



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση Οδηγικής Συμπεριφοράς σε Λωρίδες Επιβράδυνσης
Ανισόπεδων Κόμβων.**

ΛΑΜΠΡΟΣ ΚΩΣΤΑΡΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΕΡΓΙΟΣ ΜΑΥΡΟΜΑΤΗΣ,

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτής της πορείας, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη σε όλους όσους με στήριξαν σε κάθε στάδιο αυτής της προσπάθειας.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Στέργιο Μαυρομάτη, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και τη διαρκή του παρουσία σε όλη τη διάρκεια της εργασίας. Με τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την άριστη συνεργασία μας, κατάφερε να μετατρέψει κάθε δυσκολία σε ευκαιρία για μάθηση και εξέλιξη. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Βασίλειο Ματράγκο, Υποψήφιο Διδάκτορα, για τη πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές του στο κομμάτι της στατιστικής ανάλυσης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη συλλογή των δεδομένων και στην υλοποίηση των μετρήσεων στο πεδίο. Η συνεργασία, η υπομονή και η καλή διάθεση των συμμετεχόντων αποτέλεσαν σημαντικό κομμάτι της επιτυχίας της έρευνας αυτής.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετά την οδηγική συμπεριφορά στις λωρίδες επιβράδυνσης ανισόπεδων κόμβων (ΑΚ), με στόχο την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την ταχύτητα και την επιλογή απόστασης εισόδου στη λωρίδα. Η έρευνα βασίστηκε σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε δύο ΑΚ στην Αττική, μέσω του οργάνου Vericom VC4000DAQ, το οποίο κατέγραψε με υψηλή ακρίβεια τη μεταβολή ταχύτητας, απόστασης και επιβράδυνσης των οχημάτων.

Συμπληρωματικά, μέσω ερωτηματολογίου καταγράφηκαν δημογραφικά και εμπειρικά χαρακτηριστικά των συμμετεχόντων (ηλικία, φύλο, εμπειρία, συνήθειες οδήγησης). Το δείγμα της έρευνας συγκροτήθηκε από οδηγούς που συμμετείχαν εθελοντικά και οδήγησαν υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, χωρίς να γνωρίζουν εκ των προτέρων τον σκοπό της μελέτης, ώστε να διασφαλιστεί η αμεροληψία της συμπεριφοράς τους.

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν αντίστοιχα διαγράμματα, μέσω των οποίων καταγράφηκαν οι βασικές στρατηγικές επιβράδυνσης και αναδείχθηκαν τόσο κοινά πρότυπα όσο και επιμέρους διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των οδηγών. Η ανάλυση των προφίλ ταχύτητας και επιβράδυνσης ανέδειξε χαρακτηριστικά μοτίβα συμπεριφοράς, με διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο κόμβων ως προς το σημείο έναρξης της επιβράδυνσης και τον ρυθμό μείωσης της ταχύτητας. Τα ευρήματα του κεφαλαίου αυτού αποτέλεσαν τη βάση για την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων.

Τέλος, αναπτύχθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης με σκοπό την πρόβλεψη της ταχύτητας και της επιτάχυνσης ενός οχήματος σε κρίσιμα σημεία ή τμήματα της οδού. Τα μοντέλα παρουσίασαν ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία, επιβεβαιώνοντας ότι είναι εφικτή η εκτίμηση κρίσιμων μεγεθών της οδηγικής συμπεριφοράς με βάση δεδομένα τα οποία δύνανται να προκύψουν από σχετικές μετρήσεις.

Η εργασία συμβάλλει στην πληρέστερη κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς των οδηγών κατά την κίνησή τους σε λωρίδες επιβράδυνσης ανισόπεδων κόμβων και παρέχει χρήσιμα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας.

Abstract

This thesis investigates driver behavior on freeway deceleration lanes, aiming to understand the factors that influence vehicle speed and the selection of the entry distance along the lane. The research was based on real field measurements conducted at two interchanges in Athens, using the Vericom VC4000DAQ device, which recorded with high accuracy the variations in vehicle speed, distance, and deceleration.

In addition, a questionnaire was used to collect demographic and experiential information about the participants (such as age, gender, driving experience, and driving habits). The sample consisted of volunteer drivers who drove under normal traffic conditions, without being informed in advance about the specific objectives of the study, ensuring the impartiality and authenticity of their driving behavior.

Data analysis produced representative average diagrams through which the main deceleration strategies were identified, highlighting both common behavioral patterns and individual variations among drivers. The analysis revealed general deceleration profiles, variations between interchange types, and the relationship between speed changes and lane geometry. The findings of this stage formed the basis for the development of statistical models.

Finally, regression models were developed to predict vehicle speed and acceleration at critical points or segments of the roadway. These models demonstrated satisfactory accuracy and reliability, confirming that key aspects of driver behavior can be effectively estimated using simple and readily available data.

Overall, this study contributes to a deeper understanding of real-world driver behavior on freeway deceleration lanes and provides useful tools for optimizing interchange design and enhancing road safety.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
1 Εισαγωγή	9
1.1 Αντικείμενο.....	9
1.2 Δομή της εργασίας.....	10
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Οδηγική συμπεριφορά σε λωρίδες επιβράδυνσης	13
2.3 Μετρήσεις πεδίου και τεχνολογίες συλλογής δεδομένων	15
2.4 Στατιστικά μοντέλα και παλινδρόμηση	17
2.5 Ερευνητικά κενά και κατευθύνσεις	19
2.6 Συμπεράσματα	20
3 Μεθοδολογία	21
3.1 Περιοχή μελέτης.....	21
3.2 Εξοπλισμός	25
3.3 Ερωτηματολόγιο	27
3.4 Διαδικασία μετρήσεων.....	30
3.5 Επεξεργασία δεδομένων	31
4 Ανάλυση δεδομένων	32
4.1 Επεξεργασία και συσχέτιση μετρήσεων	32
4.2 Ανάλυση Προφίλ Ταχύτητας	35
4.2.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης.....	36
4.2.2 Κόμβος Αγίου Στεφάνου	37
4.3 Ανάλυση Προφίλ Επιτάχυνσης.....	38
4.3.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης.....	38
4.3.2 Κόμβος Αγίου Στεφάνου	39
4.4 Συμπληρωματικά διαγράμματα	41
4.6 Συγκεντρωτικά διαγράμματα	44

4.6.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης.....	44
4.6.2 Κόμβος Αγίου Στέφανου	45
4.7 Απόσταση και ταχύτητα εξόδου	47
4.7.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης.....	48
4.7.2 Κόμβος Αγίου Στέφανου	50
4.8 Συνολική εικόνα	53
5 Στατιστική ανάλυση	55
5.1 Εισαγωγή.....	55
5.2 Μεταβλητές Μοντέλου	55
5.2.1 Εξαρτημένες Μεταβλητές.....	55
5.2.2 Ανεξάρτητες Μεταβλητές	56
5.3 Στατιστική Μεθοδολογία	58
5.3.1 Μοντέλο για τη πρόβλεψη ταχύτητας σημείου αιχμής.....	58
5.3.2 Μοντέλο για τη πρόβλεψη μέσης επιβράδυνσης	69
5.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	77
6 Συμπεράσματα.....	80
6.1 Συνοπτικά αποτελέσματα	80
6.2 Ερμηνεία και πρακτικές συνέπειες	81
6.3 Προτάσεις βελτίωσης.....	82
6.4 Μελλοντική έρευνα.....	83
Βιβλιογραφία	85

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1 Πληθυσμιακή κατανομή φύλου οδηγών	28
Πίνακας 2 Αντιπροσωπευτικά στοιχεία οδηγών	30
Πίνακας 3 Ενδεικτικό Αποτέλεσμα Μέτρησης	33
Πίνακας 4 Συντεταγμένες σημείου αρχής.....	34
Πίνακας 5 Συντεταγμένες σημείου αιχμής.....	34
Πίνακας 6 Συντεταγμένες σημείου αρχής καμπύλης.....	34
Πίνακας 7 Συντεταγμένες σημείου πέρατος καμπύλης.....	35
Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Μετρήσεων προς Στατιστική Ανάλυση(Μοντέλο Υπολογισμού Ταχύτητας Σημείου Αιχμής)	60
Πίνακας 9 Τιμές VIF μοντέλου ταχύτητας σημείου αιχμής	63

Πίνακας 10 Στατιστικά Παλινδρόμησης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής	63
Πίνακας 11 Ανάλυση Διακύμανσης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής	63
Πίνακας 12 Συντελεστές Μεταβλητών Παλινδρόμησης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής	64
Πίνακας 13 Συντελεστές Μεταβλητών (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής)	64
Πίνακας 14 Ελαστικότητα Μεταβλητών (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής) ...	65
Πίνακας 15 Σύγκριση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών ταχύτητας σημείου αιχμής (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής)	68
Πίνακας 16 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Μετρήσεων προς Στατιστική Ανάλυση (Μοντέλο Υπολογισμού Μέσης Επιβράδυνσης)	71
Πίνακας 17 Τιμές VIF μοντέλου μέσης επιβράδυνσης.....	72
Πίνακας 18 Στατιστικά Παλινδρόμησης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης.....	73
Πίνακας 19 Ανάλυση Διακύμανσης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης	73
Πίνακας 20 Συντελεστές Μεταβλητών Παλινδρόμησης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης ...	73
Πίνακας 21 Μεταβλητές Συντελεστών Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης.....	73
Πίνακας 22 Ελαστικότητα Μεταβλητών (Μοντέλο Εκτίμησης Μέσης Επιβράδυνσης)	74
Πίνακας 23 Σύγκριση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών μέσης επιβράδυνσης	77

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1 Κόμβος Μεταμόρφωσης.....	24
Εικόνα 2 Κόμβος Αγίου Στέφανου	25
Εικόνα 3 Επιταχυνσιόμετρο Vericom VC4000DAQ	26
Εικόνα 4 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Μεταμόρφωση).....	36
Εικόνα 5 Τυπικό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Άγιος Στέφανος).....	37
Εικόνα 6 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)	39
Εικόνα 7 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος).....	40
Εικόνα 8 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)	42
Εικόνα 9 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος)	43
Εικόνα 10 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Μεταμόρφωση).....	45
Εικόνα 11 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)	45
Εικόνα 12 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Άγιος Στέφανος)	46
Εικόνα 13 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος)	47
Εικόνα 14 Σκαρίφημα Τυπικού Ανισόπεδου Κόμβου	48
Εικόνα 15 Κατανομή Οχημάτων Κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Μεταμόρφωση)	49
Εικόνα 16 Κατανομή Ταχυτήτων Οχημάτων κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Μεταμόρφωση)	50
Εικόνα 17 Κατανομή Οχημάτων Κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Άγιος Στέφανος)	51

Εικόνα 18 Κατανομή Ταχυτήτων Οχημάτων κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Άγιος Στέφανος).....	52
Εικόνα 19 Σχηματική Απεικόνιση Αποστάσεων Στατιστικής Ανάλυσης	57
Εικόνα 20 Απεικόνιση τιμών πραγματικής και προβλεπόμενης ταχύτητας σημείου αιχμής.	69
Εικόνα 21 Απεικόνιση τιμών πραγματικής και προβλεπόμενης μέσης επιβράδυνσης.	77

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Τα οδικά δίκτυα αποτελούν τη θεμελιώδη υποδομή μετακίνησης ανθρώπων και αγαθών σε κάθε κοινωνία, συνδέοντας γεωγραφικά σημεία και υποστηρίζοντας κάθε πτυχή της οικονομικής και κοινωνικής δραστηριότητας. Η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι διάφορες οδικές αρτηρίες. Τα σημεία σύνδεσης, οι λεγόμενοι κόμβοι, αποτελούν κομβικά τμήματα της υποδομής, καθώς επιτρέπουν τη μετάβαση από έναν οδικό άξονα σε άλλον, τη διανομή της κυκλοφορίας και την εξυπηρέτηση διαφορετικών κατευθύνσεων ροής.

Οι κόμβοι μπορούν να είναι ισόπεδοι ή ανισόπεδοι, ανάλογα με το αν οι ροές κυκλοφορίας τέμνονται στο ίδιο επίπεδο ή σε διαφορετικά. Στους ισόπεδους κόμβους παρατηρούνται συχνά καθυστερήσεις και αυξημένος κίνδυνος ατυχημάτων λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των διασταυρούμενων ρευμάτων κυκλοφορίας. Για τον λόγο αυτό, σε οδικά δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, όπως οι αυτοκινητόδρομοι, προτιμώνται οι ανισόπεδοι κόμβοι. Η σωστή σχεδίαση και λειτουργία των κόμβων είναι κρίσιμης σημασίας για την απόδοση, την άνεση και την ασφάλεια του οδικού δικτύου.

Οι ανισόπεδοι κόμβοι σχεδιάζονται με τρόπο που να διαχωρίζουν τις κατευθύνσεις κυκλοφορίας σε διαφορετικά επίπεδα, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλά επίπεδα ασφάλειας και ταχύτητας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην κατασκευή τεχνικών έργων, μέσω των οποίων οι συνδετήριοι κλάδοι που εξυπηρετούν τις κινήσεις μερισμού και συμβολής διοχετεύουν την κυκλοφορία στα επιμέρους επίπεδα. Οι κόμβοι αυτοί αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για την αποδοτικότητα ενός αυτοκινητόδρομου, καθώς επιτρέπουν τη γρήγορη και ασφαλή μετακίνηση μεταξύ κύριων και δευτερευόντων οδικών αξόνων.

Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα ενός ανισόπεδου κόμβου δεν εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρική του διαμόρφωση, αλλά και από τα επιμέρους τμήματα που τον συγκροτούν. Μεταξύ αυτών, οι λωρίδες επιβράδυνσης, οι οποίες εξυπηρετούν τις κινήσεις μερισμού, έχουν ιδιαίτερη σημασία.

Οι λωρίδες επιβράδυνσης αποτελούν ειδικά διαμορφωμένες πρόσθετες λωρίδες οι οποίες επιτρέπουν στα οχήματα να μειώσουν την ταχύτητά τους με ασφαλή τρόπο,

αποσυνδέοντας τη ροή τους από τον κύριο άξονα του αυτοκινητόδρομου. Οι λωρίδες επιβράδυνσης αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της οδικής ασφάλειας, καθώς εξασφαλίζουν τη σταδιακή μείωση της ταχύτητας των οχημάτων πριν από την αποχώρησή τους από τον αυτοκινητόδρομο. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων που κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες και βελτιώνεται η συνολική ροή της κυκλοφορίας στις περιοχές εξόδου.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην **καταγραφή, ανάλυση και στατιστική επεξεργασία δεδομένων σε λωρίδες επιβράδυνσης ανισόπεδων κόμβων**, μέσω **μετρήσεων πεδίου** και εφαρμογής **μοντέλων παλινδρόμησης**. Στόχοι της είναι:

- Να καταγραφεί η πραγματική συμπεριφορά των οδηγών κατά την είσοδο και χρήση των λωρίδων επιβράδυνσης.
- Να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τις παραδοχές των οδηγιών σχεδιασμού.
- Να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς (κυκλοφοριακές συνθήκες, γεωμετρία, χαρακτηριστικά οδηγών).
- Να αξιοποιηθούν τα στατιστικά μοντέλα για την κατανόηση και πρόβλεψη της οδηγικής συμπεριφοράς.

1.2 Δομή της εργασίας

Η εργασία δομείται σε πέντε κεφάλαια και μία ενότητα βιβλιογραφικών αναφορών.

Στο **Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή)** παρουσιάζονται το αντικείμενο και οι στόχοι της μελέτης, καθώς και η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε.

Το **Κεφάλαιο 2 (Βιβλιογραφική Ανασκόπηση)** περιλαμβάνει την επισκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας. Στην υποενότητα 2.1 παρατίθεται μία γενική εισαγωγή, ενώ στην ενότητα 2.2 και 2.3 εξετάζονται τα χαρακτηριστικά των λωρίδων επιβράδυνσης και των ανισόπεδων κόμβων. Στην υποενότητα 2.4 αναλύονται οι μετρήσεις πεδίου καθώς και οι διάφορες τεχνολογίες συλλογής δεδομένων που έχουν εφαρμοστεί σε συναφείς έρευνες. Στην ενότητα 2.5 γίνεται αναφορά σε μοντέλα παλινδρόμησης που έχουν δημιουργηθεί πάνω στο αντικείμενο. Τέλος, εντοπίζονται τα ερευνητικά κενά που υπάρχουν, τα οποία θα επιχειρήσει να καλύψει η παρούσα εργασία.

Στο **Κεφάλαιο 3 (Μεθοδολογία)** παρουσιάζεται η ερευνητική διαδικασία. Ειδικότερα, στην υποενότητα 3.1 περιγράφεται η περιοχή μελέτης, στην 3.2 ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, στην 3.3 το ερωτηματολόγιο που συμπληρώθηκε από τους συμμετέχοντες και στην 3.4 και 3.5 η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων.

Το **Κεφάλαιο 4 (Ανάλυση δεδομένων)** περιλαμβάνει την παρουσίαση και την ανάλυση των μετρήσεων. Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων και η

συσχέτισή τους με τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των οδηγών (ηλικία, φύλο, εμπειρία) καθώς και με τις γεωμετρικές παραμέτρους των κόμβων. Στη συνέχεια αναλύονται τα προφίλ ταχύτητας και επιβράδυνσης για κάθε κόμβο ξεχωριστά, με στόχο την αποτύπωση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την είσοδο και κίνηση στις λωρίδες επιβράδυνσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνδυαστικά και συγκεντρωτικά διαγράμματα για τον κάθε κόμβο, απεικονίζοντας τη γενική εικόνα και επισημαίνοντας τις διαφορές μεταξύ των οδηγών. Τέλος, δημιουργούνται κατάλληλα διαγράμματα σχετικά με την απόσταση αλλά και τη ταχύτητα του οχήματος, τη στιγμή εισόδου στη λωρίδα επιβράδυνσης.

Στο **Κεφάλαιο 5 (Στατιστική Ανάλυση)** αναπτύσσονται μοντέλα παλινδρόμησης με σκοπό την ανάλυση των μετρήσεων καθώς και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Γίνονται δοκιμές σε πιθανά μοντέλα με σκοπό ένα αξιόπιστο τελικό αποτέλεσμα. Τελικά, δημιουργείται μοντέλο ικανό να προβλέπει την ταχύτητα του οχήματος στο σημείο αιχμής και ένα ακόμα, ικανό να προβλέψει τη μέση επιβράδυνση του οχήματος από τη στιγμή εκκίνησης της επιβράδυνσης του. Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζεται η ικανότητα των μοντέλων να προβλέψουν το ζητούμενο μέγεθος και τέλος, δημιουργούνται διαγράμματα που επιτρέπουν τη γραφική σύγκριση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών.

Στο **Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα)** συνοψίζονται τα κυριότερα ευρήματα της έρευνας και διατυπώνονται οι βασικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση. Προτείνονται πιθανές αλλαγές για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που εντοπίστηκαν και παρουσιάζονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Κρίσιμες είναι οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με σκοπό την ενίσχυση της αξιοπιστίας των μοντέλων παλινδρόμησης.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη **Βιβλιογραφία**, στην οποία παρατίθενται όλες οι πηγές που αξιοποιήθηκαν.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Η διερεύνηση της οδηγικής συμπεριφοράς στις λωρίδες επιβράδυνσης αποτελεί ένα από τα βασικά πεδία της κυκλοφοριακής ασφάλειας. Οι λωρίδες επιβράδυνσης έχουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των ανισόπεδων κόμβων, καθώς επιτρέπουν την ασφαλή αποσύνδεση των οχημάτων από τον κύριο κορμό του αυτοκινητόδρομου. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ γεωμετρικών χαρακτηριστικών, οδηγικής συμπεριφοράς και κυκλοφοριακών συνθηκών είναι κρίσιμη για τον ορθό σχεδιασμό τους. Η **οδική ασφάλεια** αποτελεί θεμελιώδη και διαρκή πρόκληση για τα συστήματα μεταφορών παγκοσμίως, με τις **οριζόντιες καμπύλες** των οδών να αναγνωρίζονται σταθερά ως ένα από τα πλέον κρίσιμα στοιχεία του δικτύου. Η υψηλή συχνότητα συγκρούσεων που παρατηρείται σε αυτά τα τμήματα, σε σύγκριση με τις ευθείες, υπογραμμίζει την ανάγκη για αναθεώρηση και βελτίωση των υφιστάμενων πρακτικών σχεδιασμού. Ωστόσο, η οδική ασφάλεια συνιστά μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις για τα σύγχρονα συστήματα μεταφορών, αποτελώντας κεντρικό πυλώνα για τη βιώσιμη ανάπτυξη των υποδομών. Τα οδικά ατυχήματα είναι πολύπλοκα φαινόμενα, που προκύπτουν από τη συνέργεια παραγόντων που σχετίζονται με τον δρόμο, το όχημα και, κυρίως, τον **άνθρωπο**. Παρά τις σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στην ασφάλεια των οχημάτων, ο ανθρώπινος παράγοντας – η **οδηγική συμπεριφορά** – παραμένει ο πλέον καθοριστικός παράγοντας κινδύνου. Συνεπώς, η συστηματική μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι οδηγοί αντιλαμβάνονται, αξιολογούν και αντιδρούν στο οδικό περιβάλλον είναι θεμελιώδης για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης και τον επαναπροσδιορισμό των προδιαγραφών σχεδιασμού.

Ιστορικά, ο σχεδιασμός των οδικών υποδομών βασίστηκε σε **ντετερμινιστικές προσεγγίσεις**, οι οποίες συχνά χρησιμοποιούν απλοποιημένα μοντέλα του οδηγού (π.χ., σταθερός χρόνος αντίδρασης). Αυτή η μεθοδολογία, όμως, αδυνατεί να αποτυπώσει την έμφυτη **μεταβλητότητα** των συνθηκών λειτουργίας, όπως οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα, στις επιλογές λήψης αποφάσεων και στη δυναμική του οχήματος. Ειδικότερα σε κρίσιμα γεωμετρικά στοιχεία, όπως οι οριζόντιες καμπύλες, η αδυναμία ενσωμάτωσης αυτής της πραγματικής μεταβλητότητας μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιασμό που δεν είναι επαρκώς **ισχυρός** απέναντι στο πλήρες φάσμα των λειτουργικών συνθηκών.

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί αυτοί, η σύγχρονη έρευνα στρέφεται στη συλλογή δεδομένων από πραγματικές συνθήκες οδήγησης, όπως εκείνα που προκύπτουν μέσω των Μελετών Οδήγησης σε Πραγματικές συνθήκες (Naturalistic Driving Studies - NDS). Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη πιθανολογικών μοντέλων που μετατρέπουν τον παραδοσιακό σχεδιασμό σε μία μεθοδολογία βασισμένη στην αξιοπιστία και την οδική ασφάλεια. Αυτή η αλλαγή επιτρέπει στους μελετητές να ενσωματώσουν άμεσα στον σχεδιασμό την **πιθανότητα αποτυχίας ως προς τη παρεχόμενη ασφάλεια**, αντί απλώς να ικανοποιούν ένα ελάχιστο κριτήριο άνεσης ή λειτουργίας. Η σημασία αυτής της κατεύθυνσης τονίζεται σε μελέτες όπως η διατριβή "**Reliability-Based, Safety-Explicit**

Horizontal Curve Design Using Naturalistic Driving Study" (Dhahir, 2018), η οποία αναδεικνύει την ανάγκη για ρητή ενσωμάτωση των παραμέτρων ασφάλειας στον σχεδιασμό των οριζόντιων καμπυλών, αξιοποιώντας την πραγματική οδηγική συμπεριφορά. Η υιοθέτηση τέτοιων προσεγγίσεων αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για τη δημιουργία ενός οδικού δικτύου που είναι, εκ φύσεως, ασφαλέστερο και πιο ανθεκτικό στις ιδιαιτερότητες της ανθρώπινης συμπεριφοράς.

Συνολικά, η διεθνής ερευνητική δραστηριότητα καταδεικνύει ότι η οδηγική συμπεριφορά επηρεάζεται από ένα πλέγμα παραγόντων, που περιλαμβάνουν ψυχολογικά χαρακτηριστικά και τεχνολογικές επιρροές. Η ολοκληρωμένη κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι καθοριστική για τη διαμόρφωση πολιτικών οδικής ασφάλειας, την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων υποβοήθησης οδηγού και, τελικά, τη μείωση των οδικών ατυχημάτων. Η παρούσα εργασία βασίζεται σε αυτό το ερευνητικό πλαίσιο, επιδιώκοντας να συμβάλει στη βαθύτερη κατανόηση των παραγόντων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των οδηγών.

2.2 Οδηγική συμπεριφορά σε λωρίδες επιβράδυνσης

Η μελέτη της συμπεριφοράς των οδηγών αποτελεί βασικό αντικείμενο έρευνας στον τομέα της οδικής ασφάλειας, καθώς η ανθρώπινη συνιστώσα παραμένει ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλλουν στην πρόκληση οδικών ατυχημάτων. Πλήθος ερευνών έχει αναδείξει ότι η συμπεριφορά του οδηγού μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικούς τύπους, όπως παραβάσεις, λάθη και παραλείψεις, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν διαφορετικές πτυχές της οδηγικής αντίληψης και λήψης αποφάσεων. Μέσα από τη μελέτη αυτών των στοιχείων, επιδιώκεται η κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν σε επικίνδυνες συμπεριφορές και, κατ' επέκταση, η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών πρόληψης.

Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος της τεχνολογίας έχει επιτρέψει την πιο αντικειμενική και ακριβή καταγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω συστημάτων αισθητήρων, δεδομένων GPS και άλλων καταγραφικών εργαλείων σε πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Οι προσεγγίσεις αυτές επιτρέπουν την ανάλυση παραμέτρων όπως η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η απόσταση ασφαλείας και οι αντιδράσεις του οδηγού σε απρόβλεπτα γεγονότα, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση του βαθμού επικινδυνότητας της οδηγικής συμπεριφοράς. Παράλληλα, οι μελέτες που βασίζονται σε «φυσική οδήγηση» (naturalistic driving) συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του οδηγού μέσα στο πραγματικό περιβάλλον, χωρίς την επιρροή εργαστηριακών περιορισμών.

Η οδηγική συμπεριφορά κατά τη διαδικασία εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο είναι πολυπαραγοντική και επηρεάζεται από τα ατομικά χαρακτηριστικά των οδηγών, τις κυκλοφοριακές συνθήκες, αλλά και το επίπεδο εξοικείωσης με τον δρόμο. Έρευνες έχουν

δείξει ότι πολλοί οδηγοί ξεκινούν να επιβραδύνουν νωρίτερα από την τυπική είσοδο στη λωρίδα επιβράδυνσης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια της κύριας ροής (Nengchao Lyu, 2021). Παράλληλα, η εμπειρία οδήγησης, η ηλικία και η αντίληψη κινδύνου διαφοροποιούν σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο οι οδηγοί χρησιμοποιούν τις λωρίδες (Bella & Calvi, 2013).

Παρά τον σχεδιασμό τους για την αύξηση της ασφάλειας, τα τμήματα των κόμβων εξόδου και εισόδου συχνά παρουσιάζουν **υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων** σε σχέση με άλλα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου, με την ανθρώπινη συμπεριφορά να αναδεικνύεται ως ο κύριος παράγοντας κινδύνου.

Μελέτες που επικεντρώνονται στη μικροσκοπική ανάλυση της οδήγησης υπογραμμίζουν τη σημασία της στρατηγικής εξόδου του οδηγού. Έχει παρατηρηθεί ότι:

- Οι οδηγοί συχνά τείνουν να **επιβραδύνουν** ενώ κινούνται ακόμη στην **κύρια λωρίδα** του αυτοκινητοδρόμου, αντί να εισέλθουν πρώτα στη λωρίδα επιβράδυνσης και να αρχίσουν τη μείωση της ταχύτητας. Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί σε **απότομες αλλαγές ταχύτητας** στην κύρια ροή, αυξάνοντας τον κίνδυνο σύγκρουσης (Examining Driver Behaviour at Freeway Ramp Terminals Based on Trajectory Data Collected Using Unmanned Aerial Vehicles and Video Image Processing, Alamry 2022).
- Η μελέτη "**Highway Deceleration Lane Safety: Effects of Real-Time Coaching Programs on Driving Behavior**", Regan et al., 2021, έδειξε ότι οι πιο παθητικοί οδηγοί υιοθετούσαν μια ασφαλέστερη στρατηγική, δηλαδή **εισέρχονταν στη λωρίδα πριν αρχίσουν να επιβραδύνουν** σημαντικά.
- Σύμφωνα με την εργασία "**Freeway Deceleration Lane Lengths Effects on Traffic Safety and Operation**" ,Qin, X., 2013, φαίνεται πως η ανεπαρκής χρήση της διαθέσιμης λωρίδας επιβράδυνσης, συχνά λόγω της τάσης των οδηγών να επιβραδύνουν αργά, δημιουργεί προβλήματα σχετικά με τη ροή των οχημάτων.

Οι λωρίδες επιβράδυνσης σχεδιάζονται με στόχο να παρέχουν επαρκές μήκος για την ομαλή μείωση της ταχύτητας πριν την καμπύλη εξόδου. Στη βιβλιογραφία γίνεται διάκριση ανάμεσα σε παράλληλες (parallel) και συγκλίνουσες (tapered) λωρίδες. Έρευνες σε προσομοιωτές οδήγησης δείχνουν ότι οι πρόσθετες λωρίδες δημιουργούν μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με την κύρια ροή, ενώ οι οδηγοί συχνά καθυστερούν να εισέλθουν σε αυτές υπό υψηλό φόρτο (Calvi et al., 2015). Η γεωμετρία επομένως δεν επηρεάζει μόνο την ευχρηστία, αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης συγκρούσεων. **Στους ελληνικούς αυτοκινητόδρομους οι λωρίδες επιβράδυνσης αφορούν αποκλειστικά σε πρόσθετες λωρίδες παράλληλης μορφής.**

2.3 Μετρήσεις πεδίου και τεχνολογίες συλλογής δεδομένων

Στο πλαίσιο των σύγχρονων ερευνών οδικής ασφάλειας και κυκλοφοριακής ανάλυσης, η **συλλογή δεδομένων πεδίου** (Field Operational Tests) αναδεικνύεται ως ο πλέον κρίσιμος πυλώνας για τη δημιουργία **αξιόπιστων** και **διαχρονικών** μοντέλων. Τα δεδομένα αυτά, παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη **συμπεριφορά του οδηγού**, την **κινηματική του οχήματος** και την **αλληλεπίδραση** μεταξύ των χρηστών του οδικού δικτύου και του περιβάλλοντος. Η στροφή από την αποκλειστική χρήση των ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων, στην ενεργή συλλογή, επιτρέπει την **προληπτική** ανάλυση του κινδύνου.

Η αποτελεσματική συλλογή δεδομένων στο πεδίο απαιτεί τη χρήση **εξειδικευμένης τεχνολογίας** που μπορεί να καταγράψει με υψηλή συχνότητα και ακρίβεια τις μεταβλητές που συνδέονται με την οδηγική διεργασία. Μερικά παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω.

Συστήματα GNSS/RTK: Παρέχουν γεωγραφική θέση και ταχύτητα με ακρίβεια εκατοστού.

Κάμερες Υψηλής Ανάλυσης (In-Cabin & External): Χρησιμοποιούνται για:

- **OBD II/CAN-Bus Interfacing:** Απευθείας λήψη δεδομένων από τον εγκέφαλο του οχήματος (Engine Control Unit - ECU), όπως η **γωνία στροφής τιμονιού**, η **ροπή του κινητήρα** και η **πραγματική χρήση του φρένου**.
- **GPS (Smartphones):** Καταγραφή θέσης και ταχύτητας (με χαμηλότερη ακρίβεια από το RTK).

Επιταχυνσιόμετρα & Γυροσκόπια: Ανίχνευση **απότομων ενεργειών** (Harsh Braking/Acceleration) και **πλευρικών ελιγμών**.

