

‘Διερεύνηση Πραγματικής Καμπυλότητας Τροχιάς Οχημάτων Σε Σχέση Με Την Καμπυλότητα Σχεδιασμού Υπεραστικών Οδών Δυο Λωρίδων Κυκλοφορίας’

‘Analysis of the Real Curvature of Vehicle Trajectory compared with the Curvature of Design for Rural Single Carriageway Roads (Two Lane Highway)’

Σιώρα Εμμανουέλα, Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π., Msc ‘Γεωπληροφορική’
email: emmsiora@gmail.com.

Ψαριανός Βασίλειος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής Σ.Α.Τ.Μ.
email: bpsarian@mail.ntua.gr.

Γεωργόπουλος Ανδρέας, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας Σ.Α.Τ.Μ.
email: drag@central.ntua.gr.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός του παρόντος άρθρου είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μιας σχετικής επιστημονικής εργασίας αναφορικά με την διερεύνηση της πραγματικής καμπυλότητας της τροχιάς των οχημάτων σε σχέση με την θεωρητική καμπυλότητα που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό υπεραστικών οδών δύο λωρίδων κυκλοφορίας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος βιντεοσκοπήθηκε η κίνηση επιβατηγών οχημάτων σε τέσσερις καμπύλες επιλεγμένες έτσι ώστε να έχουν συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μεγάλο εύρος ως προς την καμπυλότητά τους (από 950.76 gon/km έως 67.65 gon/km). Η ελικτότητα της τροχιάς κάθε οχήματος στις καμπύλες υπολογίστηκε εφαρμόζοντας επίγεια μονοεικονική φωτογραμμετρία. Για τα περίπου 100 οχήματα ελεύθερης ροής που αποδείχθηκε πως απαιτούνται για την ανάλυση συμπεριφοράς οδηγών ανά καμπύλη, υπολογίστηκε έμμεσα η ταχύτητα του οχήματος και η λειτουργική ταχύτητα ανά καμπύλη και πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις της λειτουργικής ταχύτητας τόσο με την ελικτότητα της χάραξης όσο και με τη μέση πραγματική ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων κάθε καμπύλης. Υπολογίστηκαν ακόμα οι θεωρητικές ταχύτητες, οι οποίες προβλέπονται για τις συγκεκριμένες καμπύλες από τους Αμερικανικούς και Ελληνικούς Κανονισμούς και ερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της μέσης πραγματικής ελικτότητας της τροχιάς των οχημάτων και της ελικτότητας 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, Γερμανικούς και Ελληνικούς Κανονισμούς. Η ασφαλής συσχέτιση της πραγματικής τροχιάς με τη συχνότητα ατυχημάτων είναι ένα πρόβλημα, το οποίο γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπισθεί από διάφορους ερευνητές διεθνώς και με διάφορους τρόπους. Η παρούσα εργασία αποτελεί μία συμβολή σε αυτή την προσπάθεια.

ABSTRACT

The aim of this study is to present the results of a scientific research concerning the real curvature of vehicle trajectory compared with the design curvature for rural single carriageway (two lane highway). To address this problem, a series of video measurements on vehicles were conducted at four curves selected so as to satisfy specific geometric restrictions and a wide range of curvature (from 950.76 gon/km to 67.65 gon/km). The rate of curvature was estimated via photogrammetric techniques. It was proved that the necessary number of free flow vehicles for this research was over a hundred per curve. It was also indirectly estimated the speed of each vehicle as well as the operating speed associated with each curve. Moreover, it was tested if there is any correlation between the operating speed and the real mean rate of curvature of vehicles' trajectory and between the operating speed and the design curvature. It was also estimated the design speed of each curve according to the American (AASHTO) and Greek Guidelines. Furthermore, it 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, it 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. Ultimately, many efforts have been done worldwide by many investigators implementing a variety of ways so as the real rate of curvature and the frequency of accidents to be safely correlated. This is a serious problem and this study contributes to this effort to a certain extent.

1. 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 πάντα γνωστή με ακρίβεια η σχέση μεταξύ ατυχημάτων και διαφόρων χαρακτηριστικών σχεδιασμού.

Έτσι λοιπόν, στις μέρες μας κρίνεται πολύ σημαντική η συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με την οδηγική 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 διότι εμφανίζουν υψηλότερους δείκτες ατυχημάτων, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Αναφορικά με ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων, διάφορες έρευνες που έγιναν έδειξαν ότι οι οδοί δύο λωρίδων κυκλοφορίας κατέχουν τα υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης για κάποιους τύπους ατυχημάτων από οποιαδήποτε άλλη κατηγορία οδού και ότι ο συνολικός αριθμός τροχαίων ατυχημάτων με νεκρούς στα παραπάνω οδικά δίκτυα αγγίζει ποσοστό μεταξύ του 60% και 70% σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα σε Ευρώπη και Αμερική [Lamm et al., 1991]. Διαπιστώθηκε επίσης ότι τουλάχιστον τα μισά τροχαία ατυχήματα με νεκρούς, 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. Στον Ευρωπαϊκό χώρο, την τελευταία δεκαετία παρά τον περιορισμό των ατυχημάτων, ο βασικός στόχος της μείωσης τους κατά το ήμισυ, δεν επιτεύχθηκε. Η Ελλάδα μάλλον λαμβάνει υψηλή θέση ανάμεσα στις Ευρωπαϊκές χώρες στα ατυχήματα με νεκρούς αναλογικά με τον πληθυσμό της [European Road Safety Observatory, 2009], παρά το γεγονός ότι στο διάστημα 2001 – 2008 τα ατυχήματα με νεκρούς μειώθηκαν κατά 17% [European Commission (Care & national data), 2008]. Ακόμα, για την Ελλάδα, τα περισσότερα ατυχήματα με νεκρούς ή σοβαρά τραυματίες εμφανίζονται σε μη αστικές περιοχές, γεγονός που ισχύει και για την Ευρώπη συνολικά. Στον ίδιο διαδικτυακό χώρο, από συλλογή στοιχείων μέχρι το 2003, αναφέρεται ότι για τις υπεραστικές οδούς με μια λωρίδα ανά κατεύθυνση τα ατυχήματα με νεκρούς συμβαίνουν έξι φορές πιο συχνά από ότι σε αυτοκινητοδρόμους. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα ευρωπαϊκά ποσοστά μοιραίων ατυχημάτων για το 2008, όπου το 38% συνέβησαν σε αστικές περιοχές, το 6% σε μη αστικούς αυτοκινητοδρόμους και το 56% στις υπόλοιπες υπεραστικές οδούς [European Commission (Care & national data), 2008].

Ως προς τη γεωμετρία της χάραξης, μια ιδιαίτερα σημαντική διαπίστωση έγινε από τους Krebs και Kloeckner το 1977. Οι ερευνητές ισχυρίζονται ότι, αν οι κανόνες χάραξης οδών εγγυώνταν την ασφάλεια των οδών, τότε έπρεπε να συμβαίνουν λίγα, αν όχι καθόλου, ατυχήματα 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 οδηγικής συμπεριφοράς από ότι θεωρείται μέχρι σήμερα [Spacek, 2000].

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 and Diaz, 2000]. Η πρόσφατη έρευνα του Spacek [2000], αναφέρει τη σημασία που έχει η συλλογή δεδομένων στις τροχιές των οδηγών ως μέσο για την έγκαιρη αναγνώριση των πιθανά επικίνδυνων καμπύλων. 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.

Βασικό αντικείμενο αυτής της εργασίας ήταν να βρεθεί μια απλή και ακριβής μεθοδολογία προσδιορισμού της τροχιάς οχήματος ώστε στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ ελικτότητας σχεδιασμού και της μέσης ελικτότητας της τροχιάς που επιλέγει συγκεκριμένο δείγμα από κάθε καμπύλη που θα εξεταστεί. Στόχος επίσης ήταν να διερευνηθούν τα περιθώρια ασφαλείας κατά την κίνηση των οχημάτων στις καμπύλες να εξαχθούν πιθανώς συμπεράσματα υπερσχεδιασμού ή υποσχεδιασμού των οδών από τους Κανονισμούς.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

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 καθώς και σημεία που θα χρησιμοποιηθούν ως Σημεία Ελέγχου. Ακολούθησε η βιντεοσκόπηση της κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες ώρες στα παραπάνω τμήματα. Τέλος, ακολουθεί η επεξεργασία του μαγνητοσκοπημένου υλικού για τον υπολογισμό της ελικτότητας κάθε οχήματος.

2.1. Επιλογή Καμπύλων Οδικών Τμημάτων

Η οδηγητική συμπεριφορά, η οποία στην σύγχρονη οδοποιία ερμηνεύεται τόσο από την ταχύτητα όσο και από την τροχιά του οχήματος στην καμπύλη, μελετήθηκε σε τέσσερις καμπύλες εντός του Ν. Αττικής. Οι καμπύλες Α, Β, C, D 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. Το όριο ταχύτητας (μιας και δεν υπήρχαν όρια ταχύτητας πριν τις καμπύλες) θεωρείται πως έχει τη τιμή των 90km/h που αποτελεί το επίσημο όριο ταχύτητας επιβατηγών αυτοκινήτων για αυτή την κατηγορία οδών. Η βασική παράμετρος που θεωρήθηκε πως επηρεάζει την τροχιά των οχημάτων είναι η ελικτότητα, 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. Η ελικτότητα αντιστοιχεί σε μια ανηγμένη ακτίνα που αναφέρεται σε όλη την καμπύλη. Αντίθετα, έρευνες στο παρελθόν, εξετάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών σε καμπύλες, επιλεγμένες κατά πρώτο λόγο σύμφωνα με την ακτίνα του κυκλικού τους τόξου.

Στην παρούσα έρευνα, μια αρχική εκτίμηση της ακτίνας των καμπύλων έγινε μέσω του λογισμικού Google Earth και η τελική επιλογή τους έγινε ύστερα από επιτόπιο έλεγχο, ώστε σε κάθε καμπύλη:

- να μην υπάρχει επιρροή από διασταυρώσεις,
- να μην υπάρχουν επικίνδυνα στοιχεία στο άμεσο περιβάλλον της οδού (π.χ. στενές γέφυρες),
- να μην υπάρχουν αλλαγές στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος,
- η κατά μήκος κλίση να είναι μικρότερη από 6%,
- να υπάρχει ικανό μήκος ευθυγραμμίας εκατέρωθεν των καμπύλων,
- να μην υπάρχει σημαντικός περιορισμός ορατότητας κατά μήκος της καμπύλης λόγω ορυγμάτων στα πρηνή ή λόγω βλάστησης,
- να μην υπάρχουν πλευρικά εμπόδια (πχ. σθηθαία ασφαλείας) σε απόσταση μικρότερη του 1.5 m από την εξωτερική οριογραμμή και συνεπώς να μην επηρεάζεται η απόσταση του οχήματος από την εξωτερική οριογραμμή και τέλος,
- η μορφολογία του εδάφους να είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή από ένα σημείο η παρατήρηση ολόκληρης της καμπύλης ή ικανοποιητικού τμήματός της, χωρίς παρεμβολή εμποδίων στο οπτικό πεδίο. Η παρατήρηση έπρεπε να μην επηρεάζει την συμπεριφορά των χρηστών της οδού.

