.

Για να εκτιμηθούν οι συντελεστές οι συντελεστές τριβής για κάθε διεύθυνση θα αξιοποιηθούν οι σχέσεις:

$$\left(\frac{f_T}{f_{Tmax}}\right)^2 + \left(\frac{f_R}{f_{Rmax}}\right)^2 \leq 1 \quad (2.3),$$

$$R_{min} = \frac{V^2}{127(f_R + e)} \quad (2.52),$$

$$f_T = a_average/g \quad (2.63)$$

Από (2.52) για $R=400m$, $e=7$, $V=120km/h$, ο απαιτούμενος συντελεστής τριβής στην εγκάρσια διεύθυνση $f_R = 0,213$.

$f_T = 3,5/9,81 = 0,357$ ο συνολικός εφαπτομενικός συντελεστής τριβής.

Από τη σχέση (2.3) για $f_{Rmax} = 0,925f_T = 0,33$, $f_{Tmax} = 0,357$ και $f_T = f_T'$ ο διατιθέμενος συντελεστής τριβής στην εφαπτομενική διεύθυνση προκύπτει $f_T' = 0,273$.

Από (2.63), $\alpha_{average,tangent} = 0,273 \times 9,81 = 2,675 \text{ m/ sec}^2$.

Η συνέχεια είναι ίδια με την περίπτωση της αμιγούς ισοδυναμίας, δηλαδή:

$$\text{Από την εξίσωση (2.64) : μήκος πέδησης} = \frac{120^2}{3.6} + \frac{\left(\frac{120}{3.6}\right)^2}{2\left(2,675 + 9,81 \frac{4}{100}\right)} = 247,78m$$

$$\text{Από τη σχέση (2.65) : } D' = 110 - \frac{120^2}{3.6} = 43,33m$$

$$\text{Από τη σχέση (2.66) : } V_{D'} = 3,6 \sqrt{\frac{120^2}{3.6^2} - 2\left(2,675 + 9,81 \frac{4}{100}\right) 43,33} = 104,67km/h.$$

Όσον αφορά την περίπτωση που το όχημα διαθέτει ADAS, δηλαδή

$t_{perception_reaction} = 1sec$ το $\alpha_{average,ADAS,tangent} = 6,85m/ sec^2$ δηλαδή προκύπτει η ίδια τιμή με την περίπτωση του ευθύγραμμου οδικού τμήματος. Όμως στην περίπτωση αυτή, η τιμή της παραπάνω επιβράδυνσης αντιστοιχεί σε τριβή η οποία διατίθεται στην εφαπτομενική διεύθυνση κίνησης του οχήματος. Η επιβράδυνση που πρέπει να έχει το όχημα εξάγεται από τη συνολική τριβή η οποία με τη σειρά της είναι το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών στην εφαπτομενική και την εγκάρσια διεύθυνση. Έτσι μετασχηματίζοντας την εξίσωση (2.3) προκύπτει:

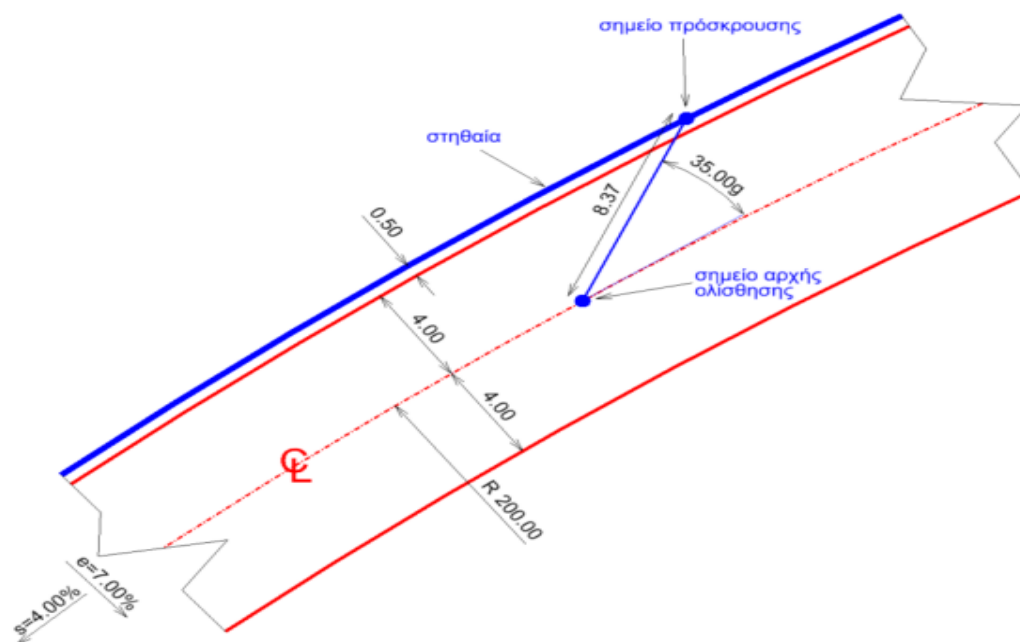
$$\left[\frac{\frac{a_{average,ADAS,tangent}}{g}}{\frac{a_{average,ADAS}}{g}} \right]^2 + \left[\frac{\frac{V^2}{127R} - \frac{e}{100}}{0.925 \frac{a_{average,ADAS}}{g}} \right]^2 \leq 1$$

Αντικαθιστώντας με τα κατάλληλα μεγέθη που είναι γνωστά, η επιβράδυνση, $a_{average,ADAS} = 7,25 \text{ m/ sec}^2$.

3.4.2 2^ο Τυπικό Παράδειγμα: προσδιορισμός ταχύτητας πρόσκρουσης σε εκτροπή οχήματος

Εκφώνηση

Σε οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας διατομής 2x4m, όχημα το οποίο επιχειρούσε ελιγμό προσπέρασης εντός δεξιόστροφου κυκλικού τόξου (ακτίνας $R=225\text{m}$, επίκλισης $e=7.00\%$ και κλίσης $s=4.00\%$) εξετράπη της πορείας του σε συνθήκες πέδησης και στη συνέχεια ολισθαίνοντας προσέκρουσε στα προστατευτικά στηθαία ασφαλείας (Σχήμα 3.1)



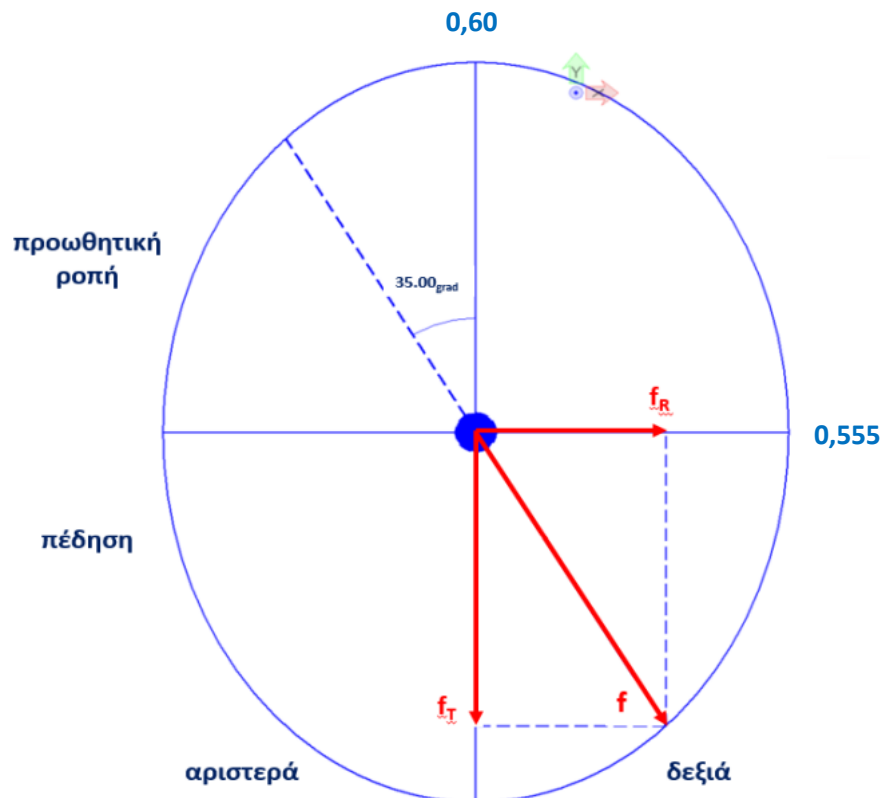
Σχήμα 3.1 : Σκίτσο εκφώνησης τυπικού παραδείγματος (Μαυρομάτης, 2025)

Με βάση τα ίχνη πέδησης του οχήματος (μήκους 8.37m) προκύπτει ότι η διεύθυνση της ολίσθησης, με σημείο αναφοράς τον άξονα της οδού, σχηματίζει γωνία 35.00grad ως προς την αντίστοιχη εφαπτόμενη του κυκλικού τόξου. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής τριβής στη διαμήκη διεύθυνση μετρήθηκε εκ των υστέρων $f_{Tmax}=0.60$.

Θεωρώντας ότι έως τη στιγμή της εκτροπής, η τροχιά του οχήματος συνέπιπτε με τη γεωμετρία του άξονα της οδού, να προσδιοριστεί η ταχύτητα τη χρονική στιγμή αρχής της ολίσθησης καθώς και η ταχύτητα πρόσκρουσης στα προστατευτικά στηθαία ασφαλείας. Να θεωρηθεί επίσης ότι το όχημα ολισθαίνει οριακά και ότι $f_{Rmax} = 0.925f_{Tmax}$.