OBD II Dongles (Τηλεματική): Μέσω Bluetooth ή Wi-Fi, μεταδίδουν βασικά δεδομένα οχήματος (π.χ. στροφές κινητήρα, ταχύτητα) σε μια εφαρμογή smartphone ή κεντρική βάση δεδομένων.

Drones/UAVs (Unmanned Aerial Vehicles): Χρησιμοποιούνται για ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική εναέρια βιντεοσκόπηση, ειδικά σε αγροτικούς ή δυσπρόσιτους δρόμους, επιτρέποντας την επεξεργασία για την ανάλυση της ροής και των αλληλεπιδράσεων

LiDAR/Radar (Σταθερής Τοποθέτησης): Παρέχουν εξαιρετικά ακριβή δεδομένα **θέσης** και **ταχύτητας** των οχημάτων εντός της εμβέλειάς τους, ιδανικά για τον υπολογισμό του **TTC** και του **PET**.

Βιντεοκάμερες Υψηλής Ανάλυσης: Τοποθετημένες σε μεγάλο ύψος (π.χ. γέφυρες, ειδικούς ιστούς) για πανοραμική λήψη. Τα δεδομένα επεξεργάζονται με **Computer Vision** και **Deep Learning** αλγορίθμους (π.χ. Tracking Algorithms) για την εξαγωγή **τροχιών** και **κινηματικών παραμέτρων** κάθε οχήματος.

Η αξιοποίηση δεδομένων πραγματικής οδήγησης (naturalistic driving data) έχει επιτρέψει τη λεπτομερή καταγραφή συμπεριφορών που δύσκολα καταγράφονται σε πειράματα. Στις ΗΠΑ, το πρόγραμμα SHRP2 παρείχε δεδομένα από χιλιάδες ώρες οδήγησης, επιτρέποντας σε μελέτες όπως των Wenxiang Xu (2018) να εξετάσουν φυσικούς ρυθμούς επιβράδυνσης και να δείξουν αποκλίσεις από τις παραδοχές των προτύπων σχεδιασμού. Στην Κίνα, οι Zhang et al. (2023) εισήγαγαν μεθόδους βασισμένες στη θεωρία αξιοπιστίας, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η στοχαστική φύση της οδηγικής συμπεριφοράς. Παράλληλα, η χρήση GPS, αισθητήρων και καταγραφής μέσω καμερών έχει ενισχύσει την ακρίβεια και την εγκυρότητα των μετρήσεων.

Μια σύγχρονη και καινοτόμος μελέτη στον τομέα της μηχανικής κυκλοφορίας είναι η εργασία του **Fayez Alamry (2022)**, με τίτλο «Examining Driver Behaviour at Freeway Ramp Terminals Based on Trajectory Data Collected Using Unmanned Aerial Vehicles and Video Image Processing». Η εργασία αυτή αντιμετωπίζει τα κενά γνώσης σχετικά με τις πραγματικές ταχύτητες και τη συμπεριφορά των οδηγών κατά μήκος εκτεταμένων περιοχών, όπως οι **λωρίδες αλλαγής ταχύτητας (Speed-Change Lanes - SCL)** και οι ράμπες των κόμβων.

Η μελέτη ξεκινά επικρίνοντας το γεγονός ότι οι υφιστάμενες οδηγίες σχεδιασμού στη Βόρεια Αμερική (π.χ., AASHTO) για τα τερματικά των ραμπών εισόδου και εξόδου βασίζονται σε **παρωχημένα δεδομένα** του 1940 σχετικά με τις ικανότητες επιτάχυνσης/επιβράδυνσης των επιβατικών οχημάτων.

Για την επίλυση αυτού του ζητήματος, ο Alamry πρότεινε την εξής μεθοδολογία συλλογής δεδομένων:

- **Συλλογή Δεδομένων:** Χρησιμοποιήθηκαν **Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs ή Drones)** για τη λήψη αεροφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης. Αυτή η μέθοδος επιλέχθηκε ως απάντηση στις δυσκολίες, το υψηλό κόστος και τον κίνδυνο που συνεπάγεται η συλλογή δεδομένων σε μεγάλους, υψηλής ταχύτητας οδικούς άξονες με παραδοσιακό εξοπλισμό, όπως τα λέιζερ ή οι σταθερές κάμερες.
- **Ανάλυση Δεδομένων:** Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό **όρασης υπολογιστών (computer vision)** και **εργαλείων βαθιάς μάθησης (deep learning)**, εξήχθησαν **πλήρεις χωροχρονικές τροχιές για 9.437 οχήματα**. Η μελέτη περιέλαβε **13 τερματικά ραμπών** (7 εισόδου και 6 εξόδου) σε αυτοκινητόδρομους.
- **Εξαγωγή Παραμέτρων Συμπεριφοράς:** Από τις τροχιές εξήχθησαν κρίσιμα μέτρα συμπεριφοράς, όπως οι ταχύτητες συγχώνευσης/απόκλισης, οι θέσεις συγχώνευσης/απόκλισης, οι αποδεκτές χρονικές αποστάσεις και οι ρυθμοί επιτάχυνσης/επιβράδυνσης.

- **Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση:** Αναπτύχθηκαν **μοντέλα παλινδρόμησης (regression models)** για τη στατιστική συσχέτιση των παραμέτρων συμπεριφοράς με τα **γεωμετρικά χαρακτηριστικά** των λωρίδων επιβράδυνσης και των ραμπών. Τέλος, τα μοντέλα αυτά ενσωματώθηκαν σε ανάλυση **Αξιοπιστίας (Reliability Analysis)** μέσω **Προσομοίωσης Monte Carlo (MCS)**, υπολογίζοντας την **Πιθανότητα Μη Συμμόρφωσης (Probability of Noncompliance - PNC)** των υφιστάμενων μηκών λωρίδων επιβράδυνσης.

Η έρευνα "**Lateral Acceleration: Research at a Large Radius Curve of a Diamond Interchange**" των **Trakakis Antonios, Apostoleris Konstantinos, και Psarianos Basil (2023)**, χρησιμοποιώντας **πραγματικές μετρήσεις οδήγησης (on-board data)**, εστιάζει στην ανάλυση της **πλευρικής επιτάχυνσης (Lateral Acceleration)** στους συνδετήριους κλάδους ΑΚ μορφής "διαμάντι". Η έρευνα αυτή αναλύει τα προφίλ ταχύτητας και τις πλευρικές επιταχύνσεις για την αξιολόγηση της **άνεσης** και της **ασφάλειας** στις οριζόντιες καμπύλες.

Ενώ οι Dhahir και Trakakis εστιάζουν στις **πλευρικές δυνάμεις** και την **οριζόντια καμπυλότητα** (ταχύτητα και επιτάχυνση σε στροφές/ράμπες), η **παρούσα εργασία** διερευνεί το επίπεδο διερεύνησης ενσωματώνοντας την **επιτρόχια (διαμήκη) δύναμη της επιβράδυνσης** στα κρίσιμα σημεία κίνησης επί των λωρίδων επιβράδυνσης. Η χρήση του καταγραφικού **Vericom** στην **παρούσα μελέτη** είναι μεθοδολογικά παρόμοια με τις τεχνικές εντός του οχήματος που χρησιμοποιήθηκαν από τον Trakakis, καθιστώντας τα αποτελέσματα άμεσα συγκρίσιμα σε επίπεδο συλλογής δυναμικών δεδομένων.

Η συστηματική συλλογή δεδομένων πεδίου, υποστηριζόμενη από τις εξελιγμένες τεχνολογίες αισθητήρων και τηλεματικής, επιτρέπει τη διεξαγωγή **εμπειρικής ανάλυσης** της αλληλεπίδρασης **οδηγού-οχήματος-υποδομής**. Αυτή η προσέγγιση είναι απαραίτητη για τον **εντοπισμό κρυφών αιτιών** ατυχημάτων και την **αποτελεσματική επιλογή** μέτρων αντιμετώπισης που στοχεύουν απευθείας στη βελτίωση της οδηγικής συμπεριφοράς.

2.4 Στατιστικά μοντέλα και παλινδρόμηση

Τα δεδομένα που συλλέγονται από το πεδίο δεν αρκούν από μόνα τους. Απαιτείται **συστηματική επεξεργασία** για την τροφοδότηση μοντέλων και την εξαγωγή **δεικτών ασφαλείας**. Η ποσοτική ανάλυση της οδηγικής συμπεριφοράς επιτυγχάνεται συχνά με στατιστικά μοντέλα, όπου μεταβλητές όπως το μήκος της λωρίδας, η κλίση, η ταχύτητα εισόδου και οι κυκλοφοριακές συνθήκες συνδέονται με τις παρατηρούμενες ταχύτητες και επιβραδύνσεις. Οι Wenxiang Xu et al. (2018) χρησιμοποίησαν πολυωνυμικά μοντέλα για την πρόβλεψη ταχυτήτων εξόδου, ενώ οι Nengchao Lyu et al. (2021) κατέταξαν τους οδηγούς σε ομάδες με βάση τα μοτίβα επιβράδυνσης. Η παλινδρόμηση λογιστικής φύσης (logistic regression) χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση πιθανοτήτων συγκεκριμένων συμπεριφορών, όπως η πρόωρη ή καθυστερημένη είσοδος στη λωρίδα.

Η εργασία των **Luo, Song, και Liu (2022)**, με τίτλο "**Study on Deceleration Behavior of Drivers in Freeway Exit Ramps and Design Suggestion**", είναι ιδιαίτερα σχετική, καθώς

χρησιμοποιεί **παρόμοια μεθοδολογία** με την **παρούσα εργασία** για την ανάλυση της συμπεριφοράς επιβράδυνσης.

Η μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση της **λειτουργικής ταχύτητας (Operating Speed)** και της **συμπεριφοράς επιβράδυνσης** των οδηγών σε **ράμπες εξόδου αυτοκινητοδρόμων**, με στόχο τη βελτίωση των προτύπων γεωμετρικού σχεδιασμού.

Οι **Luo, Song, και Liu** αναπτύσσουν **μοντέλα παλινδρόμησης** που περιγράφουν το **προφίλ ταχύτητας** και το **προφίλ επιβράδυνσης** κατά μήκος της ράμπας, χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή την **απόσταση από το σημείο απόκλισης (diverge point)**.

Η μελέτη αυτή κατέληξε σε χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν τόσο από τη σύγκριση της μορφής των μοντέλων παλινδρόμησης (γραμμικά, λογαριθμικά, πολυωνυμικά), όσο και από την αξιολόγηση των μέσων τιμών και των κατανομών των μετρημένων επιβραδύνσεων και ταχυτήτων.

Το πιο σημαντικό από αυτά είναι το γεγονός ότι, αναφορικά με τη συμπεριφορά επιβράδυνσης του οδηγού σε λωρίδες εξόδου αυτοκινητόδρομων, ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος για την αξιολόγηση και τη πιθανή αναθεώρηση των παραδοσιακών ντετερμινιστικών προτύπων σχεδιασμού, είναι η **στατιστική επεξεργασία** της συμπεριφοράς επιβράδυνσης, βασιζόμενη **σε πραγματικά δεδομένα**.

Είναι επομένως φανερό, ότι μετά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων είναι απαραίτητη η ανάλυση τους, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας κατάλληλων στατιστικών μοντέλων. Η πρωταρχική σημασία των μοντέλων παλινδρόμησης είναι η **ποσοτικοποίηση της σχέσης** μεταξύ των **επεξηγηματικών μεταβλητών** (π.χ. γεωμετρία δρόμου, καιρικές συνθήκες, χαρακτηριστικά οδηγού) και των **μεταβλητών απόκρισης** (π.χ. δείκτες κινδύνου, συχνότητα ατυχημάτων, επιλογή ταχύτητας). Συγκεκριμένα, ορισμένες βασικές λειτουργίες των μοντέλων παλινδρόμησης είναι οι εξής:

- **Αναγνώριση Κρίσιμων Παραγόντων:** Μοντέλα όπως η **Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση** ή η **Παλινδρόμηση** (ιδανική για δεδομένα μέτρησης ατυχημάτων) επιτρέπουν την αναγνώριση των παραγόντων που έχουν τη **μεγαλύτερη στατιστική σημασία** στην πρόκληση ενός φαινομένου.
- **Ποσοτικοποίηση της Επίδρασης (Marginal Effects):** Τα μοντέλα παρέχουν **συντελεστές** που υποδεικνύουν το **μέγεθος** και την **κατεύθυνση** της επίδρασης. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς να γνωρίζουν πόσο θα μειωθεί ο κίνδυνος αν βελτιώσουν μια συγκεκριμένη γεωμετρική παράμετρο.

Επίσης η ανάπτυξη ισχυρών μοντέλων παλινδρόμησης είναι θεμελιώδης για την **προληπτική ανάλυση ασφαλείας (Proactive Safety Analysis)**. Η προληπτική ανάλυση μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει:

- **Πρόβλεψη Δείκτη Ασφαλείας:** Χρησιμοποιώντας **κινηματικά δεδομένα** (π.χ. TTC, PET) ως μεταβλητές απόκρισης, τα μοντέλα μπορούν να προβλέψουν την

πιθανότητα εμφάνισης ενός κρίσιμου συμβάντος (Near-Miss) σε μια νέα ή ανασχεδιασμένη υποδομή, πριν καν καταγραφεί κάποιο ατύχημα.

- **Ανάπτυξη Συντελεστών Ασφαλείας (Safety Performance Functions - SPFs):** Τα SPFs είναι ειδικά μοντέλα παλινδρόμησης που προβλέπουν τον **αναμενόμενο αριθμό ατυχημάτων** για ένα συγκεκριμένο οδικό τμήμα ή κόμβο, με βάση τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και τον κυκλοφοριακό φόρτο. Αυτά τα μοντέλα αποτελούν τη βάση για τον εντοπισμό των **επικίνδυνων σημείων** (hotspots) με βάση όχι μόνο τα ιστορικά δεδομένα, αλλά και τις **πρότυπες (αναμενόμενες) τιμές**.

Τέλος τα μοντέλα παλινδρόμησης, δεν χρησιμεύουν μόνο για την ανάλυση, αλλά αποτελούν το κύριο εργαλείο για τη **λήψη αποφάσεων** και την **αξιολόγηση παρεμβάσεων**. Η συμβολή τέτοιων μοντέλων είναι κρίσιμη καθώς επιτρέπουν την:

- **Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Αντιμέτρων:** Πριν και μετά την εφαρμογή ενός μέτρου βελτίωσης (π.χ. αλλαγή ορίου ταχύτητας, εγκατάσταση νέας σήμανσης), τα μοντέλα παλινδρόμησης επιτρέπουν την **απομόνωση** της επίδρασης της παρέμβασης από άλλους παράγοντες (όπως η αύξηση της κυκλοφορίας ή οι καιρικές συνθήκες). Έτσι, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί **με ακρίβεια η μείωση του κινδύνου** που οφείλεται αποκλειστικά στο αντίμετρο.
- **Προσαρμογή Επίπεδων Υπηρεσίας (LOS):** Με τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ **φόρτου κυκλοφορίας και ποιότητας ροής**, μπορούν να ληφθούν αποφάσεις για τη βελτιστοποίηση των φάσεων σηματοδότησης ή του σχεδιασμού λωρίδων.

Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης μετά τη συλλογή των δεδομένων μετατρέπει τις αρχικές παρατηρήσεις σε ποσοτική και ποιοτική γνώση, επιτρέποντας στους μηχανικούς να σχεδιάζουν, να αξιολογούν και να προβλέπουν με επιστημονική τεκμηρίωση την ασφάλεια των οδικών δικτύων.

2.5 Ερευνητικά κενά και κατευθύνσεις

Παρά τις πρόσφατες έρευνες, παραμένουν κενά στην κατανόηση της συμπεριφοράς οδηγών σε διαφορετικά γεωμετρικά και κυκλοφοριακά πλαίσια. Οι περισσότερες μελέτες βασίζονται σε δεδομένα από ΗΠΑ και Κίνα, **αφήνοντας περιορισμένα ευρήματα για άλλες χώρες με διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες, αλλά και οδηγική κουλτούρα, όπως η Ελλάδα**. Επιπλέον, οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται σε προσομοιωτές οδήγησης, ενώ **οι μετρήσεις πεδίου σε πραγματικές συνθήκες είναι πιο περιορισμένες**. Αυτά τα κενά καθιστούν απαραίτητη την περαιτέρω διερεύνηση σε τοπικό επίπεδο.

Η παρούσα έρευνα διαφοροποιείται από προηγούμενες σχετικές μελέτες τόσο ως προς τη μεθοδολογία συλλογής δεδομένων όσο και ως προς το επίπεδο ακρίβειας και ρεαλισμού των αποτελεσμάτων. Ένα βασικό πλεονέκτημα αποτελεί η **καταγραφή των κινηματικών**

μεγεθών ανά 0.1sec (με συχνότητα 10 Hz), γεγονός που επιτρέπει την αποτύπωση της επιβράδυνσης και της μεταβολής της ταχύτητας με εξαιρετικά υψηλή χρονική ανάλυση. Η υψηλή αυτή ακρίβεια προσφέρει τη δυνατότητα να ανιχνευθούν ακόμη και μικρές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των οδηγών κατά τη φάση της επιβράδυνσης, οι οποίες συχνά δεν είναι ανιχνεύσιμες σε μετρήσεις χαμηλότερης ανάλυσης.

Τέλος, η εργασία αυτή αποτελεί από τις λίγες μελέτες που διαθέτουν **συνεχείς και πλήρως επεξεργασμένες σειρές δεδομένων επιβράδυνσης**, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω για την κατανόηση και μοντελοποίηση της κίνησης οχημάτων σε ανισόπεδους κόμβους.

2.6 Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι η οδηγική συμπεριφορά στις λωρίδες επιβράδυνσης δεν συμβαδίζει πάντα με τις θεωρητικές παραδοχές των οδηγιών σχεδιασμού. Παράγοντες όπως η γεωμετρία, η πυκνότητα κυκλοφορίας και τα ατομικά χαρακτηριστικά οδηγών επηρεάζουν καθοριστικά τον τρόπο χρήσης τους. Τα στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης προσφέρουν χρήσιμα εργαλεία ανάλυσης, ωστόσο, απαιτείται πιο συστηματική διασύνδεση των συνθηκών επιβράδυνσης με δυναμικά στοιχεία του οχήματος. Επιπλέον υπάρχει προφανής αναγκαιότητα προσαρμογής των διεθνών ευρημάτων αναφορικά με τη διερεύνηση των συνθηκών κίνησης σε λωρίδες εξόδου ελληνικών αυτοκινητόδρομων. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό, συνδυάζοντας μετρήσεις πεδίου με στατιστικά μοντέλα.

3 Μεθοδολογία

Οι ανισόπεδοι κόμβοι αποτελούν βασικά στοιχεία του οδικού δικτύου και έχουν ως κύριο σκοπό την **εξυπηρέτηση των κινήσεων** μεταξύ **δύο ή περισσότερων οδών σε διαφορετικά επίπεδα**, αποφεύγοντας την άμεση διασταύρωση των κύριων κατευθύνσεων κυκλοφορίας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η **απρόσκοπτη και ασφαλής ροή της κυκλοφορίας**, ελαχιστοποιώντας καθυστερήσεις, συμφόρηση και πιθανότητες ατυχημάτων.

Σε αντίθεση με τους ισόπεδους κόμβους, όπου η ροή των οχημάτων ρυθμίζεται με φανάρια ή σήμανση προτεραιότητας, οι ανισόπεδοι κόμβοι εξαλείφουν τα σημεία σύγκρουσης μέσω υψομετρικού διαχωρισμού των κυρίων κατευθύνσεων κυκλοφορίας. Η κυκλοφορία των οχημάτων από τη μια οδό στην άλλη εξυπηρετείται μέσω των συνδετήριων κλάδων.

Οι κινήσεις των οχημάτων στους συνδετήριους κλάδους καθοδηγούνται μέσω **των λωρίδων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης**. Οι λωρίδες αυτές μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες, ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο, τη μορφολογία του εδάφους και τη λειτουργική σημασία του κόμβου.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ανισόπεδου κόμβου εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων, όπως ο **κυκλοφοριακός φόρτος**, η **λειτουργική κατηγορία των οδών που διασταυρώνονται**, οι **τοπογραφικές συνθήκες**, καθώς και η **διαθεσιμότητα χώρου**. Οι μηχανικοί σχεδιασμού συγκοινωνιακών έργων λαμβάνουν υπόψη επίσης μια σειρά από παραμέτρους όπως: την **ορατότητα**, τις **ακτίνες καμπυλότητας**, τη **κλίση του οδοστρώματος**, καθώς και την **ασφάλεια των ελιγμών εισόδου και εξόδου**. Ένας σωστά σχεδιασμένος ανισόπεδος κόμβος συμβάλλει στη μείωση του χρόνου ταξιδιού, στην άνεση του χρήστη και στη σημαντική μείωση των σημείων πιθανής σύγκρουσης.

Τέλος, οι ανισόπεδοι κόμβοι αποτελούν **κομβικά σημεία στρατηγικής σημασίας** για τα αστικά και υπεραστικά οδικά δίκτυα, καθώς διασφαλίζουν τη συνεχή ροή μεταξύ κεντρικών αρτηριών και αυτοκινητοδρόμων. Παρά το υψηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης σε σχέση με τους ισόπεδους κόμβους, η λειτουργική τους απόδοση και η συμβολή τους στην οδική ασφάλεια καθιστούν τη χρήση τους απαραίτητη σε περιοχές με υψηλή κυκλοφοριακή ένταση ή όπου απαιτείται συνεχής ροή χωρίς διακοπές.

3.1 Περιοχή μελέτης

Ως **περιοχή μελέτης** ορίσθηκαν οι συνδετήριοι κλάδοι εξόδου των ανισόπεδων **κόμβων Μεταμόρφωσης και Αγίου Στέφανου** του αυτοκινητόδρομου ΑΘΕ. Οι ΑΚ αυτοί συνδέουν την Εθνική Οδό Αθηνών - Θεσσαλονίκης με την οδό Τατοΐου και με τη Λεωφόρο Κρυονερίου αντίστοιχα.

Η επιλογή της περιοχής μελέτης έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εργασίας. Κύριο κριτήριο αποτέλεσαν η **γεωμετρία των κόμβων, ο τύπος των οδών - κεντρική αρτηρία και συνδετήρια οδός** - καθώς και **οι επιτρεπόμενες ταχύτητες στη περιοχή εξόδου**. Οι παραπάνω επιλογές των ΑΚ εξασφαλίζουν λωρίδες επιβράδυνσης με ικανοποιητικά πλάτη και μήκη για τις ανάγκες της εργασίας. Ο τύπος του ανισόπεδου κόμβου και στις δύο περιπτώσεις είναι μορφής σάλπιγγας, η οποία αποτελεί συνήθη διάταξη ανισόπεδων κόμβων. Η μεταβαλλόμενη καμπυλότητα μας επιτρέπει, μέσω των μετρήσεων, να παρατηρήσουμε τις αλλαγές στη συμπεριφορά των οδηγών (απότομη επιβράδυνση). Και οι δύο ΑΚ στην περιοχή εξόδου διαθέτουν από μια λωρίδα.

Η γεωμετρία ενός ανισόπεδου κόμβου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά των οδηγών, τόσο ως προς τον τρόπο χειρισμού του οχήματος όσο και ως προς τη λήψη αποφάσεων κατά την πλοήγηση μέσα στον κόμβο. Παράμετροι όπως η **ακτίνα καμπυλότητας της εξόδου, η κλίση του οδοστρώματος, το μήκος των λωρίδων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης**, καθώς και η **ορατότητα** στις κρίσιμες περιοχές, διαμορφώνουν τον τρόπο με τον οποίο ο οδηγός αντιλαμβάνεται το οδικό περιβάλλον και ρυθμίζει την ταχύτητά του. **Μικρές ακτίνες καμπυλότητας και απότομες κλίσεις**, για παράδειγμα, τείνουν να **αυξάνουν το επίπεδο άγχους και το επίπεδο ενασχόλησης (workload)** του οδηγού, οδηγώντας σε πιο συντηρητικές συμπεριφορές, όπως μείωση ταχύτητας ή υπερβολική προσοχή στις αλλαγές πορείας. Η καμπυλότητα του συνδετήριου κλάδου εξόδου στην περιοχή αμέσως μετά την περιοχή μερισμού των λωρίδων επιβράδυνσης από έναν ανισόπεδο κόμβο (**controlling curve**) αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την οδική ασφάλεια και την ομαλή ροή της κυκλοφορίας. Η συγκεκριμένη περιοχή σηματοδοτεί τη μετάβαση από τις υψηλές ταχύτητες του αυτοκινητόδρομου σε χαμηλότερες ταχύτητες, όπου οι οδηγοί εισέρχονται σε περιοχή με διαφορετικές απαιτήσεις κυκλοφορίας. Η δεξιόστροφη αυτή καμπύλη πρέπει να έχει κατάλληλη καμπυλότητα προκειμένου να επιτρέπει την ομαλή προσαρμογή της ταχύτητας και τη διατήρηση της άνεσης, και σε οριακές συνθήκες, ευστάθειας του οχήματος. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός του τμήματος αυτού πρέπει να βασίζεται σε αρχές συνέχειας και ομοιομορφίας της γεωμετρίας, ώστε οι οδηγοί να αναγνωρίζουν έγκαιρα την επικείμενη μεταβολή της όδευσης και να προσαρμόζουν εγκαίρως την ταχύτητά τους. Τέλος, ο ορθός σχεδιασμός της καμπυλότητας στην περιοχή της καμπύλης εξόδου συμβάλλει θετικά στην ομαλή οπτική καθοδήγηση και στην ενίσχυση της οδηγικής αντίληψης. Η επαρκής ορατότητα και η κατάλληλη σήμανση λειτουργούν συμπληρωματικά, μειώνοντας τα περιθώρια σφάλματος και ενισχύοντας την αίσθηση ασφάλειας του οδηγού κατά τη φάση εξόδου από τον αυτοκινητόδρομο.

Συμπληρωματικά, μια **καλά σχεδιασμένη γεωμετρία**, με ομαλές καμπύλες, επαρκές πλάτος λωρίδων και κατάλληλη ορατότητα, ενισχύει το αίσθημα ασφάλειας και επιτρέπει την ομαλή προσαρμογή της ταχύτητας χωρίς αιφνίδιες αλλαγές. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο κόμβος παρέχει υπερβολικά μεγάλες ακτίνες ή επίπεδες κλίσεις, οι οδηγοί τείνουν να διατηρούν υψηλότερες ταχύτητες, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο

ατυχημάτων κατά τη συγχώνευση ή την έξοδο από τον κόμβο. Επομένως, η γεωμετρία του κόμβου δεν επηρεάζει μόνο την άνεση και τη ροή της κυκλοφορίας, αλλά και τη **συνολική οδηγική συμπεριφορά**, καθορίζοντας αν αυτή θα είναι προσαρμοστική και ασφαλής ή ριψοκίνδυνη.

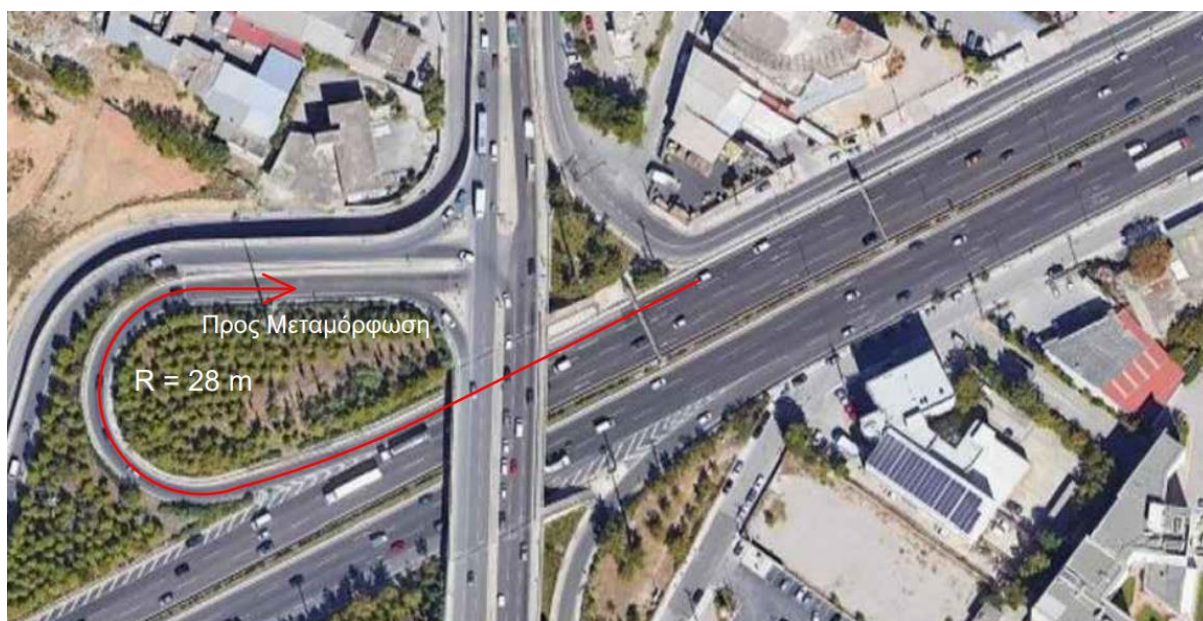
Με βάση τα παραπάνω, αναμένεται ότι σε κόμβους με **περιορισμένη ορατότητα, απότομες καμπύλες ή μικρό μήκος λωρίδας επιβράδυνσης**, οι οδηγοί θα επιδεικνύουν αυξημένα επίπεδα προσοχής, θα μειώνουν την ταχύτητα και θα πραγματοποιούν πιο απότομες αλλαγές πορείας. Αντιθέτως, σε κόμβους με **ομαλή γεωμετρία και επαρκή χώρο ελιγμών**, οι οδηγοί πιθανότατα θα υιοθετούν πιο ρευστή και φυσική συμπεριφορά, με σταδιακές μεταβολές ταχύτητας και λιγότερες επιθετικές κινήσεις. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης αναμένεται, συνεπώς, να δείξουν ότι η **ποιότητα και η συνέχεια του γεωμετρικού σχεδιασμού** σχετίζονται θετικά με την **ασφαλέστερη και πιο σταθερή οδηγική συμπεριφορά**, επιβεβαιώνοντας τη σημασία του γεωμετρικού σχεδιασμού ως εργαλείου βελτίωσης της οδικής ασφάλειας.

Τέλος, μια από τις βασικότερες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του οδηγού κατά την οδήγηση, είναι η **επιβράδυνση**. Τα **όρια άνεσης** στις τιμές επιβράδυνσης εκφράζουν το επίπεδο επιβράδυνσης που μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς ο οδηγός και οι επιβάτες να αντιληφθούν σημαντική απώλεια άνεσης ή αίσθηση ανασφάλειας. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα μέτρο που συνδέει τη **δυναμική συμπεριφορά του οχήματος** με τη **ψυχολογική και φυσιολογική απόκριση** των χρηστών. Σύμφωνα με διεθνή πρότυπα και ερευνητικές προσεγγίσεις, άνετη επιβράδυνση θεωρείται η επιβράδυνση με τιμές **έως 1.5 m/sec²** (Normal Deceleration Behavior of Passenger Vehicles at Stop Sign-Controlled Intersections Evaluated with In-Vehicle Global Positioning System Data, Jun Wang 2005) Τιμές που ξεπερνούν τα όρια άνεσης των οδηγών οδηγούν συνήθως σε **αλλαγή της οδηγικής συμπεριφοράς**, αυξημένο στρες, αίσθημα απώλειας ελέγχου και, σε ορισμένες περιπτώσεις, λανθασμένες ή απότομες αντιδράσεις.

