



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Συστήματα Αυτοματισμού

Μεταπτυχιακή εργασία

Ναναδάκης Στυλιανός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Π.Π.

**Ανάλυση τροχαίων ατυχημάτων με χρήση υπολογιστικής
προσομοίωσης**

Επιβλέπων: Δρ. - Μηχ. Δ. Κουλοχέρης

Αθήνα 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάλυση των τροχαίων ατυχημάτων με μεθόδους υπολογιστικής προσομοίωσης. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση μιας σειράς μεθόδων και τεχνικών για την αναπαράσταση ενός τροχαίου ατυχήματος με όσο το δυνατόν πιο ακριβή τρόπο. Για τον σκοπό αυτό μελετώνται διάφορα θέματα που υπεισέρχονται κατά την διαδικασία αυτή.

Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στη διαδικασία της αναπαράστασης των τροχαίων ατυχημάτων και παρατίθενται κάποιοι πίνακες με στατιστικά, ώστε να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα της ανάπτυξης και εφαρμογής συγκεκριμένων μεθόδων για την διαδικασία αυτή. Δίνεται επίσης έμφαση σε θέματα ακρίβειας μετρήσεων/αβεβαιότητας υπό την έννοια ότι εντάσσονται στην διαδικασία της αναπαράστασης με την μορφή υπολογισμών/μετρήσεων που απαιτούνται/λαμβάνονται για την διενέργεια αυτής. Στην συνέχεια, αναλύονται βασικές αρχές φυσικής επάνω στις οποίες στηρίζεται η ανάπτυξη των εν λόγω μεθοδολογιών. Αναλύονται θέματα σχετικά με τα είδη των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα ελαστικά στην διάρκεια της κίνησης του οχήματος πριν και κατά την διάρκεια του ατυχήματος ενώ γίνεται περιγραφή των διαφόρων ειδών κίνησης ενός οχήματος μέσω εξισώσεων. Έπειτα, έχοντας το θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αφορά στα σημάδια εκτροπής, τα διάφορα είδη που μπορούν να σχηματιστούν επάνω στο οδόστρωμα καθώς και στον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας.

Έπειτα, αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την αναπαράσταση ενός τροχαίου ατυχήματος με ανατροπή στην περίπτωση που εμπλέκεται μόνο ένα όχημα. Έχοντας, ως υπόβαθρο την περίπτωση για ένα όχημα, περιγράφεται η θεωρία ώθησης και ορμής αρχικά για την περίπτωση σημειακών μαζών και στην συνέχεια η θεωρία της μηχανικής των συγκρούσεων όπου όλες οι δυνάμεις, ροπές και κινήσεις βρίσκονται σε ένα επίπεδο στην οποία στηρίζεται η αναπαράσταση ενός ατυχήματος για δύο εμπλεκόμενα οχήματα. Ακόμα, μελετάται και η περίπτωση σύγκρουσης ενός οχήματος με έναν πεζό, καταλήγοντας τέλος σε μια συγκριτική παρουσίαση μεθόδων αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων.

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of road accidents using computational simulation methods. The aim of this work is the presentation of a range of methods and techniques for the reconstruction of a traffic accident at the most accurate way. For this purpose, various aspects involved in this process are studied.

Firstly, an introduction to the process of reconstruction of road accidents is given and then some statistics tables are presented in order to understand the necessity of developing and implementing specific methods for this process. Also special emphasis is given concerning precision in measurements and uncertainty since they are integrated in the process of reconstruction in the form of calculations /measurements. Furthermore, fundamental principles of physics are analyzed on which is the base for the development of these methodologies. In particular, we analyze issues related to the types of forces developed in the tires during vehicle motion before and during the accident.

Simultaneously different types of motion of a vehicle and concepts like momentum, impulse, stopping distance are described using equations. Then, having the theoretical background, the methodology for the yaw marks is presented, the various types of marks that can be formed on the pavement and the calculation of the critical velocity.

Moreover, the methodology for the reconstruction of a vehicular rollover accident is developed, in the case where only one vehicle is involved. For that purpose, the accident is separated in three phases, each of which is analyzed separately with corresponding methods and an example rollover reconstruction is presented in which we apply everything mentioned so far. Having as background the case for one vehicle collision, the point-mass impulse-momentum theory and then the theory of planar impact mechanics are analyzed on which is based the reconstruction of an accident for two vehicles involved. At the same time, issues about the concepts of collision energy and speed variation and the case of frontal vehicle-pedestrian collisions are being studied. Finally, there is a comparative presentation of capturing methods for traffic accidents.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	10
I. Εισαγωγικά Στοιχεία.....	10
II. Στατιστικά Στοιχεία Τροχαίων Ατυχημάτων	11
Αβεβαιότητα στις Μετρήσεις και στους Υπολογισμούς	14
I. Εισαγωγή.....	14
II. Ανώτερα και κατώτερα όρια.....	15
III. Διακυμάνσεις Διαφορικού.....	16
IV. Στατιστική Συσχετιζόμενων Μεταβλητών	18
IV1. Γραμμικές εξισώσεις.....	18
IV2. Τυχαίες Συναρτήσεις.....	18
Δυνάμεις στα Ελαστικά Αυτοκινήτων	22
I. Εισαγωγικά Στοιχεία.....	22
II. Αντίσταση Κύλισης.....	23
III. Διαμήκης, Πλευρική και Δύναμη Ολίσθησης.....	24
III1. Διαμήκης Ολίσθηση.....	24
III2. Παρατηρήσεις σχετικά με την τριβή, τον συντελεστή τριβής και τον συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας.....	26
III3. Διαμήκης Δύναμη.....	27
III4. Πλευρική Δύναμη	28
IV. Friction Circle και Friction Ellipse.....	30
Ευθύγραμμη Κίνηση	34
I. Ομοιόμορφη επιτάχυνση και κίνηση πέδησης.....	34
I1. Εξισώσεις σταθερής επιτάχυνσης.....	34
II. Εξισώσεις οχήματος που η κίνηση μεταδίδεται από τους μπροστινούς τροχούς	36
III. Απόσταση Ακινητοποίησης	39
Κρίσιμη ταχύτητα από τα σημάδια εκτροπής των ελαστικών	41

I. Εισαγωγικά Στοιχεία.....	41
II. Σημάδια εκτροπής.....	42
III1. Ακτίνα από Σημάδια Εκτροπής.....	43
III. Κρίσιμη Ταχύτητα.....	44
III1. Εξίσωση κρίσιμης ταχύτητας.....	44
III2. Οδόστρωμα με μεγάλη κλίση.....	45
IV. Άλλα είδη κυρτών σημαδιών.....	46
Αναπαράσταση τροχαίων ατυχημάτων με ανατροπή	48
I. Εισαγωγή.....	48
II. Καταγραφή πληροφοριών από τον τόπο του ατυχήματος.....	49
III. Φάση πριν την ανατροπή (Pretrip Phase).....	49
IV. Φάση απώλειας ελέγχου (Trip phase).....	52
IV1. Ανάλυση της απώλειας ελέγχου ενός οχήματος(vehicle trip).....	53
IV2. Ανακατασκευή της φάσης απώλειας ελέγχου	57
IV3. Επίδραση ζαντών	57
V. Φάση Ανατροπής (Roll Phase).....	58
V1. Ανάλυση της ταχύτητας.....	58
V2. Ανάλυση της ανατροπής του οχήματος	60
V3. Πληροφορίες σχετικές με τον τόπο και την σκηνή του ατυχήματος	60
V4. Πληροφορίες σχετικά με το όχημα που εμπλέκεται στο ατύχημα	62
VI. Παράδειγμα ανακατασκευής της φάσης ανατροπής.....	64
VI1. Ανάλυση της ταχύτητας	65
VI2. Λεπτομερής Ανάλυση της ανατροπής του οχήματος.....	67
VII. Ρυθμός περιστροφής του οχήματος κατά την ανατροπή.....	72
Ανάλυση συγκρούσεων και θεωρία ώθησης-ορμής	74
I. Εισαγωγή.....	74
II. Ποσοτικές Έννοιες.....	75
III. Θεωρία ώθησης-συγκρούσεων για σημειακή μάζα.....	76
III1. Συντελεστής αποκατάστασης, συγκρούσεις σημειακών μαζών χωρίς τριβή.....	79
III2. Κρίσιμος συντελεστής αναλογίας ώθησης , μ_0	80
III3. Πλευρικές συγκρούσεις και συνθήκες «κοινής ταχύτητας».....	81
IV. Ελεγχόμενες συγκρούσεις.....	81

IV1. Συντελεστές αποκατάστασης	82
V. Μηχανική των συγκρούσεων που όλες οι δυνάμεις, ροπές και κινήσεις βρίσκονται σε ένα επίπεδο	85
VI. Συγκρούσεις οχημάτων με χαμηλή ταχύτητα	89
VI1. Συγκρούσεις χαμηλής ταχύτητας ευθυγραμμισμένων οχημάτων	89
VII. Σύνοψη και Παρατηρήσεις	92
VII1. Συντελεστής αποκατάστασης και συντελεστής αναλογίας	92
VII2. Αποστάσεις, γωνίες και το σημείο C	92
Ενέργεια Σύγκρουσης και ΔV	95
I. Εισαγωγή	95
II. Μέθοδος CRASH3	95
III. Συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης με βάση τη μέση συντριβή από δοκιμές σε άκαμπτα εμπόδια	99
IV. Συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης από συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων	100
Μετωπικές συγκρούσεις οχημάτων-πεζών	104
I. Εισαγωγή	104
II. Υβριδικό Μοντέλο (Wrap collisions)	106
III. Μοντέλο ανάλυσης	107
III1. Κίνηση πεζού	108
III2. Κίνηση οχήματος	110
IV. Τιμές φυσικών μεταβλητών	110
V. Μοντέλο ανακατασκευής	111
Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων	113
I. Εισαγωγή	113
II. Αντικείμενο αποτύπωσης	115
III. Συστήματα αποτύπωσης	116
III1. Συμβατικές Μέθοδοι	116
III2. Συστήματα με χρήση GPS	117
III3. Φωτογραμμετρική Μέθοδος	119
III4. Επίγεια σάρωση laser	122
IV. Αξιολόγηση Μεθόδων	124
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	127

Εισαγωγή

Εισαγωγή

Ι. Εισαγωγικά Στοιχεία

Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν εκατοντάδες χιλιάδες σκουπιδοτόποι μέσα στον καθένα από τους οποίους υπάρχουν εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κατεστραμμένα αυτοκίνητα. Ενδεικτικά μόνο στις ΗΠΑ υπάρχουν καταχωρημένοι περισσότεροι από 19000 σκουπιδοτόποι εν λειτουργία έτσι ώστε να γίνει αντιληπτός ο αριθμός αυτών των οχημάτων. Κάθε τέτοιο όχημα που στέλνεται σε αυτούς τους χώρους ύστερα από ένα ατύχημα αντιπροσωπεύει μια τραγωδία σε κάποιο βαθμό μαζί με την οικονομική απώλεια, τους ανθρώπινους τραυματισμούς και ίσως την απώλεια ζώων που συνοδεύουν ένα τέτοιο ατύχημα. Ένας από τους στόχους της ανακατασκευής των τροχαίων ατυχημάτων είναι η διαδικασία του προσδιορισμού αυτής της ιστορίας. Η ανακατασκευή ενός αυτοκινητιστικού ατυχήματος είναι η διαδικασία προσδιορισμού του τί συνέβη στα οχήματα και στα άτομα που ενεπλάκησαν στο ατύχημα και πώς αυτό συνέβη χρησιμοποιώντας πληροφορίες που είναι διαθέσιμες μετά το ατύχημα. Αυτή η διαδικασία πρέπει να δώσει αποτελέσματα που είναι λογικά ακριβή. Η «ανακατασκευή» είναι μια διαδικασία που διενεργείται με τον συγκεκριμένο σκοπό της εκτιμής τόσο σε ποιοτικό όσο και σε ποσοτικό επίπεδο πως συνέβη ένα ατύχημα χρησιμοποιώντας επιστημονικές, μαθηματικές και μηχανικές αρχές βασισμένες σε στοιχεία που λαμβάνονται μέσω της διερεύνησης ατυχημάτων (accident investigation).

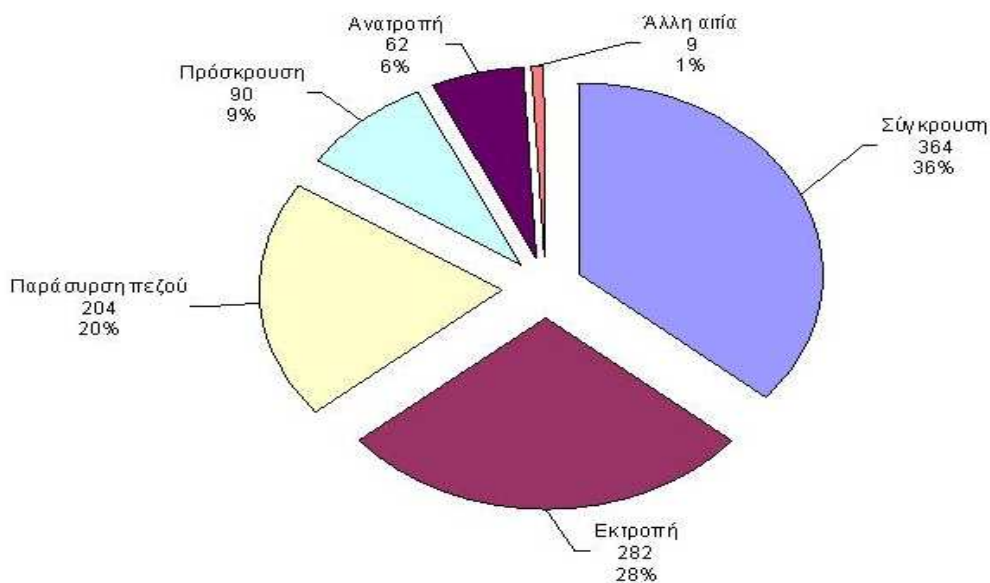
Η συλλογή δεδομένων σχετιζόμενων με τις συνθήκες ενός ατυχήματος αναφέρεται ως διερεύνηση ατυχήματος. Ο προσδιορισμός του τί και πώς συνέβη ένα ατύχημα αναφέρεται συνηθώς ως ανακατασκευή ατυχήματος. Μια τρίτη όψη της ανάλυσης μετά το ατύχημα ασχολείται με την απάντηση στο ερώτημα γιατί συνέβη αυτό (αιτιώδη συνάφεια ή υπαιτιότητα) κάτι που ενδιαφέρει κυρίως τους εμπλεκόμενους στο ατύχημα και που απαιτεί σχεδόν πάντα γνώσεις ψυχολογίας. Τέλος, σε αυτές τις περιπτώσεις προκύπτουν και νομικά θέματα σχετικά με παραβάσεις του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας (Κ.Ο.Κ) ή και ποινικού δικαίου. Γενικά όλα τα αποτελέσματα των παραπάνω θεμάτων είναι αλληλένδετα ωστόσο, στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα μας απασχολήσει σχεδόν αποκλειστικά η αναπαράσταση ενός τροχαίου ατυχήματος (vehicle accident reconstruction). Αξίζει να σημειωθεί πάντως, ότι πολλές φορές είναι αναγκαίο να συνδυαστεί η ανακατασκευή ενός ατυχήματος με την διερεύνηση αυτού καθώς μια ακριβής αναπαράσταση δεν μπορεί να διενεργηθεί χωρίς μια καλή διερεύνηση.

Στην παρούσα εργασία, η αναπαράσταση ενός ατυχήματος γίνεται με την προοπτική ότι στην ουσία αυτή είναι μια εφαρμογή των αρχών της μηχανικής, των μαθηματικών κ.α. Αυτό σημαίνει ότι οι αναπαραστάσεις ατυχημάτων δεν βασίζονται μόνο σε φυσικές αποδείξεις και πληροφορίες που συγκεντρώνονται στον τόπο του ατυχήματος αλλά και σε φυσικούς νόμους, οι οποίοι ισχύουν παντού και πάντα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε αναπαράσταση ενός ατυχήματος είναι μοναδική καθώς δεν υπάρχουν δύο ατυχήματα που να είναι ίδια.

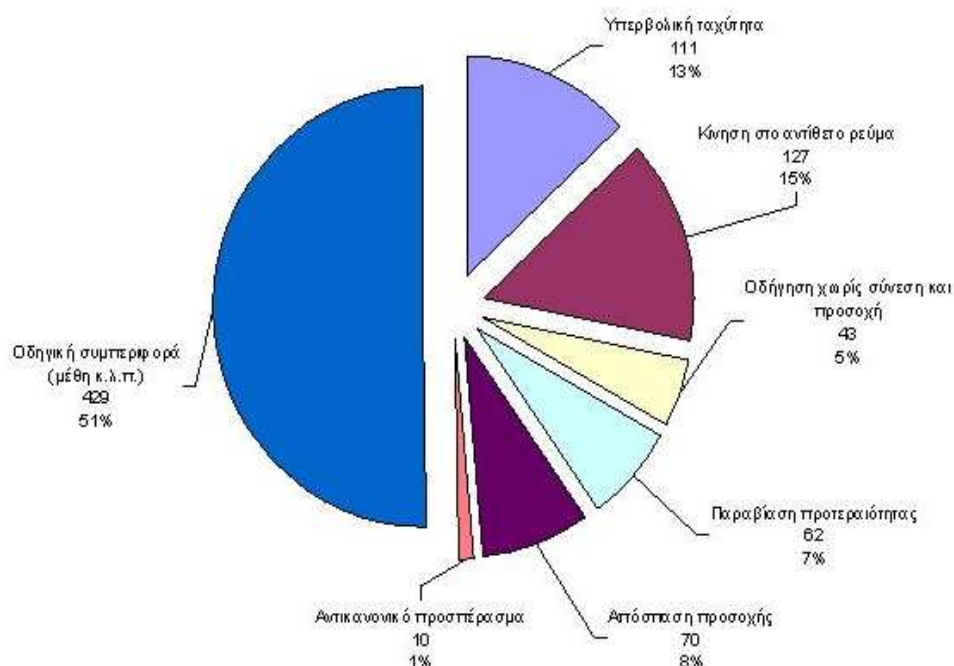
II. Στατιστικά Στοιχεία Τροχαίων Ατυχημάτων

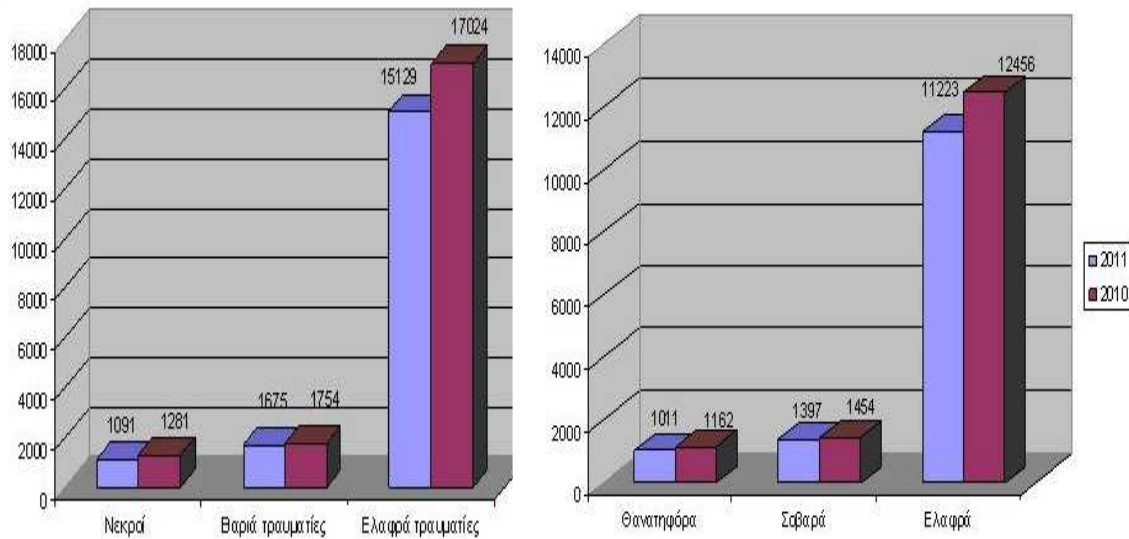
Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν κάποια στοιχεία για τα τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα που αφορούν το έτος 2011, μέσα από τα οποία γίνεται κατανοητή η αναγκαιότητα ανάπτυξης μεθόδων ανακατασκευής των τροχαίων ατυχημάτων. Ειδικότερα, παρουσιάζονται γραφήματα σχετικά με το είδος των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων, τα αίτιά τους, τους παθόντες καθώς και το πλήθος των τροχαίων σε σχέση με το έτος 2010 (βάσει πηγών της Ελληνικής Αστυνομίας).

ΕΙΔΟΣ ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΩΝ ΤΡΟΧΑΙΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ



ΑΙΤΙΑ ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΩΝ ΤΡΟΧΑΙΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ





Από τα παραπάνω στοιχεία, είναι εμφανές ότι τα μεγέθη είναι πολύ μεγάλα και επομένως η ανάπτυξη μεθόδων για τον προσδιορισμό του τί και πώς συνέβη ένα ατύχημα κρίνεται επιτακτική. Είναι επίσης ευδιάκριτο, ότι η ανάλυση ενός τροχαίου ατυχήματος εμφανίζει διάφορες όψεις, οι οποίες και αναφέρθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, στα πλαίσια της εργασίας αυτής δίνεται έμφαση αποκλειστικά στην ανακατασκευή ενός τροχαίου ατυχήματος. Κλείνοντας, αξίζει να αναφερθεί ότι πέραν από την χρησιμότητα της ανακατασκευής και της διερεύνησης ενός ατυχήματος για τον προσδιορισμό του τί πραγματικά συνέβη σε αυτό, οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόληψη και κυρίως την αποφυγή τροχαίων ατυχημάτων ώστε να μειωθεί η απώλεια σε άψυχο και κυρίως σε έμψυχο υλικό.

Κεφάλαιο Πρώτο

Αβεβαιότητα στις Μετρήσεις και στους Υπολογισμούς

I. Εισαγωγή

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται η χρήση υπολογισμών και πειραματικών δεδομένων για την αναπαράσταση ενός ατυχήματος, αυτές είναι σπάνιες και μάλιστα καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας και η ανάγκη για επαγγελματικές και ακριβείς αναπαραστάσεις μεγαλώνει, οι περιπτώσεις αυτές γίνονται σπανιότερες. Ωστόσο, οποτεδήποτε λαμβάνονται μετρήσεις ή διενεργούνται υπολογισμοί που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα υπάρχει ένα επίπεδο αβεβαιότητας.

Είναι προφανές ότι εάν ένα σφάλμα υπεισέρχεται στην μέτρηση μιας παραμέτρου τότε ένα αντίστοιχο σφάλμα θα υπάρχει και σε μια παράμετρο που υπολογίζεται με την χρήση της πρώτης. Ως «σφάλμα» ορίζουμε την διαφορά από την πραγματική τιμή μιας μεταβλητής εξαιτίας ανακρίβειας κατά την μέτρηση αυτής ή οποιουδήποτε άλλου παράγοντα όπως συνθήκες μέτρησης. Μια γνωστή εξίσωση της μηχανικής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας ενός οχήματος που αφήνει σημάδια στην άσφαλο είναι

$$u = \sqrt{2fgd} \quad (1.1)$$

Εάν η ταχύτητα u και το μήκος των σημαδιών d λαμβάνονται μέσω μετρήσεων, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας, f . Ωστόσο με βάση τα παραπάνω εάν υπάρχει κάποιο σφάλμα στην μέτρηση των u, d θα υπάρχει ανάλογο σφάλμα και στον συντελεστή f . Η αβεβαιότητα στις μετρήσεις προκύπτει και με άλλους τρόπους όπως λόγω αδυναμίας του μοντέλου (π.χ η εξίσωση 1.1 υπολογίζει την ταχύτητα του οχήματος θεωρώντας ότι ο δρόμος είναι επίπεδος) ή σφάλμα του παρατηρητή (βλέπε αριθμός σημαντικών ψηφίων) ή λόγω των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών στο χώρο διενέργειας μιας μέτρησης. Προκύπτει δηλαδή ότι διακυμάνσεις στις μεταβλητές εισόδου μιας εξίσωσης οδηγούν σε αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα.

Γενικά, η προς μέτρηση ποσότητα θα συμβολίζεται με y . Η ποσότητα y , εκφράζεται ως το άθροισμα μιας τιμής αναφοράς, Y και μιας διακύμανσης, δy έτσι ώστε το αποτέλεσμα μιας πράξης (μέτρηση ή υπολογισμός μιας ποσότητας y) καταλήγει στην σχέση

$$y = Y \pm \delta y \quad (1.1)$$

Η εγγύτητα της τιμής αναφοράς σε κάποια αληθή τιμή αναφέρεται ως ακρίβεια της y .

Η τιμή αναφοράς Y μπορεί ανάλογα με τον τρόπο που ορίζεται να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες:

A. Μία «αληθή» τιμή που γενικά είναι άγνωστη και κατά κανόνα μια εκτίμηση βασισμένη σε μια μέθοδο κατάλληλη για την εφαρμογή

B. Μία τιμή που συμφωνείται από μια ομάδα ειδικών (π.χ επιτάχυνση της βαρύτητας $g=9.806650\text{m/s}^2$)

C. Η μέση τιμή μιας τυχαίας κατανομής πληθυσμού. Η τιμή Y δεν είναι ποτέ γνωστή αλλά υπολογίζεται από την μέση τιμή δείγματος ενός σετ πειραμάτων

Γενικεύοντας υποθέτουμε ότι οι τιμές Y και δy εξαρτώνται από άλλες μεταβλητές δηλαδή

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.2)$$

Όπου και με την σειρά τους οι μεταβλητές x_i μπορούν να είναι συναρτήσεις άλλων μεταβλητών π.χ $x_1 = x_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$

Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις. Η πρώτη είναι ο καθορισμός πάνω και κάτω ορίων για το y . Η δεύτερη είναι η χρήση μιας αναλυτικής μορφής της εξίσωσης 1.3 και διαφορικός λογισμός για την συσχέτιση των διακυμάνσεων στις ανεξάρτητες μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n με το Y και δy . Τέλος λαμβάνεται μια στατιστική προσέγγιση στην οποία οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν γνωστές στατιστικές ιδιότητες. Αυτές οι προσεγγίσεις αναλύονται παρακάτω.

II. Ανώτερα και κατώτερα όρια

Ένας από τους απλούστερους τρόπους ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας είναι η δημιουργία άνω και κάτω ορίων της εξαρτημένης μεταβλητής y , που προκαλείται από τις διακυμάνσεις σε όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν σημαντικές διακυμάνσεις. Κατ' αρχήν, αυτές οι ποσότητες που έχουν ένα σημαντικό βαθμό διακύμανσης αναγνωρίζονται ως μεταβλητές ενδιαφέροντος. Στην συνέχεια καθορίζεται ένα μέγιστο εύρος διακύμανσης κάθε μεταβλητής ενώ τέλος οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής υπολογίζονται για κάθε δυνατό συνδυασμό των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Στην εξίσωση 1.3 χρησιμοποιούνται τιμές όλων των συγκεκριμένων συνδυασμών των ανεξάρτητων μεταβλητών ώστε να προκύψει η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του y . Τελικά προκύπτει ότι

$$\delta y = \frac{1}{2}(y_{max} - y_{min}) \text{ και } Y = \frac{1}{2}(y_{max} + y_{min}) \quad (1.3)$$

Δεδομένης της εξίσωσης (1.1) και θεωρώντας ότι η βαρύτητα g είναι γνωστή με ικανοποιητική ακρίβεια, αμελητέα αβεβαιότητα ενώ υπό κανονικές συνθήκες οι μεταβλητές f και d είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες είναι άγνωστες αλλά μπορούν να οριοθετηθούν έτσι ώστε $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ και $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$

Με βάση τα όρια αυτά προκύπτουν αντίστοιχα άνω και κάτω όρια για την εκτίμηση της ταχύτητας u

$$\sqrt{2f_{\min} * g * d_{\min}} \leq u \leq \sqrt{2f_{\max} * g * d_{\max}} \quad (1.4)$$

Από τα παραπάνω προκύπτουν για την αβεβαιότητα δu και την τιμή αναφοράς V , οι παρακάτω σχέσεις:

$$\delta u = \frac{1}{2}(\sqrt{2f_{\max} * g * d_{\max}} - \sqrt{2f_{\min} * g * d_{\min}}) \quad (1.5)$$

$$V = \frac{1}{2}(\sqrt{2f_{\max} * g * d_{\max}} + \sqrt{2f_{\min} * g * d_{\min}}) \quad (1.6)$$

Η παραπάνω μέθοδος είναι ίσως η πιο απλή και ευέλικτη μέθοδος για τον καθορισμό της αβεβαιότητας. Εφαρμόζει σε κάθε τύπο ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας.

III. Διακυμάνσεις Διαφορικού

Μια άλλη μέθοδος για την εκτίμηση της αβεβαιότητας χρησιμοποιεί διαφορικό λογισμό για να σχετίσει το y με τις εξαρτημένες μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n , οι οποίες όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να είναι συναρτήσεις άλλων μεταβλητών δηλαδή $x_1 = x_1(u_1, u_2, \dots, u_n)$ κ.ο.κ.

Η συνάρτηση $y = y(x)$ μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από το $x = a$ έτσι ώστε:

$$y(x) = y(a) + \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_a (x - a) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_a (x - a)^2 + \dots \quad (1.7)$$

Εάν το $(x-a)$ είναι μικρό, όπου το a είναι μια τιμή αναφορά του x , τότε το $\delta x = (x-a)$ είναι μικρό και $(x-a)^2$ και μεγαλύτερες δυνάμεις αυτού μπορούν να αγνοηθούν. Για μια συνάρτηση πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών όπου οι τιμές αναφοράς x_1, x_2, \dots, x_n δίνονται από X_1, X_2, \dots, X_n μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κάτωθι γενικός τύπος

$$\delta y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_n} \delta x_n \quad (1.8)$$

Οι παράγωγοι της παραπάνω σχέσεις αναφέρονται συχνά και ως συντελεστές ευαισθησίας επειδή τα πρόσημα και τα μεγέθη τους δείχνουν πόσο κάθε από τις διακυμάνσεις δx_i επηρεάζει την αβεβαιότητα δy .

Η εξίσωση 1.8 είναι μια προσέγγιση που αντιστοιχεί σε γραμμικοποίηση της $y = y(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Η σχετική αβεβαιότητα υπολογίζεται συχνά από αυτή την εξίσωση διαιρώντας με Y , δηλαδή

$$\frac{\delta}{Y} = \frac{X_1}{Y} \frac{\partial y}{\partial x_1} \frac{\delta x_1}{X_1} + \frac{X_2}{Y} \frac{\partial y}{\partial x_2} \frac{\delta x_2}{X_2} + \dots + \frac{X_n}{Y} \frac{\partial y}{\partial x_n} \frac{\delta x_n}{X_n} \quad (1.9)$$

Ενώ επίσης από την σχέση $y = Y \pm \delta y$ προκύπτει για την σχετική αβεβαιότητα

$$\frac{y}{Y} = 1 + \frac{\delta y}{Y} \quad (1.10)$$

Εάν οι ανεξάρτητες μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα n -διαστάσεων διάνυσμα χώρου μπορεί να οριστεί μια νόρμα του δy ως εξής:

$$\delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 * \delta x_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 * \delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 * \delta x_n^2} \quad (1.11)$$

Οι εξισώσεις 1.8 και 1.11 είναι διαφορετικές εκφράσεις της ίδιας ποσότητας. Η εξίσωση 1.12 δίνει τιμές που είναι ρεαλιστικές εκτιμήσεις της αβεβαιότητας. Επιπλέον η χρήση της εξίσωσης 1.9 πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς λόγω των προσήμων είναι δυνατή η αναιρέση κάποιων όρων (χρήση απόλυτων τιμών).

IV. Στατιστική Συσχετιζόμενων Μεταβλητών

Ορισμένες φορές είναι γνωστή η κατανομή μιας ποσότητας ή μιας μεταβλητής ενώ συχνά συμβαίνει μια μεταβλητή έστω x , της οποίας οι στατιστικές ιδιότητες είναι γνωστές να σχετίζεται με μέσω μια μαθηματικής εξίσωσης με μία άλλη μεταβλητή, έστω y , δηλαδή

$$y = f(x) \quad (1.12)$$

Κάθε μία από τις μεταβλητές x, y έχουν μια συγκεκριμένη κατανομή (π.χ κανονική, ομοιόμορφη) και κάθε κατανομή έχει συγκεκριμένες παραμέτρους (μέση τιμή, διακύμανση κ.α.). Όταν τυχαίες μεταβλητές όπως στην παραπάνω σχέση σχετίζονται, η γνώση της κατανομής της x δεν σημαίνει ότι η κατανομή της y είναι γνωστή ή ότι μπορεί να βρεθεί. Ωστόσο υπό προϋποθέσεις κάτι τέτοιο είναι δυνατόν και για το σκοπό αυτό παραθέτουμε δύο περιπτώσεις που αναλύονται παρακάτω

IV1. Γραμμικές εξισώσεις

Όταν η συνάρτηση της σχέσης 1.12 είναι γραμμική δηλαδή

$$y = f(x) = ax + b \quad (1.13)$$

Όπου a, b σταθερές, τότε οι στατιστικές ιδιότητες του y είναι γνωστές και σχετικά απλές.

Εάν το x έχει κατανομή με μέση τιμή, μ_x και διακύμανση σ_x^2 , τότε ισχύει αντίστοιχα για την μεταβλητή y

$$\mu_y = a\mu_x + b \quad (1.14)$$

$$\sigma_y^2 = a^2\sigma_x^2 \quad (1.15)$$

Επίσης για περιπτώσεις γραμμικών συναρτήσεων, εάν το x έχει κανονική κατανομή, τότε και το y και θα έχει επίσης κανονική κατανομή.

IV2. Τυχαίες Συναρτήσεις

Σε αυτή την περίπτωση, ένας τρόπος συσχέτισης των στατιστικών παραμέτρων των x και y είναι αναπτύσσοντας την συνάρτηση σε σειρά Taylor γύρω από την μέση τιμή του x και αγνοώντας τους όρους μεγάλης τάξης (από την δεύτερη τάξη και πάνω). Ειδικότερα

$$y(x) = f(\mu_x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\mu_x} (x - \mu_x) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Big|_{\mu_x} (x - \mu_x)^2 + \dots \quad (1.16)$$

$$y(x) = f(\mu_x) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\mu_x} (x - \mu_x) \quad (1.17)$$

Υπολογίζοντας την σχέση για $x=\mu_x$ λαμβάνουμε την μέση τιμή του y

$$y(\mu_x) = f(\mu_x) = \mu_y \quad (1.18)$$

Οπότε αντικαθιστώντας στην 1.17 έχουμε

$$y(x) - \mu_y = \frac{dy}{dx} \Big|_{\mu_x} (x - \mu_x) \quad (1.19)$$

Θεωρώντας την 1.19 ως μια γραμμική σχέση και με βάση την σχέση 1.15 προκύπτει

$$\sigma_y^2 = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \Big|_{\mu_x} \right]^2 \sigma_x^2 \quad (1.20)$$

Αυτή η διαδικασία μπορεί να γενικευτεί για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ως εξής

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{\mu_{xi}} \right]^2 \sigma_{xi}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Big|_{\mu_{xi}} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \Big|_{\mu_{xj}} \sigma_{xi} \sigma_{xj} \quad (1.21)$$

όπου $\sigma_{xi xj}$ η συνδιακύμανση των x_i, x_j . Εάν η συνδιακύμανση είναι μηδέν τότε αυτές οι μεταβλητές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Στην ειδική περίπτωση που όλες οι μεταβλητές x_i, x_j είναι ανεξάρτητες τότε

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + \dots + \sigma_{x_n}^2} \quad (1.22)$$

Παρόλ' αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι σχέσεις είναι προσεγγιστικές επειδή η σειρά Taylor έχει υποστεί γραμμικοποίηση ενώ και η στατιστική κατανομή του y είναι γενικά άγνωστη ακόμα και αν η κατανομή του x είναι γνωστή

Παρατήρηση

Η επιλογή της κατάλληλης εκ των τριών μεθόδων για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας εξαρτάται κάθε φορά από τις διαθέσιμες πληροφορίες κάθε φορά για την επίλυση του προβλήματος. Ωστόσο, μια άλλη άποψη είναι η χρήση όσο το δυνατόν περισσότερων προσεγγίσεων για την επίλυση του προβλήματος. Εάν τα αποτελέσματα συμφωνούν από ανεξάρτητες προσεγγίσεις ενδυναμώνεται η εγκυρότητά τους και μειώνεται η αβεβαιότητα με υποτακτικό τρόπο. Κάτι τέτοιο είναι γενικά αναγκαίο και σε περιπτώσεις αναπαράστασης τροχαίων ατυχημάτων.

Κεφάλαιο Δεύτερο

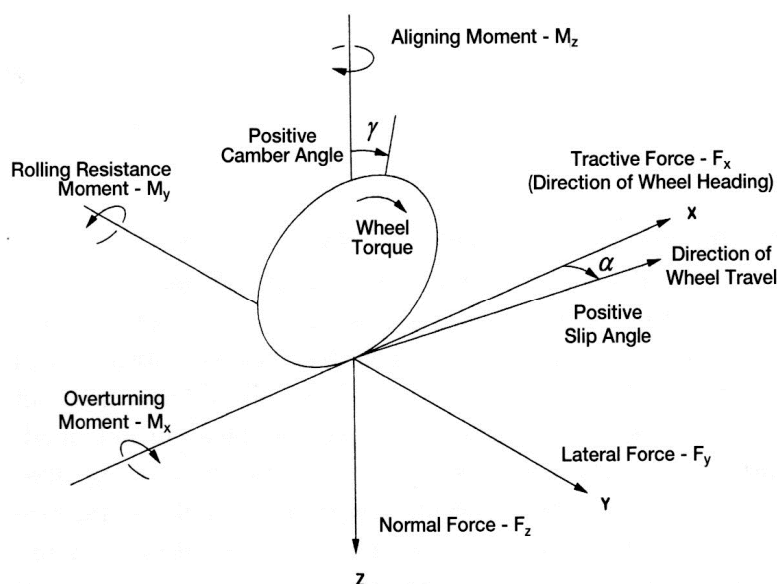
Δυνάμεις στα Ελαστικά Αυτοκινήτων

I. Εισαγωγικά Στοιχεία

Εκτός από τις δυνάμεις βαρύτητας, αεροδυναμικές δυνάμεις και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των οχημάτων κατά την διάρκεια συγκρούσεων, οι δυνάμεις και ροπές που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των ελαστικών ενός οχήματος και της επιφάνειας του οδοστρώματος ελέγχουν την κίνηση του αυτοκινήτου. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η κατανόηση των δυνάμεων αυτών ώστε να προκύπτει μια όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση ενός ατυχήματος γεγονός ου επιβάλλει την ανάπτυξη μεθόδων ακριβούς υπολογισμού των δυνάμεων αυτών.

Στο παρόν κεφάλαιο αυτής της εργασίας, παρουσιάζονται βασικές έννοιες σχετικά με δυνάμεις ελαστικών-εδάφους και ροπές καθώς επίσης και ποσοτικοποίηση των ανεξάρτητων πλευρικών και διαμήκων δυνάμεων στα ελαστικά που βρίσκονται στο επίπεδο του δρόμου. Τέλος θα παρουσιαστούν επιγραμματικά δύο μοντέλα για την πρόβλεψη της συνδυασμένης πλευρικής και διαμήκου δύναμης που αναπτύσσεται όταν ένας τροχός που έχει δεδομένη κατεύθυνση υποβάλλεται σε πέδηση.

Για το σκοπό αυτό, απαιτείται ο ορισμός ενός συστήματος συντεταγμένων που θα λειτουργεί ως αναφορά με το οποίο θα μπορούν να περιγραφούν παράμετροι του συστήματος, δυνάμεις, χαρακτηριστικά εξαρτημάτων κ.α. και το οποίο φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.

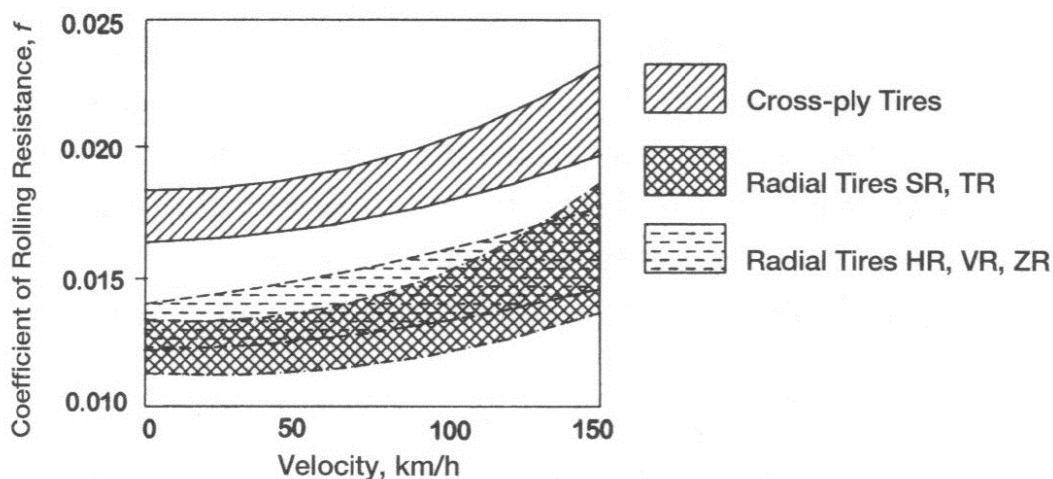


Σχήμα 2.1 Σύστημα συντεταγμένων του άξονα του ελαστικού

Στο σχήμα αυτό φαίνονται όλες οι δυνάμεις F_x, F_y, F_z και όλες οι ροπές M_x, M_y, M_z που σχετίζονται με ένα κυλιόμενο τροχό καθώς επίσης και δύο γωνιακές παραμέτρους: την γωνιακή εκτροπή α , και την γωνία καμπυλότητας που συμβολίζεται με γ . Η F_x αναφέρεται και ως διαμήκης δύναμη ενώ η F_y ως πλευρική δύναμη και εμφανίζονται αντίστοιχα ως αποτέλεσμα εφαρμογής πέδησης και εκτροπής αντίστοιχα. Η συνισταμένη δύναμη F βρίσκεται στο επίπεδο σημείου επαφής και είναι ένα είδος τριβής μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Η γωνία εκτροπής είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του τροχού και της ταχύτητας του τροχού ενώ η γωνία καμπυλότητας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της επίπεδης επιφάνειας του τροχού και του z-άξονα. Τέλος ως «σημείο επαφής» ορίζουμε την επιφάνεια αμοιβαίας επαφής του ελαστικού και της σταθερής επιφάνειας πάνω στην οποία κυλιέται.

II. Αντίσταση Κύλισης

Η αντίσταση κύλισης είναι πρωτίστως μια συνάρτηση της υστέρησης των υλικών των ελαστικών εξαιτίας της παραμόρφωσης του δομικού πλαισίου του ελαστικού που συμβαίνει καθώς ένα τμήμα του ελαστικού περνάει από το σημείο επαφής καθώς κυλιέται ο τροχός. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι παραμορφώσεις του κυλιόμενου ελαστικού ευθύνονται για το 80% τουλάχιστον των απωλειών αντίστασης κύλισης. Γενικά υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της αντίστασης κύλισης ενός ελαστικού. Μεταξύ αυτών είναι η κατασκευή του ίδιου του ελαστικού, το υλικό κατασκευής, η τραχύτητα της επιφάνειας του οδοστρώματος, η ταχύτητα κ.α. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η εξάρτηση της αντίστασης κύλισης συναρτήσει της ταχύτητας

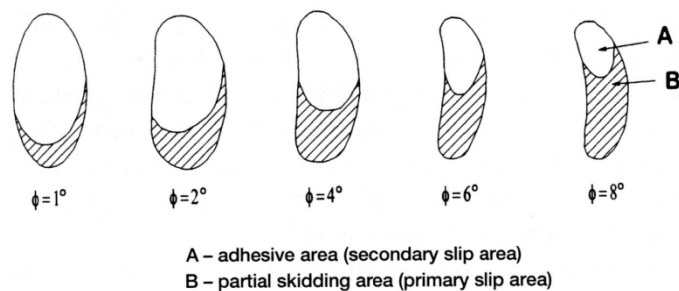


Σχήμα 2.2 Αντίσταση κύλισης για διάφορα είδη ελαστικών σε επίπεδο οδόστρωμα, υπό κανονικό φορτίο και προκαθορισμένη πίεση

III. Διαμήκης, Πλευρική και Δύναμη Ολίσθησης

Στην ευθύγραμμη κίνηση χωρίς ολίσθηση, τα στοιχεία του πέλματος ενός ελαστικού υφίστανται μικρές παραμορφώσεις στο επίπεδο όπου υπάρχει επαφή μεταξύ οδοστρώματος και ελαστικού, καθώς εισέρχονται δηλαδή στο σημείο επαφής. Αυτές οι παραμορφώσεις προκαλούν ολίσθηση ενός δοσμένου σημείου στην επιφάνεια του ελαστικού σε σχέση με την επιφάνεια του οδοστρώματος της τάξης των χιλιοστών της ίντσας και η οποία μπορεί να είναι στην διαμήκη ή την πλευρική διεύθυνση ή και στις δύο και αυτή η μετατόπιση θα είναι συνάρτηση της επιφάνειας του δρόμου και της κατασκευής του ελαστικού. Αυτή η ολίσθηση αναφέρεται και ως δευτερεύουσα.

