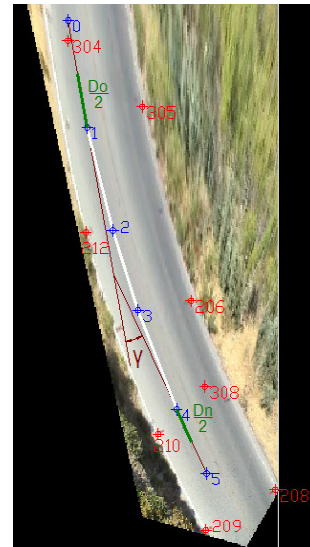


## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ  
ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΠΕΡΑΣΤΙΚΩΝ ΟΔΩΝ  
ΔΥΟ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ”



**ΣΙΩΡΑ ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ**

A.M. 06103098

Επιβλέποντες :

**Ψαριανός Βασίλειος**, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Γεωργόπουλος Ανδρέας**, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΤΕΥΧΟΣ Α

ΑΘΗΝΑ  
ΜΑΡΤΙΟΣ 2009



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν από ένα χρόνο περίπου μου ανατέθηκε η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, από το Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής σε συνεργασία με το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Στην αρχή όλα ήταν δύσκολα και πολύπλοκα, καθώς πρόκειται για μια δουλειά που απαιτούσε υπομονή κόπο και χρόνο και ο δρόμος για την ολοκλήρωση της ήταν μακρύς. Στη δύσκολη αυτή πορεία όλων αυτών των μηνών υπήρξαν κάποιοι άνθρωποι χωρίς τη βοήθεια των οποίων δε θα μπορούσα να έχω ολοκληρώσει την εργασία μου. Για το λόγο αυτό, θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν και στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθειά μου.

Πρώτα από όλα ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Β. Ψαριανό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του όλο αυτό το διάστημα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή κ. Αν. Γεωργόπουλο για τη βοήθειά του, τις ουσιαστικές συμβουλές του αλλά και για τη διάθεση του αναγκαίου εξοπλισμού.

Ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Π. Βυθούλκα για τη συνεργασία του ως προς την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και την ουσιαστική του συμβολή για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους Διδάκτορες του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας κα. Αρ. Βαλάνη και κ. Αν. Πρόκο, οι οποίοι με βοήθησαν πάρα πολύ ειδικότερα στα πρώτα στάδια της εργασίας. Τους ευχαριστώ για την υπομονή τους, για το χρόνο που διέθεσαν για μένα και για την προθυμία τους, ώστε να κατανοήσω καλύτερα το φωτογραμμετρικό πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπίσω.

Από το Εργαστήριο της Φωτογραμμετρίας ευχαριστώ επίσης την κα. Σ. Σοϊλέ και την κα. Σ. Ταπεινάκη για τη βοήθειά τους στη χρήση των τοπογραφικών και φωτογραμμετρικών πακέτων λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον αδερφό μου για την βοήθεια στις μετρήσεις πεδίου και για τη γενικότερη υποστήριξη του.

Ευχαριστώ θερμά τη συμφοιτήτριά μου Χ. Παπακώστα για την πολύτιμη βοήθειά της, καθώς και για την ηθική συμπαράσταση όλο αυτό το διάστημα. Ευχαριστώ επίσης την φίλη μου Αικ. Σεργάκη και όλους τους συμφοιτητές μου που ενθάρρυναν την προσπάθειά μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη μητέρα μου και την αδερφή μου για τη βοήθεια αλλά και την υπομονή τους σε αυτό το στάδιο της ζωής μου.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΣΥΝΟΨΗ.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>7</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>14</b>
1.1. ΟΡΙΣΜΟΙ.....	14
1.1.1. Ταχύτητα $V_{\text{επιτρ}}$ .....	14
1.1.2. Ταχύτητα μελέτης $V_e$ .....	14
1.1.3. Λειτουργική ταχύτητα $V_{85}$ .....	14
1.1.4. Βαθμός καμπύλης ( $D$ ).....	15
1.2. ΑΝΑΛΟΓΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	16
1.2.1. Έρευνα των Alfredo Garcia και M. Elena Díaz, 2000.....	16
1.2.2. Έρευνα του Peter Spacer, 2000.....	22
1.2.3. Έρευνα των Bruno Cristman, Aurelio Marchionna και Paolo Perco, 2000.....	28
1.2.4. Έρευνα των Bird R. N. και Hasmin I.N., 2005.....	29
1.2.5. Έρευνα των Glenon J. C. και Weaver G. D., 1971.....	33
<b>2. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>	<b>39</b>
2.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.....	39
2.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.....	42
2.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΟΔΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ .....	43
2.3.1. Ταχυμετρική αποτύπωση και σύνταξη τοπογραφικών διαγραμμάτων καμπυλών.....	45
2.3.2. Προσδιορισμός ακτίνων των καμπυλών.....	46
2.3.3. Προσδιορισμός ελικτότητας των καμπυλών.....	50
2.4. ΒΙΝΤΕΟΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ .....	52
2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ .....	54
2.5.1. Μετρήσεις ταχυτήτων.....	55
2.5.2. Μετρήσεις για τον υπολογισμό της ελικτότητας οχημάτων.....	55
<b>3. ΑΝΑΓΩΓΗ ΒΙΝΤΕΟΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>61</b>
3.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	61
3.2. ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	62
3.2.1. Μοντέλο κεντρικής προβολής.....	63
3.2.2. Εφαρμογή μονοεικονικής επίγειας Φωτογραμμετρίας.....	64
3.2.3. Κλίμακα εικόνας.....	64
3.2.4. Χαρακτηριστικά μηχανής.....	65
3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΑΝΑΓΩΓΗΣ.....	66
3.4. ΣΤΡΟΦΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ .....	68
3.5. ΑΝΑΓΩΓΗ ΚΕΚΛΙΜΕΝΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	70
3.5.1. Συνθήκη συγγραμμικότητας.....	71
3.5.2. Προβολικός μετασχηματισμός.....	72
3.5.3. Αναλυτική αναγωγή εικόνας – Προσδιορισμός 8 παραμέτρων προβολικού μετασχηματισμού.....	77
<b>4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....</b>	<b>81</b>
4.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ .....	81
4.1.1. Καθορισμός του μεγέθους δείγματος ταχυτήτων.....	81
4.1.2. Έλεγχος κανονικότητας του δείγματος ταχυτήτων .....	83
4.1.3. Υπολογισμός μεγέθους $V_{85}$ .....	86
4.2. ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ $V_{85}$ – ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ $K_{E,X}$ .....	90
4.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ $V_{85}$ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	95
4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ $K_{Ei}$ .....	97

4.5.	ΣΧΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ $v$ – ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΤΟΥ $K_{E,I}$ .....	99
4.6.	ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ $V_{85}$ – ΜΕΣΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ $K_{E,T}$ ..	100
	.....	100
<b>5.</b>	<b>ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΜΠΥΛΩΝ .....</b>	<b>105</b>
5.1.	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ .....	106
5.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΤΙΘΕΜΕΝΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ .....	108
5.2.1.	<i>Γερμανικοί και Ελληνικοί Κανονισμοί</i> .....	109
5.2.2.	<i>Αμερικανικοί Κανονισμοί</i> .....	114
5.3.	ΣΧΕΣΗ ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ – ΕΛΙΚΤΟΤΗΤΑΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	119
5.4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	123
	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>127</b>
	<b>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>135</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>138</b>

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.1 :</b>	(α)Ανίχνευση σχετικών σημείων (σχετικά άκρα οχήματος), (β)Μοντέλο οχήματος. ....	19
<b>Εικόνα 1.2 :</b>	Σημάδια κάθετα στις οριογραμμές του οδοστρώματος. ....	20
<b>Εικόνα 1.3 :</b>	Παράδειγμα διερεύνησης αριστερόστροφης κίνησης σε καμπύλη με μετρητικούς στήλους. ....	25
<b>Εικόνα 1.4 :</b>	Απεικόνιση τύπων τροχιάς, παράδειγμα αριστερόστροφης κίνησης. ....	26
<b>Εικόνα 1.5 :</b>	Απομονωμένες εικόνες κατά τη διάρκεια προσπεράσματος. ....	28
<b>Εικόνα 2.1 :</b>	Άποψη της καμπύλης A από το Google Earth. ....	40
<b>Εικόνα 2.2 :</b>	Άποψη της καμπύλης B από το Google Earth. ....	40
<b>Εικόνα 2.3 :</b>	Άποψη της καμπύλης C από το Google Earth. ....	41
<b>Εικόνα 2.4 :</b>	Άποψη της καμπύλης D από το Google Earth. ....	41
<b>Εικόνα 2.5 :</b>	Αυτοσχέδιο υπαίθρου καμπύλης B. ....	44
<b>Εικόνα 2.6 :</b>	Απομονωμένο frame όπου είναι ορατοί οι δύο εμπροσθεν τροχοί. ....	57
<b>Εικόνα 2.7 :</b>	Απομονωμένο frame του ίδιου οχήματος όπου δεν είναι ορατοί οι δύο εμπροσθεν τροχοί. .....	57
<b>Εικόνα 3.1 :</b>	Φωτοσταθερό επί χαρακτηριστικής διατομής. ....	73
<b>Εικόνα 3.2 :</b>	Φωτοσταθερό επί οδοστρώματος. ....	73
<b>Εικόνα 3.3 :</b>	Άποψη θέσης της βιντεοκάμερας. ....	75
<b>Εικόνα 3.4 :</b>	Απομονωμένο frame από τη βιντεοσκόπηση – Εικόνα προ αναγωγής. ....	75
<b>Εικόνα 3.5 :</b>	Ανηγμένη εικόνα στο Σύστημα Συντεταγμένων $X', Y'$ .....	76

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1</b> : Βαθμός καμπύλης. ....	16
<b>Σχήμα 1.2</b> : Συσχέτιση ακτίνων καμπυλών και ακτίνων τροχιών οχημάτων ( $R - R_p$ ). ....	36
<b>Σχήμα 1.3</b> : Συσχέτιση βαθμών καμπυλότητας οδικών τμημάτων και βαθμών καμπυλότητας τροχιάς οχημάτων. ....	37
<b>Σχήμα 2.1</b> : Τοπογραφικό διάγραμμα καμπύλης B. ....	47
<b>Σχήμα 2.2</b> : Μεγέθη κύκλου διερχόμενου από τρία διαδοχικά σημεία πύκνωσης της οριογραμμής. ...	48
<b>Σχήμα 2.3</b> : Γωνία αλλαγής κατεύθυνσης $\gamma$ και μήκος L των οριογραμμών. ....	50
<b>Σχήμα 2.4</b> : Ειδική περίπτωση υπολογισμού μήκους καμπύλης. ....	51
<b>Σχήμα 2.5</b> : Προσδιορισμός σημείου προβολής του γεωμετρικού κέντρου οχήματος από δύο πλευρικούς τροχούς. ....	59
<b>Σχήμα 3.1</b> : Μοντέλο κεντρικής προβολής για αυστηρά κατακόρυφη φωτογραφία. ....	63
<b>Σχήμα 3.2</b> : (α) Αυστηρά κατακόρυφη φωτογραφία, (β) Κεκλιμένη φωτογραφία, (γ) Πλάγια φωτογραφία. ....	64
<b>Σχήμα 3.3</b> : Η ενιαία κλίμακα εικόνας σε Κατακόρυφη Λήψη με Επίπεδο και Οριζόντιο Έδαφος. ....	65
<b>Σχήμα 3.4</b> : Μεταβολή της κλίμακας λόγω κλίσεων της μηχανής. ....	65
<b>Σχήμα 3.5</b> : Στροφή Επιπέδου. ....	69
<b>Σχήμα 3.6</b> : Η στροφή γύρω από τον άξονα Z' δεν επηρεάζει την διαδικασία αναγωγής. ....	70
<b>Σχήμα 3.7</b> : Η Συνθήκη Συγγραμμικότητας. ....	71
<b>Σχήμα 4.1</b> : Διάγραμμα Σχετικής Αθροιστικής Συχνότητας ταχυτήτων στην καμπύλη B. ....	89
<b>Σχήμα 4.2</b> : Διάγραμμα συσχέτισης ταχύτητας V οχημάτων με ελικτότητα χάραξης $K_{E,X}$ . ....	90
<b>Σχήμα 4.3</b> : Διάγραμμα λειτουργικής ταχύτητας $V_{85}$ με την ελικτότητα χάραξης $K_{E,X}$ . ....	91
<b>Σχήμα 4.4</b> : Διάγραμμα παλινδρόμησης $V_{85}$ με $K_E^{0.5}$ ΧΑΡΑΞΗΣ. ....	93
<b>Σχήμα 4.5</b> : Διάγραμμα συσχέτισης ταχύτητας V και ελικτότητας τροχιάς οχήματος $K_{Ei}$ . ....	99
<b>Σχήμα 5.1</b> : Μοντέλο εγκάρσιας ευστάθειας. ....	107
<b>Σχήμα 5.2</b> : Δυνάμεις σε καμπύλη κίνηση. ....	108
<b>Σχήμα 5.3</b> : Συντελεστές τριβής σε καμπύλη. ....	109
<b>Σχήμα 5.4</b> : Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης $\eta^*$ . ....	113
<b>Σχήμα 5.5</b> : Διάγραμμα συσχέτισης ελικτότητας χάραξης $K_{E,X}$ με την μέση πραγματική ελικτότητα τροχιάς οχημάτων $K_{E,T}$ . ....	120

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2.1</b> : Ακτίνα κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης .....	50
<b>Πίνακας 2.2</b> : Ελικτότητα χάραξης για τις μεμονωμένες καμπύλες A, B, C, D.....	52
<b>Πίνακας 2.3</b> : Ανηγμένη ακτίνα για τις μεμονωμένες καμπύλες A, B, C, D.....	52
<b>Πίνακας 3.1</b> : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των οκτώ παραμέτρων αναγωγής για κάθε καμπύλη. ...	79
<b>Πίνακας 4.1</b> : Λειτουργική ταχύτητα $V_{85}$ για το επελεγμένο δείγμα κάθε καμπύλης. ....	86
<b>Πίνακας 4.2</b> : Test Kolmogorov – Smirnov για τις ταχύτητες οχημάτων στην καμπύλη B. ....	88
<b>Πίνακας 4.3</b> : Στατιστικά μεγέθη για τις ταχύτητες των οχημάτων στην καμπύλη B. ....	88
<b>Πίνακας 4.4</b> : Λειτουργική ταχύτητα $V_{85}$ οχημάτων στην καμπύλη B.....	89
<b>Πίνακας 4.5</b> : Πίνακας λειτουργικής ταχύτητας οχημάτων $V_{85}$ και ελικτότητας της χάραξης $K_{E,X}$ .....	91
<b>Πίνακας 4.6</b> : Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας $V_{85}$ και της ρίζας της ελικτότητας χάραξης $\sqrt{K_{E,X}}$ .....	94
<b>Πίνακας 4.7</b> : Θεωρητικές τιμές $V_{85}$ σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ–X και πραγματικές τιμές $V_{85}$ σύμφωνα με το επελεγμένο δείγμα. ....	95
<b>Πίνακας 4.8</b> : Σύγκριση θεωρητικής ταχύτητας Αμερικανικών Κανονισμών με την πραγματική λειτουργική ταχύτητα $V_{85}$ . ....	96
<b>Πίνακας 4.9</b> : Συγκριτικός Πίνακας ελικτότητας χάραξης $K_{E,X}$ και μέσης πραγματικής ελικτότητας τροχιάς οχημάτων $K_{E,T}$ .....	98
<b>Πίνακας 4.10</b> : Συγκριτικός Πίνακας ανηγμένης ακτίνας χάραξης $R_{AN,X}$ και μέσης πραγματικής ανηγμένης ακτίνας της τροχιάς οχημάτων $R_{AN,T}$ . ....	98
<b>Πίνακας 4.11</b> : Συγκεντρωτικός Πίνακας λειτουργικών ταχυτήτων $V_{85}$ και μέσων πραγματικών ελικοτοτήτων της τροχιάς των οχημάτων $K_{E,T}$ .....	100
<b>Πίνακας 4.12</b> : Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας $V_{85}$ και $\sqrt{K_{E,T}}$ τροχιάς οχημάτων. ....	102
<b>Πίνακας 4.13</b> : Συγκριτικός Πίνακας μέσων πραγματικών ελικοτοτήτων στις καμπύλες A και B για ελεύθερη και μη ελεύθερη ροή. ....	103
<b>Πίνακας 4.14</b> : Συγκριτικός Πίνακας μέσων πραγματικών ανηγμένων ακτίνων στις καμπύλες A και B για ελεύθερη και μη ελεύθερη ροή. ....	103
<b>Πίνακας 5.1</b> : Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς, ΟΜΟΕ–X - 2001. ....	111
<b>Πίνακας 5.2</b> : Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, RAS-L-1, 1995.....	111
<b>Πίνακας 5.3</b> : Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, 2008. ....	112
<b>Πίνακας 5.4</b> : Αποτελέσματα ποσοστού διατιθέμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στις καμπύλες ως προς το μέγιστο συντελεστή εφαπτομενικής τριβής. .	112
<b>Πίνακας 5.5</b> : Αποτελέσματα διαφορικής πλευρικής τριβής – Σύγκριση απαιτούμενης πλευρικής τριβής με την πλευρική τριβή των Αμερικανικών Κανονισμών. ....	119
<b>Πίνακας 5.6</b> : Πρόβλεψη μέσων ανηγμένων ακτίνων των οχημάτων για τις τέσσερις καμπύλες.....	121
<b>Πίνακας 5.7</b> : Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ ελικτότητας χάραξης $K_{E,X}$ και ελικτότητας της μέσης πραγματικής τροχιάς οχημάτων $K_{E,T}$ .....	122
<b>Πίνακας 5.8</b> : Συνολικό ποσοστό υπέρβασης της ελικτότητας χάραξης στην καμπύλη. ....	124
<b>Πίνακας 5.9</b> : Ποσοστό υπέρβασης της ελικτότητας χάραξης ανάλογα με το είδος της καμπύλης. ...	124

## ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η πραγματική καμπυλότητα της τροχιάς των οχημάτων σε σχέση με την καμπυλότητα σχεδιασμού υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Επιλέχθηκαν τέσσερις καμπύλες, εκ των οποίων οι τρεις βρίσκονται στη Λεωφόρο Διονύσου (Α, Β, C) και η τέταρτη στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου (D). Το εύρος ελκτοτήτων των καμπυλών κυμαίνεται από 950.76 gon/km έως 67.65 gon/km. Για κάθε καμπύλη υπολογίστηκαν, με βοήθεια της φωτογραμμετρίας, οι ελκτότητες τροχιάς για περίπου 100 οχήματα σε συνθήκες ελεύθερης ροής. Εκτός από την ελκτότητα, υπολογίστηκε έμμεσα η ταχύτητα του οχήματος στο μέσο της καμπύλης.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων αποδείχθηκε πως οι ταχύτητες των οχημάτων κάθε καμπύλης ακολουθούν την κανονική κατανομή και στη συνέχεια υπολογίστηκε η λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  σε κάθε καμπύλη. Εξετάστηκε η συσχέτιση της λειτουργικής ταχύτητας τόσο με την ελκτότητα της χάραξης όσο και με τη μέση πραγματική ελκτότητα της τροχιάς των οχημάτων σε κάθε καμπύλη. Υπολογίστηκαν ακόμα οι θεωρητικές ταχύτητες, οι οποίες προβλέπονται για τις συγκεκριμένες καμπύλες από τους Αμερικανικούς και Ελληνικούς Κανονισμούς. Επίσης, ερευνήθηκε αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέσης πραγματικής ελκτότητας της τροχιάς των οχημάτων και της ελκτότητας της χάραξης. Τέλος, εξετάστηκε αν ο απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής των οχημάτων κάθε καμπύλης ξεπερνά το διατιθέμενο συντελεστή πλευρικής τριβής, όπως προβλέπεται από τους Αμερικανικούς, τους Γερμανικούς και τους Ελληνικούς Κανονισμούς.

Στην παρούσα εργασία λοιπόν, ακολουθείται η σύγχρονη αντίληψη σύμφωνα με την οποία για να κατανοηθεί η οδηγητική συμπεριφορά και να ερμηνευτεί ένα ατύχημα σε καμπύλη, στο οποίο εμπλέκεται ένα μόνο όχημα, δεν αρκεί η μελέτη της ταχύτητας, αλλά και της τροχιάς που επιλέγουν οι οδηγοί στην καμπύλη. Η ασφαλής συσχέτιση της τροχιάς με τη συχνότητα ατυχημάτων δεν είναι εφικτή, διότι απαιτείται πολύ μεγαλύτερο δείγμα. Ωστόσο, με την προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι δυνατή η έγκαιρη αναγνώριση των πιθανά επικίνδυνων καμπυλών προτού συμβούν πολλά ατυχήματα. Τέλος, επειδή η ανάλυση της τροχιάς οχημάτων έγινε σε περιορισμένο αριθμό καμπυλών, δεν μπορούν να γίνουν ασφαλείς υποδείξεις στους Κανονισμούς.

### Λέξεις - κλειδιά

Καμπύλη, ελκτότητα, τροχιά οχήματος, ταχύτητα οχήματος, λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ , απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής, διατιθέμενος συντελεστής πλευρικής τριβής.

## ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the real curvature of vehicle trajectory compared to the curvature of design for rural single carriageways (two lane highways). A series of measurements were carried out at four curves. Three of these curves are located to Dionysos Avenue (A, B, C) and the fourth one to the Old National Roadway Athens – Korinthos (D). The rate of curvature for these curves ranges from 950.76 gon/km to 67.65 gon/km. Using photogrammetric techniques for each curve, the rate of curvature for about 100 free flow vehicles was estimated. It was also indirectly estimated the speed of each vehicle at the mid point of the curve.

During the analysis, was proved that the speeds of each curve follow the normal distribution, so the operating speed  $V_{85}$  of each curve was able to be estimated. Then, was tested if there is any relation between the operating speed and the curvature of the road axis for each curve. Except that, was tested if there is any relation between the operating speed and the real mean rate of curvature of vehicles trajectory. It was also estimated the design speed of each curve according to the AASHTO (The Green Book – 2004) and the theoretical  $V_{85}$  according to the Greek Guidelines. After that, was investigated if there is any correlation between the mean of real rate of curvature of vehicles path and the design rate of curvature. Finally, was tested if the side friction factor demand for the vehicles of each curve exceeds the available lateral friction factor according to American, German and Greek Guidelines.

Concluding, this research follows the recent theory that in order to understand driving behavior and to interpret a single car accident in a curve, the study of speed behavior is not enough but also the study of track behavior is required. The correlation between the vehicles trajectory and the rate of accidents is not possible because an increased sample size is needed. However, the proposed methodology allows the early recognition of potentially dangerous curves before many accidents happen. Finally, due to the limited number of observed curves, any recommendation to the Guidelines would be dicey.

### Keywords

Curve, rate of curvature, vehicle trajectory, vehicle speed, operating speed  $V_{85}$ , side friction factor demand, available side friction factor.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των οχημάτων σε σχέση με την καμπυλότητα σχεδιασμού υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος βιντεοσκοπήθηκε η κίνηση επιβατηγών οχημάτων και ελαφρών ημιφορτηγών σε τέσσερις συνολικά καμπύλες, εκ των οποίων οι τρεις βρίσκονται στη Λεωφόρο Διονύσου (Α, Β, C) και η τέταρτη στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου (D). Οι ακτίνες των κυκλικών τόξων των καμπυλών κυμαίνονται από 60 m (τόξο καμπύλης Α) έως 594 m (τόξο καμπύλης D) και οι ελικτότητες της χάραξης από 950.76 gon/km έως 67.65 gon/km αντίστοιχα. Οι καμπύλες επιλέχθηκαν βάσει συγκεκριμένων προϋποθέσεων, τόσο ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ίδιων των καμπυλών, αλλά και ως προς διάφορους παράγοντες, που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τροχιά των οδηγών.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού της ελικτότητας της τροχιάς των οχημάτων ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, για κάθε υπό μελέτη τμήμα, σχεδιάστηκαν στο οδόστρωμα χαρακτηριστικές διατομές και φωτοσταθερά. Στη συνέχεια έγινε η τοπογραφική αποτύπωση της καμπύλης και των παραπάνω στοιχείων. Για κάθε λήψη, όπου η θέση της κάμερας παρέμενε σταθερή, πραγματοποιήθηκε αναγωγή των βιντεοεικόνων. Οι γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες τουλάχιστον τεσσάρων φωτοσταθερών και των αντίστοιχων εικονοσυντεταγμένων τους επιτρέπουν τη μετατροπή της εικόνας, που αποτελεί μια κεντρική προβολή, σε ορθή προβολή με τη διαδικασία προβολικού μετασχηματισμού. Στη συνέχεια, απομονώθηκαν οι βιντεοεικόνες για κάθε όχημα, που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές διατομές και προσδιορίστηκαν, για κάθε μια εικόνα, οι εικονοσυντεταγμένες της προβολής του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος. Τέλος, με τη χρήση των οκτώ παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού, γίνονται γνωστές οι αντίστοιχες γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων στο επίπεδο της αναγωγής και συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί η ελικτότητα της τροχιάς του οχήματος. Η ακρίβεια υπολογισμού της ελικτότητας ενός οχήματος με τον παραπάνω τρόπο κρίνεται ως καλή, καθώς αντιστοιχεί σε αποδεκτή αβεβαιότητα ταχύτητας του οχήματος. Επισημαίνεται ότι η ακρίβεια στον υπολογισμό της ελικτότητας μπορεί να βελτιωθεί αν η ακρίβεια της αναγωγής είναι μεγαλύτερη. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθεί βιντεοκάμερα καλύτερης ανάλυσης.

Επίσης, υπολογίστηκε η ταχύτητα που ανέπτυξαν οι οδηγοί στο μέσο του κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης, μετρώντας το χρόνο για τη διάνυση γνωστή απόστασης. Τα οχήματα απείχαν χρονικά μεταξύ τους τουλάχιστον 6 sec.

Το μέγεθος του δείγματος καθορίστηκε έτσι ώστε να πληροί τις προϋποθέσεις μέγιστου επιτρεπόμενου σφάλματος ταχύτητας  $\pm 3\text{km/h}$  και επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ότι το σφάλμα που υπολογίζεται δε θα υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα. Το μέγεθος του απαιτούμενου δείγματος προέκυψε περίπου 90 οχήματα ανά καμπύλη ενώ μετρήθηκαν περίπου 100.

Οι ταχύτητες των οχημάτων κάθε καμπύλης αποδείχθηκε πως ακολουθούν την κανονική κατανομή, σύμφωνα με το test Kolmogorov – Smirnov και συνεπώς είναι

δυνατός ο υπολογισμός της λειτουργικής ταχύτητας, δηλαδή της ταχύτητας που ακολουθεί το 85% των οδηγών. Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια να βρεθεί σχέση που να συνδέει τη λειτουργική ταχύτητα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και πιο συγκεκριμένα με την ελικτότητα της χάραξης κάθε καμπύλης. Η καλύτερη σχέση που υπολογίστηκε ήταν:

$$V_{85} = 111.394 - 1.920 \cdot \sqrt{K_{E,X}} \text{ με } R^2 = 0.908$$

Αντίστοιχα βρέθηκε σχέση που συνδέει τη λειτουργική ταχύτητα με τη μέση πραγματική ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων σε κάθε καμπύλη.

Ύστερα από σύγκριση των  $V_{85}$  που εκτιμήθηκαν με τις θεωρητικές ταχύτητες των Αμερικανικών Κανονισμών, προέκυψε ότι οι πρώτες υπερβαίνουν τις δεύτερες και παρατηρήθηκε πως όσο μεγαλώνουν οι ακτίνες οι διαφορές μειώνονται.

Αποδείχθηκε επίσης, μέσω διαγραμμάτων και ανάλυσης παλινδρόμησης, ότι δεν υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας των οδηγών και της ελικτότητας της τροχιάς που ακολούθησαν στις καμπύλες όλοι οι οδηγοί. Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνει την διαφορετική αντίληψη που δημιουργείται σε κάθε οδηγό για την καμπύλη που πλησιάζει, η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Στη συνέχεια, έγινε προσπάθεια συσχετισμού της ελικτότητας της μέσης τροχιάς των οχημάτων με την ελικτότητα χάραξης. Στην παρούσα έρευνα η συσχέτιση που προέκυψε μεταξύ της γεωμετρίας της οδού ( $K_{E,X}$ ) και της μέσης ελικτότητας τροχιάς οχημάτων σε κάθε καμπύλη ( $K_{E,T}$ ) έχει πολύ υψηλό συντελεστή προσδιορισμού και στατιστικά σημαντικούς συντελεστές, αλλά δεν μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα τεκμηριωμένη, διότι η σχέση έχει προκύψει από δεδομένα μόνο από τέσσερις καμπύλες. Δε θα πρέπει επίσης να υποτιμούνται όλες οι πιθανές επιρροές στην οδηγητική συμπεριφορά από τα άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού. Η αντίστοιχη σχέση βρέθηκε και για τις παραμέτρους  $R_{AN,X}$  και  $R_{AN,T}$ .

Σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες, που εξετάζοταν αν ο στιγμιαίος μέγιστος απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής κάθε οχήματος ξεπερνάει το συντελεστή που διατίθεται από τους Κανονισμούς, στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται αν για κάθε καμπύλη ο απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής που αναπτύσσεται για τη λειτουργική ταχύτητα και για τη μέση πραγματική ανηγμένη ακτίνα ξεπερνάει τη τιμή των Κανονισμών. Σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, το μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων για τις καμπύλες B, C και D έχει αναπτυσσόμενο συντελεστή πλευρικής τριβής μικρότερο από το διατιθέμενο από τους Κανονισμούς συντελεστή πλευρικής τριβής. Αυτό σημαίνει ότι, για τις συγκεκριμένες καμπύλες, η πρόσφυση είναι επαρκής, ώστε να προβλέπεται η ασφαλής διέλευση των οχημάτων, σύμφωνα με τους Κανονισμούς. Οι συντελεστές εκμετάλλευσης για τις καμπύλες B, C και D προέκυψαν 0.6, 0.5 και 0.4 αντίστοιχα, κάτι που σημαίνει πως, όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα τόσο μικρότερη είναι η φυγόκεντρος επιτάχυνση και άρα τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό της μέγιστης επιτρεπόμενης επαπτομενικής τριβής που χρειάζεται η εγκάρσια διεύθυνση. Στην πιο κλειστή και πιο επικίνδυνη καμπύλη A, οι οδηγοί κινούνται χωρίς να διαθέτουν σημαντικά περιθώρια ασφάλειας για πέδηση, τουλάχιστον σε υγρό οδόστρωμα, καθώς πρέπει να διαθέσουν πολύ μεγαλύτερο



ποσοστό συντελεστή επαπτομενικής τριβής κατά την εγκάρσια κίνηση σε σχέση με τις άλλες καμπύλες.

Για τους Αμερικανικούς Κανονισμούς η φιλοσοφία της μέγιστης θεωρητικής τιμής του συντελεστή πλευρικής τριβής είναι διαφορετική και εξαρτάται από το επίπεδο της πλευρικής επιτάχυνσης που είναι αρκετή, ώστε να προκαλέσει στους οδηγούς το αίσθημα της δυσφορίας. Όμως οι AASHTO [2004] χαρακτηριστικά αναφέρουν ότι οι συντελεστές σχεδιασμού πλευρικής τριβής είναι συντηρητικά χαμηλότεροι από το σημείο, όπου οι περισσότεροι οδηγοί αρχίζουν να αισθάνονται δυσφορία. Η μεθοδολογία αξιολόγησης των απαιτούμενων πλευρικών τριβών σε σχέση με τις διατιθέμενες έγινε με τη βοήθεια μιας πρόσφατης έρευνας των Pratt και Bonneson [2008], όπου εξέτασαν την αυστηρότητα μιας καμπύλης χρησιμοποιώντας μετρήσεις ενέργειας (απώλειες) και τριβής. Σύμφωνα με την εφαρμογή της συγκεκριμένης έρευνας, το σημαντικότερο πρόβλημα αντιμετωπίζεται πάλι στην καμπύλη A, όπου προκύπτει ότι χρειάζεται ανακατασκευή. Η καμπύλη B χρειάζεται απλή σήμανση επικίνδυνης στροφής, ενώ οι καμπύλες C και D παρουσιάζουν απαιτούμενη τριβή μικρότερη των Κανονισμών, οπότε, θεωρητικά τουλάχιστον, η πρόσφυσή τους είναι επαρκής.

Επισημαίνεται ότι λόγω του περιορισμένου αριθμού καμπυλών, που εξετάστηκαν στη συγκεκριμένη έρευνα, δεν είναι δυνατό να γίνουν υποδείξεις στους Κανονισμούς σχετικά με το ζήτημα υπερσχεδιασμού ή υποσχεδιασμού.

Τέλος, αναφέρεται ότι εξ αιτίας του περιορισμένου αριθμού δείγματος σε κάθε καμπύλη δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για συχνότητα ατυχημάτων.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό εδώ και πολλά χρόνια πως κατά το σχεδιασμό ενός οδικού έργου εκτός από τους οικονομικούς, λειτουργικούς, περιβαλλοντικούς και αισθητικούς περιορισμούς, η οδική ασφάλεια είναι ένα ζήτημα πρωτίστης σημασίας για τους συγκοινωνιολόγους μηχανικούς. Πρόσφατα, η αναγνώριση του υψηλού κόστους των τροχαίων ατυχημάτων στην κοινωνία έχει δώσει την ώθηση στο ζήτημα του ασφαλέστερου σχεδιασμού των οδών.

Εδώ και αρκετό καιρό έχει βρεθεί ότι υπάρχει ισχυρός συσχετισμός μεταξύ δυσμενούς γεωμετρίας οδού και εμφάνισης ατυχημάτων. Μέχρι όμως και σήμερα, εξ αιτίας μεθοδολογικών προβλημάτων, δεν είναι γνωστή με ακρίβεια η σχέση μεταξύ ατυχημάτων και χαρακτηριστικών σχεδιασμού.

Έτσι λοιπόν, στις μέρες μας κρίνεται πολύ σημαντική η συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με την οδηγητική συμπεριφορά, όπως επίσης και η έρευνα πάνω σε παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση ατυχημάτων. Οι παραπάνω ενέργειες είναι ιδιαίτερα ουσιώδεις για τις καμπύλες οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας, οι οποίες είναι επιρρεπείς σε ατυχήματα.

Αναφορικά με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων, διάφορες έρευνες που έγιναν έδειξαν ότι οι οδοί δύο λωρίδων κυκλοφορίας κατέχουν τα υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης ατυχημάτων από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία οδού και ότι ο συνολικός αριθμός θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων στα παραπάνω οδικά δίκτυα αγγίζει ποσοστό μεταξύ του 60% και 70% σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε Ευρώπη και Αμερική [Lamm et al., 1991]. Ταυτόχρονα διαπιστώθηκε ότι τουλάχιστον τα μισά θανάσιμα τροχαία ατυχήματα, ή στην καλύτερη περίπτωση ένα ποσοστό 30% αυτών, λαμβάνουν χώρα σε καμπύλα οδικά τμήματα, κυρίως λόγω του ότι η ταχύτητα των οχημάτων τη χρονική στιγμή της σύγκρουσης υπερβαίνει τη κρίσιμη ταχύτητα της καμπύλης με αποτέλεσμα την απώλεια ελέγχου εκ μέρους των οδηγών.

Μια ιδιαίτερα σημαντική διαπίστωση έγινε από τους Krebs και Kloeckner [1977] που ισχυρίζονται ότι, αν οι κανόνες χάραξης οδών εγγυώνταν την ασφάλεια των οδών, τότε καθόλου ή ελάχιστα ατυχήματα έπρεπε να συμβαίνουν στις εν λόγω οδούς και άρα η ύπαρξη τους οφείλεται κατά πρώτο λόγο σε ευθύνη του οδηγού. Σύμφωνα πάλι με παλαιότερες έρευνες των Brinkman et al [1984], οι οδοί δύο λωρίδων κυκλοφορίας παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους δείκτες ατυχημάτων, ειδικότερα στις περιπτώσεις εμπλοκής ενός μόνο οχήματος. Σε πιο πρόσφατες έρευνες, ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα που έχει προκύψει είναι ότι δεν αρκεί η αιτία της υψηλής ταχύτητας για να ερμηνευτεί ένα ατύχημα στο οποίο εμπλέκεται ένα μόνο όχημα. Η τροχιά των οδηγών έχει μεγαλύτερη σημασία για την κατανόηση της οδηγητικής συμπεριφοράς από ότι θεωρείται μέχρι σήμερα.

Γενικώς, τα αποτελέσματα των μέχρι τώρα ερευνών δείχνουν μεγάλη ασυμφωνία μεταξύ της ακτίνας της τροχιάς που ακολουθούν οι οδηγοί και της ακτίνας της καμπύλης. Έχει αποδειχθεί επίσης πως υπάρχουν μερικές θέσεις, στις οποίες η καμπυλότητα της τροχιάς των οδηγών είναι μεγαλύτερη από την καμπυλότητα του άξονα [Garcia και Diaz, 2000]. Η πρόσφατη έρευνα του Spacer [2000], αναφέρει τη

σημασία που έχει η συλλογή δεδομένων στις τροχιές των οδηγών ως μέσο για την έγκαιρη αναγνώριση των πιθανά επικίνδυνων καμπυλών. Έτσι, στο μέλλον η ασφάλεια σε μια καμπύλη θα μπορεί να κρίνεται σύμφωνα με τις πιο συχνές τροχιές των οδηγών που παρατηρούνται. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα χρήσης προληπτικών μέτρων προτού συμβούν πολλά ατυχήματα.

Οι παραπάνω λόγοι προκάλεσαν την ανάγκη συλλογής δεδομένων που σχετίζονται με την οδηγητική συμπεριφορά και την εύρεση μιας μεθοδολογίας που θα βοηθήσει στην αξιολόγηση της χάραξης των οριζόντιων καμπυλών, ώστε να ληφθούν προληπτικά μέτρα ασφαλείας όπου χρειάζεται. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνησης της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των οχημάτων σε σχέση με την καμπυλότητα σχεδιασμού υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Στα χρονικά πλαίσια εκπόνησης μιας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν τέσσερις στο σύνολο καμπύλες σε υπεραστικές οδούς εντός της Αττικής. Η επιλογή των υπό μελέτη καμπυλών παρουσίασε σημαντική δυσκολία, διότι εκτός από τα οριζοντιογραφικά χαρακτηριστικά των καμπυλών μιας υπεραστικής οδού, για τα οποία μπορούσε να γίνει εκ των προτέρων μια πρώτη εκτίμηση μέσω εικόνων από το Google Earth, ήταν απαραίτητος και ο επί τόπου έλεγχος όλων των υποψηφίων καμπυλών, ώστε να εξεταστούν η κατά μήκος κλίση, το είδος της διατομής, η κατάσταση του οδοστρώματος, η ύπαρξη πλευρικών εμποδίων, η ύπαρξη ή μη ορατότητας, καθώς και η δυνατότητα παρατήρησης ολόκληρης της καμπύλης ή σημαντικού τμήματός της από το φρύδι πρανούς δίπλα στην καμπύλη. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν στη συνέχεια είχαν να κάνουν με την καταλληλότερη θέση της βιντεοκάμερας αλλά και με την επιλογή κατάλληλων χρωμάτων στο οδόστρωμα, ώστε να προκαλείται αντίθεση και να φαίνονται τα σημάδια στο video, χωρίς όμως να επηρεάζουν τους οδηγούς. Δυσκολίες επίσης παρουσιάστηκαν και κατά τη προσπάθεια εύρεσης της Φωτογραμμετρικής μεθοδολογίας (πριν τη διαδικασία της αναγωγής), διότι δεν είχε πραγματοποιηθεί στο παρελθόν παρόμοια έρευνα και χρειαζόταν βαθύτατη κατανόηση ορισμένων φωτογραμμετρικών εννοιών. Σημαντικές επίσης δυσκολίες εντοπίστηκαν κατά την προσπάθεια προσδιορισμού της προβολής του γεωμετρικού κέντρου κάθε οχήματος, όταν φαίνονταν μόνο οι δύο πλευρικοί τροχοί. Τέλος, η στατιστική ανάλυση όλων των αποτελεσμάτων ήθελε ιδιαίτερη προσοχή, διότι τα δεδομένα προέρχονται μόνο από τέσσερις καμπύλες και όχι από πολύ μεγάλο αριθμό καμπυλών που θα μπορούσε να γίνει στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος. Το προσδοκώμενο αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής είναι να παρουσιάσει την τάση της καμπυλότητας της τροχιάς που επιλέγουν τα οχήματα σε σχέση με την καμπυλότητα σχεδιασμού, καθώς επίσης να παρουσιαστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης του προβλήματος.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρονται ορισμοί των μεγεθών (εδάφιο 1.1.) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία αλλά και σε παλαιότερες ανάλογες έρευνες οι οποίες περιγράφονται στο εδάφιο 1.2.. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση κρίνεται απαραίτητη, ώστε να μπορεί να συγκριθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης του προβλήματος με τη μεθοδολογία αντίστοιχων ερευνών.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των στοιχείων της έρευνας. Πιο αναλυτικά, στο εδάφιο 2.1. εξηγείται πώς έγινε η επιλογή των κατάλληλων καμπυλών οδικών τμημάτων παρατήρησης ενώ στο εδάφιο 2.2. παρουσιάζεται η προετοιμασία των τμημάτων αυτών. Στο εδάφιο 2.3. προσδιορίζονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των καμπυλών που επιλέχθηκαν.

Ύστερα από ταχυμετρική αποτύπωση που περιγράφεται στο υπεδάφιο 2.3.1., προσδιορίζεται η ακτίνα του κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης (2.3.2.), καθώς και η ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης (2.3.3.). Στη συνέχεια, ακολουθεί η βιντεοσκόπηση της κυκλοφορίας (εδάφιο 2.4.) και τέλος, οι μετρήσεις στο εργαστήριο (εδάφιο 2.5.), που διαχωρίζονται σε μετρήσεις ταχύτητας (υπεδάφιο 2.5.1.) και μετρήσεις για τον υπολογισμό της ελικτότητας οχημάτων (υπεδάφιο 2.5.2.).

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται η Φωτογραμμετρική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε. Στο εδάφιο 3.1. αναφέρονται οι παραδοχές στη γεωμετρία του οδοστρώματος, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της Φωτογραμμετρικής μεθόδου. Στο εδάφιο 3.2. περιγράφεται διεξοδικά το Φωτογραμμετρικό πρόβλημα και παρουσιάζονται ορισμένες βασικές ιδιότητες που ισχύουν στη Φωτογραμμετρία, όπως το μοντέλο της κεντρικής προβολής που περιγράφει κάθε εικόνα (υπεδάφιο 3.2.1.), την εφαρμογή της επίγειας μονοεικονικής Φωτογραμμετρίας για το συγκεκριμένο πρόβλημα (3.2.2.), την κλίμακα της εικόνας (3.2.3.) και τα χαρακτηριστικά της βιντεοκάμερας (3.2.4.). Στη συνέχεια προσδιορίζεται το επίπεδο της αναγωγής που προσεγγίζει το οδόστρωμα στο υπό μελέτη τμήμα (εδάφιο 3.3.), υπολογίζονται οι γωνίες στροφής (3.4.) και τέλος πραγματοποιείται η αναγωγή της κεκλιμένης φωτογραφίας (3.5.) και εξηγείται πώς, από τη συνθήκη συγγραμμικότητας (3.5.1), με την απαλοιφή των υπομέτρων, είναι εφικτός ο προβολικός μετασχηματισμός (3.5.2) και ο υπολογισμός των παραμέτρων του (3.5.3.).

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται τα στοιχεία της έρευνας. Αρχικά, στο εδάφιο 4.1 επεξεργάζονται οι μετρήσεις των ταχυτήτων και καθορίζεται το μέγεθος του δείγματος οχημάτων σε κάθε καμπύλη (υπεδάφιο 4.1.1.). Ελέγχεται η κανονικότητα του δείγματος (4.1.2.) και υπολογίζεται η λειτουργική ταχύτητα κάθε καμπύλης (4.1.3.). Στη συνέχεια (εδάφιο 4.2.), αναπτύσσεται συσχέτιση μεταξύ της λειτουργικής ταχύτητας και της ελικτότητας της καμπύλης. Στο εδάφιο 4.3. συγκρίνεται η λειτουργική ταχύτητα του δείγματος με τη θεωρητική ταχύτητα των Κανονισμών, ενώ στο εδάφιο 4.4. υπολογίζεται η ελικτότητα της τροχιάς του οχήματος. Στο εδάφιο 4.5. αναζητείται εξίσωση που να συσχετίζει τη ταχύτητα του οχήματος με την ελικτότητα της τροχιάς του, ενώ, τέλος, στο εδάφιο 4.6. αναζητείται εξίσωση που να συσχετίζει τη λειτουργική ταχύτητα κάθε καμπύλης με τη μέση ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων κάθε καμπύλης.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύονται οι επιπτώσεις στο γεωμετρικό σχεδιασμό των καμπυλών. Στο εδάφιο 5.1. περιγράφεται η δυναμική κίνησης του οχήματος και στο εδάφιο 5.2. πραγματοποιείται ο υπολογισμός του αναπτυσσόμενου και διατιθέμενου συντελεστή τριβής, σύμφωνα με τους Γερμανικούς και Ελληνικούς Κανονισμούς (5.2.1.) και σύμφωνα με τους Αμερικανικούς (5.2.2.). Στη συνέχεια (εδάφιο 5.3.), συσχετίζεται η ελικτότητα της καμπύλης με τη μέση πραγματική ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων και στο τελευταίο εδάφιο (5.4.) ακολουθεί μια ανάλυση σχετικά με τις καμπυλότητες των οδών.

Στη συνέχεια, συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα παλαιότερων ερευνών. Ακολουθούν κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στο μέλλον, ώστε να απλοποιηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία. Επίσης, αναφέρονται και οι προϋποθέσεις που απαιτούνται, ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερες ακρίβειες στα μεγέθη που υπολογίζονται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

## 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 1.1. Ορισμοί

Παρακάτω αναφέρονται ορισμοί και συνοπτική περιγραφή μερικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ - Χ. [Ψαριανός, 2001]. Επίσης παρουσιάζονται μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν σε παλαιότερες έρευνες, ώστε αυτές να γίνουν περισσότερο κατανοητές.

#### 1.1.1. Ταχύτητα $V_{\text{επιτρ}}$

Η επιτρεπόμενη ταχύτητα  $V_{\text{επιτρ}}$  είναι το τοπικό ή σχετικά ισχύον μέγιστο όριο ταχύτητας. Η επιτρεπόμενη ταχύτητα διαφέρει ανάλογα με την κατηγορία της οδού. Η ταχύτητα αυτή θεωρείται καθοριστική, διότι η ταχύτητα μελέτης, η οποία σχετίζεται άμεσα με τα στοιχεία της μελέτης της οδού, πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την επιτρεπόμενη ταχύτητα.

#### 1.1.2. Ταχύτητα μελέτης $V_e$

Η ταχύτητα μελέτης  $V_e$  προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τα περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, που ανταποκρίνονται στον προβλεπόμενο λειτουργικό χαρακτήρα της οδού, στο οδικό δίκτυο και την επιδιωκόμενη ποιότητα κυκλοφοριακής ροής, με βάση τον λειτουργικό χαρακτήρα της οδού. Στην ταχύτητα μελέτης αντιστοιχούν οριακές και προτεινόμενες τιμές για τα περισσότερα στοιχεία μελέτης καθώς και οι αποδεκτές τιμές για τη συσχέτιση των μεμονωμένων στοιχείων μελέτης. Ειδικότερα για ένα οδικό τμήμα η ταχύτητα μελέτης καθορίζει:

- τις ελάχιστες ακτίνες των οριζόντιων καμπυλών
- τις ελάχιστες παραμέτρους των κλωθοειδών
- τις μέγιστες κατά μήκος κλίσεις
- τις ελάχιστες ακτίνες των κυρτών και κοίλων κατακόρυφων καμπυλών.

Με τον τρόπο αυτό η  $V_e$  επηρεάζει, μεταξύ άλλων, αποφασιστικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός οδικού τμήματος, ιδιαίτερα αυτών της ομάδας Α, το επίπεδο εξυπηρέτησης της οδού και την οικονομικότητα. Συμπερασματικά, η ταχύτητα μελέτης  $V_e$  πρέπει να μείνει σταθερή κατά το δυνατόν σε οδικά τμήματα μεγάλου μήκους, που αποτελούν χαρακτηριστικές ενότητες και αλληλεξαρτώνται.

#### 1.1.3. Λειτουργική ταχύτητα $V_{85}$

Η λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  είναι ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στο γεωμετρικό σχεδιασμό μεμονωμένων στοιχείων μελέτης της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και της διατομής και έχει άμεση σχέση με τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων. Στις οδούς της ομάδας Α (υπεραστικές οδοί με βασική λειτουργία τη σύνδεση) η ταχύτητα  $V_{85}$  αντιστοιχεί στην ταχύτητα, με την οποία θα κινηθεί ανεμπόδιστα το 85% των επιβατηγών οχημάτων σε καθαρό και υγρό οδόστρωμα. Με την ταχύτητα  $V_{85}$  καθορίζονται:

- 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
- τα στοιχεία για την απορροή των ομβρίων.

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 την ασφάλεια.

Αναφορικά με τη μέτρηση της ταχύτητας  $V_{85}$  σε υγρά οδοστρώματα, σχετικές έρευνες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα  $V_{85}$  σε στεγνό οδόστρωμα, δε διαφέρει ουσιαστικά από την ταχύτητα  $V_{85}$  σε υγρό οδόστρωμα, εφόσον η ένταση της βροχής είναι τέτοια, ώστε το μήκος ορατότητας των οδηγών να είναι τουλάχιστον ίσο με 150 m. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα  $V_{85}$  που αναφέρεται στην κρίσιμη περίπτωση του υγρού οδοστρώματος, ισχύει τόσο σε υγρά όσο και σε στεγνά οδοστρώματα.

Σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς, η ταχύτητα  $V_{85}$  για τις οδούς ομάδας Α με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, περίπτωση στην οποία υπάγονται οι υπό μελέτη καμπύλες, είναι συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού. Η  $V_{85}$  προσδιορίζεται για κάθε μεμονωμένο γεωμετρικό στοιχείο (καμπύλη ή ευθυγραμμία) καθώς επίσης και για ένα οδικό τμήμα με ενιαία χαρακτηριστικά.

Οι καθοριστικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την τιμή της ταχύτητας  $V_{85}$  είναι η ελκτότητα (το τεταμένο)  $K_E$  της μεμονωμένης καμπύλης και το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας  $b$ . Η ταχύτητα  $V_{85}$  υπολογίζεται χωριστά για κάθε μία καμπύλη χάραξης της οδού ως συνάρτηση της τιμής της ελκτότητας  $K_E$  της κάθε μεμονωμένης καμπύλης, καθώς επίσης και για κάθε “Ανεξάρτητη Ευθυγραμμία” ( $K_E = 0$  gon/km). Η ταχύτητα  $V_{85}$  σε οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας της ομάδας Α προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των ταχυτήτων και για τις δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας, σε συνάρτηση με το τεταμένο της καμπύλης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οδικού τμήματος (κατά μήκος κλίση, μήκος εφαρμογής της κλίσης και πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας).

#### 1.1.4. Βαθμός καμπύλης (D)

Ως βαθμός καμπύλης ή βαθμός καμπυλότητας μιας καμπύλης ορίζεται η γωνία  $\phi$  που αντιστοιχεί σε τόξο καμπύλης ίσο με 100 ft (1ft=0.3048m) και μετριέται σε μοίρες / μέτρο [AASHTO, 1984].

Στο κυκλικό τόξο ο βαθμός καμπύλης δίνεται από τη σχέση:

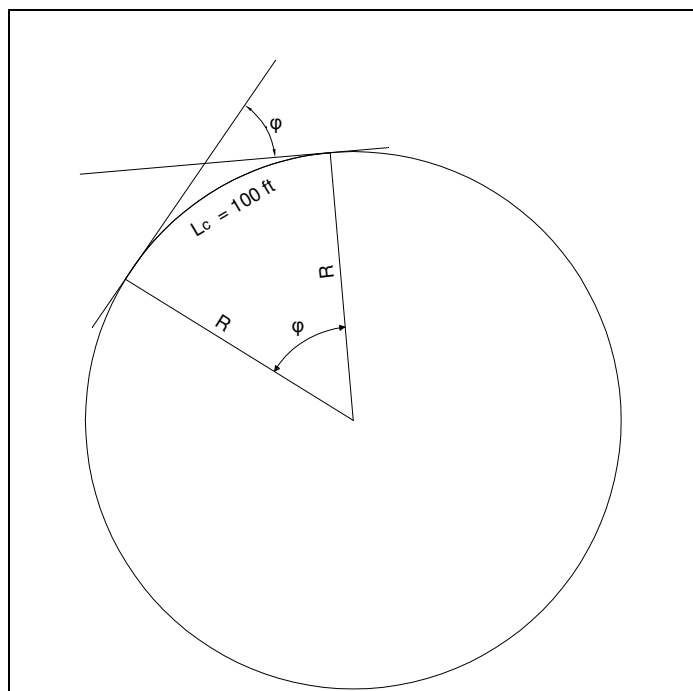
$$D = \frac{30.48 \cdot 360}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad (1.1),$$

όπου:

D [°/m] = βαθμός της καμπύλης (μοίρες / 30.48 m.),

$\pi$  = 3.14,

R [m] = η ακτίνα της καμπύλης.



Σχήμα 1.1 : Βαθμός καμπύλης.

## 1.2. Ανάλογες Έρευνες

Στα επόμενα υπεδάφια παρουσιάζονται έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στο αντικείμενο που διερευνάται. Οι τέσσερις πρώτες έρευνες είναι πιο σύγχρονες, ενώ η τελευταία ήταν από τις πρώτες έρευνες που μελετούσε τη συμπεριφορά των οδηγών στα καμπύλα τμήματα.

### 1.2.1. Έρευνα των Alfredo Garcia και M. Elena Díaz, 2000

Η έρευνα αυτή ασχολείται με την αυτόματη εξαγωγή δεδομένων της τροχιάς των οχημάτων για την ανάλυση της συμπεριφοράς τους. Η διαδικασία πραγματοποιείται με την επεξεργασία ψηφιακών εικόνων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η αναφορά των πρώτων αποτελεσμάτων από ένα σύστημα, το οποίο έχει αναπτυχθεί και ελεγχθεί ως η μέθοδος εξαγωγής τροχιάς οχημάτων σε καμπύλες. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση διαδοχικών ψηφιακών εικόνων. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιτρέπει να αποκτηθεί με αυτόματο τρόπο η χωροχρονική πορεία ενός οχήματος και στη συνέχεια να αναλυθεί και να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά του οχήματος στις καμπύλες.

Η ανίχνευση των οχημάτων πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο ακριβής, αλλά όχι απαραίτητα γρήγορη και άμεση, καθώς δεν είναι απαραίτητο η διαδικασία να γίνει σε



πραγματικό χρόνο. Η μέθοδος βασίζεται σε τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας. Αρχικά ανιχνεύεται ένα σύνολο από σχετικά σημεία που αναγνωρίζουν την ύπαρξη οχήματος. Τα σημεία αυτά έχουν οριστεί ως τα ακραία σχετικά σημεία του αντικειμένου ανταποκρινόμενα σε ένα δεδομένο απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου. Η προσομοίωση κάθε οχήματος με ένα απλοποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός αντιπροσωπευτικού σημείου (γεωμετρικό κέντρο του αυτοκινήτου). Η εκ των υστέρων αντιστοίχιση των σχετικών σημείων μεταξύ των διαδοχικών εικόνων πραγματοποιείται ώστε να εκτιμηθεί η κατεύθυνση κίνησης για κάθε θέση και στιγμή κάθε οχήματος.

Στη συνέχεια, επανεξετάζονται, εν συντομία, οι παλιότερες και κλασικότερες μέθοδοι προσδιορισμού της τροχιάς οχημάτων και συγκρίνονται με την προτεινόμενη μέθοδο. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ιχνών των οχημάτων που προκύπτουν από την έρευνα σε πραγματικές καμπύλες. Τα δεδομένα συγκρίνονται ως προς τον πλευρικό χώρο, την καμπυλότητα της πορείας του οχήματος, την ταχύτητα και την απαιτούμενη πλευρική τριβή με τα υποτιθέμενα από τα κριτήρια σχεδιασμού και τους ισχύοντες κανονισμούς. Τέλος είναι δυνατό να καθοριστούν περιθώρια ασφαλείας.

## *1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Η ασφάλεια αποτελεί ένα θέμα πρωτίστης σημασίας για τους συγκοινωνιολόγους μηχανικούς εδώ και πολλά χρόνια. Πρόσφατα, η αναγνώριση του υψηλού κόστους των τροχαίων ατυχημάτων στην κοινωνία έχει δώσει την ώθηση στο ζήτημα του ασφαλέστερου σχεδιασμού των οδών.

Εδώ και αρκετό καιρό έχει βρεθεί ότι υπάρχει ισχυρός συσχετισμός μεταξύ δυσμενούς γεωμετρίας οδού και εμφάνισης ατυχημάτων. Το πρόβλημα στον εντοπισμό στατιστικά σημαντικών σχέσεων μεταξύ τροχαίων ατυχημάτων και γεωμετρικού σχεδιασμού έχει μελετηθεί εκτενώς λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του καταστρώματος, καθώς και τα πλευρικά χαρακτηριστικά των οδών.

Ένα σημαντικό ποσοστό αυτών των ερευνών υστερούν, καθώς παρουσιάζουν ουσιώδη μεθοδολογικά προβλήματα. Όμως, από την άλλη πλευρά, η διαθέσιμη τεχνολογία δεν επιτρέπει τη συλλογή συγκεκριμένων δεδομένων με εξαντλητικό και ακριβή τρόπο. Δεδομένων τέτοιων μεθοδολογικών προβλημάτων, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ ατυχημάτων και χαρακτηριστικών σχεδιασμού δεν είναι γνωστή με ακρίβεια έως και σήμερα. Επιπρόσθετα, κρίνεται απαραίτητο για ορισμένες χώρες να υιοθετήσουν Κανονισμούς Γεωμετρικού Σχεδιασμού που μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν σε άλλες χώρες. Το ερώτημα που προκύπτει όμως είναι αν οι Κανονισμοί αυτοί είναι δυνατόν να προβλέψουν επαρκώς τη συμπεριφορά των οδηγών στη χώρα που τις υιοθέτησε.

