

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

FACULTY OF RURAL & SURVEYING ENGINEERING

LABORATORY OF TRANSPORTATION ENGINEERING



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΣΙΓΜΟΕΙΔΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ
ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ευανθία Α. ΚΑΖΑΓΛΗ, Φοιτήτρια Σ.Α.Τ.Μ.
Αριθμός Μητρώου: 06103006

Επιβλέπων:
Βασίλειος ΨΑΡΙΑΝΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ASSESSMENT OF CURRENT DESIGN STANDARDS
OF REVERSE HORIZONTAL CURVES
TO ACCOMMODATE HEAVY VEHICLE MOVEMENTS
BASED ON SIMULATION

Evanthia A. KAZAGLI

Supervisor:
Basil PSARIANOS, Professor (NTUA)

ΤΕΥΧΟΣ Α

ΑΘΗΝΑ 2009



ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΣΙΓΜΟΕΙΔΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ
ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ευανθία Α. ΚΑΖΑΓΛΗ, Φοιτήτρια Σ.Α.Τ.Μ.
Αριθμός Μητρώου: 06103006

Επιβλέπων:
Βασίλειος ΨΑΡΙΑΝΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ASSESSMENT OF CURRENT DESIGN STANDARDS
OF REVERSE HORIZONTAL CURVES
TO ACCOMMODATE HEAVY VEHICLE MOVEMENTS
BASED ON SIMULATION

Evanthia A. KAZAGLI

Supervisor:
Basil PSARIANOS, Professor (NTUA)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Β. Ψαριανός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Αντωνίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Βλαστός
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2009

Copyright © Ευανθία Α. Κάζαγλη, Οκτώβριος 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία αυτή παρουσιάστηκε στο
“*Road Safety & Simulation*”, διεθνές συνέδριο
που διεξήχθη στο Παρίσι (5 – 8 Οκτώβρη 2009).

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία μου ανατέθηκε από τον κ. Βασίλειο Ψαριανό, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Συγκοινωνιακής Τεχνικής της Σ.Α.Τ.Μ.. Θα ήθελα λοιπόν να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για το ενδιαφέρον που μου ενέπνευσε για το αντικείμενο της έρευνας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω:

Τον κ. Κωνσταντίνο Σπέντζα, καθηγητή του Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Οχημάτων της Σ.Μ.Μ., για τη μεγάλη προθυμία, το ενδιαφέρον που έδειξε και την πολύτιμη βοήθειά του, καθώς και τους ερευνητικούς συνεργάτες του εργαστηρίου κ. Βασίλειο Ντερτιμάνη, για τις παρεμβάσεις και την υποστήριξή του και κ. Δημήτριο Κουλοχέρη για τη συμβολή του. Τον κ. Αντώνη Καστή, Συγκοινωνιολόγο Μηχανικό για την κατανόηση και την υποστήριξη κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου, την υπομονή αλλά και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Τον κ. Στέργιο Μαυρομάτη, Συγκοινωνιολόγο Μηχανικό και Διδάκτωρ της Σ.Α.Τ.Μ., για τις παρεμβάσεις του και το υλικό που μου παρείχε. Τον κύριο Daniele Bosticco, Υπεύθυνο Τεχνικής Υποστήριξης του λογισμικού TruckSim για τη βοήθειά του στα τεχνικά προβλήματα που προέκυψαν. Τον κύριο Mohamadreza Banihashemi, Υπεύθυνο Τεχνικής Υποστήριξης του λογισμικού IHSDM, επίσης για τη βοήθειά του σε τεχνικά θέματα. Τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους σε ότι έχω κάνει μέχρι τώρα.

Πρόλογος

Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια προσπάθεια προσδιορισμού κρίσιμων συνδυασμών των παραμέτρων σχεδιασμού των οριζοντίων καμπυλών, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των βαρέων οχημάτων αλλά και την επιρροή της κατά μήκους κλίσεως. Τα δυο αυτά στοιχεία συνιστούν σημαντικούς παράγοντες στην οδοποιία και θέτουν επιπρόσθετους περιορισμούς στον καθορισμό των ελαχίστων τιμών των παραμέτρων των οριζοντίων καμπυλών.

Ένα σύστημα προσομοίωσης “οδός – όχημα” δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού TruckSim, με σκοπό την αναπαράσταση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς διαφόρων τύπων βαρέων οχημάτων κατά την κίνησή τους στις τρισδιάστατες χαράξεις που εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Το σύστημα αυτό, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του, επανεξετάστηκαν και επαναξιολογήθηκαν με τη βοήθεια ενός ακόμη λογισμικού προσομοίωσης, του IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model). Το IHSDM διαθέτει ένα μοντέλο “οδηγού – οχήματος” (Driver Vehicle Module - DVM) που εκτιμά τη συμπεριφορά ενός οδηγού σε συγκεκριμένες συνθήκες γεωμετρικού σχεδιασμού μιας οδού και εντοπίζει την ύπαρξη στοιχείων σε αυτό το σχεδιασμό, τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια ελέγχου του οχήματος.

Η μελέτη αυτή συντελεί στην ανάδειξη της αναγκαιότητας για ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών των βαρέων οχημάτων στις μεθόδους, τα κριτήρια και τα μοντέλα προσδιορισμού των παραμέτρων σχεδιασμού των οριζοντίων καμπυλών, ενώ ταυτόχρονα συμβάλει στην προσπάθεια συγκαταριθμησης του αστάθμητου παράγοντα του χρήστη - οδηγού στη διερεύνηση της ασφάλειας κίνησης επί μιας οδού. Επιπρόσθετα δίνει την ώθηση για την επανεξέταση και επικύρωση των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού που υιοθετούν οι διάφοροι κανονισμοί χαράξεων. Παρ’ όλα αυτά, λόγω έλλειψης συσχετισμού των αποτελεσμάτων με στοιχεία ατυχημάτων, αλλά και του περιορισμένου αριθμού χαράξεων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, δεν μπορεί να προβεί σε αυστηρές υποδείξεις στους υπάρχοντες κανονισμούς.

*Ευανθία Κάζαγλη
Αθήνα, Ιούλιος 2009*

Πρέπει να θυμόμαστε κι εκείνον
που ξεχνάει προς τα πού πάει ο δρόμος.

Ηράκλειτος (540 π.Χ. – 475 π.Χ.)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
Θεωρητικό Πλαίσιο	8
Δυναμική Οχήματος και Προσομοίωση	9
Στόχος και Πεδίο Εφαρμογής της Έρευνας	10
Διάρθρωση της Εργασίας	11
1. ΒΑΡΕΑ ΟΧΗΜΑΤΑ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΩΝ & ΟΔΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ 12	
1.1. Γενικά	12
1.2. Οδικά Ατυχήματα & Βαρέα Οχήματα	12
1.3. Οδικά Ατυχήματα & Γεωμετρικός Σχεδιασμός	14
1.3.1. Οριζόντιες καμπύλες.....	14
1.3.2. Κατά μήκος κλίσεις.....	14
1.4. Σύνοψη	15
2. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ TRUCKSIM	17
2.1. Συστήματα Αναφοράς	17
2.1.1. Συστήματα αξόνων και συντεταγμένων.....	17
2.1.2. Σημεία αναφοράς	18
2.2. Μαθηματικά Μοντέλα Προσομοίωσης	18
2.2.1. Τρισδιάστατο δυναμικό μοντέλο κίνησης - Δυναμικό μοντέλο φορτηγού.....	19
2.2.2. Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο οδού – Περιβάλλον προσομοίωσης.....	19
2.2.3. Μοντέλα Ελαστικών	22
2.2.4. Αεροδύναμη	26
2.2.5. Χειρισμοί – Μοντέλο Οδηγού.....	27
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	29
3.1. Βαρέα Οχήματα	29
3.1.1. Κίνηση βαρέων οχημάτων σε ανωφέρειες.....	29
3.1.2. Συνθήκες φόρτωσης.....	30
3.1.3. Περιορισμοί.....	30
3.1.4. Διαξονικό φορτηγό – Single unit with 2 axles.....	31
3.1.5. Τριαξονικό λεωφορείο – Tour bus with 3 axles.....	31
3.2. Σιγμοειδείς Καμπύλες	32
3.2.1. Σιγμοειδείς καμπύλες χωρίς παρεμβολή ευθύγραμμου τμήματος και σταθερή κλίση στη μηκοτομή.....	33
3.2.2. Στοιχεία σχεδιασμού	34
3.3. Ιδιότητες Οδοστρώματος	35
3.4. Χειρισμοί και Μοντέλο Οδηγού	36

3.5.	Γενική Επισκόπηση Πειραμάτων	36
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	37
4.1.	Σκοπός	37
4.2.	Γενικά	37
4.2.1.	Κίνηση οχήματος σε καμπύλη τροχιά	37
4.2.2.	Πρόσφυση	38
4.2.3.	Ολίσθηση	39
4.2.4.	Ανατροπή	39
4.3.	Εξαγόμενα TruckSim	40
4.3.1.	Μεταβλητές οχήματος	40
4.3.2.	Μεταβλητές ελαστικών	40
4.4.	Τεχνικές Διερεύνησης της Ολίσθησης σε κάθε Τροχό	41
4.4.1.	Η σχέση του Krempel	41
4.4.2.	Ο κύκλος της πρόσφυσης ελαστικού	42
4.5.	Τεχνικές Διερεύνησης της Ασφάλειας Κίνησης του Οχήματος	43
4.5.1.	Υπερστροφή – Υποστροφή οχήματος	43
5.	ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	44
5.1.	Εισαγωγικά	45
5.2.	Ασφάλεια Κίνησης Διαξονικού Φορτηγού	46
5.2.1.	Χάραξη 1	46
5.2.2.	Χάραξη 2	50
5.2.3.	Χάραξη 3	51
5.2.4.	Χάραξη 4	52
5.3.	Ασφάλεια Κίνησης Τριαξονικού Λεωφορείου	53
5.3.1.	Χάραξη 1	53
5.3.2.	Χαράξεις 2 έως 4	55
5.4.	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	56
5.5.	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	58
6.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΛΟΣ – ΟΧΗΜΑ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ IHSDM	60
6.1.	Σύντομη Επισκόπηση του Προγράμματος	60
6.2.	Επισκόπηση της Εφαρμογής DVM – Δυνατότητες & Προοριζόμενες Χρήσεις .	61
6.3.	Συστατικά Στοιχεία Μοντέλου DVM	62
6.3.1.	Απαιτούμενα δεδομένα εισόδου	62
6.3.2.	Συνιστώντα μέρη του μοντέλου DVM – Τρόπος λειτουργίας	63
6.3.3.	Υπολογισμοί	65
6.4.	Αποτελέσματα	66
6.4.1.	Εισαγωγικά	66
6.4.2.	Ντετερμινιστική προσέγγιση	68
6.4.3.	Στοχαστική προσέγγιση	72

6.5. Γενικά Συμπεράσματα	73
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	74
ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ.....	78
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80
ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2. 1: Συστήματα αξόνων αναφορικά με το όχημα (TruckSim User Manual)	17
Σχήμα 2. 2: Συστήματα αξόνων τροχών και ελαστικών (TruckSim User Manual)	18
Σχήμα 2. 3: Γεωμετρία υπολογισμού μηκών (TruckSim User Manual)	20
Σχήμα 2. 4: Σημεία και άξονες ελαστικών – Εφαρμογή δυνάμεων στα ελαστικά (TruckSim User Manual).....	22
Σχήμα 3. 1: Σιγμοειδείς καμπύλη χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα.....	33
Σχήμα 3. 2: Διάγραμμα αναπαράστασης πειραμάτων.....	36
Σχήμα 4. 1: Παραμόρφωση κυλιόμενου τροχού υπό την επίδραση πλευρικής δύναμης (Gillespie 1992).....	38
Σχήμα 4. 2: Ιδιότητες πλευρικής δύναμης ελαστικού (Gillespie 1992).....	38
Σχήμα 4. 3: Διακύμανση συντελεστών επιρόχιας και εγκάρσιας πρόσφυσης συναρτήσει της διολίσθησης (Harwood 2003).....	41
Σχήμα 4. 4: Ο κύκλος της πρόσφυσης ενός ελαστικού.....	42
Σχήμα 5. 1: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και επίπεδο έδαφος.....	47
Σχήμα 5. 2: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 4%	49
Σχήμα 5. 3: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%	54
Σχήμα 5. 4: Χάραξη 1 - Διάγραμμα τροχιάς αξόνων τριαξονικού λεωφορείου για ταχύτητα κίνησης 80 km/ h σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%	54
Σχήμα 5. 5: Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης τριαξονικού λεωφορείου για τις Χαραξείς 1 – 4 ($V_e = 60 - 90$ km/ h) και ταχύτητα κίνησης 70 km/ h σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%	55
Σχήμα 5. 6: Χάραξη 4 – Διάγραμμα ταχύτητας διαξονικού φορτηγού για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων σε ευμενές οδόστρωμα	57
Σχήμα 5. 7: Χάραξη 4 – Διάγραμμα ταχύτητας διαξονικού φορτηγού για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων σε δυσμενές οδόστρωμα.....	57
Σχήμα 5. 8: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το διαξονικό φορτηγό (ευμενές οδόστρωμα).....	58
Σχήμα 5. 9: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το διαξονικό φορτηγό (δυσμενές οδόστρωμα)	58
Σχήμα 5. 10: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το τριαξονικό λεωφορείο (ευμενές οδόστρωμα)	59
Σχήμα 5. 11: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το τριαξονικό λεωφορείο (δυσμενές οδόστρωμα).....	59
Σχήμα 6. 1: Διάγραμμα ροής πληροφοριών στο DVM.....	64
Σχήμα 6. 2: ΧΑΡΑΞΗ 2: Αντιπαράθεση πλευρικής επιτάχυνσης για τα δύο λογισμικά.....	71
Σχήμα 6. 3: ΧΑΡΑΞΗ 2 – Ταχύτητα αναρρίχησης για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων	71

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3. 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά διαξονικού φορτηγού	31
Πίνακας 3. 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά τριαξονικού λεωφορείου	32
Πίνακας 3. 3: Οριζοντιογραφικά στοιχεία σχεδιασμού σιγμοειδών καμπυλών για οδούς της ομάδας Α (Ορεινά εδάφη).....	34
Πίνακας 3. 4: Μέγιστες κατά μήκος κλίσεις για οδούς της ομάδας Α (Ορεινά εδάφη).....	34
Πίνακας 3. 5: Συντελεστές τριβής (Peak friction values - AASHTO Green Book).....	35
Πίνακας 5. 1: Αντιστοίχιση σιγμοειδών καμπυλών σε χαράξεις	44
Πίνακας 5. 2: Λειτουργικές ταχύτητες χαράξεων για επιβατηγό όχημα.....	46
Πίνακας 6. 1: Ορισμός ταχυτήτων	67
Πίνακας 6. 2: Κύρια στοιχεία σχεδιασμού χαράξεων	68
Πίνακας 6. 3: Ασφαλής ταχύτητα τριαξονικού λεωφορείου ως προς την πλαγιολίσθηση βάση των αποτελεσμάτων του TruckSim - ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα.....	70
Πίνακας 6. 4: Αποτελέσματα περιοχής εξόδου από την πρώτη καμπύλη στη Χάραξη 2 για κατά μήκος κλίση 0%.....	70
Πίνακας Ι: Ταχύτητα Ασφαλείας (km/ h) - ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα - Συντηρητική Προσέγγιση - TruckSim.....	74
Πίνακας ΙΙ: Ταχύτητα Ασφαλείας (km/ h) - ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα - Επικεικής Προσέγγιση - TruckSim	74

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3. 1: Διαξονικό φορτηγό από τις βιβλιοθήκες του TruckSim (TruckSim User Manual).....	31
Εικόνα 3. 2: Τριαξονικό λεωφορείο από τις βιβλιοθήκες του TruckSim (TruckSim User Manual) ...	32
Εικόνα 5. 1: Ενδεικτική απεικόνιση σιγμοειδούς καμπύλης από το TruckSim	44
Εικόνα 6. 1: Διαστάσεις ημι-ρυμουλκούμενου φορτηγού WB-15 (18 τροχών) βάση AASHTO Green Book.....	66

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε ένα αποδοτικό συγκοινωνιακό σύστημα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού όσο και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος, καθώς και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Για ένα ασφαλές οδικό δίκτυο είναι επίσης σημαντικό να εξασφαλισθεί ότι στα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο τα επιβατηγά αλλά και τα βαρέα οχήματα.

Παρ' όλα αυτά, στους περισσότερους κανονισμούς χαράξεως οδών, ως όχημα σχεδιασμού χρησιμοποιείται το επιβατηγό, ενώ αντίθετα τα λειτουργικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των βαρέων οχημάτων δεν εμπεριέχονται στις προδιαγραφές ή δεν επιλαμβάνονται με συνέπεια. Επιπρόσθετα, κρίσιμα γεωμετρικά μεγέθη όπως οι ακτίνες οριζόντιων καμπυλών, προσδιορίζονται ανεξαρτήτως της μηκοτομής της οδού, των δυναμικών χαρακτηριστικών των οχημάτων και της πραγματικής απαίτησης του οχήματος σε εγκάρσια πρόσφυση.

Καθώς δεν υπάρχει πρότερη ανάλυση που να λαμβάνει υπόψη ειδικούς τύπους οχημάτων όπως είναι τα φορτηγά, αλλά ούτε την επιρροή της κατά μήκος κλίσεως στον προσδιορισμό των παραμέτρων των οριζόντιων καμπυλών, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει κατά πόσο κάποια χαρακτηριστικά βαρέα οχήματα μπορούν να κινηθούν με ασφάλεια σε κρίσιμα καμπύλα οδικά τμήματα για το επιτρεπόμενο εύρος κατά μήκος κλίσεων.

Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε υπεραστικές οδούς δυο λωρίδων με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, οι οποίες παρουσιάζουν και τα μεγαλύτερα ποσοστά ατυχημάτων. Ως πιο κρίσιμες επιλέχθηκαν οι σιγμοειδείς καμπύλες χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα, σχεδιασμένες με τις ελάχιστες τιμές γεωμετρικών μεγεθών βάση των κανονισμών και σταθερή κλίση στη μηκοτομή (από μηδενική μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη).

Η προσομοίωση του οχήματος, το οποίο οι υπάρχοντες κανονισμοί θεωρούν υλικό σημείο αγνοώντας σημαντικούς παράγοντες όπως τον τύπο, τη μάζα και το κέντρο βάρους του, δίνει τη δυνατότητα επίλυσης του παραπάνω προβλήματος εξετάζοντας συνολικά την κίνηση των φορτηγών στην επιτόρεια και στην εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση. Έτσι, σημαντικό εργαλείο αποτέλεσε η χρήση ενός λογισμικού προσομοίωσης. Μέσω του συστήματος προσομοίωσης “οδός – όχημα” που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του TruckSim κατέστη δυνατό να απεικονιστεί η δυναμική συμπεριφορά των φορτηγών οχημάτων συναρτήσει των εισαγόμενων δεδομένων που ορίζουν το άμεσο περιβάλλον στο οποίο κινούνται, ενώ παράχθηκαν τα ίδια εξαγόμενα με αυτά που θα μπορούσαν να μετρηθούν σε πειραματικά εργαστήρια χρησιμοποιώντας αντίστοιχα φορτηγά.

Δυσκολία εντοπίστηκε στην εξεύρεση δεδομένων σχετικά με εξειδικευμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των φορτηγών. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι κοινοί τύποι φορτηγών από τις βιβλιοθήκες του προγράμματος οι οποίοι είναι αντιπροσωπευτικοί του στόλου των βαρέων οχημάτων παγκοσμίως.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ελάχιστες τιμές ακτινών οριζόντιων καμπυλών, που εφαρμόζουν οι διάφοροι κανονισμοί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλο το φάσμα των επιτρεπόμενων κατά μήκος κλίσεων, και ότι ο πίνακας ελαχίστων ακτινών θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει έναν περιορισμό για την κατά μήκος κλίση. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να εφαρμόζονται μεγαλύτερες οριζόντιες ακτίνες ή να θεσπίζονται ειδικά όρια ταχύτητας για συγκεκριμένους τύπους φορτηγών.

Όπως καταδεικνύουν και τα αποτελέσματα της έρευνας, τα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι τα βαρέα οχήματα μπορούν να κινηθούν με ασφάλεια στους υπό σχεδίαση δρόμους. Η επικύρωση των ελαχίστων τιμών που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό οριζόντιων καμπυλών και η ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων και μοντέλων για τον προσδιορισμό τους, τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά των βαρέων οχημάτων, κρίνεται επιβεβλημένη και μπορεί να αποτελέσει

σημαντικό εργαλείο για τους οδοποιούς και να τους καθοδηγήσει στο πως θα “φιλοξενήσουν” ασφαλέστερα το μεγάλο ποσοστό των βαρέων οχημάτων στις υπεραστικές οδούς. Η προσομοίωση αποδείχθηκε αναντικατάστατο εργαλείο και μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην επίτευξη αυτού του στόχου. Το ντετερμινιστικό μοντέλο που δεν λαμβάνει υπόψη τον καθοριστικό παράγοντα της συμπεριφοράς του οδηγού μπορεί επίσης να βελτιωθεί μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης, γεγονός που πιθανότατα θα οδηγήσει σε επιπρόσθετους περιορισμούς. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας θα υποστηρίξουν αυτή την προσπάθεια.

Λέξεις κλειδιά: Βαρέα οχήματα, Δυναμικά χαρακτηριστικά οχημάτων, Ελαστικά και τριβή, Παράμετροι σχεδιασμού, Προσομοίωση, Σιγμοειδείς χαράξεις.

ABSTRACT

For an efficient transportation system both road geometric characteristics and vehicle dynamics must be considered, as well as their interaction. It is also vital to be ensured, that not only passenger cars but trucks as well, are taken into account in geometric design criteria for safer road systems.

However, current geometric design policies use passenger cars as design vehicles, while truck operational and dynamic characteristics are not included or not addressed consistently. Furthermore, critical geometric design parameters such as horizontal curves radii are determined without consideration of the effect of the vertical alignment, the vehicle dynamics and the actual demand of the vehicle for side adhesion.

As no previous analysis has been made considering the motion of heavy vehicles or the effect of grade in the assessment of the design parameters of horizontal curves, the objective of this work is to investigate whether critical curved road sections with constant grades varying from zero percent to the maximum allowed in accordance to the design criteria, can accommodate typical heavy vehicles with safety.

The analysis was focused on rural and suburban two-lane roads with undivided pavement that produce the largest accident rates. Reverse horizontal curves without an interpolated straight section between the adjacent spiral curves, designed with the geometric minima in accordance to the design criteria, were selected as the most crucial alignments.

The simulation of the vehicle that current roadway design considers as a point mass, ignoring significant factors such as its type, mass and centre of gravity, gives the opportunity to address this problem by examining the heavy vehicle dynamics based on simulation. By means of “road - vehicle” simulation system developed in TruckSim, the vehicle dynamic response to inputs from the immediate environment is analyzed, while same kind of outputs that might be measured with physical tests involving instrumented vehicles are calculated and plotted for further analysis.

Difficulty of finding data regarding the typical technical truck characteristics was encountered during the process. Thereby, typical example trucks from the TruckSim database that cover most of the vehicles found around the world were used to address that problem.

Results indicate that horizontal curves minimum radii that are implemented according to several design criteria, can not be used in conjunction with the allowed interval of grades, and that the table of minimum radii must comprehend a limitation for the applicable grade. Otherwise, exclusively speed limits depending on the road geometry or larger radii must be used in order to adequately accommodate heavy vehicles.

It is clear that road design criteria must ensure the secure negotiation of trucks along the roadway. As the TRB (Transportation Research Board) research on “Horizontal Curve Design Philosophy” indicates, validation and appropriateness of current limiting values used in horizontal curve designs is necessary, and development of alternative horizontal design formulae, models or criteria based upon the resulting validation and safety findings, is also a matter of great importance. The concurrent consideration of heavy vehicles motion can provide roadway geometric designers great guidance on how to best accommodate large trucks on the highway streets. Simulation proved to be an indispensable analysis tool and can appreciably assist in this effort. The deterministic model of a “normal” driver can also be improved via simulation softwares, by a model considering the driver behavior, a factor that could almost certainly impose additional restrictions. The results of this research will support this effort.

Keywords: Design parameters, Heavy vehicles, Reverse horizontal curves, Simulation, Tires and friction, Vehicle dynamics.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Θεωρητικό Πλαίσιο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε πολλές μελέτες μέχρι σήμερα, για ένα αποδοτικό οδικό σύστημα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο οι οικονομικοί, λειτουργικοί, περιβαλλοντικοί και αισθητικοί παράγοντες, όσο και η ασφάλεια των κινούμενων οχημάτων σε αυτό. Ένα από τα φλέγοντα λοιπόν ζητήματα που απασχολούν παγκοσμίως όσους δραστηριοποιούνται στον τομέα των οδικών δικτύων - και όχι μόνο - είναι η *οδική ασφάλεια*. Βασικό δείκτη για την ασφάλεια ενός οδικού δικτύου, αποτελεί το ποσοστό των τροχαίων ατυχημάτων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.

Το οικονομικό και κοινωνικό κόστος που έχουν για μια χώρα τα τροχαία ατυχήματα έχει πυροδοτήσει πληθώρα ερευνών σχετικά με τους παράγοντες που οδηγούν σε κρίσιμες καταστάσεις, ικανές να προκαλέσουν ατυχήματα. Οι βασικοί παράγοντες, που προσδιορίζουν την ασφάλεια κίνησης επί μιας οδού, είναι η ίδια η *γεωμετρία της οδού*, το *όχημα* κίνησης σε αυτή, και ο *οδηγός – χρήστης* της οδού. Προκειμένου να ελεγχθεί με επιτυχία η ασφάλεια που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα υπό μελέτη οδικό τμήμα, αναγκαίος είναι ο προσδιορισμός των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των στοιχείων αυτών, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων και τα τρία συμβάλλουν στη συντέλεση ενός τροχαίου ατυχήματος.

Από σχετικές έρευνες έχει προκύψει ότι στο μεγαλύτερο ποσοστό ατυχημάτων, η οδηγική συμπεριφορά - σε συνδυασμό ίσως και με την ανεπάρκεια του οδοστρώματος - κρίνεται ως ο κύριος υπεύθυνος για την πρόκληση του ατυχήματος. Έτσι, συνήθως παραβλέπεται η πιθανή ανεπάρκεια της γεωμετρίας της οδού, αλλά και η επιρροή που αυτή έχει στην αντίληψη και τις αντιδράσεις του οδηγού. Παρ' όλα αυτά, τόσο η γεωμετρία της οδού, όσο και ο τύπος και τα χαρακτηριστικά του οχήματος, συνιστούν καθοριστικούς παράγοντες στην εκτίμηση του επιπέδου ασφαλείας της οδού.

Εξετάζοντας τα διάφορα χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων, οι έρευνες καταδεικνύουν ότι οδοί *δύο λωρίδων κυκλοφορίας* εμφανίζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά σε τροχαία ατυχήματα από οποιοδήποτε άλλη κατηγορία, και ότι μεγάλος είναι επίσης ο συνολικός αριθμός των θανατηφόρων ατυχημάτων που αφορούν σε αυτές τις κατηγορίες οδών. Η μη διαχωρισμένη επιφάνεια κυκλοφορίας στην παραπάνω κατηγορία οδών εμφανίζει ακόμη μεγαλύτερη επικινδυνότητα (Παράρτημα Γ).

Συνδυασμοί με υψηλές απαιτήσεις σε πρόσφυση, όπως οι σιγμοειδείς καμπύλες ή οι ράμπες εξόδου με κλειστές στροφές και υψομετρικές αλλαγές, σε συνδυασμό πολλές φορές και με την κατάσταση της επιφάνειας του οδοστρώματος, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε απώλεια ελέγχου του οχήματος και πρόκληση σοβαρών ατυχημάτων. Αξιοσημείωτο είναι ότι πλέον του 30% των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων λαμβάνουν χώρα σε καμπύλα οδικά τμήματα. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Gillespie (2002), *η εφαρμογή επιφανειών με υψηλά επίπεδα διάθεσης σε τριβή σε τέτοιες προβληματικές περιοχές, είναι δυνατό να εξασφαλίσει μείωση των ατυχημάτων μεγαλύτερη και του 50%*.

Το σημαντικό παράγοντα του τύπου και των χαρακτηριστικών των οχημάτων που εμπλέκονται στα τροχαία ατυχήματα, επισημαίνει σχετική μελέτη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που ανατέθηκε στο Ματθαίο Καρλαύτη από τον Σύνδεσμο Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων (Σ.Ε.Α.Α.). Στην παραπάνω μελέτη με τίτλο *“Στατιστική Διερεύνηση της Επιρροής Επαγγελματικών Οχημάτων στην Ασφάλεια Οδικών Δικτύων”*, υπογραμμίζεται η αυξημένη, σε σχέση με την εκπροσώπησή τους στο συνολικό στόλο οχημάτων, εμπλοκή των βαρέων οχημάτων σε ατυχήματα. Συγκεκριμένα, ατυχήματα στα οποία συμμετέχουν βαρέα φορτηγά (άνω των 3,5 τόνων), παρουσιάζουν αυξημένη σοβαρότητα, με ως και διπλάσιο αριθμό νεκρών σε σχέση με ατυχήματα που αφορούν σε

άλλες κατηγορίες οχημάτων. Στην ίδια μελέτη επισημαίνεται η αυξημένη εμπλοκή παλαιών βαρέων οχημάτων σε πολύνεκρα ατυχήματα.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι για ένα αποδοτικό και συνάμα ασφαλές οδικό δίκτυο πρέπει να συνυπολογίζονται στο σχεδιασμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, τα δυναμικά χαρακτηριστικά των οχημάτων, αλλά και η συμπεριφορά του χρήστη. Ακόμη, ζωτικής σημασίας είναι τα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού, να συμπεριλάβουν όχι μόνο τα επιβατηγά αλλά και τα βαρέα οχήματα.

Οι περισσότεροι κανονισμοί χαράξεων οδών όμως, προσομοιώνουν το *όχημα με αδιάστατο υλικό σημείο*, αγνοώντας σημαντικούς παράγοντες όπως τον τύπο, τη μάζα και το κέντρο βάρους του, ενώ ταυτόχρονα εξετάζουν την κίνηση ανεξάρτητα στην επιτόρεια και στην εγκάρσια προς την τροχιά διεύθυνση. Σε αυτό το πλαίσιο, οι δυνάμεις συνεισφοράς που ενεργούν στο όχημα απλοποιούνται και οι πραγματικές απαιτήσεις σε πρόσφυση υπόκεινται επίσης σε αυτούς τους περιορισμούς. Ως όχημα σχεδιασμού θεωρείται το επιβατηγό και έτσι η *δυναμική των βαρέων οχημάτων* αγνοείται, γεγονός που συνιστά αδυναμία στους κανονισμούς, καθώς απότομες κλίσεις επηρεάζουν πολύ περισσότερο τα βαρέα οχήματα από ότι τα ελαφρά. Επιπλέον, ο προσδιορισμός των τιμών των ακτινών των οριζοντίων καμπυλών, γίνεται ανεξαρτήτως της κατά μήκος κλίσεως της οδού, των δυναμικών χαρακτηριστικών των οχημάτων και της πραγματικής απαίτησης του οχήματος σε εγκάρσια πρόσφυση. Ένα ερώτημα που γεννιέται λοιπόν, είναι το κατά πόσο η επιρροή της μηκοτομής και της κίνησης των βαρέων οχημάτων, μπορεί να θέσει επιπλέον περιορισμούς στον προσδιορισμό των γεωμετρικών μεγεθών, και κυρίως των ελαχίστων τιμών που θεσπίζονται για αυτά τα μεγέθη στους εκάστοτε κανονισμούς.

Δυναμική Οχήματος και Προσομοίωση

Η δυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος καθορίζεται από τις δυνάμεις που ενεργούν στο όχημα από τα ελαστικά, τη βαρύτητα και τις αεροδυνάμεις (Gillespie 1992). Η γνώση και κατανόηση των δυνάμεων και των ροπών που δημιουργούνται στο όχημα μέσω των ελαστικών και της αλληλεπίδρασής τους με το έδαφος, είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της δυναμικής των οχημάτων. Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για τον προσδιορισμό των δυνάμεων και των ροπών στα ελαστικά, ήταν επακόλουθο μιας σειράς μαθηματικών περιορισμών και απλοποιήσεων του προβλήματος. Σήμερα, μέσω των τεράστιων δυνατοτήτων που παρέχει η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, επιτρέπεται ο προσδιορισμός των δυνάμεων και των ροπών μέσω της προσομοίωσης, και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οχημάτων πριν ακόμα αυτά κατασκευαστούν.

Η *προσομοίωση ενός πραγματικού προβλήματος*, μέσω ενός λογισμικού προσομοίωσης, υπερτερεί της θεωρητικής επίλυσής του ή της πειραματικής ανάλυσης σε κάποιο εργαστήριο, καθώς είναι πιο ευέλικτη και επιτρέπει την αναπαραγωγή του προβλήματος σε ίδιες ή διαφορετικές συνθήκες. Στο περιβάλλον του προγράμματος αναπαρίσταται ένα πραγματικό σύστημα το οποίο δεν υπάρχει, χωρίς να γίνονται απλουστεύσεις και μπορούν ανά πάσα στιγμή να ελεγχθούν οι πειραματικές συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος και χρήμα – έναντι της πειραματικής ανάλυσης.

Η προσομοίωση λοιπόν, δύναται πιθανώς να συντελέσει στην εκτίμηση του επιπέδου ασφαλείας μιας οδού (μέσω αξιολόγησης και ελέγχου των παραμέτρων σχεδιασμού που ορίζουν οι διάφοροι κανόνες χάραξης οδικών δικτύων), και να «απαντήσει» ίσως στους Feuchtinger και Christoffers, οι οποίοι υποστηρίζουν ότι *η εμπειρία που αποκτάται μέσω των ατυχημάτων μετά την παράδοση ενός οδικού δικτύου στην κυκλοφορία, είναι και η μόνη*

ένδειξη της ασφαλούς ή όχι συμπεριφοράς του (Driving Dynamic Investigations as Measure of Road-Traffic-Safety, 1953).

Η χρήση μεθόδων προσομοίωσης του οχήματος, δίνει τη δυνατότητα διερεύνησης της ασφάλειας κίνησης διαφόρων οχημάτων, εξετάζοντας συνολικά την κίνησή τους στην επιτόρεια και στην εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση. Αναλύοντας τη συμπεριφορά του οχήματος καθώς κινείται στην τρισδιάστατη επιφάνεια κύλισης που ορίζεται σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης, μπορεί να ελεγχθεί το πώς επηρεάζεται η συμπεριφορά του σε διάφορες οδηγικές συνθήκες από μια αλλαγή στη σχεδίασή του, και ταυτόχρονα να αναπαρασταθεί το αποτέλεσμα. Μπορεί ακόμη να διερευνηθεί το γιατί ένα όχημα κάποιες φορές αντιδρά με απρόσμενο τρόπο, το τι μπορεί να γίνει για να αλλάξει αυτό, ή ακόμα να εντοπισθούν συνθήκες που οδηγούν σε ανεπιθύμητες συμπεριφορές του οχήματος.

Λογισμικά προσομοίωσης έχουν κάνει τα πρώτα βήματα και για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του οδηγού και του τρόπου που χειρίζεται το όχημα σε διάφορες συνθήκες. Έτσι, το ντετερμινιστικό μοντέλο που δεν λαμβάνει υπόψη τον καθοριστικό παράγοντα της συμπεριφοράς του οδηγού, ή θεωρεί βέλτιστη την συμπεριφορά του, είναι πλέον δυνατό να αντικατασταθεί από ένα στοχαστικό μοντέλο, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει επιπρόσθετους περιορισμούς στον προσδιορισμό γεωμετρικών μεγεθών.

Στόχος και Πεδίο Εφαρμογής της Έρευνας

Καθώς δεν υπάρχει πρότερη ανάλυση που να λαμβάνει υπόψη *ειδικούς τύπους οχημάτων* όπως είναι τα φορτηγά, αλλά ούτε την *επιρροή της κατά μήκος κλίσεως* στον προσδιορισμό των παραμέτρων των οριζόντιων καμπυλών, στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει κατά πόσο κάποια χαρακτηριστικά βαρέα οχήματα μπορούν να κινηθούν με ασφάλεια σε κρίσιμα καμπύλα οδικά τμήματα για το επιτρεπόμενο εύρος κατά μήκος κλίσεων. Η επίτευξη του στόχου αυτού γίνεται μέσω *ελέγχου των παραμέτρων σχεδιασμού* για αυτά τα οδικά τμήματα που επιλέχθηκαν.

Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε υπεραστικές οδούς δυο λωρίδων με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, οι οποίες όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ατυχημάτων. Ως πιο κρίσιμες επιλέχθηκαν οι *σιγμοειδείς καμπύλες χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα*, σχεδιασμένες με τις *ελάχιστες τιμές γεωμετρικών μεγεθών* βάση των κανονισμών και σταθερή κλίση στη μηκοτομή (από μηδενική μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη), για ταχύτητες μελέτης 60 – 90 km/h. Οι συντελεστές τριβής οδοστρώματος προέκυψαν με βάση το AASHTO Green Book, για υγρό οδόστρωμα, ενώ εξετάστηκαν οι δυο ακραίες περιπτώσεις ευμενούς και δυσμενούς οδοστρώματος.

Δυσκολία εντοπίστηκε στην εξεύρεση δεδομένων σχετικά με εξειδικευμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των φορτηγών. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι κοινοί τύποι φορτηγών από τις βιβλιοθήκες του προγράμματος προσομοίωσης, οι οποίοι είναι αντιπροσωπευτικοί του στόλου των βαρέων οχημάτων παγκοσμίως. Ένα τυπικό διαξονικό φορτηγό και ένα τριαξονικό λεωφορείο, αφόρτωτα, εξετάστηκαν σε συνθήκες άπνοιας.

Το κύριο αντικείμενο της εργασίας, ήταν το κατά πόσο τα δύο αυτά οχήματα, μπορούσαν να διασχίσουν με ασφάλεια τις χαράξεις που επιλέχθηκαν, κινούμενα με το επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας (80 km/h) που αφορά στους συγκεκριμένους τύπους βαρέων οχημάτων (άνω των 3,5 τόνων), και αν όχι ποια ήταν η ταχύτητα ασφάλειας σε κάθε περίπτωση.

Σημαντικό εργαλείο στην προσπάθεια αυτή, αποτέλεσε η χρήση του λογισμικού προσομοίωσης *TruckSim* (Version 7), στο περιβάλλον του οποίου δημιουργήθηκε ένα σύστημα “οδός – όχημα” με βάση τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω, για την απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς των οχημάτων κατά την κίνησή τους στις τρισδιάστατες χαράξεις.

Στην προσπάθεια να συγκαταλεχθεί στο σύστημα “οδός – όχημα” και ο οδηγός, χρησιμοποιήθηκε ένα ακόμη λογισμικό προσομοίωσης, το *IHSDM* (Interactive Highway Safety Design Model), το οποίο διαθέτει ένα μοντέλο “οδηγού – οχήματος” (Driver Vehicle Module - DVM) που εκτιμά τη συμπεριφορά ενός οδηγού και τον τρόπο χειρισμού του οχήματος που αυτός επιλέγει στις εκάστοτε περιπτώσεις.