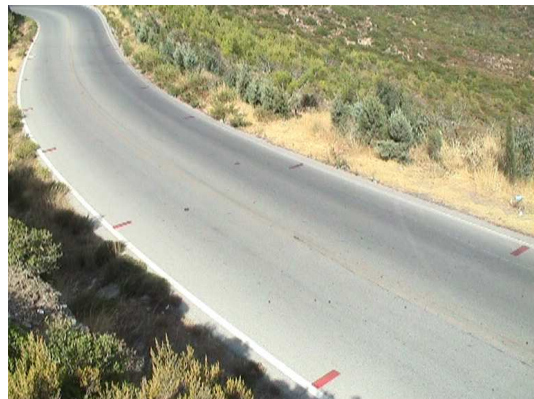
Επισημαίνεται ακόμα ότι η οριζοντιογραφία κάθε καμπύλης, που ανήκει στο υπό μελέτη οδικό τμήμα δεν ήταν απαραίτητο να ακολουθεί τη διάταξη ευθυγραμμία – κυκλικό τόξο-ευθυγραμμία, διότι εξετάζεται η καμπύλη ως προς την ελκτικότητα της και όχι με βάση την ακτίνα του κυκλικού της τόξου.

Στις καμπύλες μεγαλύτερης ακτίνας C και D, η μελέτη τους περιορίστηκε σε τμήμα της καμπύλης, αφενός λόγω του μεγάλου συνολικού μήκους, αφετέρου δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια στην αναγωγή των εικονοσυντεταγμένων στις γεωδαιτικές συντεταγμένες με μια μόνο βιντεοκάμερα. Για τις καμπύλες αυτές, η ακριβής θέση του κυκλικού τόξου και των τόξων συναρμογής προέκυψαν από την αποτύπωση και το γωνιακό διάγραμμα. Τελικά διαπιστώθηκε ότι το υπό μελέτη διάστημα συνέπεσε να ανήκει στο κυκλικό τόξο της κάθε καμπύλης. Στις καμπύλες με τις μικρότερες ακτίνες A, B, το διάστημα αυτό συμπεριλάμβανε και το κυκλικό τόξο της καμπύλης.

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 1).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1: Βιντεοεικόνες από τις καμπύλες (α) Α, (β) Β, (γ) C και (δ) D, και επισημάνσεις χαρακτηριστικών διατομών στο οδόστρωμα.

2.2. Προετοιμασία των Οδικών Τμημάτων Παρατήρησης

Ανάλογα με το ορατό τμήμα της καμπύλης από τη βιντεοκάμερα, τόσο για τον υπολογισμό των διαδοχικών θέσεων των οχημάτων επί της καμπύλης και της ταχύτητάς τους, όσο και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της αναγωγής, τοποθετήθηκαν στο οδόστρωμα κάθετα στις δύο οριογραμμές ειδικές επισημάνσεις (Εικόνα 1) που αποτελούνταν από μαύρες (κόκκινες σε μια καμπύλη) ευθείες γραμμές διαστάσεων 60x20 cm 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, ομοιόμορφα διασκορπισμένα στο οδόστρωμα. 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. Κατ' εξαίρεση σε μια καμπύλη εφαρμόστηκε κόκκινη διαγράμμιση διότι το μαύρο χρώμα δεν ήταν ευδιάκριτο σε πιο απομακρυσμένα σημεία από τη συγκεκριμένη θέση λήψης.

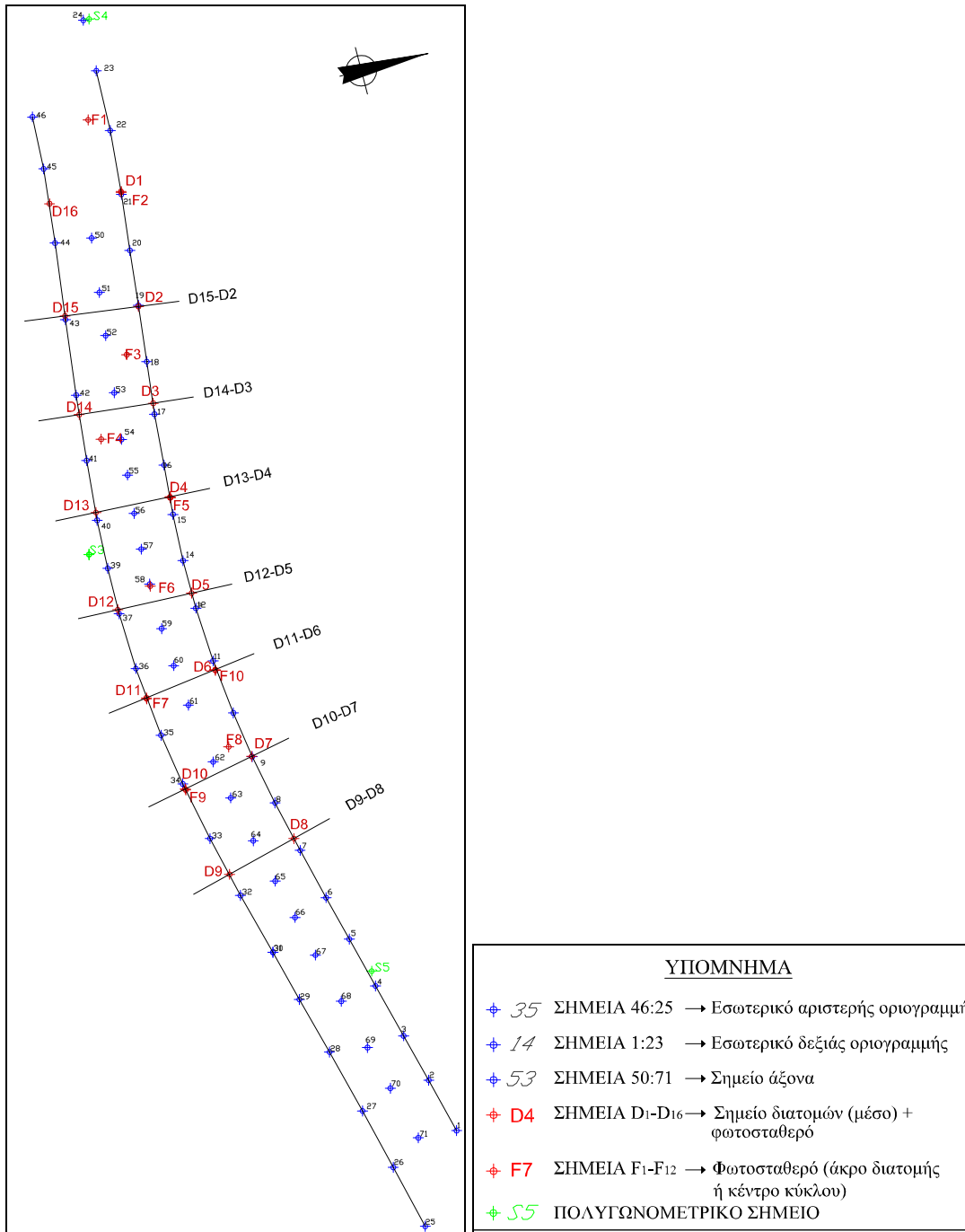
Οι εργασίες αυτές πραγματοποιήθηκαν καθημερινές μέρες και σε ώρες όπου παρατηρήθηκαν μειωμένοι κυκλοφοριακοί φόρτοι. Παρ' όλα αυτά, ήταν πολύ επικίνδυνη η τοποθέτηση των σημαδιών 60x20 cm στον άξονα της οδού και η διαδικασία περιορίστηκε στην τοποθέτησή τους μόνο στις εξωτερικές οριογραμμές.

2.3. Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά των Οδικών Τμημάτων

Τα Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά κάθε καμπύλης που προέκυψαν από τοπογραφική αποτύπωση είναι ελικτότητα της καμπύλης (K_E σε gon/km) η ακτίνα του κυκλικού τόξου της καμπύλης (R σε m), η κατά μήκος κλίση (s%) ως ο μέσος όρος όλων των διατομών, η μέση επίκλιση (q%) στο κυκλικό τόξο και το καθαρό πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας (a σε m).

Η τοπογραφική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας Ολοκληρωμένο Γεωδαιτικό Σταθμό με γωνιακή και γραμμική ακρίβεια μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα ταχυμετρικά σημεία για κάθε καμπύλη, 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. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το τοπογραφικό διάγραμμα της καμπύλης Β, όπου έχουν

αποτυπωθεί οι δύο οριογραμμές του δρόμου, ορισμένα σημεία του άξονα και τα σημεία ελέγχου.



Σχήμα 1: Διάγραμμα τοπογραφικής αποτύπωσης για την καμπύλη Β.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της κίνησης σε κάθε καμπύλη σχετίζονται άμεσα μέσω της ελκτότητας της μεμονωμένης καμπύλης και όχι μέσω του κυκλικού τόξου της καμπύλης μόνο, όπως έχει πραγματοποιηθεί σε παλαιότερες έρευνες [Garcia and Diaz, Glenon and Weaver]. Για την πλήρη περιγραφή κάθε καμπύλης από τα σημεία της τοπογραφικής αποτύπωσης για κάθε οριογραμμή, σχεδιάστηκε γωνιακό διάγραμμα, η μορφή του οποίου οδήγησε στην αναγνώριση των γεωμετρικών στοιχείων και στη συνέχεια στον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμέτρων του κάθε τόξου ξεχωριστά (π.χ. ακτίνα, παράμετρος κλωθοειδούς, μήκη κλπ) [Ψαριανός, 1999]. Η συγκεκριμένη έρευνα περιορίστηκε στον προσδιορισμό της ακτίνας του κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης με τη Μ.Ε.Τ.. Επειδή στο

γωνιακό διάγραμμα, η κεκλιμένη γραμμή αποτελεί ένδειξη ύπαρξης κυκλικού τόξου, 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 επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

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. Στον Πίνακα που ακολουθεί καταγράφονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	R [m]
A	60
B	113
C	178
D	594

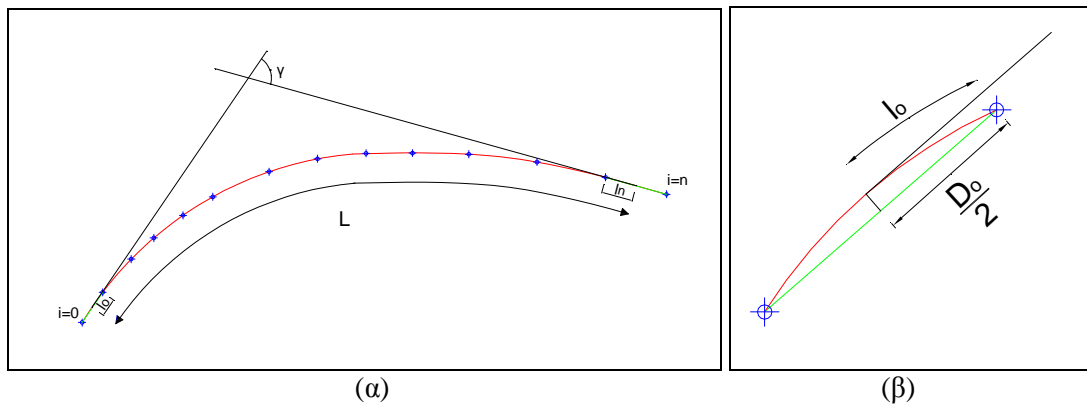
Πίνακας 1: Ακτίνα κυκλικού τόξου κάθε καμπύλης.

Η ελικτότητα K_E της μεμονωμένης καμπύλης είναι συνάρτηση της γωνίας αλλαγής κατεύθυνσης και του συνολικού μήκους της καμπύλης που αποτελείται από το μήκος του κυκλικού τόξου και τα μήκη των εκατέρωθεν τόξων συναρμογής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Η ελικτότητα κάθε καμπύλης υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$K_E = \frac{|\gamma|}{L} \tag{1}$$

όπου: K_E η ελικτότητα μεμονωμένης καμπύλης σε [gon/km], γ η γωνία αλλαγής κατεύθυνσης σε κάθε μία καμπύλη σε [gon] και L το συνολικό μήκος καμπύλης [km].