Στις μελέτες που πραγματοποίησαν οι Johnston [1983] και Wong [1993] πάνω στη σχέση μεταξύ των ατυχημάτων και του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών, υιοθέτησαν μια τελείως διαφορετική θεώρηση. Πιο συγκεκριμένα αναφέρουν την επικράτηση της ερευνητικής τους προσοχής στη σχέση ατυχήματος – συμπεριφορά οχήματος αποδεικνύοντας με επιχειρήματα ότι κατευθύνοντας τη γνώση μας στη συμπεριφορά του οχήματος σχεδόν ξέχωρα από τη γεωμετρία της οδού και την

ασφάλεια, είναι μάλλον μια κίνηση περιοριστική και όχι απαραίτητα ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προσέγγισης. Οι παραπάνω ερευνητές συνιστούν μια μετατόπιση στην έμφαση της μελέτης ως προς την κανονική συμπεριφορά των οχημάτων. Ο στόχος τους είναι να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά ξεχωριστών οχημάτων στις καμπύλες, πριν και μετά την ευθυγραμμία, ώστε να ανιχνευθούν διαφορές τόσο στη συμπεριφορά μεταξύ μεμονωμένων οδηγών, όσο και στη συνέπειά τους ως προς τη χάραξη.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, ένα από τα μεθοδολογικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μελέτες οι οποίες σχετίζονται με την εμφάνιση ατυχημάτων και τη γεωμετρία της οδού, ήταν η έλλειψη απαραίτητης τεχνολογίας για τη συλλογή δεδομένων με αρκετά εξαντλητικό σε ακρίβεια τρόπο. Η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σχετίζεται με τον αυτοματισμό στη ψηφιοποίηση, στη μεθοδολογία και στην ερμηνεία των εικόνων που προέρχονται από τις πλευρικές βιντεοκάμερες CCTV (closed circuit television). Το χαρακτηριστικό “κλειδί” του αισθητήρα του video είναι ότι μπορεί να μεταφέρει χωρική και χρονική πληροφορία. Μια κάμερα μπορεί όχι μόνο να επιβλέπει αρκετά οχήματα ταυτόχρονα, αλλά παράλληλα δίνει τη δυνατότητα να εξετάζεται ένα συνεχές μήκος δρόμου. Επίσης, με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται η ευρύτερη περιγραφή του προβλήματος από τις άλλες μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικούς βρόγχους, radars, φωτογραφίες κλπ. Οι κάμερες CCTV και η μεθοδολογία με τη χρήση ψηφιακών εικόνων επιτρέπει να μετρηθούν με ακρίβεια ο πλευρικός ελεύθερος χώρος, η καμπυλότητα της διαδρομής, οι ταχύτητες και η απαιτούμενη πλευρική τριβή. Τα τέσσερα αυτά χαρακτηριστικά μαζί με τις διαφορικές τους διακυμάνσεις δίνουν μια ολοκληρωμένη περιγραφή της κινηματικής του οχήματος. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης της CCTV κάμερας και της μεθοδολογίας της εικόνας που περιγράφηκε νωρίτερα είναι ότι επιτρέπουν την πραγματοποίηση νέων μετρήσεων που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του οχήματος όπως είναι: η διάταξη του οχήματος, η κατεύθυνση κίνησης σε ισόπεδο κόμβο και ο προσδιορισμός της ακριβούς θέσης κατά την αλλαγή λωρίδας κυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα σε ράμπες.

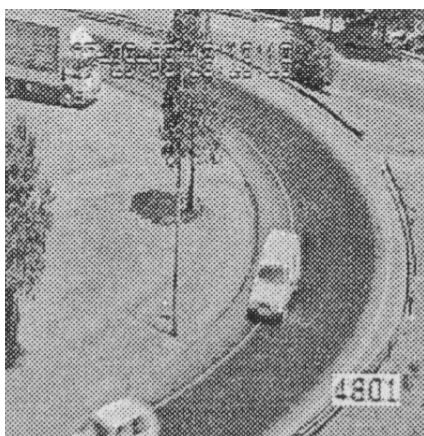
Το κύριο αντικείμενο της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η ανάπτυξη ενός λογισμικού εργαλείου βασισμένο σε τεχνικές που χρησιμοποιούν ψηφιακές εικόνες, ώστε να μετρηθούν οι μεταβλητές που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά του οδηγού. Επίσης, πραγματοποιείται δοκιμαστική εφαρμογή του λογισμικού στο πεδίο και συγκεκριμένα σε μία καμπύλη, προκειμένου να συγκριθεί η παρατηρούμενη συμπεριφορά του οχήματος με την υποτιθέμενη συμπεριφορά από τους Κανονισμούς Γεωμετρικού Σχεδιασμού.

Η συγκεκριμένη διατριβή οργανώνεται ως ακολούθως. Στο Κεφάλαιο II παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος βιντεοσκόπησης. Το Κεφάλαιο III ξεκινά με την περιγραφή της απόκτησης των εικόνων που περιέχουν οχήματα και την επισκόπηση του σεναρίου με την πραγματοποίηση πειραματικού ελέγχου. Παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τέσσερις μεταβλητές που αναλύθηκαν. Η αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο IV και τέλος τα συμπεράσματα συνοψίζονται στο Κεφάλαιο V αυτής της έρευνας.

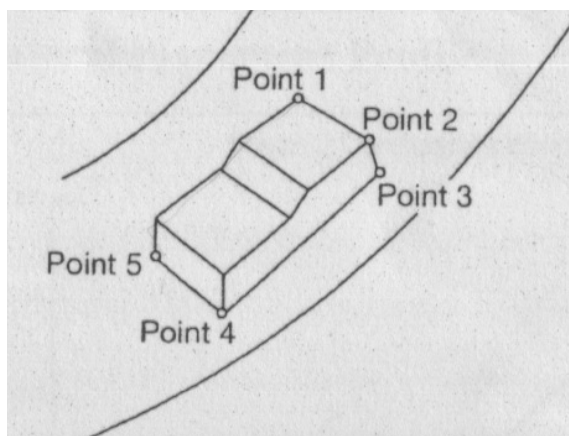
## II. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΙΝΤΕΟΣΚΟΠΗΣΗΣ

Οι βιντεοεικόνες επεξεργάζονται σε τρία υπολογιστικά επίπεδα, στο χαμηλό, στο ενδιάμεσο και στο υψηλό επίπεδο επεξεργασίας. Η ακριβής περιγραφή της μεθοδολογίας δίνεται από τους Diaz et al. [1996].

- *Χαμηλό επίπεδο:* Σε αυτό το στάδιο ανιχνεύονται τα σημεία τα οποία αναγνωρίζουν το όχημα. Αυτό το σύνολο σημείων αποτελείται από σημεία σχετιζόμενα με συναφή μέρη του αντικειμένου, τα οποία μπορεί να είναι γωνίες ή κέντρα κυκλικών σχημάτων στο εμπροσθεν ή όπισθεν μέρος του οχήματος. Στην Εικόνα 1.1(α), εμφανίζεται ένα παράδειγμα ανιχνευόμενων σημείων σε ένα όχημα. Τα σημεία αυτά ορίζονται ως τα σχετικά άκρα ενός οχήματος αντίστοιχου με ένα δεδομένο και προκαθορισμένο απλό μοντέλο αυτοκινήτου (Εικ.1.1 (β)). Το μοντέλο που προσαρμόζει τα σημεία στο απλό μοντέλο αυτοκινήτου επιτρέπει τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης ενός αντιπροσωπευτικού σημείου (γεωμετρικό κέντρο του αυτοκινήτου). Η μέθοδος της ανίχνευσης των σχετικών σημείων βασίζεται στην ανάλυση της κατανομής της κλίσης κατευθύνσεων σε μία γειτονιά σημείων.
- *Ενδιάμεσο επίπεδο:* Το επόμενο στάδιο αποτελεί η ταύτιση και η ομαδοποίηση του συνόλου των ανιχνευόμενων σημείων σε δύο διαδοχικές εικόνες της σειράς εικόνων. Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας την ομοιότητα στους τόνους του γκρι, τη γεωμετρία της ομαδοποίησης και την ομοιότητα στην κίνηση. Κάθε ομαδοποίηση σημείων αναπαριστά την κίνηση κάθε άκαμπτου σώματος του οχήματος που εμφανίζεται στην εικόνα, το οποίο κινείται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μεμονωμένες τροχιές και οι ταχύτητες των οχημάτων. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε επίπεδη εικόνα και άρα η κάμερα χρειάζεται καλιμπράρισμα, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή της τροχιάς και της ταχύτητας σε περιβάλλον πραγματικών συντεταγμένων αναφοράς. Η προτεινόμενη μέθοδος για το καλιμπράρισμα δίνεται από τον Tsai [1987].
- *Υψηλό Επίπεδο:* Σε αυτό το επίπεδο αναλύεται και ερμηνεύεται η εξέλιξη των οχημάτων σε ό,τι αφορά τον πλευρικό χώρο, τις ταχύτητες, τις καμπυλότητες και την απαιτούμενη πλευρική τριβή.



(α)



(β)

**Εικόνα 1.1 :** (α)Ανίχνευση σχετικών σημείων (σχετικά άκρα οχήματος), (β)Μοντέλο οχήματος.

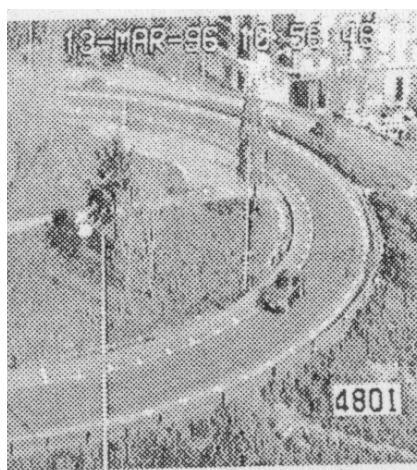
### III. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη προσέγγιση εξετάστηκε σε μια ράμπα ενός ανισόπεδου κόμβου “τριφύλλι” (Εικ. 1.1(α)). Προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά των οδηγών και το ίχνος της τροχιάς του οχήματος, χρησιμοποιήθηκε μια TV κάμερα αστικού ελέγχου της κυκλοφορίας. Η κάμερα τοποθετήθηκε σε ένα στύλο ύψους 18 m πάνω από το οδόστρωμα και είναι εξοπλισμένη με φακό 12 mm. Η ανάλυση που μπορούσε να επιτευχθεί έφτανε τα 9 cm/pixel.

Οι εικόνες απομονώθηκαν από την εγγραφή video στο κέντρο Κυκλοφοριακού Ελέγχου της Βαλένθια, η οποία έγινε σε S-VHS κασέτες. Σε μεταγενέστερο στάδιο επεξεργασίας στο εργαστήριο, οι εικόνες ψηφιοποιήθηκαν και αποθηκεύτηκαν για περαιτέρω ανάλυση. Ο ρυθμός απομόνωσης ήταν 2 εικόνες ανά sec. Ο ρυθμός μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες ψηφιοποίησης μέχρι 24 εικόνες ανά sec. Εντέλει, η ακρίβεια που επιτεύχθηκε ήταν αρκετά καλή ώστε να προσδιορίζεται η τροχιά του οχήματος με αυτό τον τρόπο, όταν οι ταχύτητες είναι μικρές. Ο υψηλότερος ρυθμός απομόνωσης θα ήταν ικανός να αντιμετωπίσει με επαρκή ακρίβεια περιπτώσεις οδικών τμημάτων όπου αναπτύσσονται υψηλότερες ταχύτητες.

Η εγγραφή των video πραγματοποιήθηκε σε πρωινές ώρες, εκτός Κυριακής, με ηλιοφάνεια και χωρίς αέρα. Η κίνηση των οχημάτων ήταν συνεχής. Επίσης, η κάμερα καλύφθηκε επιμελώς, ώστε να μην επηρεαστούν οι οδηγοί.

Πριν τη βιντεοσκόπηση έγινε το τοπογραφικό της καμπύλης, ώστε να υπάρχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της καμπύλης. Η τοπογραφική αποτύπωση έγινε με 72 σημεία κατά μήκος των δύο εξωτερικών γραμμών του οδοστρώματος, ανά 2 μέτρα περίπου. Επίσης, τοποθετήθηκαν κάθετα στις οριογραμμές σημάδια σε κάθε σημείο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Αυτά τα σημάδια χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς (φωτοσταθερά) στη διαδικασία του καλιμπραρίσματος (αναγωγή). Το μέγεθος τους ήταν 30x30 cm.



**Εικόνα 1.2 :** Σημάδια κάθετα στις οριογραμμές του οδοστρώματος.

Βρέθηκε η τροχιά για περίπου 200 οχήματα σε ελεύθερη ροή. Ως κρίσιμο χρονικό διάκενο θεωρήθηκε το διάστημα των 5 sec. Για κάθε όχημα αποδείχθηκε ότι ο μέσος των πλευρικών αποστάσεων, της καμπυλότητας της διαδρομής και των ταχυτήτων

που υπολογίστηκαν, ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ωστόσο, ο μέσος του απαιτούμενου συντελεστή πλευρικής τριβής δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή.

#### IV. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα του πειράματος είναι τα εξής:

- Η κατανομή των μέσων των πλευρικών αποστάσεων, της καμπυλότητας της διαδρομής και των ταχυτήτων που υπολογίστηκαν είναι η κανονική κατανομή. Οι ταχύτητες στις καμπύλες έχει αποδειχθεί και στο παρελθόν ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή [Kanellaidis et al., 1990].
- Τα διαγράμματα της πλευρικής απόστασης και της τροχιάς της καμπυλότητας δείχνουν ότι υπάρχει σημαντική διακύμανση στον τρόπο που συμπεριφέρονται οι οδηγοί μέσα στην καμπύλη.
- Συμπεραίνεται επίσης ότι υπάρχει η τάση των οδηγών να “κόβουν” την καμπύλη, όπως φαίνεται από τη μεταβολή στον πλευρικό χώρο, κυρίως στο μέσο της.
- Υπάρχουν αρκετά οχήματα τα οποία πατούν την εξωτερική οριογραμμή στο πρώτο τμήμα του βρόγχου και την εσωτερική οριογραμμή στο τελευταίο τμήμα της ράμπας.
- Τα αποτελέσματα δείχνουν μεγάλη ασυμφωνία μεταξύ της ακτίνας της τροχιάς που ακολουθούν οι οδηγοί και της ακτίνας της καμπύλης, όπως έδειξαν οι Wong και Nicholson [1993]. Υπάρχουν μερικές θέσεις στις οποίες η καμπυλότητα της τροχιάς των οδηγών είναι μεγαλύτερη από την καμπυλότητα του άξονα, όπως έδειξαν οι Glenon and Weaver [1971].
- Η ταχύτητα σχεδιασμού ήταν 30 km/h και την ξεπέρασε περίπου το 45% των οχημάτων. Προέκυψαν  $V_{85}=34.7$  km/h και  $V_{99}=41.6$  km/h.
- Για το λόγο αυτό, ο απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής ήταν μεγαλύτερος από τον υποτιθέμενο των κανονισμών. Η απόσταση μεταξύ τους αυξάνει στο πρώτο τμήμα του βρόγχου, όπου η πιθανότητα για κρίσιμων ελιγμών οδήγησης αυξάνονται. Η απόσταση αυτή είναι μεγαλύτερη από το όριο που έχει προταθεί από τον Lamm [1999], αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ράμπα, όπου πολλές διαφορετικές συμπεριφορές μπορούν να προκύψουν.

#### V. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Αναπτύχθηκε ένα εργαλείο με το οποίο εκτιμούνται κινηματικές μεταβλητές περιγράφοντας τη συμπεριφορά των οχημάτων.
- Η προτεινόμενη προσέγγιση εξετάστηκε σε καμπύλη με κυκλοφοριακή ροή.
- Η συμπεριφορά του οχήματος εξετάστηκε από τις τέσσερις παραμέτρους: πλευρική απόκλιση, καμπυλότητα της τροχιάς, ταχύτητα και την απαιτούμενη πλευρική τριβή.
- Βρέθηκαν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της συμπεριφοράς οχήματος που παρατηρήθηκε και της υποτιθέμενης συμπεριφοράς από τους Κανονισμούς Γεωμετρικού Σχεδιασμού.

Η παραπάνω προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει τη γνώση της συμπεριφοράς του οχήματος σε κάθε κρίσιμο σημείο ή τμήμα. Επίσης, δύναται η ανάλυση κρίσιμων θέσεων κοντά στις περιοχές όπου εμφανίζονται ατυχήματα, πράγμα που θα μπορούσε να οδηγήσει στη μείωση των αιτιών εμφάνισης ατυχημάτων. Συνεπώς, τα περιθώρια ασφαλείας στους σημερινούς Κανονισμούς Γεωμετρικού Σχεδιασμού μπορούν να εκτιμηθούν συγκρίνοντας τη συμπεριφορά του οχήματος που προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα με το προσδοκώμενο.

Σε μεγάλες καμπύλες κρίνεται απαραίτητη η χρήση παραπάνω από μιας κάμερας, αλλά η μέθοδος θα είναι παρόμοια, λαμβάνοντας υπόψη και τις επικαλυπτόμενες περιοχές.

### 1.2.2. Έρευνα του Peter Spacer, 2000

Στην έρευνα αυτή εξετάζεται η τροχιά των οδηγών και η εμφάνιση ατυχημάτων σε καμπύλες οδών με δύο λωρίδες κυκλοφορίας, που βρίσκονται σε υπεραστικές περιοχές.

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη έρευνα εξετάζει τη συμπεριφορά της τροχιάς των οδηγών και όχι τη συμπεριφορά της ταχύτητας για την περιγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς, όπως γίνεται σε παλαιότερες μελέτες. Η έναρξη της έρευνας βασίζεται στην πεποίθηση ότι η συμπεριφορά της πορείας που διαγράφουν οι οδηγοί είναι πιο κατάλληλη από την ταχύτητα για το διαχωρισμό ασυνείδητης ή της μη σκόπιμης αποτυχίας (οδηγικού λάθους) που έχουν οι οδηγοί όταν διέρχονται σε μια καμπύλη. Με βάση τα παραπάνω:

- Πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση του τρόπου οδήγησης ανάλογα με το είδος του ίχνους της διαδρομής που έχουν κατά μήκος της καμπύλης. Προέκυψαν έξι τύποι τροχιάς και ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους.
- Υπολογίστηκε η συχνότητα ύπαρξης ξεχωριστών τύπων τροχιάς και εκτιμήθηκε η συσχέτισή τους με τη γεωμετρία της καμπύλης.
- Εξετάστηκε η συσχέτιση της συμπεριφοράς της τροχιάς των οδηγών με τα ατυχήματα στην καμπύλη.

Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε έγινε σε δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν για καμπύλες με δύο λωρίδες κυκλοφορίας σε υπεραστικές περιοχές (όριο ταχύτητας 80 km/h). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με “μετρητικούς στύλους”, ένα εργαλείο, το οποίο είναι ενσωματωμένο σε κανονικούς στύλους για καμουφλάζ. Για να καλυφθεί όλο το μήκος της καμπύλης, για τις δύο κατευθύνσεις, στήθηκαν μέχρι και 12 μετρητικοί στύλοι, οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύουν το χρόνο διέλευσης οχήματος, την κατεύθυνση της οδήγησης, το μήκος του οχήματος, την ταχύτητα του καθώς και την απόσταση του οχήματος από το άκρο του οδοστρώματος. Για την ανάλυση των δεδομένων συντάχθηκε ένα εκτεταμένο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο δίνει τη δυνατότητα αναπαράστασης της τροχιάς (παρεμβολή με splines) και την απεικόνιση της σε υπόβαθρο της πραγματικής καμπύλης.

Με την έρευνα αυτή επιβεβαιώνεται η ύπαρξη διαφορετικών ειδών τροχιάς, καθώς επίσης και το γεγονός ότι η συχνότητα των ξεχωριστών τύπων τροχιάς διαφέρει

σημαντικά από καμπύλη σε καμπύλη. Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα είδη τροχιάς είναι αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους. Εξ αιτίας του περιορισμένου μεγέθους δείγματος, οι αναλύσεις υποδεικνύουν τη συσχέτιση μεταξύ συχνότητας ατυχημάτων και τη συχνότητα ορισμένων τύπων τροχιάς. Για παράδειγμα, σε μια καμπύλη με αυξημένη συχνότητα ατυχημάτων μπορεί να αποδειχθεί ότι εμφανίζεται ισχυρή εξάρτηση μεταξύ της θέσης του ατυχήματος και της συμπεριφοράς της πορείας του οχήματος. Η έρευνα τονίζει τη σημασία που έχει η συλλογή παραπανίσιων δεδομένων στη συμπεριφορά της τροχιάς, ιδιαίτερα ως ένας τρόπος έγκαιρης αναγνώρισης πιθανών κινδύνων στις καμπύλες.

## *1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Επειδή η οδική ασφάλεια είναι ένα ζήτημα πρωτίστης σημασίας για τους συγκοινωνιολόγους, κρίνεται πολύ σημαντική η συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με την οδηγική συμπεριφορά, καθώς και η έρευνα σε παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση ατυχημάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα ουσιώδες για τις καμπύλες (σε οδούς 2 λωρίδων κυκλοφορίας), οι οποίες είναι επιρρεπείς σε ατυχήματα (accident black spots).

Η εσφαλμένη οδηγική συμπεριφορά περιλαμβάνει τις περιπτώσεις παραβίασης της κυκλοφορίας και άλλες διεργασίες του οδηγού οι οποίες δεν προσαρμόζονται σε τοπικές ή καιρικές συνθήκες. Όπου υπάρχει τοπική συσχέτιση μεταξύ του επικρατέστερου τύπου ατυχήματος και του συχνότερου λάθους στην οδηγική συμπεριφορά, τότε προτείνονται ειδικές ρυθμίσεις (ρυθμίσεις επανασχεδιασμού). Ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα που εμφανίζεται στην περιοχή των καμπυλών είναι η διάκριση μεταξύ της εσφαλμένης οδηγικής συμπεριφοράς, η οποία γίνεται συνειδητά, συχνά θεαματικά, με μεγάλη προθυμία των οδηγών στο να παίρνουν ρίσκα και της συμπεριφοράς που μπορεί να αποδοθεί είτε σε ασυνείδητες ή μη σκόπιμες ενέργειες ή ακόμα και στην έλλειψη πληροφόρησης.

Ωστόσο μόνο για την εσφαλμένη οδηγική συμπεριφορά του δεύτερου group μπορεί να υποθεθεί ότι οι αβεβαιότητες στο τρόπο οδήγησης προκύπτουν, τουλάχιστον έμμεσα, από τα χαρακτηριστικά του δρόμου. Με συλλογή δεδομένων στις καμπύλες οι οποίες βασίζονται μόνο στη συμπεριφορά της ταχύτητας η παραπάνω διάκριση είναι πολύ δύσκολη. Κατά συνέπεια, απόπειρες που προσπάθησαν να εξηγήσουν τη σχέση μεταξύ εσφαλμένης οδήγησης, χαρακτηριστικών της οδού και των ατυχημάτων μόνο βάσει των ταχυτήτων συχνά αποτύχχαναν [Kraus και Trapp, 1987].

Έρευνες πάνω στη ψυχολογία των οδηγών στις καμπύλες [Friedinger, 1980], έδειξαν ότι:

“Η οπτική διάρθρωση του δρόμου αλλάζει με τη μετάβαση από την ευθυγραμμία στην καμπύλη. Αναλύσεις δείχνουν ότι για μερικούς τύπους στροφών είναι πολύ δύσκολο να μείνει παράλληλη με τον άξονα η πορεία του οχήματος. Αυτό πιθανόν οδηγεί σε αβεβαιότητες και σε διορθώσεις, οι οποίες εισάγουν αυξημένες τιμές φυγόκεντρης επιτάχυνσης. Τέλος, για τα πιο πολλά ατυχήματα σε καμπύλες, η πραγματική αιτία είναι τα οδηγικά λάθη και όχι απλά ο λόγος της ακατάλληλα ανεπτυγμένης υψηλής ταχύτητας.”

## II. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Βασίζόμενοι στις τροχιές που έχουν προκύψει στις καμπύλες μπορούν να διαχωριστούν δύο κατηγορίες συμπεριφοράς:

- Η “κανονική συμπεριφορά”, στην οποία οι τροχιές των αυτοκινήτων σχεδόν ακολουθούν την ιδανική γραμμή στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας.
- Η “υπερβολική συμπεριφορά”, στην οποία η πορεία των οχημάτων αποκλίνει σημαντικά από την ιδανική γραμμή.

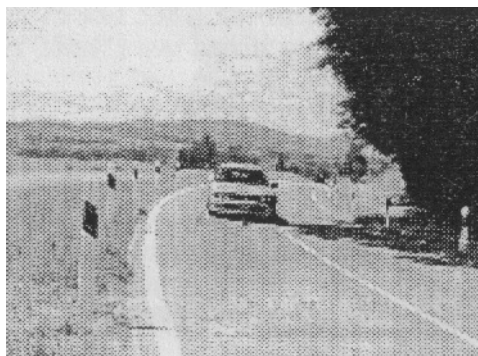
Στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να γίνει περαιτέρω διαχωρισμός σε συνειδητή ή ασυνειδητή συμπεριφορά. Ο πιο γνωστός τύπος τροχιάς που έγινε σκόπιμα λέγεται “κόψιμο” της καμπύλης, όπου συνήθως εμφανίζεται σε καμπύλες μικρής αλλαγής κατεύθυνσης.

Ένα τυπικό, μη σκόπιμο είδος τροχιάς εμφανίζεται όταν ο οδηγός υποτιμά την καμπυλότητα της καμπύλης. Κάπου κατά μήκος της καμπύλης, το λάθος γίνεται αντιληπτό και διορθώνεται με λίγο ή πολύ απότομο ελιγμό. Σε αυτό το σημείο της καμπύλης, η τροχιά που διαγράφει το όχημα έχει μικρότερη ακτίνα από τη γεωμετρική γεγονός που προκαλεί αύξηση της φυγόκεντρης επιτάχυνσης και κατά συνέπεια αυξημένη απαιτούμενη τριβή. Αν ο παραπάνω ελιγμός συνοδεύεται από ταχύτητα που δεν αρμόζει στο γεωμετρικό σχεδιασμό, ή από δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή από ταυτόχρονη πέδηση, τότε το όχημα γίνεται πιο ασταθές και υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος με έξοδο από το δρόμο. Σε πρόσφατες έρευνες σημειώθηκε συσχέτιση μεταξύ των θέσεων τέτοιων ατυχημάτων και των καμπυλών. Σύμφωνα με αυτές τις θεωρήσεις μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι η πιθανότητα ατυχήματος είναι μεγαλύτερη, όσο πιο συχνά εμφανίζεται ο συγκεκριμένος τύπος τροχιάς, όσο περισσότερες αναφορές έχουν γίνει στη συγκεκριμένη καμπύλη και όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος που μπορεί να κυμανθεί η καμπυλότητα. Από τα παραπάνω κρίνεται απαραίτητη η ταξινόμηση των τροχιών των οδηγών.

## III. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Χρησιμοποιήθηκαν 12 “μετρητικοί στύλοι”, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι σε κανονικούς στύλους και χρησιμοποιούνται τόσο για προστασία όσο και για καμουφλάζ (Εικ. 1.3). Ο κάθε στύλος επιτρέπει να ανιχνευτούν τα ακόλουθα δεδομένα: ο χρόνος διέλευσης οχήματος (σε msec), η κατεύθυνση της οδήγησης, το μήκος του οχήματος (σε cm) καθώς και η κάθετη απόσταση του οχήματος από το άκρο του οδοστρώματος (σε cm). Χρησιμοποιώντας τον χρόνο διέλευσης από δύο διαδοχικούς στύλους και τη γνωστή μεταξύ τους απόσταση, υπολογίζεται η ταχύτητα του οχήματος στο συγκεκριμένο τμήμα. Στη συνέχεια γίνεται απεικόνιση των τροχιών με υπόβαθρο την πραγματική καμπύλη. Στα σημεία που προκύπτουν από όλους τους στύλους εφαρμόζεται πολυώνυμο τρίτου βαθμού (spline). Επίσης, το πρόγραμμα υπολογίζει συνεχώς τη φυγόκεντρη επιτάχυνση και την απαιτούμενη ακτινική τριβή λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική ταχύτητα και καμπυλότητα καθώς επίσης και την επίκλιση της οδού στο τμήμα αυτό.





**Εικόνα 1.3 :** Παράδειγμα διερεύνησης αριστερόστροφης κίνησης σε καμπύλη με μετρητικούς στύλους.

#### *IV. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ*

Για τη συγκεκριμένη έρευνα έγιναν μετρήσεις σε επτά καμπύλες οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Επιλέχθηκαν καμπύλες με ακτίνες από 65 m έως 220 m σε περιοχές όπου η ταχύτητα σχεδιασμού είναι μικρότερη από το γενικό όριο ταχύτητας γι' αυτή την κατηγορία οδού (στην Ελβετία 80 km/h). Μεταξύ άλλων, με αυτή την επιλογή ήταν βέβαιο ότι οι καμπύλες διαφέρουν σημαντικά ως προς τη γεωμετρία και ιδιαίτερα ως προς το μήκος ορατότητας. Οι γωνίες της αλλαγής κατεύθυνσης κυμαίνονται μεταξύ 48 και 146 gon περίπου (100 gon = 100 grad).

Πριν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, εντοπίστηκαν τα κύρια σημεία της καμπύλης σύμφωνα με τα αρχεία από τον σχεδιασμό της οδού και τοποθετήθηκαν οι στύλοι. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν τα πλάτη των λωρίδων κυκλοφορίας και οι υπερυψώσεις για τον υπολογισμό των επικλίσεων. Σημειώθηκαν επίσης οι αποστάσεις μεταξύ των μετρητικών στύλων, οι αποστάσεις τους από τα κύρια σημεία της καμπύλης και οι κάθετες αποστάσεις μεταξύ των μετρητικών στύλων και του πέρατος του οδοστρώματος. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η ομάδα εργασίας είχε απομακρυνθεί, ώστε να μην επηρεαστούν οι οδηγοί.

Ο εξοπλισμός μπορεί να μεταφερθεί εύκολα με ένα φορτηγό. Για κάθε καμπύλη, η διάρκεια των μετρήσεων διήρκεσε μισή με μία περίπου ημέρα (διαδικασία προετοιμασίας στο πεδίο και 3 με 5 ώρες ανίχνευσης οχημάτων ανάλογα με την πυκνότητα κυκλοφορίας).

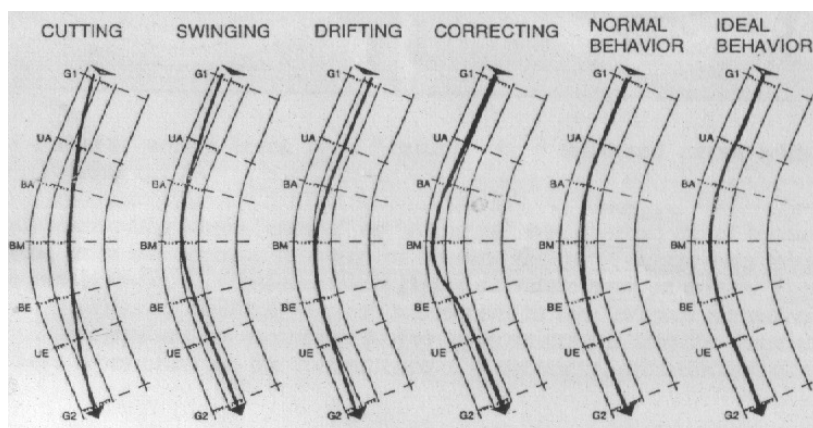
Οι μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια της ημέρας, εκτός από τις ώρες αιχμής και σε δύο από τις επτά καμπύλες έγιναν συμπληρωματικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια της νύχτας. Κατά συνέπεια, σύνολο εννέα σετ δεδομένων ήταν διαθέσιμο για ανάλυση. Στη συγκεκριμένη έρευνα δεν αποκλείστηκαν από την ανάλυση τα οχήματα που είχαν μικρό χρονικό διαχωρισμό από το προπορευόμενο όχημα. Το δείγμα υπολογίστηκε περίπου στα 1880 οχήματα ανά κατεύθυνση, ή κατά μέσο όρο 206 οχήματα ανά μέτρηση.

Ο προσδιορισμός κατάλληλων τύπων τροχιάς που να μπορούν να ανιχνευτούν από τις παραμέτρους του προγράμματος ήταν ένας από τους βασικούς στόχους της έρευνας.

Ανιχνεύτηκαν έξι τύποι τροχιάς, οι οποίοι είναι:

- Ιδανική συμπεριφορά (I-type, Ideal)
- Κανονική συμπεριφορά (N-type, Normal)
- Διόρθωση λάθους (K – type, Correcting)
- “Κόψιμο καμπύλης ” (C – type, Cutting)
- Ταλαντευόμενη συμπεριφορά( S – type, Swinging)
- Ολίσθηση ( D – type, Drifting)

Υπάρχουν και τροχιές που δεν μπορούν να ταξινομηθούν σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες και ομαδοποιούνται σε άλλο group δεδομένων, οι “υπολειπόμενες” τροχιές. Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζονται οι παραπάνω τύποι τροχιάς σε ένα παράδειγμα αριστερόστροφης καμπύλης.



Εικόνα 1.4 : Απεικόνιση τύπων τροχιάς, παράδειγμα αριστερόστροφης κίνησης.

#### IV. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται μερικά από τα αποτελέσματα:

- Θέσεις οχήματος στις καμπύλες.

Γενικά οι οδηγοί διατηρούν σαφώς μεγαλύτερη απόσταση από τα άκρα του οδοστρώματος παρά από τη κεντρική οριογραμμή τόσο στις αριστερόστροφες όσο και στις δεξιόστροφες καμπύλες, συνήθως ανεξάρτητα από το πλάτος του οδοστρώματος.

- Τοπική φυγόκεντρη επιτάχυνση

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια ελιγμών για τη διόρθωση της τροχιάς παρατηρείται τοπικά αυξημένη φυγόκεντρη επιτάχυνση. Στην έρευνα αυτή διαπιστώθηκε ότι στις μικρές ακτίνες ( $R < 120$  m περίπου) η τοπική φυγόκεντρη επιτάχυνση είναι συχνά διπλάσια από αυτή που προβλέπουν οι κανονισμοί.

- Συχνότητα τύπων τροχιάς

Οι ανεπιθύμητοι τύποι τροχιάς (K, C, S, D) υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο σε 37% και το μεγαλύτερο ποσοστό ήταν τύπου C. Η ιδανική συμπεριφορά ήταν δυσεύρετη.

- Συχνότητα τύπων τροχιάς και γεωμετρία της καμπύλης  
Μεταξύ της συχνότητας και της γεωμετρίας της καμπύλης δεν βρέθηκε ισχυρή σχέση. Πιο ισχυρή ήταν η σχέση με την παράμετρο της κλωθοειδούς  $A$ . Αποδείχθηκε ότι οι τύποι  $I$  και  $N$  εμφανίστηκαν συχνότερα όταν ο λόγος  $A/R$  κυμαίνεται από  $1/3$  έως  $1/2$ . Αντίθετα οι τύποι  $K$ ,  $C$ ,  $S$  και  $D$  εμφανίζουν υψηλότερο ποσοστό για  $A/R$   $0.8$  ή όταν δεν υπάρχει κλωθοειδής.
- Τύποι τροχιάς και ταχύτητα  
Οι υψηλότερες ταχύτητες εμφανίστηκαν με τύπο τροχιάς  $C$  (για αριστερόστροφη καμπύλη) και με  $S$  (για δεξιόστροφη καμπύλη), ενώ οι χαμηλότερες με τύπο  $N$ .
- Τοπικά μέγιστες καμπυλότητες τροχιάς  
Οι τοπικά μέγιστες ως προς την καμπυλότητα τροχιές ήταν οι τύποι  $K$ , όπου - ομοίως και με άλλους τύπους τροχιάς - τις περισσότερες περιπτώσεις συμπίπτει με τις θέσεις όπου εμφανίζεται επίσης η μέγιστη φυγόκεντρος επιτάχυνση.
- Συχνότητα ατυχημάτων  
Εξ αιτίας του περιορισμένου μεγέθους δείγματος, οι αναλύσεις φαίνεται να υποθέτουν ότι υπάρχει μια συσχέτιση μεταξύ συχνότητας ατυχημάτων και συχνότητας ορισμένων τύπων τροχιάς. Ο τύπος  $K$ , συνδέεται σημαντικά με την περίπτωση τύπου ατυχήματος με μόνο ένα όχημα. Σημαντικό ποσοστό ατυχημάτων παρατηρήθηκε και για τις τέσσερις ανεπιθύμητες τροχιές.

#### IV. ΣΥΝΟΨΗ

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά ως προς τη συσχέτιση της εμφάνισης ατυχημάτων με τον τύπο τροχιάς που ακολουθούν τα οχήματα. Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της έρευνας είναι ότι δεν αρκεί η αιτία της υψηλής ταχύτητας για να ερμηνευτεί ένα ατύχημα στο οποίο εμπλέκεται ένα μόνο όχημα. Η τροχιά των οδηγών έχει μεγαλύτερη σημασία για την κατανόηση της οδηγητικής συμπεριφοράς από ότι θεωρείται μέχρι σήμερα. Βρέθηκε ότι για μερικούς τύπους τροχιάς, στους οποίους πραγματοποιούνται ελιγμοί διόρθωσης της πορείας τους, εμφανίζεται αυξημένη φυγόκεντρη επιτάχυνση. Αυτό επιβεβαιώνει τις παραδοχές που εκφράστηκαν στις έρευνες για την ψυχολογία των οδηγών.

Αν στην έρευνα αυτή είχε χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο δείγμα τότε θα ήταν περισσότερο ασφαλείς οι υποδείξεις στους κανονισμούς. Ωστόσο αναγνωρίζομενοι την πολλαπλότητα των πιθανών επιρροών στην οδηγητική συμπεριφορά από συμβάντα κοντά στον κυκλοφορούμενο χώρο δε θα πρέπει να υπερτιμάται η ελλιπής γεωμετρία. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι βρέθηκε αμυδρή σχέση μεταξύ της γεωμετρίας της οδού και της τροχιάς.

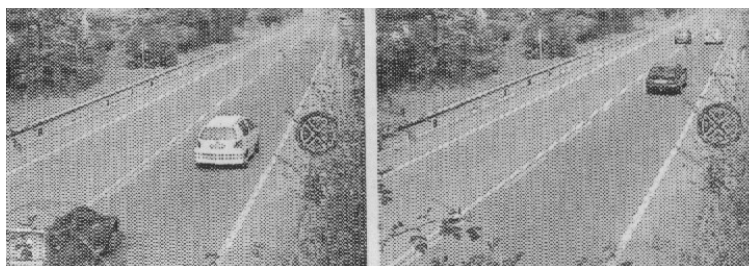
Η έρευνα τέλος αναφέρει τη σημασία που έχει η συλλογή δεδομένων στις τροχιές των οδηγών, ως μέσο για την έγκαιρη αναγνώριση των πιθανά επικίνδυνων καμπυλών. Έτσι στο μέλλον η ασφάλεια σε μια καμπύλη θα μπορεί να κρίνεται σύμφωνα με τις πιο συχνές τροχιές των οδηγών που παρατηρούνται. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα χρήσης προληπτικών μέτρων προτού συμβούν πολλά ατυχήματα.

### 1.2.3. Έρευνα των Bruno Cristman, Aurelio Marchionna και Paolo Perco, 2000

Η παρούσα έρευνα εξετάζει τον ελιγμό προσπέρασης σε δρόμους με μία λωρίδα ανά κατεύθυνση. Από τη διατριβή αυτή, ενδιαφέρουσα είναι η φωτογραμμετρική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των βιντεοεικόνων των οχημάτων που πραγματοποιούν τον ελιγμό προσπέρασης. Οι βιντεοκάμερες που χρησιμοποιήθηκαν είναι εξοπλισμένες με ακτίνες laser για να υπολογίζονται και οι ταχύτητες των οχημάτων.

#### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των οδηγών κατά τη διάρκεια του ελιγμού προσπέρασης σε διαφορετικές συνθήκες της γεωμετρίας της οδού, ώστε να προκύψουν χρήσιμες πληροφορίες για να ελεγχθούν οι ισχύοντες κανονισμοί ή πιθανώς να προταθεί ένα νέο μοντέλο για τον προσδιορισμό του μήκους ορατότητας. Η τοπογραφική μέθοδος που υιοθετήθηκε βασίζεται στην ανάλυση των βιντεοεικόνων που εγγράφηκαν με ένα ολοκληρωμένο σύστημα ψηφιακής κάμερας, με δυνατότητα παρατήρησης της μεταβολής της ταχύτητας μέσω ειδικού εξοπλισμού (Εικ. 1.5). Πρόκειται για μία δέσμη ακτίνων laser, η οποία εκτός από τη μέτρηση της ταχύτητας με 1 km/h ακρίβεια, δίνει επίσης το χρόνο, την κατεύθυνση κίνησης και το μήκος του οχήματος. Οι ταχύτητες εκτιμήθηκαν μέσω μετρήσεων του χρόνου που απαιτείται από το όχημα να διανύσει γνωστές αποστάσεις που είναι ορατές από τις εικόνες. Η τοπογραφική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των ψηφιακών εικόνων βασίζεται στη φωτογραμμετρία.



Εικόνα 1.5 : Απομονωμένες εικόνες κατά τη διάρκεια προσπεράσματος.

Μετά την εξαγωγή των εικόνων από το video, έπρεπε να βρεθούν οι σχέσεις που συνδέουν τις εικονοσυντεταγμένες που αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς, συνδεδεμένο με την τηλεκάμερα, με τις συντεταγμένες της θέσης του αντικειμένου (οχήματος) που αναφέρονται σε ένα ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στην πραγματικότητα. Κάθε σημείο της εικόνας ανιχνεύεται από δέσμη ακτίνων, η οποία ξεκινώντας από την πραγματική θέση του αντικειμένου και με βάση τον αντικειμενικό φακό διέρχεται από το επίπεδο της εικόνας. Η απόσταση μεταξύ των δεσμικών σημείων είναι μερικά χιλιοστά και είναι πολύ μικρότερη αν συγκριθεί με την απόσταση φακού με το αντικείμενο.

Εννέα είναι οι απαιτούμενες παράμετροι οι οποίες αναπαράγουν την εικόνα, εκ των οποίων οι τρεις αναφέρονται στον εσωτερικό προσανατολισμό της κάμερας και οι υπόλοιπες έξι στον εξωτερικό προσανατολισμό. Ο εξωτερικός προσανατολισμός μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστές οι γεωδαιτικές συντεταγμένες τουλάχιστον

τεσσάρων σημείων (φωτοσταθερών), με την προϋπόθεση ότι ο δρόμος είναι επίπεδος και ότι είναι γνωστές οι εικονοσυντεταγμένες τους. Στα πλαίσια της έρευνας, συντάχθηκε πρόγραμμα για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού.

Από τη στιγμή που προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες στο επίπεδο του δρόμου, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί η τροχιά του ελιγμού προσπέρασης με χρήση πολυωνύμου και παλινδρόμησης. Όσο μεγαλύτερος ο βαθμός του πολυωνύμου, τόσο μικρότερα τα εναπομείναντα σφάλματα, αλλά κάτι τέτοιο οδηγεί σε τροχιές που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Το εκτιμώμενο λάθος - αν οι εικονοσυντεταγμένες στην οθόνη μετρηθούν η φορές και υπολογίζονται οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες - είναι περίπου 10 cm κατά την εγκάρσια διεύθυνση της οδού και 30 cm κατά μήκος της ευγραμμίας, για μέτρηση αποστάσεων 80 με 100 m.

#### **1.2.4. Έρευνα των Bird R. N. και Hasmin I.N., 2005**

Στην έρευνα αυτή διερευνάται η σχέση λειτουργικής ταχύτητας και της γεωμετρίας της οδού για υπεραστικές οδούς ενιαίου καταστρώματος στο Ηνωμένο Βασίλειο.

#### *1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Στόχος της έρευνας ήταν να βρεθεί ένα πιο σύγχρονο μοντέλο λειτουργικής ταχύτητας για υπεραστικές οδούς μιας λωρίδας κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση, με ενιαίο οδόστρωμα του Η.Β. ως μέρος μιας ευρύτερης έρευνας. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια σειρά από μετρήσεις ταχυτήτων στα Νοτιοανατολικά της Αγγλίας. Εφαρμόστηκε μια νέα μέθοδος υπολογισμού της καμπυλότητας της οριζοντιογραφίας από ψηφιακούς χάρτες. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δε μπορούσαν να προσδιοριστούν από τους χάρτες μετρήθηκαν στο πεδίο χρησιμοποιώντας Total Station και μετροταινία.

Οι αναλύσεις κατανομών στις σημειακές ταχύτητες, επιβεβαίωσε τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών ότι δηλαδή ακολουθούν κανονική κατανομή στις περισσότερες περιπτώσεις. Σημαντικές διαφορές εντοπίστηκαν μεταξύ της μέσης και της λειτουργικής ταχύτητας στις δύο κατευθύνσεις κίνησης. Περαιτέρω ανάλυση εξετάζει τις διαφορές μεταξύ των ταχυτήτων στην εσωτερική και εξωτερική λωρίδα κυκλοφορίας.

Πραγματοποιήθηκε απλή και πολλαπλή παλινδρόμηση για να εξεταστούν τα δεδομένα της ταχύτητας με τις σημαντικότερες παραμέτρους των καμπυλών και των ευθυγραμμιών, ώστε να βρεθούν τα κατάλληλα μοντέλα λειτουργικής ταχύτητας. Τα καλύτερα προγνωστικά μοντέλα για τις καμπύλες βρέθηκαν να βασίζονται κυρίως στην ακτίνα της καμπύλης. Για την ευθυγραμμία βρέθηκε πως η ταχύτητα εξαρτάται κυρίως από το μήκος της.

Οι Lamm και Smith [1994] αναφέρουν ότι οι λειτουργικές ταχύτητες διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, διότι εξαρτώνται από την οδηγητική συμπεριφορά του κάθε λαού. Απ' ότι φαίνεται, ορισμένα μοντέλα λειτουργικής ταχύτητας, που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν, παρουσιάζουν ελλείψεις για να εφαρμοστούν σήμερα.

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν από αυτή την έρευνα θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση δρόμων, για την ανίχνευση ασυνεπειών και για τη μελέτη βελτίωσης της οδικής ασφάλειας.

Τα μοντέλα της λειτουργικής ταχύτητας τη δεκαετία του 1980 για το Η.Β. κρίνονται ακατάλληλα για τη σημερινή τους εφαρμογή. Σε έρευνες που έχουν γίνει σε άλλες χώρες για την εύρεση μοντέλων λειτουργικής ταχύτητας στο μέσο των καμπυλών οριζοντιογραφίας, ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιείται η  $V_{85}$  και βρέθηκε ότι υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν την πρόβλεψη της λειτουργικής ταχύτητας, όπως η ακτίνα της οριζόντιας καμπύλης, το μήκος της οριζόντιας καμπύλης, η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης, το μήκος ορατότητας, ο ρυθμός υπερύψωσης των οριογραμμών, ο συντελεστής πλευρικής τριβής και η κατάσταση οδοστρώματος [Lamm et al., 1999]. Τα περισσότερα από τα παραπάνω μοντέλα που αναπτύχθηκαν επιβεβαιώνουν την ύπαρξη σχέσης μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας και της καμπυλότητας της οριζοντιογραφίας.

## II. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### ▪ Επιλογή Θέσεων

Για την εύρεση μοντέλων λειτουργικής ταχύτητας στις καμπύλες και τις ευθυγραμμίες, επιλέχθηκαν τοποθεσίες από πέντε διαφορετικές υπεραστικές οδούς με ενιαίο οδόστρωμα στις επαρχίες της Βορειοανατολικής Αγγλίας Durham και Northumberland. Η επιλογή έγινε έτσι ώστε, να καλύπτονται όσο το δυνατόν περισσότερα οδικά χαρακτηριστικά σε αυτή τη κατηγορία οδών, όπως διαφορετική ακτίνα καμπύλης, μήκος, γωνία αλλαγής κατεύθυνσης και μήκος ευθυγραμμίας. Το όριο ταχύτητας σε όλες τις περιπτώσεις ήταν 60 miles/h, δηλαδή 100 km/h περίπου, το οποίο είναι το εθνικό όριο ταχύτητας για τους υπεραστικούς δρόμους με ενιαίο οδόστρωμα στο Ηνωμένο Βασίλειο.

### ▪ Εκτίμηση της γεωμετρίας των επιλεγμένων θέσεων

Εν συντομία αναφέρεται ότι για την εξαγωγή των οριζοντιογραφικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των καμπυλών εφαρμόστηκε μια αποτελεσματική, οικονομική, εύκολη και με καλή ακρίβεια μέθοδος χρησιμοποιώντας ψηφιακούς χάρτες κλίμακας 1:2500. Από τους χάρτες βρέθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν σε περιβάλλον AutoCAD, οι ακμές του οδοστρώματος και στη συνέχεια εφαρμόστηκε ο άξονας της οδού στο μέσο της απόστασης. Ορίστηκαν διατομές ανά 5 m και μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της καμπύλης (ακτίνα, μήκος, γωνία αλλαγής κατεύθυνσης, βαθμός καμπύλης) με βήμα 5 m. Η μεθοδολογία ελέγχθηκε συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά μιας καμπύλης που προκύπτουν με τον τρόπο που περιγράφηκε με τα χαρακτηριστικά της καμπύλης που προέκυψαν από τοπογραφικό διάγραμμα που υπήρχε στην περιοχή. Οι διαφορές που προέκυψαν ήταν ασήμαντες.

Για τη μέτρηση κλίσεων και επικλίσεων χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωμένος Γεωδαιτικός Σταθμός. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν ανά κανονικά διαστήματα στις διατομές της οδού.

- Μετρήσεις ταχύτητας.

#### *Μέγεθος δείγματος*

Υπολογίστηκε επαρκές μέγεθος δείγματος ώστε να ικανοποιούνται οι στατιστικές απαιτήσεις, βασιζόμενοι στη μέθοδο που παρουσιάζεται στο Manual of Transportation Engineering Studies [Robertson, 1994]. Το εγχειρίδιο αυτό προτείνει μια τυπική απόκλιση της ταχύτητας της τάξης των 5.3 miles/h (8.5 km/h) ως την εκτιμώμενη τιμή του μέσου όρου των τυπικών αποκλίσεων για υπεραστικούς δρόμους ενιαίου οδοστρώματος. Επίσης, στο εγχειρίδιο αυτό αναφέρεται το εύρος στο οποίο μπορεί να κυμαίνεται το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα το οποίο έχει αντίκτυπο στην ακρίβεια που απαιτείται στον υπολογισμό της ταχύτητας. Το διάστημα αυτό είναι  $\pm 1$  έως  $\pm 5$  miles/h. Το μέγιστο επιτρεπόμενο λάθος σε αυτή την έρευνα θεωρήθηκε  $\pm 2$  miles/h (3.2 km/h). Βασιζόμενοι στις παραπάνω τιμές υπολογίστηκε πως απαιτείται ελάχιστο δείγμα 42 ταχυτήτων και με στρογγυλοποίηση προκύπτει ότι χρειάζονται περίπου 50 παρατηρήσεις ταχυτήτων μόνο για επιβατηγά οχήματα, ως ελάχιστο όριο ανά κατεύθυνση.

#### *Μετρήσεις Ταχυτήτων*

Οι μετρήσεις ταχυτήτων πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ραδιοεντοπιστές. Οι θέσεις των μετρήσεων δεν ήταν ορατές από τους οδηγούς και με αυτό τον τρόπο δεν επηρέαζαν τη συμπεριφορά τους. Επιλέχθηκαν συνολικά 61 θέσεις μετρήσεων, μακριά από διασταυρώσεις, εκ των οποίων οι 31 ήταν στο μέσο ευθυγραμμίων και οι υπόλοιπες 30 στο μέσο των καμπυλών. Τέλος, διευκρινίζεται ότι όλες οι μετρήσεις ταχυτήτων έγιναν υπό συνθήκες ελεύθερης ροής.

### *III. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ*

#### *Κατανομή Ταχυτήτων*

Αναλύθηκαν οι κατανομές ταχυτήτων ανά κατεύθυνση για κάθε θέση χρησιμοποιώντας το test Kolmogorov – Smirnov για κανονική κατανομή. Πάνω από το 90% των θέσεων είχαν κανονική κατανομή ταχυτήτων, ενώ σε προηγούμενες μελέτες πριν 12 χρόνια περίπου το ποσοστό ήταν 95%.

#### *Διεύθυνση κίνησης*

Βρέθηκε ότι τόσο η μέση ταχύτητα όσο και η λειτουργική διαφέρουν ανά κατεύθυνση κίνησης και στις καμπύλες και τις ευθυγραμμίες. Χρησιμοποιώντας τον έλεγχο t σε ανεξάρτητα δείγματα βρέθηκε ότι 13 από τις 30 καμπύλες παρουσίασαν σημαντική διαφορά στη μέση ταχύτητα της κάθε κατεύθυνσης, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η διαφορά αυτή, όπως έχει αποδειχθεί σε παλαιότερες μελέτες, εμφανίζεται ή σε μεγάλες ή σε μικρές ακτίνες. Για τις λειτουργικές ταχύτητες φαίνεται πως δε συμπεριφέρονται αντίστοιχα με τις μέσες ταχύτητες. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο εύρος της τυπικής απόκλισης της κατανομής των ταχυτήτων της κάθε καμπύλης ανά κατεύθυνση.

#### *Ανάπτυξη Μοντέλων Λειτουργικής Ταχύτητας*

Για να αποδειχθεί η επιρροή της γεωμετρίας της οδού στη λειτουργική ταχύτητα (στο μέσο της καμπύλης ή της ευθυγραμμίας) εφαρμόστηκε πολλαπλή παλινδρόμηση. Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, είναι αρκετοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της ταχύτητας του οδηγού, όπως η γεωμετρία της οδού, το όριο ταχύτητας, οι

χρήσεις γης, η κυκλοφοριακή πυκνότητα κλπ. Αυτή η μελέτη περιορίζεται στο συσχετισμό λειτουργικής ταχύτητας και γεωμετρίας της οδού και έτσι η ανάλυση χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ταχυτήτων (με τους ραδιοεντοπιστές) για να προσδιορίσει την παρατηρούμενη λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ .

Χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις για να εκτιμηθούν μοντέλα λειτουργικής ταχύτητας. Η πρώτη προσέγγιση προσπάθησε να προβλέψει μία μόνο τιμή ταχύτητας για την καμπύλη (ή την ευθυγραμμία), ανεξάρτητα της κατεύθυνσης. Για να γίνει αυτό ενώθηκαν οι παρατηρούμενες ταχύτητες, πραγματοποιήθηκε ενιαία κατανομή και υπολογίστηκε η  $V_{85}$  για ολόκληρη την καμπύλη. Στη δεύτερη προσέγγιση, έγινε ξεχωριστή κατανομή ανά κατεύθυνση και υπολογίστηκε, επίσης ανά κατεύθυνση της καμπύλης, η  $V_{85}$ . Η λειτουργική ταχύτητα ήταν η εξαρτημένη μεταβλητή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ακτίνα, μήκος) οι ανεξάρτητες. Οι αναλύσεις χρησιμοποίησαν πολλές μορφές των ανεξάρτητων μεταβλητών (εκθετική μορφή, ρίζες, τετράγωνα κλπ). Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η προβλεπόμενη ακρίβεια των μοντέλων ήταν:

- Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  (ή ο συντελεστής συσχέτισης  $R$ ) πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερος και σημαντικός με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.
- Κάθε μια από τις ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει να έχει συντελεστές παλινδρόμησης οι οποίοι είναι στατιστικά διάφοροι του μηδέν με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και πρόσημο που να ερμηνεύει λογικά την επίδραση της μεταβλητής στη λειτουργική ταχύτητα.
- Η σύγκριση των τυποποιημένων αναμενόμενων σφαλμάτων έναντι των τυποποιημένων προβλεπόμενων τιμών να επιβεβαιώνει τις υποθέσεις της γραμμικής και ομοιογενούς σχέσης που έχει βρεθεί.

Το καλύτερο μοντέλο λειτουργικής ταχύτητας σε καμπύλες με μία ανεξάρτητη μεταβλητή προέκυψε:

$$V_{85} = 104.379 - \frac{4698.216}{R} \text{ με } R^2 = 0.793 \quad (1.2),$$

όπου:

$R$  [m] = ακτίνα σχεδιασμού του κυκλικού τόξου.

Το καλύτερο μοντέλο λειτουργικής ταχύτητας σε καμπύλες με περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές προέκυψε:

$$V_{85} = 119.073 - \frac{518.275}{\sqrt{R}} - \frac{125440}{(ATL)^2} + \frac{413.181}{\Phi^2} \text{ με } R^2 = 0.884 \quad (1.3),$$

όπου:

$R$  [m] = ακτίνα σχεδιασμού του κυκλικού τόξου,

$ATL$  [m] = μέσο μήκος ευθυγραμμίας (πριν και μετά την καμπύλη),

$\Phi$  [grad] = γωνία αλλαγής κατεύθυνσης της καμπύλης σε βαθμούς.

Ανάλογα μοντέλα αναπτύχθηκαν και για τις ευθυγραμμίες.

Τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποίησαν την πρώτη προσέγγιση για τον υπολογισμό της  $V_{85}$  κάθε καμπύλης. Ο λόγος  $t$  που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας προέκυψε μεγαλύτερος (για όλους τους συντελεστές



κάθε μοντέλου) από τη τιμή  $t$  της κατανομής Student για ε.ε. 95% με  $n-1$  βαθμούς ελευθερίας. Άρα οι συντελεστές είναι στατιστικά σημαντικοί.

#### IV. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Σε σύγκριση με έρευνα της Αμερικής από τους Ottesen και Krammes [2000], το μοντέλο μιας ανεξάρτητης μεταβλητής του H.B. προβλέπει χαμηλότερες λειτουργικές ταχύτητες κυρίως για ακτίνες μικρότερες των 500 m. Η διαφορά μικραίνει όσο η ακτίνα μεγαλώνει και για ακτίνες μεγαλύτερες των 500 m η διαφορά των λειτουργικών ταχυτήτων των δύο μοντέλων είναι μικρότερη από 2 km/h.

Ανάλογη σύγκριση έγινε και στις ευθυγραμμίες. Η σύγκριση μεταξύ των μοντέλων επιβεβαιώνει την άποψη ότι οι παράγοντες που ελέγχουν τη λειτουργική ταχύτητα εξαρτώνται από τη χώρα που έχει αναπτυχθεί το μοντέλο, όπως έχουν αναφέρει οι Lamm και Smith [1994].

#### IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών ότι δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας επιρροής της ταχύτητας που επιλέγουν οι οδηγοί στις οριζόντιες καμπύλες. Είναι επίσης πρακτικότερη η χρήση του μοντέλου μιας μεταβλητής απ’ ότι των περισσότερων, καθώς χρειάζονται λιγότερα δεδομένα για την πρόβλεψη της λειτουργικής ταχύτητας. Όμως, η χρήση μοντέλου με περισσότερες μεταβλητές δίνει μεγαλύτερο συντελεστή  $R^2$ , που σημαίνει ότι το ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας της  $V_{85}$  που εκφράζεται από αυτή τη σχέση παλινδρόμησης είναι μεγαλύτερο.

Τέλος, αναφέρεται ότι παρ’ όλο που βρέθηκε σημαντική διαφορά των ταχυτήτων σε κάθε κατεύθυνση, τα καλύτερα μοντέλα πρόβλεψης της λειτουργικής ταχύτητας προήλθαν από δεδομένα όπου οι μετρήσεις των δύο κατευθύνσεων ενώθηκαν. Αυτό μπορεί να συμβαίνει διότι οι βασικές μεταβλητές που επιδρούν στη ταχύτητα (ακτίνα και μήκος) είναι τα ίδια ανεξάρτητα από την κατεύθυνση κίνησης. Επίσης, αν χρησιμοποιηθεί η δεύτερη προσέγγιση, θα έχει συσχετιστεί η ίδια μεταβλητή (ακτίνα) με δύο διαφορετικές ταχύτητες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο αξιόπιστα μοντέλα λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$ .

