



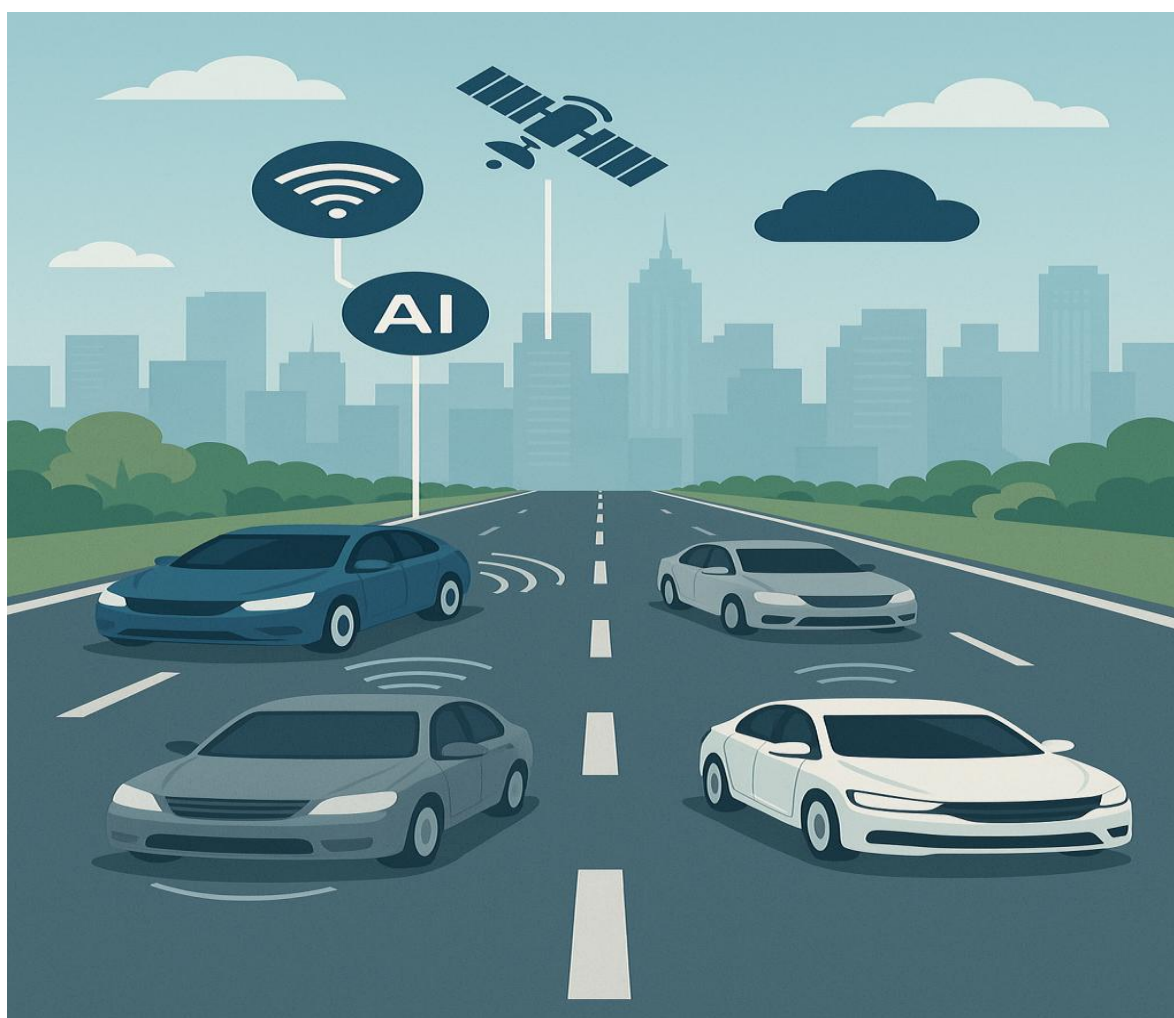
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Η επιρροή των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια με χρήση προσομοίωσης



Επιβλέπων | Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καλλιακούδη Αικατερίνη

Αθήνα, Ιούλιος 2025

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ύψιστης σημασίας ήταν η συνεισφορά όλων όσων συνέβαλαν, μέσω ενός κλίματος εξαιρετικής συνεργασίας, με οποιοδήποτε τρόπο στην ανάπτυξη και ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Γιώργο Γιαννή, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω υπό την επίβλεψή του τη διπλωματική μου εργασία και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Οι παραδειγματικές υποδείξεις του και οδηγίες ήταν καίριες για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στη Μαρία Οικονόμου, Υποψήφια Διδάκτορα Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την σημαντική συμβολή της στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η καθοριστική της βοήθεια, οι εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές της, αποτέλεσαν οδηγό σε όλη της διάρκεια της διαδικασίας από το αρχικό στάδιο έως το τέλος της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια και για τη δυνατότητα που μου παρείχαν να αφοσιωθώ στις σπουδές μου και να κυνηγήσω τους στόχους μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω του φίλους μου, που υπήρξαν στήριγμα για εμένα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η παρουσία τους και οι κοινές στιγμές που μοιραστήκαμε έκαναν αυτή τη διαδρομή πιο όμορφη.

Αθήνα, Ιούλιος 2025

Καλλιακούδη Αικατερίνη

Η επιρροή των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια με χρήση προσομοίωσης

Καλλιακούδη Αικατερίνη

Επιβλέπων | Γιώργος Γιαννής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σύνοψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων (CAV) οχημάτων στην οδική ασφάλεια, με χρήση μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα προσομοίωσης που προέκυψαν από εννέα σενάρια, τα οποία εφαρμόστηκαν σε περιοχή του κέντρου της Αθήνας. Τα σενάρια διέφεραν ως προς το ποσοστό διείσδυσης AV/CAV στο δίκτυο (MPR), με τιμές από 0% έως 100% και βήμα αύξησης 25%. Για κάθε σενάριο καταγράφηκαν εμπλοκές οχημάτων με χρόνο έως την εμπλοκή (TTC) μεταξύ 0,2 και 1,5 δευτερολέπτων, καθώς και κυκλοφοριακά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σημείων όπου συνέβησαν. Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω ανάπτυξης τριών μοντέλων: δύο μοντέλων πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (για τις μεταβλητές TTC – χρόνος ως την εμπλοκή και DeltaS – διαφορά ταχύτητας), και ενός μοντέλου πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη του τύπου εμπλοκής. Από την εφαρμογή των μοντέλων προέκυψε ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τα παραπάνω μεγέθη έχουν να κάνουν τόσο με δεδομένα σύνθεσης κυκλοφορίας (τύπος οχημάτων), όσο και με δεδομένα οδικής υποδομής (όριο ταχύτητας, χωρητικότητα οδών). Τέλος, η αύξηση του βαθμού διείσδυσης των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο, προσδιορίστηκε ότι έχει θετικές επιδράσεις στην οδική ασφάλεια και μειώνει σημαντικά τον αριθμό εμπλοκών.

Λέξεις κλειδιά: συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα, μικροσκοπική προσομοίωση, οδική ασφάλεια, χρόνος ως την εμπλοκή, τύπος εμπλοκών, ποσοστό διείσδυσης, γραμμική παλινδρόμηση

The impact of connected and autonomous vehicles on road safety with use of simulation

Kalliakoudi Aikaterini

Supervisor| George Yiannis Professor N.T.U.A.

Abstract

The objective of this thesis is to investigate the impact of autonomous vehicles (AV) and connected autonomous vehicles (CAV) on road safety, using microscopic traffic simulation. The analysis was based on simulation data derived from nine scenarios implemented in the city center of Athens. These scenarios varied in terms of the market penetration rate (MPR) of AVs and CAVs in the network, ranging from 0% to 100%, with an incremental step of 25%. For each scenario, vehicle conflicts were recorded where the time to collision (TTC) ranged between 0.2 and 1.5 seconds. Additionally, traffic and geometric characteristics of the locations where the conflicts occurred were documented. The statistical analysis was carried out through the development of three models: two multiple linear regression models (for the variables TTC – time to collision, and DeltaS – speed difference), and one multinomial logistic regression model to predict the type of conflict. The results indicated that the influencing factors for the above variables are related both to traffic composition (e.g., vehicle types) and infrastructure characteristics (e.g., speed limit, capacity). Ultimately, the increase in AV/CAV penetration in the network was found to have a positive impact on road safety, significantly reducing the number of vehicle conflicts.

Key words: connected and autonomous vehicles, microscopic simulation, road safety, time to collision, type of conflict, penetration rate, linear regression

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η **διερεύνηση της επίδρασης της διείσδυσης των αυτόνομων (Autonomous Vehicles – AVs) και των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (Connected and Automated Vehicles – CVs) στην οδική ασφάλεια**. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο η αύξηση του βαθμού διείσδυσης των δύο αυτών τεχνολογιών, ξεχωριστά, επηρεάζει κρίσιμες κυκλοφοριακές μεταβλητές, όπως ο χρόνος ως την εμπλοκή (Time to Collision – TTC), η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (Delta Speed – DS), καθώς και ο τύπος εμπλοκής (π.χ. οπίσθια, πλάγια, μετωπική ή πλαγιομετωπική σύγκρουση).

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, χρησιμοποιήθηκε **μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας**, με εφαρμογή σε επιλεγμένη περιοχή του κέντρου της Αθήνας. Η προσομοίωση βασίστηκε σε σενάρια κυκλοφορίας κατά την ώρα αιχμής, λαμβάνοντας υπόψη την υφιστάμενη λειτουργία του οδικού δικτύου. Συνολικά αναπτύχθηκαν εννέα σενάρια προσομοίωσης, με διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (Market Penetration Rate – MPR%) των αυτόνομων και των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, από 0% έως 100%, με βήμα 25%, για κάθε τεχνολογία ξεχωριστά.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων καταγράφηκαν **93.492 συμβάντα εμπλοκών**, στα οποία ο χρόνος TTC ήταν μεγαλύτερος από 0,2 δευτερόλεπτα και μικρότερος από 1,5 δευτερόλεπτα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε περιγραφική στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση, οδηγώντας σε ενδιαφέροντα προκαταρκτικά ευρήματα. Στη συνέχεια, κατόπιν επαναληπτικών δοκιμών, αναπτύχθηκαν τρία μαθηματικά μοντέλα, μέσω **γραμμικής παλινδρόμησης** και **πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης**, τα οποία περιγράφουν τη στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών (ο χρόνος ως την εμπλοκή, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων, ο τύπος εμπλοκής) και κρίσιμων παραμέτρων του κυκλοφοριακού δικτύου. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας

Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Μοντέλα Γραμμικής Παλινδρόμησης				Μοντέλο πολυωνμικής λογιστικής παλινδρόμησης			
	Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)		Διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των δύο οχημάτων (DeltaS)		Τύπος Εμπλοκής (Conflict Type)			
					ConflictType=lane change		ConflictType= rear end	
	βi	t	βi	t	βi	z	βi	z
Intercept	1,753	338,599	2,228	3,877	2,119	1310,216	4,317	2616,166
MPR_AV	-0,003	-56,786	-0,002	-6,242	0,003	3,532	0,003	3,140
MPR_CAV	-0,005	-111,851	0,003	11,219	0,005	5,357	0,007	8,404
FirstLength	0,013	18,573	0,101	32,235				
FirstWidth	-0,095	-37,734	-	-	-0,107	-17,073	-0,276	-43,226
SecondLength	0,018	18,220	0,153	0,021	-0,108	-11,067	-0,082	-8,293
SecondWidth	-0,339	-130,177	1,397	0,281	0,067	6,317	-0,027	-2,553
Length	0,000	7,794	0,000	0,000				
SpeedLimit	0,000	2,383	0,017	0,001	0,005	3,631	0,009	6,283
Capacity	0,000	-34,940	0,000	0,000	0,001	17,660	0,001	20,209
MaxS	-0,012	-29,592	-	-	-	-	-	-
ConflictType lane change	-	-	-3,697	-66,369	-	-	-	-
ConflictType rear end	-	-	-5,567	-103,815	-	-	-	-
SecondVehType56	-	-	0,266	1,962	-	-	-	-
SecondVehType58	-	-	-0,767	-3,399	-	-	-	-
SecondVehType683130	-	-	-1,374	-52,187	-	-	-	-
SecondVehType686018	-	-	1,688	3,98	-	-	-	-
SecondVehType691603	-	-	-0,249	-6,092	-	-	-	-
ControlNone	-	-	0,582	9,446	-	-	-	-
ControlStop	-	-	0,197	2,477	-	-	-	-
Controltraffilight	-	-	0,486	7,953	-	-	-	-
DeltaS	-	-	-	-	-0,195	-32,212	-0,539	-76,585
R-squared	0,4214		0,2789					
Accuracy	-		-		0,8155			

Κατά τα διάφορα στάδια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας προέκυψε μια σειρά συμπερασμάτων που συνδέονται άμεσα με τους αρχικούς στόχους και τα ερωτήματά της. Στη παρούσα ενότητα, επιχειρείται να δοθεί απάντηση στα ερωτήματα αυτά, με τη σύνθεση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων. Τα γενικά συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

1. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τον **χρόνο έως την εμπλοκή** (Time to Collision – TTC) φαίνεται να σχετίζονται κυρίως με τα χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων οχημάτων, όπως το μήκος και το πλάτος του πρώτου και του δεύτερου οχήματος, καθώς και με το ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων (CAV) οχημάτων στην κυκλοφορία. Αντιθέτως, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, όπως το συνολικό μήκος του οδικού τμήματος, το όριο ταχύτητας και η χωρητικότητα, φαίνεται να ασκούν πιο περιορισμένη επίδραση στον χρόνο TTC.
2. Η **διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS)** φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τον τύπο εμπλοκής, και συγκεκριμένα στις πλάγιες (lane change) και οπίσθιες (rear-end) συγκρούσεις παρατηρούνται υψηλότερες τιμές της μεταβλητής. Επιπλέον, σημαντική επίδραση ασκεί και ο τύπος του δεύτερου οχήματος εμπλοκής, με διαφοροποιήσεις να καταγράφονται μεταξύ συμβατικών επιβατικών αυτοκινήτων (I.X.), λεωφορείων, φορτηγών, μοτοσυκλετών, καθώς και συνδεδεμένων ή αυτόνομων οχημάτων. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος του τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας (π.χ. απουσία

ελέγχου, παρουσία πινακίδας STOP ή φωτεινού σηματοδότη), ο οποίος επηρεάζει την ταχύτητα και τον συγχρονισμό των οχημάτων κατά την προσέγγιση σε σημεία πιθανής εμπλοκής. Αντιθέτως, οι παράγοντες διείσδυσης των αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) στην κυκλοφορία, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και των εμπλεκόμενων οχημάτων, εμφανίζουν πιο περιορισμένη επίδραση στη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων.

3. Για την **πιθανότητα εμφάνισης πλάγιας εμπλοκής** τύπου (lane change) σε σύγκριση με **πλαγιομετωπική ή μετωπική (crossing) σύγκρουση**, ως σημαντικοί θετικοί παράγοντες αναδείχθηκαν η διείσδυση αυτόνομων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV), η χωρητικότητα της οδού (Capacity), το όριο ταχύτητας (SpeedLimit) και το πλάτος του δεύτερου οχήματος (SecondWidth). Αντιθέτως, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), το μήκος του δεύτερου οχήματος (SecondLength) και το πλάτος του πρώτου οχήματος (FirstWidth) συσχετίζονται αρνητικά με την πιθανότητα εμφάνισης εμπλοκής αυτού του τύπου. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι τόσο τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, όσο και οι κυκλοφοριακές και τεχνολογικές συνθήκες, επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών, ενισχύοντας την πιθανότητα πραγματοποίησης ελιγμών αλλαγής λωρίδας υπό συγκεκριμένες συνθήκες.
4. Για την πιθανότητα εμφάνισης εμπλοκής τύπου **οπίσθιας σύγκρουσης (rear end) σε σχέση με την πλαγιομετωπική ή μετωπική (crossing) εμπλοκή**, το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης ανέδειξε ως θετικά συνδεδεμένους παράγοντες τη διείσδυση αυτόνομων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV), τη χωρητικότητα της οδού (Capacity) και το όριο ταχύτητας (SpeedLimit). Οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης οπίσθιων συγκρούσεων, πιθανόν λόγω αυξημένης κυκλοφοριακής ροής και ταχυτήτων, αλλά και διαφορών στην οδηγική συμπεριφορά σε περιβάλλοντα με παρουσία AV/CAV. Αντίθετα, σημαντικά αρνητική επίδραση ασκούν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), το μήκος (SecondLength) και το πλάτος (SecondWidth) του δεύτερου οχήματος, καθώς και το πλάτος του πρώτου οχήματος (FirstWidth), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι οδηγοί διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις από οχήματα μεγάλων διαστάσεων ή όταν υπάρχει σημαντική διαφορά ταχύτητας, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο εμπλοκής από πίσω.
5. Η **εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων (AV) οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού αριθμού εμπλοκών**. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ακόμη και σε χαμηλό ποσοστό διείσδυσης (25%) παρατηρείται αισθητή μείωση σε σύγκριση με το βασικό σενάριο χωρίς αυτόνομα οχήματα (0%). Επιπλέον, καθώς το ποσοστό διείσδυσης αυξάνεται περαιτέρω (50%, 75%, 100%), ο αριθμός των εμπλοκών παραμένει σχετικά σταθερός, διατηρώντας το χαμηλό επίπεδο που παρατηρείται ήδη από το 25%. Αντίστοιχα, για τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα (CAV) παρατηρείται επίσης σημαντική μείωση των εμπλοκών στο σενάριο διείσδυσης 25%.

Ωστόσο, σε αντίθεση με τα AV, η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού διείσδυσης συνοδεύεται από ελαφρά ανοδική τάση στον αριθμό εμπλοκών, η οποία όμως δεν υπερβαίνει ποτέ τα επίπεδα του σεναρίου χωρίς CAV (0%), διατηρώντας έτσι το συνολικό όφελος σε επίπεδα θετικά.