Για κάθε καμπύλη, υπολογίστηκε η ελικτότητα από τα στοιχεία αποτύπωσης της κάθε οριογραμμής (Σχ. 2). Ο μέσος όρος της ελικτότητας των δύο οριογραμμών αποτελεί την ελικτότητα K_E του άξονα.



Σχήμα 2: (α) Γωνία αλλαγής κατεύθυνσης γ και μήκος L των οριογραμμών, (β) Ειδική περίπτωση υπολογισμού μήκους καμπύλης.

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 A και C), η χορδή δε συμπίπτει με το καμπύλο τμήμα και ο υπολογισμός του μήκους γίνεται με την παραδοχή που φαίνεται στο Σχήμα 2(β).

Το μήκος L κάθε οριογραμμής προκύπτει από τη σχέση, σύμφωνα με το Σχήμα 2 ως εξής:

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

όπου: L το μήκος οριογραμμής σε [m], X_i , Y_i η τετμημένη και τεταγμένη των σημείων της οριογραμμής ($i=0, \dots, i=n$) σε [m], και $\frac{D_o}{2}$, $\frac{D_n}{2}$ το ήμισυ της χορδής στην αρχή και το πέρας της οριογραμμής σε [m].

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 η διαφορά προσημασμένων γωνιών διεύθυνσης [grad] από τη σχέση:

$$\gamma = a_{(n-1)n} - a_{01} \quad (3)$$

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

$$R_{AN} = \frac{63700}{K_E} \quad (4),$$

όπου: R_{AN} η ανηγμένη ακτίνα της καμπύλης σε [m] και K_E η ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης σε [gon/km].

Οι τιμές της ελικτότητας K_E του άξονα και οι ανηγμένες ακτίνες των καμπύλων που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

ΚΑΜΠΥΛΗ	Ελικτότητα K_E [gon/km]	Ανηγμένη Ακτίνα R_{AN} [m]
A	950.76	67
B	524.43	121
C	259.36	246
D	67.65	942

Πίνακας 2: Ελικτότητα χάραξης και 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 ημιφορτηγών επιλέχθηκε η μέθοδος της βιντεοσκόπησης ως η καταλληλότερη και οικονομικότερη από πλευράς διατιθέμενου εξοπλισμού, σε αντίθεση με εναλλακτικές μέθοδοι π.χ. μετρητικών στηλών [Spacek, 2000].

Ο προσδιορισμός της τροχιάς οχήματος με διαφορετικές και πιο σύγχρονες μεθόδους, όπως GPS και radar, μπορεί γενικώς να είναι περισσότερο ευέλικτος και ίσως πιο ακριβής, ωστόσο εξάγονται συμπεράσματα μόνο για τα οχήματα που διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό δηλαδή δέκτη GPS για Κινηματικό εντοπισμό σε Πραγματικό Χρόνο [Goyat et al., 2009]. Συνεπώς, προκύπτει μικρό δείγμα που δεν ενδείκνυται για στατιστική ανάλυση. Επίσης, οι οδηγοί σε αυτού του τύπου μετρήσεις, γνωρίζουν ότι καταγράφονται οι κινήσεις τους.

Η θέση της βιντεοκάμερας κρίνεται καθοριστική τόσο στην ακρίβεια της Φωτογραμμετρικής επεξεργασίας όσο και στην συμπεριφορά των οδηγών. Όσο πιο ψηλά τοποθετείται η

βιντεοκάμερα, τόσο πιο εύκολη γίνεται η φωτογραμμετρική διαδικασία της αναγωγής της εικόνας του video σε ορθή προβολή. 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. Για να μην αντιληφθούν οι οδηγοί τη διαδικασία την βιντεοσκόπησης, έγινε προσπάθεια, στα πλαίσια του δυνατού, της κάλυψης του τρίποδα της βιντεοκάμερας από βλάστηση.

Το μοντέλο της βιντεοκάμερας που χρησιμοποιήθηκε ήταν SONY DCR TRV80E το οποίο διαθέτει φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης (4.5 mm - 45 mm) και συχνότητα λήψης 25 frames/sec. Το μοντέλο αυτό είχε τη δυνατότητα να βιντεοσκοπεί ταινίες μήκους μίας ώρας. Οι βιντεοσκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν καθημερινές μέρες, σε πολύ πρωινές ώρες. Οι καιρικές συνθήκες βιντεοσκόπησης ήταν σχεδόν ιδανικές (ηλιοφάνεια ή αραϊή συννεφιά) σε όλες τις λήψεις. Η διάρκεια των λήψεων κράτησε από 2 μέχρι και 3 ώρες για κάθε καμπύλη, ώστε να συλλεχθεί το απαραίτητο αντιπροσωπευτικό δείγμα. Το ύψος λήψης σε κάθε περίπτωση εξαρτήθηκε από τη μορφολογία του ορύγματος δίπλα από την καμπύλη και κυμάνθηκε από 3m (καμπύλη C) έως 10m περίπου (καμπύλη D).

2.5. Εφαρμογή Φωτογραμμετρίας – Προσδιορισμός Ελκτότητας Τροχιάς Οχήματος

Ο προσδιορισμός τροχιάς ενός οχήματος πραγματοποιήθηκε, ύστερα από βιντεοσκόπηση της κυκλοφορίας, με εφαρμογή φωτογραμμετρίας. Στόχος ήταν να βρεθεί μια απλή και ακριβής μεθοδολογία ώστε μετρώντας απλά τις εικονοσυντεταγμένες ενός αντιπροσωπευτικού σημείου (προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος) στην εικόνα πάνω στο οδόστρωμα, να είναι εφικτός ο αυτόματος μετασχηματισμός τους σε πραγματικές συντεταγμένες στο χώρο. Η καμπυλότητα της τροχιάς ενός οχήματος συνεπώς προέκυπτε από τις διαδοχικές θέσεις του αντιπροσωπευτικού σημείου μέσα στην καμπύλη σε συντεταγμένες του χώρου.

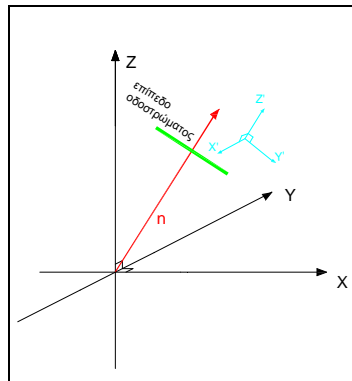
Συνοπτικά η φωτογραμμετρική μεθοδολογία ήταν η ακόλουθη. Για κάθε λήψη, όπου η θέση της κάμερας παρέμενε σταθερή και στερεωμένη σε ειδικό τρίποδα, πραγματοποιήθηκε αναγωγή των βιντεοεικόνων. Σε κάθε λήψη αντιστοιχεί προφανώς μια μόνο ανηγμένη εικόνα εφόσον η κάμερα ήταν ακίνητη.

Το βασικό πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπιστεί 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. Πιο αναλυτικά, με την προϋπόθεση ότι η επίκλιση ($q\%$) και η κατά μήκος κλίση ($s\%$) παραμένουν σταθερές στο υπό μελέτη τμήμα, το οδόστρωμα μπορεί να προσεγγιστεί με ένα κεκλιμένο επίπεδο και από τις συντεταγμένες της τοπογραφικής αποτύπωσης μπορεί να προσδιοριστεί η εξίσωση αυτού του κεκλιμένου επιπέδου.

$$aX + bY + cZ = 1 \quad (5)$$

Η συνόρθωση με ελάχιστα τετράγωνα [Μπαλοδήμου, 2005] που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της εξίσωσης του κεκλιμένου επιπέδου που προσεγγίζει το οδόστρωμα έδωσε υπόλοιπα και a posteriori τυπικό σφάλμα της μονάδας βάρους μικρότερα από 1mm γεγονός που επιβεβαιώνει ότι οι παραδοχές για τις ιδιότητες του οδοστρώματος είναι σωστές. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι γωνίες στροφής του κεκλιμένου επιπέδου σε σχέση με το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς της τοπογραφικής αποτύπωσης και ακολούθησε ο μετασχηματισμός του κεκλιμένου επιπέδου σε οριζόντιο πολλαπλασιάζοντας τις συντεταγμένες του αρχικού συστήματος με τον ορθοκανονικό πίνακα στροφής. Πρόκειται ουσιαστικά για μετασχηματισμό των συντεταγμένων από το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς XYZ στο X'Y'Z' (Σχήμα 3). Με αυτή την μετατροπή το επίπεδο με το οποίο προσομοιώνεται το οδόστρωμα κάθε καμπύλης έχει περίπου το ίδιο υψόμετρο, δηλαδή ο άξονας Z' είναι

κάθετος στο επίπεδο της αναγωγής. Η τυπική απόκλιση των υψομέτρων των σημείων του οριζοντίου επιπέδου που παρατηρήθηκε στις καμπύλες είχε εύρος από 1cm μέχρι 7cm .



Σχήμα 3: Στροφή συντεταγμένων από το καρτεσιανό σύστημα αναφοράς σε επίπεδο παράλληλο στο οδόστρωμα.

Εφόσον το οδόστρωμα έχει προσεγγιστεί με ένα αντικείμενο 2D είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί προβολικός μετασχηματισμός του 2D αυτού αντικειμένου σε ορθή προβολή [Γεωργόπουλος, 2005-2006]. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ουσιαστικά αναγωγή της εικόνας που είναι μια κεντρική προβολή σε ορθή προβολή (Εικόνα 2(α)). Για Z' σταθερό, η συνθήκη συγγραμμικότητας της Φωτογραμμετρίας απλοποιείται και ο μετασχηματισμός είναι αντιστρέψιμος. Προκύπτουν τελικά δύο Κλασματικές Εξισώσεις, οι οποίες για κάθε μετασχηματισμό λαμβάνουν την μορφή:

$$X' = \frac{A_1x + A_2y + A_3}{A_7x + A_8y + 1} \quad \text{και} \quad Y' = \frac{A_4x + A_5y + A_6}{A_7x + A_8y + 1} \quad (6)$$