Τέλος να σημειωθεί ότι λόγω έλλειψης συσχετισμού των αποτελεσμάτων με στοιχεία ατυχημάτων, αλλά και του περιορισμένου αριθμού χαράξεων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, δεν μπορεί η μελέτη αυτή να προβεί σε αυστηρές υποδείξεις στους υπάρχοντες κανονισμούς, αλλά να επισημάνει κάποιες κρίσιμες καταστάσεις.

Διάρθρωση της Εργασίας

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα διερεύνησης ασφάλειας χαράξεων, οι οποίες εμπεριέχουν κρίσιμους συνδυασμούς παραμέτρων σχεδιασμού οριζόντιων καμπυλών, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των βαρέων οχημάτων αλλά και την επιρροή της κατά μήκος κλίσεως. Το υπόλοιπο της εργασίας απαρτίζεται από τα εξής κεφάλαια (Τεύχος Α):

Κεφάλαιο 1: Βαρέα Οχήματα, Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών και Οδική Ασφάλεια. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια γενική επισκόπηση των παραγόντων που υπεισέρχονται στην οδική ασφάλεια.

Κεφάλαιο 2: Το Λογισμικό Προσομοιώσεων TruckSim. Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος, τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιεί, οι κύριες διαδικασίες που εκτελούνται μέσω του προγράμματος, και οι παραδοχές που γίνονται κατά περίπτωση.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή των Πειραμάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των πειραμάτων που προσομοιώθηκαν. Παρουσιάζονται τα βαρέα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα, τα στοιχεία των σιγμοειδών καμπυλών που εξετάστηκαν, οι χειρισμοί που έγιναν, οι παραδοχές και οι περιορισμοί σε κάθε ένα από τα παραπάνω βήματα.

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Προσέγγισης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία προσέγγισης για τη διερεύνηση της ασφάλειας κίνησης επί των χαράξεων που επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 5: Ασφάλεια Κίνησης Οχημάτων – Ανάλυση Αποτελεσμάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των στοιχείων που προκύπτουν από την προσομοίωση και διαπιστώνονται τα προβλήματα που ανακύπτουν σε κάθε περίπτωση για την ασφάλεια κίνησης των δύο οχημάτων.

Κεφάλαιο 6: Εισαγωγή του Οδηγού στο Σύστημα Οδός – Όχημα Μέσω Εφαρμογής στο Πρόγραμμα IHSDM. Στο κεφάλαιο αυτό επανεξετάζονται οι χαράξεις για ένα κρίσιμο συνδυασμό οδηγού – οχήματος, με αντικειμενικό σκοπό τη συγκαταρίθμηση του παράγοντα της συμπεριφοράς του οδηγού στο σύστημα οδός – όχημα, μέσω εφαρμογής που έγινε στο λογισμικό IHSDM.

Συμπεράσματα - Προτάσεις

Γενική Επισκόπηση - Μελλοντικές Εφαρμογές

Παραρτήματα (Τεύχος Β): Η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, γίνεται στο παράρτημα Α μέσω των διαγραμμάτων που αφορούν στο όχημα και τα ελαστικά. Το Παράρτημα Β περιλαμβάνει μια σύνοψη της παρούσας εργασίας (στα αγγλικά) που έγινε για την ανακοίνωσή της στο διεθνές συνέδριο *Road Safety & Simulation 2009*, International Conference in Paris. Τέλος, στο παράρτημα Γ δίνονται πίνακες συσχέτισης ατυχημάτων με διάφορους παράγοντες που προσδιορίζουν την οδική ασφάλεια.

1. ΒΑΡΕΑ ΟΧΗΜΑΤΑ, ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΟΔΩΝ & ΟΔΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

1.1. Γενικά

Σύμφωνα με τους Lamm, Choueiri, Kloeckner και Mailaender, πολλοί παράγοντες είναι αυτοί που επηρεάζουν σε μετρήσιμο βαθμό την οδική συμπεριφορά και ασφάλεια. Αυτοί κυρίως είναι (Μαυρομάτης 2002):

- Ανθρώπινοι παράγοντες όπως η λανθασμένη εκτίμηση της οδού, της κυκλοφορίας, της ταχύτητας, η έλλειψη εμπειρίας οδήγησης, η οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ, καθώς και δυσκολίες που μπορούν να παρουσιαστούν κυρίως στους μεγαλύτερους σε ηλικία οδηγούς.
- Η ίδια η γεωμετρία του οδικού δικτύου. Ο συνδυασμός της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και των διατομών ως προς το βαθμό ανάπτυξης των παρόδιων χρήσεων και του επιπέδου πρόσβασης.
- Η παρουσία έντονης κυκλοφορίας σε συνδυασμό με τις ποιοτικές και χρονικές της διαφοροποιήσεις.
- Θέματα που άπτονται της νομοθεσίας που ισχύει σε μια περιοχή όπως ο έλεγχος της κυκλοφορίας και ο βαθμός επιβολής αυτού.
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση του οδοστρώματος.
- Χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως τα ελαστικά, το σύστημα πέδησης και η παλαιότητα του.

Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι τα *οδικά ατυχήματα* που εμπλέκουν οχήματα και συνιστούν δείκτη της οδικής ασφάλειας, είναι πολυσχιδή περιστατικά που εμπλέκουν πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου όχι μόνο του δρόμου, αλλά και του οχήματος, των οδηγών (ανθρώπινοι παράγοντες), της κυκλοφορίας, και του περιβάλλοντος (καιρός, συνθήκες φωτισμού). Καθώς κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες, όπως η συμπεριφορά του οδηγού και οι καιρικές συνθήκες, είναι στη φύση τους ποιοτικοί και στοχαστικοί, οι πραγματικές σχέσεις μεταξύ ατυχημάτων και γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών είναι αναπόφευκτα εμπειρικές και στατιστικές. Έτσι, σε πολλές μελέτες γίνονται προσπάθειες ώστε να εγκαθιδρυθεί ένα στατιστικό πλαίσιο που να είναι σε θέση να μοντελοποιεί την έμφυτη πιθανολογική φύση των ατυχημάτων, καθώς επίσης και να προσδιορίζει τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεων των σχετικών παραγόντων.

1.2. Οδικά Ατυχήματα & Βαρέα Οχήματα

Τα ατυχήματα που εμπλέκουν φορτηγά και γενικά βαρέα οχήματα συνιστούν πλέον παγκοσμίως, ένα φλέγον θέμα για την οδική ασφάλεια. Καθώς οι κανονισμοί επιτρέπουν την κυκλοφορία *μεγαλύτερων και μακρύτερων οχημάτων*, προκύπτουν ερωτήματα όπως το αν το υφιστάμενο οδικό δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει με ασφάλεια τον αυξημένο αριθμό βαρέων οχημάτων και ιδίως των νέων και μεγαλύτερων φορτηγών, ή το ποια οδικά τμήματα είναι πιο κρίσιμα για την ασφάλεια κίνησης τέτοιου τύπου οχημάτων. Η αύξηση του ποσοστού των φορτηγών, αλλά και η *βελτίωση των κινητήρων* τους, που τους επιτρέπει να κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες, έχει δώσει μια επιπλέον ώθηση για τη συγκαταρτίθιση αυτών των οχημάτων στα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού, που μέχρι στιγμής ως όχημα σχεδιασμού χρησιμοποιούν το επιβατηγό.

Έτσι έχουν πυροδοτηθεί έρευνες με αντικείμενα όπως:

- η συσχέτιση των ατυχημάτων που εμπλέκουν βαρέα οχήματα και του γεωμετρικού σχεδιασμού [21, 26, 28],
- τα χαρακτηριστικά των βαρέων οχημάτων ως παράγοντες στο γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών [1-2, 12-15, 19-20].

Στην πρώτη κατηγορία ερευνών εξετάζονται ζητήματα ασφαλείας για την κίνηση βαρέων οχημάτων όπως:

- Πόσο ασφαλές είναι ένα δεδομένο οδικό τμήμα για μεγάλα φορτηγά, αναφορικά με τους δείκτες ατυχημάτων και την πιθανότητα ατυχήματος.
- Δοθέντος ενός συνόλου στοιχείων γεωμετρικού σχεδιασμού, ποια είναι εκείνα τα στοιχεία που έχουν σχετικά μεγαλύτερη επίδραση στην ασφαλή συμπεριφορά μεγάλων οχημάτων.
- Τι μείωση του ποσοστού των ατυχημάτων που εμπλέκουν βαρέα οχήματα αναμένεται από διάφορες βελτιώσεις στο γεωμετρικό σχεδιασμό.

Στη δεύτερη κατηγορία διερευνάται η επιρροή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών (δυναμικών και λειτουργικών) των φορτηγών, των διαστάσεων και της συμπεριφοράς τους, και αξιολογείται το κατά πόσο είναι αναγκαία η ενσωμάτωσή τους στα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού.

Πέραν όμως της επιρροής των δυναμικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των φορτηγών και των διαστάσεών τους σε σχέση με τη γεωμετρία της οδού, ένας ακόμη παράγοντας που υπεισέρχεται είναι η ηλικία των βαρέων οχημάτων. Δραματικά είναι τα στοιχεία που προκύπτουν από την έρευνα του Μ. Καρλαύτη [1].

Στην Ελλάδα, ο μέσος όρος ηλικίας των βαρέων οχημάτων εκτιμάται περίπου στα 18 χρόνια, ενώ ο μέσος ευρωπαϊκός είναι περίπου 12,5 και στη Γερμανία δεν ξεπερνά τα 8 έτη. Κατά τη διερεύνηση της επικινδυνότητας των εξεταζόμενων κατηγοριών οχημάτων, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής και σε βάθος ανάλυση της επίδρασης της ηλικίας των οχημάτων.

1. Η επικινδυνότητα των οχημάτων τόσο ως προς την πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος, όσο και ως προς την πιθανότητα να είναι θανατηφόρο, αυξάνεται με την ηλικία του οχήματος και, μάλιστα, με ρυθμό ταχύτερο από αυτή.

2. Τα παλαιότερα βαρέα οχήματα και λεωφορεία (16-20 ετών) προκύπτουν 4,6 φορές πιο επικίνδυνα από τα νεότερα (0-5 ετών).

3. Τα παλαιότερα λεωφορεία αποβαίνουν 2 φορές περισσότερο μοιραία από τα παλαιά βαρέα φορτηγά, 6 φορές περισσότερο από τα ελαφρά φορτηγά και 4 φορές περισσότερο από τα νεότερα λεωφορεία.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η κίνηση βαρέων οχημάτων επηρεάζει ποικιλοτρόπως το δείκτη ασφαλείας που χαρακτηρίζει τα εκάστοτε οδικά τμήματα και έτσι, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση των παραγόντων που συμβάλλουν σε αυτό το φαινόμενο. Συνοψίζοντας οι παράγοντες που σχετίζονται με τα βαρέα οχήματα και έχουν αντίκτυπο στην ασφάλεια είναι:

- η ηλικία των βαρέων οχημάτων, η οποία όπως προκύπτει και από τα στοιχεία της παραπάνω έρευνας είναι ζωτικής σημασίας. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στην Ελλάδα ο μέσος όρος ηλικίας αυτών των οχημάτων είναι τόσο μεγάλος, αλλά εκτός αυτού και το γεγονός ότι προστίθενται συνεχώς και νέα βαρέα οχήματα στο στόλο των ήδη υπάρχοντων, είναι σημαντικό να ενταχθούν τα χαρακτηριστικά τους στα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού και να διερευνηθεί η επιρροή των
- δυναμικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών τους, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της οδού και τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα που δύνανται να επιτύχουν. Η λειτουργική ταχύτητα των οχημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη μηκοτομή. Η επιρροή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη στην κίνηση βαρέων οχημάτων (λεωφορεία - φορτηγά), όπου σε ανωφέρειες μεγάλης κλίσης, η μείωση της ταχύτητας σε οχήματα αυτού του τύπου, μπορεί να δημιουργήσει κρίσιμες καταστάσεις. Ένας σημαντικός παράγοντας για την

ασφάλεια υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας σχετίζεται με τα ατυχήματα που εμπλέκουν προσπεράσεις, όπου ένα όχημα επιχειρεί να περάσει ένα βραδύτερο που προηγείται. Ο κίνδυνος προκύπτει στο σημείο που το όχημα που προσπερνά καταλαμβάνει την αντίθετη λωρίδα κυκλοφορίας, καθιστώντας έτσι την επάρκεια του μήκους ορατότητας κρίσιμη σε αυτές τις καταστάσεις. Στην καλύτερη περίπτωση η διαφορά αυτή στην ταχύτητα μεταξύ επιβατηγών και φορτηγών θα οδηγήσει σε παρακώλυση της κυκλοφορίας και μείωση του επιπέδου εξυπηρέτησης της οδού (απαίτηση λωρίδων ανάβασης). Η ύπαρξη έντονου ανάγλυφου στην Ελλάδα, οδηγεί σε μεγάλο ποσοστό οδών με αυξημένες κλίσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλούς δείκτες ατυχημάτων.

1.3. Οδικά Ατυχήματα & Γεωμετρικός Σχεδιασμός

1.3.1. Οριζόντιες καμπύλες

Η πιθανότητα ατυχήματος είναι μεγαλύτερη σε καμπύλα οδικά τμήματα παρά σε ευθυγραμμίες εξαιτίας της δυναμικής των οχημάτων και της επιπρόσθετης προσπάθειας που απαιτείται να καταβάλει ο οδηγός προκειμένου να ελέγξει την ευστάθεια του οχήματος. Όσο αυξάνεται ο βαθμός της καμπύλης τόσο αυξάνεται και ο δείκτης ατυχημάτων. Έτσι, αυξημένη πιθανότητα ατυχήματος εμφανίζεται ιδιαίτερα σε κλειστές καμπύλες όταν αυτές ακολουθούν μεγάλες ευθυγραμμίες, και σε αλληλουχία καμπυλών που επιβάλουν αλλαγή στην λειτουργική ταχύτητα των οχημάτων.

Τα φορτηγά, σε σύγκριση με τα επιβατηγά οχήματα, είναι πιο επιρρεπή σε ατυχήματα που λαμβάνουν χώρα σε καμπύλα τμήματα εξαιτίας του υψηλότερου κέντρου βάρους τους, ενώ επίσης δυσκολεύονται να διασχίσουν απότομες στροφές λόγω του προβλήματος του εκτροχιασμού.

Στην Ελλάδα λόγω του έντονου ανάγλυφου που δημιουργεί τοπογραφικούς περιορισμούς, τέτοιες απότομες στροφές συνοδεύονται συχνά στενές λωρίδες κυκλοφορίας και απότομες κατά μήκος κλίσεις. Αυτός ο συνδυασμός θέτει σημαντικό ρίσκο στη λειτουργία και την ασφάλεια των φορτηγών.

Μετρήσεις πεδίου έχουν δείξει πως όλα τα οχήματα δεν ακολουθούν επακριβώς το ίχνος μιας καμπύλης σταθερής ακτίνας, με αποτέλεσμα αλλού να διαγράφουν τροχιές μικρότερης ακτίνας και αλλού μεγαλύτερης. Μοντέλα προσομοίωσης οχημάτων έχουν δείξει πως η μέγιστη πλευρική επιτάχυνση αναπτύσσεται αρκετά μέτρα μετά την είσοδο του οχήματος στην καμπύλη, με μέση τιμή απόκλισης από την θεώρηση τροχιάς σταθερής ακτίνας, την τιμή των 0,02 g (Μαυρομάτης 2002).

1.3.2. Κατά μήκος κλίσεις

Για τα φορτηγά οχήματα είναι οι κατωφέρεις ίσως να είναι πιο κρίσιμες από ότι για τα επιβατηγά οχήματα εξαιτίας της υποδεέστερης ικανότητάς τους να επιβραδύνουν. Παρόλα αυτά οι ανωφέρεις θέτουν έναν άλλο κίνδυνο ο οποίος αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. Καθώς τα φορτηγά αντιμετωπίζουν πολλές φορές πρόβλημα στο να διατηρήσουν τις επικρατούσες ταχύτητες σε ανωφέρεις, οι οδηγοί των επιβατηγών επιχειρούν συχνά επικίνδυνους ελιγμούς και προσπεράσεις σε οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Το γεγονός αυτό είναι πιθανά υπεύθυνο για το ότι οι οδοί μη διαχωρισμένου οδοστρώματος έρχονται

πρώτες σε ποσοστά θανατηφόρων ατυχημάτων, στα οποία σε μεγάλο βαθμό συμμετέχουν βαρέα οχήματα.

Η σημαντική μείωση της ταχύτητας στις ανωφέρειες μπορεί να οδηγήσει σε απότομα φρεναρίσματα από τα οχήματα που έπονται. Έτσι, αυξάνεται η πιθανότητα νοτομετωπικών συγκρούσεων (rear-end collisions).

Είναι λοιπόν εμφανές, ότι σε αυξημένες κατά μήκος κλίσεις, η ύπαρξη ανομοιογενούς κυκλοφοριακής ροής, συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας ατυχήματος. Σε σχετική έρευνα που αναφερόταν σε Γερμανικά οδικά δίκτυα, ο Bitzl συσχετίζοντας την κατά μήκος κλίση με το δείκτη ατυχημάτων, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι σε οδικά τμήματα με κατά μήκος κλίσεις της τάξης του 8% - 10% ο δείκτης ατυχημάτων ήταν τετραπλάσιος απ' ότι σε οδικά τμήματα με κλίση μικρότερη του 2% (Μαυρομάτης 2002). Σύμφωνα με τα παραπάνω, η κατά μήκος κλίση μιας δύναται να επιβάλλει περιορισμούς στην επίτευξη της μέγιστης δυνατής ταχύτητας ενός οχήματος, και ιδίως σε φορτηγά.

1.4. Σύνοψη

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η γεωμετρία της οδού παίζει σημαντικό ρόλο στη διερεύνηση της ασφάλειας του εκάστοτε εξεταζόμενου οδικού τμήματος. Βέβαια, αναγκαία είναι η εξέταση τρισδιάστατων χαράξεων (σε συνδυασμό με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των οχημάτων) ούτως ώστε να προκύψουν σαφή αποτελέσματα, και όχι διαχωρισμός τους σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή, όπως γίνεται στις περισσότερες των περιπτώσεων. Μόνο έτσι μπορούν να συμπεριληφθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος στη διερεύνηση και να προσδιοριστεί μια μέγιστη σταθερή ταχύτητα με την οποία θα δύναται να κινηθεί το όχημα στους διάφορους συνδυασμούς γεωμετρικών στοιχείων. Έτσι ορίζεται μια *ταχύτητα ασφαλείας* για κάθε συνδυασμό που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη, και προσδιορίζονται οι περιορισμοί που θέτει η κατά μήκος κλίση.

Φυσικά εκτός της γεωμετρίας της οδού σημαντικό ρόλο παίζει και η κατάσταση του οδοστρώματος. Υγρά οδοστρώματα προφανώς εισάγουν περισσότερους και σοβαρότερους κινδύνους σε σχέση με τα στεγνά λόγω της μείωσης του συντελεστή τριβής. Για αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία εξετάζονται υγρά οδοστρώματα. Οι καιρικές συνθήκες και οι συνθήκες φωτισμού που σίγουρα παίζουν σημαντικό ρόλο, δεν λαμβάνονται υπόψη για ευνόητους λόγους.

Ένας ακόμη παράγοντας είναι ο τύπος της οδού. Όπως ήδη αναφέρθηκε οδοί μη διαχωρισμένου οδοστρώματος (και δη δύο λωρίδων κυκλοφορίας) εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερα ποσοστά ατυχημάτων.

Ο τρίτος όμως, και επίσης ζωτικής σημασίας παράγοντας, που υπεισέρχεται στην ασφάλεια ενός οδικού τμήματος είναι ο χρήστης - οδηγός. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω ο παράγοντας αυτός της συμπεριφοράς του οδηγού είναι αστάθμητος και δεν είναι δυνατό να προκαθοριστεί η συμμετοχή του. Η επιρροή του όμως είναι καθοριστικής σημασίας και δύναται να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Χαρακτηριστικά, μετρήσεις πεδίου έχουν δείξει ότι οι οδηγοί έχουν την τάση να υπερστρέφουν στις καμπύλες με αποτέλεσμα η απαίτηση σε εγκάρσια πρόσφυση να παρουσιάζεται αυξημένη. Στην παρούσα μελέτη γίνεται μια προσπάθεια να εξεταστούν δύο ακραίες περιπτώσεις χειρισμού των οδηγών και να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της οδικής συμπεριφοράς.

Όσον αφορά το όχημα σχεδιασμού, είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι τα βαρέα οχήματα πρέπει να συμπεριληφθούν στα κριτήρια γεωμετρικού σχεδιασμού. Τα οχήματα αυτά έχοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα επιβατικά, κινούνται με διαφορετικό τρόπο στους δρόμους. Καταλαμβάνουν περισσότερο οδικό χώρο, κινούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις

και με μικρότερες ταχύτητες, ειδικά σε αυξημένες κατά μήκος κλίσεις, και είναι πιο δυσκίνητα σε ελιγμούς. Η διαφοροποίησή τους αυτή όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, εισάγει κινδύνους για τα υπόλοιπα οχήματα και αυξάνει την πιθανότητα ατυχήματος.

2. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ TRUCKSIM

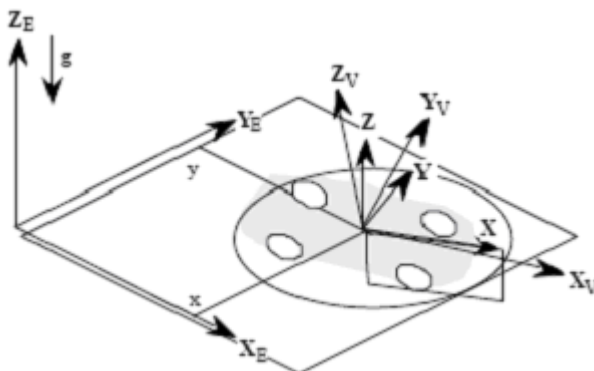
Το λογισμικό προσομοίωσης βαρέων οχημάτων TruckSim (Version 7) αποτέλεσε το βασικό εργαλείο στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Το TruckSim είναι προϊόν της Mechanical Simulation Corporation (MSC), η οποία έχει αναπτύξει αντίστοιχα λογισμικά για τη δυναμική συμπεριφορά αυτοκινήτων (CarSim), δικύκλων (BikeSim), ακόμα και μηχανικών μερών οχημάτων (SuspensionSim). Το TruckSim χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς μεσαίων έως βαρέων φορτηγών, λεωφορείων και αρθρωτών οχημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του, τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιεί, οι κύριες διαδικασίες που εκτελούνται μέσω του προγράμματος και οι παραδοχές που γίνονται σε κάθε περίπτωση. Να σημειωθεί ότι λόγω του ότι τα διατιθέμενα μοντέλα και οι εφαρμογές του προγράμματος είναι πολλές, αλλά και του ότι το βασικό αντικείμενο δεν έγκειται στην περιγραφή του προγράμματος, η ανάλυση στο παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στα μοντέλα και τις εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας.

2.1. Συστήματα Αναφοράς

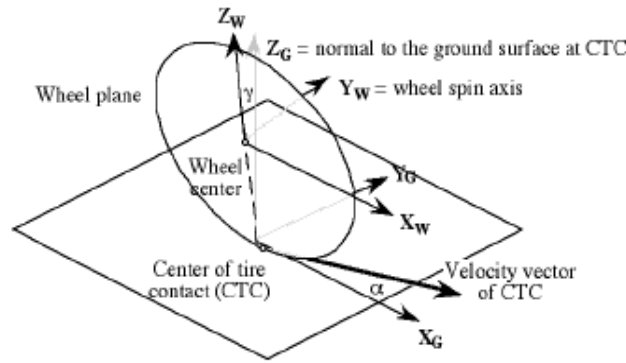
2.1.1. Συστήματα αξόνων και συντεταγμένων

Στο TruckSim χρησιμοποιείται η συνθήκη προσανατολισμού των αξόνων κατά το πρότυπο ISO 8855, σύμφωνα με την οποία ο άξονας των X προσανατολίζεται προς τα εμπρός, δηλαδή προς την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος, ο άξονας των Z προς τα επάνω (Z-up convention), και ο άξονας των Y προς τα αριστερά του οχήματος. Οι κατακόρυφες δυνάμεις είναι πάντα θετικές και η περιστροφή των τροχών είναι θετική για πρόσω ταχύτητες του οχήματος. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται τα τρία συστήματα αξόνων που σχετίζονται με το όχημα, ενώ στο Σχήμα 2.2 φαίνονται το τροχοπαγές σύστημα αναφοράς και το σύστημα αναφοράς των ελαστικών.

Στο Σχήμα 2.1, ο δείκτης E (earth-fixed) αναφέρεται στο δεξιόστροφο ορθογώνιο σύστημα αξόνων, που χρησιμεύει ως παγκόσμιο αδρανειακό σύστημα αναφοράς (γεώδαιτο αδρανειακό σύστημα αξόνων - απόλυτο σύστημα). Ο δείκτης V (vehicle) υποδηλώνει το επίσης δεξιόστροφο οχηματοπαγές σύστημα αξόνων (ως προς το πλαίσιο αναφοράς του οχήματος – σχετικό σύστημα), ενώ το ενδιάμεσο σύστημα αξόνων (X, Y, Z) προκύπτει από την περιστροφή του γήινου συστήματος αξόνων ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z_E (στο πλαίσιο αναφοράς του οχήματος), για αντίστοιχη γωνία εκτροπής του οχήματος (yaw angle, ψ).



Σχήμα 2. 1: Συστήματα αξόνων αναφορικά με το όχημα (TruckSim User Manual)



Σχήμα 2. 2: Συστήματα αξόνων τροχών και ελαστικών (TruckSim User Manual)

Στο Σχήμα 2.2, ο δείκτης G (ground) υποδηλώνει το δεξιόστροφο ορθογώνιο σύστημα αξόνων, του οποίου ο άξονας Z είναι κάθετος στο έδαφος, στο σημείο επαφής του ελαστικού με το έδαφος (center of tire contact - CTC), και ο άξονας των X κάθετος στον άξονα περιστροφής του τροχού (wheel spin axis, Y_W). Για ανώμαλο έδαφος, διαφορετικό σύστημα αξόνων μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τροχό. Να σημειωθεί ότι το σημείο επαφής ελαστικού – οδοστρώματος (CTC), δεν βρίσκεται απαραίτητα στο κέντρο της ζώνης επαφής του ελαστικού. Τέλος, ο δείκτης W (wheel) αναφέρεται στο τροχοπαγές σύστημα αξόνων. Ο άξονας Y_W , αντιστοιχεί στον άξονα περιστροφής του τροχού. Το κέντρο του τροχού (wheel center), βρίσκεται στην τομή του άξονα περιστροφής (Y_W) και του κάθετου σε αυτόν επιπέδου του τροχού (wheel plane).

2.1.2. Σημεία αναφοράς

Κέντρο βάρους

Το κέντρο βάρους (center of gravity – C.G.) συμπίπτει με το κέντρο της συνολικής μάζας του οχήματος, όταν οι αναρτήσεις είναι σε ισορροπία και το όχημα βρίσκεται σε ακινησία σε επίπεδο και οριζόντιο έδαφος. Όλες οι συνιστώσες των ταχυτήτων (V_X , V_Y) και επιταχύνσεων (A_X , A_Y) του οχήματος, αλλά και οι συνιστώσες των συνισταμένων δυνάμεων (F_X , F_Y , F_Z) και ροπών (M_X , M_Y , M_Z) που ασκούνται σε αυτό, αναφέρονται στο κέντρο βάρους.

Κέντρο αεροδυναμικών πιέσεων

Το κέντρο αεροδυναμικών πιέσεων (aerodynamic reference point) βρίσκεται στην τομή του επιπέδου συμμετρίας του οχήματος με το επίπεδο του εδάφους, στο μέσο του μεταξονίου, όταν οι αναρτήσεις είναι σε ισορροπία και το όχημα βρίσκεται σε ακινησία σε επίπεδο και οριζόντιο έδαφος. Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στο όχημα από τον αέρα (αεροδυναμικές), αθροίζονται σε μια συνισταμένη διανυσματική δύναμη και αντίστοιχα σε μια συνισταμένη διανυσματική ροπή περί του κέντρου αεροδυναμικών πιέσεων.

2.2. Μαθηματικά Μοντέλα Προσομοίωσης

Το TruckSim προβλέπει τη συμπεριφορά βαρέων οχημάτων σε σχέση με τα επιλεγμένα δεδομένα που αφορούν στους οδηγικούς χειρισμούς (πορεία, φρενάρισμα, γκάτσι, αλλαγή

ταχυτήτων) και στο εκάστοτε επιθυμητό περιβάλλον (γεωμετρία οδού, πρόσφυση, άνεμος). Οι τρεις βασικοί χειρισμοί αφορούν στον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης (control steering), στον έλεγχο του συστήματος πέδησης (control braking) και στον έλεγχο της ταχύτητας (control speed). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αποδοτικά προγράμματα επίλυσης, κατάλληλα βελτιστοποιημένα για την επίλυση εξισώσεων που αναπαριστούν τη δυναμική συμπεριφορά συγκεκριμένων βαρέων οχημάτων.

2.2.1. Τρισδιάστατο δυναμικό μοντέλο κίνησης - Δυναμικό μοντέλο φορτηγού

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η υφιστάμενη προσέγγιση της δυναμικής των οχημάτων στη σύγχρονη οδοποιία εμπεριέχει κάποιες απλοποιήσεις που συνιστούν αδυναμία για το σχεδιασμό. Οι απλοποιήσεις αυτές συνίστανται στα εξής (Ψαριανός 2001):

- το όχημα προσομοιώνεται με υλικό σημείο (σημειακή μάζα), συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του,
- δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ κινητήριου και μη κινητήριου άξονα,
- η κίνηση του οχήματος εξετάζεται ανεξάρτητα στην επιτόχια και στην εγκάρσια στην τροχιά κατεύθυνση και δεν περιλαμβάνονται οι περιορισμοί εκείνοι με τους οποίους οι συνιστώσες της εξ' επαφής δύναμης αλληλοδεσμεύονται,
- αγνοείται το πραγματικό σύστημα δυνάμεων που εμφανίζεται σε κάθε μέρος του οχήματος και όλες οι δυνάμεις ανάγονται στο κέντρο βάρους του.

Οι παραπάνω απλοποιήσεις δεν υφίστανται κατά την προσέγγιση της δυναμικής του οχήματος μέσω της προσομοίωσης. Στο TruckSim, οι εξισώσεις κίνησης στα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται, ισχύουν για πλήρως μη γραμμικές τρισδιάστατες κινήσεις. Το μοντέλο του άκαμπτου σώματος βελτιώνεται με την προσθήκη ιδιοτήτων που καθορίζουν τις κινηματικές και δυναμικές επιπτώσεις στο όχημα, οι οποίες προέρχονται από τις αναρτήσεις, το σύστημα διεύθυνσης κλπ. Το γεγονός αυτό δίνει μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Πολλά από τα συνιστώμενα μέρη που έχουν σημαντική επιρροή στους χειρισμούς του οχήματος, αναπαριστώνται και περιγράφονται από μη γραμμικούς πίνακες μετρήσιμων δεδομένων. Χρησιμοποιούνται παραδείγματος χάριν, λεπτομερή μη γραμμικά μοντέλα για τα ελαστικά, τον κινητήρα, τις σούστες ανάρτησης κλπ, ενώ μπορεί επίσης να καθορισθεί ο τρόπος μετάδοσης κίνησης (εμπροσθοκίνηση, οπισθοκίνηση, τετρακίνηση).

Στα μοντέλα του προγράμματος εισάγονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ώστε να οριστεί πλήρως ένα όχημα και να προσδιοριστούν μέσω της προσομοίωσης οι δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε αυτό. Δεδομένα για την ανηρτημένη μάζα, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, τα ελαστικά, τους άξονες, τις αναρτήσεις, το σύστημα πέδησης, το σύστημα διεύθυνσης, τον κινητήρα αλλά και τις διαστάσεις του οχήματος εμπεριέχονται σε αντίστοιχες σειρές δεδομένων (data sets) και χρησιμοποιούνται από τα αντίστοιχα μοντέλα.

2.2.2. Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο οδού – Περιβάλλον προσομοίωσης

Τρισδιάστατες επιφάνειες κύλισης ορίζονται στο TruckSim συνδυάζοντας την οριζόντια γεωμετρία του άξονα (οριζοντιογραφία), την κατακόρυφη γεωμετρία του άξονα (μηκοτομή), και την κατακόρυφη γεωμετρία για σημεία εκτός του άξονα (επικλίσεις). Κάθε μια από αυτές τις γεωμετρίες καθορίζεται από αντίστοιχες σειρές δεδομένων (data sets) στο περιβάλλον προσομοίωσης. Η τρισδιάστατη επιφάνεια συνοδεύεται επίσης από στοιχεία για την τριβή και

την αντίσταση κύλισης που σχετίζονται με τις ιδιότητες της επιφάνειας του εδάφους, ενώ παράλληλα ορίζονται και τα στοιχεία για την απεικόνιση της οδού κατά την προσομοίωση.

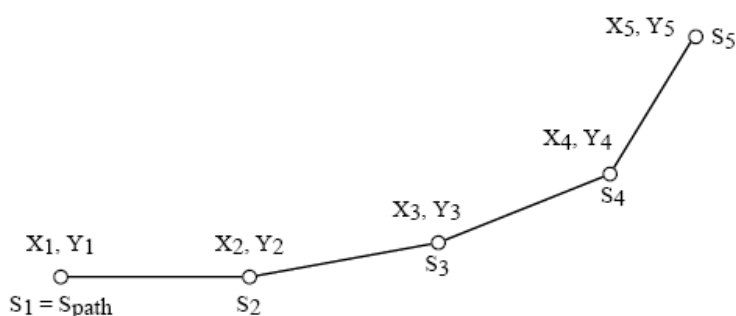
Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος κατάστρωσης των χαράξεων στο πρόγραμμα. Να σημειωθεί ότι όλες οι μεταβλητές που αναλύονται σε αυτή την ενότητα (X, Y, S, L, Z), αναφέρονται σε μέτρα (m).

Συντεταγμένες (X, Y) άξονα – Οριζοντιογραφία

Η οριζοντιογραφία της οδού προκύπτει ως μια αλληλουχία συντεταγμένων (X, Y) που ορίζουν τη γραμμή αναφοράς, η οποία μπορεί να είναι ο άξονας της οδού ή μια οριογραμμή. Το μήκος S (station) είναι η απόσταση κατά μήκος της γραμμής αναφοράς, και συνιστά την ανεξάρτητη συντεταγμένη της οδού. Για κάθε τιμή του μήκους S υπάρχει ένα μοναδικό ζεύγος συντεταγμένων (X, Y).

Το μήκος S ορίζεται ως συνάρτηση των X και Y συνδέοντας τα διαδοχικά σημεία με ευθείες γραμμές (Σχήμα 2.3). Για κάθε ζεύγος συντεταγμένων υπολογίζεται με χρήση του Πυθαγορείου Θεωρήματος αντίστοιχη επαύξηση για το μήκος, η οποία προστίθεται στην προηγούμενη τιμή του:

$$S_i \equiv S_i = S_{i-1} + \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad \{\text{for } i > 1\} \quad (2-1)$$



Σχήμα 2. 3: Γεωμετρία υπολογισμού μηκών (TruckSim User Manual)

Έτσι, εισάγοντας τις συντεταγμένες της γραμμής αναφοράς, το πρόγραμμα υπολογίζει αυτόματα όλα τα διαδοχικά μήκη. Παρόλο που το μήκος προκύπτει συνδέοντας τα σημεία με ευθείες γραμμές, τα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούν κυβική πολυωνυμική παρεμβολή για τον ορισμό των X και Y ως καμπύλες συναρτήσεων του S. Αυτό παρέχει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση ακόμα και αν η γεωμετρία της οδού δεν είναι ορισμένη λεπτομερώς.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί σειρές απλών λειτουργιών για να πραγματοποιήσει μετασχηματισμούς μεταξύ των συντεταγμένων της οδού (S και L, όπου L η πλευρική συντεταγμένη - απόσταση σχετικά προς τη γραμμή αναφοράς) και των συντεταγμένων X και Y. Ένα παράδειγμα είναι ο μετασχηματισμός των παγκόσμιων συντεταγμένων X, Y σε τιμές S, L. Ο μετασχηματισμός αυτός είναι απαραίτητος, ώστε να προσδιορισθεί η ακριβής θέση του οχήματος πάνω στο δρόμο, αλλά και για να προσδιορισθεί επίσης η ακριβής θέση του σημείου επαφής για κάθε ελαστικό, η οποία είναι αναγκαία στα μοντέλα δυναμικής του οχήματος. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο ακριβώς αντίθετος μετασχηματισμός (από S, L σε παγκόσμιες συντεταγμένες X, Y), ο οποίος χρειάζεται για την παραγωγή των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση.

Το μήκος S, χρησιμοποιείται για να οριστούν τα υψόμετρα του άξονα (μηκοτομή της οδού), αλλά και δεδομένα εισόδου για τους χειρισμούς του οχήματος, όπως η ταχύτητα και η

πορεία του. Ζεύγη S, L χρησιμοποιούνται επίσης για να οριστούν και άλλες ιδιότητες όπως τα υψόμετρα της οριογραμμής, οι συντελεστές τριβής ελαστικού – οδοστρώματος, αλλά και τα σχήματα στην απεικόνιση.

Υψόμετρα άξονα - Μηκοτομή

Το μήκος (S), η πλευρική θέση ως προς τον άξονα (L) και το υψόμετρο (Z) συνιστούν τις συντεταγμένες ενός σημείου πάνω στο δρόμο. Το μήκος S προκύπτει ως συνάρτηση των X και Y , όπως περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο. Για κάθε σημείο πάνω στον άξονα ($S, L = 0$) ορίζεται ένα υψόμετρο με βάση την απόσταση, δηλαδή το μήκος S επί του άξονα. Έτσι, η μηκοτομή της οδού προκύπτει από ένα δισδιάστατο πίνακα, όπου σε κάθε τιμή του S αντιστοιχίζεται ένα υψόμετρο Z .

Υψόμετρα οριογραμμής – Επικλίσεις

Το υψόμετρο σε οποιοδήποτε σημείο του δρόμου προκύπτει από το υψόμετρο του άξονα στη συγκεκριμένη θέση (S), και ένα αθροιστικό υψόμετρο που αφορά στο σημείο (S, L). Τα υψόμετρα σχεδιασμού υπολογίζονται με πολυωνυμική παρεμβολή, γεγονός που εξασφαλίζει ομαλές μεταβάσεις κατά τις αλλαγές των κλίσεων. Μέσω αυτής της διαδικασίας είναι δυνατό να προκύψουν οι επικλίσεις της οδού, ορίζοντας για κάθε σημείο (S, L) το κατάλληλο υψόμετρο, που σε συνδυασμό με το υψόμετρο του άξονα της οδού στη συγκεκριμένη θέση (S), δίνει την επιθυμητή πλάγια κλίση.

Τριβή και αντίσταση κύλισης

Για τις ανάγκες του προγράμματος, έχουν μετρηθεί δεδομένα για τα ελαστικά σε συνθήκες ολίσθησης και έχουν προκύψει αντίστοιχοι πίνακες. Καθώς τα δεδομένα για τα ελαστικά μετρώνται σε μεγάλη γκάμα συνθηκών ολίσθησης, οι προκύπτουσες διατμητικές δυνάμεις και η ροπή περί τον άξονα Z , εξαρτώνται από τα όρια τριβής μεταξύ ελαστικού και επιφάνειας αναφοράς.