6. **Επιπλέον, η εισαγωγή των αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) συμβάλλει στη σημαντική μείωση της συχνότητας όλων των τύπων εμπλοκών**, συμπεριλαμβανομένων των πλάγιων (lane change), οπίσθιων (rear-end), πλαγιομετωπικών και μετωπικών συγκρούσεων. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η ενίσχυση του οδικού δικτύου με AV και CAV έχει γενικευμένα οφέλη στην οδική ασφάλεια, ανεξαρτήτως του είδους της εμπλοκής.
7. **Το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων (MPR_AV) εμφανίζει αρνητική και στατιστικά σημαντική επίδραση στη διαφορά ταχύτητας** μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η αύξηση του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων (AV) στην κυκλοφορία συνδέεται με μείωση της διαφοράς ταχύτητας (DeltaS). Αυτό ερμηνεύεται από τη συνεπή και προβλέψιμη οδηγική συμπεριφορά των AV, τα οποία τείνουν να διατηρούν σταθερή ταχύτητα και ομαλή ροή, μειώνοντας τις απότομες επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις και συμβάλλοντας σε **πιο ομοιόμορφη κυκλοφοριακή δυναμική**.
8. **Το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων (MPR_CAV) παρουσιάζει θετική επίδραση στη διαφορά ταχύτητας** μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), υποδηλώνοντας ότι η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων συνοδεύεται από μεγαλύτερες αποκλίσεις στις ταχύτητες. Αυτό το φαινόμενο ενδέχεται να οφείλεται στη διαφορετική δυναμική λειτουργίας των CAV, τα οποία προσαρμόζονται σε κυκλοφοριακές συνθήκες βάσει δεδομένων που δεν είναι διαθέσιμα στα μη συνδεδεμένα οχήματα. Η πρόσβαση αυτή σε πληροφορίες μπορεί να οδηγεί τα CAV σε συμπεριφορές που διαφοροποιούνται προσωρινά από εκείνες των υπόλοιπων οχημάτων, δημιουργώντας αυξημένες διαφορές ταχύτητας στο σύνολο της κυκλοφορίας.
9. **Η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV) σχετίζεται με μείωση του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC)**. Στην περίπτωση των AV, η αιτία μπορεί να εντοπίζεται στη διαφοροποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, γεγονός που ενδέχεται να προκαλεί αιφνιδιασμό ή καθυστερημένες αντιδράσεις από τους τελευταίους. Αντίστοιχα, αν και τα CAV ενσωματώνονται γενικά πιο ομαλά στην κυκλοφορία, η έλλειψη επικοινωνίας με τα συμβατικά οχήματα μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρες ή μη αναμενόμενες καταστάσεις εμπλοκής, μειώνοντας επίσης τον διαθέσιμο χρόνο αντίδρασης.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	17
1.1	Γενική Ανασκόπηση.....	17
1.2	Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.....	18
1.3	Μεθοδολογία	19
1.4	Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	20
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	22
2.1	Εισαγωγή	22
2.2	Αυτόνομα Οχήματα	22
2.3	Συναφείς έρευνες και μεθοδολογίες.....	23
2.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	27
3	Θεωρητικό Υπόβαθρο	28
3.1	Εισαγωγή	28
3.2	Βασικές Έννοιες Στατιστικής	28
3.3	Μαθηματικά Μοντέλα	30
3.3.1	Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression).....	31
3.3.2	Πολυωνυμική Λογιστική Παλινδρόμηση	31
3.4	Στατιστική Αξιολόγηση και Κριτήρια Αποδοχής μοντέλου.....	33
4	Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων.....	35
4.1	Εισαγωγή	35
4.2	Συλλογή Δεδομένων.....	35
4.2.1	Δίκτυο Προσομοίωσης	36
4.2.2	Σενάρια προσομοίωσης	37
4.2.3	Παράμετροι Προσομοίωσης	38
4.2.4	Εξαγωγή εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας	39
4.3	Κωδικοποίηση Δεδομένων	40
4.4	Επεξεργασία Στοιχείων	45
4.4.1	Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)	45
4.4.2	Συχνότητα εμπλοκών	47
4.4.3	Τύπος εμπλοκής (Conflict Type)	50
4.5	Σύνοψη.....	54
5	Εφαρμογή Μεθοδολογίας - Αποτελέσματα	55
5.1	Εισαγωγή	55

5.2 Ανάπτυξη μοντέλων με τη γλώσσα προγραμματισμού R	55
5.2.1 Δεδομένα εισόδου – Καθορισμός μεταβλητών	55
5.2.2 Μοντέλα Γραμμικής και Πολυωνυμικής λογιστικής Παλινδρόμησης	56
5.3 Εφαρμογή στατιστικών μοντέλων προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τις εξαρτημένες μεταβλητές	57
5.3.1 Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC) – Μοντέλο 1	58
5.3.2 Διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS) – Μοντέλα 2	61
5.3.3 Τύπος Εμπλοκής (Conflict Type) – Μοντέλο 3	66
6 Συμπεράσματα	71
6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων	71
6.2 Συνολικά Συμπεράσματα	72
6.3 Προτάσεις	75
6.4 Προτάσεις για περεταίρω έρευνα	76
7 Βιβλιογραφία	77

1 Εισαγωγή

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Η **τεχνολογία των αυτόματων οχημάτων**, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής, που έχει προσφέρει πολλαπλά οφέλη στη κοινωνία σε πολλά επίπεδα, ενώ συνεχίζει συνεχώς και εξελίσσεται. Απόδειξη αυτού, αποτελεί και το γεγονός ότι ολοένα και περισσότερες λειτουργίες των συμβατικών οχημάτων, αντικαθίστανται από λειτουργίες τις οποίες το όχημα εκτελεί αυτόνομα. Επίσης, τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να κυκλοφορούν στο οδικό δίκτυο χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, αξιοποιώντας κατάλληλα διαμορφωμένα συστήματα αισθητήρων και άλλων οργάνων. Η ασφάλεια της κυκλοφορίας αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της διεύθυνσης των αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφορία. Σημαντικός σκοπός της αυτοματοποίησης των οχημάτων είναι να βοηθήσουν στη μείωση των ατυχημάτων και να συνεισφέρουν στη δημιουργία ασφαλέστερων συνθηκών κυκλοφορίας.

Σύμφωνα με τον **Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO)** σε ετήσια βάση, περίπου 1,19 εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους λόγω ατυχημάτων. Ο οργανισμός **National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)** εκτιμά ότι το 94% των ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος. Συγκριμένα, τα περισσότερα ατυχήματα συμβαίνουν λόγω υπερβολικής ταχύτητας, χρήσης κινητού τηλεφώνου και κατανάλωσης αλκοόλ. Ιδιαίτερα, η χρήση κινητού αυξάνει την πιθανότητα για ατύχημα περίπου τέσσερις φορές. Με βάση τα παραπάνω, τα αυτόματα οχήματα θα πρέπει να συμβάλλουν στη μείωση των τροχαίων, καθώς θα υπάρχει πλήρης επίγνωση του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα εξαλείφει τον ανθρώπινο παράγοντα. Η αυτοματοποίηση των οχημάτων εισάγει όμως και νέους κινδύνους. Η αστοχία του λειτουργικού συστήματος των αυτόνομων οχημάτων μπορεί να προκαλέσει ατύχημα, επομένως για να είναι ασφαλής η αυτοματοποιημένη οδήγηση θα πρέπει να εξαλειφθούν οι κίνδυνοι.

Στην Ευρώπη, πολλές χώρες καταβάλουν προσπάθεια για τη βελτίωση της ασφάλειας της αυτοματοποιημένης οδήγησης. Πιο συγκεκριμένα, διάφορες χώρες και περιφέρειες δοκιμάζουν και αναπτύσσουν ενεργά αυτόνομα οχήματα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως κλειστές πίστες δοκιμών και καθορισμένες αστικές περιοχές. Οι δοκιμές αυτές αποσκοπούν στην αξιολόγηση της ασφάλειας και της πρακτικότητας των αυτόνομων οχημάτων σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί σε περιβάλλοντα προσομοίωσης αυτόνομων οχημάτων, στα οποία μπορούν να συμμετέχουν οδηγοί, προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ οδηγού και αυτόνομου οχήματος.

Ένα πολύ **σημαντικό ζήτημα** γύρω από την αυτοματοποίηση των οχημάτων είναι ο βαθμός ετοιμότητας του οδικού δικτύου. Είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι το οδικό δίκτυο είναι σε θέση να υποστηρίξει την αυτόματη οδήγηση με τρόπο που να εξασφαλίζεται η οδική ασφάλεια.

Τέλος, για να μπορέσουν τα αυτόματα οχήματα να ενταχθούν με επιτυχία στο οδικό δίκτυο, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η εμπιστοσύνη και η αποδοχή του κοινού. Ακόμη και με την αυτοματοποίηση των οχημάτων θα υπάρχουν ατυχήματα, γεγονός που θα δημιουργεί αντιδράσεις και ζητήματα γύρω από το ποιος έχει την ευθύνη του τροχαίου. Επομένως, θα υπάρχουν συζητήσεις σχετικά με την ευθύνη που αναλογεί στα αυτόματα οχήματα το αποτέλεσμα του γεγονότος. Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών μπορεί να επιτευχθεί μέσω αυστηρών δοκιμών ασφάλειας, εκπαιδευτικών πρωτοβουλιών, συνεχής έρευνα γύρω από την ασφάλεια των αυτόματων οχημάτων και ενημέρωση για την αυτοματοποίηση ώστε να χτιστεί η εμπιστοσύνη των καταναλωτών.

Εν κατακλείδι, ενώ η έρευνα στην Ευρώπη εξελίσσεται συνεχώς και έχει ήδη σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στη ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων, υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ειδικά γύρω από το ζήτημα της ασφάλειας. Η έρευνα γύρω από την αυτοματοποίηση έχει ακόμα πολύ μεγάλα περιθώρια.

1.2 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει και η ανάλυση της **επιρροής της διείσδυσης των αυτοματοποιημένων οχημάτων και των συνδεδεμένων οχημάτων στην ασφάλεια της κυκλοφορίας.**

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση δεδομένων εμπλοκών που προέκυψαν από προσομοίωση κυκλοφορίας σε οδικό δίκτυο στο κέντρο της Αθήνας. Συγκεκριμένα, έγινε διερεύνηση των άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων των αυτόματων οχημάτων και των συνδεδεμένων αυτόματων οχημάτων στην οδική ασφάλεια, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό εισαγωγής των αυτόματων οχημάτων στο οδικό δίκτυο, και άλλων κυκλοφοριακών μεγεθών, όπως οι ταχύτητες των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων, τα χαρακτηριστικά της οδού, και άλλα. Για να γίνει η διερεύνηση αυτή, αναπτύχθηκαν κατάλληλα μαθηματικά στατιστικά μοντέλα, τα οποία περιγράφουν επαρκώς την επιρροή διαφόρων μεταβλητών στο χρόνο ως την εμπλοκή, στη διαφορά των ταχυτήτων των οχημάτων και στον τύπο εμπλοκής.

Τα συμπεράσματα της εργασίας αναμένεται να συνεισφέρουν σε ένα ευρύτερο πλαίσιο αναλύσεων, το οποίο αυξάνεται συνεχώς γύρω από την τεχνολογία των αυτοματοποιημένων οχημάτων.

1.3 Μεθοδολογία

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για την επίτευξη του τελικού της στόχου ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία, τα στάδια της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Αρχικά αντλήθηκαν **δεδομένα προσομοίωσης** κυκλοφορίας εισροής αυτόνομων οχημάτων και συνδεδεμένων αυτόματων οχημάτων σε οδικό δίκτυο στο κέντρο της Αθήνας, μέσα από διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, με χρήση του προγράμματος Aimsun. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 9 διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης πρώτα για τα αυτόματα οχήματα με βαθμό εισροής (Market Penetration Rate) από 0% έως 100% με βήμα 25% και στη συνέχεια για τα συνδεδεμένα αυτόματα οχήματα.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ευρεία **βιβλιογραφική ανασκόπηση** τόσο σε ελληνική όσο και σε διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, έγινε εκτενής αναζήτηση ερευνών, επιστημονικών άρθρων καθώς και γενικών πληροφοριών γύρω από την τεχνολογία των αυτόματων οχημάτων, που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες για τη συγκεκριμένη έρευνα.

Στη συνέχεια, έγινε επεξεργασία της **βάσης δεδομένων** που προέκυψε από τα 9 σενάρια προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν, για να αποκτήσει την τελική μορφή της. Για την επεξεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε γλώσσα προγραμματισμού R.

Επόμενο στάδιο, αποτέλεσε η ανάπτυξη **μαθηματικών μοντέλων γραμμικής λογιστικής παλινδρόμησης**, που περιγράφουν την επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εκάστοτε εξαρτημένη. Συνολικά, αναπτύχθηκαν **τρία μοντέλα**, με εξαρτημένες μεταβλητές το χρόνο ως την εμπλοκή, τη διαφορά στις ταχύτητες των οχημάτων και τον τύπο της εμπλοκής. Ανεξάρτητες μεταβλητές των μοντέλων αυτών, αποτέλεσαν μεταβλητές που περιλαμβάνονται στα δεδομένα που προέκυψαν από τα σενάρια προσομοίωσης.

Τέλος, ακολούθησε η διαδικασία **ερμηνείας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων**, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην αντίστοιχη εξαρτημένη μεταβλητή. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, προέκυψαν επομένως, πληροφορίες για το υπό εξέταση ζήτημα, αλλά και διατυπώθηκαν προτάσεις για περεταίρω έρευνα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σχηματικά τα **στάδια μεθοδολογίας** που ακολουθήθηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία.



1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής εργασίας μέσω της συνοπτικής αναφοράς του περιεχομένου του εκάστοτε κεφαλαίου της.

Το **παρόν κεφάλαιο** (Κεφάλαιο 1) είναι **εισαγωγικό** και έχει σκοπό να παρουσιάσει το αντικείμενο και το στόχο της διπλωματικής εργασίας. Γίνεται μια σύντομη αναφορά στη σημερινή κατάσταση της αυξανόμενης αυτοματοποίησης των οχημάτων και στις επιπτώσεις που έχει το φαινόμενο αυτό σε επίπεδο οδικής ασφάλειας. Εν συνεχεία, γίνεται σαφής ο στόχος της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί, ενώ ολοκληρώνεται με την παρούσα αναφορά στη δομή της Διπλωματικής Εργασίας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκτενή **βιβλιογραφική ανασκόπηση** που έγινε. Συγκεκριμένα, αναλύονται έρευνες που έγιναν με αντικείμενο τα αυτόματα οχήματα και την επιρροή τους στην οδική ασφάλεια, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα ερευνών με θέμα παρόμοιο με την παρούσα εργασία.

Το **τρίτο κεφάλαιο**, αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο, στο οποίο βασίζεται η ανάλυση των στοιχείων. Συγκεκριμένα, επεξηγούνται οι μαθηματικές και στατιστικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν. Επίσης γίνεται αιτιολόγηση της επιλογής των στατιστικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρεται η διαδικασία **συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων** που θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη του στόχου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά περιγράφεται η μέθοδος συλλογής των δεδομένων μέσω προσομοίωσης της κυκλοφορίας και στη συνέχεια με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού R και του Microsoft Excel, παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα που βοηθούν να διεξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να προκύψουν τα μοντέλα. Επιπλέον, ερμηνεύονται οι συντελεστές τους και γίνεται εξέταση των κριτηρίων αποδοχής και ποιότητάς τους.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μαθηματικών μοντέλων. Στο τέλος, επισυνάπτονται προτάσεις που αφορούν την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο θέμα της παρούσας εργασίας.

Τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει πηγές και έρευνες σχετικά με το θέμα της παρούσας εργασίας.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αφορά στην βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει έρευνες της ελληνικής και διεθνούς βιβλιογραφίας, με αντικείμενο και μεθοδολογία που παρουσιάζει συνάφεια με τα υπό μελέτη ζητήματα. Οι έρευνες αυτές εξετάζουν το **πώς η αυτοματοποιημένη οδήγηση μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των οδικών ατυχημάτων**. Βασικός στόχος αυτής της προσπάθειας είναι να δημιουργηθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα στο ζήτημα της ασφάλειας της αυτοματοποιημένης οδήγησης και να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα.

2.2 Αυτόνομα Οχήματα

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα για την αυτοματοποίηση των οχημάτων έχει σημειώσει τεράστια άλματα. Τα νέα μοντέλα οχημάτων περιλαμβάνουν όλο και περισσότερα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα τα συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης, που επιτρέπουν στα οχήματα να οδηγούνται μόνα τους σε χώρους στάθμευσης. Πολλές εταιρίες έχουν προχωρήσει ακόμα περισσότερο και έχουν δημιουργήσει αυτόνομα οχήματα τα οποία μπορούν και οδηγούν μόνα τους σε υπάρχουσες οδούς και μπορούν να πλοηγούνται σε πολλούς τύπους οδών χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

Επιπλέον, η αυτόνομη οδήγηση έχει ταξινομηθεί σε έξι επίπεδα αυτοματισμού (Summary of SAE International's Levels of Driving Automation for On-Road Vehicles, 2014) σύμφωνα με το διεθνή Σύμφωνο Μηχανικών Αυτοκινήτων – Σ.Μ.Α. (Society of Automotive Engineers – S.A.E.), με βάση τον βαθμό οδικής παρέμβασης που απαιτείται. Η Εθνική Διοίκηση Κυκλοφοριακής Ασφάλισης Αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α. (NHTSA) έχει υιοθετήσει την κατηγοριοποίηση της SAE από το 2016. Το σύστημα ταξινόμησης είναι το παρακάτω:

- Επίπεδο 0: Κανένας Αυτοματισμός

Ο οδηγός έχει το πλήρη έλεγχο του οχήματος, ακόμα και αν υπάρχουν συστήματα υποβοήθησης ή προειδοποίησης

- Επίπεδο 1: Συστήματα υποβοήθησης της οδήγησης

Το όχημα έχει τη δυνατότητα να αλλάζει αυτόματα κατεύθυνση ή να επιταχύνει/επιβραδύνει, χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για τις υπόλοιπες λειτουργίες της οδήγησης.