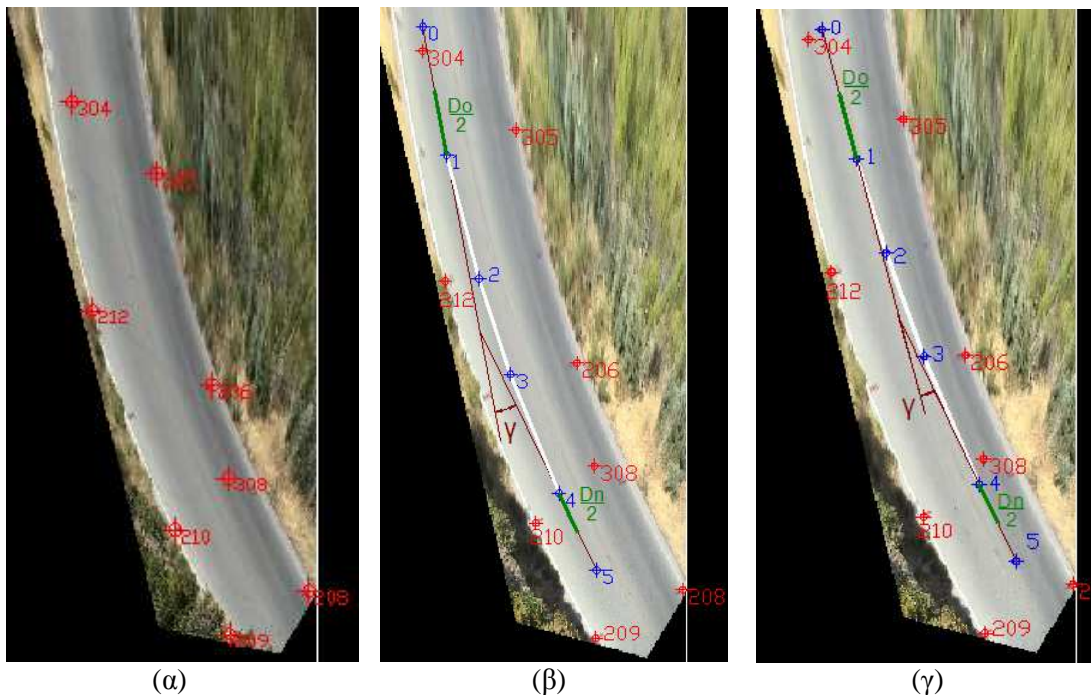
Οι γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες τουλάχιστον τεσσάρων φωτοσταθερών και των αντίστοιχων εικονοσυντεταγμένων τους επιτρέπουν τον προσδιορισμό των οκτώ παραμέτρων του μετασχηματισμού, καθώς κάθε φωτοσταθερό αντιστοιχεί σε δύο εξισώσεις παρατήρησης. Επειδή σε όλες τις αναγωγές που έχουν πραγματοποιηθεί τα φωτοσταθερά ξεπερνούν τα τέσσερα, (συνήθως πάνω από 7) ο υπολογισμός των παραμέτρων έγινε με τη Μ.Ε.Τ. ώστε να ληφθούν υπόψη περισσότερες διατιθέμενες πληροφορίες. 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.

Η στόχευση των εικονοσυντεταγμένων πραγματοποιήθηκε σε ειδικό λογισμικό φωτογραμμετρικό πακέτο και 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. Οι παράμετροι του μετασχηματισμού υπολογίστηκαν με Μ.Ε.Τ. από τον χρήστη καθώς τα λογισμικά έδιναν μόνο τις τιμές των εικονοσυντεταγμένων.

Στη συνέχεια για κάθε αναγωγή υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα από τη συνόρθωση. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το μέσο υπόλοιπο για μια αναγωγή κάθε καμπύλης. Καμπύλη A: 9cm, καμπύλη B: 13cm, καμπύλη C 3cm και καμπύλη D 16cm. Η καμπύλη D εμφανίζει το μεγαλύτερο σφάλμα λόγω μεγάλου ύψους λήψης που συνεπάγεται ότι κάθε εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε μεγάλη έκταση στο έδαφος σύμφωνα με την μεταβαλλόμενη κλίμακα της εικόνας. Γενικά έγινε προσπάθεια το μέσο υπόλοιπο στις συντεταγμένες να μην ξεπερνά τα 20cm, διότι αποδείχτηκε ότι, το σφάλμα αυτό αποτελεί οριακή τιμή για τον ακριβή υπολογισμό των ελκτοτήτων των τροχιών των οχημάτων και των ταχυτήτων στις οποίες αντιστοιχούν οι ελκτοότητες.

Επιπλέον η σχετική ανάλυση των σφαλμάτων έδειξε πως η διαδικασία της διόρθωσης των εικονοσυντεταγμένων από ακτινική διαστροφή του φακού της μηχανής μπορεί να μην πραγματοποιηθεί.

Στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας, απομονώνονται οι βιντεοεικόνες για κάθε όχημα, που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές διατομές (και σε ορισμένες περιπτώσεις και σε ενδιάμεσα σημεία) και προσδιορίζονται, για κάθε μια εικόνα, οι εικονοσυντεταγμένες σε ρίχελ της προβολής του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος. Βασική προϋπόθεση για αυτήν τη μεθοδολογία ήταν το σημείο που ανάγεται να βρίσκεται στο επίπεδο της αναγωγής, δηλαδή σε εκείνο το οριζόντιο επίπεδο με το οποίο έχει προσεγγιστεί το οδόστρωμα. Άρα η στόχευση σημείων για τον προσδιορισμό του αντιπροσωπευτικού σημείου έγινε ακριβώς στη διεπιφάνεια τροχού και οδοστρώματος. Όλες οι μετρήσεις εικονοσυντεταγμένων πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον AutoCAD. Τέλος, με τη χρήση των οκτώ παραμέτρων του προβολικού μετασχηματισμού, γίνονται γνωστές οι αντίστοιχες γεωδαιτικές συντεταγμένες $X'Y'$ του αντιπροσωπευτικού σημείου στο επίπεδο της αναγωγής που προσεγγίζει το οδόστρωμα και συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί η ελικτότητα της τροχιάς του οχήματος χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Εκτός από την ελικτότητα υπολογίστηκε και η ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς. Στην Εικόνα 2(α) παρουσιάζεται η ανηγμένη εικόνα καμπύλης Β, (β) Τροχιά οχήματος με ελικτότητα περίπου ίση της χάραξης (τροχιά παράλληλη στις οριογραμμές), (γ) Τροχιά οχήματος με ελικτότητα μικρότερη της χάραξης (είσοδος στο αντίθετο ρεύμα).

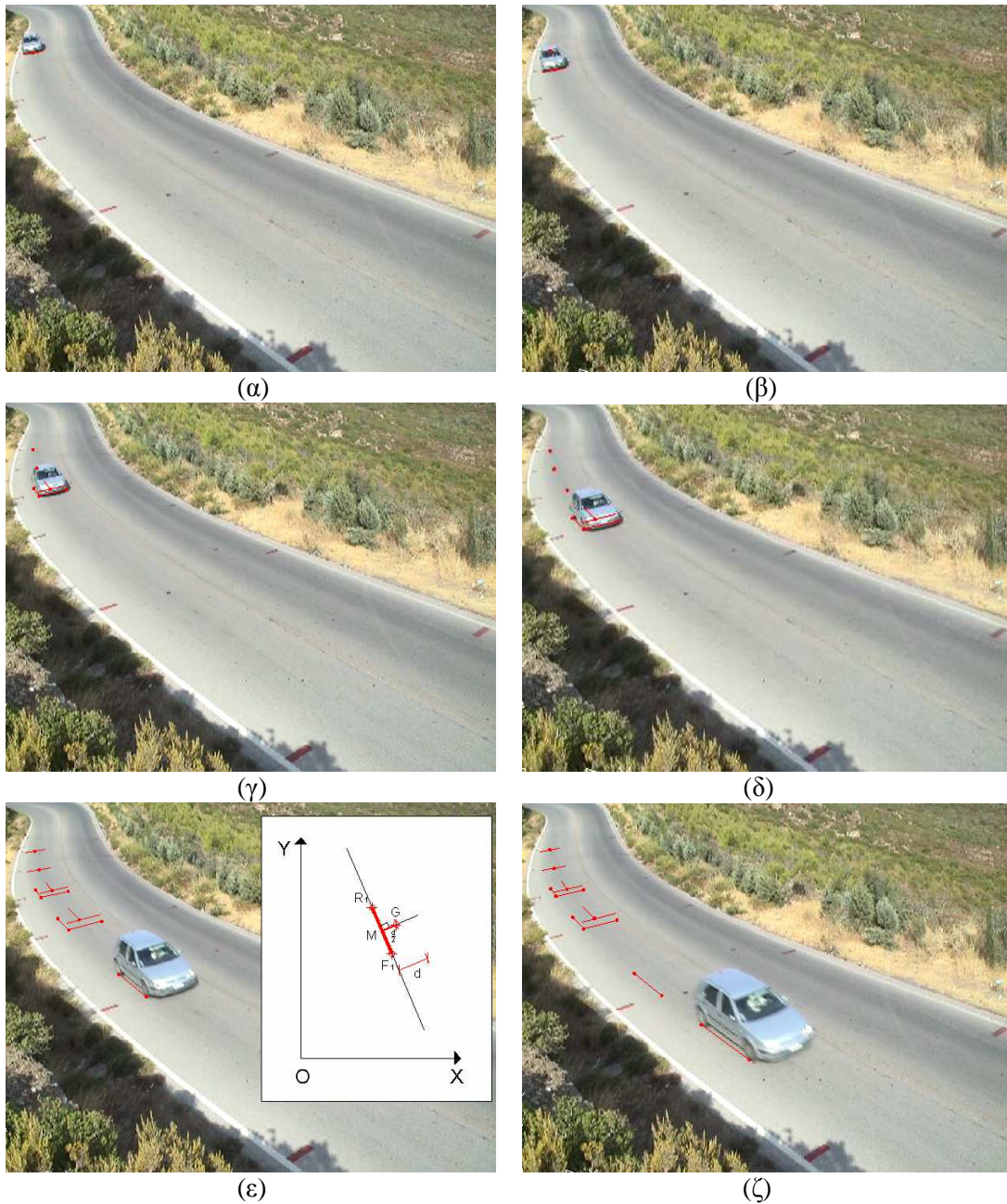


Εικόνα 2: (α) Ανηγμένη εικόνα καμπύλης Β, (β) Τροχιά οχήματος με ελικτότητα περίπου ίση της χάραξης (τροχιά παράλληλη στις οριογραμμές), (γ) Τροχιά οχήματος με ελικτότητα μικρότερη της χάραξης (είσοδος στο αντίθετο ρεύμα).

Επισημαίνεται ότι στις πιο απομακρυσμένες από την κάμερα διατομές ως προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος θεωρείται αναγκαστικά το μέσο του μετατροχίου διότι οι μόνες μετρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι των δύο εμπροσθεν (ή όπισθεν για την αντίθετη κατεύθυνση) τροχών. 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. 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.

Στην πορεία της έρευνας εντοπίστηκε το πρόβλημα της μη ορατότητας δύο μετωπικών τροχών. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε γνωρίζοντας την ανηγμένη (πραγματική) απόσταση του μετατροχίου με τα ελαστικά από προηγούμενες διατομές (μέσος όρος). Στη συνέχεια η προβολή του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος προσδιορίστηκε με έμμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας γεωδαιτική μεθοδολογία. Πιο συγκεκριμένα σε περιπτώσεις όπως στις Εικόνες 3(ε) και 3(ζ) υπολογίζονται αρχικά στο επίπεδο της ανάγωγης οι συντεταγμένες για τον όπισθεν (R) και εμπροσθεν αριστερά τροχό (F). Ύστερα υπολογίζεται το μέσο M και η κάθετη διεύθυνση a_{MG} και τέλος ακολουθεί υπολογισμός συντεταγμένων στο G με εφαρμογή θεμελιώδους προβλήματος γεωδαισίας.



Εικόνα 3:(α) – (ζ) Προσδιορισμός τροχιάς οχήματος, (ε) και (ζ) ειδική μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος όταν είναι ορατοί μόνο οι πλευρικοί τροχοί.

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 του Spacek [2000], 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 και αποδείχθηκε ότι η γραμμική παρεμβολή που εφαρμόστηκε στα συγκεκριμένα οχήματα είχε 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.