Πέραν αυτής υπάρχει και ένα άλλο είδος ολίσθησης που παρατηρείται στην επιφάνεια του ελαστικού και ονομάζεται πρωταρχική ολίσθηση, η οποία είναι συνάρτηση μιας εφαρμοζόμενης κατεύθυνσης ή μιας εφαρμοζόμενης ροπής. Μία περιοχή της επιφάνειας του σημείου επαφής που αποτελείται κυρίως από δευτερεύουσα ολίσθηση καλείται περιοχή προσκόλλησης (adhesive area), ενώ εάν σε αυτή κυριαχεί πρωταρχική ολίσθηση καλείται περιοχή μερικής ολίσθησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό του σημείου επαφής που υφίσταται πρωταρχική ολίσθηση αυξάνει από μηδέν (ευθύγραμμη κίνηση χωρίς ολίσθηση και χωρίς καθοδήγηση) σε 100% για ένα ελαστικό που υφίσταται ολίσθηση με «κλειδωμένο» τροχό.



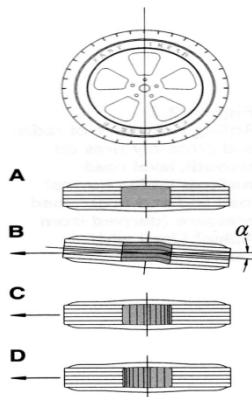
Σχήμα 2.3 Η ολίσθηση ως συνάρτηση της γωνίας εκτροπής

III1. Διαμήκης Ολίσθηση

Υπό ευρεία έννοια, οι διαμήκεις δυνάμεις F_x , είναι υπεύθυνες για την επιτάχυνση και επιβράδυνση ενός οχήματος ενώ οι πλευρικές για τον έλεγχο της κατεύθυνσης του οχήματος. Το πρώτο είδος περιγράφεται μέσω μιας παραμέτρου που ονομάζεται διαμήκης ολίσθηση, s , ενώ οι πλευρικές μέσω της γωνίας εκτροπής, α . Γενικότερα, δυνάμεις επιβράδυνσης και επιτάχυνσης σε ένα όχημα, αναπτύσσονται σε κάθε σημείο επαφής κάθε ελαστικού μέσω της εφαρμογής ροπής στον άξονα.

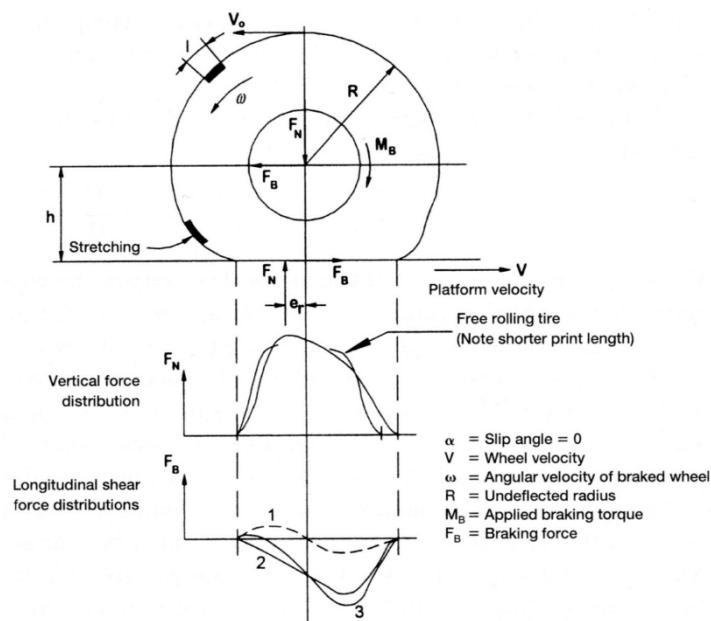
Καθώς το ελαστικό, αντιδρά με πλαστικό τρόπο στην εφαρμογή της ροπής είναι λογικό να υπάρξει παραμόρφωση του πλαισίου του ελαστικού. Εξετάζουμε την περίπτωση ελαστικού με μηδενική γωνία εκτροπής υπό την εφαρμογή δύναμης πέδησης.

Η περιστροφική κίνηση του ελαστικού συνοδεύεται από μια «προς τα πίσω» μετατόπιση του ελαστικού ως προς τον άξονα του. Η δύναμη F_x , σε αυτή την περίπτωση τείνει να τεντώσει τα στοιχεία του πέλματος ακριβώς μπροστά από το σημείο επαφής και να τα συμπιέσει ακριβώς πίσω από αυτό, κάτι που διακρίνεται στο σχήμα παρακάτω.



Σχήμα 2.4 Απεικονίσεις των συνθηκών ολίσθησης του σημείου επαφής ελαστικού-οδοστρώματος. (A) Ευθύγραμμη κίνηση χωρίς κύλιση (B) Εκτροπή γωνίας α (C) Εφαρμογή πέδησης υπό ευθύγραμμη κίνηση (D) Επιτάχυνση

Η κατανομή των διαμηθικών διαμήκων δυνάμεων για κίνηση χωρίς ολίσθηση φαίνεται στο σχήμα 2.5 (γραμμή 1). Η γραμμή 2 δείχνει την κατανομή λόγω ροπής πέδησης ενώ η γραμμή 3 την συνιστάμενη αυτών των δυνάμεων κατα μήκος του «σημείου επαφής». Επιπλέον η κατανομή της διαμήκου δύναμης έχει βρεθεί ότι είναι μη γραμμική συνάρτηση της διαμήκου ολίσθησης s .



Σχήμα 2.5 Κατανομή διαμήκου και κάθετης δύναμης επάνω στην επιφάνεια επαφής ελαστικού-οδοστρώματος στην περίπτωση επιβράδυνσης

Ιδιαίτερη έμφαση επίσης πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η ολίσθηση των τροχών ορίζεται εδώ με δύο διαφορετικούς τρόπους και πιο συγκεκριμένα για ένα τροχό υπό την εφαρμογή μιας ροπής πέδησης και ένα τροχό υπό ροπή έλξης. Στην πρώτη περίπτωση, η ολίσθηση s μπορεί να οριστεί ως:

$$s = \frac{V_F}{V_W} = \frac{V_W - R\omega}{V_W} = 1 - \frac{R\omega}{V_W} \quad (2.1)$$

Όπου V_W η ταχύτητα του κέντρου του τροχού, V_F η ταχύτητα του ελαστικού στο σημείο επαφής και ω η γωνιακή ταχύτητα του τροχού, ενώ για ένα τροχό με θετική πρόσφυση όπως η F_x , η ολίσθηση του τροχού ορίζεται ως:

$$s = -\frac{V_F}{R\omega} = \frac{R\omega - V_W}{R\omega} = 1 - \frac{V_W}{R\omega} \quad (2.2)$$

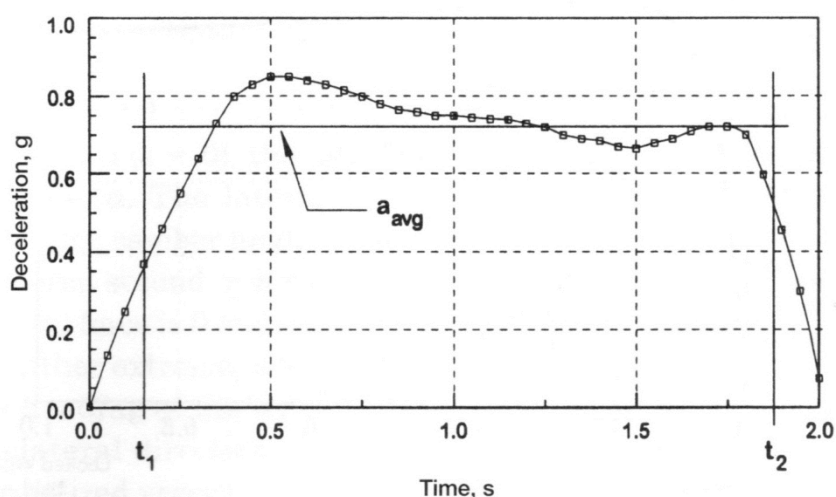
Ο λόγος που γίνεται αυτή η διάκριση είναι ώστε η ολίσθηση να οριοθετείται πάντα μεταξύ του μηδενός και της μονάδας, αφού π.χ στην εξίσωση 2.1 για $R\omega \neq 0$ και $V_W = 0$ έχουμε απειρισμό της ολίσθησης κάτι που συμβαίνει και στην εξίσωση 2.2, για $R\omega = 0$ και $V_W \neq 0$. Τέλος είναι εμφανές ότι π.χ στην εξίσωση 2.1, όταν έχουμε κλείδωμα του τροχού λόγω πέδησης τότε $\omega = 0$ ή $s = 1$. Αντίθετα σε κίνηση χωρίς κύλιση $R\omega = V_W$ ή $s = 0$.

III2. Παρατηρήσεις σχετικά με την τριβή, τον συντελεστή τριβής και τον συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας

Προτού αναφερθούμε στις πλευρικές και διαμήκεις δυνάμεις που δημιουργούνται στο ελαστικό αξίζει να αναφερθούμε στις δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται στο ελαστικό. Γενικά η τριβή είναι ένα πανταχού παρών φαινόμενο. Υπό μια έννοια είναι ένα απλό φαινόμενο ενώ σε κάποιες περιπτώσεις είναι δύσκολο να εξηγηθεί. Παρόλ'αυτά έχει μοντελοποιηθεί μέσω νόμων που θα δούμε παρακάτω.

Αρχικά, εάν η δύναμη μεταξύ δύο επίπεδων άκαμπτων σωμάτων πάνω σε μια επιφάνεια είναι N , τότε η δύναμη F ώστε να παραχθεί ολίσθηση είναι ίση με μια σταθερά φορές την δύναμη N , δηλαδή $F = f \cdot N$. Η σταθερά f καλείται συντελεστής τριβής. Επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι η δύναμη ώστε να προκαλέσει ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από την δύναμη που απαιτείται για την διατήρηση της ολίσθησης ή $F_S > F_D$ και κατ' αναλογία $f_S > f_D$. Ακόμα είναι γνωστό ότι η δύναμη τριβής F είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας επαφής ενώ ο συντελεστής τριβής είναι διαφορετικός για διαφορετικά υλικά.

Ωστόσο επειδή ένα ελαστικό δεν μπορεί να θεωρηθεί άκαμπτο στερεό έχει αποδειχθεί μέσω πειραμάτων ότι τα παραπάνω (μοντέλο Coulomb) δεν ταιριάζουν με την συμπεριφορά που παρατηρείται όταν για παράδειγμα οι τροχοί ενός εμπροσθοκίνητου αυτοκινήτου κλειδώνουν ξαφνικά λόγω επιβολής πέδησης. Μάλιστα, ο συντελεστής τριβής δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται εξαρτώμενος και από την ταχύτητα. Έτσι το μοντέλο Coulomb όταν εφαρμόζεται σε οχήματα θεωρείται μια προσέγγιση, η οποία μπορεί να είναι ικανοποιητικά ακριβής όταν χρησιμοποιείται μια κατάλληλη τιμή του f . Η τιμή αυτή του f , ονομάζεται συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας και διαχωρίζεται από τον συντελεστή τριβής που αντιστοιχεί σε μια ιδανική τιμή αντιστοιχιζόμενος σε μια θεωρία τριβής.



Σχήμα 2.6 Τυπική επιβράδυνση συναρτήσει του χρόνου ενός οχήματος που φρενάρει μετρούμενη στο κέντρο μάζας του οχήματος.

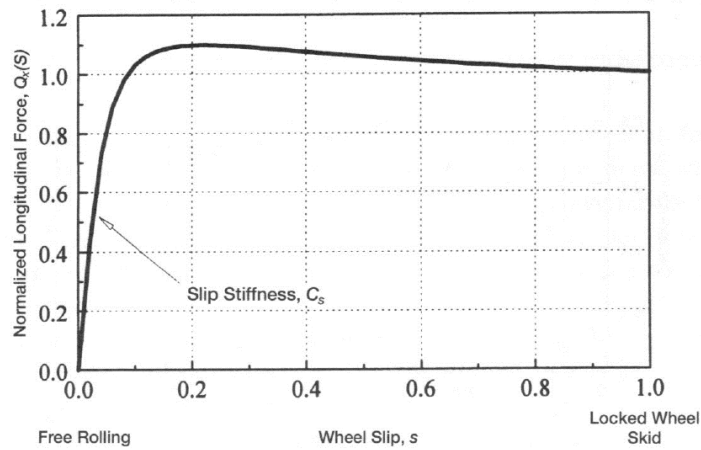
III3. Διαμήκης Δύναμη

Οι διαμήκεις δυνάμεις, τόσο η πρόσφυση όσο και η πέδησης είναι συναρτήσεις της ολίσθησης των τροχών δηλαδή $F_x = F_x(s)$. Θεωρώντας ένα κλειδωμένο τροχό ($s=1$), είναι γνωστό ότι ο τροχός αυτός παράγει μια δύναμη $F_x = f_x F_z$, όπου f_x είναι ο συντελεστής της τριβής ολίσθησης μεταξύ ελαστικού και εδάφους στην διαμήκη διεύθυνση. Αρκετές φορές είναι βολικό να λαμβάνουμε μια κανονικοποιημένη μορφή της F_x , η οποία συμβολίζεται με $Q_x(s)$ όπου

$$Q_x(s) = \frac{F_x(s)}{f_x F_z}$$

Αυτή η κανονικοποιημένη μορφή της δύναμης, έχει το πλεονέκτημα ότι εκτός από το ότι η προκύπτουσα δύναμη έχει όλα τα χαρακτηριστικά μιας διαμήκου δύναμης σε ελαστικό επιπλέον ισχύει $Q_x(s=1)=1$. Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει μια τυπική κατανομή κανονικοποιημένης δύναμης $Q_x(s)$.

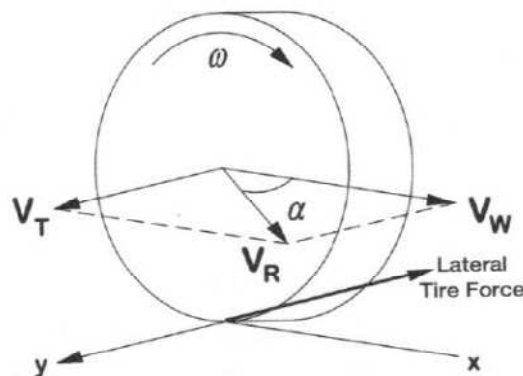
Αρχικά η δύναμη πέδησης αυξάνει γρήγορα με το s και είναι σχεδόν γραμμική με κλίση C_s . Η κλίση της καμπύλης συχνά αναφέρεται και ως ακαμψία. Η $F_x(s)$ αυξάνει με ένα μη γραμμικό τρόπο καθώς το s ξεπερνά την τιμή 0,1. Η δύναμη πέδησης μειώνεται καθώς η ολίσθηση s αυξάνεται πέρα από την τιμή 0,3. Το σχήμα της καμπύλης καθώς και το μέγιστο αυτής είναι και ο βασικός λόγος του anti-lock συστήματος πέδησης.



Σχήμα 2.7 Τυπική κανονικοποιημένη διαμήκης δύναμη

III.4. Πλευρική Δύναμη

Αυτή η δύναμη εμφανίζεται στο επίπεδο του σημείου επαφής, είναι παράλληλη στον άξονα περιστροφής, κάθετη στην κατεύθυνση του τροχού στην διεύθυνση που αντιτίθεται στην εγκάρσια ταχύτητα V_T , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Μέσω αυτής της δύναμης επιτυγχάνεται ο έλεγχος της κατεύθυνσης ενός οχήματος.



Σχήμα 2.8 Πλευρική δύναμη και συνιστώσες ταχύτητας ενός τροχού που κινείται χωρίς κύλιση εφαρμόζοντας δεδομένη διεύθυνση στην είσοδο

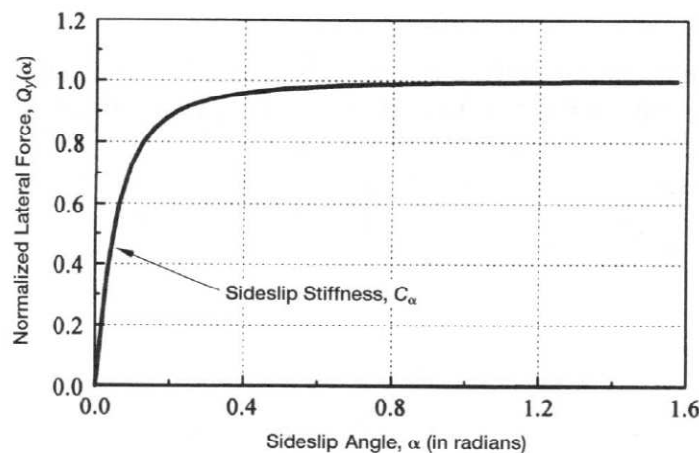
Κατά την διάρκεια ενός ελιγμού κατεύθυνσης η προκύπτουσα ταχύτητα V_R και η ταχύτητα του τροχού κατεύθυνσης διαφέρουν κατά γωνία α (γωνία ολίσθησης), ίση με:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_T}{V_W} \quad (2.4)$$

Για ένα τροχό που κινείται χωρίς κύλιση, η πλευρική δύναμη είναι μη γραμμική συνάρτηση της γωνίας ολίσθησης και επιπλέον εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η ταχύτητα, η θερμοκρασία κ.α που όμως δεν εξετάζονται εδώ. Για $\alpha=0$ δηλαδή για μηδενική πλευρική ταχύτητα, η ταχύτητα του τροχού είναι ευθυγραμμισμένη με την κατεύθυνση του τροχού. Όταν $\alpha=\pi/2$, η δύναμη ισούται με $F_y=f_y F_z$. Μια κανονικοποιημένη μορφή της δύναμης δίνεται από την σχέση:

$$Q_y(\alpha) = \frac{F_y(\alpha)}{f_y F_z} \quad (2.5)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μορφή της κανονικοποιημένης πλευρικής δύναμης κατ' αναλογία με όσο αναφέρθηκαν στις προηγούμενη ενότητα. Εύκολα φαίνεται ότι το $Q_y(\alpha)$ αυξάνει γραμμικά με το α , για μικρές τιμές αυτού ενώ η κανονικοποιημένη δύναμη προσεγγίζει την μονάδα καθώς $\alpha \rightarrow \pi/2$. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι αν και από την θεωρία του Coulomb θα έπρεπε $f=f_x=f_y$ στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει.

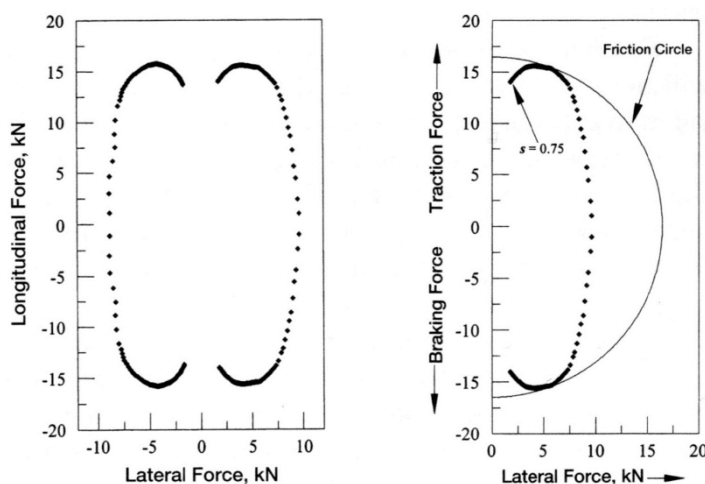


Σχήμα 2.9 Τυπική κανονικοποιημένη πλευρική δύναμη

IV. Friction Circle και Friction Ellipse

Στην παρούσα υποπαράγραφο εξετάζουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε ένα ελαστικό στο επίπεδο του οδοστρώματος F_x , F_y όχι ανεξάρτητα όπως στις προηγούμενες παραγράφους, αλλά θεωρώντας ότι δρουν ταυτόχρονα στο σημείο επαφής όπως όταν ένα όχημα φρενάρει ενώ κατευθύνεται. Η διαμήκης δύναμη F_x , σχεδιάζεται στον κατακόρυφο άξονα ενώ η πλευρική δύναμη F_y στον οριζόντιο άξονα ενώ η ολίσθηση s και η γωνία εκτροπής α είναι παράμετροι. Στο σχήμα 2.10 (αριστερά), η δύναμη πέδησης δρα προς το κάτω μέρος της σελίδας (δυναμική επιβράδυνση) ενώ η πλευρική δύναμη δρα προς τα δεξιά (προκαλώντας το αυτοκίνητο να στρίψει αριστερά).

Στο σχήμα 2.10 (δεξιά) αναπαρίσταται η κατάσταση στην οποία το ελαστικό εκτελεί κίνηση χωρίς ολίσθηση και απουσία επιβαλλόμενης κατεύθυνσης. Ο θετικός κατακόρυφος άξονας αναπαριστά την ελκτική δύναμη που δρα όταν το αυτοκίνητο επιταχύνεται. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί είναι fF_z . Ο αρνητικός κατακόρυφος άξονας αναπαριστά την δύναμη πέδησης. Ο θετικός οριζόντιος άξονας αναπαριστά την πλευρική δύναμη στο σημείο επαφής δρώντας κάθετα στον τροχό-οδηγό για θετική γωνία ολίσθησης. Η μέγιστη δύναμη σε αυτή την κατεύθυνση είναι fF_z . Υποθέτωντας ότι $f_x=f_y$, τότε τα τρία σημεία μέγιστης δύναμης επιτρέπουν την χρήση ενός κύκλου ως δείκτη της μέγιστης δύναμης που μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα σημείο επαφής για κάθε συνδυασμό s και α . Αυτή η κατασκευή καλείται friction circle.

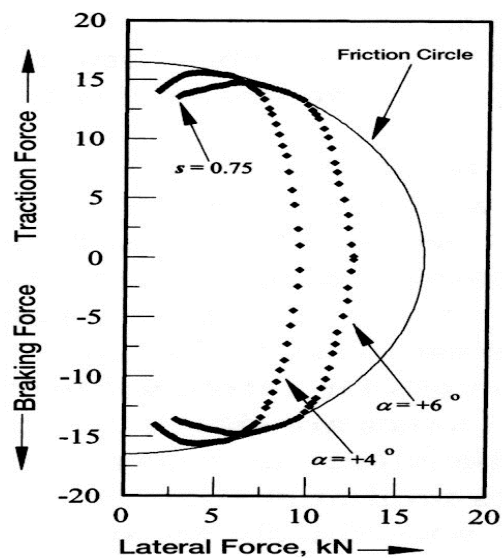


Σχήμα 2.10 Αριστερά: Πειραματικά δεδομένα που δείχνουν την εξάρτηση των δυνάμεων πέδησης και της εφαρμοζόμενης διεύθυνσης για $\alpha=\pm 4^\circ$, $0 \leq s \leq 0.75$ και $F_z=20.6\text{kN}$ Δεξιά: Friction circle για σετ δεδομένων $\alpha=\pm 4^\circ$, $0 \leq s \leq 0.75$ και $F_z=20.6\text{kN}$

Το πιο ενδιαφέρον είναι ότι για κάθε συνδυασμό s και α , εφόσον η συνισταμένη δύναμη των F_x , F_y είναι μικρότερη από την συνολική διαθέσιμη δύναμη τριβής, fF_z , το ελαστικό εξακολουθεί να παρακολουθείται επιτρέποντας τον έλεγχο της κατεύθυνσης του αυτοκινήτου. Εάν όμως η

συνισταμένη είναι ίση με την συνολική δύναμη τριβής άρα στην περίμετρο του friction circle, τότε το ελαστικό ολισθαίνει και χάνεται ο έλεγχος. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται κορεσμός, ενώ η διεύθυνση της συνισταμένης δύναμης σε αυτή τη περίπτωση είναι αντίθετη της V_R . Όπως όμως έχει ήδη αναφερθεί πρακτικά $f_x \neq f_y$ αν και εμείς θεωρήσαμε πως είναι ίσα για την διατύπωση των παραπάνω.

Ωστόσο, εξαιτίας αυτής της διαφοράς των τιμών η έννοια του friction circle μετασχηματίζεται σε friction ellipse. Η friction ellipse καθορίζεται από τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που αναπαριστούν το μέγιστο μέτρο της συνδυασμένης δύναμης για δοσμένη γωνία εκτροπής και ένα εύρος διαμήκους ολίσθησης. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.11 Διαμήκης δύναμη συναρτήσεις της πλευρικής για $\alpha=4^\circ$ και 6° , $0 \leq s \leq 0.75$

Μια έκφραση για την friction ellipse μπορεί να αναπτυχθεί βασιζόμενη στις δυνάμεις στα ελαστικά στο σημείο επαφής $F_x(a,s)$, $F_y(a,s)$, F_z , και τους συντελεστές τριβής f_x , f_y . Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις

$$\frac{F_y^2(a,s)}{f_y^2 * F_z^2} + \frac{F_x^2(a,s)}{f_x^2 * F_z^2} \leq 1 \quad (2.6)$$

Η ανισότητα στην σχέση υποδεικνύει ότι εφόσον η συνολική δύναμη παραμένει εντός της έλλειψης διατηρείται ο έλεγχος του οχήματος. Επειδή $F_x = -F \cos \alpha$, $F_y = -F \sin \alpha$, $\beta_F = \alpha$ λαμβάνουμε τον παρακάτω τύπο

$$\frac{F^2 * \cos^2 a}{f_x^2 * F_z^2} + \frac{F^2 * \sin^2 a}{f_y^2 * F_z^2} = 1 \quad (2.7)$$

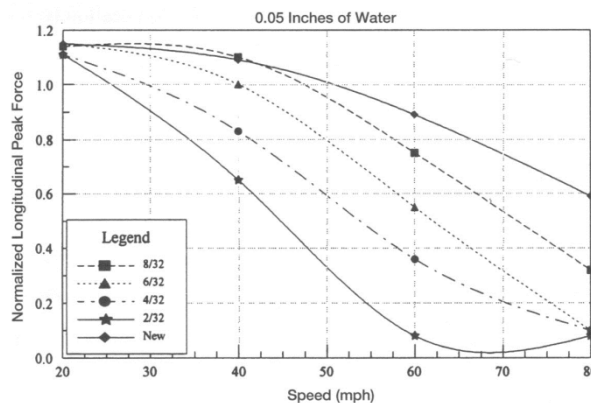
Και εφόσον έχουμε ολίσθηση $F=fF_z$, οπότε καταλήγουμε τελικά στην σχέση

$$f = \frac{f_x * f_y}{\sqrt{f_x^2 * \sin^2 a + f_y^2 \cos^2 a}} \quad (2.8)$$

Με βάση την σχέση αυτή είναι δυνατός ο προσδιορισμός του συντελεστή τριβή ολίσθησης για κάθε συνδυασμό f_x, f_y και a , ενώ η τριβή ολίσθησης υπολογίζεται για μια δοσμένη τιμή F_z .

Παρατήρηση

Η παρουσίαση όλων των παραπάνω δυνάμεων βασίστηκε στην συμπεριφορά και σε δεδομένα πραγματικών ελαστικών σε πραγματικές επιφάνειες υπό καλές συνθήκες τριβής. Ωστόσο, σε ελαστικά που εμπλέκονται σε ατυχήματα, δεν ισχύουν πάντα αυτές οι συνθήκες εννοώντας ότι η επιφάνεια ενδεχομένως δεν είναι ιδανική (υγρή, παγωμένη) μειώνοντας την ικανότητα ανάπτυξης δύναμης. Σημαντικό ρόλο παίζουν και άλλοι παράγοντες όπως η ταχύτητα του οχήματος, το επίπεδο φθοράς των ελαστικών ακόμα και το βάθος του πέλματος του ελαστικού ή το βάθος του νερού. Αυτές οι συνθήκες έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ικανότητας ανάπτυξης πλευρικών ή διαμήκων δυνάμεων στον τροχό δηλαδή αδυναμία πέδησης ή ελεγχου κατεύθυνσης του τροχού. Ενδεικτικά παρατίθεται και ένα διάγραμμα όπου φαίνονται τα παρακάτω



Σχήμα 2.12 Κανονικοποιημένη διαμήκης δύναμη (peak τιμές) με 0.05 ίντσες νερού καθώς το βάθος του πέλματος μεταβάλλεται συναρτήσει της ταχύτητας

Κεφάλαιο Τρίτο

Ευθύγραμμη Κίνηση

I. Ομοιόμορφη επιτάχυνση και κίνηση πέδησης

Σύμφωνα με τους νόμους του Νεύτωνα γνωρίζουμε ότι ένα κινούμενο όχημα στην κατεύθυνση x , με ταχύτητα \dot{x} και επιτάχυνση \ddot{x} , έχει εξίσωση κίνησης που δίνεται από την σχέση

$$m * \ddot{x} = F_{\Sigma} \quad (3.1)$$

Όπου m είναι η μάζα του οχήματος και F_{Σ} η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα στην κατεύθυνση x . Η κίνηση στον άξονα x , υποδηλώνει ότι το όχημα δεν έχει εκτροπή ή γαν. Μερικές από τις δυνάμεις που περιλαμβάνονται στην συνισταμένη F_{Σ} , είναι η «έλξη» μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος (προερχόμενη από πέδηση ή ροπή του κινητήρα), η αντίσταση κύλισης, δυνάμεις πρόσκρουσης κ.α. , οι οποίες σχεδόν πάντα είναι συνάρτηση του χρόνου και επομένως απαιτείται ολοκλήρωση ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας και της μετατόπισης.

I1. Εξισώσεις σταθερής επιτάχυνσης

Έστω ότι $\ddot{x}=a$ όπου a σταθερά. Με ολοκλήρωση της εξίσωσης 3.1 λαμβάνεται η ταχύτητα ως συναρτήση του χρόνου,

$$\dot{x}(\tau) = u_0 + a\tau \quad (3.2)$$

Οπότε με ολοκλήρωση της 3.2 προκύπτει η εξίσωση

$$x(\tau) = x_0 + u_0\tau + \frac{a\tau^2}{2} \quad (3.3)$$

Όπου u_0 και x_0 , η αρχική ταχύτητα και μετατόπιση αντίστοιχα.

Μια ακόμη σχέση για την μετατόπιση προκύπτει από την αλλαγή της κινητικής ενέργειας ενός κινούμενου οχήματος. Η αλλαγή στην κινητική ενέργεια πρέπει να είναι ίση με το έργο που παράγεται από την συνισταμένη εξωτερική δύναμη. Για ένα αυτοκίνητο που κινείται σε μια απόσταση $x-x_0$, με μια αλλαγή στην ταχύτητα $\dot{x}-u_0$, ισχύει η παρακάτω σχέση

$$\frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}mu_0^2 = ma(x - x_0) \quad (3.4)$$

ή

$$\dot{x}(\tau) = \sqrt{u_0^2 + 2a(x - x_0)} \quad (3.5)$$

Έαν ένα όχημα σταματήσει εντελώς με μια ομοιόμορφη επιβράδυνση $a = -fg$, από μια αρχική ταχύτητα u_0 μέσα σε ένα διάστημα $x-x_0=d$, τότε η απόσταση d δίνεται από την 3.4 και μάλιστα

$$d = -\frac{u_0^2}{2a} = -\frac{u_0^2}{2fg} \quad (3.6)$$

Ενώ από την εξίσωση 3.2 προκύπτει ο χρόνος τ , ώστε το όχημα να αποκτήσει ταχύτητα \dot{x} δίνεται από την σχέση

$$\tau = \frac{\dot{x} - u_0}{a} \quad (3.7)$$

Μια άλλη έκφραση για τον χρόνο τ μπορεί επίσης να ληφθεί από την επίλυση της εξίσωσης 3.3 ως εξής:

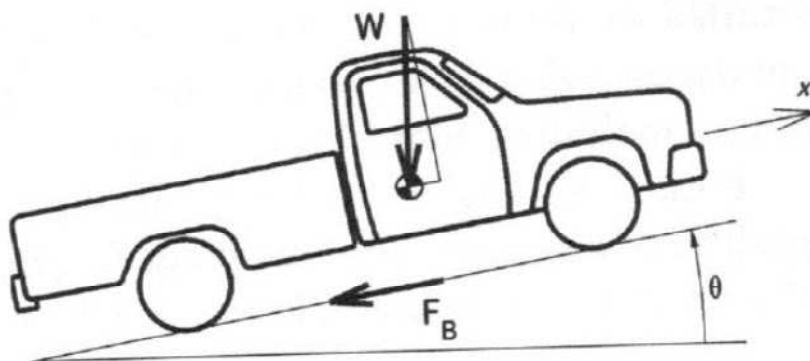
$$\tau = -\frac{u_0}{a} \pm \sqrt{\left(\frac{u_0}{a}\right)^2 + \frac{2(x - x_0)}{a}} \quad (3.8)$$

Σημείωση

Έμφαση πρέπει να δοθεί στην περίπτωση που ένα όχημα φρενάρει σε οδόστρωμα υπό κλίση, η βαρύτητα επηρεάζει την επιτάχυνση. Η κλίση του οδοστρώματος προκύπτει από την φωνία του δρόμου ως προς τον οριζόντιο άξονα και έχει μονάδες είτε μοίρες είτε %. Για θετική κλίση (ανηφορικός δρόμος), η βαρύτητα εξουδετερώνει την επιτάχυνση ενώ όταν η κλίση είναι αρνητική η βαρύτητα ενισχύει την επιτάχυνση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ορίζουμε ένα ισοδύναμο συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας f_{eq} , για να λάβουμε υπόψιν το φαινόμενο αυτό. Έτσι η επιτάχυνση εξαιτίας πέδησης ισούται με $a = -f_{eq} * g$ όπου

$$f_{eq} = f \cos \theta + \sin \theta \quad (3.9)$$

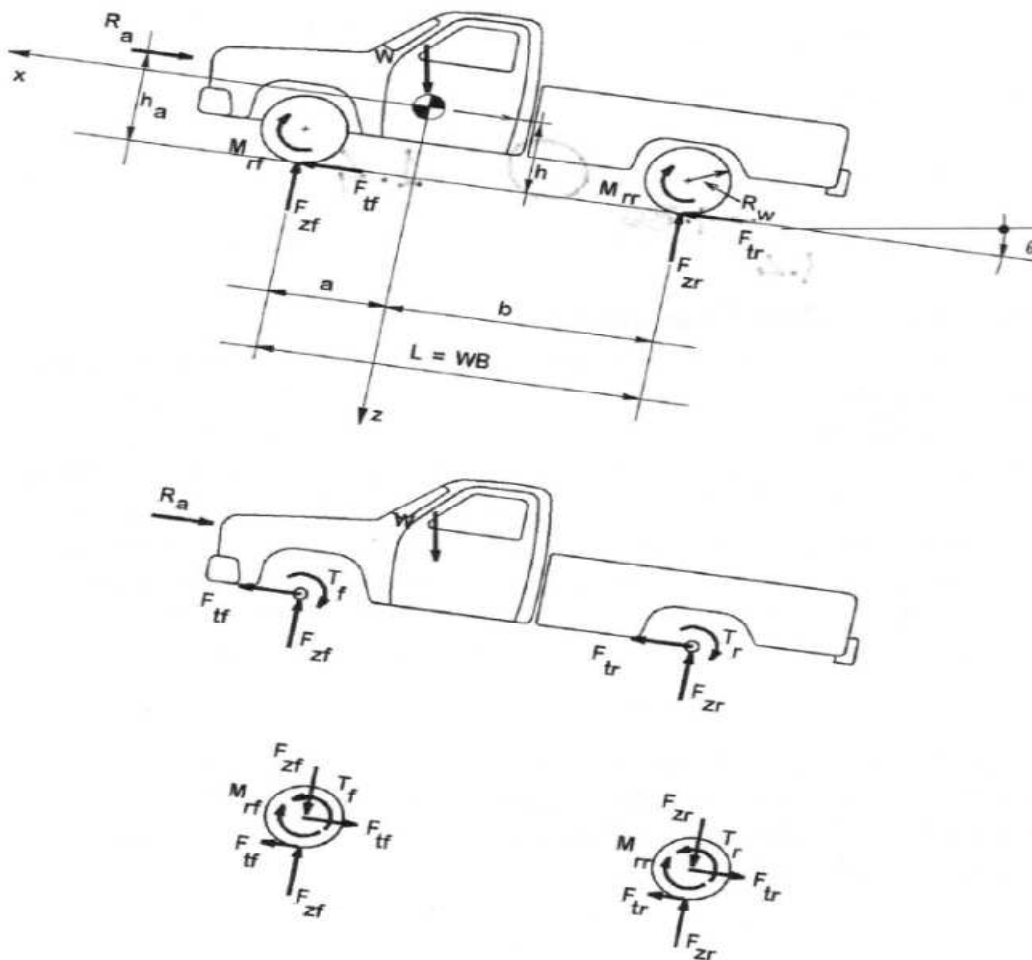
Όπου θ είναι η κλίση σε μοίρες και f ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας για μηδενική κλίση. Το θ είναι θετικό για ανηφορικό οδόστρωμα και αρνητικό για κατηφορικό.



Σχήμα 3.1 Δυνάμεις βαρύτητας και πέδησης σε ένα όχημα που φρενάρει σε κεκλιμένο έδαφος, γωνίας θ

II. Εξισώσεις οχήματος που η κίνηση μεταδίδεται από τους μπροστινούς τροχούς

Είναι γνωστό ότι μερικά οχήματα μεταδίδουν την ισχύ της μηχανής μέσω των μπροστινών τροχών(FWD), άλλα μέσω των πίσω τροχών(RWD) και κάποια βέβαια μέσω και των τεσσάρων τροχών (4WD). Επομένως η ροπή είναι δυνατόν να μεταδοθεί με διάφορους τρόπους από τους τροχούς στο οδόστρωμα. Επίσης η κάθετη δύναμη στους μπροστά και πίσω τροχούς διαφέρει με την κατανομή του βάρους του αυτοκινήτου και την επιτάχυνσή του. Το είδος της κατανομής μάλιστα μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν εμφανίζονται βλάβες(π.χ όταν δεν λειτουργήσουν τα φρένα) και οι προηγούμενες εξισώσεις για σταθερή επιτάχυνση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στο σχήμα 3.2 παρακάτω φαίνονται οι δυνάμεις που δρουν σε ένα όχημα υπό λογικές συνθήκες καθώς επίσης και διαγράμματα των μπροστινών και των πίσω τροχών του οχήματος



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός οχήματος και κινητήρια στοιχεία

A_f	Frontal area of vehicle
c_R	Coefficient of vehicle tire rolling resistance
c_D	Aerodynamic drag coefficient
F_t	Traction force
F_y	Normal force at tire–pavement contact
h	Height of vehicle center of gravity from pavement
h_a	Height of the aerodynamic drag force
I	Vehicle pitch moment of inertia
I_w	Moment of inertia of wheels and axle system
m	Mass of vehicle = W/g
m_w	Mass of wheels and axle system
M_r	Rolling resistance moment
R_a	Aerodynamic drag force
R_w	Rolling radius of tire and wheel
T	Wheel torque
V_r	Relative velocity of vehicle and air
W	Vehicle weight
α	Angular displacement of wheel
ρ	Air density

Note: Subscript f indicates front; subscript R indicates rolling; subscript r indicates rear.

Πίνακας 3.1 Συμβολισμός για τις παραμέτρους των εξισώσεων

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Νεύτωνα για την επιτάχυνση στις διευθύνσεις x, z και θ λαμβάνουμε αντίστοιχα:

$$m\ddot{x} = F_{tf} + F_{tr} - R_a - W \sin \theta \quad (3.10)$$

$$m\ddot{z} = 0 = F_{zf} + F_{zr} - W \cos \theta \quad (3.11)$$

$$I\ddot{\theta} = 0 = (h_a - h)R_a + T_f + T_r + \alpha F_{zf} - bF_{zr} + (h - R_w)F_{tf} + (h - R_w)F_{tr} \quad (3.12)$$

Επίσης για τις εξισώσεις γωνιακές ταχύτητες των ανεξάρτητων τροχών, $\ddot{\alpha}$, ισχύουν οι εξής σχέσεις

$$I_{\omega f}\ddot{\alpha}_f = M_{rf} - T_f + R_w F_{tf} \quad (3.13)$$

$$I_{\omega r}\ddot{\alpha}_r = M_{rr} - T_r + R_w F_{tr} \quad (3.14)$$

Όπου $I_{\omega f}, I_{\omega r}$ είναι ροπές αδράνειας των εμπρός και πίσω περιστρεφόμενων τμημάτων

Με το σύμβολο T , ορίζεται η εφαρμοζόμενη ροπή εμπρός και πίσω με τους αντίστοιχους δείκτες f και r ενώ με M συμβολίζεται η περιστροφική οπισθέλκουσα εξαιτίας της κύλισης των μπροστινών ή πίσω τροχών (M_{rf}, M_{rr} αντίστοιχα) πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Μόνη εξαίρεση αποτελούν περιπτώσεις περιστροφής πάνω σε πάγο όπου οι γωνιακές επιταχύνσεις είναι τόσο μικρές που μπορούν να αμεληθούν, οπότε και οι σχέσεις 3.13 και 3.14 γίνονται:

$$T_f = M_{rf} + R_w F_{tf} \quad (3.15)$$

$$T_r = M_{rr} + R_w F_{tr} \quad (3.16)$$

Προκύπτει τελικά ότι οι κάθετες δυνάμεις που ασκούνται στους μπροστινούς και πίσω τροχούς είναι ίσες με:

$$F_{zf} = \frac{1}{a+b} \left[bW \cos\theta - (h_a - h)R_a + (h - R_w)c_R W - \frac{h}{R_w}(T_f + T_r) \right] \quad (3.17)$$

$$F_{zr} = \frac{1}{a+b} \left[aW \cos\theta - (h_a - h)R_a + (h - R_w)c_R W + \frac{h}{R_w}(T_f + T_r) \right] \quad (3.18)$$

Όπου η αντίσταση κύλισης όλων των τροχών εκφράζεται μέσω της F_R ,

$$F_R = c_R W = \frac{M_{rf} + M_{rr}}{R_w} \quad (3.19)$$

Στην περίπτωση που είτε οι μπροστινοί είτε οι πίσω τροχοί κλειδώσουν τότε οι γωνιακές επιταχύνσεις καθώς και το περιστροφική οπισθέλκουσα μηδενίζονται άρα από τις σχέσεις 3.13 και 3.14 λαμβάνουμε

$$T_f = R_w F_{tf} \quad (3.20)$$

$$T_r = R_w F_{tr} \quad (3.21)$$

Ενώ για τις τριβές οπισθέλκουσας για κλειδωμένους τροχούς έχουμε:

$$F_{tf} = -f_f F_{zf} \quad (3.22)$$

$$F_{tr} = -f_r F_{zr} \quad (3.23)$$

Οπότε τελικά για τις κατακόρυφες δυνάμεις στους μπροστά και πίσω τροχούς είναι:

$$F_{zf} = \frac{(b + hf_r)W \cos\theta - (h_a - h)R_a}{a + b - h(f_f - f_r)} \quad (3.24)$$

$$F_{zr} = \frac{(a - hf_r)W \cos\theta - (h_a - h)R_a}{a + b - h(f_f - f_r)} \quad (3.25)$$

III. Απόσταση Ακίνητοποίησης

Στο πεδίο της ανακατασκευής ατυχημάτων, η απόσταση πέδησης και η απόσταση ακίνητοποίησης συνήθως θεωρούνται διαφορετικές. Η απόσταση ακίνητοποίησης είναι η απόσταση που απαιτείται από τον οδηγό για να σταματήσει ένα όχημα που κινείται ευθύγραμμα μέσω επιβολής πέδησης και περιλαμβάνει την διανυόμενη απόσταση κατά τον χρόνο αντίληψης-απόφασης- δράσης πριν την επιβολή της πέδησης στο όχημα. Η απόσταση πέδησης είναι η διανυόμενη απόσταση όσο εφαρμόζονται τα φρένα επομένως η απόσταση αυτή είναι κομμάτι ή στοιχείο της απόστασης ακίνητοποίησης. Το κίνητρο για την παύση της κίνησης του οχήματος μπορεί να είναι ένα οδικό σήμα ή κάτι αναπάντεχο όπως ένας πεζός που εμφανίζεται ξαφνικά και όπως είναι λογικό μια σειρά γεγονότων λαμβάνουν χώρα στον οδηγό πριν σταματήσει το όχημα.