- Επίπεδο 2: Συνδυασμός Λειτουργιών Αυτοματισμού

Το όχημα, με τη βοήθεια ενός ή περισσότερων συστημάτων υποβοήθησης της οδήγησης, έχει τη δυνατότητα να αλλάζει κατεύθυνση ή να επιταχύνει/επιβραδύνει, αξιοποιώντας πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον, προσδοκώντας ο οδηγός να έχει τον έλεγχο για τις υπόλοιπες λειτουργίες της οδήγησης.

- Επίπεδο 3: Περιορισμένη αυτοματοποιημένη οδήγηση

Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, με την προσδοκία ότι ο οδηγός θα λάβει τον έλεγχο καταλλήλως οποιαδήποτε στιγμή χρειαστεί.

- Επίπεδο 4: Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση, εκτός ειδικών συνθηκών

Το όχημα λειτουργεί με ένα αυτόνομο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, ακόμα κι αν ο οδηγός δε λάβει τον έλεγχο με τον κατάλληλο τρόπο όποτε χρειαστεί.

- Επίπεδο 5: Πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση

Σε όλες τις κυκλοφοριακές συνθήκες το αυτόνομο σύστημα του οχήματος μπορεί να έχει τον πλήρη έλεγχο της οδήγησης χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από τον οδηγό. Παρά τη δυνατότητα αυτή, ο οδηγός έχει την επιλογή να αναλάβει τον έλεγχο αν το επιθυμεί χωρίς η επιλογή αυτή να είναι απαραίτητη.

Τα οχήματα επιπέδου 3 και άνω θεωρούνται αυτόνομα οχήματα. Η διαφορά μεταξύ των επιπέδων 2 και 3 είναι σημαντική. Στο επίπεδο 2 την ευθύνη για την οδήγηση έχει ο οδηγός, αντίθετα στο επίπεδο 3 το αυτόνομο σύστημα μπορεί να διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες οδήγησης.

2.3 Συναφείς έρευνες και μεθοδολογίες

Η τεχνολογία των αυτόματων οχημάτων εξελίσσεται συνεχώς και αναμένεται να ενταχθούν σε μεγαλύτερο βαθμό στα αστικά οδικά δίκτυα τις επόμενες δεκαετίες. Επομένως, η έρευνα πρέπει συνεχώς να εξελίσσεται σε αυτό το ζήτημα. Παρακάτω, παρουσιάζονται έρευνες που παρουσιάζουν συνάφεια με το υπό εξέταση θέμα.

Η έρευνα των Rahman et al. (2021), που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο της Φλόριντας, αποσκοπούσε στην μελέτη της επίδρασης των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων στην ασφάλεια κυκλοφορίας, με **μέθοδο μικροσκοπικής προσομοίωσης**. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης Aimsun Next, στο οποίο κατασκευάστηκαν 14 διαφορετικά σενάρια σε μεγάλο αυτοκινητόδρομο στη Φλόριντα (Central Florida GreenWay). Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν σενάρια με διαφορετικά ποσοστά εισροής αυτόνομων οχημάτων (Autonomous Vehicles - AVs), συνδεδεμένων οχημάτων (Connected Vehicles - CVs) και συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων (Connected and Automated Vehicles - CAVs). Τα ποσοστά διείσδυσης κυμάνθηκαν από 0% έως 100% με βήμα 20% (Market Penetration Rate - MPR) για τις κατηγορίες οχημάτων

AV και CAV, ενώ έτρεξαν και τρία σενάρια με ποσοστά CV60%-CAV0%, CV60%-CAV20% και CV60%-CAV40%. Για την έρευνα αξιοποιήθηκε το λογισμικό SSAM (Surrogate Safety Assessment Model), το οποίο εντόπισε τις εμπλοκές, χρησιμοποιώντας παραμέτρους όπως ο χρόνος ως την εμπλοκή (Time-To-Collision-TTC), η μέγιστη ταχύτητα (MaxS), και άλλες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το MPR, τόσο μειώνονται οι εμπλοκές και για τα CAV και για τα AV, ακόμα και για τα μικρά ποσοστά MPR. Επίσης, το σενάριο CV60%CAV20% έδειξε μεγαλύτερη μείωση για κίνδυνο ατυχήματος συγκριτικά με το σενάριο για ποσοστό διείσδυσης 80% στα AV. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η διείσδυση των CAV βελτιώνει σημαντικά την οδική ασφάλεια συγκριτικά με τα AV.

Για την έρευνα των Jeong et al. (2018), χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό VISSIM, στο οποίο κατασκευάστηκαν διαφορετικά σενάρια με διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (MPR) αυτόματων οχημάτων. Συγκεκριμένα έγιναν δοκιμές με MPR 10%, 25%, 50%, 75%, 90% και 100%. Παρατηρήθηκε βελτίωση της οδικής ασφάλειας με τη διείσδυση των αυτόνομων οχημάτων. Ο κίνδυνος για ατύχημα, όμως μειώθηκε σημαντικά όταν το MPR ήταν μεγαλύτερο από 50%. Ιδιαίτερα, μειώθηκε κατά 31.6%, 65.3% και 80.3% για MPR 75%, 90% και 100% αντίστοιχα. Αντίθετα, για μικρές τιμές του MPR δεν παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στην οδική ασφάλεια, που ήταν μικρότερη από 3%.

Ακόμα, μία έρευνα στην οποία χρησιμοποιήθηκε μέθοδος μικροσκοπικής προσομοίωσης είναι των Sha et. al (2024). Συγκεκριμένα στο λογισμικό Aimsun Next, πραγματοποιήθηκαν αρκετά σενάρια για διαφορετικούς βαθμούς εισαγωγής (MPR) αυτόματων οχημάτων. Τα αυτόματα οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1^{ης} γενιάς CAV και 2^{ης} γενιάς CAV σε επίπεδο αυτοματισμού 5. Τα οχήματα 1ης γενιάς CAV έχουν μικρότερους χρόνους αντίδρασης, χαμηλότερη αντιληπτική ικανότητα, και πιο αργή δυνατότητα λήψης αποφάσεων, αντίθετα τα οχήματα 2^{ης} γενιάς CAV πραγματοποιούν πιο τολμηρές κινήσεις όπως αλλαγές λωρίδας ή αύξηση ταχύτητας για ελαχιστοποίηση του χρόνου. Στην προσπάθεια βελτίωσης της οδικής ασφάλειας και στην αποφυγή συγκρούσεων, έγινε παραχώρηση μίας αποκλειστικής λωρίδας κυκλοφορίας για τα συνδεδεμένα οχήματα. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι ο κίνδυνος ατυχημάτων μειώνεται σημαντικά για του διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης των CAV. Από τα σενάρια που εξετάστηκαν, ο συνδυασμός 40-40-20 (δηλαδή, 40% ανθρώπινης οδήγησης - 40% αυτόματο όχημα 1ης γενιάς - 20% αυτόματο όχημα 2ης γενιάς), θα μπορούσε να είναι το βέλτιστο ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων για την επίτευξη των καλύτερων οφελών ασφάλειας.

Εν συνεχεία, η έρευνα των Youssef El – Hansali (2021), εξέτασε την επιρροή της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα προσομοίωσης VISSIM. Τα δεδομένα μεταφέρθηκαν από το VISSIM στο SSAM το οποίο επεξεργάζεται ένα χρονικό βήμα προσομοίωσης τη φορά και ελέγχει τις συγκρούσεις κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες οριακές τιμές TTC (1,5 δευτερόλεπτα) και PET (5 δευτερόλεπτα). Το SSAM παρέχει δεδομένα για την ίδια την κυκλοφοριακή εμπλοκή (ή προσμοιαζόμενη σύγκρουση) όπως ο τύπος σύγκρουσης, η θέση της σύγκρουσης, η γωνία, η ταχύτητα και η επιτάχυνση οχημάτων πριν και μετά τη σύγκρουση. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η εισαγωγή των AV στην κυκλοφορία

βελτίωσαν σημαντικά την ασφάλεια, ενώ η μείωση των συνολικών εμπλοκών και των οπίσθιων εμπλοκών ήταν 8,6% και 13% αντίστοιχα.

Στη μελέτη των Papadoulis et al. (2018) κατασκευάστηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος ενσωματώθηκε στα αυτόνομα οχήματα και τους έδινε τη δυνατότητα να ψάχνουν γειτονικά οχήματα, να εντοπίζουν γειτονικά CAVs και να λαμβάνουν αποφάσεις σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων για τις λειτουργίες του αυτοκινητόδρομου. Στην πλατφόρμα VISSIM κατασκευάστηκε μία προσομοίωση της κυκλοφορίας για ένα αυτοκινητόδρομο στην Αγγλία. Συνολικά, δημιουργήθηκαν πέντε σενάρια προσομοίωσης, ένα για κάθε μία μέρα της εβδομάδας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η διείσδυση των CAVs μειώνει σημαντικά τον αριθμό των εμπλοκών ακόμα και για μικρά ποσοστά. Συγκεκριμένα, οι συγκρούσεις μειώθηκαν περίπου κατά 12-47%, 50-80%, 82-92% και 90-94% για 25%, 50%, 75% και 100% αντίστοιχα.

Σε ακόμα μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Morando M. Et al. (2018), χρησιμοποιήθηκε μέθοδος μικροσκοπικής προσομοίωσης και εξετάστηκε πως η εισαγωγή αυτόματων οχημάτων (AVs – επίπεδο αυτοματισμού 4) επηρεάζει την οδική ασφάλεια. Η συμπεριφορά των συμβατικών οχημάτων HVs (Human-driven Vehicles – HVs) και των AVs μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης κυκλοφορίας VISSIM. Η έρευνα έγινε σε δύο περιοχές, σε έναν κυκλικό κόμβο και σε μια σηματοδοτημένη διασταύρωση για διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης AV, τα οποία κυμαίνονταν από 0% μέχρι 100% με βήμα 25%. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η αυτοματοποιημένη οδήγηση βελτιώνει σημαντικά την οδική ασφάλεια, ειδικότερα για υψηλά ποσοστά διείσδυσης. Πιο συγκεκριμένα, για τη σηματοδοτημένη διασταύρωση μειώθηκε ο κίνδυνος σύγκρουσης από 20% έως 65% για ποσοστά διείσδυσης από 50% έως 100% (στατιστικά σημαντικό σε $<0,05$). Για τον κυκλικό κόμβο ο αριθμός εμπλοκών μειώθηκε από 29% έως 64% για ποσοστό διείσδυσης 100% των αυτόνομων οχημάτων (στατιστικά σημαντικό σε $<0,05$).

Σε Πανεπιστήμια της Κίνας και της Αμερικής πραγματοποιήθηκε μία έρευνα από τους G.Xiao et. al. (2021) που ανέλυσε άλλες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την επιρροή της αυτοματοποίησης των οχημάτων στην ασφάλεια κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι για μικρό ποσοστό διείσδυσης, MPR 10%, αναμένεται ότι η ασφάλεια θα αυξηθεί κατά 4.2%. Όταν το MPR φτάσει 50% η ασφάλεια θα αυξηθεί κατά 17.4%, ενώ για 90% κατά 43.4%. Επίσης, αναμένεται ότι το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων θα φτάσει 17 - 20% στο άμεσο μέλλον (2025), και 40-48% το 2035. Παράλληλα, ο κίνδυνος ατυχήματος θα μειωθεί κατά 5% και 13%, το 2025 και το 2035, αντίστοιχα.

Οι L. Ye and T. Yamamoto (2019) στην έρευνά τους, εξέτασαν την επίδραση της αυτόνομης οδήγησης στην οδική ασφάλεια. Για το στόχο αυτό έτρεξαν σενάρια προσομοίωσης με διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης CAV, που κυμαίνονταν από 10% έως 90%. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι για χαμηλούς βαθμούς CAV, δεν υπήρξε σημαντική βελτίωση για την οδική ασφάλεια, ενώ όταν αυξήθηκε ο βαθμός

διείσδυσης παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στην οδική ασφάλεια. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) εξακολουθεί να εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου με διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού οχημάτων.

Στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντας από τους Rahman et al. (2019), πραγματοποιήθηκε έρευνα για την επιρροή των συνδεδεμένων οχημάτων, με το χαμηλότερο βαθμό αυτοματισμού, στην οδική ασφάλεια. Η έρευνα εστίασε κυρίως σε δύο λειτουργίες των αυτόματων οχημάτων, το αυτόματο φρενάρισμα και την βοήθεια διατήρησης λωρίδας. Επομένως, για την έρευνα μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά των οδηγών στα συνδεδεμένα οχήματα (CV – Connected Vehicles) και στα αυτόματα οχήματα με χαμηλό βαθμό αυτοματισμού (CVLLA – Connected Vehicles Lower Level Automation) με χρήση γλώσσας προγραμματισμού C++ και χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα προσομοίωσης VISSIM. Για την επεξήγηση των αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για να ποσοτικοποιήσει την πιθανότητα ατυχήματος. Συνολικά, έτρεξαν 9 σενάρια με ποσοστά διείσδυσης 0%, 30%, 40%, 60%, 80%, 100%, για τις δύο κατηγορίες οχημάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι με την εισαγωγή τόσο των CV όσο και των CVLLA υπάρχει σημαντική μείωση των ατυχημάτων και σε τμήματα και σε διασταυρώσεις της αρτηρίας. Η μέγιστη βελτίωση παρουσιάστηκε για 100% ποσοστό, ενώ το ελάχιστο ποσοστό που χρειάζεται για να αρχίσει να εμφανίζεται βελτίωση στην ασφάλεια είναι 30%, και για τις δύο τεχνολογίες. Για το σενάριο CVLLA η πιθανότητα να υπάρχει σύγκρουση, για ποσοστό διείσδυσης 100%, είναι περίπου 36% μικρότερη από ότι για ποσοστό διείσδυσης 0%, ενώ για το σενάριο CV είναι 25% μικρότερη. Όμως, για το κομμάτι των διασταυρώσεων χρειάζεται τουλάχιστον 40% ποσοστό διείσδυσης.

Οι παραπάνω έρευνες, υποστηρίζουν ότι η αυτοματοποίηση των οχημάτων θα έχει **θετικές συνέπειες** στην οδική ασφάλεια και ότι τα **ατυχήματα θα μειωθούν σημαντικά**. Παρόλα αυτά όμως, υπάρχουν ερευνητές που έχουν καταλήξει σε αντίθετα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, η έρευνα των Dixit et al. (2016), εξέτασε τροχαία ατυχήματα με αυτόματα οχήματα για την πολιτεία της Καλιφόρνια από τον Σεπτέμβριο του 2014 έως τον Νοέμβριο του 2015. Τα αποτελέσματα, έδειξαν ότι **τα ατυχήματα αυξήθηκαν με την εισαγωγή των αυτόματων οχημάτων**. Ένας από τους κύριους λόγους που αποδίδεται η αιτία είναι ότι σε περίπτωση βλάβης του συστήματος των αυτόματων οχημάτων, χρειάζεσαι να αναλάβει οδηγός χειροκίνητα, ενώ παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει εμπιστοσύνη από τους οδηγούς στα αυτόματα οχήματα και μπορεί να αναλάβουν χειροκίνητα σαν αποτέλεσμα. Ακόμη, σε μεταγενέστερες ερευνητικές εργασίες, αναλύθηκαν τροχαία ατυχήματα σε περιοχή της Καλιφόρνια και σημειώθηκε ξανά μεγάλος αριθμός ατυχημάτων.

Έπειτα, σε έρευνα των Favaro et al. (2017), διαπίστωσαν ότι ο πιο συχνός τύπος σύγκρουσης είναι η οπίσθια σύγκρουση – μπροστινός προφυλακτήρας συμβατικού

οχήματος και πίσω προφυλακτήρας του αυτόνομου οχήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ταχύτητα του οχήματος ήταν μικρότερη από 10 μίλια ανά ώρα. Τα ατυχήματα που αναλύθηκαν ήταν από τις περιόδους μεταξύ Σεπτεμβρίου 2014 και Μαρτίου 2017 στην πολιτεία της Καλιφόρνια. Ακόμη, οι Petrovic et al. (2019) που ανέλυσαν επίσης ατυχήματα στην πολιτεία της Καλιφόρνιας διαπίστωσαν ότι ο αριθμός των ατυχημάτων οπίσθιων συγκρούσεων είναι υψηλότερος σε ατυχήματα με αυτόνομα οχήματα κατά 64,2% σε αντίθεση με ατυχήματα μόνο με συμβατικά οχήματα που είναι περίπου 28,3%.

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Κροατία από τους Tibljaš et al. (2018), χρησιμοποιήθηκε μέθοδος μικροσκοπικής προσομοίωσης. Στην πλατφόρμα προσομοίωσης VISSIM μοντελοποιήθηκαν τέσσερις κυκλικοί κόμβοι στην Κροατία. Έτρεξαν σενάρια με διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης αυτόματων οχημάτων (AVs) με ποσοστά διείσδυσης (10 – 50%). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό εισαγωγής αυτόματων οχημάτων τόσο αυξάνεται ο η πιθανότητα σύγκρουσης στους κυκλικούς κόμβους. Ο κύριος τύπος σύγκρουσης που καταγράφηκε ήταν τα ατυχήματα οπίσθιου τύπου και στους τέσσερις κυκλικούς κόμβους.

2.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η έρευνα για την αυτοματοποίηση των οχημάτων αποτελεί ένα πεδίο που εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια. Ένα από τα βασικότερα συμπεράσματα που έχει προκύψει είναι ότι η εισαγωγή των αυτόματων οχημάτων **βελτιώνει σημαντικά την οδική ασφάλεια**, μειώνοντας τα ανθρώπινα λάθη που αποτελούν βασική αιτία ατυχημάτων. Ωστόσο, η πλήρης επίδρασή τους εξαρτάται από το ποσοστό εισαγωγής τους.