❖ Κόμβος Μεταμόρφωσης

Ο πρώτος κόμβος που μελετήθηκε είναι ο κόμβος **Μεταμόρφωσης**. Η λωρίδα επιβράδυνσης του συγκεκριμένου κόμβου διαθέτει **συνολικό μήκος περίπου 349 m**, το οποίο αποτελείται από **το τμήμα συναρμογής της λωρίδας επιβράδυνσης (taper) μήκους 64 m** και **κύριο τμήμα λωρίδας μήκους περίπου 285 m**. Το **πλάτος της λωρίδας επιβράδυνσης** είναι σταθερό και ίσο με **3,50 m**, εξασφαλίζοντας επαρκή χώρο για την ασφαλή προσαρμογή ταχύτητας των οχημάτων πριν την έξοδο. Η καμπύλη που οδηγεί από τον αυτοκινητόδρομο προς τη δευτερεύουσα οδό έχει **ακτίνα καμπυλότητας περίπου 28 m**, τιμή που χαρακτηρίζεται σχετικά μικρή και συνεπάγεται με ανάγκη για σημαντική μείωση ταχύτητας από τους οδηγούς κατά την πορεία τους στη λωρίδα επιβράδυνσης. Στην εικόνα 1 που ακολουθεί απεικονίζεται το υπό μελέτη τμήμα εξόδου του ΑΚ

Μεταμόρφωσης. Μεταξύ των άλλων, επισημαίνεται η ακτίνα εξόδου και η διαδρομή που ακολούθησαν τα οχήματα που συμμετείχαν στις μετρήσεις.



Εικόνα 1 Κόμβος Μεταμόρφωσης

❖ Κόμβος Αγίου Στέφανου

Ο δεύτερος κόμβος που μελετήθηκε διαθέτει λωρίδα επιβράδυνσης με **συνολικό μήκος περίπου 199 m**, αποτελούμενο από το **τμήμα προσαρμογής (taper) μήκους 55 m** και **κύριο τμήμα λωρίδας** μήκους περίπου **144 m**. Το **πλάτος της λωρίδας** παραμένει σταθερό και ίσο με **3,50 m**. Η **ακτίνα καμπυλότητας** της στροφής που ακολουθεί τη λωρίδα είναι περίπου **110 m**, τιμή σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη του κόμβου Μεταμόρφωσης, επιτρέποντας στους οδηγούς να διατηρούν υψηλότερες ταχύτητες και να εκτελούν πιο ομαλές κινήσεις κατά την είσοδο και πορεία τους στη λωρίδα επιβράδυνσης. Η γεωμετρία αυτή αναμένεται να επηρεάζει τον τρόπο προσαρμογής των ταχυτήτων, το σημείο στο οποίο οι οδηγοί αποφασίζουν να μεταβούν στη λωρίδα, καθώς και την ένταση της επιβράδυνσης που εφαρμόζουν. Στη συνέχεια (Εικόνα 2) απεικονίζεται το υπό μελέτη τμήμα εξόδου του ΑΚ Αγίου Στεφάνου όπου φαίνεται η πιο ήπια ακτίνα του συνδετήριου κλάδου εξόδου μετά την περιοχή μερισμού.



Εικόνα 2 Κόμβος Αγίου Στέφανου

Μια σημαντική διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο κόμβων είναι η έλλειψη ορατότητας κατά τη κίνηση στην έξοδο του κόμβου της Μεταμόρφωσης, με αποτέλεσμα να αναμένεται πιθανή μείωση της ταχύτητας των οδηγών τόσο πριν, όσο και κατά τη διάρκεια της καμπύλης. Επίσης, στο κόμβο αυτόν υπάρχει σημαντική υψομετρική διαφορά μεταξύ κύριας και δευτερεύουσας οδού. Στον Άγιο Στέφανο, φαίνεται να επικρατούν πιο ευνοϊκές συνθήκες και έτσι οι χρήστες αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη άνεση και πιο υψηλές ταχύτητες.

3.2 Εξοπλισμός

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το επιταχυνσιόμετρο **Vericom VC4000DAQ**.

Το Vericom VC4000DAQ αποτελεί ένα σύγχρονο σύστημα λήψης και καταγραφής δεδομένων δυναμικής συμπεριφοράς οχημάτων, σχεδιασμένο ειδικά για την ακριβή μέτρηση μεγέθους όπως θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση και απόσταση σε πραγματικό χρόνο. Η συσκευή είναι εξοπλισμένη με προηγμένους αισθητήρες—συγκεκριμένα τριαξονικό

επιταχυνσιόμετρο (2G έως 6G) και ενσωματωμένο δέκτη GPS υψηλής ακρίβειας (**10Hz**). Αυτό σημαίνει πως **γίνονται 10 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο**, εξασφαλίζοντας υψηλή ανάλυση χρόνου. Η υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας ελαχιστοποιεί το σφάλμα και καταγράφει ακόμα και τις πιο σύντομες και έντονες ενέργειες επιβράδυνσης, οι οποίες είναι συχνά ενδεικτικές επικίνδυνης συμπεριφοράς. Λόγω της υψηλής συχνότητας μέτρησης, τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη ακρίβεια και θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα για τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στη μέτρηση και ταυτόχρονη συγχρονισμένη καταγραφή της επιτάχυνσης, της ταχύτητας, του χρόνου και της απόστασης, μέσω του πρωτοκόλλου Run Duration Protocol της Vericom, επιτυγχάνοντας υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ακρίβειας. Επιπλέον, η συσκευή παρέχει δυνατότητες αυτοματοποιημένου ψηφιακού οριζοντισμού, καθώς και καταγραφής δεδομένων από συμπληρωματικούς αισθητήρες όπως OBDII, tachograph και διάφορα αναλογικά ή ψηφιακά εισιτήρια.

Το σύστημα είναι φορητό και εγκαθίσταται εντός του οχήματος χωρίς να επηρεάζει την οδηγική συμπεριφορά. Έτσι, συλλέγονται δεδομένα υπό **φυσικές, αυθόρμητες** συνθήκες κυκλοφορίας, γεγονός που ενισχύει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων έναντι των δεδομένων προσομοιωτή.

Όλα τα ακατέργαστα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να εξαχθούν και να αναλυθούν μέσω του λογισμικού Profile Professional της Vericom και να μετατραπούν σε μορφή αρχείων Excel για περαιτέρω στατιστική επεξεργασία. Τα αποτελέσματα φαίνονται σε μορφή πίνακα στο Excel, και παρέχουν δεδομένα για το χρόνο, την απόσταση, τη ταχύτητα, την επιτάχυνση και τις συντεταγμένες του οχήματος, κάθε 0,1 δευτερόλεπτα.

Στη παρακάτω εικόνα 3, φαίνεται το μηχάνημα Vericom, σε συνθήκες συλλογής δεδομένων.



Εικόνα 3 Επιταχυνσιόμετρο Vericom VC4000DAQ

3.3 Ερωτηματολόγιο

Η επιλογή των συμμετεχόντων έγινε με στόχο να συγκεντρωθεί ένα δείγμα οδηγών που να αποτυπώνει όσο το δυνατόν καλύτερα την ποικιλία της ελληνικής οδηγικής πραγματικότητας. Για τον λόγο αυτό, προσκλήθηκαν οδηγοί διαφορετικών ηλικιακών ομάδων, με διαφορετικό επίπεδο εμπειρίας, καθώς και άνδρες και γυναίκες, ώστε να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα συμμετεχόντων. Η συμμετοχή ήταν απολύτως εθελοντική, χωρίς οικονομικό ή άλλο κίνητρο, και οι οδηγοί ενημερώθηκαν εκ των προτέρων ότι η έρευνα δεν εξετάζει την «ικανότητά» τους, αλλά καταγράφει τον τρόπο με τον οποίο κινούνται σε πραγματικές συνθήκες. Η διασφάλιση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, ώστε να μην υπάρξει πίεση για «σωστή» συμπεριφορά και να καταγραφούν ρεαλιστικά δεδομένα.

Κάθε οδηγός συμπλήρωσε ερωτηματολόγιο πριν από τη μέτρηση. Το ερωτηματολόγιο είχε σχεδιαστεί ειδικά για την παρούσα εργασία και στόχευε στην καταγραφή τεσσάρων κατηγοριών στοιχείων:

1. **Δημογραφικά στοιχεία:** ηλικία, φύλο.
2. **Οδηγική εμπειρία:** έτη κατοχής άδειας οδήγησης, μέσος αριθμός χιλιομέτρων που διανύονται ετησίως, συχνότητα οδήγησης σε αυτοκινητόδρομο.
3. **Συνήθειες οδήγησης:** συνήθης ταχύτητα σε αυτοκινητόδρομο, προτιμώμενη λωρίδα κυκλοφορίας, τρόπος εισόδου σε κόμβους.

Η καταγραφή αυτών των στοιχείων επέτρεψε τη συσχέτιση των δεδομένων οδήγησης με τα προσωπικά χαρακτηριστικά των οδηγών. Για παράδειγμα, εξετάστηκε εάν οι νεότεροι οδηγοί εισέρχονται σε μικρότερες αποστάσεις στη λωρίδα επιβράδυνσης ή εάν η μεγαλύτερη εμπειρία σχετίζεται με πιο ήπιες επιβραδύνσεις.

Η συμμετοχή στο πείραμα ήταν απολύτως εθελοντική και οι οδηγοί κλήθηκαν να ακολουθήσουν την καθημερινή τους οδηγική συμπεριφορά, **χωρίς να προσπαθήσουν να προσαρμοστούν στη διαδικασία της μέτρησης**. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίστηκε ότι τα αποτελέσματα αντανakλούν ρεαλιστικές συνθήκες και όχι «τεχνητές» αντιδράσεις υπό πίεση παρατήρησης.

Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα.

- Συνολικός αριθμός συμμετεχόντων: 37.
- Μέση ηλικία: 30 έτη.
- Εύρος ηλικιών: 24–35 έτη.
- Μέσος όρος εμπειρίας (έτη οδήγησης): 9 έτη.
- Εύρος εμπειρίας: 2–16 έτη.
- Φύλο (κωδικοποιημένο): 1=Άνδρας, 2=Γυναίκα.

Πληθυσμιακή κατανομή φύλου.

Ακολουθεί ο πίνακας 1, που δείχνει τη πληθυσμιακή κατανομή του φύλου των συμμετεχόντων, σύμφωνα με το ερωτηματολόγιο:

Φύλο	Πλήθος	Ποσοστό
Άνδρας (1)	24	64,9%
Γυναίκα (2)	13	35,1%

Πίνακας 1 Πληθυσμιακή κατανομή φύλου οδηγών

Συνολική εικόνα.

Παρακάτω, στο πίνακα 2, παρατίθενται όλα τα δεδομένα του ερωτηματολογίου αναλυτικά.

A/A	Ηλικία(έτη)	Φύλο(1:Άνδρας, 2:Γυναίκα)	Εμπειρία(έτη)
1	32	1	8
2	29	2	7
3	33	1	12
4	30	2	10
5	32	1	8
6	27	1	5
7	32	1	9
8	33	2	6
9	30	1	8
10	30	1	10
11	33	1	15
12	33	1	7

13	28	2	4
14	31	1	12
15	30	1	6
16	25	1	9
17	33	2	12
18	31	1	11
19	25	2	7
20	30	1	8
21	25	2	4
22	32	1	15
23	34	2	11
24	24	1	2
25	30	2	6
26	32	1	8
27	29	2	7
28	34	1	14
29	28	1	5
30	30	1	12

31	28	2	8
32	35	1	16
33	31	1	11
34	32	2	13
35	25	2	9
36	26	1	7
37	30	1	9

Πίνακας 2 Αντιπροσωπευτικά στοιχεία οδηγών

3.4 Διαδικασία μετρήσεων

Για τη διασφάλιση της συγκρισιμότητας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό πανομοιότυπες συνθήκες. Συγκεκριμένα, η συλλογή δεδομένων έγινε κατά την ίδια χρονική περίοδο και περίπου στην ίδια ώρα της ημέρας, ώστε να ελαχιστοποιηθούν πιθανές επιδράσεις από μεταβολές στον φωτισμό ή στη θερμοκρασία. Επιπλέον, **οι καιρικές συνθήκες ήταν σταθερές και ευνοϊκές**, χωρίς παρουσία βροχής ή ομίχλης, διασφαλίζοντας ότι οι οδηγοί δεν επηρεάστηκαν από εξωτερικούς παράγοντες ορατότητας ή πρόσφυσης. Οι μετρήσεις επιλέχθηκε να διεξαχθούν σε **ώρες χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου**, ώστε να υπάρχει ελεύθερη ροή και να μην επηρεάζεται η συμπεριφορά των συμμετεχόντων από την παρουσία άλλων οχημάτων. Με τον τρόπο αυτό, **κάθε καταγραφή θεωρείται αντιπροσωπευτική του προσωπικού οδηγικού προφίλ, χωρίς περιορισμούς λόγω της κυκλοφορίας**. Τέλος, σε όλους τους συμμετέχοντες δόθηκε σαφής οδηγία να οδηγούν με τον συνηθισμένο τους τρόπο, χωρίς να μεταβάλουν το στυλ οδήγησής τους εξαιτίας της διαδικασίας, ώστε να καταγραφεί η φυσική και αυθόρμητη συμπεριφορά τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν θεωρούνται επαρκώς αξιόπιστα και συγκρίσιμα, ώστε να αποτελέσουν τη βάση για την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία και ανάλυση, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Ωστόσο, η μεθοδολογία της έρευνας συνοδεύεται από ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αρχικά, το δείγμα των μετρήσεων αφορά δύο μόνο ανισόπεδους κόμβους, γεγονός που περιορίζει τη γενίκευση των συμπερασμάτων σε ολόκληρο το οδικό δίκτυο. Επίσης, ο αριθμός των οδηγών που συμμετείχαν, αν και επαρκής για την ανάλυση, παραμένει σχετικά περιορισμένος και δεν

αποτυπώνει πλήρως την ποικιλία των δημογραφικών και οδηγικών προφίλ που συναντώνται στον πληθυσμό. Επιπλέον, η επιλογή των ωρών χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου, αν και απαραίτητη για την απομόνωση της ατομικής συμπεριφοράς, δεν επιτρέπει την εξέταση της οδηγικής συμπεριφοράς υπό συνθήκες αυξημένης κυκλοφορίας ή συμφόρησης, οι οποίες συχνά συνδέονται με αυξημένο κίνδυνο ατυχημάτων. Τέλος, η παρουσία του μετρητικού εξοπλισμού, αν και ελάχιστα παρεμβατική, ενδέχεται σε κάποιο βαθμό να επηρέασε υποσυνείδητα τη συμπεριφορά ορισμένων συμμετεχόντων.

3.5 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με σκοπό την απομάκρυνση σφαλμάτων, ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. Αρχικά, τα δεδομένα εξήχθησαν σε μορφή συμβατή με λογισμικά επεξεργασίας (Excel). Ακολούθησε έλεγχος ποιότητας, κατά τον οποίο αφαιρέθηκαν μεμονωμένες τιμές που εμφάνιζαν **ακραίες αποκλίσεις** (outliers), οι οποίες προέκυψαν από απώλεια σήματος GPS ή στιγμιαίες αστοχίες του αισθητήρα. Στη συνέχεια, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν σε ενότητες ανά διέλευση και ταξινομήθηκαν ανά κόμβο και οδηγό. Επιπλέον, για λόγους συγκρισιμότητας, όλες οι θέσεις αναφοράς μετατράπηκαν σε ενιαίο σύστημα συντεταγμένων, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των διαγραμμάτων θέσης-ταχύτητας και θέσης-επιτάχυνσης για διαφορετικούς οδηγούς.

4 Ανάλυση δεδομένων

4.1 Επεξεργασία και συσχέτιση μετρήσεων

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία των μετρήσεων, όπως αναλύθηκε παραπάνω, ακολουθεί η διαδικασία της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων που προέκυψαν από όλες τις μετρήσεις. Αρχικά, τα αρχεία που προέκυψαν κατευθείαν από τον εξοπλισμό της μέτρησης (Vericom VC4000DDAQ) δεν ήταν αρχεία εύκολα αναγνώσιμα ή επεξεργάσιμα με συμβατικά λογιστικά φύλλα. Για τον λόγο αυτό, αξιοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό Vericom Profile 5, το οποίο είναι σχεδιασμένο για την οργάνωση, ανάλυση και εξαγωγή δεδομένων από όργανα της Vericom, ειδικά για δοκιμές πέδησης, επιτάχυνσης και κινηματικής οχημάτων. Το Profile 5 προσφέρει, μεταξύ άλλων, τα εξής:

- Εισαγωγή και απεικόνιση δεδομένων από συσκευές Vericom
- Δημιουργία διαγραμμάτων, αναφορών και εξαγωγή των δεδομένων σε μορφές φιλικές προς άλλα προγράμματα (όπως Excel)
- Χαρτογράφηση της διαδρομής χρησιμοποιώντας δεδομένα GPS
- Βαθμολόγηση ή υπολογισμός φυσικών μεγεθών και δημιουργία αυτόματων στατιστικών αναφορών

Πριν από τη μετατροπή των αρχείων σε μορφή συμβατή με το λογισμικό Excel, πραγματοποιήθηκαν ρυθμίσεις στο λογισμικό **Profile 5**. Συγκεκριμένα, τροποποιήθηκαν οι μονάδες μέτρησης ώστε να είναι συμβατές με τις απαιτήσεις της παρούσας έρευνας και να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια όλων των καταγραφών. Η μονάδα μέτρησης της ταχύτητας ορίσθηκαν τα **χιλιόμετρα ανά ώρα** (km/h) ενώ των επιταχύνσεων η **επιτάχυνση της βαρύτητας** (G). Παράλληλα, ορίστηκε η συχνότητα απεικόνισης των μετρήσεων σε διαστήματα των **0,1 δευτερολέπτων(δηλαδή 10hz)**, με σκοπό την επίτευξη υψηλής ανάλυσης στην απεικόνιση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Η ρύθμιση αυτή κρίθηκε αναγκαία, καθώς επέτρεψε την ακριβέστερη αποτύπωση της οδηγικής συμπεριφοράς κατά την είσοδο στη λωρίδα επιβράδυνσης και την παραγωγή διαγραμμάτων που ανταποκρίνονται με πληρότητα στους στόχους της ανάλυσης.

Το **ενδεικτικό αποτέλεσμα** που προκύπτει, για τα πρώτα τρία δευτερόλεπτα της μέτρησης, είναι το ανεπεξέργαστο αρχείο με τη παρακάτω μορφή. Στον πίνακα 3 φαίνονται τα δεδομένα που προκύπτουν από μια τυπική μέτρηση.

Χρόνος	Επιβράδυνση	Ταχύτητα	Απόσταση	GPS Latitude	GPS Longitude
Δευτερόλεπτα	G	Χιλιόμετρα/ώρα	Μέτρα	deg	deg
0,00	0,000	0,00	0,00	38,0713	23,7664
0,10	0,011	81,08	0,00	38,0713	23,7664
0,20	0,029	81,14	2,18	38,0713	23,7664
0,30	0,024	81,03	4,37	38,0713	23,7664
0,40	0,025	81,06	6,64	38,0713	23,7663
0,50	0,022	81,05	8,83	38,0713	23,7663
0,60	0,017	80,67	10,97	38,0713	23,7663
0,70	0,014	80,69	13,16	38,0713	23,7663
0,80	0,018	80,68	15,43	38,0713	23,7662
0,90	0,019	80,56	17,48	38,0713	23,7662
1,00	0,017	80,23	19,75	38,0713	23,7662
1,10	0,018	80,26	21,94	38,0712	23,7662
1,20	0,018	80,23	24,00	38,0712	23,7662
1,30	0,019	80,11	26,26	38,0712	23,7661
1,40	0,020	80,08	28,45	38,0712	23,7661
1,50	0,019	79,69	30,59	38,0712	23,7661
1,60	0,019	79,68	32,78	38,0712	23,7661
1,70	0,020	79,62	34,84	38,0712	23,7660
1,80	0,017	79,30	37,11	38,0712	23,7660
1,90	0,016	79,32	39,29	38,0712	23,7660
2,00	0,019	79,28	41,35	38,0712	23,7660
2,10	0,022	79,15	43,62	38,0712	23,7659
2,20	0,014	79,08	45,68	38,0711	23,7659
2,30	0,014	78,98	47,86	38,0711	23,7659
2,40	0,013	78,91	50,01	38,0711	23,7659
2,50	0,012	78,61	52,06	38,0711	23,7659
2,60	0,011	78,48	54,25	38,0711	23,7658
2,70	0,016	78,44	56,39	38,0711	23,7658
2,80	0,019	78,36	58,45	38,0711	23,7658
2,90	0,020	78,37	60,64	38,0711	23,7658
3,00	0,016	77,99	62,78	38,0711	23,7657

Πίνακας 3 Ενδεικτικό Αποτέλεσμα Μέτρησης

Φαίνεται από το αποτέλεσμα πως, με συχνότητα 10 hz, υπάρχουν δεδομένα για τη θέση, τη ταχύτητα, τις επιταχύνσεις και των συντεταγμένων του οχήματος. Ωστόσο, κατά τη σύγκριση των διαγραμμάτων προέκυψε το ζήτημα της **έλλειψης κοινού σημείου εκκίνησης για όλες τις μετρήσεις**. Δεδομένου ότι το κάθε όχημα εισέρχονταν στη λωρίδα επιβράδυνσης σε διαφορετικό σημείο, εκ πρώτης άποψης δεν ήταν εφικτός ο καθορισμός κοινού άξονα αναφοράς. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, κρίθηκε αναγκαία η **καθιέρωση ενός κοινού σημείου αναφοράς**, το οποίο θα αποτελούσε την «αρχή» όλων των διαδρομών. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένα σημείο με σαφώς καθορισμένες συντεταγμένες, το οποίο ορίστηκε ως **«σημείο αρχής»**, ώστε να θεωρείται ότι όλες οι

μετρήσεις ξεκινούν από το ίδιο σημείο επί του οδοστρώματος. Το σημείο αυτό κρίθηκε χρήσιμο να είναι **το σημείο αρχής της δημιουργίας της λωρίδας επιβράδυνσης**. Ακολουθούν οι ακριβείς συντεταγμένες των σημείων αρχής για τους εξεταζόμενους κόμβους, στο πίνακα 4:

Συντεταγμένες σημείου αρχής			
Κόμβος Μεταμόρφωσης		Κόμβος Αγίου Στεφάνου	
Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
38,070133	23,763321	38,135925	23,841644

Πίνακας 4 Συντεταγμένες σημείου αρχής

Στη συνέχεια, εξίσου σημαντικό σημείο είναι το **«σημείο αιχμής»**. Το σημείο αιχμής ενός ανισόπεδου κόμβου είναι **το σημείο όπου ολοκληρώνεται ο διαχωρισμός της λωρίδας επιβράδυνσης από τη κύρια οδό (περιοχή μερισμού)**. Από το σημείο αυτό και έπειτα, η λωρίδα εξόδου **αποκόπτεται πλήρως** από το κύριο οδόστρωμα και ακολουθεί **ανεξάρτητη χάραξη** που οδηγεί προς τη ράμπα του κόμβου. Ακολουθούν οι ακριβείς συντεταγμένες του σημείου αιχμής, στο πίνακα 5:

Συντεταγμένες σημείου αιχμής			
Κόμβος Μεταμόρφωσης		Κόμβος Αγίου Στεφάνου	
Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
38,068600	23,759700	38,137700	23,842900

Πίνακας 5 Συντεταγμένες σημείου αιχμής

Τέλος, ορίζονται δύο ακόμα σημεία για κάθε κόμβο. Αυτά είναι **η αρχή της καμπύλης και το πέρας της καμπύλης**, μετά τη περιοχή μερισμού (controlling curve). Τα παραπάνω σημεία προκύπτουν σχηματικά, σύμφωνα με τη γεωμετρία των κόμβων.

Αρχικά παρουσιάζονται τα σημεία αρχής καμπύλης. **Το σημείο αρχής** της καμπύλης σε συνδετήριο κλάδο εξόδου αυτοκινητοδρόμου ορίζεται ως **η θέση όπου ολοκληρώνεται η μετάβαση από την ευθύγραμμη πορεία της κύριας οδού στη νέα γεωμετρική χάραξη του συνδετηρίου κλάδου**. Ακολουθεί ο πίνακας 6:

Συντεταγμένες σημείου αρχής καμπύλης			
Κόμβος Μεταμόρφωσης		Κόμβος Αγίου Στεφάνου	
Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
38,06859	23,759225	38,137996	23,84279

Πίνακας 6 Συντεταγμένες σημείου αρχής καμπύλης

Ακολουθούν τα σημεία πέρατος της καμπύλης. Το σημείο πέρατος της καμπύλης (End of Ramp Controlling Curve) **αποτελεί τη γεωμετρική και λειτουργική έξοδο της ράμπας**, όπου ο οδηγός ολοκληρώνει την μεταβολή πορείας και σταθεροποιεί την ταχύτητα σύμφωνα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες του νέου τμήματος. Ακολουθεί ο πίνακας 7, με τις αναλυτικές συντεταγμένες του σημείου πέρατος της καμπύλης:

Συντεταγμένες σημείου πέρατος καμπύλης			
Κόμβος Μεταμόρφωσης		Κόμβος Αγίου Στεφάνου	
Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
38,06908	23,759065	38,138393	23,843456

Πίνακας 7 Συντεταγμένες σημείου πέρατος καμπύλης

Για την εύρεση του σημείου αρχής σε κάθε μέτρηση, **υπολογίστηκε** με κατάλληλο τύπο η **απόσταση του οχήματος από το ορισμένο (κοινό) σημείο αρχής**, βάσει των συντεταγμένων GPS:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

όπου (x_1, y_1) οι συντεταγμένες του σημείου αρχής και (x_2, y_2) οι τιμές κάθε δειγματοληπτικού σημείου της μέτρησης. Με τον ίδιο τύπο **υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες του οχήματος** ενώ βρίσκεται στα: σημείο αιχμής, σημείο αρχής καμπύλης και σημείο πέρατος καμπύλης. Ακολουθεί ενδεικτικά η **μέθοδος εύρεσης του σημείου αρχής**. Για τα υπόλοιπα κρίσιμα σημεία έγινε παρόμοια διαδικασία.

Αρχικά, βρέθηκαν οι συντεταγμένες του σημείου αρχής μέσω Google Earth (βλ. πίνακα 4).

Στη συνέχεια, **εφαρμόστηκε ο παραπάνω τύπος για κάθε γραμμή δεδομένων** (ανά 0,1 δευτερόλεπτα) και **βρέθηκε η χρονική στιγμή όπου η απόσταση μεταξύ οχήματος και σημείου αρχής είναι η ελάχιστη**. Εκεί θεωρήθηκε πρακτικά ότι **το όχημα συμπίπτει με το “σημείο αρχής”**. Σύμφωνα με τα δεδομένα απόστασης, βρέθηκε η **απόσταση που έχει διανύσει το όχημα έως το σημείο αρχής**. Με βάση τα παραπάνω, κάθε μέτρηση αναπροσδιορίστηκε να ξεκινά με **t=0 στο εν λόγω σημείο**, και οι επόμενες εγγραφές ακολουθούν με τον αντίστοιχο διαδοχικό χρονικό βηματισμό (0.1s, 0.2s ...).

Η παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζει τη κοινή αρχή όλων των μετρήσεων με μικρό περιθώριο σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατή η αξιόπιστη σύγκριση και επεξεργασία των δεδομένων. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τον εντοπισμό των υπόλοιπων κρίσιμων σημείων. **Όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν ως αφετηρία το κοινό σημείο αρχής**.

4.2 Ανάλυση Προφίλ Ταχύτητας

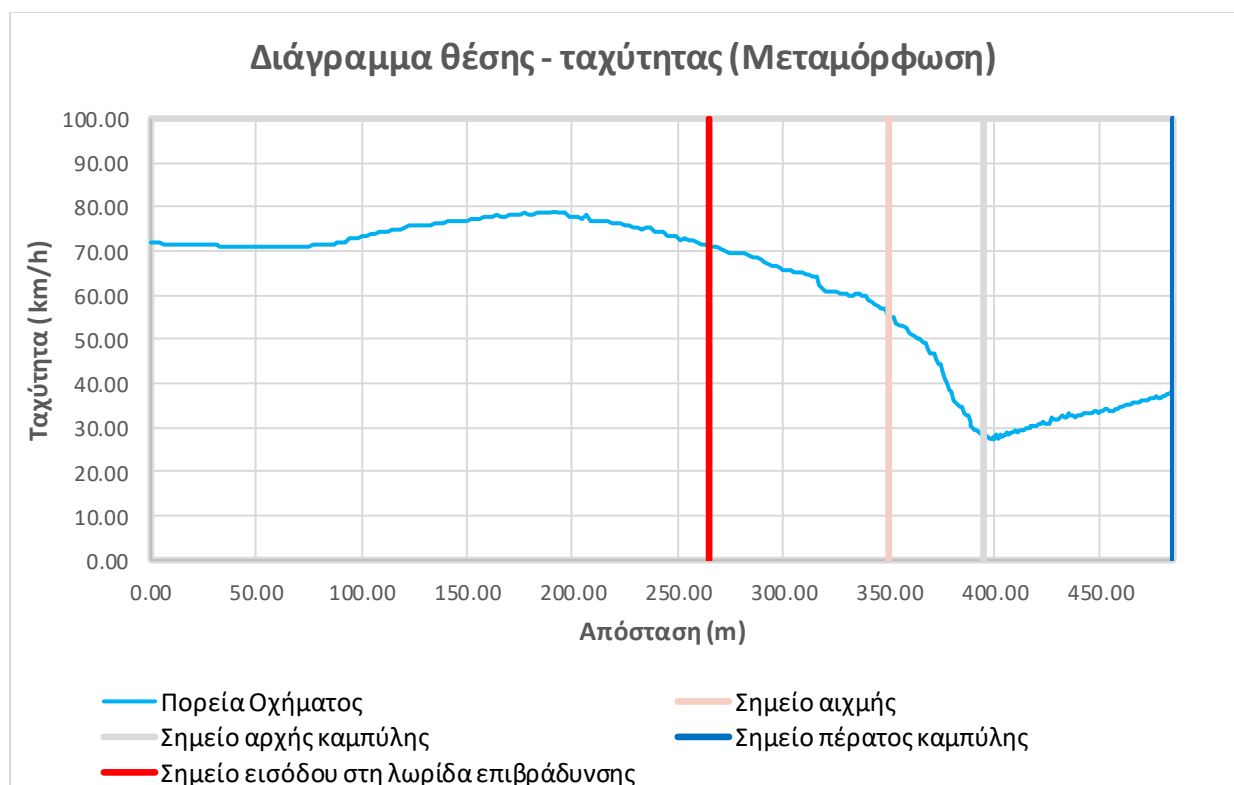
Αρχικά, σε μια πρώτη φάση της ανάλυσης, **δημιουργείται ένα διάγραμμα θέσης-ταχύτητας προκειμένου να επιτευχθεί οπτική αξιολόγηση των δεδομένων**. Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που συλλέχθηκαν, η παρουσίαση όλων των διαγραμμάτων για κάθε συμμετέχοντα θα έκανε το κείμενο υπερβολικά εκτενές και δύσκολο στην παρακολούθηση, χωρίς να προσφέρει ουσιαστική αξία στην ανάλυση. Για τον λόγο αυτό, στο βασικό μέρος της εργασίας **παρατίθενται επιλεγμένα, ενδεικτικά διαγράμματα που απεικονίζουν με σαφήνεια τα κύρια χαρακτηριστικά της οδηγικής συμπεριφοράς που παρατηρήθηκαν**. Επιπλέον, δίνονται συγκεντρωτικά διαγράμματα όπου συνοψίζονται οι

γενικές τάσεις από όλες τις μετρήσεις. Για τη κατασκευή των διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις στήλες της «απόστασης» και της «ταχύτητας».

4.2.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης

Ακολουθεί η εικόνα 4, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της απόστασης για τον Κόμβο Μεταμόρφωσης. Οι οδηγοί φαίνεται να εισέρχονται στη λωρίδα με ταχύτητες περίπου **70–75 km/h** και στην αρχή παρατηρείται μια **ήπια αύξηση** έως και τα **78 km/h** περίπου στο σημείο των **200 m**. Στη συνέχεια καταγράφεται **σταδιακή μείωση** της ταχύτητας, η οποία γίνεται πιο έντονη μετά τα **300 m**.