Στην επόμενη ενότητα, περιγράφεται η μέθοδος Similarity που χρησιμοποιείται στο TruckSim για την προσομοίωση της “συμπεριφοράς” των ελαστικών σε διάφορες επιφάνειες. Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει τη διαφορά στο όριο της διατμητικής δύναμης εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών τριβής, ενώ διατηρεί τη γραμμική συμπεριφορά για μικρές ποσότητες ολίσθησης. Μια από τις παραμέτρους του μοντέλου είναι ο συντελεστής τριβής (μ), ο οποίος καθορίζεται στο περιβάλλον προσομοίωσης της οδού.

Η τριβή ορίζεται ως μια ιδιότητα του δρόμου σε μια θέση, με χρήση των συντεταγμένων S και L , και την επιλογή μιας τιμής για το συντελεστή τριβής (μ) κατά την προσομοίωση. Έτσι είναι δυνατό να προσομοιωθούν περιπτώσεις όπου η τριβή διαφέρει κατά τμήματα της οδού. Ο συντελεστής αυτός που καθορίζεται στο περιβάλλον προσομοίωσης της οδού, χρησιμοποιείται ακολούθως στη μέθοδο Similarity για τον προσδιορισμό των δυνάμεων και των ροπών στα ελαστικά.

Εκτός του συντελεστή τριβής μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος, στο περιβάλλον της οδού ορίζεται και ένα συντελεστής για το έδαφος, που χρησιμοποιείται από το μοντέλο των ελαστικών για τον υπολογισμό της αντίστασης κύλισης, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Η τιμή του συντελεστή κυμαίνεται μεταξύ του 1,0 (για λείο σκυρόδεμα) και του 1,5 (για θερμό ασφαλτικό).

Άνεμος

Πέραν της γεωμετρίας της οδού και των ιδιοτήτων του οδοστρώματος είναι δυνατό να συμπεριληφθεί στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η επίδραση των ανέμων. Υπάρχει επιλογή για τον καθορισμό τόσο της ταχύτητας των ανέμων όσο και της κατεύθυνσής τους συναρτήσει του χρόνου ή της θέσης.

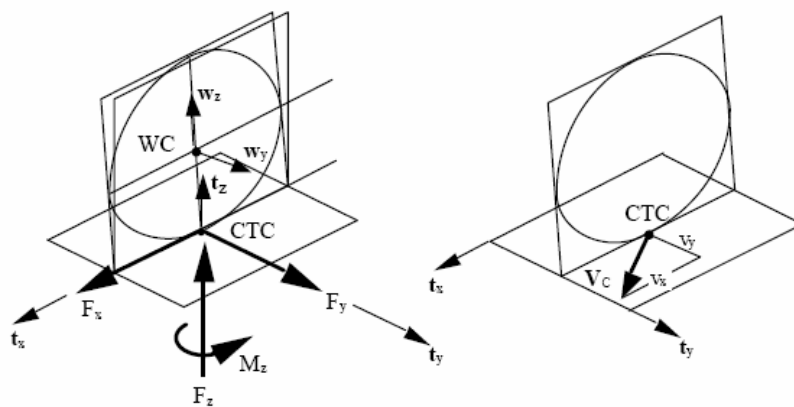
2.2.3. Μοντέλα Ελαστικών

Αρκετά μοντέλα ελαστικών διατίθενται στο TruckSim για τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ροπών. Όλα είναι σχεδιασμένα να παράγουν την κατακόρυφη δύναμη στα ελαστικά, τις διατμητικές δυνάμεις και τις ροπές λόγω παραμόρφωσης των ελαστικών.

Τα μοντέλα βασίζονται σε αλληλεπιδράσεις, των οποίων το σύστημα αναφοράς ορίζεται στο έδαφος. Παρόλα αυτά οι εξισώσεις στα προγράμματα υπολογισμού μετατρέπουν τις δυνάμεις και τις ροπές, και τις εφαρμόζουν στο κέντρο του τροχού.

Η αλληλεπίδραση κάθε ελαστικού με το έδαφος ορίζεται από μια διαμήκη δύναμη (F_x), μια πλευρική (κάθετη) δύναμη (F_y), μια κατακόρυφη δύναμη (F_z), και μια ροπή περί τον άξονα Z (ροπή ευθυγράμμισης - M_z). Οι επιδράσεις της ροπής περί τον άξονα X (ροπή ανατροπής - M_x) και της ροπής περί τον άξονα Y (ροπή αντίστασης κύλισης - M_y) αγνοούνται στο μοντέλο των ελαστικών της MSC (Mechanical Simulation Corporation), καθώς η επιρροή τους στα αποτελέσματα είναι σχεδόν ασήμαντη.

Οι δυνάμεις F_x , F_y , F_z , και η ροπή M_z εφαρμόζονται στους τροχούς και αντιδρούν με το έδαφος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2. 4: Σημεία και άξονες ελαστικών – Εφαρμογή δυνάμεων στα ελαστικά (TruckSim User Manual)

Το μοντέλο των ελαστικών της MSC υπολογίζει τις δυνάμεις και τις ροπές βάση της πλευρικής γωνίας ολίσθησης (α), του διαμήκη ρυθμού ολίσθησης (κ), της γωνίας εκτροπής (camber - γ), και της κατακόρυφης παραμόρφωσης του ελαστικού (Δ_T).

Η γωνία πλαγιοπορείας (α), είναι η γωνία από τον άξονα X_G προς το διάνυσμα της ταχύτητας στο κέντρο επαφής του ελαστικού (CTC) περί τον άξονα Z_G (Σχήμα 2.2). Για κάθε ελαστικό ορίζεται σε αντιστοιχία προς την διαμήκη (V_x) και την πλευρική (V_y) ταχύτητα του κέντρου του τροχού (WC), εκφρασμένες στο επίπεδο του εδάφους:

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \quad (2-2)$$

Η *διαμήκης ολίσθηση* (κ), ορίζεται ως ο λόγος:

$$\kappa = \frac{\omega}{\omega_0} - 1 \quad (2-3)$$

όπου το ω_0 είναι η μη μηδενική γωνιακή ταχύτητα του τροχού:

$$\omega_0 = \left| \frac{V_x}{R_{RE}} \right| \quad (2-4)$$

και όπου R_{RE} η δυναμική ακτίνα του τροχού, και V_x η διαμήκης ταχύτητά του.

Η *γωνία εκτροπής – κάμπερ* (γ), είναι η κλίση (γωνία) του τροχού ως προς το επίπεδο του εδάφους, δηλαδή η γωνία από τον Z_G στον Z_W , περί τον X_G (Σχήμα 2.2).

Η *κατακόρυφη παραμόρφωση του ελαστικού* (Δ_T) – απαραίτητη για τον υπολογισμό της F_Z – είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του σημείου WC και του δρόμου, στο επίπεδο του τροχού:

$$\Delta_T = Z_{GROUND} - Z_C \quad (2-5)$$

Συνθήκες προσήμων

Για τους παραπάνω ορισμούς διαμήκους και πλευρικής ολίσθησης ισχύουν τα εξής:

- θετική κ δίνει θετική F_X ,
- θετική α δίνει αρνητική F_Y ,
- θετική (μικρή) α δίνει θετική M_Z .

Όταν η διαμήκης ταχύτητα στο κέντρο του τροχού είναι αρνητική, οι συνθήκες των αξόνων X και Y των ελαστικών αντιστρέφονται σύμφωνα με τις πρότυπες κινηματικές συνθήκες των ελαστικών. Παρόλα αυτά, στο TruckSim, ο άξονας των X συνεχίζει να δείχνει προς τα εμπρός και ο Y προς τα αριστερά του οχήματος. Για αυτό το λόγο, οι συνθήκες των F_X και M_Z αντιστρέφονται όταν η ταχύτητα του τροχού είναι αρνητική. Η συνθήκη της F_Y δεν επηρεάζεται λόγω του απολύτου ($|V_x|$) στον ορισμό της $\tan(\alpha)$.

Δυνάμεις και ροπές

Η κατακόρυφη δύναμη F_Z υπολογίζεται πρώτη, καθώς οι υπόλοιπες δυνάμεις και ροπές εξαρτώνται από αυτή. Όπως φαίνεται και από τη εξίσωση 2-6 η F_Z είναι ανάλογη της παραμόρφωσης του ελαστικού (Δ_T).

$$F_Z = \max(0, F_{ZSTAT} + K_T \Delta_T) \quad (2-6)$$

όπου F_{ZSTAT} το στατικό φορτίο και K_T η κατακόρυφη ακαμψία του ελαστικού.

Ο παραπάνω ορισμός της κατακόρυφης δύναμης, επιβάλλει αυτή να είναι σε ισορροπία όταν το όχημα βρίσκεται στην ονομαστική διαμόρφωση. Η χρήση του μέγιστου (max function) αποτρέπει το μέγεθος της κατακόρυφης δύναμης από το να λάβει αρνητική τιμή σε περίπτωση που ο τροχός σηκωθεί από το έδαφος.

Απλή ολίσθηση

Οι δυνάμεις F_X και F_Y και η ροπή M_Z διαμορφώνονται σε πίνακες ως συναρτήσεις δυο ανεξάρτητων μεταβλητών. Γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς των πινάκων.

$$F_X = FX(F_Z, \kappa) \quad \{\text{for } \alpha = 0\} \quad (2-7)$$

$$F_Y = FY(F_Z, \alpha) \quad \{\text{for } \kappa = 0\} \quad (2-8)$$

$$M_Z = MZ(F_Z, \alpha) \quad \{\text{for } \kappa = 0\} \quad (2-9)$$

Friction similarity method

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ελαστικών σε διάφορες επιφάνειες, η μέθοδος “ομοιότητας” - *Similarity Method* (Pacejka 1958, Radt & Pacejka 1963) - χρησιμοποιείται στο TruckSim.

Η μέθοδος αυτή είναι μια ημι-εμπειρική μέθοδος, στην οποία τα μοντέλα βασίζονται σε μετρημένα δεδομένα αλλά μπορεί να περιέχουν και δομές οι οποίες προέρχονται από φυσικά μοντέλα.

Η βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι οι καμπύλες απλής ολίσθησης παραμένουν σχεδόν όμοιες σε σχήμα όταν το ελαστικό κινείται σε διαφορετικές συνθήκες από τις συνθήκες αναφοράς. Οι συνθήκες αναφοράς αναφέρονται σε ελαστικό που κινείται στο ονομαστικό του φορτίο, για μηδενική κλίση των τροχών ως προς το όχημα (camber, $\gamma = 0$), είτε για ελεύθερη κύλιση ($\kappa = 0$) ή για μηδενική πλευρική ολίσθηση ($\alpha = 0$), και σε δοσμένη επιφάνεια με δεδομένο συντελεστή τριβής (μ_0).

Το εκάστοτε χαρακτηριστικό που ανήκει στις συνθήκες αναφοράς επαναπροσδιορίζεται με κατακόρυφους και οριζόντιους πολλαπλασιασμούς και μετατοπίσεις της καμπύλης. Έτσι δοθέντος του συντελεστή τριβής στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις για το ελαστικό (μ_0), και του συντελεστή τριβής για την επιφάνεια που προσομοιώνεται (μ), οι σχέσεις 2-7 έως 2-9 διαμορφώνονται ως εξής:

$$F_X = \frac{\mu}{\mu_0} FX(F_Z, \frac{\mu_0}{\mu} \kappa) \quad \{\text{for } \alpha = 0\} \quad (2-10)$$

$$F_Y = \frac{\mu}{\mu_0} FY(F_Z, \frac{\mu_0}{\mu} \alpha) \quad \{\text{for } \kappa = 0\} \quad (2-11)$$

$$M_Z = \frac{\mu}{\mu_0} MZ(F_Z, \frac{\mu_0}{\mu} \alpha) \quad \{\text{for } \kappa = 0\} \quad (2-12)$$

Όπως χρησιμοποιείται στο TruckSim η μέθοδος αυτή ενοποιείται με τη θεωρία συνδυασμένης ολίσθησης (combined slip theory) που περιγράφεται παρακάτω.

Συνδυασμένη ολίσθηση - Combined slip theory

Η διαμήκης και η πλευρική ολίσθηση συνδυάζονται ώστε να προκύψει η συνδυασμένη ολίσθηση:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \quad (2-13)$$

όπου:

$$\sigma_X = -\frac{\kappa}{1 + \kappa}, \quad \sigma_Y = -\frac{\tan(\alpha_{eff})}{1 + \kappa} \quad (2-14)$$

Η μικρή επίδραση της κλίσης αντιμετωπίζεται μετατρέποντας τη γωνία ολίσθησης:

$$\alpha_{eff} = \tan^{-1}(\tau) + \gamma \cdot R_\gamma, \quad R_\gamma = \left| \frac{K_\gamma}{K_\alpha} \right| \quad (2-15)$$

όπου K_γ ένας γραμμικός συντελεστής απόκλισης από την κατακόρυφο, και K_α ο γραμμικός συντελεστής γωνιακής ακαμψίας. Και οι δυο συντελεστές εκτιμώνται στο τρέχον κατακόρυφο φορτίο (F_Z).

Στη συνέχεια οι θεωρητικές ολισθήσεις μετατρέπονται σε μέγιστες τιμές ολίσθησης σ_{Xmax} και σ_{Ymax} (peak slip values). Οι μέγιστες αυτές τιμές είναι αυτές που προκαλούν τις μέγιστες F_X και F_Y . Είναι συναρτήσεις της F_Z και προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή και αναζήτηση στον αλγόριθμο των πινάκων των εξισώσεων 2-7 έως 2-9. Η συνολική κανονικοποιημένη ολίσθηση είναι λοιπόν:

$$\sigma_{total}^* = \sqrt{\sigma_X^{*2} + \sigma_Y^{*2}} \quad (2-16)$$

όπου:

$$\sigma_X^* = \frac{\sigma_X}{\sigma_{Xmax}}, \quad \sigma_Y^* = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{Ymax}} \quad (2-17)$$

Η ισοδύναμη διαμήκης (κ') και η ισοδύναμη πλευρική (α') ολίσθηση υπολογίζονται από τη συνολική κανονικοποιημένη θεωρητική ολίσθηση:

$$\kappa' = \frac{\sigma_{total}^* \cdot \sigma_{Xmax} \cdot \text{sign}(\sigma_X)}{1 + \sigma_{total}^* \cdot \sigma_{Xmax} \cdot \text{sign}(\sigma_X)} \quad (2-18)$$

$$\alpha' = \tan^{-1} \left[\sigma_{total}^* \cdot \sigma_{Ymax} \cdot \text{sign}(\sigma_Y) \right] \quad (2-19)$$

Χρησιμοποιώντας τις κ' και α' , οι επονομαζόμενες “βασικές καμπύλες” (base-curves) λαμβάνονται μέσω γραμμικής παρεμβολής από τα πινακοποιημένα δεδομένα:

$$F_{X0} = FX(F_Z, \frac{\mu_0}{\mu} \kappa') \quad (2-20)$$

$$F_{Y0} = FY(F_Z, \frac{\mu_0}{\mu} \alpha') \quad (2-21)$$

Οι βασικές καμπύλες μετατρέπονται στη συνέχεια ώστε να συμπεριλάβουν τις ανισοτροπικές ιδιότητες της τριβής μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος:

$$F_{X0}^* = F_{X0} - \varepsilon(F_{X0} - F_{Y0}) \cdot \left(\frac{\sigma_Y^*}{\sigma_{total}^*} \right)^2 \quad (2-22)$$

$$F_{Y0}^* = F_{Y0} - \varepsilon(F_{Y0} - F_{X0}) \cdot \left(\frac{\sigma_X^*}{\sigma_{total}^*} \right)^2 \quad (2-23)$$

όπου $\varepsilon = \sigma_{total}^*$ για $\sigma_{total}^* < 1$ και $\varepsilon = 1$ για $\sigma_{total}^* > 1$.

Οι διαμήκεις και πλευρικές δυνάμεις των ελαστικών, καθώς και η ροπή ευθυγράμμισης υπολογίζονται τελικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F_X = F_{X0}^* \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\sigma_X}{\sigma_{total}} \quad (2-24)$$

$$F_Y = F_{Y0}^* \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\sigma_Y}{\sigma_{total}} \quad (2-25)$$

$$M_Z = \frac{MZ(F_Z, \alpha')}{F_{Y0}} \cdot |F_Y| \quad (2-26)$$

Αντίσταση κύλισης

Η αντίσταση κύλισης των ελαστικών (F_r) ορίζεται ως το ποσοστό χαμένης ισχύος εξαιτίας της αντίστασης κύλισης στην ταχύτητα. Η αντίσταση κύλισης υπολογίζεται στο μοντέλο των ελαστικών από την παρακάτω σχέση (SAE) για ελαστικά τύπου ράντιαλ (radial tires):

$$F_r = F_Z \cdot R_{r_surf} \cdot (0,0041 + 0,0000256 \cdot V_X) \quad (2-27)$$

όπου R_{r_surf} ο συντελεστής που ορίζεται στο περιβάλλον της οδού και V_X η διαμήκης ταχύτητα σε km/h.

2.2.4. Αεροδύναμη

Οι επιδράσεις της αεροδύναμης (δύναμη αντίστασης με φορά αντίθετη της φοράς κίνησης του οχήματος, η οποία οφείλεται στη σχετική κίνηση του αέρα ως προς το όχημα, Ψαριανός / Μαυρομάτης 1999) αναπαρίστανται στο μοντέλο του οχήματος από τα διανύσματα δύναμης και ροπής που δρουν στο κέντρο αεροδυναμικών πιέσεων.

Η αεροδύναμη αναλύεται σε τρεις συνιστώσες (κατά X, Y και Z):

- τη μετωπική αντίσταση (A_d) στον εφαπτομενικό άξονα του οχήματος (Drag),
- την πλευρική αντίσταση (Side force - N),
- τη δυναμική άνοση (A_N) στον κάθετο προς το οδόστρωμα άξονα (Lift).

Ο τρόπος υπολογισμού των τριών συνιστωσών της αεραντίστασης, καθώς και των αντίστοιχων ροπών, παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους (TruckSim User Manual).

Μετωπική αντίσταση

Το μέτρο της μετωπικής αντίστασης, η οποία είναι και η μεγαλύτερη από τις δυνάμεις αεραντίστασης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A_d = -C_{FX}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot Q \quad (2-28)$$

όπου $C_{FX}(\beta)$ μια αδιάστατη συνάρτηση της αεροδυναμικής γωνίας ολίσθησης (β), A_{CS} η μετωπική επιφάνεια του οχήματος, και Q η δυναμική πίεση του αέρα:

$$Q = \frac{\rho V^2}{2} \quad (2-29)$$

όπου ρ η σχετική πυκνότητα του αέρα ($= 1,206 \text{ kg/m}^3$) και V η ταχύτητα του αέρα σε σχέση με το όχημα.

Η αντίστοιχη ροπή στον άξονα των X (ροπή ανατροπής - M_X) δίνεται από τη σχέση:

$$M_X = C_{MX}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot L_a \cdot Q \quad (2-30)$$

όπου $C_{MX}(\beta)$ μια αδιάστατη συνάρτηση της αεροδυναμικής γωνίας ολίσθησης (β), L_a ένα μήκος αναφοράς (συνήθως ίσο με το μεταξόνιο), και Q η δυναμική πίεση του αέρα όπως ορίστηκε παραπάνω.

Πλευρική αντίσταση

Αντίστοιχα για την πλευρική αντίσταση ισχύουν:

$$N = -C_{FY}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot Q \quad (2-31)$$

$$M_Y = C_{MY}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot L_a \cdot Q \quad (2-32)$$

Δυναμική άνωση

Για τη δυναμική άνωση:

$$A_N = -C_{FZ}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot Q \quad (2-33)$$

$$M_Z = C_{MZ}(\beta) \cdot A_{CS} \cdot L_a \cdot Q \quad (2-34)$$

2.2.5. Χειρισμοί – Μοντέλο Οδηγού

Το TruckSim περιέχει όλους τους χειρισμούς που θα έκανε ένας οδηγός: έλεγχος τιμονιού, φρενάρισμα, γκάζι, αλλαγή ταχυτήτων – έλεγχος συμπλέκτη κλπ. Υπάρχουν επίσης κλειστοί βρόγχοι ελέγχου (closed-loop controls) που ορίζουν συγκεκριμένη πορεία (steering - target path) ή ταχύτητα (φρένο - γκάζι). Η επιλογή αυτών των κλειστών βρόγχων δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης της επίδρασης του οδηγού που προσπαθεί να κρατήσει σταθερή πορεία ή ταχύτητα.

Οι τρεις βασικοί χειρισμοί στο TruckSim αφορούν στον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης, στον έλεγχο του συστήματος πέδησης και στην ταχύτητα.

Το μοντέλο οδηγού του προγράμματος (*driver model*) που αφορά στον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης, προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός “κανονικού” οδηγού, ο οποίος

έχει μια φυσιολογική (*normal*) συμπεριφορά. Αρχικά καθορίζεται η επιθυμητή πορεία (*target path*) αναφορικά με την πλευρική θέση (*lateral position, L*) ως προς τον άξονα της οδού. Το μοντέλο του οδηγού προσδιορίζει δυναμικά τη γωνία στροφής του τιμονιού (*steering wheel angle*), ώστε να προσπαθήσει να ακολουθήσει την πορεία αυτή. Εκτός της πορείας ορίζονται επίσης ο χρόνος αντίληψης (*preview time*) και ο χρόνος υστέρησης του οδηγού (*driver time lag*).

Η ταχύτητα μπορεί να τεθεί σταθερή (*constant target speed*), μεταβαλλόμενη συναρτήσει του χρόνου ή της απόστασης (*target speed vs time or station*), ή μπορεί να οριστεί μια αρχική ταχύτητα (*initial speed – open-loop control*) και το μοντέλο να υπολογίσει τις μεταβολές και τις διακυμάνσεις της συναρτήσει των εκάστοτε συνθηκών.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται πλήρης περιγραφή των παραμέτρων των πειραμάτων που προσομοιώθηκαν και παρουσιάζεται η επεξεργασία που έγινε για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα προσομοιώσεων TruckSim. Συγκεκριμένα, αναλύονται:

- τα στοιχεία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο βαρέων οχημάτων που επιλέχθηκαν,
- τα στοιχεία σχεδιασμού των σιγμοειδών καμπυλών που εξετάστηκαν και η επεξεργασία που έγινε για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα,
- οι ιδιότητες του οδοστρώματος σε κάθε πείραμα,
- οι επιθυμητές ιδιότητες της κίνησης των οχημάτων και οι απαιτούμενοι χειρισμοί που επιλέχθηκαν για την επίτευξή τους,
- οι λόγοι επιλογής κάθε στοιχείου, οι παραδοχές που έγιναν και οι περιορισμοί που εμφανίστηκαν σε κάθε ένα από τα ανωτέρω βήματα.

3.1. Βαρέα Οχήματα

3.1.1. Κίνηση βαρέων οχημάτων σε ανωφέρειες

Κατά την ανάβαση σε θετικές κατά μήκος κλίσεις, τα φορτηγά εμφανίζουν τα χαμηλότερα επίπεδα επίδοσης από κάθε άλλο τύπο οχήματος. Έτσι, σε απότομες ανωφέρειες μεγάλου μήκους, η απώλεια ταχύτητάς τους μπορεί να είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει διάφορα προβλήματα όπως παρακώλυση της κυκλοφορίας, μείωση του επιπέδου εξυπηρέτησης, αλλά κυρίως δημιουργία πιθανών κινδύνων σε άλλα οχήματα (Gillespie 1985). Ως κρίσιμο μήκος κλίσης επιλέγεται εκείνο το μήκος οδικού τμήματος στο οποίο εμφανίζεται μείωση της ταχύτητας κατά 10 mph (16 km/h) σε φορτηγό όχημα (φορτωμένο) με λόγο μεικτού βάρους προς ιπποδύναμη ίσο προς 300lb/hp (~182 kg/KW) (AASHTO '94).

Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ικανότητα ενός φορτηγού να διατηρήσει την ταχύτητά του σε μια ανωφέρεια (Harwood 2003), είναι:

- ο λόγος μεικτού βάρους – ιπποδύναμης,
- η επί τις εκατό (%) κατά μήκος κλίση του οδικού τμήματος,
- το μήκος της ανωφέρειας
- η αντίσταση κύλισης,
- η αντίσταση του αέρα,
- η ικανότητα του οδηγού.

Οι δύο τελευταίοι παράγοντες επηρεάζουν ελάχιστα. Έτσι η ταχύτητα ενός φορτηγού σε ανωφέρεια και για ευθύγραμμη κίνηση, μπορεί να προσδιορισθεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$mV = \frac{m \cdot g}{(W/P) \cdot V} - F_r - F_a - m \cdot g \cdot \sin s \quad (3-1)$$

όπου:

m = η μάζα του οχήματος (kg)

V = η ταχύτητα (km/h)

W/P = ο λόγος μεικτού βάρους – ιπποδύναμης (kg/KW)

F_r = η δύναμη αντίστασης κύλισης (N)

F_a = η αντίσταση του αέρα (N)

s = η κατά μήκος κλίση του οδοστρώματος (%)

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,8 m/s²)

Όπως φαίνεται από τη Σχέση 3-1, η ικανότητα ενός φορτηγού να διατηρήσει την ταχύτητά του σε ανηφορικά οδικά τμήματα, είναι άμεσα συσχετισμένη με το λόγο του μεικτού βάρους του προς την ιπποδύναμη της μηχανής του (W/ HP). Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης αυτός τόσο αυξάνεται η δυσκολία ανάβασης και μειώνεται αντίστοιχα η μέγιστη σταθερή ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί. Είναι εμφανές λοιπόν ότι ο συγκεκριμένος δείκτης – σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της ανωφέρειας - παίζει σημαντικό ρόλο στη διερεύνηση και για το λόγο αυτό επιλέγονται παρακάτω δύο οχήματα με διαφορετικούς λόγους μεικτού βάρους – ιπποδύναμης.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε κίνηση σε ευθυγραμμία και δεν λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της οριζοντιογραφίας. Παρόλα αυτά επισημαίνεται η επιρροή της κατά μήκους κλίσης και των περιορισμών που θέτει στη μέγιστη σταθερή ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί από ένα φορτηγό, κάτι που αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την προσέγγιση που γίνεται σε αυτή την εργασία.

3.1.2. Συνθήκες φόρτωσης

Όπως υπογραμμίζεται στη διδακτορική διατριβή του Σ. Μαυρομάτη με τίτλο “*Διερεύνηση ασφάλειας και λειτουργικότητας οδού δύο λωρίδων κυκλοφορίας ως προς την κίνηση διαζονικών οχημάτων σε αυξημένες κατά μήκος κλίσεις*”, η ασφάλεια κίνησης ενός οχήματος είναι συνάρτηση της απόστασης του κέντρου βάρους από τον κινητήριο άξονα. Συνυπολογίζοντας το γεγονός ότι τα φορτηγά είναι οπισθοκίνητα, αναμένονται κρίσιμες καταστάσεις - εκ πρώτης άποψης - όταν αυτά είναι αφόρτωτα. Στα συμπεράσματα της παραπάνω έρευνας επισημαίνεται ότι από την εξέταση των διαζονικών φορτηγών σε ακραίες συνθήκες φόρτωσης, προκύπτει ότι:

- κρίσιμες καταστάσεις εμφανίζονται στα αφόρτωτα οχήματα δεδομένου ότι η εκμετάλλευση της ιπποδύναμης των αφόρτωντων οχημάτων δεν αγγίζει το 100%,
- τα αφόρτωτα οχήματα δημιουργούν κρίσιμες καταστάσεις τις οποίες δεν δύνανται να καλύψουν οι υπάρχοντες κανονισμοί χάραξης και για το λόγο αυτό προτείνεται η θέσπιση ορίου ταχύτητας ειδικά για φορτηγά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, αλλά και το γεγονός ότι στα φορτωμένα οχήματα το επιπλέον βάρος αυξάνει την εδαφική πίεση και συνεπώς και την τριβή, τα οχήματα εξετάστηκαν *αφόρτωτα*. Με βάση αυτή τη θεώρηση δεν αναμένεται κίνδυνος ανατροπής, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα.

3.1.3. Περιορισμοί

Ήδη από την εισαγωγή της εργασίας, επισημάνθηκε η αδυναμία να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα σχετικά με εξειδικευμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των φορτηγών, τα οποία όμως διατίθενται από το πρόγραμμα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι κοινοί τύποι φορτηγών από τις βιβλιοθήκες του προγράμματος οι οποίοι είναι αντιπροσωπευτικοί του στόλου των βαρέων οχημάτων παγκοσμίως. Όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά, αλλά και όλα τα στοιχεία για τη διαστασιολόγηση των οχημάτων λήφθηκαν από το πρόγραμμα και παρουσιάζονται παρακάτω.

Το τυπικό διαζονικό φορτηγό και το τριαζονικό λεωφορείο τα οποία παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της έρευνας. Να σημειωθεί ότι και τα δύο οχήματα έχουν συνολική μάζα άνω των 3,5 τόνων.

3.1.4. Διαξονικό φορτηγό – Single unit with 2 axles

Το διαξονικό φορτηγό που φαίνεται στη Εικόνα 3.1 επιλέχθηκε ως ένα από τα πιο κοινά βαρέα οχήματα που κυκλοφορούν παγκοσμίως. Στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 3.1) παρατίθενται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3. 1: Διαξονικό φορτηγό από τις βιβλιοθήκες του TruckSim (TruckSim User Manual)

Ο λόγος μεικτού βάρους προς την ιπποδύναμη της μηχανής για το συγκεκριμένο όχημα, το οποίο είναι αφόρτωτο, είναι 34 kg/ KW.

Πίνακας 3. 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά διαξονικού φορτηγού

Περιγραφή	Τιμή
Μεταξόνιο (m)	5,000
Εμπρόσθιο μετατρόχιο (m)	2,030
Οπίσθιο μετατρόχιο (m)	1,863
Απόσταση κέντρου βάρους από τον εμπρόσθιο	1,113
Απόσταση κέντρου βάρους από το έδαφος (m)	1,173
Ύψος κέντρου περιστροφής εμπρόσθιου άξονα (m)	0,510
Ύψος κέντρου περιστροφής οπίσθιων αξόνων (m)	0,528
Δυναμική ακτίνα κύλισης τροχού (m)	0,510
Μετωπική επιφάνεια (m ²)	6,800
Συνολική μάζα οχήματος (kgr)	5984
Μη ανηρτημένη μάζα εμπρόσθιου άξονα (kgr)	527
Μη ανηρτημένη μάζα οπίσθιων αξόνων (kgr)	1000
Τύπος κινητήρα	175 KW, 7 ταχύτητες Οπισθοκίνητο

Ο οπίσθιος άξονας διαθέτει διπλά ελαστικά σε απόσταση 310 mm.

3.1.5. Τριαξονικό λεωφορείο – Tour bus with 3 axles

Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται το τριαξονικό λεωφορείο που εξετάστηκε. Αντίστοιχα, ο Πίνακας 3.2 περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 3. 2: Τριαξονικό λεωφορείο από τις βιβλιοθήκες του TruckSim (TruckSim User Manual)

Ο λόγος μεικτού βάρους προς την ιπποδύναμη της μηχανής για αυτό το όχημα είναι 54 kg/KW. Ο δεύτερος άξονας διαθέτει διπλά ελαστικά σε απόσταση 310 mm.

Πίνακας 3. 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά τριαξονικού λεωφορείου

Περιγραφή	Τιμή
Μεταξόνιο (m)	5,790
Εμπρόσθιο μετατρόχιο (m)	6,970
Οπίσθιο μετατρόχιο (m)	1,950
Απόσταση κέντρου βάρους από τον εμπρόσθιο άξονα (m)	1,863
Απόσταση κέντρου βάρους από το έδαφος (m)	1,863
Ύψος κέντρου περιστροφής εμπρόσθιου άξονα (m)	3,500
Ύψος κέντρου περιστροφής οπίσθιων αξόνων (m)	1,250
Δυναμική ακτίνα κύλισης τροχού (m)	0,528
Μετωπική επιφάνεια (m ²)	0,510
Συνολική μάζα οχήματος (kgr)	0,510
Μη ανηρτημένη μάζα εμπρόσθιου άξονα (kgr)	0,510
Μη ανηρτημένη μάζα οπίσθιων αξόνων (kgr)	7,300
	9463
	578
	1150
	735
Τύπος κινητήρα	175 KW, 7 ταχύτητες, 6x2, 2ος άξονας

3.2. Σιγμοειδείς Καμπύλες

Οι σιγμοειδείς καμπύλες αποτελούνται από την αλληλουχία δύο αντίρροπων τόξων με ή χωρίς παρεμβολή ευθύγραμμου τμήματος. Χρησιμοποιούνται σε όλες τις κατηγορίες οδών, είτε στις βασικές αρτηρίες, είτε σε ράμπες ανισόπεδων κόμβων. Οι καμπύλες αυτές

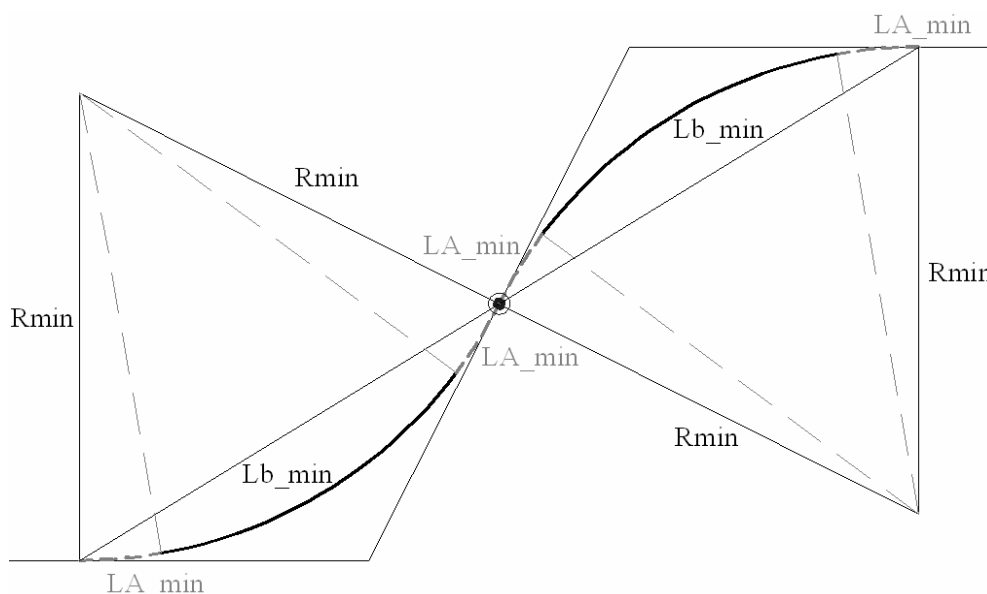
χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έλλειψης επαρκούς χώρου για την ανάπτυξη της χάραξης, καθώς η απαίτησή τους σε έκταση είναι ελάχιστη. Στην Ελλάδα λόγω του έντονου ανάγλυφου οι σιγμοειδείς καμπύλες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή, ιδιαίτερα σε ορεινές περιοχές.

3.2.1. Σιγμοειδείς καμπύλες χωρίς παρεμβολή ευθύγραμμου τμήματος και σταθερή κλίση στη μηκοτομή

Σε μελέτη που έκαναν οι Peng, Xu, Jiang και Chen με τίτλο “*Considering the Hysteresis Effect of Lateral Deformation of pneumatic Tires in Reverse Curves Design and improvement*”, εξέτασαν δυο υφιστάμενα τμήματα του δευτερεύοντος κινέζικου οδικού δικτύου, τα οποία ανήκουν στις οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας, μη διαχωρισμένου οδοστρώματος και ταχύτητας μελέτης 60 km/h. Τα δύο αυτά τμήματα συνίστανται σε σιγμοειδείς καμπύλες χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα και προσομοιώθηκαν μέσω του προγράμματος ADAMS. Μέσω της προσομοίωσης διερευνήθηκε η ασφάλεια κίνησης ενός τυπικού φορτηγού οχήματος στα παραπάνω τμήματα. Παρόλο που το αντικείμενο της έρευνας επικεντρώνεται στην ανάλυση της επιρροής της πλευρικής παραμόρφωσης του ελαστικού στην ασφάλεια της κίνησης, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν καταδεικνύουν ότι η επιλογή των γεωμετρικών παραμέτρων και στοιχείων σε αυτές τις περιπτώσεις είναι κρίσιμη. Με βάση τα αποτελέσματα της αναφοράς τους, οι συγγραφείς προτείνουν μέτρα ασφαλείας όπως: αύξηση της οριζόντιας ακτίνας, αύξηση του μήκους της σιγμοειδούς, παρεμβολή ευθύγραμμου τμήματος μεταξύ των κυκλικών τόξων και υποχρεωτικά όρια ταχύτητας σε αυτές καμπύλες.

Ένας ακόμη επικίνδυνος συνδυασμός, είναι αυτός της καμπύλης σταθερής ακτίνας στην οριζοντιογραφία και σταθερής κλίσης στην μηκοτομή, ο οποίος αποτελεί την πιο κρίσιμη περίπτωση από άποψη ασφαλείας (Μαυρομάτης 2002). Η κλίση στην επιτροχία κίνηση και η καμπύλη σταθερής ακτίνας στην εγκάρσια διεύθυνση, δημιουργούν απαιτήσεις για μέγιστα αποθέματα του αντίστοιχου συντελεστή πρόσφυσης.

Έτσι, στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι συνδυασμοί σιγμοειδών καμπυλών χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα (Σχήμα 3.1) και σταθερής (θετικής) κλίσης στη μηκοτομή, και επιδιώκεται ο έλεγχος των παραμέτρων σχεδιασμού τέτοιου είδους χαράξεων.



Σχήμα 3. 1: Σιγμοειδείς καμπύλη χωρίς ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα

3.2.2. Στοιχεία σχεδιασμού

Για τον έλεγχο των παραμέτρων σχεδιασμού των σιγμοειδών καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμοί ελαχίστων τιμών των γεωμετρικών μεγεθών (R_{\min} , A_{\min} , L_{\min}) βάση των ελληνικών κανονισμών χαράξεων οδών (ΟΜΟΕ), που αφορούν σε υπεραστικές οδούς της Ομάδας Α (ΟΜΟΕ – ΛΚΟΔ), για κατηγορίες οδού ΑΙΙ έως ΑΙΥ, και χαρακτηρίζονται από ταχύτητες μελέτης 60 km/h έως 90 km/h.

Τα στοιχεία για τις οριζόντιες χαράξεις φαίνονται στον Πίνακα 3.3. Οι τιμές αυτές αφορούν σε ορεινά εδάφη.