Λύση

Αφετηρία για την επίλυση του τυπικού παραδείγματος αποτελεί η εύρεση του εφαπτομενικού και του εγκάρσιου συντελεστή τριβής. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με την αξιοποίηση της έλλειψης του σχήματος (2.3) και των δεδομένων της εκφώνησης. Η έλλειψη εφαπτομενικού-εγκάρσιου συντελεστή τριβής για γωνία 35.00grad και λόγω οριακής ολίσθησης με $f_{Rmax} = 0,925 \times 0,6 = 0,555$ και $f_{Tmax}=0.60$ διαμορφώνεται ως εξής :



Σχήμα 3.2 : Έλλειψη εφαπτομενικού-εγκάρσιου συντελεστή τριβής για τα δεδομένα του Τυπικού Παραδείγματος 2 (Μαυρομάτης, 2025)

Άρα ισχύει πως:

$$f_R = f \sin 35, f_T = f \cos 35 \text{ και η σχέση (2.3) όπου } \left(\frac{f_T}{f_{Tmax}} \right)^2 + \left(\frac{f_R}{f_{Rmax}} \right)^2 \leq 1$$

Με γνώμονα όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι:

$$f = 0,59, f_R = 0,31, f_T = 0,50$$

Η ταχύτητα ολίσθησης την στιγμή έναρξης του φαινομένου δίνεται από την σχέση (2.53) η οποία είναι η εξής :

$$V_{skid} = \sqrt{127R(f_R + e)}$$

Για $R = 225\text{m}$, $f_R = 0,31$, $e = 7\%$ προκύπτει: $V_{skid} = 104,2\text{km/h}$

Η ταχύτητα πρόσκρουσης λαμβάνοντας υπόψιν ίχνη ολίσθησης $D=8,37\text{m}$ και σύνθετη κλίση επιφάνειας ολίσθησης $s' = s \cos 35 + e \sin 35 = 7,29$ προκύπτει από τη σχέση (2.66) και είναι:

$$V_{crash} = 3.6 \sqrt{\frac{V_{skid}^2}{3.6^2} - 2g(f + \frac{s'}{100})D} = 97,2\text{km/h}$$

3.4.3 3^ο Τυπικό Παράδειγμα: προσδιορισμός ταχύτητας ανατροπής οχήματος

Εκφώνηση

Να προσδιοριστεί η ταχύτητα ανατροπής φορτηγού οχήματος κατά την κίνησή του σε καμπύλη με $R=100\text{m}$ και επίκλισης $e=6\%$.

Δίνονται:

Πλάτος άξονα $t=2.18\text{m}$

Ύψος του κέντρου βάρους της ολικής μάζας του οχήματος $h=2.50\text{m}$

Λύση

$$\text{Θα εφαρμοστεί η σχέση (2.70): } \frac{V^2}{gR} = \frac{\left(\frac{t}{2} + he\right)}{\left(h - \frac{t}{2}e\right)} \Rightarrow \frac{V^2}{9,81 \cdot 100} = \frac{\left(\frac{2,18}{2} + 2,5 \cdot 6/100\right)}{\left(2,5 - \frac{2,18}{2} \cdot 6/100\right)}$$

$\Rightarrow V = 22,35 \text{ m/s} = 22,35 \times 3,6 \text{ km/h} = 80,47 \text{ km/h}$ ταχύτητα ανατροπής του φορτηγού οχήματος.

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως έγινε αντιληπτό μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η ανακατασκευή οδικών ατυχημάτων αποτελεί έναν ευρύ κλάδο με ποικίλες διαφορετικές μεθόδους που θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν σε ομάδες μεθόδων που εμφανίζουν ορισμένες ομοιότητες μεταξύ τους. Για παράδειγμα, υφίστανται ενεργειακές μέθοδοι που βασίζονται στην ίδιες φυσικές αρχές ή το μοντέλο σημειακής μάζας στην οποία το όχημα αντιμετωπίζεται ως σημειακή μάζα συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του. Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρθηκαν κρίσιμοι οδικοί παράμετροι για κύριες κατηγορίες οδικών ατυχημάτων και μετέπειτα αναπτύχθηκε αιτιολογημένα ποια μέθοδος προτείνεται για την εκάστοτε κατηγορία.

Στο πλαίσιο αυτό, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συγκεντρωτικά συμπεράσματα. Καταρχάς, μία μέθοδος που τυγχάνει ευρείας εφαρμογής είναι το μοντέλο σημειακής μάζας. Για αυτό το λόγο αναλύθηκαν τυπικά παραδείγματα που πιστοποιούν την χρηστικότητα της. Επιπλέον, μία κρίσιμη παράμετρος που είναι κρίσιμη σε όλα τα σενάρια ατυχημάτων είναι η ταχύτητα του οχήματος ακριβώς πριν το ατύχημα είτε πρόκειται για μετάβαση σε ασταθή κατάσταση, είτε πρόκειται για σύγκρουση. Τέλος, σε περίπτωση που συγκεκριμένα δεδομένα δεν είναι γνωστά, όπως τα ίχνη πέδησης-ολίσθησης ή ο συντελεστής τριβής η ανακατασκευή του ατυχήματος αποκτά ιδιαίτερη δυσκολία, η οποία σε ένα βαθμό δύναται να αντιμετωπιστεί με μετρήσεις τριβής στο οδόστρωμα.

Πάνω στα παραπάνω θα βασιστεί και η απόπειρα δημιουργίας ενός μοντέλου εκτίμησης της ταχύτητας πρόσκρουσης, εάν θεωρούνται γνωστά δεδομένα η παραμόρφωση και τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του οχήματος όπως το πλάτος, το μήκος και το βάρος του.

4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται λεπτομερώς το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης και των παραμέτρων της, το οποίο θα αξιοποιηθεί για την δημιουργία του μοντέλου εκτίμησης της ταχύτητας πρόσκρουσης.

4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΛΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

Στόχος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι η μοντελοποίηση μιας βαθμωτής εξαρτημένης μεταβλητής Y , ως μαθηματική συνάρτηση μίας ανεξάρτητης μεταβλητής X , έτσι ώστε, χρησιμοποιώντας το προκύπτον μοντέλο, να είναι δυνατόν ο υπολογισμός της μεταβλητή Y όταν είναι γνωστή η X .

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τη μέθοδο αυτή είναι:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (4.1)$$

όπου:

- β_0 είναι το σημείο τομής με τον άξονα y και ονομάζεται συντελεστής παλινδρόμησης
- β_1 είναι η κλίση και ονομάζεται συντελεστής παλινδρόμησης
- ε είναι ο όρος σφάλματος (το μέρος του Y που δεν εξηγεί το μοντέλο)

4.3 ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ (MULTIPLE LINEAR REGRESSION – MLR)

Η Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση (MLR) είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τιμής μιας εξαρτημένης μεταβλητής, με βάση τις τιμές δύο ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Αποτελεί επέκταση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, η οποία εξετάζει τη σχέση μεταξύ μίας εξαρτημένης και μίας ανεξάρτητης μεταβλητής όπως προαναφέρθηκε.

Η εξίσωση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης είναι:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (4.2)$$

4.4 ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Οι λογαριθμικοί μετασχηματισμοί στις μεταβλητές ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι χρήσιμοι όταν δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών. Η λογαριθμική γραμμική παλινδρόμηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές των δεδομένων ή όταν η σχέση μεταξύ των μεταβλητών ακολουθεί εκθετική μορφή. Μέσω του μετασχηματισμού των μεταβλητών σε λογαρίθμους, η μη γραμμική σχέση καθίσταται γραμμική, επιτρέποντας την δυνατότητα εφαρμογής γραμμικών μεθόδων εκτίμησης και ενισχύοντας τη σταθερότητα του εφαρμοζόμενου μοντέλου.

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το λογαριθμικό μοντέλο είναι:

$$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(X) + \varepsilon \quad (4.3)$$

$$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (4.4)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(X) + \varepsilon \quad (4.5)$$

Στην σχέση (4.3) το β_1 εκφράζει την ελαστικότητα της εξαρτημένης μεταβλητής Y σε σχέση με την ανεξάρτητη μεταβλητή X .

Στην σχέση (4.4) το β_1 εκφράζει το ποσοστό μεταβολής της εξαρτημένης μεταβλητής Y για αλλαγή μιας μονάδας στην τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής X .

Στην σχέση (4.5) το β_1 εκφράζει τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής Y για 100% μεταβολή της τιμής της ανεξάρτητης μεταβλητής X .

4.5 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου παλινδρόμησης βασίζεται σε ορισμένα θεμελιώδη στατιστικά κριτήρια που αξιολογούν τόσο την εγκυρότητα όσο και την ποιότητα της προσαρμογής του. Τα κυριότερα κριτήρια είναι τα εξής:

- Οι τιμές και τα πρόσημα των συντελεστών β_i , τα οποία υποδεικνύουν τη μορφή της σχέσης μεταξύ των ανεξάρτητων και της εξαρτημένης μεταβλητής.
- Η στατιστική σημαντικότητα (t-test), που εξετάζει αν κάθε συντελεστής συμβάλλει ουσιαστικά στο μοντέλο.
- Η τιμή σημαντικότητας (p-value), η οποία δείχνει κατά πόσο η σχέση που περιγράφεται από κάθε συντελεστή είναι στατιστικά αποδεκτή (συνήθως με όριο $p < 0,05$).

- Τα μέτρα προσαρμογής, όπως ο F-statistic και το τυπικό σφάλμα (Standard Error), που αξιολογούν τη συνολική καταλληλότητα και σταθερότητα του μοντέλου.
- Η ποιότητα προσαρμογής, η οποία εκφράζεται μέσω των R^2 και Προσαρμοσμένο (Adjusted) R^2 , και αντικατοπτρίζει το ποσοστό της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που ερμηνεύεται από το μοντέλο.

4.5.1 Συντελεστές β_i

Οι συντελεστές παλινδρόμησης β_i , εκτιμώνται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Όταν το πρόσημο τους είναι θετικό σημαίνει ότι η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής συνεπάγεται και αύξηση της εξαρτημένης, ενώ αντίθετα, αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής συνεπάγεται μείωση της εξαρτημένης.

4.5.2 Έλεγχος t-test

Ο έλεγχος t-test είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αξιολόγηση του μοντέλου. Το t-test χρησιμοποιείται για να καθορίσει την επιρροή μίας μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη είναι και επιρροή της συγκεκριμένης μεταβλητής. Η σχέση που εκφράζει το t-test είναι η παρακάτω:

$$t = \frac{\beta_i}{s.e.} \quad (4.6)$$

όπου s.e. το τυπικό σφάλμα

Αφού το τυπικό σφάλμα βρίσκεται στον παρανομαστή της σχέσης (4.6), η τιμή του είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής του t. Δηλαδή, όσο επιτυγχάνεται μείωση του τυπικού σφάλματος, τόσο θα αυξάνεται και η τιμή του t. Το t μπορεί να πάρει θετικές και αρνητικές τιμές αφού εξαρτάται από το πρόσημο των συντελεστών παλινδρόμησης β_i . Οι μεγαλύτερες τιμές του t κατά απόλυτη τιμή, δείχνουν μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα της εκάστοτε μεταβλητής που εξετάζεται. Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% η τιμή του t είναι 1,96. Επομένως, σε θεωρητικό επίπεδο, για να κριθεί μια μεταβλητή ως στατιστικά σημαντική, θα πρέπει να έχει τιμή t μεγαλύτερη του 1,96 κατά απόλυτη τιμή. Στην πράξη μπορούν να εξαχθούν έγκυρα αποτελέσματα ακόμα και αν το t λαμβάνει τιμές με κατώτατο όριο το 1,5. Στα μοντέλα λογαριθμικής παλινδρόμησης ισχύει ότι και σε αυτά της γραμμικής παλινδρόμησης.