Συνήθως ως χρόνος αντίδρασης (reaction time) θεωρείται ο χρόνος αντίληψης, απόφασης και αντίδρασης (PDR) και ο οποίος μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες και τις περιστάσεις. Τέτοιοι παράγοντες μπορούν να είναι ο καιρός, η κίνηση, η εμπειρία οδήγησης, το φύλο, η ηλικία κ.α. Επειδή όμως είναι πρακτικά αδύνατον να αναπαρασταθεί με ακρίβεια ο χρόνος αυτός λόγω των πολυάριθμων παραμέτρων λαμβάνεται συνήθως μια τιμή μεταξύ 0.5 και 2.5 sec (τυπικά 1.5 sec) ή πιο σωστά ένα εύρος τιμών (για περιορισμό της αβεβαιότητας)

Εάν την χρονική στιγμή $t=0$, για ένα όχημα που κινείται με ταχύτητα u_0 , ο οδηγός αντιληφθεί ένα συμβάν και τ_{PDR} και τ_b , οι χρόνοι για την επιβολή πέδησης και ακίνητοποίησης του οχήματος τότε ο χρόνος ακίνητοποίησης του οχήματος είναι

$$\tau_s = \tau_{PDR} + \tau_b$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιβολή πέδησης στο όχημα, δεν μπορεί να θεωρηθεί στιγμιαία και εξαρτάται από το είδος του οχήματος, τον τύπο των φρένων κ.α.

Γενικά πάντως δύο σενάρια συναντώνται στην ανακατασκευή ατυχημάτων. Το πρώτο είναι όταν είναι γνωστές η αρχική ταχύτητα, η τριβή οπισθέλκουσας και ο τ_{PDR} ενώ ο χρόνος ακίνητοποίησης είναι άγνωστος και το δεύτερο όταν άγνωστη είναι η αρχική ταχύτητα του οχήματος. Ο υπολογισμός αυτών γίνεται με τις κάτωθι εξισώσεις:

$$d_s = u_0 \tau_{PDR} + \frac{u_0^2}{2fg} \quad (3.26)$$

$$\tau_s = \tau_{PDR} + \frac{u_0}{fg} \quad (3.27)$$

Και

$$u_0 = fg \left[-\tau_{PDR} + \sqrt{\tau_{PDR}^2 + \frac{2d_s}{fg}} \right] \quad (3.28)$$

Κεφάλαιο Τέταρτο

Κρίσιμη ταχύτητα από τα σημάδια εκτροπής των ελαστικών

I. Εισαγωγικά Στοιχεία

Τα σημάδια εκτροπής είναι κυρτά σημάδια από ένα ή περισσότερα ελαστικά πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος που προκαλούνται από ένα κινούμενο όχημα, το οποίο εκτελεί μια ξαφνική στροφή με μια σχετικά υψηλή ταχύτητα. Οι εμπρός και πίσω τροχοί δεν ακολουθούν ο ένας τον άλλο πάνω στο ίδιο μονοπάτι. Συχνά αυτά τα σημάδια, είναι το αποτέλεσμα ελιγμών αποφυγής, όπου ο οδηγός αντιλαμβάνεται ένα εμπόδιο ή ένα κίνδυνο μπροστά από το όχημα και εκτελεί «στραβοτιμονιά» ξαφνικά είτε προς τα δεξιά είτε προς τα αριστερά. Τέτοια σημάδια μπορούν επίσης να προκύψουν και από μια ξαφνική ταχύτητα εκτροπής ενώ αυτά τα σημάδια μπορούν να προηγούνται μιας ανατροπής ενός οχήματος δηλαδή της απώλειας ελέγχου του οχήματος. Η ταχύτητα στην αρχή ενός τέτοιου ελιγμού μπορεί να υπολογιστεί από τα σημάδια και συχνά αναφέρεται ως κρίσιμη ταχύτητα. Για τον σκοπό της ανακατασκευής του ατυχήματος, ένα τμήμα του κυρτού σημαδιού θεωρείται κυκλικό τόξο, ενώ στους υπολογισμούς γίνεται χρήση της ακτίνας του τόξου και του συντελεστή τριβής στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

Γενικά υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού της κρίσιμης ταχύτητας. Οι περισσότεροι έχουν την μορφή εξίσωσης, ωστόσο κάποιοι άλλοι απαιτούν την χρήση προσομοιώσεων δυναμικής οχημάτων. Η πιο απλή μορφή είναι μια εξίσωση που ονομάζεται «τύπος κρίσιμης ταχύτητας» αν και πιο προηγμένες τεχνικές λαμβάνονται υπόψιν ακόμα και ιδιότητες και χαρακτηριστικά των ελαστικών και των οχημάτων εκτός των άλλων. Η σχέση που δίνει την κρίσιμη ταχύτητα είναι $V_{cr} = \sqrt{g f R}$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, f ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας και R η ακτίνα του κυκλικού μονοπατιού. Ωστόσο, η χρήση αυτής της εξίσωσης είναι αμφιλεγόμενη απο θεωρητική και απο πειραματικής άποψης. Ο λόγος είναι ότι για την χρήση της γίνονται παραδοχές όπως ότι το όχημα είναι μια σημειακή μάζα, ότι διασχίζει το κυκλικό μονοπάτι με σταθερή ταχύτητα που ωστόσο δεν ισχύουν. Πειραματικά δεδομένα έδειξαν επίσης ότι η ταχύτητα μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την υπολογιζόμενη μέσω της εξίσωσης, υποδεικνύοντας ωστόσο ότι εφόσον η εξίσωση χρησιμοποιηθεί σωστά τότε οδηγεί σε λογικά και με καλή ακρίβεια αποτελέσματα ($\pm 10\%$).

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στο παρόν κεφάλαιο, περιοριζόμαστε στον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας σε περιπτώσεις απότομων ελιγμών και μόνο, καθότι σημάδια εκτροπής μπορούν να δημιουργηθούν με ποικίλους τρόπους (π.χ. ανάπτυξη yaw spin λόγω σύγκρουσης με άλλο όχημα, ανάπτυξη διαφορετικής τριβής οπισθέλκουσας στους εμπρός και πίσω τροχούς λόγω απότομης πέδησης κ.α.)

Κλείνοντας, αξίζει να αναφερθεί ότι και οι πιο ανεπτυγμένες μέθοδοι προσομοίωσης εμφανίζουν μειονεκτήματα καθώς πολλές φορές απαιτούν παραμέτρους που είναι δύσκολο να υπολογιστούν ή προσδιοριστούν ενώ πολλές φορές δεν έχει πειραματικά αποδειχθεί η ακρίβειά τους ή τυχόν περιορισμοί. Επιπλέον δεν υπάρχουν πολλές μελέτες που να καθορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες ένα ελαστικό που «ντεραπάρει» αφήνει ορατά σημάδια στο οδόστρωμα. Εν γένει όμως μέθοδοι προσομοίωσης είναι επιθυμητές σε περιπτώσεις επιφανειών με 2 ή και περισσότερους συντελεστές τριβής.

II. Σημάδια εκτροπής

Όταν ένα όχημα που κινείται με μια μεγάλη σχετικά ταχύτητα (πρακτικά πάνω από 30m/h), υποστεί μια απότομη αλλαγή διεύθυνσης (ελιγμός) προς μια άλλη κατεύθυνση, το εμπρός τμήμα του οχήματος αλλάζει διεύθυνση προς την επιβαλλόμενη από τον οδηγό και το πίσω μέρος, «ταλαντεύεται» προς την αντίθετη με αποτέλεσμα το όχημα να αναπτύσσει μια σημαντική γωνία εκτροπής αλλά και γωνιακή ταχύτητα. Εφόσον, ο ελιγμός είναι απότομος αρκετά κάθε ελαστικό αναπτύσσει μια διαφορετική γωνία εκτροπής. Εάν επιπρόσθετα το έδαφος είναι σκληρό και η ασκούμενη δύναμη στα ελαστικά επαρκώς μεγάλη, τότε δημιουργούνται στο έδαφος κυρτά σημάδια, διαφορετικά από κάθε ελαστικό εξαιτίας της διαφορετικής γωνίας.



Σχήμα 4.1 Σημάδια απο ελαστικά που δημιουργήθηκαν πειραματικά από όχημα μάρκας Ford (μοντέλο Taurus) με αρχική ταχύτητα 83.7 km/h

Η διαδικασία δημιουργίας τέτοιων σημάδιων είναι μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος και εξαρτάται από παράγοντες όπως η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης, η ταχύτητα, τα χαρακτηριστικά του οχήματος, η πίεση των ελαστικών κ.α. Επειδή το φαινόμενο της εκτροπής των ελαστικών είναι μια συνεχής διαδικασία, η υπόθεση πως ο συντελεστής τριβής είναι σταθερός δεν είναι αληθής. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός, ότι το σημάδια εμφανίζονται πάνω από το σημείο επαφής καθώς η κυρτή περιμετρική επιφάνεια του ελαστικού συναντάει την επίπεδη επιφάνεια του οδοστρώματος.

Η ένταση των σημαδιών εκτροπής εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος, το υλικό και την κατάσταση του οδοστρώματος ενώ συχνά διαφέρει και μεταξύ των πλευρών ενός οχήματος και εμπρός και πίσω λόγω της αδρανειακής μεταφοράς φορτίου, του είδους και της κατάστασης του συστήματος αναρτήσης κ.α. Συνήθως το ελαστικό που βρίσκεται μπροστά (δεξιά για αριστερή στροφή ή αριστερά για δεξιά στροφή) αφήνει το πιο εντόνο σημάδι. Όταν σημάδια εκτροπής συναντώνται σε ένα τόπο ατυχήματος, προσφέρουν στοιχεία για τον υπολογισμό της forward ταχύτητας. Γενικά, εάν τέτοια σημάδια είναι ορατά τότε τα ελαστικά είχαν μια μεγάλη εκτροπή και έφτασαν όριο τριβής.

III1. Ακτίνα από Σημάδια Εκτροπής

Η ακτίνα R , ενός σημαδιού εκτροπής προερχόμενο από ένα ελαστικό μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τουλάχιστον δύο μεθόδους. Η πρώτη είναι η μέτρηση των συντεταγμένων τριών σημείων κατά μήκος του τόξου του σημαδιού, σε σχέση με ένα σταθερό σημείο αναφοράς. Η εξίσωση ενός κύκλου μπορεί να γραφεί με χρήση των σημείων αυτών ως εξής:

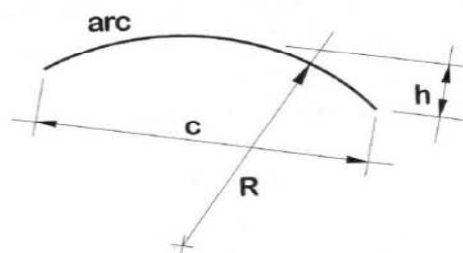
$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = R^2, i = 1,2,3 \quad (4.1)$$

Όπου a, b οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και x_i, y_i οι μετρούμενες συντεταγμένες και R η ακτίνα. Απαλείφοντας την ακτίνα από την παραπάνω εξισώσεις για $i=1,2$ και όμοια για $i=2,3$ προκύπτουν οι κάτωθι εξισώσεις

$$\begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} (x_1^2 - x_2^2)/2 & y_1^2 - y_2^2/2 \\ (x_2^2 - x_3^2)/2 & y_2^2 - x_3^2/2 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Οπότε και η εξίσωση αυτή μπορεί να λυθεί ως προς a και b ενώ με αντικατάσταση αυτών στην 4.1 για τις τιμές του i δίνει την ακτίνα R .

Ένας δεύτερος τρόπος υπολογισμού της ακτίνας του τόξου είναι μετρώντας το μήκος μιας χορδής c μεταξύ δύο σημείων του τόξου και της μέσης τεταγμένης, h . Αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.2 Κυκλικό τόξο με ακτίνα R , μήκος χορδής c , μέσης τεταγμένης h

Η ακτίνα R μπορεί τότε να υπολογιστεί από την σχέση:

$$R = \frac{c^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (4.3)$$

III. Κρίσιμη Ταχύτητα

Δύο μορφές του τύπου για την κρίσιμη ταχύτητα παρουσιάζονται παρακάτω. Ο πρώτος είναι η απλή εξίσωση για την κρίσιμη ταχύτητα που βρίσκει εφαρμογή σε επίπεδες επιφάνειες ενώ ο δεύτερος σε οδοστρώματα με σημαντική κλίση (superelevation)

III.1. Εξίσωση κρίσιμης ταχύτητας

Εάν μια σημειακή μάζα κινείται με μια ταχύτητα V , εφαπτόμενη σε ένα κυκλικό μονοπάτι με ακτίνα R εμφανίζει μια κεντρομόλο επιτάχυνση V^2/R και απαιτεί μια αντίστοιχη ακτινική δύναμη, $F_r = m V^2/R$, ώστε να συνεχίσει να κινείται στο κυκλικό μονοπάτι. Για ένα όχημα με τέσσερις τροχούς που κινείται σε ένα τέτοιο μονοπάτι, η F_r «τροφοδοτείται» από την τριβή με ένα συντελεστή f μεταξύ των ελαστικών και της επιφάνειας του δρόμου.

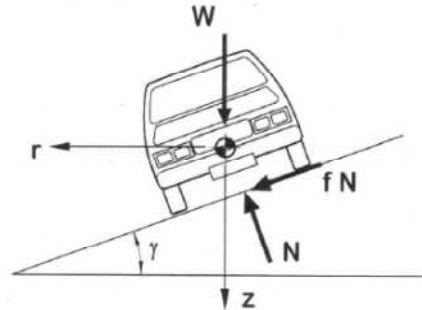
Εάν η ταχύτητα αυξηθεί αρκετά εμφανίζεται ακτινική ολίσθηση και η F_r είναι κοντά στην τιμή ολίσθησης όπου $m V^2/R = fmg$. Αυτό συμβαίνει στην ταχύτητα

$$V_{cr} = \sqrt{gfR} \quad (4.4)$$

που ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα. Εάν το f και το R είναι γνωστά τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός της κρίσιμης ταχύτητας. Στην περίπτωση που ένα όχημα κινείται με μέτρια έως μεγάλη ταχύτητα και δεν κινείται σε κυκλικό μονοπάτι, αλλά υφίσταται ένα ξαφνικό ελιγμό που καταλήγει σε ένα σχεδόν κυκλικό μονοπάτι και την δημιουργία σημαδιών εκτροπής, τότε η εξίσωση 4.4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας του οχήματος στην αρχή δημιουργίας των σημαδιών.

III2. Οδόστρωμα με μεγάλη κλίση

Στην περίπτωση που έχουμε ένα όχημα με τις ίδιες συνθήκες όπως πριν, μόνο που ο δρόμος έχει μια σημαντική κλίση, η εξίσωση (4.4) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ένα όχημα για την περίπτωση που μελετάμε όπου γ είναι η γωνία ή κλίση του οδοστρώματος.



Σχήμα 4.3 Μπροσινή όψη ενός οχήματος που κινείται σε δρόμο με μεγάλη κλίση, γ .

Με εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα στην ακτινική διεύθυνση προκύπτει

$$m \frac{V^2}{R} = fN \cos \gamma + N \sin \gamma \quad (4.5)$$

Λόγω ισορροπίας στον άξονα z ισχύει

$$N = \frac{mg}{\cos \gamma - f \sin \gamma} \quad (4.6)$$

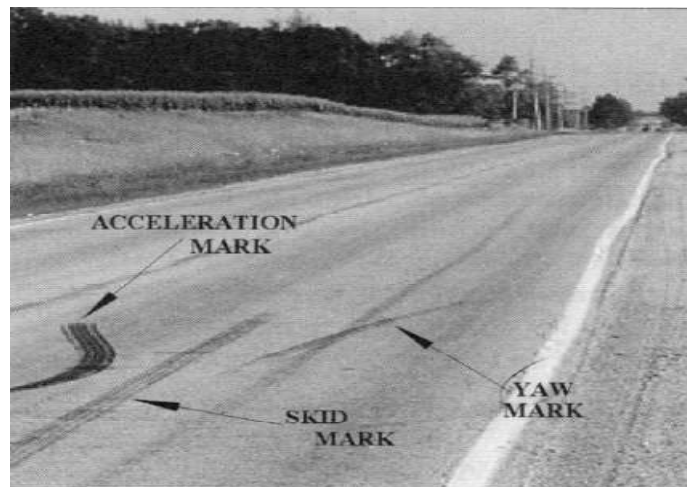
Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις έχουμε απαλοιφή της N και εν τέλει προκύπτει η κάτωθι σχέση

$$V_{cr} = \sqrt{gR \frac{f + \tan \gamma}{1 - f \tan \gamma}} = \sqrt{gR \frac{f + e}{1 - fe}} \quad (4.7)$$

Όπου με e συμβολίζεται το $\tan \gamma$. Η ταχύτητα αυτή είναι η μέγιστη που ένα όχημα μπορεί να έχει σε ένα κυρτό μονοπάτι με ακτίνα R χωρίς να έχει σημαντική ολίσθηση ή απώλεια ελέγχου. Εάν $e=0$, τότε καταλήγουμε στην εξίσωση 4.4 ενώ το γ γενικά μπορεί να έχει θετικές ή αρνητικές τιμές. Είναι επίσης εμφανές ότι η εξίσωση για την ταχύτητα ενός ξαφνικού ελιγμού και της μέγιστης ταχύτητας για μια σταθερή τροχιά-στροφή είναι ίδιες.

IV. Άλλα είδη κυρτών σημαδιών

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, κυρτά σημάδια από ελαστικά σε ένα οδόστρωμα μπορούν να δημιουργηθούν με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, σε χαμηλές ταχύτητες, ένας πίσω τροχός με τους μπροστινούς τροχούς στραμμένους μπορούν να δημιουργήσουν ένα κυρτό σημάδι με επιτάχυνση και ισχύ τέτοια ώστε να «περιστρέφουν» έναν από τους πίσω τροχούς. Τέτοια σημάδια επιτάχυνσης φαίνονται στο σχήμα 4.4 και συνήθως είναι από έναν μόνο τροχό και δεν παρουσιάζουν ραβδώσεις. Άλλου τύπου σημάδια, μπορούν να δημιουργηθούν από ένα όχημα που έχει κέντρο μάζας ταχύτητας σε ευθεία και υψηλή γωνιακή ταχύτητα. Γενικά σε όλες αυτές τις περιπτώσεις ο τύπος της κρίσιμης ταχύτητας δεν ισχύει.



Σχήμα 4.4 Απεικόνιση διαφόρων σημαδιών από ελαστικά επάνω σε ασφάλτινο δρόμο

Κεφάλαιο Πέμπτο

Αναπαράσταση τροχαίων ατυχημάτων με ανατροπή

I. Εισαγωγή

Ατυχήματα με ανατροπή συμβαίνουν συνήθως σε μεγάλες ταχύτητες και έχουν σοβαρές επιπτώσεις για τους επιβαίνοντες. Στην αναπαράσταση ενός τέτοιου ατυχήματος, το ζητούμενο είναι να καθοριστεί η ταχύτητα του οχήματος κατά την στιγμή που χάθηκε ο έλεγχος.

Ταυτόχρονα, είναι δυνατός και ο καθορισμός του αριθμού των φορών των περιστροφών του οχήματος (rolls), η θέση και ο προσανατολισμός του οχήματος κατά την διάρκεια των προσκρούσεων του οχήματος στο έδαφος κατά τις περιστροφές καθώς και το ρυθμό περιστροφής. Όλα αυτά τα μεγέθη είναι αναγκαία για μια λεπτομερή ανάλυση των παραμορφώσεων που εμφανίζονται στο όχημα μετά από ένα ατύχημα όπως επίσης και των κινήσεων των επιβαινόντων και των τραυματισμών που προκλήθηκαν.

Η ανατροπή ενός οχήματος μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις διαδοχικές φάσεις: την φάση πριν την απώλεια ελέγχου (pretrip phase), την φάση όπου ο έλεγχος χάνεται (trip phase) και την φάση της ανατροπής (roll-out phase). Σε αυτό το κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται τεχνικές για την ανακατασκευή ενός ολόκληρου ατυχήματος με ανατροπή ενός οχήματος μέσω ανάλυσης κάθε φάσης ξεχωριστά. Επειδή οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των φάσεων αυτών είναι λογικό να διαφέρουν κατά περίπτωση είναι λογικό να απαιτείται και η ανάλογη τροποποίηση των μεθόδων που θα αναλυθούν παρακάτω. Επίσης, ορίζεται η αρχή και το τέλος κάθε φάσης όπως και τεχνικές για την εύρεση της αλλαγής ταχύτητας του οχήματος κατά την διάρκεια των φάσεων αυτών.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί, πως όπως και για τα προηγούμενα κεφάλαια έτσι και εδώ οι τεχνικές που αναλύονται βρίσκουν εφαρμογή σε οχήματα με τέσσερις τροχούς εννοώντας συμβατικά αυτοκίνητα, μικρά φορτηγά, βαν. Ωστόσο, σε βαρέα φορτηγά, στρατιωτικά οχήματα, ημιρυμουλκούμενα κ.α λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών που φέρουν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέτοιες μέθοδοι. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι τυχόν μετακινούμενα φορτία ή φορτία που προκαλούν ταλαντώσεις/κυματισμούς, στρεπτική σημμόρφωση κ.α. Τέλος στο παρόν κεφάλαιο δεν αναλύονται θέματα κινητικής και κινηματικής των επιβαινόντων ή σύνθλιψης οροφής του οχήματος.

II. Καταγραφή πληροφοριών από τον τόπο του ατυχήματος

Ένα σημαντικό βήμα στην ανακατασκευή ενός ατυχήματος με ανατροπή είναι η απόκτηση των αποδεικτικών στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της διαδρομής του οχήματος πριν και μετά την ανατροπή. Αυτές οι πληροφορίες θα πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα διάγραμμα υπό κλίμακα. Ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά του τόπου του ατυχήματος και της θέσης και προσανατολισμού του οχήματος καθώς προχωρά μέσα από τις τρεις φάσεις που αναφέραμε προηγούμενως πρέπει να βασίζονται σε στοιχεία.

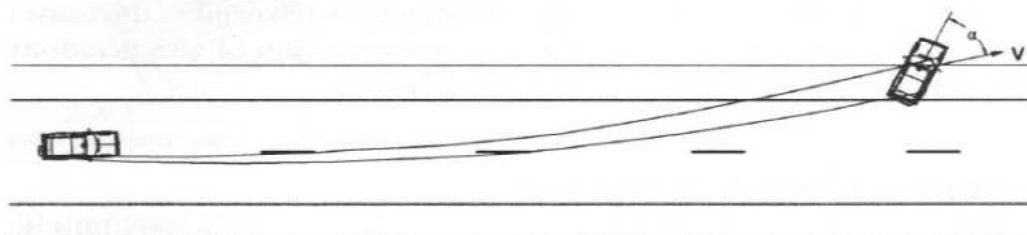
Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε οι πληροφορίες που λαμβάνονται (μετρήσεις κ.α) στον τόπο του ατυχήματος από την αστυνομία, από τον υπεύθυνο για την αναπαράσταση του ατυχήματος ή προκύπτουν από διάφορες μεθόδους (φωτογραμμετρία) είναι ακριβείς.

Επιπρόσθετα, τυχόν χαρακτηριστικά στο επίπεδο του οδοστρώματος με τα οποία ήρθε σε επαφή το όχημα, όπως φράχτες, δέντρα, τυχόν κλίσεις, στύλοι κ.α. πρέπει να τοποθετούνται με ακρίβεια στο διάγραμμα του ατυχήματος.

Κάτι ανάλογο πρέπει να ισχύει για χαρακτηριστικά και στοιχεία που δημιουργούνται από το όχημα όπως γρατζουνιές, σημάδια από ελαστικά, σχισμές κ.α. Στο εν λόγω διάγραμμα, θα πρέπει ακόμα να αναγράφονται πληροφορίες για τυχόν εξαρτήματα που αποκολλήθηκαν από το όχημα, την τελική θέση και προσανατολισμό του οχήματος, το πλάτος του δρόμου. Ως εξαρτήματα που αποκολλώνται, συνήθως αναφερόμαστε σε καθρέπτες, εξωτερικά φώτα, γυαλιά από σπασμένα τζάμια ή τυχόν σήματα που φέρουν την μάρκα του οχήματος.

III. Φάση πριν την ανατροπή (Pretrip Phase)

Η τροχιά πριν την ανατροπή του οχήματος, περιλαμβάνει τυπικά την εκτροπή του οχήματος. Η διεύθυνση κατά την οποία εκτρέπεται το όχημα καθορίζεται από την γωνία εκτροπής α , η οποία είναι η γωνία μεταξύ του κέντρου μάζας ταχύτητας και του άξονα κατεύθυνσης του οχήματος. Αυτή η κίνηση, οδηγεί στην δημιουργία πλευρικών δυνάμεων στο σημείο επαφής των ελαστικών με το έδαφος, γεγονός που συνήθως συνοδεύεται από την εμφάνιση σημαδιών στο οδόστρωμα ή αυλακώσεων εάν η κίνηση γίνεται εκτός δρόμου. Τα τελικά σημάδια που προκύπτουν από τα ελαστικά γενικά αποκλίνουν μεταξύ τους καθώς το όχημα μετατοπίζεται και περιστρέφεται.



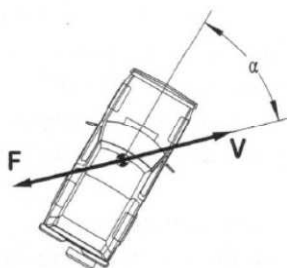
Σχήμα 5.1 Αποκλίνοντα σημάδια ελαστικών που σχετίζονται με την φάση πριν την ανατροπή (α , γωνία εκτροπής οχήματος)

Μια κλασική μέθοδος για την ανακατασκευή της ταχύτητας του οχήματος στην αρχή της φάσης αυτής είναι η διαίρεση της τροχιάς του οχήματος σε κομμάτια και ο υπολογισμός της αλλαγής της ταχύτητας εξαιτίας της απώλειας ενέργειας λόγω ολίσθησης για κάθε ένα κομμάτι. Αυτή η διαδικασία ξεκινάει αντίστροφα, δηλαδή από το ξεκίνημα της δεύτερης φάσης ή το τέλος της εν λόγω φάσης και όπως είναι λογικό απαιτεί γνώση των συνθηκών του οχήματος και του οδοστρώματος κατά μήκος της τροχιάς. Αμελώντας, πιθανή αλληλεπίδραση με αντικείμενα εκτός δρόμου καθώς και αεροδυναμικές δυνάμεις, η ταχύτητα του οχήματος θα αλλάζει μόνο εξαιτίας δυνάμεων τριβής μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος. Το έργο των δυνάμεων αυτών ισούται με την μεταβολή της κινητικής ενέργειας για δεδομένη απόσταση. Επίσης, στην επιβράδυνση του οχήματος παίζουν ρόλο τυχόν κλίσεις στο οδόστρωμα.

Στην μέθοδο αυτή οι τροχοί υποτίθεται ότι μπορούν να περιστραφούν γύρω από τον άξονα καθώς το όχημα διασχίζει το μονοπάτι κατά την πρώτη φάση ενώ επίσης αγνοούνται οι συνιστάμενες δυνάμεις πέδησης και ολίσθησης εάν υπάρχουν και η ταχύτητα εκτροπής. Από την άλλη μεριά, προτείνεται η χρήση ενός *effective* συντελεστή αντίστασης, f_E , για τον χαρακτηρισμό της επιβράδυνσης του κέντρου μάζας του οχήματος. Ο συντελεστής αυτός βασίζεται στην μέση γωνία εκτροπής του οχήματος για το επιλεγμένο κομμάτι της τροχιάς αυτού και στην ονομαστική τιμή του συντελεστή αντίστασης μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος για τις συνθήκες που επικρατούν στο επιλεγμένο τμήμα της τροχιάς. Η εξίσωση που δίνει την τιμή του συντελεστή είναι

$$f_E = f_t \sin \alpha \quad (5.1)$$

Όπου f_t η ονομαστική τιμή του συντελεστή αντίστασης μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος και α η μέση γωνία εκτροπής του οχήματος.



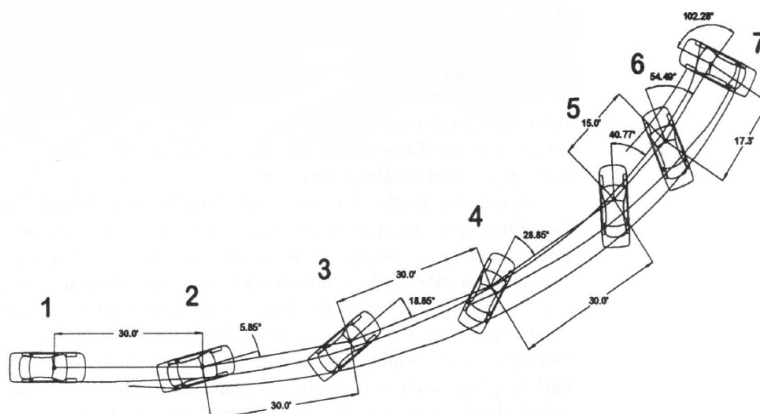
Σχήμα 5.2 Όχημα με γωνία εκτροπής α , με διανύσματα δύναμης και ταχύτητας που φαίνονται επάνω σε αυτό

Το παραπάνω σχήμα δείχνει την γωνία εκτροπής α , το διάνυσμα της ταχύτητας V και το διάνυσμα της δύναμης F που δρα στο κέντρο μάζας του οχήματος αντιστεκόμενο στην κίνησή του. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να συμπεριλάβει και τα φαινόμενα της αντίστασης ολίσθησης, της αντίστασης της μηχανής και της παρουσίας κλίσης στο οδόστρωμα οπότε μετασχηματίζεται στην παρακάτω:

$$f_E = f_t \sin \alpha + f_p \cos \alpha + \sin \theta \quad (5.2)$$

Σε αυτή τη σχέση f_p είναι η αντίσταση που σχετίζεται με τον κινητήρα και την αντίσταση ολίσθησης ενώ θ είναι η γωνία που σχετίζεται με την κλίση του δρόμου στην κατεύθυνση κίνησης του οχήματος. Η πέδηση έχει ενσωματωθεί στην ανάπτυξη αυτής της τεχνικής έτσι ώστε σημάδια με αυλακώσεις να μπορούν να ερμηνευτούν ως την εφαρμογή πέδησης υπό την παρουσία γωνίας εκτροπής. Ωστόσο, το εν λόγω μοντέλο που περιγράφουμε είναι στην πραγματικότητα ένα προσεγγιστικό μοντέλο υπό την έννοια ότι το ημίτονο και συνημίτονο της γωνίας εκτροπής χρησιμοποιούνται για να κατανέμουν τις πλευρικές και διαμήκεις δυνάμεις που δημιουργούνται στα ελαστικά σε στοιχεία που δρουν κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης του οχήματος στο κέντρο μάζας του. Αυτή η τεχνική όμως αγνοεί τις ροπές γύρω από το κέντρο μάζας. Η πιο ακριβής μέθοδος εν τέλει θεωρείται η δυναμική προσομοίωση οχήματος που παρέχει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους και χαρακτηριστικά του οχήματος και χρησιμοποιεί ένα σωστό μοντέλο για τα ελαστικά του οχήματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα σημάδια από τα ελαστικά στην αρχή της πρώτης φάσης συχνά πληρούν τις προϋποθέσεις για την εφαρμογή της εξίσωσης της κρίσιμης ταχύτητας, οπότε και αυτή θεωρείται αρχική ταχύτητα- είσοδος για το πρόγραμμα προσομοίωσης.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται τμήμα της διαδικασίας που αναλύθηκε παραπάνω. Η τροχιά που διένυσε το όχημα έχει διαιρεθεί σε έξι κομμάτια. Η ταχύτητα του οχήματος στην αρχή εμφάνισης των σημαδιών προσδιορίστηκε συσχετίζοντας τις αλλαγές ταχύτητας σε κάθε τμήμα της τροχιάς. Τα πρώτα τέσσερα τμήματα έχουν μήκος 9.1m και τα δύο τελευταία 15 και 17.3 m αντίστοιχα. Οι συνεχείς γραμμές υποδεικνύουν τα σημάδια από τα ελαστικά. Ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας λαμβάνεται ίσο με $f=0.9$ και ο συντελεστής αντίστασης κινητήρα ίσος με $f_p=0.1$ (ολίσθηση με κλειδωμένους τροχούς). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον πίνακα 5.1. Να σημειωθεί ότι η αρχική ταχύτητα της φάσης αυτής προέκυψε από τους υπολογισμούς της μεθόδου ίση με 74.4km/h ενώ η πειραματικά μετρούμενη ίση με 73.1km/h , άρα με ικανοποιητική ακρίβεια



Σχήμα 5.3 Τα έξι τμήματα της διανυόμενης τροχιάς του οχήματος που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση. Οι συνεχείς γραμμές υποδηλώνουν την τροχιά που διαγράφουν τα ελαστικά

Path segment	Initial speed (mph)	Average vehicle sideslip angle (deg)	Equivalent frictional drag
1-2	46.2	3.0	$f_{eq} = 0.15$
2-3	44.7	12.4	$f_{eq} = 0.29$
3-4	41.7	23.9	$f_{eq} = 0.46$
4-5	36.5	34.9	$f_{eq} = 0.60$
5-6	28.2	47.7	$f_{eq} = 0.73$
6-7	21.6	78.4	$f_{eq} = 0.90$
7	0.0	—	—

Πίνακας 5.1 Προβλεπόμενες ταχύτητες του οχήματος για τις επτά θέσεις αυτού χρησιμοποιώντας την μέθοδο διαχωρισμού της τροχιάς του σε τμήματα

IV. Φάση απώλειας ελέγχου (Trip phase)

Ένα όχημα που κινείται και περιστρέφεται όπως συμβαίνει στην πρώτη φάση ενός ατυχήματος με ανατροπή δημιουργεί πλευρικές δυνάμεις στην επιφάνεια επαφής ελαστικού και οδοστρώματος. Αυτές οι δυνάμεις δημιουργούν με το χρόνο ωθήσεις στα πλευρικά ελαστικά που δίνουν την κατεύθυνση της κίνησης και επιβάλλουν μια ροπή γύρω από τον κέντρο μάζας του οχήματος. Τέτοιες ωθήσεις μπορούν να μεταβάλλουν το κέντρο μάζας (ανύψωση) και εφόσον αυτές είναι ικανοποιητικά μεγάλες ενώ το διάστημα που δημιουργούνται πολύ μικρό τότε το αυτοκίνητο θα ανατραπεί.

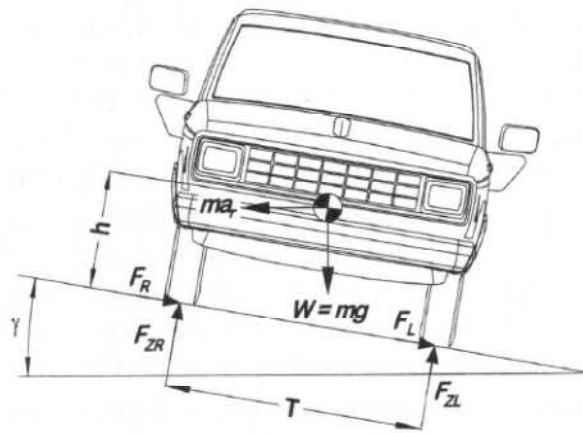
Η διαδικασία κατά την οποία μικρού μήκους και μεγάλους μέτρου δυνάμεις προκαλούν την ανύψωση του κέντρου μάζας του οχήματος και την επακόλουθη ανατροπή αυτού αναφέρεται ως trip phase ενός ατυχήματος με ανατροπή. Μια ώθηση (impulse) ορίζεται ως το ολοκλήρωμα μιας δύναμης ως προς το χρόνο. Επομένως, το μέγεθος της ώθησης είναι συνάρτηση της διάρκειας της εφαρμοζόμενης δύναμης καθώς επίσης και του μεγέθους της δύναμης. Για την ανατροπή ενός οχήματος, απαιτείται μια ώθηση συγκεκριμένου μεγέθους ώστε να ανυψωθεί το κέντρο μάζας του οχήματος. Η ώθηση που δρα στα πλευρικά ελαστικά που «κατευθύνουν» το όχημα, το οποίο υφίσταται εκτροπή μπορεί να είναι τέτοια, ώστε να είναι μια μεγάλη δύναμη που δρα για μικρό χρονικό διάστημα (π.χ όταν ένα όχημα που έχει υποστεί σημαντική εκτροπή συναντά ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στο οδόστρωμα όπως το κράσπεδο ή πάγος) .

Εναλλακτικά, για ένα όχημα που κινείται με μεγάλη ταχύτητα, η ώθηση μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μιας δύναμης που εφαρμόζεται για μεγαλύτερο διάστημα. Η μόνη διαφορά στις δύο περιπτώσεις είναι το μέγεθος της δύναμης και ο χρόνος εφαρμογής της.

IV1. Ανάλυση της απώλειας ελέγχου ενός οχήματος(vehicle trip)

Για την κατανόηση της δεύτερης φάσης σε ένα ατύχημα, είναι απαραίτητη μια επισκόπηση των μαθηματικών προσεγγίσεων ώστε να ποσοτικοποιηθεί η έννοια της απώλειας ελέγχου. Η μελέτη αυτή ξεκινά με την προσέγγιση ότι η ανατροπή του οχήματος είναι ένα στατικό ή ημιστατικό φαινόμενο ενώ άλλες προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν το φαινόμενο ως δυναμικό. Αρχικά μελετάται η προσέγγιση της trip ως ημιστατικό φαινόμενο και στην συνέχεια επιχειρείται μια δυναμική ανάλυση του εν λόγω φαινομένου. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί πως αυτές οι μέθοδοι δεν χρησιμοποιούνται πρακτικά στην ανακατασκευή της δεύτερης φάσης απλά παρουσιάζονται για να αναδείξουν την πολυπλοκότητα της φάσης της απώλειας ελέγχου ενός οχήματος.

Έστω το παρακάτω σχήμα, στο οποίο υποθέτουμε ότι το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα σε μια τροχία με σταθερή ταχύτητα, επάνω σε δρόμο με μεγάλη κλίση, έστω γ .



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα δυνάμεων ενός οχήματος

Η ακτινική επιτάχυνση συμβολίζεται με a_r , ενώ οι δυνάμεις F_R , F_L την συνολική πλευρική δύναμη στον δεξιό μπροστά και πίσω τροχό και την συνολική πλευρική δύναμη στον αριστερό μπροστά και πίσω τροχό αντίστοιχα. Για τις ροπές γύρω από το κέντρο επαφής για τα ελαστικά από την πλευρά των επιβατών του οχήματος ισχύει ότι:

$$\sum M_R = \frac{-MgT}{2} \cos\theta - Mgh \sin\theta + F_{ZL}T + Ma_r h \cos\theta + \frac{Ma_r T}{2} \sin\theta = 0 \quad (5.3)$$

Για την περίπτωση όπου έχω μικρές προσεγγίσεις γωνίας (περίπτωση μεγάλης κλίσης όπως εδώ), $\cos\theta \approx 1$ και $\sin\theta \approx \theta$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

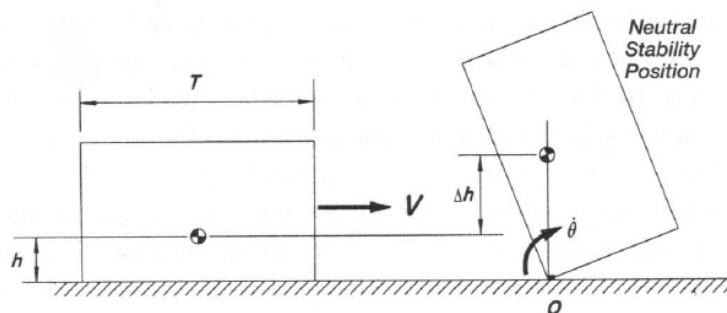
$$\frac{a_r}{g} = \frac{h\theta + \frac{T}{2} - \frac{F_{ZL}T}{Mg}}{h + \frac{T}{2}\theta} \quad (5.4)$$

Για μηδενική κλίση ή $\theta=0$ και θεωρώντας ότι η F_{ZL} είναι μηδενική (αρχή της απώλειας ελέγχου) η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\frac{a_r}{g} = \frac{T}{2h} \quad (5.5)$$

Προκύπτει επίσης ότι η επιτάχυνση από την σχέση αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την εκκίνηση της ανατροπής του οχήματος. Η ανάρτηση του οχήματος και η συμμόρφωση των ελαστικών μπορεί να μειώσει την επιτάχυνση στην οποία η F_{ZL} να μηδενιστεί. Αυτό συμβαίνει γιατί το σώμα του οχήματος θα κλίνει προς το εξωτερικό της τροχιάς, επομένως θα μειώσει το σκέλος της ροπής της δύναμης, F_{ZR} . Μια επίπτωση αυτού είναι η μείωση του ύψους του κέντρου μάζας του οχήματος καθώς η ανάρτηση στην εξωτερική πλευρά του οχήματος συμπιέζεται. Η τελευταία σχέση είναι γνωστή και ως στατικός παράγοντας σταθερότητας (SSF) και είναι η βάση με το σύστημα αξιολόγησης των αυτοκινήτων σχετικά με την αντοχή του αυτοκινήτου σε πιθανή ανατροπή λόγω ατυχήματος. Με βάση το σύστημα αυτό (NHTSA) μια αξιολόγηση με αστέρια αποδίδεται σε κάθε όχημα που υποδεικνύει την προδιάθεση για ανατροπή σε πιθανό ατύχημα. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος $T/2h$, τόσο πιο πιθανή είναι η ανατροπή του οχήματος. Με πέντε αστέρια συμβολίζεται η βέλτιστη αξιολόγηση ενώ με ένα η χειρίστη.

Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση μοντέλων που επιχειρούν δυναμική προσέγγιση οχήματος που κινούταν πλαγίως και αναποδογύρισε ως αποτέλεσμα της πρόσκρουσης με ένα άκαμπτο εμπόδιο. Ένα τυπικό κριτήριο για την ανατροπή είναι η ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για το κέντρο μάζας του οχήματος να φθάσει την απόσταση πάνω από την γραμμή που ορίζεται από τα σημεία επαφής των ελαστικών με το οδόστρωμα. Αυτή η θέση ονομάζεται θέση ουδέτερης σταθερότητας. Έστω το σώμα του οχήματος με αρχική ταχύτητα V , που συναντά ένα εμπόδιο στο σημείο O , και περιστρέφεται μέχρι την θέση ουδέτερης σταθερότητας.



Σχήμα 5.5 Απεικόνιση σώματος που ολισθαίνει με ταχύτητα V , συναντώντας ένα άκαμπτο εμπόδιο

Υποθέτοντας ότι δεν έχουμε απώλειες ενέργειας κατά την σύγκρουση, η κινητική ενέργεια λίγο πριν την σύγκρουση μπορεί να υπολογιστεί με την αύξηση της δυναμικής ενέργειας στην ουδέτερη σταθερότητα λόγω του Δh . Προκύπτει έτσι η παρακάτω σχέση:

$$V = \sqrt{2gh \sqrt{\left(\frac{T}{2h}\right)^2 - 1} - 1} \quad (5.6)$$

Μια άλλη προσέγγιση χρησιμοποιεί την διατήρηση της στροφορμής σε συνδυασμό με την διατήρηση της ενέργειας μετά την πρόσκρουση. Η διατήρηση της στροφορμής γύρω από το σημείο O , δίνει

$$I_o \dot{\theta} = mVh \quad (5.7)$$

Η κινητική ενέργεια που έχει το σώμα μετά την πρόσκρουση ώστε να φθάσει στην γωνία ουδέτερης σταθερότητας, είναι ίση με την αλλαγή στην δυναμική ενέργεια λόγω του Δh . Όταν το κέντρο μάζας του σώματος είναι ακριβώς πάνω από το σημείο O , πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$\frac{1}{2} I_o \dot{\theta}^2 = mg \left[\sqrt{\left(\frac{T}{2}\right)^2 + h^2} - h \right] \quad (5.8)$$

Επιλύοντας την 5.7 για $\dot{\theta}$, αντικαθιστώντας στην 5.8 και λύνοντας ως προς την ταχύτητα έχουμε:

$$V = \sqrt{\frac{2I_o g}{mh} \sqrt{\left(\frac{T}{2h}\right)^2 + 1} - 1} \quad (5.9)$$

Η τελευταία εξίσωση απαιτεί γνώση και της περιστροφικής αδράνειας του οχήματος, όχι απλά το ύψος του κέντρου βάρους και το πλάτος της τροχιάς.