Πίνακας 3. 3: Οριζοντιογραφικά στοιχεία σχεδιασμού σιγμοειδών καμπυλών για οδούς της ομάδας Α (Ορεινά εδάφη)

V_e (km/h)	R_{\min} (m)	L_{b_min} (m)	A_{\min} (m)	L_{A_min} (m)
60	140	33,333	46,667	15,556
70	200	38,889	66,667	22,222
80	280	44,444	93,333	31,111
90	370	50,000	123,333	41,111

όπου:

V_e = η ταχύτητα μελέτης (km/h)

R_{\min} = η ελάχιστη ακτίνα που αντιστοιχεί στην ταχύτητα μελέτης (m)

L_{b_min} = το ελάχιστο μήκος κυκλικού τόξου, το οποίο είναι ίσο με το μήκος που διανύεται σε 2 δευτερόλεπτα από όχημα κινούμενο με την ταχύτητα μελέτης (m)

A_{\min} = η ελάχιστη παράμετρος κλωθοειδούς, ίση με το ένα τρίτο της ακτίνας ($R/3$) στο πέρας της κλωθοειδούς (m)

L_{A_min} = το ελάχιστο μήκος τόξου της κλωθοειδούς, το οποίο προκύπτει από τον τύπο $A^2 = RL$ (m)

Οι παραπάνω οριζοντιογραφίες συνοδεύονται από ανωφέρεις σταθερής κλίσης, που ξεκινούν από 0% (επίπεδο) και φθάνουν στη μέγιστη επιτρεπόμενη από τους κανονισμούς κλίση (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3. 4: Μέγιστες κατά μήκος κλίσεις για οδούς της ομάδας Α (Ορεινά εδάφη)

V_e (km/h)	S_{\max} (%)
60	9
70	8
80	7
90	7

Οι τυπικές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν (ΟΜΟΕ - Δ) είναι δύο λωρίδων και ενιαίας επιφάνεια κυκλοφορίας. Οι επικλίσεις δόθηκαν σύμφωνα με τα διαγράμματα προσδιορισμού της επίκλισης σε καμπύλες υπεραστικών οδών της ομάδας Α των ΟΜΟΕ.

Οι χαράξεις αυτές που συνδυάζουν τις ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές παραμέτρων των γεωμετρικών μεγεθών καταστρώθηκαν στο πρόγραμμα σχεδιασμού οδικών έργων ΟΔΟΣ. Από τους πίνακες που εξάγει το πρόγραμμα λήφθηκαν τα στοιχεία των διατομών, τα οποία

αξιοποιήθηκαν στη συνέχεια για τη δημιουργία των τρισδιάστατων χαράξεων στο TruckSim. Οι διατομές τοποθετήθηκαν στο ΟΔΟΣ ανά 50 πόντους, και για κάθε διατομή λήφθηκαν:

- η χιλιομετρική θέση του πασάλου (m),
- οι συντεταγμένες του πασάλου (m),
- το υψόμετρο ερυθράς σε κάθε πάσαλο (m),
- η επίκλιση κάθε οριογραμμής στις θέσεις των πασάλων (m),
- τα υψόμετρα των οριογραμμών στις θέσεις των πασάλων (m).

Οι συντεταγμένες των πασάλων εισήχθησαν στο πρόγραμμα ορίζοντας την οριζοντιογραφία του άξονα, καθώς και το μήκος S, το οποίο υπολογίζεται μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά στη χιλιομετρική θέση επί του άξονα. Με βάση το μήκος αυτό ορίστηκε στη συνέχεια η κατακόρυφη γεωμετρία του άξονα. Καθώς η κλίσεις στη μηκοτομή είναι σταθερές, χρειάστηκαν μόνο τα υψόμετρα του πρώτου και του τελευταίου σημείου στις χιλιομετρικές θέσεις της αρχής και του τέλους κάθε χάραξης. Για τον ορισμό των επικλίσεων χρησιμοποιήθηκαν τα υψόμετρα των οριογραμμών στις χιλιομετρικές θέσεις που αντιστοιχούσαν στους πασσάλους (ανά 50 cm).

3.3. Ιδιότητες Οδοστρώματος

Εκτός των χαρακτηριστικών του οχήματος, ο δεύτερος παράγοντας που καθορίζει την ισορροπία μεταξύ της απαιτούμενης και της διαθέσιμης πρόσφυσης είναι το έδαφος και οι ιδιότητες της επιφάνειάς του.

Η σχέση μεταξύ του μέγιστου απαιτούμενου συντελεστή πρόσφυσης (peak friction coefficient - f_p) και του συντελεστή τριβής ολίσθησης (sliding friction coefficient - f_s) ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του ελαστικού και την κατάσταση του οδοστρώματος. Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή πρόσφυσης που εφαρμόζονται στα επιβατηγά οχήματα, ξεπερνούν τον συντελεστή ολίσθησης κατά ένα παράγοντα 10% - 45%. Έτσι, οι χαράξεις εξετάστηκαν για ευμενές (1,45) και δυσμενές (1,10) οδόστρωμα, ώστε να συμπεριληφθούν και οι δύο ακραίες περιπτώσεις.

Τα ελαστικά των φορτηγών είναι κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να μη φθείρονται εύκολα. Για το λόγο αυτό τείνουν να έχουν μικρότερους συντελεστές τριβής σε υγρό οδόστρωμα από ότι τα ελαστικά των επιβατηγών (Harwood 2003). Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα ελαστικά των φορτηγών αναπτύσσουν συντελεστές τριβής της τάξης του 70% των ελαστικών των επιβατηγών, οι μέγιστες τιμές του συντελεστή πρόσφυσης για ευμενές και δυσμενές οδόστρωμα αντίστοιχα προέκυψαν από τη σχέση:

$$f_p = (0,70) \cdot (1,45) \cdot f_s \quad \text{και} \quad f_p = (0,70) \cdot (1,10) \cdot f_s \quad (3-2)$$

Καθώς τα οδοστρώματα έχουν μικρότερους συντελεστές τριβής υπό υγρές συνθήκες παρά όταν είναι στεγνά, οι συντελεστές τριβής υπολογίστηκαν βάση των κριτηρίων σχεδιασμού οριζοντίων καμπυλών του AASHTO Green Book για υγρό οδόστρωμα (Πίνακας 3.5).

Πίνακας 3. 5: Συντελεστές τριβής (Peak friction values - AASHTO Green Book)

V_e (km/ h)	f_{peak} (Ευμενές Οδόστρωμα)	f_{peak} (Δυσμενές Οδόστρωμα)
60	0,33	0,25
70	0,31	0,24
80	0,30	0,23
90	0,29	0,22

3.4. Χειρισμοί και Μοντέλο Οδηγού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκαν τα μοντέλα που χρησιμοποιεί το TruckSim για να προσομοιώσει τους χειρισμούς που θα έκανε ο οδηγός. Όπως λοιπόν αναφέρθηκε, οι τρεις βασικοί χειρισμοί αφορούν στον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης, στον έλεγχο του συστήματος πέδησης και στην ταχύτητα.

Σταθερή θέση στο μέσο της λωρίδας κυκλοφορίας επιλέχθηκε ως επιθυμητή πορεία (target path). Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του οδηγού χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τιμές:

- χρόνος αντίληψης (preview time) = 1,5 sec
- χρόνος υστέρησης του οδηγού (driver time lag) = 0,001 sec

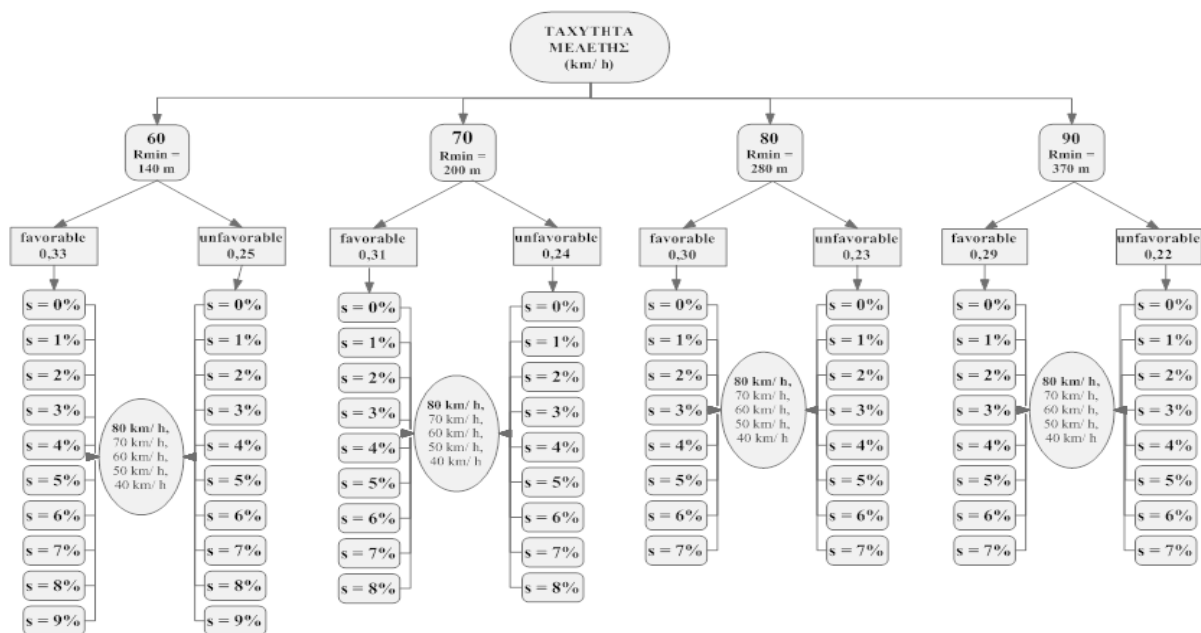
Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν μια ομαλή – φυσιολογική συμπεριφορά του οδηγού (normal driver).

Όσον αφορά την ταχύτητα, αρχικά εξετάστηκε αν τα φορτηγά μπορούσαν να κινηθούν κρατώντας σταθερή την ταχύτητα των 80 km/h, η οποία είναι η επιτρεπόμενη ταχύτητα για φορτηγά άνω των 3,5 τόνων για οδούς ταχείας κυκλοφορίας και άλλες οδούς. Έτσι, όλα τα πειράματα ξεκίνησαν με μοντέλο σταθερής ταχύτητας στα 80 km/h. Αν αυτή η ταχύτητα δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί ή οδηγούσε σε μη ασφαλείς καταστάσεις, τα πειράματα επαναλαμβάνονταν σε χαμηλότερες ταχύτητες (με βήμα ανά 10 km/h), έως ότου προσδιοριζόταν μια ασφαλής ταχύτητα.

Καθώς η παρούσα εργασία ασχολείται με ανωφέρειες, και επιδιώκεται ο προσδιορισμός της μέγιστης δυνατής σταθερής ταχύτητα των οχημάτων, η κίνηση εξετάστηκε υπό την επίδραση προωθητικής ροπής και έτσι δεν χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πέδησης.

Τέλος, να σημειωθεί ότι δεδομένου ότι η αντίσταση του αέρα που δέχεται ένα όχημα κινούμενο σε μία χάραξη εξαρτάται από την οριζοντιογραφία της χάραξης, η παρουσία του ανέμου θεωρήθηκε μηδενική, και τα πειράματα διεξήχθησαν σε συνθήκες άπνοιας (ταχύτητα ανέμου ίση σε μέτρο με την ταχύτητα του οχήματος).

3.5. Γενική Επισκόπηση Πειραμάτων



Σχήμα 3. 2: Διάγραμμα αναπαράστασης πειραμάτων

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα πειράματα που έλαβαν χώρα στην έρευνα. Στο παρόν κεφάλαιο σκιαγραφείται η μεθοδολογία προσέγγισης για τη διερεύνηση της ασφάλειας κίνησης επί των σιγμοειδών καμπυλών και παρουσιάζονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του σκοπού αυτού.

4.1. Σκοπός

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στόχος της παρούσας μελέτης είναι να εξετάσει κατά πόσο τα δύο χαρακτηριστικά οχήματα που επιλέχθηκαν, μπορούν να κινηθούν με ασφάλεια στις σιγμοειδείς καμπύλες που σχεδιάστηκαν, για το επιτρεπόμενο εύρος κατά μήκος κλίσεων.

Η παραμονή του οχήματος στην προδιαγεγραμμένη πορεία είναι αναγκαία προκειμένου να θεωρηθεί η κίνησή του ασφαλής. Η εκτροπή του οχήματος από την επιθυμητή και προδιαγεγραμμένη πορεία, οφείλεται είτε σε ολίσθηση των ελαστικών, είτε στην ανατροπή του, και δύναται να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα. Έτσι, για να διερευνηθεί η ασφάλεια κίνησης επί των σιγμοειδών καμπυλών και να ελεγχθούν συγχρόνως οι παράμετροι σχεδιασμού τους, ζωτικής σημασίας είναι:

- να προσδιορισθεί η πρόσφυση και η θέση των τροχών σε σχέση με το οδόστρωμα,
- να καθορισθεί για τα οχήματα μια *ταχύτητα ασφαλείας* (σταθερή) για την οποία:
 - η ολίσθηση σε κάθε τροχό θα είναι μηδενική,
 - δεν θα παρατηρείται αποκόλλησή του από το έδαφος.

Να σημειωθεί ότι και σε περίπτωση μη εκτροπής του οχήματος από την τροχιά του, η απώλεια πρόσφυσης σε κάποιο τροχό σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της χάραξης, συνιστά μια δυσμενή κατάσταση η οποία θεωρείται απαγορευτική.

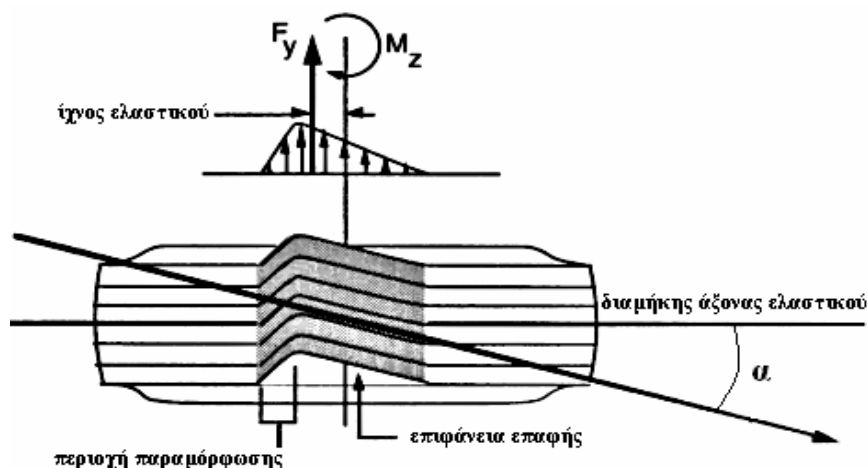
4.2. Γενικά

4.2.1. Κίνηση οχήματος σε καμπύλη τροχιά

Κατά την κίνηση ενός οχήματος σε καμπύλη τροχιά διακρίνονται δύο περιπτώσεις (Μαυρομάτης 2002):

- η ταχύτητα του οχήματος είναι μικρή με αποτέλεσμα να μην αναπτύσσεται πλευρική επιτάχυνση (αμελητέα),
- η ταχύτητα του οχήματος είναι υψηλή, και έτσι εμφανίζεται πλευρική επιτάχυνση. Προκειμένου το όχημα να μπορέσει να κινηθεί με ασφάλεια σε όλο το μήκος της καμπύλης, απαιτείται η ανάπτυξη σε κάθε ελαστικό, εκτός της επιτρόχιας στατικής τριβής, και μιας πλευρικής δύναμης (εγκάρσια στατική τριβή).

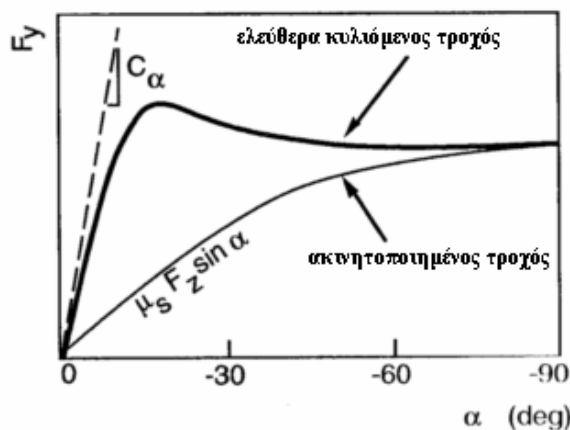
Όταν το όχημα κινείται με μικρές ταχύτητες, η διεύθυνση της ταχύτητας των εμπρόσθιων τροχών συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα τους. Οι εξωτερικοί στην καμπύλη τροχοί κινούνται σε κύκλο μεγαλύτερης ακτίνας απ' ό,τι οι εσωτερικοί. Στις υψηλές ταχύτητες όπου η πλευρική επιτάχυνση (φυγόκεντρος) είναι εμφανής, αναπτύσσεται στο ελαστικό η εγκάρσια στατική τριβή F_Y (Σχήμα 4.1). Η εμφανιζόμενη πλευρική δύναμη έχει φορά προς το εσωτερικό της καμπύλης προκαλώντας έτσι παραμόρφωση του ελαστικού στην περιοχή του ίχνους του με αποτέλεσμα ο τροχός να αναγκάζεται να κινηθεί σε άξονα που σχηματίζει γωνία α με τον διαμήκη άξονα του. Η γωνία αυτή ονομάζεται *γωνία πλαγιοδρόμησης του ελαστικού*.



Σχήμα 4. 1: Παραμόρφωση κυλιόμενου τροχού υπό την επίδραση πλευρικής δύναμης (Gillespie 1992)

Όταν η πλευρική δύναμη που δέχεται ένα ελαστικό υπερβεί τη διαθέσιμη τιμή πλευρικής τριβής, τότε το ελαστικό ολισθαίνει κατά τον κάθετο άξονα, ενώ συνεχίζει να κυλιέται κατά τον διαμήκη. Έτσι το σημείο εφαρμογής της F_y είναι μετατοπισμένο προς τα πίσω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 (Μαυρομάτης 2002).

Σημαντικό ρόλο στον έλεγχο και τη σταθερότητα του οχήματος παίζει η σχέση μεταξύ εγκάρσιας στατικής τριβής και γωνίας πλαγιοδρόμησης των τροχών. Για μεγάλες τιμές της γωνίας πλαγιοδρόμησης, η τιμή της εγκάρσιας δύναμης πλησιάζει τις τιμές που αυτή παίρνει με ακινητοποιημένους τροχούς (Σχήμα 4.2). Η κλίση της καμπύλης στο Σχήμα 4.2, η οποία έχει εκτιμηθεί για μηδενική γωνία πλαγιοδρόμησης, ορίζεται ως συντελεστής ακαμψίας του ελαστικού (cornering stiffness - C_α) (Gillespie 1992).



Σχήμα 4. 2: Ιδιότητες πλευρικής δύναμης ελαστικού (Gillespie 1992)

4.2.2. Πρόσφυση

Όλοι οι χειρισμοί που κάνει ένας οδηγός προκειμένου να ελέγξει ένα όχημα - είτε αυτοί αφορούν στην πορεία του οχήματος (κίνηση ευθεία, στροφή), είτε στον έλεγχο της ταχύτητας του οχήματος (επιτάχυνση, επιβράδυνση, φρενάρισμα) - εκφράζονται μέσω των ελαστικών. Οι περισσότερες δυνάμεις που καθορίζουν την κινητική κατάσταση ενός οχήματος αναπτύσσονται μέσω του εδάφους στα ελαστικά. Μέσω της κατακόρυφης δύναμης που παραλαμβάνουν τα ελαστικά από το όχημα, αναπτύσσουν πρόσφυση. Η δύναμη της πρόσφυσης είναι αναγκαία ώστε να εκτελεστούν επιτυχώς οι εντολές του οδηγού. Καθώς η

τιμή της πρόσφυσης μεταβάλλεται συνεχώς κατά την κίνηση του οχήματος, είναι σημαντικό τόσο το όχημα, όσο και ο οδηγός να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις μεταβαλλόμενες ανάγκες, ούτως ώστε να μη απολεσθεί η πρόσφυση μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος.

Η τάση του οχήματος φύγει εκτός δρόμου (skidding off road) πρέπει να εμποδίζεται από την τριβή μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος. Το όχημα θα πλαγιολισθήσει, εκτός αν ο συντελεστής τριβής μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος ξεπερνά την πλευρική απαίτηση σε τριβή (Harwood 2003).

Μια λοιπόν από τις βασικές παραμέτρους στην ασφάλεια κίνησης των οχημάτων είναι η πρόσφυση του οδοστρώματος. Η πρόσφυση στην οδοποιία, χαρακτηρίζεται ως εκείνη η φυσική κατάσταση που εμφανίζεται στην κοινή επιφάνεια ελαστικού και οδοστρώματος και η οποία οφείλεται στη συνάφεια, στη στατική τριβή και στην αντίσταση λόγω ταχύτητας (ΟΜΟΕ-Χ). Εκφράζεται με το συντελεστή τριβής ολίσθησης.

4.2.3. Ολίσθηση

Η ύπαρξη ικανής πρόσφυσης μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος είναι αναγκαία προκειμένου να αποφευχθεί η ολίσθηση. Κατά την κίνηση ενός οχήματος σε καμπύλη, ο απαιτούμενος συντελεστής τριβής κατά την εγκάρσια κατεύθυνση δίνεται από τη γνωστή εξίσωση της δυναμικής της κίνησης (ΟΜΟΕ-Χ):

$$f_R = \frac{V^2}{127 \cdot R} - q \quad (4-1)$$

όπου:

f_R = ο συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής

q = η επίκλιση της οδού (%)

V = η ταχύτητα του οχήματος (m/ sec)

R = η ακτίνα της οριζόντιας καμπύλης (m)

Από το μετασχηματισμό της παραπάνω σχέσης ως προς R , προκύπτει η εξίσωση προσδιορισμού των ελαχίστων τιμών για τις ακτίνες οριζόντιας καμπύλης. Οι δύο αυτές σχέσεις, που χρησιμοποιούνται από τους κανονισμούς μέχρι σήμερα, υπόκεινται στους περιορισμούς που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και αγνοούν την επίδραση της κατά μήκους κλίσεως. Οι ελάχιστες τιμές που προκύπτουν από αυτή τη σχέση, ελέγχονται στην παρούσα μελέτη ως προς την επάρκειά τους κάτω από τις συνθήκες που αναλύθηκαν (συνδυασμός με άλλα γεωμετρικά ελάχιστα, κατά μήκος κλίση, κίνηση βαρέων οχημάτων).

Μέσω της βοήθειας του προγράμματος προσομοίωσης, και με χρήση των τεχνικών που περιγράφονται παρακάτω, θα εξεταστεί κατά πόσο η παρουσία της κατά μήκους κλίσεως αυξάνει την απαίτηση σε εγκάρσια και διαμήκη πρόσφυση, ενώ θα συμπεριληφθούν και οι δεσμεύσεις που επιβάλλουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος, το οποίο στην υπάρχουσα κατάσταση θεωρείται αδιάστατο υλικό σημείο με τη μάζα του συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του.

4.2.4. Ανατροπή

Η ανατροπή μπορεί να οριστεί ως το φαινόμενο κατά το οποίο το όχημα περιστρέφεται κατά 90 και πλέον μοίρες περί το διαμήκη άξονά του, έτσι ώστε το «σώμα» του έρχεται σε

επαφή με το έδαφος. Η ανατροπή λαμβάνει χώρα όταν ένας ή περισσότεροι τροχοί του οχήματος χάσουν την επαφή τους με το έδαφος.

Το φαινόμενο αυτό είναι συχνό κυρίως σε φορτηγά οχήματα δεδομένου του υψηλού κέντρου βάρους που παρουσιάζουν ειδικά όταν είναι φορτωμένα (Μαυρομάτης 2002). Στην παρούσα εργασία εξετάζονται αφόρτιστα οχήματα και ως εκ τούτου δεν αναμένεται κίνδυνος ανατροπής. Παρόλα αυτά γίνεται έλεγχος για πιθανή αποκόλληση τροχού από το οδόστρωμα ($F_z = 0$).

4.3. Εξαγόμενα TruckSim

Προτού αναλυθούν οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν τα δεδομένα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα για κάθε ένα από τα πειράματα προσομοίωσης.

Τα εξαγόμενα του TruckSim αφορούν σε:

- διαγράμματα που αναπαριστούν την «πορεία» κάθε μεταβλητής συναρτήσει του χρόνου,
- πίνακες με τις αριθμητικές τιμές των μεταβλητών που αναπαραστάθηκαν μέσω των διαγραμμάτων.

Η εντολή που δόθηκε στο πρόγραμμα ήταν να υπολογίζει στο μαθηματικό μοντέλο τις τιμές των μεταβλητών με βήμα χρόνου 0,001 δευτερόλεπτο (συχνότητα = 1000 Hz), αλλά να δίνει αποτελέσματα στο αρχείο εξόδου κάθε 0,25 δευτερόλεπτα (συχνότητα = 4 Hz). Αυτό σημαίνει ότι οι πίνακες που προέκυψαν εμφανίζουν τιμές κάθε ένα τέταρτο του δευτερολέπτου.

Τα δεδομένα αυτά αξιοποιήθηκαν μέσω των τεχνικών που περιγράφονται στην επόμενη ενότητα, ώστε να γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα δύο οχήματα και να αξιολογηθούν τα δυναμικά στοιχεία που προέκυψαν, ώστε να διαπιστωθούν τελικά τα προβλήματα που προκύπτουν για κάθε χάραξη.

4.3.1. Μεταβλητές οχήματος

Οι μεταβλητές που εκτυπώθηκαν για την κίνηση του οχήματος, είναι:

- η διαμήκης ταχύτητα – longitudinal speed V_x (km/ h),
- η πλευρική επιτάχυνση – lateral acceleration A_y (g),
- η γωνία στροφής του τιμονιού – steering wheel angle (deg),
- το ποσοστό εκτροπής (άξονας Z) – yaw rate (deg/ s),
- η γωνία ολίσθησης του οχήματος (deg),
- η τροχιά κάθε άξονα συναρτήσει και της επιθυμητής προδιαγεγραμμένης πορείας του οχήματος – trajectory (m)

4.3.2. Μεταβλητές ελαστικών

Αντίστοιχα οι μεταβλητές που εκτυπώθηκαν για κάθε τροχό – ελαστικό, είναι:

- οι γωνίες ολίσθησης – alpha slip angles (deg),
- οι πλευρικές ταχύτητες – lateral speed (km/ h),
- οι διαμήκεις ταχύτητες – longitudinal speed (km/ h),
- οι διαμήκεις δυνάμεις – longitudinal tire forces F_x (N),
- οι πλευρικές δυνάμεις – lateral tire forces F_y (N),
- οι κατακόρυφες δυνάμεις – vertical tire forces F_z (N).

4.4. Τεχνικές Διερεύνησης της Ολίσθησης σε κάθε Τροχή

4.4.1. Η σχέση του Krempel

Η δύναμη της τριβής που αναπτύσσεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των ελαστικών και του οδοστρώματος, αναφέρεται στη διαμήκη και την εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση. Η ασφαλής κίνηση ενός οχήματος που κινείται σε μια καμπύλη επιτυγχάνεται μόνο όταν η δύναμη της τριβής αποτρέπει την ολίσθηση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (Μαυρομάτης 2002).

Κατά την κίνηση ενός οχήματος σε μια καμπύλη, τα αποθέματα της τριβής μπορούν να διατεθούν στις δύο διευθύνσεις, αρκεί να τηρείται η παρακάτω σχέση που εισήχθη από τον Krempel:

$$\left(\frac{f_T}{f_{T,\max}}\right)^2 + \left(\frac{f_R}{f_{R,\max}}\right)^2 \leq 1 \quad (4-2)$$

όπου:

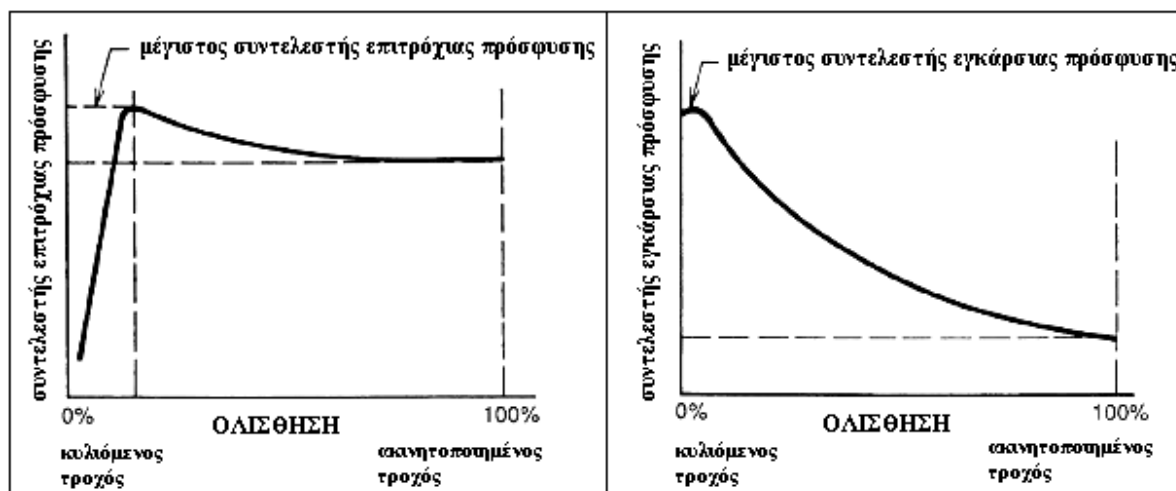
f_T = ο απαιτούμενος εφαπτομενικός συντελεστής τριβής

f_R = ο απαιτούμενος εγκάρσιος συντελεστής τριβής

Η παραπάνω σχέση δείχνει την αλληλεξάρτηση μεταξύ του εφαπτομενικού και εγκάρσιου συντελεστή τριβής. Η παραβίαση ή μη της Σχέσης 4-2, αποτελεί κριτήριο για την ύπαρξη ολίσθησης στον τροχή που εξετάζεται.

Έτσι, από τις δυνάμεις που ασκούνται στα ελαστικά (F_X , F_Y , F_Z) υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι συντελεστές τριβής (εφαπτομενικός και εγκάρσιος) – κάθε 0,25 sec – για τις δύο κατευθύνσεις:

$$f_T = \frac{F_X}{F_Z} \quad \text{και} \quad f_R = \frac{F_Y}{F_Z} \quad (4-3)$$

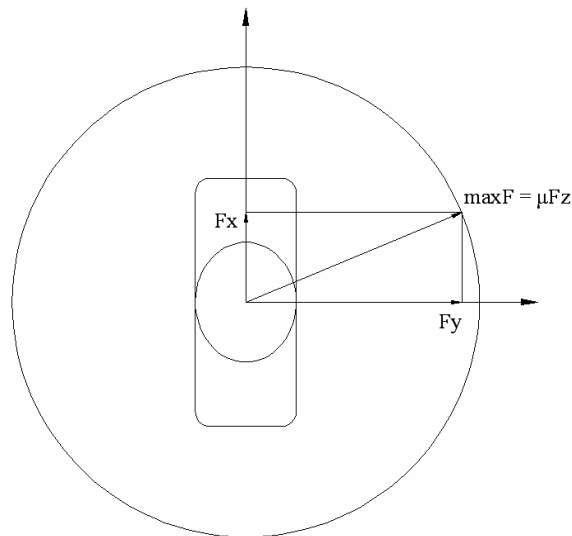


Σχήμα 4. 3: Διακύμανση συντελεστών επιτροχίας και εγκάρσιας πρόσφυσης συναρτήσει της διολίσθησης (Harwood 2003)

Οι τιμές για τους μέγιστους επιτρεπόμενους συντελεστές ($f_{T,max}$, $f_{R,max}$) δόθηκαν στον Πίνακα 3.5 του προηγούμενου κεφαλαίου για ευμενές και δυσμενές οδόστρωμα, και θεωρείται ότι είναι ίδιες στις δύο κατευθύνσεις ($f_{T,max} = f_{R,max}$).

4.4.2. Ο κύκλος της πρόσφυσης ελαστικού

Ο κύκλος της πρόσφυσης του ελαστικού (Σχήμα 4.4) δείχνει ότι οποιοσδήποτε συνδυασμός διαμήκους και πλευρικής δύναμης δίνει συνισταμένη μεγαλύτερη της ακτίνας του κύκλου, οδηγεί σε απώλεια της πρόσφυσης και συνεπώς σε ασταθείς και επικίνδυνες καταστάσεις. Η ακτίνα του κύκλου αντιπροσωπεύει τη μέγιστη συνισταμένη δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς να ολισθήσει το ελαστικό.



Σχήμα 4. 4: Ο κύκλος της πρόσφυσης ενός ελαστικού

Όταν ένα όχημα κινείται σε καμπύλη τροχιά χωρίς να επιταχύνει, τότε στα ελαστικά ασκούνται εγκάρσιες δυνάμεις (η συνισταμένη των οποίων είναι η κεντρομόλος). Αν σε κάποιο τροχό η εγκάρσια δύναμη υπερβεί την ακτίνα του αντίστοιχου κύκλου πρόσφυσης, τότε ο τροχός αυτός χάνει την πρόσφυσή του.

Η μέγιστη συνισταμένη δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς να ολισθήσει το ελαστικό ισούται με το συντελεστή τριβής επί το κάθετο φορτίο που παραλαμβάνει ο τροχός:

$$\max F = f_{R,max} \cdot F_Z \quad (4-4)$$

Η Σχέση 4-4 φανερώνει τη σημασία ύπαρξης μεγάλου συντελεστή πρόσφυσης, ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την κατακόρυφη δύναμη, θα εξασφαλίζει υψηλά όρια πρόσφυσης, και συνεπώς θα επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων στα ελαστικά χωρίς τον κίνδυνο της ολίσθησης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται αρκετά χαμηλοί συντελεστές (υγρό οδόστρωμα, Πίνακας 3.5), οι οποίοι σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα οχήματα εξετάστηκαν αφόρτωτα, κάτι που σημαίνει μικρότερο κατακόρυφο φορτίο στα ελαστικά, καθιστούν δυσμενείς τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν (ειδικά για συνθήκες δυσμενούς οδοστρώματος).

Με τον κύκλο της πρόσφυσης του ελαστικού και μέσω της Σχέσης 4-4, έγινε ο δεύτερος έλεγχος για τη διαπίστωση ολίσθησης σε κάθε ελαστικό, τα οποία υπενθυμίζεται ότι εξετάστηκαν υπό την επίδραση της προωθητικής ροπής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τη σχέση του Krempel όσο και από τον κύκλο της πρόσφυσης, κατέληξαν σε «συμφωνία» μεταξύ των δύο τεχνικών.

4.5. Τεχνικές Διερεύνησης της Ασφάλειας Κίνησης του Οχήματος

Εκτός της ύπαρξης ολίσθησης σε κάποιο τροχό η οποία μπορεί να προκαλέσει δυσχερείς καταστάσεις, υφίστανται και άλλοι παράγοντες οι οποίοι υποδηλώνουν αστάθεια στην κίνηση του οχήματος. Έτσι εξετάστηκαν οι μεταβλητές της παραγράφου 4.3.1., και έγιναν συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων πειραμάτων για τις διάφορες ταχύτητες προτού προκύψει η λεγόμενη ταχύτητα ασφαλείας.

Ένα παράδειγμα αποτελεί η γωνία ολίσθησης (πλαγιοπορείας) του οχήματος. Σε αρκετές περιπτώσεις, παρόλο που δεν διαπιστωνόταν ολίσθηση σε κάποιο τροχό, η γωνία ολίσθησης του οχήματος ήταν αντίθετη από την αναμενόμενη. Αυτό θα πει, ότι ενώ το όχημα έστριβε για παράδειγμα προς τα αριστερά, η γωνία ολίσθησης η οποία σύμφωνα με τις συνθήκες προσήμων θα έπρεπε να είναι θετική, ήταν αρνητική. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την απόκλιση του οπίσθιου άξονα, κάτι που ήταν εμφανές και από τα διαγράμματα τροχιάς των αξόνων, και δύναται να δημιουργήσει ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Τα διαγράμματα της γωνίας ολίσθησης εξετάστηκαν σε συνδυασμό και με τα διαγράμματα πλευρικής επιτάχυνσης και εκτροπής από τον κατακόρυφο άξονα ούτως ώστε να διαπιστωθούν ασταθείς καταστάσεις. Αναπτυσσόμενες πλευρικές επιταχύνσεις μεγαλύτερες των 0,3 – 0,35 g θεωρούνται κρίσιμες.

4.5.1. Υπερστροφή – Υποστροφή οχήματος

Μέσω των γωνιών πλαγιοδρόμησης των τροχών εξετάστηκε η ύπαρξη υπερστροφικής ή υποστροφικής συμπεριφοράς του οχήματος.

Υπερστροφή

Όταν οι γωνίες πλαγιοδρόμησης των εμπρόσθιων τροχών είναι μικρότερες από αυτές των οπίσθιων, τότε το όχημα τείνει να διαγράψει τροχιά μικρότερης ακτίνας από αυτή που υπαγορεύει το σύστημα διεύθυνσης και να κινηθεί έτσι προς το εσωτερικό της καμπύλης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *υπερστροφή* και είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, κυρίως για τα βαρέα οχήματα.

Υποστροφή

Όταν οι γωνίες πλαγιοδρόμησης των εμπρόσθιων τροχών είναι μεγαλύτερες από αυτές των οπίσθιων, τότε το όχημα τείνει να διαγράψει τροχιά με ακτίνα καμπυλότητας μεγαλύτερη από αυτή που υπαγορεύει το σύστημα διεύθυνσης, δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο της *υποστροφής*. Στο φαινόμενο αυτό, η επιρροή της πλευρικής επιτάχυνσης όντας μικρότερη (λόγω της μεγαλύτερης τροχιάς στην οποία εξαναγκάζεται το όχημα να κινηθεί), εμφανίζεται ως ζητούμενη συμπεριφορά για το όχημα, αφού η διόρθωση της πορείας του μπορεί να γίνει πιο εύκολα (Μαυρομάτης 2002).

5. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι σιγμοειδείς χαράξεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, και στο τέλος του κεφαλαίου δόθηκε ένα συνοπτικό διάγραμμα αναπαράστασης των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η εξής αντιστοίχιση:

Πίνακας 5. 1: Αντιστοίχιση σιγμοειδών καμπυλών σε χαράξεις

Στοιχεία σιγμοειδούς καμπύλης	Αντιστοίχιση
Ταχύτητα μελέτης 60 km/h, Rmin = 140 m, s = 0% - 9%	ΧΑΡΑΞΗ 1
Ταχύτητα μελέτης 70 km/h, Rmin = 200 m, s = 0% - 8%	ΧΑΡΑΞΗ 2
Ταχύτητα μελέτης 80 km/h, Rmin = 280 m, s = 0% - 7%	ΧΑΡΑΞΗ 3
Ταχύτητα μελέτης 90 km/h, Rmin = 370 m, s = 0% - 7%	ΧΑΡΑΞΗ 4

Έτσι από εδώ και πέρα για λόγους συντομίας θα αναφέρονται οι Χαράξεις ένα (1) έως τέσσερα (4), οι οποίες εξετάζονται ξεχωριστά για την κίνηση κάθε οχήματος και για συνθήκες ευμενούς και δυσμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος.