Η μέθοδος **μικροσκοπικής προσομοίωσης** είναι η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στις μελέτες για την αυτοματοποίηση των οχημάτων. Στις περισσότερες έρευνες γίνεται ανάμιξη αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων, δείχνοντας ότι η μετάβαση στην πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση θα πρέπει να είναι σταδιακή και θα χρειαστεί εκτενή έρευνα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει στις περισσότερες έρευνες είναι ότι όσο μεγαλύτερο το ποσοστό διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων τόσο βελτιώνεται η οδική ασφάλεια και ο κίνδυνος συγκρούσεων ελαχιστοποιείται. Τα βέλτιστα αποτελέσματα σημειώνονται για ποσοστά 100%.

Παρόλα αυτά, οι τρέχουσες έρευνες αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς. Το πεδίο σχετικά με την **αλληλεπίδραση των οδηγών συμβατικών οχημάτων με τα αυτόματα οχήματα** είναι ακόμα άγνωστο, όπως και το πώς θα αντιμετωπίσει ο κόσμος αυτή την αλλαγή. Το γεγονός αυτό αφήνει μεγάλο περιθώριο για επόμενες μελέτες στην αυτοματοποίηση των οχημάτων.

3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το **θεωρητικό υπόβαθρο** της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η στατιστική ανάλυση και θα προκύψουν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε **βασικές έννοιες στατιστικής**, ώστε να γίνουν εύκολα κατανοητές. Έπειτα, αναφέρονται τα **μαθηματικά πρότυπα** που επιλέχθηκαν, δηλαδή η γραμμική παλινδρόμηση και η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση. Παρουσιάζονται επίσης, οι απαραίτητοι στατιστικοί έλεγχοι και τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης ενός μοντέλου.

3.2 Βασικές Έννοιες Στατιστικής

Πληθυσμός

Το σύνολο του οποίου τα στοιχεία μελετώνται στη στατιστική έρευνα ως προς ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά ονομάζεται πληθυσμός. Ένας πληθυσμός είναι ένα σύνολο στοιχείων που είναι τελείως καθορισμένα και μπορεί να είναι πραγματικός ή θεωρητικός. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός ενός πληθυσμού είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός, διότι πραγματοποιείται βάσει προκαθορισμένων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που επιλέγονται ανάλογα με τους στόχους της εκάστοτε έρευνας.

Δείγμα

Είναι όμως αδύνατο, η εξέταση του συνόλου του πληθυσμού, επομένως εξετάζεται ένα υποσύνολο, το οποίο ονομάζεται δείγμα και η διαδικασία ονομάζεται δειγματοληψία ή δημοσκοπήση. Όλα τα στοιχεία που ανήκουν στο δείγμα ανήκουν και στον πληθυσμό, ενώ δεν ισχύει το αντίστροφο. Εάν αυτό το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό, τότε τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την ανάλυσή του θα ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια και για τον πληθυσμό.

Μεταβλητές

Ο όρος «μεταβλητή» αναφέρεται σε ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα ή σε ένα μετρήσιμο μέγεθος, το οποίο εμφανίζει ενδιαφέρον, ώστε να καταγραφεί ή να μετρηθεί κατά τη διενέργεια μίας στατιστικής έρευνας. Οι μεταβλητές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

Ποιοτικές ή κατηγορικές μεταβλητές: Είναι οι μεταβλητές των οποίων οι δυνατές τιμές είναι κατηγορίες διαφορετικές μεταξύ τους. Η χρήση αριθμών για την παράσταση των τιμών μίας τέτοιας μεταβλητής είναι καθαρά συμβολική και δεν έχει την έννοια της μέτρησης.

Ποσοτικές μεταβλητές: Είναι οι μεταβλητές που λαμβάνουν αυστηρά αριθμητικές τιμές, που έχουν τη σημασία της μέτρησης. Οι ποσοτικές μεταβλητές διακρίνονται με τη σειρά τους σε δύο **μεγάλες κατηγορίες τις διακριτές και τις συνεχείς**.

- Μια μεταβλητή θεωρείται **διακριτή** όταν η μικρότερη μη μηδενική διαφορά που μπορεί να έχουν δύο τιμές της, είναι σταθερή ποσότητα. Ένα τέτοιο παράδειγμα θεωρείται ο αριθμός των ατυχημάτων σε ένα χρονικό διάστημα.
- Μια μεταβλητή θεωρείται **συνεχής** όταν δύο τιμές μπορούν να διαφέρουν κατά οποιαδήποτε μικρή ποσότητα. Ουσιαστικά εάν μια μεταβλητή μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή σε ένα διάστημα τιμών θεωρείται συνεχής. Για παράδειγμα τέτοια μεταβλητή μπορεί να θεωρηθεί η απόσταση, για την οποία η διαφορά ανάμεσα σε δύο τιμές θα μπορούσε να είναι χιλιόμετρα, μέτρα, δεκατόμετρα, εκατοστά, χιλιοστά.

Επίσης, δύο από τα πιο σημαντικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται στον κλάδο της στατιστικής και υπάρχουν σε όλες τις κατανομές είναι η μέση τιμή και η διακύμανση.

Μέση τιμή (E): Ορίζεται το άθροισμα των τιμών δια το πλήθος των τιμών. Σε περίπτωση ανάλυσης ενός δείγματος $x_1, x_2, \dots, x_n$ η μέση τιμή υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_n)}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

Διακύμανση (Var): Ορίζεται ο "μέσος όρος των τετραγώνων διαφορών από τον μέσο όρο". Η διακύμανση είναι ίση με 0 εάν όλες οι τιμές της μεταβλητής είναι ίσες. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ των τιμών, τόσο μεγαλύτερη είναι η διακύμανση. Όταν η διακύμανση είναι μεγαλύτερη από την μέση τιμή, αυτό ονομάζεται υπερδιασπορά και είναι μεγαλύτερη από 1. Εάν είναι μικρότερη από 1, είναι γνωστή ως υποδιασπολή. Στην περίπτωση που τα δεδομένα αποτελούν ένα δείγμα η διακύμανση συμβολίζεται με s^2 και ορίζεται ως:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Εξίσωση 2})$$

Επιπροσθέτως, μία σημαντική έννοια, η οποία δείχνει πόσο καλά συσχετίζονται δύο μεταβλητές και μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο μοντέλο είναι ο συντελεστής συσχέτισης ρ . Θεωρούνται δύο τυχαίες και συνεχείς μεταβλητές x, y . Ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης των δύο αυτών μεταβλητών x και y με διασπορά σ_x^2 και σ_y^2 αντίστοιχα και συνδιασπορά $\sigma_{xy} = \text{Cov}[x, y]$ καθορίζεται με τον συντελεστή συσχέτισης (correlation coefficient) ρ , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$p = \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x} \right) \left(\frac{1}{\sigma_y} \right) \quad (\text{Εξίσωση 3})$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ εκφράζει τον βαθμό και τον τρόπο που οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται. Δεν εξαρτάται από την μονάδα μέτρησης των x και y και παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1,1]$. Τιμές κοντά στο 1 δηλώνουν ισχυρή θετική συσχέτιση, τιμές κοντά στο -1 δηλώνουν ισχυρή αρνητική συσχέτιση και τιμές κοντά στο 0 δηλώνουν γραμμική ανεξαρτησία των x και y . Η εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης ρ γίνεται με την αντικατάσταση στην ανωτέρω εξίσωση την συνδιασποράς s_{xy} και των διασπορών s_x , s_y , από όπου προκύπτει τελικά η έκφραση της εκτιμήτριας r :

$$r(x, y) = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{[(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)^{1/2}]} \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

3.3 Μαθηματικά Μοντέλα

Η **ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis)**, είναι μία στατιστική μέθοδος που εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη μίας από τις υπόλοιπες. Με τον όρο εξαρτημένη μεταβλητή της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί και συμβολίζεται ως y , ενώ με τον όρο ανεξάρτητη γίνεται αναφορά σε εκείνη τη μεταβλητή, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής και συμβολίζεται ως x . Η παλινδρόμηση στην οποία υπάρχει μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή ονομάζεται **απλή παλινδρόμηση**, ενώ αν υπάρχουν περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές καλείται **πολλαπλή παλινδρόμηση**. Η ανεξάρτητη μεταβλητή δε θεωρείται τυχαία, αλλά παίρνει καθορισμένες τιμές. Η εξαρτημένη μεταβλητή θεωρείται τυχαία και “καθοδηγείται” από την ανεξάρτητη μεταβλητή. Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων κρίνεται απαραίτητη, για να προσδιοριστεί αν μια ανεξάρτητη μεταβλητή ή συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών προκάλεσε τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής.

Η **μέθοδος ανάπτυξης** ενός μοντέλου εξαρτάται από το αν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής ή διακριτό μέγεθος καθώς διαφορετικοί τύποι μοντέλων είναι κατάλληλοι ανά περίπτωση. Στην περίπτωση που η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχές μέγεθος και ακολουθεί την κανονική κατανομή, μία από τις πλέον διαδεδομένες στατιστικές τεχνικές είναι η γραμμική παλινδρόμηση.

3.3.1 Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)

Η **μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης** είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές στατιστικής ανάλυσης. Με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας ενός γεγονότος σε σχέση με παράγοντες που το επηρεάζουν. Έτσι προκύπτει ένα μαθηματικό γραμμικό μοντέλο με το οποίο υπολογίζεται η πιθανότητα πραγματοποίησης του γεγονότος (πρότυπο πρόβλεψης πιθανότητας). Η απλούστερη μορφή γραμμικής παλινδρόμησης είναι η απλή γραμμική παλινδρόμηση (simple linear regression), η οποία δίνεται από την σχέση:

$$y_i = \alpha + \beta * x_i + \varepsilon_i \quad (\text{Εξίσωση 5})$$

Στην περίπτωση που η τυχαία μεταβλητή y εξαρτάται γραμμικά από περισσότερες από μία μεταβλητές x ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$), γίνεται αναφορά στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (multiple linear regression). Η εξίσωση που περιγράφει την σχέση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών είναι η εξής:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_{1i} + \beta_2 * x_{2i} + \beta_3 * x_{3i} + \dots + \beta_k * x_{ki} + \varepsilon_i \quad (\text{Εξίσωση 6})$$

όπου,

n : το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: οι συντελεστές παλινδρόμησης των ανεξάρτητων μεταβλητών $x_1, x_2, \dots, x_n$

β_0 : οι σταθερός όρος της εξίσωσης (δηλαδή η τιμή του y όταν $x_1, x_2, \dots, x_n = 0$)

ε_i : το σφάλμα παλινδρόμησης, το οποίο προσεγγίζει τη διαφορά της προβλεπόμενης με την πραγματική τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής y

Το πρόβλημα και η εκτίμηση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης δεν διαφέρει ουσιαστικά από εκείνο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ένα καινούριο στοιχείο στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση είναι ότι πριν προχωρήσει κανείς στην εκτίμηση των παραμέτρων πρέπει να ελέγξει εάν πράγματι πρέπει να συμπεριληφθούν όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές στο μοντέλο. Εκείνο που απαιτείται να εξασφαλιστεί είναι η μηδενική συσχέτιση των ανεξάρτητων μεταβλητών ($\rho(x_i, x_j) \rightarrow 0$, για κάθε $i \neq j$).

3.3.2 Πολυωνυμική Λογιστική Παλινδρόμηση

Η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιείται όταν η μεταβλητή αποτελέσματος που προβλέπεται είναι κατηγορική και έχει περισσότερες από δύο κατηγορίες που δεν έχουν συγκεκριμένη κατάταξη ή σειρά. Αυτό το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιονδήποτε αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών που είναι κατηγορικές ή συνεχείς.

Η λογιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης, ενώ καθίσταται δυνατή η έκβαση μιας κατηγορικής μεταβλητής με δύο ή περισσότερες κατηγορίες με τη χρήση ενός συνόλου συνεχών και διακριτών μεταβλητών. Επιπλέον, η εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζει την πιθανότητα η έκβαση του αποτελέσματος να ισούται με 1. Χρησιμοποιείται, λοιπόν, ο νεπέριος λογάριθμος για την πιθανότητα ή το λόγο πιθανοφάνειας (likelihood ratio), η εξαρτημένη μεταβλητή να ισούται με 1, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$Y = \text{Logit}(P) = \ln \left[\frac{P_i}{(1-P_i)} \right] = B_0 + B_i X_i \quad (\text{Εξίσωση 7})$$

Όπου:

P_i : η πιθανότητα η i -οστή περίπτωση να έχει έκβαση του αποτελέσματος ίση με τη μονάδα (π.χ. P_5 η πιθανότητα να συμβεί ατύχημα στην 5η περίπτωση)

B_0 : η σταθερά του μοντέλου

B_i : παραμετρικές εκτιμήτριες για τις ανεξάρτητες μεταβλητές X_i ($i = 1, 2, \dots, n$, όπου n το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών)

Η πιθανότητα κυμαίνεται από 0 έως 1, ενώ ο νεπέριος λογάριθμος $\ln[P_i/(1-P_i)]$ κυμαίνεται από μείον άπειρο έως συν άπειρο. Τα μοντέλα λογιστικής ανάλυσης παλινδρόμησης υπολογίζουν την καμπυλόγραμμη σχέση ανάμεσα στην κατηγορική επιλογή Y και στις μεταβλητές X_i οι οποίες μπορεί να είναι συνεχείς ή διακριτές. Η καμπύλη της λογιστικής παλινδρόμησης είναι προσεγγιστικά γραμμική στις μεσαίες τιμές και λογαριθμική στις ακραίες. Με απλό μετασχηματισμό της παραπάνω σχέσης προκύπτει η εξής νέα σχέση:

$$\frac{P_i}{1-P_i} = e^{(B_0+B_i X_i)} = e^{B_0} e^{B_i X_i} \quad (\text{Εξίσωση 8})$$

Η θεμελιώδης εξίσωση για τη λογιστική παλινδρόμηση δείχνει ότι όταν η τιμή μίας ανεξάρτητης μεταβλητής αυξάνεται κατά μία μονάδα και οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές, τότε ο νέος λόγος πιθανοφάνειας $[P_i/(1-P_i)]$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\left[\frac{P_i}{1-P_i} \right] = e^{B_0} e^{B_i(X_i+1)} = e^{B_0} e^{B_i X_i} e^{B_i} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή X_i αυξηθεί κατά μία μονάδα και οι υπόλοιπες μεταβλητές παραμένουν σταθερές, τότε η πιθανότητα $[P_i/(1-P_i)]$ αυξάνεται κατά ένα συντελεστή e^{B_i} (Adjusted Odds Ratio). Όταν οι πιθανές κατηγορίες της εξαρτημένης μεταβλητής είναι δύο η ανάλυση ονομάζεται Διωνυμική λογιστική παλινδρόμηση (binary logistic regression) ενώ σε περίπτωση πλήθους κατηγοριών περισσότερων των δύο (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση), χρησιμοποιείται η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση (multinomial logistic regression).

3.4 Στατιστική Αξιολόγηση και Κριτήρια Αποδοχής μοντέλου

Έπειτα από την διαμόρφωση των παραπάνω μοντέλων, είναι απαραίτητος ο έλεγχος διαφόρων παραγόντων προκειμένου να αξιολογηθούν και να γίνει αποδεκτή η χρήση τους. Αρχικά, θα πρέπει οι τιμές της μεταβλητής y των γραμμικών μοντέλων, να ακολουθούν κανονική κατανομή. Επιπλέον, βασική προϋπόθεση αποτελεί ο έλεγχος των συσχετίσεων μεταξύ των μεταβλητών, προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση μεταβλητών που είναι υψηλά συσχετισμένες, καθώς αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει το αποτέλεσμα του μοντέλου. Τα **βασικά κριτήρια** που υποβάλλονται σε έλεγχο για την **αποδοχή των μοντέλων** είναι τα εξής:

- **Λογική επεξήγηση των συντελεστών του μοντέλου**

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης του μοντέλου, εξετάζεται αν τα πρόσημα των συντελεστών παλινδρόμησης έχουν λογική ερμηνεία. Σε περίπτωση που δεν έχουν η μεταβλητή απορρίπτεται. Το θετικό πρόσημο του συντελεστή δηλώνει αύξηση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης. Αντιθέτως, αρνητικό πρόσημο συνεπάγεται μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης. Η τιμή του συντελεστή θα πρέπει κι αυτή να ερμηνεύεται λογικά δεδομένου ότι αύξηση της ανεξάρτητης μεταβλητής κατά μία μονάδα επιφέρει αύξηση της εξαρτημένης κατά βι μονάδες.

- **Στατιστική Εμπιστοσύνη του μοντέλου**

Η στατιστική εμπιστοσύνη του μοντέλου αξιολογείται μέσω του ελέγχου t-test (κριτήριο t της κατανομής Student). Με το δείκτη t προσδιορίζεται η στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών, καθορίζονται, δηλαδή, ποιες μεταβλητές θα συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο. Ο συντελεστής t εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$t_{stat} = \frac{\beta_i}{s.e.} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Όπου $s.e.$ το τυπικό σφάλμα (standard error)

Με βάση την παραπάνω σχέση, όσο μειώνεται το τυπικό σφάλμα τόσο αυξάνεται ο συντελεστής t_{stat} και συνεπώς αυξάνεται η επάρκεια (efficiency). Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του t (κατά απόλυτη τιμή), τόσο μεγαλύτερη είναι η επιρροή της συγκεκριμένης μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα.

- **Στατιστική Σημαντικότητα**

Σημαντικός έλεγχος για την αξιολόγηση του πολυωνυμικού μοντέλου είναι η στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή η επιλογή των μεταβλητών που θα συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο. Ο έλεγχος στατιστικών υποθέσεων γίνεται μέσω του υπολογισμού της τιμής της πιθανότητας p (probability-value ή $pvalue$). Εάν το p είναι

μικρότερο από 0,05 τότε, η μεταβλητή επηρεάζει τη μεταβλητή απόκρισης και πρέπει να συμπεριληφθεί στο τελικό μοντέλο, διαφορετικά δεν πρέπει.