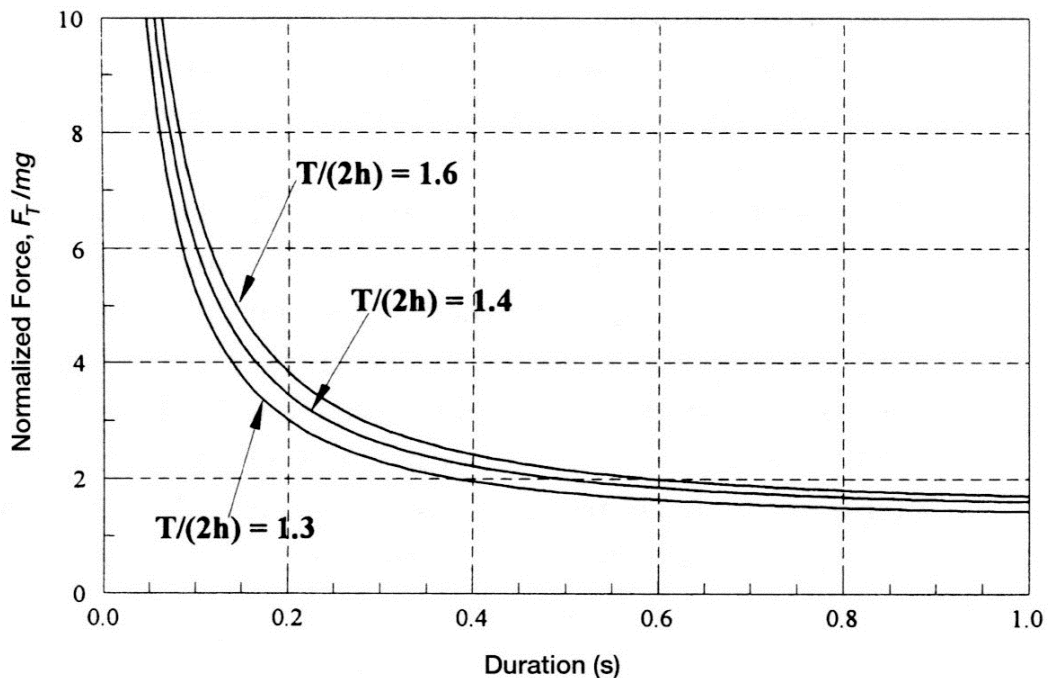
Τέλος παρατίθεται και ένα μοντέλο στο οποίο λαμβάνεται υπόψιν η χρονική διάρκεια της δύναμης που οδηγεί σε ανατροπή του οχήματος. Αν και ο τρόπος που εξάγεται το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιος με τα προηγούμενα μοντέλα, διαφέρει στο ότι λαμβάνει υπόψιν το impulse που εφαρμόζεται στα πλευρικά ελαστικά που κατευθύνουν το όχημα. Εδώ απλά παρουσιάζεται η εξίσωση του εν λόγω μοντέλου

$$\left(\frac{F_T}{mg} - \frac{T}{2h}\right) \Delta\tau^2 + \frac{T}{2h} \left(\frac{F_T}{mg} - \frac{T}{2h}\right) \Delta\tau^2 = \frac{2}{mgh} \left(I_R + \frac{mT^2}{4}\right) \left\{ \sqrt{\left(\frac{T}{2h}\right)^2 + 1} - 1 \right\} \quad (5.10)$$

Μετά από απλοποιήσεις και γνωρίζοντας ότι $I = mk_R^2$ καταλήγουμε στην σχέση:

$$\frac{F_T}{mg} = \frac{1}{2\Delta\tau} \left[\Delta\tau \left(\frac{T}{2h}\right) + \sqrt{\Delta\tau^2 \left(\frac{T}{2h}\right)^2 + \frac{8h}{g} \left(\frac{k_R^2}{h^2} + \left(\frac{T}{2h}\right)^2\right) \left(\sqrt{\left(\frac{T}{2h}\right)^2 + 1} - 1\right)} \right] \quad (5.11)$$

Όπου F_T η συνολική πλευρική δύναμη στα ελαστικά που κατευθύνουν το όχημα, I_R η ροπή αδρανείας του οχήματος γύρω από το κέντρο μάζας, h το ύψος του κέντρου μάζας, T το πλάτος της τροχιάς.



Σχήμα 5.6 F_T/mg συναρτήσει της διάρκειας για τρία διαφορετικά πλάτη τροχιάς

Είναι εμφανές από το σχήμα ότι το όχημα με το μεγαλύτερο εύρος τροχιάς για σταθερό ύψος κέντρου μάζας θα απαιτεί μεγαλύτερη *impulse* ώστε να ανατραπεί το όχημα. Η εφαρμογή μια τέτοιας ώθησης οδηγεί στην αύξηση στην στροφορμή ικανή να περιστρέψει το κέντρο μάζας γύρω από την θέση που βρίσκεται πάνω από την γραμμή που ορίζονται από τα σημεία επαφής των ελαστικών.

IV2. Ανακατασκευή της φάσης απώλειας ελέγχου

Η θέση των πλευρικών ελαστικών που κατευθύνουν το όχημα, στην λήξη της δεύτερης αυτής φάσης είναι γενικά εύκολο να εντοπιστεί. Στην περίπτωση ανατροπής του οχήματος που λαμβάνει χώρα πάνω στο οδόστρωμα, το τέλος της ολίσθησης και η αρχή της ανατροπής του οχήματος συνήθως συνοδεύεται από το τέλος των σημαδιών των ελαστικών και μερικές φορές υπολειμμάτων από τις ζάντες. Εάν ωστόσο, η ανατροπή συμβεί εκτός του οδοστρώματος, η θέση που υποδηλώνει το πέρας της δεύτερης φάσης συνδέεται συχνά με το τέλος των αυλακώσεων των «κατευθυντήριων» τροχών στο χώμα ή την χορτολιβαδική έκταση. Συχνά τα σημάδια των ελαστικών τερματίζουν σε ένα εμπόδιο όπως για παράδειγμα το κράσπεδο του πεζοδρομίου ή ένα χαντάκι τα οποία εφαρμόζουν μια ώθηση μικρής διάρκειας στους «κατευθυντήριους» τροχούς. Το πέρας της δεύτερης φάσης περιγράφεται ως η μετάβαση του οχήματος σε μια συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα και μάλιστα έχει βρεθεί ότι ρυθμός της τάξης των $100^\circ/s$ είναι το πιθανό κατώφλι για το τέλος της φάσης απώλειας ελέγχου.

Επειδή ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια σχέση που να συνδέει την θέση του κέντρου μάζας και του τέλους των σημαδιών/αυλακώσεων των ελαστικών, για πρακτικούς λόγους έχει κυριαρχήσει ότι το πέρας της δεύτερης φάσης συμβαίνει όταν ξεπεραστεί το σημείο ουδέτερης σταθερότητας. Ενώ ο καθορισμός του πέρατος της δεύτερης φάσης ορίζεται επαρκώς καλά με βάση τα προαναφερθέντα, δεν συμβαίνει το ίδιο και για την αρχή της φάσης αυτής. Μια θεώρηση που έχει γενικά υιοθετηθεί είναι, ότι η αρχή της φάσης τοποθετείται ως η χρονική στιγμή όπου οι πλευρικές δυνάμεις υπερνικούν την ικανότητα του οχήματος να διατηρεί τους τέσσερις τροχούς σε επαφή με το έδαφος.

IV3. Επίδραση ζαντών

Σε κάποια ατυχήματα, η μεταφορά φορτίου στους κατευθυντήριους τροχούς και η αλλαγή του προσανατολισμού της ανατροπής του οχήματος είναι τέτοιες ώστε το ένα ή και τα δύο ελαστικά στους τροχούς αυτούς να εκτραπούν, με αποτέλεσμα η ζάντα του ελαστικού να έρθει σε επαφή με το έδαφος ή το οδόστρωμα. Όταν συμβεί το εν λόγω φαινόμενο, παρατηρείται ξύσιμο του οδοστρώματος ενώ και μια κοιλότητα(τρύπα) είναι δυνατόν να δημιουργηθεί εξαιτίας της

επαφής ζάντας- δρόμου, προκαλώντας debead στο ελαστικό. Αυτά τα δύο φαινόμενα αφήνουν διαφορετικά στοιχεία. Το debeaded ελαστικό αφήνει ένα στενό σημάδι δίπλα από την κοιλότητα στη ζάντα σε σύγκριση με ένα πιο πλατύ σημάδι πιθανόν με αυλακώσεις που αφήνει ένα φουσκωμένο πλην παραμορφωμένο ελαστικό. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι η επαφή της ζάντας του ελαστικού με το δρόμο δεν διευκόλυνε την ανατροπή του οχήματος ενώ σε μερικές περιπτώσεις την απέτρεψε.

Επιπλέον, δεν δημιουργήθηκε κάποια ασυνήθιστα μεγάλη επιβράδυνση κατά την διάρκεια της επιφάνειας αυτής. Η πιθανότητα, μια επαφή ζάντας με το οδόστρωμα και των αυλακώσεων που δημιουργούνται να προκαλέσει απώλεια ελέγχου και δυνητική ανατροπή του οχήματος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις υποδηλώνουν ότι η παρουσία μια επαφής ζάντας και δρόμου δεν δημιουργεί απαραίτητα μια αύξηση της πλευρικής επιβράδυνσης του οχήματος.

V. Φάση Ανατροπής (Roll Phase)

Υπάρχουν δύο βασικές πτυχές για την ανακατασκευή της φάσης ανατροπής ενός ατυχήματος. Η πρώτη είναι ο καθορισμός της συνολικής απόστασης που διένυσε το όχημα καθώς αναποδογύριζε καθώς και της ταχύτητας του οχήματος στην αρχή της φάσης αυτής (δηλαδή στο τέλος της φάσης απώλειας ελέγχου- φάση II). Η δεύτερη πτυχή της ανακατασκευής έχει να κάνει με τον αριθμό των φορών που το αυτοκίνητο ανετράπη καθώς και με την θέση και τον προσανατολισμό του οχήματος κατά την διάρκεια της φάσης αυτής. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται χρήση ενός πραγματικού συντελεστή οπισθέλκουσας (efficient drag coefficient) για την διανυόμενη απόσταση κατά την ανατροπή ώστε να προσδιοριστεί η ταχύτητα. Γενικά ο υπολογισμός της ταχύτητας στην αρχή της φάσης αυτής μπορεί να γίνει χωρίς λεπτομερή γνώση του αριθμού των ανατροπών του οχήματος πριν αυτό ακινητοποιηθεί. Ο προσδιορισμός του αριθμού των ανατροπών είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί μια συστηματική προσέγγιση για την αντιστοίχιση της παραμόρφωσης και στοιχείων από το όχημα με στοιχεία από τον τόπο του ατυχήματος.

Η διαδικασία προσδιορισμού του προσανατολισμού του αυτοκινήτου κατά την διάρκεια των προσκρούσεων με το έδαφος και ο υπολογισμός του ρυθμού περιστροφής γίνονται ώστε να αποκτηθούν πληροφορίες για την κινηματική και κινητική των επιβαινόντων κατά την διάρκεια της τρίτης αυτής φάσης.

V1. Ανάλυση της ταχύτητας

Η ανατροπή ενός οχήματος είναι ένα περίπλοκο τρισδιάστατο δυναμικό φαινόμενο. Στην περιπλοκότητα του προβλήματος προστίθεται και το ενδεχόμενο ενός ανώμαλου οδοστρώματος, χωρίς να υπάρχουν λεπτομερή και ολοκληρωμένα δυναμικά μοντέλα ή

προσομοιώσεις που να αναπαριστούν την κίνηση του οχήματος στην φάση αυτή. Συνεπώς, γίνεται χρήση απλοποιημένων μοντέλων που στηρίζονται στην ιδέα μιας μέσης επιβράδυνσης του οχήματος καθώς κινείται από την ανατροπή προς την ηρεμία. Οι αρχές για σταθερή επιβράδυνση που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ταχύτητας στην αρχή της φάσης ανατροπής. Η τελική ταχύτητα στην ηρεμία είναι μηδέν ενώ η απόσταση στην οποία το όχημα υφίσταται ανατροπές προσδιορίζεται από στοιχεία στον τόπο του ατυχήματος. Επίλυση της σχέσης (3.5) για την αρχική ταχύτητα u_o και αλλάζοντας ελαφρώς τους συμβολισμούς με βάση την φάση ανατροπής που μελετάμε προκύπτει:

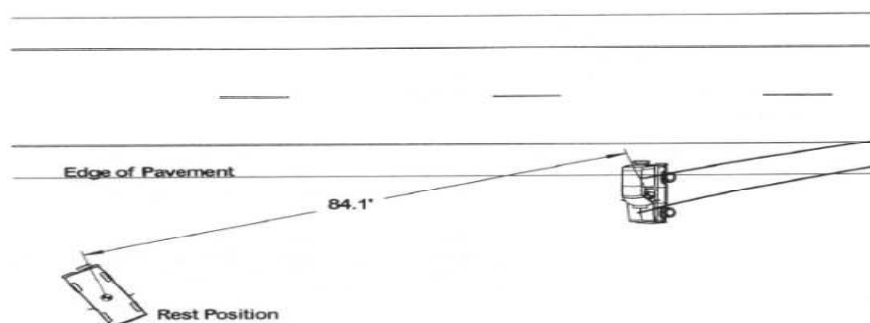
$$u_o = \sqrt{u_f^2 - 2ad} \quad (5.14)$$

Γνωρίζοντας ότι στην ηρεμία $u_f=0$ και d είναι η απόσταση στην οποία το όχημα ανατρέπεται ενώ $a=-fg$ (το μείον λόγω της επιβράδυνσης) η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$u_o = \sqrt{2fgd} \quad (5.15)$$

Η ταχύτητα στην αρχή της φάσης ανατροπής υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση εφόσον είναι γνωστές η απόσταση d και ο συντελεστής αντίστασης f . Μια εκτίμηση βέβαια της ταχύτητας μπορεί να γίνει και από τα στοιχεία που συλλέγονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα σχετικά με την επιβράδυνση παρουσιάζονται με δύο τρόπους. Ο πρώτος θεωρεί μια μόνο τιμή για την επιβράδυνση κοινή και για την φάση απώλειας ελέγχου και για την φάση ανατροπής. Αντίθετα, ο δεύτερος τρόπος θεωρεί κάθε φάση ανεξάρτητη και συνεπώς καταγράφονται ξεχωριστές επιβραδύνσεις για κάθε φάση.

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται η κάτοψη ενός οχήματος στην αρχή και στο τέλος της τρίτης φάσης (αναποδογυρισμένο) ενός ατυχήματος. Αναγράφεται επίσης η συνολική διανυόμενη απόσταση μέχρι την ακινητοποίηση του οχήματος. Η ταχύτητα του οχήματος μπορεί να υπολογιστεί με γνωστό f από την σχέση 5.15.



Σχήμα 5.7 Φάση ανατροπής ενός ατυχήματος

V2. Ανάλυση της ανατροπής του οχήματος

Μετά τον προσδιορισμό της ταχύτητας στην αρχή της φάσης ανατροπής, σειρά έχει ο προσδιορισμός του αριθμού των φορών που ανετράπη το όχημα. Μια τέτοια ανάλυση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του οχήματος κατά τις προσκρούσεις αυτού με το έδαφος. Η γνώση του αριθμού των φορών που ανετράπη το όχημα, του effective συντελεστή οπισθέλκουσας και της διανυόμενης απόστασης επιτρέπει τον υπολογισμό του μέσου ρυθμού περιστροφής του οχήματος.

Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει τρία βήματα. Το πρώτο είναι η συλλογή πληροφοριών σχετικών με το ατύχημα που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση του ατυχήματος. Μετά, ακολουθεί η «κατανόηση» των συλλεγόμενων πληροφοριών καθώς και η επεξεργασία αυτών με σκοπό την ανάλυση της φάσης ανατροπής. Κάτι τέτοιο απαιτεί οργάνωση και κατανόηση πληροφοριών όπως παραμορφώσεις σε τμήματα του οχήματος, γρατζουνιές και ξυσίματα σε αντιστοιχία με στοιχεία που συλλέγονται στον τόπο του ατυχήματος. Βέβαια, κάποιες από τις πληροφορίες στον τόπο του ατυχήματος είναι παροδικές και χάνονται με την πάροδο του χρόνου αν και ότι πληροφορία σχετίζεται με το όχημα είναι σχετικά μόνιμως διαθέσιμη. Το τελευταίο βήμα, είναι η χρήση όλων των παραπάνω ώστε να ανακατασκευαστούν οι θέσεις και οι προσανατολισμοί του οχήματος κατά την φάση ανατροπής.

V3. Πληροφορίες σχετικές με τον τόπο και την σκηνή του ατυχήματος

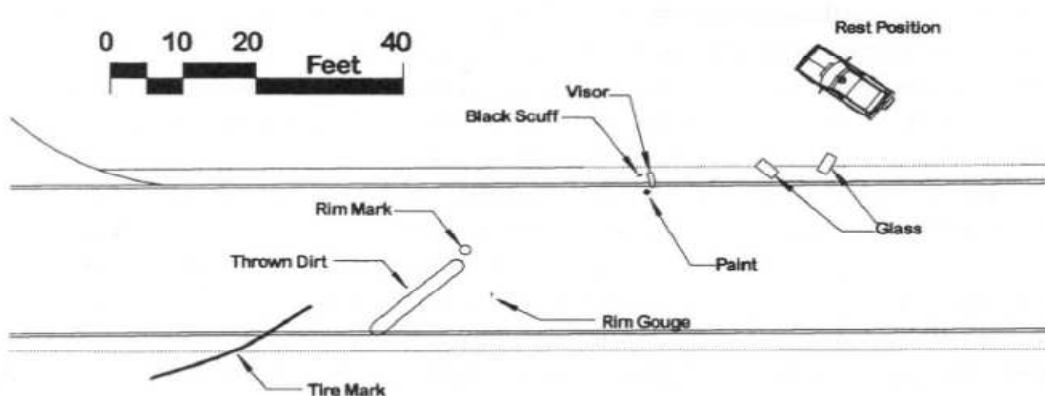
Οι δύο βασικές πηγές πληροφοριών σχετικά με τον τόπο του ατυχήματος είναι η αναφορά της αστυνομίας και οι φωτογραφίες που λαμβάνονται από αυτήν και έχουν ιδιαίζουσα σημασία για την ανακατασκευή ενός ατυχήματος με ανατροπή. Η ποιότητα και η ποσότητα των φωτογραφιών μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα του ατόμου που κάνει την αναπαράσταση του ατυχήματος να την κάνει με ακρίβεια. Η αναφορά της αστυνομίας περιλαμβάνει σημαντικές πληροφορίες όπως η θέση ηρεμίας του οχήματος ή οι θέσεις των σημαδιών από τα ελαστικά ή κάποιων κομματιών που αποκολλήθηκαν κατά την διάρκεια του ατυχήματος.

Εάν είναι διαθέσιμες, η αναφορά της αστυνομίας και οι φωτογραφίες θα πρέπει να μελετώνται πριν την επιθεώρηση του τόπου του ατυχήματος από τον ειδικό. Η επιθεώρηση θα πρέπει να γίνεται ώστε να επιβεβαιωθούν οι μετρήσεις και διαστάσεις μεγεθών μέσα στην αναφορά ή για την ληψη μετρήσεων που δεν γίνονται από την αστυνομία. Τέτοιες μετρήσεις αφορούν την κλίση του εδάφους στο οποίο κινήθηκε το όχημα και διάφορα σημάδια όπως αυλακώσεις, μεταφορά βαφής, τρύπες, χτυπήματα από ζάντες κ.α. Επίσης πρέπει να προσδιοριστούν και τυχόν αντικείμενα με τα οποία ήρθε σε επαφή το όχημα όπως δέντρα, κράσπεδα πεζοδρομίων, βράχοι κ.α τα οποία αφήνουν διακριτά σημάδια στην επιφάνεια του οχήματος.

Εκτός από τις κλασικές μεθόδους για την επιθεώρηση ενός τόπου ατυχήματος όπως μετρητικές ταινίες και τροχούς μέτρησης, υπάρχουν και πιο σύγχρονες μέθοδοι που προτιμούνται όπως επαγγελματικοί ερευνητικοί εξοπλισμοί όπως ο Θεοδόλιχος ή το γεωδαιτικό όργανο



Επιπρόσθετα της καλύτερης ακρίβειας, ο Θεοδόλιχος δίνει την δυνατότητα δεδομένα στις τρεις διαστάσεις για όλα τα σημεία που μετρώνται στον τόπο του ατυχήματος. Κάτι τέτοιο επιτρέπει την ενσωμάτωση τυχόν αλλαγών στην κλίση κατά την ανάλυση της επιβράδυνσης του ανατρεπόμενου οχήματος. Πληροφορίες που υπάρχουν στις φωτογραφίες της αστυνομίας και δεν μπορούν να εντοπιστούν στον τόπο του ατυχήματος μπορούν να εντοπιστούν με διάφορες τεχνικές όπως η φωτογραμμετρική ανάλυση και οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες συγκεντρώνονται και χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό ενός διαγράμματος του τόπου του ατυχήματος (υπό κλίμακα). Παρακάτω φαίνεται ένα τέτοιο διάγραμμα



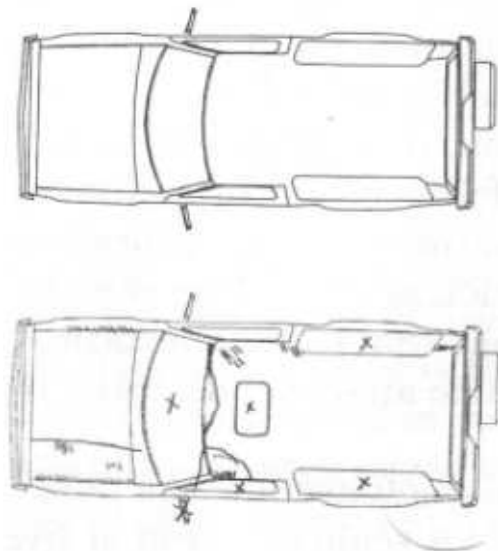
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ατυχήματος με ανατροπή

V4. Πληροφορίες σχετικά με το όχημα που εμπλέκεται στο ατύχημα

Οι φυσικές αποδείξεις επάνω στο ίδιο το όχημα περιλαμβάνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την δυναμική και κινηματική του αυτοκινήτου κατά την διάρκεια της φάσης ανατροπής του. Μια επιθεώρηση του οχήματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την διενέργεια μιας αναπαράστασης του ατυχήματος και την κατανόηση της κίνησης στην ανατροπή του οχήματος. Είναι αυτονόητο ότι μια τέτοια επιθεώρηση πρέπει να συνοδεύεται από λήψη φωτογραφιών. Σε αυτό το σημείο, παρουσιάζονται μερικές επιπρόσθετες τεχνικές που συμπληρώνουν την φωτογράφιση του οχήματος.

Κατά την διάρκεια της επιθεώρησης, ο ειδικός θα πρέπει πρώτα να παρατηρήσει την γενική φύση της παραμόρφωσης του οχήματος και τις γενικές «κατευθύνσεις» και χαρακτηριστικά των χτυπημάτων και γρατζουνιών στα σημεία επαφής του οχήματος με το έδαφος ή άλλα αντικείμενα και να σχεδιάσει σκίτσα των πληροφοριών που προκύπτουν.

Ενδεικτικά παρατίθεται το σχήμα 5.9 με ένα κενό πρότυπο ενός οχήματος και το ίδιο προφίλ με παραμορφώσεις και χτυπήματα που σημειώνονται ύστερα από μια επιθεώρηση.



Σχήμα 5.9 Πρόφιλ για καταγραφή παραμορφώσεων, γρατζουνιών και άλλων ζημιών

Μια ολοκληρωμένη επιθεώρηση θα πρέπει να φέρει αντίστοιχες πληροφορίες για το κάτω μέρος του οχήματος αν και σε αυτό το μέρος οι φωτογραφίες δίνουν καλύτερης ποιότητας πληροφορίες από τα σκίτσα. Στο σχήμα αυτό, με «X» σημειώνονται τα παράθυρα που έσπασαν κατά το ατύχημα ενώ θα πρέπει και για τα ελαστικά και τις ζάντες να υπάρχουν φωτογραφίες και αντίστοιχα λεπτομερής εξέταση.

Επίσης, θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην διάκριση ζημιάς που προκλήθηκε στο όχημα λόγω της ανατροπής και ζημιάς που δημιουργήθηκε μετά το όχημα κάτι στο οποίο μπορεί να βοηθήσει σύγκριση των φωτογραφιών κατά την επιθεώρηση και αυτών της αστυνομίας. Τόσο τα ελαστικά όσο και οι ζάντες θα πρέπει να ελεγχθούν σχετικά με πιθανή παραμόρφωση. Τα κατευθυντήρια ελαστικά στην φάση απώλειας ελέγχου ενδέχεται να εμφανίσουν γδαρσίματα μεταξύ πέλματος και ζάντας ενώ ίσως υπάρχουν ενδείξεις επαφής της ζάντας με το έδαφος. Όμοια με πριν πρέπει να γίνει διαχωρισμός φθοράς στα ελαστικά που συμβαίνει στην δεύτερη φάση με φθορά που προκαλείται στην φάση ανατροπής.

Συχνά επίσης, διάφορα συντρίμια παγιδούνται μεταξύ της ενισχυμένης εσωτερικής άκρης του ελαστικού και της ζάντας, στην οποία και στηρίζεται κατά την διάρκεια και των δύο προαναφερθέντων φάσεων. Επιπρόσθετα, η επιθεώρηση του κάτω μέρους της κοιλότητας που βρίσκεται το ελαστικό και του ελαστικού στρώματος που χρησιμοποιείται για την σκλήρυνση της ανάρτησης μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με το αν το όχημα «προσγειώθηκες» σε ένα ή περισσότερους τροχούς κατά την ανατροπή, προκαλώντας την πλήρη συμπίεση της ανάρτησης. Ακόμα, τα οχήματα που εμπλέκονται σε ατυχήματα με ανατροπή, συσσωρεύουν διάφορα συντρίμια κατά την επαφή τους με το έδαφος όπως χλόη ή χώμα. Τέτοια «σκουπίδια» θα πρέπει να μελετώνται και ως προς την θέσης τους στο όχημα και ως προς την φύση τους και να αρχειοθετούνται. Μέσω της θέσης αυτών, είναι δυνατόν να καθοριστεί η κατεύθυνση κίνησης του οχήματος κατά την επαφή.

Τα χαρακτηριστικά επίσης των γρατζουνιών στις επιφάνειες του οχήματος μπορούν να καθορίσουν το προσανατολισμό κατά την επαφή με το έδαφος. Γρατζουνιές που δημιουργούνται από επαφή με ασφαλτο διαφέρουν συνήθως από αυτές που προκύπτουν με άμμο ή χορτάρι κ.ο.κ. ενώ η παραμόρφωση της λαμαρίνας μπορεί να πληροφορήσει σχετικά με την σειρά με την οποία έγιναν αυτές. Εάν για π.χ. μετά από επαφή με το έδαφος δημιουργηθεί μια κοίλη επιφάνεια και η ίδια αυτή επιφάνεια ξαναέρθει σε επαφή με το έδαφος, η δεύτερη γρατζουνιά δεν θα είναι ορατή. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την ανακατασκευή του ατυχήματος, ώστε να καθοριστεί η χρονική σειρά των δύο συμβάντων. Ένα άλλο σημείο που χρειάζεται προσοχή είναι το γεγονός πως μια ομάδα από γρατζουνιές δεν καθορίζει μονοσήμαντα την διεύθυνση κίνησης του οχήματος ως προς το έδαφος αλλά δημιουργεί δύο εναλλακτικές διευθύνσεις με διαφορά 180°. Η διάκριση της σωστής διεύθυνσης σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι προφανής (π.χ μέσω θεώρησης της κίνησης του «άκαμπτου» σώματος του οχήματος) ενώ σε κάποιες άλλες απαιτείται ανάλυση της μόνιμης παραμόρφωσης της επιφάνειας του υλικού. Ωστόσο αυτή η διαδικασία είναι επίπονη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η λαμαρίνα έχει βαφτεί και σε εκείνο το σημείο προκύπτουν γρατζουνιές.

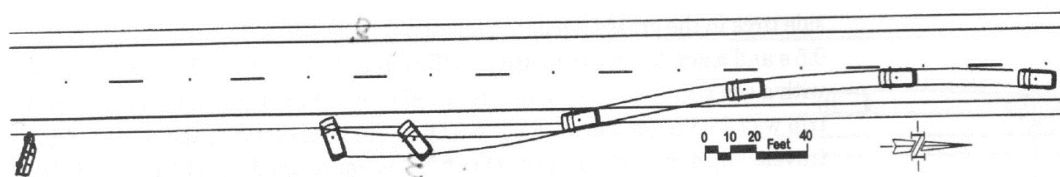
Τέλος, πολύτιμες πληροφορίες μπορούν να προκύψουν από μέρη που έχουν αποκολληθεί από το όχημα κατά την πρόσκρουση στο έδαφος σχετικά με τον προσανατολισμό του οχήματος την στιγμή της επαφής. Για μέρη του οχήματος που προεξέχουν πριν την αποκόλλησή τους, η θέση των γρατζουνιών ή η απόδειξη άσκησης δύναμης σε μια πλευρά αυτών υποδεικνύουν τον προσανατολισμό και την διεύθυνση της κίνησης του οχήματος. Αφού όλες αυτές οι πληροφορίες

συγκεντρωθούν σχετικά με τον τόπο του ατυχήματος και το όχημα είναι δυνατή η ανακατασκευή της τρίτης φάσης. Η ανακατασκευή είναι μια διαδικασία όπου οι πληροφορίες αυτών των δύο συγκρίνονται στοιχείο με στοιχείο και είναι γενικά επίπονη.

VI. Παράδειγμα ανακατασκευής της φάσης ανατροπής

Πριν την παρουσίαση του παραδείγματος πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή κάθε ατύχημα τέτοιας φύσης είναι μοναδικό, η ανακατασκευή τέτοιων ατυχημάτων ίσως απαιτεί χρήση και άλλων τεχνικών που ενδεχομένως δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία ή ξεφεύγουν από τα όρια αυτής.

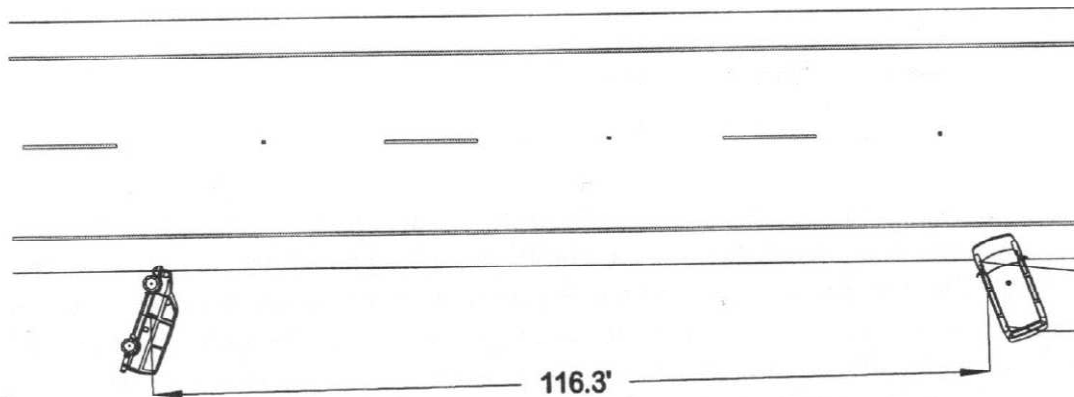
Στο παράδειγμά μας, το όχημα είναι ένα Chevrolet Astro βαν οκτώ θέσεων (μοντέλο 1998) με ABS. Το ατύχημα συνέβη όταν καθώς το όχημα κινούνταν σε αυτοκινητόδρομο τεσσάρων λωρίδων το δεξί πίσω λάστιχο έσκασε. Το σχήμα 5.10 δείχνει τις νότιες λωρίδες του δρόμου και τις λωρίδες έκτακτης ανάγκης (κατασκευασμένες από άσφαλτο) καθώς και την θέση του οχήματος σε διάφορες στιγμές. Οι συνθήκες στο οδόστρωμα ήταν ξηρές όταν συνέβη το ατύχημα σε ώρα με παρουσία φωτός. Ο οδηγός προσπάθησε να διατηρήσει τον έλεγχο εφαρμόζοντας πέδηση και αλλάζοντας κατεύθυνση αφήνοντας ορατά σημάδια στο οδόστρωμα αλλά το όχημα υπέστη εκτροπή (ωρολογιακής φοράς) και τελικά κατέληξε εκτός δρόμου με εμφάνιση αυλακώσεων στο αριστερούς πλευρικούς τροχούς. Η ταχύτητα του βαν στην αρχή εμφάνισης των σημαδιών όπως και ο αριθμός των φορών που ανετράπη το όχημα μπορούν να ανακατασκευαστούν χρησιμοποιώντας τον διαχωρισμό σε τρεις φάσεις που αναλύθηκε παραπάνω. Ο αριθμός των φορών που ανετράπη το όχημα προσδιορίζεται με λεπτομερή ανάλυση φυσικών στοιχείων.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα ατυχήματος

VI1. Ανάλυση της ταχύτητας

Η φάση ανατροπής συνέβη σε μια απόσταση μήκους 116.3ft (35.4m). Το σχήμα 5.11 δείχνει την «απόσταση ανατροπής», η οποία μετράται από το κέντρο μάζας του οχήματος σε ηρεμία (τέλος φάσης ανατροπής) μέχρι το κέντρο μάζας του οχήματος στο σημείο απώλειας ελέγχου(αρχή φάσης ανατροπής).

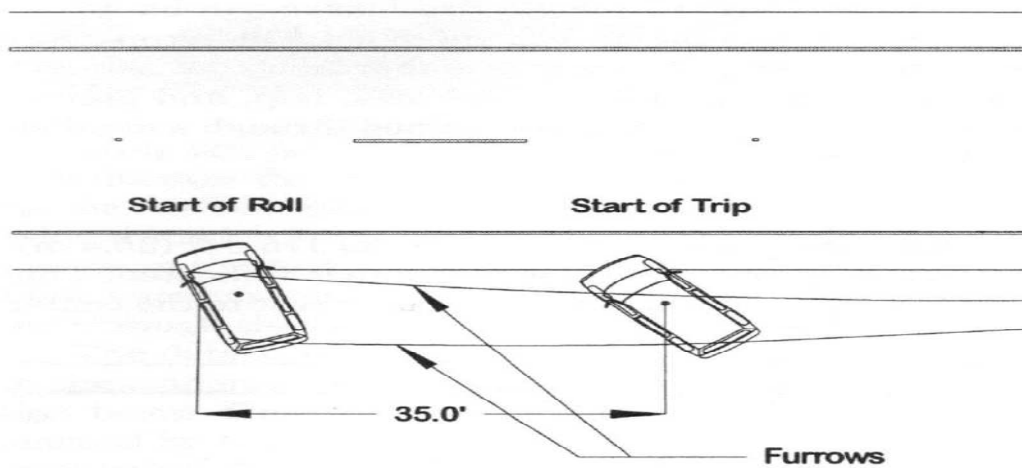


Σχήμα 5.11 Διάγραμμα της σκηνής του ατυχήματος, όπου φαίνεται η απόσταση που διένυσε το όχημα καθώς ανετράπη.

Η θέση του κέντρου μάζας του οχήματος στην αρχή της φάσης λαμβάνεται όταν οι κατευθυντήριοι πλευρικοί τροχοί είναι στην θέση ουδέτερης σταθερότητας (και όχι απαραίτητα όταν και οι τέσσερις τροχοί είναι στο έδαφος). Αυτό πρακτικά σημαίνει ανακατανομή της απόστασης που αντιστοιχεί περίπου σε μισό μήκος του οχήματος από την φάση ανατροπής στην φάση απώλειας ελέγχου. Επιπλέον αφού ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας στην φάση απώλειας ελέγχου είναι μεγαλύτερος από την τελευταία φάση αυτό οδηγεί σε μια μικρή αύξηση της ταχύτητας. Θεωρώντας για το συντελεστή τριβής εύρος $f=[0.4 \ 0.5]$ για την φάση ανατροπής, η ταχύτητα του κέντρου μάζας στην θέση ουδέτερης σταθερότητας υπολογίζεται από την σχέση 5.15. Η ταχύτητα του οχήματος στο τέλος της δεύτερης φάσης κυμαίνεται από 60 ως 67.1 km/h.

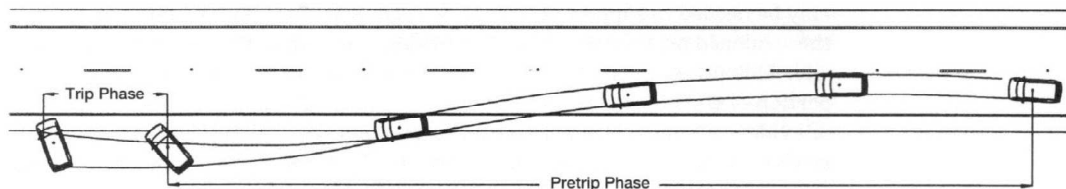
Η ταχύτητα στην αρχή της δεύτερης φάσης υπολογίζεται από την σχέση

$u_{start} = u_{end} + fg\tau$, όπου το τ λαμβάνεται ίσο με 0.5sec και ο $f=1.5$ με βάση θεωρητικά στοιχεία και δεδομένα που αναφέρθηκαν παραπάνω και με βάση πίνακες. Το προκύπτον εύρος ταχύτητας στην αρχή της δεύτερης φάσης είναι 86.5 ως 93.6 km/h. Η διανυόμενη απόσταση του κέντρου μάζας κατά την δεύτερη φάση δίνεται από την σχέση $d_{trip} = \frac{u_{start}^2 - u_{end}^2}{2fg}$, οπότε και προκύπτει εύρος 33.4 ως 36.6 ft. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια μέση τιμή των δύο αυτών αποστάσεων.



Σχήμα 5.12 Η φάση απώλειας ελέγχου σε ένα ατύχημα

Η ανάλυση πριν την απώλεια ελέγχου (πρώτη φάση) απαιτεί πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του οχήματος, τις συνθήκες οδήγησης και την διαδρομή. Αυτό γίνεται και μέσω της αναφοράς της αστυνομίας με βάση την οποία μετά την απώλεια πίεσης στο πίσω δεξιά ελαστικό, το όχημα μετατοπίστηκε προς της δεξιά πλευρά της αριστερής λωρίδας. Ο οδηγός άρχισε να κατευθύνει το όχημα προς τα αριστερά για να αποφύγει ένα όχημα στην παρακείμενη λωρίδα με αποτέλεσμα τον σχηματισμό σημαδιών στο οδόστρωμα.



Σχήμα 5.13 Απεικόνιση φάσεων πριν και κατά την φάση απώλειας ελέγχου

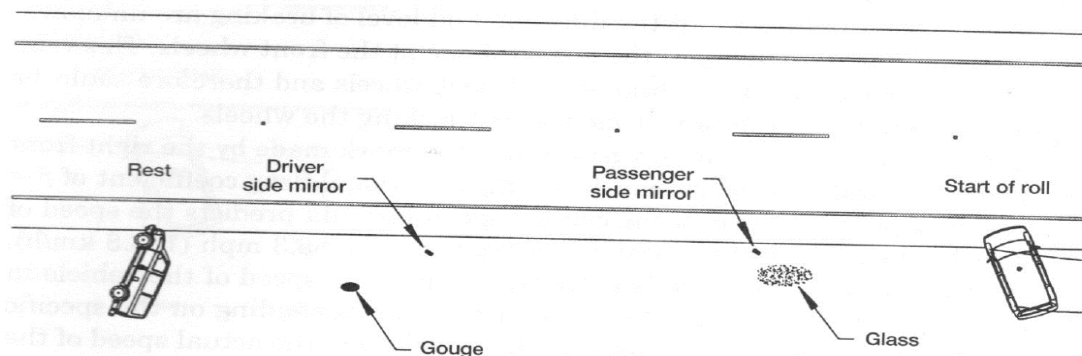
Το σημάδι από το μπροστά δεξιά ελαστικό είναι σημάδι εκτροπής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της κρίσιμης ταχύτητας για τον υπολογισμό της ταχύτητας κοντά στην αρχή του σημαδιού. Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση την αναφορά της αστυνομίας ότι ο οδηγός διατήρησε τον έλεγχο των μπροστινών τροχών παρά την απώλεια πίεσης του πίσω δεξιά λάστιχου και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το αυτοκίνητο αντέδρασε στην κίνηση προς τα αριστερά που έκανε ο οδηγός.

Το γεγονός ότι υπάρχουν σημάδια και από τους δύο μπροστινούς τροχούς υποδηλώνει ότι η δύναμη στο μπροστά αριστερό ελαστικό ήταν επαρκής για να δημιουργήσει σημάδι αν και θα περίμενε κανείς το όχημα να «κλυδωνίζεται» γύρω από το δεξιά μπροστά και πίσω αριστερά λάστιχο. Επίσης το όχημα ήταν εφοδιασμένο με ABS άρα και οι τέσσερις τροχοί μπορούσαν να κατευθυνθούν με εφαρμογή πέδησης χωρίς να κλειδώσουν οι τροχοί.

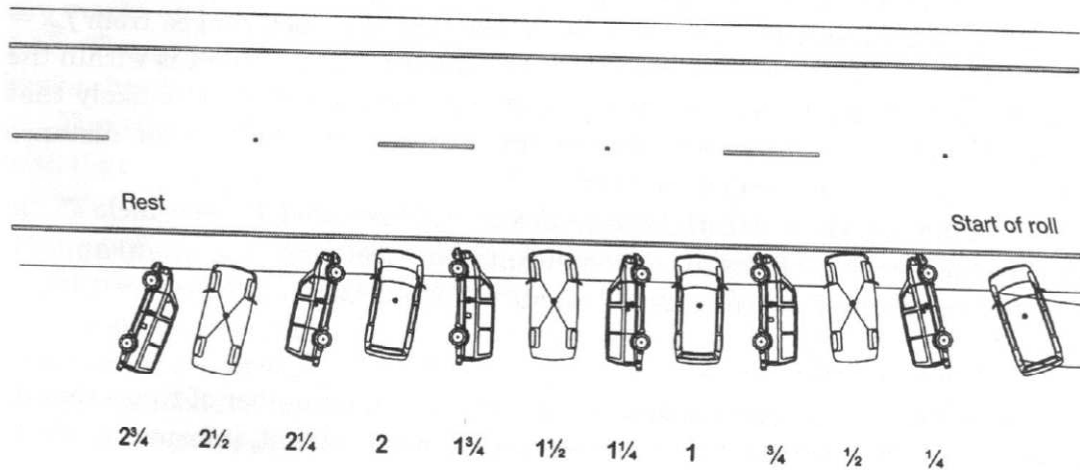
Συνεπώς με εφαρμογή του τύπου της ταχύτητας, για $f=0.7$ (στεγνή άσφαλτος) και για R που προκύπτει με βάση όσα έχουν περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα 710.2 ft του σημαδιού από το μπροστά δεξιά ελαστικό χρησιμοποιήθηκαν τα πρώτα 77ft) προκύπτει ταχύτητα ίση με 138.8km/h, η οποία ενδεχομένως να χρειάζεται προσαύξηση γιατί ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε τείνει να υποτιμά την ταχύτητα όταν υπάρχει εφαρμογή πέδησης. Το τελευταίο που πρέπει να γίνει είναι ο συσχετισμός της ταχύτητας στην αρχή εμφάνισης των σημαδιών των ελαστικών που μόλις υπολογίστηκε με την ταχύτητα κατά της έναρξης της απώλειας ελέγχου, που είναι 138.8km/h και 86.5 ως 93.6 km/h αντίστοιχα. Η διανυόμενη απόσταση είναι περίπου 74.6m. Με βάση αυτά προκύπτει f_{eff} από 0.55 ως 0.62 που είναι εντός των δυνατοτήτων του συστήματος πέδησης του οχήματος και υποδηλώνει ότι εφαρμόζοταν πέδηση καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης

VI2. Λεπτομερής Ανάλυση της ανατροπής του οχήματος

Σε αυτή την ενότητα, επιδεικνύεται μια διαδικασία προσδιορισμού του αριθμού των φορών που ένα όχημα ανετράπη κατά την τρίτη φάση του ατυχήματος που στηρίζεται στα στοιχεία του τόπου του ατυχήματος αλλά και του οχήματος και είναι γενικά μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Ο στόχος μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης είναι η απόδοση κάθε στοιχείου του οχήματος όπως παραμορφώσεις, γρατζουνιές, θραύσεις γυαλιών σε μια συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό του οχήματος κατά την ανατροπή. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν μπορεί να δοθεί μια εξήγηση όλων των θέσεων του οχήματος κατά την διάρκεια όλης της φάσης ανατροπής και η οποία να ταιριάζει για τα περισσότερα αν όχι όλα τα διαθέσιμα στοιχεία. Το πρώτο βήμα συνήθως είναι η τοποθέτηση όλων των ευρημάτων από τον τόπο και την σκηνή του ατυχήματος, κάτι που αναπαρίσταται στο σχήμα 5.14 ενώ στο σχήμα 5.15 για ευκολία φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με εικονιζόμενα οχήματα σε στροφές 90°. Το όχημα ανετράπη από την πλευρά του οδηγού και αναποδογύρισε $2\frac{3}{4}$ φορές και ακινητοποιήθηκε από την πλευρά του συνοδηγού.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα του ατυχήματος όπου φαίνονται οι θέσεις κατά την έναρξη της απώλειας ελέγχου, η θέση ακινητοποίησης καθώς και οι θέσεις διαφόρων αντικειμένων σχετικών με το ατύχημα



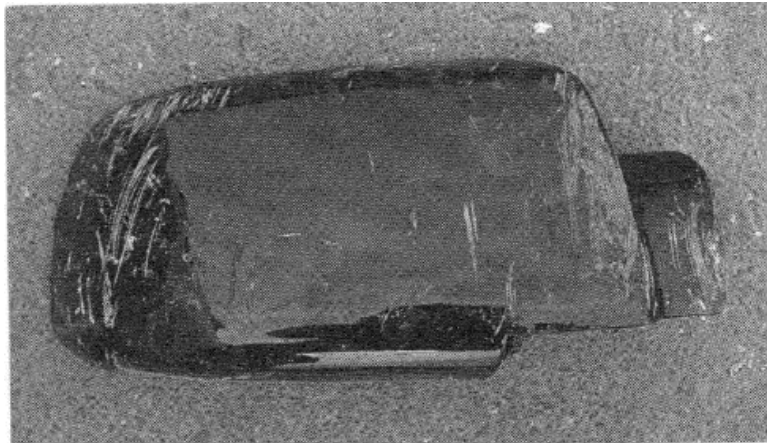
Σχήμα 5.15 Διάγραμμα του ατυχήματος όπου φαίνονται οι διάφορες θέσεις και ο αντίστοιχος προσανατολισμός του οχήματος κατά την φάση ανατροπής

Η οροφή πιέστηκε πρώτη φορά προς τα μέσα στην πλευρά του συνοδηγού αφού η πρώτη επαφή οχήματος και εδάφους συνέβη στις ράγες οροφής του συνοδηγού. Επίσης είχαμε παραμόρφωση της συρόμενης πόρτας του οχήματος και το σπάσιμο του παραθύρου στην πλευρά του συνοδηγού. Η θέση και ο προσανατολισμός του οχήματος μπορεί να βρεθεί από το κομμάτι γυαλιού που αντιστοιχεί στο σπασμένο παράθυρο και βρέθηκε στον τόπο του ατυχήματος



Σχήμα 5.16 Αριστερά: Παραμόρφωση της πλευράς του συνοδηγού από την πρώτη ανατροπή Δεξιά: Παραμόρφωση του πλαινού τμήματος του οχήματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.14, ο καθρέπτης το συνοδηγού βρέθηκε παρακείμενα σε ένα σωρό από γυαλιά κάτι που συνάδει με την φύση της σύγκρουσης μεταξύ πλευράς συνοδηγού και εδάφους. Στο σχήμα 5.17 φαίνεται ο εν λόγω καθρέπτης από την μπροστινή πλευρά του με εμφανείς χαρακιές και γρατζουνιές στο περίβλημα που συμφωνούν με την σειρά επαφής περιβλήματος και λωρίδας έκτακτης ανάγκης, όπου και ο καθρέπτης θα δίπλωνε προς το εσωτερικό του οχήματος. Οι γρατζουνιές στο περίβλημα στην πτυσσόμενη περιοχή απλά επιβεβαιώνει το παραπάνω αφού και η διεύθυνση αυτών είναι κοινή με τις προαναφερθείσες γρατζουνιές.