Εικόνα 5. 1: Ενδεικτική απεικόνιση σιγμοειδούς καμπύλης από το TruckSim

Η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται σε δύο διαφορετικές ενότητες (για κάθε όχημα ξεχωριστά), γίνεται μέσω αναλυτικών διαγραμμάτων στο *Παράρτημα Α*. Εδώ παρατίθενται ενδεικτικά κάποια συγκεντρωτικά διαγράμματα για ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Μετά τις ενότητες στις οποίες γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα δύο οχήματα, ακολουθεί μια ενότητα στην οποία γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων και διαπιστώνονται τα βασικά προβλήματα που ανακύπτουν με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

5.1. Εισαγωγικά

Όπως επισημάνθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, τα φορτηγά χαρακτηριστικά επιδεικνύουν τα χαμηλότερα επίπεδα επίδοσης κατά την ανάβαση σε αυξημένες κατά μήκος κλίσεις, με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες από αυτές των υπολοίπων οχημάτων. Σε συνδυασμό των απότομων κλίσεων με επαρκή μήκη ανωφέρειας, η απώλεια ταχύτητας μπορεί να είναι αρκετή ώστε να δημιουργήσει προβλήματα, όπως μείωση του επιπέδου εξυπηρέτησης της οδού, παρακώλυση της κυκλοφορίας, και δημιουργία κινδύνων για τα υπόλοιπα οχήματα που εξυπηρετούνται από την οδό. Ιδιαίτερα κρίσιμες, είναι οι κλίσεις άνω του 3%.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να οριστεί αρχικά και να προσδιοριστεί στη συνέχεια, η λειτουργική ταχύτητα των οδικών τμημάτων. Η *λειτουργική ταχύτητα* (V_{85}) είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στο γεωμετρικό υπολογισμό μεμονωμένων στοιχείων μελέτης της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και της διατομής και έχει άμεση σχέση με την δυναμική της κίνησης των οχημάτων. Στις οδούς της ομάδας Α η ταχύτητα V_{85} αντιστοιχεί στην ταχύτητα με την οποία θα κινηθεί ανεμπόδιστα το 85% των *επιβατηγών οχημάτων* σε καθαρό και *υγρό οδόστρωμα* (Ψαριανός 2001). Η ταχύτητα V_{85} μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας σχεδιασμού των οδικών τμημάτων όσον αφορά στην ασφάλεια (Κριτήρια Σχεδιασμού Ι έως ΙΙΙ). Η ταχύτητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στο γεωμετρικό σχεδιασμό, καθώς με βάση αυτή καθορίζονται μεγέθη όπως:

- οι επικλίσεις στις οριζόντιες καμπύλες,
- τα απαιτούμενα μήκη ορατότητας για στάση και κατά συνέπεια οι ακτίνες των κυρτών κατακόρυφων καμπυλών,
- τα απαιτούμενα μήκη ορατότητας για προσπέραση,
- οι ελάχιστες οριζόντιες ακτίνες σε περίπτωση εφαρμογής αρνητικής επίκλισης, και
- τα στοιχεία για την απορροή των ομβρίων.

Για οδούς της ομάδας Α και *ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας* η ταχύτητα V_{85} , σύμφωνα με πολλές ερευνητικές εργασίες είναι συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού και προσδιορίζεται για κάθε μεμονωμένο γεωμετρικό στοιχείο (ευθυγραμμία, καμπύλη) καθώς επίσης και για ένα οδικό τμήμα με ενιαία χαρακτηριστικά. Οι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της λειτουργικής ταχύτητας, είναι η *ελικτότητα* (τεταμένο) K_E της μεμονωμένης καμπύλης και το *πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας* b (Ψαριανός 2001). Η V_{85} προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των ταχυτήτων και για τις δύο διευθύνσεις κυκλοφορίας. Για τις τέσσερις χαράξεις που εξετάζονται προκύπτουν βάση των ΟΜΟΕ – Χ οι λειτουργικές ταχύτητες του Πίνακα 5.2.

Η λειτουργική ταχύτητα των οχημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη μηκοτομή. Η επιρροή αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη στην κίνηση βαρέων οχημάτων (λεωφορεία - φορτηγά), όπου σε ανωφέρειες μεγάλης κλίσης, η μείωση της ταχύτητας σε οχήματα αυτού του τύπου, οδηγεί στα προβλήματα που επισημάνθηκαν στην πρώτη παράγραφο και συνεπάγεται επιπλέον κινδύνους όπως αυτοί που περιγράφηκαν στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας.

Πίνακας 5. 2: Λειτουργικές ταχύτητες χαράξεων για επιβατηγό όχημα

Σιγμοειδής καμπύλη / διατομή	V ₈₅ (km/ h)
ΧΑΡΑΞΗ 1 / ε2	66,4
ΧΑΡΑΞΗ 2 / δ2	77,4
ΧΑΡΑΞΗ 3 / γ2	86,8
ΧΑΡΑΞΗ 4 / β2	94,6

Να σημειωθεί τέλος, ότι από τα τρία ποσοτικά κριτήρια ασφαλείας, τα οποία αφορούν στην επίτευξη αρμονίας και ομοιογενούς συνέχειας στη μελέτη (κριτήριο I), στη λειτουργική ταχύτητα V₈₅ (κριτήριο II), και στη δυναμική της κίνησης των οχημάτων (κριτήριο III) σε οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, και για τις διατομές που επιλέχθηκαν, δεν προέκυψε παραβίαση της ασφαλείας σε κάποιο τμήμα. Η διατύπωση όμως των τριών κριτηρίων ασφαλείας, έχει προκύψει από ανάλυση ατυχημάτων και αφορά σε *επιβατηγά οχήματα*. Παρακάτω φαίνονται οι παραβιάσεις ασφαλείας που προκύπτουν από την κίνηση των φορτηγών στις τρισδιάστατες χαράξεις που καταστρώθηκαν.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και με γνώμονα τις τεχνικές που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα διερευνηθεί η ασφάλεια κίνησης των δύο οχημάτων.

5.2. Ασφάλεια Κίνησης Διαξονικού Φορτηγού

5.2.1. Χάραξη 1

Ευμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,33$)

➤ Κατά μήκος κλίση 0%

Ξεκινώντας τα πειράματα με το διαξονικό φορτηγό και την πρώτη χάραξη για σταθερή επιδιωκόμενη ταχύτητα (constant target speed) 80 km/ h – η οποία είναι κατά 20 km/ h υψηλότερη της ταχύτητας μελέτης για αυτή τη χάραξη – προέκυψαν τα εξής στοιχεία:

- Η ταχύτητα διατηρείται με μικρές διακυμάνσεις σταθερή.
- Από τον έλεγχο τόσο της Σχέσης 4-2 όσο και του κύκλου πρόσφυσης του ελαστικού, δεν παρουσιάστηκε ολίσθηση σε κάποιο τροχό κατά μήκος της χάραξης.

Όμως:

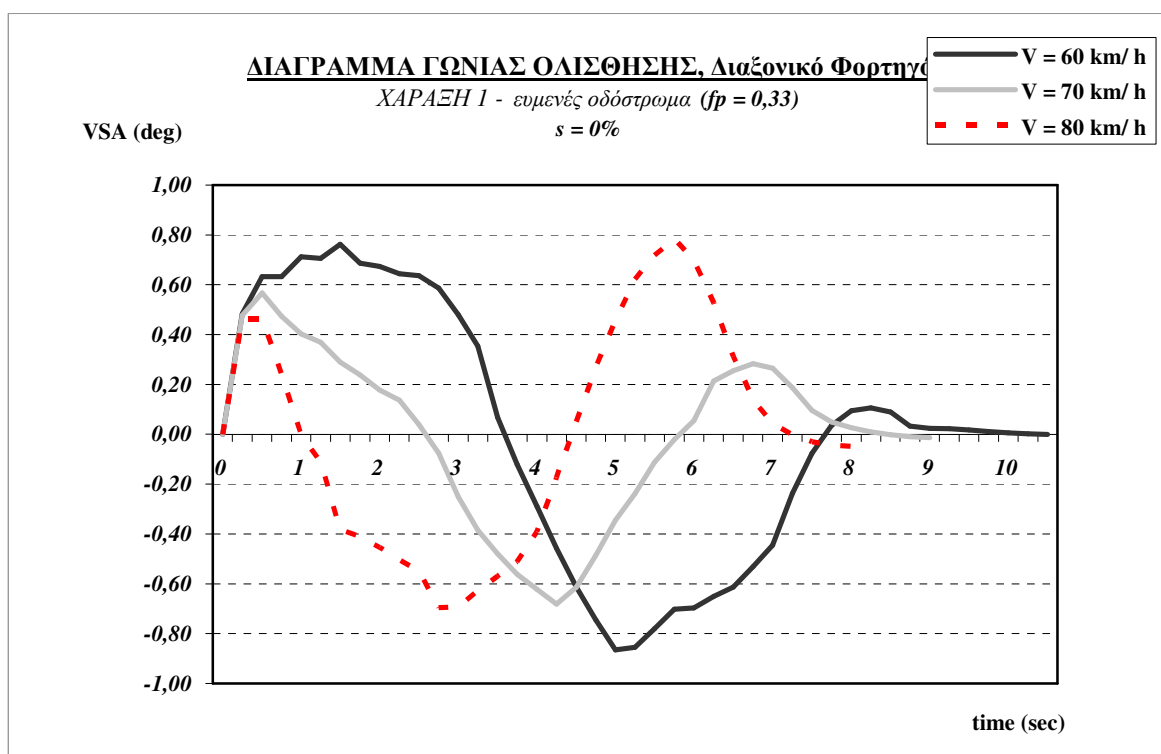
- Η γωνία ολίσθησης του οχήματος ήταν αντίθετη της αναμενόμενης, υποδεικνύοντας σημαντική απόκλιση του οπίσθιου άξονα, κάτι που ήταν εμφανές και από το διάγραμμα τροχιάς των αξόνων σε σχέση με την επιδιωκόμενη πορεία, αλλά και από την προσομοίωση του πειράματος στο πρόγραμμα.
- Η πλευρική επιτάχυνση του οχήματος (A_y) έφτανε μέχρι και τα 0,35 g, τιμή που όπως αναφέρθηκε θεωρείται κρίσιμη.

Η μη ασφαλής κίνηση του φορτηγού με αυτή την ταχύτητα ήταν αναμενόμενη καθώς η ταχύτητα αυτή ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη της ταχύτητας μελέτης. Ακολούθησε ο έλεγχος της ταχύτητας των 70 km/ h η οποία προσεγγίζει τη λειτουργική ταχύτητα για τη συγκεκριμένη χάραξη, με την οποία παρατηρήθηκε μείωση της πλευρικής επιτάχυνσης, αλλά η γωνία ολίσθησης του οχήματος εξακολούθησε να παρουσιάζει αστάθεια.

Συνεχίζοντας με σταθερή επιδιωκόμενη ταχύτητα αυτή τη φορά στα 60 km/h, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η ταχύτητα διατηρείται σταθερή.
- Από τον έλεγχο της Σχέσης 4-2 και του κύκλου πρόσφυσης του ελαστικού, δεν παρουσιάστηκε ολίσθηση σε κάποιο τροχό κατά μήκος της χάραξης.
- Η γωνία ολίσθησης του οχήματος ήταν η αναμενόμενη και το όχημα ήταν σταθερό στην πορεία του.
- Τόσο η πλευρική επιτάχυνση του οχήματος, όσο και αντίστοιχα μεγέθη που αναφέρονται στα ελαστικά (γωνίες πλαγιοπορείας, πλευρικές ταχύτητες), κυμάνθηκαν σε χαμηλότερες τιμές από ότι στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, και εντός ασφαλών ορίων.

Με βάση τα παραπάνω, ως ταχύτητα ασφαλείας για κατά μήκος κλίση 0% λαμβάνεται αυτή των 60 km/h, η οποία συμπίπτει με την ταχύτητα μελέτης. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η γωνία ολίσθησης του διαξονικού φορτηγού για κάθε ταχύτητα κίνησης που εξετάστηκε. Να σημειωθεί ότι μετά τη σιγμοειδή καμπύλη ακολουθεί και ένα κομμάτι ευθυγραμμίας της τάξης των 50 m (αμφικλινές, επίκλιση 2,5%) σε όλες τις χαράξεις.



Σχήμα 5. 1: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και επίπεδο έδαφος

➤ Κατά μήκος κλίση 1%

Για κατά μήκος κλίση 1%, η ταχύτητα των 80 km/h παρουσίασε όπως ήταν αναμενόμενο τα ίδια προβλήματα με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή: γωνία ολίσθησης οχήματος αντίθετη της αναμενόμενης και πλευρική επιτάχυνση που έφτανε μέχρι και τα 0,33 g. Εκτός αυτού, από τους ελέγχους ολίσθησης στα ελαστικά προέκυψε ολίσθηση στους πίσω δεξιά τροχούς για χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου. Παρά την απώλεια της πρόσφυσης το όχημα δεν εκτράπηκε από το δρόμο. Η ταχύτητα βέβαια των 80 km/h κρίνεται απαγορευτική.

Για τα 70 km/h τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα με αυτά για κλίση 0%. Παρά δηλαδή του γεγονότος ότι δεν παρουσιάζεται ολίσθηση σε κάποιο τροχό η γωνία ολίσθησης είναι και σε αυτή την περίπτωση κρίσιμη.

Έτσι και για κατά μήκος κλίση 1%, η ταχύτητα ασφαλείας ορίζεται στα 60 km/h. Και για αυτή την ταχύτητα τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα με αυτά για επίπεδο έδαφος ($s = 0\%$).

➤ Κατά μήκος κλίση 2%

Κατά την κίνηση του φορτηγού σε κατά μήκος κλίση 2% τα προβλήματα που εμφάνισαν οι δύο προηγούμενες κλίσεις για τις ταχύτητες των 80 km/h και 70 km/h οξύνθηκαν. Για ταχύτητα κίνησης 80 km/h πέραν της απόκλισης του οπίσθιου άξονα και της ανεβασμένης πλευρικής επιτάχυνσης, η ολίσθηση του οπίσθιου άξονα έφτασε τα δύο δευτερόλεπτα. Για ταχύτητα 70 km/h η ολίσθηση του οπίσθιου άξονα κάλυψε διάστημα 1,5 δευτερολέπτου.

Και σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα με την οποία δεν παρουσιάστηκε ολίσθηση σε κάποιο τροχό κατά μήκος της χάραξης, ούτε απόκλιση του οπίσθιου άξονα, ήταν τα 60 km/h.

Έως κατά μήκος κλίση 2% λοιπόν παρουσιάζονται περίπου τα ίδια προβλήματα και στο ίδιο μέγεθος, ενώ η ταχύτητα ασφαλείας ορίζεται στα 60 km/h, ίση με την ταχύτητα μελέτης.

➤ Κατά μήκος κλίση 3%

Ανεβαίνοντας σε κλίση και φτάνοντας στο 3% αρχίζουν να εμφανίζονται τα πρώτα σημαντικά προβλήματα. Το φορτηγό δεν κατορθώνει να κρατήσει απολύτως σταθερή ταχύτητα και από τα 80 km/h ρίχνει στα 73 km/h. Η σχέση του Krepnel και ο κύκλος της πρόσφυσης των ελαστικών υπόδειξαν απώλεια πρόσφυσης στον πίσω άξονα για διάστημα τριών δευτερολέπτων. Από την προσομοίωση του πειράματος αρχίζει να είναι εμφανής η απόκλιση του οχήματος από την προδιαγεγραμμένη πορεία. Επίσης, καθώς αυξάνεται η κατά μήκος κλίση αρχίζει να εντοπίζεται εντονότερο πρόβλημα υπερστροφής.

Το όχημα κρατάει σταθερή την ταχύτητα των 70 km/h, αλλά το πρόβλημα της ολίσθησης στον πίσω άξονα παραμένει (3 δευτερόλεπτα). Για πρώτη φορά εμφανίζεται απώλεια πρόσφυσης στον οπίσθιου άξονα (1 δευτερόλεπτο) για ταχύτητα κίνησης 60 km/h.

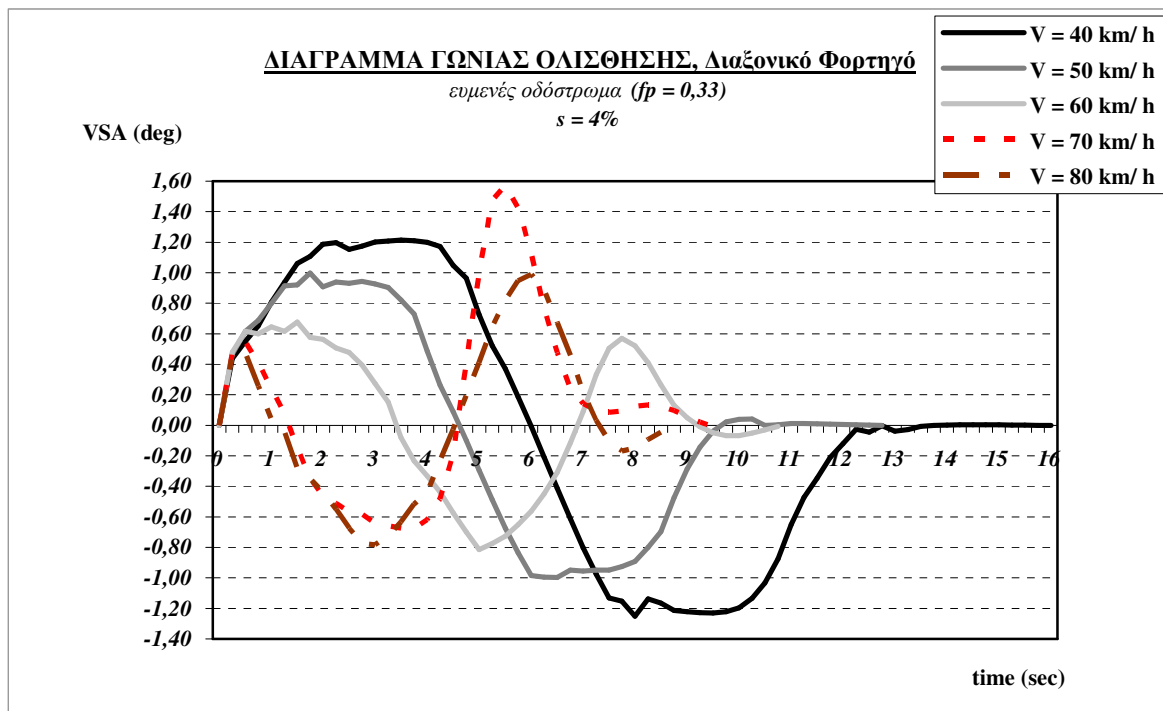
Για ταχύτητα 50 km/h, η σχέση του Krepnel και ο κύκλος της πρόσφυσης δεν δίνουν υπέρβαση των ορίων της πρόσφυσης και υποδηλώνουν ασφαλή κίνηση. Η ταχύτητα όμως των 50 km/h είναι μικρότερη της λειτουργικής ταχύτητας περίπου κατά 17 km/h, γεγονός που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και θα εξετασθεί στην τέταρτη ενότητα του κεφαλαίου.

➤ Κατά μήκος κλίση 4%

Για κατά μήκος κλίση 4% τα αποτελέσματα οδηγούν σε ταχύτητα ασφαλείας 40 km/h (κατά πολύ μικρότερη της λειτουργικής), καθώς για ταχύτητα 60 km/h η ολίσθηση στον πίσω άξονα έφτασε στα τρία δευτερόλεπτα σε συνδυασμό με έντονο πρόβλημα υπερστροφής, ενώ για τα 50 km/h στα δύο δευτερόλεπτα. Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.2 αποτυπώνεται το πρόβλημα μέσω των γωνιών ολίσθησης του οχήματος για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οξυμένο ήταν το πρόβλημα για ταχύτητα 70 km/h. Η απόκλιση του πίσω άξονα σε αυτή την περίπτωση ήταν ιδιαίτερα εμφανής και στην προσομοίωση που έγινε στο TruckSim. Το ίδιο ισχύει και για την ταχύτητα των 80 km/h.

Παρόλα αυτά από το διάγραμμα δεν φαίνεται να υπάρχει πρόβλημα με ολίσθηση του άξονα για ταχύτητα κίνησης 50 km/h, στην οποία παρουσιάστηκε όμως, όπως αναφέρθηκε,

ολίσθηση για δύο δευτερόλεπτα. Είναι λοιπόν εμφανές ότι πρέπει να γίνεται συνολική εξέταση των παραμέτρων της κίνησης προτού καθοριστεί η ταχύτητα ασφαλείας (= μηδενική ολίσθηση σε κάθε τροχό) σε κάθε κατά μήκος κλίση.



Σχήμα 5. 2: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 4%

➤ Κατά μήκος κλίση 5% - 9%

Για κατά μήκος κλίση 5% το όχημα δε δύναται να κρατήσει σταθερή καμιά ταχύτητα πέραν αυτής των 40 km/h, στην οποία όμως παρουσιάζεται έντονο το πρόβλημα της ολίσθησης του πίσω άξονα (>4 δευτερόλεπτα). Για ταχύτητες 50 km/h έως 80 km/h, το όχημα εκτρέπεται από την πορεία του, και ο πίσω άξονας περνά σε κάποια σημεία στο αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας.

Έτσι, για κατά μήκος κλίσεις 5% και άνω, καμιά ταχύτητα δεν εξασφαλίζει ασφαλή κίνηση για το διαξονικό φορτηγό, καθώς παρουσιάζονται έντονα προβλήματα και αδυναμία διατήρησης της αρχικής επιδιωκόμενης ταχύτητας. Οι συνδυασμοί λοιπόν των ελάχιστων ακτινών σε αυτή τη χάραξη, με κατά μήκος κλίσεις 5% - 9%, είναι απαγορευτικοί.

Δυσμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,25$)

Όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα για δυσμενή πρόσφυση οδοστρώματος, ήταν χειρότερα από αυτά για ευμενές οδόστρωμα. Το όχημα, κινούμενο με ταχύτητα 80 km/h, ταλαντεύεται με αποτέλεσμα να περνά στο άλλο ρεύμα σε όλες τις κατά μήκος κλίσεις, ενώ για πρώτη φορά παρατηρείται ολίσθηση και στον εμπρόσθιο άξονα. Το ίδιο συμβαίνει και για ταχύτητα κίνησης 70 km/h, για κατά μήκος κλίσεις μεγαλύτερες του 1%. Για κατά μήκος κλίσεις 0% έως 1% η ταχύτητα ασφαλείας είναι και σε αυτή την περίπτωση 60 km/h. Όμως,

για αυτή την ταχύτητα σε κατά μήκος κλίση 2%, εμφανίζεται ολίσθηση στον οπίσθιο άξονα και έτσι απαιτείται ταχύτητα 50 km/h.

Η κατά μήκος κλίση 3% εμφανίζει πολύ σοβαρά προβλήματα. Το φορτηγό δεν κατορθώνει να κρατήσει σταθερή ταχύτητα μεγαλύτερη από 50 km/h. Αλλά και για τα 40 km/h και 50 km/h, παρόλο που η ταχύτητα διατηρείται σταθερή, εμφανίζεται σημαντική ολίσθηση στον οπίσθιο άξονα. Για υψηλότερες ταχύτητες (60 – 80 km/h) τα αποτελέσματα ήταν απαγορευτικά. Παρά την αδυναμία διατήρησης της ταχύτητας, η ταλάντωση του οχήματος ήταν πολύ έντονη. Το πρόβλημα αποτυπώνεται σε όλα τα διαγράμματα (ταχύτητας, γωνίας ολίσθησης, ποσοστού εκτροπής από τον άξονα Z).

Το συμπέρασμα είναι ότι για δυσμενές οδόστρωμα, το φορτηγό δεν δύναται να κινηθεί με ασφάλεια σε κατά μήκος κλίσεις μεγαλύτερες του 2%, με καμία ταχύτητα κίνησης.

5.2.2. Χάραξη 2

Ευμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,31$)

➤ Κατά μήκος κλίση 0% - 2%

Για κατά μήκος κλίσεις 0% και 1%, και ταχύτητα κίνησης 80 km/h, προέκυψαν τα εξής στοιχεία για τη δεύτερη χάραξη:

- Η ταχύτητα διατηρείται σταθερή.
- Οι δύο έλεγχοι που έγιναν με τον κύκλο της πρόσφυσης και τη Σχέση 4-2, έδειξαν ότι δεν υπήρχε ολίσθηση σε κάποιο τροχό.
- Τέλος, η πλευρική επιτάχυνση που στην περίπτωση της πρώτης χάραξης για αυτή την ταχύτητα κίνησης ήταν κρίσιμη, έχει μειωθεί στη Χάραξη 2 και δεν ξεπερνά τα 0,25 g.

Παρόλα αυτά και στις δύο περιπτώσεις κατά μήκος κλίσεων, οι γωνίες ολίσθησης του οχήματος υποδήλωσαν σημαντική απόκλιση του οπίσθιου άξονα. Για κλίση 2%, η ταχύτητα των 80 km/h έδωσε - πέραν της κρίσιμης γωνίας - και απώλεια πρόσφυσης στον οπίσθιο άξονα για 1,5 δευτερόλεπτο. Έτσι, εξετάστηκε εν συνεχεία η ταχύτητα των 70 km/h, για την οποία πληρούνται τελικά όλα τα κριτήρια ασφαλείας. Η ταχύτητα αυτή δεν έχει μεγάλη απόκλιση από τη λειτουργική ταχύτητα, η οποία σε αυτή την περίπτωση ισούται με 77,4 km/h.

➤ Κατά μήκος κλίση 3%

Όπως και στην περίπτωση της πρώτης χάραξης, έτσι και στη δεύτερη χάραξη, η κατά μήκος κλίση του 3% είναι κρίσιμη. Τόσο η ταχύτητα των 80 km/h όσο και η ταχύτητα των 70 km/h, παρουσιάζουν προβλήματα απώλειας της πρόσφυσης στον πίσω άξονα που φτάνουν και τα 2,5 δευτερόλεπτα, ενώ παρουσιάζουν επίσης κρίσιμες γωνίες ολίσθησης του οχήματος.

Με ταχύτητα 60 km/h, φαίνεται να εξασφαλίζεται ασφαλής κίνηση, με εξαίρεση μιας στιγμιαίας κρίσιμης τιμής, που υπόδειξαν ο κύκλος της πρόσφυσης και η σχέση του Krempel. Η ταχύτητα των 50 km/h δεν παρουσίασε καμία παραβίαση. Παρατηρείται όμως και πάλι σημαντική διαφορά από τη λειτουργική ταχύτητα που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο τμήμα και είναι ίση με 77,4 km/h.

➤ Κατά μήκος κλίση 4% - 8%

Για κατά μήκος κλίση 4%, τα αποτελέσματα ήταν αντίστοιχα με αυτά της Χάραξης 1 για την αντίστοιχη κλίση, και η ταχύτητα ασφαλείας ορίστηκε στα 40 km/h. Για κλίσεις 5% έως 8% παρουσιάστηκαν τα ίδια προβλήματα με την πρώτη χάραξη. Έτσι για κλίση 5% η μόνη ταχύτητα που διατηρήθηκε σταθερή ήταν αυτή των 40 km/h, η οποία όμως εμφάνισε απώλεια πρόσφυσης στον οπίσθιο άξονα σχεδόν σε όλο το μήκος της χάραξης.

Δυσμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,24$)

Στην περίπτωση της δυσμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος η ταχύτητα ασφαλείας για κατά μήκος κλίσεις 0% και 1% έπεσε στα 60 km/h, σε αντίθεση με το ευμενές οδόστρωμα που ήταν 70 km/h. Παρόλο που για κλίση 0% δεν διαπιστώθηκε απώλεια πρόσφυσης με βάση τους δύο ελέγχους στα ελαστικά, η γωνία ολίσθησης του οχήματος ήταν δυσμενής. Για κατά μήκος κλίση 1% η ολίσθηση στον πίσω άξονα έφτασε το 1,5 δευτερόλεπτο. Για κατά μήκος κλίση 2% τα αποτελέσματα ήταν κάπως δυσμενέστερα, και χρειάστηκε ταχύτητα 60 km/h, έναντι των 70 km/h που ορίστηκε για το ευμενές οδόστρωμα. Τέλος σε κατά μήκος 3% η ταχύτητα ασφαλείας έπεσε στα 40 km/h, ενώ για κλίση 4% το όχημα δεν κινήθηκε με σταθερή ταχύτητα και παρουσίασε ολίσθηση σε όλες τις περιπτώσεις (ταχύτητες).

Οι ταχύτητες ασφαλείας στην περίπτωση του δυσμενούς οδοστρώματος είναι κατά πολύ μικρότερες της λειτουργικής ταχύτητας σε όλες τις κατά μήκος κλίσεις. Ειδικά για κατά μήκος κλίση 3% η διαφορά είναι δραματικής (37,4 km/h).

5.2.3. Χάραξη 3

Ευμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,30$)

➤ Κατά μήκος κλίση 0% - 2%

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την τρίτη χάραξη, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας ασφαλείας όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο αφού έχει πλέον αυξηθεί και η ελάχιστη ακτίνα κυκλικού τόξου (280 m). Βέβαια σε αυτά τα οδικά τμήματα η αναμενόμενη λειτουργική ταχύτητα φτάνει τα 86,8 km/h, η οποία εκ των προτέρων ξεπερνά την επιτρεπόμενη ταχύτητα κίνησης για τα βαρέα οχήματα άνω των 3,5 τόνων.

Για το εύρος κλίσεων 0% - 2% και ταχύτητα κίνησης 80 km/h, οι έλεγχοι απώλειας πρόσφυσης στα ελαστικά δεν έδειξαν να υπάρχει πρόβλημα. Μάλιστα, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Από τη σχέση του Krempel προέκυψαν τιμές κατά πολύ μικρότερες της μονάδας.
- Η πλευρική επιτάχυνση του οχήματος μειώθηκε κατά πολύ.

Οι γωνίες ολίσθησης του οχήματος παρουσίασαν κάποιες διακυμάνσεις οι οποίες, με βάση μια πιο συντηρητική προσέγγιση, θεωρήθηκαν κρίσιμες και έτσι ως ταχύτητα ασφαλείας ορίστηκε αυτή των 70 km/h.

➤ Κατά μήκος κλίση 3% - 4%

Για κατά μήκος κλίση 3% η ταχύτητα των 80 km/h έδωσε ολίσθηση του πίσω άξονα για 2,5 δευτερόλεπτα. Για ταχύτητα 70 km/h η Σχέση 4-2 έδωσε υψηλές τιμές για ένα χρονικό

διάστημα 1,5 δευτερολέπτου και στιγμιαία παραβίαση της συνθήκης. Έτσι, η ταχύτητα ασφαλείας έπεσε στα 60 km/h. Σε κλίση 4% το φορτηγό δε διατήρησε τις ταχύτητες των 80 km/h και 70 km/h, ενώ με ταχύτητα 60 km/h η ολίσθηση του πίσω άξονα ξεπέρασε τα 4 δευτερόλεπτα. Οπότε σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα τοποθετήθηκε στα 50 km/h.

Είναι εμφανές ότι σε κλίσεις μεγαλύτερες του 3%, υπεισέρχεται σημαντικά ο παράγοντας της δυναμικής των βαρέων οχημάτων. Οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες είναι κατά πολύ μικρότερες της λειτουργικής, είτε για λόγους αδυναμίας διατήρησής τους, είτε για λόγους ασφάλειας.

➤ Κατά μήκος κλίση 5% - 7%

Σε αντιστοιχία και με τις προηγούμενες περιπτώσεις, για τις κλίσεις του 5% και άνω, δεν πληρούνται οι συνθήκες ασφαλείας που έχουν τεθεί.

Δυσμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,23$)

Κατά την εξέταση της τρίτης χάραξης για δυσμενές οδόστρωμα, τα αποτελέσματα για κλίσεις 0% και 1% ήταν όμοια με αυτά για το ευμενές, με την ταχύτητα στα 70 km/h. Για κλίση 2% η ταχύτητα έπεσε στα 60 km/h, καθώς για τα 70 km/h εμφανίστηκε απώλεια πρόσφυσης για 1 δευτερόλεπτο και τιμές της Σχέσης 4-2 κοντά στη μονάδα σε ένα χρονικό διάστημα γύρω από αυτό, ενώ για 80 km/h η ολίσθηση άγγιξε τα 3 δευτερόλεπτα.

Για κατά μήκος κλίση 3% η απώλεια της πρόσφυσης έφτασε τα 2,5 δευτερόλεπτα για ταχύτητα κίνησης 40 km/h. Και σε αυτή την περίπτωση λοιπόν επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι το 3% είναι μια κρίσιμη κλίση, από την οποία και μετά εμφανίζονται τα σοβαρότερα προβλήματα.

5.2.4. Χάραξη 4

Ευμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,29$)

➤ Κατά μήκος κλίση 0% - 3%

Σε αυτή τη χάραξη μέχρι κλίση 2%, η ταχύτητα των 80 km/h δεν παρουσιάζει προβλήματα. Οι γωνίες ολίσθησης του οχήματος παρουσιάζουν κάποιες διακυμάνσεις στο τμήμα των 50 m της ευθυγραμμίας, αλλά τόσο από την προσομοίωση όσο και από το διάγραμμα τροχιάς των αξόνων δεν φαίνεται να υπάρχει πρόβλημα απόκλισης του οπίσθιου άξονα.

Από τον έλεγχο των ελαστικών με τη σχέση του Kreppele, προέκυψε για κλίση 3% και ταχύτητα 80 km/h, ένα εύρος τιμών κοντά στη μονάδα για περίπου 1,5 δευτερόλεπτο. Έτσι η ταχύτητα των 80 km/h επισημάνθηκε ως κρίσιμη και ως ταχύτητα ασφαλείας επιλέχθηκε αυτή των 70 km/h.

➤ Κατά μήκος κλίση 4% - 7%

Για κατά μήκος κλίση 4% και άνω δεν εξασφαλίζεται ασφαλής κίνηση του φορτηγού με καμιά ταχύτητα κίνησης.

Δυσμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,22$)

Τα αποτελέσματα για κλίση 0% και 1%, και ταχύτητα 80 km/h είναι όμοια με αυτά του ευμενούς οδοστρώματος. Για κατά μήκος κλίση 2% η ταχύτητα πέφτει στα 60 km/h, καθώς τόσο στα 80 km/h όσο και στα 70 km/h παρουσιάστηκε απώλεια πρόσφυσης στον οπίσθιο άξονα. Το πρόβλημα εντοπίζεται σε κλίση 3%, όπου ενώ για ευμενές οδόστρωμα προέκυψε ταχύτητα 70 km/h, για δυσμενές δεν εξασφαλίζεται καμία σταθερή ταχύτητα ασφαλείας. Έτσι κλίσεις από 3% και πάνω κρίνονται απαγορευτικές.

5.3. Ασφάλεια Κίνησης Τριαξονικού Λεωφορείου

Ξεκινώντας την ανάλυση για την κίνηση του τριαξονικού λεωφορείου έγινε μια σημαντική παρατήρηση. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, παρά το γεγονός ότι οι δύο έλεγχοι στα ελαστικά δεν επισήμαναν απώλεια πρόσφυσης σε κάποιο τροχό, οι γωνίες ολίσθησης του οχήματος υπόδειξαν σημαντική απόκλιση του οπίσθιου άξονα. Το γεγονός αυτό έχει να κάνει με το μεγάλο μεταξόνιο αυτού του οχήματος και θέτει επιπρόσθετους περιορισμούς στην ασφάλεια κίνησης οχημάτων μεγάλου μήκους που θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

Επίσης να σημειωθεί ότι για κατά μήκος κλίση 4% δεν επιτεύχθηκε ταχύτητα ασφαλείας σε καμία χάραξη, καθώς το λεωφορείο δεν κατόρθωσε να κρατήσει σταθερή ταχύτητα, εξαιρουμένης αυτής των 40 km/h, στην οποία όμως παρουσιάστηκε επίσης παραβίαση των ορίων της πρόσφυσης. Έτσι, κατά μήκος κλίσεις της τάξης του 4% και άνω για τους συνδυασμούς ελαχίστων παραμέτρων που έχουν γίνει, κρίνονται απαγορευτικές.

Το ίδιο ισχύει και για κατά μήκος κλίση 3% για την περίπτωση δυσμενούς πρόσφυση οδοστρώματος, για την οποία δεν εξασφαλίζεται ασφαλής κίνηση του λεωφορείου σε καμία χάραξη.

5.3.1. Χάραξη 1

Ευμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,33$)

- Κατά μήκος κλίση 0% - 3%

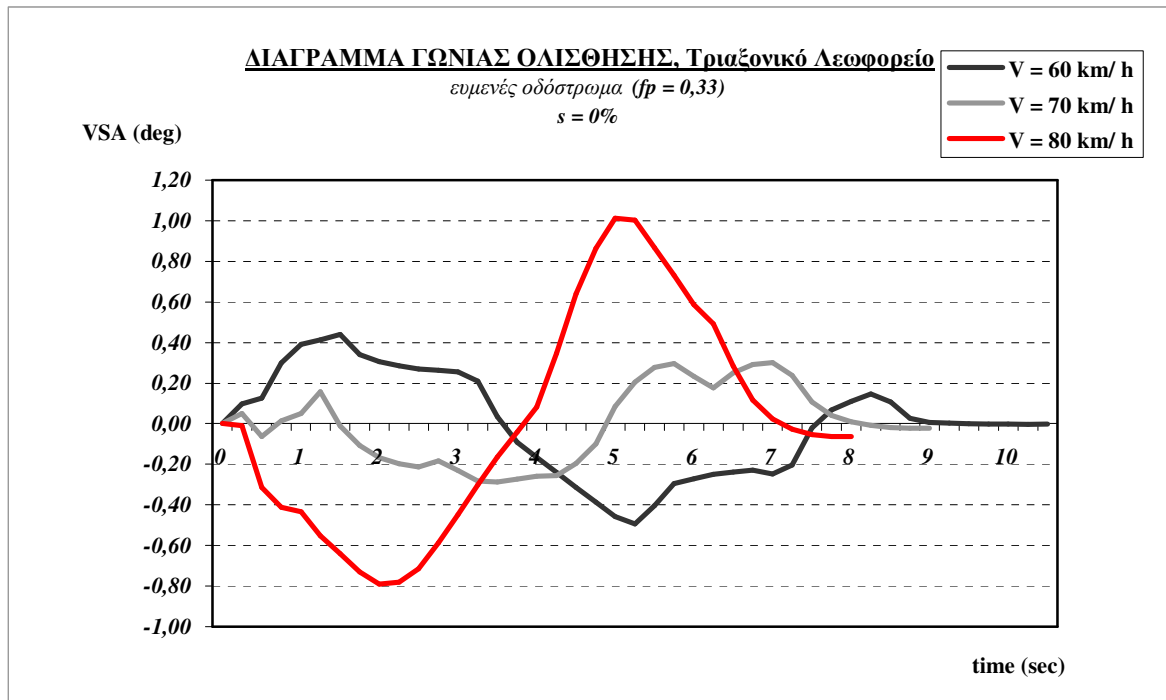
Η ταχύτητα ασφαλείας που ορίστηκε για το εύρος κλίσεων 0% - 3% ήταν αυτή των 60 km/h, όπως και στην περίπτωση του διαξονικού φορτηγού. Η διαφορά στην περίπτωση του τριαξονικού, είναι ότι η ταχύτητα των 70 km/h δεν καταγράφηκε ως κρίσιμη με βάση τους ελέγχους για απώλεια πρόσφυσης στα ελαστικά (πλην της κλίσης 3%). Το πρόβλημα ήταν, όπως επισημάνθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η γωνία ολίσθησης του οχήματος. Στο Σχήμα 5.3, φαίνονται οι γωνίες ολίσθησης του οχήματος για κλίση 0%. Ιδιαίτερα εμφανές είναι το πρόβλημα για ταχύτητα κίνησης 80 km/h. Η γωνία ολίσθησης του οχήματος είναι αντίθετη της αναμενόμενης σε όλο το μήκος της χάραξης.