- **Ποιότητα μοντέλου**

Η ποιότητα του μοντέλου καθορίζεται βάση του συντελεστή προσδιορισμού R^2 . Ο συντελεστής R^2 εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής Y που εξηγείται από την μεταβλητή X και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του R^2 στη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών Y και X , δηλαδή τόσο πιο ορθή είναι η πρόβλεψη του μοντέλου και ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Ο συντελεστής R^2 έχει συγκριτική αξία που σημαίνει ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη τιμή του αποδεκτή ή απορριπτέα, αλλά μεταξύ δύο ή περισσότερων μοντέλων επιλέγεται ως καταλληλότερο εκείνο με τη μεγαλύτερη τιμή του R^2 . Τέλος, ο συντελεστής R^2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο ισχυρότητας της γραμμικής σχέσης ανεξάρτητα αν το X παίρνει καθορισμένες τιμές ή αν είναι τυχαία μεταβλητή. Ο συντελεστής R^2 χρησιμοποιείται ως κριτήριο καλής προσαρμογής των δεδομένων στο γραμμικό μοντέλο και ορίζεται από την σχέση:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (\text{Εξίσωση 11})$$

Όπου:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \beta^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Εξίσωση 12})$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Εξίσωση 13})$$

όπου

y_i : η παρατηρηθείσα ανεξάρτητη μεταβλητή

$\hat{y}_i$: η προβλεπόμενη ανεξάρτητη μεταβλητή, από την πρόβλεψη του μοντέλου

$\bar{y}$: η μέση τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής y_i

n : το σύνολο των τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής y_i

4 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η επιρροή των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων στο δίκτυο προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα σε μεταβλητές που αφορούν οδική την ασφάλεια, όπως ο **χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)**, η **διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (MaxS)** και ο **τύπος εμπλοκής (Conflict Type)**. Συγκεκριμένα, **παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής και η επεξεργασία των απαραίτητων στοιχείων** για να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Θα πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας, έτσι ώστε να δοθεί μια πλήρης εικόνα της αξιοπιστίας και της ποιότητας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής των στοιχείων που αξιοποιήθηκαν. Στη συνέχεια αναφέρεται η **περιγραφική στατιστική ανάλυση** των στοιχείων αυτών και παρουσιάζονται **συγκεντρωτικά διαγράμματα** που απεικονίζουν τη σχέση των ανεξάρτητων μεταβλητών που προσδιορίστηκαν παραπάνω, σε σχέση με τον βαθμό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate – MPR). Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα.

4.2 Συλλογή Δεδομένων

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιήθηκε μικροσκοπική **προσομοίωση της κυκλοφορίας** και χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο του κέντρου της Αθήνας. Συγκεκριμένα, για 9 διαφορετικά σενάρια, τα οποία διαφοροποιήθηκαν στους βαθμούς διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate – MPR), από 0% ως 100% με βήμα 25%, έγινε προσομοίωση του αστικού δικτύου και καταγράφηκαν συνολικά 93.492 συμβάντα εμπλοκών, για τα οποία ο **χρόνος ως την εμπλοκή** των δύο οχημάτων (TTC), **ήταν μικρότερος από 1,5s**. Για κάθε τέτοιο συμβάν, το οποίο αντιπροσωπεύει μια εμπλοκή, καταγράφηκαν τόσο τα κυκλοφοριακά δεδομένα όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τμήματος του οδικού δικτύου που πραγματοποιήθηκε η εμπλοκή. Αναλυτικά, οι μεταβλητές που καταγράφηκαν και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε επίπεδο στατιστικής ανάλυσης παρουσιάζονται παρακάτω.

4.2.1 Δίκτυο Προσομοίωσης

Το δίκτυο μελέτης αντιπροσωπεύει περιοχή στο κέντρο της Αθήνας και σχεδιάστηκε στο λογισμικό Aimsun Next. Το προσομοιωμένο δίκτυο όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1 έχει έκταση περίπου 3,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα και αποτελείται από 434 οδικά τμήματα συνολικού μήκους 47 χιλιομέτρων και 192 κόμβους.

Επιπλέον, στο δίκτυο ενσωματώνονται γραμμές δημόσιας συγκοινωνίας που περιλαμβάνουν 43 γραμμές λεωφορείων και 14 γραμμές τρόλεϊ.



Εικόνα 4.1: Δίκτυο Προσομοίωσης

Οι μετρήσεις πεζών, έγιναν από αναλύσεις βίντεο από κάμερες στρατηγικά τοποθετημένες. Οι μετρήσεις που προέκυψαν από τα βίντεο καταγράφηκαν στις 11 Ιουνίου του 2020, ανάμεσα στις ώρες 8:00 – 9:00 π.μ., όπου συμπεριλήφθηκαν όλοι οι πεζοί που διέσχισαν τον δρόμο. Καταγράφηκαν 6.912 πεζοί, συνολικά κατά τη διάρκεια της περιόδου που έγιναν οι μετρήσεις.

Για την εισαγωγή των οχημάτων, συλλέχθηκαν κυκλοφοριακά δεδομένα για πρωινή ώρα αιχμής 8:00 – 9:00 π.μ., Τρίτη και Πέμπτη του Μαΐου του 2019, από το Κέντρο Διαχείρισης

Κυκλοφορίας (ΚΔΚ). Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από 19 κάμερες. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις σε διάστημα μίας εβδομάδας από την Δευτέρα 30 Νοεμβρίου του 2019 έως την Παρασκευή 3 Δεκεμβρίου του 2019, ανάμεσα στις 7:30 με 9:30 π.μ., και συγκεντρώθηκαν επιπλέον κυκλοφοριακά δεδομένα.

4.2.2 Σενάρια προσομοίωσης

Προέκυψαν δεδομένα εμπλοκών από **εννέα μικροσκοπικά σενάρια** που διέφεραν ως προς το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στην αγορά (MPR από 0% έως 100% με αυξανόμενο βήμα 25%), όπως φαίνονται στον πίνακα 4.1. Συγκεκριμένα τα ποσοστά διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων και των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά αφορούσαν τα επιβατικά οχήματα και αντικατέστησαν τα αντίστοιχα ποσοστά των συμβατικών οχημάτων.

Πίνακας 4.1: Σενάρια Προσομοίωσης

<u>Σενάριο</u>	<u>Ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων (%)</u> <u>(AV, MPR)</u>	<u>Ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (%)</u> <u>(CAV, MPR)</u>
1	0%	0%
2	25%	0%
3	50%	0%
4	75%	0%
5	100%	0%
6	0%	25%
7	0%	50%
8	0%	75%
9	0%	100%

Το προφίλ οδήγησης συνδεδεμένου αυτόνομου οχήματος των επιβατικών οχημάτων θεωρήθηκε ως ένα «επιθετικό» προφίλ, που παρουσιάζει προηγμένη ικανότητα ανίχνευσης και νόησης, αυτοπεποίθηση στη λήψη αποφάσεων, μικρότερα κενά, έγκαιρη πρόβλεψη αλλαγών λωρίδας από ότι τα συμβατικά οχήματα και λιγότερο χρόνο σε καταστάσεις υποχώρησης.

4.2.3 Παράμετροι Προσομοίωσης

Για τη εισαγωγή των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων στο δίκτυο προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι παράμετροι, οι οποίες αποτελούν ευρήματα της βιβλιογραφίας. Για τα συνδεδεμένα και αυτόματα οχήματα (CAV), οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Ευρωπαϊκό έργο <<LEVITATE>> και βασίστηκαν σε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάστηκαν σε μελέτη των Mourtakos et al. (2021).

Όλες οι παράμετροι μοντελοποίησης των δύο αυτόνομων οχημάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράγοντες		Συμβατικό όχημα	Αυτόνομο όχημα (CAV)
Μέγιστη επιτάχυνση	<i>Mean</i>	5.0	3.5
	<i>Min</i>	3.0	2.5
	<i>Dev</i>	0.2	0.1
	<i>Max</i>	7.0	4.5
Κανονική επιβράδυνση	<i>Mean</i>	3.4	3.0
	<i>Min</i>	2.4	2.5
	<i>Dev</i>	0.25	0.13
	<i>Max</i>	4.4	3.5
Μέγιστη επιβράδυνση	<i>Mean</i>	5.0	9.0
	<i>Min</i>	4.0	8.5
	<i>Dev</i>	0.5	0.25
	<i>Max</i>	6.0	9.5

Ελεύθερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος		<i>Mean</i>	1.0	1.0
		<i>Min</i>	0.5	0.8
		<i>Dev</i>	0.3	0.1
		<i>Max</i>	1.5	1.2
Αλλαγή λωρίδας	Όριο ταχύτητας προσπέρασης		90%	85%
	Προοπτική απόσταση	<i>Min</i>	0.8	1.0
		<i>Max</i>	1.2	1.25
		<i>Min</i>	1.0	0.75
	Περιθώριο ασφαλείας	<i>Max</i>	1.0	1.0
Χρόνος αντίδρασης (sec)			0.8	0.4

4.2.4 Εξαγωγή εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας

Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας στην ασφάλεια, από τη μικροσκοπική προσομοίωση εξήχθησαν και αναλύθηκαν οι τροχιές των οχημάτων με τη χρήση του λογισμικού Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) της Federal Highway Administration (FHWA). Συγκεκριμένα, το SSAM είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ασφάλειας με βάση εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας, τα οποία χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατα των ατυχημάτων. Το λογισμικό επεξεργάστηκε τα δεδομένα της τροχιάς των οχημάτων που εξήχθησαν μέσω της μικροσκοπικής προσομοίωσης και εντόπισε εμπλοκές. Μια εμπλοκή εντοπίζεται όταν ο χρόνος μέχρι τη σύγκρουση (TTC) και ο χρόνος μετά την εμπλοκή (PET) είναι χαμηλότεροι από προκαθορισμένα όρια, με προεπιλεγμένες τιμές στο λογισμικό τα 1,5 δευτερόλεπτα και 5,0 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα.

Όμως, στην περίπτωση των συνδεδεμένων και αυτοματοποιημένων επιβατικών οχημάτων θεωρήθηκε διαφορετική τιμή του TTC λόγω της μικρότερης απόστασης ακινητοποίησής τους και ορίστηκε σε 0,5 δευτερόλεπτα αντί για 1,5 δευτερόλεπτα (προεπιλεγμένη τιμή στο λογισμικό), με βάση το πλαίσιο που διεξήχθη στο ερευνητικό έργο LEVITATE. Επίσης, οι τιμές 0,0 και 0,1 αφαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων, καθώς θεωρήθηκαν σφάλματα προσομοίωσης.

4.3 Κωδικοποίηση Δεδομένων

Τα δεδομένα, τα οποία προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία, παραδόθηκαν σε μορφή πίνακα και αποτελούνταν, από 93.492 παρατηρήσεις, κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια εμπλοκή οχημάτων, για κάθε μία από τις οποίες καταγράφηκαν τα εξής δεδομένα:

- **FirstVehType (SecondVehType):** Ο τύπος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος. Οι τύποι των οχημάτων που παρουσιάζονται στη βάση δεδομένων είναι οι εξής:

1. Αυτόνομο επιβατικό όχημα
2. Συνδεδεμένο επιβατικό όχημα
3. Συμβατικό επιβατικό όχημα
4. Συμβατικό λεωφορείο
5. Συμβατικό φορτηγό
6. Συμβατική μοτοσυκλέτα

- **trjFile:** Το όνομα του αρχείου στο οποίο εντοπίστηκε η εμπλοκή.

- **tMinTTC:** Ο χρόνος προσομοίωσης κατά τον οποίο παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή TTC (χρόνος μέχρι τη εμπλοκή) για την εμπλοκή αυτή. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης, ο χρόνος είναι (γενικά) 0 και αυξάνεται σε βήματα από 0,1 έως 1,0 δευτερόλεπτα ανά χρονικό βήμα, ανάλογα με την ανάλυση του λογισμικού προσομοίωσης.

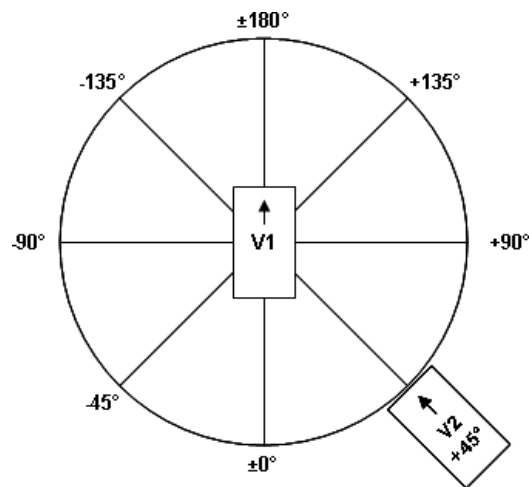
- **xMinPET:** Η συντεταγμένη x που προσδιορίζει την κατά προσέγγιση θέση της εμπλοκής τη στιγμή που παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή PET (χρόνος μετά την εμπλοκή). Πιο συγκεκριμένα, η θέση αυτή αντιστοιχεί στο κέντρο του (πρώτου) οχήματος, όπου η επακόλουθη άφιξη του δεύτερου οχήματος στην ίδια θέση ήταν η συντομότερη παρατηρούμενη επέμβαση.

- **yMinPET:** Η συντεταγμένη y που προσδιορίζει την κατά προσέγγιση θέση της εμπλοκής τη στιγμή που παρατηρήθηκε η ελάχιστη PET (χρόνος μετά την εμπλοκή). Πιο συγκεκριμένα, η θέση αυτή αντιστοιχεί στο κέντρο του (πρώτου) οχήματος, όπου η μετέπειτα άφιξη του δεύτερου οχήματος στην ίδια θέση ήταν η συντομότερη παρεμπόδιση που παρατηρήθηκε.

- **TTC:** Η ελάχιστη τιμή του χρόνου έως τη εμπλοκή, που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Αυτή η εκτίμηση βασίζεται στην τρέχουσα θέση, ταχύτητα και τροχιά των δύο οχημάτων σε μια δεδομένη στιγμή.

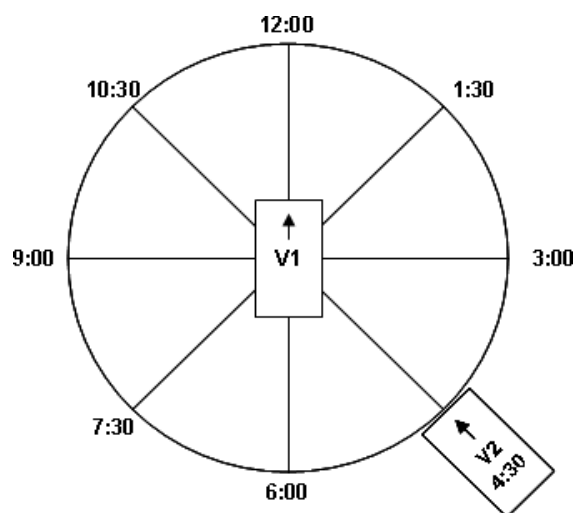
- **PET:** Ο ελάχιστος χρόνος μετά την εμπλοκή που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της τελευταίας κατάληψης μιας θέσης από το πρώτο όχημα, και της επακόλουθης κατάληψης αυτής από το δεύτερο όχημα. Η τιμή 0 υποδηλώνει μια πραγματική εμπλοκή.
- **MaxS:** Η μέγιστη ταχύτητα οποιουδήποτε εκ των δύο οχημάτων της εμπλοκής, καθ' όλη τη διάρκεια της εμπλοκής (δηλ. όσο ο χρόνος έως την εμπλοκή (TTC) είναι μικρότερος από το καθορισμένο όριο). Η μεταβλητή αυτή, εκφράζεται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο ή μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις μονάδες που καθορίζονται στο αντίστοιχο αρχείο τροχιάς.
- **DeltaS:** Η διαφορά στις ταχύτητες των οχημάτων όπως παρατηρείται την χρονική στιγμή **tMinTTC**. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τιμή ορίζεται μαθηματικά ως το μέγεθος της διαφοράς στις ταχύτητες των οχημάτων (ή των τροχιών), έτσι ώστε αν **v1** και **v2** είναι τα διανύσματα ταχύτητας του πρώτου και του δεύτερου οχήματος αντίστοιχα, τότε **DeltaS = || v1 - v2 ||**. Για παράδειγμα, για δύο οχήματα τα οποία κινούνται με την ίδια ταχύτητα, **v**, εάν κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, **DeltaS = 0**. Αν έχουν κάθετη πορεία διασταύρωσης, **DeltaS = ($\sqrt{2}$)v**. Αν πλησιάζουν το ένα το άλλο κατά μέτωπο, τότε **DeltaS = 2v**.
- **DR:** Ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος. Σημειώνεται ότι, στην πραγματικότητα, η τιμή αυτή καταγράφεται ως ο στιγμιαίος ρυθμός επιτάχυνσης. Εάν το όχημα φρενάρει (δηλ. αντιδρά), η τιμή αυτή είναι η πρώτη αρνητική τιμή επιτάχυνσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Εάν το όχημα δεν φρενάρει, αυτή είναι η χαμηλότερη τιμή επιτάχυνσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Η μεταβλητή αυτή, εκφράζεται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο ή μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις μονάδες που καθορίζονται στο αντίστοιχο αρχείο τροχιάς.
- **MaxD:** Η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος. Σημειώνεται ότι, στην πραγματικότητα, η τιμή της μεταβλητής αυτής, καταγράφεται ως ο ελάχιστος στιγμιαίος ρυθμός επιτάχυνσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Μια αρνητική τιμή υποδηλώνει επιβράδυνση (πέδηση ή απελευθέρωση του πεντάλ του γκαζιού). Θετική τιμή υποδηλώνει ότι το όχημα δεν επιβράδυνε κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Η μεταβλητή αυτή, εκφράζεται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο ή μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις μονάδες που καθορίζονται στο αντίστοιχο αρχείο τροχιάς.
- **MaxDeltaV:** Η μέγιστη τιμή DeltaV (FirstDeltaV ή SecondDeltaV) οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή.
- **ConflictAngle:** Η κατά προσέγγιση γωνία υποθετικής εμπλοκής μεταξύ συγκρουόμενων οχημάτων, με βάση την εκτιμώμενη πορεία κάθε οχήματος (βλ. επεξήγηση του FirstHeading). Η γωνία, εκφρασμένη από την οπτική γωνία του πρώτου οχήματος που φτάνει στο σημείο της εμπλοκής, μεταφέρει την κατεύθυνση από την οποία το δεύτερο όχημα προσεγγίζει το πρώτο όχημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Η γωνία κυμαίνεται από -180° έως $+180^\circ$, όπου αρνητική γωνία υποδηλώνει προσέγγιση από αριστερά και η θετική γωνία υποδηλώνει προσέγγιση από τα δεξιά. Μια γωνία 180° (ή -180°) υποδηλώνει

άμεση μετωπική προσέγγιση και μια γωνία 0° (ή -0°) υποδηλώνει άμεση προσέγγιση από πίσω.



Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής Conflict Angle

• **ClockAngle:** Η εναλλακτική έκφραση της γωνίας εμπλοκής με όρους μιας πιο οικείας θέσης του δείκτη του ρολογιού. Και πάλι, η γωνία εκφράζεται από την οπτική γωνία του πρώτου οχήματος, με το δείκτη του ρολογιού να δείχνει τη γωνία από την οποία πλησιάζει το δεύτερο όχημα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Η θέση 12:00 είναι ακριβώς μπροστά από το πρώτο όχημα, η θέση 3:00 είναι προς το δεξιό, 6:00 είναι ακριβώς πίσω και 9:00 είναι αριστερά.



Εικόνα 4.3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής ClockAngle

• **ConflictType:** Ο τύπος της εμπλοκής, η οποία μπορεί να είναι α) οπίσθια εμπλοκή (rear-end conflict) β) εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane-change conflict) ή γ) εμπλοκή διέλευσης (crossing conflict). Εάν οι πληροφορίες μητρώου της εμπλοκής, δηλαδή, ο κωδικός της οδού (link) και της λωρίδας (lane), δεν είναι διαθέσιμες και για τα δύο οχήματα, τότε ο τύπος της εμπλοκής ταξινομείται αποκλειστικά βάσει της απόλυτης τιμής του ConflictAngle ως εξής. Ο τύπος της εμπλοκής είναι οπίσθια (rear-end conflict) αν ισχύει $||\text{ConflictAngle}|| < 30^\circ$, εμπλοκή διέλευσης (crossing conflict) εάν ισχύει $||\text{ConflictAngle}|| > 85^\circ$. Σε διαφορετική περίπτωση, η εμπλοκή κατατάσσεται ως μια εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane-change conflict). Εάν είναι διαθέσιμες πληροφορίες οδού και λωρίδας, οι πληροφορίες αυτές είναι χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση στην περίπτωση που και τα δύο οχήματα καταλαμβάνουν την ίδια λωρίδα (της ίδιας οδού), είτε στην αρχή είτε στο τέλος του συμβάντος εμπλοκής. Εάν τα οχήματα καταλαμβάνουν και τα δύο την ίδια λωρίδα κατά την αρχή και στο τέλος του συμβάντος, τότε αυτό ταξινομείται ως συμβάν οπίσθιας εμπλοκής. Εάν ένα από τα δύο οχήματα τερματίσει σε διαφορετική λωρίδα από αυτήν που ξεκίνησε (ενώ δεν έχει αλλάξει οδούς), τότε το συμβάν ταξινομείται ως εμπλοκή αλλαγής λωρίδας. Εάν κάποιο από τα οχήματα αλλάξει οδό κατά τη διάρκεια του συμβάντος, τότε η γωνία εμπλοκής καθορίζει την ταξινόμηση όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με την ακόλουθη πιθανή εξαίρεση). Για δύο οχήματα που ξεκινούν το συμβάν εμπλοκής στην ίδια λωρίδα, αλλά αλλάζουν οδούς κατά τη διάρκεια του συμβάντος, η λογική της ταξινόμησης λαμβάνει υπόψη μόνο την οπίσθια εμπλοκή ή την εμπλοκή αλλαγή λωρίδας, με βάση τη γωνία εμπλοκής (χρησιμοποιώντας την τιμή κατωφλίου που προαναφέρθηκε που αναφέρθηκε κατά την επεξήγηση της μεταβλητής ConflictAngle). Σημειώνεται ότι, οι ελιγμοί οχημάτων, όπως η αλλαγή λωρίδας σε παρακείμενη λωρίδα στροφής ή η είσοδος σε περιοχή διασταύρωσης, μπορεί να θεωρηθεί αλλαγή οδού, ανάλογα με την υποκείμενο μοντέλο προσομοίωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα οχήματα που φαίνεται να κινούνται στην ίδια λωρίδα, μπορεί στην πραγματικότητα να θεωρείται από το μοντέλο προσομοίωσης ότι ταξιδεύουν σε διαφορετικές οδούς που τυχαίνει να επικαλύπτονται.

• **PostCrashV:** μια εκτίμηση της ταχύτητας μετά τη εμπλοκή και των δύο οχημάτων. Αυτή η εκτίμηση υποθέτει ότι τα οχήματα ενεπλάκησαν, στην εκτιμώμενη γωνία εμπλοκής, με ταχύτητες που παρατηρήθηκαν στο tMinTTC, και υποθέτοντας μια ανελαστική εμπλοκή μεταξύ του κέντρου μάζας και των δύο οχημάτων, όπου και τα δύο οχήματα εκτρέπονται στη συνέχεια προς την ίδια κατεύθυνση και με την ίδια ταχύτητα.

• **PostCrashHeading:** Η εκτιμώμενη πορεία και των δύο οχημάτων μετά από μια υποθετική εμπλοκή (όπως αναφέρεται στο PostCrashV). Αυτή η κατεύθυνση εκφράζεται ως η γωνία που μετράται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον άξονα x (ο οποίος υποτίθεται ότι δείχνει δεξιά), έτσι ώστε 0° είναι δεξιά, 90° είναι πάνω, 180° είναι αριστερά και 270° είναι κάτω. Η γωνία κυμαίνεται από 0° έως 360° .

• **FirstVID (SecondVID):** είναι ο αριθμός αναγνώρισης οχήματος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος. Το πρώτο όχημα είναι το όχημα που φτάνει πρώτο στο σημείο εμπλοκής. Το δεύτερο όχημα φτάνει στη συνέχεια στο ίδιο σημείο. Σε σπάνιες περιπτώσεις (πραγματικές

εμπλοκές) και τα δύο οχήματα μπορεί να φθάσουν σε μια θέση ταυτόχρονα, οπότε η ισοπαλία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου οχήματος όχημα κατατάσσεται αυθαίρετα.

- **FirstLink (SecondLink):** υποδεικνύει τον κωδικό της οδού στην οποία ταξιδεύει το πρώτο (δεύτερο) όχημα, κατά την χρονική στιγμή t_{MinTTC} .

- **FirstLane (SecondLane):** υποδεικνύει σε ποια λωρίδα κυκλοφορίας βρίσκεται το πρώτο (δεύτερο) όχημα, κατά την χρονική στιγμή t_{MinTTC} .

- **FirstLength (SecondLength):** υποδεικνύει το μήκος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος σε πόδια ή μέτρα.

- **FirstWidth (SecondWidth):** υποδεικνύει το πλάτος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος σε πόδια ή μέτρα.

- **FirstHeading (SecondHeading):** υποδεικνύει την πορεία του πρώτου (δεύτερου) οχήματος κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Αυτή η κατεύθυνση προσεγγίζεται από την αλλαγή της θέσης από την έναρξη της εμπλοκής έως το τέλος της εμπλοκής. Σημειώνεται ότι, στις περισσότερες εμπλοκές που δεν είναι οπίσθιες, τουλάχιστον ένα όχημα στρίβει καθ' όλη τη διάρκεια της εμπλοκής. Η πραγματική του πορεία μεταβάλλεται ανάλογα κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Εάν το όχημα δεν κινείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής, τότε η κατεύθυνση προς την οποία είναι στραμμένο, λαμβάνεται ως κατεύθυνση. Αυτή η κατεύθυνση εκφράζεται ως γωνία που μετράται αριστερόστροφα από τον άξονα x (ο οποίος θεωρείται ότι δείχνει δεξιά), δηλαδή 0° είναι δεξιά, 90° είναι επάνω, 180° είναι αριστερά και 270° είναι κάτω. Η γωνία κυμαίνεται από 0° έως 360° .

- **FirstVMinTTC (SecondVMinTTC):** υποδεικνύει την ταχύτητα του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο t_{MinTTC} .

- **FirstDeltaV (SecondDeltaV):** υποδεικνύει τη μεταβολή μεταξύ της ταχύτητας εμπλοκής (που δίνεται από την ταχύτητα **FirstVMinTTC** και την πορεία **FirstHeading**) και της ταχύτητας μετά τη εμπλοκή (που δίνεται από τη ταχύτητα **PostCrashV** και την πορεία **PostCrashHeading**): υποκατάστατο για τη σοβαρότητα της εμπλοκής, που υπολογίζεται υποθέτοντας μια υποθετική σύγκρουση των δύο οχημάτων στην μεταξύ τους εμπλοκή.

- **xFirstCSP (xSecondCSP):** συντεταγμένη x του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο σημείο εκκίνησης της εμπλοκής (Conflict Starting Point-CSP). Η θέση CSP είναι η θέση του οχήματος τη χρονική στιγμή **tMinTTC**.

- **yFirstCSP (ySecondCSP):** συντεταγμένη y του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο σημείο εκκίνησης της εμπλοκής (Conflict Starting Point-CSP). Η θέση CSP είναι η θέση του οχήματος τη χρονική στιγμή **tMinTTC**.

- **xFirstCEP (xSecondCEP):** συντεταγμένη x του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στην εμπλοκή, στο σημείο τερματισμού (Conflict Ending Point-CEP). Η θέση CEP είναι η θέση του οχήματος είτε στο τελευταίο χρονικό βήμα όπου η τιμή TTC είναι κάτω από το

καθορισμένο κατώφλι ή όπου η τελευταία μεταγενέστερη προσπέλαση τιμή παρατηρήθηκε, όποιο από τα δύο συμβαίνει αργότερα στο χρονοδιάγραμμα εμπλοκής.

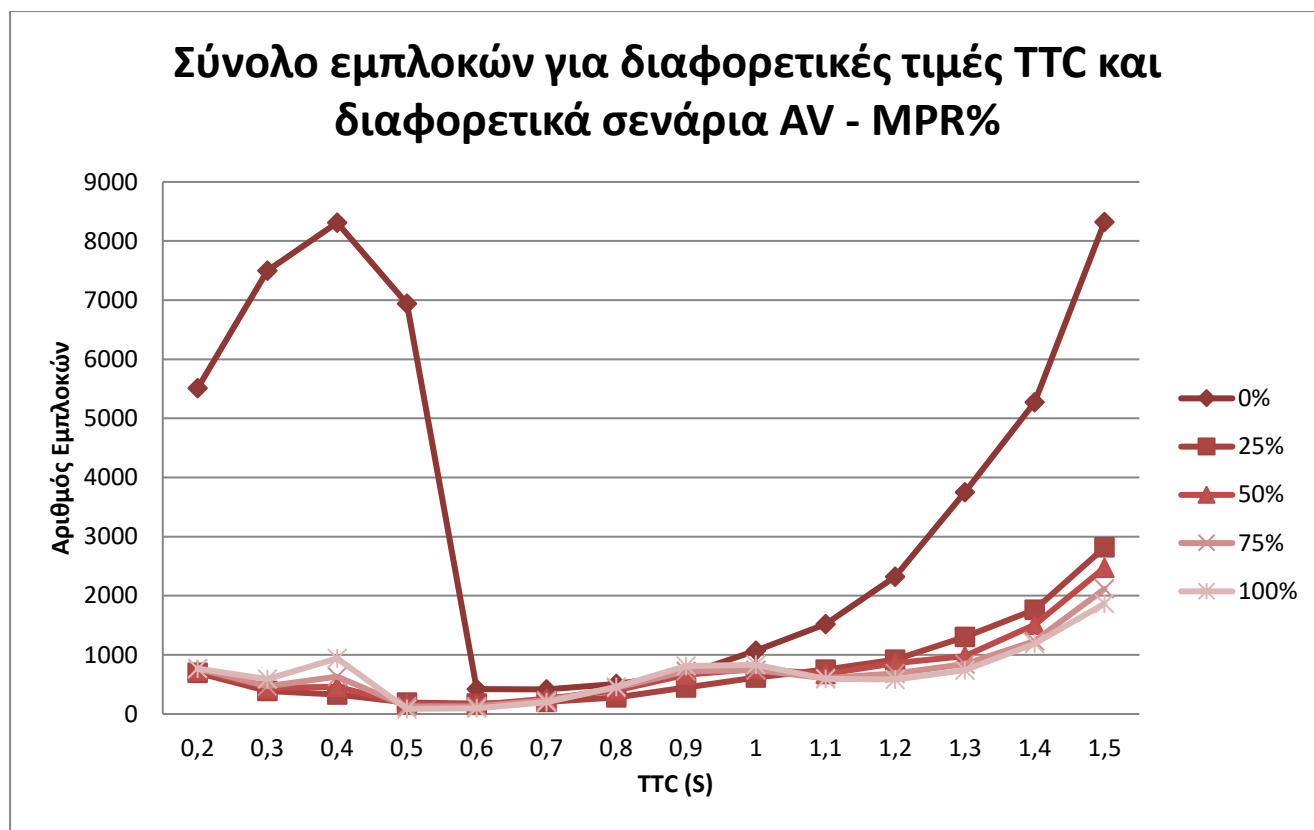
- **yFirstCEP (ySecondCEP):** συντεταγμένη y του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στην εμπλοκή, στο σημείο τερματισμού (Conflict Ending Point-CEP). Το CEP είναι η θέση του οχήματος είτε στο τελευταίο χρονικό βήμα όπου η τιμή TTC είναι κάτω από το καθορισμένο κατώφλι ή όπου η τελευταία μεταγενέστερη προσπέλαση τιμή παρατηρήθηκε, όποιο από τα δύο συμβαίνει αργότερα στο χρονοδιάγραμμα εμπλοκής.

4.4 Επεξεργασία Στοιχείων

Πραγματοποιήθηκε αρχικά μία **προκαταρκτική ανάλυση σε περιβάλλον Excel**, που συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ποιοτικότερων συμπερασμάτων. Τα στατιστικά στοιχεία επιτρέπουν μία πρώτη ανασκόπηση των δεδομένων και ως συνέπεια την αναγνώριση ορισμένων φαινομένων ή τάσεων. Παράλληλα, διερευνήθηκαν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών.

4.1.1 Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μελέτη για τη σχέση μεταξύ τη σχέση μεταξύ του χρόνου ως την εμπλοκή (TTC) και του βαθμού διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (MPR) στο οδικό δίκτυο, προκειμένου να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς η αύξηση των συνδεδεμένων (CAV) και αυτόνομων οχημάτων (AV) , επηρέασε την οδική ασφάλεια. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση της σχέσης των δύο μεγεθών, χρησιμοποιήθηκαν και τα αριθμητικά σύνολα των εμπλοκών για κάθε τιμή του βαθμού διείσδυσης (MPR). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά, ξεχωριστά για τις δύο περιπτώσεις αυτόνομων οχημάτων, στα παρακάτω Διαγράμματα 4.1 και 4.2.

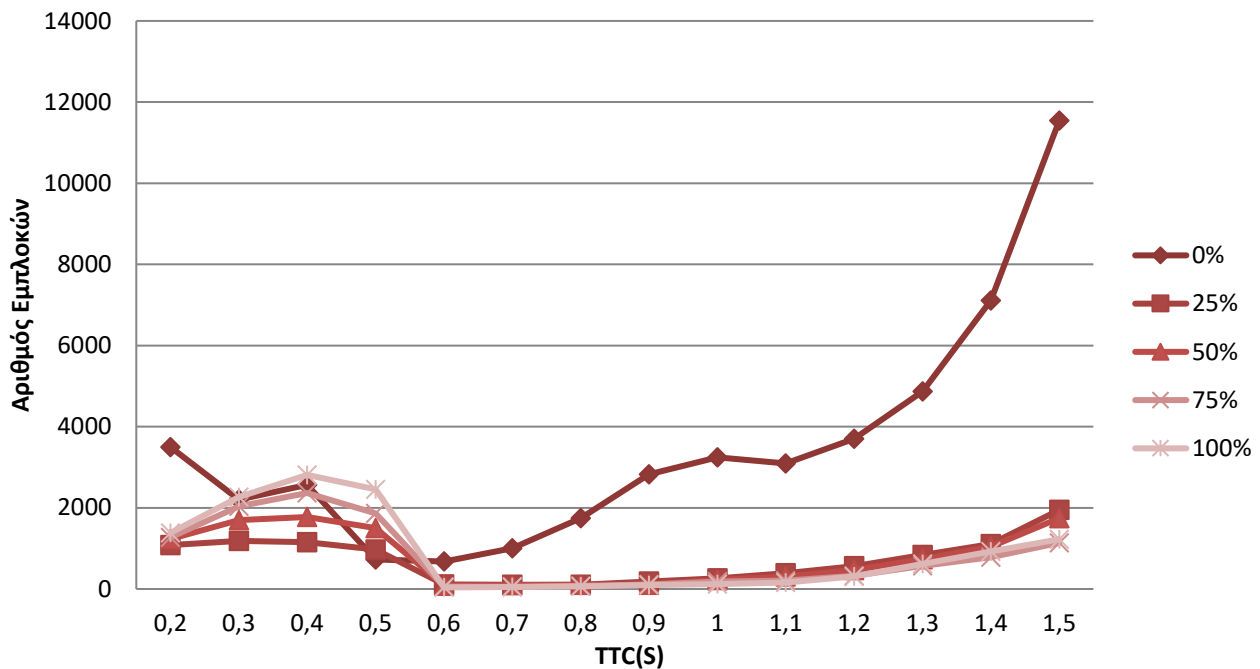


Διάγραμμα 4.1: Αριθμός εμπλοκών για διαφορετικές τιμές χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), για διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (AV - MPR)

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο μεγαλύτερος αριθμός εμπλοκών, με **τιμή χρόνου έως τη εμπλοκή (TTC) ίσο με το 1.5**, προκύπτει για το σενάριο όπου **ο βαθμός διείσδυσης (AV - MPR) είναι ίσος με 0%**, όπου δεν υπάρχουν αυτόματα οχήματα στο οδικό δίκτυο.
- Για όλους τους βαθμούς διείσδυσης αυτόματων οχημάτων (AVs), παρατηρείται σημαντική μείωση των αριθμών εμπλοκών, με τις χαμηλότερες τιμές να σημειώνονται **για τιμή χρόνου ως την εμπλοκή (TTC) ίσο με 0.5, 0.6, 0.7**. Ο χαμηλότερος αριθμός εμπλοκών σημειώθηκε για **TTC ίσο με 0.5** για το σενάριο **100%**.
- Στο σενάριο για 0%, για μικρές τιμές TTC από 0,2-0,6, παρατηρείται μεγάλος αριθμός εμπλοκών, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια οι εμπλοκές είναι μειωμένες.