4.5.3 Τιμή σημαντικότητας p-value

Η τιμή p-value ορίζεται ως η πιθανότητα λήψης αποτελέσματος ίσο ή μεγαλύτερο από αυτό που παρατηρήθηκε μέσω των δεδομένων. Αφού οριστεί η τιμή p-value, συγκρίνεται με μια προκαθορισμένη τιμή στατιστικής σημαντικότητας, η οποία

συνήθως είναι η 0,05. Αν η τιμή p-value είναι μικρότερη από 0,05 τότε ένα γραμμικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί στατιστικά σημαντικό. Αντίθετα, όταν το p-value > 0,05, τότε δεν υπάρχει επαρκής στατιστική ένδειξη ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή συμβάλλει ουσιαστικά στο μοντέλο.

4.5.4 Μέτρα προσαρμογής

4.5.4 i) F-statistic

Χρησιμοποιείται για να κρίνει πολλαπλούς συντελεστές που λαμβάνονται μαζί ταυτόχρονα, αντί να κρίνονται μεμονωμένα μέσω του t-test. Μια υψηλή τιμή F υποδηλώνει ότι το μοντέλο εξηγεί σημαντικά μεγαλύτερο μέρος της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων σε σχέση με το τυχαίο σφάλμα, άρα κρίνεται στατιστικά αξιόπιστο. Η σχέση που το ορίζει είναι η παρακάτω:

$$F_{\text{statistic}} = \frac{MSR}{MSE} \quad (4.7)$$

$$\text{Μέση τετραγωνική παλινδρόμηση: } MSR = \frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y})^2}{(q-1)} = \frac{SST - SSE}{(q-1)} \quad (4.8)$$

$$\text{Μέσο τετραγωνικό σφάλμα: } MSE = \frac{SSE}{n-q} \quad (4.9)$$

$$\text{Άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων: } SSE = \sum n_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.10)$$

$$\text{Άθροισμα συνόλου τετραγώνων: } SST = \sum n_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4.11)$$

Όπου:

$\hat{y}_i$: Προσαρμοσμένη τιμή παρατήρησης i

$\bar{y}_i$: Μέση τιμή του Y

n: Αριθμός των παρατηρήσεων

q: Αριθμός των συντελεστών

4.5.4 ii) Τυπικό σφάλμα (Standard Error)

Το τυπικό σφάλμα (standard error – s.e.) είναι η τυπική απόκλιση της κατανομής δειγματοληψίας. Ακολουθεί η σχέση που το περιγράφει με τους όρους να είναι οι ίδιοι με τις προηγούμενες σχέσεις.

$$s. e. = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{n-q}} \quad (4.12)$$

4.5.5 Κριτήριο καλής προσαρμογής R^2 – Adjusted R^2

Το κριτήριο του R^2 , χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποιότητας ενός μοντέλου. Η μαθηματική σχέση που το εκφράζει είναι η παρακάτω:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.13)$$

Οι όροι SSE και SST δίνονται από τις σχέσεις (4.10) και (4.11) αντίστοιχα.

Ο συντελεστής R^2 αποτελεί ένα στατιστικό μέτρο που εκφράζει το βαθμό στον οποίο τα δεδομένα απόκρισης ευθυγραμμίζονται με τη γραμμή παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα, αντιπροσωπεύει το ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής που εξηγείται από ένα γραμμικό μοντέλο. Οι τιμές του R^2 κυμαίνονται μεταξύ 0% και 100%, όπου η τιμή 0% υποδηλώνει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί καμία μεταβλητή των δεδομένων απόκρισης, ενώ η τιμή 100% υποδηλώνει ότι το μοντέλο εξηγεί πλήρως τη μεταβλητότητα των δεδομένων. Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του R^2 , τόσο αποδοτικότερη θεωρείται η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα της εξαρτημένης μεταβλητής.

Το Προσαρμοσμένο R^2 (Adjusted R^2) χρησιμοποιείται για μια πιο ακριβή εκτίμηση της ποιότητας του μοντέλου, ιδίως όταν προστίθενται επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές. Σε αντίθεση με το κλασικό R^2 , το οποίο τείνει να αυξάνεται με την προσθήκη κάθε νέας μεταβλητής, το Προσαρμοσμένο R^2 λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των μεταβλητών και διαμορφώνεται ανάλογα με τον αριθμό αυτών, παρέχοντας έτσι μια πιο αντικειμενική αξιολόγηση της πραγματικής ικανότητας του μοντέλου να εξηγεί τη μεταβλητότητα των δεδομένων. Η σχέση που το εκφράζει είναι η παρακάτω:

$$adjR^2 = 1 - \frac{MSE}{MST} \quad (4.14)$$

Ο όρος MSE δίνεται από τη σχέση (4.9) ενώ το MST εκφράζει την μέση τιμή του συνόλου των τετραγώνων και δίνεται από την σχέση :

$$MST = \frac{SST}{n-1} \quad (4.15)$$

όπου, n ο αριθμός των παρατηρήσεων.

4.5.6 Εκτιμητής Διόγκωσης της Διακύμανσης (Variance Inflation Factor-VIF)

Ο Εκτιμητής Διόγκωσης της Διακύμανσης (VIF) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της πολυσυγγραμμικότητας (multicollinearity) των ανεξάρτητων μεταβλητών. Ως πολυσυγγραμμικότητα ορίζεται η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η ύπαρξή της μειώνει σημαντικά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου, καθώς οδηγεί σε αύξηση της διακύμανσης των εκτιμώμενων συντελεστών παλινδρόμησης, καθιστώντας τους στατιστικά ασταθείς και δύσκολα ερμηνεύσιμους.

Ο δείκτης αυτός εκφράζει το πόσο αυξάνεται η διακύμανση ενός εκτιμώμενου συντελεστή όταν η αντίστοιχη ανεξάρτητη μεταβλητή παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση με μία ή περισσότερες άλλες.

Η διαδικασία υπολογισμού του VIF βασίζεται στη δημιουργία νέων μοντέλων παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα, κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή του αρχικού μοντέλου θεωρείται εκ περιτροπής ως εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ οι υπόλοιπες λειτουργούν ως ανεξάρτητες. Ο υπολογισμός του δείκτη δίνεται από τη σχέση:

$$VIF_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (4.16)$$

Όπου:

R_i^2 ο συντελεστής προσδιορισμού για την εκάστοτε μεταβλητή i

Όσο μικρότερες είναι οι τιμές VIF τόσο μικρότερη η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών. Εάν VIF μικρότερο από 5 (<5), ο έλεγχος θεωρείται επιτυχής καθώς δεν υφίσταται σημαντική συσχέτιση, ενώ και το εύρος τιμών από 5 έως 10 θεωρείται οριακά αποδεκτό.

5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά η συλλογή των δεδομένων και η επεξεργασία τους ώστε να λάβουν την ζητούμενη μορφή για την στατιστική ανάλυση τους. Η επεξεργασία που θα ακολουθήσει περιλαμβάνει καθαρισμό, ομαδοποίηση και τυποποίηση, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και η συνέπεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Απώτερος στόχος της συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων είναι η διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης της ταχύτητας πρόσκρουσης.

5.2 ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το σύνολο των δεδομένων αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων της NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). Πρόκειται για μία λίστα πειραματικών μετρήσεων σε ποικίλα οχήματα. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω βάση δεδομένων περιλαμβάνει διάφορες δοκιμές σύγκρουσης -και όχι μόνο- μεταξύ οχήματος με άλλο όχημα και οχήματος με σταθερό εμπόδιο. Στην εν λόγω βάση δεδομένων περιλαμβάνονται για κάθε δοκιμή που διεξήχθη το όχημα δοκιμής, το είδος της σύγκρουσης (όχημα με σταθερό εμπόδιο, πλαγιομετωπική ή μετωπική σύγκρουση), η μάρκα, το μοντέλο, η χρονολογία, το βάρος το πλάτος, το μήκος, η γωνία πρόσκρουσης, η παραμόρφωση, η εκκεντρότητα σε σχέση με το κέντρο του οχήματος κατά την διάσταση του πλάτους του, το υλικό του οδοστρώματος (σκυρόδεμα ή ασφαλτός) και το αν ήταν υγρό, στεγνό ή ακόμα και χιονισμένο. Επίσης περιλαμβάνονταν δεδομένα τραυματισμών καθώς υπήρχαν τοποθετημένα ανθρώπινα ομοιώματα εντός των οχημάτων τα οποία όμως στην προκειμένη δεν συνάδουν με το σκοπό της διερεύνησης της ταχύτητας πρόσκρουσης.

5.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Καθώς η εν λόγω βάση δεδομένων περιείχε άνω των 10000 δοκιμών το φιλτράρισμα τους έγινε ως εξής:

Αποφασίστηκε η αξιοποίηση αποκλειστικά των συγκρούσεων οχήματος με εμπόδιο, καθώς το διαθέσιμο δείγμα κρίθηκε επαρκές (πλήθος $n = 1360$), ενώ παρείχε ομοιογένεια ως προς το γεγονός ότι το εμπόδιο είχε πανομοιότυπα χαρακτηριστικά σε όλες τις δοκιμαστικές συγκρούσεις (crash-tests).

Στην συνέχεια:

- Αφαιρέθηκαν οι δοκιμές που περιείχαν ελλιπείς πληροφορίες καθώς δεν θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν
- Αφαιρέθηκαν οι δοκιμές με οχήματα χρονολογίας πριν το 2000
- Αφαιρέθηκαν τα οχήματα που αφορούσαν μάρκες οι οποίες δεν κυκλοφορούν σε ευρωπαϊκές οδούς και επελέγησαν οι 5 πιο συνήθεις που συμμετείχαν άλλωστε στην πλειοψηφία των δοκιμών
- Αφαιρέθηκαν οι δοκιμές που το δείγμα ήταν ιδιαίτερα μικρό όπως αυτές σε οδόστρωμα από ασφαλτό, αυτές σε υγρό οδόστρωμα, αυτές που πραγματοποιήθηκαν υπό γωνία, καθώς και όσες εμπεριείχαν εκκεντρότητα σε σχέση με το σημείο σύγκρουσης. Δεδομένου ότι οι τιμές τριβής μεταξύ ασφάλτου και σκυροδέματος είναι περίπου ίδιες, τα αποτελέσματα δύνανται σε γενικές γραμμές να αντιπροσωπεύουν και ασφαλτικά οδοστρώματα.