Στο Σχήμα 5.4 που αφορά σε ταχύτητα κίνησης 80 km/h και επίπεδο έδαφος, είναι εμφανής η απόκλιση του οχήματος από την προδιαγεγραμμένη πορεία (target path).

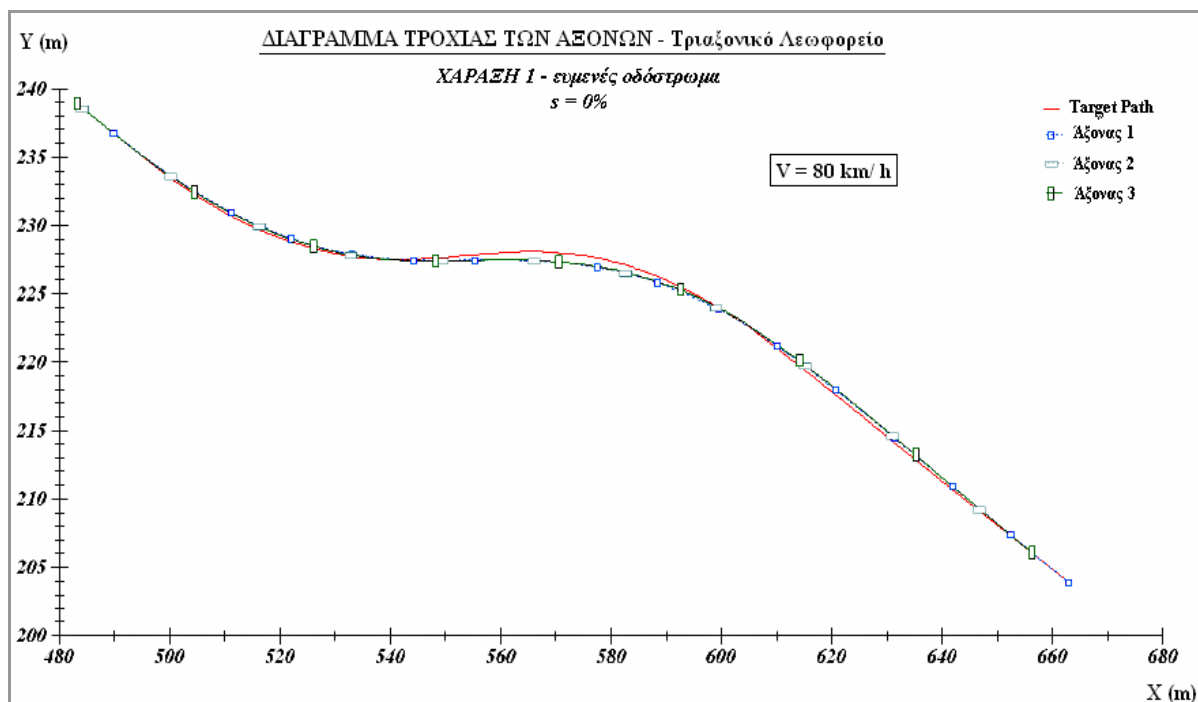
Δυσμενές οδόστρωμα ($f_p = 0,25$)

Για δυσμενές οδόστρωμα τα αποτελέσματα ήταν προφανώς δυσμενέστερα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, για κατά μήκος κλίση 3% και 4% δεν εξασφαλίζεται ασφαλής κίνηση του

λεωφορείου με καμιά ταχύτητα. Όσον αφορά όμως τις κλίσεις από 0% έως 2%, η ταχύτητα ασφαλείας ορίζεται και πάλι στα 60 km/h, όπως και στην περίπτωση του ευμενούς οδοστρώματος.



Σχήμα 5. 3: Χάραξη 1 - Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης διαξονικού φορτηγού για τις διάφορες ταχύτητες κίνησης σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%



Σχήμα 5. 4: Χάραξη 1 - Διάγραμμα τροχιάς αξόνων τριαξονικού λεωφορείου για ταχύτητα κίνησης 80 km/h σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%

5.3.2. Χαράξεις 2 έως 4

Ευμενές οδόστρωμα

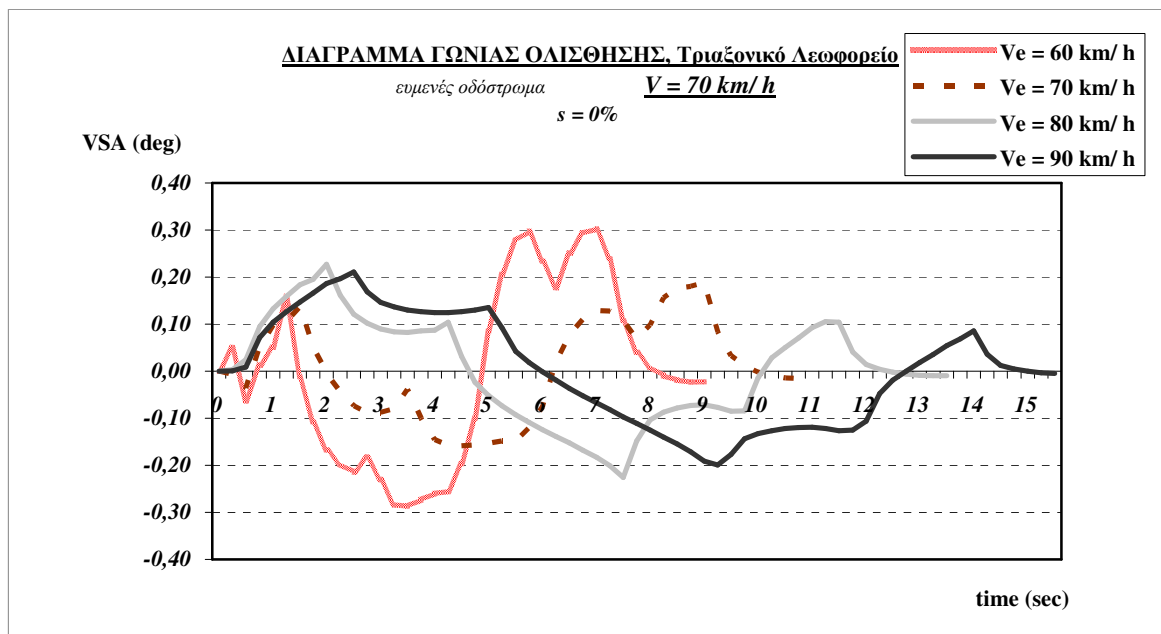
➤ Κατά μήκος κλίση 0% - 3%

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.8 έως 5.10, τα αποτελέσματα για όλες τις χαράξεις καταλήγουν σε ταχύτητα ασφαλείας 60 km/h. Παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα ασφαλείας ορίστηκε στα 60 km/h, με βάση τους ελέγχους της Σχέσης 4-2 και του κύκλου της πρόσφυσης των ελαστικών και η ταχύτητα των 70 km/h βρέθηκε κατάλληλη. Ο λόγος που αποκλείστηκε τελικά, ήταν και πάλι η γωνία ολίσθησης του οχήματος, η οποία ήταν αντίθετη της αναμενόμενης σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήμα 5.5).

Αυτό που πρέπει να επισημανθεί για μια ακόμη φορά είναι ότι η προκύπτουσα ταχύτητα ασφαλείας είναι κυρίως για τις χαράξεις 3 και 4, κατά πολύ μικρότερη της λειτουργικής ταχύτητας που αντιστοιχεί σε αυτά τα οδικά τμήματα.

Δυσμενές οδόστρωμα

Ομοίως και στην περίπτωση του δυσμενούς οδοστρώματος η ταχύτητα ασφαλείας ορίζεται στα 60 km/h. Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση του ευμενούς οδοστρώματος, όπου το πρόβλημα στις υψηλότερες ταχύτητες (70 km/h, 80 km/h) αφορούσε κυρίως στις γωνίες ολίσθησης του οχήματος, για το δυσμενές οδόστρωμα προέκυπτε και πρόβλημα ολίσθησης με βάση τους ελέγχους στα ελαστικά, κυρίως στην πρώτη και τη δεύτερη χάραξη οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρότερες ακτίνες οριζόντιας καμπύλης.



Σχήμα 5. 5: Διάγραμμα γωνίας ολίσθησης τριαξονικού λεωφορείου για τις Χαράξεις 1 – 4 ($V_e = 60 - 90 \text{ km/h}$) και ταχύτητα κίνησης 70 km/h σε ευμενές οδόστρωμα και κατά μήκος κλίση 0%

Πριν την ανάλυση των προβλημάτων που προκύπτουν με βάση τα δεδομένα που αναλύθηκαν στις δύο αυτές ενότητες, να σημειωθεί ότι σε κανένα από τα πειράματα που

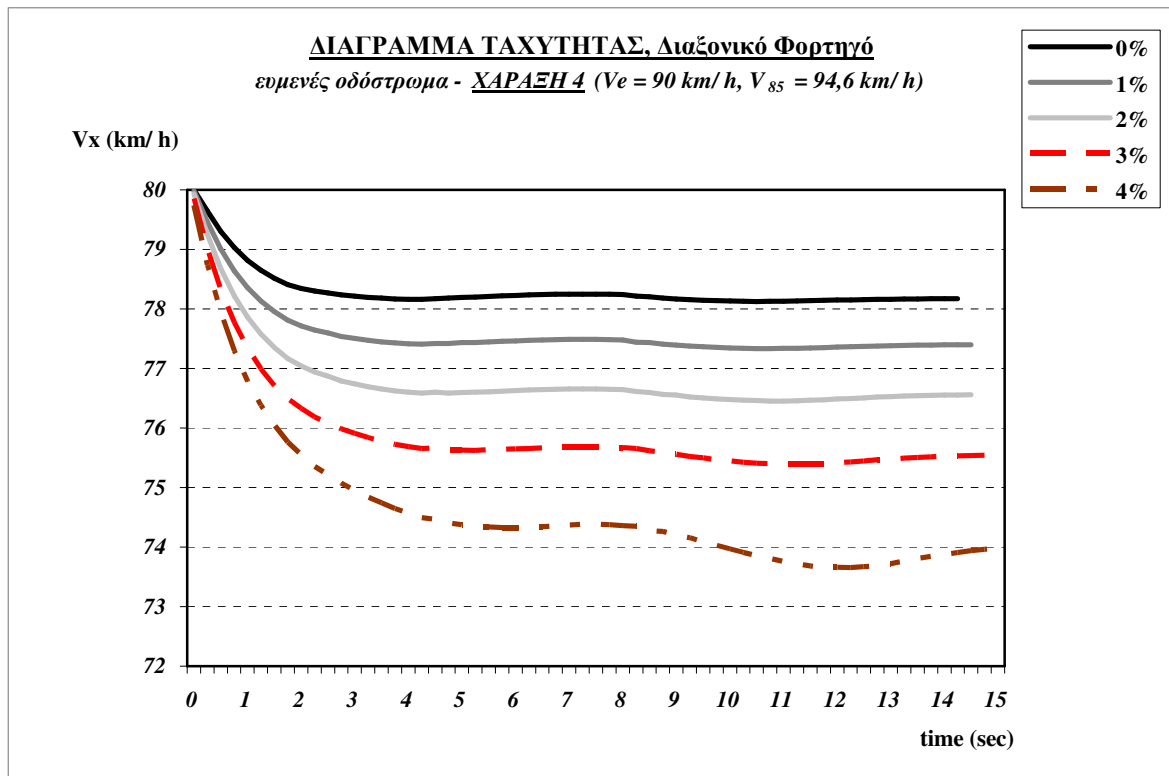
διεξήχθησαν δεν παρουσιάστηκε πρόβλημα αποκόλλησης κάποιου τροχού από το οδόστρωμα.

5.4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων

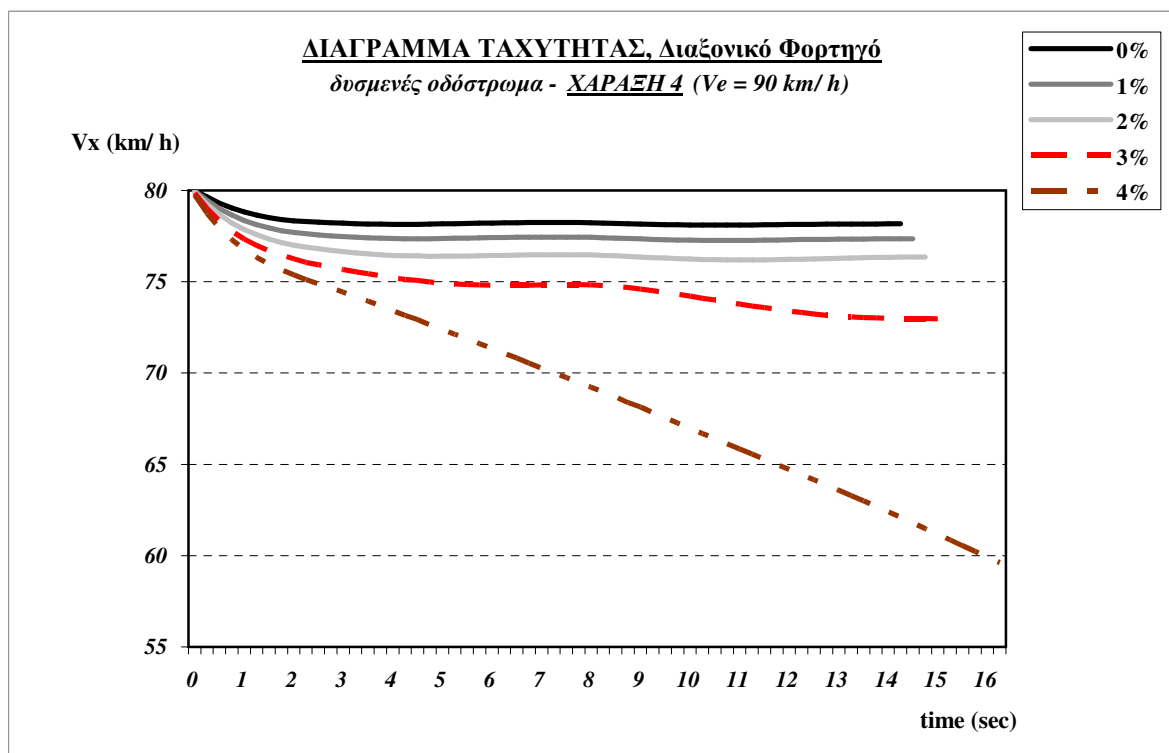
Παρόλο που οι προδιαγραφές σχεδιασμού επιτρέπουν κατά μήκος κλίσεις μεγαλύτερες του 7% για τις χαράξεις που επιλέχθηκαν, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ακόμα και σε μικρότερες κλίσεις δεν εξασφαλίζεται ασφαλής κίνηση για τα φορτηγά που εξετάστηκαν. Όσον αφορά το διαξονικό φορτηγό, κλίσεις της τάξης του 4% και 2% και άνω, για την περίπτωση αντίστοιχα της ευμενούς και δυσμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος, φαίνονται να είναι ιδιαίτερα κρίσιμες. Πέραν της απώλειας πρόσφυσης και της απόκλισης του οπίσθιου άξονα, πολύ βασικό πρόβλημα είναι η αδυναμία διατήρησης της ταχύτητας στο αρχικό επίπεδο. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται χαρακτηριστικά η αδυναμία διατήρησης της ταχύτητας των 80 km/h καθώς αυξάνεται η κατά μήκος κλίση, στην περίπτωση της τέταρτης χάραξης και για ευμενή πρόσφυση οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα είναι κατά πολύ χειρότερα στην περίπτωση της δυσμενούς πρόσφυσης (Σχήμα 5.7), αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η συγκεκριμένη χάραξη χαρακτηρίζεται από λειτουργική ταχύτητα επιβατηγών οχημάτων 94,6 km/h. Η αδυναμία διατήρησης της ταχύτητας εισάγει την ανάγκη για έλεγχο δημιουργίας λωρίδων ανάβασης βραδυπορούντων οχημάτων.

Όσον αφορά την αποφυγή απώλειας πρόσφυσης η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πολύ κρίσιμες καταστάσεις και στην πλαγιολίσθηση του οχήματος ή την εκτροπή του από το δρόμο, οι ρυθμίσεις που μπορούν να γίνουν είναι:

- *αύξηση της ακτίνας οριζόντιας καμπύλης.* Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 5.8 έως 5.9, οι χαράξεις που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες οριζόντιες ακτίνες παρουσιάζουν μικρότερα ποσοστά ολίσθησης ακόμα και στις μεγαλύτερες κατά μήκος κλίσεις. Η θέσπιση βέβαια μεγαλύτερων ακτινών δεν είναι πάντα εφικτή, ειδικά στην Ελλάδα όπου το έντονο ανάγλυφο θέτει περιορισμούς και επιβάλλει πολλές φορές οριακές χαράξεις.
- *επιβολή αποκλειστικών ορίων ταχύτητας για τα βαρέα οχήματα.* Στα Σχήματα 5.8 έως 5.9 είναι επίσης εμφανές ότι όσο μειώνεται η ταχύτητα μειώνεται και η πιθανότητα ολίσθησης, αλλά και της απόκλισης του οπίσθιου άξονα, η οποία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εμφανίζεται πολύ συχνά στην περίπτωση του τριαξονικού με το μεγάλο μεταξόνιο. Το γεγονός αυτό επιβάλλει περαιτέρω περιορισμούς στα *όρια ταχύτητας επιμηκών οχημάτων*. Η επιβολή βέβαια διαφορετικών ορίων ταχύτητας σε επιβατηγά και βαρέα οχήματα έχει αποτελέσει ένα ζητούμενο σε διάφορες έρευνες όσον αφορά το αντίκτυπο που έχει στην ασφάλεια των οδών. Παρά το γεγονός ότι η ασφαλής κίνηση ενός φορτηγού μπορεί να επιβάλλει χαμηλότερες ταχύτητες – ειδικά αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι αυτά απαιτούν μεγαλύτερα περιθώρια μήκους και χρόνου για ακινητοποίηση από ότι τα επιβατηγά – η διαφοροποίηση αυτή των ταχυτήτων αυξάνει τον κίνδυνο συγκρούσεων όπως οι νοτομετωπικές (rear-end collisions).
- *δημιουργία λωρίδων ανάβασης βραδυπορούντων οχημάτων.* Με βάση τα παραπάνω τίθεται και το θέμα ελέγχου δημιουργίας λωρίδων ανάβασης στις αυξημένες κατά μήκος κλίσεις. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο τρία, στις θετικές κατά μήκος κλίσεις υπεισέρχεται ο λόγος του μεικτού βάρους του οχήματος προς την ιπποδύναμη της μηχανής του (W/ HP). Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης αυτός τόσο αυξάνεται η δυσκολία ανάβασης και μειώνεται αντίστοιχα η μέγιστη σταθερή ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της έρευνας καθώς το τριαξονικό που έχει μεγαλύτερο λόγο μεικτού βάρους – ιπποδύναμης (54 kg/ KW) από το διαξονικό (34 kg/ KW), εμφανίζει το πρόβλημα σε οξύτερο βαθμό σε κλίσεις μεγαλύτερες του 3%.



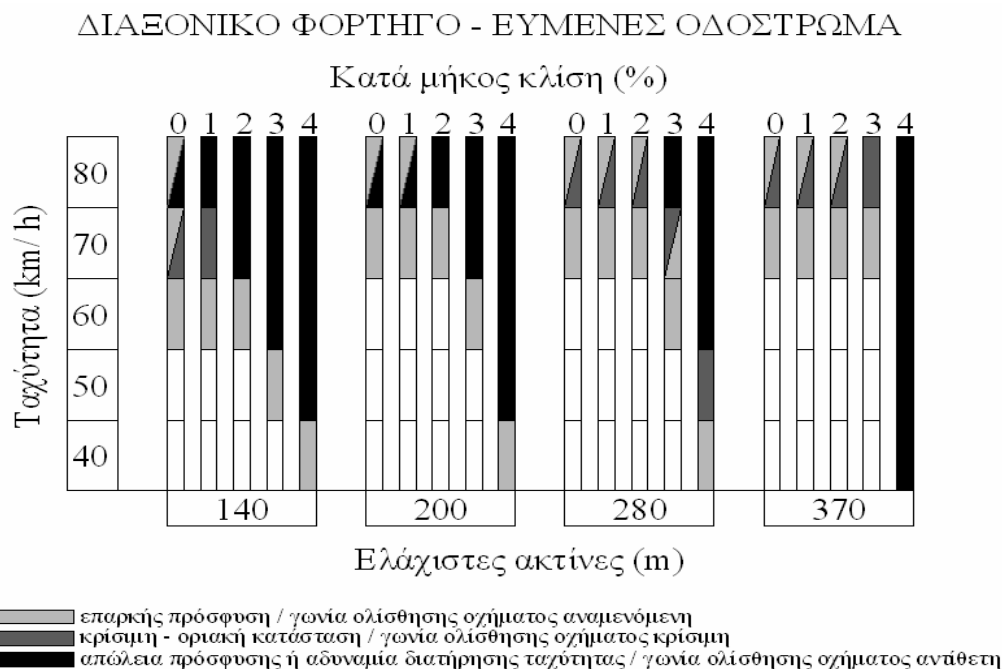
Σχήμα 5. 6: Χάραξη 4 – Διάγραμμα ταχύτητας διαξονικού φορτηγού για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων σε ευμενές οδόστρωμα



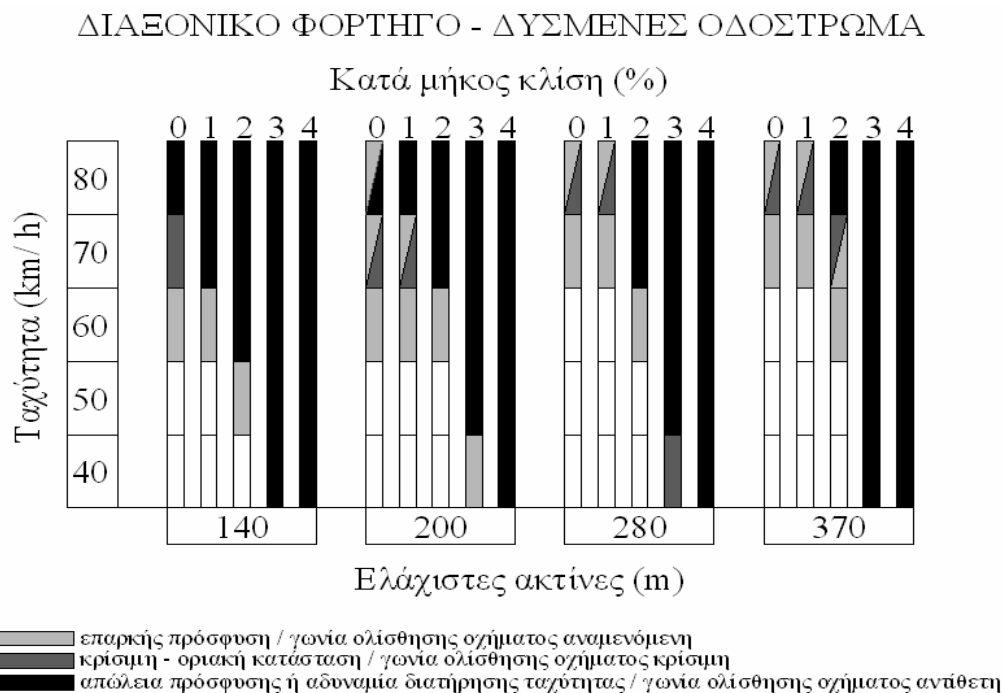
Σχήμα 5. 7: Χάραξη 4 – Διάγραμμα ταχύτητας διαξονικού φορτηγού για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων σε δυσμενές οδόστρωμα

5.5. Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα δίνεται μια συγκεντρωτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τα δύο οχήματα. Η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται όπως ήδη αναφέρθηκε στο Παράρτημα Α, όπου παρατίθενται αναλυτικά όλα τα διαγράμματα που αφορούν στο όχημα και τα ελαστικά, για κάθε πείραμα προσομοίωσης.

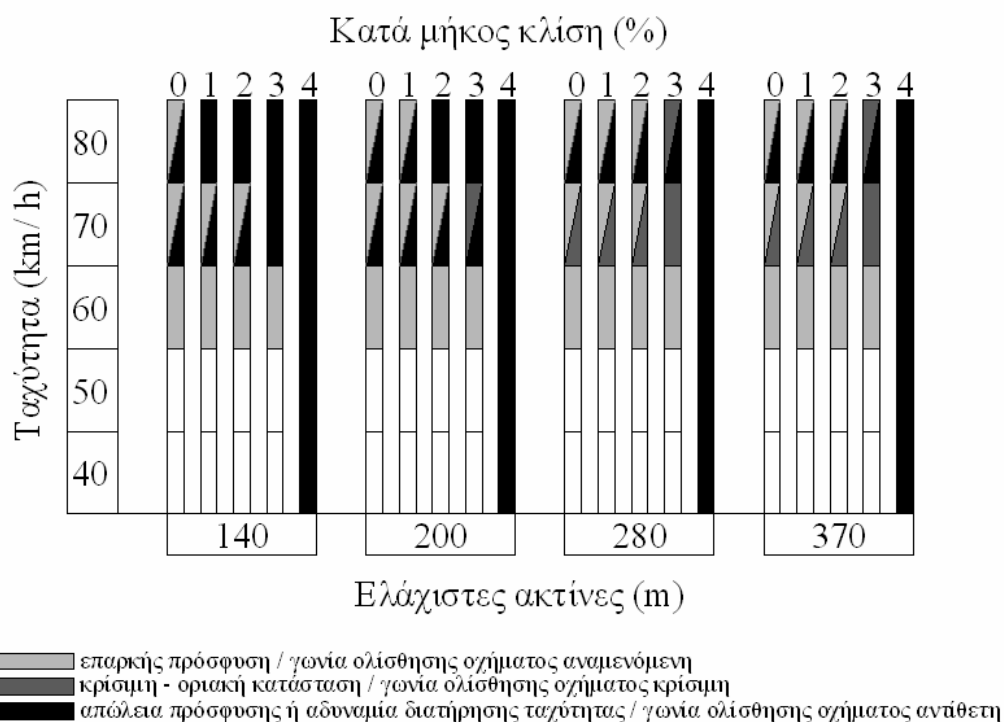


Σχήμα 5. 8: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το διαξονικό φορτηγό (ευμενές οδόστρωμα)



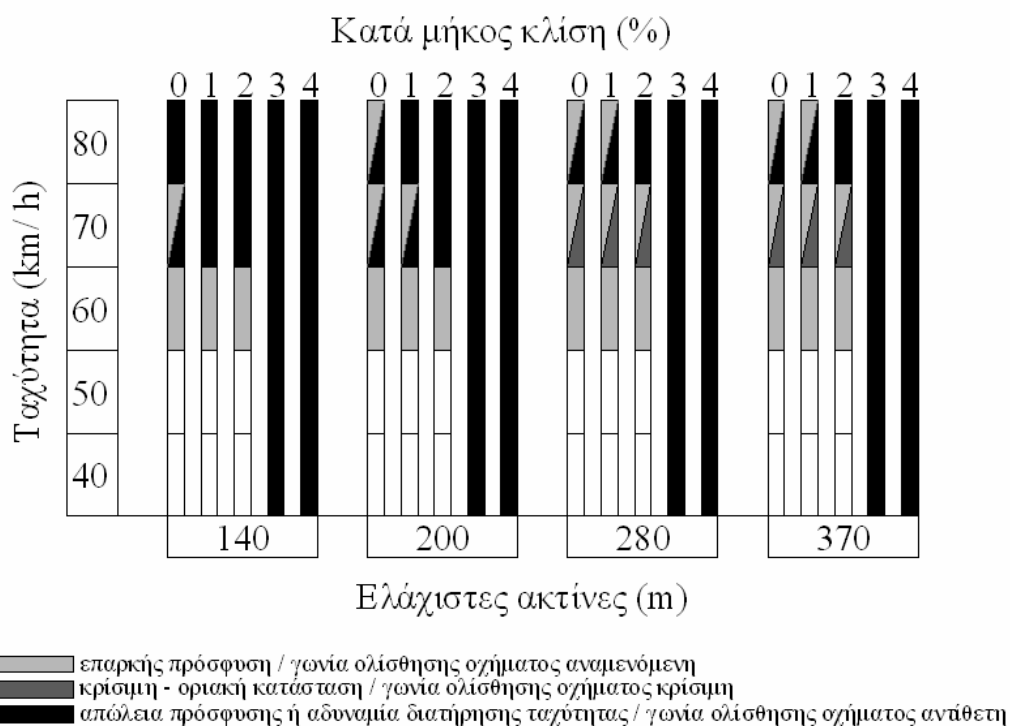
Σχήμα 5. 9: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το διαξονικό φορτηγό (δυσμενές οδόστρωμα)

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ - ΕΥΜΕΝΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ



Σχήμα 5. 10: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το τριαξονικό λεωφορείο (ευμενές οδόστρωμα)

ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΟ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟ - ΔΥΣΜΕΝΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ



Σχήμα 5. 11: Συγκεντρωτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων για το τριαξονικό λεωφορείο (δυσμενές οδόστρωμα)

6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΔΟΣ – ΟΧΗΜΑ ΜΕΣΩ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ IHSDM

Οι τέσσερις χαράξεις που εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω του προγράμματος προσομοίωσης βαρέων οχημάτων TruckSim, επανεξετάζονται εδώ για έναν κρίσιμο οδηγό και ένα κρίσιμο όχημα αναφοράς με σκοπό να συμπεριληφθεί στο σύστημα “οδός – όχημα” και ο παράγοντας του οδηγού.

6.1. Σύντομη Επισκόπηση του Προγράμματος

Το IHSDM (*Interactive Highway Safety Design Model*) συνιστά μια αλληλουχία λογισμικών ανάλυσης για την αξιολόγηση της ασφάλειας και των λειτουργικών επιδράσεων του γεωμετρικού σχεδιασμού στη διαδικασία του αναπτυξιακού έργου των οδών. Η ανάπτυξή του συντονίζεται υπό την αιγίδα της FHWA (Federal Highway Administration) και του TRB (Transportation Research Board). Το πλαίσιο εφαρμογής του καλύπτει μέχρι στιγμής τις *υπεραστικές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας*.

Το IHSDM σχεδιάστηκε ως ένα συμπληρωματικό εργαλείο για την επαύξηση και βελτίωση της διαδικασίας του σχεδιασμού, και προορίζεται για την πρόβλεψη της λειτουργικότητας και αποδοτικότητας προτεινόμενων ή υφιστάμενων σχεδιασμών, μέσω εφαρμογής των επιλεγμένων οδηγιών σχεδιασμού. Περιλαμβάνει τις εξής αυτοτελείς μονάδες (evaluation modules), οι οποίες αξιολογούν τους υπάρχοντες ή προτεινόμενους γεωμετρικούς σχεδιασμούς από διαφορετικές οπτικές γωνίες, και εκτιμούν τα μεγέθη που περιγράφουν στην εκάστοτε περίπτωση μια άποψη της προσδοκώμενης ασφάλειας και λειτουργικής απόδοσης του σχεδιασμού:

- Μοντέλο αξιολόγησης πολιτικών σχεδιασμού (Policy Review Module, PRM): Ελέγχει το σχεδιασμό σχετικά με το φάσμα των τιμών για κρίσιμες διαστάσεις που προτείνονται στις αμερικάνικες προδιαγραφές (AASHTO).
- Μοντέλου πρόβλεψης ατυχημάτων (Crash Prediction Module, CPM): Παρέχει εκτιμήσεις για την αναμενόμενη συχνότητα και σοβαρότητα ατυχημάτων.
- Μοντέλο συνέπειας σχεδιασμού (Design Consistency Module, DCM): Εκτιμά τις αναμενόμενες λειτουργικές ταχύτητες και εξακριβώνει τη συνέπεια των λειτουργικών ταχυτήτων.
- Μοντέλο αξιολόγησης κόμβων (Intersection Review Module, IRM): Παρέχει μια συστηματική αξιολόγηση των στοιχείων σχεδιασμού των κόμβων σχετικά με την πιθανή ασφάλεια και τη λειτουργική απόδοση.
- Μοντέλο κυκλοφοριακής ανάλυσης (Traffic Analysis Module, TAM): Εκτιμά τα μεγέθη κυκλοφοριακών λειτουργιών που χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό του επιπέδου εξυπηρέτησης και την αξιολόγηση της ποιότητας εξυπηρέτησης των οδών.
- Μοντέλο οδηγού – οχήματος (Driver/ Vehicle Module, DVM): Προσομοιώνει την οδηγική συμπεριφορά και τη δυναμική των οχημάτων σε οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Παρέχει προβλεπόμενες χρονικές σειρές για την ταχύτητα και άλλες μεταβλητές μαζί με στατιστικές μετρήσεις ασφαλούς συμπεριφοράς, διαμέσου της προσομοίωσης ενός συνδυασμού οδηγού – οχήματος.

Οι μετρήσεις της προσδοκώμενης ασφάλειας και λειτουργικής απόδοσης που υπολογίζονται μέσω του IHSDM, προορίζονται ως δεδομένα εισόδου στη διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά το σχεδιασμό. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται όπως ήδη αναφέρθηκε το μοντέλο DVM για την εισαγωγή της συμπεριφοράς του οδηγού στο σύστημα οδός – όχημα που μελετήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με την παραδοχή ενός κανονικού οδηγού (normal driver behaviour).

6.2. Επισκόπηση της Εφαρμογής DVM – Δυνατότητες & Προοριζόμενες Χρήσεις

Το DVM (*Driver/ Vehicle Module*) είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο οδηγικής συμπεριφοράς που προσομοιώνει την αντιληπτικότητα του οδηγού, την ικανότητά του, και τους χειρισμούς που αυτός κάνει για να στρίψει, να φρενάρει ή να επιταχύνει το όχημα. Ο αντικειμενικός σκοπός του μοντέλου, είναι να δώσει τη δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει το πώς θα χειριζόταν ο οδηγός το όχημα (π.χ. ένα επιβατηγό ή ένα φορτηγό) σε έναν ορισμένο γεωμετρικό σχεδιασμό, και να διαπιστώσει αν υπάρχουν συνθήκες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια ελέγχου του οχήματος (π.χ. ανατροπή ή ολίσθηση).

Το DVM αντιπροσωπεύει ένα συνδυασμό δύο αλληλεπιδρούντων και συνεργαζόμενων μοντέλων: του μοντέλου συμπεριφοράς του οδηγού (*Driver Performance Model, DPM*) και του μη γραμμικού μοντέλου ανάλυσης της δυναμικής του οχήματος (*Vehicle Dynamics Analysis Non-Linear Model, VDANL*). Πέντε υπολογιστικές συναρτήσεις συνιστούν το μοντέλο:

1. Αντίληψη (*perception*)
2. Απόφαση ταχύτητας (*speed decision*)
3. Απόφαση πορείας (*path decision*)
4. Έλεγχος ταχύτητας (*speed control*)
5. Έλεγχος πορείας (*path control*)

Καθώς το μοντέλο αυτό είναι όμοιο με πολύπλοκα μοντέλα ανθρώπινης συμπεριφοράς, περιέχει πολλές παραμέτρους οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν μόνο μέσω εμπειρικών ερευνών. Με σκοπό να αποκτηθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τη ανάπτυξη και επικύρωση του μοντέλου, διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων επί της οδού (*on-road experiments*). Το ζητούμενο κατά την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν να προσομοιωθούν οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της γεωμετρίας της οδού, του οχήματος, και του οδηγού, ούτως ώστε να:

- αξιολογηθεί το αντίκτυπο της αλληλεπίδραση οδηγού – οδού στην ασφάλεια,
- να βελτιωθεί ο σχεδιασμός ως προς την οδική ασφάλεια.

Το DVM προσδιορίζει την ταχύτητα του οχήματος και την πορεία που ακολουθεί αυτό κατά μήκος οδών δύο λωρίδων, απουσία άλλης κυκλοφορίας. Αυτοί οι υπολογισμοί διατίθενται για διάφορες μετρήσεις όπως πλευρικής επιτάχυνσης, απαιτούμενης τριβής και ροπής ανατροπής. Η συμπεριφορά του οδηγού επηρεάζεται από πρότυπα του συστήματος οδός – όχημα. Ο οδηγός δηλαδή, προσαρμόζει τη συμπεριφορά του βάση της ανάδρασης από το όχημα και το δρόμο, και ως επακόλουθο η απόδοση του οχήματος επηρεάζεται από την συμπεριφορά – απόδοση του οδηγού.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ 16 χαρακτηριστικών αξιολόγησης: 2 μέθοδοι αξιολόγησης (ντετερμινιστική, στοχαστική), επί 2 τύπους οχήματος (επιβατηγό Sedan, φορτηγό επικαθήμενης ρυμούλκας 18 τροχών), επί 2 τύπους οδηγού (ονομαστικός - κανονικός, επιθετικός), επί 2 επιλογές πορείας (κέντρο λωρίδας, «κόψιμο» καμπύλης).

Η ντετερμινιστική ανάλυση επιτρέπει την επισκόπηση των ποιοτικών επιπτώσεων της γεωμετρίας της οδού στη συμπεριφορά του οδηγού με μια και μόνο «εκτέλεση» για κάθε γεωμετρική διαμόρφωση. Έτσι η ντετερμινιστική δομή χρησιμοποιείται για την απόκτηση ενός αποτελέσματος μοναδιαίου μοντέλου για δοσμένη συνθήκη, με σκοπό τη διαπίστωση των επιδράσεων της γεωμετρίας στην οδηγική συμπεριφορά για έναν εξιδανικευμένο οδηγό (χωρίς θόρυβο). Η στοχαστική ανάλυση από την άλλη μεριά, η οποία απαιτεί 30 με 40 δοκιμές, παρέχει στατιστικά αποτελέσματα σχετικά με κρίσιμες μεταβλητές απόδοσης. Σε αυτή τη μέθοδο το μοντέλο εκτελείται πολλαπλές φορές (30 – 40 δοκιμαστικές) ώστε να δώσει στιγμή προς στιγμή και δοκιμή προς δοκιμή τις διακυμάνσεις στη συμπεριφορά του οδηγού.

Έτσι το DVM παρέχει τις ακόλουθες μετρήσεις αποτελεσματικότητας, και όπου χρειάζεται, τα όρια ή τις τιμές αναφοράς:

- πλευρικής επιτάχυνσης,
- απαίτησης σε τριβή,
- δεικτών ανατροπής σε σύγκριση με τα όρια ανατροπής,
- προβλεπόμενης ταχύτητας του οχήματος,
- πορείας του οχήματος συναρτήσει των λωρίδων κυκλοφορίας (πλευρική θέση),
- δεικτών πλευρικής ολίσθησης σε σύγκριση με τα όρια πλευρικής ολίσθησης,
- δεικτών διαμήκους ολίσθησης σε σύγκριση με τα όρια διαμήκους ολίσθησης.