Η μεγαλύτερη πτώση εμφανίζεται μεταξύ **350–400 m**, όπου η ταχύτητα μειώνεται απότομα, φτάνοντας ακόμη και τα **25 km/h**. Μετά το σημείο αυτό ακολουθεί μια μικρή ανάκαμψη, με σταθεροποίηση γύρω στα **40 km/h** έως το τέλος της καμπύλης.



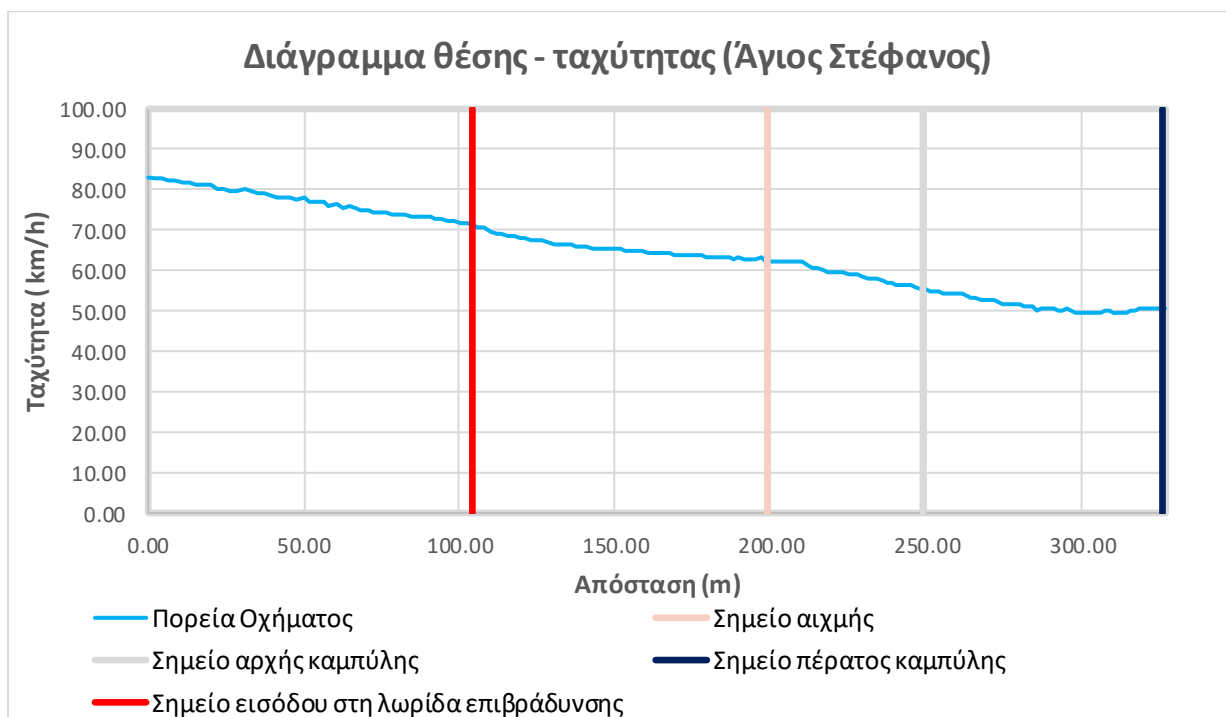
Εικόνα 4 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Μεταμόρφωση)

Η τάση αυτή επιβεβαιώνεται και από τις υπόλοιπες μετρήσεις, καθώς παρουσιάζεται συχνά το εν λόγω φαινόμενο. Από την παρατήρηση αυτή προκύπτει η υπόθεση ότι προκύπτει ότι στην εν λόγω περιοχή απαιτείται η λήψη ειδικών μέτρων ενίσχυσης της οδικής ασφάλειας (πχ. επισήμανση ορίου ταχύτητας, εγκάρσιες ραβδώσεις ακουστικής προειδοποίησης). Ως αποτέλεσμα της υφιστάμενης κατάστασης, οι οδηγοί αναγκάζονται να μειώσουν απότομα την ταχύτητά τους στη μέση της στροφής, γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και ενδεχόμενης μελέτης βελτίωσης του γεωμετρικού σχεδιασμού του οδικού τμήματος.

4.2.2 Κόμβος Αγίου Στεφάνου

Με παρόμοιο σκεπτικό κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για τον κόμβο του Άγιου Στέφανου. Παρατηρείται ότι οι οδηγοί εισέρχονται στη λωρίδα επιβράδυνσης με ταχύτητα περίπου **85 km/h**, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μια σχετικά **ομαλή μείωση**. Η ταχύτητα σταθεροποιείται κοντά στα **50 km/h** μετά από απόσταση περίπου **320–350 m**, όπου ολοκληρώνεται η διαδικασία επιβράδυνσης.

Η μορφή της καμπύλης δείχνει ότι η επιβράδυνση δεν είναι απότομη, αλλά κατανέμεται προοδευτικά σε όλο το μήκος της λωρίδας, με μια πιο έντονη μείωση να παρατηρείται στο διάστημα **200–270 m**. Σε σύγκριση με τον Κόμβο Μεταμόρφωσης, το προφίλ ταχύτητας στον Κόμβο Αγίου Στεφάνου **εμφανίζεται πιο σταθερό**, γεγονός που πιθανόν συνδέεται με **τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις κυκλοφοριακές συνθήκες του συγκεκριμένου κόμβου**. Ακολουθεί η εικόνα 5, όπου φαίνεται γραφικά η μεταβολή της ταχύτητας μιας τυπικής μέτρησης.



Εικόνα 5 Τυπικό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Άγιος Στέφανος)

Η ομαλή μορφή του διαγράμματος ταχύτητας σε σχέση με τη θέση υποδηλώνει ότι οι περισσότεροι οδηγοί επιβραδύνουν σταθερά και ομαλά κατά την είσοδό τους στη λωρίδα επιβράδυνσης. Αυτό υποδεικνύει ομαλή και ελεγχόμενη συμπεριφορά οδήγησης, η οποία συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου ατυχημάτων και βελτιώνει τη ροή της κυκλοφορίας. **Η ομαλή επιβράδυνση αποδίδεται στη σωστή γεωμετρική διαμόρφωση και επάρκεια μήκους της λωρίδας επιβράδυνσης**, που επιτρέπει στους οδηγούς να προσαρμόσουν τη ταχύτητά τους με ασφάλεια και άνεση.

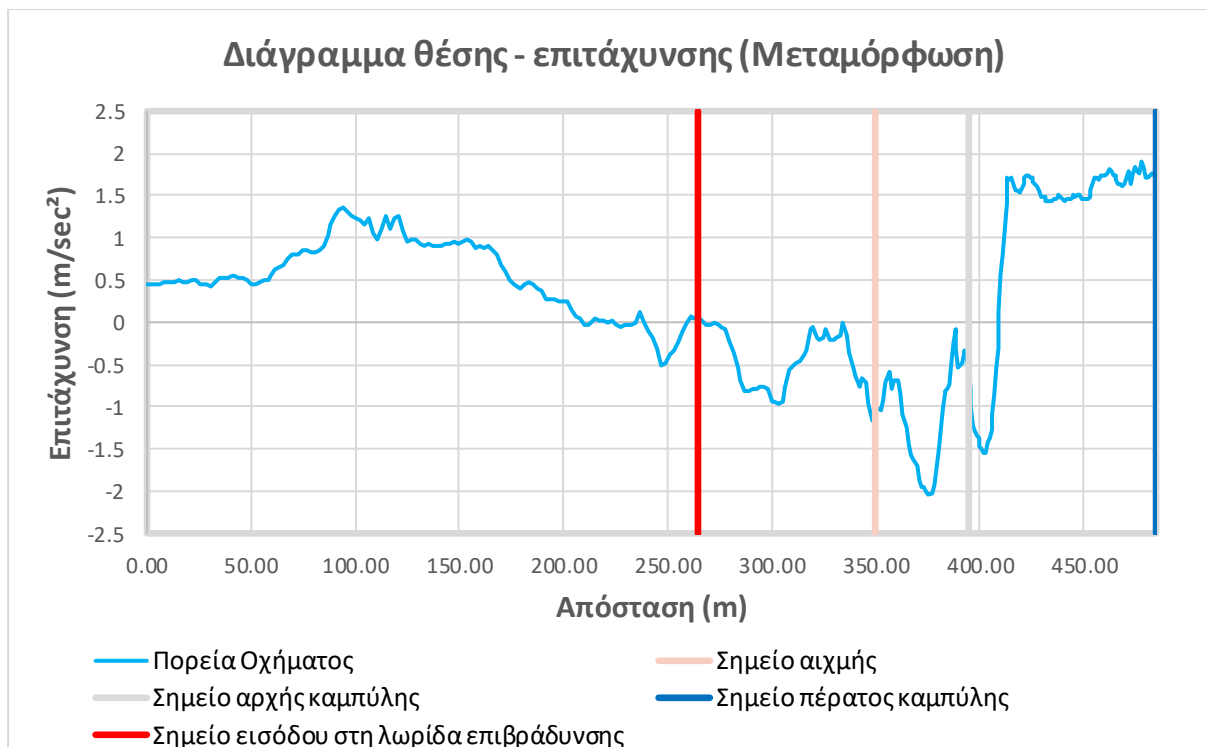
Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα θέσης–ταχύτητας, διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά των οδηγών στον Κόμβο Αγίου Στεφάνου χαρακτηρίζεται από **σταδιακή και σχετικά ομαλή μείωση της ταχύτητας**, με την επιβράδυνση να κατανέμεται σε όλο το μήκος της λωρίδας. Αντίθετα, στον Κόμβο Μεταμόρφωσης καταγράφεται μια **σχετικά περίπλοκη διαδικασία κίνησης οχημάτων**, με αρχική μικρή αύξηση της ταχύτητας, στη συνέχεια ήπια μείωση και τέλος μια **απότομη επιβράδυνση** στο τμήμα 350–400 m, όπου οι ταχύτητες μειώνονται έως και στα 25 km/h πριν επανέλθουν ελαφρώς. Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο κόμβων, όπως τις ακτίνες καμπυλότητας, το μήκος και πλάτος της λωρίδας επιβράδυνσης και την ορατότητα που έχει ο οδηγός.

4.3 Ανάλυση Προφίλ Επιτάχυνσης

Η ανάλυση της κίνησης ενός οχήματος κατά μήκος μιας διαδρομής μπορεί να εμπλουτιστεί μέσω της **χρήσης διαγραμμάτων που συσχετίζουν τη θέση του οχήματος με την επιτάχυνσή του**. Το διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο, καθώς παρέχει πληροφορίες για το **πώς μεταβάλλεται η επιτάχυνση σε διαφορετικά σημεία της διαδρομής**. Μέσα από αυτή την προσέγγιση, είναι δυνατή η ταυτοποίηση περιοχών όπου το όχημα επιταχύνει ή επιβραδύνει απότομα. Έτσι, το διάγραμμα αυτό συμβάλλει στην κατανόηση της συμπεριφοράς του οχήματος εντός του χώρου κίνησης και στην αξιολόγηση κρίσιμων σημείων της διαδρομής. Αξίζει να αναφερθεί πως τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτουν από μια μέτρηση. Για να διασφαλιστεί πως τα παραδείγματα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά, **τα αποτελέσματα διασταυρώθηκαν με πλήθος υπολοίπων μετρήσεων και επιβεβαιώθηκε πως προσεγγιστικά μπορούμε να θεωρήσουμε τα συγκεκριμένα παραδείγματα ικανά να προβάλουν την εικόνα του κόμβου**.

4.3.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης

Αφού προηγήθηκε η **μετατροπή των μονάδων** μέτρησης της επιτάχυνσης, **από G που προκύπτει από τη μέτρηση, σε μέτρα ανά δευτερόλεπτα² (m/sec²)**, συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα επιτάχυνσης και θέσεις για να δημιουργηθούν τα παρακάτω διαγράμματα. Ακολουθεί η εικόνα 6, όπου απεικονίζει τη μεταβολή της επιτάχυνσης ενός οχήματος σε μια τυπική μέτρηση.



Εικόνα 6 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)

Από το διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις της επιτάχυνσης κατά μήκος της διαδρομής. Σε ορισμένα τμήματα, η επιτάχυνση γίνεται απότομα αρνητική, γεγονός που υποδηλώνει ότι το όχημα επιβραδύνει σημαντικά σε συγκεκριμένες περιοχές, πιθανότητα λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της έλλειψης ορατότητας, όπως προέκυψε κι από την αυτοψία.

Ιδιαίτερα στο διάστημα μεταξύ 300 και 400 μέτρων, σημειώνεται η εντονότερη επιβράδυνση, η οποία στη συνέχεια ακολουθείται από απότομη αύξηση της επιτάχυνσης. Αυτή η συμπεριφορά δείχνει την ύπαρξη κρίσιμων σημείων στη διαδρομή, όπου απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στην ταχύτητα, ενδεχομένως λόγω αλλαγής κλίσης ή καμπυλότητας του οδικού τμήματος. Συνολικά, το διάγραμμα αναδεικνύει τα σημεία που πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω ως προς την ασφάλεια και την άνεση της διαδρομής.

4.3.2 Κόμβος Αγίου Στεφάνου

Ακολουθεί η εικόνα 7, όπου φαίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της επιβράδυνσης μιας τυπικής μέτρησης.



Εικόνα 7 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη της επιτάχυνσης ανά θέση κατά μήκος της λωρίδας επιβράδυνσης στον κόμβο Αγίου Στεφάνου. Παρατηρείται ότι **οι τιμές της επιτάχυνσης διατηρούν αρνητικό πρόσημο σε όλη τη διαδρομή**, αποτυπώνοντας τη φάση της επιβράδυνσης που χαρακτηρίζει τους οδηγούς καθώς προσεγγίζουν τον κόμβο. Εντοπίζονται ωστόσο τοπικές διακυμάνσεις με έντονα αρνητικές τιμές στο μέσο περίπου της ζώνης, ακολουθούμενες από περιόδους μικρότερης επιβράδυνσης ή και σταθεροποίησης. Σε ορισμένα σημεία, ιδίως κοντά στην αρχή και στο τέλος του διαγράμματος, σημειώνονται αυξημένες κορυφές επιβράδυνσης, γεγονός που σχετίζεται πιθανότατα με απαιτήσεις προσαρμογής της οδηγικής συμπεριφοράς, αλλαγές γεωμετρίας ή κυκλοφοριακές συνθήκες. Από την συνολική εικόνα του διαγράμματος συμπεραίνεται ότι **οι οδηγοί ακολουθούν ως επί το πλείστον μια ομαλή**, αλλά όχι απόλυτα σταθερή διαδικασία επιβράδυνσης, **με διαστήματα ταχύτερης προσαρμογής της ταχύτητας** σε συγκεκριμένες θέσεις της διαδρομής.

Η **συγκριτική ανάλυση των δύο διαγραμμάτων επιτάχυνσης** αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά των οδηγών ανάμεσα στους δύο κόμβους. Στον κόμβο Αγίου Στεφάνου, η επιτάχυνση παραμένει κυρίως αρνητική σε όλη τη διαδρομή, αντανακλώντας μια διαρκή και ήπια επιβράδυνση, δεδομένου ότι **το σχετικό όριο άνεσης σε στεγνό οδόστρωμα ορίζεται στα 1.5 m/sec²**. Αντίθετα, στο διάγραμμα της Μεταμόρφωσης, οι τιμές επιτάχυνσης παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη διασπορά, με περιόδους θετικής

επιτάχυνσης που εναλλάσσονται με εντονότερες φάσεις φρεναρίσματος, ιδίως κοντά στο τέλος της διαδρομής.

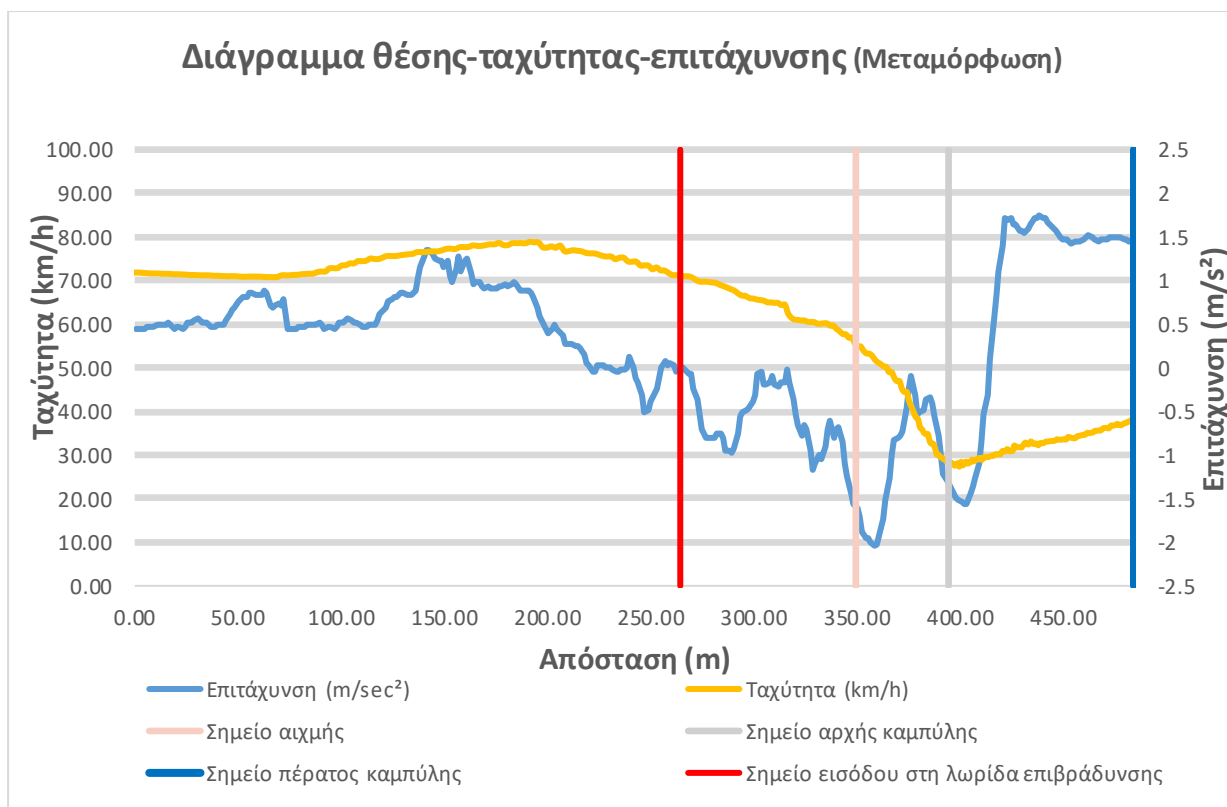
Αυτή η διαφοροποίηση υποδηλώνει ότι η γεωμετρία του κόμβου Μεταμόρφωσης απαιτεί πιο συχνές αλλά και απότομες αλλαγές στη ταχύτητα, λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του, ενώ ο κόμβος του Αγίου Στέφανου χαρακτηρίζεται από πιο σταθερή και ομαλή επιβράδυνση. Από τα δύο αυτά διαγράμματα ήδη φαίνεται πως επηρεάζεται η συνολική ασφάλεια και η άνεση των οδηγών.

4.4 Συμπληρωματικά διαγράμματα

Στο πλαίσιο της ανάλυσης, παρουσιάζονται δύο ιδιαίτερα διαγράμματα που συμβάλλουν στην πληρέστερη κατανόηση της οδηγικής συμπεριφοράς στην περιοχή της λωρίδας επιβράδυνσης.

Στο ακόλουθο διάγραμμα εξετάζεται η θέση ως προς την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Το διάγραμμα, με διπλό άξονα τεταγμένων, **συνδυάζει την ταχύτητα και την επιτάχυνση ταυτόχρονα, επιτρέποντας τη σύγκριση και ανάλυση των δύο μεταβλητών σε κοινό χρονικό ή χωρικό πλαίσιο**. Αυτή η παρουσίαση διευκολύνει την ανάδειξη σημαντικών μεταβολών στην οδηγική συμπεριφορά, όπως η ταυτόχρονη αύξηση ή μείωση των δύο μεγεθών, που θα μπορούσαν να περάσουν απαρατήρητα αν αναλύονταν ξεχωριστά. Οι τιμές της επιτάχυνσης είναι κατά βάση αρνητικές, καταδεικνύοντας μια αναμενόμενη και διαρκή διαδικασία επιβράδυνσης σε όλη τη λωρίδα, χωρίς εμφανείς φάσεις σημαντικής επιτάχυνσης.

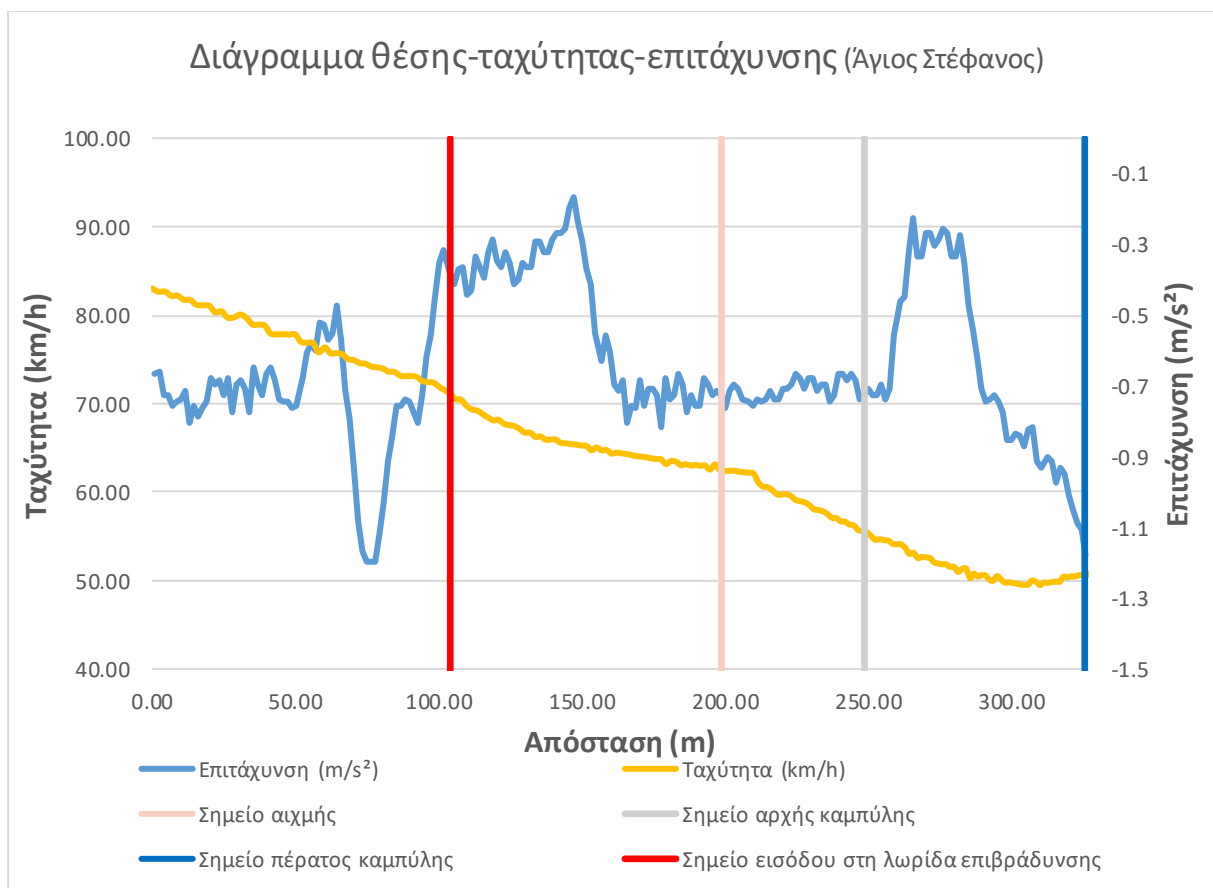
Η **σύγκριση** των δύο διαγραμμάτων επιβεβαιώνει, όπως και μέσω των διαγραμμάτων θέσης-ταχύτητας, ότι οι οδηγοί στη Μεταμόρφωση παρουσιάζουν πιο έντονα πρότυπα μεταβολής της ταχύτητας, με φάσεις επιτάχυνσης και ισχυρής επιβράδυνσης, ενδεχομένως λόγω της απότομης γεωμετρίας της οδού. Αντίθετα, στον κόμβο Αγίου Στεφάνου η διαδικασία επιβράδυνσης είναι πιο ομαλή και συνεπής, με σαφώς λιγότερες και πιο ήπιες μεταβολές στην ταχύτητα. Ακολουθεί η εικόνα 8, δηλαδή το συνδυαστικό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης για τυπική μέτρηση του κόμβου της Μεταμόρφωσης.



Εικόνα 8 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)

Στο διάγραμμα θέσης–ταχύτητας–επιτάχυνσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα του οχήματος διατηρείται σχετικά σταθερή στα πρώτα 150–200 m, σε επίπεδα περίπου 75–80 km/h, γεγονός που δείχνει ότι ο οδηγός δεν ξεκίνησε άμεσα την προσαρμογή του. Μετά το σημείο αυτό καταγράφεται σταδιακή μείωση της ταχύτητας, η οποία γίνεται εντονότερη μετά τα 300 m, όπου η καμπύλη αποκτά μεγαλύτερη κλίση. Η εικόνα αυτή συνδέεται με την αντίστοιχη μεταβολή της επιτάχυνσης: στις αρχικές αποστάσεις οι τιμές κινούνται κοντά στο μηδέν, στοιχείο που υποδηλώνει ομαλή και χωρίς σημαντικές μεταβολές κίνηση. Ωστόσο, μετά τα 250–300 m παρατηρείται εμφανής αύξηση των αρνητικών τιμών, με αποκορύφωμα την περίοδο μεταξύ 350–450 m όπου εμφανίζονται τιμές έντονης επιβράδυνσης, έως και 2 m/sec². Ακολούθως, καθώς η ταχύτητα έχει μειωθεί αρκετά, η επιτάχυνση επανέρχεται σε ηπιότερα επίπεδα και σταθεροποιείται. Μετά το σημείο αρχής της καμπύλης παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας, συνοδευόμενη από τις αντίστοιχες θετικές τιμές της επιτάχυνσης. Περίπου στα μέσα της καμπύλης σταθεροποιείται η ταχύτητα του οχήματος μέχρι και το πέρας του κόμβου.

Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι ο οδηγός καθυστέρησε την είσοδο στη φάση προσαρμογής και αναγκάστηκε να επιβραδύνει πιο απότομα κατά τη κίνηση του στη καμπύλη, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερο ομαλή και πιθανόν λιγότερο άνετη οδήγηση. Επίσης γίνεται ξεκάθαρο πως οι οδηγοί συχνά δεν αντιλαμβάνονται την απότομη στροφή του κόμβου, καθώς επιταχύνουν ενώ βρίσκονται στη καμπύλη. Ακολουθεί η εικόνα 9, όπου φαίνεται το συνδυαστικό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης.



Εικόνα 9 Τυπικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος)

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται ταυτόχρονα η θέση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση των οχημάτων που κινούνται στη λωρίδα επιβράδυνσης του κόμβου Αγίου Στεφάνου. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα παρουσιάζει σταδιακή και σχετικά ομαλή μείωση καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής, καταγράφοντας αρχικές τιμές κοντά στα 90 km/h και φτάνοντας ως και τα 40 km/h στο τέλος της καμπύλης. Παράλληλα, η επιτάχυνση κινείται σχεδόν σταθερά σε αρνητικές τιμές, αποτυπώνοντας το γενικότερο πρότυπο ήπιας επιβράδυνσης που ακολουθούν οι περισσότεροι οδηγοί.

Ο σχετικός παραλληλισμός των δύο καμπυλών υποδηλώνει ότι η μείωση της ταχύτητας γίνεται χωρίς απότομες μεταβολές στην επιτάχυνση, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη συνθηκών ομαλής προσαρμογής της κίνησης εντός του κόμβου. Τέτοιου είδους συμπεριφορά υποδηλώνει τυπικά **επαρκή γεωμετρική διαμόρφωση** της λωρίδας επιβράδυνσης και διασφαλίζει **μεγαλύτερα επίπεδα οδικής άνεσης και ασφάλειας** για τους χρήστες της οδού.

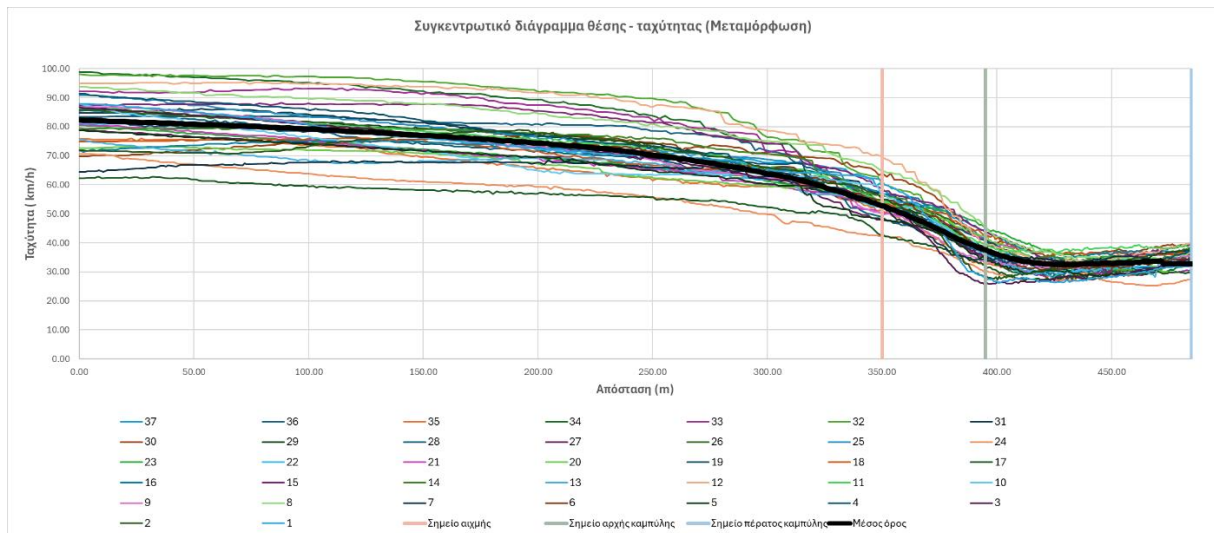
4.6 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Στο υποκεφάλαιο των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, παρουσιάζεται ένα ενιαίο διάγραμμα όπου έχουν αποτυπωθεί όλες οι μεμονωμένες μετρήσεις του δείγματος. Σε αυτό το συγκεντρωτικό γράφημα απεικονίζονται τα διαγράμματα θέσης-ταχύτητας καθώς και τα διαγράμματα θέσης-επιτάχυνσης κάθε συμμετέχοντα, επιτρέποντας τη σύγκριση των διαφορετικών προτύπων οδηγικής συμπεριφοράς μέσα στο ίδιο πλαίσιο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη γραμμή που εμφανίζεται με μαύρο και έντονο πάχος, η οποία αναπαριστά τον μέσο όρο των μετρήσεων και αποτυπώνει τις γενικές τάσεις του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτή η ταυτόχρονη απεικόνιση όλων των παρατηρούμενων συμπεριφορών καθώς και η ανάδειξη του τυπικού μοτίβου που επικρατεί, διευκολύνοντας την ερμηνεία και τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

4.6.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης

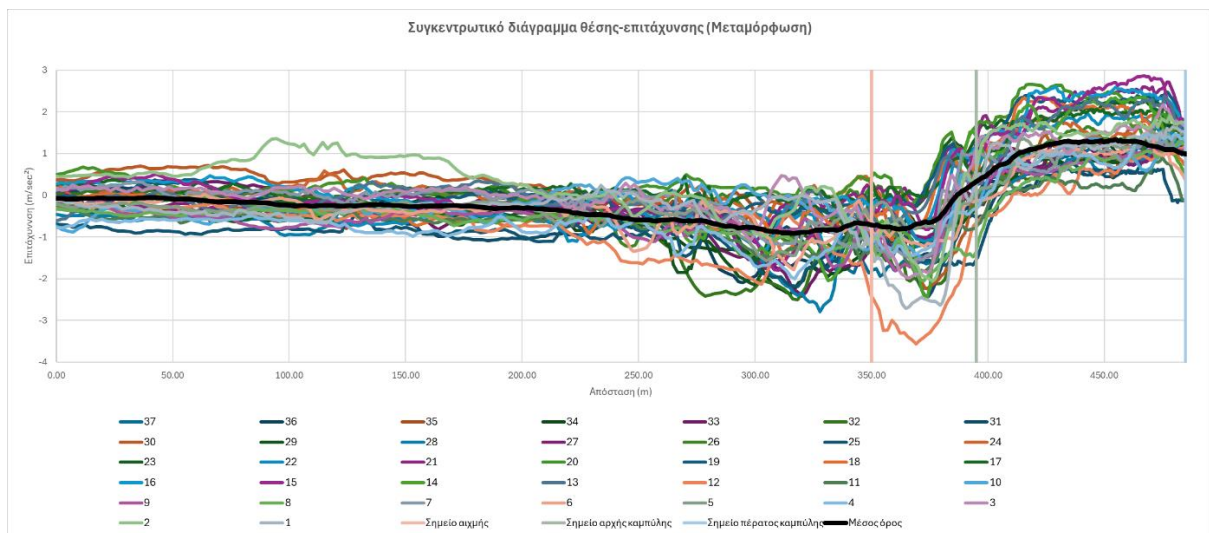
Το συγκεντρωτικό αυτό διάγραμμα για τον κόμβο της Μεταμόρφωσης απεικονίζει τη μεταβολή της ταχύτητας σε συνάρτηση με τη θέση για όλες τις επιμέρους μετρήσεις οδηγών, με την έντονη μαύρη γραμμή να αναπαριστά τη μέση τιμή. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των οδηγών ξεκινά τη λωρίδα επιβράδυνσης με υψηλές ταχύτητες (κοντά στα 90-100 km/h), οι οποίες **σταδιακά, αλλά όχι ομοιόμορφα**, μειώνονται όσο προχωρούν προς το τέλος της διαδρομής. Οι κατά τόπους κατακόρυφες γραμμές υποδεικνύουν κρίσιμα σημεία της λωρίδας (σημείο αιχμής, σημείο αρχής καμπύλης και σημείο πέρατος καμπύλης), όπου παρατηρούνται και μικρές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά μεταξύ των οδηγών.