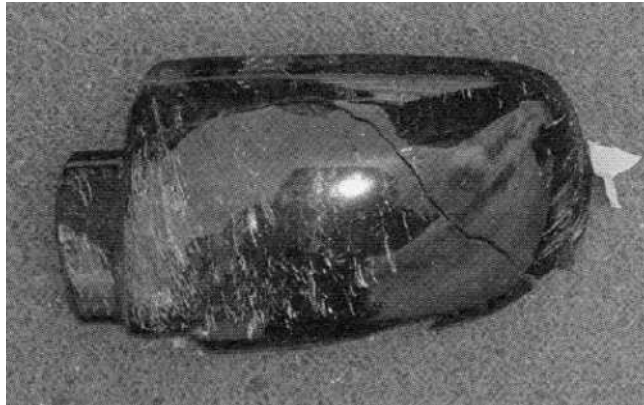
Σχήμα 5.17 Απεικόνιση του περιβλήματος του καθρέπτη του συνοδηγού

Η πλάγια θέση του οχήματος ως προς το δρόμο και την λωρίδα έκτακτης ανάγκης κατά την πρώτη επαφή μπορεί να εξακριβωθεί και από την θέση των μοτίβων των γρατζουνιών στην πλευρά του οχήματος. Το σχήμα 5.18 δείχνει ένα τμήμα του δεξιά μπροστά φτερού και της πόρτας μετά το ατύχημα. Οι γρατζουνιές τελειώνουν ακριβώς μετά την μπροστινή άκρη της πόρτας, υποδηλώνοντας ότι αυτό το κομμάτι του οχήματος βρισκόταν κατά μήκος της άκρης της λωρίδας έκτακτης ανάγκης



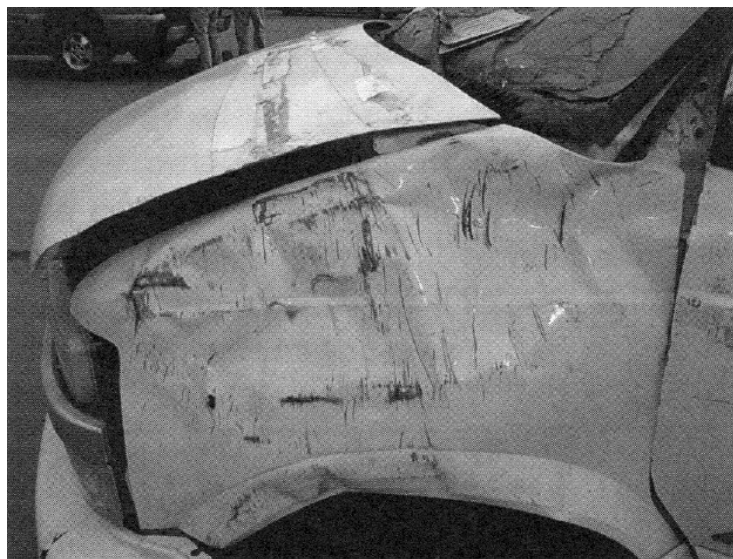
Σχήμα 5.18 Απεικόνιση τμήματος του δεξιά μπροστά φτερού και της πόρτας όπου φαίνεται η οριοθέτηση μεταξύ τμημάτων της λαμαρίνας που υπέστησαν φθορά και αυτών που δεν υπέστησαν

Ο καθρέπτης του οδηγού βρέθηκε πιο κάτω από το καθρέπτη του συνοδηγού, που σημαίνει ότι αποκολλήθηκε πιο μετά χρονικά κατά την φάση ανατροπής από αυτόν κάτι που υποστηρίζεται από τα δύο διαφορετικά σχέδια γρατζουνιών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Με βάση το σχήμα 5.15 ο καθρέπτης θα ήταν σε επαφή με το έδαφος στην $1 \frac{1}{4}$ και $2 \frac{1}{4}$ στροφές καθώς στην $\frac{1}{4}$ στροφή το όχημα δεν άγγιξε το έδαφος. Επίσης τα σημάδια του περιβλήματος το διατρέχουν μπρος-πίσω κάθετα στην διεύθυνση που λογικά αναμενόταν με βάση την κίνηση του οχήματος κατά την ανατροπή, κάτι που οφείλεται από την κίνηση του περιβλήματος καθώς έσπαγε. Οι γρατζουνιές στην πτυσσόμενη περιοχή συνέβησαν λίγο αργότερα αφού είχε διπλώσει προς τα μέσα ο καθρέπτης.



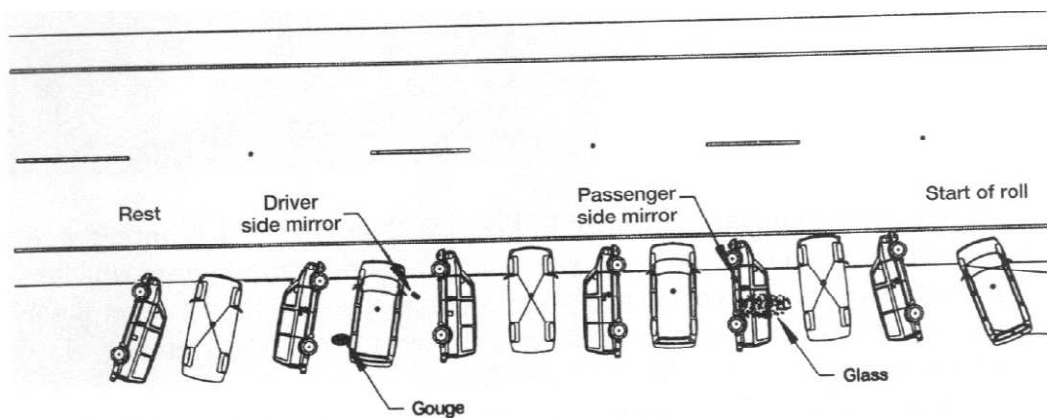
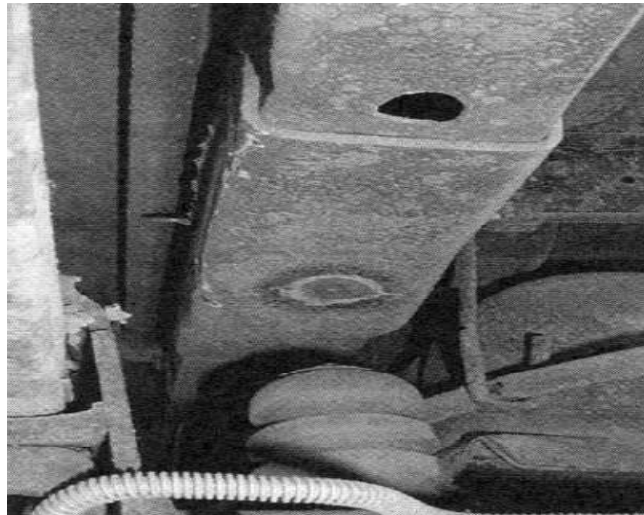
Σχήμα 5.19 Απεικόνιση του περιβλήματος του καθρέπτη του οδηγού

Δύο επαφές μεταξύ του αριστερά μπροστά τμήματος του αυτοκινήτου και της λωρίδας έκτακτης ανάγκης στις $1 \frac{1}{4}$ και $2 \frac{1}{4}$ στροφές υποδηλώνονται από δυο διαφορετικά είδη γρατζουνιών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που απεικονίζει το αριστερό μπροστά προφυλακτήρα/φτερό. Δύο σχέδια γρατζουνιών με ελαφρώς διαφορετικές κατεθύνσεις μπορούν να διακριθούν.



Σχήμα 5.20 Απεικόνιση του μπροστά αριστερού φτερού του οχήματος

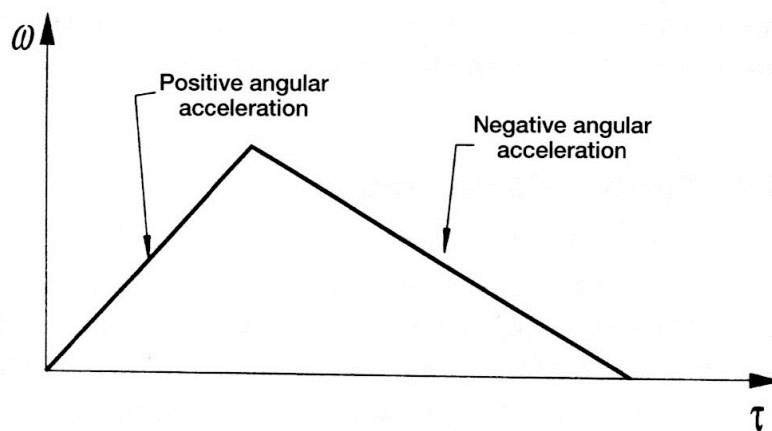
Τέλος μια τρύπα στη διαχωριστική λωρίδα δημιουργήθηκε από την επαφή του αριστερού πίσω τροχού στις 2 στροφές. Κατά την διάρκεια αυτού του τύπου επαφής τροχού-εδάφους, η ανάρτηση στον συγκεκριμένο τροχό τυπικά συμπιέζεται εντελώς. Συχνά, η ανάρτηση παραμορφώνεται πλευρικά επιτρέποντας τον τροχό/ανάρτηση να έλθει σε επαφή με το σώμα του οχήματος. Αυτό αφήνει ένα σημάδι το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα αν και δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο στο ατύχημα αυτό καθ' αυτό.



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα του ατυχήματος που δείχνει τις φυσικές αποδείξεις στον τόπο του ατυχήματος και τις θέσεις του οχήματος που αντιστοιχούν στις αποδείξεις αυτές

VII. Ρυθμός περιστροφής του οχήματος κατά την ανατροπή

Πέρα από την θέση και τον προσανατολισμό του οχήματος στην φάση ανατροπής, ο ρυθμός περιστροφής είναι επίσης σημαντικός. Έχει αποδειχθεί ότι αυτός ο ρυθμός αντιστοιχίζεται στο τριγωνικό προφίλ του σχήματος 5.23. Αυτή η συμπεριφορά προκύπτει και σε χωμάτινο έδαφος με μια παρόμοια αύξηση μέχρι μια μέγιστη περιστροφική ταχύτητα μετά την έναρξη των αυλακώσεων και μετά μια μείωση μέχρι το μηδενισμό. Στην περίπτωση κρασπέδου, μια πολύ πιο απότομη αύξηση στον ρυθμό περιστροφής παρατηρείται. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση δεν παρέχονται πληροφορίες για την διάκριση της μετάβασης από την δεύτερη στην τρίτη φάση σχετικά με τον ρυθμό περιστροφής και επομένως δεν είναι δυνατό να γενικεύσει την σχέση μεταξύ του τέλους της δεύτερης φάσης και της θέσης της μέγιστης τιμής του ρυθμού περιστροφής. Αντίθετα, περαιτέρω μελέτη απαιτείται.



Σχήμα 5.23 Προφίλ του ρυθμού περιστροφής για οχήματα που υποβάλλονται σε τεστ ανατροπής

Η κορυφή του ρυθμού περιστροφής για τα οχήματα εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος κατά την αρχή της ανατροπής και τον τύπο του μηχανισμού εξαιτίας του οποίου χάνεται ο έλεγχος (κράσπεδο, χώμα κ.ο.κ.)

Κεφάλαιο Έκτο

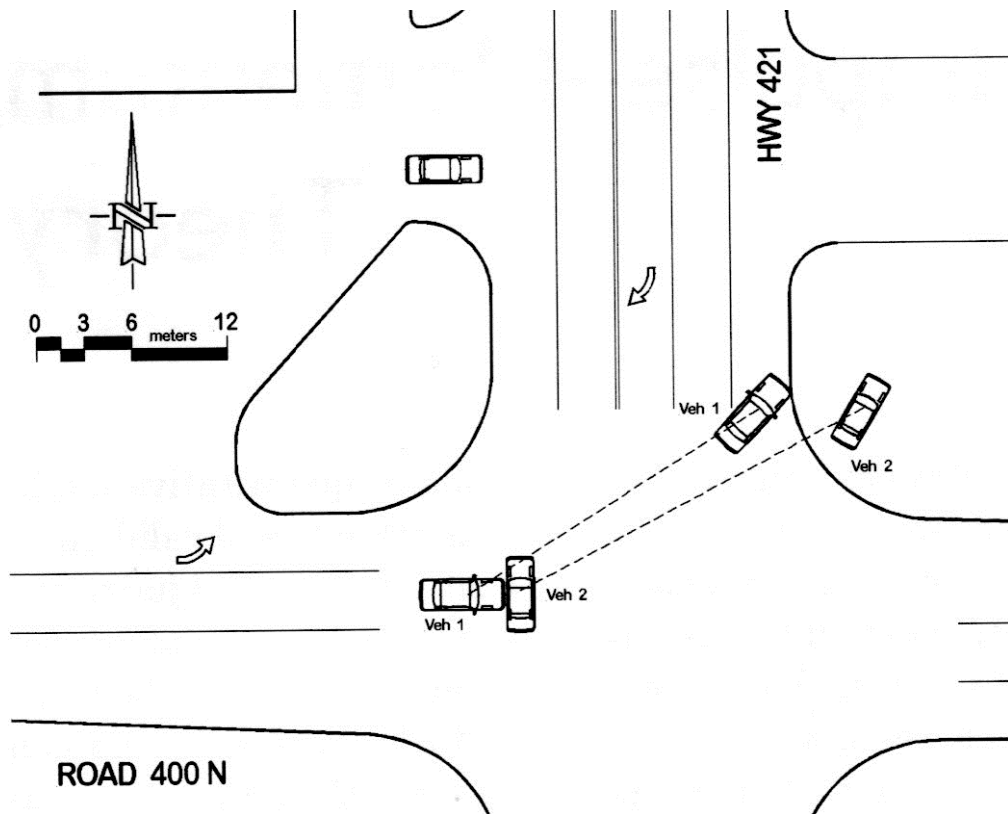
Ανάλυση συγκρούσεων και θεωρία ώθησης-ορμής

I. Εισαγωγή

Για την εξαγωγή αξιόπιστων και έγκυρων συμπερασμάτων για ένα ατύχημα, απαιτούνται ποσοτικές μέθοδοι για την ανακατασκευή εφόσον είναι διαθέσιμες αξιόπιστες και έγκυρες πληροφορίες και στοιχεία. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ικανότητες όπως η διαίσθηση και η κρίση, πάντα όμως με προσοχή. Εντούτοις, η κατανόηση των βασικών εννοιών της μηχανικής θεωρείται αυτονόητη για την μελέτη των συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων. Μια φράση που χρησιμοποιείται συχνά σε περιπτώσεις τέτοιων ατυχημάτων είναι η «διατήρηση της ορμής». Ως ορμή ορίζεται το γινόμενο της μάζας και της ταχύτητας. Η μάζα, m , είναι έμφυτη ιδιότητα ενός αντικειμένου. Πρόκειται στην ουσία για μέγεθος που εκφράζει το έργο που απαιτείται για την μετακίνηση ενός αντικειμένου ή την ρυμούλκηση ενός αντικειμένου ώστε να κινηθεί πιο αργά και παραμένει σταθερή ανεξάρτητη από την επιτάχυνση της βαρύτητας. Το βάρος, W , είναι μια δύναμη, ένα μέτρο πρακτικά της επίδρασης βαρύτητας που τραβά ένα αντικείμενο προς την γη και ισούται με το γινόμενο της μάζας m και της επιτάχυνσης της βαρύτητας, g , δηλαδή $W=mg$. Επομένως η τιμή του βάρους είναι συνάρτηση του g το οποίο μεταβάλλεται (π.χ για ατυχήματα κοντά στο επίπεδο της θάλασσας, 9.81m/s^2). Επομένως υπό την έννοια αυτή, η μάζα και το βάρος είναι ισοδύναμα.

Το άλλο κομμάτι της ορμής είναι η ταχύτητα με μια σχετική κατεύθυνση. Άρα ένα όχημα με μεγάλη ορμή μπορεί να έχει μεγάλη μάζα και μικρή ταχύτητα ή μικρή μάζα και μεγάλη ταχύτητα. Εάν επάνω στο αντικείμενο δεν δρουν εξωτερικές δυνάμεις (όπου αντικείμενο μπορούν να θεωρηθούν και δύο αντικείμενα που βρίσκονται σε επαφή), οι νόμοι της μηχανικής ορίζουν ότι η ορμή του συστήματος (συνδυασμένη ροπή των δύο αντικειμένων) δεν αλλάζει. Επομένως, από την στιγμή που δύο οχήματα ενώνονται σε ένα τροχαίο, μέχρι να χωριστούν, η ορμή τους παραμένει ίδια υπό την προϋπόθεση ότι οποιεσδήποτε δυνάμεις (π.χ δυνάμεις στα ελαστικά) κατά την διάρκεια της επαφής είναι αμελητέες. Στην πραγματικότητα είναι η ώθηση (μεταβολή της ορμής) των δυνάμεων τριβής των ελαστικών που πρέπει να είναι σχετικά μικρές ως προς την ώθηση των δυνάμεων μεταξύ των οχημάτων, όπου η ώθηση των δυνάμεων είναι η συσσώρευση (accumulate) της δύναμης στο χρόνο. Συνεπώς, εφόσον ο χρόνος επαφής των οχημάτων είναι μικρός, η ορμή διατηρείται περίπου σταθερή.

Η σύνδεση των παραπάνω με την διαίσθηση και την κρίση μπορεί να φανεί στο παρακάτω παράδειγμα.



Σχήμα 6.1 Απεικόνιση σύγκρουσης δύο οχημάτων σε διασταύρωση

Εάν το όχημα 1 (vehicle 1) είχε μεγάλη ορμή την στιγμή της σύγκρουσης και το όχημα 2 μια πολύ μικρή ορμή, οι θέσεις ηρεμίας μετά το ατύχημα θα ήταν κοντά στην θέση που αντιστοιχεί στις 3 μ.μ (κανόνας ρολογιού ορμής - momentum clock). Αν η κατανομή των ορμών ήταν ακριβώς αντίθετη τότε οι αντίστοιχες θέσεις θα ήταν κοντά στις 12. Εάν η συνολική αρχική ορμή είναι μικρή τότε τα οχήματα θα μείνουν εντός του ρολογιού διαφορετικά θα περάσουν έξω από αυτό. Εάν και τα δύο οχήματα έχουν ίδιο βάρος και είναι ένα τροχαίο με τις θέσεις στις 2 η ώρα όπως στο παραπάνω σχήμα, τότε η διαίσθηση λέει πως το όχημα 1 πηγαινει πιο γρήγορα από το όχημα 2.

II. Ποσοτικές Έννοιες

Για την ανάλυση των συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων ποσοτικά, απαιτούντι πιο αυστηρά μοντέλα από μηχανικής. Παρακάτω παρατίθενται μερικά από αυτα. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για μια σταθερή κινούμενη μάζα στην διεύθυνση, έστω των x , μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\mu \frac{du(\tau)}{d\tau} = F(\tau) \quad (6.1)$$

Όπου m η μάζα, τ ο χρόνος, $u(\tau)=dx/dt$ η ταχύτητα. Η $F(\tau)$ αναπαριστά την συνισταμένη δύναμη στην x διεύθυνση που δρα στην μάζα m . Η ολοκλήρωση της σχέσης αυτής δίνει:

$$m \int_{\tau_1}^{\tau_2} du = mu(\tau_2) - mu(\tau_1) = mV - mu = \int_{\tau_1}^{\tau_2} F(\tau) d\tau \quad (6.2)$$

Όπου ο κεφαλαίος και μικρός συμβολισμός για τις ταχύτητες χρησιμοποιείται για τις τελικές και αρχικές ταχύτητες αντίστοιχα. Το γινόμενο μάζας και ταχύτητας καλείται ορμή και κατ' αναλογία mu και mV είναι η αρχική και τελική ορμή αντίστοιχα. Το αόριστο ολοκλήρωμα της δύναμης $F(\tau)$ σε ένα χρονικό διάστημα από τ_1 έως τ , ορίζεται ως η ώθηση, $p(\tau)$, της δύναμης και γράφεται ως:

$$p(\tau) = \int_{\tau_1}^{\tau} F(\tau) d\tau \quad (6.3)$$

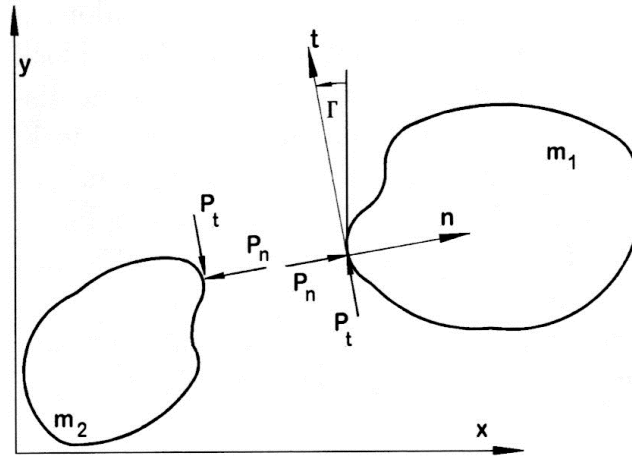
Οπότε με αντικατάσταση στην 6.2 προκύπτει

$$mV - mu = P \quad (6.4)$$

Όπου P είναι η ώθηση την χρονική στιγμή τ_2 . Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η αλλαγή στην ορμή(τελική μείον αρχική) ενός σώματος είναι ίση με την ώθηση της συνισταμένης δύναμης.

III. Θεωρία ώθησης-συγκρούσεων για σημειακή μάζα

Όταν δύο κινούμενα σώματα συγκρουστούν και είναι σε επαφή για ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, η δύναμη επαφής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις άλλες δυνάμεις που δρουν στα σώματα. Η προκύπτουσα επιτάχυνση λόγω της δύναμης επαφής και η μεγάλη ώθηση κυριαρχούν επί των άλλων ωθήσεων που προκαλούνται από τις μικρότερες δυνάμεις. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο νόμος του Νεύτωνα για την ορμή και την ώθηση μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε σώμα ξεχωριστά, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν άλλες δυνάμεις κατά την επαφή των σωμάτων. Έστω m_1 και m_2 οι μάζες των σωμάτων που φαίνονται στο σχήμα 6.2 και x - y σύστημα συντεταγμένων σταθερής αναφοράς. Επειδή η σύγκρουση εξαρτάται από την γεωμετρία της επαφής, στην επιφάνεια επαφής θεωρούμε ξεχωριστούς άξονες n - t .



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος δύο συγκρουόμενων σημειακών μαζών με συνιστώσες ώθησης επαφής, P_n και P_t

Με εφαρμογή της (6.4) για το σώμα m_1 για τις δύο διευθύνσεις προκύπτουν :

$$m_1 V_{1n} - m_1 u_{1n} = P_n \quad (6.5)$$

$$m_2 V_{1t} - m_1 u_{1t} = P_t \quad (6.6)$$

Όμοια για το σώμα m_2 εφαρμόζουμε και καταλήγουμε στις εξισώσεις:

$$m_2 V_{2n} - m_2 u_{2n} = -P_n \quad (6.7)$$

$$m_2 V_{2t} - m_2 u_{2t} = -P_t \quad (6.8)$$

Επειδή η διάρκεια επαφής είναι σχετικά μικρή, οι θέσεις των σωμάτων δεν αλλάζουν σημαντικά, έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι ταχύτητες αλλάζουν στιγμιαία χωρίς αλλαγή της θέσης.

Οι εξισώσεις 6.5 ως 6.8 ονομάζονται εξισώσεις επιπέδου ώθησης-ορμής για σημειακές μάζες. Προστίθοντας κατά μέλη τις 6.5, 6.7 και 6.6, 6.8 έχουμε:

$$(m_1 V_{1n} - m_1 u_{1n}) + (m_2 V_{2n} - m_2 u_{2n}) = 0 \quad (6.9)$$

$$(m_2 V_{1t} - m_1 u_{1t}) + (m_2 V_{2t} - m_2 u_{2t}) = 0 \quad (6.10)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις βλέπουμε ότι η ορμή στις διευθύνσεις t και n δεν αλλάζει αφού το άθροισμα είναι μηδέν (διατήρηση της ορμής). Ωστόσο, θεωρώντας γνωστές τις μάζες και τις αρχικές ταχύτητες, επειδή οι άγνωστοι συνολικά είναι έξι και οι διαθέσιμες εξισώσεις τέσσερις,

απαιτούνται δύο επιπλέον εξισώσεις. Η μια εξ'αυτών προκύπτει από τον ορισμό ενός συντελεστή αποκατάστασης, e που είναι στην ουσία ο λόγος της ταχύτητας κατά τον διαχωρισμό των δύο αντικειμένων προς την ταχύτητα κατά την στιγμή της σύγκρουσης, μεταξύ του κέντρου επαφής των δύο σωμάτων (impact center) και δίνεται από την σχέση:

$$V_{2n} - V_{1n} = -e(u_{2n} - u_{1n}) \quad (6.11)$$

Η δεύτερη απαιτούμενη εξίσωση προκύπτει από την συσχέτιση της εφαπτόμενης ώθησης και της «κανονικής» μέσω της σχέσης:

$$P_t = \mu P_n \quad (6.12)$$

Ο συντελεστής μ , δεν είναι ένας συντελεστής τριβής αν και μπορεί να σχετιστεί με αυτή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να πάρει θετικές ή αρνητικές τιμές ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες. Στο σημείο αυτό η ποσότητα μ , πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένας λόγος ωθήσεων και μόνο.

Οι έξι εξισώσεις (6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.11 και 6.12) είναι οι εξισώσεις του συστήματος από την επίλυση του οποίου προκύπτουν οι κάτωθι εξισώσεις σε βολική μορφή

$$V_{1n} = u_{1n} + \frac{\bar{m}(1+e)(u_{2n} - u_{1n})}{m_1} \quad (6.13)$$

$$V_{2n} = u_{2n} - \frac{\bar{m}(1+e)(u_{2n} - u_{1n})}{m_2} \quad (6.14)$$

$$V_{1t} = u_{1t} + \frac{\mu\bar{m}(1+e)(u_{2n} - u_{1n})}{m_1} \quad (6.15)$$

$$V_{2t} = u_{2t} - \frac{\mu\bar{m}(1+e)(u_{2n} - u_{1n})}{m_2} \quad (6.16)$$

Όπου

$$\bar{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (6.17)$$

Οι ωθήσεις στους άξονες μπορούν να υπολογιστούν με αντικατάσταση των τελικών ταχυτήτων στις 6.5 και 6.8

Δύο ποσότητες με επίσης ιδιαίτερη σημασία είναι η μεταβολή της ταχύτητας και η απώλεια κινητικής ενέργειας κατά την σύγκρουση. Η μεταβολή της ταχύτητας, ΔV_i , δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\Delta V_i = \frac{\bar{m}(u_{2n} - u_{1n})}{m_i} (1 + e)\sqrt{1 + \mu^2}, \quad i = 1,2 \quad (6.18)$$

Ενώ η απώλεια κινητικής ενέργειας της σύγκρουσης, T_L , προκύπτει από την διαφορά της τελικής κινητικής ενέργειας από την αρχική ή αλλιώς:

$$T_L = \frac{1}{2}m_1(u_{1n}^2 + u_{1t}^2) + \frac{1}{2}m_2(u_{2n}^2 + u_{2t}^2) - \frac{1}{2}m_1(V_{1t}^2 + V_{1n}^2) - \frac{1}{2}m_2(V_{2t}^2 + V_{2n}^2) \quad (6.19)$$

Ενώ με αντικατάσταση των 6.13 και 6.14 στην παραπάνω εξίσωση δίνει την εξής απλοποιημένη μορφή:

$$T_L = \frac{1}{2}\bar{m}(u_{2n} - u_{1n})^2(1 + e)[(1 - e) + 2\mu r - (1 + e)\mu^2] \quad (6.20)$$

$$r = \frac{u_{2t} - u_{1t}}{u_{2n} - u_{1n}} \quad (6.21)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απώλεια κινητικής ενέργειας είναι ανάλογη της ποσότητας $(u_{2n} - u_{1n})^2$, όπου $(u_{2n} - u_{1n})$ είναι η αρχική σχετική ταχύτητα των μαζών, η οποία καλείται και ταχύτητα προσέγγισης.

III1. Συντελεστής αποκατάστασης, συγκρούσεις σημειακών μαζών χωρίς τριβή

Έστω η επαπτόμενη ώθηση P_t ότι είναι μηδέν, δηλαδή ότι έχουμε σύγκρουση απουσία τριβών. Για να συμβεί κάτι τέτοιο, το μ τίθεται ίσο με μηδέν σε όλες τις εξισώσεις. Οπότε η απώλεια κινητικής ενέργειας είναι:

$$T_L = \frac{1}{2}\bar{m}(u_{2n} - u_{1n})^2(1 - e)^2 \quad (6.22)$$

Από την παραπάνω εξίσωση είναι εμφανές ότι ο συντελεστής αποκατάστασης είναι αυτός που καθορίζει την απώλεια ενέργειας με τρόπο τέτοιο ώστε όταν $e=1$, η απώλεια κινητικής ενέργειας είναι μηδέν (ελαστική σύγκρουση). Όταν $e=0$, η σύγκρουση είναι πλαστική και τα δύο σώματα παραμένουν ενωμένα μετά την σύγκρουση ενώ έχουμε μεγιστοποίηση της απώλειας

κινητικής ενέργειας. Επειδή η απώλεια ενέργειας δεν μπορεί να είναι αρνητική $e^2 \leq 1$ και εξ'ορισμού $e^2 \geq 0$ χωρίς αυτό να σημαίνει ότι όταν το $e=0$ ολοκληρω η αρχική κινητική ενέργεια χάνεται. Αξίζει να σημειωθεί πάντως ότι το e μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές αλλά τέτοιες περιπτώσεις είναι σπάνιες και ξεφεύγουν από τα πλαίσια της εργασίας αυτής.

III2. Κρίσιμος συντελεστής αναλογίας ώθησης , μ_0

Στην περίπτωση που σκληρές συνθήκες επαφής αναπτύσσονται κατά την σύγκρουση, μια επαπτόμενη ώθηση P_t , δημιουργείται και είναι ικανή να σταματήσει την ολίσθηση πριν ή κατά τον αποχωρισμό των δύο σωμάτων. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί στην συνθήκη $V_{2t} - V_{1t} = 0$, η οποία ικανοποιείται όταν:

$$\mu = \mu_0 = \frac{r}{1 + e} \quad (6.23)$$

Όπου το r , δίνεται από την σχέση 6.21.

Ο συντελεστής αναλογίας ώθησης, μ_0 , καλείται κρίσιμος συντελεστής αναλογίας και έχει το ίδιο πρόσημο με το r , του οποίου το πρόσημο καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι όταν $\mu = \mu_0$, τα δύο σώματα έχουν ίδιες συνιστώσες ταχύτητας στην t , ή επαπτομενική, διεύθυνση κατά την αποκόλλησή τους. Υπό μια άλλη οπτική γωνία γνωρίζοντας ότι $P_t = \mu P_n$, άρα δεν παρατηρείται ολίσθηση κατά την αποκόλληση όταν $P_t = \mu_0 P_n$ μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως όταν $\mu < \mu_0$, η ολίσθηση υπάρχει και μετά την αποκόλληση το οποίο υπονοεί ότι η ολίσθηση υφίσταται κατά την αποκόλληση όταν $\mu < \mu_0$.

Η χρήση απόλυτων προσήμων είναι απαραίτητη καθώς το πρόσημο του μ καθορίζει την διεύθυνση της επαπτομενικής ώθησης P_t . Εάν υποθέσουμε ότι η δύναμη που δημιουργεί αυτή την ώθηση έχει ένα μέσο συντελεστή οπισθέλκουσας f με $f < \mu_0$, τότε η ολίσθηση υφίσταται και μετά την αποκόλληση ενώ όταν $f = \mu_0$, αυτή τερματίζει κατά την αποκόλληση. Τέλος όταν $f > \mu_0$, η ολίσθηση θα τερματιστεί πριν το αποχωρισμό των δύο σωμάτων. Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει σχέση μεταξύ του μ και της απώλειας ενέργειας και μάλιστα καθώς το μ αυξάνεται από 0 στην τιμή μ_0 , έχουμε μεγιστοποίηση των απωλειών.

III3. Πλευρικές συγκρούσεις και συνθήκες «κοινής ταχύτητας»

Στην ανάλυση συγκρούσεων οχημάτων, μια τιμή του συντελεστή αναλογίας $\mu < \mu_0$, υπονοεί μια πλευρική σύγκρουση, επειδή τα οχήματα συνεχίζουν να ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των οχημάτων κατά την διάρκεια επαφής αυτών. Όταν ισχύει η παραπάνω ανισότητα εξ'ορισμού θα θεωρούμε πλευρική σύγκρουση.

Όταν $\mu = \mu_0$, η σχετική επαπτομενική κίνηση(ολίσθηση), τελειώνει πριν ή κατά τον αποχωρισμό των οχημάτων. Όταν επιπλέον ο συντελεστής αποκατάστασης ισούται με μηδέν, $e=0$, τα οχήματα δεν αναπηδούν ή αποκολλώνται με αποτέλεσμα κατά το πέρας της σύγκρουσης να έχουν ταυτόσημες συνιστώσες ταχύτητας, κάτι που αναφέρεται ως κοινή ταχύτητα. Συνεπώς οι συνθήκες «κοινής ταχύτητας» ορίζονται ως $\mu = \mu_0$ και $e = 0$ κάτι που σημαίνει ότι τα οχήματα παραμένουν ενωμένα μετά την σύγκρουση. Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται στις περισσότερες συγκρούσεις που χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί επίσης, πως για ένα ζευγάρι σωμάτων με γνωστές ιδιότητες και τιμές συντελεστών, οι εξισώσεις 6.13 έως 6.16 επιτρέπουν τον προσδιορισμό των τελικών ταχυτήτων για γνωστές αρχικές ταχύτητες.

Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις ανακατασκευής, είναι πιο βολικό να λύνεται το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή τον προσδιορισμό των αρχικών ταχυτήτων για γνωστές τελικές ταχύτητες. Όμως απαιτείται προσοχή σε περιπτώσεις ατυχημάτων που δεν ισχύουν οι συνθήκες κοινής ταχύτητας και γιατί κατά το αντίστροφο πρόβλημα εμφανίζεται όροι που περιέχουν $1/e$, που απειρίζονται όταν $e=0$. Συμπερασματικά, σε τυπικές εφαρμογές οι εξισώσεις επιλύονται με χρήση επαναληπτικής μεθόδου.

IV. Ελεγχόμενες συγκρούσεις

Ελεγχόμενες συγκρούσεις πραγματοποιούνται για την συλλογή μιας μεγάλης ποικιλίας πληροφοριών όπως παρακολούθηση της επίδοσης εξαρτημάτων ασφαλείας (αισθητήρες, φρένα κ.α.), μετρήσεις ανθρωπομετρικών επιταχύνσεων, διαρροή εύφλεκτων υλικών, αξιοπιστία σε περίπτωση σύγκρουσης και πολλά άλλα. Οι συγκρούσεις αυτές μπορεί να είναι μετωπικές σε σταθερά άκαμπτα εμπόδια, οπίσθιες προσκρούσεις σε κινούμενα άκαμπτα εμπόδια, πλευρικές προσκρούσεις σε κινούμενα άκαμπτα και παραμορφώσιμα εμπόδια καθώς και πολλές άλλες. Δοκιμαστικές συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων χρησιμοποιούνται σε δοκιμές, αν και συνήθως τέτοιες δοκιμές γίνονται σε περιπτώσεις αντιδικιών.

Γενικά, αυτές οι ελεγχόμενες συγκρούσεις με εμπόδια, αντιμετωπίζονται ως ισοδύναμες με συγκρούσεις που συμβαίνουν σε τροχαία. Αυτές οι έννοιες περί ισοδυναμίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την ανακατασκευή ατυχημάτων με υποκειμενικό τρόπο και επιπλέον μπορούν να επιτρέπουν συγκρίσεις πραγματικών τροχαίων με υποθετικά και/ή ελεγχόμενα αντίστοιχα.

Ωστόσο, πριν φανεί η ισοδυναμία ή όχι των παραπάνω, πρέπει να προσδιοριστούν οι συνθήκες ισοδυναμίας. Εάν είναι επιθυμητή η ίδια ΔV από την ελεγχόμενη σύγκρουση, η ταχύτητα του εμποδίου μπορεί να είναι διαφορετική από την περίπτωση που είναι επιθυμητή η ίδια δομική απορρόφηση ενέργειας μεταξύ τροχαίου και δοκιμαστικής σύγκρουσης. Η επιλογή της «σωστής» ταχύτητας έχει να κάνει με τι μας ενδιαφέρει κανονικά (π.χ. αν επικεντρωνόμαστε στην πιθανότητα τραυματισμού, η ισοδυναμία βασισμένη στην ΔV δίνει πιο συναφή αποτελέσματα). Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εξισώσεις που προηγήθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ισοδυναμίας. Ιδιάζουσα σημασία φέρει και η ενέργεια σύγκρουση, E_c , και κυρίως κατά πόσο η ενέργεια αυτή σε μια δοκιμαστική σύγκρουση και ένα πραγματικό ατύχημα μπορεί να είναι ίδια. Ωστόσο, αυτό θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Στο σημείο αυτό απλά θα αρκεστούμε στο γεγονός, ότι σε μια δοκιμαστική σύγκρουση όλη η απώλεια ενέργειας μεταφέρεται στην σύγκρουση ενώ σε μια πραγματική σύγκρουση η μεταφορά εξαρτάται από την αντίσταση στην παραμόρφωση των οχημάτων (ακαμψία). Με λίγα λόγια το πιο άκαμπτο όχημα, θα παραμορφωθεί λιγότερο και συνεπώς θα απορροφήσει λιγότερη ενέργεια από το άλλο.

IV1. Συντελεστές αποκατάστασης

Όταν διεξάγονται μετωπικές δοκιμαστικές συγκρούσεις σε άκαμπτα εμπόδιο, είναι σχετικά απίθανο να μην αναπηδήσει το όχημα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο συντελεστής αποκατάστασης δεν είναι ακριβώς μηδέν και ακόμα και αν στις περισσότερες συγκρούσεις με μεγάλες ταχύτητες η αναπήδηση του οχήματος μπορεί να αγνοηθεί, υπάρχουν πάντα περιπτώσεις που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν. Ο συντελεστής αποκατάστασης, e , όπως ορίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην θεωρία συγκρούσεων για σημειακή μάζα αλλά και για συγκρούσεις όπου όλες οι δυνάμεις, ροπές και κινήσεις γίνονται σε ένα επίπεδο (planar impacts), αντιστοιχεί σε μια σύγκρουση δυο διαφορετικών οχημάτων. Στην πραγματικότητα, είναι μια παράμετρος σύγκρουσης που χαρακτηρίζει την απώλεια ενέργειας της σύγκρουσης και όχι των οχημάτων ξεχωριστά. Όπως θα φανεί παρακάτω, είναι δυνατόν να σχετιστούν οι ανεξάρτητες τιμές e_1, e_2 των οχημάτων και να προκύψει μια μόνο ενιαία τιμή για την σύγκρουση αυτών και μάλιστα όχι με μόνο ένα τρόπο.

Συντελεστής αποκατάστασης ισοδύναμος σκληρότητας

Οι δύο συντελεστές e_1, e_2 για τα οχήματα δοκιμών 1 και 2 μπορούν να σχετιστούν για απευθείας κεντρικές συγκρούσεις μέσω των απωλειών ενέργειας και από την ακαμψία κατά την πρόσκρουση. Οι συγκρούσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι έχουν δύο στάδια, την προσέγγιση και την αναπήδηση με σημείο διαχωρισμού των δύο σταδίων το σημείο μέγιστης συμπίεσης.

Η κινητική ενέργεια που επιστρέφεται (λόγω αποκατάστασης) είναι e^2 φορές την ενέργεια που αποθηκεύεται ενώ η ενέργεια που χάνεται είναι $(1-e)^2$ φορές την αποθηκευόμενη ενέργεια. Από την εξίσωση 6.22 κατά την μέγιστη προσέγγιση, η ενέργεια που αποθηκεύεται στα οχήματα για μέγιστη παραμόρφωση είναι ίση με $E_T = 1/2 \bar{m}(u_{2n} - u_{1n})^2$. Η ενέργεια που επιστρέφεται κατά την αναπήδηση είναι $e^2 * (1/2 \bar{m}(u_{2n} - u_{1n})^2)$ ενώ οι απώλειες ενέργειας είναι ίσες με $(1-e^2) E_T$.

Η συνολική ενέργεια κατά την σύγκρουση μπορεί να γραφτεί ως:

$$T_L = (1 - e_1^2)E_1 + (1 - e_2^2)E_2 = (1 - e^2)E_T \quad (6.24)$$

Όπου E_1, E_2 είναι οι απώλειες ενέργειας κάθε οχήματος που αντιστοιχούν στους ανεξάρτητους συντελεστές αποκατάστασης e_1 και e_2 . Εάν υποθέσουμε ότι η παραμόρφωση θραύσης κατά την φάση προσέγγισης κάθε οχήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμικό ελαστικό ελατήριο, σταθεράς k , τότε κάθε ένα πρέπει να έχει ίσα και αντίθετα επίπεδα ισχύος και $k_1 C_1 = k_2 C_2$, όπου C_i αντιπροσωπεύει την παραμόρφωση θραύσης. Τετραγωνίζοντας την παραπάνω σχέση και με γνωρίζοντας ότι για γραμμικό ελατήριο ισχύει $E = 1/2 K c^2$, προκύπτει ότι:

$$E_1 k_1 = E_2 k_2 = E_T \bar{k} \quad (6.25)$$

$$\bar{k} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad (6.26)$$

Αντικαθιστώντας στην 6.24 και επιλύοντας ως προς e προκύπτει ο ζητούμενος ισοδύναμος συντελεστής:

$$e_k = \frac{e_1^2 k_2 + e_2^2 k_1}{k_1 + k_2} \quad (6.27)$$

Συντελεστής αποκατάστασης ισοδύναμος μάζας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τον καθορισμό ενός ενιαίου ισοδύναμου συντελεστή αποκατάστασης προκύπτει θεωρώντας ότι σε μια απευθείας σύγκρουση κατά την μέγιστη συμπίεση και τα δύο οχήματα έχουν την ίδια ταχύτητα, u_c . Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση 6.9 για $V_{1n} = V_{2n} = u_c$ οπότε προκύπτει:

$$u_c = \frac{m_1 u_1 + m_2 u_2}{m_1 + m_2} \quad (6.28)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να ερμηνευθεί ότι σε τέτοιου είδους συγκρούσεις, η σύγκρουση, η προσέγγιση και η αναπήδηση κάθε οχήματος ισοδυναμεί με την πρόσκρουση καθενός εξ' αυτών με ένα άκαμπτο εμπόδιο που κινείται με ταχύτητα προσέγγισης u_c .

Αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα προσέγγισης του οχήματος 1 ισούται με $u_c - u_1$ και του οχήματος 2 με $u_2 - u_c$. Εξισώνοντας το άθροισμα των απωλειών ενέργειας για τα δύο οχήματα (εξ. 6.22) έχουμε:

$$\frac{1}{2}(1 - e_1)^2 m_1 (u_c - u_1)^2 + \frac{1}{2}(1 - e_2)^2 m_2 (u_2 - u_c)^2 = \frac{1}{2} \bar{m} (u_2 - u_1)^2 (1 - e)^2 \quad (6.29)$$

$$\bar{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (6.30)$$

Οπότε επιλύοντας ως προς e από την σχέση 6.29, προκύπτει ο ισοδύναμος συντελεστής

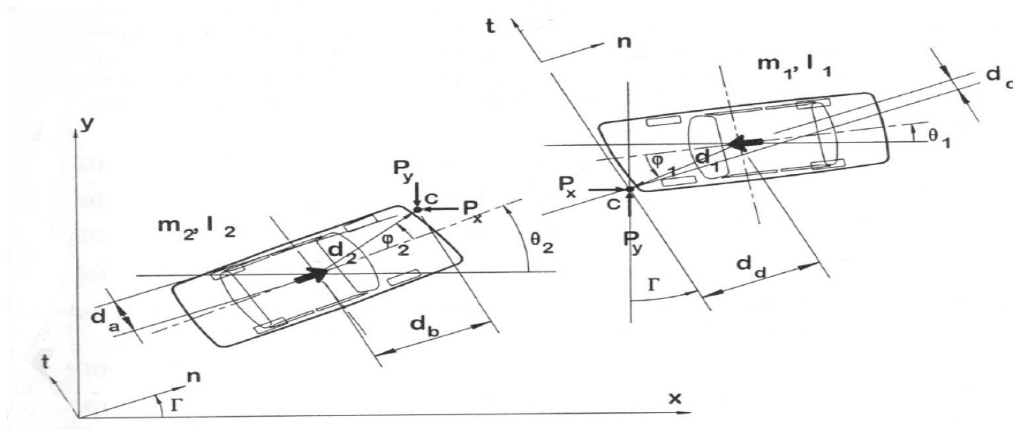
$$e_m = \sqrt{\frac{e_1^2 m_2 + e_2^2 m_1}{m_1 + m_2}} \quad (6.31)$$

Μια παρατήρηση που εύκολα προκύπτει είναι ότι οι δύο ισοδύναμοι συντελεστές που παρουσιάστηκαν παραπάνω οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Η επιλογή του καταλληλότερου είναι θέμα εμπειρίας και εφαρμογής, χωρίς να μπορεί να γίνει κάποια σύγκριση που να βασίζεται σε πειράματα. Αν και η μοντελοποίηση με βάση την ακαμψία είναι μια σύνθητης διαδικασία στην ανακατασκευή ατυχημάτων ενδεχομένως και η χρήση του αντίστοιχου συντελεστή να φαντάζει πιο ρεαλιστική. Εντούτοις, η υπόθεση στην εν λόγω μοντελοποίηση ότι η παραμόρφωση προσομοιάζεται με γραμμικό ελατήριο φυσικά δεν είναι αληθής. Και στην άλλη όμως περίπτωση θεωρούμε ισοδύναμια στην απώλεια ενέργειας κάθε οχήματος κατά την πρόσκρουση οχήματος-οχήματος και οχήματος-εμποδίου. Η καλύτερη λύση είναι η χρήση και των δύο για την ανακατασκευή και η χρήση των αποτελεσμάτων ως μέτρο της αβεβαιότητας.

V. Μηχανική των συγκρούσεων που όλες οι δυνάμεις,ροπές και κινήσεις βρίσκονται σε ένα επίπεδο

Μέχρι τώρα οι γωνιακές ταχύτητες, η περιστροφική αδράνεια και η γωνιακή ορμή περιστροφής είχαν αγνοηθεί, κάτι που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι γενικά αποδεκτό. Σε αυτή την ενότητα, αναλύεται μια θεωρία που συχνά αναφέρεται με το όνομα «θεωρία συγκρούσεων άκαμπτου σώματος» και κατά την οποία τα συγκρουόμενα οχήματα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι είναι μη-παραμορφώσιμα αλλά ότι η περιστροφική αδράνεια λαμβάνεται υπόψιν όπως επίσης και οι διαστάσεις κάθε οχήματος πριν την σύγκρουση. Η εξαγωγή των εξισώσεων που περιγράφουν την σύγκρουση δύο οχημάτων γίνεται με τρόπο αντίστοιχο όπως αναλύθηκε παραπάνω, εννοώντας την έλλειψη εξισώσεων που παρείχαν οι νόμοι του Νεύτωνα ώστε να διατυπωθεί το πρόβλημα και να προκύψουν λύσεις. Προηγουμένως έπρεπε να ληφθούν υπόψιν οι διαδικασίες στην κανονική και εφαπτομενική διεύθυνση μέσω του συντελεστή αποκατάστασης και του συντελεστή αναλογίας.

Αν και η διαδικασία παραγωγής των επιπλέον εξισώσεων διαφέρει εδώ, ακολουθεί την ίδια λογική. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι εφαρμογές που εξετάζονται, αφορούν συγκρούσεις οχημάτων που έχουν σχεδόν πάντα μικρές τιμές του συντελεστή αποκατάστασης δηλαδή είναι εξαιρετικά ανελαστικά. Το σχήμα 6.5 δείχνει δύο οχήματα σε μορφή διαγράμματος ελευθέρου σώματος με μάζες m_1 και m_2 , περιστροφικές αδράνεις I_1 και I_2 με κοινό σημείο επαφής, το σημείο C . Ως σύστημα αναφοράς θεωρείται το (x,y) που βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους ενώ οι γωνίες θ_1 και θ_2 υποδεικνύουν τους προσανατολισμούς των οχημάτων την στιγμή της σύγκρουσης. Το σημείο C , βρίσκεται ως προς τα κέντρα βάρους αποστάσεις d_1 και d_2 υπό γωνίες φ_1 και φ_2 ενώ ένα σύστημα συντεταγμένων (n,t) που αναφέρεται στην σύγκρουση ή την επιφάνεια σύγκρουσης σχηματίζει γωνία Γ , με το (x,y) .



Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος της σύγκρουσης (planar impact) δύο οχημάτων με απεικόνιση συντεταγμένων και διαστάσεων

Οι υπόλοιπες αποστάσεις στο σχήμα περιγράφονται από τις κάτωθι εξισώσεις

$$d_a = d_2 \sin(\theta_2 + \varphi_2 - \Gamma) \quad (6.32)$$

$$d_b = d_2 \cos(\theta_2 + \varphi_2 - \Gamma) \quad (6.33)$$

$$d_c = d_1 \sin(\theta_1 + \varphi_1 - \Gamma) \quad (6.34)$$

$$d_d = d_1 \cos(\theta_1 + \varphi_1 - \Gamma) \quad (6.35)$$

Με P_n, P_t συμβολίζονται οι moment arms των συνιστωσών των ωθήσεων στην κανονική και εφαπτομενική διεύθυνση ενώ τόσο αυτές όσο και οι τελικές ταχύτητες μπορούν να μετασχηματιστούν από το σύστημα συντεταγμένων (x, y) στο (n, t) με χρήση τριγωνομετρίας. Για π.χ. η σχέση μεταξύ των συνιστωσών των ωθήσεων δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_n = P_x \cos \Gamma + P_y \sin \Gamma \quad (6.36)$$

$$P_t = P_x \sin \Gamma + P_y \cos \Gamma \quad (6.37)$$

Στο σημείο αυτό γίνεται η υπόθεση ότι το επίπεδο της δύναμης που δρα στην κοινή επιφάνεια επαφής/σύγκρουσης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις άλλες δυνάμεις (π.χ τριβή ελαστικών-δρόμου, αεροδυναμικές δυνάμεις κ.α.). Έτσι οι ωθήσεις αυτών των δυνάμεων μπορούν να αγνοηθούν, ενώ και ο χρόνος επαφής θεωρείται πολύ μικρός κάτι που υποδηλώνει ότι κατά την επαφή, οι επιταχύνσεις είναι επαρκώς μεγάλες ώστε οι ταχύτητες αλλάζουν ξαφνικά και οι αλλαγές θέσης και προσανατολισμού είναι αμελητέες. Με τις υποθέσεις αυτές, οι νόμοι του Νεύτωνα μπορούν να εφαρμοστούν στα οχήματα ενώ για τις εξισώσεις ώθησης και ορμής για μάζες m_1 και m_2 στην x και y διεύθυνση ισχύει ότι:

$$m_1 V_{1x} - m_1 u_{1x} = P_x \quad (6.38)$$

$$m_2 V_{2x} - m_2 u_{2x} = -P_x \quad (6.39)$$

$$m_1 V_{1y} - m_1 u_{1y} = P_y \quad (6.40)$$

$$m_2 V_{2y} - m_2 u_{2y} = -P_y \quad (6.41)$$

Σύμφωνα τώρα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η αλλαγή στην στροφορμή ισούται με τις ροπές των ωθήσεων κάθε οχήματος, οπότε με εφαρμογή αυτών έχουμε:

$$m_1 k_1^2 (\Omega_1 - \omega_1) = P_n d_c - P_t d_d \quad (6.42)$$

$$m_2 k_2^2 (\Omega_2 - \omega_2) = P_n d_a - P_t d_b \quad (6.43)$$

Οι μεταβλητές k_1, k_2 είναι οι ακτίνες περιστροφής των οχημάτων γύρω από τα κέντρα μάζας τους. Συνεπώς οι προκύπτουσες ροπές αδρανείας δίνονται από τις σχέσεις $I_1 = m_1 k_1^2$ και $I_2 = m_2 k_2^2$. Υπενθυμίζεται εδώ ότι τα κεφαλαία σύμβολα αντιπροσωπεύουν τιμές των μεταβλητών κατά το τέλος της διάρκειας επαφής ενώ τα μικρά κατά την έναρξη της επαφής, κάτι που ισχύει για γραμμικές ταχύτητες, γωνιακές ταχύτητες και ωθήσεις (οι αρχικές ωθήσεις κατά την έναρξη της επαφής είναι μηδενικές). Από τα παραπάνω προκύπτουν συνολικά οκτώ άγνωστοι ($\Omega_1, \Omega_2, V_{1x}, V_{1y}, V_{2x}, V_{2y}, P_x, P_y$) και έξι εξισώσεις, οπότε χρειάζονται άλλες δύο εξισώσεις για την επίλυση του συστήματος και άρα τον ορισμό δύο συντελεστών. Ο συντελεστής αποκατάστασης ορίζεται εδώ ως ο λόγος της σχετικής «κανονικής» ταχύτητας στο σημείο C στο τέλος της επαφής προς την σχετική «κανονική» ταχύτητα κατά την έναρξη της επαφής, δηλαδή:

$$e = - \frac{V_{Crn}}{u_{Crn}} \quad (6.44)$$

Όπου ο δείκτης C δηλώνει την θέση, ο r την σχετική ταχύτητα και ο n τις συνιστώσες κανονικής ταχύτητας. Αυτές οι σχετικές ταχύτητες στο σημείο C είναι:

$$V_{Crn} = V_{1n} + d_c \Omega_1 - V_{2n} + d_a \Omega_2 \quad (6.45)$$

$$u_{Crn} = u_{1n} + d_c \omega_1 - u_{2n} + d_a \omega_2 \quad (6.46)$$

Αντίθετα ο συντελεστής αναλογίας ώθησης, μ , ορίζεται ακριβώς όπως και πριν δηλαδή:

$$P_t = \mu P_n \quad (6.47)$$

Με τις εξισώσεις αυτές, είναι δυνατή η επίλυση του συστήματος από την οποία προκύπτει:

$$V_{1n} = u_{1n} + \frac{\bar{m}(1+e)u_{rn}q}{m_1} \quad (6.48)$$

$$V_{1t} = u_{1t} + \frac{\mu \bar{m}(1+e)u_{rn}q}{m_1} \quad (6.49)$$

$$V_{2n} = u_{2n} - \frac{\bar{m}(1+e)u_{rn}q}{m_2} \quad (6.50)$$

$$V_{2t} = u_{2t} - \frac{\mu \bar{m}(1+e)u_{rn}q}{m_2} \quad (6.51)$$

$$\Omega_1 = \omega_1 + \frac{\bar{m}(1+e)u_{rn}(d_c - \mu d_a)dq}{m_1 k_1^2} \quad (6.52)$$

$$\Omega_2 = \omega_2 + \frac{\bar{m}(1+e)u_{rn}(d_a - \mu d_b)dq}{m_2 k_2^2} \quad (6.53)$$

Όπου \bar{m} δίνεται από την σχέση 6.17 και

$$u_{rn} = (u_{2n} - d_a \omega_2) - (u_{1n} + d_c \omega_1) \quad (6.54)$$

Ενώ το q μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$\frac{1}{q} = 1 + \frac{\bar{m}d_a^2}{m_2 k_2^2} + \frac{\bar{m}d_c^2}{m_1 k_1^2} - \mu \left(\frac{\bar{m}d_c d_a}{m_1 k_1^2} + \frac{\bar{m}d_a d_b}{m_2 k_2^2} \right) \quad (6.55)$$

Από την επίλυση του συστήματος και την εύρεση των οκτώ αγνώστων μπορούν να υπολογιστούν σημαντικές ποσότητες, όπως η κινητική ενέργεια που χάνεται και από τα δύο σώματα κατά την σύγκρουση, T_L , η οποία εκφράζεται ως:

$$T_L = \frac{1}{2} \bar{m} q u_{rn}^2 (1+e) \left[2 + 2\mu r - (1+e)q \left(1 + \mu^2 + \frac{\bar{m}d_e^2}{m_1 k_1^2} + \frac{\bar{m}d_f^2}{m_2 k_2^2} \right) \right] \quad (6.56)$$

Όπου

$$d_e = d_c - \mu d_a \quad (6.57)$$

$$d_f = d_a - \mu d_b \quad (6.58)$$

$$r = \frac{(u_{2t} - d_b \omega_2) - (u_{1t} + d_a \omega_1)}{(u_{2n} - d_a \omega_2) - (u_{1n} + d_c \omega_1)} \quad (6.59)$$

Κλείνοντας ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος είναι η αναλογία ώθησης που δίνει την συνθήκη επαπτομενικής κοινής ταχύτητας, δηλαδή όταν $V_{1ct} - V_{2ct} = 0$, μια συνθήκη που ισχύει για το σημείο C και όχι για το κέντρο μάζας. Προκύπτει ότι:

$$\mu_o = \frac{rA + (1+e)B}{(1+e)(1+C) + rB} \quad (6.60)$$

Όπου

$$A = 1 + \frac{\bar{m}d_c^2}{m_1k_1^2} + \frac{\bar{m}d_a^2}{m_2k_2^2} \quad (6.61)$$

$$B = \frac{\bar{m}d_c d_a}{m_1k_1^2} + \frac{\bar{m}d_a d_b}{m_2k_2^2} \quad (6.62)$$

$$C = 1 + \frac{\bar{m}d_d^2}{m_1k_1^2} + \frac{\bar{m}d_b^2}{m_2k_2^2} \quad (6.63)$$

Δεδομένων συγκεκριμένων πληροφοριών, το παραπάνω μοντέλο που αναπτύχθηκε παρέχει ένα τρόπο υπολογισμού των συνιστωσών των τελικών ταχυτήτων και ωθήσεων δύο συγκρουόμενων ταχυτήτων. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- ✓ Συνιστώσες αρχικών ταχυτήτων: $u_{1x}, u_{1y}, \omega_1, u_{2x}, u_{2y}, \omega_2$
- ✓ Φυσικές ιδιότητες οχημάτων: m_1, m_2, I_1, I_2
- ✓ Γωνίες προσανατολισμού: θ_1, θ_2
- ✓ Χαρακτηριστικά σύγκρουσης-ζημιών: $d_1, \varphi_1, d_2, \varphi_2, \Gamma, e, \mu$

Σχετικά με την τελευταία κατηγορία οι παράμετροι $d_1, \varphi_1, d_2, \varphi_2, \Gamma$ σχετίζονται με την ζημιά και την επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο οχημάτων κατά την σύγκρουση ενώ οι e, μ σχετίζονται με το επίπεδο της απώλειας ενέργειας. Όταν $e=1$ και $\mu=0$, η σύγκρουση είναι τελείως ελαστική και χωρίς τριβή ενώ όταν $e=0$ και $\mu=\mu_0$, η απώλεια ενέργειας είναι ελάχιστη.

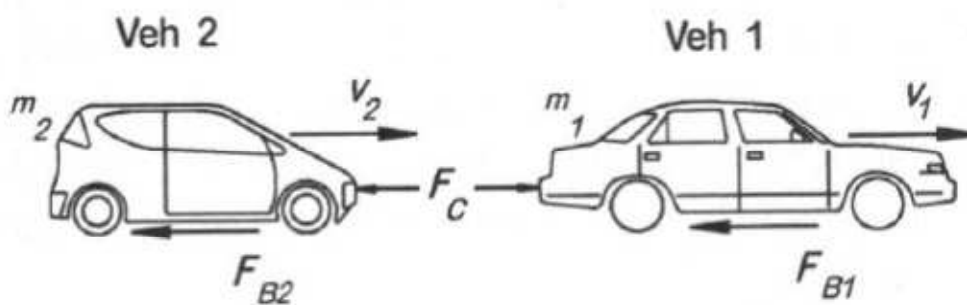
VI. Συγκρούσεις οχημάτων με χαμηλή ταχύτητα

VI1. Συγκρούσεις χαμηλής ταχύτητας ευθυγραμμισμένων οχημάτων

Ενώ οι περισσότερες συγκρούσεις μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που είδαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, κάποιες φορές απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση για συγκρούσεις που συμβαίνουν όταν οι ταχύτητες είναι μικρές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, δύο χαρακτηριστικά απαιτούν προσοχή: η ανάγκη να ληφθούν υπόψιν οι τιμές του συντελεστή αποκατάστασης που είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μηδέν και η δυναμική σημασία των δυνάμεων στα ελαστικά και των ωθήσεων αυτών, λόγω ολίσθησης των φρένων κατά την διάρκεια της επαφής. Οι συγκρούσεις που μελετώνται εν προκειμένω αφορούν αυτοκινήτα που είναι ευθυγραμμισμένα, που έχουν δηλαδή ίδια κατεύθυνση και μικρό offset.

Συνεπώς προκειται ως επί το πλείστον για συγκρούσεις μετωπικές ή front-to-rear, αν και ορισμένες φορές μπορούν να ενταχθούν σε αυτή την κατηγορία και συγκρούσεις του εμπρός τμήματος ενός οχήματος με το πλευρικό τμήμα του άλλου. Λόγω των χαμηλών ταχυτήτων, συχνά η παραμόρφωση είναι πολύ μικρή ή ακόμα και μη εμφανής χωρίς αυτό να σημαίνει την απουσία τραυματισμών των επιβαινόντων.

Οι σύνηθεις κατηγορίες πληροφοριών και δεδομένων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την ανάλυση τέτοιων συγκρούσεων είναι τα οχήματα, οι επιβαίνοντες και το περιβάλλον. Τυπικές παράμετροι των οχημάτων είναι το σχέδιο και η κατάσταση του συστήματος των προφυλακτήρων, φυσικά χαρακτηριστικά του οχήματος όπως βάρος, μέγεθος, καθίσματα, συστήματα συγκράτησης κ.α. Παραδείγματα πληροφοριών των επιβαινόντων περιλαμβάνουν την ηλικία, φύλο, βάρος, φυσιολογία, στάση του κορμού και του κεφαλιού, ανοχή στον πόνο κ.α. Τέλος, οι περιβαλλοντικές παράμετροι περιλαμβάνουν τις συνθήκες του οδοστρώματος, την εφαρμογή πέδησης, ταχύτητα προσέγγισης κ.α. Στο σχήμα παρακάτω αναπαριστώνται δύο οχήματα κατά την επαφή σε μια σύγκρουση όπως αυτές που μελετώνται εδώ, όπου το όχημα 2 συγκρούεται πάνω στο όχημα 1. Η σύγκρουση δημιουργεί μια ώθηση μεταξύ των οχημάτων, P , κατά μήκος της δύναμης F_C , όσο διαρκεί η επαφή των οχημάτων, Δt .



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος για σύγκρουση του μπροστινού τμήματος του οχήματος 2 στο πίσω μέρος του οχήματος 1

Επιπρόσθετα της P , κάθε όχημα δέχεται μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη ώθηση, P_1 και P_2 , εξαιτίας των ωθήσεων από τις δυνάμεις λόγω πέδησης με ολίσθηση ή κλειδωμένους τροχούς. Αυτές οι εξωτερικές ωθήσεις θεωρούνται γνωστές, οπότε εφαρμόζοντας τους νόμους της ώθησης και της ορμής για τα δύο οχήματα έχουμε:

$$m_1(V_1 - u_1) = P - P_1 \quad (6.65)$$

$$m_2(V_2 - u_2) = P - P_2 \quad (6.66)$$

Από τον ορισμό του συντελεστή αποκατάστασης έχουμε

$$V_2 - V_1 = -e(u_2 - u_1) \quad (6.67)$$

Οι τρεις παραπάνω εξισώσεις σχηματίζουν ένα σύστημα 3x3 από την επίλυση του οποίου προκύπτουν οι τελικές ταχύτητες και η ώθηση P και μάλιστα:

$$V_1 = u_1 + \frac{m_2(1+e)(u_2 - u_1)}{m_T} - \frac{P_T}{m_T} \quad (6.68)$$

$$V_2 = u_2 - \frac{m_1(1+e)(u_2 - u_1)}{m_T} - \frac{P_T}{m_T} \quad (6.69)$$

Και

$$P = \bar{m}(1+e)(u_2 - u_1) + \frac{m_2P_1 - m_1P_2}{m_T} \quad (6.70)$$

Όπου

$$\bar{m} = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \quad (6.71)$$

$$m_T = m_1 + m_2 \quad (6.72)$$

$$P_T = P_1 + P_2 \quad (6.73)$$

Από τις εξισώσεις 6.68 και 6.69 μπορούν να προκύψουν εκφράσεις για τις μεταβολές ταχύτητας ΔV_1 και ΔV_2 , ενώ οι εξισώσεις αυτές αποτελούν επέκταση των εξισώσεων 6.13 και 6.14 που περιλαμβάνουν τις επιδράσεις των ωθήσεων από εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Η εφαρμογή των εξισώσεων παραπάνω είναι αρκετά απλή ωστόσο απαιτείται προσοχή ώστε να διασφαλιστούν αποτελέσματα ρεαλιστικά και με νόημα.

Μια ακόμα περίπτωση που αξίζει να αναφερθεί είναι όταν υπάρχει εφαρμογή πέδησης, οπότε οι εξισώσεις 6.68 έως 6.73 πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή για διάφορους λόγους. Κάποιοι από αυτούς είναι οι παρακάτω:

- ✓ Ο συντελεστής αποκατάστασης για μια σύγκρουση μεταξύ οχημάτων χωρίς πέδηση, μπορεί να αλλάξει σημαντικά όταν έχουμε εφαρμογή πέδησης γιατί οι συνθήκες της σύγκρουσης αλλάζουν.
- ✓ Η διάρκεια επαφής των οχημάτων της σύγκρουσης μπορεί να μεταβληθεί όταν εφαρμόζεται πέδηση
- ✓ Η ώθηση τριβής που χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή δεν είναι αυθαίρετη. Αυτό σημαίνει, ότι είναι πιθανό να επιλεγεί ένας συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας και μια διάρκεια ώθησης που πρακτικά να είναι αδύνατον να επιτύχουν την πιστή αναπαράσταση των συνθηκών της σύγκρουσης.

VII. Σύνοψη και Παρατηρήσεις

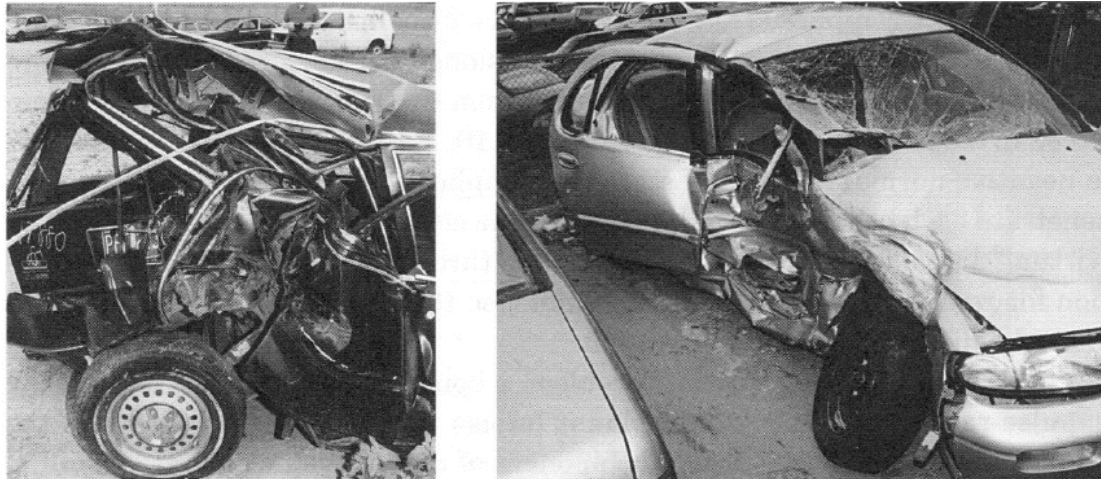
VII1. Συντελεστής αποκατάστασης και συντελεστής αναλογίας

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για τις συγκρούσεις σημειακών μαζών, ο συντελεστής αποκατάστασης e , περιορίζεται στο διάστημα $[0,1]$. Ωστόσο στην περίπτωση συγκρούσεων που όλες οι δυνάμεις, ροπές και κινήσεις βρίσκονται σε ένα επίπεδο, η τιμή του συντελεστή μπορεί να ξεπερνά την μονάδα ή ακόμα και να περιορίζεται από ένα όριο μικρότερο από την μονάδα. Παρόλ'αυτά, στις περιπτώσεις συγκρούσεων οχημάτων, το e πρακτικά σπάνια ξεπερνά την τιμή 0.4 οπότε το πάνω όριο δεν δημιουργεί συνήθως προβλήματα. Σε περίπτωση που το μοντέλο συγκρούσεων άκαμπτου σώματος χρησιμοποιείται για άλλες εφαρμογές πλην των συγκρούσεων οχημάτων, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η συνολική απώλεια ενέργειας δεν γίνεται αρνητική για κανένα συνδυασμό e και $\mu \in [0,1]$, ώστε η προκύπτουσα λύση να είναι ρεαλιστική. Ο προσδιορισμός μιας κατάλληλης τιμής για τον συντελεστή αποκατάστασης για μια συγκεκριμένη σύγκρουση είναι ένα πρόβλημα που συχνά προκύπτει κατά την ανακατασκευή ατυχημάτων. Διάφορες μελέτες έχουν διεξαχθεί πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μέσω πειραμάτων για μετωπικές συγκρούσεις οι τιμές του συντελεστή κυμαίνονταν από 0 έως 0.15.

Ένας ανάλογος περιορισμός ισχύει και για τον συντελεστή αναλογίας. Όταν η τελική σχετική επαπτομενική συνιστώσα των δύο οχημάτων είναι μηδέν, ο συντελεστής λαμβάνει την κρίσιμη τιμή μ_0 (βλέπε εξ. 6.60) ενώ για τις συνθήκες κοινής ταχύτητας ισχύει $\mu = \mu_0$ και $e = 0$. Για μια πλευρική σύγκρουση $\mu < \mu_0$ ενώ τιμές $\mu > \mu_0$ πρέπει να αποφεύγονται γιατί οδηγούν σε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Σε μια δεδομένη σύγκρουση, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή αναλογίας εξαρτάται από τις μάζες των οχημάτων, τις ροπές αδρανείας, τη διαμόρφωση της σύγκρουσης, τον συντελεστή αποκατάστασης και τις αρχικές συνθήκες με αποτέλεσμα να διαφέρεις σημαντικά από σύγκρουση σε σύγκρουση. Για τον λόγο αυτό, δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται μια αυθαίρετη τιμή για τον συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας των δύο οχημάτων.

VII2. Αποστάσεις, γωνίες και το σημείο C

Μια βασική υπόθεση για την εφαρμογή του μοντέλου συγκρούσεων άκαμπτου σώματος είναι ότι η θέση και η διαμόρφωση των οχημάτων δεν αλλάζουν κατά την επαφή και ότι οι διαστάσεις αυτών παραμένουν σταθερές. Η παραμόρφωση των οχημάτων κατά την σύγκρουση ιδιαίτερα όταν οι ταχύτητες είναι μεγάλες, δεν είναι ποτέ ελαστική και σπάνια μικρή. Αντίθετα, τα περισσότερα οχήματα είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να συνθλίβονται με τέτοιο τρόπο ώστε προστατεύονται οι επιβαίνοντες.



Σχήμα 6.5 Αριστερά: Παράδειγμα μόνιμης παραμόρφωσης οχήματος που χτυπήθηκε στο πίσω μέρος (front-to rear collision) Δεξιά: Παράδειγμα μόνιμης παραμόρφωσης οχήματος που χτυπήθηκε στο πλαϊνό μέρος σε μια σύγκρουση επάνω σε διασταύρωση

Μάλιστα αν και η επιφάνεια σύνθλιψης σχηματίζεται σε μικρό χρονικό διάστημα, εντούτοις αναπαριστά την αλλαγή από το μη παραμορφωμένο σχήμα ως συνάρτηση του χρόνου και του χώρου, δηλαδή πρόκειται για ένα τρισδιάστατο δυναμικό φαινόμενο. Για τη εφαρμογή του μοντέλου απαιτείται η υιοθέτηση κάποιων υποθέσεων. Η πρώτη είναι ότι η επιφάνεια σύνθλιψης μεταξύ των οχημάτων που βρίσκεται σε ένα κατακόρυφο επίπεδο μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα κοινό σημείο C , το οποίο εκφράζει το σημείο εφαρμογής της ώθησης, P . Αν και μαθηματικά ο προσδιορισμός του σημείου C είναι απλός (το σημείο που αναπαριστά την θέση του διανύσματος ώθησης $P = P_n n + P_t t$ όπου τα P, n, t διανύσματα) η θέση του δεν είναι ποτέ γνωστή και πρέπει να εκτιμηθεί.

Μια λύση είναι να χρησιμοποιηθεί η κάτοψη της επιφάνειας μόνιμης παραμόρφωσης και να ληφθεί ως C το κέντρο βάρους αυτής. Όποια λύση και να χρησιμοποιηθεί η επιλογή όχι μόνο του C αλλά και άλλων παραμέτρων όπως $d_1, \varphi_1, d_2, \varphi_2, \Gamma$ απαιτούν μετρήσεις και προσωπική κρίση. Τέλος να σημειωθεί ότι τόσο οι διαστάσεις των οχημάτων, όσο και οι αδράνειες I_1, I_2 καθώς και οι ακτίνες περιστροφής k_1, k_2 θεωρούνται σταθερές αν και στην ουσία αλλάζουν καθώς τα οχήματα παραμορφώνονται. Πρακτικά όμως μεταβαλλόμενες τιμές των εν λόγω παραμέτρων δεν εφαρμόζονται στην ανακατασκευή ατυχημάτων.

Κεφάλαιο Έβδομο

Ενέργεια Σύγκρουσης και ΔV

I. Εισαγωγή

Μέσα από δοκιμές για μετωπικές συγκρούσεις με σταθερά άκαμπτα εμπόδια, έχει αποδειχθεί ότι η σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της μόνιμης παραμόρφωσης στην εξωτερική επιφάνεια του οχήματος που προκαλείται από την σύγκρουση (residual crush) είναι σχεδόν γραμμική.

Επιπλέον, σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 30mph (ή 48km/h) η ενέργεια που χάνεται σε μια σύγκρουση με ένα εμπόδιο ισούται σχεδόν με το σύνολο της κινητικής ενέργειας πριν την σύγκρουση και επειδή η κινητική ενέργεια είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας τότε και η τετραγωνική ρίζα της κινητικής ενέργειας θα είναι προσεγγιστικά γραμμικά ανάλογη με την μόνιμη παραμόρφωση. Η ενέργεια σύγκρουσης, E_c , ανά μονάδα πλάτους w , ενός παραμορφωμένου πλαισίου οχήματος μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση της σύγκρουσης, C , μέσω της σχέσης:

$$\sqrt{\frac{2E_c}{w}} = d_0 + d_1 C \quad (7.1)$$

Όπου η μόνιμη παραμόρφωση, C , μετράται κάθετα από και προς την κανονική μη-παραμορφωμένη επιφάνεια. Οι σταθερές d_0 και d_1 ονομάζονται συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης και προσδιορίζονται πειραματικά ενώ διαφέρουν από όχημα σε όχημα καθώς και μεταξύ μπροστινού, πλάγιου και πίσω τμήματος του οχήματος. Ωστόσο, τα οχήματα δεν συγκρούονται πάντα μετωπικά με επίπεδα άκαμπτα εμπόδια, οπότε η παραπάνω σχέση μεταξύ ενέργειας (και ταχύτητας) και μόνιμης παραμόρφωσης δεν είναι γενικώς εφαρμόσιμη για ανακατασκευή ατυχημάτων εκτός και αν μπορεί να προσαρμοστεί σε ανομοιόμορφα προφίλ συγκρούσεων και συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων.

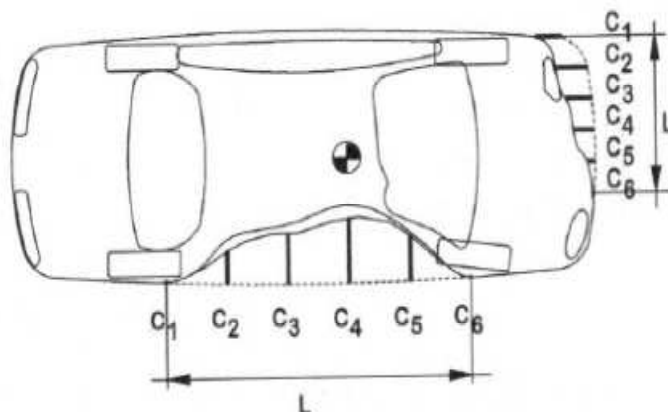
II. Μέθοδος CRASH3

Η παραπάνω σχέση αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας, γνωστή ως CRASH3 (Calspan Reconstruction of Accident Speeds on the Highway, version 3), για συγκρούσεις μεταξύ ελαφρών οχημάτων. Η διαδικασία μέτρησης της μόνιμης παραμόρφωσης ακολουθεί ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο μέτρησης, το οποίο συνήθως χρησιμοποιεί μια σειρά έξι μετρήσεων ισοκατανεμημένων πάνω σε μια παραμορφωμένη επιφάνεια. Οι μετρήσεις γίνονται κάθετα στην παραμορφωμένη επιφάνεια του τρακαρισμένου οχήματος σε ένα ομοιόμορφο ύψος από το έδαφος που τα οχήματα είναι σχεδιασμένα να αντιστέκονται και να

αναπτύσσουν ελεγχόμενες δυνάμεις πρόσκρουσης, το οποίο είναι συνήθως στο πίσω και μπροστά ύψος των προφυλακτήρων. Αν και στην θεωρία, η σύγκρουση υποτίθεται ότι είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια του οχήματος, στην πράξη κάτι τέτοιο δεν ισχύει, ειδικά για τις πλευρικές παραμορφώσεις. Στην περίπτωση αυτή, οι μετρήσεις γίνονται στο σκελετό του οχήματος κοντά στο ύψος του κατωφλίου του δαπέδου εκτός και αν η ζημιά είναι σημαντικά μεγαλύτερη πάνω από αυτό οπότε λαμβάνεται και ο μέσος όρος της ζημιάς πάνω από αυτό.

Μετρήσεις της μόνιμης παραμόρφωσης γίνονται κατά την πλήρη πλευρική έκταση της ζημιάς, πράγμα που σημαίνει ότι περιλαμβάνεται η ζημιά που δημιουργείται με άμεση επαφή αλλά και η παραμόρφωση που προκαλείται λόγω των δυνάμεων επαφής σε παρακείμενες περιοχές. Εφόσον το προφίλ του αρχικού μη παραμορφωμένου σχήματος είναι καμπυλωτό, κάθε τιμή πρέπει να μετράται από την αντίστοιχη αρχική μη παραμορφωμένη καμπυλωτή επιφάνεια. Η CRASH3 δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις σύγκρουσης με στενά αντικείμενα ή όταν η σύγκρουση δεν είναι στο ύψος των προφυλακτήρων ή κοντά σε αυτό (under-ride).

Στο σχήμα παρακάτω, φαίνεται μια σειρά έξι μετρήσεων σε ίσα διαστήματα κατά μήκος μιας παραμόρφωσης μήκους L , στο μπροστινό μέρος και στο πλάι του οχήματος όπου C_1 ως C_6 οι μετρούμενες αποστάσεις από την μη παραμορφωμένη, όπως κατασκευάστηκε, επιφάνεια του οχήματος έως το σημείο της παραμορφωμένης επιφάνειας.



Σχήμα 7.1 Παράδειγμα πρωτοκόλλου μέτρησης σύγκρουσης έξι σημείων στο πλαινό και μπροστινό(ή πίσω) μέρος του οχήματος

Εάν το προφίλ της παραμόρφωσης μπορεί να προσεγγιστεί από γραμμικά τμήματα μεταξύ των έξι ισαπέχοντων σημείων και αν η εξίσωση 7.1 είναι κατά προσέγγιση αληθής, τότε η ενέργεια της σύγκρουσης μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω σχέσεις γνωστές και ως CRASH3 αλγόριθμος ενέργειας σύγκρουσης:

$$E_C = d_0^2 K_1 + d_0 d_1 K_2 + d_1^2 K_3 \quad (7.2)$$

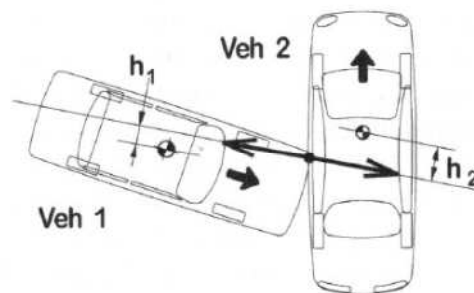
Όπου

$$K_1 = \frac{L}{2} \quad (7.3)$$

$$K_2 = \frac{L[C_1 + 2(C_2 + C_3 + C_4 + C_5) + C_6]}{10} \quad (7.4)$$

$$K_3 = \frac{L[C_1^2 + 2(C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + C_5^2) + C_6^2 + C_1C_2 + C_2C_3 + C_3C_4 + C_4C_5 + C_5C_6]}{30} \quad (7.5)$$

Στο σχήμα 7.2 απεικονίζεται η σύγκρουση μεταξύ δύο οχημάτων, όπου τα συγγραμικά βέλη αναπαριστούν τις ίσες και αντίθετες ωθήσεις των δυνάμεων που δρουν πάνω στην κοινή επιφάνεια σύγκρουσης των δύο οχημάτων κατά την διάρκεια αυτής. Αυτή η «γραμμή» της ώθησης αναφέρεται γενικά ως κύρια διεύθυνση της δύναμης (PDOF). Επίσης οι αποστάσεις h_1 και h_2 μετρώνται κάθετα από το κέντρο βάρους κάθε οχήματος μέχρι την PDOF.



Σχήμα 7.2 Προσανατολισμός σύγκρουσης με βέλη που αναπαριστούν την ίση και αντίθετη ώθηση (PDOF) καθώς και τις αποστάσεις h_1 , h_2

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου CRASH3, η ενέργεια σύγκρουσης σχετίζεται με την αλλαγή ταχύτητας, ΔV_i , κάθε οχήματος χρησιμοποιώντας βασικές αρχές μηχανικής. Συνήθως για την απλοποίηση των αποτελεσμάτων γίνονται τέσσερις υποθέσεις:

- ✓ Η ενέργεια σύγκρουσης, E_c , ισούται με την απώλεια ενέργειας κατά την σύγκρουση, T_L
- ✓ Η σύγκρουση είναι τελείως ανελαστική, δηλαδή δεν υπάρχει αναπήδηση ή επιστροφή των οχημάτων στο αρχικό τους σχήμα στην επιφάνεια σύγκρουσης
- ✓ Η σχετική ταχύτητα ολίσθησης των οχημάτων, εφαπτόμενη στην επιφάνεια σύγκρουσης μηδενίζεται πριν ή την στιγμή που τα αυτοκίνητα χωρίζουν
- ✓ Εξωτερικές δυνάμεις που δρουν στα συγκρουόμενα οχήματα (συμπεριλαμβανομένων και των δυνάμεων μεταξύ ελαστικών-εδάφους) θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με το μέτρο των δυνάμεων που δρουν στην επιφάνεια σύγκρουσης μεταξύ των οχημάτων

Η δεύτερη και τρίτη υπόθεση συχνά αναφέρονται ως συνθήκες κοινής ταχύτητας και είναι γενικά αληθείς εκτός από περιπτώσεις όπου έχουμε συγκρούσεις με χαμηλές ταχύτητες (παρουσία υψηλής αποκατάστασης) ή πλευρικές συγκρούσεις (η ολίσθηση μπορεί να συνεχιστεί και μετά τον αποχωρισμό των οχημάτων).

Αυτές οι υποθέσεις ωστόσο, δεν ισχύουν πάντοτε ακόμα για μεγάλες ταχύτητες και κατ'επέκταση η εξίσωση για την εύρεση της ΔV_i , δεν είναι τόσο γενική όσο απαιτείται σε πολλές ανακατασκευές ατυχημάτων. Με βάση την τελευταία υπόθεση εξασφαλίζεται η διατήρηση της ορμής, άρα

$$m_i \Delta V_i = \sqrt{2m_e E_c}, i = 1,2 \quad (7.10)$$

Όπου E_c , η συνολική ενέργεια σύγκρουσης και για τα δύο οχήματα και

$$m_e = \frac{\gamma_1 m_1 \gamma_2 m_2}{\gamma_1 m_1 + m_2 \gamma_2} \quad (7.11)$$

$$\gamma_i = \frac{k_i^2}{k_i^2 + h_i^2} \quad (7.12)$$

Όπου k_i , η ακτίνα εκτροπής της περιστροφής κάθε οχήματος και h_i , η κάθετη απόσταση όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2 ενώ ισχύει ότι:

$$k_i = \sqrt{\frac{J_i}{m_i}} \quad (7.13)$$

Με J_i η ροπή μάζας αδράνειας γύρω από τον άξονα i του οχήματος και m_i , η μάζα κάθε οχήματος.

Η εξίσωση 7.10 υπολογίζει την ΔV από την ενέργεια πρόσκρουσης, μια μέθοδος που βασίζεται στις συνθήκες κοινής ταχύτητας, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την απώλεια ενέργειας που σχετίζεται με τις αλλαγές στις σχετικές εφαπτομενικές ταχύτητες.

Δηλαδή η ενέργεια που διαχέεται λόγω της ολίσθησης του ενός οχήματος πάνω στο άλλο και λόγω της εφαπτομενικής παραμόρφωσης και περιπλοκής πάνω στις επιφάνειες σύγκρουσης, δεν περιλαμβάνεται στις παραπάνω εξισώσεις για την απώλεια ενέργειας, E_c . Σε μερικές συγκρούσεις, η απώλεια ενέργειας που σχετίζεται με την εφαπτομενική κίνηση πάνω στην επιφάνεια επαφής μπορεί να είναι σημαντική και να μην μπορεί να αγνοηθεί. Μια προσέγγιση θα ήταν η χρήση ενός διορθωτικού παράγοντα, κάτι που ωστόσο δεν είναι απόλυτα ακριβές και άρα

υπό αμφισβήτηση. Μια πιο ακριβής και αυστηρή προσέγγιση της ενέργειας που σχετίζεται με την εφαπτομενική κίνηση συνδέεται με τις εφαπτομενικές ωθήσεις και ειδικότερα μέσω του συντελεστή αναλογίας ώθησης και τις κρίσιμες τιμές του, που παρουσιάστηκαν στην θεωρία ώθησης-ορμής.

Με χρήση αυτών, είναι δυνατός ο υπολογισμός ξεχωριστά της ενέργεια που χάνεται λόγω της σύγκρουσης και της ενέργειας λόγω «εφαπτομενικών» φαινομένων υπό συνθήκες κανονικής ταχύτητας. Ένα άλλο πλεονέκτημα του υπολογισμού της ΔV από την ενέργεια σύγκρουσης με βάση την θεωρία ώθησης-ορμής είναι ότι η PDOF υπολογίζεται αυτόματα και έτσι δεν χρειάζεται να εκτιμηθεί από τις παραμορφωμένες επιφάνειες όπως θα έπρεπε να γίνει σε διαφορετική περίπτωση, διαδικασία που είναι και αρκετά επίπονη.