Το πλήθος των πειραματικών δοκιμών που παρέμεινε είναι $n = 724$.

Πιο συγκεκριμένα, κατηγοριοποιώντας τες ανά μάρκα οχήματος δοκιμής προκύπτουν:

FORD: 201

TOYOTA: 190

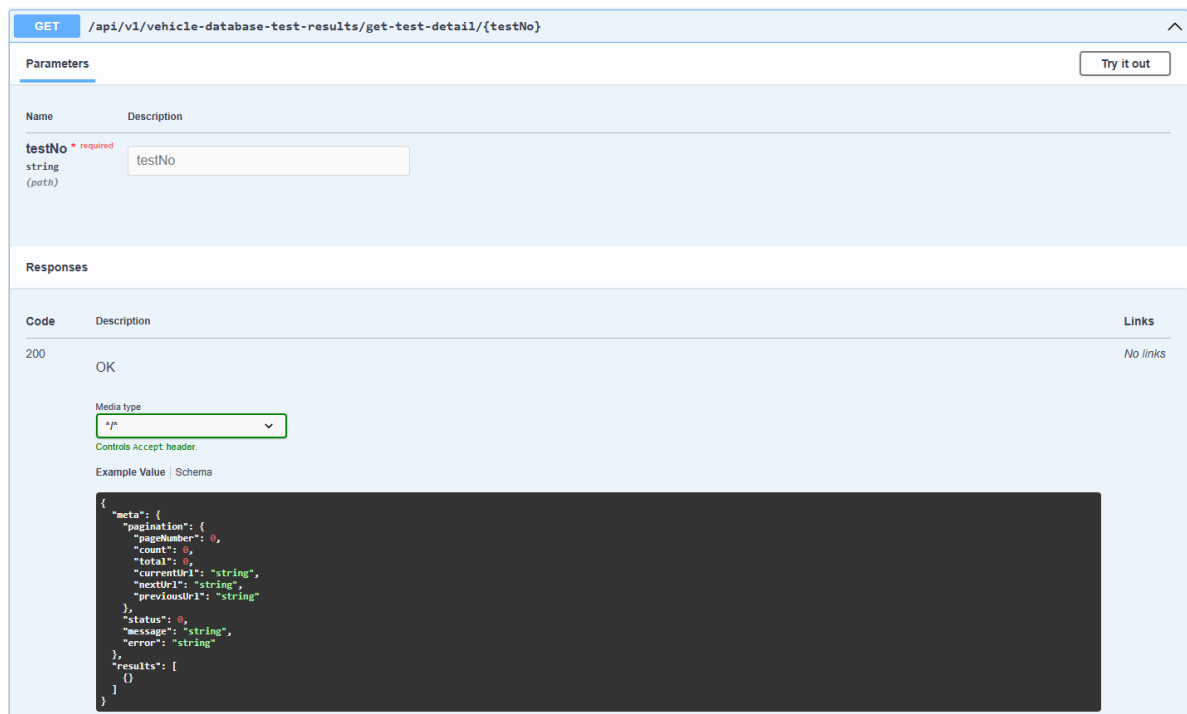
CHEVROLET: 146

HONDA: 117

HYUNDAI: 70

Όλες οι παραπάνω δοκιμές τονίζεται πως αφορούν σύγκρουση οχήματος με άκαμπτο εμπόδιο το οποίο έχει πλάτος μεγαλύτερο του πλάτους του οχήματος δοκιμής και ύψος μεγαλύτερο του αντίστοιχου ύψους του. Δηλαδή, στην πράξη, το όχημα υφίσταται παραμορφώσεις σε όλο το πλάτος της εμπρόσθιας όψης του χωρίς να υπάρχει σενάριο υπερπήδησης του εμποδίου.

Η λήψη των δεδομένων από την ιστοσελίδα της NHTSA πραγματοποιήθηκε με χρήση Διεπαφών Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interface-API) (Σχήμα 5.1). Η τελική τους μορφοποίηση έγινε εντός του περιβάλλοντος του Excel στο οποίο δημιουργήθηκε αρχικά αρχείο με τίτλο “vehicle_impact_linear_regression.xlsm” που εμπεριείχε συγκεντρωτικό πίνακα των δεδομένων (Σχήμα 5.1) Έπειτα, δημιουργήθηκαν 5 ξεχωριστά φύλλα Excel, ένα για κάθε μάρκα οχήματος που θα χρησιμοποιηθεί, ώστε το μοντέλο να είναι κοινό για οχήματα του ίδιου κατασκευαστή (Πίνακας 5.2). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ακρίβεια του εκάστοτε μοντέλου, καθώς τα αμαξώματα οχημάτων ίδιας μάρκας έχουν παρόμοια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 5.1 : Διαδικτυακή πλατφόρμα περιγραφής API (Swagger UI)

Year	Weight	Length	Width	Speed	Deformation	Brand
2000	1727	5,103	1,857	48,1	337	FORD
2000	1584	4,787	1,785	56,3	522	HONDA
2000	2286	5,781	1,31	56,3	681	CHEVROLET
2000	1430	4,194	1,7	56,5	414	HYUNDAI
2000	1657	5,11	1,85	44	331	FORD
2000	1654	5,255	1,855	48,3	366	FORD
2000	1777	4,97	1,856	56,6	507	FORD
2000	1656	4,784	1,785	56,49	518	TOYOTA
2000	1429	4,37	1,998	56,32	505	FORD
2000	1407	4,283	1,998	56,65	537	FORD
2000	2367	4,682	2,028	48	50	CHEVROLET
2001	1335	4,412	1,694	56,3	439	HONDA
2001	1597	4,745	1,792	55,62	583	HONDA
2000	2740	5,19	2,002	59,82	1040	FORD
2000	2875	5,19	2,036	47,54	528	FORD
2000	2713	5,053	1,995	60,97	862	CHEVROLET
2001	1341	4,41	1,618	56,8	474	HONDA
2001	1589	4,8	1,78	55,7	554	HONDA
2001	1788	5,089	1,854	56,16	689	CHEVROLET
2001	2269	5,525	1,91	56,96	516	TOYOTA
2001	1832	5,149	1,785	57,13	646	FORD
2001	2701	5,213	2	56,33	799	FORD
2001	2149	4,706	1,8	56,32	658	TOYOTA
2001	2271	5,73	1,989	55,99	705	FORD
2001	1741	5,045	1,854	57,13	723	CHEVROLET
2001	1138	3,937	1,656	56,5	447	TOYOTA
2001	1608	4,657	1,785	56,33	596	FORD
2001	1594	4,051	1,71	56,48	543	CHEVROLET
2001	1346	4,338	1,735	56,64	525	TOYOTA
2001	1764	4,877	1,82	56,17	629	TOYOTA
2001	2868	5,569	1,81	56,5	647	CHEVROLET
2001	1608	4,83	1,76	55,56	563	CHEVROLET
2001	1508	4,297	1,722	56,3	519	HYUNDAI
2001	1769	4,245	1,736	56,3	469	FORD
2001	2135	4,997	1,87	56,6	567	FORD

Πίνακας 5.1 : Τμήμα πίνακα συγκεντρωτικών δεδομένων από το περιβάλλον του Excel

Year▼	Weight▼	Length▼	Width▼	Speed▼	Deformation▼	Brand▼
2000	1584	4,787	1,785	56,3	522	HONDA
2001	1335	4,412	1,694	56,3	439	HONDA
2001	1597	4,745	1,792	55,62	583	HONDA
2001	1341	4,41	1,618	56,8	474	HONDA
2001	1589	4,8	1,78	55,7	554	HONDA
2001	1297	4,256	1,712	56,5	421	HONDA
2001	1564	4,613	1,782	56,3	385	HONDA
2001	1520	4,81	1,787	48,1	439	HONDA
2001	1555	4,8	1,525	47,9	309	HONDA
2001	1556	4,782	1,525	40,2	325	HONDA
2002	1699	4,346	1,782	55,62	543	HONDA
2002	2228	5,105	1,92	56,49	664	HONDA
2003	2173	4,755	1,95	55,91	575	HONDA
2001	1500	4,78	1,772	40,2	303	HONDA
2003	1586	4,77	1,81	56,49	534	HONDA
2003	1465	4,126	1,717	56,97	545	HONDA
2003	2178	5,107	1,92	56,81	603	HONDA
2003	1571	4,813	1,824	55,8	481	HONDA
2003	1745	4,291	1,78	56,01	510	HONDA
2002	1325	3,983	1,717	48,2	372	HONDA
2003	2121	5,093	1,93	39,3	415	HONDA
2002	1315	4,419	1,716	47,9	373	HONDA
2002	1252	4,423	1,717	40,2	219	HONDA
2004	1579	4,791	1,802	31,8	430	HONDA
2004	1563	4,812	1,357	32	467	HONDA
2004	1624	4,79	1,83	56,6	530	HONDA
2004	1673	4,802	1,823	39,8	274	HONDA
2004	1834	4,809	1,361	56,52	570	HONDA
2004	2364	5,095	1,222	56,4	638	HONDA
2004	1654	4,805	1,83	56,5	629	HONDA
2004	2146	5,095	1,95	56,4	618	HONDA
2004	2345	5,1	1,94	48,02	671	HONDA
2004	1860	4,807	1,81	48,09	492	HONDA
2005	2263	5,103	1,956	56,28	466	HONDA
2005	1622	4,416	1,77	32,5	471	HONDA

Πίνακας 5.2 : Τμήμα πίνακα δεδομένων αποκλειστικά για οχήματα μάρκας Honda.

Σημείωση: Οι μονάδες των παραμέτρων στους παραπάνω πίνακες είναι:

Βάρος σε kg, μήκος-πλάτος σε m, ταχύτητα σε km/h και παραμόρφωση σε mm.

6 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται λεπτομερώς η στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων της NHTSA. Τα μοντέλα πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση των δεδομένων είναι διαφορετικά για κάθε μάρκα οχήματος και θα περιγραφούν ξεχωριστά.