Η διασπορά των γραμμών δείχνει και την ποικιλία στον τρόπο που προσαρμόζει ο κάθε οδηγός την ταχύτητα του, ωστόσο η γενική τάση παραμένει σαφής: υπάρχει ομαλή, αλλά και έντονη, μείωση της ταχύτητας πριν το τελικό τμήμα της λωρίδας. Η μέση γραμμή υποδηλώνει ότι τα περισσότερα οχήματα ακολουθούν σχετικά κοινότυπο πρότυπο, με διαφοροποιήσεις γύρω από βασικά σημεία αλλαγής γεωμετρίας — στοιχείο που δίνει κρίσιμες πληροφορίες για το πώς αντιδρούν οι οδηγοί στη γεωμετρία και το μήκος της συγκεκριμένης λωρίδας. Ακολουθεί η εικόνα 10, που δείχνει τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων και τη γενική τάση στη μεταβολή της ταχύτητας.



Εικόνα 10 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Μεταμόρφωση)

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε το αντίστοιχο συγκεντρωτικό διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης για τον κόμβο. Όπως και προηγουμένως, φαίνονται οι διαφορές μεταξύ μετρήσεων καθώς και η γενική τάση (μέσος όρος) της μεταβολής της επιβράδυνσης για τον κόμβο. Ακολουθεί η εικόνα 11, που συνοψίζει τα αποτελέσματα της επιβράδυνσης όλων των μετρήσεων.



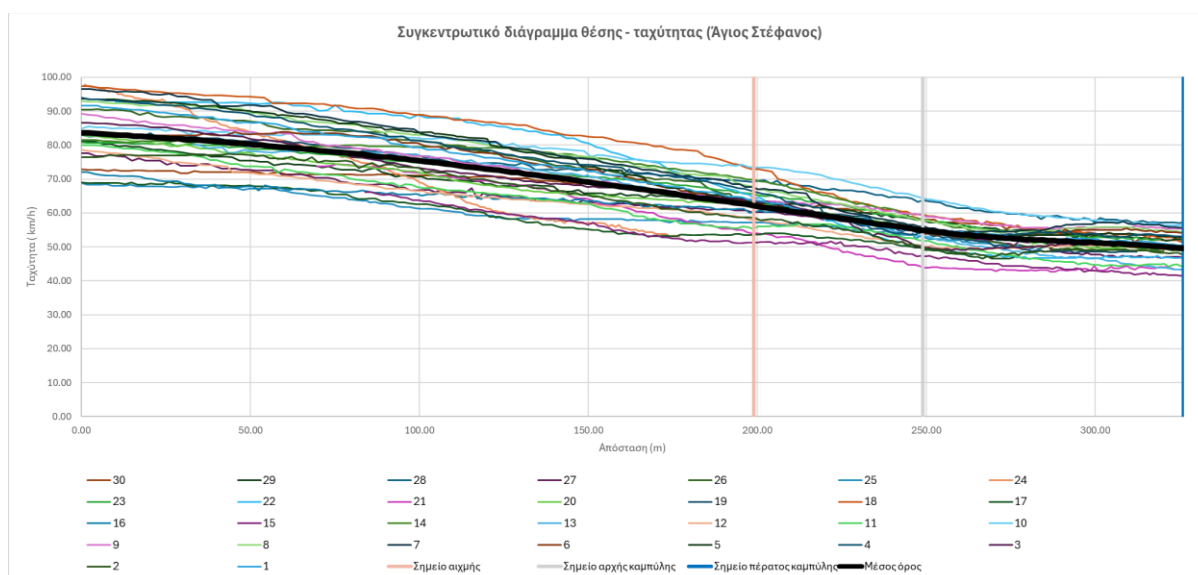
Εικόνα 11 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Μεταμόρφωση)

4.6.2 Κόμβος Αγίου Στέφανου

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα θέσης-ταχύτητας και θέσης-επιτάχυνσης για όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον κόμβο του Αγίου Στεφάνου. Κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει την πορεία ενός οδηγού, ενώ με έντονη μαύρη γραμμή έχει αποτυπωθεί η μέση τιμή όλων των μετρήσεων, ώστε να προκύψει ένα αντιπροσωπευτικό προφίλ συμπεριφοράς. Η γενική τάση καταδεικνύει ότι οι οδηγοί

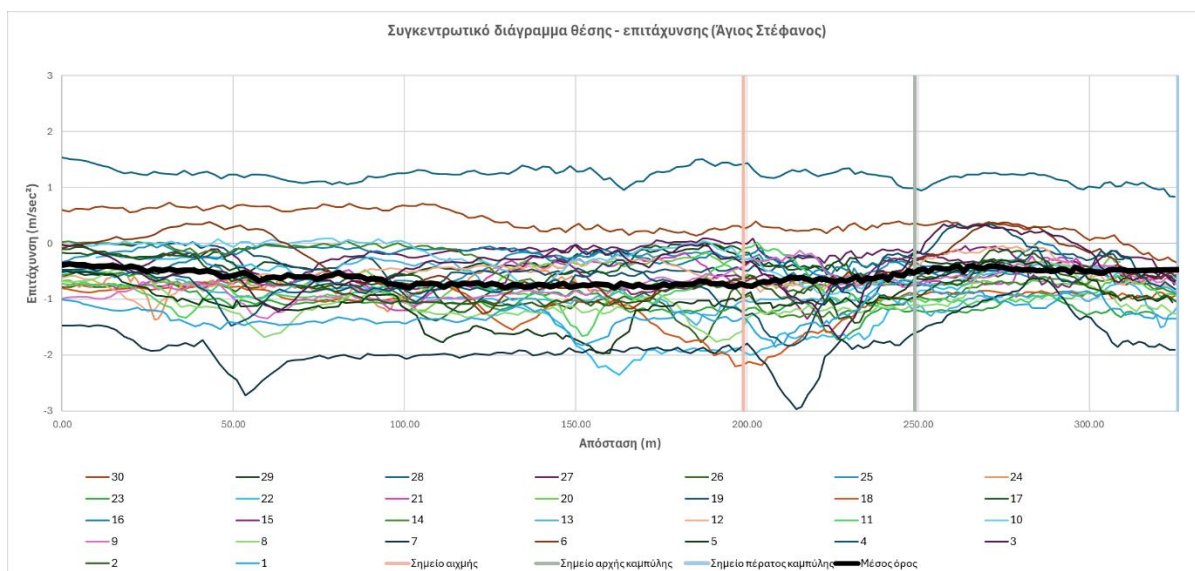
ξεκινούν την πορεία τους στη λωρίδα επιβράδυνσης με ταχύτητες που κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 90 και 100 km/h και σταδιακά μειώνουν την ταχύτητα τους όσο πλησιάζουν το τέλος της λωρίδας. Παρατηρείται διαφοροποίηση ως προς το σημείο και τον ρυθμό επιβράδυνσης: ορισμένοι οδηγοί αρχίζουν τη μείωση της ταχύτητας από τα πρώτα κιόλας μέτρα του τμήματος προσαρμογής, ενώ άλλοι παραμένουν σε υψηλότερες ταχύτητες και καθυστερούν την επιβράδυνση προς το τέλος της λωρίδας.

Η έντονη μαύρη γραμμή του μέσου όρου αποτυπώνει μια σχετικά ομαλή και σταθερή μείωση της ταχύτητας, χωρίς απότομες μεταβολές, στοιχείο που υποδηλώνει την επικράτηση μιας γενικής οδηγικής συμπεριφοράς προσαρμογής στην γεωμετρία της εξόδου. Η παρουσία ωστόσο αρκετών αποκλίσεων γύρω από αυτήν τη μέση τιμή αποδεικνύει τις ατομικές διαφοροποιήσεις μεταξύ οδηγών, τόσο ως προς την αρχική ταχύτητα εισόδου όσο και ως προς το σημείο έναρξης της επιβράδυνσης. Συνολικά, το συγκεντρωτικό διάγραμμα προσφέρει μια σαφή εικόνα της ποικιλίας των στρατηγικών που υιοθετούν οι οδηγοί στον συγκεκριμένο κόμβο, αλλά και των κοινών μοτίβων που αναδεικνύονται μέσα από τον μέσο όρο. Ακολουθεί η εικόνα 12, με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για τον εξεταζόμενο κόμβο:



Εικόνα 12 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-ταχύτητας (Άγιος Στέφανος)

Αντιστοίχως, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα θέσης – επιτάχυνσης, συνοψίζοντας τα στοιχεία επιβράδυνσης από όλες τις μετρήσεις. Και σε αυτή τη περίπτωση γίνεται φανερή η γενική τάση των οδηγών να έχουν σχετικά ομαλή επιβράδυνση κατά την είσοδο τους στον ανισόπεδο κόμβο. Μέσω του διαγράμματος, η γενική τάση φαίνεται να έχει τόσο μικρή διακύμανση που μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Ακολουθεί η εικόνα 13, που δείχνει τη σύνοψη όλων των μετρήσεων, που αφορούν τα στοιχεία επιβράδυνσης των οχημάτων.



Εικόνα 13 Συγκεντρωτικό Διάγραμμα θέσης-επιτάχυνσης (Άγιος Στέφανος)

Η **σύγκριση** των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων θέσης-ταχύτητας και θέσης-επιτάχυνσης για τους δύο κόμβους αναδεικνύει σημαντικές διαφορές στην οδηγική συμπεριφορά, οι οποίες αποδίδονται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε εξόδου. Στον κόμβο της Μεταμόρφωσης, όπου η ακτίνα της καμπύλης είναι μόλις **28 m**, οι οδηγοί αναγκάζονται να μειώσουν ουσιαστικά την ταχύτητά τους κατά την είσοδο στη καμπύλη. Η γεωμετρία της εξόδου καταδεικνύει έντονη και σχετικά έγκαιρη επιβράδυνση, με αποτέλεσμα η μέση γραμμή να εμφανίζει απότομη πτώση. Αντιθέτως, στον κόμβο του Αγίου Στεφάνου, η σημαντικά μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας (**110 m**) επιτρέπει την ομαλότερη είσοδο στην καμπύλη, δίνοντας τη δυνατότητα στους οδηγούς να διατηρήσουν υψηλότερες ταχύτητες για μεγαλύτερο μέρος της λωρίδας. Η μέση γραμμή στον κόμβο αυτόν ακολουθεί μια πιο σταδιακή μείωση, γεγονός που φανερώνει ηπιότερη και πιο ομοιόμορφη προσαρμογή.

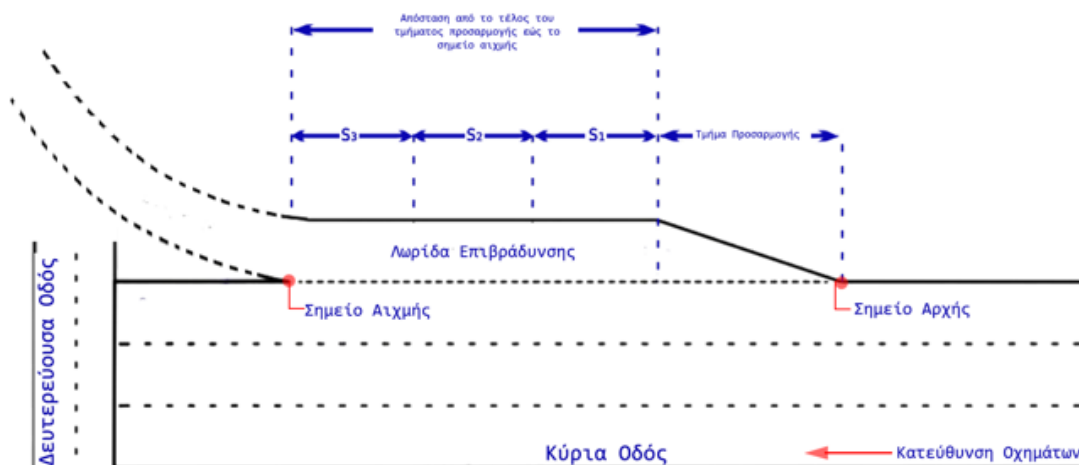
Επιπλέον, το συνολικό μήκος της λωρίδας επιβράδυνσης διαφοροποιεί περαιτέρω τη συμπεριφορά. Στη Μεταμόρφωση, όπου η λωρίδα φτάνει τα **349 m**, οι οδηγοί έχουν περισσότερο χώρο να κατανεύμουν την επιβράδυνση, κάτι που δεν συμβαίνει καθώς οι οδηγοί επιβραδύνουν σημαντικά μετά το πέρας της λωρίδας επιβράδυνσης. Από την άλλη, στον Άγιο Στέφανο, με μήκος λωρίδας επιβράδυνσης μόλις **199 m**, όπου οι οδηγοί διαθέτουν μικρότερη απόσταση για να προσαρμόσουν κατάλληλα τη ταχύτητα τους, φαίνεται να το επιβραδύνουν με μεγαλύτερη άνεση και ομοιομορφία.

4.7 Απόσταση και ταχύτητα εξόδου

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η **ανάλυση της συμπεριφοράς των οδηγών κατά την αλλαγή λωρίδας** από τη λωρίδα ροής της Εθνικής Οδού προς τη λωρίδα

επιβράδυνσης. Για κάθε μέτρηση καταγράφηκε η απόσταση που έχει μεσολαβήσει από το σημείο αρχής έως το σημείο αλλαγής λωρίδας καθώς και η ταχύτητα του οχήματος τη στιγμή που πραγματοποιείται η αλλαγή λωρίδας. Η λωρίδα επιβράδυνσης χωρίστηκε σε συγκεκριμένα τμήματα ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση της θέσης όπου οι οδηγοί εισέρχονται σε αυτή.

Συγκεκριμένα, το πρώτο τμήμα, ονομαζόμενο **τμήμα προσαρμογής (taper)** της λωρίδας επιβράδυνσης, και αναφέρεται στο τμήμα συναρμογής όπου η λωρίδα αρχίζει να σχηματίζεται με σταδιακή αύξηση του πλάτους της έως ότου καταλήξει σε κανονική λωρίδα επιβράδυνσης. Το υπόλοιπο μήκος της λωρίδας επιβράδυνσης διαιρέθηκε σε τρία ίσα μέρη, τα οποία ονομάστηκαν **s1, s2 και s3**. Με βάση την απόσταση εισόδου κάθε οδηγού στην επιβραδυνόμενη λωρίδα, αυτοί κατατάχθηκαν στο αντίστοιχο τμήμα (taper, s1, s2 ή s3). Από την ταξινόμηση αυτή προκύπτουν τα ποσοστά των οδηγών που επιλέγουν να εισέλθουν σε κάθε τμήμα της λωρίδας επιβράδυνσης. Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα αναλυτικό διάγραμμα που απεικονίζει γραφικά αυτή τη διαδικασία, διευκολύνοντας την οπτική κατανόηση της κατανομής των οδηγών κατά μήκος της λωρίδας. Ακολουθεί η εικόνα 14, που έχει σκοπό να ορίσει τις απαραίτητες αποστάσεις για τη συνέχεια.

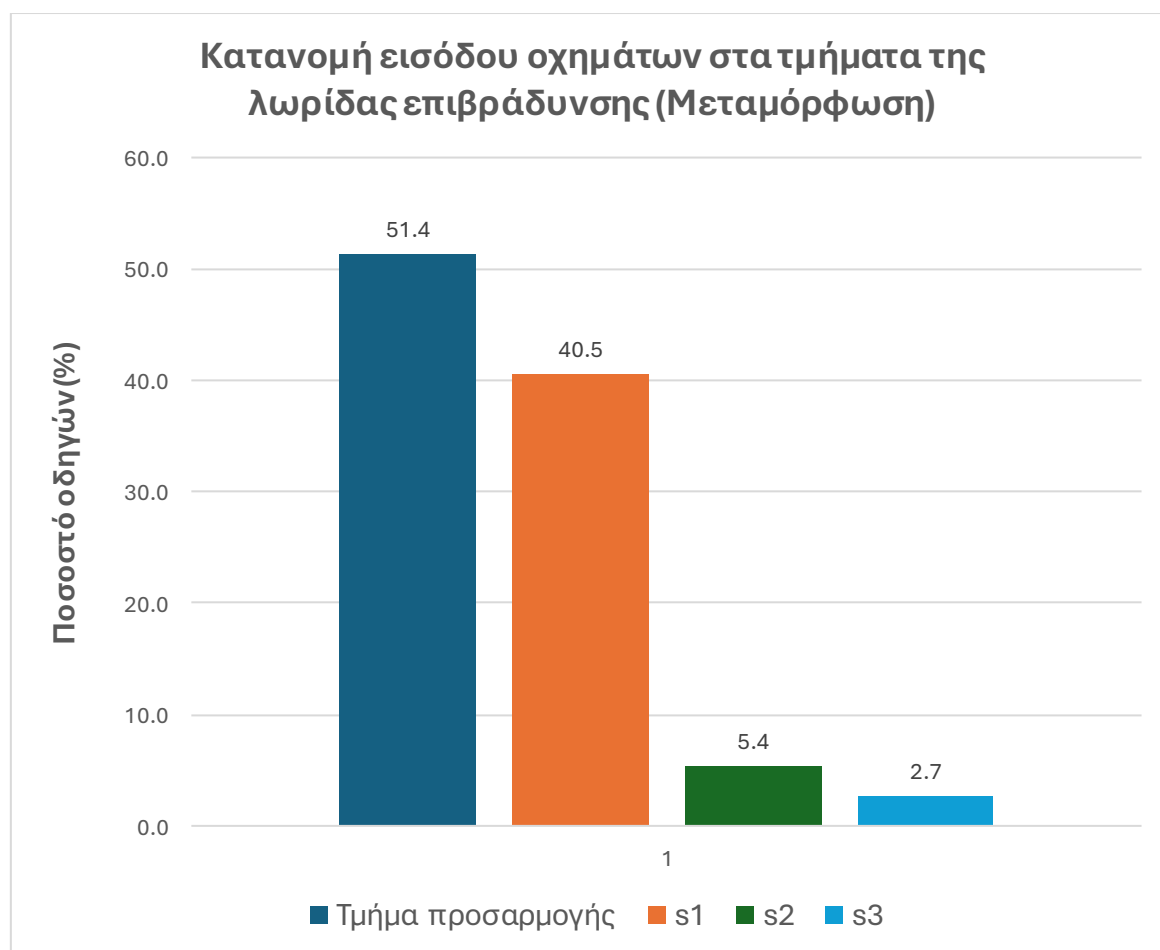


Εικόνα 14 Σκαρίφημα Τυπικού Ανισόπεδου Κόμβου

4.7.1 Κόμβος Μεταμόρφωσης

Στη προκειμένη περίπτωση, το τμήμα συναρμογής (**taper**) υπολογίστηκε ίσο με **64 μέτρα**, ενώ η υπόλοιπη λωρίδα επιβράδυνσης μήκους 285 μέτρων, διαιρέθηκε σε **τρία ίσα μέρη**, έκαστο μήκους **95 μέτρων**. Σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά τις μετρήσεις, δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας, όπου κατανέμονται οι οδηγοί βάσει τα τμήματα στα

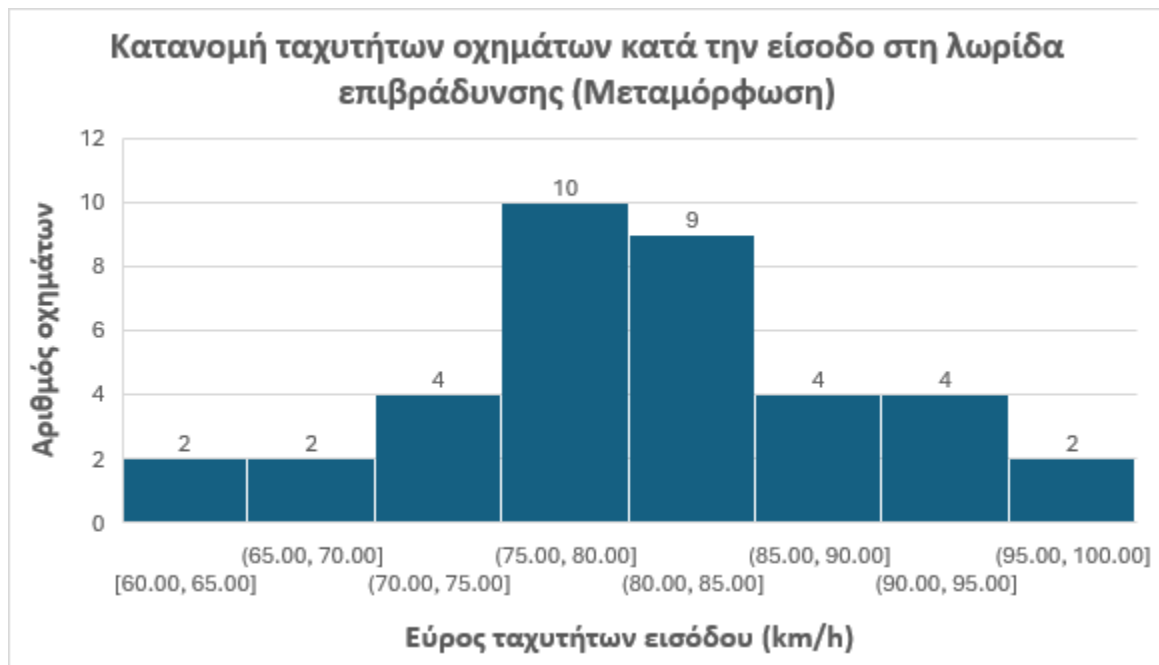
οποία εισήλθαν στη λωρίδα επιβράδυνσης. Ακολουθεί η εικόνα 15, που περιέχει τα παραπάνω:



Εικόνα 15 Κατανομή Οχημάτων Κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Μεταμόρφωση)

Αναλύοντας το διάγραμμα που απεικονίζει την κατανομή εισόδου των οχημάτων στα επιμέρους τμήματα της λωρίδας επιβράδυνσης, παρατηρείται ότι περισσότεροι από τους μισούς οδηγούς εισέρχονται στη λωρίδα ήδη από το τμήμα προσαρμογής, ενώ σημαντικό ποσοστό (άνω του 40%) αλλάζει λωρίδα στο πρώτο τμήμα (s1) της επιβραδυνόμενης λωρίδας. Τα ποσοστά μειώνονται σημαντικά για τα επόμενα τμήματα (s2 και s3), με πολύ μικρό αριθμό οδηγών να επιλέγουν να εισέλθουν τόσο αργά στη λωρίδα. Το μοτίβο αυτό δείχνει ότι η πλειονότητα των οδηγών προτιμά να πραγματοποιεί την αλλαγή λωρίδας νωρίς, είτε αμέσως μόλις δημιουργηθεί το τμήμα προσαρμογής είτε στα πρώτα μέτρα της λωρίδας επιβράδυνσης, γεγονός που ενδέχεται να σχετίζεται με αντιλήψεις ασφάλειας, ορατότητα ή άνεση στη διαδικασία επιβράδυνσης. Αντίθετα, η περιορισμένη επιλογή των μεταγενέστερων τμημάτων υποδηλώνει ότι η καθυστερημένη αλλαγή λωρίδας είναι λιγότερο διαδεδομένη. Μέσω της διαδικασίας των μετρήσεων παρατηρήθηκε πως δεν υφίσταται επαρκής σήμανση που να προϊδεάζει τον οδηγό για την επικείμενη αυξημένης καμπυλότητας έξοδο.

Παράλληλα, εξετάστηκαν οι ταχύτητες των οδηγών τη στιγμή της εισόδου στη λωρίδα επιβράδυνσης, με τη χρήση διαγράμματος. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται το πλήθος των οδηγών που επιλέγουν κάθε ταχύτητα κατά τη στιγμή της αλλαγής λωρίδας, παρέχοντας πολύτιμες ενδείξεις για τα πρότυπα οδήγησης και τις δυναμικές συμπεριφορές σε αυτό το κρίσιμο σημείο της διαδρομής. Ακολουθεί η εικόνα 16, με τα παραπάνω αποτελέσματα:



Εικόνα 16 Κατανομή Ταχυτήτων Οχημάτων κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Μεταμόρφωση)

Από το διάγραμμα της κατανομής ταχυτήτων κατά την είσοδο στη λωρίδα επιβράδυνσης παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των οδηγών επιλέγει να εισέλθει στη λωρίδα με ταχύτητες μεταξύ 75 και 85 km/h, γεγονός που υποδηλώνει ότι προτιμάται μια σχετικά υψηλή ταχύτητα εισόδου πριν ξεκινήσει η διαδικασία επιβράδυνσης. Οι ακραίες τιμές, τόσο χαμηλότερες όσο και υψηλότερες ταχύτητες εισόδου, φαίνεται να υιοθετούνται από μικρό αριθμό οδηγών, οι οποίοι έχουν πιο συντηρητικές ή πιο επιθετικές οδηγικές συμπεριφορές. Η κατανομή υποδεικνύει ότι υπάρχει μια «τυπική» ζώνη ταχύτητας που υιοθετείται ως βέλτιστη από τους περισσότερους, ενώ η μειωμένη συχνότητα στις ακραίες κατηγορίες τιμών εμφανίζει το μικρό ποσοστό των οδηγών, οι οποίοι ξεφεύγουν από το μέσο όρο.

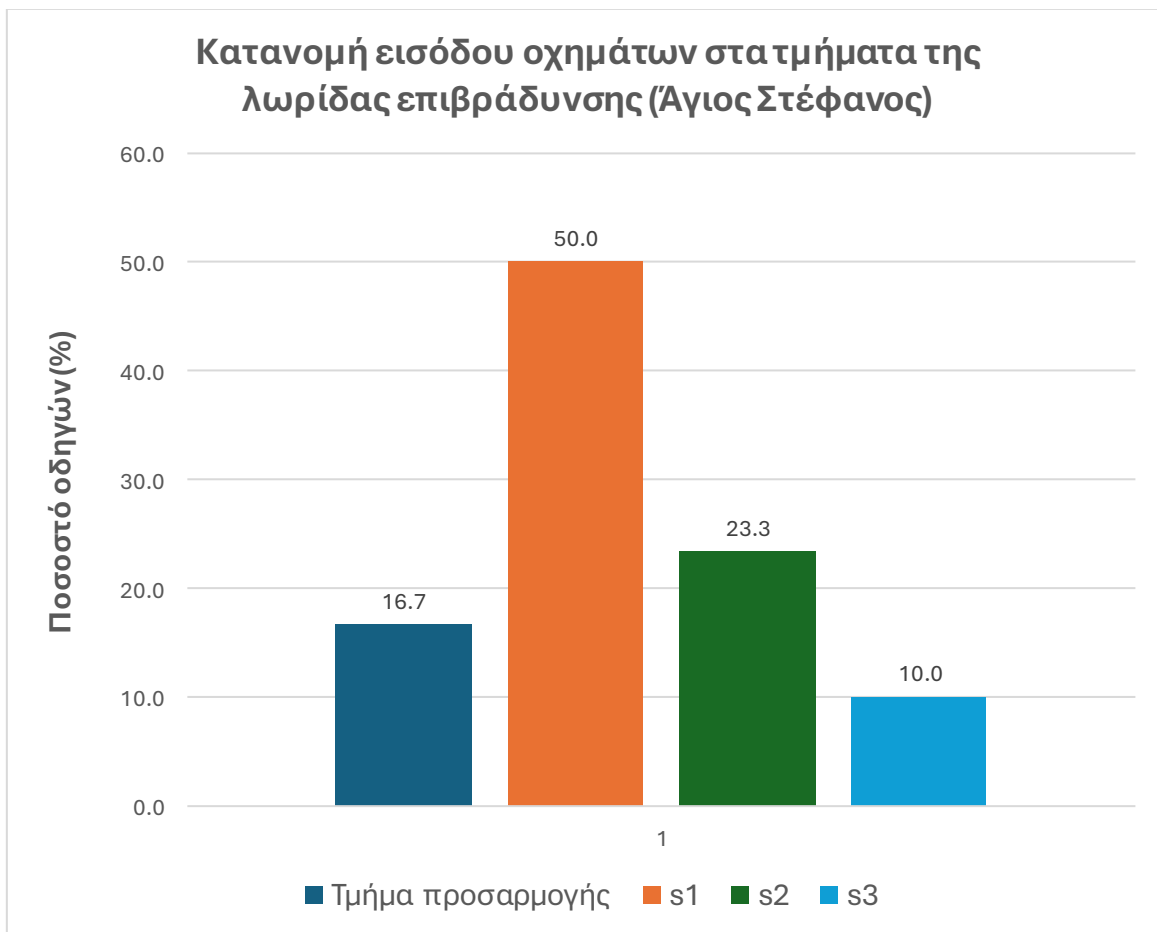
4.7.2 Κόμβος Αγίου Στέφανου

Στο Σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή των σημείων εισόδου των οχημάτων στη λωρίδα επιβράδυνσης του κόμβου Αγίου Στεφάνου, χωρισμένη σε τέσσερα τμήματα: το **τμήμα προσαρμογής**, το **s1**, το **s2** και το **s3**. Στον κόμβο αυτό, με **συνολικό μήκος λωρίδας ίσο με 199 μέτρα**, το **τμήμα προσαρμογής έχει τιμή ίση με 55 μέτρα**. Το υπόλοιπο μήκος των 155

μέτρων, χωρίζεται σε τρία ίσα μέρη των 48 μέτρων. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των οδηγών επιλέγει να εισέλθει στη λωρίδα στα τμήματα **s1** και **s2**, με ποσοστά **51,7% και 24,1%** αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό δείχνει μια σαφή προτίμηση των οδηγών να εντάσσονται στη λωρίδα επιβράδυνσης ούτε υπερβολικά νωρίς (δηλαδή στο τμήμα προσαρμογής), αλλά ούτε και υπερβολικά αργά (στο s3), αλλά σε ένα ενδιάμεσο σημείο που εξασφαλίζει επαρκή χρόνο και χώρο για την ομαλή μείωση της ταχύτητας.