Συνεπώς, είναι προτιμότερο ότι η ενέργεια που σχετίζεται με την σύγκρουση, να υπολογίζεται από την εξίσωση 7.2, αλλά η ΔV κάθε οχήματος να μην υπολογίζεται από την εξίσωση 7.10. Προτείνεται ο υπολογισμός της ενέργεια σύγκρουσης ακολουθούμενος από τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν στην θεωρία ώθησης-ορμής για την ολοκλήρωση της ανακατασκευής. Ένας ακόμη λόγος που η διαδικασία αυτή πλεονεκτεί, είναι το γεγονός ότι η CRASH3 μέθοδος βασίζεται σε συνθήκες κανονικής ταχύτητας, οι οποίες παίζουν ρόλο στον υπολογισμό της ΔV και όχι στον υπολογισμό της E_c . Είναι επίσης αρκετά πιθανό, ο συντελεστής αποκατάστασης να είναι μη μηδενικός, οπότε μόνο με την θεωρία ώθησης-ορμής να μπορεί να ληφθεί εύκολα υπόψιν.

III. Συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης με βάση τη μέση συντριβή από δοκιμές σε άκαμπτα εμπόδια

Μια από τις πιο κοινές πειραματικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό μετωπικών συντελεστών δυσκαμψίας είναι μέσω μετρήσεων των μόνιμων παραμορφώσεων που δημιουργούνται από την σύγκρουση του οχήματος σε ένα άκαμπτο εμπόδιο. Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός, ενός ορίου ταχύτητας (κατώφλι), κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται κάποια μετρήσιμη παραμόρφωση, δηλαδή μια ταχύτητα για την οποία $C=0$. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν σημαίνει απαραίτητα μη ορατή ζημιά στο όχημα, αλλά στην ουσία μη σημαντική παραμόρφωση. Συνήθως η ταχύτητα αυτή επιλέγεται αυθαίρετα να κυμαίνεται στο εύρος 5 έως 7 mph (8.1 έως 11.3 km/h)

Η εξίσωση 7.1 χρησιμοποιείται για την επίλυση ως προς d_0 και ένας σταθμισμένος μέσος των έξι μετρήσεων παραμόρφωσης δίνει ένα C_{avg} , οπότε μέσω της 7.1 προκύπτει:

$$d_1 = \frac{1}{C_{avg}} \left(\sqrt{\frac{2E_c}{w}} - d_0 \right) \quad (7.14)$$

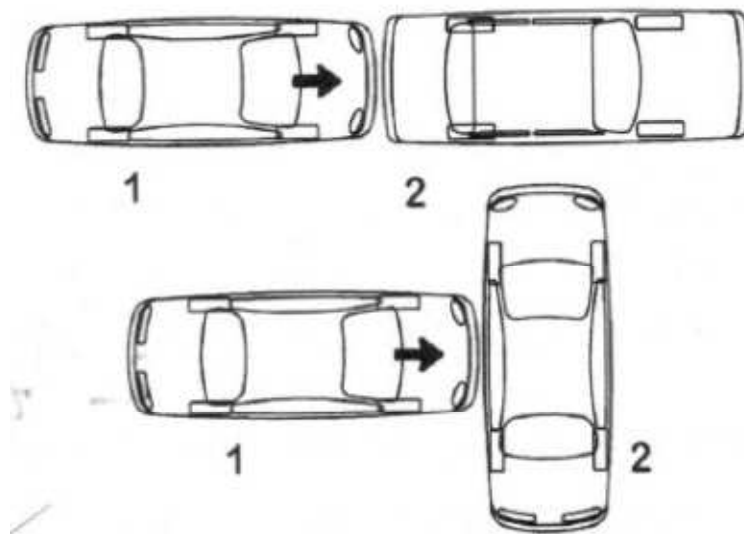
Εξαιτίας της μορφής της 7.4, είναι πιο ακριβές αν το C_{avg} υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$C_{avg} = \frac{[C_1 + 2(C_2 + C_3 + C_4 + C_5) + C_6]}{10} \quad (7.15)$$

Σε περιπτώσεις δοκιμών συγκρούσεων οχημάτων με άκαμπτα εμπόδια σε υψηλές ταχύτητες, ο συντελεστής αποκατάστασης δεν είναι πάντοτε μηδέν, οπότε η απώλεια ενέργειας μειώνεται και μπορεί να λαμβάνεται υπόψιν όταν υπολογίζονται οι συντελεστές δυσκαμψίας.

IV. Συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης από συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων

Μερικές φορές, οι συντελεστές δυσκαμψίας σύγκρουσης ενός οχήματος, λαμβάνονται από δοκιμή στην οποία ένα όχημα συγκρούεται με ένα άλλο όχημα. Ένα τέτοιο παράδειγμα σύγκρουσης φαίνεται στο σχήμα παρακάτω



Σχήμα 7.3 Δύο παραδείγματα προσανατολισμών ελεγχόμενων συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων

Μια σημαντική συνθήκη είναι ότι σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει ένας λογικά ακριβής υπολογισμός της απώλειας ενέργειας κατά την σύγκρουση. Ωστόσο, σε αυτή την ενέργεια δεν θα πρέπει να περιληφθεί ενέργεια που τυχόν διαχέεται μέσω δυνάμεων στα ελαστικά. Μια άλλη συνθήκη είναι ότι τα πλάτη των παραμορφώσεων w_1 , w_2 πρέπει να είναι ίσα.

Κάτι τέτοιο αποκλείει την χρήση πλάγιων συγκρούσεων και σημαίνει ότι κάθε παραμόρφωση που προκαλείται στο όχημα πέραν της σύγκρουσης πρέπει να αγνοείται. Ένα πρόβλημα που προκύπτει με δοκιμές μεταξύ δύο οχημάτων, είναι ότι η συνολική απώλεια ενέργεια των οχημάτων μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, αν και η ενέργεια σύγκρουσης για κάθε όχημα είναι άγνωστη. Στην πραγματικότητα, το όχημα που δέχεται το χτύπημα, κερδίζει κινητική ενέργεια ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης ακόμα και αν η σύγκρουσή του συνεισφέρει στην απώλεια ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό ωστόσο, μπορεί να επιλυθεί. Για μια σύγκρουση που η ώθηση που περνά από το κέντρο μάζας, η συνολική απώλεια ενέργειας T_L , δίνεται από την σχέση 6.22. Αν η απώλεια ενέργειας της σύγκρουσης αυτής μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε ενέργεια σύγκρουσης τότε $T_L = E_C$ και

$$E_C = \frac{1}{2} \bar{m} (1 - e^2) (u_2 - u_1)^2 \quad (7.16)$$

Όπου το \bar{m} δίνεται από την 6.17. Για κάθε όχημα, η εξίσωση 7.1 σχετίζει την απώλεια ενέργειας της σύγκρουσης και την μόνιμη παραμόρφωση ως εξής:

$$\sqrt{\frac{2E_1}{w}} = d_{01} + d_{11} C_{1avg} \quad (7.17)$$

$$\sqrt{\frac{2E_2}{w}} = d_{02} + d_{12} C_{2avg} \quad (7.18)$$

Όπου οι μέσες τιμές της σύγκρουσης υπολογίζονται από την σχέση 7.15. Επιπλέον, η ταχύτητα στην οποία έχουμε αμελητέα παραμόρφωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε μια από τις 7.17 και 7.18 για μια μηδενική μέση τιμή της σύγκρουσης ώστε να υπολογιστούν τα d_{01} , d_{02} . Αυτό σημαίνει ότι μοναδικοί άγνωστοι είναι τα d_{11} , d_{12} .

Ωστόσο, από τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, οι δυνάμεις μεταξύ δύο αντικειμένων σε επαφή είναι ίσες κατά μέγεθος.

Εξισώνοντας την εξ. 7.6 για κάθε όχημα και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 7.8 και 7.9 λαμβάνουμε:

$$d_{11} (d_{01} + d_{11} C_{1avg}) = d_{12} (d_{02} + d_{12} C_{2avg}) \quad (7.19)$$

Παίρνοντας τον λόγο των τετραγώνων της εξίσωσης 7.1 για κάθε όχημα και με βάση την παραπάνω σχέση καταλήγουμε:

$$\frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{d_{01} + d_{11}C_{1avg}}{d_{02} + d_{12}C_{2avg}} \right)^2 = \left(\frac{d_{11}}{d_{12}} \right)^2 \quad (7.20)$$

Επειδή $E_C = E_1 + E_2$, η εξίσωση 7.20 δίνει:

$$E_1 = \frac{E_C}{1 + \left(\frac{d_{11}}{d_{12}} \right)^2} \quad (7.21)$$

$$E_2 = \frac{E_C}{1 + \left(\frac{d_{12}}{d_{11}} \right)^2} \quad (7.22)$$

Τελικά δηλαδή από τις εξισώσεις 7.17, 7.19, 7.21 και 7.22 προκύπτει ένα σύστημα 4x4 από όπου προκύπτουν όλοι οι άγνωστοι.

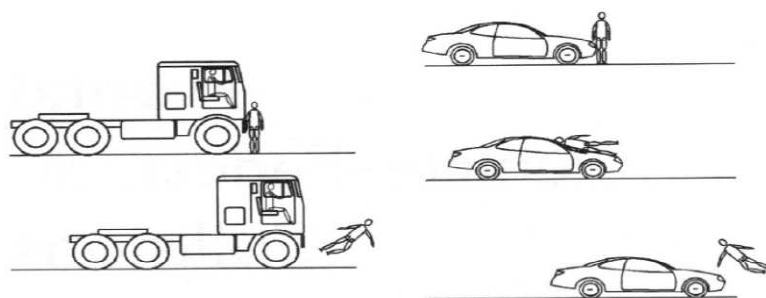
Κεφάλαιο Όγδοο

Μετωπικές συγκρούσεις οχημάτων-πεζών

I. Εισαγωγή

Η ανακατασκευή συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων και πεζών απαιτεί γενικά μια διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με τις κλασσικές συγκρούσεις αποκλειστικά μεταξύ οχημάτων. Η αρχική κίνηση των πεζών συχνά είναι άνευ σημασίας επειδή οι ταχύτητές τους κατά την σύγκρουση είναι πολύ χαμηλότερες από την ταχύτητα του αυτοκινήτου. Επιπλέον, η μεγάλη διαφορά μάζας και τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ οχήματος και πεζού κατά την σύγκρουση έχουν ως αποτέλεσμα στην κίνηση του πεζού κατά βάση στην κατεύθυνση της κίνησης του οχήματος. Η κίνηση μετά την σύγκρουση συχνά περιλαμβάνει μια τροχιά διαμέσου του αέρα, ακολουθούμενη από μια σύγκρουση με το έδαφος και ένα κατακύλημα ή ολίσθηση μέχρι την ακινητοποίηση. Η ταχύτητα και η μετωπική γεωμετρία του οχήματος μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την φύση της κίνησης του πεζού μετά την σύγκρουση.

Μέσω στοιχείων, όπως η θέση και το είδος της παραμόρφωσης του οχήματος, ο τύπος και τα σημεία που τραυματίζεται ο πεζός, η θέση σύγκρουσης και ακινητοποίησης του οχήματος και του πεζού, ενδείξεις στο έδαφος και στο οδόστρωμα κ.α. μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό της φύσης και των λεπτομερειών της σύγκρουσης οχήματος-πεζού ώστε να προκύψει μια σωστή και λογικά ακριβής ανακατασκευή. Οι συγκρούσεις οχημάτων-πεζών συχνά κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον τύπο της αλληλεπίδρασης οχήματος-πεζού και την κίνηση του πεζού μετά την σύγκρουση. Μια από αυτές είναι η «προβολή προς τα εμπρός» (forward projection), όπου η επιφάνεια επαφής είναι πάνω από το ύψος του κέντρου βάρους του πεζού (ή ποδηλάτη) και η σύγκρουση οδηγεί σε κίνηση του τελευταίου εμπρός από το όχημα. Μια άλλη περίπτωση είναι η επαφή των δύο να είναι πιο κάτω από το κέντρο βάρους του πεζού οπότε η κίνηση μετά την σύγκρουση του πεζού θα είναι προς τα πίσω σε σχέση με το όχημα και πιθανόν θα υπάρξει πρόσκρουση και με κάποιο άλλο τμήμα του οχήματος π.χ παρμπρίζ, οροφή εφόσον η ταχύτητα του οχήματος είναι αρκετά υψηλή (wrap pedestrian collision). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται αυτά τα δύο είδη συγκρούσεων καθώς και η κίνηση του πεζού μετά την σύγκρουση.



Σχήμα 8.1 Απεικόνιση συγκρούσεων τύπου forward projection και wrap pedestrian

Σε άλλη περίπτωση ο πεζός μπορεί να παραμείνει στο καπό του αυτοκινήτου για κάποιο χρονικό διάστημα καθώς το όχημα κινείται (carry category) και εφόσον ο ίδιος ή κάποιο κομμάτι ρουχισμού δεν μπλεχτεί στο όχημα τελικά καθώς το όχημα επιβραδυνθεί θα γλιστρήσει προς τα εμπρός. Εάν το όχημα όμως τρέχει με μεγάλη ταχύτητα, είναι δυνατόν ο πεζός να «προωθηθεί» προς την οροφή του οχήματος, με αποτέλεσμα να εκτελέσει μια κίνηση προς τα πίσω και να φθάσει στο έδαφος έχοντας έρθει σε επαφή με τμήματα του οχήματος που βρίσκονται στο πίσω μέρος (roof vault). Τέλος υπάρχει και η περίπτωση η σύγκρουση οχήματος και πεζού να γίνει κοντά σε μια από τις άκρες του οχήματος, οπότε ο πεζός να μην συγκρουστεί με τμήματα του οχήματος όπως το παρμπρίζ (fender vault). Σημαντικό ρόλο παίζει και η επιτάχυνση και επιβράδυνση του οχήματος μετά την αρχική σύγκρουση.

Σε μια σύγκρουση όπου ο πεζός παραμένει στο καπό του οχήματος για κάποιο χρόνο, εάν το όχημα επιταχυνθεί τότε το χρονικό αυτό διάστημα μεγαλώνει. Εάν ωστόσο το όχημα επιβραδυνθεί τότε ο πεζός τείνει να γλιστρήσει εμπρός από το όχημα. Αξιόλογο ρόλος παίζουν και άλλοι παράγοντες ακόμα και η κλίση του καπό. Γενικά υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την ανακατασκευή ενός ατυχήματος μεταξύ οχήματος-πεζού και η προσέγγιση που γίνεται κάθε φορά έχει να κάνει με τον στόχο της ανακατασκευής και τις διαθέσιμες πληροφορίες. Στο σημείο αυτό γίνεται διαχωρισμός μεταξύ «ανακατασκευής ταχύτητας» και «ανακατασκευής δυναμικής αλληλεπίδρασης οχήματος-πεζού». Η πρώτη έχει σκοπό τον καθορισμό της ταχύτητας του οχήματος από φυσικές αποδείξεις από το ατύχημα.

Τέτοιες αποδείξεις είναι η απόσταση που «προωθείται» ο πεζός (throw distance), δηλαδή η απόσταση μεταξύ της θέσης του πριν την σύγκρουση και της θέσης όπου ακινητοποιείται μετά την σύγκρουση και η απόσταση πεζού και οχήματος όταν και οι δύο είναι ακινητοποιημένοι. Στην περίπτωση της δυναμικής αλληλεπίδρασης, ο στόχος είναι ο καθορισμός της κίνησης πεζού-οχήματος με λεπτομερή τρόπο καθώς και των δυνάμεων που αναπτύσσονται ώστε να αποδοθούν τυχόν τραυματισμοί ή αλλαγές στην γεωμετρία του οχήματος. Η ανάλυση αυτή γίνεται με ειδικό λογισμικό και δεν αναλύεται παρακάτω. Αντίθετα θα γίνει παρουσίαση της μεθοδολογίας για την ανακατασκευή ταχύτητας (speed reconstruction). Και στην περίπτωση αυτή μπορούν να γίνουν διάφορες προσεγγίσεις για την διένεργεια της ανακατασκευής ταχύτητας. Μια προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές εξισώσεις που έχουν προκύψει από πειράματα, ελεγχόμενες συγκρούσεις με ομοιώματα πεζών κ.ο.κ.

Άλλη προσέγγιση είναι η χρήση εξισώσεων που εξάγονται από αρχές της μηχανικής ενώ μια τελευταία μέθοδος είναι η υιοθέτηση μιας υβριδικής προσέγγισης όπου οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται βασίζονται και σε μηχανικά μοντέλα και σε πειράματα. Γενικά η χρήση εμπειρικών εξισώσεων θεωρείται πιο αποτελεσματική καθώς έχει αποδειχθεί μια στενή σχέση μεταξύ της απόστασης προώθησης του πεζού και του τετραγώνου της ταχύτητας του οχήματος. Κάθε μια από τις προσεγγίσεις έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Για παράδειγμα οι εμπειρικές εξισώσεις είναι απλές και εύκολο να εφαρμοστούν.

Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στα εμπειρικά αυτά μοντέλα αναπαριστούν πειραματικό σφάλμα και όχι αβεβαιότητα στην αναπαράσταση. Τα θεωρητικά μοντέλα που βασίζονται στην μηχανική έχουν ένα διακριτό πλεονέκτημα, υπό την έννοια ότι οι διακυμάνσεις στα μοντέλα αυτά βασίζονται σε αλλαγές φυσικών παραμέτρων και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για ανακατασκευή αλλά και για εκτίμηση της αβεβαιότητας μιας δεδομένης ανακατασκευής.

Κλείνοντας αξίζει να αναφερθεί ότι η σύγκρουση αλλά και η κίνηση του οχήματος και του πεζού μετά από αυτή είναι δύο μόνο τμήματα ενός τέτοιου ατυχήματος. Στην πραγματικότητα, ακόμα και γεγονότα πριν την σύγκρουση είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν καθότι παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ατυχήματος. Αν και αυτά δεν αναλύονται στην παρούσα εργασία, ενδεικτικά αναφέρουμε κάποια όπως η ορατότητα, η απροσεξία του οδηγού, η κατεύθυνση και ταχύτητα του πεζού (ή ποδηλάτη ή ζώου) κ.α.

II. Υβριδικό Μοντέλο (Wrap collisions)

Το μοντέλο που παρατίθεται παρακάτω είναι ένα σχετικά πολύπλοκο μοντέλο που περιγράφει την σύγκρουση οχήματος-πεζού και λαμβάνει υπόψιν πιθανές πολλαπλές συγκρούσεις μεταξύ του οχήματος και του πεζού, τον χρόνο που διαρκεί η εναέρια τροχιά του πεζού (wrap) κ.α. , ενώ βασίζεται σε ένα αριθμό πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί. Περιλαμβάνει επίσης μια απλή αλγεβρική σχέση μεταξύ της αρχικής ταχύτητας του οχήματος, u_{c0} , και της απόστασης προώθησης του πεζού, s_p , η οποία φαίνεται παρακάτω:

$$u_{c0} = c_w \sqrt{s_p} \frac{m}{s} \quad (8.1)$$

Όπου τρεις διαφορετικές τιμές του c_w , παρέχουν εκτιμήσεις της μέσης και πειραματικής αβεβαιότητας. Η ταχύτητα έχει μονάδες m/s , ενώ η απόσταση προώθησης έχει μονάδες m. Αυτές οι τρεις τιμές της σταθεράς είναι $c_w=2.5$, 3.6 , 4.5 , όπου η τιμή 3.6 είναι μια μέση τιμή και οι άλλες παρέχουν άνω και κάτω όρια.

Το εν λόγω μοντέλο βρίσκει εφαρμογή και για περιπτώσεις όπου ο πεζός κινείται εμπρός από το όχημα (forward projection collisions). Μάλιστα για την τελευταία αυτή περίπτωση έχει αναπτυχθεί μια παραλλαγή του παραπάνω μοντέλου, όπου τα αποτελέσματα δίνονται ως όρια με ελάχιστες και μέγιστες ταχύτητες ως συναρτήσεις της απόστασης προώθησης όταν ο πεζός είναι παιδί ή ενήλικας.

Για ένα παιδί, ισχύει

$$u_{c0} = c_c \sqrt{s_p} \frac{m}{s} \quad (8.2)$$

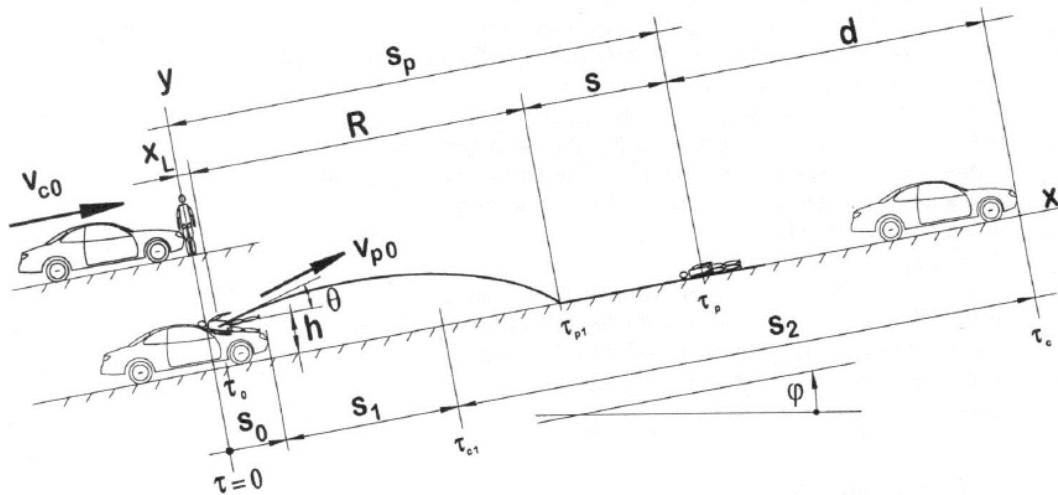
Όπου η ελάχιστη τιμή για την αρχική ταχύτητα προκύπτει για $c_c=2.03$ και η μέγιστη για $c_c=3.90$. Για ενήλικες, η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$u_{c0} = c_a \sqrt{s_p} \frac{m}{s} \quad (8.3)$$

Όπου η ελάχιστη τιμή για την αρχική ταχύτητα προκύπτει για $c_a=1.95$ και η μέγιστη για $c_c=3.77$.

III. Μοντέλο ανάλυσης

Το σχήμα 8.2 δείχνει μια σειρά εικόνων που αντιστοιχούν σε γεγονότα που συμβαίνουν σε μια σύγκρουση πεζού και οχήματος και υποδεικνύουν διάφορες μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μοντέλο.



Σχήμα 8.2 Απεικόνιση συντεταγμένων και μεταβλητών που σχετίζονται με το μοντέλο σύγκρουσης οχήματος-πεζού

Ο αρχικός χρόνος επαφής είναι $t=0$ και η ταχύτητα του οχήματος u_{c0} . Το όχημα και ο πεζός κινούνται προς τα εμπρός με διαφορετικές ταχύτητες μέχρι την στιγμή $t=t_0$, όπου μια δεύτερη σύγκρουση συμβαίνει. Μεταξύ $t=0$ και $t=t_0$, το κέντρο βάρους του πεζού διανύει απόσταση x_L , ενώ την στιγμή $t=t_0$, είναι σε ύψος h πάνω από το έδαφος. Σε περίπτωση μιας forward projection σύγκρουσης $x_L=0$ και δεν έχουμε δεύτερη σύγκρουση. Λόγω του ύψους h , του κέντρου βάρους, ο πεζός αναπηδά και εκτελεί μια εναέρια τροχιά με ταχύτητα u_{p0} και γωνία θ . Η τροχιά αυτή έχει εύρος R και συναντά το έδαφος την στιγμή t_{p1} , στιγμή κατά την οποία ο πεζός προσκρούει στο έδαφος με ταχύτητα που καθορίζεται από την τροχιά αυτή. Από το σημείο αυτό, μέχρι την θέση ακινητοποίησης θεωρείται ότι ο πεζός επιβραδύνεται ομοιόμορφα διανύοντας απόσταση s με συντελεστή τριβής οπισθέλκουσας, f_p .

Η κίνηση στο διάστημα αυτό αποτελείται τυπικά από ολίσθηση, κύλιση ή/και κατρακύλισμα. Η συνολική απόσταση από το σημείο αρχικής σύγκρουσης μέχρι την ακινητοποίηση είναι η απόσταση προώθησης του πεζού, s_p . Επίσης υποθέτουμε ότι από την στιγμή της δεύτερης σύγκρουσης, t_0 , μέχρι την ακινητοποίηση, t_p , η κίνηση του πεζού θεωρείται ανεξάρτητη αυτής του οχήματος.

Με στόχο την γενίκευση της διαδικασίας ανακατασκευής, η κίνηση του οχήματος σε μια αυθαίρετη απόσταση, s_1 , από $t=0$ έως $t=t_{c1}$ θεωρείται ότι παραμένει σταθερή. Στην συνέχεια το όχημα επιβραδύνεται μέχρι την ηρεμία διανύοντας απόσταση s_2 με επιβράδυνση a_2

III1. Κίνηση πεζού

Με βάση τα παραπάνω, εύκολα προκύπτει ότι η απόσταση προώθησης ισούται με

$$s_p = x_L + R + s \quad (8.4)$$

Η μάζα του πεζού, m_p , θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με την μάζα του οχήματος, m_c .

Υπάρχουν ωστόσο περιπτώσεις, όπου η απώλεια ορμής είναι σημαντική (π.χ σύγκρουση με ένα μεγαλόσωμο ζώο), οπότε γίνεται μια παραδοχή σε τέτοιες περιπτώσεις. Έτσι προκύπτει:

$$u'_{c0} = \frac{m_c}{m_c + m_p} u_{c0} \quad (8.5)$$

Και εδώ για λόγους γενικότητας, ένας παράγοντας a , χρησιμοποιείται για την συσχέτιση της ταχύτητας προώθησης του πεζού και της ταχύτητας του οχήματος, δηλαδή:

$$u_{p0} = a u'_{c0} \quad (8.6)$$

Επίσης υποθέτουμε ότι η αντίσταση του αέρα είναι αμελητέα καθώς ο πεζός διαγράφει την εναέρια τροχιά. Σε τέτοια περίπτωση, η τροχιά είναι παραβολική με μηδενική οριζόντια επιτάχυνση και ομοιόμορφη κατακόρυφη επιτάχυνση λόγω της βαρύτητας. Με βάση αυτά οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις για το εύρος R και τον χρόνο διαγραφής της τροχιάς τ_R :

$$R = u_{p0} \cos \theta \tau_R - \frac{1}{2} g \sin \varphi \tau_R^2 \quad (8.7)$$

$$\tau_R = \frac{u_{p0} \sin \theta}{g \cos \varphi} = \frac{\sqrt{u_{p0}^2 \sin^2 \theta + 2gh \cos \varphi}}{g \cos \varphi} \quad (8.8)$$

Επίσης οι συνιστώσες της ταχύτητας τροχιάς, την στιγμή πριν την σύγκρουση με το έδαφος είναι ίσες με:

$$u_{pRx} = u_{p0} \cos \theta - g \tau_R \sin \varphi \quad (8.9)$$

$$u_{pRy} = u_{p0} \sin \theta - g \tau_R \cos \varphi \quad (8.10)$$

Η κανονική συνιστώσα της σύγκρουσης πεζού με το έδαφος θεωρείται τελείως ανελαστική, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μια μόνο σύγκρουση με το έδαφος χωρίς κατακόρυφη αναπήδηση. Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο της θεωρίας ώθησης-ορμής σε ένα επίπεδο (planar impact theory), λόγω των παραπάνω δημιουργείται μια κατακόρυφη ώθηση $P_n = -m_p u_{pRy}$ και εξαιτίας αυτής αναπτύσσεται μια εφαπτομενική ώθηση $P_t = \mu P_n$. Ο πεζός ολισθαίνει καθ'όλη την επαφή με το έδαφος ώστε $\mu = -f_p$. Τελικά η ταχύτητα στην αρχή της απόστασης ολίσθησης, s , ισούται με:

$$u'_{pRx} = u_{pRx} + \mu u_{pRy} \quad (8.11)$$

Οπότε γίνεται εύκολος ο προσδιορισμός της απόστασης s , ως εξής:

$$s = \frac{u'_{pRx}{}^2}{2g(f_p \cos \varphi + \sin \varphi)} \quad (8.12)$$

III2. Κίνηση οχήματος

Εκτός από την αλλαγή στην ορμή του οχήματος λόγω της σύγκρουσης με τον πεζό, η κίνηση των δύο θεωρείται ανεξάρτητη για $t > t_0$. Κάθε τυχαία επαφή στα πρώτα μέρη της τροχιάς αμελείται. Κατά την απόσταση s_0 και την στιγμή t_0 , η ταχύτητα του οχήματος είναι u_{c0} . Κατά την απόσταση s_1 και το χρονικό διάστημα $t_{c1} - t_0$, το όχημα κινείται με ταχύτητα u_{c0}' , ενώ ομοιόμορφη επιτάχυνση $-a_2$ παρατηρείται κατά την απόσταση s_2 . Η διαφορά, d , μεταξύ της συνολικής διανυόμενης απόστασης του οχήματος και της απόστασης προώθησης του πεζού είναι

$$d = u_{c0}t_0 + u_{c0}'(t_{c1} - t_0) + \frac{a_2}{2}(t_c - t_{c1})^2 - s_p \quad (8.13)$$

Αυτή η απόσταση μπορεί να είναι πολύ σημαντική για μια ανακατασκευή επειδή μετά από ένα ατύχημα πεζού-οχήματος το σημείο σύγκρουσης είναι συχνά άγνωστο ενώ η απόσταση d γνωστή. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πιθανόν να ανακατασκευάσουμε την ταχύτητα του οχήματος χρησιμοποιώντας την απόσταση d .

IV. Τιμές φυσικών μεταβλητών

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης προώθησης του πεζού και της απόστασης που διανύει το όχημα. Τα αποτελέσματα των εξισώσεων του αναλυτικού μοντέλου, έχει αποδειχθεί μέσω πειραμάτων ότι συμφωνούν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Μέσω της σύγκρισης αυτής παρέχονται σημαντικές πληροφορίες για τα εύρη τιμών κάποιων φυσικών μεταβλητών. Εντούτοις, πληροφορίες σχετικά με κάποιες μεταβλητές όπως α , θ , R και s δεν μπορούσαν να προσδιοριστούν απευθείας μόνο από τα πειραματικά δεδομένα επειδή δεν λαμβάνονταν συνήθως μετρήσεις αυτών κατά την διεξαγωγή των δοκιμών για αυτό και η σύγκριση είναι πολύ χρήσιμη.

Εξ' ορισμού, η τιμή της γωνίας προώθησης για forward projection σύγκρουση πρέπει να είναι $\theta=0$, επειδή ο πεζός «προωθείται» απευθείας προς τα εμπρός. Αυτό επιτρέπει την προσαρμογή των εξισώσεων του αναλυτικού μοντέλου και τον καθορισμό των τιμών της σταθεράς, α . Όπως ορίστηκε στην εξίσωση 8.7, το α αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή αποκατάστασης. Εφόσον ο ίδιος ή κάποιο κομμάτι ρουχισμού δεν μπλεχτεί στο όχημα τότε δεν θα υπάρχει αναπήδηση, δηλαδή $\alpha=0$. Εάν όμως $\alpha > 1$, τότε υπονοείται ότι η σύγκρουση πεζού και οχήματος έχει μια ελαστική συνιστώσα και μάλιστα ότι ο πεζός «αναπηδά» και προωθείται προς τα εμπρός με μεγαλύτερη ταχύτητα από το όχημα. Γενικά τιμές του α πρακτικά ίσες με την μονάδα, υποδηλώνουν σύγκρουση τύπου wpar. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα και επιπλέον για την εξάρτηση της τιμής του α από την ταχύτητα. Τέλος αναφέρεται ότι για την γωνία θ , ένα τυπικό εύρος για σύνηθεις συνθήκες θεωρείται το $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$.

Μια από τις πιο σημαντικές μεταβλητές για τον προσδιορισμό της απόστασης προώθησης του πεζού είναι ο συντελεστής τριβής οπισθέλκουσας πεζού-εδάφους που συμβολίζεται με f_p . Ο προσδιορισμός του εύρους τιμών που κυμαίνεται γίνεται μέσω πειραμάτων με ομοιώματα ανθρώπων με διάφορα είδη ρουχισμού, τα οποία ρίχνονται από κινούμενο όχημα σε ασφάλτινο έδαφος. Τα διάφορα είδη ρουχισμού, υποδηλώνουν ότι η τιμή του συντελεστή επηρεάζεται από τον ρουχισμό, χωρίς ωστόσο να υπάρχει μεγάλη ευαισθησία ή διακύμανση των τιμών για τα διάφορα ρούχα που χρησιμοποιήθηκαν. Επίδραση στην διαμόρφωση της τιμής του συντελεστή αναμένεται να έχει και το είδος του εδάφους (άσφαλτος, χώμα, πάγος, γρασίδι κ.ο.κ.). Μια μέση τιμή του συντελεστή έχει αποδειχθεί η τιμή $f_p=0.58$ με απόκλιση $s_f=0.1$ και άνω και κάτω όρια στα $\pm 3s_f$.

V. Μοντέλο ανακατασκευής

Αν και το αναλυτικό μοντέλο που περιγράφηκε νωρίτερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή ενός ατυχήματος, κάποιες φορές είναι προτιμότερο να υπολογίσουμε την αρχική ταχύτητα από την απόσταση προώθησης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού, είναι για την εκτίμηση της αβεβαιότητας μιας ανακατασκευής ενός ατυχήματος. Εάν η περιοχή στην οποία συμβαίνει η σύγκρουση οχήματος-πεζού είναι επίπεδη, ή αλλιώς $\varphi=0$, τότε οι εξισώσεις που αφορούν την «ρίψη» του πεζού μπορούν να αντιστραφούν λύνοντας για u_{p0} . Έτσι προκύπτει:

$$u_{c0} = A\sqrt{s_p - B} \quad (8.14)$$

Όπου

$$A = A_p \frac{m_c + m_p}{\alpha m_c} \quad (8.15)$$

$$A_p = \sqrt{\frac{2f_p g}{f_p^2 \sin^2 \theta + f_p \sin 2\theta + \cos^2 \theta}} \quad (8.16)$$

Και

$$B = x_L + f_p h \quad (8.17)$$

Κεφάλαιο Ένατο

Συγκριτική παρουσίαση μεθόδων αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων

I. Εισαγωγή

Ο κυριότερος κίνδυνος δημόσιας ασφάλειας στην Ελλάδα και στις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες είναι οι θάνατοι, οι τραυματισμοί και οι υλικές ζημιές που προκαλούνται από τροχαία ατυχήματα. Παρόλο που διαφαίνεται την τελευταία δεκαετία μια πολύ μικρή πτώση των ρυθμών των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων, ο απόλυτος αριθμός των ατυχημάτων αυτών παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος για το ίδιο χρονικό διάστημα (Fatality Analysis Reporting System, 2001). Αν επιζητείται μείωση των αριθμών αυτών θα πρέπει να αναπτυχθούν συστήματα παρακολούθησης της κυκλοφορίας των οδικών αρτηριών (traffic records system) σε εθνικό επίπεδο. Αυτά αποτελούν ουσιαστικά ένα συνδυασμό ανεξαρτήτων συστημάτων συλλογής δεδομένων που συνεισφέρουν στην ανάπτυξη μιας βάσης πληροφοριών για την διαχείριση των οδικών αξόνων καθώς και των δραστηριοτήτων ασφάλειας και προστασίας που αναπτύσσονται και εφαρμόζονται σε μια χώρα.

Ένα σημαντικό τμήμα του παραπάνω ολοκληρωμένου συστήματος πληροφοριών αποτελεί η έρευνα και η αναπαράσταση των τροχαίων ατυχημάτων, η οποία πραγματεύεται με την καταγραφή των οδικών ατυχημάτων μιας χώρας με σκοπό την εφαρμογή μέτρων ασφαλείας για την αποφυγή ατυχημάτων και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους. Η έρευνα των ατυχημάτων αποτελείται ουσιαστικά από την συλλογή, καταγραφή αποκωδικοποίηση και ερμηνεία των πληροφοριών που αφορούν στον τόπο αλλά και στα αίτια του ατυχήματος. Για την όσο καλύτερη και πιο πιστή αναπαράσταση ενός τροχαίου ατυχήματος, προκειμένου να προσδιοριστούν με σαφήνεια οι συνθήκες και τα αίτιά του, απαιτείται η συλλογή όσο το δυνατό περισσότερων μετρητικών στοιχείων από τον τόπο του ατυχήματος. Η συλλογή των στοιχείων αυτών πρέπει να γίνει όσο το δυνατό γρηγορότερα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος παρακώλυσης της κυκλοφορίας επί της οδού.

Η συλλογή της πληροφορίας για την καταγραφή και αποτύπωση ενός οδικού ατυχήματος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το είδος και τη μορφή του ατυχήματος. Η κατηγοριοποίηση των οδικών ατυχημάτων συνήθως διακρίνεται σε τρεις τάξεις (ANSI D, 1983).

Η κατηγορία Α αναφέρεται στα θανατηφόρα ατυχήματα ως άμεσο αποτέλεσμα της σύγκρουσης καθώς και σε ατυχήματα που προκαλούν μεγάλες υλικές ζημιές σε τεχνικές υποδομές, όπως για παράδειγμα γέφυρες ή κτήρια. Η κατηγορία Β αφορά ατυχήματα με τραυματισμούς των εμπλεκόμενων ανθρώπων ενώ όλα τα υπόλοιπα ατυχήματα περιλαμβάνονται στην τρίτη κατηγορία. Εντούτοις, ανεξάρτητα από την κατηγορία, η αποδεκτή διαδικασία της αναπαράστασης ενός ατυχήματος για περαιτέρω νομική ή άλλου είδους έρευνα, ακολουθεί τα ίδια επίπεδα μελέτης. Αυτά συνίστανται από την επιτόπια καταγραφή της υπάρχουσας

κατάστασης αμέσως μετά το ατύχημα, την συλλογή επιπρόσθετης πληροφορίας αν απαιτηθεί εκ των υστέρων για τον τόπο του ατυχήματος (π.χ ορατότητα, κλίση οδοστρώματος), την αναπαράσταση του ατυχήματος που γίνεται πλέον με σύγχρονα λογισμικά εργαλεία μοντελοποίησης και τέλος, την ανάλυση για τα αίτια που προκάλεσαν το ατύχημα.

Όμως, η πληροφορία που συλλέγεται κατά την διερεύνηση ενός οδικού ατυχήματος αποτελεί ένα μίγμα παρατηρήσεων αλλά και προσωπικών μαρτυριών. Η πιστότητα και η ορθότητα τους καθορίζουν την ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων και συνεπώς την επιτυχία της έρευνας του ατυχήματος. Υπάρχει επομένως η αναγκαιότητα για την χρήση ενός τεχνολογικά ενημερωμένου, αξιόπιστου και αντικειμενικού συστήματος καταγραφής δεδομένων το οποίο, σε σχετικά σύντομο χρόνο, να συλλέγει μεγάλη ποσότητα πληροφορίας για την πλήρη αποτύπωση του συμβάντος και του περιβάλλοντα χώρου. Ενώ οι απαιτήσεις ακριβείας για τέτοιου είδους αποτύπωσης δεν χρειάζεται να είναι καλύτερες από τα λίγα cm, η δυνατότητα ταχείας καταγραφής δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί προκαλούνται καθυστερήσεις στην κυκλοφορία ή ευνοούν ακόμα και νέα ατυχήματα από την μακρόχρονη απομόνωση του τόπου του συγκεκριμένου συμβάντος.

Η πλέον συνηθισμένη τεχνική αποτύπωσης αφορά μετρήσεις μήκους με χρήση απλής μετροταινίας και σύνταξη αυτοσχέδιων του τόπου του ατυχήματος. Η τεχνική αυτή παρόλο που παρουσιάζει μεγάλη ευκολία εφαρμογής δεν παρέχει λεπτομέρεια, ενώ το προϊόν της αποτύπωσης μπορεί να περιλαμβάνει ακόμα και λανθασμένη πληροφορία. Σε αντίθεση με την Ελλάδα που σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται μόνο η παραπάνω τεχνική αποτύπωσης, διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες αποτύπωσης που παρέχουν σημειακές μετρήσεις με χρήση ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών (total stations) ή δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης όπως το GPS (Global Positioning System). Συστήματα που παρέχουν πυκνή χωρική πληροφορία δίνουν αυτά που στηρίζονται στην χρήση της φωτογραμμετρίας και πρόσφατα στην τεχνολογία της επίγειας σάρωσης με laser (terrestrial laser scanning). Όλα τα παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούνται είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους ενώ έχει πλέον αυτοματοποιηθεί η χρήση των περισσότερων για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυνατότητες των μεθόδων αποτύπωσης και αναπαράστασης τροχαίων ατυχημάτων και συγκεκριμένα των τοπογραφικών και φωτογραμμετρικών μεθόδων, με παράλληλη χρήση συμβατικών (κλασική ταχυμετρία) και αυτοματοποιημένων διεργασιών. Οι αυτοματοποιημένες διεργασίες περιλαμβάνουν τη χρήση τεχνολογίας GPS και ειδικά την εφαρμογή της μεθόδου RTK (Real Time Kinematic) και τη χρήση της τεχνολογίας της επίγειας σάρωσης laser. Οι επιμέρους στόχοι περιλαμβάνουν την διερεύνηση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των μεθόδων, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα εφαρμογής τους καθώς και τους περιορισμούς εφαρμογής της κάθε μεθόδου. Συγκεκριμένα, γίνεται ποιοτική αξιολόγηση των παραπάνω τεχνικών αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων σχετικά με το βαθμό διακριτότητας χαρακτηριστικών του τόπου του ατυχήματος (π.χ. κατακόρυφη και οριζόντια σήμανση των δρόμων, ίχνη ελαστικών πάνω στο οδόστρωμα), τις συνθήκες του οδοστρώματος κατά το ατύχημα (π.χ. βρεγμένο) και του φωτισμού. Εκτός από τη

μελέτη της λειτουργίας της κάθε μεθόδου κάτω από διαφορετικές συνθήκες, παρουσιάζονται τόσο οι απαιτήσεις χρόνου όσο και οι απαιτήσεις προσωπικού (π.χ. εκπαίδευση) για κάθε μέθοδο.

II. Αντικείμενο αποτύπωσης

Οι μετρήσεις που γίνονται στο τόπο του ατυχήματος αποτελούν το θεμέλιο για τις εκτιμήσεις σχετικά με τον τρόπο διεξαγωγής του συγκεκριμένου ατυχήματος. Σε ένα σοβαρό τροχαίο ατύχημα, ενδείκνυται να γίνονται δύο είδη μετρήσεων μέσω των οποίων θα καταγραφεί η κατάσταση αμέσως μετά το συμβάν με τελικό προϊόν ένα σχέδιο υπό κλίμακα (διάγραμμα). Το πρώτο είδος μετρήσεων γίνεται στη σκηνή του ατυχήματος έτσι ώστε να εντοπιστούν όλα τα ίχνη στο δρόμο και να προσδιοριστούν οι τελικές θέσεις των οχημάτων, και το δεύτερο είδος μετρήσεων αφορούν τη γεωμετρία των δρόμων στους οποίους συνέβη το ατύχημα, η διεξαγωγή των οποίων γίνεται αργότερα και μόνο αν είναι απαραίτητη. Οι πληροφορίες για την έρευνα ενός ατυχήματος αντλούνται από τα αποτελέσματα του ατυχήματος.

Συγκεκριμένα, ο εντοπισμός χαρακτηριστικών σημείων γίνεται μέσω της έρευνας των παρακάτω οκτώ ειδών αποτελεσμάτων ενός ατυχήματος, τόσο πάνω στο δρόμο όσο και στο παρόδιο χώρο του: 1) θέσεις των οχημάτων μετά το ατύχημα, 2) σημεία που κείτονται νεκροί ή τραυματίες, οι οποίοι δεν είναι μέσα στα οχήματα, 3) αυλακώσεις, που δημιουργούνται από δυνατά αιχμηρά αντικείμενα τα οποία εκτοπίζουν το υλικό ασφαλτόστρωσης, 4) γραμμώσεις, που δημιουργούνται από ασθενή ή από στρογγυλεμένα μεταλλικά αντικείμενα που δεν μπορούν να εκτοπίσουν το υλικό ασφαλτόστρωσης, 5) ίχνη από λάστιχα στο δρόμο ή αλλού, εκτός αν είναι φανερό ότι δεν έχουν σχέση με το ατύχημα, 6) ίχνη στον παρόδιο χώρο, 7) υπολείμματα διαφόρων ειδών όπως πατημένη λάσπη ή χιόνι, αποκολλημένα τμήματα των οχημάτων, όπως καπό ή ρόδες, αντικείμενα πεζών όπως παπούτσια, τσάντες, γυαλιά, υγρά οχημάτων σε διάφορες μορφές ακόμη και αίμα από τα θύματα του ατυχήματος, 8) αντικείμενα πάνω ή κοντά στο δρόμο που είναι σπασμένα (π.χ. κράσπεδο) ή έχουν αναδειχθεί ως αποτέλεσμα του ατυχήματος. Χρήσιμος είναι ακόμη και ο εντοπισμός άλλων θέσεων όπως: 1) παρκαρισμένα ή ακινητοποιημένα από βλάβη οχήματα που μπορεί να εμποδίζουν την ορατότητα, 2) μέρη στα οποία ήταν οι μάρτυρες όταν συνέβη το ατύχημα, 3) υπολείμματα πάγου, χιόνι και λακκούβες τα οποία μπορεί να είχαν κάποια επίδραση στα συμβάντα του ατυχήματος και τα οποία μπορεί σύντομα να εξαφανιστούν.