6.3. Συστατικά Στοιχεία Μοντέλου DVM

6.3.1. Απαιτούμενα δεδομένα εισόδου

Γεωμετρικά στοιχεία οδών

Τα παρακάτω γεωμετρικά δεδομένα σχεδιασμού απαιτούνται για την εκτέλεση του μοντέλου:

- Γενικά:
 - Όριο ταχύτητας (η προεπιλεγμένη εντολή υποδεικνύει στον οδηγό να τηρήσει το τοποθετημένο όριο ταχύτητας). Τα όρια ταχύτητας τέθηκαν κατά περίπτωση ίσα με την ταχύτητα μελέτης (60 – 90 km/h).
 - Υψόμετρο (σε περίπτωση που αφορά - εδώ τοποθετείται ένα τυχαίο υψόμετρο στην αφετηρία, 10 m).
 - Κατεύθυνση (δίνεται επίσης ένας τυχαίος προσανατολισμός της χάραξης, 90°).
- Οριζοντιογραφία: Ορίζονται οι 4 σιγμοειδείς καμπύλες με τα ίδια στοιχεία που εξετάστηκαν και στο TruckSim, με χρήση ευθύγραμμων τμημάτων, κυκλικών τόξων και κλωθοειδών και τα αντίστοιχα κάθε φορά ελάχιστα μήκη βάση των κανονισμών.
- Μηκοτομή: Εξετάζονται οι κλίσεις 0%, 2%, 4% και 6%, οι οποίες ορίζονται ως επαπτόμενες.
- Επικλίσεις: Ορίζονται οι ίδιες επικλίσεις που χρησιμοποιήθηκαν και στο TruckSim για κάθε διατομή (συναρτήσει του μήκους).
- Λωρίδες κυκλοφορίας: Ορίζονται τα πλάτη των λωρίδων κυκλοφορίας για κάθε κατεύθυνση (επίσης όμοια με τα προεξετασθέντα).

Δεδομένα αξιολόγησης

Τα δεδομένα αξιολόγησης συντελούνται από τα όρια αξιολόγησης, και περιέχουν τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες της προσομοίωσης και του συστήματος οδηγός – όχημα. Τα όρια αξιολόγησης είναι οι σταθμοί αρχής και τέλους. Οι ιδιότητες του συστήματος οδηγός – όχημα αφορούν στη μέθοδο προσομοίωσης, τον τύπο του οδηγού, την απόφαση πορείας και τον τύπο του οχήματος. Στην παρούσα εξέταση χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- ντετερμινιστική και στοχαστική μέθοδος αξιολόγησης,
- ως πιο κρίσιμος επιλέχθηκε ο επιθετικός οδηγός, μιας και στο προηγούμενο λογισμικό η συμπεριφορά του χρήστη ήταν αμελητέα,
- πορεία στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας επιλέχθηκε και εδώ ως επιδιωκόμενη τροχιά,

- και τέλος χρησιμοποιήθηκε το φορτηγό με επικαθήμενη ρυμούλκα.
Έτσι, σε αντίθεση με την εφαρμογή που έγινε στο TruckSim, εδώ καλύπτεται μια οριακή και κρίσιμη περίπτωση οδηγού – οχήματος, μιας και τα φορτηγά με ενιαίο σώμα (Single Unit Trucks) αντικαταστάθηκαν από ρυμουλκούμενο (Tractor – Trailer Truck), και η αμελητέα επίδραση της συμπεριφοράς του οδηγού, από μια που αναπαριστά το 85% των οδηγών όπως εκτιμήθηκε από επιτόπιες έρευνες για τις ανάγκες του μοντέλου.

Ρυθμίσεις προσομοίωσης

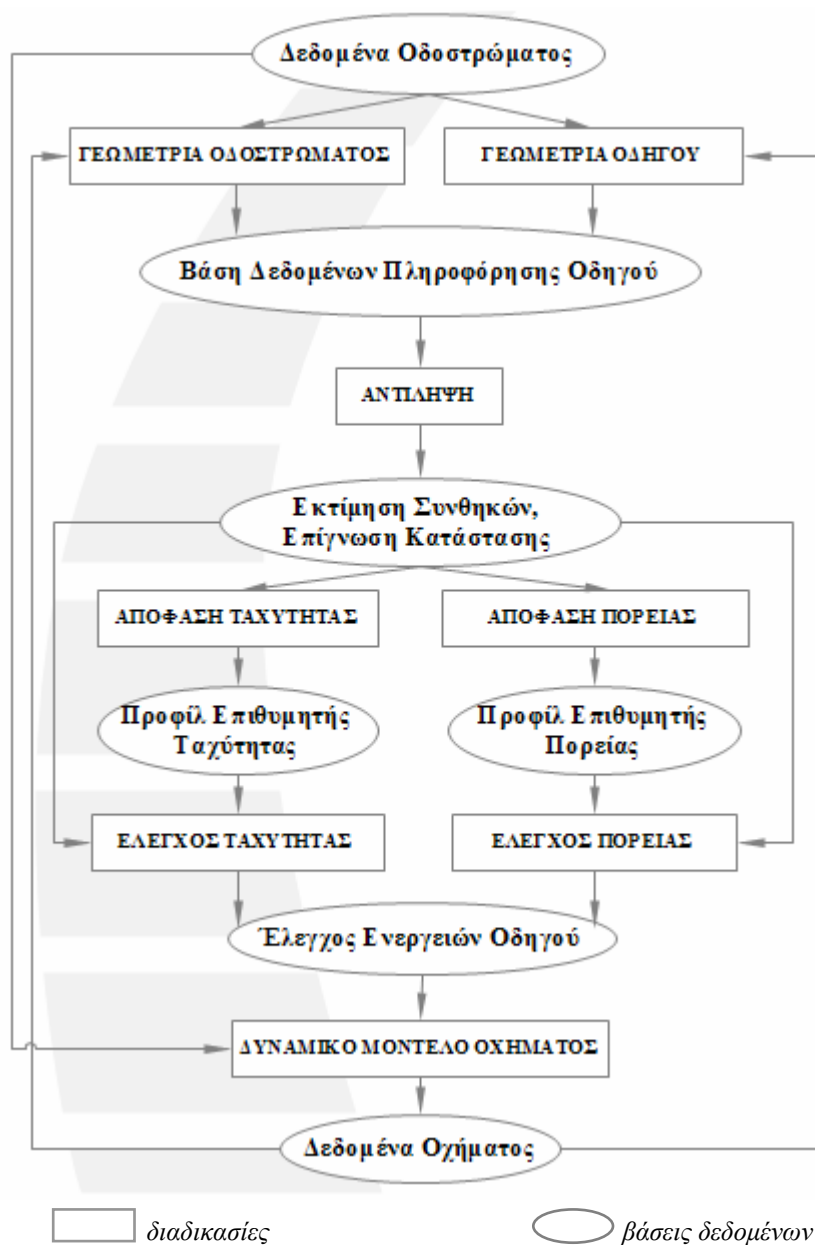
Μέσω των ρυθμίσεων μπορούν να οριστούν παράμετροι λειτουργίας του μοντέλου όπως τα χρονικά διαστήματα για τα οποία θα καταγράφονται τα αποτελέσματα στην αναφορά (0,1 δευτερόλεπτο είναι η ονομαστική αλλά και ελάχιστη δυνατή τιμή που χρησιμοποιήθηκε), τη συχνότητα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ο οδηγός και το όχημα (0,005 δευτερόλεπτο είναι η ονομαστική αλλά και ελάχιστη δυνατή τιμή που χρησιμοποιήθηκε), την ελεύθερη ταχύτητα με την οποία θα επιλέξει να κινηθεί ο οδηγός αν δεν περιορίζεται από τη γεωμετρία ή τα όρια ταχύτητας, το αν ο οδηγός υπακούει στα υπάρχοντα όρια ταχύτητας (η προεπιλεγμένη εντολή υποδεικνύει στον οδηγό να τηρήσει το τοποθετημένο όριο ταχύτητας), και τέλος το επίπεδο της εξοικειώσης του οδηγού με το δρόμο (εξοικειωμένος).

6.3.2. Συνιστώντα μέρη του μοντέλου DVM – Τρόπος λειτουργίας

Στο Σχήμα 6.1 αποτυπώνεται η ροή της πληροφορίας εντός του μοντέλου. Τα στοιχεία της γεωμετρίας της οδού και του οδηγού εκτελούν συντονισμένους μετασχηματισμούς των δεδομένων της οδού και υπολογίζουν ορισμένες μεταβλητές «σφάλματος», όπως το ποσοστό εκτροπής του οχήματος, οι οποίες πρόκειται να διορθωθούν από τον οδηγό. Το μοντέλο ανάλυσης της δυναμικής του οχήματος (VDM) απαντά στους χειρισμούς του οδηγού καθώς επίσης και στα εισαγόμενα από τη γεωμετρία της οδού, προκειμένου να προσομοιώσει την κίνηση του οχήματος. Το τμήμα του οδηγού στο DVM έχει πέντε βασικά λειτουργικά στοιχεία, τα οποία διασυνδέονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Αυτά τα στοιχεία είναι όπως ήδη αναφέρθηκε:

- η αντίληψη (perception): αυτό το στοιχείο ερμηνεύει τη φυσική περιγραφή της κατάστασης που περιέχεται στη βάση δεδομένων εισόδου για τον οδηγό σε εκτιμήσεις για το πώς αυτός θα αντιληφθεί τα χαρακτηριστικά της οδού και θα χειριστεί το όχημα, καθώς και άλλων σχετικών μεταβλητών που χρειάζονται για την απόφαση και τον έλεγχο της ταχύτητας και της πορείας.
- η απόφαση - επιλογή ταχύτητας (speed decision): αυτό το στοιχείο υπολογίζει την επιθυμητή ταχύτητα που επιλέγει ο οδηγός. Η επιθυμητή ταχύτητα τυπικά διαφέρει κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης και, κάθε στιγμή, ο οδηγός θα προσπαθεί να πραγματοποιήσει ένα από τα ακόλουθα: α) να διατηρήσει σταθερή ταχύτητα, β) να επιβραδύνει ή να επιταχύνει κατάλληλα ώστε να εισέλθει ή να εξέλθει από την καμπύλη, γ) να επιβραδύνει εξαιτίας συνθηκών όπως μείωση του ορίου ταχύτητας ή άλλης σηματοδότησης που απαιτεί μείωση της ταχύτητας ή πλήρη ακινητοποίηση του οχήματος, δ) να επιταχύνει ώστε να ανακτήσει την ταχύτητα μετά το πέρας των συνθηκών που τον οδήγησαν να επιβραδύνει ή να ακινητοποιήσει το όχημα. Η απόφαση της ταχύτητας μπορεί να επηρεαστεί από περιορισμένα μήκη ορατότητας.
- η απόφαση - επιλογή πορείας (path decision): αυτό το στοιχείο υπολογίζει την επιθυμητή πορεία, η οποία είναι είτε στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας είτε σε τροχιά πιο ομαλή από αυτή που ορίζει από το κέντρο της λωρίδας (cut the curve).

- ο έλεγχος ταχύτητας (speed control) και ο έλεγχος πορείας (path control): τα δύο αυτά στοιχεία εκτελούν κλειστούς βρόγχους διαδικασιών για τη ρύθμιση της ταχύτητας και της πορείας για τα προφίλ που παράχθηκαν στο προηγούμενο στάδιο της επιλογής των στοιχείων αυτών. Καθώς η πλευρική απόκλιση στην πορεία γενικά απαιτεί σημαντικά πιο αυστηρό έλεγχο από ότι η απόκλιση στην ταχύτητα (απουσία κυκλοφορίας), ξεχωριστά στοιχεία μοντέλων για τη ρύθμιση των δύο αυτών παραμέτρων ορίζονται ώστε να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση διαφορετικών προσεγγίσεων και να δοθεί μελλοντικά η δυνατότητα ανεξάρτητης ανάπτυξης μοντέλων ελέγχου ταχύτητας και πορείας.



Σχήμα 6. 1: Διάγραμμα ροής πληροφοριών στο DVM

Παραδοχές

Μερικές από τις βασικές παραδοχές που γίνονται στα πέντε στοιχεία που αναλύθηκαν παραπάνω, είναι οι εξής:

- ο οδηγός εκτιμά την κατάλληλη ταχύτητα ώστε να διασχίσει την καμπύλη, βάση της εμπειρίας του από αντίστοιχα καμπύλα οδικά τμήματα,
- ο οδηγός εξομαλύνει την καμπύλη με το να ξεκινά το στρίψιμο του τιμονιού πριν μπει στην καμπύλη, και με το να ισιώνει το τιμόνι προτού βγει από αυτή,
- ο οδηγός προσπαθεί να διασχίσει την καμπύλη με πλευρική επιτάχυνση που ποικίλει και ισούται με την τετραγωνική ρίζα της καμπυλότητας,
- ο οδηγός προσπαθεί να διατηρήσει την ελεύθερη ταχύτητα (V_{free}), εκτός αν περιορίζεται από τη γεωμετρία, τα ανηρημένα όρια ταχύτητας ή άλλη σήμανση (π.χ. ρυθμιστική πινακίδα υποχρεωτικής διακοπής πορείας, *STOP*).

6.3.3. Υπολογισμοί

Οι υπολογισμοί που ενδιαφέρουν κυρίως για τις ανάγκες τις έρευνας είναι αυτοί των δεικτών τριβής, ούτως ώστε να διαπιστωθούν πιθανά προβλήματα ολίσθησης. Καθώς στο DVM δίνεται η δυνατότητα να εξεταστούν μόνο *αφόρτωτα οχήματα*, δεν προκύπτουν προβλήματα ανατροπής, κάτι που είχε επισημανθεί και από την επικύρωση και τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Τα όρια του δείκτη ανατροπής είναι +/- 1 και σε περίπτωση που ξεπεραστούν το μοντέλο διακόπτει την προσομοίωση λόγω ανατροπής.

Το μοντέλο υπολογίζει τους απαιτούμενους συντελεστές τριβής για κάθε διεύθυνση (διαμήκη, πλευρική) από τη σχέση:

$$f_{dx} = \frac{a_x}{9,806} - s(\%) \qquad f_{dy} = \frac{a_y}{9,806} - q(\%) \qquad (6-1)$$

όπου:

f_{dx} = ο απαιτούμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής

f_{dy} = ο απαιτούμενος συντελεστής εγκάρσιας τριβής

a_x = η διαμήκης επιτάχυνση (km/ h)

a_y = η πλευρική επιτάχυνση (km/ h)

s = η κατά μήκος κλίση (%)

q = η επίκλιση (%), η οποία θεωρείται θετική για στροφή του οδοστρώματος κατά τη φορά του ρολογιού

Ο διατιθέμενος συντελεστής υπολογίζεται βάση της ταχύτητας από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f_a = 0,5 \qquad \text{για ταχύτητα } V \leq 8,3 \text{ m/ s} \qquad (6-2)$$

$$f_a = 0,5 - 0,0076(V - 8,3) \qquad \text{για ταχύτητα } V > 8,3 \text{ m/ s} \qquad (6-3)$$

Η διατύπωση αυτή του διατιθέμενου συντελεστή τριβής, πηγάζει από τις οδηγίες των AASHTO “Green Book”, για διατιθέμενη τριβή μεταξύ καινούριων ελαστικών και υγρό οδόστρωμα (από σκυρόδεμα).

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι δείκτες διαμήκους και εγκάρσιας τριβής:

$$FrictionRatio(X) = \frac{f_{dx}}{f_a} \qquad FrictionRatio(Y) = \frac{f_{dy}}{f_a} \qquad (6-4)$$

Τα όρια του κριτηρίου και για τους δύο δείκτες είναι +/- 1. Τα όρια καταδεικνύουν ότι το όχημα βρίσκεται σε συνθήκες οριακής ολίσθησης, ενώ το πρόσημο υποδεικνύει την κατεύθυνση της επικείμενης ολίσθησης.

Έτσι κατευθείαν από τα εξαγόμενα του μοντέλου μπορεί να εντοπιστούν κρίσιμες θέσεις για κίνδυνο ολίσθησης, σε συνδυασμό με υψηλές τιμές πλευρικής επιτάχυνσης (0,4 g λαμβάνεται ως μέγιστη επιτρεπόμενη πλευρική επιτάχυνση) και πλευρικής απόκλισης από την πορεία.

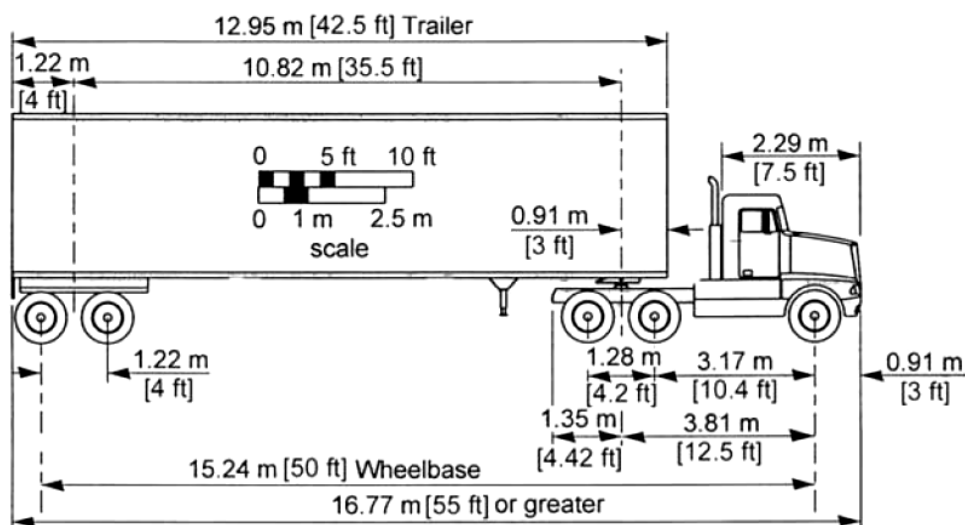
Κάτι που πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο, είναι ότι οι προκύπτοντες από τους υπολογισμούς του μοντέλου συντελεστές εφαρμόζονται τόσο για επιβατηγά όσο και για φορτηγά οχήματα, αφορούν στην περίπτωση ευμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος. Επίσης δεν υπάρχει διαφοροποίηση των διατιθέμενων συντελεστών για ελαστικά επιβατηγών και φορτηγών οχημάτων. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3, τα ελαστικά των φορτηγών είναι κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να μη φθείρονται εύκολα. Για το λόγο αυτό τείνουν να έχουν μικρότερους συντελεστές τριβής σε υγρό οδόστρωμα από ότι τα ελαστικά των επιβατηγών κατά ένα ποσοστό της τάξης του 30%, στοιχείο που δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς του μοντέλου. Έτσι, η αλληλεπίδραση ελαστικού – οδοστρώματος σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικά ευμενέστερη σε σύγκριση με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα του TruckSim, μιας και εδώ οι διατιθέμενοι συντελεστές πρόσφυσης είναι αρκετά μεγαλύτεροι, ξεπερνώντας το 0,41 και φτάνοντας μέχρι και το 0,45.

6.4. Αποτελέσματα

6.4.1. Εισαγωγικά

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις τέσσερις χαράξεις θα οριστούν οι παραδοχές που έγιναν για όλα τα σενάρια:

- Όχημα σχεδιασμού = WB – 15 [WB – 50] – αφόρτωτο (Εικόνα 6.1)
- Τύπος οδοστρώματος = υπεραστικές οδοί δύο λωρίδων κυκλοφορίας
- Πλάτος λωρίδας = 3,00 m (χάραξη 1), 3,25 m (χάραξη 2), 3,50 m (χάραξη 3), 3,75m (χάραξη 4)
- Ορισμός ταχυτήτων = Πίνακας 6.1
- Ορισμός τροχιάς = κέντρο λωρίδας
- Τύπος οδηγού = επιθετικός



Εικόνα 6. 1: Διαστάσεις ημι-ρυμουλκούμενου φορτηγού WB-15 (18 τροχών) βάση AASHTO Green Book

Πίνακας 6. 1: Ορισμός ταχυτήτων

	V_e (km/ h)	$V_{desired}$ (km/ h)	V_{posted} (km/ h)
ΧΑΡΑΞΗ 1	60	70	60
ΧΑΡΑΞΗ 2	70	70	70
ΧΑΡΑΞΗ 3	80	70	80
ΧΑΡΑΞΗ 4	90	70	90

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι ταχύτητες που ορίστηκαν για κάθε χάραξη. Ως επιθυμητή ταχύτητα ορίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις αυτή των 70 km/h , η οποία αφορά στο όριο ταχύτητας για το συγκεκριμένο τύπο οχήματος. Έτσι, αν ο οδηγός δεν περιορίζεται από τη γεωμετρία ή τα όρια ταχύτητας (τα οποία τέθηκαν ίσα με τις ταχύτητες μελέτης), βάση του μοντέλου επιχειρεί να κινηθεί με αυτή την ταχύτητα. Η ελεύθερη ταχύτητα ορίστηκε επίσης στα 70 km/h , ώστε να μην επιτραπεί σε κάποιον οδηγό να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα από το όριο ταχύτητας για αυτά τα φορτηγά.

Γενικά, για έναν οδηγό φορτηγού δεν είναι επωφελές να κινηθεί προς το εσωτερικό της καμπύλης. Είναι πιο πιθανό ο οδηγός να επιλέξει να κινηθεί προς το εξωτερικό της καμπύλης, ώστε να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα το ρυμουλκούμενο να περάσει τα όρια της λωρίδας. Αυτή η συμπεριφορά δεν διατίθεται προς το παρόν στο μοντέλο, και έτσι επιλέχθηκε η πορεία στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας.

Ο επιθετικός οδηγός διαφέρει ως προς τον αντίστοιχο εικονικό οδηγό ως προς τρεις παραμέτρους που έχουν αναπροσαρμοστεί ώστε να αναπαραριστούν την προβλεπόμενη συμπεριφορά του οδηγού σε ποσοστό 85%, αναφορικά με την ελεύθερη ταχύτητα, τον παράγοντα της πλευρικής επιτάχυνσης, και την προτιμώμενη διαμήκη επιτάχυνση. Οι αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους, επιτρέπουν στον οδηγό να κινηθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα απουσία παραγόντων γεωμετρικών χαρακτηριστικών και άλλων οχημάτων, να παίρνει τις στροφές με μεγαλύτερη ταχύτητα και να ανέχεται μεγαλύτερες πλευρικές επιταχύνσεις, αλλά και να φρενάρει πιο απότομα. Έτσι ο επιθετικός οδηγός κρίνεται πιο κρίσιμος και αναμένεται να δώσει πιο οριακά αποτελέσματα, γεγονός που επαληθεύτηκε και από την εφαρμογή του μοντέλου για τα βαρέα οχήματα [17].

Όλες οι χαράξεις εξετάστηκαν με τόσο με την ντετερμινιστική όσο και με τη στοχαστική μέθοδο. Η ντετερμινιστική μέθοδος, η οποία θεωρεί απουσία διαφοροποίησης στην αντίληψη και την αντίδραση του οδηγού, επιλέχθηκε ούτως ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων χαράξεων, για τις διάφορες δηλαδή ακτίνες οριζόντιας καμπύλης, κάτω από την επιρροή του ίδιου οδηγού, αλλά και για σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά του TruckSim, στο οποίο επίσης γινόταν η θεώρηση ενός μόνο οδηγού του οποίου η επίδραση ήταν αμελητέα.

Η στοχαστική ανάλυση από την άλλη μεριά, δίνει τη δυνατότητα να διαπιστωθούν προβλήματα και επικίνδυνα σημεία σε κάθε μία χάραξη, βάση της διαφοροποίησης των οδηγών (30 τυχαία οδηγοί, διαφορετικού τύπου για κάθε σενάριο).

Όσον αφορά στη στοχαστική μέθοδο, το μοντέλο υπολογίζει και παρέχει πίνακες για τα εξής (υποθέτοντας κανονική κατανομή):

- τυπική απόκλιση των κρίσιμων μεταβλητών,
- Z_1 τιμές των κρίσιμων μεταβλητών,
- Z_2 τιμές των κρίσιμων μεταβλητών,
- κανονική πιθανότητα κρίσιμων μεταβλητών

τα οποία υπολογίζονται με την παρακάτω διαδικασία:

$$Z_1 = \frac{(\mu - LL)}{\sigma} \quad (6-5)$$

$$Z_2 = \frac{(\mu - UL)}{\sigma} \quad (6-6)$$

$$P = (1 + 0,196854 \cdot Z_k + 0,115194 \cdot Z_k^2 + 0,0003442 \cdot Z_k^3 + 0,0195272 \cdot Z_k^4)^{-4} \quad (6-7)$$

όπου:

μ = η μέση τιμή

LL = το κατώτατο όριο της οριακής τιμής. Για τους δείκτες τριβής ισούται με -1, ενώ για την πλευρική απόκλιση με $LL = -\frac{(\text{πλάτοςλωρίδας} - \text{πλάτοςοχήματος})}{2}$

UL = το ανώτατο όριο της οριακής τιμής. Για τους δείκτες τριβής ισούται με 1, ενώ για την πλευρική απόκλιση με $UL = \frac{\text{πλάτοςλωρίδας} - \text{πλάτοςοχήματος}}{2}$

P = η πιθανότητα για την τιμή της μεταβλητής να πάει κάτω (πάνω) από το ελάχιστο (μέγιστο) όριο (υποθέτοντας κανονική κατανομή), για $k = [1, 2]$.

Συνοψίζοντας τα μέτρα αποδοτικότητας (measures of effectiveness, MOEs) όπως αναφέρονται στο DVM, τα οποία καταδεικνύουν δυνητικά προβλήματα ασφαλείας σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος των χαράξεων, είναι:

- η πλευρική μετατόπιση - απόκλιση (θέση στη λωρίδα, lateral offset),
- ο δείκτης ανατροπής,
- ο δείκτης πλευρικής τριβής (δείκτης πλαγιολίσθησης),
- ο δείκτης επαπτομενικής τριβής (δείκτης διαμήκους ολίσθησης).

Στα εξαγόμενα του μοντέλου υποδεικνύεται η ύπαρξη ή μη προβλήματος ή κρίσιμη κατάσταση, με κόκκινες (πιθανότητα ίση ή μεγαλύτερη του 1%), πράσινες (πιθανότητα μικρότερη του 0,1%) ή κίτρινες (πιθανότητα μεγαλύτερη του 0,1% και μικρότερη του 1%) «σημαίες» αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζονται τα στοιχεία σχεδιασμού των χαράξεων (Πίνακας 6.2), προκειμένου να παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6. 2: Κύρια στοιχεία σχεδιασμού χαράξεων

α/ α	Στοιχεία σιγμοειδούς καμπύλης
ΧΑΡΑΞΗ 1	Ταχύτητα μελέτης 60 km/ h, Rmin = 140 m, s = 0% - 9%
ΧΑΡΑΞΗ 2	Ταχύτητα μελέτης 70 km/ h, Rmin = 200 m, s = 0% - 8%
ΧΑΡΑΞΗ 3	Ταχύτητα μελέτης 80 km/ h, Rmin = 280 m, s = 0% - 7%
ΧΑΡΑΞΗ 4	Ταχύτητα μελέτης 90 km/ h, Rmin = 370 m, s = 0% - 7%

6.4.2. Ντετερμινιστική προσέγγιση

Από την εφαρμογή της ντετερμινιστικής μεθόδου στις τέσσερις χαράξεις και για σταθερές κατά μήκος κλίσεις 0%, 2%, 4% και 6%, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

Πρόβλημα ολίσθησης παρουσιάστηκε στην πρώτη χάραξη για όλες τις κατά μήκος κλίσεις, και ταχύτητα κίνησης 60 km/h , στις θέσεις 50 έως 51. Σε αυτές τις θέσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στην έξοδο του οχήματος από την πρώτη καμπύλη, οι λόγοι απαιτούμενου προς διατιθέμενου συντελεστή *εγκάρσιας* τριβής έφτασαν και ξεπέρασαν τη μονάδα, γεγονός που καταδεικνύει απώλεια πρόσφυσης στα συγκεκριμένα σημεία και κίνδυνο πλαγιολίσθησης. Επίσης, στα ίδια σημεία (για θέσεις 50 έως 52) παρατηρήθηκαν υψηλές πλευρικές επιταχύνσεις, οι οποίες έφτασαν και τα $0,5 \text{ g}$, όταν η μέγιστη επιτρεπόμενη έχει οριστεί στα $0,4 \text{ g}$, γεγονός που επιβεβαιώνει την επικινδυνότητα των θέσεων αυτών. Όσον αφορά στη διαμήκη κίνηση δεν παρουσιάστηκε πρόβλημα ολίσθησης. Επίσης όπως ήταν αναμενόμενο δεν υπήρξε παραβίαση των ορίων ανατροπής. Αναφορικά όμως με την πλευρική μετατόπιση, για την οποία τα όρια υπολογίστηκαν με βάση το μοντέλο στα $\pm 0,49$, εμφανίστηκε παραβίαση και γενικά προσέγγιση των οριακών τιμών στις θέσεις μεταξύ 56 και 64, οι οποίες αντιστοιχούν στις θέσεις όπου γίνεται η μετάβαση από την πρώτη καμπύλη στη δεύτερη καμπύλη αντίστροφης καμπυλότητας, κάτι που είναι αναμενόμενο.

Η δεύτερη χάραξη, η οποία πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα κίνησης 70 km/h , παρουσίασε για κατά μήκος κλίσεις $0\% - 2\%$ προβλήματα υψηλής πλευρικής μετατόπισης στις θέσεις από 104 έως 111, οι οποίες αντιστοιχούν στο τέλος της μετάβασης και την είσοδο στη δεύτερη καμπύλη. Κατά τα άλλα δεν εντοπίστηκαν προβλήματα παραβίασης στα όρια ολίσθησης και ανατροπής. Το γεγονός ότι σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου η χάραξη αυτή δεν παρουσίασε πρόβλημα πλαγιολίσθησης δεν έχει να κάνει τόσο με το γεγονός ότι χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες ακτίνες οριζόντιας καμπύλης σε σχέση με την προηγούμενη χάραξη, αλλά κυρίως στο γεγονός ότι οι *διατιθέμενοι* συντελεστές τριβής είναι υψηλοί. Εδώ χρησιμοποιείται ένα μοντέλο οδοστρώματος που δεν λαμβάνει το φάσμα τιμών ($1,10 - 1,45$) που χρησιμοποιήθηκε στην εξέταση των χαράξεων με το προηγούμενο πρόγραμμα προσομοίωσης, αλλά αντιθέτως θεωρεί μια περίπτωση ευμενούς πρόσφυσης ελαστικού – οδοστρώματος. Επίσης, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω δεν λαμβάνονται υπόψη οι διορθωτικοί συντελεστές για τα ελαστικά των φορτηγών. Έτσι, για το φορτηγό προκύπτουν οι ίδιοι διατιθέμενοι συντελεστές τριβής που θα προέκυπταν αν εξεταζόταν το επιβατηγό όχημα. Η χάραξη αυτή λοιπόν, εμφανίζει *απαιτήσεις* για εγκάρσιους συντελεστές τριβής που φθάνουν και το $0,31$, τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο διατιθέμενο συντελεστή τριβής που είχε οριστεί για το *ευμενές* οδόστρωμα στο πρόγραμμα TruckSim, πράγμα που σημαίνει ότι αν είχαν συνυπολογιστεί οι διορθωτικοί συντελεστές για τα ελαστικά των φορτηγών στο μοντέλο, τα αποτελέσματα θα έδιναν ολίσθηση όχι μόνο στην περίπτωση της δυσμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος, αλλά και στη περίπτωση του ευμενούς. Η απλοποίηση αυτή του μοντέλου φαίνεται ότι έχει σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα και θα πρέπει σίγουρα να αναθεωρηθεί.

Ακολούθως, στην τρίτη και τέταρτη χάραξη δεν παρουσιάστηκε παραβίαση ορίων σε καμιά κατά μήκος κλίση. Και εδώ εμφανίζεται η έλλειψη του μοντέλου όσον αφορά στην προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ελαστικού – οδοστρώματος. Αν και στις δύο αυτές χαράξεις οι απαιτήσεις σε εγκάρσια πρόσφυση είναι αρκετά μικρότερες λόγω και των σημαντικά μεγαλύτερων ακτινών των σιγμοειδών καμπυλών, για την περίπτωση του δυσμενούς οδοστρώματος θα ήταν αρκετές για να οδηγήσουν σε απώλεια της πρόσφυσης στην περίπτωση του φορτηγού.

Καταλήγοντας σε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αυτά του TruckSim, προκύπτει (αν ληφθούν υπόψη οι διορθωτικοί συντελεστές για τα ελαστικά των φορτηγών στο μοντέλο του DVM) ότι όντως ο παράγοντας του οδηγού έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται οι ταχύτητες ασφαλείας που προέκυψαν για το τριαξονικό λεωφορείο από την εφαρμογή στο TruckSim. Αυτές οι ταχύτητες αναφέρονται μόνο στην ασφάλεια ως προς την απώλεια πρόσφυσης, και όχι στους άλλους παράγοντες που εξετάστηκαν προτού οριστεί η ταχύτητα ασφαλείας (π.χ. γωνίες ολίσθησης οχήματος).

Πίνακας 6. 3: Ασφαλής ταχύτητα τριαξονικού λεωφορείου ως προς την πλαγιολίσθηση βάση των αποτελεσμάτων του TruckSim ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα

α/ α	Κλίση (%)			
	0%	2%	4%	6%
1	80 / 70	70 / 60	X / X	X / X
2	80 / 80	70 / 60	X / X	X / X
3	80 / 80	80 / 70	X / X	X / X
4	80 / 80	80 / 70	X / X	X / X

Παρατηρείται λοιπόν σε ότι αφορά την ολίσθηση, ότι από τα αποτελέσματα του TruckSim στο οποίο αμελείται η συμπεριφορά του οδηγού ως εμπλεκόμενου παράγοντα στο σύστημα οδός – όχημα, προκύπτουν ταχύτητες ιδιαίτερα υψηλές χωρίς προβλήματα απώλειας πρόσφυσης για τις κατά μήκος κλίσεις 0% – 2%. Από τα αποτελέσματα όμως του DVM διαφαίνεται ότι σε αυτές τις ταχύτητες, με βάση το μοντέλο του επιθετικού οδηγού και λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των διατιθέμενων συντελεστών πρόσφυσης για το φορτηγό, υπάρχουν προβλήματα πλαγιολίσθησης τόσο στην περίπτωση της ευμενούς (χαράξεις 1 και 2) όσο και στην περίπτωση της δυσμενούς πρόσφυσης οδοστρώματος (όλες οι χαράξεις).

Ενδεικτικά στον πίνακα 6.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα για ένα τμήμα της δεύτερης χάραξης στην περιοχή εξόδου από την πρώτη καμπύλη (εντός της κλωθοειδούς), για κατά μήκος κλίση 0%.

Πίνακας 6. 4: Αποτελέσματα περιοχής εξόδου από την πρώτη καμπύλη στη Χάραξη 2 για κατά μήκος κλίση 0%

S (m)	f_{dx} / f_a	f_{dy} / f_a	f_{dy}	A_y (g)	V (km/ h)
62.000	-0.027	-0.582	-0.243	-0.295	69.394
63.000	-0.033	-0.620	-0.258	-0.309	69.360
64.000	-0.031	-0.675	-0.281	-0.329	69.343
65.000	-0.030	-0.710	-0.296	-0.341	69.316
66.000	-0.031	-0.720	-0.300	-0.343	69.274
67.000	-0.031	-0.702	-0.293	-0.333	69.245
68.000	-0.031	-0.660	-0.275	-0.313	69.226
69.000	-0.035	-0.615	-0.256	-0.292	69.191

όπου:

S = το μήκος (m),

f_{dx} / f_a και f_{dy} / f_a = οι δείκτες διαμήκους και εγκάρσιας τριβής αντίστοιχα,

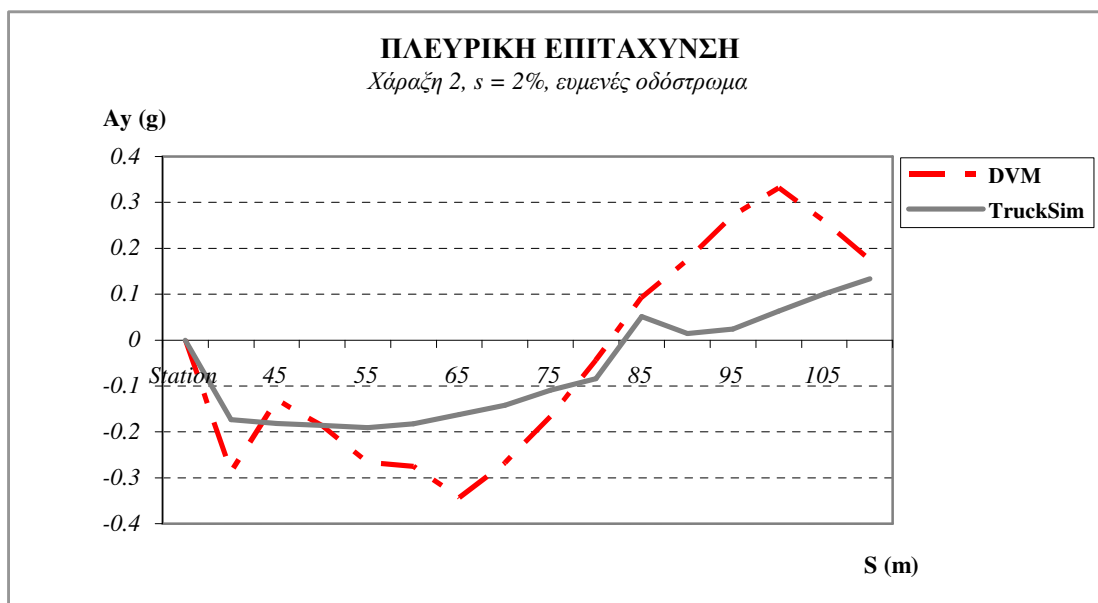
f_{dy} = ο απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής,

A_y = η πλευρική επιτάχυνση (g),

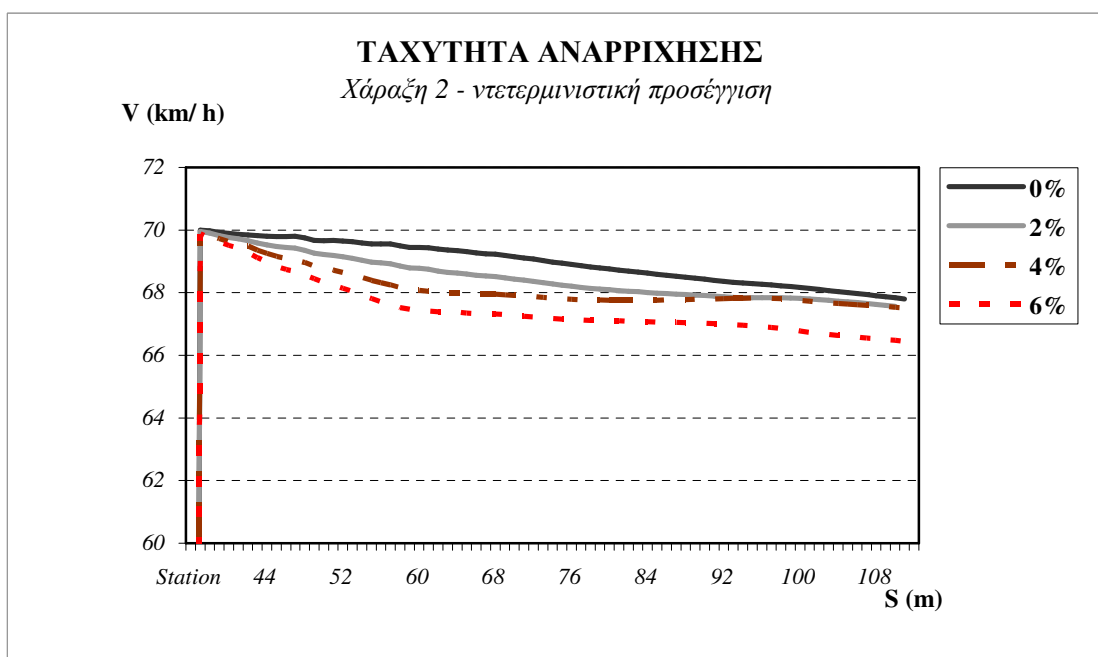
V = η ταχύτητα κίνησης (km/ h)

Ο απαιτούμενος συντελεστής τριβής σε αυτό το τμήμα κυμαίνεται μεταξύ του 0,25 και του 0,30. Αυτό σημαίνει ότι αν ληφθούν υπόψη οι μέγιστοι διατιθέμενοι συντελεστές που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.3 για αυτή την χάραξη, προκύπτει παραβίαση των ορίων της πρόσφυσης για το δυσμενές οδόστρωμα και οριακή κατάσταση για το ευμενές. Η ταχύτητα κίνησης όπως φαίνεται είναι 70 km/ h. Από την εφαρμογή όμως του TruckSim για τη συγκεκριμένη διάταξη προκύπτει ταχύτητα ασφαλείας 80 km/ h, όσον αφορά τουλάχιστον στα όρια της πρόσφυσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν και για τις άλλες χαράξεις, όπου ενώ τα εξαγόμενα της προσομοίωσης στο TruckSim δεν καταδείκνυαν απώλεια πρόσφυσης, από το DVM εντοπιζόταν παραβίαση των ορίων. Συνεπώς, φαίνεται ότι ο

παράγοντας του επιθετικού οδηγού είχε επιρροή στο σύστημα, καθώς το έφερε σε πιο οριακές καταστάσεις, γεγονός που καταδεικνύεται και από τη σύγκριση των πλευρικών επιταχύνσεων. Από την εφαρμογή στο DVM παρατηρήθηκε ότι όντως ο επιθετικός οδηγός ανέπτυξε και ανέχθηκε αρκετά μεγαλύτερες πλευρικές επιταχύνσεις από ότι στα αντιστοιχούμενα πειράματα του TruckSim (Σχήμα 6.2), οι οποίες πλησίασαν αρκετές φορές και τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (0,4 g). Βέβαια δεν πρέπει να παραληφθεί σε αυτό το σημείο ότι σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται και ένα πολύ πιο κρίσιμο όχημα σχεδιασμού, το οποίο είναι αρθρωτό και με κατά πολύ μεγαλύτερο μεταξόνιο από αυτά που εξετάστηκαν στο προηγούμενο λογισμικό.