6.2 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ FORD

6.2.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Για τα οχήματα μάρκας Ford κατασκευάστηκε μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με γνώμονα το να θεωρείται στατιστικά ποιοτικό. Επιλέχθηκαν οι ανεξάρτητες μεταβλητές $X1 = \text{YEAR}^3$ και $X2 = \text{DEFORMATION}$ για τη διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης της ανεξάρτητης μεταβλητής Y η οποία είναι η ταχύτητα πρόσκρουσης όπως προαναφέρθηκε. Μέσω της χρήσης του εργαλείου ανάλυσης δεδομένων του Excel (Data Analysis Toolpak), προέκυψαν τα αποτελέσματα του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 6.1).

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ									
Στατιστικά παλινδρόμησης									
Πολλαπλό R	0,587969028								
R Τετράγωνο	0,345707578								
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,339098563								
Τυπικό σφάλμα	6,963423853								
Μέγεθος δείγματος	201								
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ									
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F				
Παλινδρόμηση	2	5072,801403	2536,400702	52,30849238	5,77321E-19				
Υπόλοιπο	198	9600,875807	48,48927175						
Σύνολο	200	14673,67721							
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%	
Τεταγμένη επί της αρχής	-163,5735339	48,04757589	-3,40440763	0,000802609	-258,3241933	-68,82287443	-258,324193	-68,8228744	
YEAR^3	2,4561E-08	5,92977E-09	4,141982491	5,09648E-05	1,28674E-08	3,62546E-08	1,28674E-08	3,6255E-08	
DEFORMATION	0,032192119	0,003542724	9,08682581	1,06492E-16	0,025205805	0,039178433	0,025205805	0,03917843	

Σχήμα 6.1 : Αποτελέσματα τελικού μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση ταχύτητας πρόσκρουσης οχημάτων μάρκας Ford.

6.2.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Με γνώμονα το θεωρητικό υπόβαθρο του κεφαλαίου 4 θα πραγματοποιηθεί ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Οι τιμές του R^2 και του προσαρμοσμένου R^2 δεν είναι ιδανικές αλλά κρίνονται ως σχετικά ικανοποιητικές, γνωρίζοντας πως όσο πιο κοντά στο 1 είναι οι τιμές τους, τόσο αποδοτικότερη θεωρείται η προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα της εξαρτημένης μεταβλητής. Επιπλέον, οι τιμές των t-value κατά απόλυτη τιμή είναι μεγαλύτερες από 1,96 που είναι το όριο για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Τέλος, οι τιμές p-value είναι όλες μικρότερες του 0,05. Τα παραπάνω υποδεικνύουν στατιστική σημαντικότητα των μεταβλητών και του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης.

Όσον αφορά την φυσική σημασία των προσήμων των β_i , παρατηρείται πως όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση και η χρονολογία κατασκευής του οχήματος τόσο μεγαλύτερη εκτιμάται ότι είναι η ταχύτητα πρόσκρουσης.

6.2.3 Τελική μορφή μοντέλου

Η τελική μορφή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που προέκυψε έπειτα από πλήθος δοκιμών ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών, είναι η εξής:

$$\text{SPEED} = -163,57 + 2,46 \cdot 10^{-8} \cdot \text{YEAR}^3 + 0,032 \cdot \text{DEFORMATION} \quad (6.1)$$

Όπου:

SPEED: η ταχύτητα πρόσκρουσης του οχήματος στο εμπόδιο (km/h)

YEAR: η χρονολογία κατασκευής του οχήματος

DEFORMATION: η παραμόρφωση που υπέστη το όχημα κατά την πρόσκρουση (mm)

6.2.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF

Για να ελεγχθεί η συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών X (collinearity test), βρέθηκαν οι τιμές των Εκτιμητών Διόγκωσης της Διακύμανσης (Variance Inflation Factors -VIF). Η σχέση που περιγράφει τους όρους VIF αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.5.6 και είναι:

$$VIF_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (4.16)$$

Για την εύρεση τους αρκεί η υλοποίηση παλινδρόμησης για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή X_i ως εξαρτημένη και τις υπόλοιπες X_j ως ανεξάρτητες όπως προαναφέρθηκε. Στην συνέχεια εφαρμόζοντας την σχέση (6.1) βρίσκεται η τιμή του παράγοντα VIF για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή. Για τα οχήματα μάρκας Ford ο πίνακας τιμών VIF είναι ο παρακάτω (Πίνακας 6.1):

TIMES VIF		
	YEAR ³	DEFORMATION
SPEED	1,004	1,004

Πίνακας 6.1 : Πίνακας τιμών VIF για οχήματα μάρκας Ford

Οι τιμές του Πίνακα 6.1 είναι σχεδόν μονάδα κάτι που ερμηνεύεται ως πολύ μικρή συσχέτιση των ανεξάρτητων μεταβλητών.

6.3 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ TOYOTA

6.3.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Για τα οχήματα μάρκας Toyota κατασκευάστηκε μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ενώ περιέχεται και λογαριθμικός όρος. Το μοντέλο δημιουργήθηκε έπειτα από πολλαπλές δοκιμές με σκοπό την μεγιστοποίηση της στατιστικής σημαντικότητας του. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

$X_1 = \text{Deformation}$

$X_2 = \text{Year}^3$

$X_3 = \ln(\text{Weight}+1)$

$X_4 = \text{Length}^3$

Στο λογαριθμικό όρο του μοντέλου προστίθεται μία μονάδα, κάτι το οποίο θα πραγματοποιηθεί σε όλα τα μοντέλα που θα διαμορφωθούν ώστε να σταθεροποιείται η διακύμανση και σε περίπτωση μηδενικών όρων να μην ελλοχεύει ο κίνδυνος απειρισμού. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.2):

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ								
Στατιστικά παλινδρόμησης								
Πολλαπλό R	0,615182014							
R Τετράγωνο	0,378448911							
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,365009968							
Τυπικό σφάλμα	6,021116173							
Μέγεθος δείγματος	190							
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ								
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F			
Παλινδρόμηση	4	4083,721996	1020,930499	28,16062	2,83784E-18			
Υπόλοιπο	185	6706,960394	36,25383997					
Σύνολο	189	10790,68239						
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	ατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%
Τεταγμένη επί της αρχής	-222,5477502	49,15710912	-4,52727498	1,07E-05	-319,5283335	-125,567167	-319,5283335	-125,567167
Deformation	0,041578348	0,004726366	8,797107122	9,74E-16	0,032253842	0,050902853	0,032253842	0,050902853
Year^3	2,29076E-08	6,03842E-09	3,793642079	0,000201	1,09946E-08	3,48206E-08	1,09946E-08	3,48206E-08
ln(Weight+1)	9,773584157	3,331542204	2,933651612	0,003774	3,200884668	16,34628365	3,200884668	16,34628365
Length^3	-0,036370843	0,018862053	-1,92825473	0,055354	-0,07358322	0,000841535	-0,07358322	0,000841535

Σχήμα 6.2 : Αποτελέσματα τελικού μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση ταχύτητας πρόσκρουσης οχημάτων μάρκας Toyota.

6.3.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στο πλαίσιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων του μοντέλου, το R^2 και το προσαρμοσμένο R^2 κυμάνθηκαν σε παρόμοια επίπεδα με το γραμμικό μοντέλο των Ford. Οι τιμές των t-value και των p-value είναι τέτοιες που το μοντέλο κρίνεται αξιόπιστο, εξαιρουμένου του Length³ του οποίου οι τιμές είναι οριακά αποδεκτές.

Αναφορικά με τους συντελεστές β_i και την ερμηνεία των προσήμων τους, όσο μεγαλύτερο το βάρος, η χρονολογία και η παραμόρφωση, τόσο αυξημένη είναι και η ταχύτητα ενώ αντίθετα υπάρχει αρνητική συσχέτιση μεταξύ του μήκους του οχήματος και της ταχύτητας πρόσκρουσης.

6.3.3 Τελική μορφή μοντέλου

Η τελική μορφή του μοντέλου που διαμορφώθηκε είναι η εξής:

$$\text{SPEED} = -222,55 + 0,042 \cdot \text{Deformation} + 2,29 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Year}^3 + 9,77 \cdot \ln(\text{Weight}+1) - 0,036 \cdot \text{Length}^3 \quad (6.3)$$

Όπου:

SPEED = Ταχύτητα πρόσκρουσης του οχήματος στο εμπόδιο (km/h)

Deformation = Το βάθος της παραμόρφωσης του οχήματος (mm)

Year = Χρονολογία του οχήματος

Weight = Βάρος του οχήματος (kg)

Length = Μήκος οχήματος (m)

6.3.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο της αντίστοιχης υποενοότητας των Ford, οι τιμές VIF που βρέθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.2):

TIMES VIF				
	Year ³	Deformation	ln (Weight+1)	Length ³
SPEED	1,08	1,008	3,344	3,198

Πίνακας 6.2 : Πίνακας τιμών VIF για οχήματα μάρκας Toyota

Από την στιγμή που οι τιμές είναι μικρότερες του 5 (<5) το επίπεδο συσχέτισης αξιολογείται ως ιδανικό.

6.4 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ CHEVROLET

6.4.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Για τα οχήματα μάρκας Chevrolet δημιουργήθηκε μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μετά από σειρά δοκιμών στο οποίο:

$$X1 = \text{Year}^3$$

$$X2 = \text{Deformation}$$

$$X3 = \ln (\text{Weight}+1)$$

$$X4 = \ln (\text{Length}+1)$$

$$X5 = \text{Width}^3$$

Στην προκειμένη αξιοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα και προέκυψαν τα αποτελέσματα του σχήματος 6.3.

ΈΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ									
Στατιστικά παλινδρόμησης									
Πολλαπλό R	0,644563388								
R Τετράγωνο	0,415461962								
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,394585603								
Τυπικό σφάλμα	6,350988084								
Μέγεθος δείγματος	146								
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ									
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F				
Παλινδρόμηση	5	4013,554	802,71082	19,90107	5,93018E-15				
Υπόλοιπο	140	5646,907	40,33505						
Σύνολο	145	9660,461							
	Συντελεστές	πικό σφάλ	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%	
Τεταγμένη επί της αρχής	-77,67291756	51,11698	-1,519513	0,130889	-178,7339318	23,38809672	-178,733932	23,388097	
Year^3	1,46052E-08	6,31E-09	2,3140908	0,022118	2,12718E-09	2,70832E-08	2,12718E-09	2,708E-08	
Deformation	0,031433487	0,003589	8,7579954	5,84E-15	0,024337606	0,038529368	0,024337606	0,0385294	
ln(Weight+1)	8,659296965	3,85048	2,2488876	0,026081	1,046690851	16,27190308	1,046690851	16,271903	
ln(Length+1)	-38,07229166	9,464589	-4,022604	9,38E-05	-56,78429348	-19,36028984	-56,7842935	-19,36029	
Width^3	-0,349820511	0,06865	-5,095699	1,1E-06	-0,485545536	-0,214095485	-0,48554554	-0,214095	

Σχήμα 6.3 : Αποτελέσματα τελικού μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση ταχύτητας πρόσκρουσης οχημάτων μάρκας Chevrolet.

6.4.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Οι τιμές του t είναι μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή από 1,96 το οποίο είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπλέον, για τις τιμές p των ανεξάρτητων μεταβλητών ισχύει: $p < 0,05$.

Στο σκέλος της ερμηνείας των προσήμων των βί τα εξαγόμενα συμπεράσματα είναι τα ίδια με μόνη διαφοροποίηση ότι υπεισέρχεται στο μοντέλο για πρώτη φορά το πλάτος του οχήματος το οποίο έχει αρνητική γραμμική σχέση με την ταχύτητα που διερευνάται.

6.4.3 Τελική μορφή μοντέλου

Η οριστικοποιημένη μορφή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για οχήματα μάρκας Chevrolet είναι η εξής:

$$\text{SPEED} = -77,67 + 1,46 \cdot \text{Year}^3 + 0,03 \cdot \text{Deformation} + 8,66 \cdot \ln(\text{Weight}+1) - 38,07 \cdot \ln(\text{Length}+1) - 0,35 \text{Width}^3 \quad (6.4)$$

Όπου:

SPEED = Ταχύτητα πρόσκρουσης του οχήματος στο εμπόδιο (km/h)

Deformation = Το βάθος της παραμόρφωσης του οχήματος (mm)

Year = Χρονολογία του οχήματος

Weight = Βάρος του οχήματος (kg)

Length = Μήκος οχήματος (m)

Width = Πλάτος εμπροσθεν όψης οχήματος (m)

6.4.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.3), οι τιμές των VIF είναι ικανοποιητικές, έστω και οριακά, δηλαδή δεν υφίσταται υπερβολική συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.

TIMES VIF					
	Year ³	Deformation	ln (Weight+1)	Width ³	ln (Length+1)
SPEED	1,076	1,354	3,186	2,274	4,381

Πίνακας 6.3 : Πίνακας τιμών VIF για οχήματα μάρκας Chevrolet

6.5 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ HONDA

6.5.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Για την κατασκευή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης ακολουθήθηκε πανομοιότυπη διαδικασία με τις προηγούμενες περιπτώσεις με:

$$X1 = \text{Year}^3$$

$$X2 = \text{Deformation}^2$$

$$X3 = \ln (\text{Length}+1)$$

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου (Σχήμα 6.4).

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ									
Στατιστικά παλινδρόμησης									
Πολλαπλό R	0,667808441								
R Τετράγωνο	0,445968114								
Ισοαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,431259302								
Τυπικό σφάλμα	6,508207511								
Μέγεθος δείγματος	117								
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ									
	βαθμοί ελευθερία	SS	MS	F	Σημαντικότητα F				
Παλινδρόμηση	3	3852,745079	1284,2	30,31979	1,8635E-14				
Υπόλοιπο	113	4786,314446	42,357						
Σύνολο	116	8639,059525							
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Ύψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Ύψηλότερο 95,0%	
Τεταγμένη επί της αρχής	-11,34734809	61,24294363	-0,1853	0,853338	-132,6806652	109,985969	-132,68067	109,98597	
Year^3	1,50465E-08	7,36544E-09	2,0429	0,043394	4,54254E-10	2,96388E-08	4,5425E-10	2,964E-08	
Deformation^2	5,86485E-05	6,25263E-06	9,3798	8,31E-16	4,62609E-05	7,10361E-05	4,6261E-05	7,104E-05	
ln(Length+1)	-42,42832203	10,87540268	-3,9013	0,000163	-63,97445623	-20,88218784	-63,974456	-20,882188	

Σχήμα 6.4 : Αποτελέσματα τελικού μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση ταχύτητας πρόσκρουσης οχημάτων μάρκας Honda.

6.5.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Στην προκειμένη, οι τιμές t-value είναι ικανοποιητικές άρα η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών και ειδικά της παραμόρφωσης υψωμένη στο τετράγωνο είναι σημαντικές. Επιπλέον, οι τιμές p-value είναι εντός του αποδεκτού ορίου.

Τέλος, η ερμηνεία των συντελεστών παλινδρόμησης βί είναι ίδιας μορφής με τις προηγούμενες ενότητες, δηλαδή η αύξηση των X1,X2 έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της ταχύτητας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με αύξηση του όρου X3.

6.5.3 Τελική μορφή μοντέλου

Ακολουθεί η τελική μορφή του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για οχήματα μάρκας Honda.

$$\text{SPEED} = -11,35 + 1,50 \cdot \text{Year}^3 + 5,86 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Deformation}^2 - 42,43 \cdot \ln(\text{Length}+1) \quad (6.5)$$

Όπου:

SPEED = Ταχύτητα πρόσκρουσης του οχήματος στο εμπόδιο (km/h)

Deformation = Το βάθος της παραμόρφωσης του οχήματος (mm)

Year = Χρονολογία του οχήματος

Length = Μήκος οχήματος (m)

6.5.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF

Οι τιμές των όρων VIF για τα οχήματα μάρκας Honda που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6.4), είναι εξαιρετικά χαμηλές και τεκμηριώνουν την έλλειψη σημαντικής συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.

TIMES VIF			
	Year ³	Deformation ²	ln (Length+1)
SPEED	1,011	1,095	1,095

Πίνακας 6.4 : Πίνακας τιμών VIF για οχήματα μάρκας Honda

6.6 ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΑΡΚΑΣ HYUNDAI

6.6.1 Κατασκευή μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης

Για τα οχήματα μάρκας Hyundai, μετά από δοκιμές, δομήθηκε ένα απλής μορφής μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης, όπου Y η εκτιμώμενη ταχύτητα και X ένας λογαριθμικός μετασχηματισμός της παραμόρφωσης (η μονάδα προστίθεται προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός του λογαρίθμου και για μηδενικές τιμές παραμόρφωσης). Στο σχήμα 6.5 απεικονίζονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου λογαριθμικής παλινδρόμησης.

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ									
Στατιστικά παλινδρόμησης									
Πολλαπλό R	0,671686234								
R Τετράγωνο	0,451162397								
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,443091256								
Τυπικό σφάλμα	4,903295067								
Μέγεθος δείγματος	70								
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ									
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F				
Παλινδρόμηση	1	1343,921823	1343,92	55,89822	1,95326E-10				
Υπόλοιπο	68	1634,876571	24,0423						
Σύνολο	69	2978,798394							
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95,0%	Υψηλότερο 95,0%	
Τεταγμένη επί της αρχής	-56,8699439	14,74983622	-3,8556	0,000259	-86,30278382	-27,43710398	-86,30278382	-27,437104	
ln(Deformation+1)	18,05262984	2,414579466	7,47651	1,95E-10	13,23441154	22,87084815	13,23441154	22,8708482	

Σχήμα 6.5 : Αποτελέσματα τελικού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης για εκτίμηση ταχύτητας πρόσκρουσης οχημάτων μάρκας Hyundai.

6.6.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Για το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για οχήματα μάρκας Hyundai, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5, το t-value είναι μεγαλύτερο από 1,96 και το p-value μικρότερο από 0,05 οπότε οι τιμές τους είναι ικανοποιητικές και πιστοποιούν πως το μοντέλο είναι στατιστικά σημαντικό. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5 η ταχύτητα εξαρτάται αποκλειστικά από την παραμόρφωση αφού έπειτα από διερεύνηση διαφορετικών εκφράσεων κατά τη διαδικασία της δημιουργίας του μοντέλου δεν βρέθηκε αλληλεπίδραση μεταξύ των μεγεθών του πλάτους, βάρους, μήκους των οχημάτων μάρκας Hyundai και των ταχυτήτων πρόσκρουσης τους στο εμπόδιο.

Επιπροσθέτως, το θετικό πρόσημο του συντελεστή παλινδρόμησης β1 αποδεικνύει πως εάν αυξηθεί το βάθος της παραμόρφωσης της εμπρόσθιας όψης του οχήματος, αυξάνεται και η εκτιμώμενη ταχύτητα.

6.6.3 Τελική μορφή μοντέλου

Η τελική εκδοχή του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης που επιλέχθηκε είναι η εξής:

$$\text{SPEED} = -56,87 + 18,05 \cdot \ln(\text{Deformation}+1) \quad (6.6)$$

Όπου:

SPEED = Ταχύτητα πρόσκρουσης του οχήματος στο εμπόδιο (km/h)

Deformation = Το βάθος της παραμόρφωσης του οχήματος (mm)

6.6.4 Έλεγχος συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω τιμών VIF

Στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν υφίστανται εκτιμητές διόγκωσης της διακύμανσης επειδή υπάρχει μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή και το VIF εκφράζει την συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών όπως έχει ήδη αναφερθεί.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει συνοπτική παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων που αναδείχτηκαν από την παρούσα εργασία, με έμφαση στα ευρήματα του προηγούμενου κεφαλαίου. Παράλληλα, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική διερεύνηση, όπου παρουσιάζεται ερευνητικό ενδιαφέρον.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξήχθησαν ορισμένα ουσιώδη και χρήσιμα συμπεράσματα:

- Ο τομέας της ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη, εμπλουτιζόμενος συνεχώς με νέες μεθόδους αποτύπωσης και ανακατασκευής.
- Παρά την πρόοδο του κλάδου, η επίτευξη υψηλής ακρίβειας στην ανακατασκευή παραμένει ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς αρκετές μεθοδολογίες είναι χρονοβόρες, πολύπλοκες ή παρουσιάζουν ελλείψεις δεδομένων.
- Το μοντέλο της σημειακής μάζας αναδεικνύεται ως μία από τις πλέον αξιόπιστες μεθόδους ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων και συνιστάται η χρήση του όπου αυτό είναι εφικτό.
- Η αναγνώριση και ανάλυση των κρίσιμων παραμέτρων για κάθε διαφορετικό τύπο ατυχήματος επιτρέπει μια πιο στοχευμένη και ακριβή προσέγγιση στη διαδικασία ανακατασκευής.