Μάλιστα, στο **τμήμα προσαρμογής** εισέρχεται μόλις το **13,8%** των οδηγών, γεγονός που φανερώνει ότι η πλειονότητα θεωρεί επαρκές το μήκος της λωρίδας για ασφαλή προσαρμογή της ταχύτητας. Τέλος, μόνο το **10,3%** των οδηγών καθυστέρησε την είσοδο μέχρι το **s3**, γεγονός που μπορεί να ερμηνευτεί είτε ως στρατηγική επιλογή για διατήρηση υψηλότερης ταχύτητας στο μεγαλύτερο μέρος του αυτοκινητόδρομου είτε ως ένδειξη καθυστερημένης αντίδρασης.

Η συγκεκριμένη κατανομή καταδεικνύει ότι, για τον κόμβο Αγίου Στεφάνου, η πλειονότητα των οδηγών επιδιώκει μια ισορροπημένη στρατηγική εισόδου, που συνδυάζει ασφάλεια και άνεση, προσαρμοζόμενη στις γεωμετρικές παραμέτρους της εξόδου. Ακολουθεί η εικόνα 17, που δείχνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



Εικόνα 17 Κατανομή Οχημάτων Κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Άγιος Στέφανος)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κατανομή των ταχυτήτων των οχημάτων κατά την είσοδο τους στη λωρίδα επιβράδυνσης του κόμβου Αγίου Στεφάνου. Παρατηρείται ότι οι οδηγοί κινούνται σε ένα εύρος ταχυτήτων μεταξύ **66 km/h και 96 km/h**, με το υψηλότερο ποσοστό να εντοπίζεται στη ζώνη **76-81 km/h** (10 οδηγοί) και αμέσως μετά στη ζώνη **66-71 km/h** (6 οδηγοί) και στη ζώνη **81-86 km/h** (6 οδηγοί). Αντίστοιχα υψηλό είναι και το πλήθος των οδηγών που εισήλθαν με ταχύτητες **71-76 km/h** (5 οδηγοί).

Αντίθετα, μικρότερα ποσοστά παρατηρούνται τόσο στις χαμηλές ταχύτητες με δύο οδηγούς στο εύρος **86-91 km/h** και μόλις έναν οδηγό στο εύρος ταχυτήτων **91-96 km/h**. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι οι περισσότεροι οδηγοί επιλέγουν **μια μέτρια προς υψηλή ταχύτητα εισόδου**, η οποία αντανακλά τον σχετικά **μεγάλο βαθμό άνεσης που προσφέρει η γεωμετρία του κόμβου** (ακτίνα 110 m), χωρίς ωστόσο να παρατηρείται σημαντικός αριθμός οδηγών που εισέρχονται με ακραίες ταχύτητες.

Συνολικά, η εικόνα καταδεικνύει μια τάση συγκέντρωσης γύρω από τον μέσο όρο των ταχυτήτων, γεγονός που συνάδει με την ομαλή και σταδιακή επιβράδυνση που καταγράφηκε και στα συγκεντρωτικά διαγράμματα θέσης-ταχύτητας. Ακολουθεί η εικόνα 18, με τα αποτελέσματα των παραπάνω:



Εικόνα 18 Κατανομή Ταχυτήτων Οχημάτων κατά την Είσοδο στη Λωρίδα Επιβράδυνσης (Άγιος Στέφανος)

Η **σύγκριση** των δύο κόμβων αποκαλύπτει ουσιαστικές διαφορές στις στρατηγικές εισόδου στη λωρίδα επιβράδυνσης των οδηγών, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε εξόδου. Στον κόμβο **Μεταμόρφωσης**, όπου η ακτίνα καμπυλότητας είναι ιδιαίτερα μικρή (**28 m**), οι οδηγοί επιλέγουν να εισέλθουν στη λωρίδα επιβράδυνσης πολύ νωρίς: πάνω από το **50%** στο τμήμα προσαρμογής και περίπου το **40%** στο s1. Παράλληλα, οι ταχύτητες εισόδου συγκεντρώνονται κυρίως γύρω από τα **75–85 km/h**, ένδειξη ότι η επιβράδυνση ξεκινά νωρίς και με πιο συντηρητικό ρυθμό. Αντίθετα, στον κόμβο **Αγίου Στεφάνου**, με σαφώς μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας (**110 m**), οι οδηγοί εμφανίζουν μια διαφορετική συμπεριφορά: μόλις το **13,8%** εισέρχεται στο τμήμα προσαρμογής, ενώ τα υψηλότερα ποσοστά συγκεντρώνονται στα ενδιάμεσα τμήματα s1 και s2 (**51,7% και 24,1%** αντίστοιχα). Αντίστοιχα, οι ταχύτητες εισόδου είναι ελαφρώς υψηλότερες, με την πλειονότητα να κινείται στο εύρος **76–86 km/h**, κάτι που επιβεβαιώνει την πιο ομαλή και καθυστερημένη προσαρμογή στην καμπύλη.

Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι οι οδηγοί προσαρμόζουν την επιλογή σημείου και ταχύτητας εισόδου στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε κόμβου. Στη Μεταμόρφωση, η γεωμετρία επιβάλλει έγκαιρη είσοδο και χαμηλότερες ταχύτητες, ενώ στον Άγιο Στέφανο οι οδηγοί εκμεταλλεύονται τη μεγαλύτερη ακτίνα για να διατηρήσουν υψηλότερες ταχύτητες και να καθυστερήσουν την αλλαγή λωρίδας.

4.8 Συνολική εικόνα

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια αναλυτική προσέγγιση για την κατανόηση της συμπεριφοράς των οδηγών στη λωρίδα επιβράδυνσης, μέσα από μια σειρά από διαφορετικά διαγράμματα και μεθόδους ανάλυσης. Αρχικά μελετήθηκαν τα διαγράμματα θέσης–ταχύτητας, τόσο ξεχωριστά για κάθε συμμετέχοντα όσο και συγκεντρωτικά. Η σύγκλιση αυτών των καμπυλών ανέδειξε ένα τυπικό μοτίβο οδηγικής συμπεριφοράς, που αποτυπώνεται μέσα από τη μέση καμπύλη όλων των μετρήσεων. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η σχέση θέσης–επιτάχυνσης, η οποία καταδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο οι οδηγοί μεταβάλλουν τη ταχύτητα τους κατά την είσοδο και την κίνησή τους στη λωρίδα, καταγράφοντας πότε επιβραδύνουν πιο σταδιακά και πότε πιο απότομα. Επιπρόσθετα, η ανάλυση των σημείων εισόδου στη λωρίδα (σε τμήματα: τμήμα προσαρμογής, s1, s2, s3) επέτρεψε την κατανόηση των προτιμήσεων των οδηγών ως προς το πότε επιλέγουν να εισέλθουν στη λωρίδα επιβράδυνσης, ενώ παράλληλα η μελέτη των ταχυτήτων εισόδου έδωσε πολύτιμα στοιχεία για τις στρατηγικές που ακολουθούν. Τέλος, τα συγκεντρωτικά διαγράμματα βοηθούν στη καλύτερη οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μετρήσεων και τη γενική τάση των οδηγών στα αντίστοιχα τμήματα της οδού.

Συνολικά, τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων συνθέτουν μια πολυδιάστατη εικόνα της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς στη περιοχή εξόδου του αυτοκινητοδρόμου, αποκαλύπτοντας τόσο τα κοινά πρότυπα που ακολουθούν οι περισσότεροι οδηγοί όσο και

τις διαφοροποιήσεις που χαρακτηρίζουν το κάθε άτομο. Η ποικιλία και η λεπτομέρεια των δεδομένων που προέκυψαν μέσα από τα διαγράμματα αποτελούν ένα γερό υπόβαθρο για την επόμενη φάση της έρευνας, που είναι η στατιστική ανάλυση στο κεφάλαιο 5. Με την εφαρμογή ποσοτικών μεθόδων, η μελέτη εμβαθύνει και τεκμηριώνει επιστημονικά τις παρατηρήσεις, οδηγώντας σε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα και στην ανάδειξη παραγόντων που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση του οδικού σχεδιασμού και της ασφάλειας.

Η μετάβαση αυτή από την περιγραφική ανάλυση των δεδομένων σε στατιστικές μεθόδους αποτελεί κομβικό σημείο στην εξέλιξη της έρευνας, καθώς διασφαλίζει μια πιο ολοκληρωμένη και συστηματική διερεύνηση του φαινομένου της οδηγικής συμπεριφοράς στις λωρίδες επιβράδυνσης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μοντελοποίηση των ευρημάτων αυτού του κεφαλαίου.

5 Στατιστική ανάλυση

5.1 Εισαγωγή

Μετά την περιγραφική ανάλυση των δεδομένων και την παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών της οδηγικής συμπεριφοράς στη λωρίδα επιβράδυνσης, το επόμενο βήμα της μελέτης είναι η **στατιστική διερεύνηση** των παραγόντων που επηρεάζουν αυτή τη συμπεριφορά. Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζονται **μοντέλα παλινδρόμησης** με στόχο να εξεταστεί αν και σε ποιο βαθμό χαρακτηριστικά των οδηγών (όπως ηλικία, εμπειρία, συνήθειες οδήγησης) και στοιχεία γεωμετρίας του κόμβου συμβάλλουν στον καθορισμό κρίσιμων μεταβλητών, όπως η ταχύτητα στο σημείο αιχμής καθώς και τη μέση επιβράδυνση του οχήματος. Έγιναν δοκιμές με σκοπό το προσδιορισμό των κατάλληλων ανεξάρτητων μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα παλινδρόμησης. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη ανάλυση της επίδρασης πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών πάνω σε μία εξαρτημένη, ενώ παρέχει και εκτιμήσεις για τη σχετική βαρύτητα κάθε παράγοντα. Μέσω αυτής της προσέγγισης επιχειρείται η μετάβαση από την απλή περιγραφή των δεδομένων σε μια πιο συστηματική και τεκμηριωμένη ερμηνεία, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που μπορούν να υποστηρίξουν τη βελτίωση του οδικού σχεδιασμού και την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας.

5.2 Μεταβλητές Μοντέλου

Προκειμένου να αναπτυχθεί το κατάλληλο μοντέλο παλινδρόμησης, είναι απαραίτητο να ορισθούν οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν. Οι μεταβλητές χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Οι **εξαρτημένες**, για τις οποίες θα δημιουργηθούν μοντέλα πρόβλεψης, και υπάρχουν και οι **ανεξάρτητες**, βάσει των οποίων θα υπολογισθούν τα παραπάνω μοντέλα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές εκφράζουν τα χαρακτηριστικά των οδηγών, τα οποία επηρεάζουν το τρόπο οδήγησης τους και αντλήθηκαν τόσο από τις μετρήσεις όσο και από τη γεωμετρία των κόμβων. **Οι ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιούνται ως βάση δεδομένων**, πάνω στις οποίες θα στηριχθεί το μοντέλο και θα βρεθεί συσχέτιση μεταξύ αυτών και της εξαρτημένης μεταβλητής.

5.2.1 Εξαρτημένες Μεταβλητές

Οι εξαρτημένες μεταβλητές που επιλέχθηκαν, αποτελούν και τα ζητούμενα του κεφαλαίου. Ως εξαρτημένες μεταβλητές επελέγησαν οι εξής δύο: η ταχύτητα σημείου αιχμής (km/h) και η μέση επιβράδυνση (m/sec^2) του οχήματος στην περιοχή κίνησης του στη λωρίδα επιβράδυνσης.

Η ταχύτητα σημείου αιχμής αφορά τη ταχύτητα την οποία έχει αναπτύξει το όχημα κατά τη διέλευση του από το σημείο αιχμής. Επιλέχθηκε ως εξαρτημένη μεταβλητή καθώς αποτελεί

κρίσιμο δείκτη της οδηγικής συμπεριφοράς και επηρεάζει άμεσα τόσο την ασφάλεια όσο και την αποτελεσματικότητα της μετακίνησης σε κόμβους.

Η μέση επιβράδυνση αφορά την επιβράδυνση του οχήματος κατά τη κίνηση του στη λωρίδα επιβράδυνσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις η επιβράδυνση του οχήματος δεν ξεκινά αμέσως με την είσοδό του στη λωρίδα επιβράδυνσης, αλλά μετά από κάποια απόσταση κατά μήκος της λωρίδας. Η συγκεκριμένη απόσταση υπολογίζεται και ενσωματώνεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή στο μοντέλο που θα αναπτυχθεί.

5.2.2 Ανεξάρτητες Μεταβλητές

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές προέκυψαν κυρίως μέσω των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, αλλά και από το ερωτηματολόγιο (όπως ηλικία, φύλο και εμπειρία. Μερικά από αυτά τα στοιχεία είναι η απόσταση μεταξύ σημείου αρχής της λωρίδας επιβράδυνσης και του σημείου εισόδου οχήματος σε αυτή, η μέγιστη επιβράδυνση και η αρχική ταχύτητα. Ωστόσο τα μοντέλα που προέκυψαν μέσω αυτών των μεταβλητών **δεν παρουσίασαν μεγάλη αξιοπιστία, και μάλιστα εμφάνισαν μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.**

Εξετάστηκε το ενδεχόμενο να συμπεριληφθούν και τα γεωμετρικά στοιχεία του κόμβου όπως μήκος λωρίδας επιβράδυνσης, ακτίνα της καμπύλης της στροφής και επιτρεπτό όριο ταχύτητας. Ωστόσο μια τέτοια απόφαση δεν θα είχε ουσιαστικό αποτέλεσμα καθώς όλα τα παραπάνω είναι κοινά μεγέθη για κάθε μέτρηση και έτσι δε μπορεί να προκύψει κάποιο πόρισμα για τη συμπεριφορά του εκάστοτε οδηγού.

Η μεταβλητή των χιλιομέτρων που οδηγεί ο κάθε συμμετέχων σε μηνιαία βάση δεν συμπεριλήφθηκε τελικά στα μοντέλα παλινδρόμησης. Ο λόγος είναι ότι παρουσίαζε ισχυρή συσχέτιση με άλλες μεταβλητές εμπειρίας, όπως τα χρόνια οδήγησης, και συνεπώς δεν παρείχε πρόσθετη ερμηνευτική αξία. Επιπλέον, οι απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο για τα χιλιόμετρα/μήνα είχαν σημαντική διασπορά και ενδεχόμενη ανακρίβεια, γεγονός που θα μπορούσε να αυξήσει τον θόρυβο στα αποτελέσματα.

Μετά από αρκετές δοκιμές πολλών μοντέλων, το συμπέρασμα ήταν πως οι παραπάνω μεταβλητές δεν είναι ικανές να περιγράψουν και να προβλέψουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα ζητούμενα. Αυτό συνέβη, τόσο λόγω της μορφής των δεδομένων (δυναμική μορφή), αλλά και λόγω της μεγάλης συσχέτισης που έχουν μεταξύ τους οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Έπρεπε να γίνει περαιτέρω διερεύνηση, έτσι ώστε να προκύψει ένα μοντέλο που με μεγάλη αξιοπιστία να προβλέπει ταχύτητα και επιβράδυνση. Τελικά, οι παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη για τη κατασκευή των μοντέλων παλινδρόμησης είναι αυτοί που επηρεάζονται πιο άμεσα από την οδηγική συμπεριφορά ενός οδηγού. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

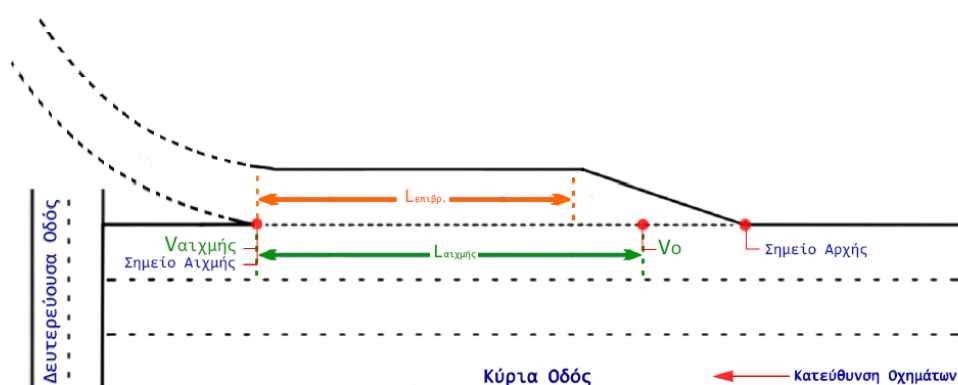
Για το μοντέλο πρόβλεψης της ταχύτητας αιχμής, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το **Λαίχμης, Vo, RatioL³ και $\alpha^2_{\text{αιχμής}}$.**

Για το μοντέλο πρόβλεψης της μέσης επιβράδυνσης, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το **Λαιχμής**, **V_0** , **RatioL³**, και **Ναιχμής³**.

Στη συνέχεια θα εξηγηθούν οι μεταβλητές αυτές και θα απεικονισθούν σχηματικά για καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη κατανόηση.

- **Λαιχμής**, δηλαδή το μήκος σημείου αιχμής. Είναι η απόσταση από το σημείο εισόδου του οχήματος στη λωρίδα επιβράδυνσης έως το σημείο αιχμής.
- **V_0** , δηλαδή η ταχύτητα στο σημείο εισόδου στη λωρίδα επιβράδυνσης.
- **RatioL**, όπου $\text{RatioL} = L_{\text{επιβρ.}} / \text{Λαιχμής}$. Το $L_{\text{επιβρ.}}$ ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του σημείου εκκίνησης της επιβράδυνσης του οχήματος έως το σημείο αιχμής.
- **$a_{\text{αιχμής}}$** , δηλαδή η μέση επιβράδυνση του οχήματος. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η μέση επιβράδυνση του οχήματος, από το σημείο εκκίνησης της επιβράδυνσης του οχήματος έως το σημείο αιχμής.
- **Ναιχμής**, δηλαδή η ταχύτητα στο σημείο αιχμής.

Για τη καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, δημιουργήθηκε κατάλληλο σχήμα που περιέχει όλες τις εμπλεκόμενες αποστάσεις, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του κόμβου. Ακολουθεί η εικόνα 19, στην οποία φαίνονται οι απαραίτητες αποστάσεις, για την ανάπτυξη των μοντέλων παλινδρόμησης.



Εικόνα 19 Σχηματική Απεικόνιση Αποστάσεων Στατιστικής Ανάλυσης

Η αρχή της απόστασης **Λαιχμής** θεωρείται πως είναι τη στιγμή όπου το όχημα εισέρχεται στη λωρίδα επιβράδυνσης και το πέρας του στο σημείο αιχμής. Το **$L_{\text{επιβρ.}}$** ξεκινάει από τη στιγμή όπου αρχίζει το όχημα να επιβραδύνει, και ολοκληρώνεται επίσης στο σημείο

αιχμής. Σε πολλές περιπτώσεις, **οι δύο αυτές αποστάσεις συμπίπτουν** καθώς ο οδηγός έχει ήδη αρχίζει την επιβράδυνση του πριν κιάλας αλλάξει λωρίδα. Έτσι το **RatioL προκύπτει από τη διαίρεση των δύο.** Η μέση επιβράδυνση του οχήματος, υπολογίζεται στο διάστημα του **Λεπιβρ.**

Όλα αυτά τα δεδομένα υπολογίσθηκαν μέσω των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, στο Excel. Τα **διάφορα σημεία για το καθορισμό των αποστάσεων**, υπολογίσθηκαν μέσω των **συντεταγμένων** των αντίστοιχων σημείων. Με τον **ίδιο τρόπο προέκυψε και η ταχύτητα**, ενώ η **μέση επιβράδυνση είναι ο μέσος όρος όλων των τιμών επιβράδυνσης** (κάθε 0,1 δευτερόλεπτα) των οχημάτων, στο κατάλληλο διάστημα.

Η μορφή των παραπάνω μοντέλων προέκυψε ύστερα από **αρκετές δοκιμές και πολλούς συνδυασμούς διαφόρων μεταβλητών.** Σκοπός είναι η εύρεση ενός μοντέλου το οποίο είναι ικανό να προβλέπει το ζητούμενο μέγεθος, και παράλληλα να πληροί ορισμένα κριτήρια καταλληλότητας. Μέσω των δοκιμών, βρέθηκε ως βέλτιστη λύση αυτή η μορφή για το μοντέλο, όπου αν και πολύπλοκη στον ορισμό και την ανάλυση της, είναι ικανή να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τα ζητούμενα αυτής της εργασίας.

5.3 Στατιστική Μεθοδολογία

Αξιοποιώντας τη μέθοδο της παλινδρόμησης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση **με σκοπό την πρόβλεψη της ταχύτητας του σημείου αιχμής, καθώς και της μέσης επιβράδυνσης** βάσει των παραπάνω παραμέτρων. Όλα τα στοιχεία, και από τους δύο κόμβους ενοποιήθηκαν, σε μια ενιαία λίστα δεδομένων και κατηγοριοποιήθηκαν αναλόγως. Το δείγμα για το κάθε μοντέλο περιλαμβάνει 67 μετρήσεις, όσες πραγματοποιήθηκαν συνολικά. Τα ίδια τα στοιχεία επιβραδύνσεων, ταχυτήτων και αποστάσεων αντλήθηκαν μέσω των μετρήσεων είτε με χρήση χρονομέτρου ώστε να βρεθεί βάση του χρόνου, η ζητούμενη ταχύτητα στο σημείο αλλαγής είτε μέσω των συντεταγμένων των κρίσιμων σημείων για την εύρεση αποστάσεων.

5.3.1 Μοντέλο για τη πρόβλεψη ταχύτητας σημείου αιχμής

Για την ανάλυση κατασκευάστηκε κατάλληλος πίνακας που συνοψίζει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για κάθε μέτρηση. Ακολουθεί ο πίνακας 8:

Λαιχμής	V ₀	RatioL ³	α ² _{αιχμής}	Ναιχμής
Μέτρα	Χλμ/ώρα	-	(Μέτρα/δευτερόλεπτα ²) ²	Χλμ/ώρα
324,32	86,77	1,00	0,09	61,96
83,40	71,16	1,00	0,15	56,89
234,02	79,92	1,00	0,02	53,84

333,02	90,34	0,85	0,77	53,10
345,67	78,33	1,00	0,20	47,69
332,01	82,48	1,00	0,23	54,82
287,62	66,93	0,02	0,05	52,91
279,57	90,63	0,76	0,46	65,04
279,97	83,68	0,61	0,49	50,36
301,09	81,76	1,00	0,04	57,42
230,23	82,99	0,86	0,66	55,82
146,10	91,49	0,61	1,83	69,85
271,07	69,67	0,08	0,14	52,44
230,66	79,08	0,47	0,81	56,37
283,11	87,75	0,22	0,48	58,60
195,81	74,58	0,68	0,09	57,64
263,77	60,00	0,93	0,00	42,74
268,40	75,69	0,42	0,38	54,10
249,66	78,28	0,81	0,06	53,21
293,59	72,74	0,73	0,01	54,38
244,74	75,15	1,00	0,10	50,75
253,65	78,89	1,00	0,34	52,41
292,30	77,39	1,00	0,23	53,95
180,88	60,45	1,00	0,00	42,43
276,80	85,53	0,90	1,16	54,56
304,59	83,94	1,00	0,04	54,19
333,03	78,19	1,00	0,24	47,98
336,01	84,78	1,00	0,70	48,65
312,18	84,83	1,00	0,48	53,16
287,32	72,54	0,11	0,06	64,89
312,20	85,35	0,74	0,68	57,13
250,51	97,25	1,00	0,85	62,67
297,01	91,89	0,49	0,78	52,87
289,85	96,56	0,80	0,74	54,70
312,36	75,51	0,65	0,10	51,08
322,55	83,56	0,68	0,34	54,12
289,59	80,94	1,00	0,10	60,51
142,57	71,34	1,00	0,44	50,50
69,98	81,41	1,00	3,03	50,15
153,25	75,77	1,00	0,49	52,50
54,75	78,16	0,75	3,39	47,20
94,53	75,22	0,68	0,52	58,50
47,48	93,84	0,11	1,80	72,50
184,21	79,01	0,57	0,77	68,50
120,96	69,21	0,68	1,80	50,30
117,79	86,53	0,37	1,42	70,15
129,73	69,85	0,65	0,55	59,24
72,38	79,83	0,44	0,94	68,56
88,47	66,44	0,44	0,98	50,14

137,08	69,23	0,61	1,35	50,23
167,54	80,69	1,00	0,31	68,54
108,80	82,47	0,47	1,59	60,18
125,83	79,24	0,44	2,66	61,25
115,45	80,45	0,60	0,77	70,50
102,02	76,80	0,52	1,56	59,69
185,75	68,72	0,35	0,98	56,55
10,47	74,32	0,71	2,50	65,82
110,39	77,15	0,65	1,64	60,15
78,92	85,31	0,27	1,44	71,46
52,89	82,11	0,07	3,92	55,64
21,38	65,98	0,12	3,03	51,22
105,01	79,41	0,48	1,80	60,28
106,26	76,87	0,73	1,96	59,45
145,78	73,32	0,41	0,14	68,50
121,88	81,80	0,53	0,37	75,82
99,90	84,29	0,62	0,46	75,65
101,61	86,46	0,53	0,77	74,92

Πίνακας 8 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Μετρήσεων προς Στατιστική Ανάλυση(Μοντέλο Υπολογισμού Ταχύτητας Σημείου Αιχμής)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η παλινδρόμηση, μέσω του excel. Η διαδικασία είναι η ακόλουθη. Από τη καρτέλα «**Δεδομένα**» και στη κατηγορία «**Ανάλυση**», επιλέγεται «**Ανάλυση Δεδομένων**». Στην αναδυόμενη καρτέλα, επιλέγεται «**Παλινδρόμηση**». Ως **περιοχή εισόδου Y**, επιλέγεται αρχικά η στήλη της **Βαιχμής**, δηλαδή το ζητούμενο. Ως **περιοχή εισόδου X**, επιλέγονται **όλα τα υπόλοιπα στοιχεία**(Λαιχμής, V_0 , RatioL^3 , $\alpha^2_{\text{αιχμής}}$). Πατώντας “OK” τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης προκύπτουν σε νέο φύλλο εργασίας. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αξιολογηθεί το μοντέλο μέσω των απαραίτητων στατιστικών κριτηρίων:

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων συνοδεύεται ταυτόχρονα από την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε μοντέλου, ώστε να είναι δυνατή η άμεση ερμηνεία της χρησιμότητάς του. Για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή παρουσιάζονται οι στατιστικοί δείκτες που αποδεικνύουν την αξιοπιστία του μοντέλου, οι αποκλίσεις μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών, καθώς και τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν για την οδική συμπεριφορά. Στο τέλος του κεφαλαίου, τα επιμέρους αποτελέσματα συγκεντρώνονται και επισημαίνονται οι βασικές τάσεις αλλά και οι περιορισμοί της μελέτης.

Αρχικά, το excel εμφανίζει πίνακες με τίτλους «**Στατιστικά Παλινδρόμησης**» και «**Ανάλυση Διακύμανσης**» αντίστοιχα. Μέσω των πινάκων αυτών αντλούνται κρίσιμα στοιχεία για **τη ποιότητα και την αξιοπιστία του μοντέλου**. Έχουν ως στόχο να αποτιμήσουν το κατά πόσο οι εισαγόμενες μεταβλητές εξηγούν την εξαρτημένη μεταβλητή και αν το μοντέλο είναι

στατιστικά σημαντικό. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης.

❖ Προσαρμοσμένο R^2

Αποτυπώνει το ποσοστό της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής που εξηγείται από το μοντέλο. Η τιμή του σχετίζεται με το πόσο καλά οι ανεξάρτητες μεταβλητές μπορούν να εξηγήσουν την εξαρτημένη. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το προσαρμοσμένο R^2 , είναι διότι λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η βασική διαφορά με το απλό R^2 είναι πως το προσαρμοσμένο R^2 αυξάνεται μόνο αν η νέα μεταβλητή βελτιώνει το μοντέλο, σε αντίθεση με το απλό όπου θα αυξάνεται στη προσθήκη κάθε νέας μεταβλητής στο μοντέλο. Γενικώς, όσο υψηλότερο είναι, τόσο καλύτερα το μοντέλο εκφράζει την εξαρτημένη μεταβλητή. Στη προκειμένη περίπτωση ο συντελεστής αυτός έχει τιμή **0,688** (δηλαδή το μοντέλο μπορεί να εξηγήσει το 68% της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής). Είναι μια αποδεκτή τιμή (τιμές μεγαλύτερες του 0,7 θεωρούνται υψηλές), που υποδηλώνει πως **το μοντέλο εξηγεί ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των οδηγών, δηλαδή τη ταχύτητα τους στο σημείο αιχμής.**

❖ Τιμή P

Η τιμή P δείχνει τη πιθανότητα ο συντελεστής μιας μεταβλητής να μην έχει επιρροή στη διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής. Υπολογίζεται για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή και καθορίζει αν η κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή, είναι στατιστικά σημαντική, δηλαδή αν έχει σημαντική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Συνήθως το επίπεδο σημαντικότητας ορίζεται στο 5%, δηλαδή 0,05). Για **τιμές μικρότερες του 0,05** θεωρείται πως οι **συντελεστές έχουν σημαντική επίδραση στη πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής.** Στη προκειμένη περίπτωση, όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν πολύ χαμηλή τιμή P, που σημαίνει πως **όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν επίδραση στην εκτίμηση της ταχύτητας σημείου αιχμής. Άρα όλες οι μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές.** Ως αποτέλεσμα προκύπτει πως όλες οι μεταβλητές θα παραμείνουν στο μοντέλο.

❖ Τυπικό σφάλμα και t-test

Το τυπικό σφάλμα αντιπροσωπεύει την αβεβαιότητα στην εκτίμηση του κάθε συντελεστή του μοντέλου παλινδρόμησης. **Χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με τη τιμή p για να καθορίσει τις στατιστικά σημαντικές μεταβλητές.** Όσο μικρότερο είναι το τυπικό σφάλμα σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή, τόσο πιο αξιόπιστη θεωρείται η εκτίμηση για την επίδραση της μεταβλητής. Ο όρος t-test χρησιμοποιείται για να καθορίσει την επιρροή του κάθε συντελεστή στο τελικό αποτέλεσμα. Ο τύπος υπολογισμού της τιμής t είναι:

$$t = \frac{\text{Συντελεστής Μεταβλητής}}{\text{Τυπικό Σφάλμα}}$$

Οι τιμές του t είναι αντιστρόφως ανάλογες με τη τιμή του τυπικού σφάλματος, δηλαδή οι μεγάλες τιμές του t , κατ' απόλυτη τιμή, δείχνουν μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα της αντίστοιχης μεταβλητής. Για το επίπεδο σημαντικότητας της εργασίας αυτής, δηλαδή 5%, η κρίσιμη τιμή t είναι 1,6. **Οπότε για να συμπεριληφθεί μια μεταβλητή στο μοντέλο θα πρέπει να έχει τιμή t μεγαλύτερη από 1,6** (αναφέρεται σε απόλυτη τιμή, καθώς το πρόσημο καθορίζεται από το συντελεστή της μεταβλητής ο οποίος μπορεί να είναι και αρνητικός). Για το μοντέλο αυτό, όλες οι μεταβλητές έχουν ικανοποιητική τιμή t .

Μια σημαντική υπόθεση που γίνεται για τη δημιουργία και τη σωστή λειτουργία ενός μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης, είναι πως **οι ανεξάρτητες μεταβλητές δεν σχετίζονται μεταξύ τους**. Η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής δε πρέπει ούτε να επηρεάζεται ούτε να μπορεί να υπολογισθεί μέσω κάποιας άλλης ανεξάρτητης μεταβλητής. Αν τα παραπάνω συμβαίνουν στο μοντέλο, το φαινόμενο λέγεται **πολυσυγγραμμικότητα**. Τα αποτελέσματα ενός μοντέλου παλινδρόμησης που παρουσιάζει αυτό το φαινόμενο, δε θεωρούνται αξιόπιστα, καθώς θα υπάρχει αύξηση στη διακύμανση μεταξύ των εκτιμώμενων συντελεστών. Για να ελεγχθεί, και να αποφευχθεί το φαινόμενο της πολυσυγγραμμικότητας, εκτελείται ο παρακάτω έλεγχος.