Σχήμα 6. 2: ΧΑΡΑΞΗ 2: Αντιπαράθεση πλευρικής επιτάχυνσης για τα δύο λογισμικά



Σχήμα 6. 3: ΧΑΡΑΞΗ 2 – Ταχύτητα αναρρίχησης για το εύρος των κατά μήκος κλίσεων

Τέλος να σημειωθεί η διαφοροποίηση που υφίσταται μεταξύ των δύο προγραμμάτων στην ικανότητα αναρρίχησης των οχημάτων σε απότομες ανωφέρειες. Στο DVM το φορτηγό κατόρθωσε όπως φάνηκε να διατηρήσει με μικρές απώλειες (της τάξης των 5 km/h) την ταχύτητά του ακόμα και στις κατά μήκος κλίσεις του 6% (Σχήμα 6.3). Αντίθετα όπως είχε επισημανθεί από τα εξαγόμενα της προηγούμενης προσομοίωσης, τα δύο οχήματα αντιμετώπιζαν προβλήματα διατήρησης της ταχύτητας από την κλίση του 3%, ενώ για κλίσεις μεγαλύτερες του 4% δεν ήταν δυνατόν να διατηρήσουν σταθερή καμία ταχύτητα (Πίνακας 6.3). Η έντονη αυτή απόκλιση έχει να κάνει προφανώς, και σε αυτή την περίπτωση, με το γεγονός ότι στο φορτηγό του DVM διατέθηκαν πολύ μεγαλύτεροι συντελεστές πρόσφυσης σε σχέση με αυτούς τους TruckSim.

6.4.3. Στοχαστική προσέγγιση

Χάραξη 1

Για την πρώτη χάραξη η στοχαστική προσέγγιση ήρθε να επιβεβαιώσει τα προβληματικά σημεία που έδειξε η ντετερμινιστική μέθοδος. Όντως στις θέσεις 50 έως 52 (έξοδος οχήματος από την πρώτη καμπύλη) το πρόβλημα πλαγιολίσθησης σε συνδυασμό με υψηλές πλευρικές επιταχύνσεις επιβεβαιώνεται. Το μοντέλο για κατά μήκος κλίσεις 0% και 2% έδωσε πιθανότητα 1, στο να παραβιαστούν τα όρια της πρόσφυσης στη θέση 51, ενώ αντίστοιχα για τις κλίσεις 4% και 6% η παραβίαση (με πιθανότητα 1) κάλυψε τις θέσεις 51 και 52.

Επίσης στο εύρος από 56 έως 74 (κατά μήκος δηλαδή της μετάβασης, S – καμπύλη των κλωθοειδών) επιβεβαιώθηκε το πρόβλημα παραβίασης ή οριακών καταστάσεων όσον αφορά στην πλευρική απόκλιση.

Έτσι προκύπτει ότι η ταχύτητα των 60 km/h με την οποία κινήθηκε ο οδηγός σε αυτή τη χάραξη – και η οποία είχε προταθεί και ως ταχύτητα ασφαλείας από την εφαρμογή του TruckSim – δεν πληρεί τις απαιτήσεις ασφαλούς κίνησης, βάση του μοντέλου επιθετικού οδηγού – ημι-ρυμουλκούμενου φορτηγού.

Χάραξη 2 – Χαράξεις 3 & 4

Αντίστοιχα για τη δεύτερη χάραξη επιβεβαιώθηκαν τα κρίσιμα σημεία για πλευρική απόκλιση ως εξής:

- για κατά μήκος κλίση 0% παρουσιάστηκε υψηλή πιθανότητα (κίτρινη σημαία) παραβίασης των ορίων στις θέσεις 68 έως 102 (κατά μήκος της μετάβασης, S – καμπύλη των κλωθοειδών), και πιθανότητα 1 (κόκκινη σημαία) για παραβίαση των ορίων στις θέσεις 103 έως 111 (από την είσοδο και μετά στη δεύτερη καμπύλη).
- Για κατά μήκος κλίσεις 2% έως 6% παρουσιάστηκε υψηλή πιθανότητα (κίτρινη & κόκκινη σημαία) παραβίασης των ορίων στο εύρος 68 έως 112.

Έτσι η ταχύτητα των 70 km/h με την οποία κινήθηκε ο οδηγός σε αυτή τη χάραξη, δεν εξασφαλίζει την ασφαλή κίνηση του οχήματος όσον αφορά στη θέση επί της λωρίδας. Σχετικά με την απώλεια πρόσφυσης ισχύουν βέβαια οι περιορισμοί και τα συμπεράσματα που αναλύθηκαν και στη ντετερμινιστική μέθοδο.

Στις χαράξεις 3 & 4, για τις οποίες η ντετερμινιστική προσέγγιση δεν έδωσε καμία παραβίαση, η στοχαστική προσέγγιση έδειξε κρίσιμες τιμές (κίτρινες & κόκκινες σημαίες) όσον αφορά στην πλευρική απόκλιση, σε μεγάλο μήκος επί των χαράξεων.

6.5. Γενικά Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του DVM, η συμπεριφορά του οδηγού παίζει καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια κίνησης επί των οδικών τμημάτων. Βέβαια όπως επισημαίνεται και στην επικύρωση του μοντέλου, έμφυτη στο πρόγραμμα είναι η αδυναμία να ξαφνιαστεί ο οδηγός ενόψει διαδοχικών καμπυλών (αντίθετης καμπυλότητας), καθώς γίνεται η θεώρηση ότι βλέπει την επερχόμενη καμπύλη και κάνει τους απαραίτητους χειρισμούς και προσαρμογές στην ταχύτητά του προκειμένου να τη διασχίσει με ασφάλεια. Πέρα όμως από αυτή τη θεώρηση, ο επιθετικός οδηγός που διασχίζει τις καμπύλες με ταχύτητες μεγαλύτερες κατά 10 – 15 km/h, από ότι θα επέλεγε ο ονομαστικός οδηγός, και η ανοχή αυτού σε μεγαλύτερες πλευρικές επιταχύνσεις έδειξαν τη διαφοροποίηση σε αντιστοίχιση με τα αποτελέσματα του TruckSim.

Από την άλλη μεριά, η παράληψη των διορθωτικών συντελεστών για τα ελαστικά των φορτηγών στο μοντέλο, και η θεώρηση ότι οι διατιθέμενοι συντελεστές τριβής είναι ίδιοι για επιβατηγά και φορτηγά, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, και δεν βοηθά στην επιβεβαίωση των κρίσιμων σημείων κατά μήκος των χαράξεων μέσω της στοχαστικής μεθόδου. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η συμπλήρωση αυτή προκειμένου να εξαχθούν αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα ενότητα γίνεται ανασκόπηση και παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων της έρευνας, η οποία αποσκοπούσε στον έλεγχο των παραμέτρων σχεδιασμού των σιγμοειδών καμπυλών, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των βαρέων οχημάτων, διάφοροι τύποι των οποίων –όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια – χρησιμοποιήθηκαν ως οχήματα σχεδιασμού. Συνδυασμοί των ελαχίστων παραμέτρων των οριζόντιων καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό, προκειμένου να διερευνηθούν τα προβλήματα που ανακύπτουν σε οριακές χαράξεις, οι οποίες συνιστούν συχνό φαινόμενο στην Ελλάδα λόγω του έντονου αναγλύφου της.

Το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι η δυναμική των οχημάτων εξετάστηκε σε τρισδιάστατες επιφάνειες κύλισης, προσεγγίζοντας έτσι την πραγματική κίνηση και απόδοση των οχημάτων, συνυπολογίζοντας την επιρροή της κατά μήκους κλίσεως στην ασφάλεια κίνησης και στον προσδιορισμό των παραμέτρων σχεδιασμού των οριζόντιων καμπυλών. Μέσω του λογισμικού προσομοίωσης κατέστη δυνατό να προσδιοριστούν οι πραγματικές δυνάμεις που ασκούνται στα ελαστικά οι οποίες ελέγχουν κατά βάση την κίνηση του οχήματος, και να εξαχθούν έτσι σημαντικά στοιχεία που αφορούν στην ασφάλεια κίνησης των υπό εξέταση οχημάτων.

Από τη διερεύνηση της κίνησης των δύο οχημάτων που εξετάστηκαν στο TruckSim υπό την επίδραση προωθητικής ροπής και με τη μέγιστη κάθε φορά δυνατή σταθερή ταχύτητα, προέκυψαν οι ταχύτητες ασφαλείας που παρουσιάζονται στον Πίνακα I και αφορούν στα δυσμενέστερα, κατά περίπτωση, αποτελέσματα μεταξύ των δύο οχημάτων. Για λόγους συνέπειας, υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι ταχύτητα ασφαλείας (σταθερή) ορίστηκε αυτή για την οποία η ολίσθηση σε κάθε τροχό ήταν μηδενική, και για την οποία οι παράμετροι κίνησης του οχήματος (γωνία ολίσθησης οχήματος, πλευρική επιτάχυνση κλπ) ήταν εντός των αναμενόμενων πλαισίων.

**Πίνακας I: Ταχύτητα Ασφαλείας (km/ h)
ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα
Συντηρητική Προσέγγιση - TruckSim**

Κλίση (%)	Ελάχιστη Ακτίνα (m)			
	140	200	280	370
0%	60 / 60	60 / 60	60 / 60	60 / 60
1%	60 / 60	60 / 60	60 / 60	60 / 60
2%	60 / 50	60 / 60	60 / 60	60 / 60
3%	50 / X	60 / X	60 / X	60 / X
4%	X / X	X / X	X / X	X / X

**Πίνακας II: Ταχύτητα Ασφαλείας (km/ h)
ευμενές / δυσμενές οδόστρωμα
Επιευκής Προσέγγιση - TruckSim**

Κλίση (%)	Ελάχιστη Ακτίνα (m)			
	140	200	280	370
0%	60 / 60	70 / 60	70 / 70	70 / 70
1%	60 / 60	70 / 60	70 / 70	70 / 70
2%	60 / 50	70 / 50	70 / 60	70 / 60
3%	50 / X	60 / X	60 / X	60 / X
4%	X / X	X / X	X / X	X / X

Καθώς δεν έχει γίνει συσχέτιση των αποτελεσμάτων με στοιχεία ατυχημάτων η οποία να επαληθεύεται μια τόσο αυστηρή προσέγγιση, στον Πίνακα II δίνεται μια πιο επιεικής άποψη των ταχυτήτων ασφαλείας.

Το γενικό συμπέρασμα, όπως αποτυπώνεται και στους δύο παραπάνω πίνακες, είναι ότι οι ελάχιστες ακτίνες οριζοντίων καμπυλών δεν δύνανται να καλύψουν επαρκώς και με ασφάλεια όλο το εύρος των επιτρεπτών κατά μήκος κλίσεων, τουλάχιστον ως προς την κίνηση των φορτηγών, και ότι ο πίνακας των ελαχίστων ακτινών καμπυλών των Ο.Μ.Ο.Ε. πρέπει να συμπεριλάβει περιορισμό για την εφαρμοζόμενη κλίση. Σε αντίθετη περίπτωση, μέτρα όπως αυτά που αναλύθηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο – καθιέρωση μεγαλύτερων ακτινών καμπυλών, ή αποκλειστικά όρια ταχύτητας για βαρέα και επιμήκη οχήματα – θα πρέπει να εξεταστούν διεξοδικά. Βέβαια λόγω του περιορισμένου αριθμού οριζοντιογραφικών χαράξεων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, αλλά κυρίως λόγω του μικρού δείγματος φορτηγών οχημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, δεν μπορεί η μελέτη αυτή να προβεί σε αυστηρές υποδείξεις στους υπάρχοντες κανονισμούς, αλλά κυρίως να εντοπίσει προβληματικά σημεία και να επισημάνει κάποιες κρίσιμες καταστάσεις.

Παρά το γεγονός ότι οι υπάρχοντες κανονισμοί χαράξεων δεν εμπεριέχουν ή λαμβάνουν υπόψη μερικώς τη δυναμική των βαρέων οχημάτων, γίνεται αντιληπτό από τα εξαγόμενα αυτής της μελέτης ότι η κίνησή τους επί των οδικών τμημάτων συνιστά έναν από τους βασικούς παράγοντες στον προσδιορισμό της οδικής ασφαλείας. Η εξέταση των δυναμικών χαρακτηριστικών των βαρέων οχημάτων δύναται να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για τους οδοποιούς και να τους καθοδηγήσει στο πως θα “φιλοξενήσουν” ασφαλέστερα το στόλο των βαρέων οχημάτων στα επερχόμενα οδικά τμήματα. Η χρήση προσομοίωσης αποδείχθηκε αξιόλογο μέσο προς αυτή την κατεύθυνση, καθώς έδωσε τη δυνατότητα να εξεταστεί η κίνηση των οχημάτων συνολικά στην επιτόρξια και στην εγκάρσια στην τροχιά διεύθυνση, εισάγοντας έτσι τον παράγοντα της κατά μήκους κλίσεως, η οποία όπως αναλύθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια έχει σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση αναρρίχησης των οχημάτων, και ιδιαιτέρως των βαρέων οχημάτων.

Επιστρέφοντας στα αποτελέσματα της έρευνας, τα στοιχεία των Πινάκων I και II επιβεβαιώνουν, ότι παρά το γεγονός ότι οι υπάρχουσες προδιαγραφές σχεδιασμού επιτρέπουν κατά μήκος κλίσεις μεγαλύτερες του 7% για τις χαράξεις που τέθηκαν υπό εξέταση, τα προβλήματα για τα φορτηγά εμφανίζονται από κατά μήκος κλίση 3%. Πέραν της απώλειας πρόσφυσης ένα ζωτικό πρόβλημα είναι η αδυναμία αναρρίχησης σε κατά μήκος κλίσεις άνω του 3% - κλίση η οποία αποτελεί το κατώφλι για τα βαρέα οχήματα όσον αφορά στη διατήρηση της ταχύτητας. Ένα ακόμη κομβικό σημείο είναι ότι οι προτεινόμενες ταχύτητες ασφαλείας είναι σε αρκετές περιπτώσεις κατά πολύ χαμηλότερες των λειτουργικών ταχυτήτων για τα συγκεκριμένα οδικά τμήματα, στοιχείο που επιφέρει επιπρόσθετα ζητήματα ασφαλείας όπως επισημάνθηκε και στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Είναι λοιπόν έκδηλο, ότι τόσο ο παράγοντας της δυναμικής των βαρέων οχημάτων, όσο και αυτός της επιρροής της κατά μήκους κλίσεως, είναι τεράστιας σημασίας στο σχεδιασμό. Έως αυτό το σημείο έχουν διαπιστωθεί οι επιδράσεις της γεωμετρίας και του οχήματος στον προσδιορισμό της ασφαλείας των οδικών τμημάτων. Υπολείπεται όμως και ο παράγοντας της συμπεριφοράς του οδηγού για να κλίσει το τρίγωνο της οδικής ασφαλείας. Αυτός ο παράγοντας μέχρι σήμερα έχει αγνοηθεί καθώς είναι συνήθως απρόβλεπτος και απαιτεί τη συνδρομή και άλλων επιστημονικών προσεγγίσεων και μετρήσεων προκειμένου να προσδιοριστεί. Και σε αυτή τη περίπτωση, για την εισαγωγή του παράγοντα αυτού στο σύστημα οδός – όχημα που αναπτύχθηκε παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε η προσομοίωση μέσω του μοντέλου DVM (Driver Vehicle Module DVM), που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και περιλαμβάνεται στο λογισμικό IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model).

Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν ότι η συμπεριφορά του οδηγού, η αντίληψή του και ο τρόπος που αυτός αντιδρά στις διάφορες συνθήκες, παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια κίνησης επί των οδικών τμημάτων. Το προφίλ του επιθετικού οδηγού που χρησιμοποιήθηκε, έδειξε σε αντιστάθμιση του προηγούμενου μοντέλου στο οποίο η συνεισφορά του οδηγού στα αποτελέσματα ήταν μηδαμινή, ότι δύναται να επιφέρει επιπρόσθετους περιορισμούς στο σχεδιασμό. Ο εξοικειωμένος με το οδικό τμήμα οδηγός – σύμφωνα με τη θεώρηση του μοντέλου – έδειξε ανοχή σε υψηλές πλευρικές επιταχύνσεις και σε συνδυασμό με τους πιο απότομους χειρισμούς που επιλέγει, επισήμαναν προβλήματα σε ταχύτητες οι οποίες είχαν προταθεί ως ταχύτητες ασφαλείας σύμφωνα με τα εξαγόμενα του προηγούμενου μοντέλου.

Μέσω της στοχαστικής προσέγγισης που παρέχει το μοντέλο, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να λάβει αποτελέσματα για την αντίδραση 30 έως και 40 διαφορετικών οδηγών στο εκάστοτε οδικό τμήμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν και να επικυρωθούν κρίσιμα σημεία κατά μήκος των χαράξεων. Βέβαια η παράληψη του μοντέλου όσον αφορά στα ελαστικά των φορτηγών, η οποία διατυπώθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, δυσχεραίνει την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων και τη σύγκριση μεταξύ των δύο εφαρμογών, και θα πρέπει άμεσα να αποκατασταθεί.

Καταλήγοντας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για μία όσο το δυνατό πιο ολοκληρωμένη και συνολική προσέγγιση των ζητημάτων οδικής ασφαλείας, επιβεβλημένη είναι η συνδυασμένη και από κοινού εξέταση και των τριών βασικών παραγόντων που εμπλέκονται στην ασφάλεια κίνησης επί της οδού, και φυσικά και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών. Έτσι, τόσο η τρισδιάστατη γεωμετρία της οδού, όσο το όχημα σχεδιασμού και ο χρήστης αυτών θα πρέπει να κρίνονται δυναμικά εξίσου ικανοί να υποβιβάσουν την ασφάλεια κίνησης. Είναι σημαντικό επίσης, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των βαρέων οχημάτων να εμπλακούν σε αυτό το σύστημα, αν όχι μέσω των κριτηρίων σχεδιασμού (οικονομικός παράγοντας), αλλά έστω μέσω εξωτερικών ρυθμίσεων. Προτείνονται λοιπόν τα εξής:

- *αύξηση των ακτινών οριζόντιας καμπύλης:* όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, χαράξεις που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες οριζόντιες ακτίνες εμφανίζουν μικρότερη πιθανότητα κινδύνου ολίσθησης, και άλλων παραβιάσεων. Η θέσπιση βέβαια μεγαλύτερων ακτινών δεν είναι πάντα εφικτή, ειδικά στην Ελλάδα όπου το έντονο ανάγλυφο θέτει περιορισμούς και επιβάλλει πολλές φορές οριακές χαράξεις, λόγω του περιορισμένου χώρου. Αυτός είναι και ο λόγος που οι σιγμοειδείς χαράξεις που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία έχουν τόσο συχνή εφαρμογή στη χώρα μας, μιας και οι απαιτήσεις τους σε χώρο είναι ελάχιστες.
- *επιβολή αποκλειστικών ορίων ταχύτητας για τα βαρέα οχήματα.* Καθώς η θέσπιση κανονισμών που λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των βαρέων οχημάτων έχει σε πολλές περιπτώσεις κριθεί ως αντιοικονομική, ένα αντίμετρο είναι η καθιέρωση αποκλειστικών ορίων ταχύτητας για τα βαρέα οχήματα. Όπως καταδεικνύουν τα αποτελέσματα του πέμπτου κεφαλαίου, όσο μειώνεται η ταχύτητα μειώνεται και η πιθανότητα ολίσθησης, αλλά και της απόκλισης του οπίσθιου άξονα, η οποία όπως αναφέρθηκε εμφανίζεται πολύ συχνά στην περίπτωση του τριαξονικού με το μεγαλύτερο μεταξόνιο. Το γεγονός αυτό επιβάλλει περαιτέρω περιορισμούς στα *όρια ταχύτητας επιμηκών οχημάτων*. Η θέσπιση βέβαια διαφορετικών ορίων ταχύτητας σε επιβατηγά και βαρέα οχήματα έχει αποτελέσει ένα ζητούμενο σε διάφορες έρευνες όσον αφορά το αντίκτυπο που έχει στην ασφάλεια των οδών. Παρά το γεγονός ότι η ασφαλής κίνηση ενός φορτηγού μπορεί να επιβάλλει χαμηλότερες ταχύτητες κίνησης – ειδικά αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι αυτά απαιτούν μεγαλύτερα περιθώρια μήκους και χρόνου για ακινητοποίηση από ότι τα επιβατηγά – η διαφοροποίηση αυτή των ταχυτήτων αυξάνει τον κίνδυνο συγκρούσεων όπως οι νοτομετωπικές (rear-end collisions) για υψηλές ταχύτητες άνω των 90 km/h, και διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο τύπων οχημάτων άνω των 30

km/ h. Ο κίνδυνος αυτός αντικατοπτρίζεται στην τρίτη και κυρίως στην τέταρτη χάραξη όπου η προτεινόμενη ταχύτητα ασφαλείας είναι κατά πολύ μικρότερη της υπολογισθείσας λειτουργικής ταχύτητας των επιβατηγών οχημάτων (V_{85}).

- *συσχέτιση ταχύτητας ασφαλείας φορτηγών και μετρηθείσας λειτουργικής ταχύτητας: σε σύνδεση με τα παραπάνω και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα φορτηγά εμφανίζουν τα χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης κατά την ανάβαση σε θετικές κατά μήκος κλίσεις, παρατίθεται εδώ η ακόλουθη επισήμανση από προηγούμενη έρευνα [2], σύμφωνα με την οποία «από τη συσχέτιση της μετρηθείσας λειτουργικής ταχύτητας με την ταχύτητα ασφαλείας των φορτηγών ότι κρίσιμες καταστάσεις, δημιουργούνται στις ανωφέρειες. Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση των επιβατηγών οχημάτων η κίνηση των φορτηγών μπορεί να δημιουργήσει κρίσιμες καταστάσεις ακόμα και σε οδόστρωμα ευμενούς πρόσφυσης. Το γεγονός ότι η πρόσφυση του οδοστρώματος και κυρίως η θέση του κέντρου βάρους του οχήματος αποδείχθηκαν κρίσιμες μεταβλητές, περιπλέκει την εξαγωγή συγκεκριμένων συμπερασμάτων για το βαθμό στην ασφάλεια κίνησης των φορτηγών και ως εκ τούτου προτείνεται η λήψη μετρήσεων οι οποίες να διαχωρίζονται τόσο ως προς τον τρόπο φόρτωσης των οχημάτων, όσο και ως προς την πρόσφυση του οδοστρώματος».*
- *δημιουργία λωρίδων ανάβασης βραδυπορούντων οχημάτων. Με βάση τα παραπάνω τίθεται και το θέμα ελέγχου δημιουργίας λωρίδων ανάβασης στις αυξημένες κατά μήκος κλίσεις, που συνιστούν επίσης σύνηθες φαινόμενο στην ορεινή Ελλάδα. Όπως αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο, στις θετικές κατά μήκος κλίσεις υπεισέρχεται ο λόγος του μεικτού βάρους του οχήματος προς την ιπποδύναμη της μηχανής του (W/ HP). Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης αυτός τόσο αυξάνεται η δυσκολία ανάβασης και μειώνεται αντίστοιχα η μέγιστη σταθερή ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της έρευνας καθώς το τριαξονικό που έχει μεγαλύτερο λόγο μεικτού βάρους – ιπποδύναμης (54 kg/ KW) από το διαξονικό (34 kg/ KW), εμφανίζει το πρόβλημα σε οξύτερο βαθμό σε κλίσεις μεγαλύτερες του 3%.*

ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ

Έρευνα του TRB (Transportation Research Board) με τίτλο “Horizontal Curve Design Philosophy” καταδεικνύει ότι κρίνεται απαραίτητη η επικύρωση και ο έλεγχος της επάρκειας των τωρινών οριακών τιμών που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό των οριζοντίων καμπυλών, και ότι ένα ακόμη ζήτημα ζωτικής σημασίας είναι η ανάπτυξη εναλλακτικών τύπων, μοντέλων και κριτηρίων στον οριζόντιο σχεδιασμό τα οποία θα βασίζονται στην προκύπτουσα επικύρωση και στα πορίσματα ασφαλείας. Όπως φαίνεται και από το πλαίσιο στο οποίο κινήθηκε η παρούσα έρευνα τα παραπάνω συνιστούν επιβεβλημένη ανάγκη προκειμένου να γίνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διερεύνηση της ασφάλειας που παρέχει ένα οδικό τμήμα. Η επιρροή της κατά μήκους κλίσεως στον προσδιορισμό των παραμέτρων των οριζοντίων καμπυλών αποτελεί ένα βασικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω, η επέκταση του δυναμικού μοντέλου που εξετάστηκε σε αυτή την εργασία μέσω της προσομοίωσης, σε ένα ευρύτερο φάσμα που να καλύπτει κρίσιμες περιπτώσεις χαράξεων, και να συμπεριλαμβάνει όλους τους αντιπροσωπευτικούς τύπους που συνιστούν το στόλο των βαρέων οχημάτων, μπορεί να οδηγήσει σε πιο έγκυρα αποτελέσματα και σημαντικές υποδείξεις στους κανονισμούς. Στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος και με χρήση εξελιγμένων πακέτων προσομοίωσης, θα ήταν δυνατόν να εξεταστεί πλήθώρα διαφορετικών χαράξεων, για διάφορους τύπους οχημάτων, και να εισαχθεί τέλος στο μοντέλο και ο παράγοντας του οδηγού. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε κάλλιστα να προέλθει σε επισημάνσεις, υποδείξεις και συμπληρώσεις στους κανονισμούς χαράξεων οδών.

Η περαιτέρω προσπάθεια προσέγγισης της συμπεριφοράς του οδηγού και της πρόβλεψης του τρόπου που αυτός θα αντιδράσει υπό διάφορες οδηγικές συνθήκες, είναι ένα σημαντικό στοιχείο στο σχεδιασμό των οριζοντίων καμπυλών, δεδομένου ότι μετρήσεις πεδίου έχουν δείξει ότι οι οδηγοί έχουν την τάση να υπερστρέφουν στις καμπύλες με αποτέλεσμα η απαίτηση σε εγκάρσια πρόσφυση να παρουσιάζεται αυξημένη. Έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα της οδηγικής συμπεριφοράς δύναται να βελτιστοποιήσει τον προσδιορισμό της ασφάλεια κίνησης των οχημάτων κατά μήκος των εκάστοτε χαράξεων.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, μέσω της Επιχορήγησης Εκσυγχρονισμού Εμπορευματικών Μεταφορών (Road Haulage Modernisation Fund – RHMF), στήθηκε ένα έργο με στόχο την εκπαίδευση οδηγών φορτηγών οχημάτων μέσω προσομοιωτή (Truck Driver Training Simulator – TDTS). Η πρώτη φάση του προγράμματος ολοκληρώθηκε το Μάρτιο του 2004, και για την επικύρωση του TDTS συμμετείχαν πάνω από 600 επαγγελματίες οδηγοί από 120 εταιρίες. Μέσω αυτής της προσομοίωσης κατέστη δυνατό να αναγνωριστούν οι αδυναμίες στην απόδοση των οδηγών και να δοθούν απαντήσεις στο πως αυτές θα αντιμετωπιστούν, καθώς ο προσομοιωτής τοποθετεί τους οδηγούς σε συνθήκες (ανατροπή ή παγωμένο οδόστρωμα), οι οποίες θα ήταν αδύνατο να εκφραστούν σε πραγματικό τόπο και χρόνο λόγω των κινδύνων που θα επέφεραν, τόσο για τους οδηγούς, όσο και για τα οχήματα αλλά και τους άλλους χρήστες της οδού. Όλα τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης που έχουν ήδη αναφερθεί όπως η εποπτεία της δραστηριότητας του οδηγού και των αντιδράσεων αυτού σε διάφορες συνθήκες (θέση στο οδόστρωμα, σηματοδότηση, φρενάρισμα, επιλογή ταχύτητας και επιτάχυνσης), δύνανται να συντελέσουν κατ’ αυτό τον τρόπο στο ζητούμενο που τέθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο βασικός βέβαια στόχος του προσομοιωτή, δεν είναι να δει τη συμπεριφορά του χρήστη, αλλά μέσω των διαδοχικών επαναλήψεων των διαφόρων σεναρίων, να καταλήξει στην επιθυμητή ανταπόκριση αυτού, και επισημαίνοντας του έτσι τα επακόλουθα των χειρισμών του να τον εκπαιδέσει. Αντίστοιχοι προσομοιωτές χρησιμοποιούνται και από τη Mechanical Simulation Corporation, προϊόν της οποίας είναι και το TruckSim που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Η αναφορά σε αυτό το έργο δεν έγινε βέβαια ως πρόταση που θα βρει άμεσα εφαρμογή στην οδοποιία και τη διερεύνηση της ασφάλειας των οδών, αλλά σίγουρα αναδεικνύει τις δυνατότητες που έχει η προσομοίωση και τις διεξόδους που μπορεί να δώσει όσον αφορά στην καθολική προσέγγιση του συστήματος “οδός – οδηγός – όχημα”, η οποία είναι απαραίτητη προκειμένου μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης της οδικής ασφάλειας.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καρλαύτης Ματθαίος, *Στατιστική Διερεύνηση της Επιρροής Επαγγελματικών Οχημάτων στην Ασφάλεια Οδικών Δικτύων*, Τελική Έκθεση Ερευνητικού Έργου, Σύνδεσμος Εισαγωγέων Αντιπροσώπων Αυτοκινήτων, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
2. Μαυρομάτης Σ., *Διερεύνηση Ασφάλειας και Λειτουργικότητας Οδού Διαμέσου Δυναμικής και Κινηματικής Ανάλυσης Διαζονικού Οχήματος*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ / ΣΑΤΜ, Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης, Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Αθήνα 2002.
3. Μπαλαδήμας Δημήτριος, *Οδική Ασφάλεια και Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Υπεραστικών Οδών Δύο Λωρίδων Κυκλοφορίας*, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος και Συγκοινωνιών, Πάτρα, Μάιος 2006.
4. Σπέντζας Κ., *“Δυναμική Οχημάτων”*, 2η Έκδοση, Αναθεωρημένη, ΕΜΠ / ΣΜΜ, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου, Αθήνα 2000.
5. Σπέντζας Κ., *“Θεωρία Κινήσεως Τροχοφόρων Οχημάτων”*, Σειρά Συγγραμμάτων του Εργαστηρίου Οχημάτων ΕΜΠ / ΣΜΜ, Αθήνα 2004.
6. Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Οδοποιίας, Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 1, *“Λειτουργική Κατάταξη Οδικού Έργου” (ΟΜΟΕ - ΑΚΟΔ)*, Αθήνα 2001.
7. Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Οδοποιίας, Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 2, *“Διατομές” (ΟΜΟΕ - Δ)*, Αθήνα 2001.
8. Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Οδοποιίας, Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, Τεύχος 3, *“Χαράξεις” (ΟΜΟΕ - Χ)*, Αθήνα 2001.
9. Ψαριανός Β., ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΟΔΟΠΟΙΑΣ Ι, Τεύχος 2ο, *“Υπολογισμοί”*, Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής ΕΜΠ / ΣΑΤΜ, Αθήνα 2001.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Allen Wade R., Harwood Douglas, Chrstos Jeffrey P., Glauz William D., *The Capability and Enhancement of VDANL and TWOPAS for Analyzing Vehicle Performance on Upgrades and Downgrades Within IHSDM*, Report No. FHWA-RD-00-078, U.S. Department of Transportation, January 2000.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, DC, 2001.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, DC, 2004.
4. Choueiri Elias M., Lamm R., Kloeckner J. H., and Mailaender T., *Safety Aspects of Individual Design Elements and Their Interactions on Two-Lane Highways: International Perspective*, Transportation Research Record 1445, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 34-46.
5. Ellis J. R., *“Vehicle Handling Dynamics”*, Mechanical Engineering Publications Limited, London 1994.
6. Fancher P. S., Ervin R. D., Winkler C. B., Gillespie T. D., *A Factbook of the Mechanical Properties of the Components for Single – Unit and Articulated Heavy*

- Trucks*, The University of Michigan, Transportation Research Institute, Ann Arbor, Michigan, 48109, December 1986.
7. Garber Nicholas J., Miller John S., Sun Xin, Yuan Bo, *Safety Impacts of Differential Speed Limits for Trucks and Passenger Cars on Rural Interstate Highways: A Modified Empirical Bayes Approach*, JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING © ASCE / JANUARY 2006 / 27.
 8. Gillespie Thomas D., “*Fundamentals of Vehicle Dynamics*”, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania, 1992.
 9. Gillespie Thomas D., *Methods for predicting truck speed loss on grades*, Final Report, The University of Michigan Transportation Research Institute, 1986.
 10. Hallmark Shauna L., Knapp Keith K., Grant Christopher D., *Evaluating Speed Differences Between Cars, Light-Duty Trucks, and Vans for Emissions Modeling*, 814 / JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING © ASCE / NOVEMBER/DECEMBER 2004.
 11. Harwood D. W., Council F. M., Hauer E., Hughes W. E., and Vogt A., *Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways*, Report No. FHWA-RD-99-207, U.S. Department of Transportation, December 2000.
 12. Harwood D. W., Mason J. M., Glauz W. D., Kulakowski B. T. and Fitzpatrick K., *Truck Characteristics for Use in Highway Design and Operation*, Volume I, Research Report, Publication No. FHWA-RD-89-226, August 1990.
 13. Harwood D. W., Mason J. M., Glauz W. D., Kulakowski B. T. and Fitzpatrick K., *Truck Characteristics for Use in Highway Design and Operation*, Volume II, Appendixes, Publication No. FHWA-RD-89-227, August 1990.
 14. Harwood D. W., Potts I. B., Torbic D. J., and Glauz W. D., *Highway/Heavy Vehicle Interaction, A Synthesis of Safety Practice*, Synthesis 3, Commercial Truck and Bus Safety Synthesis Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
 15. Harwood Douglas W., Torbic Darren J., Richard Karen R., Glauz William D. and Eleftheriadou Lily, *Review of Truck Characteristics as Factors in Roadway Design*, NCHRP Report 505, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
 16. Lamm R., Psarianos B., Mailaender T., “*Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*”, McGraw - Hill Handbooks Company, February 1999.
 17. Levison William H., Campbell John L., Kludt Kelli, Bittner Alvah C., Jr., Potts Ingrid, Harwood Douglas W., Hutton Jessica, Gilmore David, Howe J. Gavin, Chrstos Jeffrey P., Allen R. Wade, Kantowitz Barry, Robbins Tom, and Schreiner Chris, *Development of a Driver Vehicle Module (DVM) for the Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM)*, Report No. FHWA-HRT-08-019, U.S. Department of Transportation, November 2007.
 18. MacAdam, C. C., Fancher P. S., and Segal L., *Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves*, Volume II: Technical Report, Final Report of Contract No. DTFH61-82-C-00019, University of Michigan Transportation Research Institute, August 1985.
 19. Mavromatis Stergios, Psarianos B., *An Analytical Model to Determine the Influence of Horizontal Alignment of Two-Axle Heavy Vehicles on Upgrades*, Journal of Transportation Engineering, Volume 129, No. 6, November/December 2003 July 2002.
 20. Mavromatis Stergios, Psarianos B., *Design Speed Ranges to Accommodate a Safe Highway Geometric Design for Heavy Vehicles*, Paper of the 2nd International Symposium of Highway Geometric Design, TRB, Mainz, 1999 Germany.
 21. Miaou Shaw-Pin, Hu Patricia S., Wright Tommy, Davis Stacy C., Rathi Ajay K., *Development of Relationship Between Truck Accidents and Geometric Design*, Report

- No. FHWA-RD-91-124, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, March 1993.
22. Olson, P. L., Cleveland D. E., Fancher P. S., Kostyniuk L. P., and Schneider L. W., *Parameters Affecting Stopping Sight Distance*, NCHRP Report 270, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, June 1984.
 23. Pacejka Hans B., *“Tire and Vehicle Dynamics”*, Butterworth - Heinemann, Oxford 2002.
 24. Peng Qi-yuan, Xu Jin, Jiang Chao-zhe, Chen Yong-xi, *Considering the Hysteresis Effect of Lateral Deformation of Pneumatic Tires in Reverse Curves Design and Improvement*, 2007.
 25. Psarianos B., Konratos M., and Katsios D., *Influence of Vehicle Parameters on Horizontal Curve Design of Rural Highways*, Transportation Research Board, International Symposium on Highway Geometric Design, Boston, Ma. USA, August 30 – September 1 1995.
 26. Styles Tanya, Mabbott Nick, Roberts Paul, Tziotis Michael, *Safety Benefits of Improving Interaction between Heavy Vehicles and the Road System*, Austroads Project No. ST1143, Austroads Publication No. AP-T119/08, Sydney 2008.
 27. TruckSim, User Manual, Mechanical Simulation Corporation, Last updated March 2008.
 28. Tziotis Michael, Pyta Victoria and Dr McLean John, *Heavy Vehicle Safety in Rural and Remote Areas*, Austroads Project No. ST1193, Austroads Publication No. AP-T136/09, Sydney 2009.

If you don't know where you are going,
any road will take you there.

Lewis Carroll (1832 - 1898)