Πέραν των παραπάνω, μέσα από τη δημιουργία και την εφαρμογή μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψαν επιπλέον σημαντικά συμπεράσματα:

- Τα επιμέρους μοντέλα που αναπτύχθηκαν παρείχαν αποδεκτά αποτελέσματα, επιβεβαιώνοντας τη χρησιμότητα της μεθοδολογικής προσέγγισης.
- Διαπιστώθηκε ότι για ορισμένες μάρκες οχημάτων υφίσταται σαφής συσχέτιση μεταξύ βάρους, πλάτους και μήκους με την ταχύτητα πρόσκρουσης, ενώ για όλες τις περιπτώσεις το βάθος της παραμόρφωσης αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει την εκτίμηση της ταχύτητας πρόσκρουσης.
- Η προσπάθεια εφαρμογής μοντέλου στο σύνολο των οχημάτων, χωρίς διαχωρισμό ανά μάρκα, δεν κατέστη εφικτή, γεγονός που καταδεικνύει τις ουσιαστικές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των αμαξωμάτων μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών.
- Ο όρος που περιείχε το μήκος του οχήματος εμφάνισε αρνητική συσχέτιση με την ταχύτητα πρόσκρουσης σε όλα τα μοντέλα, υποδηλώνοντας ότι όσο αυξάνεται το μήκος, τόσο μειώνεται η ταχύτητα πρόσκρουσης.
- Το πλάτος του οχήματος παρουσίασε στατιστικά αξιόπιστη συσχέτιση και συμπεριλήφθηκε αποκλειστικά στο μοντέλο οχημάτων μάρκας *Chevrolet*, όπου η αύξησή του συνδέεται με μείωση της ταχύτητας πρόσκρουσης — εύρημα που μπορεί να αποδοθεί σε αεροδυναμικούς παράγοντες.
- Παρατηρήθηκε ότι, όσο αυξάνεται η χρονολογία κατασκευής, το βάρος και το βάθος παραμόρφωσης των οχημάτων, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα πρόσκρουσης, για όλες τις μάρκες στις οποίες εφαρμόστηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα.

7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται η προτυποποίηση της διαδικασίας ανακατασκευής οδικών ατυχημάτων βάσει των κρίσιμων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις διαφορετικές κατηγορίες συμβάντων, καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης της ταχύτητας πρόσκρουσης μέσω της ανάπτυξης μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης. Τα περιθώρια για περαιτέρω έρευνα σε ένα τόσο πολύπλευρο και τεχνικά απαιτητικό αντικείμενο είναι ιδιαίτερα ευρεία. Ορισμένες προτάσεις για ενδεχόμενες μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας περιλαμβάνουν τα εξής:

- Δημιουργία αντίστοιχων μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης για διαφορετικές μάρκες οχημάτων και διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης γενικευμένου μοντέλου ανεξάρτητο των κατασκευαστών των οχημάτων.
- Προσαρμογή και αξιολόγηση των μοντέλων σε πραγματικές συγκρούσεις, όπου όμως η ταχύτητα πρόσκρουσης θα είναι γνωστή μέσω καταγραφικών συμβάντων (EDR), ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους υπό πραγματικές συνθήκες (άσφαλτος, υγρό οδόστρωμα, φρενάρισμα κ.α.) καθώς τα δεδομένα των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης που αναπτύχθηκαν αφορούσαν στεγνή επιφάνεια κυκλοφορίας από σκυρόδεμα και δίχως συνθήκες πέδησης, κάτι που σπανίως συμβαίνει υπό πραγματικές συνθήκες.
- Εξέταση της δυνατότητας εφαρμογής παρόμοιων μοντέλων για εκτίμηση της ταχύτητας πρόσκρουσης σε σύγκρουση οχήματος με πεζό, έχοντας ως επιπρόσθετα δεδομένα το ύψος του προφυλακτήρα που στα συγκεκριμένα ατυχήματα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, όπως και την απόσταση εκτίναξης του πεζού (εάν υφίσταται εκτίναξη).
- Διερεύνηση της εφαρμογής των μοντέλων σε συγκρούσεις όχημα με όχημα, των οποίων η πολυπλοκότητα είναι αυξημένη, λόγω ύπαρξης σχετικών ταχυτήτων και γωνίας πρόσκρουσης μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων.
- Διερεύνηση της δυνατότητας εκτίμησης της ταχύτητας μετάβασης σε ασταθή κατάσταση, σε περιπτώσεις χωρίς άμεση σύγκρουση, με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του οχήματος και παραμέτρους όπως την απόσταση ολίσθησης ή/και το συντελεστή τριβής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahmed, A.F.M. Sadullah, A.S. Yahya, (2019). Errors in accident data, its types, causes and methods of rectification-analysis of the literature. Accident Analysis & Prevention, Volume 130 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.018>
2. Ali Can Yilmaz, Cigdem Inan Aci, Kadir Aydin, (2015). MFFNN and GRNN Models for Prediction of Energy Equivalent Speed Values of Involvements in Traffic Accidents. International Journal of Automotive Engineering and Technologies. [10.18245/ijaet.78159](https://doi.org/10.18245/ijaet.78159)
3. Amrit Toor and Michael Araszewski, (2003). Theoretical vs. Empirical solutions for vehicle/pedestrian collisions. SAE Technical Papers. [10.4271/2003-01-0883](https://doi.org/10.4271/2003-01-0883)
4. Austroads road engineering guides, (2009).
5. Bureau of Infrastructure and Transport Research Economics (BITRE), (2023). Road Trauma Australia 2022 statistical summary, Canberra ACT
6. C.K. Simms, D.P. Wood, and D. G. Walsh, (2004). Confidence limits for impact speed estimation from pedestrian projection distance. International Journal of Crashworthiness. [10.1533/ijcr.2004.0283](https://doi.org/10.1533/ijcr.2004.0283)
7. Chalmers University of Technology, DaCoTa manual. <https://dacota-investigation-manual.eu/Main/Reconstruction>
8. Charles E. O' Hara, James W. Osterburg, (1960). An Introduction to Criminalistics.
9. Chen, Samantha & Rakotonirainy, A. & Loke, Seng & Krishnaswamy, Shonali, (2015). A crash risk assessment model for road curves. Journal of Transportation Safety & Security. [10.1080/19439962.2014.959585](https://doi.org/10.1080/19439962.2014.959585)
10. Coufal, Tomáš & Semela, Marek, (2016). Determination of Selected Crash Parameters in Head-on Vehicle Collision with Rollover. Promet-Traffic & Transportation 28(1):71-79. https://www.researchgate.net/publication/301557615_Determination_of_Selected_Crash_Parameters_in_Head-on_Vehicle_Collision_with_Rollover
11. CRASH DATA GROUP. https://crashdatagroup.com/pages/edr-explained?srsId=AfmBOoq1oRhUujEBKgE_na99zH_2i1zin0qR14SZ8PaAN14WTG0-7ani

12. D.P. Wood and C.K. Simms, (2000). A hybrid model for pedestrian impact and projection. International Journal of Crashworthiness. [10.1533/cras.2000.0150](https://doi.org/10.1533/cras.2000.0150)
13. Dadvar, Seyedehsan & Lee, Young-Jae & Shin, Hyeonshic, (2020). Improving crash predictability of the Highway Safety Manual through optimizing local calibration process. Accident Analysis & Prevention 136:105393. [10.1016/j.aap.2019.105393](https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105393)
14. Daily, Jeremy S.; Singleton, Nathan; Downing, Elizabeth; and Manes, Gavin W., (2008). The Forensics Aspects of Event Data Recorders. Journal of Digital Forensics, Security and Law, Vol. 3, No. 3, Article 2. <https://commons.erau.edu/jdfsl/vol3/iss3/2>
15. Daniel Chindamo and Marco Gadola, (2018). Estimation of Vehicle Side-Slip Angle Using an Artificial Neural Network. MATEC Web of Conferences 166(3):02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816602001>
16. Depriester, Jean-Philippe & Perrin, Christophe & Serre, Thierry & Chalandon, Sophie, (2005). Comparison of Several Methods for Real Pedestrian Accident Reconstruction. https://www.researchgate.net/publication/253740616_COMPARISON_OF_SEVERAL_METHODS_FOR_REAL_PEDESTRIAN_ACCIDENT_RECONSTRUCTION
17. European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI), (2015). Best Practice Manual for Road Accident Reconstruction. <https://enfsi.eu/docfile/best-practice-manual-for-road-accident-reconstruction/>
18. Francisco Martínez, Javier Páez, Arturo Furones, Samuel Sánchez, (2016). Pedestrian-Vehicle Accidents Reconstruction with PC-Crash®: Sensibility Analysis of Factors Variation. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.016>
19. Fricke, L.B., (1990). Accident Reconstruction, Volume 2.
20. Gillespie T.D., (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Mining Metallurgy and Exploration. Inc.
21. Global status report on road safety, (2023). Geneva: World Health Organization; Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
22. Hartmut Rau, Dietmar Otte, and Burkhard Schultz, (2000). Pkw-Fußgängerkollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich Ergebnisse von Dummyversuchen mit Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 70 und 90 km/h. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. <http://worldcat.org/issn/07242050>