##### 1.2.5. Έρευνα των Glenon J. C. και Weaver G. D., 1971

Στην έρευνα αυτή εξετάζεται η επάρκεια της παραδοχής που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό οριζοντιογραφικών καμπυλών ότι δηλαδή τα οχήματα ακολουθούν τις καμπύλες με οριζοντιογραφική ακρίβεια [AASHTO, 1984]. Κύριος σκοπός της έρευνας ήταν η συσχέτιση των ακτίνων των τροχιών των οχημάτων στις καμπύλες με τις ακτίνες των καμπυλών. Παράλληλα, εξετάστηκε η συσχέτιση της ταχύτητας των οχημάτων με την ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς που ακολουθούν στις ακτίνες.

Στη μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκαν κινηματογραφικές λήψεις της κυκλοφορίας σε πέντε καμπύλα οδικά τμήματα υπεραστικών δρόμων, (μίας λωρίδας ανά κατεύθυνση), στην Πολιτεία του Τέξας, των οποίων οι βαθμοί καμπυλότητας

κυμαίνονται από 2 έως 7. Όλα τα οδικά τμήματα αποτελούνταν από την ακολουθία ευθυγραμμία - κυκλικό τόξο – ευθυγραμμία και οι επικλίσεις τους ήταν από 4% έως 8%.

Η έρευνα έγινε σε τέσσερις φάσεις. Πρώτα έγινε κινηματογραφική λήψη της κυκλοφορίας στα συγκεκριμένα οδικά τμήματα. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση των λήψεων αυτών. Έπειτα έγινε μαθηματική ανάλυση για τον υπολογισμό των ακτίνων των τροχιών των οχημάτων και τέλος, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας.

## *I. ΚΙΝΗΜΑΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ*

Για την κινηματογράφηση της κυκλοφορίας στα συγκεκριμένα οδικά τμήματα χρησιμοποιήθηκε κινηματογραφική μηχανή λήψης σε πειραματικό όχημα παρατήρησης. Η μηχανή λήψης είχε την κατάλληλη κάλυψη έτσι ώστε να μην είναι ορατή από τους οδηγούς. Το όχημα παρατήρησης ακολουθούσε καθένα από τα οχήματα που μελετήθηκαν και κινηματογραφούσε τη θέση του αριστερά πίσω ελαστικού του ως προς τον άξονα της οδού.

Για να μετρηθεί η εγκάρσια απόκλιση των πίσω αριστερά ελαστικών των οχημάτων μελέτης από τη διαχωριστική λωρίδα κυκλοφορίας του άξονα της καμπύλης, καθώς επίσης και οι μεταβολές των ταχυτήτων μέσα στην καμπύλη, τοποθετήθηκαν σημάδια στο οδόστρωμα που αποτελούνταν από άσπρες ευθείες γραμμές με μήκος 60 cm και πλάτος 15 cm βαμμένες κάθετα στη διαχωριστική λωρίδα κυκλοφορίας της οδού και σε ισαπέχοντα διαστήματα των 6 m κατά μήκος του άξονα της καμπύλης. Οι διατομές που επισημάνθηκαν με διαγράμμιση ονομάστηκαν χαρακτηριστικές διατομές. Τα σημάδια αυτά τοποθετήθηκαν σε όλο το μήκος του κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης.

Για κάθε καμπύλο οδικό τμήμα κινηματογραφήθηκαν 100 οχήματα, το ήμισυ περίπου των οποίων για κάθε λωρίδα κυκλοφορίας. Το δείγμα περιορίστηκε αποκλειστικά σε επιβατηγά οχήματα και ελαφρά ημιφορτηγά που κινούνταν στα συγκεκριμένα οδικά τμήματα σε κατάσταση ελεύθερης ροής.

## *II. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΛΗΨΕΩΝ*

Το φιλμ αναλύθηκε με τη βοήθεια αναλυτή εικόνας τύπου Vanguard. Υπολογίστηκαν οι εγκάρσιες αποκλίσεις της αριστερά ακμής των ελαστικών ως προς τον άξονα της οδού τη στιγμή, (στο πλαίσιο εκείνο της εικόνας), όπου το ελαστικό βρισκόταν πάνω στα σημάδια του οδοστρώματος. Με αυτά τα σημάδια (γνωστών διαστάσεων) έγινε επίσης η μετατροπή των αποκλίσεων που μετρήθηκαν από το επίπεδο της εικόνας στο επίπεδο του οδοστρώματος (χρήση απλού λόγου προβολικής γεωμετρίας).

Με την βοήθεια μηχανισμού αναλυτή εικόνας υπολογίστηκαν οι ταχύτητες των οχημάτων, μετρώντας των αριθμό των παρερχόμενων πλαισίων που αντιστοιχούσαν σε κάθε όχημα για τη διάνυση γνωστή απόστασης.

### III. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε για κάθε όχημα σε κάθε διατομή η ακτίνα της τροχιάς του, η ταχύτητά του και στη συνέχεια ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Η στιγμιαία ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς του οχήματος εκτιμήθηκε υπολογίζοντας την ακτίνα του κυκλικού τόξου που διέρχεται από τρεις θέσεις του αριστερά οπίσθιου ελαστικού σε τρεις διαδοχικές διατομές όπου υπήρχαν τα σημάδια (στο οδόστρωμα). Η στιγμιαία ακτίνα καμπυλότητας αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο σημείο. Ο τρόπος που προτείνεται από τους ερευνητές προσδιορίζει την ακτίνα της τροχιάς του κάθε οχήματος σύμφωνα με την ακτίνα της οδού όπως λήφθηκε από τα σχέδια κατασκευής χωρίς να υπάρχει η βεβαιότητα ακριβούς εφαρμογής της. Επίσης, με αυτή τη μεθοδολογία δε λαμβάνονται υπόψη οι τυχόν λοξές παρεκκλίσεις ως προς τον άξονα της οδού των διατομών που επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν τα χαρακτηριστικά σημάδια στο οδόστρωμα, αλλά, θεωρείται ως δεδομένο ότι αυτά τα σημάδια τοποθετήθηκαν σε ευθείες γραμμές (διατομές) κάθετες ως προς τον άξονα της οδού.

Ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής  $f$  στη διεπιφάνεια ελαστικού οδοστρώματος υπολογίστηκε για κάθε όχημα, σε κάθε χαρακτηριστική διατομή, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$f = \frac{V^2}{127 \cdot R} - e \quad (1.4)$$

### IV. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην έρευνα των John C. Glenon και Greame D. Weaver υπολογίστηκαν για κάθε όχημα 10 έως 15 τιμές στιγμιαίας ακτίνας καμπυλότητας με αντίστοιχες τιμές ταχύτητας και αναπτυσσόμενου συντελεστή τριβής  $f$ . Η κρίσιμη θέση κάθε καμπύλης θεωρήθηκε εκείνη στην οποία εφαρμόζεται ο μέγιστος αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής. Η θέση αυτή για ένα μεγάλο αριθμό οχημάτων συνέπιπτε είτε με τη θέση εκείνη όπου το όχημα ανέπτυξε την μεγαλύτερη ταχύτητα στην καμπύλη είτε με τη θέση όπου η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς του οχήματος λάμβανε την ελάχιστη της τιμή, είτε στη θέση όπου συνέβαιναν και τα δύο αυτά γεγονότα ταυτοχρόνως.

Η μελέτη των στοιχείων που προέκυψαν έδειξε ότι τα περισσότερα οχήματα, ανεξαρτήτως της ταχύτητας, ακολουθούν τροχιές στις καμπύλες με ελάχιστες ακτίνες καμπυλότητας μικρότερες από αυτές των αντίστοιχων οδικών τμημάτων. Έτσι επιχειρήθηκε η συσχέτιση στιγμιαίων ακτίνων καμπυλότητας των τροχιών των οχημάτων με τις αντίστοιχες ταχύτητες που αυτά αναπτύσσουν. Τα διαγράμματα συσχέτισης ταχύτητας και ακτίνας της τροχιάς των οχημάτων δεν έδειξαν κάποια συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από την ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης. Για τις πέντε καμπύλες οδών που μελετήθηκαν, η ταχύτητα δε μπόρεσε να εκφράσει με περισσότερο από 11.4% ( $R^2 = 0.114$ ) τη μεταβλητότητα των τροχιών των οχημάτων, ενώ σε τρεις από αυτές τις καμπύλες το ποσοστό ήταν 4.7%. Η έλλειψη συσχέτισης των μεταβλητών αυτών έδειξε ότι ο κάθε

χρήστης στις καμπύλες αυτές επέλεξε ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας (όπου  $f_{max}$ ), η οποία ήταν ανεξάρτητη της ταχύτητας κινήσεώς του.

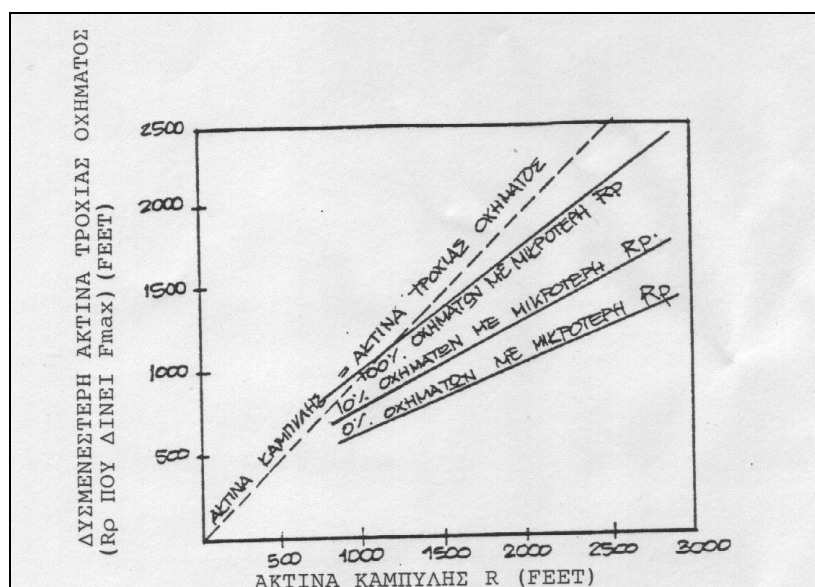
Έτσι οι μελετητές σκέφτηκαν να συσχετίσουν την ακτίνα των καμπυλών με την ακτίνα των τροχιών των οχημάτων. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται καμπύλες συσχέτισης (ευθείες) από τις οποίες μπορεί να προσδιοριστεί, για διάφορες τιμές των ακτίνων των καμπυλών, η ακτίνα της τροχιάς των οχημάτων, την οποία δεν υπερβαίνει ορισμένο ποσοστό οχημάτων. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται μια ανάλογη συσχέτιση σε βαθμούς καμπυλότητας. Οι εξισώσεις και οι αντίστοιχοι συντελεστές για ποσοστό οχημάτων σχεδιασμού 10% είναι:

$$R_p = 268.0 + 0.524 \cdot R \text{ με } R^2 = 0.951 \quad (1.5)$$

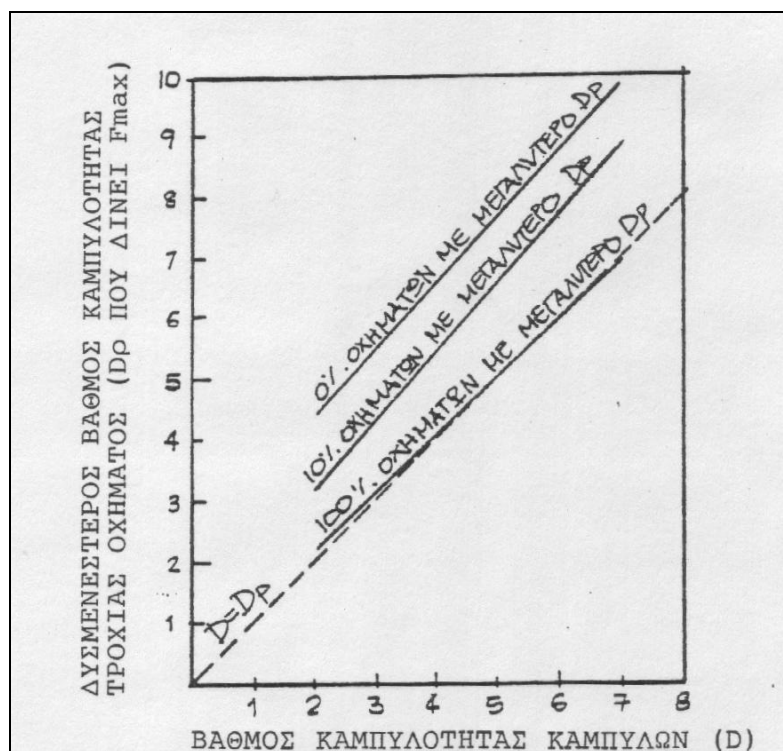
και

$$D_p = 1.014 + 1.128 \cdot D \text{ με } R^2 = 0.984 \quad (1.6)$$

Παρατηρείται ότι η συσχέτιση της τροχιάς με τις καμπύλες των οδών είναι προτιμότερο να γίνει με βαθμούς, καθώς για ένα ποσοστό οχημάτων σχεδιασμού 10% ο συντελεστής  $R^2$  είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή όταν συσχετίζονται οι ακτίνες.



Σχήμα 1.2 : Συσχέτιση ακτίνων καμπυλών και ακτίνων τροχιών οχημάτων ( $R - R_p$ ).



**Σχήμα 1.3 :** Συσχέτιση βαθμών καμπυλότητας οδικών τμημάτων και βαθμών καμπυλότητας τροχιάς οχημάτων.

Αν και στην έρευνα αυτή δεν επιλέχθηκαν για μελέτη καμπύλα τμήματα που να περιλαμβάνουν κλωθοειδή για τη μετάβαση από την ευθυγραμμία στο κυκλικό τόξο, οι μελετητές έφτασαν στο συμπέρασμα ότι η συναρμογή με κλωθοειδή καμπύλη είναι απαραίτητη. Οι περισσότεροι οδηγοί εμφανίζουν δυσκολίες στη μετάβαση από την ευθυγραμμία στο κυκλικό τόξο και αντίστροφα. Αυτό φάνηκε από το γεγονός ότι στα περισσότερα οχήματα ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής τριβής αναπτύχθηκε είτε στο πρώτο είτε στο τελευταίο τέταρτο της καμπύλης.

Χρησιμοποιώντας ποσοστό οχημάτων 10%, προσδιορίζεται η εξίσωση σχεδιασμού (1.4), σε σχέση με την τροχιά που ακολουθούν οι χρήστες των οδών ως εξής:

$$e + f = \frac{V^2}{7.86 \cdot R + 4030} \quad (1.7)$$

ή

$$e + f = \frac{(D + 0.9) \cdot V^2}{76100} \quad (1.8),$$

όπου:

e = επίκλιση σχεδιασμού,

f = τιμή συντελεστή πλευρικής ολίσθησης σχεδιασμού,

V [miles/h] = ταχύτητα μελέτης,

R [ft] = ακτίνα καμπύλης δρόμου,

D [grad/inches] = βαθμός καμπυλότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

## 2. ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των οχημάτων σε καμπύλα οδικά τμήματα ήταν απαραίτητο να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη μεθοδολογία αντιμετώπισης του προβλήματος, με βάση το διατιθέμενο εξοπλισμό και τα διατιθέμενα προγράμματα Η/Υ. Το αρχικό στάδιο της μελέτης ήταν η επιλογή των καμπύλων οδικών τμημάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη προετοιμασία των συγκεκριμένων οδικών τμημάτων. Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την τοπογραφική αποτύπωση των καμπύλων, ώστε να καταγραφούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε καμπύλης (ελικτικότητα, ακτίνα κυκλικού τόξου, πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας, κατά μήκος κλίση, επίκλιση κλπ), καθώς και σημεία που θα χρησιμοποιηθούν ως Σημεία Ελέγχου. Ακολούθησε η βιντεοσκόπηση της κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες ώρες στα παραπάνω τμήματα. Το τελικό στάδιο αποτελεί η επεξεργασία του μαγνητοσκοπημένου υλικού που συλλέχθηκε στο πεδίο.

### 2.1. Επιλογή των Κατάλληλων Οδικών Τμημάτων Παρατήρησης

Οι τέσσερις καμπύλες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αποτελούν οδικά τμήματα υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας, με μια λωρίδα ανά κατεύθυνση. Η επιλογή οδών με μια λωρίδα ανά κατεύθυνση θεωρείται ως η πλέον κρίσιμη περίπτωση στη συμπεριφορά των οδηγών, διότι καλούνται να ακολουθήσουν τη τροχιά του γεωμετρικού σχεδιασμού. Η βασική παράμετρος που θεωρήθηκε πως επηρεάζει την τροχιά των οχημάτων είναι η ελικτικότητα, η οποία εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  του -ή των - κυκλικών τόξων της καμπύλης, καθώς και από το μήκος των κυκλικών τόξων και των τόξων συναρμογής της. Η ελικτικότητα αντιστοιχεί σε μια ανηγμένη ακτίνα που αναφέρεται σε όλη την καμπύλη. Σε αντίστοιχη μελέτη, όπως φαίνεται στο υπεδάφιο 1.2.2., οι ακτίνες κυκλικών τόξων, στις οποίες εξετάστηκε η συμπεριφορά των οδηγών, ανήκουν στο διάστημα  $R$  [65,220] m. Μια αρχική εκτίμηση της ακτίνας των καμπύλων έγινε μέσω του λογισμικού Google Earth. Η τελική επιλογή τους έγινε ύστερα από επιτόπιο έλεγχο, ώστε σε κάθε καμπύλη να ικανοποιούνταν τα ακόλουθα:

- Δεν υπήρχε καμία επιρροή από διασταυρώσεις.
- Δεν υπήρχαν στοιχεία στο άμεσο περιβάλλον της οδού, τα οποία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν μη φυσιολογικές επικινδυνότητες (π.χ. ύπαρξη στενών γεφυρών).
- Δεν υπήρχαν αλλαγές στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.
- Η κατά μήκος κλίση ήταν μικρότερη από 6%.
- Δεν υπήρχαν στηθαία ασφαλείας, ώστε να επηρεάζεται η απόσταση του οχήματος από την εξωτερική οριογραμμή.
- Η μορφολογία του εδάφους ήταν τέτοια ώστε να είναι δυνατή από ένα σημείο η παρατήρηση ολόκληρης της καμπύλης ή ικανοποιητικού τμήματός της, χωρίς παρεμβολή εμποδίων στο οπτικό πεδίο. Έγινε προσπάθεια ώστε η παρατήρηση να μην επηρεάζει την συμπεριφορά των χρηστών της οδού.

Η διαδικασία επιλογής κατέληξε σε τέσσερις καμπύλες, εκ των οποίων οι δύο βρίσκονται σε μεγάλα ορύγματα και οι άλλες δυο σε μικρότερα. Ο παρατηρητής

στεκούμενος στο φρύδι πρανούς του ορύγματος ήταν σε θέση να παρατηρεί κάθε σημείο του οδοστρώματος σε όλο το μήκος της καμπύλης, στην περίπτωση μικρών ακτίνων ή σημαντικού τμήματός της, στην περίπτωση των μεγαλύτερων ακτίνων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι ήταν αδύνατη η παρατήρηση ολόκληρης της C και D καμπύλης, λόγω του μεγάλου συνολικού μήκους τους. Ακόμα και στην περίπτωση που αυτό ήταν εφικτό από μικρό σχετικά ύψος παρατήρησης, δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η αναγωγή μεταξύ εικονοσυνταταγμένων και γεωδαιτικών συντεταγμένων με την απαιτούμενη ακρίβεια. Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να ξεπεραστεί αν είχε διατεθεί καλαθοφόρο όχημα ή αερόστατο, μέθοδοι που όμως επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών.

Τρεις από τις καμπύλες βρίσκονται στη Λεωφόρο Διονύσου, στο ορεινό τμήμα μεταξύ Πεντέλης και Αγίου Πέτρου. Επίσημη χιλιομέτρηση επί του άξονα δεν υπάρχει. Θεωρήθηκε όμως σκόπιμο να υπάρχει μια ενδεικτική χιλιομέτρηση με αφετηρία την αρχή του άξονα στην Πεντέλη, ώστε να μπορεί ο κάθε ενδιαφερόμενος να εντοπίζει τις καμπύλες. Συγκεκριμένα η καμπύλη A βρίσκεται στη Χ.Θ. 5+100, η καμπύλη B στη Χ.Θ. 6+800 και η C στη Χ.Θ. 5+300. Η μεγαλύτερη σε ακτίνα καμπύλη D βρίσκεται στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου στη Χ.Θ. 43+900.



**Εικόνα 2.1 :** Άποψη της καμπύλης A από το Google Earth.



**Εικόνα 2.2 :** Άποψη της καμπύλης B από το Google Earth.





**Εικόνα 2.3 :** Άποψη της καμπύλης C από το Google Earth.



**Εικόνα 2.4 :** Άποψη της καμπύλης D από το Google Earth.

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι απορρίφθηκαν ορισμένες καμπύλες, οι οποίες οριζοντιογραφικά πληρούσαν τις προδιαγραφές για τη συγκεκριμένη εργασία, είχαν όμως μεγάλη κατά μήκος κλίση ( $s > 6\%$ ) και περιορισμένη ορατότητα.

Τέλος, αναφέρεται ότι η στροφή με τη μικρότερη ελικτότητα, δηλαδή τη μεγαλύτερη ακτίνα, εξετάστηκε περισσότερο για λόγους εξακρίβωσης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων της με αυτά των μικρότερων ακτίνων.

## 2.2. Προετοιμασία των Οδικών Τμημάτων Παρατήρησης

Για κάθε μια από τις καμπύλες επιλέχτηκε ένα διάστημα, στο οποίο θα γινόταν η συλλογή των πληροφοριών για τους οδηγούς. Στις καμπύλες με τις μικρότερες ακτίνες, το διάστημα αυτό συμπεριλάμβανε και το κυκλικό τόξο της καμπύλης. Για τις καμπύλες με τις μεγαλύτερες ακτίνες C και D, η ακριβής θέση του κυκλικού τόξου και των τόξων συναρμογής προκύπτουν από την αποτύπωση και το γωνιακό διάγραμμα. Σημαντικός όμως παράγοντας στη συγκεκριμένη μεθοδολογία αντιμετώπισης του προβλήματος ήταν η θέση παρατήρησης από τα πρανή. Ενδέχεται λοιπόν, στις μεγαλύτερες ακτίνες να είναι δυνατή μόνο η παρατήρηση τμήματος τόξου συναρμογής, καθώς μπορεί να υπάρχουν εμπόδια (δέντρα ή πυκνή βλάστηση) για την παρατήρηση του κυκλικού τόξου. Όμως, επειδή το μέγεθος που ενδιαφέρει είναι η ελκτικότητα της καμπύλης, δεν έχει σημασία αν το υπό εξέταση τμήμα βρίσκεται εντός κυκλικού τόξου ή σε κάποιο τόξο συναρμογής. Για τις καμπύλες C και D το υπό μελέτη διάστημα συνέπεσε να ανήκει στο κυκλικό τόξο της κάθε καμπύλης.

Τόσο για τον υπολογισμό των διαδοχικών θέσεων των οχημάτων επί της καμπύλης όσο και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της αναγωγής, τοποθετήθηκαν στο οδόστρωμα σημάδια που αποτελούνταν από μαύρες (κόκκινες σε μια στροφή) ευθείες γραμμές διαστάσεων 60x20 cm. Οι γραμμές αυτές βάφτηκαν κάθετα στις δυο οριογραμμές, ώστε ανά δύο να καθορίζουν μια διατομή στο οδόστρωμα (χαρακτηριστική διατομή). Οι διατομές αυτές απέχουν απόσταση μεταξύ τους περίπου R/10 και καλύπτουν όλο το υπό μελέτη τμήμα. Το μήκος διαστήματος ανάλυσης κυμαίνεται από 7 m έως 15 m ανάλογα με την ακτίνα και μήκος του τόξου κάθε καμπύλης. Εκτός από τις χαρακτηριστικές διατομές, χρωματίστηκαν στο οδόστρωμα κάθε στροφής κυκλικά φωτοσταθερά σημαντικής διαμέτρου (10-15 cm), ώστε να είναι ευδιάκριτα στην εικόνα της κάμερας. Τα φωτοσταθερά αυτά ήταν διασκορπισμένα στο οδόστρωμα, ώστε το επίπεδο που ορίζεται για κάθε στροφή να περιλαμβάνει όχι μόνο σημεία κοντά στις δυο οριογραμμές, αλλά και σημεία στο μέσο της διατομής, καθώς και σημεία περίπου στο μέσο της κάθε λωρίδας κυκλοφορίας. Το μαύρο χρώμα υιοθετήθηκε ως το καταλληλότερο για τα σημάδια, ύστερα από πειραματική διαδικασία με διαφορετικά χρώματα, ως το λιγότερο πιθανό να γίνει ορατό από τους οδηγούς. Αρχικά επιχειρήθηκε το άσπρο χρώμα, το οποίο ήταν πιο “ουδέτερο” για τον οδηγό, όμως δεν εξασφάλιζε την αναγνώριση των σημαδιών στην εικόνα του video και έτσι εγκαταλείφθηκε. Στη συνέχεια δοκιμάστηκε το κόκκινο χρώμα παρουσιάζοντας καλή αντίθεση με το οδόστρωμα και εφαρμόστηκε σε μια καμπύλη. Όμως τελικά στις υπόλοιπες στροφές εφαρμόστηκε μαύρη διαγράμμιση, ώστε να είναι λιγότερο αντιληπτά τα σημάδια από τους οδηγούς. Αξιοσημείωτο είναι ότι κάποιοι γνωστοί χρήστες των συγκεκριμένων οδών, οι οποίοι ρωτήθηκαν, φάνηκαν να μη γνωρίζουν την ύπαρξη των σημαδιών κάτι που δείχνει ότι αυτά, μάλλον, δεν υπέπεσαν στην αντίληψη των χρηστών αυτής της μελέτης.

Για την τοποθέτηση των σημαδιών στο οδόστρωμα σε κάθε επιλεγμένη καμπύλη ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Σε όλες τις καμπύλες εντοπίζεται και επισημαίνεται στις εξωτερικές οριογραμμές, η αρχή και το τέλος του τμήματος της καμπύλης που είναι ορατό από την βιντεοκάμερα. Στη συνέχεια, το κάθε διάστημα μελέτης χωρίζεται σε ισαπέχοντα τμήματα μήκους περίπου R/10 και σημειώνονται οι χαρακτηριστικές διατομές στο οδόστρωμα με ειδική ανεξίτηλη μπογιά χρησιμοποιώντας οπτικό ορθογώνιο διαστάσεων 60x20 cm. Εκτός από τον

προσδιορισμό της τροχιάς των οδηγών στις καμπύλες και εκτός από την διαδικασία της αναγωγής, τα σημάδια στο οδόστρωμα στις χαρακτηριστικές διατομές θα χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό της ταχύτητας των οχημάτων στο μέσο της καμπύλης.

Οι εργασίες αυτές πραγματοποιήθηκαν καθημερινές μέρες και Σάββατο σε πολύ πρωινές ώρες, όπου παρατηρήθηκαν μειωμένοι κυκλοφοριακοί φόρτοι. Παρ’ όλα αυτά, ήταν πολύ επικίνδυνη η τοποθέτηση των σημαδιών 60x20 cm στον άξονα της οδού και η διαδικασία περιορίστηκε στην τοποθέτησή τους μόνο στις εξωτερικές οριογραμμές.

### 2.3. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Οδικών Τμημάτων

Σε αυτό το στάδιο κρίθηκε απαραίτητη η τοπογραφική αποτύπωση κάθε καμπύλης, ώστε να μετρηθούν και να υπολογιστούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της. Για την απόδοση του τοπογραφικού διαγράμματος έπρεπε, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο πεδίο, να σχεδιάζεται και το αυτοσχέδιο υπαίθρου (κροκί), όπου σε αυτό θα απεικονίζεται η στροφή και θα επισημαίνονται, διατηρώντας μια αναλογία στη σχεδίαση των αντικειμένων, οι διατομές, τα φωτοσταθερά και οι στάσεις οργάνου και σκόπευσης μηδενισμού, κωδικοποιώντας παράλληλα τα σημεία αυτά.

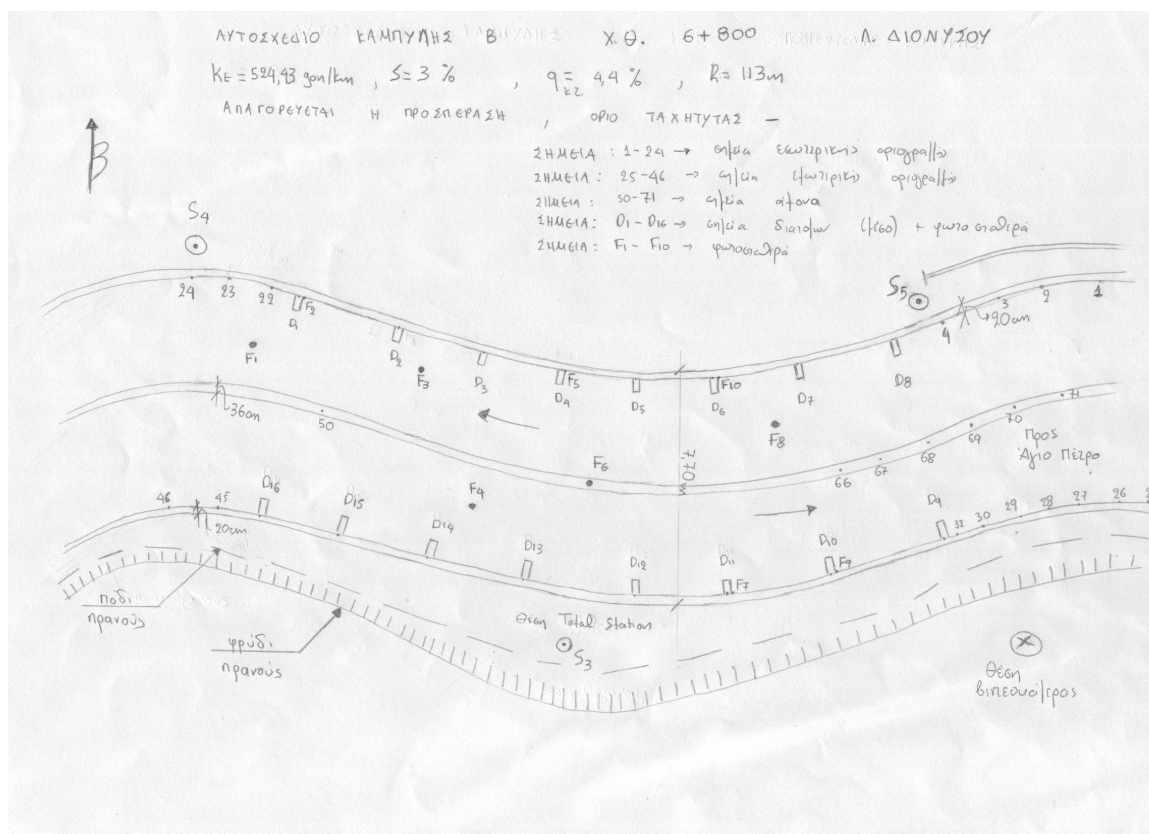
Οι μετρήσεις έγιναν ταυτόχρονα και για τις δυο κατευθύνσεις, και στα κροκί σημειώνονται τα εξής:

- Η ακριβής θέση της καμπύλης, ώστε οποιοσδήποτε ενδιαφερόμενος να είναι σε θέση να την εντοπίσει.
- Τον κωδικό της Στάσης Οργάνου και τους κωδικούς της - ή των - Στάσεων Ορισμού Διεύθυνσης.
- Την αρίθμηση των ταχυμετρικών σημείων στην εσωτερική πλευρά των εξωτερικών οριογραμμών.
- Την αρίθμηση των ταχυμετρικών σημείων επί του άξονα.
- Την αρίθμηση των ταχυμετρικών σημείων στα άκρα του καταστρώματος στην περίπτωση ύπαρξης μεγάλου πλάτους σταθεροποιημένου ερείσματος.
- Τους κωδικούς των Φωτοσταθερών.
- Το πλάτος του οδοστρώματος σε τυχαίες διατομές με τη χρήση μετροταινίας.
- Το πλάτος της λωρίδας καθοδήγησης.
- Αν η διαγράμμιση στο οδόστρωμα επιτρέπει ή απαγορεύει την προσπέραση στο συγκεκριμένο τμήμα της καμπύλης.

Σημειώνονται επίσης επιπλέον στοιχεία τα οποία προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία των μετρήσεων, όπως:

- Η ελικτότητα της καμπύλης,  $K_E$ , σε gon/km.
- Η κατά μήκος κλίση,  $s\%$ .
- Η ακτίνα του κυκλικού τόξου της καμπύλης,  $R$ , σε m.
- Η μέση επίκλιση στο κυκλικό τόξο,  $q\%$ .

Τα αυτοσχέδια των καμπυλών, καθώς και οι σημειωμένες πάνω σε αυτά πληροφορίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1 στην παράγραφο 1.1.. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται το αυτοσχέδιο (κροκί) της καμπύλης Β.



Εικόνα 2.5 : Αυτοσχέδιο υπαίθρου καμπύλης Β.

Τα Γεωμετρικά και Υψομετρικά Στοιχεία κάθε καμπύλης (πλην της  $K_E$  και της  $R$  του κυκλικού τόξου), όπως προέκυψαν από τα σημεία της αποτύπωσης στις χαρακτηριστικές διατομές, παρουσιάζονται στην παράγραφο 1.5. του Παραρτήματος 1. Αρχικά, υπολογίστηκαν οι κεκλιμένες και οι οριζόντιες αποστάσεις ανά δύο σημεία της κάθε οριογραμμής, η υψομετρική τους διαφορά και η κλίση τους. Για κάθε χαρακτηριστική διατομή υπολογίστηκαν επίσης, η κεκλιμένη και η οριζόντια απόσταση, η υψομετρική διαφορά των δύο σημείων, η επίκλιση % και το καθαρό πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας,  $a$  (m). Τέλος, εκτιμήθηκαν έμμεσα τα υψόμετρα των σημείων των χαρακτηριστικών διατομών επί του άξονα και βρέθηκε η κατά μήκος κλίση ανά δύο σημεία. Ως κατά μήκος κλίση  $s\%$  κάθε καμπύλης θεωρήθηκε ο μέσος όρος όλων των διατομών.

Απαραίτητο κρίθηκε να εξεταστεί και η σήμανση πριν από κάθε υπό εξέταση καμπύλη και από τις δύο κατευθύνσεις. Χαρακτηριστικό είναι ότι στον άξονα της Λεωφόρου Διονύσου (μέχρι τουλάχιστον τον Άγιο Πέτρο) δεν υπάρχουν ρυθμιστικές πινακίδες που να αναγράφεται το όριο ταχύτητας. Διαπιστώθηκε επίσης ότι πινακίδες αναγγελίας επικίνδυνης στροφής υπάρχουν μόνο πριν τις καμπύλες C και D και μάλιστα μόνο στη μια κατεύθυνση. Στο Παράρτημα 7 (παράγραφος 7.1.) παρουσιάζεται αντίστοιχο φωτογραφικό υλικό από την κατακόρυφη σήμανση πριν τις καμπύλες. Επίσης, ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας, που θα μπορούσε να επηρεάσει τη συμπεριφορά των οδηγών, είναι η κατάσταση του οδοστρώματος, η οποία όμως εκτιμήθηκε ως πολύ καλή (τουλάχιστον στα επιφανειακά της στρώματα).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η ελκτικότητα της μεμονωμένης καμπύλης  $K_E$  ( $\text{gon/km}$ ), όσο και η ακτίνα του κυκλικού τόξου της καμπύλης  $R$  (m) δεν ήταν δυνατό

να υπολογιστούν χωρίς τοπογραφική αποτύπωση, διότι αφενός δεν υπήρχε διαθέσιμη η μελέτη κατασκευής των οδών και αφετέρου δεν υπάρχει και η βεβαιότητα της ακριβούς εφαρμογής της. Η μέθοδος προσδιορισμού της  $K_E$  και της  $R$  περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενα υπεδάφια 2.3.2. και 2.3.3..

### 2.3.1. Ταχυμετρική αποτύπωση και σύνταξη τοπογραφικών διαγραμμάτων καμπυλών

Η ταχυμετρική αποτύπωση κάθε καμπύλης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον “Ολοκληρωμένο Γεωδαιτικό Σταθμό” Pentax R -323NX με ελάχιστη ανάγνωση 1’’ και ακρίβεια 3’’, δηλαδή 10<sup>cc</sup>. Για τα μήκη, η ακρίβεια που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας πρίσμα δίνεται συναρτήσει της απόστασης :  $(\pm 2 \pm 2ppm \cdot D)$ mm. Οι ακρίβειες αυτές κρίνονται ως πολύ καλές για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εκτός από το Total Station χρησιμοποιήθηκαν και τα παρελκόμενα του οργάνου, όπως τρίποδας αλουμινίου, στηλεός, συμβατό πρίσμα, τριποδίσκοι στήριξης ράβδου, μετροταινία. Όλος ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις πεδίου παραχωρήθηκε από το Τμήμα Οργάνων του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π..

Εκτός από την καμπύλη C, όπου χρειάστηκε η υλοποίηση τριών στάσεων για την αποτύπωσή της, στις υπόλοιπες καμπύλες υλοποιήθηκαν δυο στάσεις, εκ των οποίων η μια αποτελεί τη στάση οργάνου και η άλλη τη στάση ορισμού των διευθύνσεων. Στη περίπτωση της καμπύλης C επιλύθηκε αρχικά η Ανοιχτή Ανεξάρτητη Όδευση [Μπαλοδήμος, 2000], ώστε να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες της τρίτης κορυφής μετρώντας τη γωνία εξάρτησης. Η μόνιμη σήμανση των στάσεων θεωρείται πολύ σημαντική, ώστε σε περίπτωση που χρειάζεται να αποτυπωθεί κάτι επιπλέον σε διαφορετική χρονική στιγμή να προκύπτουν συντεταγμένες στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Απαραίτητη θεωρήθηκε και η εξασφάλιση της κάθε στάσης από τρία σταθερά σημεία  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ .

Η στάση οργάνου υλοποιήθηκε σε τέτοιο σημείο παράπλευρα του οδοστρώματος, ώστε να είναι ορατά όλα τα υπό αποτύπωση σημεία. Τα ταχυμετρικά σημεία για κάθε καμπύλη, όπως φαίνεται και στο κροκί της καμπύλης B, θεωρήθηκαν τα εσωτερικά σημεία των εξωτερικών οριογραμμών και στις δυο κατευθύνσεις, μερικά σημεία επί του άξονα, οι θέσεις των χαρακτηριστικών διατομών και οι θέσεις των φωτοσταθερών.

Ύστερα από κέντρωση και οριζοντίωση του οργάνου, ώστε να ικανοποιούνται οι τρεις “πληρωτές συνθήκες” [Μπαλοδήμος και Σταθάς, 1993], κωδικοποιήθηκε στο όργανο το όνομα της στάσης του οργάνου και έγινε εισαγωγή του ύψους οργάνου. Στη συνέχεια, κωδικοποιήθηκε το όνομα της στάσης για τον μηδενισμό και έγινε εισαγωγή του ύψους σκόπευσης και μηδενίστηκε το αζιμούθιο. Έπειτα, ορίστηκαν οι κωδικοί των προς αποτύπωση σημείων και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Η χρήση Total Station δίνει τη δυνατότητα να καταγράφονται στη μνήμη του οργάνου :

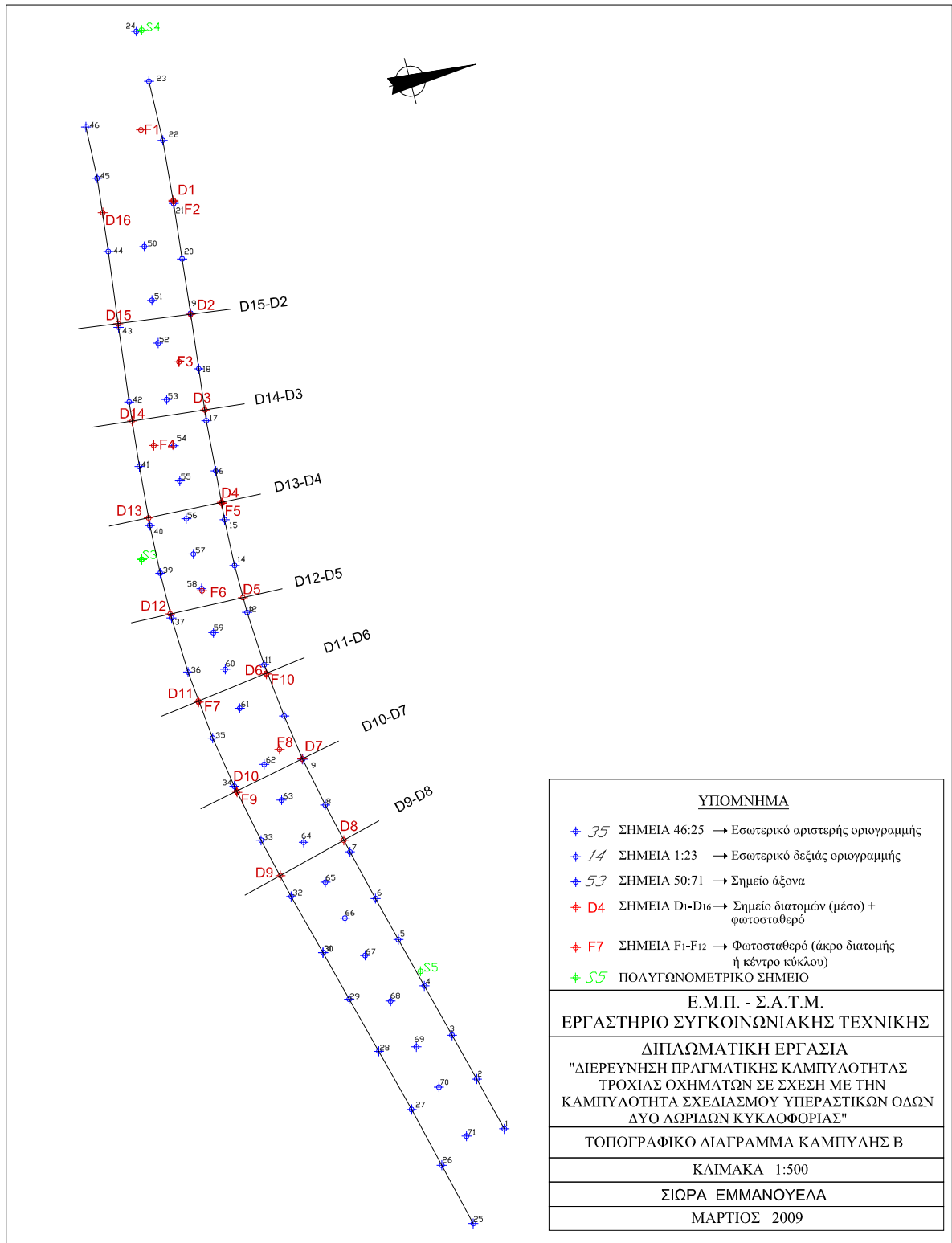
- Κεκλιμένα μήκη και να υπολογίζονται τα οριζόντια μήκη.
- Οριζόντιες γωνίες.
- Ζενίθιες γωνίες.
- Κωδικός σκοπευόμενου σημείου.

Το όργανο συνδέθηκε με Η/Υ του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας, που έχει εγκατεστημένο το πρόγραμμα TOPOREST, με τη βοήθεια του οποίου μεταφέρονται τα δεδομένα της αποτύπωσης από το όργανο στον Η/Υ.

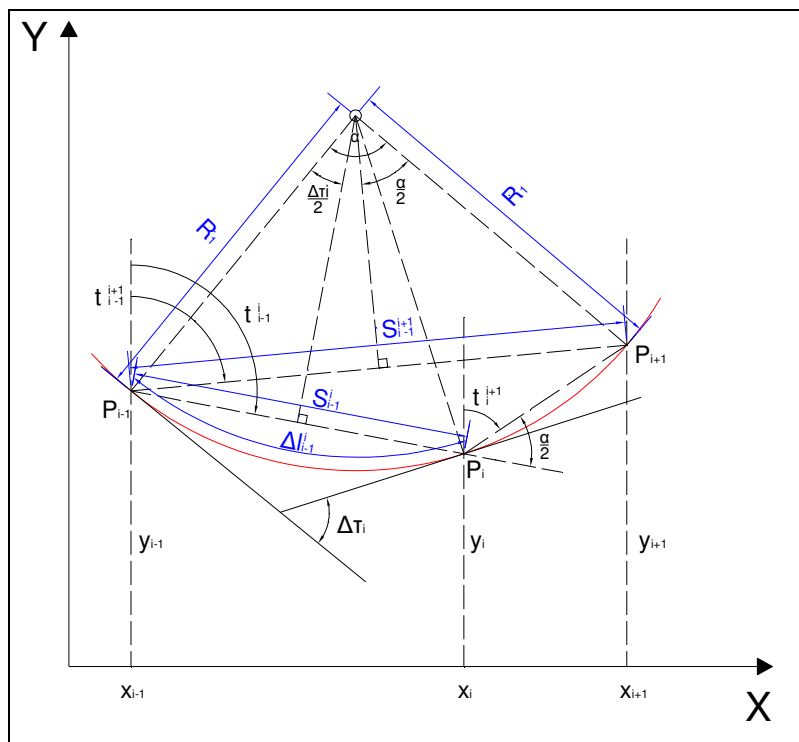
Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του Προγράμματος FOTOPRO, ραπορταρίστηκαν αυτόματα τα σημεία της αποτύπωσης σε τρισδιάστατο καρτεσιανό, ανεξάρτητο σύστημα αναφοράς, με συντεταγμένες στάσης οργάνου κάθε στροφής (1000,1000,100). Ο άξονας Y του αυθαίρετου συστήματος αναφοράς υλοποιείται από την ευθεία μηδενισμού των διευθύνσεων με θετική φορά, που ορίζεται από τη στάση οργάνου προς τη στάση μηδενισμού κάθε στροφής. Τέλος, ο κωδικός κάθε σημείου απεικονίζεται σε τέτοιο μέγεθος, ώστε στη κλίμακα εκτύπωσης να μην υπάρχει πρόβλημα ανάγνωσης των σημείων. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το τοπογραφικό διάγραμμα της καμπύλης B, όπου έχουν αποτυπωθεί οι δύο οριογραμμές του δρόμου, ορισμένα σημεία του άξονα και τα σημεία ελέγχου. Στο σχήμα αυτό φαίνεται το επιλεγμένο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, καθώς και οι θέσεις των χαρακτηριστικών διατομών. Τα τοπογραφικά διαγράμματα των τεσσάρων καμπυλών, όπου έγιναν οι μετρήσεις, παρουσιάζονται στο Παράρτημα 1 στην παράγραφο 1.2..

### **2.3.2. Προσδιορισμός ακτίνων των καμπυλών**

Ο προσδιορισμός της ακτίνας του κυκλικού τόξου της καμπύλης γίνεται μέσω του γωνιακού διαγράμματος. Επειδή δεν υπάρχουν τα σχέδια εφαρμογής για τους υπό μελέτη άξονες, η τοπογραφική αποτύπωση είναι απαραίτητη. Ακόμα και στην περίπτωση που υπήρχαν τα σχέδια εφαρμογής, δεν είναι σίγουρο ότι η χάραξή τους θα ήταν ακριβής. Η τοπογραφική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε με απόσταση μεταξύ των σημείων μικρότερη από R/10 ώστε να εξασφαλίζονται υψηλές ακρίβειες στους υπολογισμούς. Η πύκνωση σε R/10 έγινε με μέτρηση βημάτων. Υπενθυμίζεται ότι μια πρώτη εκτίμηση του μεγέθους της ακτίνας προσδιορίστηκε μέσω του λογισμικού Google Earth. Στο γωνιακό διάγραμμα που θα προκύψει, θα προσαρμοστούν οι καμπύλες των γνωστών γωνιακών διαγραμμάτων των κλασικών γεωμετρικών στοιχείων. Η αρχή στην οποία στηρίζεται ο προσδιορισμός του γωνιακού διαγράμματος από τις συντεταγμένες των σημείων πύκνωσης φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.2. Για τον υπολογισμό της Χ.Θ. και της γωνίας διεύθυνσης σε κάθε σημείο πύκνωσης της οριογραμμής ή του άξονα υπολογίζεται η ακτίνα του κύκλου που διέρχεται από τρία σημεία [Ψαριανός, 1999].



Σχήμα 2.1 : Τοπογραφικό διάγραμμα καμπύλης Β.



**Σχήμα 2.2 :** Μεγέθη κύκλου διερχόμενου από τρία διαδοχικά σημεία πύκνωσης της οριογραμμής.

Με βάση τα διαδοχικά κυκλικά τόξα, που διέρχονται από τρία σημεία πύκνωσης, ο υπολογισμός της Χ.Θ. και της γωνίας διεύθυνσης σε κάθε σημείο πύκνωσης γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις σε γεωδαιτικό δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς :

- Υπολογισμός των γωνιών διεύθυνσης των δημιουργημένων χορδών:

$$t_{i-1}^i = a \tan \frac{x_i - x_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \quad (2.1)$$

$$t_i^{i+1} = a \tan \frac{x_{i+1} - x_i}{y_{i+1} - y_i} \quad (2.2)$$

$$t_{i-1}^{i+1} = a \tan \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{y_{i+1} - y_{i-1}} \quad (2.3)$$

- Υπολογισμός της επίκεντρης γωνίας α:

$$\frac{a}{2} = t_{i-1}^i - t_i^{i+1} \quad (2.4)$$

- Υπολογισμός των μηκών των χορδών s:

$$s_{i-1}^i = \frac{x_i - x_{i-1}}{\sin t_{i-1}^i} \quad (2.5)$$



$$S_{i-1}^{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{\sin t_{i-1}^{i+1}} \quad (2.6)$$

- Υπολογισμός της ακτίνας R του κυκλικού τόξου:

$$R_i = \frac{S_{i-1}^{i+1}}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.7)$$

- Υπολογισμός της μεταβολής Δτ της γωνίας διεύθυνσης:

$$\Delta \tau_i = 2 \cdot a \sin \frac{S_{i-1}^i}{2R_i} \quad (2.8)$$

- Υπολογισμός της γωνίας διεύθυνσης στο ενδιάμεσο σημείο:

$$\tau_i = \sum_{t=0}^i \Delta \tau_t \quad (2.9)$$

- Υπολογισμός του μήκους του τόξου μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου σημείου του κυκλικού τόξου:

$$\Delta \ell_i = \frac{R_i \cdot \Delta \tau_i}{\rho}, \text{ όπου } \rho = 63.6620 \quad (2.10)$$

- Υπολογισμός της Χ.Θ. του μεσαίου σημείου του κυκλικού τόξου:

$$\ell_i = \sum_{t=0}^i \Delta \ell_{t-1} \quad (2.11)$$

Η παραπάνω διαδικασία θα διαμορφώσει ένα διακριτό γωνιακό διάγραμμα, η μορφή του οποίου θα οδηγήσει στην αναγνώριση των γεωμετρικών στοιχείων και στη συνέχεια στον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμέτρων του κάθε τόξου ξεχωριστά (π.χ. ακτίνα, παράμετρος κλωθοειδούς, μήκη κλπ). Η συγκεκριμένη έρευνα περιορίζεται στον προσδιορισμό της ακτίνας του κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης.

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της ακτίνας του κυκλικού τόξου θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και όχι με γραφική προσαρμογή. Ο προσδιορισμός της ακτίνας καμπυλότητας επιλέγεται να γίνεται με τη Μ.Ε.Τ., διότι με αυτό τον τρόπο επιλέγεται η ομάδα των σημείων που ορίζουν το κυκλικό τόξο και εφαρμόζεται σε αυτή γραμμική παρεμβολή. Ως ακτίνα του κυκλικού τόξου θεωρείται ο αντίστροφος του συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής ή αλλιώς, ο αντίστροφος της κλίσης με την προϋπόθεση ότι είναι στατιστικά σημαντικός όπως και αποδείχθηκε για τις τέσσερις καμπύλες με ε.ε. 95%. Η γραφική προσαρμογή θα λάμβανε υπόψη μόνο τη μεταβολή της γωνίας και της Χ.Θ. του αρχικού και του τελικού σημείου του κυκλικού τόξου και όχι των ενδιάμεσων σημείων, προσδίδοντας μικρότερη ακρίβεια.

Δεδομένου ότι η οριογραμμή μιας ευθυγραμμίας είναι επίσης μια ευθυγραμμία και του κυκλικού τόξου επίσης ένα κυκλικό τόξο με ακτίνα  $R+B$ , αν πρόκειται για την εξωτερική και  $R-B$  αν πρόκειται για την εσωτερική, όπου  $B$ : το ημιπλάτος του οδοστρώματος, μελετώντας είτε την εσωτερική είτε την εξωτερική οριογραμμή μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα του κυκλικού τόξου  $R$  στον άξονα. Αναλυτικά τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες στο Παράρτημα 1 στην παράγραφο 1.4.. Στον Πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	R [m]
A	60
B	113
C	178
D	594

**Πίνακας 2.1 :** Ακτίνα κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης.

### 2.3.3. Προσδιορισμός ελικτότητας των καμπύλων

Η ελικτότητα  $K_E$  της μεμονωμένης καμπύλης είναι συνάρτηση της γωνίας αλλαγής της κατεύθυνσης και του συνολικού μήκους της καμπύλης που αποτελείται από το μήκος του κυκλικού τόξου και τα μήκη των εκατέρωθεν τόξων συναρμογής. Η ελικτότητα κάθε καμπύλης υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$K_E = \frac{|\gamma|}{L} \quad (2.12),$$

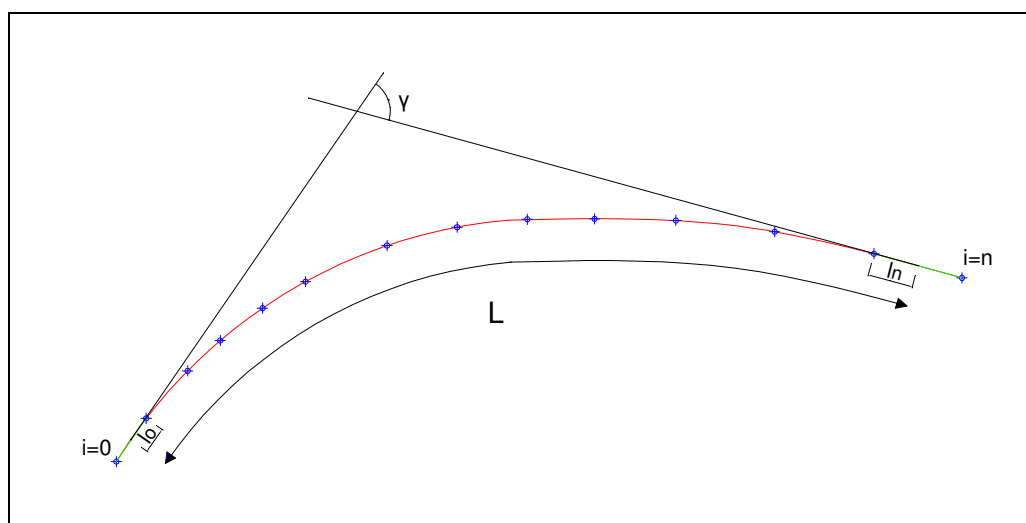
όπου :

$K_E$  [gon/km] = η ελικτότητα μεμονωμένης καμπύλης,

$\gamma$  [gon] = γωνία αλλαγής κατεύθυνσης σε κάθε μία καμπύλη,

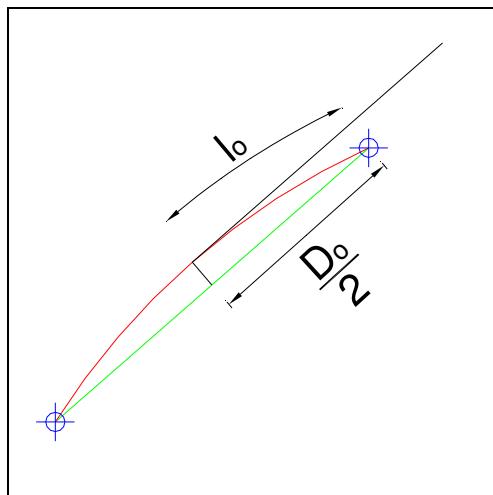
$L$  [km] = συνολικό μήκος καμπύλης.

Για κάθε καμπύλη, υπολογίστηκε η ελικτότητα από τα στοιχεία αποτύπωσης της κάθε οριογραμμής (Σχ. 2.3). Ο μέσος όρος της ελικτότητας των δύο οριογραμμών αποτελεί την ελικτότητα  $K_E$  του άξονα.



**Σχήμα 2.3 :** Γωνία αλλαγής κατεύθυνσης  $\gamma$  και μήκος  $L$  των οριογραμμών.

Στη περίπτωση που έχει αποτυπωθεί ολόκληρη η καμπύλη, το μήκος  $l_0$  αποτελεί το ήμισυ της απόστασης  $l_{01}$  (αντίστοιχα και για το  $l_n$ ), διότι το τμήμα είναι ευθύγραμμο. Σε περίπτωση όμως που δεν έχει αποτυπωθεί ολόκληρη η καμπύλη λόγω του μεγάλου μήκους της (Καμπύλες Α και C), η χορδή δε συμπίπτει με το καμπύλο τμήμα και ο υπολογισμός του μήκους γίνεται με την παραδοχή που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



**Σχήμα 2.4 :** Ειδική περίπτωση υπολογισμού μήκους καμπύλης.

Το μήκος  $L$  κάθε οριογραμμής προκύπτει από τη σχέση, σύμφωνα με τα Σχήματα 2.3 και 2.4, ως εξής:

$$L = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\Delta X_{i+1}^2 + \Delta Y_{i+1}^2} + \frac{D_o}{2} + \frac{D_n}{2} \quad \Leftrightarrow \quad L = \sum_{i=1}^{n-2} \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} + \frac{D_o}{2} + \frac{D_n}{2} \quad (2.13),$$

όπου:

$L$  [m] = μήκος οριογραμμής,

$X_i$  [m] = τετμημένη των σημείων της οριογραμμής ( $i=0, \dots, i=n$ ),

$Y_i$  [m] = τεταγμένη των σημείων της οριογραμμής ( $i=0, \dots, i=n$ ),

$\frac{D_o}{2}$  [m] = το ήμισυ της χορδής στην αρχή της οριογραμμής,

$\frac{D_n}{2}$  [m] = το ήμισυ της χορδής στο πέρας της οριογραμμής.

Στις καμπύλες που έχουν επιλεγεί, από το διάγραμμα καμπυλότητας διαπιστώνεται ότι σε κάθε καμπύλη υπάρχει μόνο ένα κυκλικό τόξο. Σε μερικές καμπύλες υπάρχουν και τόξα συναρμογής, ενώ σε καμία δεν εμφανίζονται ευθυγραμμίες μεταξύ των τόξων.