Ο τελικός έλεγχος που γίνεται είναι αυτός του υπολογισμού του **Εκτιμητή Διόγκωσης της Διακύμανσης** (Variance Inflation Factor – **VIF**). Ο εκτιμητής αυτός υπολογίζει κατά πόσο θα αυξηθεί η διακύμανση ενός εκτιμώμενου συντελεστή εάν η αντίστοιχη ανεξάρτητη μεταβλητή παρουσιάζει πολυσυγγραμμικότητα. Η διαδικασία περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

Ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη VIF γίνεται μέσω νέων μοντέλων παλινδρόμησης. Στη προκειμένη περίπτωση **δημιουργούνται καινούργια μοντέλα, θέτοντας κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή του πολλαπλού μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης ως την εξαρτημένη μεταβλητή και όλες τις υπόλοιπες ως τις ανεξάρτητες**. Ο τύπος υπολογισμού φαίνεται παρακάτω και εφαρμόστηκε σε κάθε μοντέλο.

$$\text{VIF} = \frac{1}{1-R^2}$$

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζει μία τιμή VIF για κάθε μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Γενικά, **όσο πιο μεγάλη η τιμή του VIF, τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση εμφανίζει η εκάστοτε μεταβλητή με κάποια άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή**. Για **VIF<10**, θεωρείται αποδεκτό το όριο και πως οι μεταβλητές παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή συσχέτιση μεταξύ τους. Για

VIF<5, είναι οι ιδανικές τιμές και το μοντέλο δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα σε σχέση με τη πολυσυγγραμμικότητα.

Ακολουθούν οι τιμές των VIF για το μοντέλο εκτίμησης της ταχύτητας αιχμής, στο πίνακα 9.

	VIF
Λαιχμής	2,164
Vo	1,171
RatioL ³	1,191
α ² αιχμής	2,087

Πίνακας 9 Τιμές VIF μοντέλου ταχύτητας σημείου αιχμής

Οι τιμές των VIF είναι εξαιρετικά χαμηλές και επιβεβαιώνουν πως **οι ανεξάρτητοι συντελεστές του μοντέλου είναι αξιόπιστοι** και δε παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ τους.

Στη συνέχεια φαίνονται τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης όπως προέκυψαν από το Excel. Από αυτά τα στοιχεία προέκυψαν τα μεγέθη που αναλύθηκαν προηγουμένως. Ακολουθούν οι πίνακες 10, 11 και 12, με όλα τα στοιχεία από τα αποτελέσματα της ανάλυσης:

Παράμετρος	Τιμή
Πολλαπλό R	0,840
R Τετράγωνο	0,706
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,687
Τυπικό σφάλμα	4,441
Μέγεθος δείγματος	67

Πίνακας 10 Στατιστικά Παλινδρόμησης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής

	Βαθμοί Ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	4	2948,195	737,0488	37,35892	6,98E-16
Υπόλοιπο	62	1223,189	19,72886		
Σύνολο	66	4171,384			

Πίνακας 11 Ανάλυση Διακύμανσης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής

	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%
Σταθερός όρος	26,71744	5,607815	4,764322	1,18E-05	15,50757	37,9273
Λαιχμής	-0,07234	0,008243	-8,7757	1,8E-12	-0,08881	-0,05586
Vo	0,714839	0,075412	9,479163	1,13E-13	0,564094	0,865585
RatioL ³	-8,92573	2,048093	-4,35807	5,03E-05	-13,0198	-4,83165
α ² αιχμής	-6,10113	0,877707	-6,95121	2,61E-09	-7,85564	-4,34662

Πίνακας 12 Συντελεστές Μεταβλητών Παλινδρόμησης Μοντέλου Ταχύτητας Αιχμής

Η συνολική αξιολόγηση των τριών βασικών παραμέτρων της παλινδρόμησης (προσαρμοσμένο R^2 , τιμή P και t test) δείχνει ότι **το μοντέλο έχει ικανοποιητική επιστημονική ισχύ και αξιοπιστία** για το σύνολο των μεταβλητών που αφορούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Τα τυπικά σφάλματα για αυτές τις μεταβλητές είναι αρκετά μικρά σε σχέση με τους αντίστοιχους συντελεστές και τα p-values μικρότερα από το συμβατικό επίπεδο σημαντικότητας (0,05), που σημαίνει ότι οι επιδράσεις είναι στατιστικά σημαντικές.

Γενική κρίση για το μοντέλο: Τα σημαντικά χαμηλά p-values, το υψηλό R^2 , το χαμηλό τυπικό σφάλμα και η πολύ χαμηλή τιμή του σημαντικότητας F (6,98E-16) αποδεικνύουν ότι το μοντέλο συνολικά είναι πολύ καλά προσαρμοσμένο στα δεδομένα και συγχρόνως στατιστικά σημαντικό. Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας, μέσω των συντελεστών των ανεξαρτήτων μεταβλητών.

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης, παρέχουν τους κατάλληλους συντελεστές που θα χρησιμοποιηθούν στη γραμμική εξίσωση με στόχο τον υπολογισμό της ταχύτητας εξόδου. Οι συντελεστές αυτοί φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 13:

Μεταβλητές	Συντελεστές
Σταθερός όρος	26,717
Λαιχμής	-0,072
Vo	0,715
RatioL ³	-8,925
$\alpha^2_{\text{αιχμής}}$	-6,101

Πίνακας 13 Συντελεστές Μεταβλητών (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής)

Μέσω της παρακάτω εξίσωσης υπολογίστηκαν οι εκτιμώμενες ταχύτητες σημείου αιχμής για κάθε οδηγό. Η εφαρμογή της εξίσωσης παλινδρόμησης, καθώς και τα ευρήματα της, φαίνονται παρακάτω.

- Ταχύτητα σημείου αιχμής = $26,717 - 0,072 \times \text{Λαιχμής} + 0,715 \times \text{Vo} - 8,925 \times \text{RatioL}^3 - 6,101 \times \alpha^2_{\text{αιχμής}}$.

Οι συντελεστές των μεταβλητών αποτελούν μια πρώτη εικόνα, όσον αφορά τους παράγοντες που έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στη τελική ταχύτητα που θα προκύψει. Για να γίνει κατανοητή η επιρροή της κάθε μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα, θα ακολουθήσει η διαδικασία που ονομάζεται **ελαστικότητα**. Είναι ένα **αδιάστατο** μέγεθος όπου επιτρέπει την **άμεση σύγκριση της επίδρασης διαφορετικών συντελεστών**. Ο τύπος υπολογισμού της ελαστικότητας για μια μεταβλητή είναι ο εξής:

$$\text{Ελαστικότητα} = \frac{\text{Συντελεστής ανεξάρτητης μεταβλητής} * \text{Τιμή ανεξάρτητης μεταβλητής}}{\text{Εκτιμώμενη τιμή εξαρτημένης μεταβλητής}}$$

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται για κάθε μέτρηση και για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή ξεχωριστά. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών της ελαστικότητας για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή και προκύπτει ο παρακάτω πίνακας 14:

Μεταβλητή	Ελαστικότητα
Λαιχμής	-0,26
Vo	0,99
RatioL ³	-0,11
α ² αιχμής	-0,09

Πίνακας 14 Ελαστικότητα Μεταβλητών (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής)

Τα αποτελέσματα του πίνακα 14, αποτυπώνουν τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής σε σχέση με τη μεταβολή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής. Συγκεκριμένα, αν η αρχική ταχύτητα Vo αυξηθεί κατά 1%, τότε η ταχύτητα αιχμής θα αυξηθεί κατά 0,99%. Αντίστοιχα, αν το μήκος αιχμής Λαιχμής αυξηθεί κατά 1%, τότε η ταχύτητα αιχμής θα μειωθεί κατά 0,26%. Μέσω της ελαστικότητας, φαίνεται πως η αρχική ταχύτητα Vo, έχει τη μεγαλύτερη τιμή ελαστικότητας, δηλαδή έχει τη μεγαλύτερη ποσοτική επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο συμπέρασμα, που επιβεβαιώνεται μέσω αυτής της διαδικασίας.

Σε αυτό το σημείο γίνεται αξιολόγηση των συντελεστών του μοντέλου. Στόχος της είναι αν τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι λογικά και αναμενόμενα. Αξιολογείται, δηλαδή, η φυσική σημασία των συντελεστών του μοντέλου.

Αρχική ταχύτητα (Vo):

Ο συντελεστής της μεταβλητής Vo είναι **θετικός (+0,715)**, γεγονός που είναι απολύτως αναμενόμενο από φυσικής άποψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ταχύτητα του οχήματος πριν την είσοδό του στη λωρίδα επιβράδυνσης, τόσο μεγαλύτερη τείνει να είναι και η ταχύτητα στο σημείο αιχμής.

Μέση επιβράδυνση (α²αιχμής):

Η μεταβλητή α^2 αιχμής έχει **αρνητικό συντελεστή (-6,101)**, κάτι που επίσης ευθυγραμμίζεται με τη φυσική ερμηνεία της διαδικασίας επιβράδυνσης. Η γωνία αιχμής (ή η τετραγωνική της τιμή, όπως χρησιμοποιείται στο μοντέλο) εκφράζει ουσιαστικά τον ρυθμό ή την ένταση της επιβράδυνσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο εντονότερη είναι η μεταβολή της ταχύτητας προς τα κάτω. Έτσι, το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι αυξημένες τιμές του α αιχμής συνδέονται με μειωμένες ταχύτητες στο σημείο αιχμής — κάτι απόλυτα αναμενόμενο και φυσικά λογικό.

Λόγος RatioL³:

Η μεταβλητή **RatioL³** παρουσιάζει επίσης **αρνητικό συντελεστή (-8,925)**. Όταν το **RatioL** αυξάνεται, σημαίνει ότι το όχημα αρχίζει να επιβραδύνει νωρίτερα μέσα στη λωρίδα. Συνεπώς, διαθέτει μεγαλύτερη απόσταση για επιβράδυνση, άρα είναι λογικό να φτάνει σε μικρότερη τελική ταχύτητα στο σημείο αιχμής.

Απόσταση Λαιχμής:

Η μεταβλητή **Λαιχμής** έχει επίσης **αρνητικό συντελεστή (-0,072)**, κάτι που μπορεί να ερμηνευθεί με ανάλογο τρόπο. Μεγαλύτερη τιμή του **Λαιχμής** υποδηλώνει ότι ο οδηγός έχει στη διάθεσή του περισσότερη απόσταση για να επιβραδύνει προτού φτάσει στο σημείο αιχμής. Αυτό αυξάνει τη δυνατότητα για σταδιακό φρενάρισμα και οδηγεί τελικά σε χαμηλότερη ταχύτητα στο κρίσιμο σημείο.

Εφαρμόζεται η εξίσωση εφαρμογής του μοντέλου, για κάθε μέτρηση, και έτσι προκύπτει η αντίστοιχη προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας στο σημείο αιχμής. Στον ακόλουθο πίνακα 15 παρατίθεται συγκριτικά η πραγματική ταχύτητα του σημείου αιχμής, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις πεδίου, με την αντίστοιχη ταχύτητα που εκτιμήθηκε από το αναπτυγμένο μοντέλο παλινδρόμησης.

Πραγματικές Ταχύτητες (Χλμ/ώρα)	Προβλεπόμενες Ταχύτητες (Χλμ/ώρα)
61,96	55,81
56,89	61,70
53,84	57,90
53,10	54,90
47,69	47,54
54,82	51,34
52,91	53,30
65,04	61,68
50,36	57,83
57,42	54,22
55,82	57,63
69,85	64,90
52,44	55,36

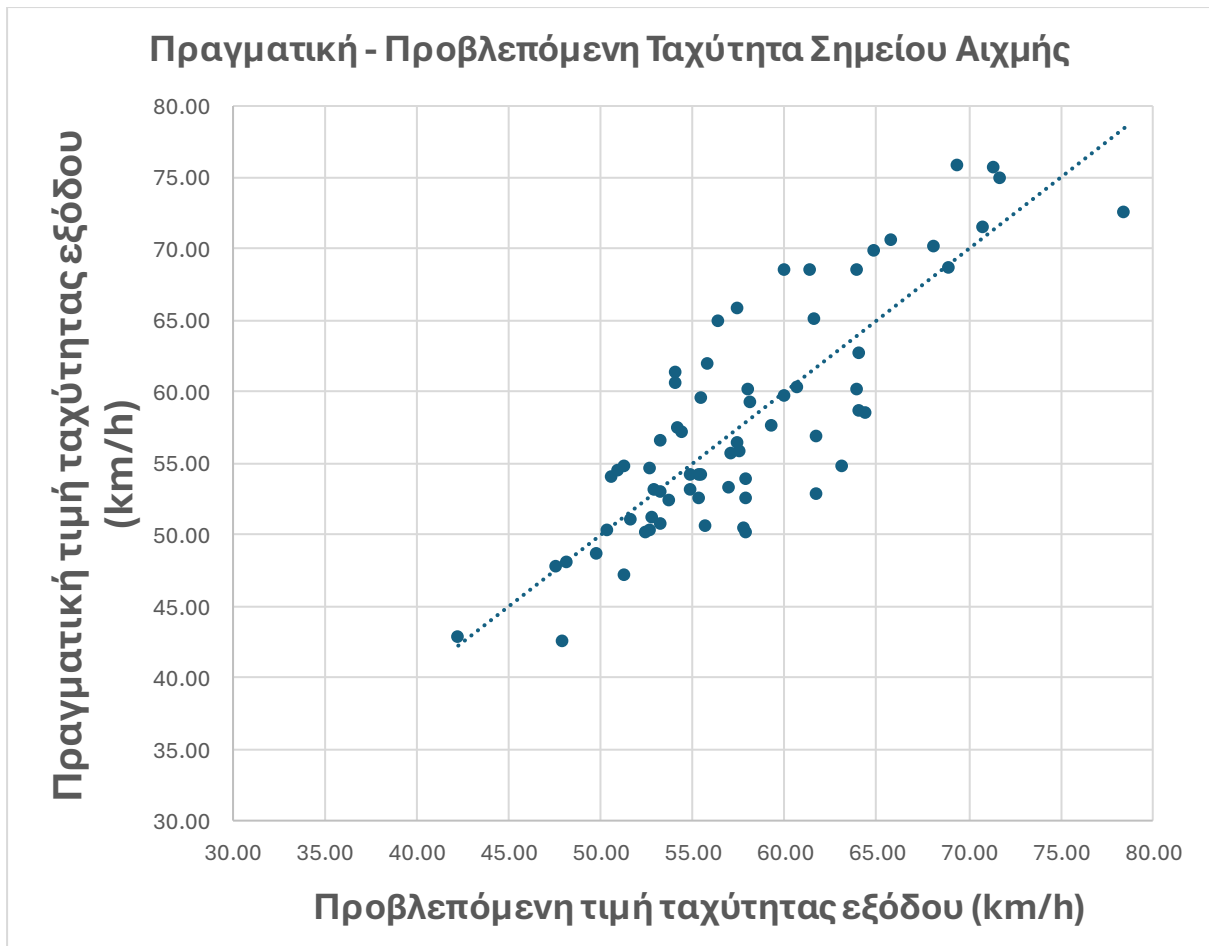
56,37	57,43
58,60	64,07
57,64	59,30
42,74	42,24
54,10	55,33
53,21	57,04
54,38	50,92
50,75	53,23
52,41	53,77
53,95	50,57
42,43	47,89
54,56	52,71
54,19	55,51
47,98	48,15
48,65	49,81
53,16	52,89
64,89	56,44
57,13	54,39
62,67	64,02
52,87	61,75
54,70	63,11
51,08	51,65
54,12	54,93
60,51	54,08
50,50	55,77
50,15	52,45
52,50	57,88
47,20	51,26
58,50	64,42
72,50	78,47
68,50	60,04
50,30	50,42
70,15	68,15
59,24	58,10
68,56	68,89
50,14	57,94
50,23	52,65
68,54	61,44
60,18	63,95
61,25	54,12
70,50	65,82
59,69	60,04
56,55	53,26
65,82	57,50
60,15	58,07
71,46	70,79

55,64	57,08
51,22	52,82
60,28	60,66
59,45	55,50
68,50	64,00
75,82	69,38
75,65	71,36
74,92	71,73

Πίνακας 15 Σύγκριση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών ταχύτητας σημείου αιχμής (Μοντέλο εκτίμησης ταχύτητας σημείου αιχμής)

Ο πίνακας αυτός παρουσιάζεται με σκοπό τη σύγκριση μεταξύ των δύο τιμών και την αξιολόγηση της ακρίβειας πρόβλεψης του μοντέλου.

Για την απεικόνιση της ακρίβειας των προβλέψεων, δημιουργήθηκε **διάγραμμα στο οποίο συγκρίνονται οι πραγματικές τιμές ταχύτητας σημείου αιχμής με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες** (Πραγματική-Προβλεπόμενη Ταχύτητα Σημείου Αιχμής). Η γραφική αυτή παρουσίαση επιτρέπει τον οπτικό έλεγχο της ποιότητας της προσαρμογής του μοντέλου, τη διαπίστωση ενδεχόμενων αποκλίσεων και την αξιολόγηση της ικανότητας της παλινδρόμησης να αποτυπώσει τις βασικές τάσεις του συνόλου των μετρήσεων. Ακολουθεί η εικόνα 20, με την απεικόνιση των αποτελεσμάτων:



Εικόνα 20 Απεικόνιση τιμών πραγματικής και προβλεπόμενης ταχύτητας σημείου αιχμής.

Το διάγραμμα σύγκρισης πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών ταχύτητας σημείου αιχμής δείχνει ότι το μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης αποδίδει με ικανοποιητική ακρίβεια για το σύνολο των παρατηρήσεων. Η πλειονότητα των τιμών συγκεντρώνεται κοντά στη διαγώνιο, στοιχείο που υποδηλώνει υψηλή προσαρμοστικότητα του μοντέλου καθώς και μικρή, σχετικά, απόκλιση. Τα ελάχιστα σημεία που παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τη γραμμή ταύτισης θεωρούνται πως ανήκουν σε φυσιολογικό πλαίσιο διασποράς για πραγματικά κυκλοφοριακά δεδομένα. Συνολικά, το μοντέλο κρίνεται ιδιαίτερα αξιόπιστο ως εργαλείο πρόβλεψης της ταχύτητας σε τέτοιες συνθήκες.

5.3.2 Μοντέλο για τη πρόβλεψη μέσης επιβράδυνσης

Ακολουθώντας ίδιο σκεπτικό και μεθοδολογία με το προηγούμενο μοντέλο, η ανάλυση ξεκινά με τη συλλογή των δεδομένων σε κατάλληλο πίνακα. Ακολουθεί ο πίνακας 16:

Λαιχμής	Vo	RatioL³	Βαιχμής³	Ααιχμής
Μέτρα	Χλμ/ώρα	-	(Χλμ/ώρα)³	Μέτρα/δευτ²
324,32	86,77	1,00	237867,01	-0,30
83,40	71,16	1,00	184122,92	-0,39
234,02	79,92	1,00	156068,44	-0,12
333,02	90,34	0,85	149721,31	-0,88
345,67	78,33	1,00	108463,08	-0,45
332,01	82,48	1,00	164746,84	-0,48
287,62	66,93	0,02	148119,85	-0,23
279,57	90,63	0,76	275132,37	-0,68
279,97	83,68	0,61	127719,49	-0,70
301,09	81,76	1,00	189316,97	-0,20
230,23	82,99	0,86	173928,00	-0,81
146,10	91,49	0,61	340799,72	-1,35
271,07	69,67	0,08	144207,57	-0,38
230,66	79,08	0,47	179120,01	-0,90
283,11	87,75	0,22	201230,06	-0,69
195,81	74,58	0,68	191501,38	-0,29
263,77	60,00	0,93	78073,48	-0,01
268,40	75,69	0,42	158340,42	-0,62
249,66	78,28	0,81	150653,69	-0,24
293,59	72,74	0,73	160811,69	-0,08
244,74	75,15	1,00	130709,80	-0,31
253,65	78,89	1,00	143960,21	-0,58
292,30	77,39	1,00	157027,00	-0,48
180,88	60,45	1,00	76386,94	-0,07
276,80	85,53	0,90	162413,89	-1,08
304,59	83,94	1,00	159131,94	-0,20
333,03	78,19	1,00	110453,83	-0,49
336,01	84,78	1,00	115145,92	-0,84
312,18	84,83	1,00	150229,37	-0,70
287,32	72,54	0,11	273233,12	-0,25
312,20	85,35	0,74	186463,02	-0,83
250,51	97,25	1,00	246138,24	-0,92
297,01	91,89	0,49	147784,18	-0,88
289,85	96,56	0,80	163667,35	-0,86
312,36	75,51	0,65	133276,24	-0,32
322,55	83,56	0,68	158516,06	-0,58
289,59	80,94	1,00	221554,91	-0,32
142,57	71,34	1,00	128787,63	-0,67
69,98	81,41	1,00	126128,38	-1,74
153,25	75,77	1,00	144703,13	-0,70
54,75	78,16	0,75	105154,05	-1,84
94,53	75,22	0,68	200201,63	-0,72
47,48	93,84	0,11	381078,13	-1,34
184,21	79,01	0,57	321419,13	-0,88

120,96	69,21	0,68	127263,53	-1,34
117,79	86,53	0,37	345209,73	-1,19
129,73	69,85	0,65	207895,53	-0,74
72,38	79,83	0,44	322264,47	-0,97
88,47	66,44	0,44	126052,94	-0,99
137,08	69,23	0,61	126732,95	-1,16
167,54	80,69	1,00	321982,52	-0,56
108,80	82,47	0,47	217949,84	-1,26
125,83	79,24	0,44	229783,20	-1,63
115,45	80,45	0,60	350402,63	-0,88
102,02	76,80	0,52	212669,27	-1,25
185,75	68,72	0,35	180841,39	-0,99
10,47	74,32	0,71	285150,17	-1,58
110,39	77,15	0,65	217624,05	-1,28
78,92	85,31	0,27	364912,75	-1,20
52,89	82,11	0,07	172250,85	-1,98
21,38	65,98	0,12	134375,08	-1,74
105,01	79,41	0,48	219038,13	-1,34
106,26	76,87	0,73	210114,28	-1,40
145,78	73,32	0,41	321419,13	-0,38
121,88	81,80	0,53	435864,34	-0,61
99,90	84,29	0,62	432939,09	-0,68
101,61	86,46	0,53	420526,44	-0,88

Πίνακας 16 Συγκεντρωτικά Στοιχεία Μετρήσεων προς Στατιστική Ανάλυση(Μοντέλο Υπολογισμού Μέσης Επιβράδυνσης)

Εκτελείται η ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω, με στόχο τη πρόβλεψη της μέσης επιβράδυνσης των οχημάτων, από το σημείο εκκίνησης επιβράδυνσης έως το σημείο αιχμής. Προτού αναλυθούν τα αποτελέσματα, θα προηγηθεί αξιολόγηση του μοντέλου παλινδρόμησης. Επειδή ο τρόπος αξιολόγησης και τα αποδεκτά όρια των τιμών των παρακάτω έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο μοντέλο, θα ακολουθήσει σύντομη αναφορά και σύνοψη αποτελεσμάτων.

❖ Προσαρμοσμένο R^2

Σε αυτή τη περίπτωση το προσαρμοσμένο R^2 είναι ίσο με **0,743**, μια τιμή αρκετά υψηλή και ικανοποιητικό σύμφωνα με τις απαιτήσεις του μοντέλου. Πρακτικά, οι ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου είναι ικανές να περιγράψουν τη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής κατά 74%. Έτσι, το μοντέλο θεωρείται πως έχει υψηλό προσαρμοσμένο R^2 και οι ανεξάρτητες μεταβλητές εκτιμούν αρκετά καλά τη διακύμανση της εξαρτημένης.

❖ Τιμή P

Και σε αυτή τη περίπτωση εξετάζεται το ενδεχόμενο κάποια ανεξάρτητη μεταβλητή να μην έχει ουσιαστική επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα. Γίνεται σύγκριση των τιμών P κάθε

μεταβλητής με το αποδεκτό όριο που είναι ορισμένο στο 0,05. Για ακόμη μια φορά, κάθε μεταβλητή παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή τιμή P, χαμηλότερη από 0,05, με αποτέλεσμα όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές να παραμένουν στο μοντέλο παλινδρόμησης.

❖ Τυπικό σφάλμα και t-test

Έχοντας θέσει ίδιο επίπεδο σημαντικότητας, δηλαδή 5%, η κρίσιμη τιμή της τιμής t για τη κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή μένει ίδια ($t > 1,6$). Μέσω των αποτελεσμάτων φαίνεται η αρκετά μικρή τιμή του τυπικού σφάλματος αλλά και η μεγάλη, και άνω του ορίου, που σημαίνει πως οι μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο μοντέλο εκτίμησης της μέσης επιβράδυνσης.

Τέλος, γίνεται ο έλεγχος των τιμών VIF. Εφαρμόστηκε ίδια διαδικασία με το πρώτο μοντέλο της ταχύτητας αιχμής (5.3.1 Μοντέλο για τη πρόβλεψη ταχύτητας σημείου αιχμής). Υπενθυμίζεται πως θα δημιουργηθούν νέα μοντέλα, ορίζοντας μια ανεξάρτητη μεταβλητή ως εξαρτημένη για το κάθε μοντέλο. Θα εφαρμοσθεί ο τύπος:

$$VIF = \frac{1}{1-R^2}$$

Τα αποδεκτά όρια των τιμών είναι για $VIF < 5$, ενώ τα ιδανικά είναι για $VIF < 2$. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Ακολουθεί ο πίνακας 17:

	VIF
Λαιχμής	1,557
Vo	1,523
RatioL ³	1,251
Βαιχμής ³	1,841

Πίνακας 17 Τιμές VIF μοντέλου μέσης επιβράδυνσης

Και σε αυτό το μοντέλο, οι τιμές των VIF παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, με τιμές μικρότερες του δύο ($VIF < 2$). Το συμπέρασμα είναι πως το μοντέλο δεν παρουσιάζει προβλήματα πολυσυγγραμμικότητας, δηλαδή μεγάλης συσχέτισης μεταξύ δύο ή περισσότερων ανεξαρτήτων μεταβλητών.

Ακολουθούν οι πίνακες των αποτελεσμάτων της γραμμικής παλινδρόμησης για την εκτίμηση της μέσης επιβράδυνσης, όπως προέκυψαν από το Excel. Τα σημαντικότερα στοιχεία που αναπτύχθηκαν παραπάνω αντλήθηκαν από τους παρακάτω πίνακες 18, 19 και 20.

Παράμετρος	Τιμή
Πολλαπλό R	0,871
R Τετράγωνο	0,758
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0,743
Τυπικό σφάλμα	0,239
Μέγεθος δείγματος	67

Πίνακας 18 Στατιστικά Παλινδρόμησης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης

	Βαθμοί Ελευθερίας	SS	MS	F	Σημαντικότητα F
Παλινδρόμηση	4	11,12519	2,781298	48,5824	1,91E-18
Υπόλοιπο	62	3,549443	0,057249		
Σύνολο	66	14,67464			

Πίνακας 19 Ανάλυση Διακύμανσης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης

	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P	Κατώτερο 95%	Υψηλότερο 95%
Σταθερός όρος	0,49021	0,307275	1,595345	0,11572	-0,12402	1,104444
Λαιχμής	0,004544	0,000377	12,06242	6,53E-18	0,003791	0,005297
Vo	-0,03904	0,004633	-8,425	7,27E-12	-0,0483	-0,02977
RatioL ³	0,426104	0,11305	3,769165	0,000368	0,20012	0,652088
Βαιχμής ³	3,02E-06	4,53E-07	6,663987	8,18E-09	2,12E-06	3,93E-06

Πίνακας 20 Συντελεστές Μεταβλητών Παλινδρόμησης Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης, εμφάνισαν τους συντελεστές για τη κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή, και φαίνονται στο πίνακα 21:

Μεταβλητές	Συντελεστές
Σταθερός όρος	0,49021
Λαιχμής	0,004544
Vo	-0,03904
RatioL ³	0,426104
Βαιχμής ³	3,02E-06

Πίνακας 21 Μεταβλητές Συντελεστών Μοντέλου Μέσης Επιβράδυνσης

Η εξίσωση υπολογισμού της προβλεπόμενης επιβράδυνσης μετατρέπεται ως εξής:

- Μέση Επιβράδυνση = $0,49 + 0,004 \times \text{Λαιχμής} - 0,039 \times \text{Vo} + 0,426 \times \text{RatioL}^3 + 0,000003 \times \text{Βαιχμής}^3$.

Σε αυτό το σημείο, υπολογίζεται η ελαστικότητα για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή του μοντέλου. Ακολουθεί ο πίνακας 22, με τα αποτελέσματα της ελαστικότητας:

Μεταβλητή	Ελαστικότητα
Λαιχμής	-2,59
V_0	6,63
$RatioL^3$	-0,77
$V_{αιχμής}^3$	-1,14

Πίνακας 22 Ελαστικότητα Μεταβλητών (Μοντέλο Εκτίμησης Μέσης Επιβράδυνσης)

Παρατηρείται πως η **αρχική ταχύτητα έχει** τη μεγαλύτερη ελαστικότητα και κατά συνέπεια **τη μεγαλύτερη επιρροή στο αποτέλεσμα**. Μέσω της αυτοψίας επιβεβαιώθηκε πως **τα οχήματα που ξεκινούν με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, αναγκάζονται να έχουν μεγαλύτερη επιβράδυνση**. Το μήκος αιχμής έχει επίσης μεγάλη τιμή, λόγω της άμεσης συσχέτισης του με την επιβράδυνση του οχήματος. Και σε αυτό το μοντέλο, τα αποτελέσματα είναι λογικά.

Θα ακολουθήσει η ερμηνεία της φυσικής σημασίας των συντελεστών του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία είναι ένας αρχικός έλεγχος των πρόσημων των συντελεστών των μεταβλητών.

Απόσταση αιχμής (Λαιχμής)

Ο συντελεστής του $L_{αιχμής}$ είναι **θετικός (+0,004)**, γεγονός που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διαθέτει ο οδηγός μέχρι το σημείο αιχμής, τόσο ελαφρώς αυξάνεται η μέση επιβράδυνση. Η σχέση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής: όταν το μήκος μέχρι το σημείο αιχμής είναι μεγαλύτερο, ο οδηγός έχει τη δυνατότητα να ξεκινήσει την επιβράδυνση νωρίτερα, διατηρώντας έναν πιο σταθερό ρυθμό μείωσης ταχύτητας σε όλη τη διάρκεια της λωρίδας. Έτσι, η συνολική μέση επιβράδυνση εμφανίζεται οριακά αυξημένη. Αν και η επίδραση είναι μικρή, το θετικό πρόσημο είναι φυσικά αποδεκτό και ενδεικτικό μίας πιο «συντηρητικής» διαδικασίας επιβράδυνσης.

Αρχική ταχύτητα (V_0)

Η μεταβλητή V_0 εμφανίζει **αρνητικό συντελεστή (-0,039)**, κάτι που είναι απολύτως λογικό από φυσικής άποψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική ταχύτητα με την οποία το όχημα εισέρχεται στη λωρίδα επιβράδυνσης, τόσο μικρότερη είναι κατά μέσο όρο η επιβράδυνση που εφαρμόζεται, καθώς ο οδηγός τείνει να επιβραδύνει πιο ομαλά σε μεγαλύτερη απόσταση. Με άλλα λόγια, ένα όχημα που ξεκινά με υψηλή ταχύτητα δεν επιβραδύνει απότομα, αλλά κατανέμει την επιβράδυνση σε μεγαλύτερο μήκος, οδηγώντας σε χαμηλότερη μέση τιμή επιβράδυνσης. Επομένως, το αρνητικό πρόσημο του συντελεστή είναι πλήρως σύμφωνο με την πραγματική οδηγική συμπεριφορά.