Η ακρίβεια υπολογισμού της ελικτότητας ενός οχήματος με τον παραπάνω τρόπο κρίνεται ως καλή, καθώς αντιστοιχεί σε αποδεκτή αβεβαιότητα ταχύτητας του οχήματος. Υπάρχουν όμως περιθώρια για καλύτερα αποτελέσματα αν η ακρίβεια της αναγωγής είναι μεγαλύτερη. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθεί βιντεοκάμερα υψηλότερης ανάλυσης.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

3.1. Προσδιορισμός Μεγέθους του Δείγματος Οχημάτων

Το δείγμα οχημάτων ανά καμπύλη που αντιπροσωπεύει τα χαρακτηριστικά του πληθυσμού υπολογίστηκε μέσω ταχυτήτων. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογίστηκε έμμεσα γνωρίζοντας την απόσταση μεταξύ χαρακτηριστικών διατομών που διανύει ένα όχημα στο μέσο της καμπύλης σε συγκεκριμένο χρόνο. Η ταχύτητα αυτή θεωρείται ως η στιγμιαία ταχύτητα. Σύμφωνα με το Manual of Transportation Engineering Studies [Robertson, 1994], προτείνεται 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 ± 1 έως ± 5 miles/h (± 1.6 km/h έως ± 8 km/h). Το μέγεθος του μέγιστου επιτρεπτού σφάλματος της μέσης τιμής του δείγματος από τη μέση τιμή του πληθυσμού επιλέχθηκε στα ± 3 km/h, δηλαδή περίπου στα ± 2 miles/h. Το επίπεδο εμπιστοσύνης ότι το σφάλμα στον υπολογισμό δεν υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα, θεωρήθηκε 95%. Ως προς την τυπική απόκλιση του δείγματος εκτιμήθηκε από την επεξεργασία ταχυτήτων μικρού δείγματος οχημάτων σε κάθε καμπύλη. Η μεγαλύτερη τιμή εντοπίστηκε στην καμπύλη D (περίπου 14km/h) όπου μπορούν να αναπτυχθούν υψηλές ταχύτητες, ενώ για τις άλλες καμπύλες ήταν πολύ μικρότερη η τιμή της (< 8 km/h). Συνεπώς, η τιμή της τυπικής απόκλισης S, του δείγματος λαμβάνεται λίγο μεγαλύτερη από την max, με τιμή 14.5 km/h. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το αντιπροσωπευτικό δείγμα ανέρχεται περίπου στα 90 οχήματα ανά καμπύλη, ενώ μετρήθηκαν περίπου 100, δηλαδή περίπου 50 επιβατηγά ανά κατεύθυνση. Το κρίσιμο διάκενο μεταξύ των οχημάτων ήταν 5 sec σύμφωνα με το HCM, 1994. Επίσης η κίνηση κάθε οχήματος μέσα στην καμπύλη ήταν ανεξάρτητη από την κίνηση του αντίθετου ρεύματος κυκλοφορίας. 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].

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.

3.2. Έλεγχος Κανονικότητας Δείγματος Ταχύτητων

Για τις ταχύτητες κάθε καμπύλης πραγματοποιήθηκε Test Kolmogorov – Smirnov με επίπεδο σημαντικότητας 5% και αποδείχθηκε ότι σε όλες τις καμπύλες το δείγμα που επιλέχθηκε ακολουθεί την κανονική κατανομή. Από την γραμμική παρεμβολή στο διάγραμμα Σχετικής Αθροιστικής Συχνότητας (που έχει την μορφή της S καμπύλης της κανονικής κατανομής) υπολογίζεται η λειτουργική ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα που επιλέγει το 85% των οδηγών κάθε καμπύλης. Επισημαίνεται ότι η ταχύτητα των οχημάτων δεν διέφερε σημαντικά στις αντίθετες κατευθύνσεις, γι' αυτό και ο έλεγχος κανονικότητας ήταν ενιαίος σε κάθε καμπύλη. Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι λειτουργικές ταχύτητες σε κάθε καμπύλη (στήλη 6) καθώς και οι ταχύτητες σχεδιασμού με τους συντελεστές πλευρικής τριβής που αντιστοιχούν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραπάνω καμπύλων, σύμφωνα με τους Αμερικανικούς Κανονισμούς AASHTO 2004 (στήλες 2 έως 5). Στη συγκεκριμένη έρευνα, εφόσον οι ακτίνες και οι επικλίσεις των καμπύλων έχουν συγκεκριμένη τιμή, τα διαγράμματα στους κανονισμούς AASHTO 2004 χρησιμοποιούνται αντίστροφα. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας διπλή γραμμική παρεμβολή στα δεδομένα των ακτίνων και των επικλίσεων, υπολογίζεται η ταχύτητα μελέτης V_{des} και ο μέγιστος συντελεστής πλευρικής τριβής σε κάθε καμπύλη. Παρατηρείται πως οι Αμερικανικοί κανονισμοί AASHTO 2004 προβλέπουν χαμηλότερες ταχύτητες σχεδιασμού για τη δεδομένη γεωμετρία της κάθε καμπύλης. Χαρακτηριστικά για την Α που αποτελεί την πιο αυστηρή καμπύλη η διαφορά είναι σχεδόν 14 km/h, ενώ καθώς η ακτίνα του κυκλικού τόξου της καμπύλης μεγαλώνει η διαφορά μειώνεται και στην καμπύλη D φτάνει μόλις το 1 km/h. Υπολογίστηκαν ακόμα οι θεωρητικές λειτουργικές ταχύτητες που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη γεωμετρία ως προς τις ΟΜΟΕ-Χ (στήλη 7). Σημαντική απόκλιση παρουσιάζεται στην καμπύλη Β στην οποία οι οδηγοί στην πραγματικότητα οδηγούν πιο συντηρητικά.

ΚΑΜΠΥΛΗ	R [m]	f_R	e (%)	V_{des} [km/h]	V_{85} [km/h]	V_{85} ΟΜΟΕ – Χ [km/h]
A	60	0.21	4.6	44.5	58.3	-
B	113	0.18	4.4	56.3	64.2	71.5
C	178	0.15	4.7	67.5	69.7	69.4
D	594	0.11	3.1	101.9	103.0	96.4

Πίνακας 3: Γεωμετρικά στοιχεία, θεωρητικές και αναπτυσσόμενες ταχύτητες για τις καμπύλες Α, Β, C, D.

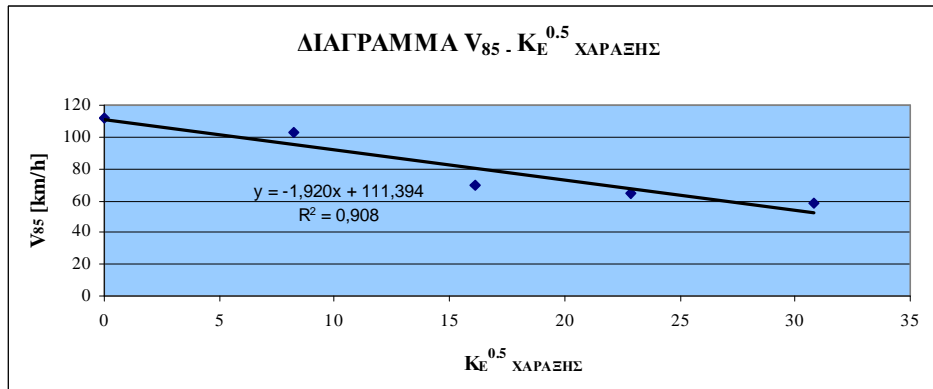
3.3. Συσχέτιση V_{85} με τη Γεωμετρία της Οδού

Όπως αναφέρουν οι Lamm και Smith [1994], οι λειτουργικές ταχύτητες διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, διότι εξαρτώνται από την οδηγητική συμπεριφορά του κάθε λαού. Άρα, δεν είναι ορθό να υιοθετηθούν μοντέλα πρόβλεψης V_{85} 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.

Σύμφωνα επίσης με παλαιότερες μελέτες, τα καλύτερα προγνωστικά μοντέλα ταχυτήτων στις καμπύλες βασίζονται στην καμπυλότητα της καμπύλης [Bird, R. N. and Hasmin, 2005]. Το παραπάνω συμπέρασμα υποδηλώνει ότι η κρίσιμότερη παράμετρος από την οποία εξαρτάται η ταχύτητα των οδηγών σε μια καμπύλη είναι η ελκτικότητα της. Παράμετροι εκτός από το μήκος της οριζόντιας καμπύλης και την γωνία αλλαγής κατεύθυνσης, όπως δηλαδή το μήκος ορατότητας, ο ρυθμός υπερύψωσης των οριογραμμών, ο συντελεστής πλευρικής τριβής και η κατάσταση οδοστρώματος εκφράζουν μεγαλύτερο ποσοστό της εξαρτημένης μεταβλητής [Lamm et al., 1999], αλλά απαιτούν τη γνώση των παραμέτρων αυτών. Αν και μερικά από τα παραπάνω δεδομένα είναι γνωστά και θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί πολλαπλή

παλινδρόμηση, εξ' αιτίας του περιορισμένου αριθμού καμπύλων που εξετάζονται εφαρμόζεται απλή παλινδρόμηση καθώς οποιαδήποτε προσπάθεια συσχετισμού της V_{85} με παραπάνω από μια παράμετρο θα ήταν παρακινδυνευμένη.

Ύστερα από την εξέταση αρκετών μορφών γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων, το καλύτερο προγνωστικό μοντέλο βρέθηκε εκείνο που συσχετίζει τη λειτουργική ταχύτητα με τη ρίζα της ελικτότητας (μη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ V_{85} και K_E) και το οποίο προκύπτει από πέντε συνολικά σημεία εκ των οποίων τα τέσσερα αντιστοιχούν στις καμπύλες και το πέμπτο στην τιμή της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην ευθυγραμμία (η ταχύτητα αυτή έχει ληφθεί από πρόσφατα δεδομένα επικαιροποίησης της λειτουργικής ταχύτητας στον Ελληνικό χώρο για τη δεδομένη κατηγορία οδού).



Σχήμα 4: Διάγραμμα παλινδρόμησης V_{85} με $K_E^{0.5}$ ΧΑΡΑΞΗΣ.

Η σχέση αυτή ανάγεται σε γραμμική αν υπολογιστούν οι τιμές $\sqrt{K_E}$ και προκύπτει:

$$V_{85} = 111.394 - 1.920 \cdot \sqrt{K_{E,X}} \quad \text{με } R^2 = 0.908 \quad (7)$$

Το παραπάνω προγνωστικό μοντέλο έχει:

- υψηλό συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Αναλυτικότερα προκύπτει ότι η συγκεκριμένη σχέση παλινδρόμησης εξηγεί το 90.8% της συνολικής μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής V_{85} .
- στατιστικά σημαντικούς συντελεστές παλινδρόμησης καθώς από την κατανομή t – Student προκύπτει $t > t_{4,95\%}$, δηλαδή ο σταθερός όρος και ο συντελεστής της μεταβλητής είναι διάφοροι του μηδενός
- λογικές τιμές και τα πρόσημα συντελεστών. Επίσης, αν συγκριθούν οι προβλέψεις του μοντέλου με τις πραγματικές τιμές που μετρήθηκαν, προκύπτουν σχετικά μικρές αποκλίσεις. Τέλος αναφέρεται ότι ο σταθερός όρος που εκφράζει τη λειτουργική ταχύτητα στην ευθυγραμμία έχει επίσης λογική τιμή.