Η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης υπολογίζεται εκτός από γραφικά (μέσω AutoCAD) και αναλυτικά από τις συντεταγμένες αποτύπωσης της κάθε οριογραμμής ως εξής :

- Υπολογίζονται οι γωνίες διεύθυνσης  $a_{01}$  και  $a_{(n-1)n}$  σύμφωνα με το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς.
- Υπολογίζεται η διαφορά των προσημασμένων γωνιών διεύθυνσης σε grad από τη σχέση:

$$\gamma = a_{(n-1)n} - a_{01} \quad (2.14)$$

Οι τιμές της ελικτότητας  $K_E$  του άξονα που προέκυψαν είναι:

ΚΑΜΠΥΛΗ	Ελικτότητα $K_E$ [gon/km]
A	950.76
B	524.43
C	259.36
D	67.65

**Πίνακας 2.2 :** Ελικτότητα χάραξης για τις μεμονωμένες καμπύλες A, B, C, D.

Ο υπολογισμός των ελικτοτήτων των καμπυλών (αναλυτικός και γραφικός) παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1 στην παράγραφο 1.3..

Η σχέση που συνδέει την ελικτότητα  $K_E$  της μεμονωμένης καμπύλης και της **ανηγμένης** ακτίνας  $R$  που αντιστοιχεί στη δεδομένη καμπύλη είναι:

$$R_{AN} = \frac{63700}{K_E} \quad (2.15),$$

όπου :

$R_{AN}$  [m] = η ανηγμένη ακτίνα της καμπύλης,

$K_E$  [gon/km] = η ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης.

Κατά συνέπεια οι ανηγμένες ακτίνες των καμπυλών προκύπτουν:

ΚΑΜΠΥΛΗ	Ανηγμένη Ακτίνα $R_{AN}$ [m]
A	67
B	121
C	246
D	942

**Πίνακας 2.3 :** Ανηγμένη ακτίνα για τις μεμονωμένες καμπύλες A, B, C, D.

## 2.4. Βιντεοσκόπηση της Κυκλοφορίας

Για τη μελέτη της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των επιβατηγών οχημάτων και των ελαφρών ημιφορηγών επιλέχθηκε η μέθοδος της βιντεοσκόπησης. Η μέθοδος αυτή κρίθηκε ως η καταλληλότερη και η οικονομικότερη από πλευράς εξοπλισμού που διέθεταν τα Εργαστήρια της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Η εναλλακτική μέθοδος των μετρητικών στύλων, όπως περιγράφηκε στο υπεδάφιο 1.2.2., ίσως αποτελεί πιο σύγχρονη αντιμετώπιση του προβλήματος, όμως στα χρονικά πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας ήταν αδύνατο να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος εξοπλισμός από το Ε.Μ.Π..

Με τη βιντεοσκόπηση, εκτός από τη συλλογή δεδομένων για τον προσδιορισμό της τροχιάς που ακολουθεί ο οδηγός του οχήματος σε κάθε οδικό τμήμα, υπολογίζεται και η ταχύτητα που αναπτύσσει χρησιμοποιώντας τα σημάδια των χαρακτηριστικών διατομών. Η διαδικασία της βιντεοσκόπησης περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η επιλογή της καταλληλότερης θέσης στην καμπύλη για την τοποθέτηση της βιντεοκάμερας. Η θέση της βιντεοκάμερας κρίνεται καθοριστική τόσο στην ακρίβεια της Φωτογραμμετρικής επεξεργασίας όσο και στην συμπεριφορά των οδηγών. Πιο συγκεκριμένα η θέση της κάμερας σε κάθε καμπύλη έπρεπε να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Η βιντεοκάμερα έπρεπε να βρίσκεται σε τέτοιο ύψος από την επιφάνεια του οδοστρώματος, ώστε να είναι δυνατή η επισκόπηση κάθε σημείου της καμπύλης ή του επιλεγμένου τμήματος της καμπύλης χωρίς παρεμβολή εμποδίων στο οπτικό πεδίο. Το ύψος λήψης του video αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο κατά τη διαδικασία της αναγωγής, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.
- Να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή λήψη των σημαδιών στο οδόστρωμα, ώστε να καθίσταται ευκολότερη αναγνώρισή τους στην εικόνα του video.
- Η βιντεοκάμερα να μην είναι ορατή από τους οδηγούς που κινούνταν στην καμπύλη, ώστε να μην επηρεάζεται η οδηγητική τους συμπεριφορά.

Όσο πιο ψηλά τοποθετείται η βιντεοκάμερα, τόσο πιο εύκολη γίνεται η φωτογραμμετρική διαδικασία της αναγωγής της εικόνας του video σε ορθή προβολή. Ο παραπάνω ισχυρισμός δικαιολογείται ως εξής: όσο πιο ψηλά βρίσκεται το σημείο παρατήρησης, τόσο η λήψη τείνει από πλάγια, να μετατραπεί σε κατακόρυφη, περιορίζοντας σημαντικά τις παραμορφώσεις στα πιο απομακρυσμένα από την κάμερα σημεία. Όμως, στο μεγάλο ύψος λήψης υπάρχει ο κίνδυνος να μην μπορούν να ανιχνευτούν ή να στοχευτούν σωστά τα φωτοσταθερά και κατά συνέπεια να μη μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια της αναγωγής. Κατά συνέπεια, οι δύο πρώτες απαιτήσεις είναι ανταγωνιστικές. Η εξισορρόπηση των δυο αυτών απαιτήσεων υπήρξε μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν στην πορεία αυτής της έρευνας. Μια ακόμη αντιξοότητα ήταν το γεγονός ότι τις πρωινές ώρες, που πραγματοποιήθηκαν όλες οι βιντεοσκοπήσεις, ο ήλιος επηρέαζε την ορατότητα των σημαδιών του οδοστρώματος από την κάμερα (όχι όμως και την ορατότητα των οδηγών). Επίσης, έγινε προσπάθεια, στα πλαίσια του δυνατού, της κάλυψης του τρίποδα της βιντεοκάμερας από βλάστηση, ώστε οι οδηγοί να μην αντιληφθούν τη βιντεοσκόπηση. Ακόμα, η κίνηση του παρατηρητή κατά τη διάρκεια της βιντεοσκόπησης ήταν περιορισμένη. Γενικώς, οι επηρεασμένοι από την κάμερα οδηγοί ήταν πολύ λίγοι και αποκλείστηκαν από το δείγμα που επιλέχθηκε για την ανάλυση κάθε καμπύλης.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι καμπύλες που επιλέχθηκαν, βρίσκονται σε ορύγματα με υψηλά πρανή και η βιντεοκάμερα τοποθετήθηκε στο φρύδι του κάθε πρανούς στην είσοδο ή στην έξοδο της καμπύλης. Στις μικρότερες ακτίνες βρέθηκαν θέσεις από τις οποίες ήταν δυνατή η λήψη και η παρατήρηση σχεδόν ολόκληρης της καμπύλης περιλαμβανομένου του κυκλικού τόξου και των τόξων συναρμογής. Στις μεγαλύτερες ακτίνες όμως, όπου το μήκος της καμπύλης δεν μπορούσε να καλυφθεί από μια κάμερα και η μορφολογία του εδάφους δεν βοηθούσε ώστε να παρατηρείται μεγαλύτερο μήκος, εξετάστηκε τμήμα της καμπύλης, χαρακτηριζόμενο από την ελκτότητά της. Ίσως η χρήση αερόστατου ή καλαθοφόρου οχήματος να έλυne το πρόβλημα αυτό, όμως η παρουσία τους θα ήταν άμεσα αντιληπτή από τους οδηγούς. Η χρήση δεύτερης κάμερας με επικαλυπτόμενο τμήμα, αν ήταν διαθέσιμη, ίσως θα μπορούσε να είναι μια πιθανή εκδοχή για να μελετηθεί μεγαλύτερο τμήμα κάθε καμπύλης. Στην παράγραφο 7.2. του Παραρτήματος 7 παρουσιάζεται ενδεικτικά η θέση λήψης μιας βιντεοσκόπησης για κάθε καμπύλη.

Για τις λήψεις χρησιμοποιήθηκε έγχρωμη ψηφιακή βιντεοκάμερα που παραχωρήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας αυτής από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το μοντέλο SONY DCR TRV80E διαθέτει φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης (4.5 mm - 45 mm) και συχνότητα λήψης 25 frames/sec. Ο φακός μεταβλητής εστιακής απόστασης με ελάχιστη τιμή 4.5 mm ήταν οριακά επαρκής για να εξασφαλίσει ικανό οπτικό πεδίο από ύψος τουλάχιστον πέντε μέτρων από την επιφάνεια του οδοστρώματος.

Η συγκεκριμένη κάμερα είχε τη δυνατότητα να βιντεοσκοπεί ταινίες μήκους μίας ώρας. Οι βιντεοσκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν καθημερινές μέρες, σε πολύ πρωινές ώρες, όπου παρατηρήθηκαν μειωμένοι κυκλοφοριακοί φόρτοι. Οι καιρικές συνθήκες βιντεοσκόπησης ήταν όσο το δυνατό ιδανικές (ηλιοφάνεια ή αραιή συννεφιά) σε όλες τις λήψεις, ώστε να υπάρχει ομοιομορφία του δείγματος σε όλες τις καμπύλες.

Η διάρκεια των λήσεων κράτησε από 2 μέχρι και 3 ώρες για κάθε καμπύλη, ώστε να συλλεχθεί το απαραίτητο αντιπροσωπευτικό δείγμα.

## 2.5. Μετρήσεις στο Εργαστήριο

Το μαγνητοσκοπημένο υλικό που συλλέχτηκε αναλύθηκε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών. Η αρχική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε ήταν η αναγωγή των βιντεοεικόνων, δηλαδή ο μετασχηματισμός της βιντεοεικόνας σε ορθή προβολή. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για κάθε λήψη κάθε στροφής και περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα “Pinnacle Studio Deluxe version 9”, με την βοήθεια του οποίου απομονώθηκαν frames οχημάτων στις χαρακτηριστικές διατομές. Στη συνέχεια, εισάγεται κάθε εικόνα ενός οχήματος στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD και χρησιμοποιώντας τα ορατά σημεία επαφής μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος υλοποιείται η προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Από τα σημεία αυτά, στις διαδοχικές χαρακτηριστικές θέσεις, μπορεί να διερευνηθεί η συμπεριφορά των οδηγών και να υπολογιστεί η ελκτικότητα της τροχιάς τους.

Πολλοί όμως είναι οι παράγοντες που επιδρούν στη συμπεριφορά ενός οδηγού. Αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από τις μηχανολογικές δυνατότητες του οχήματος, την εμπειρία, τη ψυχολογία και τις επιθυμίες του ίδιου του οδηγού, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρόμου, την ορατότητα, τις κυκλοφοριακές συνθήκες και άλλους φυσικούς περιορισμούς όπως οι καιρικές συνθήκες. Για να υπάρχει απόλυτη σιγουριά ότι οι ταχύτητες που μετρήθηκαν αντιπροσωπεύουν τις ελεύθερες ταχύτητες που επιθυμούσαν να αναπτύξουν οι οδηγοί, αλλά και ότι οι τροχιές που ακολουθούσαν στη καμπύλη ήταν αυτές που ελεύθερα επέλεξαν, χωρίς να επηρεάζονται από άλλα κυκλοφορούντα οχήματα, επιλέχθηκαν να μετρηθούν οι ταχύτητες V σε μεμονωμένα οχήματα, που απέχουν χρονικά μεταξύ τους τουλάχιστον 6 sec. Από τις μετρήσεις εξαιρούνται οχήματα, που προφανώς κινούνται αργά για διάφορους λόγους (υπερφορτισμένα, παλαιά κλπ) καθώς και τα οχήματα που ηγούνται σειράς πολλών

οχημάτων (platoon leaders) [Ψαριανός, 2001]. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι μετρήθηκαν μόνο επιβατηγά οχήματα και ελαφρά ημιφορτηγά, διότι η μελέτη περιορίζεται στη διερεύνηση της καμπυλότητας της τροχιάς μόνο τέτοιου τύπου οχημάτων. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος μέτρησης των ταχυτήτων και του προσδιορισμού της ελικτότητας της τροχιάς κάθε οχήματος.

### **2.5.1. Μετρήσεις ταχυτήτων**

Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή ταχυτήτων ήταν η μέτρηση χρόνων και αποστάσεων. Για κάθε όχημα μετρήθηκε ο χρόνος διάνυσης μιας συγκεκριμένης απόστασης μεταξύ των χαρακτηριστικών διατομών. Το πρόγραμμα “Pinnacle Studio Deluxe version 9” έχει τη δυνατότητα να μετακινεί την εικόνα μπροστά ή πίσω στην οθόνη προβολής με ταχύτητα όση και η συχνότητα λήψης της βιντεοκάμερας, δηλαδή 25 frames/sec. Έτσι, μετρώντας για κάθε όχημα τον αριθμό των παρεχόμενων frames που χρειάζεται για να διανύσει τη γνωστή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών διατομών, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της μετατόπισης σε σχέση με το χρόνο, δηλαδή της ταχύτητας του οχήματος. Για τις καμπύλες μεγαλύτερης ελικτότητας παρατηρήθηκε μια διακύμανση της ταχύτητας καθώς πλησιάζουν οι οδηγοί στην καμπύλη και καθώς απομακρύνονται. Για τις καμπύλες A και B επιλέχθηκαν οι ταχύτητες στο μέσο περίπου του κυκλικού τόξου, ενώ για τις C και D οι ταχύτητες είχαν πολύ μικρότερη μεταβολή μέσα στην καμπύλη και η επιλογή ταχύτητας σε συγκεκριμένο τμήμα δεν είχε ουσιαστική σημασία. Παρ’ όλα αυτά, στις επόμενες αναλύσεις, ως ταχύτητα του οχήματος θα θεωρείται η ταχύτητά του στο μέσο της καμπύλης. Το μήκος των τμημάτων δεν ήταν σταθερό, διότι, όπως έχει προαναφερθεί η απόσταση δυο χαρακτηριστικών διατομών σε κάθε καμπύλη εξαρτάται από την ακτίνα του κυκλικού τόξου και κυμαίνεται μεταξύ 7m – 15 m.

Οι ταχύτητες των υπό μελέτη οχημάτων παρουσιάζονται στο Παράρτημα 3 καθώς και στο Παράρτημα 4 στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

### **2.5.2. Μετρήσεις για τον υπολογισμό της ελικτότητας οχημάτων**

Για να προσδιοριστεί η ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων έπρεπε να βρεθεί μια μεθοδολογία, η οποία να δίνει όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε έρευνες που έχουν στο παρελθόν, όπως έχει αναφερθεί στο εδάφιο 1.2.1., έχουν αναπτυχθεί ειδικά προγράμματα αυτόματης αναγνώρισης του οχήματος, προσομοίωσής του με ένα τυπικό όχημα και στη συνέχεια αυτόματη εξαγωγή ενός αντιπροσωπευτικού χαρακτηριστικού σημείου που είναι το γεωμετρικό κέντρο του οχήματος. Η φωτογραμμετρική μεθοδολογία όμως, που έχει αναπτυχθεί στην παρούσα εργασία, δε θα ευνοούσε αυτή την προσέγγιση, διότι είναι απαραίτητο το αντιπροσωπευτικό σημείο του οχήματος να βρίσκεται πάνω στο επίπεδο της αναγωγής. Κατά συνέπεια, έπρεπε να βρεθεί διαφορετική λύση στο πρόβλημα.

Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση προσδιορισμού της τροχιάς του οχήματος σύμφωνα με την τροχιά ενός τροχού. Ύστερα από διερεύνηση της συμπεριφοράς των τροχών ενός οχήματος, διαπιστώθηκε ότι οι ακτίνες που διαγράφουν οι εμπροσθεν με τους όπισθεν τροχούς διαφέρουν σημαντικά. Η διαφορά αυτή περιγράφεται από μια διαφορική εξίσωση αλλά παρ’ όλα αυτά παραμένει άγνωστη η τροχιά του οχήματος

[Lamm et al., 1999]. Συνεπώς, οποιαδήποτε σκέψη να χρησιμοποιηθεί μόνο ο πίσω ή ο μπροστά τροχός στον προσδιορισμό της τροχιάς κάθε οχήματος ήταν απαγορευτική. Ένα ακόμη πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί είναι το γεγονός ότι από το σημείο της βιντεοσκόπησης δεν ήταν δυνατό να είναι ορατοί οι ίδιοι τροχοί σε όλη την καμπύλη. Σκεπτόμενοι τα παραπάνω προτείνεται ένας απλός και κατανοητός τρόπος υλοποίησης της προβολής του γεωμετρικού κέντρου ενός οχήματος στο επίπεδο της αναγωγής.

Υπενθυμίζεται ότι πριν τη διαδικασία που θα περιγραφεί στη συνέχεια, έχει προηγηθεί η απομόνωση frames τις χρονικές στιγμές που τα οχήματα διέρχονται από τις χαρακτηριστικές διατομές με τη χρήση του προγράμματος “Pinnacle Studio Deluxe version 9”. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάστηκε η απομόνωση frames και σε ενδιάμεσα σημεία μεταξύ των χαρακτηριστικών διατομών για μεγαλύτερη αξιοπιστία της μεθοδολογίας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την υλοποίηση της προβολής του γεωμετρικού κέντρου ενός οχήματος στο επίπεδο της αναγωγής είναι η εξής:

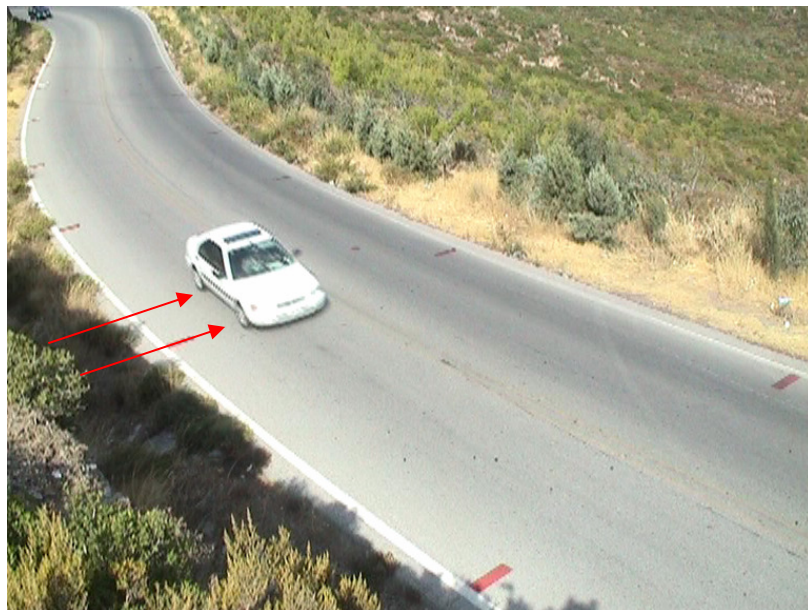
- Εισάγονται τα frames κάθε οχήματος στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD.
- Αποκαθίσταται η κλίμακα των εικόνων ώστε το μέγεθος τους να αντιστοιχεί 1 m με 1 pixel. Άρα το μέγεθος κάθε εικόνας είναι 768x576 m.
- Όταν στα οχήματα φαίνεται μόνο η μπροστά όψη του οχήματος, το σημείο που αντιπροσωπεύει το όχημα αποτελεί το μέσο της ευθείας στο οδόστρωμα που ενώνει τους δύο τροχούς. Όμοια και στην περίπτωση για την πίσω όψη του οχήματος.
- Όταν είναι ορατοί τρεις τροχοί σχεδιάζονται δυο ευθείες. Η μια ευθεία ενώνει τους δυο πλευρικούς τροχούς και η άλλη τους μετωπικούς. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε το κάθε σημείο να βρίσκεται ακριβώς στη διεπιφάνεια οδοστρώματος και ελαστικού. Κάτι τέτοιο διευκολύνεται από τη δυνατότητα του πακέτου AutoCAD για μεγάλο zoom. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η παράλληλη μιας πλευράς στο μέσο της άλλης και υλοποιείται ένα σημείο τομής. Αυτό το σημείο αποτελεί την προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος στο επίπεδο του οδοστρώματος.
- Όταν είναι ορατοί δύο πλευρικοί τροχοί λαμβάνεται η απόσταση των μετωπικών τροχών (μετατρόχιο μαζί με τα ελαστικά) από προηγούμενη ή επόμενη εικόνα, στην οποία είναι ορατοί οι μετωπικοί τροχοί. Η απόσταση αυτή, στο επίπεδο της αναγωγής, αποτελεί την πραγματική απόσταση μεταξύ των δύο έμπροσθεν ή όπισθεν τροχών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δηλαδή γίνεται έμμεσος υπολογισμός της προβολής του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος. Αναλυτικά η συγκεκριμένη διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια.
- Μεταφέρονται οι εικονοσυντεταγμένες των αντιπροσωπευτικών σημείων από το AutoCAD σε φύλλο Excel για κάθε όχημα κάθε καμπύλης. Μεταφέρονται επίσης για κάποιες διατομές, στις οποίες είναι ορατοί τρεις τροχοί, οι εικονοσυντεταγμένες των δύο σημείων διεπαφής τροχού – οδοστρώματος για τα έμπροσθεν ή όπισθεν ελαστικά.
- Αλλάζει το σύστημα αναφοράς, ώστε να συμφωνεί με το σύστημα αναφοράς της αναγωγής (+x : προς τα δεξιά, +y προς τα κάτω).
- Πραγματοποιείται ο προβολικός μετασχηματισμός και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των πιο πάνω σημείων στο επίπεδο που προσεγγίζει το οδόστρωμα. Ο προσδιορισμός του επιπέδου αναγωγής αναλύεται στο επόμενο Κεφάλαιο.



Απομένει να βρεθεί απάντηση στο ερώτημα πώς από τους δύο πλευρικούς τροχούς είναι δυνατός ο προσδιορισμός της προβολής του γεωμετρικού κέντρου ενός οχήματος. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας παρουσιάζονται δύο frames της καμπύλης Β κατά την αριστερόστροφη κίνηση.



**Εικόνα 2.6 :** Απομονωμένο frame όπου είναι ορατοί οι δύο εμπροσθεν τροχοί.



**Εικόνα 2.7 :** Απομονωμένο frame του ίδιου οχήματος όπου δεν είναι ορατοί οι δύο εμπροσθεν τροχοί.

Από την Εικόνα 2.6 μεταφέρονται δύο ζεύγη εικονοσυντεταγμένων, όπου το κάθε ένα αποτελεί το σημείο επαφής του ελαστικού με το οδόστρωμα στην εξωτερική επιφάνεια του ελαστικού. Στη συνέχεια, οι εικονοσυντεταγμένες μετασχηματίζονται σε συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς της αναγωγής για τη συγκεκριμένη καμπύλη και υπολογίζεται η απόστασή τους ( $d$ ). Αντίστοιχα, από την Εικόνα 2.7

μεταφέρονται οι εικονοσυντεταγμένες των εμπροσθεν και όπισθεν αριστερά τροχών και υπολογίζονται οι συντεταγμένες τους στο επίπεδο της αναγωγής.

Αν  $(X_{R1}, Y_{R1})$  οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του πίσω τροχού και  $(X_{F1}, Y_{F1})$  οι συντεταγμένες του εμπροσθεν τροχού (Εικ. 2.7), οι συντεταγμένες του μέσου της απόστασης είναι:

$$X_M = \frac{X_{R1} + X_{F1}}{2} \quad (2.16)$$

και

$$Y_M = \frac{Y_{R1} + Y_{F1}}{2} \quad (2.17)$$

Υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης  $a_{FIR1}$  από το δεύτερο θεμελιώδες πρόβλημα της γεωδαισίας [Μπαλοδήμου και Μπαλοδήμος, 2002-2003]:

$$a_{FIR1} = a \tan\left(\frac{X_{R1} - X_{F1}}{Y_{R1} - Y_{F1}}\right), \quad \text{με λόγο } \frac{-}{+} \text{ στη συγκεκριμένη καμπύλη} \quad (2.18)$$

Άρα,

$$a'_{FIR1} = 2\pi - |a_{FIR1}| \quad (2.19)$$

Επίσης ισχύει:

$$a_{MR1} = a'_{FIR1} \quad (2.20)$$

Άρα,

$$a_{MG} = a'_{FIR1} + \frac{\pi}{2} \quad (2.21)$$

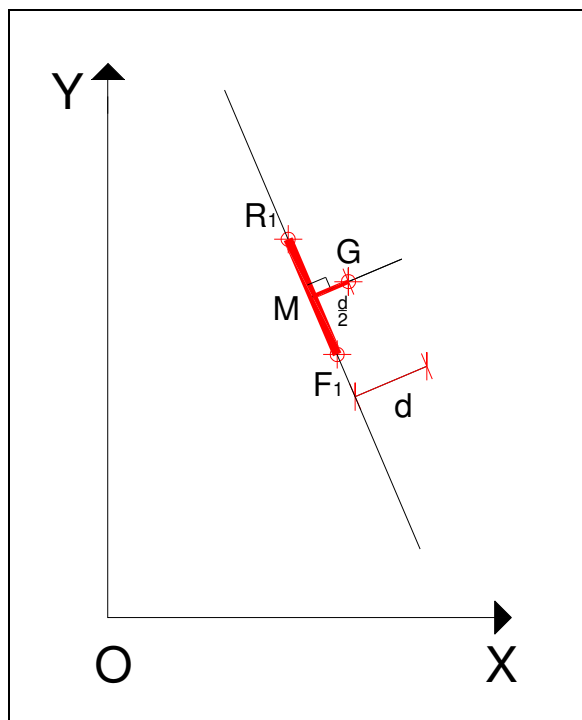
Από το πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα της γεωδαισίας υπολογίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του σημείου G  $(X_G, Y_G)$ :

$$X_G = X_M + \frac{d}{2} \cdot \sin a_{MG} \quad (2.22)$$

και

$$Y_G = Y_M + \frac{d}{2} \cdot \cos a_{MG} \quad (2.23)$$

Η παραπάνω διαδικασία συνοψίζεται στο ακόλουθο Σχήμα. Το G αποτελεί το ζητούμενο σημείο, δηλαδή την προβολή του γεωμετρικού κέντρου στη συγκεκριμένη διατομή πάνω στο επίπεδο που προσεγγίζει το οδόστρωμα.



**Σχήμα 2.5 :** Προσδιορισμός σημείου προβολής του γεωμετρικού κέντρου οχήματος από δύο πλευρικούς τροχούς.

Για τον υπολογισμό της απόστασης  $d$  κάθε οχήματος χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μια διατομές. Ο λόγος που έγινε αυτό ήταν κυρίως η αποφυγή κάποιου χονδροειδούς λάθους. Οι διαφορές στην απόσταση  $d$  που εντοπίστηκαν ανά όχημα ήταν της τάξης των 3 έως 4 cm, απόκλιση απόλυτα λογική λόγω της ύπαρξης σκιάς του οχήματος στο οδόστρωμα. Στους παραπάνω τύπους η απόσταση  $d$  είναι ο μέσος όρος των υπολογιζόμενων αποστάσεων.

Το τελικό βήμα είναι ο υπολογισμός της ελικτότητας της τροχιάς του οχήματος. Από την παραπάνω διαδικασία κάθε όχημα διαθέτει ένα σύνολο σημείων το οποίο περιγράφει την τροχιά του. Η παραδοχή που γίνεται στη συγκεκριμένη εργασία είναι ότι οι οδηγοί διαγράφουν μια νέα ακτίνα, δηλαδή οι συντεταγμένες της τροχιάς κάθε οχήματος ανήκουν σε έναν κύκλο. Άρα, σε αντίθεση με τη μελέτη στο υπεδάφιο 1.2.2., δεν εξετάζεται η παρεμβολή με splines στα ίχνη της τροχιάς ενός οχήματος.

Η παραδοχή της γραμμικής μεταβολής της γωνίας διεύθυνσης σε σχέση με το μήκος που διανύουν τα οχήματα επιβεβαιώθηκε με την εφαρμογή γωνιακού διαγράμματος για κάθε όχημα. Γωνιακό διάγραμμα πραγματοποιήθηκε για τα οχήματα στις καμπύλες A και B που θεωρούνται πιο κρίσιμες. Όπως φαίνεται και στο Παράρτημα 9 η γραμμική παρεμβολή που εφαρμόζεται στα συγκεκριμένα οχήματα έχει ιδιαίτερα υψηλό  $R^2$  (πάνω από 97%) και λόγο  $t$  για τον συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής υψηλότερο από την τιμή της κατανομής  $t$ -Student για 95% επίπεδο εμπιστοσύνης και βαθμό ελευθερίας  $v-1$ . Άρα, για κάθε όχημα που εξετάστηκε στις καμπύλες A και B, η τιμή του συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι στατιστικά σημαντική.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΓΩΓΗ ΒΙΝΤΕΟΕΙΚΟΝΩΝ

### 3. ΑΝΑΓΩΓΗ ΒΙΝΤΕΟΕΙΚΟΝΩΝ

Η συλλογή των δεδομένων για τη διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των οχημάτων (επιβατηγών και ελαφρών ημιφορτηγών) σε καμπύλα οδικά τμήματα επιλέχθηκε να γίνει με τη μέθοδο της βιντεοσκόπησης, λόγω της δυναμικότητας του φαινομένου. Η διαδικασία αυτή έχει περιγραφεί αναλυτικά στο προηγούμενο Κεφάλαιο (εδάφιο 2.4.). Για κάθε καμπύλη που επιλέχθηκε τοποθετήθηκε το σύστημα τρίποδας – κάμερα σε κατάλληλη θέση και για κάθε λήψη παρέμενε σταθερό σε όλη τη διάρκεια της βιντεοσκόπησης. Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, ώστε μετρώντας τις εικονοσυντεταγμένες σε pixel ενός σημείου του οδοστρώματος στην εικόνα, να υπολογίζονται αυτόματα οι συντεταγμένες του  $X', Y'$  στο επίπεδο της αναγωγής που προσεγγίζει το οδόστρωμα σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

#### 3.1. Γεωμετρία του Οδοστρώματος

Το βασικό πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο θα μετασχηματιστεί το επίπεδο της εικόνας στο επίπεδο της αναγωγής που προσεγγίζει καλύτερα το οδόστρωμα της κάθε καμπύλης. Η λύση του προβλήματος δόθηκε με μερικές παραδοχές ως προς τη γεωμετρία του οδοστρώματος, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Αρχικά θεωρήθηκε ότι στο κυκλικό τόξο η επίκλιση  $q\%$  είναι πρακτικά σταθερή και ότι η μεταβολή της επίκλισης πραγματοποιείται στα τόξα συναρμογής και στα ευθύγραμμα τμήματα. Η κατά μήκος κλίση  $s\%$  είναι επίσης τοπικά σταθερή (δηλαδή έγινε η παραδοχή ότι οι καμπύλες βρίσκονται σε ευθυγραμμία κατά την μηκοτομή). Με βάση τις παραπάνω παραδοχές το οδόστρωμα σε κάθε καμπύλη μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με ένα κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με την επίκλιση και την κατά μήκος κλίση που παρουσιάζει. Στην περίπτωση που η καμπύλη είχε και κυκλικό τόξο αλλά και τόξο συναρμογής με σημαντικές διαφορές στην κατά μήκος κλίση των οριογραμμών ορίστηκαν δύο ξεχωριστά επίπεδα, ένα για το κυκλικό τόξο και ένα για το τόξο συναρμογής (περίπτωση καμπύλης Α). Αναφέρεται πως μόνο με αυτό τον τρόπο μπορούσε να αυξηθεί η ακρίβεια των μετασχηματισμών.

Παρ' όλο που πρακτικά η επίκλιση και η κατά μήκος κλίση μεταβάλλονται στα κυκλικά τόξα και τα τόξα συναρμογής, τα εναπομείναντα σφάλματα που υπολογίστηκαν με τη Μ.Ε.Τ. κατά την προσαρμογή του επιπέδου είναι της τάξης των μερικών mm. Άρα οι παραδοχές που έχουν γίνει είναι και εκ του αποτελέσματος αποδεκτές.

### 3.2. Φωτογραμμετρικό Πρόβλημα

Η Φωτογραμμετρία έχει ευρύ φάσμα εφαρμογής στη μελέτη και στο σχεδιασμό δρόμων. Γενικά η Φωτογραμμετρία είναι η επιστήμη και η τεχνική απόκτησης αξιόπιστων μετρητικών πληροφοριών για φυσικά αντικείμενα και το περιβάλλον, μέσω διαδικασιών καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων, προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και άλλων φαινομένων. Στόχος της Φωτογραμμετρίας είναι ο μετασχηματισμός της κεντρική προβολής με την οποία περιγράφεται η κάθε λήψη σε ορθή προβολή [Πατιάς, 1991].

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα ώστε να βιντεοσκοπηθούν οι οδηγοί σε κάθε καμπύλη. Η συχνότητα λήψης της συγκεκριμένης βιντεοκάμερας είναι 25 frames/sec. Η διαδοχή των εικόνων στο συγκεκριμένο χρόνο δίνει την εντύπωση της συνεχούς κίνησης των οχημάτων που βιντεοσκοπούνται. Με τη βοήθεια ειδικού προγράμματος απομονώθηκαν frames χωρίς οχήματα σε κάθε βιντεοσκόπηση κάθε καμπύλης, ώστε στη συνέχεια να υποστούν την κατάλληλη επεξεργασία.

Εφόσον έχει προσδιοριστεί το κεκλιμένο επίπεδο που προσεγγίζει το οδόστρωμα κάθε καμπύλης, το επόμενο βήμα είναι να στραφούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες από το τοπικό τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς της τοπογραφικής αποτύπωσης κάθε καμπύλης σε ένα τρισδιάστατο, επίσης δεξιόστροφο, σύστημα αναφοράς στο οποίο το επίπεδο  $X'Y'$  είναι παράλληλο στο κεκλιμένο επίπεδο και ο άξονας  $Z'$  κάθετος σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο, αν έχει γίνει σωστά η διαδικασία της στροφής των συντεταγμένων, στο νέο τρισδιάστατο σύστημα  $X'Y'Z'$  όλα τα σημεία θα έχουν περίπου το ίδιο υψόμετρο. Με άλλα λόγια η διαδικασία της στροφής μετατρέπει το κεκλιμένο επίπεδο σε οριζόντιο επίπεδο (ίδιο  $Z'$ ). Το επίπεδο  $X'Y'$  αποτελεί το επίπεδο της αναγωγής. Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται στο εδάφιο 3.4. και η απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το αντικείμενο δεν έχει ανάγλυφο είναι δυνατή η πραγματοποίηση αναγωγής. Είναι δηλαδή εφικτός ο προβολικός μετασχηματισμός της εικόνας του 2D αντικειμένου (του οδοστρώματος) σε ορθή προβολή [Γεωργόπουλος, 2005-2006]. Με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων αναγωγής προσδιορίζεται η ανηγμένη εικόνα. Ύστερα υπολογίζονται οι 8 παράμετροι του προβολικού μετασχηματισμού με τη σύνταξη ειδικού προγράμματος σε γλώσσα προγραμματισμού Excel.

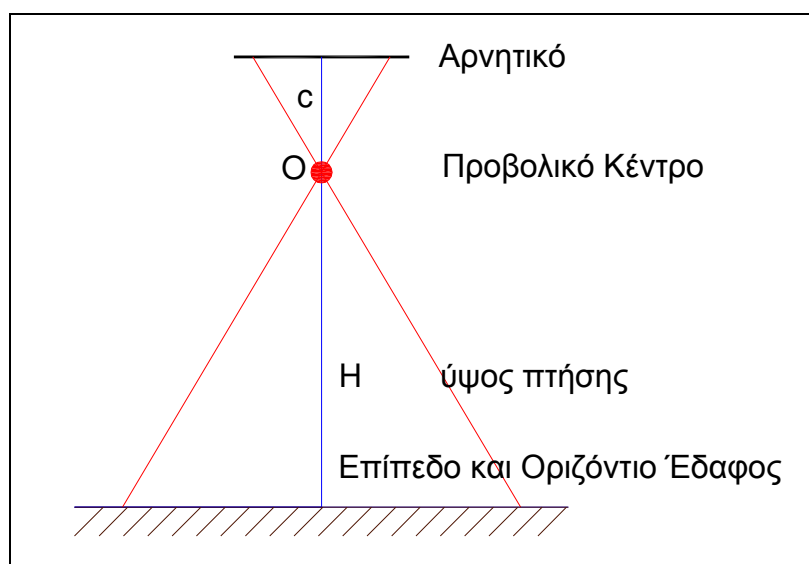
Οι Φωτογραμμετρικές μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή ορθών προβολών, όμως χρειάζεται προσοχή στις πηγές σφαλμάτων που εισάγουν, ώστε τα τελικά προϊόντα να είναι καλής ακρίβειας. Πιο συγκεκριμένα, η ακρίβεια των Φωτογραμμετρικών μεθόδων εξαρτάται και από την ακρίβεια που έχουν μετρηθεί τα Σημεία Ελέγχου [Πατιάς, 1991]. Επειδή τα σφάλματα του οργάνου στις γωνίες και τις αποστάσεις είναι πολύ μικρά με το όργανο που χρησιμοποιήθηκε, η αβεβαιότητα των συντεταγμένων των Σημείων Ελέγχου αποτύπωσης εισάγει πολύ μικρό σφάλμα στην ανηγμένη εικόνα. Οπότε, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από άλλους παράγοντες.

Πριν ξεκινήσει η ανάλυση της παραπάνω διαδικασίας βήμα προς βήμα, κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν μερικά από τα στοιχεία της Προβολικής Γεωμετρίας που ισχύουν και στη Φωτογραμμετρία. Αναλύεται επίσης η παράμετρος της κλίμακας της εικόνας στη συγκεκριμένη εφαρμογή και τέλος παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της μη μετρητικής βιντεοκάμερας που χρησιμοποιήθηκε.

### 3.2.1. Μοντέλο κεντρικής προβολής

Κάθε εικόνα θεωρείται μια κεντρική προβολή του εδάφους ή ενός αντικειμένου πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια (αρνητικό ή διαθετικό). Εξ αιτίας της μοντελοποίησης της πραγματικότητας, υπάρχουν διαφορές από την εφαρμογή των φωτογραμμετρικών σχέσεων και της αντίστοιχης πραγματικής κατάστασης. Μια τέτοια περίπτωση είναι το προβολικό κέντρο, το οποίο βρίσκεται μέσα στο σύστημα των φακών. Το σημείο αυτό δεν είναι πραγματικό. Έχει επινοηθεί ώστε να περιγράφεται η γεωμετρία της δέσμης από το μοντέλο της Κεντρικής Προβολής [Πατιάς, 1991]. Θεωρητικά όλες οι ακτίνες διέρχονται από το Προβολικό Κέντρο ενώ στην πραγματικότητα περνούν μέσα από το σύστημα των φακών το οποίο έχει φυσικές διαστάσεις που δεν είναι αμελητέες. Συνεπώς, το σύστημα αυτό δε μπορεί να θεωρηθεί σαν σημείο, σαν προοπτικό κέντρο δηλαδή, όπως θα απαιτούσε η Κεντρική Προβολή. Ύστερα από αναζήτηση του ή των σημείων στα οποία θα μπορούσε να αποδοθούν ιδιότητες του προοπτικού κέντρου βρέθηκε πως για ένα σύστημα φακών ορίζονται δύο θεωρητικά σημεία (δεσμικά σημεία) από τα οποία όλες οι ακτίνες διέρχονται χωρίς απόκλιση. Στην Κεντρική Προβολή τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στα είδωλα του διαφράγματος από την εσωτερική και εξωτερική πλευρά του φακού αντίστοιχα, που εν γένει συμπίπτουν με τα δεσμικά σημεία μόνο όταν ο φακός είναι εστιασμένος στο φωτογραφικό άπειρο [Γεωργόπουλος, 1991].

Σε αυστηρά κατακόρυφες λήψεις και για επίπεδο και οριζόντιο έδαφος το Μοντέλο της Κεντρικής προβολής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.

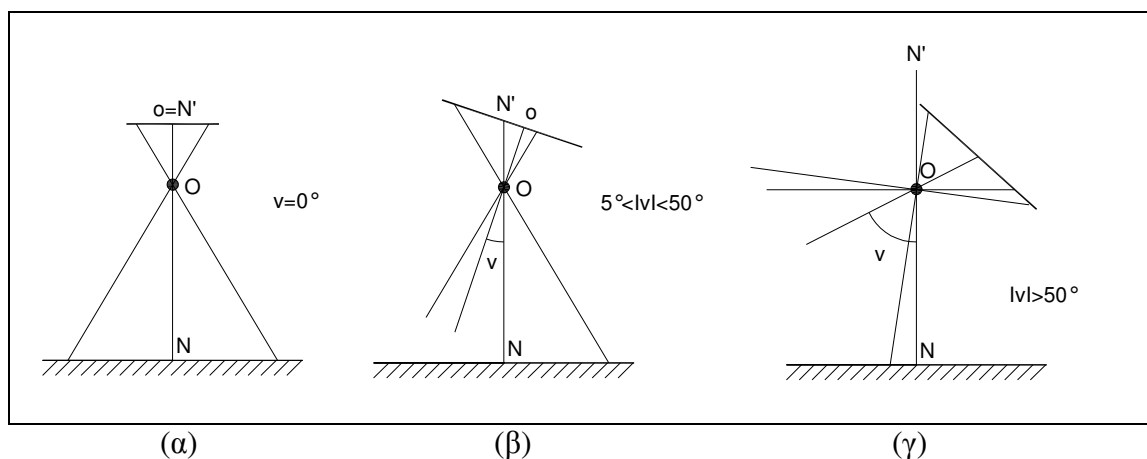


Σχήμα 3.1 : Μοντέλο κεντρικής προβολής για αυστηρά κατακόρυφη φωτογραφία.

### 3.2.2. Εφαρμογή μονοεικονικής επίγειας Φωτογραμμετρίας

Η βιντεοσκόπηση των οχημάτων στις καμπύλες θεωρείται εφαρμογή της επίγειας Φωτογραμμετρίας, διότι ο σταθμός λήψης του video και κατά συνέπεια των φωτογραφιών βρίσκεται στο έδαφος και ο άξονας λήψης δεν είναι κατακόρυφος.

Ως προς τον τρόπο λήψης οι εικόνες χαρακτηρίζονται άλλες ως κεκλιμένες και άλλες ως πλάγιες ανάλογα με τη κλίση του άξονα λήψης σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους. Όταν η ναδιρική απόσταση είναι μεταξύ των  $5^\circ$  και των  $50^\circ$  η φωτογραφία θεωρείται κεκλιμένη ενώ αν ξεπερνάει την τιμή των  $50^\circ$  είναι πλάγια [Πατιάς, 1991]. Στην περίπτωση αυτή η προβολή του ναδιρικού σημείου είναι εκτός φωτογραφίας. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί.



**Σχήμα 3.2 :** (α) Αυστηρά κατακόρυφη φωτογραφία, (β) Κεκλιμένη φωτογραφία, (γ) Πλάγια φωτογραφία.

Λόγω του ότι η ανηγμένη εικόνα προκύπτει από μία μόνο εικόνα γίνεται εφαρμογή Μονοεικονικής Φωτογραμμετρίας. Τέλος εφαρμόστηκε Ψηφιακή Απόδοση της πληροφορίας, δεδομένου ότι οι εικόνες είναι ψηφιακές.

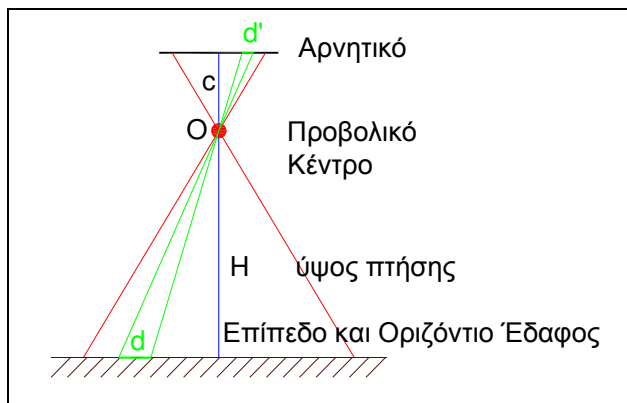
### 3.2.3. Κλίμακα εικόνας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρητικά το οδόστρωμα σε κάθε εξεταζόμενο τμήμα καμπύλης προσεγγίζεται με ένα κεκλιμένο επίπεδο. Οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του επιπέδου στη συνέχεια στρέφονται, ώστε το νέο σύστημα συντεταγμένων να ορίζει το επίπεδο  $X'Y'$  παράλληλο στο κεκλιμένο επίπεδο και τον άξονα  $Z'$  κάθετο στο επίπεδο αυτό. Με αυτό τον τρόπο οι συντεταγμένες του οδοστρώματος ορίζουν ένα οριζόντιο επίπεδο με σταθερό  $Z'$ . Αυτό συνεπάγεται ότι το αντικείμενο που μελετάται δεν έχει ανάγλυφο και η μεταβολή κλίμακας λόγω αναγλύφου θεωρείται ανεπαίσθητη.

Αν η λήψη ήταν κατακόρυφη τότε η κλίμακα της εικόνας θα ήταν προφανώς ενιαία (Σχ. 3.3). Λόγω όμως της κλίσης της μηχανής προκαλείται μεταβολή της κλίμακας. Η κλίση του άξονα της λήψης μεταβάλλει την απόσταση λήψης και με αυτό τον τρόπο προκαλούνται διαφορές στην κλίμακα απεικόνισης. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται μια κεκλιμένη φωτογραφία, στην οποία τα σημεία που έχουν μικρότερη απόσταση λήψης απεικονίζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα. Σε μια ψηφιακή εικόνα αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος του pixel αντιστοιχεί σε διαφορετική επιφάνεια του εδάφους ανάλογα με την

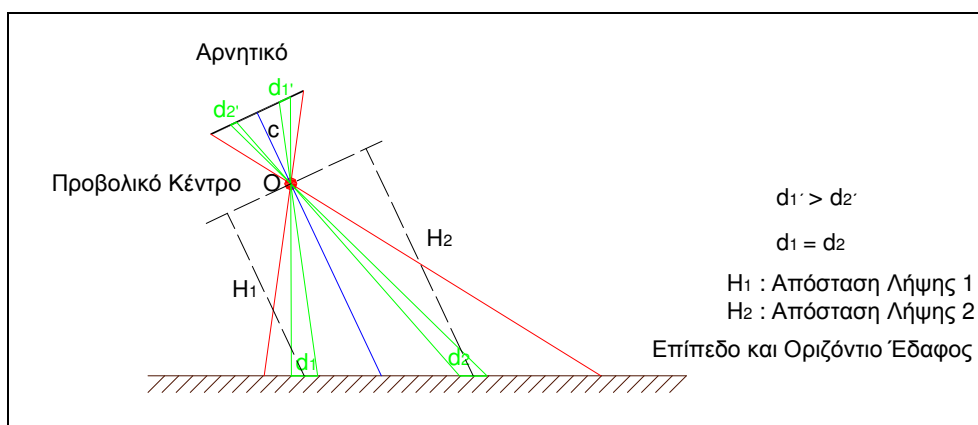


απόστασή του από την βιντεοκάμερα. Όσο πιο κοντά στην κάμερα, τόσο μικρότερη η επιφάνεια εδάφους στην οποία αντιστοιχεί ένα pixel. Αντίθετα όσο απομακρύνεται το σημείο από την κάμερα, το μέγεθος του pixel στο έδαφος αυξάνει και ένα λάθος κατά τη στόχευση των εικονοσυντεταγμένων αντιστοιχεί σε μεγάλο σφάλμα γεωδαιτικών συντεταγμένων [Γεωργόπουλος, 2005-2006].



με Κλίμακα Εικόνας  $k = \frac{c}{H} = \frac{d'}{d}$ .

**Σχήμα 3.3 :** Η ενιαία κλίμακα εικόνας σε Κατακόρυφη Λήψη με Επίπεδο και Οριζόντιο Έδαφος.



**Σχήμα 3.4 :** Μεταβολή της κλίμακας λόγω κλίσεων της μηχανής.

### 3.2.4. Χαρακτηριστικά μηχανής

Για τις λήψεις χρησιμοποιήθηκε έγχρωμη, μη μετρητική, ψηφιακή βιντεοκάμερα SONY DCR TRV80E με φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης (4.5mm-45mm) και συχνότητας λήψης 25 frames/sec που παραχωρήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας αυτής από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Οι μη μετρητικές μηχανές υστερούν σε σχέση με τις μετρητικές επειδή οι δεύτερες έχουν σταθερή εσωτερική γεωμετρία, διαθέτουν εικονοσήματα και έχουν μικρότερα σφάλματα των φακών περιορίζοντας την ακτινική διαστροφή και συνεπώς εξάγουν πιο αξιόπιστη μετρητική πληροφορία. Οι μη μετρητικές μηχανές είναι στην ουσία ερασιτεχνικές μηχανές χωρίς καμία γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας και η ακρίβειά τους είναι προφανώς μικρότερη. Αξίζει να επισημανθεί ότι μέχρι και σήμερα δεν

υπάρχουν μετρητικές βιντεοκάμερες. Τέλος, αναφέρεται ότι τα Εργαστήρια της Φωτογραμμετρίας και της Συγκοινωνιακής Τεχνικής δεν διέθεταν πιο εξελιγμένη βιντεοκάμερα με μεγαλύτερη ανάλυση και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω μοντέλο.

### 3.3. Προσδιορισμός Εξίσωσης Επιπέδου Αναγωγής

Το οδόστρωμα στις υπό μελέτη καμπύλες θεωρείται τοπικά ως ένα κεκλιμένο επίπεδο σύμφωνα με την κατά μήκος κλίση  $s\%$  και την επίκλιση  $q\%$  που έχει. Η συνισταμένη αυτών των διανυσμάτων δίνει τη λοξή κλίση που αποτελεί και την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης του επιπέδου.

Η τοπογραφική αποτύπωση απέδωσε τις συντεταγμένες σε τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς τόσο των σημείων στις οριογραμμές όσο και των σημείων ελέγχου. Τα φωτοσταθερά, σε κάθε καμπύλη, είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένα σημεία στο οδόστρωμα. Επιλέχθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στις διατομές αναφοράς καθώς και σε ενδιάμεσα σημεία του κυκλοφορούμενου χώρου. Με βάση τις τρισδιάστατες συντεταγμένες προσεγγίζεται το οδόστρωμα με ένα κεκλιμένο επίπεδο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τμήματος της καμπύλης λαμβάνονται αυτόματα υπόψη. Το επίπεδο που προσεγγίζει το οδόστρωμα υπολογίζεται με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην αναγωγή της εικόνας κρίθηκε απαραίτητο τα σημεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου κατά τη διαδικασία της αναγωγής, να συμμετέχουν ή να είναι ακριβώς τα ίδια, με τα σημεία από τα οποία θα προκύψει η εξίσωση του επιπέδου. Ο προσδιορισμός της εξίσωσης του επιπέδου πραγματοποιείται με τη Μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων [Μπαλοδήμου, 2005].

Η γενική μορφή της εξίσωσης ενός επιπέδου είναι :

$$aX + bY + cZ = d \quad (3.1)$$

Το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο αυτό και σε οποιοδήποτε παράλληλό του, ορίζεται από τους συντελεστές των  $X, Y, Z$ . Κατά συνέπεια ένα κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο είναι το  $\vec{n} = (a, b, c)$ . Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ενδιαφέρει μόνο η διεύθυνση του επιπέδου και άρα η εξίσωση του επιπέδου μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$aX + bY + cZ = 1 \quad (3.2)$$

Εφαρμόζεται η μέθοδος των έμμεσων παρατηρήσεων και αναζητούνται οι καλύτερες τιμές των  $a, b, c$  οι οποίες ελαχιστοποιούν τα υπόλοιπα.

Οι άγνωστες ανεξάρτητες καθοριστικές παράμετροι είναι  $m=3$ . Κάθε σημείο που συμμετέχει στο προσδιορισμό της εξίσωσης του επιπέδου κάθε στροφής θεωρείται και μια παρατήρηση. Άρα οι εξισώσεις παρατήρησης  $n$  είναι όσα και τα σημεία που συμμετέχουν στη συνόρθωση. Ο βαθμός ελευθερίας για κάθε στροφή αντιστοιχεί σε  $r=n-m \Leftrightarrow r=n-3$ . Σε μορφή πινάκων οι εξισώσεις παρατήρησης έχουν τη μορφή:

$$A_3^n \hat{x}_1^3 = \delta \ell_1^n + v_1^n \quad (3.3),$$

όπου:

- $A$  = ο πίνακας των μερικών παραγώγων της εξίσωσης του επιπέδου ως προς  $a$ ,  $b$ ,  $c$  με διαστάσεις  $n \times 3$ . Είναι φανερό ότι ο πίνακας  $A$  αποτελείται από  $n$  γραμμές όπου η κάθε μια περιέχει τις συντεταγμένες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μορφή του συγκεκριμένου πίνακα.

$$A_{n \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{(1)}}{\partial a} & \frac{\partial f_{(1)}}{\partial b} & \frac{\partial f_{(1)}}{\partial c} \\ \frac{\partial f_{(2)}}{\partial a} & \frac{\partial f_{(2)}}{\partial b} & \frac{\partial f_{(2)}}{\partial c} \\ \frac{\partial f_{(3)}}{\partial a} & \frac{\partial f_{(3)}}{\partial b} & \frac{\partial f_{(3)}}{\partial c} \\ \frac{\partial f_{(4)}}{\partial a} & \frac{\partial f_{(4)}}{\partial b} & \frac{\partial f_{(4)}}{\partial c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{(n)}}{\partial a} & \frac{\partial f_{(n)}}{\partial b} & \frac{\partial f_{(n)}}{\partial c} \end{bmatrix}$$

- $\bar{x}$  = το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων, διαστάσεων  $3 \times 1$ .
- $\delta\ell$  = το διάνυσμα των σταθερών όρων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα διαστάσεων  $n \times 1$ .
- $u$  = το διάνυσμα των υπολοίπων, διαστάσεων  $n \times 1$ .

Αναζητείται η λύση η οποία ικανοποιεί το σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης καθώς επίσης και τις δεσμεύσεις που υπαγορεύονται από την αρχή της Μ.Ε.Τ.:

$$S^2 = u^T P u = \min \quad (3.4)$$

Στη προκειμένη περίπτωση ο πίνακας των βαρών  $P$  θεωρείται μοναδιαίος διότι όλες οι μετρήσεις των τρισδιάστατων συντεταγμένων θεωρούνται ισοβαρείς.

Αν θεωρηθεί:  $u = A\bar{x} - \delta\ell$ , η αρχή της Μ.Ε.Τ. οδηγεί στο κανονικό σύστημα:

$$A^T A \bar{x} = A^T \delta\ell \quad (3.5)$$

Το σύστημα των κανονικών εξισώσεων περιέχει  $m$  εξισώσεις με  $m$  αγνώστους.

Για πιο εύκολο συμβολισμό θεωρήθηκε:  $N = A^T A$  και  $u = A^T P$ , οπότε το κανονικό σύστημα έχει τη μορφή:  $N\bar{x} = u$ .

Ο πίνακας  $N_m^m$  είναι τετραγωνικός και συμμετρικός. Η ορίζουσα του πίνακα  $N$  σε όλες τις περιπτώσεις είναι μη μηδενική οπότε ο πίνακας αντιστρέφεται.

Το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix} \text{ υπολογίζεται από τη σχέση πινάκων:}$$

$$\bar{x} = N^{-1}u \quad (3.6)$$

Το επόμενο βήμα ήταν η εκτίμηση των μεταβλητοτήτων μετά τη συνόρθωση. Προσδιορίστηκαν τα υπόλοιπα  $v = A\bar{x} - d\ell$  και στη συνέχεια η a posteriori μεταβλητότητα της μονάδας βάρους, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις είχε τιμή πολύ κοντά στο μηδέν. Η ερμηνεία της σχεδόν μηδενικής μεταβλητότητας της μονάδας βάρους είναι η ότι εφόσον έχει υποθεθεί αρχικά ότι η a priori μεταβλητότητα είναι μηδενική, το γεγονός ότι προκύπτει κοντά στο μηδέν a posteriori μεταβλητότητα σημαίνει πως η αρχική υπόθεση είναι σωστή και ότι οι μεταβλητότητες των καλύτερων τιμών που θα προκύψουν θα έχουν επίσης τιμή κοντά στο μηδέν.

Η a posteriori μεταβλητότητα της μονάδας βάρους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T v}{n - m} \quad (3.7)$$

Τέλος ο a posteriori πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας των καλύτερων τιμών των ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων προκύπτει :

$$\hat{V}_{\bar{x}} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (3.8)$$

Τα τυπικά σφάλματα των καλύτερων τιμών των συντελεστών της εξίσωσης του επιπέδου προκύπτουν της τάξης των μερικών δεκάτων του χιλιοστού ή στην χειρότερη περίπτωση μερικών χιλιοστών.

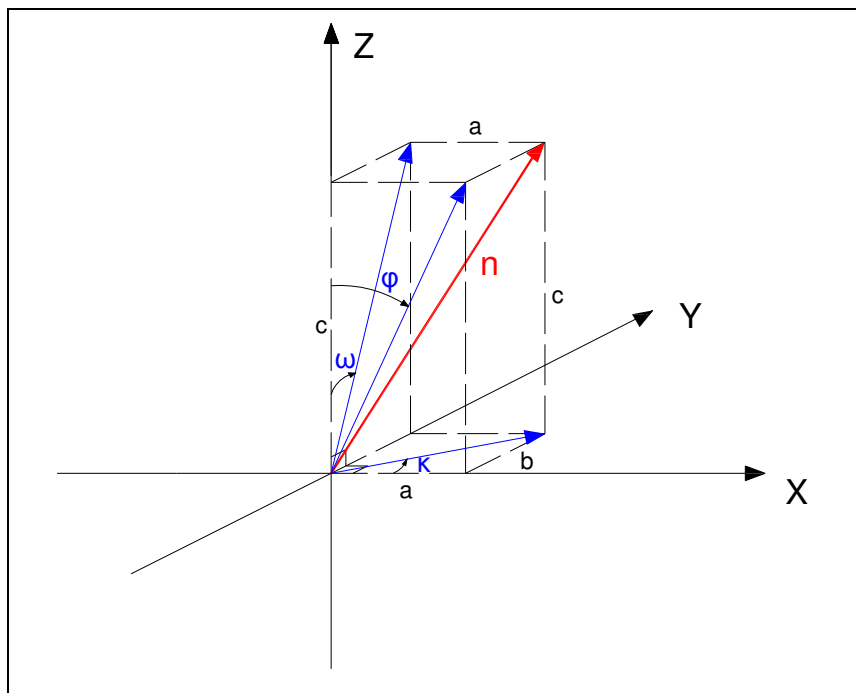
Στο Παράρτημα 2 παρουσιάζεται για κάθε καμπύλη ο πίνακας  $\hat{x}$ , τα υπόλοιπα και τα τυπικά σφάλματα των καλύτερων τιμών των παραμέτρων όπως υπολογίστηκαν με τη Μ.Ε.Τ..

### 3.4. Στροφή Επιπέδου

Στο προηγούμενο εδάφιο προσεγγίστηκε το οδόστρωμα με ένα κεκλιμένο επίπεδο. Στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων της τοπογραφικής αποτύπωσης το Z μεταβάλλεται, διότι προφανώς τα σημεία δεν ανήκουν σε οριζόντιο επίπεδο. Για να μπορεί όμως να πραγματοποιηθεί η αναγωγή της εικόνας σε κάθε καμπύλη με τη βοήθεια του προβολικού μετασχηματισμού θα πρέπει το αντικείμενο που ανάγεται, στην προκειμένη περίπτωση το οδόστρωμα, να έχει Z σταθερό. Η δέσμευση αυτή ισχύει μόνο αν στραφεί το τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων της τοπογραφικής αποτύπωσης σε ένα νέο τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων στο οποίο το επίπεδο X'Y' θα είναι παράλληλο στο επίπεδο με το οποίο έχει προσομοιωθεί το οδόστρωμα της κάθε καμπύλης. Ο άξονας Z' θα συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα και κατά συνέπεια τα σημεία του επιπέδου της αναγωγής θα έχουν περίπου το ίδιο υψόμετρο Z'. Η μέγιστη τυπική απόκλιση των υψομέτρων που παρατηρήθηκε από όλες τις καμπύλες ήταν 7,6 cm και η ελάχιστη 1 cm περίπου.