Λόγος $RatioL^3$

Ο συντελεστής του $RatioL^3$ είναι **θετικός (+0,426)**, γεγονός που δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου αυτού, τόσο υψηλότερη είναι η μέση επιβράδυνση. Η μεταβλητή $RatioL^3$ εκφράζει ουσιαστικά το σημείο εντός της λωρίδας όπου ξεκινά η διαδικασία

επιβράδυνσης σε σχέση με το συνολικό μήκος της. Αυξημένες τιμές υποδηλώνουν ότι ο οδηγός αρχίζει να επιβραδύνει πιο αργά μέσα στη λωρίδα επιβράδυνσης, έχοντας μικρότερο διαθέσιμο μήκος για να μειώσει την ταχύτητά του. Αυτό οδηγεί αναγκαστικά σε εντονότερη (δηλαδή μεγαλύτερη κατά μέσο όρο) επιβράδυνση. Επομένως, το θετικό πρόσημο του συντελεστή αντικατοπτρίζει τη φυσική συνέπεια της μειωμένης απόστασης φρεναρίσματος.

Ταχύτητα αιχμής (Vαιχμής³)

Η μεταβλητή $V_{αιχμής}^3$ έχει **πολύ μικρό αλλά θετικό συντελεστή (+0,000003)**. Αυτό δείχνει ότι, σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερη είναι η τελική ταχύτητα στο σημείο αιχμής, τόσο ελαφρώς αυξάνεται η μέση επιβράδυνση. Αν και η αριθμητική τιμή του συντελεστή είναι εξαιρετικά μικρή, η θετική του κατεύθυνση είναι φυσικά αποδεκτή: υψηλότερη τελική ταχύτητα σημαίνει συνήθως και συνολικά μεγαλύτερη κινητική ενέργεια, η οποία απαιτεί πιο έντονη διαδικασία επιβράδυνσης για να επιτευχθεί η μείωση της ταχύτητας σε περιορισμένο χώρο. Επομένως, ακόμη και η ασθενής θετική επίδραση του όρου αυτού είναι συμβατή με τη φυσική λογική του φαινομένου.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η εξίσωση υπολογισμού της μέσης επιβράδυνσης, σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο. Η σύγκριση των τιμών φαίνεται στο πίνακα 23:

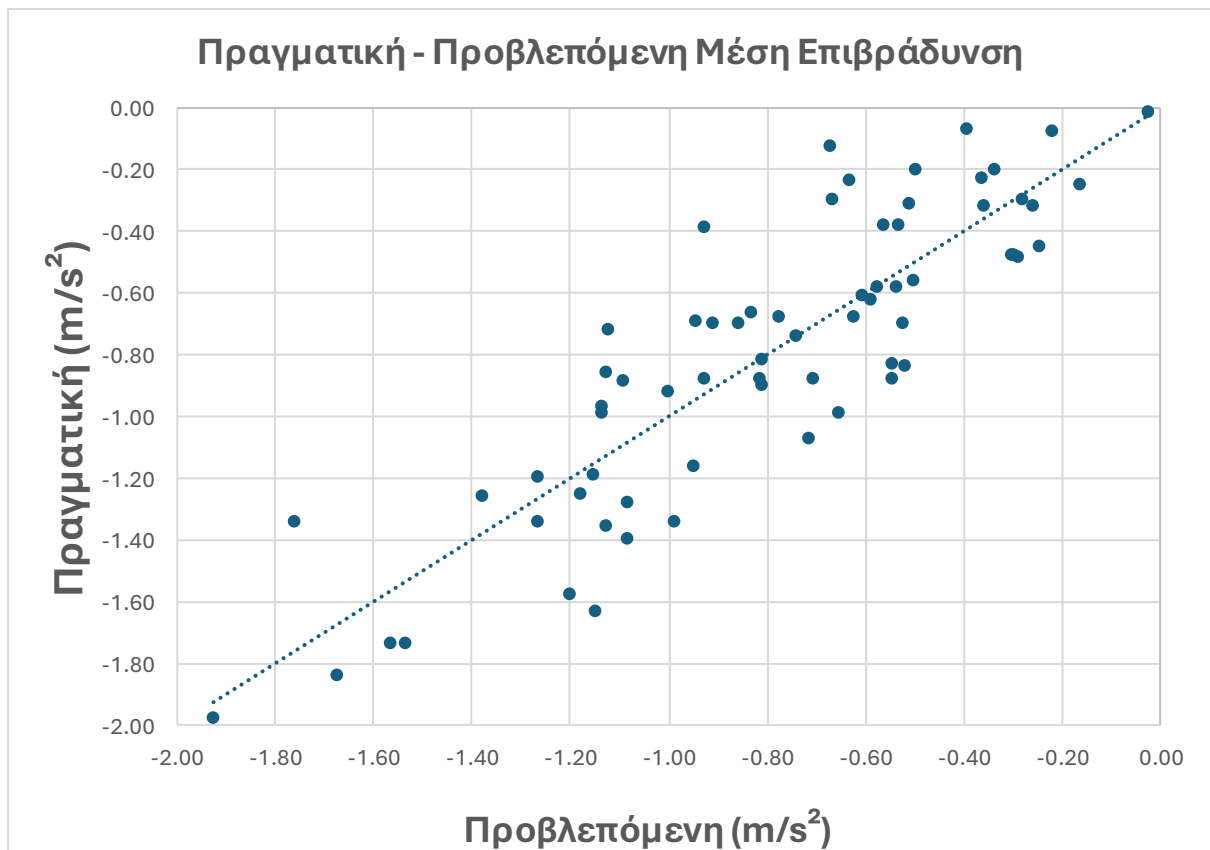
Πραγματική Επιβράδυνση (Μέτρα/δευτερόλεπτα ²)	Προβλεπόμενη Επιβράδυνση (Μέτρα/δευτερόλεπτα ²)
-0,30	-0,28
-0,39	-0,93
-0,12	-0,67
-0,88	-0,71
-0,45	-0,24
-0,48	-0,30
-0,23	-0,36
-0,68	-0,62
-0,70	-0,86
-0,20	-0,34
-0,81	-0,81
-1,35	-1,13
-0,38	-0,53
-0,90	-0,81
-0,69	-0,95
-0,29	-0,66
-0,01	-0,02
-0,62	-0,59
-0,24	-0,63

-0,08	-0,22
-0,31	-0,51
-0,58	-0,58
-0,48	-0,30
-0,07	-0,39
-1,08	-0,71
-0,20	-0,50
-0,49	-0,29
-0,84	-0,52
-0,70	-0,52
-0,25	-0,16
-0,83	-0,55
-0,92	-1,00
-0,88	-1,09
-0,86	-1,13
-0,32	-0,36
-0,58	-0,54
-0,32	-0,26
-0,67	-0,83
-1,74	-1,56
-0,70	-0,91
-1,84	-1,67
-0,72	-1,12
-1,34	-1,76
-0,88	-0,54
-1,34	-0,99
-1,19	-1,15
-0,74	-0,74
-0,97	-1,14
-0,99	-1,13
-1,16	-0,95
-0,56	-0,50
-1,26	-1,38
-1,63	-1,15
-0,88	-0,81
-1,25	-1,18
-0,99	-0,65
-1,58	-1,20
-1,28	-1,08
-1,20	-1,26
-1,98	-1,93
-1,74	-1,53
-1,34	-1,27
-1,40	-1,08
-0,38	-0,56

-0,61	-0,61
-0,68	-0,77
-0,88	-0,93

Πίνακας 23 Σύγκριση πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών μέσης επιβράδυνσης

Για ακόμα μια φορά παρατηρείται αρκετά μικρή απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών. Αυτό υποδηλώνει πως το μοντέλο δουλεύει καλά, και μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια τις τιμές των επιβραδύνσεων. Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα 21, σύγκρισης πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών για τη καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 21 Απεικόνιση τιμών πραγματικής και προβλεπόμενης μέσης επιβράδυνσης.

Πράγματι, σύμφωνα και με το διάγραμμα, φαίνεται πως οι τιμές μεταξύ τους έχουν μικρή σχετικά απόκλιση από τη διαγώνιο. Θεωρείται πως το μοντέλο έχει καλή προσαρμογή, καθώς σε μεγάλο βαθμό οι τιμές ταυτίζονται με τις πραγματικές τιμές επιβράδυνσης.

5.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η συγκριτική ανάλυση των δύο μοντέλων παλινδρόμησης ανέδειξε σημαντικές ομοιότητες αλλά και διαφοροποιήσεις τόσο ως προς τη στατιστική τους επάρκεια όσο και ως προς τη φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Και τα δύο μοντέλα παρουσίασαν υψηλή ικανότητα

ερμηνείας της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής, με συντελεστή προσδιορισμού R^2 άνω του 0,70, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων παραμέτρων και της υπό εξέταση απόκρισης.

Το μοντέλο για τη μέση επιβράδυνση εμφάνισε ελαφρώς ανώτερη προσαρμογή ($R^2 = 0,758$, προσαρμοσμένο $R^2 = 0,743$) και χαμηλότερο τυπικό σφάλμα πρόβλεψης (0,239), γεγονός που καταδεικνύει μεγαλύτερη στατιστική ακρίβεια. Οι περισσότεροι συντελεστές αναδείχθηκαν στατιστικά σημαντικοί, με κυρίαρχες επιδράσεις από τις μεταβλητές **Λαιχμής** και **Vo** οι οποίες παρουσιάζουν σαφείς σχέσεις με την εξαρτημένη μεταβλητή. Η κατεύθυνση των επιδράσεων (θετική ή αρνητική) υποδεικνύει ότι οι αυξήσεις στις τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων συνδέονται με μεταβολές στην εξαρτημένη μεταβλητή με φυσικά ερμηνεύσιμους τρόπους, όπως η αρνητική επίδραση της αρχικής ταχύτητας (V_0).

Το μοντέλο της ταχύτητας αιχμής, αν και παρουσίασε ελαφρώς χαμηλότερη στατιστική επάρκεια ($R^2 = 0,707$, προσαρμοσμένο $R^2 = 0,688$), ενσωμάτωσε μία πρόσθετη δυναμική παράμετρο — τη **μέση επιβράδυνση (α^2 αιχμής)** — η οποία ενισχύει τη φυσική και μηχανική ερμηνεία της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Η συγκεκριμένη μεταβλητή εμφάνισε στατιστικά σημαντική και αρνητική επίδραση, στοιχείο που ευθυγραμμίζεται με τη θεωρητική προσέγγιση ότι μεγαλύτερες τιμές επιβράδυνσης σχετίζονται με μειωμένες αποδόσεις ή αυξημένα επίπεδα κινδύνου, ανάλογα με το πλαίσιο της μελέτης. Παράλληλα, η κατεύθυνση των επιδράσεων σε ορισμένες μεταβλητές διαφοροποιήθηκε σε σχέση με το πρώτο μοντέλο, πιθανώς λόγω της προσθήκης της νέας δυναμικής παραμέτρου, η οποία μεταβάλλει τη συσχέτιση μεταξύ των υπολοίπων.

Συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι το **πρώτο μοντέλο υπερτερεί στατιστικά**, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και συνοχή στα αποτελέσματα, ενώ το **δεύτερο μοντέλο υπερέχει ως προς τη φυσική ερμηνευσιμότητα**, ενσωματώνοντας παράγοντες που αντανακλούν με μεγαλύτερη πιστότητα τη δυναμική της πραγματικής συμπεριφοράς του συστήματος. Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου εξαρτάται, επομένως, από τον στόχο της ανάλυσης: εάν ζητούμενο είναι η πρόβλεψη με μέγιστη στατιστική ακρίβεια, προτείνεται το πρώτο μοντέλο· ενώ αν προτεραιότητα αποτελεί η βαθύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν τη μεταβλητή απόκριση, το δεύτερο μοντέλο παρέχει πιο ρεαλιστική και ολοκληρωμένη προσέγγιση. Και τα δύο μοντέλα επιβεβαιώνουν ότι η γεωμετρία και η θέση εξόδου επηρεάζουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά των οδηγών. Μαζί προσφέρουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της προσαρμογής ταχύτητας κατά την έξοδο.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως μέσω των μοντέλων αυτών, βρέθηκε πως δημογραφικά χαρακτηριστικά, όπως **η ηλικία και το φύλο των οδηγών δεν επηρεάζουν την οδηγική τους συμπεριφορά**. Αυτό προέκυψε καθώς τα παραπάνω μοντέλα, αν και συμπεριλήφθηκαν στοιχεία που αφορούν την ηλικία ή την εμπειρία του καθενός, τελικά αφαιρέθηκαν λόγω μη σημαντικότητας. Αυτό δεν σημαίνει πως τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των οδηγών δεν έχουν καμία σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές των παραπάνω μοντέλων πρόβλεψης, αλλά δεν μπορούν να ερμηνευτούν με τη συγκεκριμένη

μεθοδολογία της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, η οποία κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη λόγω της φύσης και του είδους των ανεξαρτήτων μεταβλητών.

6 Συμπεράσματα

Η εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη της οδηγικής συμπεριφοράς στις λωρίδες επιβράδυνσης ανισόπεδων κόμβων αυτοκινητοδρόμων, **με στόχο την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία μείωσης της ταχύτητας και την επιλογή της απόστασης εισόδου στη λωρίδα**. Η ερευνητική διαδικασία βασίστηκε σε μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε δύο κόμβους της Αττικής (Μεταμόρφωσης και Αγ. Στεφάνου), με χρήση του οργάνου Vericom VC4000DAQ. Το όργανο κατέγραψε με υψηλή χρονική ανάλυση τη μεταβολή της ταχύτητας, της επιβράδυνσης και της απόστασης κίνησης των οχημάτων, επιτρέποντας την ακριβή απεικόνιση των χαρακτηριστικών φάσεων της επιβράδυνσης. Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο **θα γίνει σύνοψη των ευρημάτων της εργασίας**, καθώς και **προτάσεις για μελλοντική έρευνα** πάνω στο αντικείμενο.

6.1 Συνοπτικά αποτελέσματα

Ύστερα από τη καταγραφή δεδομένων, ακολούθησε η επεξεργασία τους. Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής επεξεργασία των δεδομένων και ανάλυση των επιμέρους μεταβλητών. Παρουσιάστηκαν κατανομές ταχυτήτων, αποστάσεων και επιβραδύνσεων, καθώς και διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας και της επιβράδυνσης σε συνάρτηση με τη θέση κατά μήκος της λωρίδας. Μέσα από την ανάλυση αυτών των δεδομένων προέκυψαν γενικά πρότυπα επιβράδυνσης, τα οποία φανερώνουν ότι η συμπεριφορά των οδηγών είναι σε μεγάλο βαθμό συστηματική και επηρεάζεται από τη γεωμετρία και το μήκος της λωρίδας. Οι οδηγοί τείνουν να ξεκινούν τη διαδικασία επιβράδυνσης σε σχετικά σταθερό σημείο πριν τη περιοχή εξόδου, ενώ η ένταση της επιβράδυνσης διαφοροποιείται ανάλογα με την αρχική ταχύτητα και τον διαθέσιμο χώρο. Οι κατανομές ταχυτήτων παρουσίασαν λογική διακύμανση και επιβεβαίωσαν ότι η ταχύτητα μειώνεται σταδιακά με την πρόοδο της κίνησης προς το σημείο αιχμής. Μέσω συγκεντρωτικών διαγραμμάτων, απεικονίστηκε η διαφορά μεταξύ δύο διαφορετικών κόμβων, με έμφαση στη γεωμετρία και τη συμπεριφορά των οδηγών.

Το επόμενο κεφάλαιο επικεντρώθηκε στην στατιστική ανάλυση και συγκεκριμένα στη δημιουργία μοντέλων παλινδρόμησης. Δημιουργήθηκαν δύο κύρια μοντέλα, τα οποία αποσκοπούσαν στην ποσοτική περιγραφή της σχέσης μεταξύ των κινηματικών μεγεθών (ταχύτητας, επιβράδυνσης, απόστασης) και των παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά του οχήματος. **Το πρώτο μοντέλο εκτιμά τη τιμή της ταχύτητας στο σημείο αιχμής, ενώ το δεύτερο εκτιμά τη τιμή της μέσης επιβράδυνσης του οχήματος**. Το πρώτο μοντέλο απέδωσε αποδεκτό συντελεστή προσδιορισμού ($R^2 \approx 0,68$), αποδεικνύοντας ότι οι μεταβλητές που περιλαμβάνει εξηγούν ικανοποιητικό ποσοστό της διακύμανσης της ταχύτητας. Το δεύτερο μοντέλο, με ελαφρώς υψηλότερο συντελεστή προσδιορισμού ($R^2 \approx 0,74$), παρουσίασε βελτιωμένη φυσική ερμηνεία, καθώς ενσωμάτωσε μεταβλητές σχετικές με τη μέγιστη επιβράδυνση. Και τα δύο μοντέλα εμφάνισαν στατιστικά σημαντικούς

συντελεστές, επιβεβαιώνοντας ότι η αρχική ταχύτητα και η γεωμετρία του κόμβου ασκούν καθοριστική επιρροή στη συμπεριφορά επιβράδυνσης.

Η συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δύο κεφαλαίων δείχνει ότι η οδηγική συμπεριφορά στις λωρίδες επιβράδυνσης δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα πρότυπα που εξαρτώνται από φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η ομαλότητα της επιβράδυνσης και η προοδευτική μείωση της ταχύτητας αποτελούν ενδείξεις συνειδητής προσαρμογής των οδηγών στο περιβάλλον του κόμβου. Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να αναδείξει αυτή τη σύνδεση μεταξύ σταθερών παραμέτρων του οδικού συστήματος και μεταβαλλόμενων στοιχείων όπως οι οδηγικές συνήθειες και αποφάσεις των χρηστών της οδού. Σημαντικό είναι να αναφερθεί **πως τη μεγαλύτερη επιρροή στη συμπεριφορά των οδηγών είναι η γεωμετρία του κόμβου και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οδηγού, και όχι στοιχεία όπως το φύλο ή η ηλικία του καθενός.**

6.2 Ερμηνεία και πρακτικές συνέπειες

Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η γεωμετρία των λωρίδων επιβράδυνσης έχει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά των οδηγών. Στον κόμβο Μεταμόρφωσης, το μικρότερο μήκος του τμήματος συναρμογής και οι πιο περιορισμένες αποστάσεις οδηγούν σε αιφνίδιες μεταβολές ταχύτητας, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει αρνητικά την οδική ασφάλεια. Αντίθετα, στον κόμβο Αγίου Στεφάνου, η πιο ομαλή γεωμετρία συνδέεται με πιο σταδιακή επιβράδυνση και μειωμένο κίνδυνο.

Σημαντικό γεγονός που παρατηρήθηκε κατά τη διαδικασία των μετρήσεων είναι η **έλλειψη ορατότητας**, εκτός από την εξαιρετικά μικρή ακτίνα **στην έξοδο του κόμβου Μεταμόρφωσης**. Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, φαίνεται πως το συγκεκριμένο σημείο είναι προβληματικό και **προτείνεται να εξεταστούν μέτρα ενίσχυσης της οδικής ασφάλειας**.

Τα στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης έδειξαν ότι είναι εφικτή η πρόβλεψη της ταχύτητας και της επιβράδυνσης σε κρίσιμα σημεία με καλή ακρίβεια, αξιοποιώντας λίγες και φυσικά ερμηνεύσιμες μεταβλητές. Επίσης η συνολική μεθοδολογική προσέγγιση, που συνδυάζει πραγματικά δεδομένα, γραφική ανάλυση και στατιστική μοντελοποίηση, αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για την κατανόηση και την ποσοτική περιγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς σε περιοχές εξόδου. **Τα μοντέλα παλινδρόμησης που δημιουργήθηκαν σε αυτή την εργασία μπορούν να αξιοποιηθούν σε διαφορετικούς κόμβους, ώστε να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι αντίστοιχοι παράγοντες ταχύτητας και επιβράδυνσης.**

Η ανάπτυξη των μοντέλων παλινδρόμησης στην παρούσα εργασία δεν στοχεύει μόνο στην περιγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς, αλλά και στη **βελτίωση της ασφάλειας και του σχεδιασμού των ανισόπεδων κόμβων**. Μέσω των μοντέλων αυτών επιτυγχάνεται η **ποσοτική εκτίμηση κρίσιμων μεγεθών** όπως η ταχύτητα και η επιβράδυνση σε συγκεκριμένα σημεία της λωρίδας επιβράδυνσης. Τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας έχουν ως εξής:

1. **Πρόβλεψη επικίνδυνων συνθηκών:** Τα μοντέλα μπορούν να εντοπίσουν συνδυασμούς παραμέτρων (όπως μεγάλη αρχική ταχύτητα και μικρή διαθέσιμη απόσταση επιβράδυνσης) που οδηγούν σε αυξημένες τιμές επιβράδυνσης και ενδεχομένως σε απώλεια ελέγχου ή αδυναμία ασφαλούς εισόδου στη λωρίδα.
2. **Αναγνώριση κρίσιμων σημείων σχεδιασμού:** Μέσα από την ανάλυση των προβλεπόμενων τιμών ταχύτητας και επιβράδυνσης, μπορούν να εντοπιστούν γεωμετρικές διαμορφώσεις που ευνοούν απότομες ή επικίνδυνες μεταβολές ταχύτητας και να τις ανασχεδιάσουν αναλόγως.
3. **Καθορισμό κατάλληλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών:** Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του μήκους, της καμπυλότητας των λωρίδων επιβράδυνσης και των συνδετήριων κλάδων εξόδου εν γένει, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή προσαρμογή της ταχύτητας χωρίς υπερβολικές επιβραδύνσεις.
4. **Ανάπτυξη προγνωστικών εργαλείων ασφάλειας:** Μελλοντικά, τα μοντέλα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για εργαλεία πρόβλεψης που θα αξιολογούν την ασφάλεια ενός κόμβου ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού, επιτρέποντας τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων.
5. **Υποστήριξη συστημάτων ευφυούς μεταφορών (ITS):** Η ενσωμάτωση τέτοιων μοντέλων σε συστήματα προειδοποίησης ή αυτόματης υποβοήθησης οδηγού μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών για την ανάγκη μείωσης ταχύτητας πριν την είσοδο στον κόμβο.

Συνολικά, η εφαρμογή των μοντέλων παλινδρόμησης επιτρέπει τη **μετατροπή των μετρήσεων πεδίου σε πρακτικά εργαλεία πρόβλεψης και αξιολόγησης ασφάλειας**, συμβάλλοντας έτσι σε **πιο ολοκληρωμένες αποφάσεις σχεδιασμού** και στη **μείωση του κινδύνου** στους ανισόπεδους κόμβους.

6.3 Προτάσεις βελτίωσης

Με βάση τα ευρήματα, προτείνονται:

- **Επαναξιολόγηση γεωμετρίας** στους κόμβους με μικρό ή περιορισμένο τμήμα συναρμογής, όπως αυτός της Μεταμόρφωσης, ώστε να μειωθούν οι απότομες επιβραδύνσεις. Απαραίτητη φαίνεται να είναι η **επανεξέταση της ακτίνας καμπυλότητας** προς όφελος της ασφάλειας. Η λωρίδα επιβράδυνσης φαίνεται να έχει επαρκές μήκος και ταυτόχρονα να αξιοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος της από τους χρήστες.
- **Βελτίωση σήμανσης** πριν την είσοδο στη λωρίδα επιβράδυνσης, ώστε οι οδηγοί να προετοιμάζονται εγκαίρως.

- **Χρήση τεχνολογιών καθοδήγησης** (π.χ. ηλεκτρονικές πινακίδες με μεταβαλλόμενα όρια ταχύτητας) για έγκαιρη ενημέρωση σχετικά με την απαιτούμενη μείωση ταχύτητας, ιδιαίτερα σε δυσμενείς συνθήκες [π.χ. υγρό οδόστρωμα, περιορισμένη ορατότητα (ομίχλη)].

6.4 Μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της οδηγικής συμπεριφοράς στις λωρίδες επιβράδυνσης, ωστόσο προσφέρει πεδίο για περαιτέρω ερευνητικές επεκτάσεις και βελτιώσεις:

1. **Επέκταση του δείγματος κόμβων:** Μελλοντικές έρευνες μπορούν να συμπεριλάβουν περισσότερους κόμβους με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μεγαλύτερο αριθμό οδηγών, ώστε να ενισχυθεί η στατιστική αξιοπιστία και να μειωθεί η γενίκευση των αποτελεσμάτων. Συμπληρωματικά, αντίστοιχες μετρήσεις μπορούν να γίνουν και σε διαφορετικά σημεία του οδικού δικτύου, όπως σε λωρίδες εισόδου.
2. **Επέκταση του δείγματος οδηγών:** Απαραίτητη είναι η διεύρυνση του δείγματος των συμμετεχόντων στις μετρήσεις. Τόσο για να ενισχυθεί η αξιοπιστία των στατιστικών, όσο για να είναι όσο πιο αντικειμενικά τα δεδομένα που θα ληφθούν από τις μετρήσεις, θα πρέπει οι οδηγοί να έχουν μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά τους όπως ηλικία, φύλο, εμπειρία οδήγησης. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να συμπεριληφθούν τακτικοί αλλά και μη, χρήστες του οδικού δικτύου της περιοχής.
3. **Επέκταση του δείγματος οχημάτων:** Σημαντικός και καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα είναι η επιλογή του οχήματος με το οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση. Διαχωρίζοντας τα δεδομένα ανά τύπο οχήματος (επιβατικό, φορτηγό), θα μπορούσαν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον ρόλο πρόσθετων παραμέτρων όπως: της μάζας και της διατιθέμενης ισχύος. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη η υψομετρική γεωμετρία της οδού καθώς και η διαμόρφωση των επικλίσεων προκειμένου να αξιολογηθούν οι συνθήκες ασφάλειας σε τρισδιάστατο οδικό περιβάλλον.
4. **Ανάλυση σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης:** Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ελεύθερης ροής. Η διερεύνηση της συμπεριφοράς σε συνθήκες αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου θα συμβάλλει καθοριστικά στην ολοκληρωμένη κατανόηση διαφορετικών προτύπων επιβράδυνσης και θα ήταν μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση της καθημερινής κατάστασης στο οδικό δίκτυο.
5. **Ανάλυση σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες:** Παρότι όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ευνοϊκές συνθήκες, η έρευνα μπορεί να επεκταθεί με τη συλλογή δεδομένων υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως βροχή, χιόνι ή ομίχλη. Είναι προφανές ότι η οδήγηση σε τέτοιες συνθήκες θα επηρεάσει τα αποτελέσματα

των μετρήσεων, παρέχοντας έναν πιο ολοκληρωμένο και ρεαλιστικό πίνακα δεδομένων.

6. **Ενσωμάτωση δημογραφικών μεταβλητών:** Αν και δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση, μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν αν και πώς παράγοντες όπως η ηλικία ή η εμπειρία επηρεάζουν τις τιμές επιβράδυνσης.
7. **Εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης:** Η αξιοποίηση μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια πρόβλεψης και να εντοπίσει μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.
8. **Προσομοίωση και εφαρμογή σε σχεδιαστικά πρότυπα:** Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν δύνανται να αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη εργαλείων προσομοίωσης, με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των λωρίδων επιβράδυνσης σύμφωνα με τα ευρήματα της παρούσας μελέτης.

Συνολικά, η συνέχιση της έρευνας προς αυτές τις κατευθύνσεις μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας των ανισόπεδων κόμβων, αλλά και στην ευρύτερη κατανόηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο οδικό περιβάλλον.

Βιβλιογραφία

1. Bella, F. and Calvi, A. (2013) 'Effects of traffic and geometric characteristics on driver behavior in deceleration lanes: A driving simulator study', *Accident Analysis & Prevention*.
2. Calvi, A., Bella, F. and D'Amico, F. (2015) 'Diverging driver performance along deceleration lanes: Driving simulator study', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
3. Nengchao Lyu, N., Wang, Y., Wu, C., Deng, C. and Wenxiang Xu, J. (2021) 'Exploring longitudinal driving behavior on a freeway deceleration lane using field operational test data', *IET Intelligent Transport Systems*.
4. Wenxiang Xu, C., Liu, P., Wang, W. and Li, Z. (2018) 'Interchange deceleration lane design based on naturalistic driving speeds and deceleration rates', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
5. Zhang, Y., Li, J. and Zhao, L. (2023) 'Calculation method of deceleration lane length and slope based on reliability theory', *Sustainability*.
6. Orsini, Tagliabue, De Cet, Gastaldi & Rossi, (2021) 'Highway Deceleration Lane Safety: Effects of Real-Time Coaching Programs on Driving Behavior'.
7. Wenxiang Xu, Ting Fu (2022) 'Aggressive driving behavior prediction considering driver's intention based on multivariate-temporal feature data'.
8. Wenhui Zhang et al (2022) 'Drivers Decelerating Behaviors in Expressway Accident Segments under Different Speed Limit Schemes'.
9. Yasser Hassan, Mohamed Sarhan, Mohsen Salehi (2012) 'Probabilistic Model for Design of Freeway Acceleration Speed-Change Lanes'.
10. Hongyun Chen et al (2012) 'Selecting Optimal Deceleration Lane Lengths at Freeway Diverge Areas Combining Safety and Operational Effects'.
11. Bashar Dhahir (2018) 'Reliability-Based, Safety-Explicit Horizontal Curve Design Using Naturalistic Driving Study'.
12. Fayez Alamry (2022) 'Examining Driver Behavior at Freeway Ramp Terminals Based on Trajectory Data Collected Using Unmanned Aerial Vehicles and Video Image Processing'.
13. Fayez Alamry and Yasser Hassan (2023) 'Driver Behavior Performance at Freeway Exit Ramp Terminals: Investigation and Modeling'.
14. Orsini, F., Tagliabue, M., De Cet, G., Gastaldi, M. & Rossi, R. (2021) 'Highway Deceleration Lane Safety: Effects of Real-Time Coaching Programs on Driving Behavior, Sustainability'.
15. Int. J. Environ. Res. Public Health (2022) 'Drivers Decelerating Behaviors in Expressway Accident Segments under Different Speed Limit Schemes'. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

16. Hassan, Y., Sarhan, M. & Salehi, M. (2012) 'Probabilistic Model for Design of Freeway Acceleration Speed-Change Lanes', Transportation Research Record.
17. Wang, H., Cheng, C., Guan, H. & Ding, N. et al. (2024) 'Study on Length of Deceleration Lane of Left Off-Ramp for Urban Underground Interchanges Based on Traffic Conflicts'.
18. Chen, H., Zhou, H. & Lin, P.-S. (2012) 'Selecting Optimal Deceleration Lane Lengths at Freeway Diverge Areas Combining Safety and Operational Effects', Transportation Research Board, Proceedings of the Annual Meeting.
19. Nardos Feknssa (2022) 'Unobserved heterogeneity in ramp crashes due to alignment, interchange geometry and truck volume: Insights from a random parameter model'.
20. Tanvir Chowdhury (2022) 'Estimation of Appropriate Acceleration Lane Length for Safe and Efficient Truck Platooning Operation on Freeway Merge Areas'.
21. Sushmitha Ramireddy (2023) 'Influence of sight distance characteristics on safety of intersections using surrogate safety measures: Effect of Sight Distance Characteristics on Safety of Intersections'.
22. Essam Dabbour (2020) 'Minimum Lengths of Acceleration Lanes Based on Actual Driver Behavior and Vehicle Capabilities'.
23. Hassan, Y., Sarhan, M. & Salehi, M. (2012) 'Probabilistic Model for Design of Freeway Acceleration Speed-Change Lanes'.
24. Jun Wang (2005) 'Normal Deceleration Behavior of Passenger Vehicles at Stop Sign-Controlled Intersections Evaluated with In-Vehicle Global Positioning System Data'.
25. <https://vericomcomputers.com/products/profile-software/profile-5-software-only/>
26. <https://vericomcomputers.com/cms-files/vc4000-daq-brochure-101716.J.pdf>
27. <https://www.vericomcomputers.com/cms-files/vc4000daq-specification-sheet-101916.pdf>
28. <https://www.masstransitmag.com/home/product/12078778/vericom-computers-vc4000daq-performance-computer-internal-10hz-gps-and-automatic-pitch-adjustment>
29. <https://abcdust.net/motion/>