3.4. Προσδιορισμός Τροχιάς Οχημάτων Μέσω της Ελικτότητάς τους

Στο στάδιο αυτό εφαρμόστηκε για τα οχήματα η μεθοδολογία προσδιορισμού της τροχιάς που αναπτύχθηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Έχοντας τις συντεταγμένες της προβολής του γεωμετρικού κέντρου του οχήματος στο επίπεδο της αναγωγής με τη βοήθεια του προβολικού μετασχηματισμού σε διαδοχικά σημεία μέσα στην καμπύλη, εφαρμόζονται οι σχέσεις (1), (2) και (3) και υπολογίζεται η ελικτότητα της τροχιάς κάθε οχήματος. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε στα οχήματα των καμπύλων B, C και D, ενώ στην καμπύλη A ακολουθήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση, διότι το οδόστρωμα προσεγγίστηκε με δυο επίπεδα αναγωγής λόγω της μεταβολής των επικλίσεων στην κλωθοειδή καμπύλη. Σε κάθε ένα από τα επίπεδα της αναγωγής η τροχιά του οδηγού θεωρήθηκε ως τμήμα κύκλου με

αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα (κατασκευή γωνιακού διαγράμματος για κάθε τροχιά, εφαρμογή γραμμικής παρεμβολής με υψηλό R^2 (>97%) και στατιστικά σημαντικός συντελεστής της μεταβλητής, ο αντίστροφος του οποίου αντιστοιχεί στην ακτίνα του κυκλικού τόξου που διαγράφει το όχημα.). Η ελικτότητα κάθε οχήματος της καμπύλης Α δίνεται από τη σχέση:

$$K_{Ei} = \frac{\frac{L_1}{R_1} + \frac{L_2}{R_2}}{L_1 + L_2} \cdot 63700 \quad (8),$$

όπου: K_{Ei} η ελικτότητα τροχιάς οχήματος σε [gon/km], L_1 και L_2 το μήκος κυκλικού τόξου 1 και 2 αντίστοιχα [m](τμήμα αναγωγής 1 και 2), R_1 και R_2 η ακτίνα κυκλικού τόξου 1 και 2 αντίστοιχα [m] (τμήμα αναγωγής 1 και 2).

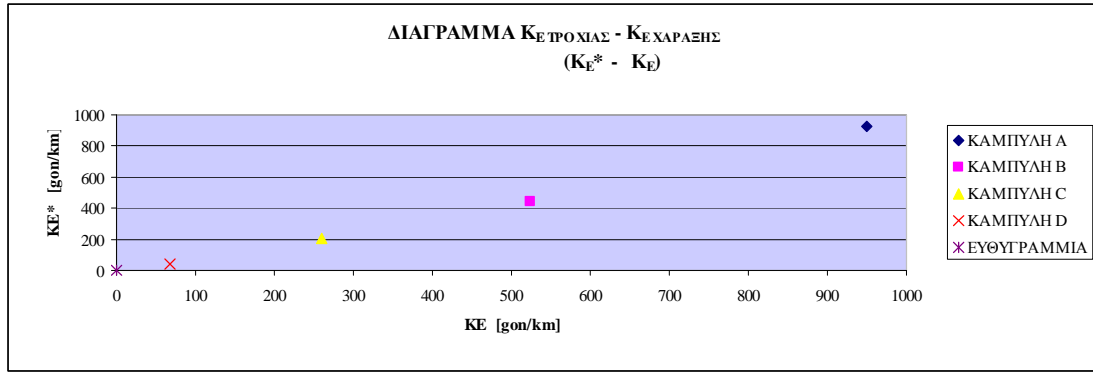
Ως αντιπροσωπευτική τιμή ελικτότητας της τροχιάς των οχημάτων στην καμπύλη αποτελεί ο μέσος όρος των ελικτοτήτων των οχημάτων σε κάθε καμπύλη, εφόσον οι τιμές τους δεν διαφέρουν ουσιαστικά από την εξωτερική στην εσωτερική λωρίδα κυκλοφορίας. Ο μέσος όρος αποδείχθηκε ότι εκφράζει την ελικτότητα που επιλέγει περίπου το 50% των οχημάτων κάθε καμπύλης. Από τη μέση πραγματική ελικτότητα υπολογίζεται η μέση ανηγμένη ακτίνα $R_{AN,T}$ των οχημάτων κάθε καμπύλης. Με την επιλογή της μέσης ελικτότητας των οχημάτων, σε σχέση με την ταχύτητα που επιλέγει το 85% των οδηγών, βελτιώνονται τα περιθώρια ασφαλείας όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια. Στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζεται η ελικτότητα σχεδιασμού και η μέση πραγματική ελικτότητα της τροχιάς των οχημάτων κάθε καμπύλης. Παρουσιάζονται επίσης οι ανηγμένες ακτίνες που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές ελικτότητας.

ΚΑΜΠΥΛΗ	$K_{E,ΧΑΡΑΞΗΣ}$ [gon/km]	$K_{E,ΤΡΟΧΙΑΣ}$ [gon/km]	$R_{AN,ΧΑΡΑΞΗΣ}$ [m]	$R_{AN,ΤΡΟΧΙΑΣ}$ [m]
A	950.76	923.71	67	69
B	524.43	439.27	121	145
C	259.36	205.94	246	309
D	67.65	40.60	942	1569

Πίνακας 4: Συγκριτικός Πίνακας ελικτότητας χάραξης $K_{E,X}$ και μέσης πραγματικής ελικτότητας τροχιάς οχημάτων $K_{E,T}$, ανηγμένης ακτίνας χάραξης $R_{AN,X}$ και μέσης πραγματικής ανηγμένης ακτίνας της τροχιάς οχημάτων $R_{AN,T}$.

Αναφέρεται ότι δεν βρέθηκε να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας και της ελικτότητας μεμονωμένου οχήματος καθώς το αντίστοιχο διάγραμμα των 400 περίπου οχημάτων δεν έδειχνε κάποια συγκεκριμένη τάση. Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνει την διαφορετική αντίληψη που δημιουργείται σε κάθε οδηγό για την καμπύλη στην οποία πλησιάζει. Σε ανάλογα συμπεράσματα έχουν καταλήξει και παλαιότερες έρευνες των Glenon και Weaver [1971]. Η αντίληψη αυτή, σύμφωνα με τους ερευνητές, πιθανόν εξαρτάται από τα προσωπικά του χαρακτηριστικά στην εκπαίδευση και την εμπειρία που διαθέτει στην οδήγηση, καθώς και από ψυχολογικούς παράγοντες. Αναζητήθηκε ακόμα σχέση μεταξύ των παραμέτρων V_{85} και $K_{E,T}$ και προέκυψε σχέση αντίστοιχης μορφής με της ελικτότητας της χάραξης με διαφορά στον σταθερό όρο ο οποίος ήταν κατά 3 km/h περίπου μεγαλύτερος.

Τέλος, διερευνήθηκε αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέσης πραγματικής ελικτότητας της τροχιάς των οχημάτων με την ελικτότητα σχεδιασμού για οδούς αυτής της κατηγορίας. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την τάση της επιλογής της μέσης τροχιάς των οχημάτων κάθε καμπύλης σε σχέση με την ελικτότητα της χάραξης.



Σχήμα 5: Διάγραμμα συσχέτισης ελικτότητας χάραξης $K_{E,X}$ με την μέση πραγματική ελικτότητα τροχιάς οχημάτων $K_{E,T}$.

Η εξίσωση παλινδρόμησης που προκύπτει είναι γραμμική, της μορφής:

$$K_{E \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = 0.931 \cdot K_{E,X} \quad \text{με } R^2 = 0.990 \quad (9)$$

Η στατιστική ανάλυση δείχνει ότι η εξίσωση παλινδρόμησης έχει υψηλό συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και στατιστικά σημαντικό τον συντελεστή της μεταβλητής. Για πιο αξιόπιστη συσχέτιση όμως απαιτείται δείγμα από περισσότερες καμπύλες. Επισημαίνεται ότι αν για το διάγραμμα συσχέτισης ελικτότητας χάραξης με τη μέση ελικτότητα τροχιάς οχημάτων χρησιμοποιηθούν όλα τα υπό μελέτη οχήματα τότε η εξίσωση παλινδρόμησης που προκύπτει δεν διαφέρει σημαντικά.

Η αντίστοιχη έκφραση της παραπάνω σχέσης σύμφωνα με τη μέση πραγματική ανηγμένη ακτίνα είναι:

$$R_{AN \text{ ΜΕΣΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ}} = \frac{1}{0.931} \cdot R_{AN,X} \quad (10)$$

Η τιμή που προβλέπει το μοντέλο για την κρίσιμη καμπύλη A παρουσιάζει μικρή διαφορά από την πραγματική τιμή, ενώ για την καμπύλη D η διαφορά είναι μεγάλη χωρίς όμως αυτό να αποτελεί κρίσιμη περίπτωση καθώς η κίνηση είναι σχεδόν ευθύγραμμη.

3.5. Επιπτώσεις στο Γεωμετρικό Σχεδιασμό

Ως προς την δυναμική της κίνησης του οχήματος εφαρμόστηκε το απλοποιημένο μοντέλο της εγκάρσιας ευστάθειας σύμφωνα με το οποίο το όχημα προσομοιώνεται με υλικό σημείο και όλες οι δυνάμεις ασκούνται στην προβολή του κέντρου μάζας στο οδόστρωμα. 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. [Ψαριανός, 2001] και [Ψαριανός, 2005 - 2006]. Από την ισορροπία αυτή, υπολογίζεται και η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα ώστε να μην ολισθήσει το όχημα προς το εσωτερικό της καμπύλης, από την σχέση:

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 \cdot (f_{R,\text{perm}} + e_{\max})} \quad (11),$$

όπου η ταχύτητα V του οχήματος εκφράζεται σε [km/h] και η ελάχιστη οριζόντια ακτίνα R_{\min} σε [m]. Ως $f_{R,\text{perm}}$ ορίζεται ο επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας πρόσφυσης και ως e_{\max} η μέγιστη επίκλιση (%/100).

Όταν η σχέση εφαρμόζεται σε υφισταμένες καμπύλες υπολογίζεται ο αναπτυσσόμενος – απαιτούμενος συντελεστής πλευρικής τριβής από τη σχέση:

$$f_{RA} = \frac{V^2}{127 \cdot R} - e \quad (12)$$

Αποδείχθηκε πως η σχέση μένει προσεγγιστικά η ίδια είτε η ακτίνα αναφέρεται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων είτε στο σύστημα συντεταγμένων της αναγωγής για επικλίσεις <10%.

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. Σε αντίθεση με προηγούμενες έρευνες [Glenon and Weaver, 1971] όπου ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής υπολογιζόταν για κάθε ένα όχημα της καμπύλης και μάλιστα στο σημείο όπου εμφανιζόταν η μικρότερη στιγμιαία ακτίνα, στη συγκεκριμένη εφαρμογή υπολογίζεται σύμφωνα με τη V_{85} και τη μέση πραγματική ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς των οχημάτων κάθε καμπύλης. Επιλέγεται αυτή η τακτική διότι στα πλαίσια του γεωμετρικού σχεδιασμού είναι προτιμότερη η εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας στατιστικά δεδομένα από συγκεκριμένο ποσοστό του δείγματος οχημάτων κάθε καμπύλης.

Τα περιθώρια ασφαλείας κατά την κίνηση των οχημάτων στις καμπύλες διερευνώνται ως προς τους Γερμανικούς, τους Ελληνικούς και Αμερικάνικους Κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα διερευνάται αν ο διατιθέμενος από τους Κανονισμούς συντελεστής πλευρικής τριβής είναι μεγαλύτερος από τον αναπτυσσόμενο- απαιτούμενο.