Οι μαθηματικές σχέσεις που ορίζουν το μετασχηματισμό από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο προκύπτουν ύστερα από την κατανόηση του Σχήματος 3.5. Στο Σχήμα αυτό το κόκκινο διάνυσμα αποτελεί το κάθετο διάνυσμα στο επίπεδο αναγωγής που περιγράφει το οδόστρωμα. Όπως προαναφέρθηκε το διάνυσμα αυτό είναι της μορφής:  $\vec{n} = (a, b, c)$  και αναλύεται σε τρεις συνιστώσες ως προς X, Y και Z (μπλε διανύσματα). Οι γωνίες που έχουν σχηματιστεί αποτελούν τις στροφές που πρέπει να

πραγματοποιηθούν, ώστε να μετασχηματιστούν οι συντεταγμένες από το καρτεσιανό τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων  $X, Y, Z$  στο νέο τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων  $X', Y', Z'$  (όπου το διάνυσμα  $\vec{n}$  θα είναι παράλληλο στο νέο άξονα  $Z'$ ). Πρακτικά χρειάζεται να υπολογιστούν μόνο 2 από τις τρεις γωνίες στροφής για να επιτευχθεί ο παραπάνω μετασχηματισμός συντεταγμένων. Οι γωνίες αυτές είναι οι  $\omega$  και  $\varphi$ . Η γωνία  $\kappa$  δεν επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα διότι δεν χρειάζεται το νέο σύστημα να συσχετιστεί με το γεωδαιτικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.5 : Στροφή Επιπέδου.

Από τη γεωμετρία του προβλήματος προκύπτουν οι σχέσεις:

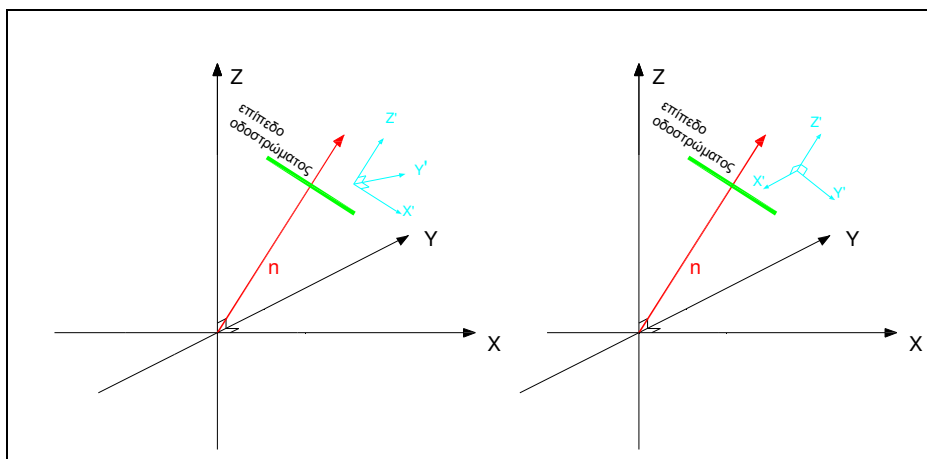
- Στροφή ως προς τον άξονα X

$$\omega = \arccos \frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}} \quad (3.9)$$

- Στροφή ως προς τον άξονα Y

$$\varphi = \arccos \frac{c}{\sqrt{a^2 + c^2}} \quad (3.10)$$

Οι γωνίες  $\omega$  και  $\varphi$  έχουν θετικό πρόσημο όταν είναι δεξιόστροφες. Ανάλογα με τη γεωμετρία του επιπέδου στο οποίο έχει προσομοιωθεί κάθε καμπύλη, τα πρόσημα των γωνιών στροφής ήταν διαφορετικά σε κάθε περίπτωση.



**Σχήμα 3.6 :** Η στροφή γύρω από τον άξονα Z' δεν επηρεάζει την διαδικασία αναγωγής.

Οι συντεταγμένες στο νέο σύστημα συντεταγμένων θα προσδιοριστούν με τη βοήθεια του ορθοκανονικού Πίνακα Στροφής  $R_{\omega\phi\kappa}$  και ισχύει:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R_{\omega\phi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Ο Πίνακας Στροφής προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό τριών επιμέρους στροφών:

$$R_{\omega\phi\kappa} = R_{\kappa} \cdot R_{\phi} \cdot R_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

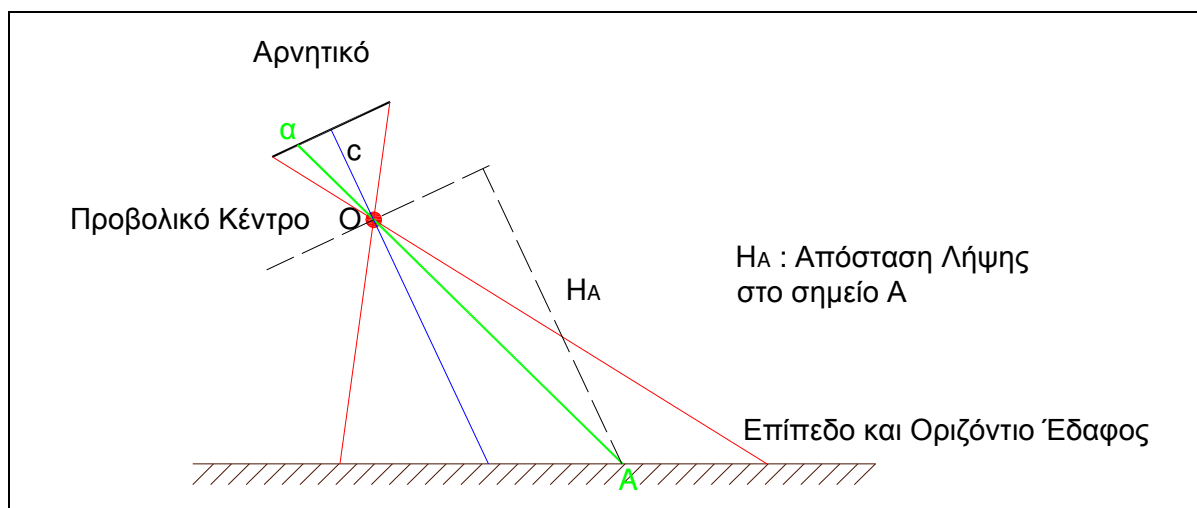
Ο Πίνακας Στροφής ως προς  $\kappa$  στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο μοναδιαίος πίνακας διότι έχει θεωρηθεί  $\kappa=0^{\text{grad}}$ .

### 3.5. Αναγωγή Κεκλιμένης Φωτογραφίας

Με τη βοήθεια του λογισμικού ‘Pinnacle Studio Deluxe version 9’ απομονώθηκαν frames χωρίς οχήματα σε κάθε βιντεοσκόπηση κάθε στροφής. Κάθε frame είναι μια ψηφιακή εικόνα. Η ψηφιακή εικόνα διαθέτει πεπερασμένο αριθμό σημείων, για τα οποία είναι γνωστά τόσο η θέση τους σε σύστημα εικονοσυντεταγμένων  $(x_i, y_i)$  όσο και το χρώμα τους. Οι διαστάσεις των εικόνων είναι 768x576 pixel. Εφόσον η κάμερα κατά τη διάρκεια κάθε λήψης παρέμενε σταθερή, αρκεί η αναγωγή μιας μόνο εικόνας της συγκεκριμένης λήψης για να περιγράψει τη γεωμετρία της και να προσδιοριστούν οι συντελεστές της αναγωγής όλων των επί μέρους frames της συγκεκριμένης βιντεοσκόπησης. Το προϊόν που παράγεται σε κάθε αναγωγή είναι μια ανηγμένη εικόνα, δηλαδή η ορθή προβολή της εικόνας.

### 3.5.1. Συνθήκη συγγραμμικότητας

Πριν περιγραφεί η διαδικασία της αναγωγής της εικόνας θεωρείται απαραίτητο να παρουσιαστεί η Συνθήκη Συγγραμμικότητας που αποτελεί την εξίσωση μιας ευθείας στο χώρο των τριών διαστάσεων, όπως υπαγορεύει το μοντέλο της Κεντρικής Προβολής, Σχήμα 3.7 [Γεωργόπουλος, 2005 - 2006].



Σχήμα 3.7 : Η Συνθήκη Συγγραμμικότητας.

Τα σημεία  $a$ ,  $A$  και  $O$  κείνται σε ευθεία και τα διανύσματα  $Oa$  και  $OA$  είναι συγγραμμικά και ισχύει:  $Oa = \lambda \cdot OA$ . Ως  $\lambda$  θεωρείται ο συντελεστής κλίμακας για το σημείο  $A$ . Το  $\lambda$  μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο διότι μπορεί το έδαφος να θεωρείται Επίπεδο και Οριζόντιο η λήψη όμως είναι κεκλιμένη ή ακόμα και πλάγια.

Η Συνθήκη Συγγραμμικότητας για την συγκεκριμένη ευθεία στο χώρο είναι:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \cdot R_{\omega\phi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} X' - X_0 \\ Y' - Y_0 \\ Z' - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.13),$$

όπου:

$x, y$  = οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου  $a$  στην εικόνα σε pixel

$X', Y', Z'$  = οι συντεταγμένες του σημείου στο χώρο

$X_0, Y_0, Z_0$  = η θέση του προβολικού κέντρου στο χώρο

$\omega, \phi$  και  $\kappa$  = ο προσανατολισμός του άξονα λήψης.

Τα τελευταία 6 στοιχεία αποτελούν τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού, τα οποία δεν προσδιορίζονται άμεσα αλλά όπως θα αποδειχθεί εμπεριέχονται στις 8 παραμέτρους του προβολικού μετασχηματισμού της αναγωγής.

Τέλος αναφέρεται ότι στις παρατηρήσεις  $x, y$  πρέπει να εμπεριέχονται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού ( $x_0, y_0$ , και  $\Delta r$ ), διαδικασία η οποία θεωρήθηκε ως δευτερεύουσα και για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήθηκε Βαθμονόμηση της βιντεοκάμερας.

### 3.5.2. Προβολικός μετασχηματισμός

Γενικά η ανηγμένη φωτογραφία μιας κεκλιμένης λήψης από τη βιντεοσκόπηση αντιστοιχεί σε μία ισοδύναμη κατακόρυφη φωτογραφία που λήφθηκε από το ίδιο κέντρο προβολής με την αντίστοιχη κεκλιμένη. Ως αναγωγή της εικόνας θεωρείται ο προβολικός μετασχηματισμός ενός 2D αντικείμενου σε ορθή προβολή [Γεωργόπουλος, 2005 -2006].

Σε προηγούμενα Εδάφια του Κεφαλαίου περιγράφηκε πώς το οδόστρωμα προσεγγίστηκε με επίπεδο και πώς μετασχηματίστηκαν οι συντεταγμένες από το τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων της τοπογραφικής αποτύπωσης σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων παράλληλο με το επίπεδο της αναγωγής. Άρα στο νέο σύστημα συντεταγμένων το οδόστρωμα αποτελεί ένα 2D αντικείμενο χωρίς ανάγλυφο (σταθερό  $Z'$ ).

Η εξίσωση συγγραμμικότητας για  $Z'=\text{σταθερό}$ , δηλαδή  $Z'-Z_0=\text{σταθερό}$ , απλοποιείται ως εξής:

$$x = -c \frac{r_{11}(X' - X_0) + r_{12}(Y' - Y_0) + r_{13}(Z' - Z_0)}{r_{31}(X' - X_0) + r_{32}(Y' - Y_0) + r_{33}(Z' - Z_0)} \Leftrightarrow x = \frac{p_1 X' + p_2 Y' + p_3}{p_7 X' + p_8 Y' + p_9} \quad (3.14)$$

$$y = -c \frac{r_{21}(X' - X_0) + r_{22}(Y' - Y_0) + r_{23}(Z' - Z_0)}{r_{31}(X' - X_0) + r_{32}(Y' - Y_0) + r_{33}(Z' - Z_0)} \Leftrightarrow y = \frac{p_4 X' + p_5 Y' + p_6}{p_7 X' + p_8 Y' + p_9} \quad (3.15)$$

Άρα,

$$x = \frac{\alpha_1 X' + \alpha_2 Y' + \alpha_3}{\alpha_7 X' + \alpha_8 Y' + 1} \quad (3.16)$$

και

$$y = \frac{\alpha_4 X' + \alpha_5 Y' + \alpha_6}{\alpha_7 X' + \alpha_8 Y' + 1} \quad (3.17)$$

Επειδή το οδόστρωμα στις καμπύλες θεωρείται επίπεδο, ο προβολικός μετασχηματισμός είναι αμφιμονοσήμαντος. Συνεπώς οι δύο κλασματικές εξισώσεις αντιστρέφονται και είναι δυνατός ο υπολογισμός των επίπεδων συντεταγμένων  $X'$ ,  $Y'$  του χώρου από τις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες  $x, y$ . Οι νέες κλασματικές εξισώσεις είναι:

$$X' = \frac{A_1 x + A_2 y + A_3}{A_7 x + A_8 y + 1} \quad (3.18)$$

και

$$Y' = \frac{A_4 x + A_5 y + A_6}{A_7 x + A_8 y + 1} \quad (3.19)$$

Ο υπολογισμός των οκτώ παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού απαιτεί να είναι γνωστές οι γεωδαιτικές συντεταγμένες  $X'$ ,  $Y'$  τεσσάρων τουλάχιστον σημείων και οι αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες τους, καθώς κάθε φωτοσταθερό αντιστοιχεί σε δύο εξισώσεις παρατήρησης. Επειδή σε όλες τις αναγωγές που έχουν πραγματοποιηθεί τα φωτοσταθερά ξεπερνούν τα τέσσερα, ο υπολογισμός των παραμέτρων έχει γίνει με τη Μ.Ε.Τ. ώστε να ληφθούν υπόψη περισσότερες διατιθέμενες πληροφορίες. Τα φωτοσταθερά θα μπορούσαν να περιοριστούν σε τέσσερα ή σε πέντε όμως θα ήταν χειρότερη η ανηγμένη εικόνα και σε κάποια σημεία

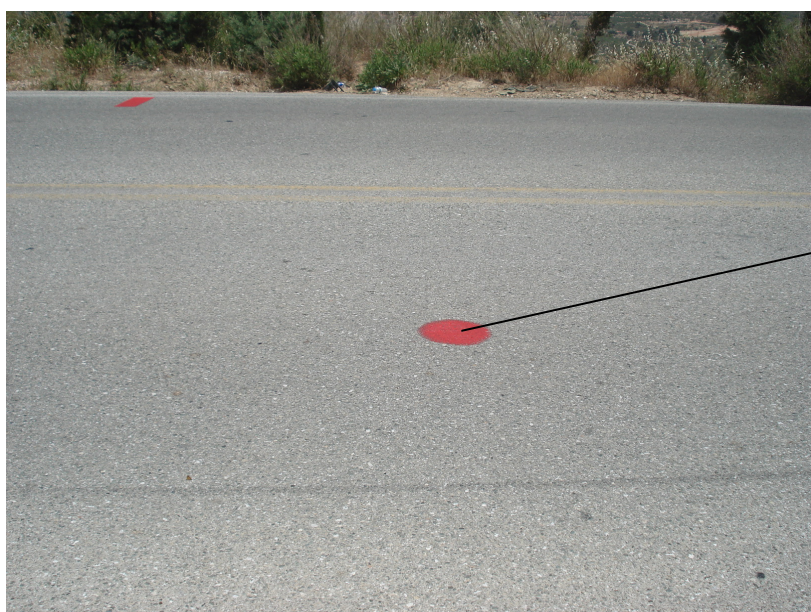


οι αποκλίσεις των φωτοσταθερών στην εικόνα με τις γεωδαιτικές τους συντεταγμένες στο σύστημα  $X', Y', Z'$  ήταν σημαντικές. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμο να αυξηθεί ο αριθμός των φωτοσταθερών βελτιώνοντας την εικόνα της αναγωγής και κρατώντας την τελική ακρίβεια στα ίδια περίπου επίπεδα. Τα φωτοσταθερά που επιλέχθηκαν ήταν, σε όλες τις περιπτώσεις, ομοιόμορφα κατανομημένα στο οδόστρωμα ώστε το προϊόν της αναγωγής να αποτελεί την ορθή προβολή σε όλο το μήκος μελέτης της καμπύλης. Ως σημεία ελέγχου θεωρήθηκαν συγκεκριμένα σημεία στις διατομές αναφοράς καθώς και σημεία διασκορπισμένα σε όλο το κυκλοφορούμενο χώρο. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων είχαν σημειωθεί στο αυτοσχέδιο κάθε καμπύλης οι θέσεις των φωτοσταθερών καθώς και ο αύξων αριθμός τους για την αποφυγή συγχύσεων των σημείων. Στις Εικόνες 3.1 και 3.2 που ακολουθούν απεικονίζονται μερικά σημεία ελέγχου για την καμπύλη Β.



Φωτοσταθερό στο μέσο του παραλληλόγραμμου προς την εξωτερική οριογραμμή.

**Εικόνα 3.1 :** Φωτοσταθερό επί χαρακτηριστικής διατομής.



Φωτοσταθερό στο κέντρο του κύκλου.

**Εικόνα 3.2 :** Φωτοσταθερό επί οδοστρώματος.

Η διαδικασία της αναγωγής πραγματοποιήθηκε αρχικά με τη βοήθεια των προγραμμάτων αναγωγής RDF και ARCHIS. Ύστερα από σύγκριση αποτελεσμάτων του τελικού προϊόντος διαπιστώθηκε ότι το πρόγραμμα ARCHIS δίνει καλύτερα αποτελέσματα και όλες οι αναγωγές πραγματοποιήθηκαν τελικά με αυτό. Το πλεονέκτημα του ARCHIS είναι ότι έχει τη δυνατότητα εισαγωγής και δεκαδικών στις εικονοσυντεταγμένες πράγμα που βελτιώνει σημαντικά τη στόχευση των πιο απομακρυσμένων από τη βιντεοκάμερα σημείων. Στο πρόγραμμα αυτό εισάγονται δύο στοιχεία, η εικόνα που θα μετασχηματιστεί και οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων ελέγχου σε σύστημα συντεταγμένων  $X', Y'$ . Στη συνέχεια στοχεύονται οι εικονοσυντεταγμένες κάθε φωτοσταθερού με μεγάλη ακρίβεια, διότι το πρόγραμμα έχει δυνατότητα μεγέθυνσης της εικόνας. Μετά τη στόχευση του τέταρτου φωτοσταθερού προσδιορίζεται η πρώτη λύση και με το επόμενο ξεκινάει η διαδικασία της συνόρθωσης και εμφανίζονται τα σφάλματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων από τον μετασχηματισμό. Έγινε προσπάθεια το μέσο υπόλοιπο στις συντεταγμένες να μην ξεπερνά τα 20 cm, διότι, όπως αναλύεται και στο Παράρτημα 5, το σφάλμα αυτό αποτελεί οριακή τιμή για τον ακριβή υπολογισμό των ελκτοτήτων των τροχιών των οχημάτων και των ταχυτήτων στις οποίες αντιστοιχούν οι ελκτοότητες. Η μέση τιμή των υπολοίπων για όλες τις καμπύλες κυμαίνεται από 3 έως 16 πόντους. Τέλος, η τιμή που εκφράζει το τυπικό σφάλμα της μιας μέτρησης για όλο τον πληθυσμό, δεν ξεπερνά σε καμία καμπύλη τα 20 cm. Η μέγιστη τιμή της εντοπίστηκε στην καμπύλη D, όπου το σημείο λήψης ήταν σε πολύ υψηλό σημείο και το μέγεθος του pixel αντιστοιχούσε σε μεγαλύτερη επιφάνεια οδοστρώματος. Στο Παράρτημα 2 επισημαίνονται τα παραπάνω στοιχεία για κάθε καμπύλη.

Αναφέρεται επίσης ότι το σύστημα των εικονοσυντεταγμένων είναι σε pixel και ξεκινά από την πάνω αριστερή γωνία της εικόνας με αύξουσες τιμές  $x$  προς τα δεξιά και  $y$  προς τα κάτω. Πράγματι, στο προβολικό μετασχηματισμό οι μετρήσεις των εικονοσυντεταγμένων μπορεί να μην αναφέρονται στο σύστημα οριζόμενο από εικονοσήματα που έχουν οι μετρητικές μηχανές. Ευνοείται με αυτό τον τρόπο η χρήση του μετασχηματισμού για μη μετρητικές, ερασιτεχνικές κάμερες όπως είναι και η συγκεκριμένη βιντεοκάμερα λήψης.

Επισημαίνεται ότι οι μετρημένες συντεταγμένες δεν είναι απαραίτητο να έχουν διορθωθεί εκ των προτέρων από τα τυχόν γραμμικά σφάλματα της ίδιας της εικόνας (συρρίκνωση) ή και του συστήματος μέτρησης. Ο προβολικός μετασχηματισμός “ενσωματώνει” όλες τις γραμμικές μεταβολές. Τις μη γραμμικές όμως, όπως είναι η ακτινική διαστρόφη του φακού δεν τις διορθώνει. Αν γίνει η παραδοχή ότι η ατμοσφαιρική διάθλαση και η καμπυλότητα της γης έχουν πολύ μικρή επίδραση λόγω των μικρών αποστάσεων λήψης, μόνο η ακτινική διαστρόφη εισάγει σφάλματα [Καρράς, 1998]. Όμως τα σφάλματα των φακών είναι πολύ μικρότερα από τα σφάλματα που προκαλούνται λόγω των παραδοχών που έχουν γίνει περί επιπεδότητας του οδοστρώματος και στροφής του συστήματος συντεταγμένων με συνέπεια η επίδρασή τους στην ανηγμένη εικόνα να θεωρείται αμελητέα. Για τους παραπάνω λόγους θεωρήθηκε πως η διαδικασία της διόρθωσης των εικονοσυντεταγμένων από ακτινική διαστρόφη του φακού της μηχανής μπορεί να μην πραγματοποιηθεί. Επισημαίνεται γενικότερα ότι στην αναγωγή δεν είναι απαραίτητη η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού.

Γενικότερα αναφέρεται ότι οι κλασματικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν νωρίτερα εκφράζουν, με τους κατάλληλους συντελεστές, τη σχέση δύο επίπεδων προβολικών

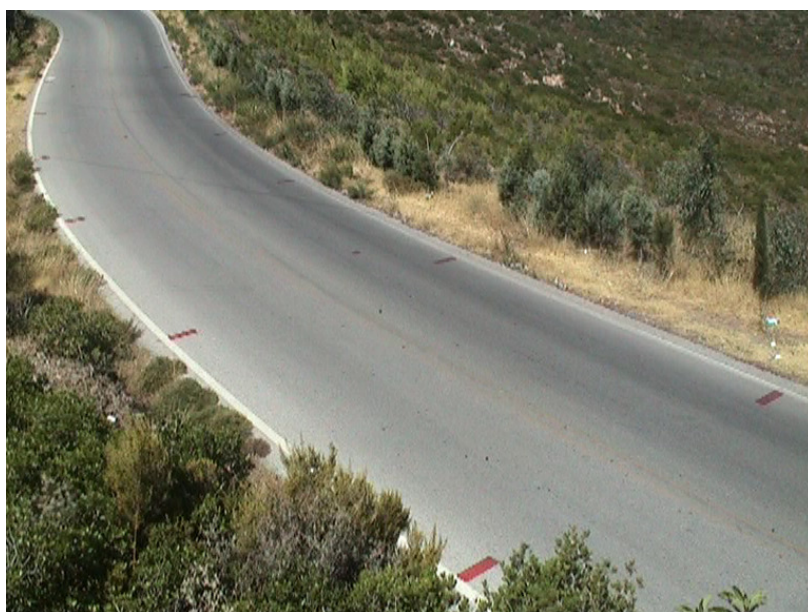


σημειοσυνόλων  $x,y$  και  $X',Y'$ . Δηλαδή μετά τη λήψη “καταργείται” η συγκεκριμένη προοπτική θέση εικόνας – επιπέδου και απομένει το σημειοσύνολο της εικόνας, το οποίο βρίσκεται σε προβολική σχέση με το αντίστοιχο σημειοσύνολο του επιπέδου. Συνεπώς, ενώ η λήψη έχει γίνει με συγκεκριμένο εσωτερικό και εξωτερικό προσανατολισμό, η γεωμετρική σχέση ανάμεσα στα εικονοσημεία και τα ομόλογα σημεία του χώρου είναι πλέον ανεξάρτητη της συγκεκριμένης γεωμετρίας της λήψης. Μπορεί δηλαδή να έχει προέλθει από απειρία συνδυασμών μηχανής λήψης, σημείου λήψης και προσανατολισμού [Καρράς, 1998].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες από την καμπύλη Β.



**Εικόνα 3.3 :** Άποψη θέσης της βιντεοκάμερας.



**Εικόνα 3.4 :** Απομονωμένο frame από τη βιντεοσκόπηση – Εικόνα προ αναγωγής.



Εικόνα 3.5 : Ανηγμένη εικόνα στο Σύστημα Συντεταγμένων X', Y'.

### 3.5.3. Αναλυτική αναγωγή εικόνας – Προσδιορισμός 8 παραμέτρων προβολικού μετασχηματισμού

Οι 8 παράμετροι  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$  του 2D μετασχηματισμού κεντρικής προβολής του επιπέδου της αναγωγής της κεκλιμένης φωτογραφίας σε ορθή προβολή προσδιορίζονται με την βοήθεια της Μ.Ε.Τ. [Πατιάς, 1991].

- **Δεδομένα:** Οι συντεταγμένες τουλάχιστον τεσσάρων φωτοσταθερών στο επίπεδο  $X', Y'$ .
- **Παρατηρήσεις :** Οι συντεταγμένες σε pixel  $(x_i, y_i)$  των ίδιων φωτοσταθερών. Έχει αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο το σύστημα των εικονοσυντεταγμένων της ψηφιακής εικόνας.

Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται η μέθοδος των έμμεσων παρατηρήσεων όπου προσδιορίζονται οι καλύτερες τιμές των 8 άγνωστων ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων. Οι εξισώσεις παρατήρησης είναι οι κλασματικές εξισώσεις (3.18) και (3.19):

$$X' = \frac{A_1x + A_2y + A_3}{A_7x + A_8y + 1} \text{ και } Y' = \frac{A_4x + A_5y + A_6}{A_7x + A_8y + 1}$$

Κάθε φωτοσταθερό συμβάλλει με δύο τέτοιες εξισώσεις. Έτσι για  $N$  φωτοσταθερά έχουμε  $n=2N$  εξισώσεις με  $m=8$  άγνωστες ανεξάρτητες καθοριστικές παραμέτρους.

Οι εξισώσεις παρατήρησης σε μορφή πινάκων γράφονται:  $A_8^n \bar{x}_1^8 = \delta \ell^n + \nu_1^n$  και το κανονικό σύστημα ώστε να ισχύει η αρχή των ελαχίστων Τετραγώνων είναι :  $A^T A \bar{x} = A^T \delta \ell$  διαστάσεων  $8 \times 8$ .

Αν τεθεί:

$$f_1(i) : -A_1x_i - A_2y_i - A_3 + A_7x_iX'_i + A_8y_iY'_i = -X'_i \quad (3.20)$$

και

$$f_2(i) : -A_4x_i - A_5y_i - A_6 + A_7x_iY'_i + A_8y_iY'_i = -Y'_i \quad (3.21)$$

η μορφή των εξισώσεων, στις οποίες όπως φαίνεται κατ' οικονομία εμπλέκονται οι άγνωστοι  $A_7$  και  $A_8$  με τις παρατηρήσεις  $x$  και  $y$  είναι:

$$A_{n \times 8} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_1} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_2} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_3} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_4} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_5} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_6} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_7} & \frac{\partial f_1(1)}{\partial A_8} \\ \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_1} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_2} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_3} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_4} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_5} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_6} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_7} & \frac{\partial f_2(1)}{\partial A_8} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_1} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_2} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_3} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_4} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_5} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_6} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_7} & \frac{\partial f_1(n)}{\partial A_8} \\ \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_1} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_2} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_3} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_4} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_5} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_6} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_7} & \frac{\partial f_2(n)}{\partial A_8} \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow A_{n \times 8} = \begin{bmatrix} -x_1 & -y_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & x_1 X'_1 & y_1 Y'_1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1 & -y_1 & -1 & x_1 Y'_1 & y_1 X'_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -x_n & -y_n & -1 & 0 & 0 & 0 & x_n X'_n & y_n Y'_n \\ 0 & 0 & 0 & -x_n & -y_n & -1 & x_n Y'_n & y_n X'_n \end{bmatrix}$$

$$\delta \ell_{n \times 1} = \begin{bmatrix} -X'_1 \\ -Y'_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ -X'_n \\ -Y'_n \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα των καλύτερων τιμών των άγνωστων ανεξάρτητων καθοριστικών παραμέτρων:

$$\hat{x}_{8 \times 1} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{bmatrix}$$

προσδιορίζεται από τη σχέση πινάκων:  $\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \delta \ell$  (3.22), καθώς οι μετρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς και ο πίνακας P μοναδιαίος.

Από τη στιγμή που θα προσδιοριστούν οι παράμετροι του μετασχηματισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετασχηματισμό οποιουδήποτε σημείου του οδοστρώματος της φωτογραφίας  $(x_i, y_i)$  στο επίπεδο της αναγωγής  $(X'_i, Y'_i)$  σύμφωνα με τις κλασματικές εξισώσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις που χρειαζόταν επαναφόρτιση η μπαταρία της κάμερας ή τελείωνε η κασέτα αναπαραγωγής, μπορεί ο τρίποδας να έμενε ακίνητος, όμως η κάμερα δεν επανατοποθετήθηκε ακριβώς στην ίδια θέση και για το λόγο αυτό η φωτογραμμετρική διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω έπρεπε να πραγματοποιηθεί εξ αρχής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά οι παράμετροι του προβολικού μετασχηματισμού μιας λήψης για κάθε στροφή.

▪ Καμπύλη Α

Η καμπύλη αυτή περιγράφηκε με δύο επίπεδα διότι η επίκλιση της οδού στο υπό μελέτη τμήμα δεν ήταν σταθερή και δεν ήταν δυνατή η προσέγγιση του οδοστρώματος μόνο από ένα επίπεδο.

1 <sup>ο</sup> τμήμα	
A <sub>1</sub>	-1.21349
A <sub>2</sub>	-20.33257
A <sub>3</sub>	1037.80513
A <sub>4</sub>	-0.99032
A <sub>5</sub>	-19.89831
A <sub>6</sub>	817.39774
A <sub>7</sub>	-0.00106
A <sub>8</sub>	-0.02041

2 <sup>ο</sup> τμήμα	
A <sub>1</sub>	-3.76638
A <sub>2</sub>	-30.48723
A <sub>3</sub>	1058.55983
A <sub>4</sub>	-3.42257
A <sub>5</sub>	-29.98673
A <sub>6</sub>	704.82828
A <sub>7</sub>	-0.00351
A <sub>8</sub>	-0.03072

▪ Καμπύλη Β

A <sub>1</sub>	1.63408
A <sub>2</sub>	15.24956
A <sub>3</sub>	975.74054
A <sub>4</sub>	1.41637
A <sub>5</sub>	14.52737
A <sub>6</sub>	1084.86120
A <sub>7</sub>	0.00150
A <sub>8</sub>	0.01516

▪ Καμπύλη C

A <sub>1</sub>	-0.66604
A <sub>2</sub>	-3.53672
A <sub>3</sub>	989.27192
A <sub>4</sub>	-0.65040
A <sub>5</sub>	-3.58356
A <sub>6</sub>	990.68764
A <sub>7</sub>	-0.00066
A <sub>8</sub>	-0.00356

▪ Καμπύλη D

A <sub>1</sub>	0.74685
A <sub>2</sub>	5.86436
A <sub>3</sub>	1095.68027
A <sub>4</sub>	0.54546
A <sub>5</sub>	6.21447
A <sub>6</sub>	1135.47520
A <sub>7</sub>	0.00070
A <sub>8</sub>	0.00622

**Πίνακας 3.1 :** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των οκτώ παραμέτρων αναγωγής για κάθε καμπύλη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ



## 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παρούσα έρευνα η διαδικασία ανάλυσης των στοιχείων διαχωρίστηκε σε έξι στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την ανάλυση των μετρήσεων ταχυτήτων των οχημάτων και τον προσδιορισμό της λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$ . Στο δεύτερο, αναζητείται εξίσωση που συσχετίζει τη  $V_{85}$  με την ελκτικότητα της χάραξης. Το τρίτο συγκρίνει τις λειτουργικές ταχύτητες σύμφωνα με τις θεωρητικές ταχύτητες που προβλέπουν οι Ελληνικοί και Αμερικανικοί Κανονισμοί, ενώ στο τέταρτο στάδιο υπολογίζεται η πραγματική ελκτικότητα της τροχιάς των οχημάτων. Στο προτελευταίο εδάφιο του κεφαλαίου αναζητείται μια σχέση μεταξύ της ταχύτητας του οχήματος με την ελκτικότητα της τροχιάς του και στο τελευταίο μια σχέση μεταξύ της  $V_{85}$  και της μέσης πραγματικής ελκτικότητας της τροχιάς τους.

### 4.1. Ανάλυση Μετρήσεων Ταχυτήτων

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδηγών σε καμπύλες υπεραστικών οδών κρίνεται απαραίτητη η μελέτη των χαρακτηριστικών της ταχύτητας που αναπτύσσουν σε αυτές. Όπως και σε άλλες μετρήσεις κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών, η συγκεκριμένη μελέτη συνοδεύεται από δειγματοληπτική έρευνα και από στατιστική ανάλυση.

#### 4.1.1. Καθορισμός του μεγέθους δείγματος ταχυτήτων

Είναι προφανές ότι η ανάλυση όλου του πληθυσμού οχημάτων σε μια καμπύλη δεν είναι εφικτή για πολλούς λόγους (οικονομικούς, χρονικούς, τεχνικούς κλπ). Συνεπώς, μελετάται δείγμα του συγκεκριμένου πληθυσμού. Το μέγεθος του δείγματος ταχυτήτων που θα επιλεγεί πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό, δηλαδή να αναπαριστά τη μεταβλητότητα των ταχυτήτων του πληθυσμού των οχημάτων για κάθε καμπύλη.

Χρησιμοποιώντας τη μεταβλητότητα των στοιχείων του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί το φάσμα τιμών μέσα στο οποίο είναι πιθανό να βρίσκεται η μέση τιμή του πληθυσμού [Kennedy and Neville, 1964] και [Βυθούλκας, 2006]. Επισημαίνεται ότι το φάσμα τιμών μεταβάλλεται ανάλογα με την πιθανότητα που έχει η πραγματική μέση τιμή του πληθυσμού να βρίσκεται στο συγκεκριμένο φάσμα (συνήθως 95% ή 99%). Άρα, το μέγεθος του δείγματος υπολογίζεται για ένα συγκεκριμένο επίπεδο ακρίβειας. Αναφέρεται επίσης ότι η ακρίβεια των εκτιμήσεων μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής του δείγματος, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του.

Για να είναι συγκεκριμένο το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται, είναι απαραίτητο να οριστούν δυο στοιχεία:

- Το μέγεθος του μέγιστου επιτρεπτού σφάλματος της μέσης τιμής του δείγματος από τη μέση τιμή του πληθυσμού.
- Το επίπεδο εμπιστοσύνης ότι το σφάλμα στον υπολογισμό δεν υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα. (π.χ. αποδοχή ότι στο 5% των περιπτώσεων θα υπάρχει υπέρβαση).

Εξετάζοντας παλαιότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε υπεραστικές οδούς 2 λωρίδων κυκλοφορίας με ενιαίο οδόστρωμα, το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα κυμαίνεται από  $\pm 1$  mile/h έως  $\pm 5$  miles/h, δηλαδή  $\pm 1.6$  km/h έως  $\pm 8$  km/h [Robertson, 1994]. Το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνεται  $e = \pm 3$  km/h.

Το επίπεδο εμπιστοσύνης λαμβάνεται ίσο με 95%, υπάρχει δηλαδή πιθανότητα 5% η διαφορά μεταξύ μέσης τιμής δείγματος και μέσης τιμής πληθυσμού να ξεπερνάει το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα.

Σύμφωνα με τον Robertson [1994] και τους Kennedy και Neville [1964], η γενική σχέση που συνδέει τις παραπάνω παραμέτρους για τον προσδιορισμό του μεγέθους ενός δείγματος, είναι η εξής:

$$z = \frac{|\bar{x} - \mu|}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (4.1),$$

όπου:

$|\bar{x} - \mu| = e$  [km/h] = το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα,

$\sigma$  [km/h] = η τυπική απόκλιση του πληθυσμού,

$z$  = ο συντελεστής του επιπέδου εμπιστοσύνης στην Τυποποιημένη Κανονική Κατανομή,

$n$  = το μέγεθος του δείγματος.

Επειδή για κάθε καμπύλη χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο δείγμα, η καλύτερη εκτίμηση της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  του πληθυσμού, είναι η τυπική απόκλιση  $S$  του δείγματος και η καλύτερη εκτίμηση του  $\mu$ , είναι ο μέσος όρος. Συνεπώς, το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής του πληθυσμού  $\mu$ , για μεγάλο πληθυσμό, όπως ισχύει στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι :

$$S(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.2)$$

Άρα, από τη σχέση (4.1), συνεπάγεται:

$$z = \frac{e}{S / \sqrt{n}} \quad (4.3)$$

Λύνοντας τη σχέση ως προς  $n$ , προκύπτει:

$$n = \frac{z^2 \cdot S^2}{e^2} \quad (4.4)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει το μέγεθος του δείγματος, το οποίο δεδομένου του συντελεστή του επιπέδου εμπιστοσύνης διατηρεί το σφάλμα της δειγματοληψίας μέσα στα προσδιορισμένα όρια. Το επίπεδο εμπιστοσύνης που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη έρευνα είναι το 95% και ο συντελεστής  $z$  της Τυποποιημένης Κανονικής Κατανομής, για αμφίπλευρο έλεγχο, προκύπτει ίσος με 1.96.

Η τυπική απόκλιση  $S$ , του δείγματος μπορεί να ληφθεί αντίστοιχα με το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα  $e$ , από προηγούμενες έρευνες. Σύμφωνα με τον Robertson [1994], για υπεραστικές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας με ενιαίο οδόστρωμα η τυπική απόκλιση λαμβάνεται ως  $\pm 5.3$  miles/h, δηλαδή περίπου  $\pm 8.5$  km/h. Σε

προηγούμενη έρευνα [Πουλίδης, 1991], η τυπική απόκλιση θεωρήθηκε ίση με 13 km/h.

Λόγω της διαφοράς στην τιμή της  $S$ , που παρατηρήθηκε από έρευνα σε έρευνα, κρίθηκε ορθότερο να μετρηθούν οι ταχύτητες μικρού δείγματος οχημάτων, περίπου 20 οχήματα ανά κατεύθυνση, ώστε να προκύψει μια πρώτη ένδειξη της τυπικής απόκλισης του δείγματος κάθε καμπύλης. Οι καμπύλες A, B και C παρουσίασαν τυπική απόκλιση ταχυτήτων μικρότερη από 8 km/h, ενώ η καμπύλη D, λόγω των υψηλών ταχυτήτων που μπορούν να αναπτυχθούν στην καμπύλη, παρουσίασε  $S$  περίπου 14 km/h. Συνεπώς, η τιμή της τυπικής απόκλισης  $S$ , του δείγματος λαμβάνεται λίγο μεγαλύτερη, με τιμή 14.5 km/h.

Αντικαθιστώντας τα  $e$ ,  $z$  και  $S$  στη σχέση (4.4), λαμβάνεται δείγμα μεγέθους  $n = 90$  οχημάτων ανά καμπύλη.

Στις μετρήσεις που έγιναν, στη συγκεκριμένη εργασία, μετρήθηκαν κατά μέσο όρο 100 οχήματα ανά καμπύλη, το ήμισυ των οποίων σε κάθε λωρίδα κυκλοφορίας. Τα οχήματα στα οποία έγινε ο υπολογισμός της  $V$  και της τροχιάς τους απείχαν χρονικά μεταξύ τους τουλάχιστον 6 sec, ώστε να θεωρούνται μεμονωμένα [Ψαριανός, 2001]. Σε άλλες έρευνες, το κρίσιμο διάκενο θεωρήθηκε 5 sec [H.C.M., 1994]. Επίσης, εξαιρέθηκαν οχήματα, τα οποία κινήθηκαν αργά για διάφορους λόγους (υπερφορτισμένα, παλαιά) καθώς και τα οχήματα, που ηγούνται σειράς οχημάτων (platoon leaders).

Τέλος, σημειώνεται ότι για τις καμπύλες A, B και C θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση του  $n$  για  $S = 8$  km/h, διότι η τυπική απόκλιση, που παρουσιάζει το δείγμα τους, είναι μικρότερη από αυτή τη τιμή. Τα συνολικά οχήματα ανά καμπύλη, για αυτή τη διασπορά, προκύπτουν πολύ λιγότερα (περίπου 30).

#### 4.1.2. Έλεγχος κανονικότητας του δείγματος ταχυτήτων

Για τον έλεγχο της κανονικότητας του δείγματος χρησιμοποιείται η μέθοδος ελέγχου Kolmogorov – Smirnov, η οποία θεωρείται στατιστικά πιο πλεονεκτική και αξιόπιστη σε σχέση με τον έλεγχο  $X^2$  [Ψαριανός, 2001]. Η μέθοδος στατιστικού ελέγχου Kolmogorov – Smirnov χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της  $V_{85}$  με τη βοήθεια φορητών ραδιοεντοπιστών, που μετρούν τις στιγμιαίες ταχύτητες  $V$  οχημάτων σε μια καθορισμένη θέση. Όμως, στην παρούσα έρευνα, η μέτρηση της ταχύτητας  $V$  ενός οχήματος υπολογίζεται έμμεσα, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, θεωρώντας ως στιγμιαίες ταχύτητες τις ταχύτητες σε ένα μικρό τμήμα στο μέσο της καμπύλης. Η παραδοχή αυτή επαρκεί για την εφαρμογή της ίδια μεθοδολογίας και στη συγκεκριμένη περίπτωση. Αναφέρεται ότι οι ταχύτητες που συμμετέχουν στον έλεγχο είναι από το δείγμα όλης της καμπύλης.

Πριν την εφαρμογή του test Kolmogorov – Smirnov υπολογίζονται τα παρακάτω στατιστικά μεγέθη:

- Μέση τιμή του δείγματος

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \cdot V_i)}{N} \quad (4.5),$$

όπου:

$V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  σε [km/h] = τα αποτελέσματα των ταχυτήτων,

$V_m$  σε [km/h] = η μέση τιμή της ταχύτητας,

$\sum_{i=1}^n (f_i \cdot V_i)$  = το άθροισμα των ταχυτήτων όλων των οχημάτων,

$N$  = ο συνολικός αριθμός των παρατηρούμενων οχημάτων.

Σημειώνεται ότι η μέση τιμή, δηλαδή η καλύτερη τιμή, είναι ένα στατιστικό μέγεθος που ακολουθεί την κανονική κατανομή με ακριβή τιμή και τυπικό σφάλμα, το οποίο θα υπολογιστεί στη συνέχεια.

- Τυπική απόκλιση, η οποία δηλώνει τη διασπορά των παρατηρήσεων γύρω από την αριθμητική μέση τιμή και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{N \cdot \sum_{i=1}^n (f_i \cdot V_i^2) - \left( \sum_{i=1}^n (f_i \cdot V_i) \right)^2}{N \cdot (N - 1)}} \quad (4.6),$$

όπου:

$\sigma$  [km/h] = η τυπική απόκλιση,

$\sum_{i=1}^n (f_i \cdot V_i^2)$  = το άθροισμα των τετραγώνων των συχνοτήτων,

$N$  = ο συνολικός αριθμός των παρατηρούμενων οχημάτων.

- Τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής, το οποίο δηλώνει τη περιοχή γύρω από την πραγματική, αληθή τιμή της ταχύτητας  $V_\mu$  για όλα τα οχήματα στον ίδιο χώρο, τόπο και χρόνο που αντιστοιχεί το δείγμα. Το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_{(V_m)} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.7),$$

όπου:

$\sigma_{(V_m)}$  [km/h] = το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής του δείγματος,

$\sigma$  [km/h] = η τυπική απόκλιση του δείγματος,

$N$  = ο συνολικός αριθμός των παρατηρούμενων οχημάτων.

Σημειώνεται ότι για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η πραγματική μέση τιμή της ταχύτητας, για όλα τα οχήματα του δείγματος, είναι μέσα στην καθορισμένη περιοχή της αριθμητικής μέσης τιμής  $V_m$ , με διάστημα εύρους σχεδόν δύο φορές το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής, δηλαδή ισχύει:

$$-1.96 \cdot \sigma_{(V_m)} < V_m - V_\mu < 1.96 \cdot \sigma_{(V_m)}$$

Για την περαιτέρω στατιστική ανάλυση το δείγμα ελέγχεται ως προς την κανονικότητα του με το test Kolmogorov – Smirnov. Με δεδομένο το δείγμα των στιγμιαίων ταχυτήτων  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ , το μέγεθος του δείγματος  $N$ , ο έλεγχος διαπιστώνει αν το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή σε επίπεδο εμπιστοσύνης  $p=1-\alpha$ . Επιλέχθηκε  $p=95\%$  και συνεπώς επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=5\%$  (λάθος τύπου I) [Μπαλοδήμου, 2007]. Τα βήματα του ελέγχου είναι:

- Αναγραφή τιμών με αυξανόμενη τάξη,

$$V_1 \leq V_2 \leq V_3 \leq \dots \leq V_n$$

- Για  $j = 1, 2, \dots, n$  ορίζεται η παράμετρος

$$z_j = \frac{V_j - V_m}{\sigma} \quad (4.8)$$

- Για  $j = 1, 2, \dots, n$  ορίζεται η τιμή

$$D_j = \max \left( \left| F(z_j) - \frac{j}{n} \right|, \left| F(z_j) - \frac{j-1}{n} \right| \right) \quad (4.9),$$

όπου  $F(z_j)$ , είναι η συνάρτηση της τυπικής κανονικής κατανομής. Η τιμή  $F(z_j)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F(z_j) = 1 - 0.5 \cdot \left( 1 + d_1 \cdot z_j + d_2 \cdot z_j^2 + d_3 \cdot z_j^3 + d_4 \cdot z_j^4 + d_5 \cdot z_j^5 + d_6 \cdot z_j^6 \right)^{-16} + \varepsilon(z_j) \quad (4.10)$$

Οι παράμετροι  $d_1, d_2, \dots, d_6$  είναι σταθερές με τιμές

$d_1$	0.0498673470
$d_2$	0.0211410061
$d_3$	0.0032776263
$d_4$	0.0000380036
$d_5$	0.0000488906
$d_6$	0.0000053830

και  $\varepsilon(z_j) < 1.5 \cdot 10^{-7}$ .

- Εντοπίζεται η τιμή  $D = \max D_j$ .
- Υπολογισμός της κρίσιμης τιμής από σχετικό Πίνακα κρίσιμων τιμών παραμέτρου  $D$  του test Kolmogorov – Smirnov. Στη συγκεκριμένη έρευνα, για επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=5\%= 0.05$  και για σύνολο παρατηρούμενων τιμών μεγαλύτερο των 30 σε όλες τις καμπύλες, προκύπτει  $D_c = \frac{0.886}{\sqrt{n}}$ , όπου  $n$  είναι το πλήθος των διαφορετικών τιμών ταχυτήτων που προέκυψε στο δείγμα  $N$  οχημάτων.
- Αν ισχύει  $D \geq D_c$ , απορρίπτεται η υπόθεση  $H_0$ , ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή. Σε όλες τις καμπύλες προέκυψε  $D < D_c$ , οπότε η κανονική κατανομή προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα δεδομένα του δείγματος των ταχυτήτων κάθε καμπύλης.

- Σχηματίζεται το ιστόγραμμα κατανομής ταχυτήτων, το οποίο προσεγγίζει το ιστόγραμμα κανονικής κατανομής.

#### 4.1.3. Υπολογισμός μεγέθους $V_{85}$

Ο υπολογισμός της ταχύτητας  $V_{85}$  για κάθε δείγμα ταχυτήτων σε μια καμπύλη πραγματοποιείται με τη βοήθεια του διαγράμματος της σχετικής αθροιστικής συχνότητας των μετρήσεων. Η τιμή της  $V_{85}$  προκύπτει ύστερα από γραμμική παρεμβολή από τη σχέση:

$$V_{85} = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{P_2 - P_1} \cdot (85 - P_1) \quad (4.11),$$

όπου:

$V_1$ : η πλησιέστερη ταχύτητα του δείγματος μικρότερη της  $V_{85}$ ,

$V_2$ : η πλησιέστερη ταχύτητα του δείγματος μεγαλύτερη της  $V_{85}$ ,

$P_1$ : η πλησιέστερη αθροιστική συχνότητα (%) μικρότερη του 85%,

$P_2$ : η πλησιέστερη αθροιστική συχνότητα (%) μεγαλύτερη του 85%.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω μεθοδολογία υπολογίστηκε η λειτουργική ταχύτητα κάθε καμπύλης. Χρειάστηκε να αποκλειστούν κάποια οχήματα, που κινούνται είτε με υπερβολική είτε με πολύ χαμηλή ταχύτητα. Τα αποτελέσματα της λειτουργικής ταχύτητας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ [km/h]
A	58.3
B	64.2
C	69.7
D	103.0

**Πίνακας 4.1** : Λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  για το επελεγμένο δείγμα κάθε καμπύλης.

Ένα παράδειγμα της στατιστικής συμπεριφοράς των ταχυτήτων της καμπύλης B δίνεται στους παρακάτω πίνακες.

n	$V_i$	$F_i$	$F_i \cdot V_i$	$V_i^2$	$F_i \cdot V_i^2$	$Z_i$	$F(Z_i)$	$D_{i1}$	$D_{i2}$	$ D_{i1} $	$ D_{i2} $	$F_n$	$P_n$
1	46.5	1	46.50	2162.25	2162.25	-2.021636	0.004280	-0.022036	0.004280	0.022036	0.004280	1	1.10
2	47.0	1	47.00	2209.00	2209.00	-1.935949	0.013215	-0.039417	-0.013101	0.039417	0.013101	2	2.20
3	47.5	2	95.00	2256.25	4512.50	-1.850263	0.022195	-0.056752	-0.030436	0.056752	0.030436	4	4.40
4	48.0	1	48.00	2304.00	2304.00	-1.764576	0.031463	-0.073800	-0.047484	0.073800	0.047484	5	5.49
5	48.5	1	48.50	2352.25	2352.25	-1.678890	0.041247	-0.090332	-0.064016	0.090332	0.064016	6	6.59
6	49.0	1	49.00	2401.00	2401.00	-1.593203	0.051761	-0.106133	-0.079817	0.106133	0.079817	7	7.69
7	50.0	1	50.00	2500.00	2500.00	-1.421830	0.075764	-0.108447	-0.082131	0.108447	0.082131	8	8.79
8	51.5	7	360.50	2652.25	18565.75	-1.164771	0.121634	-0.088892	-0.062576	0.088892	0.062576	15	16.48
9	52.0	1	52.00	2704.00	2704.00	-1.079084	0.140048	-0.096794	-0.070478	0.096794	0.070478	16	17.58
10	52.5	2	105.00	2756.25	5512.50	-0.993398	0.160152	-0.103006	-0.076690	0.103006	0.076690	18	19.78
11	53.0	3	159.00	2809.00	8427.00	-0.907712	0.181980	-0.107493	-0.081178	0.107493	0.081178	21	23.08
12	53.5	1	53.50	2862.25	2862.25	-0.822025	0.205533	-0.110256	-0.083940	0.110256	0.083940	22	24.18
13	54.0	2	108.00	2916.00	5832.00	-0.736339	0.230780	-0.111325	-0.085009	0.111325	0.085009	24	26.37
14	55.0	4	220.00	3025.00	12100.00	-0.564966	0.286068	-0.082353	-0.056037	0.082353	0.056037	28	30.77
15	55.5	2	111.00	3080.25	6160.50	-0.479279	0.315885	-0.078852	-0.052536	0.078852	0.052536	30	32.97
16	56.0	1	56.00	3136.00	3136.00	-0.393593	0.346951	-0.074102	-0.047786	0.074102	0.047786	31	34.07
17	56.5	3	169.50	3192.25	9576.75	-0.307906	0.379083	-0.068286	-0.041970	0.068286	0.041970	34	37.36
18	57.0	2	114.00	3249.00	6498.00	-0.222220	0.412074	-0.061610	-0.035294	0.061610	0.035294	36	39.56
19	57.5	5	287.50	3306.25	16531.25	-0.136533	0.445701	-0.054299	-0.027983	0.054299	0.027983	41	45.05
20	58.0	1	58.00	3364.00	3364.00	-0.050847	0.479724	-0.046592	-0.020276	0.046592	0.020276	42	46.15
21	58.5	6	351.00	3422.25	20533.50	0.034840	0.513896	-0.038736	-0.012420	0.038736	0.012420	48	52.75
22	59.0	8	472.00	3481.00	27848.00	0.120526	0.547967	-0.030981	-0.004665	0.030981	0.004665	56	61.54
23	59.5	2	119.00	3540.25	7080.50	0.206212	0.581688	-0.023576	0.002740	0.023576	0.002740	58	63.74
24	60.5	2	121.00	3660.25	7320.50	0.377585	0.647131	0.015552	0.041868	0.015552	0.041868	60	65.93

25	61.0	5	305.00	3721.00	18605.00	0.463272	0.678415	0.020521	0.046836	0.020521	0.046836	65	71.43
26	61.5	1	61.50	3782.25	3782.25	0.548958	0.708483	0.024272	0.050588	0.024272	0.050588	66	72.53
27	62.0	2	124.00	3844.00	7688.00	0.634645	0.737170	0.026644	0.052959	0.026644	0.052959	68	74.73
28	62.5	3	187.50	3906.25	11718.75	0.720331	0.764339	0.027497	0.053813	0.027497	0.053813	71	78.02
29	63.5	5	317.50	4032.25	20161.25	0.891704	0.813724	0.050566	0.076882	0.050566	0.076882	76	83.52
30	64.0	1	64.00	4096.00	4096.00	0.977391	0.835812	0.046338	0.072654	0.046338	0.072654	77	84.62
31	64.5	1	64.50	4160.25	4160.25	1.063077	0.856126	0.040337	0.066653	0.040337	0.066653	78	85.71
32	65.0	1	65.00	4225.00	4225.00	1.148764	0.874673	0.032568	0.058884	0.032568	0.058884	79	86.81
33	66.0	4	264.00	4356.00	17424.00	1.320137	0.906605	0.038184	0.064500	0.038184	0.064500	83	91.21
34	67.0	1	67.00	4489.00	4489.00	1.491509	0.932086	0.037349	0.063665	0.037349	0.063665	84	92.31
35	67.5	3	202.50	4556.25	13668.75	1.577196	0.942625	0.021572	0.047888	0.021572	0.047888	87	95.60
36	68.5	1	68.50	4692.25	4692.25	1.748569	0.959817	0.012449	0.038765	0.012449	0.038765	88	96.70
37	70.0	1	70.00	4900.00	4900.00	2.005628	0.977552	0.003868	0.030183	0.003868	0.030183	89	97.80
38	71.5	2	143.00	5112.25	10224.50	2.262688	0.988172	-0.011828	0.014488	0.011828	0.014488	91	100.00

**Πίνακας 4.2 :** Test Kolmogorov – Smirnov για τις ταχύτητες οχημάτων στην καμπύλη Β.

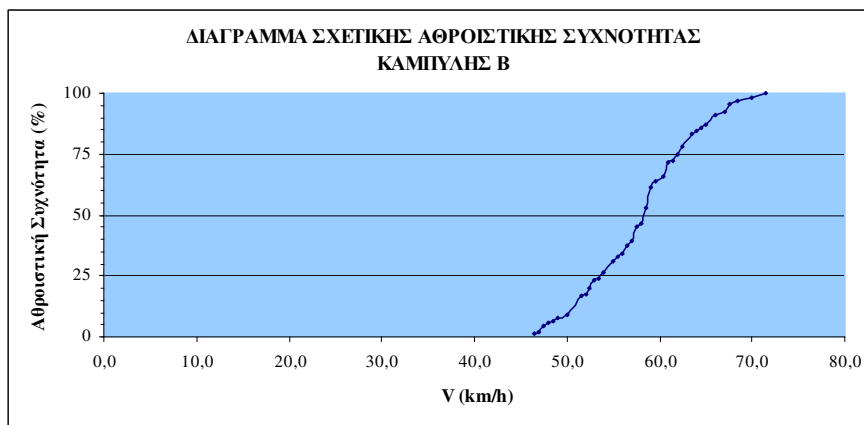
N	91	οχήματα
V <sub>m</sub>	58.3	km/h
σ	5.84	km/h
n	38	τιμές
σ <sub>V<sub>m</sub></sub>	0.61	km/h

D <sub>c</sub>	0.144
D <sub>max</sub>	0.111

Ισχύει  $D_c > D_{max}$

**Πίνακας 4.3 :** Στατιστικά μεγέθη για τις ταχύτητες των οχημάτων στην καμπύλη Β.





**Σχήμα 4.1 :** Διάγραμμα Σχετικής Αθροιστικής Συχνότητας ταχυτήτων στην καμπύλη Β.

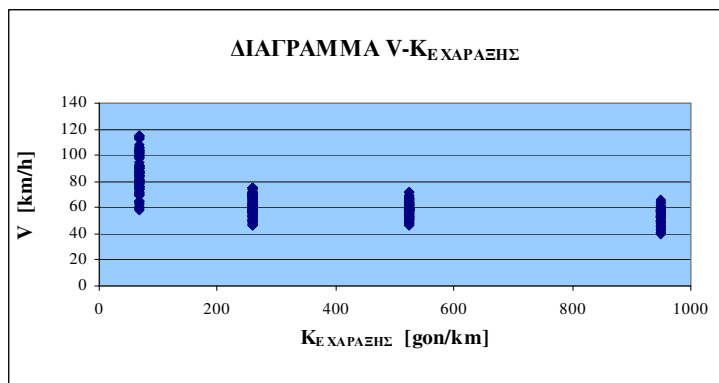
$V_1$ [km/h]	64.0	$P_1$ (%)	84.62
$V_2$ [km/h]	64.5	$P_2$ (%)	85.71

$V_{85}$ [km/h]	64.2
-----------------	------

**Πίνακας 4.4 :** Λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  οχημάτων στην καμπύλη Β.

Παρατηρώντας τις τιμές των τυπικών αποκλίσεων στις μετρήσεις ταχυτήτων στα τέσσερα οδικά τμήματα στο Παράρτημα 3, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη τιμή που εμφανίστηκε για τις καμπύλες Α, Β και C ήταν 7.3 km/h, ενώ για την καμπύλη D περίπου 14 km/h. Ως τυπική απόκλιση του πληθυσμού, για τον προσδιορισμό του μεγέθους του δείγματος ταχυτήτων, λήφθηκε τιμή 14.5 km/h κάτι που σημαίνει ότι το μέγεθος του δείγματος ήταν πολύ ικανοποιητικό (για τις τρεις πρώτες καμπύλες) έτσι ώστε, δεδομένου του συντελεστή εμπιστοσύνης, το σφάλμα δειγματοληψίας να διατηρείται στα προκαθορισμένα όρια. Στην καμπύλη D, χρησιμοποιήθηκαν, για μεγαλύτερη αξιοπιστία, παραπάνω από 90 οχήματα που είναι τα ελάχιστα γι' αυτό το επίπεδο εμπιστοσύνης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται το εύρος των ταχυτήτων  $V$  ανάλογα με την ελικτότητα της χάραξης  $K_E$ . Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ελικτότητα τόσο μικραίνει το εύρος των τιμών των ταχυτήτων, όπως επιβεβαιώνεται από τη τυπική απόκλιση της ταχύτητας σε κάθε καμπύλη, καθώς τη μεγαλύτερη τιμή τυπικής απόκλισης την είχε η καμπύλη D, που έχει τη μικρότερη ελικτότητα.



Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα συσχέτισης ταχύτητας V οχημάτων με ελικτότητα χάραξης K<sub>E,X</sub>.

#### 4.2. Σχέση μεταξύ V<sub>85</sub> – Ελικτότητας Καμπύλης K<sub>E,X</sub>

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η ταχύτητα συνήθως εκφράζεται συναρτήσει της ακτίνας. Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 1, στο υπεδάφιο 1.2.4., η V<sub>85</sub> συσχετίστηκε με μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή η οποία ήταν η καμπυλότητα της οριζοντιογραφίας (1/R). Η καμπυλότητα όμως, δεν είναι παρά η ελικτότητα μιας καμπύλης (με διαφορά μόνο στις μονάδες σύμφωνα με τον ορισμό της ελικτότητας). Όπως αναφέρουν οι Lamm και Smith [1994], οι λειτουργικές ταχύτητες διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, διότι εξαρτώνται από την οδηγική συμπεριφορά του κάθε λαού. Άρα, δεν είναι ορθό να υιοθετηθούν μοντέλα πρόβλεψης V<sub>85</sub> από άλλες χώρες. Επίσης, δεν είναι ορθό να υιοθετηθούν μοντέλα από αρκετά παλαιότερες μελέτες της ίδιας χώρας, που έγιναν σε οδούς ίδιου τύπου, διότι μπορεί να παρουσιάζουν ελλείψεις.

Στις ΟΜΟΕ-Χ του 2001, αναφέρεται ότι η συσχέτιση της V<sub>85</sub> με την κάθε μεμονωμένη καμπύλη αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική στη σύγχρονη οδοποιία και ότι οι καθοριστικές παράμετροι που επηρεάζουν τη τιμή της ταχύτητας V<sub>85</sub>, είναι η ελικτότητα (το τεταμένο) K<sub>E</sub> της μεμονωμένης καμπύλης και το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας b. Αναφέρεται επίσης ότι η ταχύτητα V<sub>85</sub> σε οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας της ομάδας Α προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των ταχυτήτων για τις δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας, σε συνάρτηση με το τεταμένο της καμπύλης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά (κατά μήκος κλίση, μήκος εφαρμογής της κλίσης και πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας) του οδικού τμήματος, από τις επόμενες σχέσεις:

- Για κατά μήκος κλίση  $s \leq 5\%$  ή  $s > 5\%$  εφόσον το μήκος της είναι  $< 250\text{m}$ .

$$V_{85} = \frac{10^6}{10150.1 + 8.529 \cdot K_E} + (b - 3.5) \cdot 20 \quad (4.12),$$

όπου b το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας.

- Για  $s > 5\%$  επί μήκους  $\geq 250\text{m}$ , ανεξαρτήτως του πλάτους λωρίδας κυκλοφορίας διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

1. Για  $5\% < s \leq 7\%$   $\Leftrightarrow V_{85} = 73.260 - 0.015 \cdot K_E \quad (4.13)$

2. Για  $7\% < s < 10\%$   $\Leftrightarrow V_{85} = 69.456 - 0.014 \cdot K_E \quad (4.14)$

Παρατηρείται ότι, τόσο στη μελέτη των Bird και Hashim [2005] στο υπεδάφιο 1.2.4., όσο και στους Ελληνικούς Κανονισμούς για τις οδούς της κατηγορίας Α και για κατά μήκος κλίσεις άνω του 5%, η σχέση μεταξύ  $V_{85}$  και  $K_E$  είναι γραμμική. Για κλίσεις μικρότερες από 5% οι ΟΜΟΕ –X του 2001 προβλέπουν πως δύο μεταβλητές επηρεάζουν τη  $V_{85}$ , η ελικτότητα και το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας.

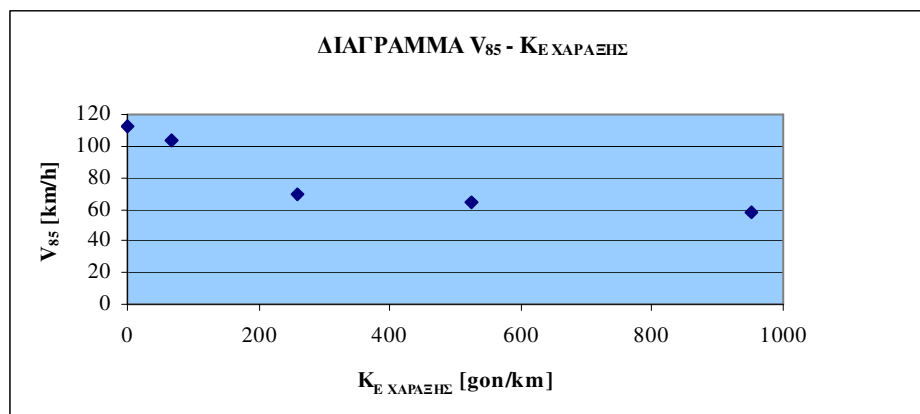
Η συγκεκριμένη έρευνα διαθέτει στοιχεία μόνο για τέσσερις καμπύλες και κατά συνέπεια οποιαδήποτε προσπάθεια συσχετισμού της  $V_{85}$  με παραπάνω από μια παράμετρο θα ήταν παρακινδυνευμένη. Όπως προέκυψε και στη μελέτη στο υπεδάφιο 1.2.4., τα καλύτερα προγνωστικά μοντέλα ταχυτήτων για τις καμπύλες βρέθηκαν να βασίζονται κυρίως στην καμπυλότητα της καμπύλης. Ακολουθώντας το συμπέρασμα αυτό έγινε προσπάθεια συσχετισμού της  $V_{85}$  και της  $K_E$  χάραξης, με βάση τα στοιχεία που έχουν προκύψει από τις τέσσερις καμπύλες.

Στον παρακάτω Πίνακα, εμφανίζονται πέντε ζεύγη σημείων  $V_{85}$ ,  $K_E$  χάραξης εκ των οποίων τέσσερα είναι για τις επιλεγμένες καμπύλες και ένα σημείο αφορά τη λειτουργική ταχύτητα στην ευθυγραμμία (ανεξάρτητη) για πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας 3.75 m, η οποία λήφθηκε από την πρόσφατη διπλωματική εργασία του Ν. Ξενάκη [2008].

ΚΑΜΠΥΛΗ	$K_E$ ΧΑΡΑΞΗΣ [gon/km]	$V_{85}$ [km/h]
A	950.76	58.3
B	524.43	64.2
C	259.36	69.7
D	67.65	103.0
ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΑ	0	112

**Πίνακας 4.5 :** Πίνακας λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  οχημάτων και ελικτότητας της χάραξης  $K_{E,X}$ .

Το αντίστοιχο διάγραμμα των παραπάνω στοιχείων είναι:



**Σχήμα 4.3 :** Διάγραμμα λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  με την ελικτότητα χάραξης  $K_{E,X}$ .

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η εξίσωση που μπορεί να εκφράζει τη  $V_{85}$  σε σχέση με τη  $K_{E,X}$  μάλλον δεν είναι γραμμική.

Εφαρμόζοντας γραμμική παλινδρόμηση στα σημεία, προκύπτει η γραμμική σχέση :

$$V_{85} = 100.977 - 0.054 \cdot K_{E,X} \text{ με } R^2 = 0.747 \quad (4.15),$$

όπου:

$V_{85}$  [km/h] = η ταχύτητα που δεν υπερβαίνουν το 85% των οχημάτων στην καμπύλη,

$K_{E,X}$  [gon/km] = η ελικτότητα χάραξης της μεμονωμένης καμπύλης.

Η σχέση όμως εκφράζει μόνο το 75% περίπου της συνολικής μεταβλητότητας της  $V_{85}$ . Παρ' όλα αυτά, η σχέση είναι αποδεκτή με στατιστικά σημαντικούς συντελεστές παλινδρόμησης και λογικά πρόσημα.

Η μορφή της καμπύλης θυμίζει την αρνητική εκθετική κατανομή. Ίσως η μορφή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα πλάτη λωρίδας κυκλοφορίας για τις τέσσερις καμπύλες είναι διαφορετικά. Άρα, θα ήταν ορθότερο να προστεθεί και ο δεύτερος όρος στην εξίσωση, πράγμα όμως που δε μπορεί να πραγματοποιηθεί, λόγω του περιορισμένου αριθμού των καμπυλών που ερευνήθηκαν.

Έγιναν αρκετές απόπειρες συσχετισμού των μεταβλητών  $V_{85}$  και  $K_{E,X}$ , όπου άλλες ήταν στατιστικά αποδεκτές και άλλες όχι. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από τα μοντέλα που περιγράφουν καλύτερα τη  $V_{85}$  σε σχέση με την  $K_{E,X}$ .

✓ Μη γραμμική σχέση  $V_{85}$  με  $K_{E,X}$  της μορφής:  $V_{85} = \alpha + \beta \cdot K_{E,X} + \gamma \cdot K_{E,X}^2$

Ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης στο Excel και στο SPSS προέκυψε η σχέση:

$$V_{85} = 110.866 - 0.156 \cdot K_{E,X} + 0.00011 \cdot K_{E,X}^2 \text{ με } R^2 = 0.957 \quad (4.16).$$

Αναλύοντας τα στατιστικά μεγέθη της συγκεκριμένης παλινδρόμησης τα οποία παρουσιάζονται στο Παράρτημα 8 (παράγραφος 8.1.) παρατηρούνται τα εξής:

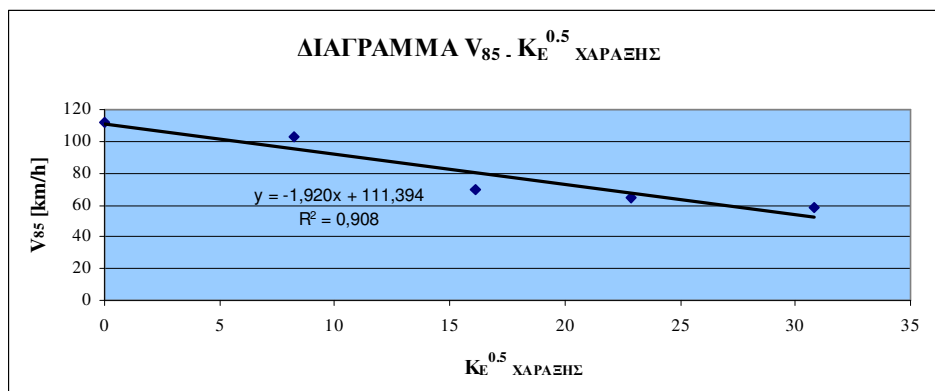
- Τα πρόσημα και οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  φαίνονται λογικά αλλά εξ αιτίας του δεύτερου όρου πρέπει να υπολογιστούν οι  $V_{85}$  που προβλέπονται από το μοντέλο για να αξιολογηθούν. Αναφέρεται ότι η παράμετρος  $\alpha$  εκφράζει την ταχύτητα στην ευθυγραμμία.
- Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι πολύ υψηλός. Αναλυτικότερα προκύπτει ότι η συγκεκριμένη σχέση παλινδρόμησης εξηγεί το 95.7% της συνολικής μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής  $V_{85}$ .
- Από τη σύγκριση του λόγου  $t$ , που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας, με την κατανομή  $t$  – Student προκύπτει ότι για 4 βαθμούς ελευθερίας και για ε.ε. 95% τόσο η τεταγμένη όσο και οι συντελεστές των μεταβλητών (παραμέτροι  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ ) είναι στατιστικά σημαντικοί, διότι η τιμή της κατανομής Student  $t_{4,95}=2.132$  είναι μικρότερη από τις τιμές  $t$  των συντελεστών αυτών. Επίσης, αν συγκριθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις πραγματικές τιμές που μετρήθηκαν, προκύπτουν σχετικά μικρές αποκλίσεις.

✓ Μη γραμμική σχέση  $V_{85}$  με  $K_{E,X}$  της μορφής:  $V_{85} = \alpha + \beta \cdot \sqrt{K_{E,X}}$

Η σχέση αυτή ανάγεται σε γραμμική αν υπολογιστούν οι τιμές  $\sqrt{K_{E,X}}$  και προκύπτει:

$$V_{85} = 111.394 - 1.920 \cdot \sqrt{K_{E,X}} \text{ με } R^2 = 0.908 \quad (4.17).$$

Οι τιμές και τα πρόσημα της τεταγμένης  $\alpha$  και του συντελεστή  $\beta$  της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι λογικά και σε αυτή την περίπτωση. Οι συντελεστές επίσης είναι στατιστικά σημαντικοί, όμως ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι λίγο μικρότερος. Επίσης, οι προβλέψεις έχουν λογικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές σύμφωνα και με το τυπικό σφάλμα αυτής της παλινδρόμησης. Το αντίστοιχο διάγραμμα είναι:



Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα παλινδρόμησης  $V_{85}$  με  $K_E^{0.5}$  ΧΑΡΑΞΗΣ.

✓ Μη γραμμική σχέση  $V_{85}$  με  $K_E$  της μορφής:  $V_{85} = \frac{\alpha}{\beta + K_{E,X}}$ .

Ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης στο SPSS προέκυψε η σχέση:

$$V_{85} = \frac{84759.029}{777.515 + K_{E,X}} \text{ με } R^2 = 0.895 \quad (4.18).$$

Η μορφή αυτή της εξίσωσης μοιάζει με τη μορφή της εξίσωσης των ΟΜΟΕ-Χ χωρίς την επίδραση στη λειτουργική ταχύτητα του πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας. Στη σχέση αυτή, πάλι, οι τιμές και τα πρόσημα των  $\alpha$  και  $\beta$  είναι λογικά. Επίσης, οι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι στατιστικά σημαντικοί με  $t_1=4.116$  και  $t_2=3.544$ . Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με το προηγούμενο μοντέλο.

Επειδή όλα τα παραπάνω μοντέλα είναι στατιστικά αποδεκτά, επιλέγεται εκείνο που προβλέπει τις μικρότερες αποκλίσεις από τις γνωστές τιμές των λειτουργικών ταχυτήτων στις τέσσερις καμπύλες. Η σχέση (4.16), παρατηρείται πως έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού. Όμως το μοντέλο αυτό προβλέπει για τις καμπύλες Α και Β περίπου την ίδια λειτουργική ταχύτητα πράγμα που δεν είναι λογικό λόγω της μεγάλης διαφοράς της ελκτότητας χάραξης που έχουν οι δύο καμπύλες. Στην πορεία της ανάλυσης διαπιστώθηκε πως τις πιο λογικές εκτιμήσεις δίνει το μοντέλο  $V_{85} = 111.394 - 1.920 \cdot \sqrt{K_{E,X}}$ , το οποίο και τελικά επιλέγεται.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη που σε όλα τα μοντέλα παρουσίαζε τη μεγαλύτερη απόκλιση ήταν η C διότι είναι μια καμπύλη με μικρή ελκτότητα, αλλά η κατά μήκος κλίση της εμποδίζει τους οδηγούς να αναπτύξουν μεγαλύτερη ταχύτητα. Τα στατιστικά στοιχεία του παραπάνω μοντέλου παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα ενώ τα στατιστικά στοιχεία όλων των μοντέλων που αναφέρθηκαν βρίσκονται στο Παράρτημα 8 (παράγραφος 8.1.). Όλες οι παλινδρομήσεις και τα αποτελέσματα υπάρχουν σε φύλλα Excel και σε αρχεία SPSS που συνοδεύουν την παρούσα εργασία.

Στατιστικά παλινδρόμησης								
Πολλαπλό R		0.953						
R Τετράγωνο		0.908						
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο		0.877						
Τυπικό σφάλμα		8.534						
Μέγεθος δείγματος		5						
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ								
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F			
Παλινδρόμηση	1	2150.356	2150.356	29.523	0.012			
Υπόλοιπο	3	218.509	72.836					
Σύνολο	4	2368.865						
	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95.0%	Υψηλότερο 95.0%
Τεταγμένη επί την αρχή	111.39439	6.708	16.606	0.000	90.046	132.743	90.046	132.743
Μεταβλητή X 1	-1.91988	0.353	-5.434	0.012	-3.044	-0.795	-3.044	-0.795

**Πίνακας 4.6 :** Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  και της ρίζας της ελικτότητας χάραξης  $\sqrt{K_{E,X}}$ .

Τέλος, εφαρμόστηκε η σχέση της μορφής:  $V_{85} = \alpha + \beta \cdot K_{E,X} + \gamma \cdot K_{E,X}^{0.5}$ . Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει για τη μεταβλητή  $X_1$  μη στατιστικά σημαντικός συντελεστής, πράγμα που σημαίνει πως ανάγεται η σχέση στη μορφή της (4.17). Άρα το μοντέλο αυτό απορρίπτεται.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.17), είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας  $V_{85}$  που αναπτύσσουν οι οδηγοί στις στροφές της Λεωφόρου Διονύσου καθώς και στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου με το συγκεκριμένο τύπο διατομής.

### 4.3. Σύγκριση μεταξύ $V_{85}$ – Θεωρητικής Ταχύτητας

Η λειτουργική ταχύτητα της καμπύλης, όπως προέκυψε από το επελεγμένο δείγμα, συγκρίθηκε με τη λειτουργική ταχύτητα που προβλέπουν οι ΟΜΟΕ–X [Ψαριανός, 2001] και με τη θεωρητική ταχύτητα που προβλέπουν για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε καμπύλης οι Αμερικανικοί Κανονισμοί [AASHTO, 2004].

Οι ΟΜΟΕ –X για τον υπολογισμό της λειτουργικής ταχύτητας ανάλογα με την κατά μήκος κλίση και το μήκος της καμπύλης, χρησιμοποιούν τις σχέσεις (4.12), (4.13) και (4.14). Τα γεωμετρικά στοιχεία των καμπυλών υπαγορεύουν για τις καμπύλες Β και D να χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.12), ενώ για τη C η σχέση (4.13). Για την καμπύλη Α δεν μπορεί να υπολογιστεί θεωρητική  $V_{85}$  με αξιοπιστία, διότι η ελικτότητα της καμπύλης βρίσκεται εκτός πεδίου τιμών ανεξάρτητης μεταβλητής για τις παραπάνω σχέσεις. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών ταχυτήτων, για τις τρεις καμπύλες, φαίνονται στον Πίνακα 4.7 και συγκρίνονται με τις πραγματικές λειτουργικές ταχύτητες, που υπολογίστηκαν από το δείγμα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ ΟΜΟΕ – X [km/h]	$V_{85}$ [km/h]
A	-	58.3
B	71.5	64.2
C	69.4	69.7
D	96.4	103.0

**Πίνακας 4.7 :** Θεωρητικές τιμές  $V_{85}$  σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ–X και πραγματικές τιμές  $V_{85}$  σύμφωνα με το επελεγμένο δείγμα.

Παρατηρείται ότι για την καμπύλη C οι ΟΜΟΕ–X προβλέπουν σωστά τη λειτουργική ταχύτητα. Επίσης, ενώ στην καμπύλη Β οι οδηγοί φαίνεται να κινούνται πιο συντηρητικά κατά 7 km/h περίπου από ότι προβλέπουν οι Ελληνικού Κανονισμοί, στην καμπύλη D κινούνται ταχύτερα κατά 7 km/h περίπου.

Έπειτα, υπολογίστηκαν οι θεωρητικές ταχύτητες που προβλέπονται γι’ αυτές τις καμπύλες χρησιμοποιώντας τους Αμερικανικούς Κανονισμούς. Σύμφωνα με τις AASHTO – The Green Book [2004], η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας προκύπτει για μία ταχύτητα σχεδιασμού και υπολογίζεται για τη μέγιστη τιμή επίκλισης  $q_{max}$  και για τον μέγιστο συντελεστή πλευρικής τριβής σχεδιασμού  $f_{max}$ . Η ελάχιστη ακτίνα

καμπυλότητας  $R_{\min}$  υπολογίζεται από το απλοποιημένο μοντέλο δυναμικής κίνησης οχήματος, ως ακολούθως:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (0.01 \cdot e_{\max} + f_{\max})} \quad (4.19),$$

όπου :

$R_{\min}$  [m] = η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας,

$V$  [km/h] = η ταχύτητα μελέτης ,

$e_{\max}$  (%) = η μέγιστη επίκλιση,

$f_{\max}$  = ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής τριβής.

Στους Αμερικανικούς Κανονισμούς υπάρχουν πίνακες που προσδιορίζουν την  $R_{\min}$  σύμφωνα με την ταχύτητα σχεδιασμού και τις μέγιστες τιμές των δύο άλλων παραμέτρων. Στη συγκεκριμένη έρευνα, εφόσον οι ακτίνες και οι επικλίσεις των καμπυλών έχουν συγκεκριμένη τιμή, τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας διπλή γραμμική παρεμβολή στα δεδομένα των ακτίνων και των επικλίσεων, υπολογίζεται η ταχύτητα μελέτης  $V_{\text{des}}$  και ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής τριβής σε κάθε καμπύλη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.8, όπου γίνεται η σύγκριση της πραγματικής λειτουργικής ταχύτητας,  $V_{85}$  που μετρήθηκε, με τη θεωρητική. Στον πίνακα σημειώνονται ακόμη η ακτίνα των καμπυλών, η επίκλιση και ο μέγιστος προβλεπόμενος από τους κανονισμούς συντελεστής πλευρικής τριβής.

ΚΑΜΠΥΛΗ	R [m]	$f_R$	e (%)	$V_{\text{des}}$ [km/h]	$V_{85}$ [km/h]
A	60	0.21	4.6	44.5	58.3
B	113	0.18	4.4	56.3	64.2
C	178	0.15	4.7	67.5	69.7
D	594	0.11	3.1	101.9	103.0

**Πίνακας 4.8 :** Σύγκριση θεωρητικής ταχύτητας Αμερικανικών Κανονισμών με την πραγματική λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, οι Έλληνες οδηγοί για τις πιο κλειστές καμπύλες A και B υπερβαίνουν τη θεωρητική ταχύτητα, που υπολογίζεται βάσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάθε καμπύλης, ενώ για τις C και D δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στις ταχύτητες. Η υπέρβαση μειώνεται καθώς αυξάνεται η ακτίνα, δηλαδή για την καμπύλη A είναι 13.7 km/h, για τη B 7.9 km/h, για τη C 2.2 km/h ενώ για την D μόλις 1.1 km/h.

Επισημαίνεται πως για τον προσδιορισμό της θεωρητικής ταχύτητας, σύμφωνα με τους Κανονισμούς της Αμερικής, κρίνεται ορθότερο να χρησιμοποιηθούν οι ακτίνες των κυκλικών τόξων και όχι οι ανηγμένες ακτίνες της καμπύλης. Άλλωστε, το υπό μελέτη τμήμα, όπως επιβεβαιώνεται και από το γωνιακό διάγραμμα των οριογραμμών της κάθε καμπύλης, ανήκει στο κυκλικό τόξο της καμπύλης.



#### 4.4. Υπολογισμός Ελικτότητας της Τροχιάς Οχήματος $K_{Ei}$

Από τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο εδάφιο 2.5.2, διατίθεται για κάθε όχημα του δείγματος ένα σύνολο σημείων, το οποίο περιγράφει την τροχιά του. Η ελικτότητα της τροχιάς του οχήματος δίνεται από τη σχέση (2.12), το μήκος της καμπύλης από τη σχέση (2.13) και η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης από τη σχέση (2.14). Η ανηγμένη ακτίνα υπολογίζεται από τη σχέση (2.15). Διευκρινίζεται ότι οι παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούνται για τις συντεταγμένες της προβολής του γεωμετρικού κέντρου στο επίπεδο της αναγωγής της κάθε καμπύλης. Δηλαδή, ενώ για τον προσδιορισμό των ελικοτοτήτων των οριογραμμών το σύστημα αναφοράς ήταν το τρισδιάστατο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς της αποτύπωσης, για τα οχήματα οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για το δισδιάστατο σύστημα αναφοράς της αναγωγής (επίπεδο της αναγωγής). Με αυτό τον τρόπο, υπολογίζονται οι ελικτότητες των οχημάτων στο επίπεδο της αναγωγής κάθε καμπύλης. Στο Παράρτημα 6 αποδεικνύεται ότι η διαφορά της ανηγμένης ακτίνας  $R_{AN}$  στο σύστημα αναφοράς της αναγωγής και στο σύστημα αναφοράς της αποτύπωσης δεν επιφέρει ουσιαστική αλλαγή στον υπολογισμό του πλευρικού συντελεστή τριβής για μικρές επικλίσεις.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τα οχήματα στις καμπύλες B, C και D. Για την καμπύλη A, η οποία περιγράφεται από δύο επίπεδα αναγωγής, έπρεπε να βρεθεί ένας διαφορετικός τρόπος υπολογισμού της ελικτότητας. Μια λύση ήταν να γίνει η αντίστροφη φωτογραμμετρική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, θα έπρεπε οι γεωδαιτικές συντεταγμένες της τροχιάς του οχήματος να μετατραπούν στο αρχικό καρτεσιανό σύστημα αναφοράς της αποτύπωσης και στη συνέχεια να υπολογιστεί η ελικτότητα σε όλη την καμπύλη. Μια εναλλακτική λύση ήταν ο υπολογισμός μιας ακτίνας  $R$  για κάθε ένα από τα δύο επίπεδα, χωρίς να πραγματοποιηθεί η αντίστροφη φωτογραμμετρική διαδικασία. Η μια ακτίνα θα αντιστοιχεί στο επίπεδο που προσεγγίζει το κυκλικό τόξο της καμπύλης και η δεύτερη ακτίνα στο επίπεδο που περιγράφει το τόξο συναρμογής, στο οποίο μεταβάλλεται η επίκλιση. Ουσιαστικά γίνεται πάλι η παραδοχή ότι η τροχιά των οδηγών είναι ένα τμήμα κύκλου, είτε το όχημα διασχίζει κυκλικό τόξο, είτε τόξο συναρμογής.

Επιλέχθηκε η εφαρμογή του δεύτερου τρόπου υπολογισμού της ελικτότητας κάθε οχήματος της καμπύλης A, διότι αφενός δε χρειάζεται να γίνει η αντίστροφη φωτογραμμετρική διαδικασία και αφετέρου αποδεικνύεται ότι η παραδοχή επί του είδους της τροχιάς των οδηγών μπορεί να γίνει αποδεκτή. Από τα γωνιακά διαγράμματα των οχημάτων της καμπύλης A που έχουν γίνει και στα δυο επίπεδα για τον υπολογισμό της  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα, οι γραμμικές παρεμβολές τόσο για το ένα όσο και για το άλλο επίπεδο έχουν ιδιαίτερα υψηλό  $R^2$  (πάνω από 97% και στις περισσότερες περιπτώσεις πάνω από 99%) και λόγο  $t$  για το συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής, υψηλότερο από την τιμή της κατανομής t-Student για 95% επίπεδο εμπιστοσύνης και βαθμό ελευθερίας  $v-1$ . Άρα, για κάθε όχημα που εξετάστηκε στην καμπύλη A η τιμή του συντελεστή είναι στατιστικά σημαντική και συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα  $R_i$  που διαγράφει σε κάθε επίπεδο. Η ελικτότητα κάθε οχήματος της καμπύλης A δίνεται από τη σχέση:

$$K_{Ei} = \frac{\frac{L_1}{R_1} + \frac{L_2}{R_2}}{L_1 + L_2} \cdot 63700 \quad (4.20),$$

όπου:

- $K_{Ei}$  [gon/km] = η ελικτότητα τροχιάς οχήματος,  
 $L_1$  [m] = μήκος κυκλικού τόξου 1 (τμήμα αναγωγής 1),  
 $L_2$  [m] = μήκος κυκλικού τόξου 2 (τμήμα αναγωγής 2),  
 $R_1$  [m] = ακτίνα κυκλικού τόξου 1 (τμήμα αναγωγής 1),  
 $R_2$  [m] = ακτίνα κυκλικού τόξου 2 (τμήμα αναγωγής 2).

Το μήκος κάθε κυκλικού τόξου έχει υπολογιστεί από τη σχέση (2.13). Διευκρινίζεται πάλι ότι για τις καμπύλες B, C και D η ελικτότητα κάθε οχήματος της καμπύλης δίνεται από τη σχέση (2.12), με γωνία που υπολογίζεται από τη σχέση (2.14) και μήκος τόξου (2.13). Η ανηγμένη ακτίνα  $R_{AN}$  της τροχιάς του οχήματος για κάθε καμπύλη δίνεται από τη σχέση (2.15), όπου  $K_E$  είναι η ελικτότητα τροχιάς οχήματος  $K_{Ei}$ .

Στο Παράρτημα 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού της ελικτότητας οχήματος και για τις δύο λωρίδες κυκλοφορίας κάθε καμπύλης καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελικτοτήτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9. Ως ελικτότητα των οχημάτων κάθε καμπύλης θεωρείται ο μέσος όρος των ελικτοτήτων των τροχιών για κάθε καμπύλη. Η επιλογή της μέσης τιμής και όχι της του ίδιου ποσοστού με την ταχύτητα αποτελεί μια προσέγγιση που μπορεί να γίνει αποδεκτή, καθώς, όπως θα αναφερθεί και στο επόμενο Κεφάλαιο, η επιλογή της μέσης τιμής της ελικτότητας της τροχιάς των οδηγών ως η αντιπροσωπευτική ελικτότητα της τροχιάς οχημάτων για κάθε καμπύλη αποτελεί μια συντηρητική εκτίμηση η οποία οδηγεί σε λογικά και αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$K_{E \text{ ΧΑΡΑΞΗΣ}}$ [gon/km]	$K_{E \text{ ΤΡΟΧΙΑΣ}}$ [gon/km]
A	950.76	923.71
B	524.43	439.27
C	259.36	205.94
D	67.65	40.60

**Πίνακας 4.9 :** Συγκριτικός Πίνακας ελικτότητας χάραξης  $K_{E,X}$  και μέσης πραγματικής ελικτότητας τροχιάς οχημάτων  $K_{E,T}$ .

Αντίστοιχα οι ανηγμένες ακτίνες για τις παραπάνω ελικτότητες είναι:

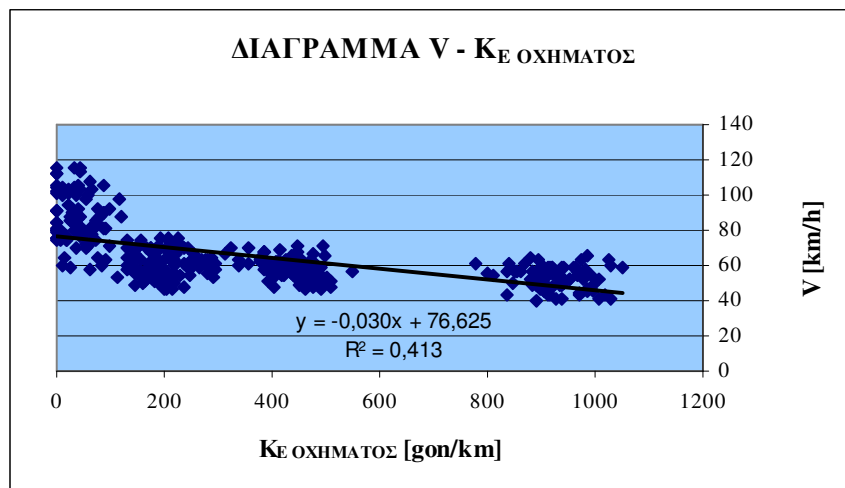
ΚΑΜΠΥΛΗ	$R_{AN \text{ ΧΑΡΑΞΗΣ}}$ [m]	$R_{AN \text{ ΤΡΟΧΙΑΣ}}$ [m]
A	67	69
B	121	145
C	246	309
D	942	1569

**Πίνακας 4.10 :** Συγκριτικός Πίνακας ανηγμένης ακτίνας χάραξης  $R_{AN,X}$  και μέσης πραγματικής ανηγμένης ακτίνας της τροχιάς οχημάτων  $R_{AN,T}$ .

#### 4.5. Σχέση Ταχύτητας Οχήματος V – Ελικτότητας Τροχιάς του $K_{Ei}$

Μια πολύ χρήσιμη εφαρμογή στη συγκεκριμένη έρευνα είναι η εύρεση εξίσωσης που συσχετίζει την ταχύτητα με την οποία κινείται ένα όχημα στην καμπύλη με την ελικτότητα της τροχιάς του. Σε αντίθεση με την έρευνα των Glenon και Weaver [1971], δεν εξετάζεται η καμπυλότητα της τροχιάς (στιγμιαία  $R_{min}$ ), που διαγράφει το όχημα στο σημείο που εμφανίζεται ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής τριβής όπως περιγράφεται και στο υπεδάφιο 1.2.5.. Μια τέτοια προσέγγιση θεωρήθηκε επισφαλής, διότι η ελάχιστη ακτίνα μπορεί να εμφανίζεται όντως στιγμιαία, αλλά δεν περιγράφει τη συμπεριφορά του οδηγού σε όλη τη καμπύλη. Όπως έδειξαν και τα γωνιακά διαγράμματα για τις πιο κρίσιμες καμπύλες A και B, η τροχιά των οδηγών περιγράφεται από ένα κυκλικό τόξο ακτίνας  $R_i$ , που δεν είναι παρά το αντίστροφο του συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής. Ο συντελεστής προσδιορισμού σε κάθε όχημα είναι υψηλός ( $R^2 \geq 97\%$ , εκτός από δύο εξαιρέσεις) και ο συντελεστής της μεταβλητής είναι στατιστικά σημαντικός όπως φαίνεται και στο Παράρτημα 9.

Για να ελεγχθεί η συσχέτιση της ταχύτητας του οχήματος με την ελικτότητά του, έγινε το αντίστοιχο διάγραμμα, όπου ως εξαρτημένη μεταβλητή ήταν η ταχύτητα και ανεξάρτητη η ελικτότητα των οδηγών (Σχ. 4.5). Παρατηρώντας την κατανομή των ελικτοτήτων ανάλογα με τις ταχύτητες στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ των δύο παραμέτρων. Αυτό επιβεβαιώνεται με την ανάλυση παλινδρόμησης των δύο παραμέτρων με τη βοήθεια του Excel. Συγκεκριμένα, για το σύνολο των οχημάτων που μελετήθηκαν στις τέσσερις καμπύλες, η γραμμική παλινδρόμηση έδειξε ότι η ελικτότητα του οχήματος δεν μπόρεσε να εκφράσει περισσότερο από 41% την μεταβλητότητα της ταχύτητας των οχημάτων.



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα συσχέτισης ταχύτητας V και ελικτότητας τροχιάς οχήματος  $K_{Ei}$ .

Το συμπέρασμα της παλινδρόμησης δείχνει ότι ουσιαστικά δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας V και της ελικτότητας  $K_{Ei}$  του οχήματος. Άρα, για τις συγκεκριμένες καμπύλες ο κάθε οδηγός επέλεξε τροχιά με ελικτότητα που ήταν ανεξάρτητη της ταχύτητας κίνησης του. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα των οδηγών επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες που δε λήφθηκαν υπόψη στη συγκεκριμένη έρευνα. Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται στη συνέχεια.

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας, όπως αναφέρεται στην έρευνα που περιγράφηκε στο εδάφιο 1.2.2., είναι η ψυχολογία του οδηγού. Σύμφωνα και με άλλες μελέτες με τους Lamm et al. [TRR 1445], εκτός από την επιλογή ταχύτητας, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών. Αρχικά, αναφέρονται οι ανθρώπινοι παράγοντες όπως είναι: η λανθασμένη εκτίμηση οδηγού, η έλλειψη εμπειρίας, η οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ, δυσκολίες από τους οδηγούς μεγαλύτερης ηλικίας. Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας είναι τα χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως τα ελαστικά, το σύστημα πέδησης και η παλαιότητά του. Η αστυνόμευση μια περιοχής επίσης επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδηγών. Υπενθυμίζεται ότι η ροή των οχημάτων ήταν ελεύθερη και συνεπώς η ύπαρξη αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου δεν θεωρείται παράγοντας επιρροής στην οδηγική συμπεριφορά στη συγκεκριμένη έρευνα. Το ίδιο ισχύει και για τις καιρικές συνθήκες και την κατάσταση του οδοστρώματος.

Οι Glenon και Weaver [1971] κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι ο κάθε οδηγός αντιλαμβάνεται διαφορετικά την καμπύλη που ακολουθεί και κατά συνέπεια η επιλογή τροχιάς και ταχύτητας διαφέρει από οδηγό σε οδηγό. Αναφέρουν επίσης ότι η εμπειρία του οδηγού είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην οδηγική συμπεριφορά.

Σκεπτόμενοι τη σχέση (4.17) που βρέθηκε μεταξύ της  $V_{85}$  και της ελικτότητας της χάραξης της οδού  $K_{E,X}$ , ελέγχθηκε μήπως ισχύει κάτι αντίστοιχο για τη λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  και για τη μέση πραγματική ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων  $K_{E,T}$  κάθε καμπύλης. Η συσχέτιση αυτή εξετάζεται στο επόμενο εδάφιο.

#### 4.6. Σχέση μεταξύ $V_{85}$ – Μέσης Πραγματικής Ελικτότητας Τροχιάς Οχημάτων $K_{E,T}$

Ύστερα από τον προσδιορισμό της ελικτότητας της τροχιάς κάθε οχήματος, είναι δυνατό να συσχετιστεί η ταχύτητα των οδηγών με την ελικτότητα της πραγματικής τους τροχιάς και όχι με την ελικτότητα της χάραξης όπως έγινε στο εδάφιο 4.2.. Για κάθε καμπύλη έχει προσδιοριστεί ήδη η λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ . Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι λειτουργικές ταχύτητες των οδηγών και η μέση τιμή των πραγματικών ελικοτοτήτων των τροχιών για κάθε καμπύλη.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ [km/h]	$K_{E, ΤΡΟΧΙΑΣ}$ [gon/km]
A	58.3	923.71
B	64.2	439.27
C	69.7	205.94
D	103.0	40.60
ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΑ	112	0

**Πίνακας 4.11 :** Συγκεντρωτικός Πίνακας λειτουργικών ταχυτήτων  $V_{85}$  και μέσων πραγματικών ελικοτοτήτων της τροχιάς των οχημάτων  $K_{E,T}$ .

Η γραμμική συσχέτιση των δύο παραμέτρων παρουσίασε μικρό συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.686$  και κατά συνέπεια αναζητήθηκαν μη γραμμικές σχέσεις. Από τις σχέσεις που μελετήθηκαν αποδείχθηκε και πάλι πως την καλύτερη συσχέτιση εμφάνισαν οι μεταβλητές  $V_{85}$  και  $\sqrt{K_{E,T}}$ . Από την ανάλυση της παλινδρόμησης προέκυψε:

$$V_{85} = 109.098 - 1.920 \cdot \sqrt{K_{E,T}} \text{ με } R^2 = 0.888 \quad (4.21),$$

Όπως φαίνεται και στον επόμενο Πίνακα στατιστικής ανάλυσης οι συντελεστές της τεταγμένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής είναι στατιστικά σημαντικοί. Αν συγκριθεί με τη σχέση που προβλέφθηκε για την ελικτότητα της χάραξης, η διαφορά προκύπτει στο σταθερό όρο. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι ο αριθμός των καμπυλών που μελετήθηκαν είναι πολύ μικρός σε σχέση με άλλες έρευνες για τις οποίες προσδιορίστηκαν μοντέλα λειτουργικής ταχύτητας (υπεδάφιο 1.2.4), αλλά παρ' όλα αυτά μπορεί να προβλεφθεί μια τάση της πραγματικής ελικτότητας της τροχιάς των οδηγών. Στην παράγραφο 8.2. του Παραρτήματος 8 παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα από το πρόγραμμα SPSS. Οι παλινδρομήσεις πραγματοποιήθηκαν και στο Excel για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Οι πίνακες παλινδρόμησης υπάρχουν και στα σχετικά αρχεία Excel και SPSS που παραδίδονται μαζί με την παρούσα διπλωματική εργασία.

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ								
<i>Στατιστικά παλινδρόμησης</i>								
Πολλαπλό R								
R Τετράγωνο								
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο								
Τυπικό σφάλμα								
Μέγεθος δείγματος								
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ								
	<i>βαθμοί ελευθερίας</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Σημαντικότητα F</i>			
Παλινδρόμηση	1	2103.869	2103.869	23.818	0.016			
Υπόλοιπο	3	264.996	88.332					
Σύνολο	4	2368.865						
	<i>Συντελεστές</i>	<i>Τυπικό σφάλμα</i>	<i>t</i>	<i>τιμή-P</i>	<i>Κατώτερο 95%</i>	<i>Υψηλότερο 95%</i>	<i>Κατώτερο 95.0%</i>	<i>Υψηλότερο 95.0%</i>
Τεταγμένη επί την αρχή	109.09826	7.059	15.455	0.001	86.633	131.564	86.633	131.564
Μεταβλητή X 1	-1.92018	0.393	-4.880	0.016	-3.172	-0.668	-3.172	-0.668

**Πίνακας 4.12 :** Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ της λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  και  $\sqrt{K_{E,T}}$  τροχιάς οχημάτων.

Για να θεωρηθεί η έρευνα πληρέστερη εξετάστηκε ένας αριθμός οχημάτων για τις καμπύλες Α και Β σε συνθήκες κίνησης και στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας και εντοπίστηκαν οι διαφορές με την αρχική έρευνα που αναφέρεται σε ελεύθερη ροή των οχημάτων. Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ενδεικτικό, δηλαδή περίπου 30 οχήματα ανά καμπύλη. Για την καμπύλη Α οι ταχύτητες των οχημάτων, που η κίνησή τους δεσμευόταν από την ταυτόχρονη κίνηση του αντίθετου ρεύματος κυκλοφορίας δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για την καμπύλη Β, το δείγμα ακολουθεί οριακά την κανονική κατανομή και η λειτουργική ταχύτητα των οδηγών είναι κατά 4 km/h μικρότερη, δηλαδή στα 60.4 km/h. Οι πραγματικές ελκτιότητες των συγκεκριμένων οχημάτων διαφέρουν από τις ελκτιότητες ελεύθερης ροής κυρίως στην καμπύλη Β. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα των μέσων πραγματικών ελκτιοτήτων για τις καμπύλες Α και Β για ελεύθερη και μη ελεύθερη ροή συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

ΚΑΜΠΥΛΗ	$K_E$ ΤΡΟΧΙΑΣ [gon/km]-free	$K_E$ ΤΡΟΧΙΑΣ [gon/km]-bias
A	923.71	954.34
B	439.27	463.56

**Πίνακας 4.13 :** Συγκριτικός Πίνακας μέσων πραγματικών ελκτιοτήτων στις καμπύλες Α και Β για ελεύθερη και μη ελεύθερη ροή.

Αντίστοιχα οι ανηγμένες ακτίνες προκύπτουν:

ΚΑΜΠΥΛΗ	$R_{AN}$ ΤΡΟΧΙΑΣ [m]-free	$R_{AN}$ ΤΡΟΧΙΑΣ [m]-bias
A	69	67
B	145	136

**Πίνακας 4.14 :** Συγκριτικός Πίνακας μέσων πραγματικών ανηγμένων ακτίνων στις καμπύλες Α και Β για ελεύθερη και μη ελεύθερη ροή.

Παρατηρείται πως τα οχήματα που δεσμεύονται από την κίνηση οχήματος στην αντίθετη κατεύθυνση ακολουθούν περισσότερο τη χάραξη πράγμα που ήταν αναμενόμενο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΜΠΥΛΩΝ



## 5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Το κύριο μέλημα στο σχεδιασμό ενός οδικού έργου εκτός από τους οικονομικούς, λειτουργικούς, περιβαλλοντικούς και αισθητικούς περιορισμούς, είναι η ασφάλεια των κινούμενων οχημάτων σε αυτό.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα Κεφάλαια, έρευνες που έγιναν έδειξαν ότι οι οδοί δύο λωρίδων κυκλοφορίας κατέχουν τα υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης ατυχημάτων από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία οδού και ότι ο συνολικός αριθμός θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων στα παραπάνω οδικά δίκτυα, αγγίζει ποσοστό μεταξύ του 60% και 70% σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε Ευρώπη και Αμερική [Lamm et al., 1991]. Ταυτόχρονα διαπιστώθηκε ότι τουλάχιστον τα μισά θανάσιμα τροχαία ατυχήματα, ή στην καλύτερη περίπτωση ένα ποσοστό 30% αυτών, λαμβάνουν χώρα σε καμπύλα οδικά τμήματα, κυρίως λόγω του ότι η ταχύτητα των οχημάτων τη χρονική στιγμή της σύγκρουσης υπερβαίνει τη κρίσιμη ταχύτητα της καμπύλης, με αποτέλεσμα την απώλεια ελέγχου εκ μέρους των οδηγών. Από επίσημα στατιστικά δεδομένα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ελλάδα το 1996 κατατάσσεται δεύτερη στην Ευρώπη με 227 νεκρούς ανά εκατομμύριο κατοίκων [Ψαριανός, 2005 - 2006].

Σύμφωνα με τους Lamm, Choueri, Kloeckner και Maillaender, οι παράγοντες που επηρεάζουν σε μετρήσιμο βαθμό την οδηγική συμπεριφορά και ασφάλεια είναι:

- Ανθρώπινοι παράγοντες (λανθασμένη εκτίμηση οδηγού, η επιλογή ταχύτητας, η έλλειψη εμπειρίας, η οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ, δυσκολίες από τους οδηγούς μεγαλύτερης ηλικίας).
- Η ίδια η γεωμετρία της οδού (συνδυασμός οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και διατομών ως προς το βαθμό ανάπτυξης παρόδιων χρήσεων γης και του επιπέδου πρόσβασης).
- Η ύπαρξη αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου σε συνδυασμό με τις ποιοτικές και χρονικές της διαφοροποιήσεις.
- Θέματα που άπτονται της νομοθεσία μιας περιοχής (έλεγχος κυκλοφορίας και ο βαθμός επιβολής αυτού).
- Περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση του οδοστρώματος.
- Τα χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως τα ελαστικά, το σύστημα πέδησης και η παλαιότητά του.

Στα επόμενα εδάφια περιγράφεται η δυναμική κίνησης οχήματος και η εφαρμογή της στη συγκεκριμένη μεθοδολογία για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδηγών στην καμπύλη σύμφωνα με την καμπυλότητα που επιλέγουν.

## 5.1. Δυναμική Κίνησης Οχήματος

Οι περισσότεροι Κανονισμοί χάραξης οδών στην οριζοντιογραφία έχουν προσεγγίσει εμπειρικά τη δυναμική του οχήματος και ο προσδιορισμός του κρίσιμου μεγέθους της οριζοντιογραφίας, που είναι η ακτίνα της οριζόντιας καμπύλης, έγινε με βάση τη συμπεριφορά του οχήματος στην πέδηση [Ψαριανός, 2001]. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ισχυρό απόθεμα πρόσφυσης (90% περίπου της μέγιστης επιτρεπόμενης) στην επιρόχια κατεύθυνση, η διάθεση του οποίου να είναι δυνατή σε περίπτωση πέδησης και ανεπιθύμητων ελιγμών. Επισημαίνεται ότι στους υπολογισμούς των κρίσιμων μεγεθών, οι κανονισμοί αγνοούν τη δυναμική κίνησης των βαρέων οχημάτων δεδομένου ότι ως όχημα σχεδιασμού θεωρείται το επιβατηγό όχημα.

Στην οδοποιία σήμερα η υφιστάμενη προσέγγιση της δυναμικής εμπεριέχει τις εξής απλοποιήσεις [Ψαριανός, 2001] και [Ψαριανός, 2005 - 2006]:

- Το όχημα προσομοιώνεται με υλικό σημείο, δηλαδή με μια σημειακή μάζα, η οποία είναι συγκεντρωμένη στο Κ.Β. του οχήματος.
- Οι δυνάμεις ασκούνται στη προβολή του Κ.Β. του οχήματος.
- Αγνοείται παντελώς το πραγματικό σύστημα δυνάμεων που εμφανίζεται σε διάφορα μέρη του οχήματος (π.χ στους τροχούς) και προφανώς ο διαχωρισμός μεταξύ κινητήριου και μη κινητήριου άξονα.
- Η κίνηση του οχήματος εξετάζεται ανεξάρτητα στην επιρόχια και στην εγκάρσια κατεύθυνση και δε συμπεριλαμβάνονται οι περιορισμοί εκείνοι με τους οποίους οι συνιστώσες της εξ επαφής δύναμης αλληλοδεσμεύονται.
- Οι δυνάμεις μεταφέρονται εξίσου σε καθένα από τα ελαστικά του.

Έτσι, κατά την κίνηση του οχήματος σε καμπύλη τροχιά στην εγκάρσια διεύθυνση η φυγόκεντρος δύναμη εξισορροπείται από τη συνιστώσα του βάρους του και την αναπτυσσόμενη πλευρική τριβή μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος. Από την ισορροπία αυτή (Σχ. 5.1) υπολογίζεται και η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα, όπως έχει αναφερθεί και στο εδάφιο 4.3., ως εξής:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (f_{R,\text{perm}} + e_{\max})} \quad (5.1),$$

όπου :

$R_{\min}$  [m] = η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα,

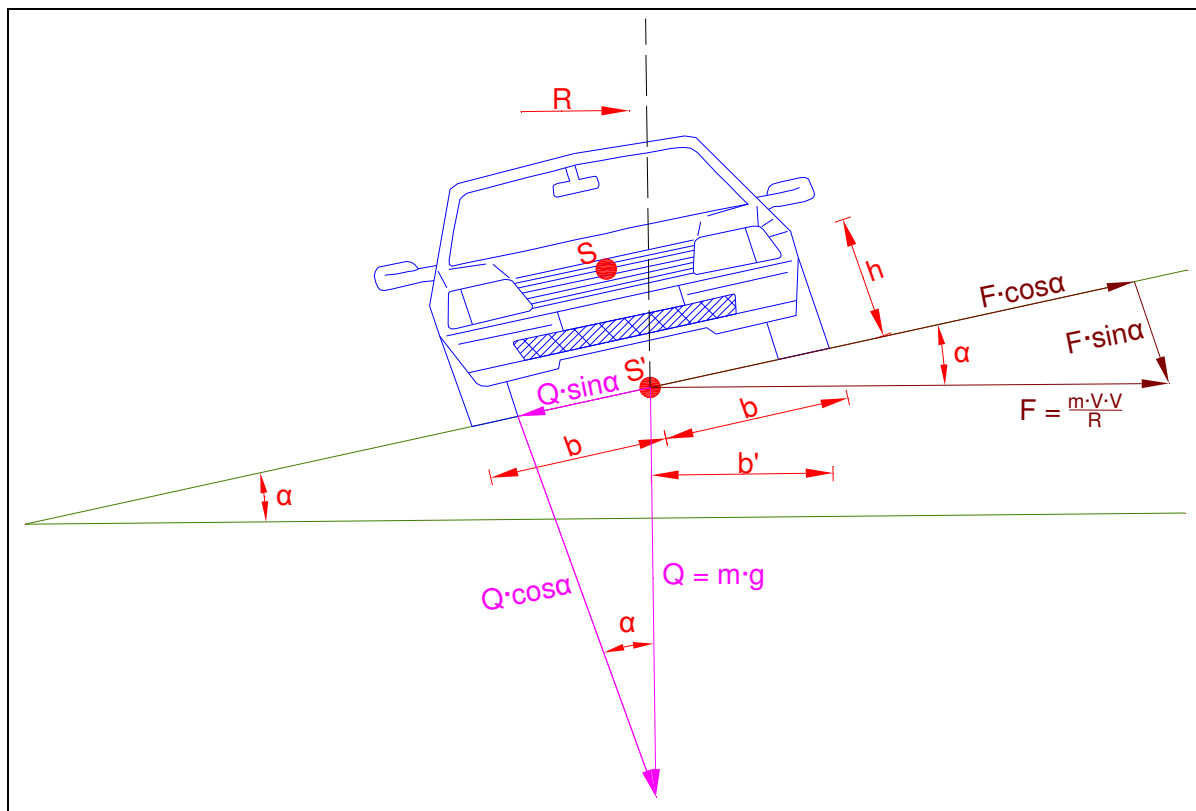
$V$  [km/h] = η ταχύτητα οχήματος – συνήθως ταχύτητα μελέτης –

$f_{R,\text{perm}}$  = ο επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας πρόσφυσης,

$e_{\max}$  = η μέγιστη επίκλιση (%/100).

Η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα με βάση τις παραπάνω απλοποιήσεις είναι ανεξάρτητη, τόσο από τη μηκοτομή του οδικού δικτύου, όσο και των χαρακτηριστικών του οχήματος. Στην πραγματικότητα, κατά την κίνηση του οχήματος στην καμπύλη οι δυνάμεις που μεταβιβάζονται στα τέσσερα ελαστικά είναι διαφορετικές και για τον προσδιορισμό αυτών απαιτείται θεώρηση κάποιου προτύπου συμπεριφοράς οχήματος και ελαστικών. Αν και η εγκυρότητα του μοντέλου προβλημάτισε στο παρελθόν αρκετούς μελετητές, εντούτοις, τουλάχιστον ως τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας, η έρευνα δεν είχε προχωρήσει στο βαθμό που να καθιστά την εισαγωγή της κατά μήκος κλίσης αναγκαία στον προσδιορισμό ελάχιστων γεωμετρικών μεγεθών. Στο πρόσφατο παρελθόν διάφοροι ερευνητές Macadam et al. [1985], Κονταράτος [1990],

ανέπτυξαν μοντέλα δίτροχου, με βάση τα οποία, σε αντίθεση με την κλασική οδοποιία, μελετήθηκε το όχημα σε όλες τις διευθύνσεις κίνησης υπό την επίδραση προωθητικής ροπής. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, Κονταράτος [1990], συνδυάζοντας τα στοιχεία μηκοτομής με αυτά της οριζοντιογραφίας αποδείχθηκαν περιπτώσεις όπου οι Κανονισμοί χάραξης οδών άλλοτε υποσχεδιάζουν και άλλοτε υπερσχεδιάζουν. Παρ’ όλα αυτά, η παρούσα έρευνα περιορίστηκε στο απλοποιημένο μοντέλο εγκάρσιας ευστάθειας.



Σχήμα 5.1 : Μοντέλο εγκάρσιας ευστάθειας.

Στους Ελληνικούς Κανονισμούς χάραξης οδών ΟΜΟΕ–Χ [Ψαριανός, 2001], επιχειρείται μια ποσοτική αξιολόγηση μεταξύ των στοιχείων μελέτης της οδού και της δυναμικής των οχημάτων. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Κριτήριο Ασφαλείας ΙΙΙ, ελέγχεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ της απαιτούμενης πρόσφυσης του οδοστρώματος και της διατιθέμενης, σε συνάρτηση με την αναμενόμενη ταχύτητα των οχημάτων σε καμπύλα οδικά τμήματα. Η συσχέτιση αυτή, στην ουσία, αξιοποιεί έμμεσα την υφιστάμενη προσέγγιση της δυναμικής του οχήματος μέσω της συσχέτισης της απαιτούμενης πρόσφυσης με τα ατυχήματα σε μία οδό.

## 5.2. Υπολογισμός Αναπτυσσόμενου και Διατιθέμενου Συντελεστή Τριβής

Για τον υπολογισμό του αναπτυσσόμενου ή απαιτούμενου συντελεστή τριβής κατά την κίνηση του οχήματος στην καμπύλη χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση [Glenon and Weaver, 1971], σύμφωνα με τις παραδοχές του προηγούμενου εδαφίου:

$$f_R = \frac{V^2}{127 \cdot R'} - e \quad (5.2),$$

όπου :

$f_R$  = ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής,

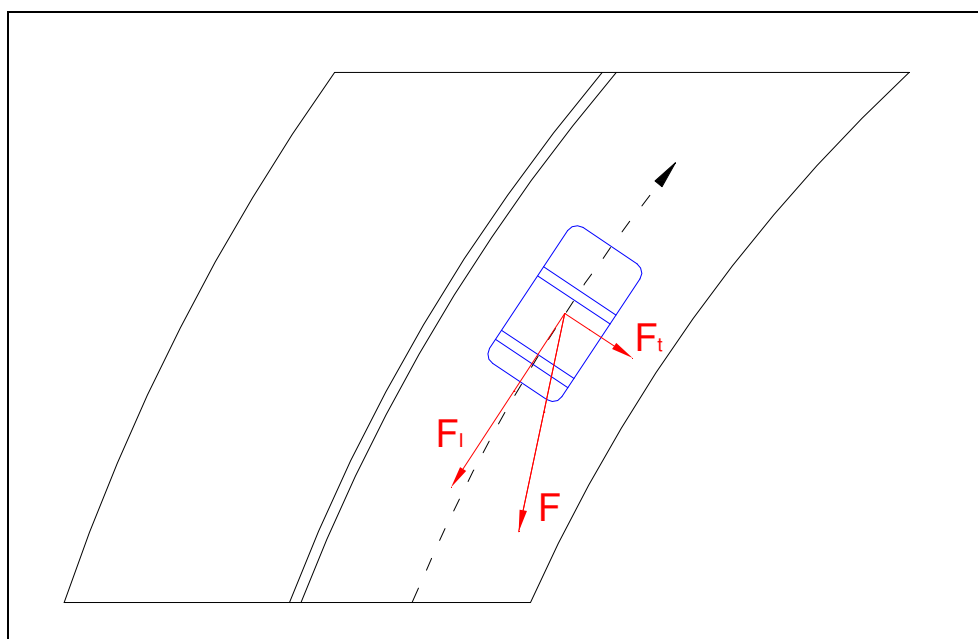
$V$  [km/h] = η ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα στην καμπύλη,

$R'$  [m] = η ακτίνα της τροχιάς που ακολουθεί το όχημα στην καμπύλη,

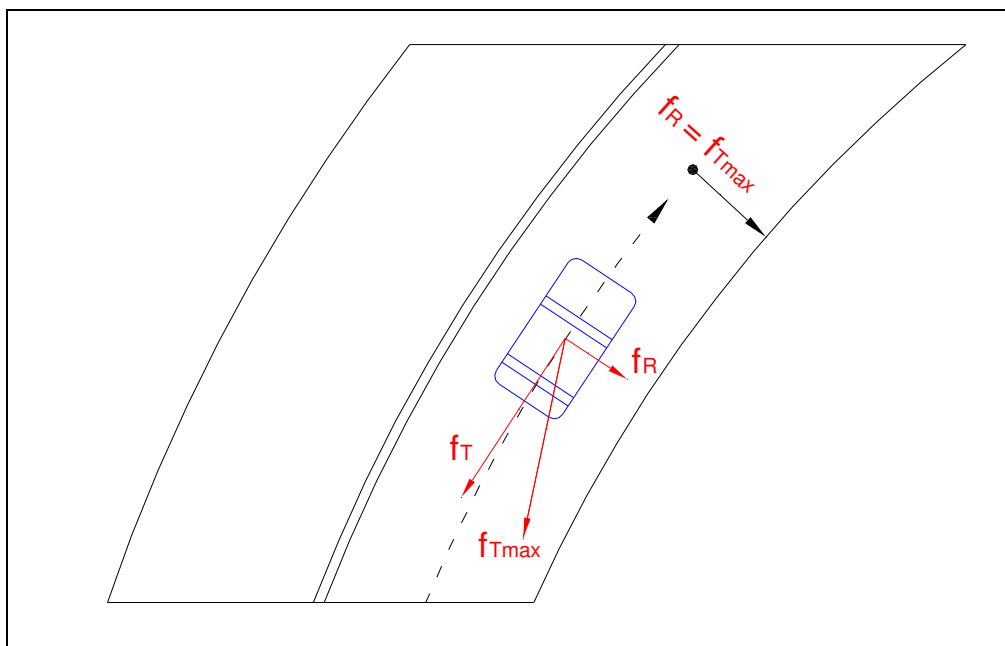
$e$  = η επίκλιση στην καμπύλη (%/100).