Σύνολο εμπλοκών για διαφορετικές τιμές TTC και διαφορετικά σενάρια CAV - MPR%



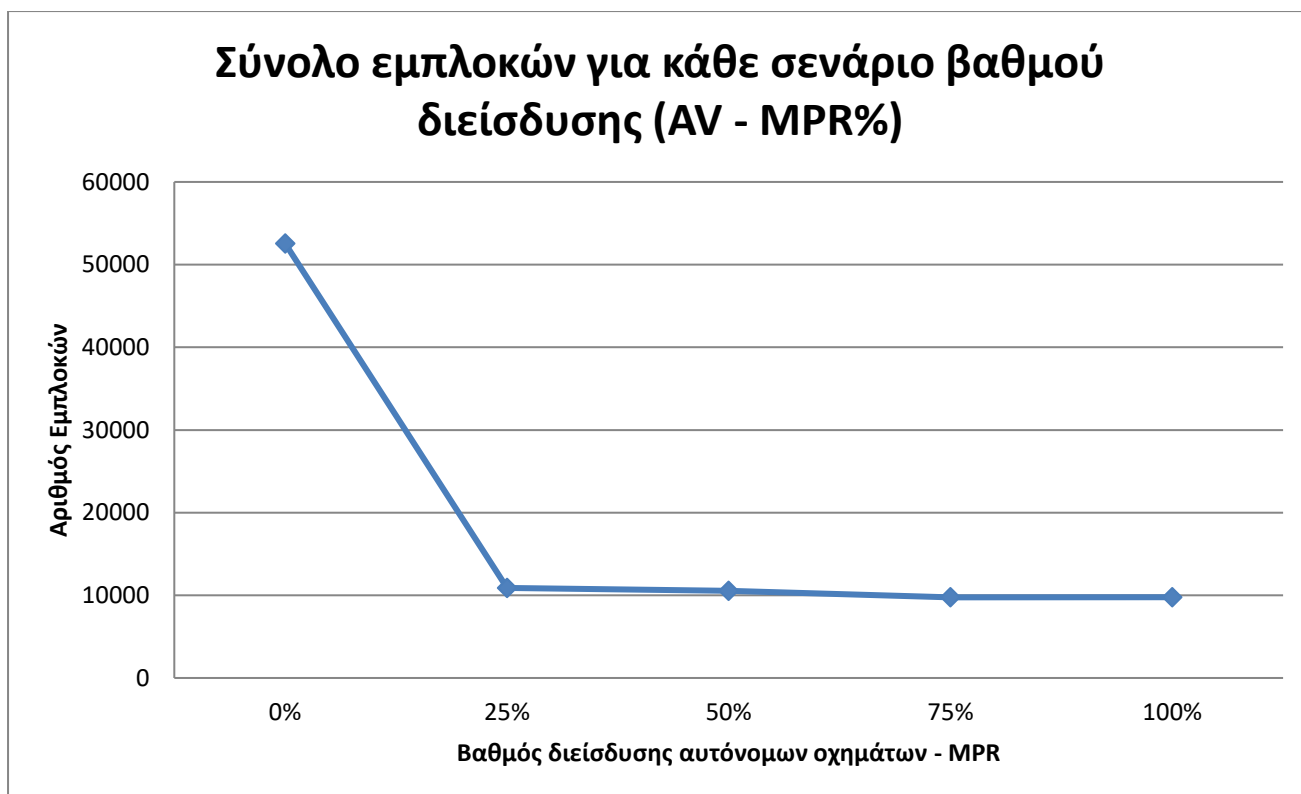
Διάγραμμα 4.2: Αριθμός εμπλοκών για διαφορετικές τιμές χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), για διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (CAV - MPR)

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.2 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο μεγαλύτερος αριθμός εμπλοκών, με **τιμή χρόνου έως τη εμπλοκή (TTC) ίσο με το 1.5**, προκύπτει για το σενάριο όπου **ο βαθμός διείσδυσης (CAV - MPR) είναι ίσος με 0%**, όπου δεν υπάρχουν αυτόματα οχήματα στο οδικό δίκτυο.
- Για όλους τους βαθμούς διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων (CAVs), παρατηρείται σημαντική **μείωση των αριθμών εμπλοκών**, στις περιπτώσεις των εμπλοκών με TTC μεγαλύτερο του 0,6. Για τιμές TTC μικρότερες του 0,6 παρατηρείται όμοιος αριθμός εμπλοκών για όλους τους βαθμούς διείσδυσης.

4.4.2 Συχνότητα εμπλοκών

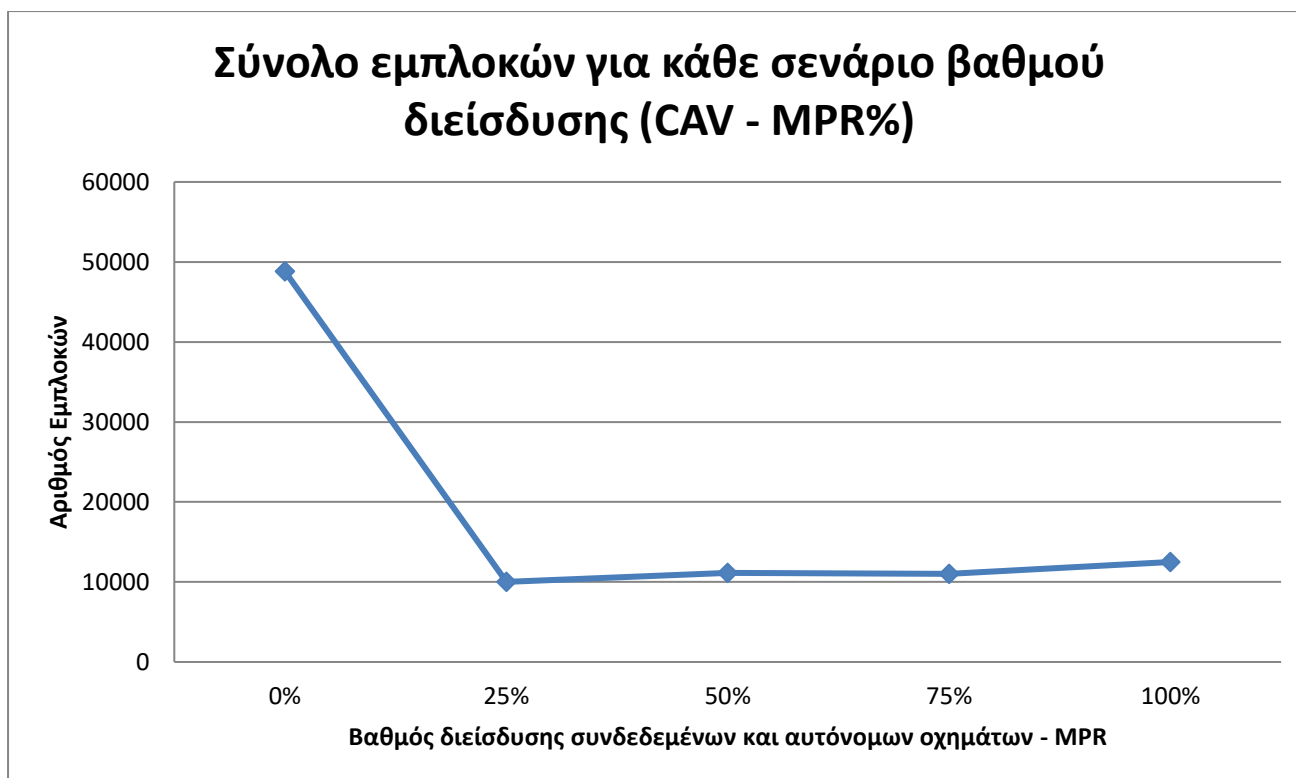
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη σχέση μεταξύ του **βαθμού διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων (MPR% – Market Penetration Rate)**, και τον **αριθμό εμπλοκών**, ξεχωριστά για τις δύο περιπτώσεις, προκειμένου να αναλυθεί πως η αύξηση των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο επηρέασε την οδική ασφάλεια.



Διάγραμμα 4.3: Αριθμός εμπλοκών για κάθε διαφορετικό σενάριο βαθμού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων AV – MPR

Εξετάζοντας το διάγραμμα 4.3, γίνονται αντιληπτά τα εξής:

- Για ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων 25%, παρατηρείται **πολύ μεγάλη μείωση** του αριθμού εμπλοκών, συγκριτικά με το σενάριο 0%
- Όσο αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης αυτόματων οχημάτων, δεν σημειώνεται σημαντική μείωση των αριθμών εμπλοκών. Πιο συγκεκριμένα, για ποσοστά 50%, 75% και 100% ο αριθμός των εμπλοκών παραμένει σχετικά σταθερός.



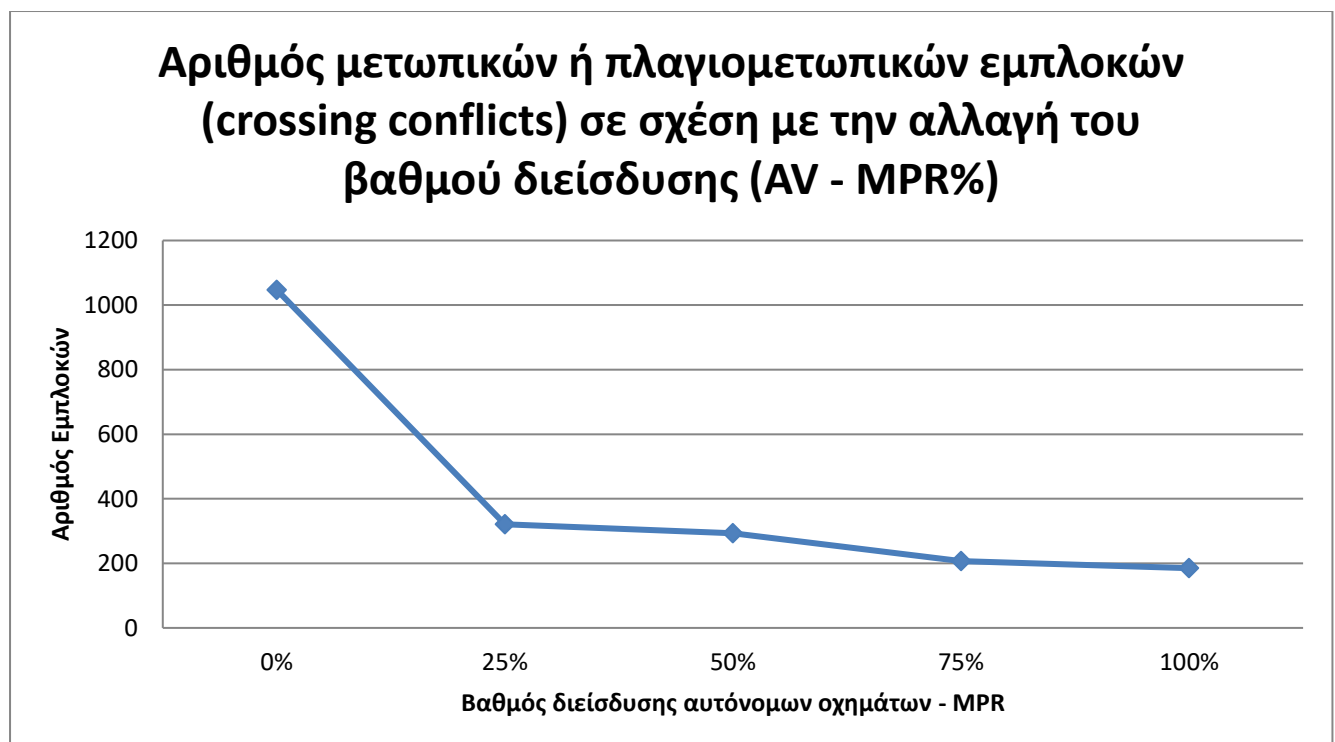
Διάγραμμα 4.4: Αριθμός εμπλοκών για κάθε διαφορετικό σενάριο βαθμού διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων CAV - MPR

Εξετάζοντας το διάγραμμα 4.4, γίνονται αντιληπτά τα εξής:

- Για ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων 25%, σημειώνεται **πολύ μεγάλη μείωση** του αριθμού εμπλοκών σε σχέση με το σενάριο για 0%
- Όσο το ποσοστό διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων αυξάνεται παρατηρείται μια πολύ μικρή αύξηση των αριθμών εμπλοκών σε σχέση με το σενάριο 25%. Δηλαδή, για ποσοστά διείσδυσης 50%, 75% και 100%, ο αριθμός των εμπλοκών αυξάνεται ελάχιστα, χωρίς όμως να ξεπερνά τον αριθμό εμπλοκών από το σενάριο για 0%, από τον οποίο παραμένει σημαντικά μικρότερος.

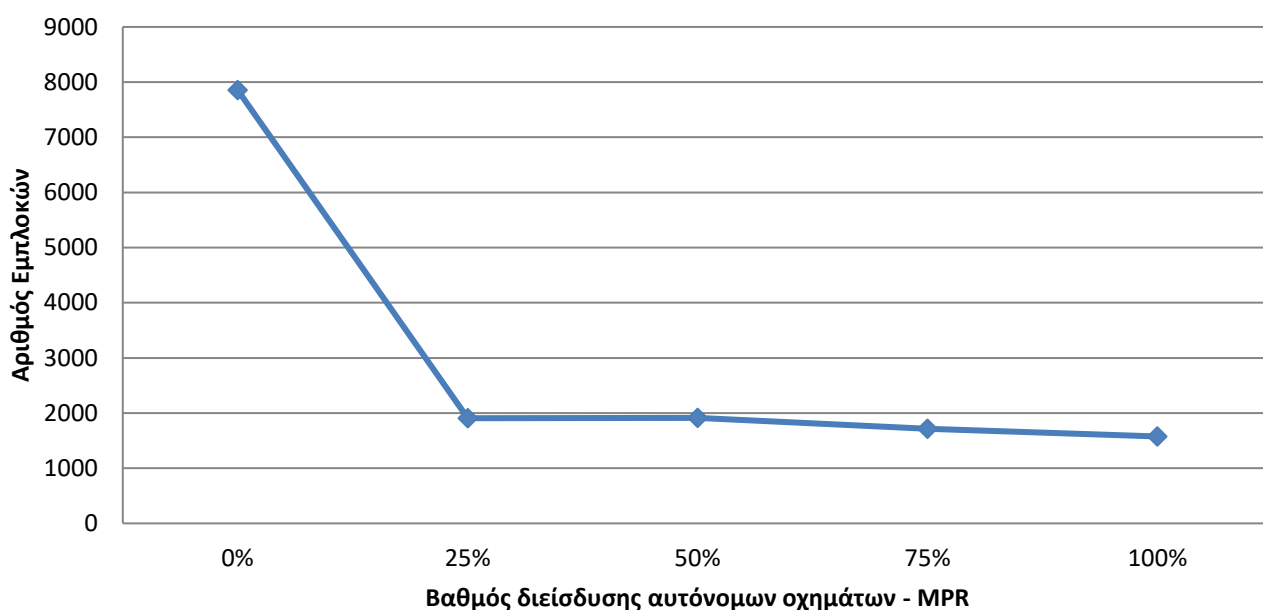
4.4.3 Τύπος εμπλοκής (Conflict Type)

Οι **τύποι εμπλοκών** οι οποίοι καταγράφηκαν χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες. Οι τρεις αυτοί τύποι εμπλοκών είναι οι εξής: α) **οπίσθια εμπλοκή (rear-end conflict)**, β) **πλάγια εμπλοκή (lane-changing conflict)**, και γ) **μετωπική ή πλαγιομετωπική εμπλοκή (crossing conflict)**. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο, ο κάθε τύπος επηρεάζεται από τον βαθμό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR).