23. Håvard Fjær Grip, Lars Imsland, Tor A. Johansen, Jens C. Kalkkuhl, and Avshalom Suissa, (2009). Vehicle Sideslip Estimation Design, implementation, and experimental validation. *IEEE Control Systems Magazine* 29(5):36-52.
https://www.researchgate.net/publication/257200089_Vehicle_Sideslip_Estimation_Design_implementation_and_experimental_validation
24. Hongpeng Chi and Bing Gong, (2020). Analysis of Energy Conversion Law in Vehicle Collision Accident. *Journal of Physics Conference Series* 1486(7):072014. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1486/7/072014>
25. M. Zulhilmi, P. M. Heerwan, S. M. Asyraf1, I. M. Sollehudin and I. M. Ishak, (2020). Experimental Study on the Effect of Emergency Braking without Anti-Lock Braking System to Vehicle Dynamics Behaviour. *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 7832–7841.
<https://doi.org/10.15282/ijame.17.2.2020.02.0583>
26. Inhwan Han, (2017). Optimization analysis in reconstruction of vehicle collision accidents with deficient EDR data. Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.12.010>
27. International Transport Forum (ITF), (2022). The Safe System Approach in Action, Research Report, OECD Publishing, Paris.
28. Irina Duma, Nicolae Burnete, Adrian Todoruț, (2022). A review of road traffic accidents reconstruction methods and their limitations with respect to the national legal frameworks. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#)
29. J.E. Martinez, R.J. Schlueter, (1996). A primer on the reconstruction and presentation of rollover accidents.
30. James Mason, Brach, R. M., Brach, M. R., (2022). Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods. [10.4271/9781468603453](#)
31. Jin Xu, Xiao Luo, Yi-Ming Shao, (2018). Vehicle trajectory at curved sections of two-lane mountain roads: a field study under natural driving conditions. *European Transport Research Review*.
32. Jinming Wang, Zhengdong Li, Fan ying, Donghua Zou, Yijiu Chen, (2022). Reconstruction of a real-world car-to-pedestrian collision using geomatics techniques and numerical simulations. *J Forensic Leg Med*.
<https://doi.org/10.1016/j.jflm.2022.102433>

33. John A. Searle and Angela Searle, (1983). The trajectories of pedestrians, motorcycles, motorcyclists, etc., following a road accident.
<https://doi.org/10.4271/831622>
34. K.F. Orłowski, E. A. Moffatt, R.T. Bundorf, M.P. Holcomb, (1989).
Reconstruction of Rollover Collisions.
35. Kano, Tamio & Horinouchi, Katsutoshi & Takashi, Yonekawa, (2000). Study of braking in-a-turn stability. JSAE Review, Volume 21, Issue 2, Pages 249-251, ISSN 0389-4304. [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00088-0).
36. Klaps J and Day AJ, (2003). Steering drift and wheel movement during braking: parameter sensitivity studies. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers D: Journal of Automobile Engineering. 217(1): 1107-1115.
37. KURT D. WEISS, (2007). Auto accident reconstruction: The basics you must know. Plaintiff magazine.
38. Zheng, Jinzi & Yang, Qi & Liu, Jun & Li, Liang & Chai, Yanan & Xu, Pengfei. (2023). Research on Road Traffic Accident Scene Investigation Technology Based on 3D Real Scene Reconstruction. 38-43.
10.1109/ACIE58528.2023.00014.
39. Mastinu, Giampiero & Previati, Giorgio & Della Rossa, Fabio & Gobbi, Massimiliano & Fainello, Marco, (2024). How Drivers Lose Control of the Car. SAE International Journal of Vehicle Dynamics Stability and NVH. 8. 99-121. 10.4271/10-08-01-0007.
40. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA).
<https://www.nhtsa.gov/research-data/research-testing-databases/#/vehicle>
41. National Safety Council, (2025). <https://injuryfacts.nsc.org/>
42. Niehoff, Peter, (2005). The accuracy of energy-based crash reconstruction techniques using event data recorder measurements. Mechanical Engineering, Henry M. Rowan College of Engineering. <https://rdw.rowan.edu/etd/1056>
43. Nishant Mukund Pawara, Rashmeet Kaur Khanujaa, Pushpa Choudharyb, Nagendra R. Velaga, (2020). Modelling braking behaviour and accident probability of drivers under increasing time pressure conditions. Accident Analysis & Prevention, Volume 136. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105401>

44. Northwestern, Center for Public Safety, (2024). Traffic Crash Investigation & Reconstruction: The Core Sequence.
45. P. Urbanová, M. Jurda, T. Vojtisek, J. Krajsa, (2017). Using drone-mounted cameras for on-site body documentation: 3D mapping and active survey. *Forensic Science International* 281. [10.1016/j.forsciint.2017.10.027](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.10.027)
46. Panagiotis Ch. Anastasopoulos, Fred L. Mannering, Venky N. Shankar, John E. Haddock, (2012). A study of factors affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 45, Pages 628-633, ISSN 0001-4575.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.015>
47. Pankaj Shrivastava, Jose Antonio Lorente, Ankit Srivastava, Ashish Badiye, Neeti Kapoor, (2023). Textbook of Forensic Science.
48. Paul Carlson, Bradford Brimley, H. Gene Hawkins, Jr, Scott Himes, Hugh McGee, Frank Gross, (2015). Traffic Control Device Guidelines for Curves. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
49. Pawlus, Witold & Nielsen, Jan & Karimi, Hamid & Robbersmyr, Kjell, (2010). Mathematical modeling and analysis of a vehicle crash. 194-199.
50. Peter Chen, P.E., CFEI, ACTAR, (2020). Motor Vehicle Accident Reconstruction Skid to Rest and Skid Mark Analysis.
51. Peter Spacek, (2005). Track Behavior in Curve Areas: Attempt at Typology. *Journal of Transportation Engineering* 131(9).
<https://www.researchgate.net/publication/239391336>
52. Pinter, Krisztian & Szalay, Zsolt, (2018). Comparison of Data Required for Accident Reconstruction Based on Crash Test. *Vehicle and Automotive Engineering* 2 (pp.476-486). [10.1007/978-3-319-75677-6_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6_41)
53. R. Limpert, (1994). Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis.
54. R. W. Rivers, (2011). Traffic Crash Investigators' Manual: A Levels 1 and 2 Reference, Training and Investigation Manual.
55. R. Kamnik, M. Nekrep Perc, D. Topolšek, (2020). Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 135.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.018>

56. Rachel Wu, (2022). Run-off road crashes in Australia, 2016-2020. ISSN 1440-9593.
57. S. Chen, A. Rakotonirainy, S. W. Loke, S. Krishnaswamy, M. Sheehan, (2006). Assessing Crash Risks on Curves. Australasian Road Safety Research Policing Education Conference.
58. S. E. Meyer, M. Davis, S. Forrest, D. Chng, and B. Herbst, (2000). Accident Reconstruction of Rollovers—A Methodology. 10.4271/2000-01-0853
59. Sergei Evtiukov, Elena Kurakina, Valery Lukinskiy, Aleksey Ushakov, (2017). Methods of Accident Reconstruction and Investigation Given the Parameters of Vehicle Condition and Road Environment. Transportation Research Procedia, Volume 20. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.049>
60. Shireen Ibrahim Mohammed, (2023). An Overview of Traffic Accident Investigation Using Different Techniques. Automotive Experiences Vol. 6(No. 1:68-79). <https://doi.org/10.31603/ae.7913>
61. George YANNIS, 2007. ROAD SAFETY IN GREECE. IATSS Research, Volume 31, Issue 2. [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60229-6](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60229-6).
62. Soomin Woo, Boram Woo, Yoojin Chang, Sehyun Tak, (2024). Road Design on Human Driver Accidents Versus Automated Vehicle Failures: Comparison With Real-World Field Data. IEEE ACCESS [10.1109/ACCESS.2024.3487353](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3487353)
63. Spurgeon, S., (n.d.). Estimation of road frictional force and wheel slip for effective antilock braking system (ABS) control. International Journal of Robust and Nonlinear Control. <https://doi.org/10.1002/RNC.4366>
64. Sudesh Nair Baskara, Haryati Yaacob, Mohd Rosli Hainin, Sitti Asmah Hassan, (2016). Accident Due to Pavement Condition – A Review. Jurnal Teknologi. <https://www.researchgate.net/publication/305698283>
65. Tamio Kano, Katsutoshi Horinouchi, Takashi Yonekawa, (2000). Study of braking in-a-turn stability. Technical Notes/JSAE Review 21 (2000) 241-263.
66. Thomas L. Bohan, (2009). Crashes and Collapses Essentials of Forensic Science.
67. Treat, J.R. et al., (1979). Tri-Level Study of the Causes of Traffic Accidents: Executive Summary. National Highway Traffic Safety Administration.
68. U. Buck, S. Naether, B. Räss, C. Jackowski, M.J. Thali, (2013). Accident or homicide—virtual crime scene reconstruction using 3D methods. Forensic Science International. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.05.015>

69. U.S Department of Transportation, (2025). What is a Safe System Approach?
<https://www.transportation.gov/safe-system-approach>
70. Venkata R. Duddu, Srinivas S. Pulugurtha, Venu M. Kukkapalli, (2020). Variable Categories Influencing Single-Vehicle Run-off-Road Crashes and Their Severity. Transportation Engineering, Volume 2.
<https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100038>
71. Vulcan, A., & Haworth, N., (2000). Estimation of Risk Factors for Fatal Single Vehicle Crashes. Monash University, Accident Research Center
72. Wegman, F., Aarts, L., (2006). SWOV Advancing Sustainable Safety: National Road Safety Outlook for 2005–2020.
73. Y. Samim Unlusoy, Gokhan Tekin, (2010). Design and simulation of an integrated active yaw control system for road vehicles. International Journal of Vehicle Design [10.1504/IJVD.2010.029632](https://doi.org/10.1504/IJVD.2010.029632)
74. Yanna Yin, Huiying Wen, Lu Sun, Wei Hou, (2020). Study on the Influence of Road Geometry on Vehicle Lateral Instability. Journal of Advanced Transportation.
75. Yuji Hisaoka, Masaki Yamamoto, Akio Okada, (1999). Closed-loop analysis of vehicle behavior during braking in a turn. JSAE Review, Volume 20, Issue 4
[https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00042-9)
76. ΕΛΣΤΑΤ, (2024). Οδικά Τροχαία Ατυχήματα: έτος 2022.
77. Κυριάκος Καπέτης, (2019). Ανακατασκευή τροχαίων ατυχημάτων με χρήση της Αρχής Διατήρησης της Ορμής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, Εργαστήριο Οχημάτων.
78. M.J. Lofgren, (1983). Handbook for the Accident Reconstructionist. Institute of police traffic management, University of North Florida
79. Ναναδάκης Στυλιανός, (2012). Ανάλυση τροχαίων ατυχημάτων με χρήση υπολογιστικής προσομοίωσης. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, Εργαστήριο Οχημάτων.
80. Σ. Μαυρομάτης, (2023). Σημειώσεις για το μάθημα: Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών, Τεύχος Α: Στοιχεία Σχεδιασμού. Τομέας Μεταφορών και

Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

81. Σοφία Βαρδάκη, (2025). Σημειώσεις Γεωμετρικού Σχεδιασμού Οδών, Τεύχος Γ, Ασφάλεια του Σχεδιασμού των Οδών. Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.