Επισημαίνεται ότι η ακτίνα  $R'$  στη συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί την ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς ενός οχήματος στο επίπεδο της αναγωγής της καμπύλης και όχι την ανηγμένη ακτίνα του στο οριζόντιο επίπεδο. Στο Παράρτημα 6 (παράγραφος 6.1.) αποδεικνύεται ότι η παραπάνω σχέση είναι ισοδύναμη με την αντίστοιχη σχέση για την οριζόντια ακτίνα για επίκλιση μικρότερη από 10% περίπου.

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η γεωμετρική ερμηνεία των δυνάμεων στην καμπύλη κίνηση σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς [Ψαριανός, 2005-2006] και [RAS-L-1, 1995]. Είναι φανερό ότι το όχημα ξεφεύγοντας οριακά από τους Κανονισμούς μπορεί να κινηθεί κατά τέτοιο τρόπο (ταχύτητα και ακτίνα τροχιάς), ώστε η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής να διατεθεί κατά την εγκάρσια διεύθυνση και ο διατιθέμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στην καμπύλη να είναι θεωρητικά μηδέν. Σε αυτή τη περίπτωση οποιαδήποτε πέδηση του οχήματος ενδέχεται να αποβεί μοιραία (Σχ. 5.3). Οι Κανονισμοί όμως προβλέπουν περιθώρια ασφαλείας, όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια.



Σχήμα 5.2 : Δυνάμεις σε καμπύλη κίνηση.



Σχήμα 5.3 : Συντελεστές τριβής σε καμπύλη.

Η δύναμη της τριβής στα ελαστικά του οχήματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. [Ψαριανός, 2005-2006]. Αρχικά, το είδος και η κατάσταση του οδοστρώματος αποτελούν καθοριστικές παράμετρους καθώς το οδόστρωμα μπορεί να είναι στεγνό, βρεγμένο, με πάγο ή ακόμα και με λάσπη. Είναι προφανές ότι ανάλογα με την κατάσταση του οδοστρώματος, η αντίσταση που προκαλείται στο όχημα είναι διαφορετική. Η εμφάνιση της τριβής επίσης εξαρτάται από τις ιδιότητες και την κατάσταση του οχήματος. Επί παραδείγματι, η συμπεριφορά του οχήματος στο οδόστρωμα είναι διαφορετική ανάλογα με τον κινητήριο άξονα του οχήματος, με το φορτίο του, με τα χαρακτηριστικά των ελαστικών και την κατάστασή τους. Τέλος, η τριβή εξαρτάται από το είδος της κίνησης του οχήματος, δηλαδή αν το όχημα επιταχύνει ή επιβραδύνει ή αν έχει σταθερή ταχύτητα.

### 5.2.1. Γερμανικοί και Ελληνικοί Κανονισμοί

Σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς [Ψαριανός, 2005-2006], η τιμή του συντελεστή τριβής για το 95% των οδοστρωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$f_{T_{max}} = 0.241 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 - 0.721 \cdot \left(\frac{V}{100}\right) + 0.708 \quad (5.3),$$

όπου:

$f_{T_{max}}$  = η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή τριβής που επιτρέπεται να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς,

$V$  [km/h] = η ταχύτητα του οχήματος.

Η σχέση αυτή έχει προκύψει από μετρήσεις ολισθηρότητας σε αντιπροσωπευτικά υγρά οδοστρώματα της ομοσπονδιακής Γερμανίας και οι τιμές που προκύπτουν για το συντελεστή επαπτομενικής τριβής καλύπτουν το 95% των περιπτώσεων και επομένως, μόνο στο 5% των οδοστρωμάτων της Γερμανίας μπορεί να προκύψουν ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Για τον συντελεστή πλευρικής τριβής προβλέπονται περιθώρια ασφαλείας, διότι αποδείχθηκε ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό οδηγών κινείται στις καμπύλες με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα μελέτης ακόμα και σε υγρό οδόστρωμα. Κατά συνέπεια, ορίζεται ο συντελεστής εκμετάλλευσης  $n$  της τιμής του συντελεστή εγκάρσιας τριβής. Τέλος, η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής πολλαπλασιάζεται, εκτός από το  $n$ , και με τον συντελεστή 0.925 που καλύπτει την επίδραση της μορφής και της κατάστασης των ελαστικών. Άρα ο επιτρεπόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$f_R = 0.925 \cdot n \cdot f_{T_{\max}} \quad (5.4)$$

Οι συνηθέστερες τιμές του  $n$  είναι 50%, 60% και 70%, ανάλογα με τη κατηγορία της οδού και τις ταχύτητες που αναπτύσσονται. Όταν ένα όχημα κινείται με μικρή ταχύτητα ή διαγράφει πολύ μικρή ακτίνα ή και τα δύο μαζί, τότε ο συντελεστής πρέπει να είναι μεγαλύτερος διότι αλλιώς το όχημα θα ολισθήσει προς το εσωτερικό της καμπύλης.

Στη συνέχεια είναι δυνατός ο υπολογισμός του διατιθέμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στην καμπύλη. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.3 ισχύει η σχέση:

$$f_T^2 = f_{T_{\max}}^2 - f_R^2 \quad (5.5),$$

όπου:

$f_T$  = ο διατιθέμενος συντελεστής επαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στη καμπύλη,

$f_R$  = ο συντελεστής πλευρικής τριβής,

$f_{T_{\max}}$  = ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής επαπτομενικής τριβής που αναπτύσσεται στα ευθύγραμμα τμήματα.

Ο διατιθέμενος συντελεστής τριβής στην καμπύλη για  $n$  50%, 60% και 70% προκύπτει 89%, 83% και 76% αντίστοιχα του μέγιστου διατιθέμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής στα ευθύγραμμα τμήματα.

Οι Ελληνικές Οδηγίες ΟΜΟΕ-Χ [Ψαριανός, 2001], ακολουθούν την ίδια μεθοδολογία για τον υπολογισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή εγκάρσιας τριβής με τις Γερμανικές Οδηγίες όμως, η σχέση για τον μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή επαπτομενικής τριβής προκύπτει με διαφορετική τακτική. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι στην Ελλάδα παρατηρήθηκαν μικρότερες τιμές πρόσφυσης και άρα μικρότερες τιμές συντελεστών τριβής. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε όμως σε επιλογή μεγαλύτερων ακτίνων χάραξης και συνεπώς σε αντικοινωνικές κατασκευές.

Σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ-Χ, ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής επαπτομενικής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$f_{T_{\max}} = 0.59 - 4.85 \cdot \left( \frac{V}{100} \right) + 1.51 \cdot \left( \frac{V^2}{100000} \right) \quad (5.6),$$

όπου:

$f_{T_{\max}}$  = ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής επαπτομενικής τριβής,

$V$  [km/h] = η ταχύτητα.

Οι συντελεστές εκμετάλλευσης  $\eta$  των ΟΜΟΕ-Χ, για τις διάφορες κατηγορίες οδού και για τα διάφορα είδη εδάφους είναι υπό αμφισβήτηση στις μέρες μας.

Το ζητούμενο στην παρούσα εργασία είναι να εξεταστεί για τις τέσσερις καμπύλες αν ο διατιθέμενος από τους κανονισμούς συντελεστής πλευρικής τριβής είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή της αναπτυσσόμενης πλευρικής τριβής των οχημάτων. Επιλέχθηκε να μην εξεταστεί η τριβή για κάθε ένα όχημα, διότι στα πλαίσια του γεωμετρικού σχεδιασμού είναι προτιμότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας στατιστικά δεδομένα από συγκεκριμένο ποσοστό του δείγματος οχημάτων κάθε καμπύλης. Με αυτή τη λογική, οι διατιθέμενες τιμές εφαπτομενικής και εγκάρσιας τριβής προκύπτουν από τις προηγούμενες σχέσεις, ενώ ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής προκύπτει από τη σχέση:

$$f_{RA} = \frac{V_{85}^2}{127 \cdot R'} - e \quad (5.7),$$

όπου :

$f_{RA}$  = ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής,

$V_{85}$  [km/h] = η λειτουργική ταχύτητα της καμπύλης,

$R'$  [m] = η μέση ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς που ακολουθούν τα οχήματα στην καμπύλη,

$e$  = η μέση επίκλιση της καμπύλης (%/100).

Επισημαίνεται ότι η χρήση της παραπάνω σχέσης δίνει σημαντικά περιθώρια ασφαλείας, καθώς η ταχύτητα επιλέγεται με βάση το 85% των οδηγών, ενώ για την ανηγμένη ακτίνα με βάση το 50% περίπου των οδηγών.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής για τις τέσσερις καμπύλες ανάλογα με τους Κανονισμούς που χρησιμοποιούνται.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ [km/h]	$f_{Tmax}$	$\eta^*$	$f_R$	$f_{RA}$	$f_R - f_{RA}$
A	58.3	0.36	1	0.34	0.34	0.00
B	64.2	0.34	0.6	0.19	0.18	0.01
C	69.7	0.33	0.5	0.15	0.08	0.07
D	103.0	0.25	0.4	0.09	0.02	0.07

**Πίνακας 5.1 :** Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς, ΟΜΟΕ-Χ - 2001.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ [km/h]	$f_{Tmax}$	$\eta^*$	$f_R$	$f_{RA}$	$f_R - f_{RA}$
A	58.3	0.37	1	0.34	0.34	0.00
B	64.2	0.34	0.6	0.19	0.18	0.01
C	69.7	0.32	0.5	0.15	0.08	0.07
D	103.0	0.22	0.4	0.08	0.02	0.06

**Πίνακας 5.2 :** Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, RAS-L-1, 1995.

Στην πορεία της έρευνας βγήκαν και οι Γερμανικοί Κανονισμοί του 2008 [Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008], στους οποίους, ανάλογα με την ταχύτητα, δίνεται η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής. Η

υπόλοιπη διαδικασία παραμένει η ίδια. Τα αποτελέσματα των πιο σύγχρονων τιμών των Γερμανικών Κανονισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$V_{85}$ [km/h]	$f_{Tmax}$	$n^*$	$f_R$	$f_{RA}$	$f_R - f_{RA}$
A	58.3	0.36	1	0.34	0.34	0.00
B	64.2	0.35	0.6	0.20	0.18	0.02
C	69.7	0.34	0.5	0.16	0.08	0.08
D	103.0	0.29	0.4	0.11	0.02	0.09

**Πίνακας 5.3 :** Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, 2008.

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης σε αυτή την περίπτωση συμβολίζεται με  $n^*$ , διότι αναφέρεται στο ποσοστό του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής όταν ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής αναφέρεται στην ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς των οδηγών και όχι στην ακτίνα της χάραξης.

Παρατηρείται ότι και για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις προκύπτουν οι ίδιοι συντελεστές εκμετάλλευσης  $n^*$ , που σημαίνει ότι εξάγουν τα ίδια συμπεράσματα. Φαίνεται πως το μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων για τις καμπύλες B, C και D έχει αναπτυσσόμενο συντελεστή πλευρικής τριβής μικρότερο από το διατιθέμενο από τους Κανονισμούς που αναπτύσσεται μεταξύ της διεπιφάνειας ελαστικού και οδοστρώματος. Αυτό σημαίνει ότι για τις συγκεκριμένες καμπύλες η πρόσφυση είναι επαρκής, ώστε να προβλέπεται η ασφαλής διέλευση των οχημάτων, σύμφωνα πάντα με τους Κανονισμούς. Αυτό όμως δεν αποκλείει τις περιπτώσεις διέλευσης οχημάτων με πολύ υψηλές ταχύτητες, όπου εκεί πιθανώς να ξεπεράσουν τη διατιθέμενη πρόσφυση. Δεν πρέπει όμως να παραβλεφθεί το γεγονός ότι οι τιμές των συντελεστών τριβής που καθορίζουν οι Κανονισμοί αναφέρονται σε βρεγμένο και καθαρό οδόστρωμα και συνεπώς οι τιμές που μπορούν να αναπτυχθούν στο στεγνό οδόστρωμα είναι πολύ μεγαλύτερες. Επιπλέον, οι Κανονισμοί προβλέπουν περιθώρια ασφαλείας και μετά την εξάντληση του ολικού συντελεστή τριβής. Με βάση τα παραπάνω, εξηγείται και η συμπεριφορά της πιο κλειστής και πιο επικίνδυνης καμπύλης A. Σε αυτή τη στροφή, οι οδηγοί κινούνται χωρίς να διαθέτουν σημαντικά περιθώρια ασφαλείας για πέδηση, τουλάχιστον σε υγρό οδόστρωμα, μιας και πρέπει να διαθέσουν πολύ μεγαλύτερο ποσοστό συντελεστή επαπτομενικής τριβής κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε σχέση με τις άλλες καμπύλες.

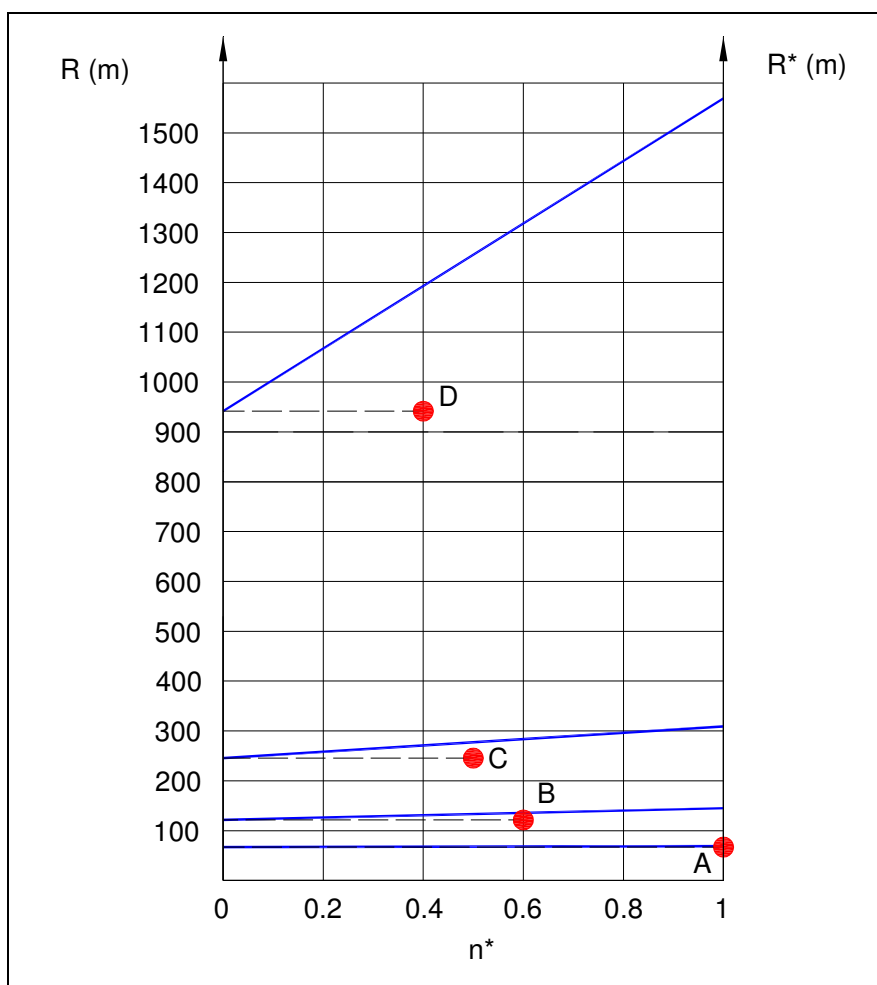
Ο διατιθέμενος συντελεστής επαπτομενικής τριβής  $f_T$  για τροχοπέδηση σε κάθε καμπύλη ως ποσοστό του  $f_{Tmax}$  προέκυψε:

ΚΑΜΠΥΛΗ	$f_T = (\%) f_{Tmax}$
A	38
B	83
C	89
D	93

**Πίνακας 5.4 :** Αποτελέσματα ποσοστού διατιθέμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στις καμπύλες ως προς το μέγιστο συντελεστή επαπτομενικής τριβής.



Στη συνέχεια παρουσιάζεται διαγραμματικά η μεταβολή του συντελεστή εκμετάλλευσης  $n^*$  σε σχέση με την ανηγμένη ακτίνα χάραξης αλλά και την μέση ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς των οχημάτων για τις τέσσερις καμπύλες.



Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης  $n^*$ .

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.10, αλλά και στο παραπάνω σχήμα, η μέση πραγματική ανηγμένη ακτίνα των οχημάτων σε κάθε καμπύλη είναι μεγαλύτερη από την ανηγμένη ακτίνα χάραξης. Αυτό σημαίνει ότι οι γενικά οι Γερμανικοί και Ελληνικοί Κανονισμοί χάραξης διαθέτουν περιθώρια ασφαλείας, όπως άλλωστε αποδείχθηκε στις καμπύλες B, C και D. Αντίθετα, στην καμπύλη A αποδείχθηκε ότι τα περιθώρια ασφαλείας είναι ιδιαίτερα περιορισμένα. Δηλαδή, ενώ για τις τρεις καμπύλες μαθηματικά αποδεικνύεται ότι οι Κανονισμοί υπερσχεδιάζουν, στην καμπύλη A δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Λόγω του περιορισμένου αριθμού καμπυλών που εξετάζονται, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία και δεδομένα, ώστε να είναι δυνατό να γίνουν συστάσεις στους Κανονισμούς για μείωση ακτίνων των οριζόντιων καμπυλών. Στο Παράρτημα 6 (παράγραφος 6.2.) παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι τρεις πίνακες με τους Ελληνικούς και Γερμανικούς Κανονισμούς, όπου προκύπτουν οι συντελεστές εκμετάλλευσης  $n$ , δηλαδή όταν χρησιμοποιείται στους τύπους η ανηγμένη ακτίνα χάραξης. Ειδικότερα για την καμπύλη B προκύπτει ότι απαιτείται συντελεστής εκμετάλλευσης 70% αντί 60% που υπολογίστηκε παραπάνω.

### 5.2.2. Αμερικανικοί Κανονισμοί

Σύμφωνα με τους Αμερικανικούς Κανονισμούς [AASHTO, 2004], ο σχεδιασμός οδών ως προς την οριζοντιογραφία βασίζεται στην κατάλληλη σχέση μεταξύ ταχύτητας σχεδιασμού, της ακτίνας καμπυλότητας και της από κοινού σχέσης τους με την επίκλιση και την πλευρική τριβή. Ως ταχύτητα σχεδιασμού θεωρείται η επιλεγμένη ταχύτητα που χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα ποικίλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδών. Η υποτιθέμενη ταχύτητα σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνεται σύμφωνα με την τοπογραφία της περιοχής, την προσδοκώμενη λειτουργική ταχύτητα, τις γειτονικές χρήσεις γης και τη λειτουργική κατάταξη των οδών. Σύμφωνα επίσης με τους Αμερικανικούς Κανονισμούς, όταν ένα όχημα έχει σταθερή ταχύτητα σε μια καμπύλη που έχει επίκλιση, έτσι ώστε ο συντελεστής πλευρικής τριβής είναι μηδέν, η κεντρομόλος επιτάχυνση αντισταθμίζεται μόνο από τη συνιστώσα του βάρους και θεωρητικά τουλάχιστον δε χρειάζεται δύναμη διεύθυνσης οχήματος (περιστροφή τιμονιού). Όταν το όχημα κινείται πιο γρήγορα ή πιο αργά από την ταχύτητα ισορροπίας, αναπτύσσεται τριβή στα ελαστικά, καθώς χρειάζεται προσπάθεια από μέρος του οδηγού για να μη ξεφύγει από την πορεία του. Στις καμπύλες που δεν έχουν επίκλιση, οι ταχύτητες των οχημάτων διαφέρουν και σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούν την κατάλληλη τιμή πλευρικής τριβής ώστε να αντισταθμίσουν την κεντρομόλο επιτάχυνση.

Οι ίδιοι Κανονισμοί αναφέρουν ότι υπάρχουν ανώτατα όρια επίκλισης στην οριζοντιογραφία. Αυτά τα όρια σχετίζονται κυρίως με το κλίμα, τις κατασκευαστικές ιδιότητες, τις προσκείμενες χρήσεις γης και τη συχνότητα των αργά κινούμενων οχημάτων. Στις οδούς όπου μπορεί να εμφανιστεί χιόνι ή πάγος, ο βαθμός της υπερύψωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το ρυθμό με τον οποίο τα οχήματα ταξιδεύουν, καθώς μπορεί να γλιστρήσουν προς το εσωτερικό της καμπύλης. Αντίστοιχα, εμφανίζεται ολίσθηση προς το εσωτερικό της καμπύλης, όταν αναπτύσσονται υψηλές ταχύτητες σε οδόστρωμα με κακή απορροή, όταν βρέχει. Σε αυτή την περίπτωση, η διαθέσιμη πλευρική τριβή είναι χαμηλότερη από την απαιτούμενη για τη στρόφη. Όταν ένα όχημα κινείται αργά σε μία καμπύλη με μεγάλη επίκλιση, αναπτύσσονται αντίθετες πλευρικές δυνάμεις και ο οδηγός διατηρεί την πορεία του μόνο αν στρίψει το τιμόνι προς το εξωτερικό της καμπύλης. Κατά συνέπεια, οι μεγάλες επικλίσεις είναι ανεπιθύμητες στις οδούς με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, όπως οι αστικές και προαστιακές περιοχές. Τέλος, ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι μεγάλες επικλίσεις για τα οχήματα που έχουν υψηλό κέντρο βάρους. Όταν αυτά τα οχήματα κινηθούν αργά εντός της καμπύλης, υπάρχει κίνδυνος να ανατραπούν λόγω της ανισοκατανομής φορτίου.

Ο συντελεστής πλευρικής τριβής, σύμφωνα με τους ίδιους Κανονισμούς, ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την απαραίτητη για το όχημα πλευρική τριβή. Η πλευρική τριβή αποτελεί την πλευρική επιτάχυνση που ασκείται κατά την εγκάρσια διεύθυνση του οχήματος. Η επιτάχυνση αυτή υπολογίζεται από το γινόμενο του συντελεστή πλευρικής τριβής και της σταθεράς της βαρύτητας ( $a_f = f \cdot g$ ). Το ανώτερο όριο του συντελεστή πλευρικής τριβής είναι εκείνο στο οποίο τα ελαστικά ξεκινούν να ολισθαίνουν προς το εσωτερικό της καμπύλης. Η τιμή του συντελεστή πλευρικής τριβής για επικείμενη πλαγιοολίσθηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του οχήματος, το είδος και η κατάσταση του οδοστρώματος, το είδος και η κατάσταση των ελαστικών και οι καιρικές συνθήκες. Γενικά διαπιστώθηκε από μελέτες ότι οι μέγιστες τιμές αναπτύχθηκαν σε υγρό οδόστρωμα, όταν τα ελαστικά ήταν καινούργια, ενώ για πιο φθαρμένα ελαστικά, οι τιμές μειώνονται σημαντικά. Το

βασικότερο συμπέρασμα, που προέκυψε σε όλες μελέτες, είναι ότι ο συντελεστής πλευρικής τριβής μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα.

Ωστόσο, οι Αμερικανικοί Κανονισμοί [AASHTO, 2004] θεωρούν ότι ο σχεδιασμός των καμπυλών δεν πρέπει να γίνεται με βάση τις μέγιστες τιμές διατιθέμενου συντελεστή πλευρικής τριβής, διότι κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε υψηλά κόστη συντήρησης. Το κριτήριο για την επιλογή της μέγιστης τιμής του συντελεστή πλευρικής τριβής που θα χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό είναι το επίπεδο της κεντρομόλου (ή πλευρικής) επιτάχυνσης, που είναι αρκετή, ώστε να προκαλέσει στους οδηγούς να βιώσουν το αίσθημα της δυσφορίας και στη συνέχεια να αντιδράσουν ενστικτωδώς αποφεύγοντας την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων. Η ταχύτητα καμπύλης, στην οποία αναπτύσσεται το αίσθημα της δυσφορίας, εξ αιτίας της κεντρομόλου επιτάχυνσης, αποτελεί το στοιχείο που οδηγεί στον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής εγκάρσιας τριβής σχεδιασμού για τους αυτοκινητόδρομους και τις υπεραστικές οδούς. Για χαμηλές ταχύτητες οι οδηγοί είναι περισσότερο ανεκτικοί στη δυσφορία, γι’ αυτό και απαιτούν υψηλότερες τιμές σχεδιασμού πλευρικής τριβής. Για κάθε περίπτωση, το αίσθημα της δυσφορίας ανιχνεύεται με το σύστημα “ball – bank indicator”. Επίσης, είναι γνωστό το γεγονός ότι υπό την επίδραση υψηλού συντελεστή τριβής, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα του οδηγού, όπως π.χ. παρεκκλίσεις του οδηγού και αυξημένη προσπάθεια ώστε να αποφύγει την είσοδό του στο αντίθετο ρεύμα κλπ. Υπό αυτές τις συνθήκες, το εύρος της όρασης μειώνεται και χρειάζεται ο οδηγός να είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένος και σε επαγρύπνηση.

Αξίζει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι το σύστημα “ball – bank indicator” τοποθετείται στο όχημα των υπό μελέτη οδηγών και ουσιαστικά καταγράφει κάποιες γωνίες, οι οποίες με κάποια διαδικασία αντιστοιχούν σε τιμές πλευρικής επιτάχυνσης. Όμως, το αίσθημα της δυσφορίας για κάθε οδηγό όπως μελετήθηκε από τους συγκεκριμένους Κανονισμούς, εξαρτάται και από την τροχιά που επιλέγουν οι οδηγοί. Αυτή είναι μια παράμετρος που ίσως παρέβλεψαν οι μελετητές, διότι προφανώς, θεωρούν ότι ο οδηγός ακολουθεί τη χάραξη.

Τέλος, αναφέρεται ότι οι μέγιστες παράμετροι πλευρικής τριβής που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό πρέπει να είναι συντηρητικοί για στεγνά οδοστρώματα και πρέπει να παρέχουν μεγάλα περιθώρια ασφάλειας πλαγιοολίσθησης σε υγρά οδοστρώματα ή και ακόμα σε οδοστρώματα καλυμμένα με πάγο. Στην εξασφάλιση αυτή υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες δεν πρέπει να δοθεί υπερβολική έμφαση, διότι οι περισσότερες ανάγκες σε τριβή βρίσκονται στην επιτόρξια διεύθυνση, όπου πραγματοποιούνται ελιγμοί πέδησης κλπ. Στις AASHTO [2004] παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα πλευρικής τριβής που συνιστώνται για σχεδιασμό καμπυλών σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν σε διάφορες Πολιτείες. Το συγκεντρωτικό διάγραμμα για σχεδιασμό οδών χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων παρουσιάζει τον συντελεστή πλευρικής τριβής σχεδιασμού για τις διάφορες ταχύτητες σχεδιασμού.

Σε μία πρόσφατη έρευνα των Pratt και Bonneson [2008], χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ώστε να υπολογιστεί η αυστηρότητα των καμπυλών και η συνέπεια στο σχεδιασμό, χρησιμοποιώντας μετρήσεις ενέργειας (απώλειες) και τριβής. Μέχρι την έρευνα αυτή η αυστηρότητα στις καμπύλες βασιζόταν αποκλειστικά στα δεδομένα μείωσης της ταχύτητας. Η νέα έρευνα

αποδεικνύει ότι η πλευρική τριβή που επιλέγουν οι οδηγοί (side friction demand) είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που ορίστηκαν στις AASHTO [2004] σύμφωνα με τη δυσφορία των οδηγών. Μάλιστα, η αύξηση της απαιτούμενης πλευρικής τριβής σε σχέση με τα κατώφλια των Αμερικανικών Κανονισμών, δείχνει να είναι περίπου ανάλογη με τη μείωση της κινητικής ενέργειας, που σχετίζεται με τη μείωση της ταχύτητας. Αρμόδιες υπηρεσίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα περί αυστηρότητας μια καμπύλης και να εξετάσουν ποιες καμπύλες της δικαιοδοσίας τους θα επωφεληθούν περισσότερο από τα μέτρα ασφαλείας που μπορούν να ληφθούν.

Η έρευνα αυτή αναφέρει πως στις διάφορες βιβλιογραφίες υπάρχουν πολλά μοντέλα που σχετίζουν την ταχύτητα σε μία καμπύλη με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Τα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση της ταχύτητας στην ευθυγραμμία (ταχύτητα προσέγγισης στις καμπύλες) έδειξαν ότι οι οδηγοί επιλέγουν ταχύτητες στην καμπύλη τέτοιες ώστε, να ελαχιστοποιείται η μείωση της ταχύτητας, αλλά παράλληλα να αποφεύγονται τα υπερβολικά μεγέθη απαιτούμενης πλευρικής τριβής (λόγω μεγάλης ταχύτητας). Στις παλαιότερες έρευνες ίσχυε πως όσο πιο μεγάλη είναι η μείωση της ταχύτητας από την ευθυγραμμία στην καμπύλη τόσο πιο αυστηρή θεωρείται η καμπύλη και τόσο μεγαλύτερη η ασυνέπεια της χάραξης στις προσδοκίες των οδηγών. Σε αυτή την έρευνα, η αυστηρότητα μετριέται βασιζόμενη στα επίπεδα της απαιτούμενης πλευρικής τριβής των οδηγών και της κινητικής ενέργειας. Η τριβή που ενδιαφέρει τους μελετητές είναι η πλευρική διαφορική τριβή, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της απαιτούμενης πλευρικής τριβής, στην ταχύτητα της καμπύλης που επιλέγουν οι οδηγοί, και της τριβής που αποτελεί κατώφλι άνεσης στους οδηγούς για τη συγκεκριμένη ταχύτητα. Τέλος, αναφέρεται ότι το *Πράσινο Βιβλίο* [AASHTO, 2004] υποδεικνύει τους συντελεστές σχεδιασμού πλευρικής τριβής (κατώφλια) που είναι συντηρητικά χαμηλότεροι από το σημείο όπου οι περισσότεροι οδηγοί αρχίζουν να αισθάνονται δυσφορία.

Σε σχέση με τα ατυχήματα που σχετίζονται με την καμπυλότητα της οριζοντιογραφίας, η μελέτη αυτή τα διακρίνει σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε οδηγούς που δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία της καμπύλης λόγω ψυχολογικών αιτιών ή λόγω περιορισμένης ορατότητας. Η δεύτερη κατηγορία ατυχημάτων σχετίζεται με τους οδηγούς που υποτιμούν την οξύτητα μιας καμπύλης. Στην τελευταία περίπτωση, οι οδηγοί εισέρχονται στην καμπύλη με υψηλή ταχύτητα και έχουν απαιτούμενη πλευρική τριβή πιο ψηλά από τα όρια της άνεσης. Οι οδηγοί αντιλαμβανόμενοι αυτό το απροσδόκητο ρίσκο, είτε διορθώνουν τη τροχιά τους, είτε φρενάρουν δυνατά, ώστε να συμβιβάσουν τα παρεχόμενα επίπεδα πλευρικής τριβής των ελαστικών τους. Η έρευνα των Pratt και Bonneson [2008] εξετάζει τη δεύτερη κατηγορία ατυχημάτων, διότι αυτά τα ατυχήματα σχετίζονται με την επιλογή ταχύτητας των οδηγών στις καμπύλες και με την αίσθησή τους ως προς την απαιτούμενη πλευρική τριβή. Για να μειωθούν τα ατυχήματα αυτού του τύπου, πρέπει να χρησιμοποιηθούν σχετικές ποσοτικές μετρήσεις, για να προσδιοριστεί η αυστηρότητα μιας καμπύλης και να ανιχνευτούν οι καμπύλες που θα επωφεληθούν περισσότερο από τα μέτρα για την ασφάλεια.

Η ποσοτικοποίηση του κινδύνου στις καμπύλες υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την απαιτούμενη πλευρική τριβή. Σύμφωνα με τα μοντέλα ταχύτητας των δύο ερευνητών, οι οδηγοί επιλέγουν ταχύτητες στις καμπύλες βασιζόμενοι στην άνεση και όσο το δυνατόν, στη διατήρηση της ταχύτητας. Αν η ακτίνα μιας καμπύλης είναι αρκετά μεγάλη οι οδηγοί δε θα νιώσουν άβολα διανύοντας την καμπύλη στην ταχύτητα της

ευθυγραμμίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο οδηγός δεν επιβραδύνει και κατά συνέπεια ο κίνδυνος ατυχήματος δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένος.

Αν η απαιτούμενη πλευρική τριβή της καμπύλης στην ταχύτητα της ευθυγραμμίας είναι υψηλότερη από το κατώφλι των Κανονισμών για αυτή την ταχύτητα, οι οδηγοί θα επιλέξουν μια ταχύτητα καμπύλης, που να αντιστοιχεί σε μία απαιτούμενη πλευρική τριβή πιο πάνω από το κατώφλι, αλλά όχι πάνω από μια τιμή που θα θεωρούν αποδεκτή, καθώς οι οδηγοί επιθυμούν να διατηρούν σταθερή τη ταχύτητά τους. Άρα λοιπόν, αποφεύγουν κάποιον κίνδυνο ατυχήματος από την επιβράδυνση, αλλά από την άλλη, δέχονται κάποιον κίνδυνο για να διατηρήσουν την επιθυμητή ταχύτητα στην καμπύλη.

Ο Glenon [2006] προτείνει το διαχωρισμό της αυστηρότητας μιας καμπύλης σύμφωνα με την απαιτούμενη πλευρική τριβή για την ταχύτητα της καμπύλης. Το σκεπτικό του είναι πως όσο μεγαλώνει η τιμή της απαιτούμενης πλευρικής τριβής, τόσο πιο ισχυρά είναι τα μέτρα σήμανσης για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Εκτός από τα εύρη της απαιτούμενης πλευρικής τριβής που αντιστοιχούν σε κάποιο μέτρο πρόληψης, αναφέρονται επίσης, τα διαφορετικά επίπεδα πλευρικής τριβής για κάθε εύρος. Οι υπολογισμοί της μεθόδου είναι οι εξής:

▪ Υπολογισμός μέγιστου κινδύνου – **Maximum Risk**

Ο μέγιστος κίνδυνος ατυχήματος βιώνεται, όταν οι οδηγοί διασχίζουν την καμπύλη χωρίς επιβράδυνση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υφίστανται απαιτούμενη τιμή πλευρικής τριβής σημαντικά μεγαλύτερη από το όριο άνεσης. Η ποσότητα με την οποία η απαιτούμενη πλευρική τριβή, που έχει υπολογιστεί με την ταχύτητα στην ευθυγραμμία, υπερβαίνει τα όρια της άνεσης για τους οδηγούς, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{maximum risk} \propto f_{T,85} - f_{T,Des} = \left( \frac{V_{T,85}^2}{127 \cdot R} - \frac{e}{100} \right) - f_{T,Des} \quad (5.8),$$

όπου:

$f_{T,85}$  = απαιτούμενη πλευρική τριβή για  $V_{85}$  της ευθυγραμμίας (g),

$f_{T,Des}$  = κατώφλι πλευρικής τριβής Κανονισμών για  $V_{85}$  της ευθυγραμμίας (g),

$V_{T,85}$  = η  $V_{85}$  στην ευθυγραμμία (g).

▪ Υπολογισμός κινδύνου που αποφεύγεται από τους οδηγούς – **Risk Avoided**

Όταν οι οδηγοί μειώνουν ταχύτητα, μειώνουν την ποσότητα της απαιτούμενης πλευρικής τριβής που υφίστανται. Επίσης, η μείωση της ταχύτητας επιφέρει μια μικρή αύξηση στην ανοχή της πλευρικής τριβής, επειδή το κατώφλι άνεσης μειώνεται καθώς αυξάνει η ταχύτητα. Άρα, η ποσότητα του κινδύνου που γλιτώνουν οι οδηγοί μειώνοντας την ταχύτητά τους είναι:

$$\text{risk avoided} \propto (f_{T,85} - f_{C,85}) + (f_{C,Des} - f_{T,Des}) = \left( \frac{V_{T,85}^2 - V_{C,85}^2}{127 \cdot R} \right) + (f_{C,Des} - f_{T,Des}) \quad (5.9),$$

όπου:

$f_{C,Des}$  = κατώφλι πλευρικής τριβής Κανονισμών για  $V_{85}$  στην καμπύλη (g),

$V_{C,85}$  = η  $V_{85}$  στην καμπύλη (g).

Η πρώτη διαφορά της παραπάνω σχέσης ( $f_{T,85} - f_{C,85}$ ), είναι η ποσότητα της απαιτούμενης πλευρικής τριβής που αποφεύγει ο οδηγός, καθώς μειώνει την ταχύτητά του, και η δεύτερη διαφορά ( $f_{C,Des} - f_{T,Des}$ ) υπολογίζει την μικρή αύξηση στην ανοχή του οδηγού ως προς την πλευρική τριβή, εξ αιτίας της μείωσης της ταχύτητας.

▪ Υπολογισμός αποδεχόμενου κινδύνου – **Risk Accepted**

Ο αποδεκτός κίνδυνος των οδηγών που μπορεί να τους οδηγήσει σε ατύχημα, σχετίζεται με την επιλογή της ταχύτητάς τους στις καμπύλες. Ο αποδεκτός κίνδυνος για μια συγκεκριμένη ταχύτητα είναι ανάλογος με την ποσότητα που η απαιτούμενη πλευρική τριβή ξεπερνά τα όρια άνεσης των Κανονισμών για την ίδια ταχύτητα και ισούται με:

$$\text{risk accepted} \propto f_{C,85} - f_{C,Des} = \left( \frac{V_{C,85}^2}{127 \cdot R} - \frac{e}{100} \right) - f_{C,Des} \quad (5.10),$$

όπου:

$f_{C,Des}$  = κατώφλι πλευρικής τριβής Κανονισμών για  $V_{85}$  στην καμπύλη (g),

$V_{C,85}$  = η  $V_{85}$  στην καμπύλη (g).

Η παραπάνω εξίσωση θεωρείται ένα μέτρο για τον προσδιορισμό της αυστηρότητας της καμπύλης. Η ποσότητα αυτή είναι η διαφορική τιμή πλευρικής τριβής. Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι ο μέγιστος κίνδυνος ισούται με το άθροισμα του κινδύνου που αποφεύγεται λόγω της μείωσης της ταχύτητας και του αποδεκτού κινδύνου.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο υπολογισμός της απώλειας της κινητικής ενέργειας ως η διαφορά της κινητικής ενέργειας στην ταχύτητα προσέγγισης της καμπύλης με την κινητική ενέργεια στην καμπύλη. Από την έρευνα αποδεικνύεται πως όσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες, για το ίδιο dV παρατηρείται αύξηση της απώλειας ενέργειας. Επίσης, συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες στην ευθυγραμμία, τόσο μεγαλύτερος και ο κίνδυνος ατυχήματος.

Σκεπτόμενοι την παραπάνω μεθοδολογία, αλλά και το περιορισμένο πλήθος δεδομένων που διατίθεται στην παρούσα έρευνα, θα μπορούσε να προσδιοριστεί μια ενδεικτική τιμή διαφορικής τριβής για κάθε καμπύλη και από την τιμή αυτή να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα ως προς την αυστηρότητα των επιλεγθέντων καμπυλών. Ακολουθώντας, με βάση την τιμή διαφορικής τριβής, είναι δυνατόν να προταθούν κάποια μέτρα σήμανσης, όπως υποδεικνύει ο Glenon [2006]. Πριν όμως ξεκινήσει η εφαρμογή παρατηρήθηκε πως μόνο οι καμπύλες A και B παρουσιάζουν απαιτούμενες πλευρικές τριβές μεγαλύτερες των κατωφλίων και άρα, είναι αυτές που αντιμετωπίζουν πρόβλημα.

Πριν την εφαρμογή, χρειάζεται επίσης να διευκρινιστούν κάποια σημεία. Αρχικά, ως ακτίνα για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης τριβής, επιλέγεται η μέση ανηγμένη ακτίνα των οχημάτων κάθε καμπύλης. Σχετικά με το θέμα της επιλογής ταχύτητας προσέγγισης στην κάθε καμπύλη, τα μήκη ευθυγραμμίας εκατέρωθεν των καμπυλών A και B δεν είναι γνωστό αν είναι εξαρτημένα ή ανεξάρτητα και γι' αυτό το λόγο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία

επιλέγεται η δυσμενέστερη περίπτωση της ανεξάρτητης ευθυγραμμίας, όπου η ταχύτητα προσέγγισης των οδηγών είναι  $V_{85}=112$  km/h για  $K_E=0$  gon/km [Ξανάκης, 2008]. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και τις τιμές των Αμερικάνικων Κανονισμών για τις καμπύλες A και B προκύπτουν τα εξής:

	$V_{85}$ [km/h]	Design - Side Friction Factor ( $f_{des}$ )	Maximum Risk	Risk Avoided	Risk Accepted
Ταχύτητα Προσέγγισης	112	0.10			
A	58.3	0.18	1.28	1.12	0.17
Ταχύτητα Προσέγγισης	112	0.10			
B	64.2	0.16	0.54	0.52	0.02

**Πίνακας 5.5 :** Αποτελέσματα διαφορικής πλευρικής τριβής – Σύγκριση απαιτούμενης πλευρικής τριβής με την πλευρική τριβή των Αμερικανικών Κανονισμών.

Σύμφωνα με τις προτεινόμενες οδηγίες για τη σήμανση στις καμπύλες από το Glenon [2006], η καμπύλη A κρίνεται ως πολύ επικίνδυνη και δεν επαρκεί η λήψη προληπτικών μέτρων μέσω της κατακόρυφης σήμανσης, για να βελτιωθούν τα περιθώρια ασφαλείας των οδηγών. Προτείνεται η ανακατασκευή της καμπύλης. Για την καμπύλη B, αρκεί μια προειδοποιητική πινακίδα χωρίς συμπληρωματική πινακίδα αναγραφής του ορίου ταχύτητας. Από την καταγραφή των στοιχείων σήμανσης στις υπό μελέτη καμπύλες, διαπιστώθηκε ότι η οδός διαθέτει προειδοποιητικές πινακίδες επικίνδυνης στροφής για τις καμπύλες C και D αλλά όχι για τις καμπύλες A και B που εμφανίζουν το πρόβλημα.

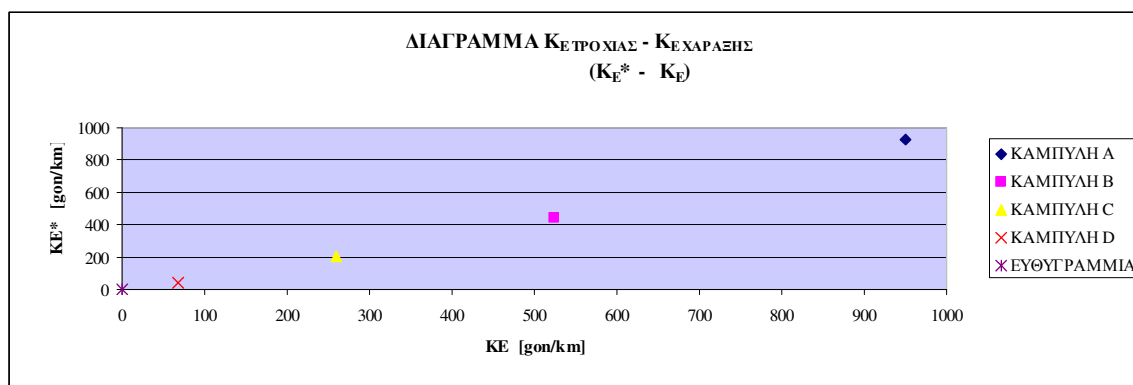
Η καμπύλη A, σύμφωνα με τις παραπάνω αναλύσεις, αποτελεί μια ιδιαίτερα επικίνδυνη στροφή και χαρακτηρίζεται ως μια ιδιαίτερα αυστηρή καμπύλη. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, διότι όπως φάνηκε και στους Γερμανικούς Κανονισμούς, τα οχήματα εξαντλούν σχεδόν όλη τη διατιθέμενη τριβή κατά την εγκάρσια διεύθυνση και κινούνται με πολύ χαμηλά περιθώρια ασφαλείας. Η διαφορική πλευρική τριβή λογικά, σχετίζεται με τον κίνδυνο ατυχήματος διότι οι οδηγοί είναι πολύ πιθανό να πανικοβληθούν και να χάσουν τον έλεγχο του οχήματος, όταν η απαιτούμενη πλευρική τριβή είναι μεγαλύτερη από την πλευρική τριβή που ορίζουν οι Κανονισμοί.

### 5.3. Σχέση Ελκτότητας Καμπύλης – Ελκτότητας Τροχιάς Οχημάτων

Σε αντίθεση με τη μελέτη των Glenon και Weaver [1971], όπου οι ερευνητές εξέτασαν τη συσχέτιση μεταξύ της στιγμιαίας ελάχιστης ακτίνας του οχήματος (στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή πλευρικής τριβής  $f_{Rmax}$ ) με την ακτίνα της καμπύλης, στην παρούσα έρευνα γίνεται προσπάθεια να συσχετιστεί η ελκτότητα του οχήματος, στο υπό μελέτη τμήμα κάθε καμπύλης, με την ελκτότητα της χάραξης. Οι δύο προσεγγίσεις έχουν σημαντικές διαφορές οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Οι Glenon και Weaver εφάρμοσαν γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ των δύο παραμέτρων. Η ανάλυση έγινε για το σύνολο των οχημάτων σε κάθε καμπύλη, αφού οι τιμές των τροχιών των οχημάτων δεν διαφέρουν ουσιαστικά από την εξωτερική στην εσωτερική λωρίδα κυκλοφορίας. Διαπιστώθηκε ότι τα οχήματα που μελετήθηκαν στις καμπύλες είχαν τη τάση να “κλείνουν” τις καμπύλες, δηλαδή να εμφανίζουν ελάχιστη στιγμιαία ακτίνα μικρότερη από αυτήν της χάραξης. Υπολογίστηκαν με παλινδρόμηση ευθείες που συμβολίζουν την ακτίνα της τροχιάς των οχημάτων, την οποία δεν υπερβαίνει ορισμένο ποσοστό οχημάτων 0%, 10% και 100%. Το ποσοστό των οχημάτων σχεδιασμού για τον προσδιορισμό της συσχέτισης επιλέχθηκε να είναι 10% και με βάση την εξίσωση παλινδρόμησης που ισχύει γι’ αυτό το ποσοστό συσχέτιστηκαν οι ακτίνες των οδηγών με την ακτίνα της χάραξης. Επειδή οι συντελεστές συσχέτισης ήταν μεγαλύτεροι όταν αντί για τις ακτίνες σχετίζονταν οι βαθμοί τροχιών οδηγών και χάραξης, επιλέχθηκε αυτή η μορφή εξίσωσης παλινδρόμησης.

Στην παρούσα έρευνα η ανάλυση έγινε λαμβάνοντας το μέσο όρο των ελικοτοτήτων των οχημάτων σε κάθε καμπύλη, εφόσον οι τιμές τους δεν διαφέρουν ουσιαστικά από την εξωτερική στην εσωτερική λωρίδα κυκλοφορίας. Ο μέσος όρος αποδείχθηκε ότι εκφράζει την ελικοτότητα που επιλέγει περίπου το 50% των οχημάτων κάθε καμπύλης. Σύμφωνα με τα δεδομένα των ελικοτοτήτων των οχημάτων στις τέσσερις καμπύλες, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:



**Σχήμα 5.5 :** Διάγραμμα συσχέτισης ελικοτότητας χάραξης  $K_{E,X}$  με την μέση πραγματική ελικοτότητα τροχιάς οχημάτων  $K_{E,T}$ .

Η εξίσωση παλινδρόμησης που προκύπτει είναι :

$$K_{E \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = 0.931 \cdot K_{E,X} \text{ με } R^2 = 0.990 \quad (5.11)$$

Η στατιστική ανάλυση όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.7 δείχνει ότι η εξίσωση παλινδρόμησης έχει υψηλό συντελεστή προσδιορισμού και στατιστικά σημαντικό τον συντελεστή της μεταβλητής. Άρα, η παραπάνω σχέση δίνει την μέση ελικοτότητα της τροχιάς οχημάτων για καμπύλες της Λεωφόρου Διονύσου και της Παλαιάς Εθνικής Οδού Αθηνών - Κορίνθου αντίστοιχης διατομής.

Επισημαίνεται ότι αν για το διάγραμμα συσχέτισης ελικοτότητας χάραξης με τη μέση ελικοτότητα τροχιάς οχημάτων χρησιμοποιηθούν και τα 380 οχήματα τότε η εξίσωση παλινδρόμησης που προκύπτει είναι:



$$K_{E \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = 0.929 \cdot K_{E,X} \text{ με } R^2 = 0.968 \quad (5.12)$$

Η παραπάνω εξίσωση προβλέπει τιμές που δε διαφέρουν σχεδόν καθόλου με τις τιμές που προβλέπονται από την εξίσωση 5.11.

Σύμφωνα με τον τύπο 5.11, η ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς του οχήματος σε σχέση με την ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς της χάραξης θα προκύπτει από τη σχέση:

$$R_{AN \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = \frac{63700}{K_{E \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}}} = \frac{63700}{0.931 \cdot K_{E,X}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{AN \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = \frac{63700}{0.931 \cdot \frac{63700}{R_{AN,X}}} = \frac{1}{0.931} \cdot R_{AN,X} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow R_{AN \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = \frac{1}{0.931} \cdot R_{AN,X} \quad (5.13)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.13) για τις ανηγμένες ακτίνες χάραξης των τεσσάρων καμπυλών, προκύπτουν οι μέσες ανηγμένες ακτίνες οχήματος:

ΚΑΜΠΥΛΗ	$R_{AN,X}$ [m]	$R_{AN\_ΜΕΣΗΣ \text{ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ}}$ [m]
A	67	72
B	121	130
C	246	264
D	942	1011

**Πίνακας 5.6 :** Πρόβλεψη μέσων ανηγμένων ακτίνων των οχημάτων για τις τέσσερις καμπύλες.

Από τον Πίνακα 5.6 και τον Πίνακα 4.10, παρατηρείται μια σημαντική διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων μέσων ανηγμένων ακτίνων από το παραπάνω μοντέλο και της πραγματικής μέσης ανηγμένης ακτίνας της τροχιάς των οδηγών που υπολογίστηκε. Η διαφορά αυτή είναι πολύ μεγάλη για την καμπύλη D που όμως δεν έχει καμία σημασία επί της ουσίας, διότι η κίνηση είναι σχεδόν ευθύγραμμη και είναι λογικό οι ακτίνες να διαφέρουν τόσο. Πάντως, για την πιο κρίσιμη καμπύλη που είναι η A, η διαφορά της προβλεπόμενης μέσης ανηγμένης ακτίνας διαφέρει από την πραγματική μόλις 3 m. Είναι αυτονόητο, πως για πιο αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα χρειάζεται λήψη δείγματος από περισσότερες καμπύλες.

Τέλος, η εξίσωση σχεδιασμού (5.2) σύμφωνα με την ανηγμένη ακτίνα των τροχιών που ακολουθούν οι οδηγοί στις καμπύλες της Πεντέλης και της Παλαιάς Εθνικής Οδού Ελευσίνιας – Κορίνθου και της V<sub>85</sub> που αναπτύσσουν είναι:

$$e + f = \frac{V^2}{127 \cdot \frac{1}{0.931} \cdot R_{AN,X}} \quad (5.14)$$

Στατιστικά παλινδρόμησης	
Πολλαπλό R	0.995
R Τετράγωνο	0.990
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0.740
Τυπικό σφάλμα	37.577
Μέγεθος δείγματος	5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ					
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	1	566508.063	566508.063	401.193	0.000
Υπόλοιπο	4	5648.239	1412.060		
Σύνολο	5	572156.302			

	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%	Κατώτερο 95.0%	Υψηλότερο 95.0%
Τεταγμένη επί την αρχή	0							
Μεταβλητή X 1	0.93119	0.034	27.715	0.000	0.838	1.024	0.838	1.024

**Πίνακας 5.7 :** Στατιστικά Παλινδρόμησης της σχέσης μεταξύ ελικτότητας χάραξης  $K_{E,X}$  και ελικτότητας της μέσης πραγματικής τροχιάς οχημάτων  $K_{E,T}$ .

## 5.4. Ανάλυση Καμπυλότητας Οχημάτων

Στο εδάφιο αυτό υπολογίζονται τα ποσοστά των οχημάτων που η ελκτικότητα τους ξεπερνά την ελκτικότητα της χάραξης. Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα ποσοστά υπέρβασης της ελκτικότητας της χάραξης ανά καμπύλη, αλλά και ανά λωρίδα κυκλοφορίας (σύμφωνα με το πώς φαίνονται στη βιντεοκάμερα). Στον επόμενο Πίνακα, παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα, ανάλογα με το αν η διεύθυνση κίνησης είναι αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη.

Από τους παρακάτω πίνακες, διαπιστώνεται ότι στην καμπύλη A (πιο κλειστή καμπύλη), οι οδηγοί που διαγράφουν ελκτικότητα μεγαλύτερη της χάραξης αποτελούν σημαντικό ποσοστό και στις δύο κατευθύνσεις, ενώ στην καμπύλη B είναι ιδιαίτερα σπάνια τέτοια συμπεριφορά οδηγών. Η καμπύλη C εμφανίζει σημαντικά το φαινόμενο αυτό, μόνο σε μία κατεύθυνση, ενώ για την καμπύλη D το ποσοστό μπορεί να είναι μεγάλο και στις δύο κατευθύνσεις, όμως επειδή η ελκτικότητα της καμπύλης πλησιάζει την ελκτικότητα της ευθυγραμμίας δεν αποτελεί κρίσιμη περίπτωση. Προφανώς, πρέπει να επιδρούν στην επιλογή τροχιάς των οδηγών και άλλοι παράγοντες π.χ. κατά μήκος κλίση, ορατότητα και πλάτος οδοστρώματος που όμως λόγω του περιορισμένου αριθμού καμπυλών δε μπορεί να διερευνηθεί η επίδρασή τους με αξιοπιστία.

Παρατηρώντας τον τελευταίο Πίνακα 5.9, προκύπτει ότι κατά την αριστερόστροφη κίνηση τα οχήματα που “κλείνουν” την καμπύλη είναι περίπου το 18.8% των οχημάτων που διαγράφουν τη συγκεκριμένη κίνηση, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τη δεξιόστροφη κίνηση είναι 15.6%. Πιο αναλυτικά διαπιστώνονται τα εξής:

- Στην καμπύλη A εμφανίζεται ένα σημαντικό ποσοστό οχημάτων που ξεπερνάει την ελκτικότητα χάραξης. Πιο αναλυτικά, το 20.0% των οχημάτων στην αριστερόστροφη κίνηση της καμπύλης A διαγράφει ανηγμένη ακτίνα μικρότερη από την ανηγμένη ακτίνα της χάραξης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται, όπως έχει αναφερθεί και στη μελέτη που περιγράφεται στο υπεδάφιο 1.2.2., στην υποτίμηση της καμπυλότητας από τους οδηγούς. Στο εσωτερικό της καμπύλης (δεξιόστροφη κίνηση), το ποσοστό των οχημάτων που η ελκτικότητα τροχιάς τους ξεπερνάει την ελκτικότητα της χάραξης του άξονα είναι 39.1%, δηλαδή σχεδόν διπλάσιο από την αντίθετη κατεύθυνση. Όπως αναφέρεται στην ίδια μελέτη για τις δεξιόστροφες καμπύλες, κάπου κατά μήκος της καμπύλης, το λάθος γίνεται αντιληπτό και διορθώνεται με ελιγμό (απότομο ή μη). Συνέπεια της μικρότερης ανηγμένης ακτίνας της τροχιάς των οδηγών είναι η αύξηση της φυγόκεντρης επιτάχυνσης και άρα της απαιτούμενης τριβής. Αν ο παραπάνω ελιγμός συνοδεύεται από ταχύτητα που δεν αρμόζει στο γεωμετρικό σχεδιασμό, ή από δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή από ταυτόχρονη πέδηση, τότε το όχημα γίνεται πιο ασταθές και υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος. Η παραβίαση της διπλής διαχωριστικής γραμμής είναι σπάνια και για τις δύο κατευθύνσεις. Τέλος, αναφέρεται ότι η ορατότητα σε αυτή την καμπύλη είναι πολύ καλή και για τις δύο κατευθύνσεις κίνησης.