Οι μετρήσεις που γίνονται στο χώρο του ατυχήματος και αφορούν σταθερά αντικείμενα δεν είναι απαραίτητο να γίνουν από την αρχή της έρευνας, γιατί είναι μόνιμα στοιχεία και μπορούν να εντοπιστούν αργότερα. Τέτοιες μετρήσεις είναι το πλάτος των δρόμων, οι καμπυλότητες και οι κλίσεις τους και κάποιες κατακόρυφες μετρήσεις όπως είναι τα ύψη πιθανών ιχνών από σύγκρουση πάνω σε τοίχο, δένδρο ή άλλο αντικείμενο, το ύψος εμποδίων ορατότητας των

οδηγών κλπ. Πολλές από τις παραπάνω μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν ακόμη και με τη χρήση μιας απλής μετροταινίας.

III. Συστήματα αποτύπωσης

Τα συστήματα αποτύπωσης διακρίνονται σε αυτά που μπορούν να δώσουν μονοδιάστατη πληροφορία, όπως η απλή μετροταινία, και σε αυτά που παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία θέσης (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά). Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται στην κλασσική τοπογραφία και είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί (EDM) και τα συστήματα GPS. Αυτά τα συστήματα είναι αξιόπιστα, έχουν μεγάλες ακρίβειες, αλλά παρέχουν μόνο σημειακή πληροφορία. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, μπορεί να γίνει χρήση της φωτογραμμετρίας που είναι μια καλά καταξιωμένη τεχνική και δίνει πυκνή χωρική πληροφορία κατάλληλη για εργασίες αποτύπωσης ατυχημάτων. Η πλέον σύγχρονη τεχνική συλλογής χωρικής πληροφορίας είναι η επίγεια σάρωση Laser η οποία παρέχει άμεσα τρισδιάστατες συντεταγμένες ενός τεράστιου αριθμού σημείων της επιφάνειας αντικειμένων. Η ενότητα αυτή περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος αποτύπωσης και παρουσιάζει τις μορφές τους που εφαρμόζονται σε εργασίες αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων.

III1. Συμβατικές Μέθοδοι

Στην Ελλάδα η τυπική μέθοδος αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων είναι αυτή σύμφωνα , με την οποία όλες οι μετρήσεις γίνονται με τη χρήση μετροταινίας. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται λόγω της μονοδιάστατης φύσης τους, αφορούν κυρίως στην παρουσίαση αυτοσχεδίων με τις θέσεις των οχημάτων που ενεπλάκησαν στο ατύχημα ως προς κάποιο σημείο αναφοράς (π.χ. Χ.Θ. σύγκρουσης), το μήκος των ιχνών πέδησης αν υπάρχουν, και άλλες πληροφορίες στον περιβάλλοντα χώρο όπως διαγραμμίσεις, σήματα, σηματοδότες. Σε περιπτώσεις που απαιτείται η απόκτηση στοιχείων για το ανάγλυφο της περιοχής του ατυχήματος, η χρήση της μετροταινίας δύσκολα μπορεί να δώσει τέτοια πληροφορία αφού απαιτείται η μέτρηση των κατά μήκος και εγκάρσιων κλίσεων. Αυτές όμως οι μετρήσεις παρουσιάζουν δυσκολίες στον συνηθισμένο τροχονόμο για να αποδώσει σωστά σε ένα σκαρίφημα την σκηνή του ατυχήματος.

Η ακριβέστερη συμβατική , μέθοδος αποτύπωσης είναι αυτή κατά την οποία γίνεται χρήση ενός πλήρους γεωδαιτικού σταθμού ο οποίος βάσει μετρήσεων αποστάσεων και γωνιών εξάγει άμεσα και με μεγάλη ακρίβεια τρισδιάστατες συντεταγμένες θέσης στα σημεία ενδιαφέροντος της σκηνής του ατυχήματος. Με τη μέθοδο αυτή μειώνεται ο χρόνος των μετρήσεων αφού η συλλογή τους γίνεται αυτόματα και έτσι αποφεύγονται και πιθανά λάθη καταγραφής.

Είναι μια αποδεδειγμένη και ακριβής μέθοδος για την έρευνα τροχαίων ατυχημάτων, αλλά απαιτείται περισσότερος χρόνος για την διεξαγωγή των μετρήσεων και συνεπώς για τον καθαρισμό ενός τόπου ατυχήματος απ' ότι χρειάζεται με την παραδοσιακή μέθοδο. Στις χώρες (όπως ΗΠΑ, Ιαπωνία, Καναδάς) που χρησιμοποιείται επίσημα η τεχνική αυτή, ο εξοπλισμός βρίσκεται μόνιμα σε συνεργεία αυτοκινήτων που ερευνούν ατυχήματα. Συνήθως υπάρχει πάντα διαθέσιμος ένας εξοπλισμός σε ένα κεντρικό σημείο της πόλης και σε περίπτωση ανάγκης μετακινείται στο χώρο του ατυχήματος, κάτι που μπορεί να είναι χρονοβόρο και όχι πάντα βολικό.

III2. Συστήματα με χρήση GPS

Η χρήση δορυφορικών συστημάτων, όπως το GPS και το αντίστοιχο ευρωπαϊκό σύστημα GALILEO που είναι σε λειτουργία από το 2008, για τον εντοπισμό της θέσης σημείων είναι πλέον διαδεδομένη και οι τεχνικές συλλογής τέτοιων μετρήσεων είναι καλά τεκμηριωμένες. Οι δύο βασικές τεχνικές μέτρησης με το GPS είναι ο απόλυτος εντοπισμός (χρήση ενός μόνο δέκτη) που δίνει ακρίβεια της τάξης των 5-30m και ο σχετικός εντοπισμός θέσης (χρήση τουλάχιστον δύο δεκτών) που φτάνει τα λίγα cm. Οποιαδήποτε τεχνική μέτρησης και αν χρησιμοποιηθεί, το αποτέλεσμα είναι οι τρισδιάστατες συντεταγμένες θέσης ενός σημείου σε παγκόσμιο ή εθνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Σε αντίθεση με τον στατικό εντοπισμό, όπου οι δέκτες παραμένουν ακίνητοι για κάποιο χρονικό διάστημα, ο κινηματικός εντοπισμός μπορεί να έχει διάφορες μορφές που όμως όλες βασίζονται στην ταχεία κατάληψη σημείων (από μερικά sec ως 1-2min) και με κυμαινόμενες ακρίβειες της τάξης των cm. Η πλέον σύγχρονη τεχνική συλλογής δεδομένων με το σύστημα GPS αποτελεί η μέθοδος RTK (real time kinematic) όπου σε πραγματικό χρόνο προσδιορίζεται η θέση ενός σημείου με ακρίβεια που φθάνει τα $\pm 1\text{cm} \pm 2\text{ppm}$ (parts per million, δηλ. αναλογικό σφάλμα ως προς την απόσταση μέτρησης). Για την λειτουργία της μεθόδου αυτής απαιτούνται δύο δέκτες GPS (διπλής συχνότητας) και μια ασύρματη ζεύξη μεταξύ τους (radio link). Ο ένας δέκτης που είναι σταθερός τοποθετείται σε σημείο γνωστών συντεταγμένων, ενώ ο δεύτερος που είναι κινητός μετακινείται στα σημεία προς αποτύπωση. Ο σταθερός δέκτης εκπέμπει διορθώσεις για τις μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται από τον κινητό για τον προσδιορισμό της θέσης των σημείων την ίδια χρονική στιγμή.

Η χρήση του GPS παρουσιάζει ευρύτατη εφαρμογή σε συστήματα ασφαλούς πλοήγησης οχημάτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η περίπτωση προσδιορισμού της θέσης του οχήματος όταν συμβεί ένα ατύχημα μέσω συστημάτων τηλεματικής για την έγκαιρη αντιμετώπιση του συμβάντος.

Τέτοια ολοκληρωμένα συστήματα αποτελούνται βασικά από ένα κινητό τηλέφωνο με ενσωματωμένα ένα δέκτη GPS και σύστημα επικοινωνίας με ένα κέντρο παρακολούθησης και τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα σε τέτοια θέση του οχήματος που επιτρέπει εύκολη πρόσβαση αλλά και προστασία από σοβαρές συγκρούσεις του οχήματος. Οι διεθνείς στατιστικές μελέτες σχετικά με τα τροχαία ατυχήματα δείχνουν ότι τα πρώτα λεπτά μετά από ένα σοβαρό ατύχημα είναι καθοριστικά για την επιβίωση των επιβατών. Οι θέσεις του οχήματος που φέρει τέτοιο σύστημα αποθηκεύονται στο ολοκληρωμένο σύστημα καθόλη την κίνησή του (είναι αντίστοιχο με το «μαύρο κουτί» του αεροσκάφους). Επομένως, το σύστημα έχει την δυνατότητα να πληροφορήσει την θέση ενός ατυχήματος στις ομάδες διάσωσης ακόμα και αν το σύστημα έχει καταστραφεί ή έχει διακοπεί η επικοινωνία λόγω της σύγκρουσης.

Στις εργασίες αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων η χρήση του GPS δεν εμφανίζει διαδεδομένη χρήση όπως θα αναμενόταν, κυρίως λόγω των προβλημάτων ανεμπόδιστης λήψης του δορυφορικού σήματος που πιθανά να προκαλούνται όταν υπάρχουν εμπόδια, όπως δέντρα, κτήρια, μεγάλα οχήματα κλπ, στον τόπο ενός ατυχήματος. Η επιτυχής χρήση της μεθόδου RTK, η οποία είναι η μόνη που ενδείκνυται για τέτοιου είδους εφαρμογές εξαρτάται από παράγοντες που αφορούν τον αριθμό και τον γεωμετρικό σχηματισμό των ορατών δορυφόρων κατά την λειτουργία του συστήματος, την ύπαρξη εμποδίων και τον περιβάλλοντα χώρο για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω ηλεκτρικών παρεμβολών και πολλαπλών διαδρομών του σήματος (multipath). Εντούτοις, τα μεγάλα πλεονεκτήματα χρήσης του σε οποιαδήποτε στιγμή, μέρα ή νύχτα σε οποιοδήποτε καιρικές συνθήκες, ελεύθερη ακόμα πρόσβαση στα δεδομένα χωρίς οικονομική συνδρομή και με μεγάλη ευκολία λειτουργίας του ακόμα και από ένα χρήστη, κάνουν το σύστημα ιδανικό για την αποτύπωση βασικών σημείων του χώρου του ατυχήματος ενώ τα σημεία - λεπτομέρειες δύνανται να αποτυπωθούν με χρήση μετροταινίας.

Συχνά τα συστήματα RTK-GPS συνοδεύονται από κατάλληλο λογισμικό αυτόματου σχεδιασμού των σημείων κατά την διάρκεια της συλλογής των δεδομένων, ώστε να είναι εφικτή η πληρότητα της αποτύπωσης στον τόπο του ατυχήματος. Σε πληρέστερη μορφή του το σύστημα μπορεί να παρέχει την γεωμετρική πληροφορία σε ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) και να ενημερώνεται έτσι μια ήδη υπάρχουσα βάση πληροφοριών των οδικών αρτηριών μιας χώρας για τα σημεία εκείνα που προκαλούνται συχνά ατυχήματα. Οι δέκτες GPS που χρησιμοποιούνται σε τέτοια συστήματα δεν είναι απαραίτητο να είναι εφοδιασμένοι με δυνατότητα RTK. Αρκεί η χρήση ενός δέκτη με δυνατότητα DGPS (differential GPS) όπου παρέχονται μέσω συνδρομητικής διάθεσης οι διορθώσεις από τον κοντινότερο σταθμό αναφοράς ο οποίος ανήκει σε μόνιμο δίκτυο σταθμών GPS (WAAS). Η ακρίβεια τέτοιων συστημάτων είναι μικρότερη (της τάξης των μερικών m) σε σχέση με τη τεχνική RTK-GPS αλλά θεωρείται ικανοποιητική για την απλή αποτύπωση της περιοχής ενός ατυχήματος (Σχήμα 9.1)



Σχήμα 9.1 Τυπικά παραδείγματα χρήσης συστήματος RTK-GPS σε εφαρμογές αποτύπωσης δρόμου

Η χρήση του GPS εμφανίζει μεγαλύτερη εφαρμογή σε συνδισμένα συστήματα καταγραφής πληροφορίας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούν ερασιτεχνικές φωτογραφικές μηχανές που δεν απαιτούν μετρολογικό έλεγχο πριν από την συλλογή φωτογραφιών στο τόπο του ατυχήματος όπως στις τυπικές φωτογραμμετρικές μεθόδους. Όμως ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων επιτυγχάνεται μέσω των σημείων γνωστών συντεταγμένων που έχουν προσδιοριστεί με το σύστημα GPS. Επιπλέον, αν διατίθεται για την περιοχή καταγραφόμενη πληροφορία μέσω ψηφιακών χαρτών σε σύστημα GPS, αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις φωτογραφικές λήψεις για την γεωαναφορά τους. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τέτοια συνδυσμένα συστήματα καταγραφής είναι της τάξης των 5-10cm.

III3. Φωτογραμμετρική Μέθοδος

Η φωτογραμμετρία είναι μια καλά καταξιωμένη τεχνική, κατάλληλη για εργασίες αποτύπωσης ατυχημάτων με την οποία αποκτώνται μετρητικές πληροφορίες από φωτογραφίες. Οι μετρητικές πληροφορίες όσον αφορά στην ακρίβειά τους σχετίζονται με την ποιότητα της εικόνας. Ωστόσο υπάρχει η στερεοσκοπική και η μονοεικονική απόδοση των φωτογραφιών κάποιου τροχαίου ατυχήματος. Στην στερεοσκοπική μέθοδο χρησιμοποιούνται στερεοζεύγη φωτογραφιών, τα οποία αποκτώνται μέσω μιας στερεοσκοπικής κάμερας. Η κάμερα αυτή αποτελείται από δύο φωτομηχανές οι οποίες είναι τοποθετημένες στα άκρα ενός πτυσσόμενου σωλήνα (βάση) γνωστού μήκους με τους άξονες των μηχανών παράλληλους μεταξύ τους. Οι μηχανές αυτές έχουν τις ίδιες παραμέτρους έτσι ώστε οι δύο φωτογραφίες που παράγονται να μπορούν να παρατηρηθούν στερεοσκοπικά μέσω ενός στερεοσκοπίου.

Αφού τοποθετηθούν οι φωτογραφίες στο όργανο (αναλογικό ή αναλυτικό) και περατωθεί η διαδικασία των προσανατολισμών (σχετικού και απόλυτου), οι δύο προοπτικές προβολές των εικόνων αναπλάθουν τη δέσμη των ακτίνων και αποδίδουν μια τρισδιάστατη εικόνα.

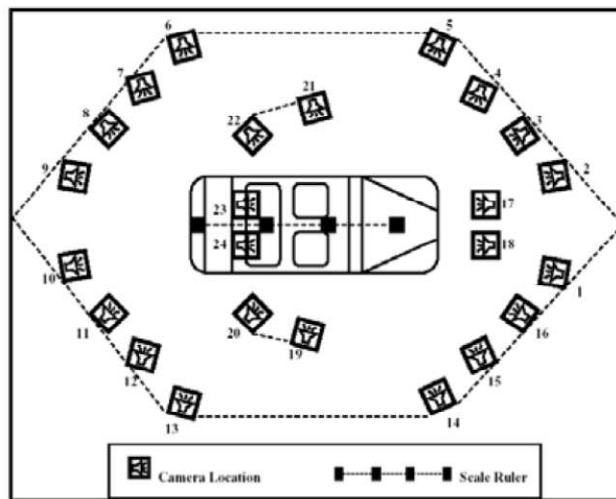
Στη συνέχεια, με την διαδικασία της απόδοσης γίνονται μετρήσεις διαστάσεων και από όλα τα μετρούμενα στοιχεία γίνεται η σύνταξη σχεδίου υπό κλίμακα, οριζοντιογραφικά και προοπτικά. Μ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποτύπωση της σκηνής από τις φωτογραφίες στο χαρτί. Η διαδικασία της φωτογράφισης μπορεί να διαρκέσει ανάλογα με την περίπτωση από λίγα min ως τα 30min. Για την εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιλογή κατάλληλων στάσεων κάμερας ώστε όλη η περιοχή να καλυφθεί από όσο το δυνατόν λιγότερες φωτογραφίες και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Συνήθως τοποθετούνται τέσσερις κώνοι (στο ρόλο φωτοσταθερών) οι οποίοι σχηματίζουν ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο τέτοιο ώστε οι διαγώνιες του να είναι παράλληλες αλλά και κάθετες προς τη βάση λήψης. Στη συνέχεια μετριοούνται με ακρίβεια οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών των κώνων οι οποίες χρησιμεύουν σαν βάσεις από τις οποίες θα εξαχθεί η κλίμακα του σχεδίου καθώς και όλα τα υπόλοιπα μήκη. Η ακρίβεια της στερεοφωτογραμμετρίας υπερέχει σε σχέση με άλλες μεθόδους, αλλά μειονεκτεί στο σχετικό κόστος που καθιστά τη χρήση της αδικαιολόγητη για ατυχήματα με μικρές νομικές συνέπειες. Συνήθως οι μόνες φωτογραφίες που είναι διαθέσιμες σε περιπτώσεις τροχαίων ατυχημάτων είναι αυτές που έχουν τραβηχτεί από ερασιτεχνική μηχανή των 35mm. Είναι όμως εφικτή η παραγωγή σχεδίων υπό κλίμακα και από μονοσκοπικές φωτογραφίες.

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση τουλάχιστον τεσσάρων φωτοσταθερών τα οποία θα ανήκουν στο ίδιο επίπεδο με το αντικείμενο και ανά τρία να μην είναι συνευθειακά.

Τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και μετριοούνται οι μεταξύ τους αποστάσεις με ακρίβεια. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας φυσικός προοπτικός κánaβος ή ένας φορητός ορθογώνιος κánaβος που μπορεί να τοποθετηθεί στο δρόμο και να συμπεριληφθεί στο μπροστινό πλάνο των κύριων φωτογραφιών. Μ' αυτόν τον τρόπο δεν χάνεται χρόνος για μετρήσεις στο τόπο του ατυχήματος και οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν πάνω στην εικόνα που έχει τον κánaβο. Όμως, λόγω του προοπτικού χαρακτήρα της φωτογραφίας, μια μικρή κλίση ή ανωμαλία στο οδόστρωμα μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στην ακρίβεια. Στο τυπικό περιβάλλον του δρόμου η χειρότερη ακρίβεια μπορεί να είναι 20cm. Γενικά, η ακρίβεια της απόδοσης μειώνεται όσο οι μετρήσεις πλησιάζουν προς το βάθος της φωτογραφίας γι' αυτό και η εφαρμογή της μεθόδου είναι περιορισμένη. Επιπλέον δεν είναι εφικτή η απόδοση όλης της σκηνής του ατυχήματος από διαφορετικές φωτογραφίες πράγμα που είναι δυνατό με τα στερεοζεύγη.

Η χρήση της φωτογραμμετρίας σε αποτυπώσεις τροχαίων ατυχημάτων είναι καταξιωμένη σε χώρες όπως η Ελβετία Γερμανία, Ιαπωνία και Αυστραλία εδώ και 50 χρόνια. Επίσης, μια φωτογραμμετρική διάταξη που έχει αναπτυχθεί στη Σουδία (γνωστή ως Folksam/Chalmers) έχει πλέον καθιερωθεί ως ένα από τα βασικά συστήματα αποτύπωσης τροχαίων ατυχημάτων.

Το Σχήμα 2 δείχνει τις 12 θέσεις των φωτογραφικών λήψεων που λαμβάνονται γύρω από το όχημα ώστε να μην υπάρχουν περιοχές του αντικειμένου που δεν έχουν αποτυπωθεί. Πριν την λήψη των φωτογραφιών τοποθετούνται κατάλληλοι στόχοι για την σύνδεση τους κατά το στάδιο της επεξεργασίας καθώς μια κλίμακα κατά μήκος του οχήματος (εμφανίζεται στο σχήμα με 4 μαύρα πλαίσια που συνδέονται με διακεκομμένη γραμμή) που βοηθάει στον έλεγχο των μετρήσεων. Μελέτη που έγινε για την αξιολόγηση του συστήματος κατά την αποτύπωση 3000 ατυχημάτων έδειξε ότι το σύστημα παρέχει ακρίβειες εντοπισμού σημείων της τάξης των $\pm 15-30\text{mm}$, ενώ ο χρόνος συλλογής των φωτογραφιών κυμαίνεται από 20-30min για ατυχήματα σύγκρουσης δύο οχημάτων.



Σχήμα 9.2 Η διάταξη του συστήματος Folksam/Chalmers (από Duignan et al.1996)

Πέρα από την επεξεργασία των φωτογραφιών σε ειδικά φωτογραμμετρικά λογισμικά πακέτα, η τρισδιάστατη παρουσίαση της αποτύπωσης γίνεται με χρήση τυπικών λογισμικών μοντελοποίησης. Στο Σχήμα 3 φαίνεται χρήση ενός τέτοιου πακέτου για την αποτύπωση των ιχνών πέδησης από τις φωτογραφίες σε σχέδια δύο διαστάσεων.



Σχήμα 9.3 Παράδειγμα αποτύπωσης ιχνών από φωτογραφίες

III4. Επίγεια σάρωση laser

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τοπογραφικές μεθόδους μέτρησης όπου ένας περιορισμένος αριθμός διακριτών σημείων μπορεί δειγματοληπτικά να αποτυπώσει ένα ατύχημα, η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης με laser (terrestrial laser scanning) μπορεί άμεσα να δώσει έως και 2 εκατομμύρια τρισδιάστατες συντεταγμένες σε κάθε σάρωση, χωρίς να απαιτείται καμία φυσική επαφή με το αντικείμενο ή την επιφάνεια που αποτυπώνεται. Η τεχνολογία της σάρωσης με laser είναι η πιο σύγχρονη και αυτοματοποιημένη μέθοδος που μπορεί να εφαρμοσθεί για την αποτύπωση τροχαίων ατυχημάτων.

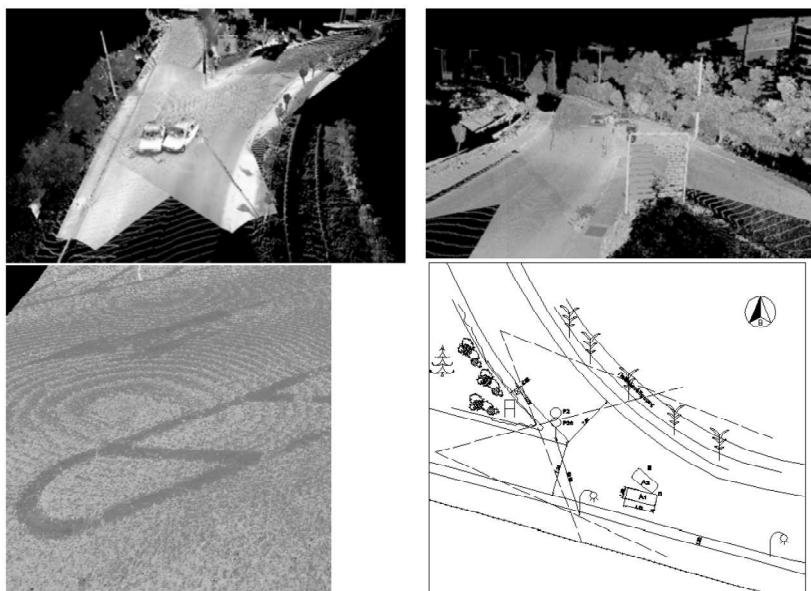
Οι σαρωτές laser μικρού βεληνεκούς είναι στην πραγματικότητα ενεργά τηλεπισκοπικά συστήματα για επίγειες εφαρμογές, γνωστά και ως 3D close-range Laser Mapping Systems (3D-LMS). Ο όρος «ενεργά» αναφέρεται στην ιδιότητα των συστημάτων αυτών να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή προσπίπτει σε αντικείμενα του πραγματικού χώρου, ανακλάται και επιστρέφει στο όργανο το οποίο καταγράφει και το σήμα επιστροφής. Έτσι «αποτυπώνεται» η επιφάνεια πάνω στην οποία έχει ανακλαστεί το εκπεμπόμενο σήμα. Πρόκειται δηλαδή για πηγές και δέκτες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ένα σύστημα επίγειου σαρωτή εκπομπής laser αποτελείται από τα παρακάτω μέρη: α) τον σαρωτή που περιλαμβάνει τον πομπό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τον δέκτη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που λαμβάνει το επιστρεφόμενο σήμα, την καταγραφική μονάδα στην οποία καταγράφονται η επιστροφή του σήματος και ο χρόνος εκπομπής-λήψης, το χρονόμετρο για την μέτρηση του χρόνου μετάβασης και επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος και το σύστημα των περιστρεφόμενων καθρεφτών που κατευθύνει την δέση της ακτινοβολίας, β) την μπαταρία για την τροφοδοσία του συστήματος και γ) την μονάδα ελέγχου που αποτελείται από έναν φορητό υπολογιστή στον οποίο είναι εγκαταστημένο το λογισμικό σάρωσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Συνεπώς ο χρήστης έχει την δυνατότητα οπτικής επαφής με τα δεδομένα της εκάστοτε σάρωσης σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να μπορεί να επέμβει σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν τον ικανοποιεί.

Οι σαρωτές κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την αρχή που χρησιμοποιούν για τη μέτρηση της απόστασης σαρωτή-σκοπευόμενου σημείου ανάλογα με την εμβέλειά τους και ανάλογα με τη δυνατότητα τοποθέτησής τους. Δεν υπάρχει όμως κανένα σύστημα σαρωτή που να είναι κατάλληλο για όλες τις εφαρμογές. Η διαδικασία της σάρωσης στο πεδίο είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Το όλο σύστημα μπορεί εύκολα να στηθεί και να λειτουργήσει ακόμη και με ένα μόνο άτομο.

Αφού πρώτα μελετηθεί γρήγορα ο τόπος του ατυχήματος και γενικότερα το αντικείμενο που θα σαρωθεί ως προς το μέγεθος, τις ιδιομορφίες που παρουσιάζει και την πολυπλοκότητα ή μη της γεωμετρίας του, με βάση το οπτικό πεδίο του σαρωτή προσδιορίζεται με ακρίβεια ο αριθμός των στάσεων στις οποίες θα στηθεί ο σαρωτής προκειμένου να σαρωθεί η σκηνή του ατυχήματος χωρίς να υπάρξουν κενά και ασυνέχειες.

Ακόμη, επιλέγονται οι θέσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν κατάλληλοι στόχοι που θα χρησιμεύσουν στη σύνδεση των διαδοχικών σάρωσεων (registration). Η όλη διαδικασία της σάρωσης γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού που συνοδεύει κάθε σαρωτή και ο χρόνος της κάθε σάρωσης κυμαίνεται μεταξύ 1-30min. Ο χρόνος διεξαγωγής της εξαρτάται από το μέγεθος της οριοθετημένης προς σάρωση περιοχής και την πυκνότητα σάρωσης.

Οι ακρίβειες που είναι δυνατόν να επιτευχθούν στην αποτύπωση με σάρωση είναι αρκετά υψηλές. Ειδικότερα, ο προσδιορισμός της τρισδιάστατης θέσης μεμονωμένων σημείων γίνεται με ακρίβεια της τάξης των $\pm 1-6\text{mm}$ για συνήθεις αποστάσεις των 50m του αντικειμένου από τον σαρωτή. Όμως, η ακρίβεια βελτιώνεται σημαντικά όταν ακολουθήσει επεξεργασία των δεδομένων (νέφη σημείων) και γίνει μοντελοποίηση επιφάνειας με τιμές που ανέρχονται στα $\pm 2\text{mm}$. Το οπτικό πεδίο του σαρωτή μπορεί να φτάσει τις $360^\circ \times 270^\circ$ σε οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα (ανάλογα με το σαρωτή) και η ταχύτητα σάρωσης φτάνει τα 20,000 σημεία ανά δευτερόλεπτο.



Σχήμα 9.4 Παραδείγματα νέφους σημείων και διαγράμματος για την αποτύπωση σκηνής ατυχήματος

Οι μέθοδοι της επίγειας σάρωσης όπως και οι προαναφερθείσες μέθοδοι δεν έχουν ακόμα χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα σε εφαρμογές αποτύπωσης ατυχημάτων σε λειτουργικό επίπεδο. Έχει όμως γίνει διερεύνηση των δυνατοτήτων για τέτοιου είδους εφαρμογές με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 9.4 φαίνονται κάποια παραδείγματα νέφους σημείων και ένα παραγόμενο διάγραμμα μιας αποτύπωσης σκηνής ατυχήματος. Η χρήση του στο εξωτερικό έχει αρχίσει να γίνεται από δημόσιες υπηρεσίες κυρίως για ατυχήματα που αφορούν συγκρούσεις με τρένα ενώ είναι αξιοσημείωτη η εφαρμογή του από ιδιωτικές εταιρείες που αναλαμβάνουν την έρευνα οδικών ατυχημάτων (π.χ. TRL's Investigations and Risk Management (IRM) Group).

Η εμπειρία έχει δείξει ότι για αποτυπώσεις οδικών ατυχημάτων που έχουν συμβεί κατά την διάρκεια της νύχτας, η χρήση του σαρωτή ήταν επιτυχής. Ειδικότερα, δημιουργήθηκε ένα 3-D μοντέλο του περιβάλλοντος του αυτοκινητοδρόμου μέσω του laser scanner. Η θέση του κάθε αυτοκινήτου ορίστηκε χρησιμοποιώντας ατομικά πλαίσια βίντεο και τη γνωστή θέση της κάμερας. Στο τέλος, δημιουργήθηκε μια εικονική αναπαράσταση του ατυχήματος το οποίο μπορούσε να παρατηρηθεί από κάθε γωνία περιλαμβάνοντας την οπτική γωνία του κάθε οδηγού. Επίσης, στην Ασία πρόσφατα έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία της επίγεια σάρωσης για την βελτίωση της ασφάλειας μιας διατομής του δρόμου μήκους 55km. Ακόμα έχει χρησιμοποιηθεί για την οπτικοποίηση των τόπων των ατυχημάτων .

IV. Αξιολόγηση Μεθόδων

Η ακριβής και ολοκληρωμένη τεκμηρίωση ενός τροχαίου ατυχήματος είναι η βάση της έρευνας και ανάλυσης των ατυχημάτων για τον καθορισμό των παραγόντων και αιτίων που οδήγησαν στο συμβάν. Από τις τεχνικές που περιγράφησαν στην ενότητα 3, είναι σαφές ότι τα συστήματα που έχουν την δυνατότητα συλλογής χωρικής (φωτογραμμετρία, επίγεια σάρωση) έναντι διακριτής πληροφορίας (μετροταινία, γεωδαιτικός σταθμός, GPS) υπερτερούν σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γίνεται πλήρης και ακριβής καταγραφή του σκηνικού ενός ατυχήματος διότι δεν υπάρχει η δυνατότητα επαναληπτικής μέτρησης όταν από το πεδίο απομακρυνθούν τα εμπλεκόμενα οχήματα και το σκηνικό καθαριστεί.

Η συμβατική μέθοδος χρήσης της μετροταινίας είναι αφενός πολύ απλή και γρήγορη στην εφαρμογή της χωρίς να απαιτεί ειδική εκπαίδευση, όμως ενέχει τον κίνδυνο παράληψης ουσιαστών μετρήσεων λόγω της μονοδιάστατης φύσης των παρατηρήσεων που παρέχει . Η αποτύπωση με μετροταινία δίνει άμεσα αποτελέσματα όμως το σκαρίφημα του σκηνικού του ατυχήματος που προκύπτει δεν έχει συχνά γεωμετρική ακρίβεια, ομοιόμορφη κλίμακα, σωστό προσανατολισμό και προσδιορισμό της τρίτης διάστασης. Επίσης, όσο πιο περίπλοκο είναι το σκηνικό ενός ατυχήματος τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να προκληθούν στις μετρήσεις λάθη ή παραλήψεις. Η χρήση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού έχει πλέον καταξιωθεί ως μέθοδος αποτύπωσης ατυχημάτων όμως το βασικό μειονέκτημα χρήσης του ανάγεται στα κριτήρια επιλογής των σημείων αποτύπωσης της σκηνής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται συχνά σχέδια αποτύπωσης με επιβαλλόμενη γεωμετρία των μη μετρημένων συμμετριών (π χ. μέτρηση μόνο της μίας πλευράς του οχήματος θεωρώντας συμμετρική την άλλη) λόγω του μεγάλου αριθμού των σημείων που απαιτούνται για την πλήρη αποτύπωση και της χρονοβόρας διαδικασίας συλλογής των μετρήσεων.

Τέλος, η χρήση συστημάτων GPS δεν είναι ευρεία για την αποτύπωση ατυχημάτων παρόλο που αποτελεί πλέον βασικό εργαλείο πλοήγησης και εντοπισμού οχημάτων. Το σύστημα κυρίως εξυπηρετεί αποτυπώσεις σε περιπτώσεις που οι συνθήκες εμποδίζουν τη χρήση του ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού (π.χ. σε ομίχλη, βροχή, νύχτα).

Από τα συστήματα συλλογής χωρικής πληροφορίας η φωτογραμμετρία είναι η πλέον καταξιωμένη τεχνική για εργασίες αποτύπωσης ατυχημάτων γεγονός που διαφαίνεται με την απαρίθμηση βασικών πλεονεκτημάτων της: 1) διευκολύνει την καταγραφή όλης της σκηνής του ατυχήματος με διαδοχικές στάσεις της στερεομετρικής κάμερας παρέχοντας πληρότητα πληροφορίας, 2) δεν είναι απαραίτητο στο προσωπικό της αστυνομίας να εισέλθει στη σκηνή του ατυχήματος, 3) η ακρίβεια της μεθόδου είναι καλύτερη από 1cm για αποστάσεις φωτοληψίας έως 30m, 4) διαχρονικότητα και τεκμηρίωση πληροφοριών, 5) αν το φωτογραμμετρικό όργανο έχει την δυνατότητα σύνδεσης με κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα, τότε είναι εύκολη η ταυτόχρονη απόδοση του σχεδίου σε περισσότερες από μια όψεις. Εντούτοις, υπάρχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα για την χρήση της σε τέτοιου είδους εφαρμογές που είναι: 1) η δύσκολη εφαρμοσιότητά της κατά τη διάρκεια της νύχτας και ειδικά για την αποτύπωση στοιχείων όπως ίχνη πέδησης (απαιτείται χρήση ισχυρών προβολέων), 2) το κόστος αγοράς του απαραίτητου εξοπλισμού και τη δημιουργία μιας κινητής μονάδας έναντι της μετροταινίας, 3) η βασική εκπαίδευση και οι λίγες εξειδικευμένες γνώσεις που πρέπει να έχουν τα μέλη του συνεργείου γύρω από τη φωτογραμμετρία για το χειρισμό της στερεοκάμερας και του οργάνου ώστε να πιστοποιηθεί το αξιόπιστό τους και 4) η αναγκαιότητα χρήσης της όταν οι μετρήσεις με μετροταινία μπορεί να αρκούν για την απλή αποτύπωση και επομένως η εφαρμοσιότητά της δεν είναι εμφανής.

Παρόλο που η αρχή της φωτογραμμετρίας δεν απαιτεί φυσική επαφή με το αντικείμενο προς αποτύπωση (δηλ. τοποθέτηση ανακλαστήρων σε διάφορα σημεία όπως απαιτείται στις συμβατικές τοπογραφικές τεχνικές) οι επιφάνειες με ασαφή προσδιορισμό ή μειωμένη υφή είναι δυνατό να δώσουν αναξιόπιστα αποτελέσματα ή να μην μπορούν να δώσουν καθόλου πληροφορία (π.χ. δέντροφυτεμένα πρηνή) από την διαδικασία της επεξεργασίας των εικόνων. Επίσης, ενώ η τεχνολογία της φωτογραμμετρίας μπορεί να δώσει τρισδιάστατες συντεταγμένες, αυτές υπολογίζονται έμμεσα αντί να μετρώνται απευθείας, με αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση λόγω της επεξεργασίας της εικόνας.

Η τεχνολογία της επίγειας σάρωσης laser είναι ιδιαίτερα σύγχρονη, και παρόλο που διεθνώς δεν εφαρμόζεται ακόμα επιχειρησιακά σε αποτυπώσεις τροχαίων ατυχημάτων, έχει παρουσιάσει αρκετά πλεονεκτήματα που είναι: 1) αυτόματος και άμεσος προσδιορισμός στο πεδίο τρισδιάστατης θέσης σημείων του χώρου, 2) η διεξαγωγή μετρήσεων κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της σάρωσης, 3) η συλλογή των δεδομένων γίνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα και συνεπώς διευκολύνει την γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφοριακής ροής, 4) αποτύπωση αντικειμένων σε κλίμακα 1:1, 5) δυνατότητα διαχείρισης τεράστιου όγκου δεδομένων, 6) δυνατότητα εξόδου αρχείων σε πολλά format ώστε να εισάγονται χωρίς πρόβλημα σε περιβάλλον CAD, 7) μέσω της δημιουργίας του ψηφιακού

μοντέλου του δρόμου είναι δυνατόν να εντοπιστούν ανωμαλίες στο οδόστρωμα (π.χ. λακκούβες ή υπερυψώματα) που πιθανόν να συνετέλεσαν στην δημιουργία του ατυχήματος, 8) τα κυκλοφοριακά σήματα είναι ευδιάκριτα μέχρι τα 60m ενώ οι διαγραμμίσεις ενός κόμβου γύρω στα 30m, 9) μπορεί να γίνει αποτύπωση ιχνών ελαστικών αρκεί ο σαρωτής να στηθεί σε απόσταση της τάξης των 10m και να γίνει η σάρωσή τους με μεγάλη ανάλυση της τάξεως κάποιων mm και 10) ο χρόνος διεξαγωγής των μετρήσεων στο πεδίο μειώνεται ενώ αυξάνεται ο χρόνος επεξεργασίας τους στο γραφείο. Κάποια από τα μειονεκτήματα της μεθόδου που καθιστούν δύσκολη την εφαρμοσιμότητά της είναι: 1) υψηλό κόστος αγοράς συστήματος σάρωσης και λογισμικού, 2) απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων, 3) σε περίπτωση έντονης βροχόπτωσης δεν είναι δυνατή η χρήση του σαρωτή για την αποτύπωση μιας περιοχής, 4) δεν είναι δυνατή η αποτύπωση σημείων που βρίσκονται στη σκιά κάποιου αντικειμένου. Ο Πίνακας 1 που ακολουθεί συνοψίζει τις βασικές διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών χωρικής συλλογής δεδομένων, δηλαδή της φωτογραμμετρίας και της επίγειας σάρωσης laser και όπως φαίνεται παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες.

ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ	ΣΑΡΩΣΗ ΜΕ LASER
Παθητική μέθοδος	Ενεργητική μέθοδος
Χρήση πολλών σημείων σύνδεσης (ομόλογα σημεία και φωτοσταθερά)	Χρήση τουλάχιστον τριών στόχων στο κοινό τμήμα γειτονικών σαρώσεων για τη σύνδεση
Απαιτείται προσανατολισμός στερεομοντέλων	Γίνεται ταυτόχρονα με τη σύνδεση σαρώσεων όταν οι στόχοι έχουν γεωαναφορά
Έμμεση απόκτηση 3D πληροφορίας	Άμεση απόκτηση 3D πληροφορίας
Εικόνες υψηλής ανάλυσης	Εικόνες χαμηλής ανάλυσης
Ακρίβεια: < cm	Ακρίβεια: λίγα cm
Κατάλληλη μέθοδος για μη σύνθετης γεωμετρίας επιφάνειες	Κατάλληλη μέθοδος για πολύπλοκης γεωμετρίας επιφάνειες
Παρέχει γεωμετρική και χρωματική πληροφορία	Παρέχει χρωματική πληροφορία (RGB) και πληροφορία για γεωμετρία, ανακλαστικότητα και υφή επιφανειών
Η ποιότητα του αποτελέσματος εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού του αντικειμένου	Η ποιότητα του αποτελέσματος δεν εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού του αντικειμένου
Αποτύπωση εικόνας αντικειμένου υπό κλίμακα	Αποτύπωση εικόνας αντικειμένου σε κλίμακα 1:1
Απαιτεί εμπειρία και γνώστικό υψόμετρο	Γρηγορότερη εκμάθηση
Απαιτεί πολύ χρόνο επεξεργασίας	Λιγότερος χρόνος επεξεργασίας
Όχι υψηλός βαθμός αυτοματοποίησης	Υψηλός βαθμός αυτοματοποίησης
Τυποποιημένη βαθμονόμηση	Μη αυτοματοποιημένη βαθμονόμηση
Περιορισμένη εφαρμοσιμότητα την νύχτα (μόνο με ισχυρούς προβολείς)	Εφαρμόζεται μέρα – νύχτα χωρίς πρόβλημα
Εφαρμόζεται ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών (όχι σε ομίχλη)	Δεν εφαρμόζεται σε περίπτωση ομίχλης ή βροχόπτωσης

Πίνακας 9.1 Σύγκριση μεθόδων χωρικής συλλογής δεδομένων (φωτογραμμετρία-επίγεια σάρωση)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fricke, L.B., "Traffic Accident Reconstruction," *Traffic Accident Investigation Manual*, vol.2, Northwestern University Traffic Institute, Evanston, IL, 1990.
2. Taylor, J.R., *An Introduction to Error Analysis*, University Science Books, Mill Valley, CA, 1982.
3. Beers, Y., *Introduction to the Theory of Error*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1957.
4. Gim, G., and RE. Nikravesh, "An Analytical Model of Pneumatic Tyres for Vehicle Dynamic Simulations. Part 1: Pure Slips," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 11, no. 6, Inderscience, Geneva, Switzerland, 1990.
5. *Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods*, Raymond M. Brach and R. Matthew Brach, SAE International, Warrendale, PA, 2nd Edition, 2011.
6. Warner, C Y, G.C. Smith, M.B. James, and G.J. Germane, "Friction Applications in Accident Reconstruction," Paper 830612, SAE International, Warrendale, PA, 1983.
7. Brach, R. Matthew, and Raymond M. Brach, "Modeling Combined Braking and Steering Forces," Paper 2000-01-0357, SAE International, Warrendale, PA, 2000.
8. Gillespie, T., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE International, Warrendale, PA, 1992.
9. Wong, J.Y., *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley, New York, NY, 2001.
10. Semon, M., "Determination of Speed from Yaw Marks," Chapter 4 in *Forensic Accident Investigation: Motor Vehicles*, Bohan and Damask [ed.], Michie Butterworth, Charlottesville, VA, 1995.
11. Lambourn, R.F., "The Calculation of Motor Car Speeds from Curved Tire Marks," *Journal of the Forensic Science Society* (U.K.), 29, 1989, pp. 371-386.
12. Larson, R.E., J.W. Smith, S.M. Werner, and G.F. Fowler, "Vehicle Rollover Testing in Recreating Rollover Collisions," Paper 2000-01-1641, SAE International, Warrendale, PA, 2000.
13. Jones, I.S., and L.A. Wilson, "Techniques for the Reconstruction of Rollover Accidents Involving Sport Utility Vehicles, Light Trucks and Minivans," Paper 2000-01-0851, SAE International, Warrendale, PA, 2000.

14. Meyer, S.E., M. Davis, S. Forrest, D.Chng, and B. Herbst, "Accident Reconstruction of Rollovers—A Methodology," Paper 2000-01-0853, SAE International, Warrendale, PA, 2000.
15. Brach, R.M., *Mechanical Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1991.
16. McHenry, B.G, and R.R. McHenry, "SMAC-97—Refinement of the Collision Algorithm," Paper 970947, SAE International, Warrendale, PA, 1997.
17. Brach, R.M., "Impact Analysis of Two-Vehicle Collisions," Paper 830468, SAE International, Warrendale, PA, 1987.
18. Campbell, K., "Energy as a Basis for Accident Severity," Paper 74056, SAE International, Warrendale, PA, 1974.
19. Prasad, A.K., "CRASH3 Damage Algorithm Reformulation for Front and Rear Collisions," Paper 900098, SAE International, Warrendale, PA, 1990.
20. Welsh, K.J., and D.E. Struble, "Crush Energy & Structural Characterization," Paper 1999-01-0099, SAE International, Warrendale, PA, 1999.
21. Neptune, J.A., and J.E. Flynn, "A Method for Determining Accident Specific Crush Stiffness Coefficients," Paper 940913, SAE International, Warrendale, PA, 1994.
22. Eubanks, J.J., *Pedestrian Accident Reconstruction*, Lawyers & Judges Publishing Company, Tucson, AZ, 1994.
23. Han, I., and R.M. Brach, "Throw Model for Frontal Pedestrian Collisions," Paper 2001-01-0898, SAE International, Warrendale, PA, 2001.
24. Wood, D., and C.K. Simms, "A Hybrid Model for Pedestrian Impact and Projection," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 5, no. 4, Woodhead Publishing, Ltd., Cambridge, U.K., 2000, pp. 393-403.