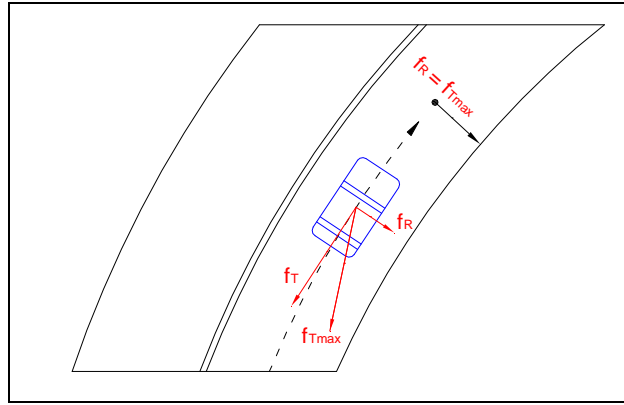
- Γερμανικοί και Ελληνικοί Κανονισμοί

Σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς 2008 [Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, 2008], ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής (f_{Tmax}) που επιτρέπεται να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς προκύπτει από σχετικό πίνακα, σύμφωνα με την ταχύτητα που αναπτύσσεται στην καμπύλη. Για τον συντελεστή πλευρικής τριβής προβλέπονται περιθώρια ασφαλείας, διότι έχει αποδειχθεί ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό οδηγών κινείται στις καμπύλες με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα μελέτης ακόμα και σε υγρό οδόστρωμα. Επισημαίνεται ότι εκτός από την ταχύτητα, διαφορετική από την θεωρητική είναι και η τροχιά του οχήματος. Κατά συνέπεια, ορίζεται ο συντελεστής εκμετάλλευσης n της τιμής του συντελεστή εγκάρσιας τριβής. Η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου συντελεστή εφαπτομενικής 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:

$$f_R = 0.925 \cdot n \cdot f_{Tmax} \quad (13)$$

Χωρίς την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής θα μπορούσε 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 (Σχήμα 6).

Οι συνηθέστερες τιμές του n είναι 50%, 60% και 70%, ανάλογα με τη κατηγορία της οδού και τις ταχύτητες που αναπτύσσονται. Ο διατιθέμενος συντελεστής τριβής στην καμπύλη για τις παραπάνω τιμές n προκύπτει 89%, 83% και 76% αντίστοιχα του μέγιστου διατιθέμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής στα ευθύγραμμα τμήματα.



Σχήμα 6: Συντελεστές τριβής σε καμπύλη.

Στη συνέχεια είναι δυνατός ο υπολογισμός του διατιθέμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στην καμπύλη. Σύμφωνα με το Σχήμα 6 ισχύει η σχέση:

$$f_T = +\sqrt{f_{Tmax}^2 - f_R^2} = +\sqrt{f_{Tmax}^2 - (0.925 \cdot n \cdot f_{Tmax})^2} \quad (14)$$

Τα αποτελέσματα για τους Γερμανικούς Κανονισμούς, 2008 συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

ΚΑΜΠΥΛΗ	V ₈₅ [km/h]	f _{Tmax}	n*	f _R	f _{RA}	f _R -f _{RA}	f _T = (%) f _{Tmax}
A	58.3	0.36	1	0.34	0.34	0.00	38
B	64.2	0.35	0.6	0.20	0.18	0.02	83
C	69.7	0.34	0.5	0.16	0.08	0.08	89
D	103.0	0.29	0.4	0.11	0.02	0.09	93

Πίνακας 5: Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής και ποσοστού διατιθέμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής για τροχοπέδηση στις καμπύλες ως προς το μέγιστο συντελεστή εφαπτομενικής τριβής σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, 2008.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι για τις καμπύλες B, C και D, η πρόσφυση είναι επαρκής για το μεγαλύτερο ποσοστό των οχημάτων της καμπύλης ενώ για την καμπύλη A τα περιθώρια ασφαλείας είναι μειωμένα τουλάχιστον σε υγρό οδόστρωμα καθώς το ποσοστό του μέγιστου διατιθέμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής που απομένει για ελιγμούς πέδησης είναι μόλις 38%. Επισημαίνεται ότι οι Κανονισμοί προβλέπουν περιθώρια ασφαλείας και μετά την εξάντληση του ολικού συντελεστή τριβής.

Οι Ελληνικές Οδηγίες ΟΜΟΕ-X [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 εφαπτομενικής 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. Όπως αναγράφεται και στις ΟΜΟΕ-X (παράγραφος 5.2.2), η σχέση μεταξύ του επιτρεπόμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής του οδοστρώματος και της ταχύτητας για την Ελλάδα προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα σύγχρονα δεδομένα σχετικά με την δυναμική της κίνησης των οχημάτων όσο και δεδομένα κανονισμών άλλων χωρών εφαρμόζοντας σύνθετες μεθόδους ανάλυσης. Στην εξίσωση, εκτός από τη βασική παράμετρος που είναι η ασφάλεια, λήφθηκαν υπόψη η οικονομικότητα στις κατασκευές καθώς και περιβαλλοντικά δεδομένα.

Σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ–X λοιπόν, ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφραπτομενικής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$f_{T_{\max}} = 0.59 - 4.85 \cdot \left(\frac{V}{1000} \right) + 1.51 \cdot \left(\frac{V^2}{100000} \right) \quad (15)$$

Η σχέση (15) έχει ελεγχθεί ως προς τα αποτελέσματα της και τον βαθμό σύμπτωσης τους με υπάρχοντα δεδομένα με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως οι τιμές των συντελεστών τριβής που λαμβάνονται από τη σχέση αυτή πρέπει να εξασφαλίζονται πάντοτε όσον αναφορά την ασφάλεια της κυκλοφορίας των οχημάτων, είτε πρόκειται για νέα κατασκευή, για ανακατασκευή ή για βελτίωση μιας οδού.

Γενικά, με δεδομένο ότι παγκοσμίως οι διατιθέμενοι συντελεστές τριβής με βάση τους εκάστοτε ισχύοντες κανονισμούς έχουν ενσωματώσει στις τιμές τους συγκεκριμένα επίπεδα οδικής ασφαλείας, η μη τήρησή τους επιφέρει αντίστοιχα την μείωση των αποδεκτών επιπέδων ασφαλείας που προκύπτει από τον σχεδιασμό των οδών. Επειδή στην Ελλάδα οι συμβατικές τιμές των συντελεστών τριβής κατά ΟΜΟΕ είναι ούτως ή άλλως υπερτιμημένοι σε σχέση με τις πραγματικές τιμές, η μη τήρηση των αποδεκτών επιπέδων ασφαλείας σχεδιασμού καμπύλων κατά ΟΜΟΕ ουσιαστικά προσεγγίζει τα πραγματικά επίπεδα ασφαλείας των ελληνικών οδών με βάση τον πραγματικό συντελεστή τριβής, που είναι από την άποψη του σχεδιασμού κατά κανόνα μη αποδεκτός. Ως εκ τούτου η μη τήρηση των συντελεστών τριβής σχεδιασμού με βάση τους ΟΜΟΕ αποτελεί στοιχείο και κριτήριο για αυξημένη επικινδυνότητα της οδού. Το αντίθετο δεν μπορεί να ισχύει πάντοτε.

Ο αναπτυσσόμενος συντελεστής πλευρικής τριβής από τη σχέση (12), όπου V είναι η λειτουργική ταχύτητα κάθε καμπύλης [km/h], e η μέση επίκλιση της καμπύλης (%100) και R η μέση ανηγμένη ακτίνα της τροχιάς που ακολουθούν τα οχήματα στην καμπύλη σε [m]. 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. Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα ως προς τους Ελληνικούς Κανονισμούς.

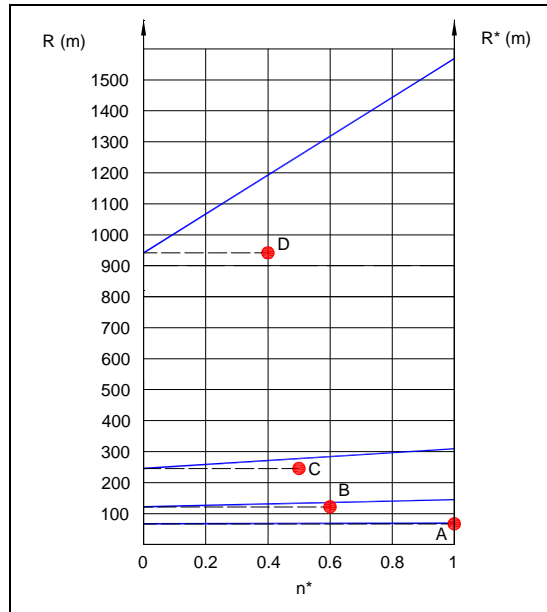
ΚΑΜΠΥΛΗ	V_{85} [km/h]	$f_{T_{\max}}$	n^*	f_R	f_{RA}	$f_R - f_{RA}$
A	58.3	0.36	1	0.34	0.34	0.00
B	64.2	0.34	0.6	0.19	0.18	0.01
C	69.7	0.33	0.5	0.15	0.08	0.07
D	103.0	0.25	0.4	0.09	0.02	0.07

Πίνακας 6: Αποτελέσματα διατιθέμενων και αναπτυσσόμενων συντελεστών τριβής σύμφωνα με τους Ελληνικούς Κανονισμούς, ΟΜΟΕ–X - 2001.

Παρατηρείται ότι και για τις δυο 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 Α. 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 επαφτομενικής τριβής κατά την εγκάρσια διεύθυνση σε σχέση με τις άλλες καμπύλες.

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



Σχήμα 7: Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης n^* .

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η αντιστοιχία από την ανηγμένη ακτίνα σχεδιασμού R στην μέση πραγματική ανηγμένη ακτίνα των οχημάτων κάθε καμπύλης R^* και στην τιμή n^* που αντιστοιχεί ο συντελεστής εκμετάλλευσης για την R^* . Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για τις καμπύλες Α και Β αν είχε χρησιμοποιηθεί η ανηγμένη ακτίνα σχεδιασμού τότε το n θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή.

Συνοπτικά λοιπόν οι Ελληνικοί και Γερμανικοί Κανονισμοί ενώ για τις τρεις καμπύλες μαθηματικά αποδεικνύεται ότι οι Κανονισμοί υπερσχεδιάζουν, στην καμπύλη Α δεν ισχύει κάτι τέτοιο.

- Αμερικανικοί Κανονισμοί

Για τους Αμερικανικούς Κανονισμούς η φιλοσοφία της μέγιστης θεωρητικής τιμής του συντελεστή πλευρικής τριβής f_{Rmax} 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] (Πράσινο Βιβλίο-Green Book) χαρακτηριστικά αναφέρουν ότι οι συντελεστές σχεδιασμού πλευρικής τριβής f_{Rdes} είναι συντηρητικά χαμηλότεροι από το σημείο, όπου οι περισσότεροι οδηγοί αρχίζουν να αισθάνονται δυσφορία. Σύμφωνα πάλι με το Πράσινο Βιβλίο γενικά ισχύει πως όσο η ταχύτητα μειώνεται τόσο οι οδηγοί είναι πιο ανεκτικοί και η f_{Rdes} αυξάνει. 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.

Οι παραπάνω ερευνητές ποσοτικοποιούν τον κίνδυνο σε μια καμπύλη σύμφωνα με τον αναπτυσσόμενο συντελεστή πλευρικής τριβής (f_{RA}). 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 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 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:

$$\text{risk accepted: } f_{C,85} - f_{C,Des} = \left(\frac{V_{C,85}^2}{127 \cdot R} - \frac{e}{100} \right) \cdot f_{C,Des} \quad (16),$$

όπου: $f_{C,Des}$ το κατώφλι πλευρικής τριβής Κανονισμών για V_{85} στην καμπύλη [g] και $V_{C,85}$ η V_{85} στην καμπύλη [g].