ΚΑΜΠΥΛΗ	ΟΧΗΜΑΤΑ - ΑΡΙΣΤΕΡΗ Λ.Κ.	ΟΧΗΜΑΤΑ - ΔΕΞΙΑ Λ.Κ.	ΟΧΗΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΗΣ Λ.Κ. ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΔΕΞΙΑ Λ.Κ. ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ	Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ [gon/km]	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ – Α.Λ.Κ.	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ – Δ.Λ.Κ.	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΣΤΗ ΚΑΜΠΥΛΗ
A	40	46	8	18	950.76	20.0	39.1	30.2
B	44	47	0	1	524.43	0	2.1	1.1
C	62	47	3	13	259.36	4.8	27.7	14.7
D	44	50	9	13	67.65	20.5	26.0	23.4
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	190	190	20	45		10.5	23.7	
ΣΥΝΟΛΟ	380					17.1		

**Πίνακας 5.8 :** Συνολικό ποσοστό υπέρβασης της ελκτότητας χάραξης στην καμπύλη.

ΚΑΜΠΥΛΗ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ -ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΟΦΗ- Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ -ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΗ- Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ	Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ [gon/km]	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%) ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ Κ <sub>Ε</sub> ΧΑΡΑΞΗΣ ΔΕΞΙΟΣΤΡΟΦΗΣ
A	40	46	8	18	950.76	20.0	39.1
B	44	47	0	1	524.43	0	2.1
C	47	62	13	3	259.36	27.7	4.8
D	50	44	13	9	67.65	26.0	20.5
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	181	199	34	31		18.8	15.6
ΣΥΝΟΛΟ	380					17.1	

**Πίνακας 5.9:** Ποσοστό υπέρβασης της ελκτότητας χάραξης ανάλογα με το είδος της καμπύλης.

- Στην καμπύλη B δεν υπάρχουν οχήματα στο δείγμα αριστερόστροφης κίνησης που η ελκτικότητα τους να ξεπερνάει την ελκτικότητα χάραξης, ενώ για τη δεξιόστροφη κίνηση εμφανίζεται μόνο ένα όχημα που ξεπερνάει την ελκτικότητα χάραξης του άξονα. Το φαινόμενο αυτό, για την αριστερόστροφη κίνηση, ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι η ανηγμένη ακτίνα της καμπύλης B είναι  $R_{AN} = 121 \text{ m}$ , δηλαδή ούτε ιδιαίτερα κλειστή αλλά ούτε και ανοιχτή και άρα ο οδηγός, όταν δεν διέρχεται όχημα στην αντίθετη κατεύθυνση έχει τη δυνατότητα να διαγράψει το ίχνος τροχιάς τύπου Cutting (υπεδάφιο 1.2.2.), δηλαδή διαγράφει μεγαλύτερη ακτίνα και έτσι ο απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής είναι μικρότερος (υποθέτοντας ότι η ταχύτητα του οδηγού δεν είναι υπερβολική). Αναφέρεται επίσης ότι οι οδηγοί κάνοντας ένα τέτοιο είδος τροχιάς, συνήθως παραβιάζουν τη διπλή διαχωριστική γραμμή του οδοστρώματος. Οι οδηγοί της καμπύλης B που κινούνται στην εσωτερική λωρίδα κυκλοφορίας (δεξιόστροφη κίνηση) ακολουθούν επίσης τροχιές με μικρότερες απαιτήσεις πλευρικής τριβής. Οι οδηγοί σπάνια παραβιάζουν τη διπλή διαχωριστική γραμμή. Στη συμπεριφορά αυτή των οδηγών βοηθά και το μικρό έρεισμα που υπάρχει στη συγκεκριμένη καμπύλη. Τέλος, αναφέρεται ότι η ορατότητα σε αυτή την καμπύλη είναι πολύ καλή και για τις δύο κατευθύνσεις κίνησης.
- Στην καμπύλη C στην εξωτερική λωρίδα κυκλοφορίας (αριστερόστροφη κίνηση), το ποσοστό υπέρβασης είναι 27.7 %, ενώ στην εσωτερική λωρίδα κυκλοφορίας (δεξιόστροφη κίνηση) μόλις 4.8%. Για την αριστερόστροφη κίνηση, το αυξημένο ποσοστό που “κλείνει” την καμπύλη ερμηνεύει τη συμπεριφορά των οδηγών στην εξωτερική λωρίδα κυκλοφορίας για μεγαλύτερες ανηγμένες ακτίνες από την καμπύλη B. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στην καμπύλη B στην εξωτερική οριογραμμή, το ποσοστό των οχημάτων που η ελκτικότητα τροχιάς τους υπερβαίνει την ελκτικότητα χάραξης είναι 0%, στην καμπύλη C, το ποσοστό είναι 27.7%. Η διαφορά αυτή ίσως οφείλεται στη μεγαλύτερη κατά μήκος κλίση και στο μεγαλύτερο πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας της καμπύλης C σε σχέση με την καμπύλη B. Συνέπεια των παραπάνω παραμέτρων είναι πως αρκετοί οδηγοί δεν είναι σε θέση να διαγράψουν τροχιά ελκτικότητας μικρότερης από την ελκτικότητα χάραξης. Για τη δεξιόστροφη κίνηση τα περισσότερα οχήματα επιλέγουν τροχιά ελκτικότητας μικρότερη από αυτή της χάραξης. Ίσως αυτό οφείλεται στην ανωφέρεια και στην πιο περιορισμένη ορατότητα κατά την κίνηση αυτή. Τέλος, αναφέρεται ότι η διπλή διαχωριστική γραμμή δεν παραβιάζεται από τα οχήματα.
- Στην καμπύλη D το ποσοστό που η ελκτικότητα των οχημάτων ξεπερνάει την ελκτικότητα της χάραξης είναι περίπου το ίδιο και στις δύο κατευθύνσεις. Όμως, σε τόσο ανοιχτές καμπύλες δεν έχει ουσιαστική σημασία η διαφορά των ελκτικότητων των οχημάτων, τόσο μεταξύ τους, όσο και με την ελκτικότητα της χάραξης διότι πρακτικά η ελκτικότητα της τροχιάς των οχημάτων προσεγγίζει για πολλά οχήματα την ελκτικότητα της ευθυγραμμίας όπου  $K_E=0 \text{ gon/km}$ . Οι πιο ακραίες ελκτικότητες οχημάτων που εντοπίστηκαν είναι η τιμή  $K_{E,36} = 148.85 \text{ gon/km}$  για τη δεξιόστροφη κίνηση (εσωτερικό καμπύλης) και  $K_{E,1} = 120.94 \text{ gon/km}$  για την αριστερόστροφη κίνηση (εξωτερικό καμπύλης).

Αναφέρεται τέλος ότι τα οχήματα δεν παραβιάζουν τη διπλή διαχωριστική γραμμή και ότι η ορατότητα της καμπύλης είναι πολύ καλή.

Υπενθυμίζεται ότι τα 380 οχήματα που μελετήθηκαν στις τέσσερις καμπύλες ήταν σε συνθήκες ελεύθερης ροής (χρονική απόσταση μεταξύ οχημάτων της ίδιας κατεύθυνσης μεγαλύτερη από 6 sec) και χωρίς να διέρχεται όχημα στην αντίθετη κατεύθυνση. Άρα η συμπεριφορά κάθε οχήματος ήταν ανεξάρτητη τόσο ως προς τα οχήματα της ίδιας κατεύθυνσης όσο και της αντίθετης προς αυτά κατεύθυνσης.

Η παραπάνω ανάλυση μάλλον επιβεβαιώνει τον υπερσχεδιασμό των Ελληνικών και Γερμανικών Κανονισμών χάραξης για τις καμπύλες B, C και D, καθώς τα ποσοστά υπέρβασης της ελικτότητας σχεδιασμού είναι μικρά στις καμπύλες B και C, ενώ για την καμπύλη D το ποσοστό δεν επηρεάζει επί της ουσίας τον γεωμετρικό σχεδιασμό. Η καμπύλη A όμως, που αποτελεί την πιο κρίσιμη καμπύλη, εμφανίζει μειωμένα περιθώρια ασφαλείας σύμφωνα με τους Κανονισμούς αλλά και σύμφωνα με την πιο πάνω ανάλυση, καθώς το ποσοστό των οχημάτων που επιλέγουν μεγαλύτερη καμπυλότητα είναι αξιοσημείωτο.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας και συγκρίνονται με τα συμπεράσματα παλαιότερων ερευνών. Πριν την παρουσίασή τους όμως, αναφέρεται συνοπτικά ο σκοπός της εργασίας και υπενθυμίζονται οι προϋποθέσεις επιλογής καμπυλών.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας των οχημάτων, δηλαδή ο προσδιορισμός της ελικτότητας της τροχιάς που ακολουθούν, και η σύγκρισή της με την καμπυλότητα σχεδιασμού. Επίσης, μετρήθηκαν οι ταχύτητες που αναπτύσσουν και εξετάστηκε αν οι οδηγοί κινούνται μέσα στα περιθώρια ασφαλείας που προβλέπουν οι Κανονισμοί. Επισημαίνεται ότι οι μετρήσεις που έγιναν για αυτή την εργασία, πραγματοποιήθηκαν σε υπεραστικές οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας, δηλαδή μιας λωρίδας ανά κατεύθυνση, και περιλάμβαναν την διερεύνηση τροχιάς μόνο σε επιβατηγά οχήματα και ελαφρά ημιφορτηγά. Συνεπώς, όλες οι σχέσεις, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις, που αναπτύσσονται σε αυτήν την εργασία, αναφέρονται σε οδούς αυτής της κατηγορίας και σε αυτήν την ομάδα οχημάτων.

Μελετήθηκαν συνολικά τέσσερις καμπύλες, εκ των οποίων οι τρεις βρίσκονται στη Λεωφόρο Διονύσου (στο τμήμα μέχρι τον Άγιο Πέτρο) ενώ η τελευταία βρίσκεται στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου στην περιοχή των Μεγάρων. Το εύρος της ελικτότητας της χάραξης  $K_{E,X}$ , για τις παραπάνω καμπύλες, κυμαίνεται από 950.76 gon/km έως 67.65 gon/km, δηλαδή εξετάζεται η συμπεριφορά των οδηγών και σε μια ιδιαίτερα κλειστή καμπύλη αλλά και σε ανοιχτή καμπύλη, που η ελικτότητά της πλησιάζει αυτήν της ευθυγραμμίας ( $K_{E,X} = 0$  gon/km). Τα οδικά τμήματα αυτά πληρούσαν τις παρακάτω συνθήκες:

- Δεν υπήρχε καμία επιρροή από διασταυρώσεις.
- Δεν υπήρχαν στοιχεία στο άμεσο περιβάλλον της οδού, τα οποία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν μη φυσιολογικές επικινδυνότητες (π.χ. στενές γέφυρες).
- Η κατά μήκος κλίση ήταν μικρότερη ή ίση με 6% η οποία θεωρείται η οριακά αποδεκτή κλίση, που δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδηγών.
- Υπήρχε ικανό μήκος ευθυγραμμίας εκατέρωθεν των καμπυλών, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η τροχιά των οδηγών στα τμήματα αυτά από την πιθανή αλληλουχία καμπυλών.
- Η οριζοντιογραφία κάθε καμπύλης, που ανήκει στο υπό μελέτη οδικό τμήμα δεν είναι απαραίτητο να ακολουθεί τη διάταξη ευθυγραμμία – κυκλικό τόξο-ευθυγραμμία, διότι εξετάζεται η καμπύλη ως προς την ελικτότητά της και όχι με βάση την ακτίνα του κυκλικού τόξου της.
- Δεν υπήρχαν στηθαία ασφαλείας ή στην περίπτωση που υπήρχαν βρίσκονταν σε απόσταση μεγαλύτερη του 1.5 m από την εξωτερική οριογραμμή, ώστε να μην επηρεάζονται οι οδηγοί.
- Δεν υπήρχε σημαντικός περιορισμός της ορατότητας κατά μήκος της καμπύλης λόγω ορυγμάτων στα πρανή ή λόγω βλάστησης.
- Τέλος, έπρεπε να είναι δυνατή η παρατήρηση όλης, ή σημαντικού τμήματος, της καμπύλης από το φρύδι πρανούς, ώστε να είναι εφικτή η βιντεοσκόπηση με τη χρήση μίας μόνο κάμερας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα **συμπεράσματα** που προέκυψαν:

- Η παρούσα μελέτη, σε αντίθεση με την έρευνα των Glenon και Weaver [1971], δεν δεσμεύεται από τον περιορισμό της επιλογής καμπυλών που αποτελούνται αποκλειστικά από την αλληλουχία ευθυγραμμία - κυκλικό τόξο - ευθυγραμμία. Η ανάλυση των οριζοντιογραφικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιας καμπύλης μέσω της ελικτότητας, υπερέρχει σε σχέση με την περιγραφή της αποκλειστικά με την ακτίνα του κυκλικού τόξου, διότι η ελικτότητα μιας μεμονωμένης καμπύλης εμπεριέχει, εκτός από τα χαρακτηριστικά του κυκλικού τόξου, και τα χαρακτηριστικά των τόξων συναρμογής. Η ελικτότητα μιας καμπύλης αντιστοιχεί σε μια ανηγμένη ακτίνα, η οποία αποτελεί ουσιαστικά μια μέση ακτίνα όλης της καμπύλης.
- Από την επεξεργασία των ταχυτήτων που μετρήθηκαν στα τμήματα που επιλέχθηκαν, αποδείχτηκε ότι οι ταχύτητες κάθε καμπύλης ακολουθούν την κανονική κατανομή, όπως προέκυψε από το test Kolmogorov – Smirnov. Ύστερα από αυτή την απαραίτητη προϋπόθεση, ήταν δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας που ακολουθεί το 85% των οδηγών σε κάθε καμπύλη.
- Χρησιμοποιώντας τους Αμερικανικούς Κανονισμούς προέκυψε ότι η λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  κάθε καμπύλης υπερβαίνει τη θεωρητική ταχύτητα που προβλέπεται με βάση τα χαρακτηριστικά των καμπυλών. Η υπέρβαση αυτή μειώνεται καθώς αυξάνεται η ακτίνα της καμπύλης. Στο συμπέρασμα αυτό καταλήγουν και παλαιότερες έρευνες [Garcia, 2000] και [Πουλίδης, 1991]. Οι Ελληνικοί Κανονισμοί ΟΜΟΕ-Χ του 2001 προβλέπουν σωστά τη λειτουργική ταχύτητα μόνο για την καμπύλη C.
- Στην προσπάθεια συσχέτισης της λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού βρέθηκε πως η ρίζα της ελικτότητας, ως μεμονωμένη παράμετρος, περιγράφει σε πολύ μεγάλο ποσοστό τη μεταβλητότητα της  $V_{85}$ . Η σχέση αυτή έχει υψηλό συντελεστή προσδιορισμού, στατιστικά σημαντικούς συντελεστές παλινδρόμησης με λογικές τιμές και πρόσημα. Με τη σχέση που προσδιορίστηκε, γνωρίζοντας μόνο την ελικτότητα χάραξης της μεμονωμένης καμπύλης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας  $V_{85}$  στις στροφές της Λεωφόρου Διονύσου (μέχρι τον Άγιο Πέτρο), καθώς και στην Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών – Κορίνθου με το συγκεκριμένο τύπο διατομής.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία αναγωγής των βιντεοεικόνων είναι μια διαδικασία που εφαρμόζεται για πρώτη φορά για την αντιμετώπιση του προβλήματος προσδιορισμού της πραγματικής τροχιάς των οχημάτων σε καμπύλες. Η ακρίβεια με την οποία επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός της εικόνας, που αποτελεί μια κεντρική προβολή, σε ορθή προβολή κρίνεται ικανοποιητική, καθώς μεταδίδει επιτρεπτό σφάλμα στον υπολογισμό της ελικτότητας του οχήματος. Το σφάλμα της ελικτότητας κάθε οχήματος αντιστοιχεί σε σφάλμα ταχύτητας μικρότερο από το επιτρεπτό σφάλμα που έχει θεωρηθεί ότι εισάγει η μεθοδολογία υπολογισμού ταχύτητας ( $e=\pm 3$  km/h) με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το αποτέλεσμα της αναγωγής θα μπορούσε να είναι ακόμα καλύτερο, αν είχε χρησιμοποιηθεί κάμερα μεγαλύτερης ανάλυσης, ώστε η στόχευση των πιο απομακρυσμένων από τη βιντεοκάμερα φωτοσταθερών να ήταν καλύτερη και πιο αξιόπιστη. Για την καμπύλη A το μέσο σφάλμα που επιτεύχθηκε (ίδιο κατά την x και y διεύθυνση) ήταν περίπου



9 cm, για την καμπύλη B 13 cm, για την καμπύλη C 3cm και για την καμπύλη D 16 cm περίπου. Η καμπύλη A χωρίστηκε σε δύο τμήματα, διότι στο τόξο συναρμογής της καμπύλης η επίκλιση δεν ήταν σταθερή και η καμπύλη δεν μπορούσε να περιγραφεί από ένα μόνο επίπεδο. Στην καμπύλη B προκύπτει αρκετά μεγάλο σφάλμα αναγωγής, διότι η ανάλυση της κάμερας δεν επέτρεπε την ακριβή στόχευση των πιο απομακρυσμένων φωτοσταθερών, παρ’ όλο που η γωνία λήψης ήταν πολύ καλή. Αναφέρεται επίσης ότι ήταν αδύνατος ο αποκλεισμός περισσοτέρων σημείων για να βελτιωθεί η ακρίβεια, καθώς έπρεπε να συμμετέχουν στην αναγωγή φωτοσταθερά ομοιόμορφα διασκορπισμένα στο οδόστρωμα. Παρ’ όλα αυτά, το σφάλμα που εισάγεται είναι αποδεκτό. Η καμπύλη D έχει το μεγαλύτερο σφάλμα αναγωγής, διότι η κάμερα βρίσκεται σε μεγάλο ύψος και το μέγεθος του pixel αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια στο έδαφος από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις. Το σφάλμα αυτό θεωρείται επίσης αποδεκτό. Η καμπύλη C έχει το μικρότερο σφάλμα αναγωγής και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κάμερα έχει τοποθετηθεί σε μικρότερο ύψος από τις υπόλοιπες και το μέγεθος του pixel αντιστοιχεί σε μικρότερη επιφάνεια στο έδαφος. Συνεπώς, η στόχευση των φωτοσταθερών σε αυτή την καμπύλη ήταν πολύ πιο ακριβής.

- Στη συγκεκριμένη εργασία το όχημα προσομοιώνεται με ένα αντιπροσωπευτικό σημείο, το οποίο είναι η προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος στο επίπεδο της αναγωγής. Πιο σωστή, αλλά μη υλοποιήσιμη τακτική, θα ήταν το όχημα να προσομοιώνεται με ένα σημείο, δηλαδή μια σημειακή μάζα, η οποία είναι συγκεντρωμένη στο Κέντρο Βάρους του οχήματος. Ο προσδιορισμός του Κ.Β. όμως, αφενός έχει μια αβεβαιότητα εξ αιτίας της ανισοκατανομής του φορτίου και της επίδρασης της κατά μήκος κλίσης και της επίκλισης στο φορτίο που δέχονται τα ελαστικά, αφετέρου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή, διότι το αντιπροσωπευτικό σημείο πρέπει να ανήκει στο επίπεδο της αναγωγής. Άρα η αβεβαιότητα προσδιορισμού του αντιπροσωπευτικού σημείου για κάθε όχημα, εκ των πραγμάτων, δε μπορεί να είναι καλύτερη από 10 cm και συνεπώς, η ακρίβεια των αναγωγών και για τις τέσσερις καμπύλες θεωρείται πρακτικά επαρκής, έχοντας όμως περιθώρια βελτίωσης στις καμπύλες B και D.
- Η φωτογραμμετρική διαδικασία της παρούσας εργασίας διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα, σε σχέση με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν σε παρεμφερείς έρευνες. Όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 1 στο υπεδάφιο 1.2.1., οι ερευνητές Garcia και Díaz [2000] χρησιμοποίησαν πλευρικές ψηφιακές βιντεοκάμερες CCTV και ανέπτυξαν ένα αυτόματο σύστημα εξαγωγής τροχιάς οχημάτων σε καμπύλες. Σε αντίθεση με την παραπάνω μελέτη, οι τροχιές στην παρούσα έρευνα δεν προσδιορίστηκαν αυτόματα, αλλά για κάθε όχημα έπρεπε να απομονωθούν εικόνες σε χαρακτηριστικές θέσεις, να εισαχθούν οι εικόνες στο AutoCAD, να προσδιοριστεί η προβολή του γεωμετρικού κέντρου, να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις του προβολικού μετασχηματισμού για να μετατραπούν οι εικονοσυντεταγμένες σε γεωδαιτικές συντεταγμένες πάνω στο επίπεδο της αναγωγής και τέλος να προσδιοριστεί η ελικτότητα της τροχιάς του οδηγού με αυτόματο τρόπο. Η διαδικασία της παρούσας εργασίας είναι προφανώς πολύ λιγότερο αυτοματοποιημένη, αλλά η ακρίβεια προσδιορισμού του γεωμετρικού κέντρου είναι σίγουρα μεγαλύτερη, διότι εξετάζεται η γεωμετρία του μεμονωμένου οχήματος. Είναι προφανές επίσης ότι η αυτοματοποιημένη

διαδικασία αυτών των ερευνητών δεν είναι δυνατό να αναπτυχθεί στα χρονικά πλαίσια μιας εργασίας αυτού του επιπέδου. Η έρευνα των Cristman et al. [2000] που περιγράφεται στο υπεδάφιο 1.2.3., εξετάζει τη συμπεριφορά των οδηγών στον ελιγμό προσπέρασης σε ευθυγραμμία και χρησιμοποιεί ψηφιακές βιντεοκάμερες που είναι εξοπλισμένες με ακτίνες Laser για να υπολογίζονται και οι ταχύτητες των οχημάτων με μεγάλη ακρίβεια. Στην έρευνα αυτή προσδιορίζεται ο εξωτερικός προσανατολισμός της κάμερας με τη χρήση τεσσάρων φωτοσταθερών, με την προϋπόθεση ότι ο δρόμος είναι επίπεδος. Το εκτιμώμενο λάθος υπολογίστηκε στα 10 cm κατά την εγκάρσια διεύθυνση της οδού και 30 cm κατά μήκος της ευθυγραμμίας για μήκος 80 m περίπου. Στην έρευνα των Cristman et al. [2000], δεν περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού ενός επιπέδου που προσεγγίζει το οδόστρωμα, μια διαδικασία που ίσως έχει παραληφθεί. Τέλος, οι εκτιμώμενες ακρίβειες των ερευνητών είναι μικρότερες από τις ακρίβειες που επιτεύχθηκαν στην παρούσα εργασία.

- Η τοπογραφική μέθοδος προσδιορισμού της τροχιάς των οδηγών σε καμπύλες, με τη χρήση “μετρητικών στύλων”, που περιγράφεται στο υπεδάφιο 1.2.2. δεν ήταν δυνατό να εφαρμοστεί, λόγω έλλειψης σχετικού εξοπλισμού και λογισμικού αναπαράστασης της τροχιάς των οδηγών.
- Σε αντίθεση με την έρευνα των Glenon και Weaver [1971] (υπεδάφιο 1.2.5.), όπου σε κάθε ενδιάμεση χαρακτηριστική διατομή υπολογίζεται η στιγμιαία ακτίνα του οχήματος, στη συγκεκριμένη έρευνα εκτιμήθηκε πως η τροχιά κάθε οδηγού μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενιαία καμπύλη και συγκεκριμένα ως μια νέα ακτίνα κυκλικού τόξου. Η παραδοχή αυτή θεωρήθηκε αποδεκτή, καθώς, για τις δύο πιο κρίσιμες καμπύλες Α και Β, σχεδιάστηκε για κάθε όχημα γωνιακό διάγραμμα για τις συντεταγμένες της τροχιάς τους στο επίπεδο της αναγωγής. Από την παλινδρόμηση που εφαρμόστηκε στο γωνιακό διάγραμμα κάθε οχήματος προέκυψε ότι ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  ήταν σε όλα τα οχήματα πολύ υψηλός (πάνω από 97% και σε πολλές περιπτώσεις άνω του 99%) και ο συντελεστής της μεταβλητής ήταν σε όλες τις περιπτώσεις στατιστικά σημαντικός για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.
- Στην παρούσα έρευνα δεν εφαρμόστηκαν πολυώνυμα τρίτου βαθμού (παρεμβολή με splines) και, συνεπώς, δεν ήταν δυνατή η διάκριση του είδους της τροχιάς των οδηγών, όπως στην έρευνα του Spacer [2000] (υπεδάφιο 1.2.2). Ίσως, αν είχε εφαρμοστεί πολυώνυμο τρίτου βαθμού, ο συντελεστής προσδιορισμού να ήταν ακόμη μεγαλύτερος αλλά, όπως έχει συμβεί και σε παλαιότερες μελέτες, πιθανότατα η τροχιά που θα προέκυπτε να μην ανταποκρινόταν στην πραγματική τροχιά των οδηγών [Πουλίδης, 1991] και Cristman et al. [2000]. Το φαινόμενο των οδηγών που “κόβουν” την καμπύλη, στην προτεινόμενη μεθοδολογία αυτής της διπλωματικής ίσως εκφράζεται από το ποσοστό των οδηγών που διαγράφουν ελικτότητα μικρότερη από την ελικτότητα της χάραξης, ενώ το φαινόμενο της υποτίμησης της καμπυλότητας μάλλον εκδηλώνεται όταν η ελικτότητα της τροχιάς του οχήματος είναι μεγαλύτερη από την ελικτότητα της χάραξης. Ας μη παραληφθεί όμως το γεγονός ότι η τοπογραφική μέθοδος των “μετρητικών στύλων” της έρευνας του Spacer [2000], όπου έγινε η διάκριση των τροχιών, δίνει πολύ καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις των σημείων της τροχιάς του οχήματος και συνεπώς είναι περισσότερο αξιόπιστο να εφαρμοστεί στα

δεδομένα αυτά μοντέλο πολυωνύμου τρίτου βαθμού από ότι σε αυτή την έρευνα.

- Στην προσπάθεια συσχέτισης της ταχύτητας που ανέπτυξαν οι οδηγοί και της ελκτότητας της τροχιάς που ακολούθησαν στις καμπύλες, έγιναν διαγράμματα μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων. Τα διαγράμματα και η ανάλυση παλινδρόμησης μεταξύ των δύο παραμέτρων για όλα τα οχήματα δεν έδειξαν την ύπαρξη κάποιας συσχέτισης. Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνει την διαφορετική αντίληψη που δημιουργείται σε κάθε οδηγό για την καμπύλη στην οποία πλησιάζει. Η αντίληψη αυτή πιθανόν να εξαρτάται από τα προσωπικά του χαρακτηριστικά στην εκπαίδευση και την εμπειρία που διαθέτει στην οδήγηση, καθώς και από ψυχολογικούς παράγοντες. Σε ανάλογα συμπεράσματα έχουν καταλήξει και παλαιότερες έρευνες των Glenon και Weaver [1971] και Πουλίδης [1991].
- Η συσχέτιση όμως της λειτουργικής ταχύτητας  $V_{85}$  με τη μέση πραγματική ελκτότητα της τροχιάς των οχημάτων είναι εφικτή. Η καλύτερη συσχέτιση της  $V_{85}$  ήταν πάλι με τη ρίζα της μέσης πραγματικής ελκτότητας της τροχιάς των οχημάτων με μικρή διαφορά από την προηγούμενη σχέση στο σταθερό όρο.
- Η επάρκεια της διατιθέμενης πλευρικής τριβής (θεωρητικής), σε σχέση με την πραγματικά απαιτούμενη πλευρική τριβή (αναπτυσσόμενη), εξετάστηκε με διαφορετική προσέγγιση, σε σχέση με αρκετές μελέτες στο παρελθόν. Πιο συγκεκριμένα, σε παλαιότερες έρευνες εξετάζόταν η επάρκεια σε πλευρική τριβή για τη δυσμενέστερη περίπτωση της εμφάνισης της  $f_{max}$ . Η στιγμιαία μέγιστη απαιτούμενη πλευρική τριβή για ένα όχημα εμφανίζεται στη θέση που διαγράφεται η μικρότερη στιγμιαία ακτίνα. Η αντιμετώπιση αυτή, σε όλες τις περιπτώσεις, κατέληξε πως ο στιγμιαίος απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής ήταν μεγαλύτερος των κανονισμών, λόγω αυξημένης φυγόκεντρης επιτάχυνσης. Στην παρούσα έρευνα, αντί για τη στιγμιαία ακτίνα, εξετάζεται η ελκτότητα της τροχιάς των οχημάτων. Από την ελκτότητα της τροχιάς υπολογίζεται η ανηγμένη ακτίνα κάθε οχήματος στην καμπύλη. Σε κάθε καμπύλη δεν εξετάστηκε η συμπεριφορά, ως προς την επάρκεια τριβής, για κάθε όχημα μεμονωμένα, αλλά επιλέχθηκαν δύο μεγέθη που περιγράφουν τη συνηθέστερη συμπεριφορά των οδηγών. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η  $V_{85}$  των οδηγών κάθε καμπύλης και η μέση πραγματική ελκτότητα  $K_{E,T}$  των οδηγών, δηλαδή η ελκτότητα που διαγράφει περίπου το 50% των οδηγών. Από τη μέση ελκτότητα υπολογίζεται η μέση ανηγμένη ακτίνα  $R_{AN,T}$  των οδηγών και υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τριβές με βάση αυτά τα μεγέθη. Με την επιλογή της μέσης ελκτότητας των οχημάτων, σε σχέση με την ταχύτητα που επιλέγει το 85% των οδηγών, βελτιώνονται τα περιθώρια ασφαλείας. Αναφέρεται πως, τόσο η ταχύτητα όσο και η ελκτότητα των οχημάτων δεν διέφεραν σημαντικά στις αντίθετες κατευθύνσεις, γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκαν ενιαία δεδομένα για κάθε καμπύλη.
- Στην παρούσα έρευνα η δυναμική της κίνησης του οχήματος στις καμπύλες περιγράφεται από το απλοποιημένο μοντέλο εγκάρσιας ευστάθειας. Τα αποτελέσματα επάρκειας της διατιθέμενης πλευρικής τριβής, σε σχέση με την απαιτούμενη, εξετάστηκαν ως προς τους Γερμανικούς, Αμερικανικούς και Ελληνικούς Κανονισμούς. Για τους Γερμανικούς και Ελληνικούς

Κανονισμούς, που βασίζονται στην ίδια μεθοδολογία προσδιορισμού διατιθέμενης πλευρικής τριβής, προέκυψε πως το μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων για τις καμπύλες B, C και D έχει αναπτυσσόμενο συντελεστή πλευρικής τριβής μικρότερο από το διατιθέμενο από τους Κανονισμούς που αναπτύσσεται μεταξύ της διεπιφάνειας ελαστικού και οδοστρώματος. Άρα, για τις συγκεκριμένες καμπύλες η πρόσφυση είναι επαρκής, ώστε να προβλέπεται η ασφαλής διέλευση των οχημάτων, σύμφωνα πάντα με τους Κανονισμούς. Οι συντελεστές εκμετάλλευσης του εγκάρσιου συντελεστή πλευρικής τριβής για τις καμπύλες B, C και D προέκυψαν 0.6, 0.5 και 0.4 αντίστοιχα κάτι που σημαίνει πως όσο μεγαλύτερη η ακτίνα τόσο μικρότερη η φυγόκεντρος επιτάχυνση και άρα τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό της μέγιστης επιτρεπόμενης επαπτομενικής τριβής που απαιτεί η εγκάρσια διεύθυνση, χωρίς να αποκλείονται οι περιπτώσεις διέλευσης οχημάτων με πολύ υψηλές ταχύτητες, όπου ίσως ξεπεραστεί η διατιθέμενη πρόσφυση. Όμως, οι τιμές των συντελεστών τριβής που καθορίζουν οι Κανονισμοί αναφέρονται σε βρεγμένο και καθαρό οδόστρωμα και συνεπώς οι τιμές που μπορούν να αναπτυχθούν στο στεγνό οδόστρωμα είναι πολύ μεγαλύτερες. Επίσης, οι Κανονισμοί προβλέπουν περιθώρια ασφαλείας και μετά την εξάντληση του ολικού συντελεστή τριβής. Στην καμπύλη A οι οδηγοί κινούνται χωρίς να διαθέτουν σημαντικά περιθώρια ασφαλείας για πέδηση, τουλάχιστον σε υγρό οδόστρωμα, μιας και το ποσοστό του διατιθέμενου συντελεστή επαπτομενικής τριβής που απομένει σε περίπτωση ταυτόχρονου ελιγμού πέδησης είναι μόλις 38%.

- Για τους Αμερικανικούς Κανονισμούς ο τρόπος υπολογισμού της μέγιστης θεωρητικής τιμής του συντελεστή πλευρικής τριβής εξαρτάται από το επίπεδο της πλευρικής επιτάχυνσης που είναι αρκετή, ώστε να προκαλέσει στους οδηγούς το αίσθημα της δυσφορίας. Η μεθοδολογία αξιολόγησης των απαιτούμενων πλευρικών τριβών, σε σχέση με τις διατιθέμενες, έγινε με τη βοήθεια μιας πρόσφατης έρευνας των Pratt και Bonneson [2008], όπου εξέτασαν την αυστηρότητα μιας καμπύλης χρησιμοποιώντας μετρήσεις ενέργειας (απώλειες) και τριβής. Η νέα έρευνα αποδεικνύει ότι η πλευρική τριβή που επιλέγουν οι οδηγοί (side friction demand) είναι μεγαλύτερη από τις τιμές που ορίστηκαν στις AASHTO [2004] σύμφωνα με τη δυσφορία των οδηγών. Μάλιστα, η αύξηση της απαιτούμενης πλευρικής τριβής σε σχέση με τα κατώφλια των Αμερικανικών Κανονισμών δείχνει να είναι περίπου ανάλογη με τη μείωση της κινητικής ενέργειας, που σχετίζεται με τη μείωση της ταχύτητας κατά τη μετάβαση από την ευθυγραμμία στην καμπύλη. Στην προσπάθεια εφαρμογής της παραπάνω έρευνας στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε μια μεθοδολογία, ώστε να αξιολογηθούν οι καμπύλες ως προς την επικινδυνότητά τους και την ανάγκη για λήψη προληπτικών μέτρων σε αυτές. Αρχικά, υπολογίστηκε ο μέγιστος κίνδυνος που οι οδηγοί βιώνουν αν διασχίζουν την καμπύλη χωρίς επιβράδυνση. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο κίνδυνος που αποφεύγουν οι οδηγοί, όταν μειώνουν ταχύτητα για να διασχίσουν την καμπύλη και τέλος υπολογίζεται ο κίνδυνος που αποδέχονται οι οδηγοί, ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί τη διαφορά της δεύτερης από τη πρώτη τιμή και σχετίζεται με την επιλογή της ταχύτητάς τους στις καμπύλες. Από την τιμή του αποδεχόμενου κινδύνου μπορεί να δοθεί μια πρώτη εκτίμηση για την αυστηρότητα της καμπύλης. Σύμφωνα με τις προτεινόμενες οδηγίες για τη σήμανση στις καμπύλες από το Glenon [2006], η καμπύλη A

κρίνεται ως πολύ επικίνδυνη και δεν επαρκεί η λήψη προληπτικών μέτρων μέσω κατακόρυφης σήμανσης, για να βελτιωθούν τα περιθώρια ασφαλείας των οδηγών και υποδεικνύεται η ανακατασκευή της καμπύλης. Για την καμπύλη Β αρκεί μια προειδοποιητική πινακίδα χωρίς συμπληρωματική πινακίδα αναγραφής του ορίου ταχύτητας. Τέλος, οι καμπύλες C και D παρουσίασαν απαιτούμενη τριβή μικρότερη των Κανονισμών, οπότε, θεωρητικά, δε χρειάζεται να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή.

- Το σύστημα ‘ball – bank indicator’, με το οποίο μετράται η δυσφορία των οδηγών, τοποθετείται στο όχημα και καταγράφει κάποιες γωνίες, οι οποίες με κάποια διαδικασία αντιστοιχούν σε τιμές πλευρικής επιτάχυνσης. Όμως, το αίσθημα της δυσφορίας για κάθε οδηγό, όπως μελετήθηκε από τους συγκεκριμένους Κανονισμούς, εξαρτάται και από την τροχιά που επιλέγουν οι οδηγοί. Αυτή είναι μια παράμετρος που ίσως παρέβλεπαν οι Αμερικανικοί Κανονισμοί, διότι, προφανώς, θεωρούν ότι ο οδηγός ακολουθεί τη χάραξη. Άρα, ίσως η χρήση της ανηγμένης ακτίνας των οχημάτων στη σχέση υπολογισμού του αναπτυσσόμενου συντελεστή πλευρικής τριβής να είναι πιο αξιόπιστη από τη χρήση της ακτίνας σχεδιασμού.
- Η ταχύτητα εισόδου στην καμπύλη επιλέχθηκε να είναι η λειτουργική ταχύτητα που αναπτύσσει το όχημα σε ανεξάρτητη ευθυγραμμία, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις λειτουργικών ταχυτήτων στην ευθυγραμμία για συγκεκριμένο πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας [Ξενάκης, 2008]. Η επιλογή αυτή είναι υποθετική, διότι δεν είναι γνωστό ούτε το μήκος της ευθυγραμμίας, ούτε έχουν μετρηθεί ταχύτητες πριν τις καμπύλες. Παρατηρήθηκε πως αν αλλάξει η ταχύτητα εισόδου καμία μεταβολή δεν παρατηρείται στην τιμή του αποδεχόμενου κινδύνου. Αντίθετα, η ταχύτητα εισόδου είναι καθοριστική στην περίπτωση που έπρεπε να εξαχθούν δείκτες ατυχημάτων, όμως, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, είναι αδύνατον, λόγω περιορισμένου δείγματος. Η ταχύτητα εισόδου, λοιπόν, είναι μια παράμετρος που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και πιθανότατα επιπρόσθετες μετρήσεις.
- Εξ αιτίας του περιορισμένου αριθμού δείγματος σε κάθε καμπύλη, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για συχνότητα ατυχημάτων. Το μόνο συμπέρασμα που μπορεί να ισχύει από την παρούσα στατιστική ανάλυση είναι πως τα ατυχήματα, στα οποία εμπλέκεται ένα μόνο όχημα, είναι συχνότερα στις καμπύλες όπου συνήθως ο οδηγός υποτιμά την καμπυλότητα και διορθώνει την πορεία του διαγράφοντας ακτίνα μικρότερη από την ακτίνα της χάραξης. Σε ανάλογο συμπέρασμα καταλήγει και η έρευνα στο υπεδάφιο (1.2.2.). Η εμφάνιση ενός ατυχήματος όμως, σχετίζεται με πολλούς παράγοντες. Παρ’ όλα αυτά, πραγματοποιήθηκε το πρώτο βήμα της σύγχρονης αντίληψης για την ερμηνεία ατυχήματος με ένα μόνο όχημα, πως, για την περιγραφή της συμπεριφοράς των οδηγών, δεν αρκεί μόνο η ταχύτητα αλλά και η τροχιά τους.
- Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, μπορούν απλά να υποδειχθούν πιθανές επικίνδυνες καμπύλες, όπως είναι η καμπύλη Α. Η προτεινόμενη μεθοδολογία, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη αναγνώριση των πιθανά επικίνδυνων καμπυλών και έτσι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης προληπτικών μέτρων προτού συμβούν πολλά ατυχήματα.

- Η συσχέτιση που έχει προκύψει μεταξύ της γεωμετρίας της οδού  $K_{E,X}$  και της ελκτότητας της τροχιάς οχημάτων  $K_{E,T}$ , στην παρούσα έρευνα, έχει πολύ υψηλό συντελεστή προσδιορισμού και στατιστικά σημαντικές παραμέτρους αλλά δεν μπορεί θεωρηθεί απόλυτα τεκμηριωμένη, διότι η σχέση έχει προκύψει από δεδομένα μόνο από τέσσερις καμπύλες και φυσικά δε πρέπει να υποτιμούνται όλες οι πιθανές επιρροές στην οδηγική συμπεριφορά από χαρακτηριστικά όπως το πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας, η κατά μήκος κλίση και η επίκλιση της καμπύλης, αλλά και άλλων πιθανών καταστάσεων κοντά στον κυκλοφορούμενο χώρο.
- Λόγω του περιορισμένου αριθμού καμπυλών που εξετάζονται, δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία και δεδομένα, ώστε να είναι δυνατό να γίνουν συστάσεις στους Κανονισμούς για μείωση ακτίνων των οριζόντιων καμπυλών. Από την παρούσα ανάλυση προέκυψε ότι για τις καμπύλες B, C και D οι Κανονισμοί μάλλον υπερσχεδιάζουν.
- Επειδή δεν υπάρχουν όρια ταχύτητας για τις καμπύλες A, B και C, οι οδηγοί θεωρούν πως το όριο ταχύτητας για τη συγκεκριμένη κατηγορία οδού είναι τα 90 km/h και άρα θεωρητικά κινούνται σύμφωνα με τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας. Η παραβίαση της διπλής διαχωριστικής γραμμής παρουσιάζεται εντονότερα στην αριστερόστροφη καμπύλη B (κατεύθυνση προς Άγιο Πέτρο), όπου οι οδηγοί “κόβουν” την καμπύλη και εισέρχονται στο αντίθετο ρεύμα με τον κίνδυνο πιθανής σύγκρουσης. Ασφαλέστερα συμπεράσματα και ποσοστά παραβίασης θα μπορούσαν να εξαχθούν, αν είχαν υπολογιστεί οι εγκάρσιες αποκλίσεις των σημείων της προβολής του γεωμετρικού κέντρου από τις οριογραμμές του οδοστρώματος, όπως είχε γίνει από τους Garcia και Díaz [2000], αλλά και παλαιότερα, για τον πίσω τροχό, στην έρευνα των Glenon και Weaver [1971].
- Τέλος, αναφέρεται ότι ο προσδιορισμός της τροχιάς οχήματος με διαφορετικές μεθόδους, όπως GPS και radar, μπορεί γενικώς να είναι περισσότερο ευέλικτες και ίσως πιο ακριβείς, ωστόσο εξάγουν συμπεράσματα μόνο για τα οχήματα που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό (π.χ. δέκτη GPS για Κινηματικό εντοπισμό σε Πραγματικό Χρόνο). Συνεπώς, προκύπτει μικρό δείγμα που δεν ενδείκνυται για στατιστική ανάλυση. Επίσης, οι οδηγοί σε αυτού του τύπου μετρήσεις, γνωρίζουν ότι καταγράφονται οι κινήσεις τους και ίσως οδηγούν πιο συνετά. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Wuping X. et al. [2008], στις μέρες μας, η συλλογή δεδομένων μέσω video είναι η πλέον δημοφιλής και οικονομική μέθοδος συλλογής τροχιών σε μεγάλη κλίμακα με μετρήσεις στο πεδίο.

## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στη συνέχεια διατυπώνονται κάποιες προτάσεις, που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, ώστε να απλοποιηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία. Επίσης, αναφέρονται και οι προϋποθέσεις που απαιτούνται, ώστε να επιτευχθούν μεγαλύτερες ακρίβειες στα μεγέθη που υπολογίζονται. Ο περιορισμένος εξοπλισμός σε τέτοιου είδους εφαρμογές από τα εργαστήρια της Συγκοινωνιακής Τεχνικής και της Φωτογραμμετρίας δεν επέτρεψε τη χρήση πιο σύγχρονων μεθόδων που θα απλοποιούσαν σημαντικά τη διαδικασία. Ανασταλτικός παράγοντας, επίσης, ήταν η έλλειψη προσωπικού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο ύπαιθρο.

Για την πιο ολοκληρωμένη διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας των οχημάτων στις καμπύλες προτείνεται:

- Χρήση ψηφιακής βιντεοκάμερας με καλύτερη ανάλυση και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Δεδομένου ότι μέχρι και τις μέρες μας δεν έχει κατασκευαστεί μετρητική βιντεοκάμερα, πρέπει να βρεθεί τρόπος, με την υπάρχουσα τεχνολογία, ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη στόχευση των απομακρυσμένων σημείων. Η καλύτερη στόχευση εξασφαλίζεται αν τα πιο απομακρυσμένα σημεία έχουν μεγαλύτερη κλίμακα. Ο τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί ψηφιακή βιντεοκάμερα η οποία, εκτός από μεγαλύτερη ανάλυση, θα έχει μεγαλύτερη σταθερά μηχανής αλλά και μεγαλύτερο μέγεθος αρνητικού. Τα αποτελέσματα της αναγωγής των βιντεοεικόνων, με τη χρήση τέτοιας βιντεοκάμερας, θα ήταν καλύτερα από αυτά που επιτεύχθηκαν στην παρούσα έρευνα και συνεπώς το σφάλμα στον υπολογισμό της ελκτότητας του οχήματος θα ήταν μικρότερο. Ιδανική θα ήταν επίσης η χρήση βιντεοκάμερας με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αν διέθετε τις ακτίνες laser, οι οποίες, όπως παρουσιάζεται και στην έρευνα στο υπεδάφιο 1.2.3., μπορούν να παρατηρούν και να καταγράφουν την μεταβολή της ταχύτητας των οχημάτων. Επίσης, πρέπει να εξεταστεί αν οι ακρίβειες που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας δύο ψηφιακές βιντεοκάμερες είναι μεγαλύτερες. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να υπάρχει ένα σημαντικό επικαλυπτόμενο τμήμα με κοινά φωτοσταθερά. Ακόμα, πρέπει οι κάμερες να είναι συγχρονισμένες και υποχρεωτικά ο υπολογισμός των σημείων στο οδόστρωμα θα είναι τρισδιάστατος. Σε μια τέτοια εφαρμογή είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού, ενώ με τη χρήση του προβολικού μετασχηματισμού δεν είναι απαραίτητη η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού.
- Άμεση μέτρηση στιγμιαίας ταχύτητας, η οποία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αν ταυτόχρονα με τη βιντεοσκόπηση χρησιμοποιούνταν φορητοί ραδιοεντοπιστές. Στην παρούσα έρευνα, ως ταχύτητα του οχήματος θεωρείται η ταχύτητα του στο μέσο του κυκλικού τόξου και υπολογίστηκε έμμεσα μέσω γνωστής απόστασης που διανύεται σε συγκεκριμένο χρόνο. Η ταχύτητα αυτή θεωρείται, άτυπα, ως η στιγμιαία ταχύτητα του οχήματος, ενώ υπολογίστηκαν και οι ταχύτητες σε όλα τα υπό μελέτη διαστήματα κάθε καμπύλης, έχοντας με αυτό τον τρόπο μια αίσθηση της μεταβολής της ταχύτητας μέσα στην καμπύλη. Η χρήση φορητών ραδιοεντοπιστών θα

εξοικονομούσε χρόνο στην προσπάθεια εξαγωγής των αποτελεσμάτων της ταχύτητας. Όμως, αυτό απαιτεί την ενασχόληση περισσότερων ατόμων, πιθανότατα στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Με τη χρήση ραδιοεντοπιστών ίσως η ακρίβεια της ταχύτητας να ήταν καλύτερη και πιθανά η συσχέτιση της ταχύτητας του οχήματος με την ελκτικότητα του οχήματος να έδινε μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού.

- Διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας των οχημάτων σε περισσότερες καμπύλες για πιο ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα, πράγμα που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί στα χρονικά πλαίσια μιας εργασίας αυτού του επιπέδου. Επίσης, προτείνεται μελέτη περισσότερων οχημάτων σε κάθε καμπύλη, ώστε οι υποδείξεις στους Κανονισμούς να είναι περισσότερο ασφαλείς.
- Διερεύνηση της τροχιάς των οδηγών με μια πιο λεπτομερειακή ανάλυση που να περιλαμβάνει τον υπολογισμό της θέσης του οχήματος σε περισσότερες διατομές στην καμπύλη αλλά και σε διατομές στις εκατέρωθεν ευθυγραμμίες που πιθανώς υπάρχουν, όπως εφαρμόστηκε και από τους Garcia και Diaz [2000], καθώς και από τους Segal και Banney [1980]. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα έρευνα η τροχιά των οχημάτων υπολογίστηκε από έξι, επτά ή και οκτώ σημεία στις χαρακτηριστικές διατομές για τις καμπύλες B, C και D, ενώ για την καμπύλη A τα σημεία ήταν αρκετά περισσότερα. Κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατό να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθεί παραπάνω από μία ψηφιακή βιντεοκάμερα. Ίσως, επίσης, στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος, να μπορούσε να επιτευχθεί με λήψη της κυκλοφορίας από αερόστατο ή καλαθοφόρο όχημα με τη βοήθεια συνεργείου λήψης. Αυτή η λύση και πάλι όμως δεν είναι ιδανική λόγω τη πιθανής κίνησης της κάμερας αλλά και λόγω της αντίληψης της ύπαρξής τους από τους οδηγούς. Η ιδανική λύση θα ήταν να υπάρξει δυνατότητα χειρισμού μιας ψηφιακής κάμερας, η οποία να είναι στερεωμένη, με κάποιο τρόπο, σε μεγάλο ύψος (αν οι οδοί δεν ήταν υπεραστικές αλλά αστικές τότε θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε πολύ υψηλά κτίρια). Το πλεονέκτημα του μεγάλου ύψους της βιντεοκάμερας είναι ότι το οπτικό πεδίο λήψης θα είναι μεγαλύτερο και έτσι θα υπάρχει η δυνατότητα πλήρους μελέτης της συμπεριφοράς του οδηγού, δηλαδή μελέτη των χειρισμών που κάνει πριν την είσοδό του στην καμπύλη, την κίνησή του μέσα στην καμπύλη, αλλά και μετά την έξοδο του από αυτήν. Επίσης, ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η λήψη πλησιάζει την κατακόρυφη και ο προσδιορισμός της προβολής του γεωμετρικού κέντρου είναι ευκολότερος. Όμως το μέγεθος του pixel είναι πολύ μεγαλύτερο και ένα μικρό σφάλμα στις εικονοσυντεταγμένες οδηγεί σε μεγαλύτερο σφάλμα στις πραγματικές διαστάσεις, σε σχέση με χαμηλότερες λήψεις.
- Ίσως να είναι χρήσιμο να εξετασθεί η συσχέτιση της απόκλισης του οχήματος από την εξωτερική ή εσωτερική οριογραμμή κατά μήκος του άξονα της οδού, όπως έχει γίνει σε παλαιότερες έρευνες των Garcia και Díaz [2000], αλλά και των Segal και Banney [1980] αντίστοιχα. Η απόκλιση αυτή δίνεται σε σχέση με το μήκος της καμπύλης και η τροχιά του οχήματος είναι μια ενιαία καμπύλη. Προφανώς, σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να διερευνηθεί αν είναι σωστή η θεώρηση ότι η τροχιά κάθε οχήματος περιγράφεται ως μια νέα ακτίνα, διότι το υπό μελέτη τμήμα θα είναι πολύ μεγαλύτερο.



- Παράλληλα με την παρατήρηση της συμπεριφοράς των οδηγών στις καμπύλες με μεθόδους βιντεοσκόπησης, για τον προσδιορισμό τροχιών και ταχυτήτων, προτείνεται και η πραγματοποίηση εργαστηριακών πειραμάτων με εξομοιωτή οδήγησης και σύγκριση στη συνέχεια των αποτελεσμάτων. Η πραγματοποίηση πειραμάτων με εξομοιωτή πραγματοποιήθηκε σε μια πρόσφατη έρευνα από τον Benedetto [2008], όπου εξετάστηκε η συμπεριφορά της ταχύτητας νεότερων και πιο ηλικιωμένων οδηγών σε ισόπεδους κόμβους.

Αν η παραπάνω διερεύνηση είχε γίνει στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος, τότε θα μπορούσαν να προγραμματιστούν και να χρησιμοποιηθούν ισχυρά πακέτα λογισμικού που θα απλοποιούσαν αρκετά τη μεθοδολογία, όπως για παράδειγμα έκαναν οι ερευνητές Garcia και Díaz [2000] με την αυτοματοποίηση εξαγωγής της τροχιάς των οδηγών. Η χρήση των πακέτων σε δεδομένα περισσότερων καμπυλών αποτελεί βασική προϋπόθεση για εξαγωγή ασφαλέστερων στατιστικών συμπερασμάτων. Η εξοικονόμηση χρόνου, από την αυτοματοποίηση της μεθόδου, δίνει τα περιθώρια εκτενέστερης ανάλυσης των δεδομένων, καθώς και περιθώρια ανάλυσης περισσότερων δεδομένων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. American Associations of State Highway and Transportations Officials, **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**, AASHTO, Washington D.C., 1984.
2. American Associations of State Highway and Transportations Officials, **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets – The Green Book**, AASHTO, Washington D.C., 2004.
3. Benedetto, A., **Older Drivers and Safety: A Roadway Study Using Driving Simulator**, Advances in Transportation Studies, Section A 16, pp.29-42, 2008.
4. Bird, R. N. and Hasmin, I. H., **Operating Speed and Geometry Relationships for Rural Single Carriageways in the UK**, 3rd International Symposium on Highway Geometric Design, TRB, Washington, USA, June 29-July 1 2005.
5. Brinkman C. P. and Smith S. A., **Two Lane Rural Highway Safety**, Public Roads, Vol.48, No.2, pp.48-53, Sept. 1984.
6. Γεωργόπουλος, Α., **Συμπληρωματικές Σημειώσεις Φωτογραμμετρίας**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 1991.
7. Γεωργόπουλος, Α., **Φωτογραμμετρία Ι – Διαφάνειες Διαλέξεων**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα, 2005-2006.
8. Crisman, B., Marchionna, A. and Perco, P., **Photogrammetric Surveys for the Definition of a Model for a Passing Sight Distance Computation**, Proceedings 2<sup>o</sup> International Symposium on Highway Geometry Design, , Road and Transportation Research Association, Mainz, June 14-17, 2000.
9. Díaz, M. E., Domingo, J. and García, A., **Automatic Data Extraction of Vehicle Positioning by Digital Image Processing for Modeling its Dynamic Behaviour**, 8<sup>th</sup> International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, 23-25 April, pp.110-114, IEE, London, United Kingdom, 1996.
10. Friedinger, C., **Information und Verhalten des Autofahrers beim Durchfahren von Kurven, Dissertation**, ETH Zürich, 1980.
11. García, A. and Díaz, M. E., **Automatic Data Extraction of Vehicle Trajectory by Digital Image Processing for Analyzing Behaviour – Experimental Results**, Proceedings 2<sup>o</sup> International Symposium on Highway Geometry Design, Road and Transportation Research Association, Mainz, June 14-17, 2000.

12. German Road and Transportation Research Association, **Guidelines for the Design of Roads, (RAS-L-1)**, Committee 2.3, Geometric Design Standards, Germany, 1995.
13. Glenon, J. C. and Weaver, G. D., **The Relationship of Vehicle Paths to Highway Curve Design**, Technical Report 134-5. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 1971.
14. Glenon, J. C., **Thoughts on a New Approach for Signing Roadway Curves**, Jan.2003, PaperID=18. Accessed Dec.7, 2006.
15. Johnston, I. R., **The Effects of Roadway Delineation on Curve Negotiation by Both Sober and Drinking Drivers**, ARR 128, Australian Road Research Board, Australia, 1983.
16. Kanellaidis et al., **Drivers Behaviour on Rural Road Curves**, Traffic Engineering and Control, vol.31, n.7/8, pp.414-415, 1990.
17. Καρράς, Γ., **Γραμμικοί Μετασχηματισμοί Συντεταγμένων στη Φωτογραμμετρία**, Συμπληρωματικές Σημειώσεις Μαθήματος “Φωτογραμμετρία ΙΙΙ”, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα, Φεβρουάριος 1998.
18. Kennedy, J. B. and Neville, A. M., **Basic Statistical Methods For Engineers & Scientists, Second Edition**, IEP, New York, 1964.
19. Κονταράτος Μ., **Σχέσεις Γεωμετρικών Μεγεθών Οδών με Βάση τα Κριτήρια της Ασφάλειας και της Κατανάλωσης Καυσίμου κατά την Προώθηση Επιβατηγού Οχήματος**, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π. Αθήνα, 1990.
20. Kraus B. and Trapp K.-H, **Analyse und Beseitigung von Unfallstellen im ausserörtlichen Strassennetz**, Report of Research Project 8319, Federal Institute of Highways, Bergisch Gladbach, 1987.
21. Krebs, H. G. and Kloeckner J. H., **Investigation of the Effects of Highway and Traffic Conditions Outside Built – Up Areas on Accident Rates**, Technical Journal: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Vol.223, 1977.
22. Lamm, R., Choueiri, E. M. and Mailaender, T., **Traffic Safety on Two Continents – A ten Years Analysis of Human and Vehicular Involvement**, Proc., Strategic Highway Research Program (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents, Swedish Road and Traffic Research Institute , Linköping, Sweeden, Gothenburg, Sweeden 18 -20 Sept 1991, VTirapport 372A, Part 1, pp.121-136, 1991.
23. Lamm, R., Choueiri, El. M., 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, pp.34-46.

24. Lamm, R., Psarianos, B. and Mainlaender, T., **Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook**, McGraw – Hill, New York, 1999.
25. Lamm, R. and Smith, B. L., **Curvilinear Alinement : an Important Issue for More Consistent and Safer Road Characteristics**, Transportation Research Record 1445, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.12-21, 1994.
26. Lynn, B Fricke., **Traffic Accident Reconstruction**, Volume 2 of The Traffic Accident Investigation Manual, Northwestern Traffic Institute University.
27. Macadam C.C., Fancher P.S. and Segal L., **Side Friction for Superelevation on Horizontal Curves**, Final Technical Report, DTFH61-85-C-00019, Federal Highway Administration, Washington D.C., USA, 1985.
28. Μπαλοδήμου, Α. Μ., Μπαλοδήμος, Δ.-Δ., **Σημειώσεις Μαθήματος Γεωδαισία Ι**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα, 2002 - 2003.
29. Μπαλοδήμου – Αγατζά, Α.Μ., **Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις Ι**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ, Αθήνα 2005.
30. Μπαλοδήμου – Αγατζά, Α.Μ., **Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις ΙΙ**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ, Αθήνα 2007.
31. Μπαλοδήμος, Δ.-Δ. και Σταθάς, Δ., **Γεωδαιτικά Όργανα και Μέθοδοι Μέτρησης Γωνιών και Μηκών**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 1993.
32. Μαυρομάτης, Σ., Ψαριανός, Β., Παλάσκας, Σ., **Δυναμική Προσέγγιση στον Προσδιορισμό Κρίσιμων Γεωμετρικών Παραμέτρων σε Επιβατηγά Οχήματα**, 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005.
33. Μπαλοδήμος, Δ.-Δ., Σταθάς, Δ., Αραμπατζή, Ο., **Γεωδαισία – Δίκτυα – Αποτυπώσεις – Χαράξεις**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα. 2000.
34. Ξενάκης, Ν., **Επικαιροποίηση Λειτουργικών Ταχυτήτων  $V_{85}$  Υπεραστικών Οδών Δύο Λωρίδων Κυκλοφορίας**, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα, Ιούλιος 2008.
35. Ottesen, J. L. and Krammes R. A., **Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States**, Transportation Research Record 1701, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp 76-85, 2000.
36. Πατιάς, Π., **Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία**, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1991.
37. Πουλίδης, Δ., **Μελέτη Συμπεριφοράς των Χρηστών Σε Καμπύλες Οδών**, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ιούλιος 1991.

38. Pratt, M. P. and Bonneson J. A., **Assessing Curve Severity and Design Consistency Using Energy – and Friction – Based Measures**, Transportation Research Record 2075, TRB, pp. 8-15, 2008.
39. Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, Forschungsgesellschaft für Strassen – und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Strassenentwurf, 2008.
40. Robertson, H. D., **Manual of Transportation Engineering Studies**, 4<sup>th</sup> edition, Washington D.C., 1994.
41. Segal, D. I. and Banney, T. A., **Evaluation of Horizontal Curve Design**, FHWA rd-79-48, August 1980.
42. Spacek, P., **Track Behavior and Accident Occurrence in Curves on Two – Lane Highways in Rural Areas**, Proceedings 2<sup>o</sup> International Symposium on Highway Geometry Design, Road and Transportation Research Association, Mainz, June 14-17, 2000.
43. Transportation Research Board, **Highway Capacity Manual**, third edition, Special Report n<sup>o</sup> 209, National Research council, Washington D.C., 1994.
44. Tsai, R. Y., **A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using off – the Self TV Cameras and Lenses**, IEE Transactions on Robotics and Automation, 3:323 – 344, 1987.
45. Wong, Y. D. and Nicholson, A., **Speed and Lateral Placement on Horizontal Curves**, Road and Transport Research, vol.2, n.1, pp74–87, 1993.
46. Wuping, X., Hourdos, J., Michalopoulos, P., **A Vehicle Trajectory Collection and Processing Methodology and Its Implementation to Crash Data**, Transportation Research Board 2008 Annual Meeting, Washington, D.C., January 2008.
47. Ψαριανός, Β., **Σημειώσεις Οδοποιίας Ι – Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών**, Ε.Μ.Π – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 2001.
48. Ψαριανός, Β., **Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών - Διαφάνειες Διαλέξεων**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα, 2005-2006.
49. Ψαριανός, Β., **Υπολογισμοί Στοιχείων Εφαρμογής Χάραξης**, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 1999.