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

Ο Glenon [2006] προτείνει το διαχωρισμό της επικινδυνότητας μιας καμπύλης σύμφωνα με την απαιτούμενη πλευρική τριβή για την ταχύτητα της καμπύλης. Για τον ερευνητή, 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 διαφορικά επίπεδα πλευρικής τριβής για κάθε εύρος.

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 επιλεχθέντων καμπύλων. Ακολούθως, 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. Ως ακτίνα για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης τριβής, επιλέγεται η μέση ανηγμένη ακτίνα των οχημάτων κάθε καμπύλης.

Σύμφωνα με την εφαρμογή της συγκεκριμένης έρευνας, το σημαντικότερο πρόβλημα αντιμετωπίζεται πάλι στην καμπύλη A, όπου προκύπτει ότι χρειάζεται ανακατασκευή (τιμή risk accepted: 0.17). Για την καμπύλη B, αρκεί μια προειδοποιητική πινακίδα επικίνδυνης στροφής χωρίς συμπληρωματική πινακίδα αναγραφής του ορίου ταχύτητας (τιμή risk accepted: 0.02)., ενώ οι καμπύλες C και D παρουσιάζουν απαιτούμενη τριβή μικρότερη των Κανονισμών, οπότε, θεωρητικά τουλάχιστον, η πρόσφυσή τους είναι επαρκής.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η καμπύλη A γενικά παρουσίασε σημαντικό ποσοστό υπέρβασης της ελκτότητας σχεδιασμού κατά 20% στην αριστερόστροφη κίνηση και κατά το διπλάσιο ποσοστό περίπου κατά τη δεξιόστροφη κίνηση. Πρακτικά αυτό επιβεβαιώνει την

επικινδυνότητα της καμπύλης διότι το ποσοστό αυτό των οδηγών πιθανώς υποτίμησε την καμπυλότητα και διόρθωσε το λάθος “κλείνοντας την καμπύλη” και διαγράφοντας ουσιαστικά μικρότερη ακτίνα από εκείνη του σχεδιασμού. Σε ανάλογο συμπέρασμα είχαν καταλήξει και οι Glenon - Weaver [1971] και οι Garcia - Diaz [2000] οι οποίοι εξέταζαν τη δυσμενέστερη στιγμιαία ακτίνα των οδηγών και όχι συνολικά την τροχιά τους όπως μελετάται στην παρούσα έρευνα.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της παρούσας μεθοδολογίας.

- Η ακρίβεια αναγωγής μεταδίδει αποδεκτό σφάλμα στον υπολογισμό της ελικτότητας του οχήματος. Το σφάλμα αντιστοιχεί σε σφάλμα ταχύτητας $< \pm 3 \text{ km/h}$ για τις καμπύλες A, B και C.
- Επιθυμητή ακρίβεια αναγωγής $\leq 10 \text{ cm}$. Περιθώρια βελτίωσης κυρίως για τη D καμπύλη με χρήση βιντεοκάμερας υψηλότερης ανάλυσης.
- Η αναγωγή “ενσωματώνει” τα γραμμικά σφάλματα. Εναπομένουν τα μη γραμμικά σφάλματα (ακτινική διαστροφή φακού).
- Ευνοείται η χρήση βιντεοκάμερας (μη μετρητική μηχανή) καθώς στην αναγωγή δεν είναι απαραίτητη η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού.
- Οι ταχύτητες των οχημάτων ακολουθούν την κανονική κατανομή. [Kanellaidis et al., 1990].
- Όπως και σε προηγούμενες μελέτες, δε βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ V και καμπυλότητας μεμονωμένου οχήματος [Glenon and Weaver, 1971].
- Βρέθηκε μοντέλο πρόβλεψης της V_{85} σε σχέση με την $K_{E,X}$. Απαραίτητη η χρήση δεδομένων από παραπάνω καμπύλες.
- Έγινε παραδοχή τροχιάς οχήματος ως τμήμα κύκλου. Δεν εφαρμόστηκαν πολυώνυμα 3ου βαθμού (splines) όπως στην έρευνα του Spacek [2000]. Απόδειξη παραδοχής.
- Διαφορετική προσέγγιση επάρκειας διατιθέμενης πλευρικής τριβής σε σχέση με την αναπτυσσόμενη. Δεν εξετάστηκε ένα προς ένα όχημα. Επιλογή V_{85} και $R_{AN,T}$.
- Μειωμένα περιθώρια ασφαλείας για την καμπύλη A σύμφωνα με τους Κανονισμούς.
- Επαρκής πρόσφυση για τις καμπύλες B, C και D, σύμφωνα με τους Ελληνικούς και Γερμανικούς Κανονισμούς.
- Δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για συχνότητα ατυχημάτων, λόγω περιορισμένου αριθμού δείγματος. Υπόδειξη πιθανά επικίνδυνων καμπύλων.
- Βρέθηκε μοντέλο πρόβλεψης της $K_{E,T}$ σε σχέση με την $K_{E,X}$. Απαραίτητη η χρήση δεδομένων από παραπάνω καμπύλες. Επιρροή οδηγητικής συμπεριφοράς και από άλλους παράγοντες.
- Δεν μπορούν να γίνουν ασφαλείς συστάσεις στους Κανονισμούς για μείωση στις ακτίνες οριζόντιων καμπύλων. Για τις B, C και D οι Κανονισμοί μαθηματικά υπερσχεδιάζουν.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Βρέθηκε απλή και ακριβής μεθοδολογία προσδιορισμού τροχιάς οχήματος μέσω της ελικτότητάς του εφορμόζοντας επίγεια μονοεικονική φωτογραμμετρία.
- Εφαρμογή μεθόδου σε τέσσερις καμπύλες διαφορετικών ελικτοτήτων.
- Η οδηγητική συμπεριφορά μελετήθηκε και ως προς την ταχύτητα και ως προς την τροχιά των οχημάτων στην καμπύλη.

- Στατιστική Επεξεργασία δείγματος οχημάτων και εκτίμηση επιπτώσεων στον γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών.

Για την βελτίωση των αποτελεσμάτων προτείνεται:

- Χρήση βιντεοκάμερας με μεγαλύτερη ανάλυση και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Καλύτερη στόχευση των πιο απομακρυσμένων φωτοσταθερών με βιντεοκάμερα μεγαλύτερου c και αρνητικού.
- Αυτοματοποίηση διαδικασίας εξαγωγής τροχιάς οχημάτων. Πιθανότητα όμως χειρότερου αποτελέσματος.
- Άμεση μέτρηση ταχύτητας οχήματος (φορητοί ραδιονετοπιστές).
- Διερεύνηση πραγματικής καμπυλότητας οχημάτων σε περισσότερες καμπύλες και σε περισσότερα οχήματα ώστε να μπορούν να διατυπωθούν στοιχεία σχετικά με την εμφάνιση ατυχημάτων.
- Διερεύνηση τροχιάς σε περισσότερες διατομές - πριν και μετά την καμπύλη.
- Απόκλιση της τροχιάς από την εσωτερική ή εξωτερική οριογραμμή
- Εργαστηριακά πειράματα με εξομοιωτές για κατανόηση της οδηγητικής συμπεριφοράς [Benedetto, 2008].
- Τέλος, προτείνεται να ερευνηθεί η ακρίβεια στις συντεταγμένες του χώρου που θα έδινε η χρήση μιας δευτέρας κάμερας με επικαλυπτόμενό τμήμα με τη πρώτη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. 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.
2. Benedetto, A.. Older Drivers and Safety: A Roadway Study Using Driving Simulator, *Advances in Transportation Studies*, Section A 16, 2008, pp.29-42.
3. Bird, R. N. and Hasmin, I. H., Operating Speed and Geometry Relationships for Rural Single Carriageways in the UK, *Transportation Research Board*, Washington, USA, June 29-July 1 2005.
4. Brinkman C. P. and Smith S. A., Two Lane Rural Highway Safety, *Public Roads*, Vol.48, No.2, Sept. 1984, pp.48-53.
5. Γεωργόπουλος, Α., Φωτογραμμετρία Ι – Διαφάνειες Διαλέξεων, Ε.Μ.Π. – Σ.ΑΤ.Μ., Αθήνα, 2005-2006.
6. García, A. and Díaz, M. E.. Automatic Data Extraction of Vehicle Trajectory by Digital Image Processing for Analyzing Behaviour – Experimental Results, *Proceedings 2^ο International Symposium on Highway Geometry Design*, Road and Transportation Research Association, Mainz, June 14-17, 2000.
7. Glenon, J. C. and Weaver, G. D., The Relationship of Vehicle Paths to Highway Curve Design, Technical Report 134-5. Texas Transportation Insitute, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 1971.
8. Glenon, J. C., Thoughts on a New Approach for Signing Roadway Curves, Jan.2003, PaperID=18. Accessed Dec.7, 2006.

9. Goyat, A., Riouall, A., Château, T., Malaterre, I., Trassoudaine, L. Trajectory measurements of vehicles: a new observatory, *Advances in Transportation Studies*, Section A 18, 2009, pp.5-16.
10. Highway Capacity Manual, *Transportation Research Board*, third edition, Special Report n° 209, National Research council, Washington D.C., 1994.
11. Kanellaidis et al. Driver's Speed Behaviour on Rural Road Curves. *Traffic Engineering and Control*, vol 31, n.7/8, 1990, pp.414-415.
12. 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.
13. 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 , Linkoeeping, Sweden, Gothenburg, Sweden 18 -20 Sept 1991, VTIrapport 372A, Part 1, 1991, pp.121-136.
14. Lamm, R. and Smith, B. L., Curvilinear Alinement : an Important Issue for More Consistent and Safer Road Characteristics, *In Transportation Research Record: Jurnal of the Transportation Research Board*, No. 1445, Transportation Research Board of the national Academies, Washington, D.C., 1994, pp. 12-21
15. Lamm, R., Psarianos, B. and Mainlaender, T., *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*, McGraw – Hill, New York,. 1999.
16. Μπαλοδήμου – Αγατζά, Α.Μ., Θεωρία Σφαλμάτων & Συνορθώσεις Ι, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ, Αθήνα 2005.
17. Pratt, M. P. and Bonneson J. A.. Assessing Curve Severity and Design Consistency Using Energy – and Friction – Based Measures. *In Transportation Research Record: Jurnal of the Transportation Research Board*, No. 2075, Transportation Research Board of the national Academies, Washington, D.C., 2008, pp. 8-15.
18. Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, Forschungsgesellschaft für Strassen – und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Strassenentwurf, 2008.
19. Robertson, H. D., *Manual of Transportation Engineering Studies*, 4th edition, Washington D.C., 1994.
20. Spacek, P.. Track Behavior and Accident Occurrence in Curves on Two – Lane Highways in Rural Areas, *Proceedings 2^ο International Symposium on Highway Geometry Design*, Road and Transportation Research Association, Mainz, June 14-17, 2000.
21. Ψαριανός, Β., Υπολογισμοί Στοιχείων Εφαρμογής Χάραξης, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 1999.
22. Ψαριανός, Β., Σημειώσεις Οδοποιίας Ι – Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών, Ε.Μ.Π – Σ.Α.Τ.Μ., Αθήνα 2001.
23. Ψαριανός, Β., Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών - Διαφάνειες Διαλέξεων, Ε.Μ.Π. – Σ.Α.Τ.Μ, Αθήνα, 2005-2006.
24. http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/index_en.htm