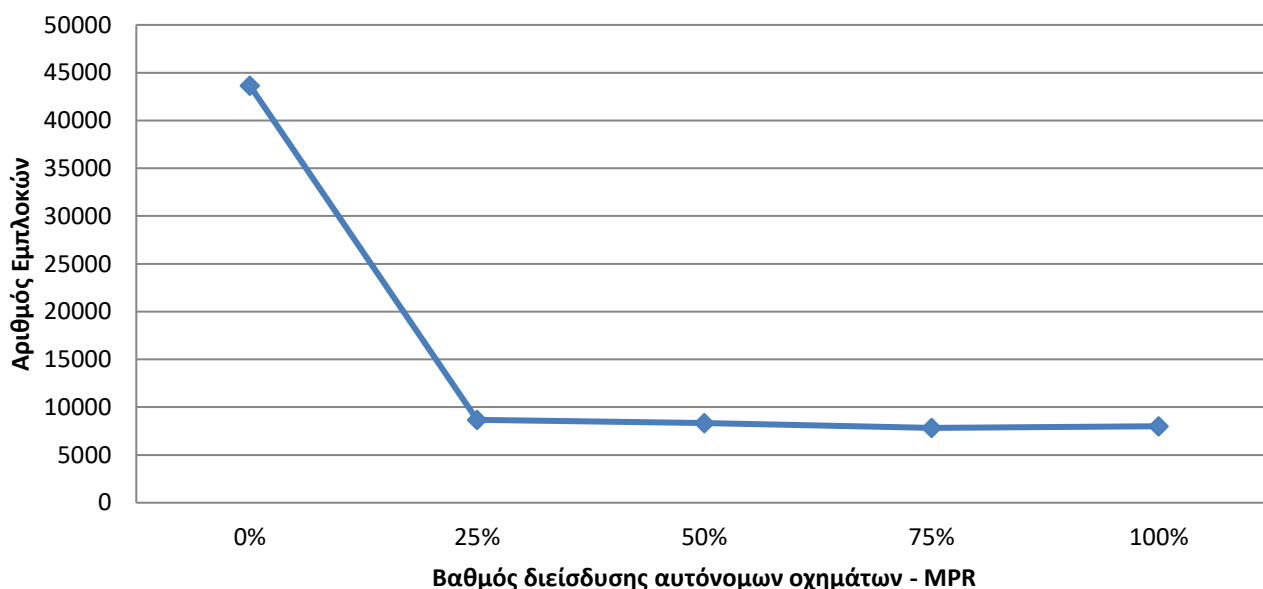
Διάγραμμα 4.5: Αριθμός μετωπικών ή πλαγιομετωπικών εμπλοκών (crossing conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείσδυσης (MPR)

Αριθμός πλάγιων εμπλοκών (lane change) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (AV - MPR%)



Διάγραμμα 4.6: Αριθμός πλάγιων εμπλοκών (lane-change conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)

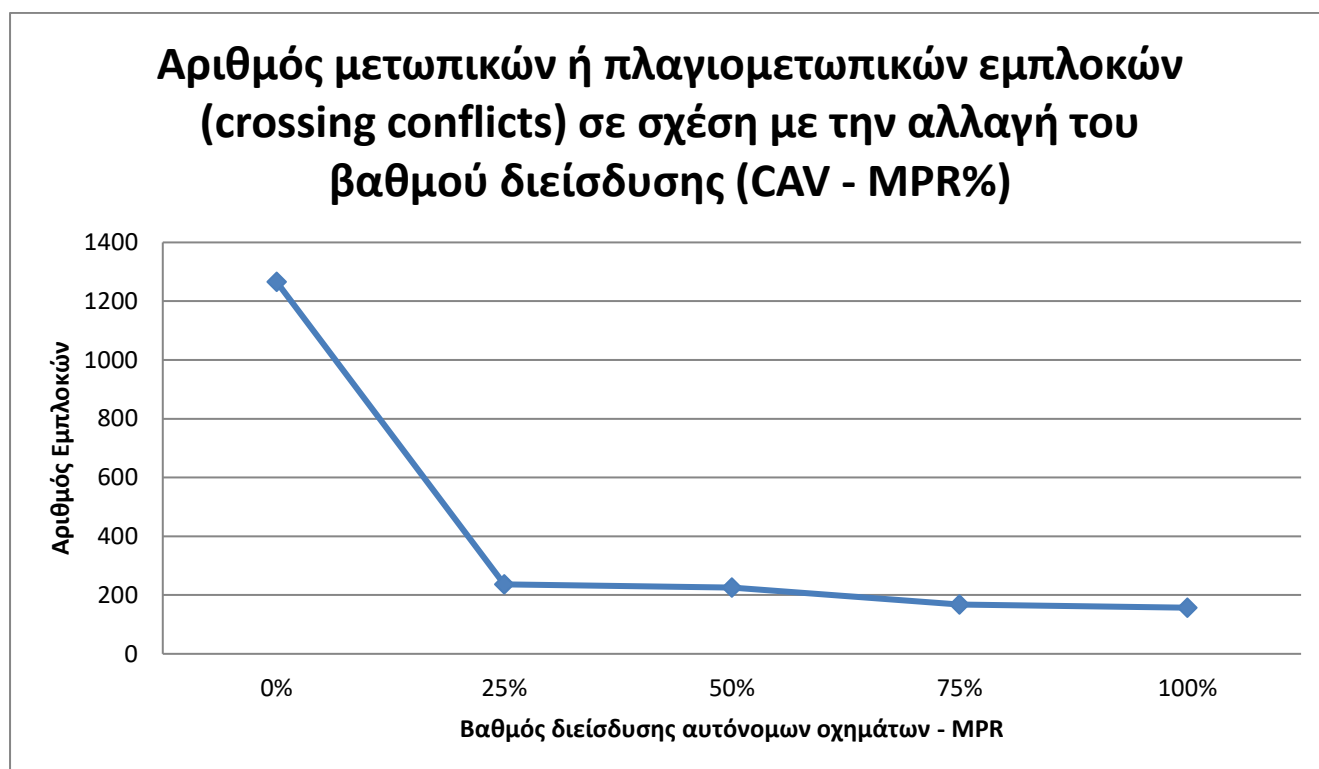
Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear - end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (AV - MPR%)



Διάγραμμα 4.7: Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear-end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)

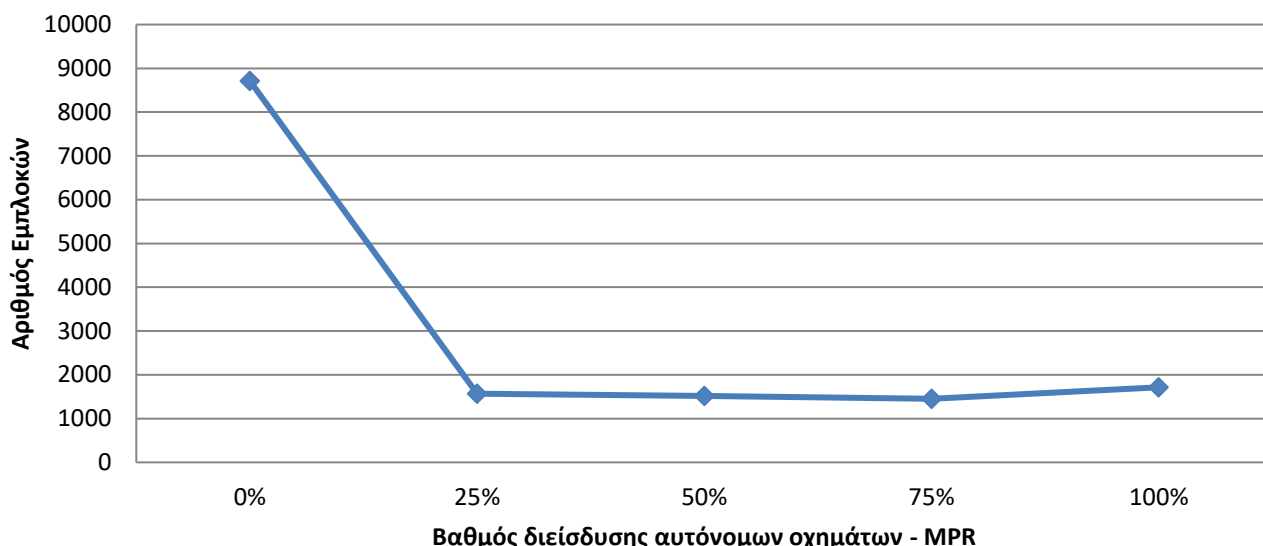
Εξετάζοντας τα διαγράμματα 4.5, 4.6, 4.7, γίνεται αντιληπτό ότι:

- η αύξηση του βαθμού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο (AV – MPR) επέφερε μείωση όλων των τύπων **εμπλοκών (οπίσθιων, μετωπικών ή πλαγιομετωπικών και πλάγιων)**.



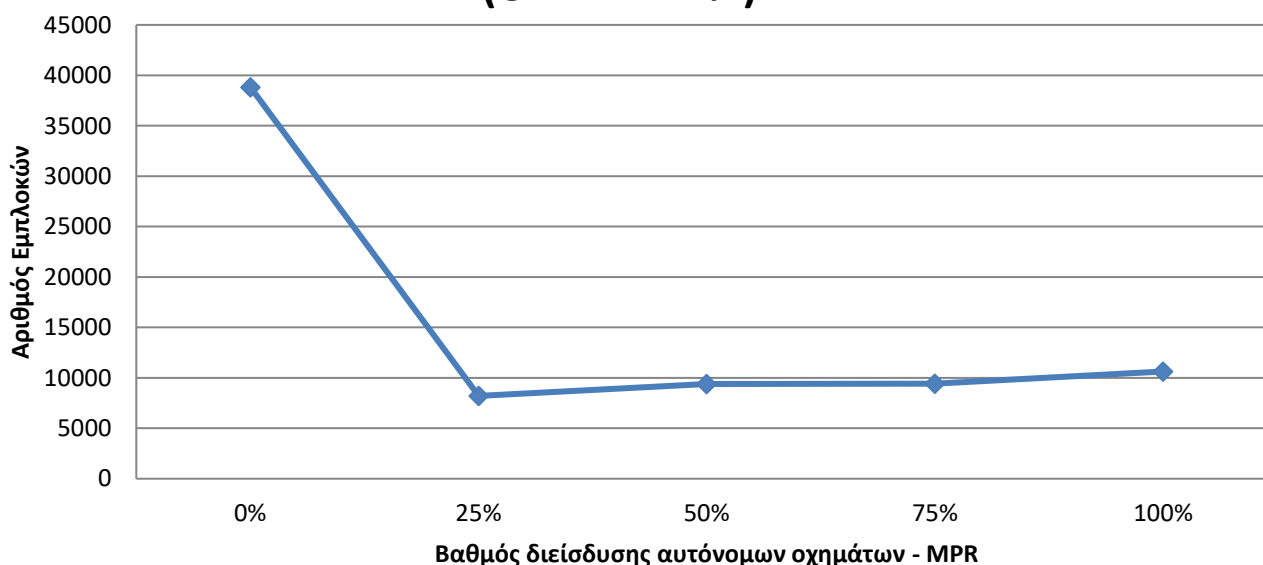
Διάγραμμα 4.8: Αριθμός μετωπικών ή πλαγιομετωπικών εμπλοκών (crossing conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείσδυσης (MPR)

Αριθμός πλάγιων εμπλοκών (lane change) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (CAV - MPR%)



Διάγραμμα 4.9: Αριθμός πλάγιων εμπλοκών (lane-change conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)

Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear - end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (CAV - MPR%)



Διάγραμμα 4.10: Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear-end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)

Εξετάζοντας τα διαγράμματα 4.8, 4.9, 4.10, γίνεται αντιληπτό ότι:

- η αύξηση του βαθμού διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων στο οδικό δίκτυο (CAV – MPR) επέφερε μείωση των **όλων των τύπων εμπλοκών**.

4.5 Σύνοψη

Όσον αφορά τον **χρόνο ως την εμπλοκή (TTC)**, τόσο για την περίπτωση των συνδεδεμένων οχημάτων όσο και για την περίπτωση των αυτόνομων οχημάτων, παρατηρήθηκε ότι για το σενάριο διείσδυσης στο δίκτυο για MPR ίσο με 100%, σημειώθηκαν οι χαμηλότερες τιμές αριθμών εμπλοκών. Επομένως, τα αυτόματα οχήματα μπορούν πιο εύκολα να αντιληφθούν και να προλάβουν μία πιθανή εμπλοκή, συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα.

Στη συνέχεια, από τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη σχέση ανάμεσα στα ποσοστά διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων, παρατηρείται ότι ακόμα και από το χαμηλότερο ποσοστό διείσδυσης (25%), υπάρχει **μεγάλη μείωση του αριθμού των εμπλοκών**. Όμως, όσο αυξάνεται το **ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων (AV)** οι τιμές παραμένουν σταθερές, συγκριτικά με το σενάριο με ποσοστό διείσδυσης 25%. Για τα συνδεδεμένα οχήματα, όσο αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης, από το 25% στο 100% παρατηρείται ότι υπάρχει μία πολύ μικρή αύξηση των αριθμών εμπλοκών.

Τέλος, με την αύξηση του βαθμού διείσδυσης συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, παρατηρείται μείωση των οπίσθιων εμπλοκών (rear end), των πλάγιων εμπλοκών λωρίδας (lane change conflicts) και των πλαγιομετωπικών ή μετωπικών εμπλοκών (crossing conflicts), για όλα τα ποσοστά διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων, ακόμα και για τα μικρότερα ποσοστά.

5 Εφαρμογή Μεθοδολογίας - Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, η **διαδικασία ανάπτυξης μαθηματικών μοντέλων**, καθώς και τα **αποτελέσματα** της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Μετά την ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης συναφών ερευνών και μεθοδολογιών, την παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου και την περιγραφή της συλλογής και επεξεργασίας στοιχείων, έγινε η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την επίτευξη του στόχου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν για την ανάλυση δεδομένων είναι η **γραμμική παλινδρόμηση και πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση**. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι στατιστικοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν για την αποδοχή ή την απόρριψη των στατιστικών μοντέλων. Τέλος, περιγράφονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθοδολογιών, καθώς και η ερμηνεία τους.

5.2 Ανάπτυξη μοντέλων με τη γλώσσα προγραμματισμού R

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία ανάλυσης για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων που αφορούν στους παράγοντες επιρροής της μεταβλητής του χρόνου ως την εμπλοκή (TTC), της διαφοράς των ταχυτήτων των δύο οχημάτων της εμπλοκής (DeltaS) και του τύπου εμπλοκής (Conflict Type). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε **γλώσσα προγραμματισμού R** με το **περιβάλλον ανάπτυξης RStudio** (R Core Team, 2024).

5.2.1 Δεδομένα εισόδου – Καθορισμός μεταβλητών

Για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες αναλύθηκαν, εξετάστηκαν όλες οι μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.3 προηγουμένως, και πιο συγκεκριμένα μεταβλητές όπως τα χαρακτηριστικά των δύο οχημάτων που συμμετείχαν σε κάθε συμβάν εμπλοκής, τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εμπλοκής και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού.

Εφόσον τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν αποτελούνταν από 93.492 εμπλοκές, δηλαδή 93.492 σειρές στον πίνακα δεδομένων, για τα οποία είχαν καταγραφεί 58 μεταβλητές (στήλες στον πίνακα δεδομένων), θεωρήθηκε σκόπιμο να αφαιρεθούν τυχόν μεταβλητές,

για τις οποίες μπορούσε εύκολα να κριθεί ότι η συμβολή τους στη διαδικασία στατιστικής ανάλυσης θα είχε μόνο αρνητικές επιπτώσεις κατά τη διαμόρφωση των στατιστικών μοντέλων. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μεταβλητές που επιλέχθηκε να μην συμμετέχουν στη διαδικασία ανάλυσης, και ο λόγος που αυτό συνέβη.

- **trjFile**
- **FirstVID (SecondVID)**
- **ClockAngle**
- **FirstLink (SecondLink)**
- **FirstLane (SecondLane)**
- **tMinTTC**
- **xFirstCEP (xSecondCEP), yFirstCEP (ySecondCEP)**
- **PET**

Τα τελικά μαθηματικά μοντέλα που προέκυψαν ήταν αποτελέσματα μίας σειράς δοκιμών, κατά τις οποίες αναπτύχθηκε ένας αριθμός μοντέλων που περιλάμβαναν συνδυασμούς όλων των μεταβλητών που καταγράφηκαν. Τα μοντέλα αυτά αξιολογήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων, όπως αυτοί έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά και με βάση τη λογική εξήγηση των αποτελεσμάτων. Στις δοκιμές αυτές απορρίφθηκαν οι μεταβλητές που αποδείχτηκαν ότι δεν έχουν στατιστικά σημαντική επιρροή στην εξαρτημένη μεταβλητή υπό εξέταση. Με αυτή τη διαδικασία διαδοχικών δοκιμών και απόρριψης μοντέλων προέκυψαν τα μοντέλα με τις καλύτερες επιδόσεις στατιστικής σημαντικότητας, όπως αυτά παρουσιάζονται ακολούθως.

5.2.2 Μοντέλα Γραμμικής και Πολυωνυμικής λογιστικής Παλινδρόμησης

Για τον προσδιορισμό των μοντέλων για την μεταβλητή για τον χρόνο ως την εμπλοκή (TTC) και για τη διαφορά στις ταχύτητες των οχημάτων (DeltaS), χρησιμοποιήθηκε γραμμική παλινδρόμηση. Όσον αφορά τον τύπο εμπλοκών (Conflict Type), εφόσον η μεταβλητή είναι κατηγορική χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση.

Οι εξισώσεις οι οποίες αποτυπώνουν τη σχέση ανάμεσα στην εξαρτημένη και τις ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν τη γενικότερη μορφή:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_{1i} + \beta_2 * x_{2i} + \beta_3 * x_{3i} + \dots + \beta_k * x_{ki} + \varepsilon_i \quad (\text{Linear Regression})$$

$$Y = \text{Logit}(P) = \ln \left[\frac{P_i}{(1-P_i)} \right] = B_0 + B_i X_i \quad (\text{Multinomial Logistic Regression})$$

Σε κάθε μοντέλο θα πρέπει να ελεγχθούν οι παρακάτω παράγοντες:

- Οι τιμές και τα πρόσημα των συντελεστών παλινδρόμησης β_i να μπορούν να εξηγηθούν λογικά
- Ο δείκτης t , ο οποίος καθορίζει τη στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών και άρα τη στατιστική εμπιστοσύνη του μοντέλου, να παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 1,7 κατά απόλυτη τιμή
- Όσον αφορά στο επίπεδο σημαντικότητας (Sig-Significance), η πιθανότητα $Pr(>|t|)$ πρέπει να παίρνει τιμές μικρότερες από 0,05
- Οι συντελεστές των μεταβλητών πρέπει να εξηγούνται λογικά

5.3 Εφαρμογή στατιστικών μοντέλων προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τις εξαρτημένες μεταβλητές

Για κάθε μοντέλο παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία:

- I. Ανάπτυξη μοντέλου: Παρουσιάζονται οι μεταβλητές οι οποίες απαρτίζουν το εκάστοτε μοντέλο
- II. Πίνακας μεταβλητών στην εξίσωση (Coefficients): Περιλαμβάνει τις ανεξάρτητες μεταβλητές που ορίζονται για κάθε εξαρτημένη μεταβλητή, απεικονίζοντας τις τιμές των συντελεστών β_i (Coefficients), τον έλεγχο t -test, τα τυπικά σφάλματα Standard Error, το επίπεδο σημαντικότητας Significance και ο συντελεστής προσαρμογής
- III. Μαθηματική σχέση περιγραφής του μοντέλου
- IV. Ποιότητα στατιστικού μοντέλου: Ελέγχεται αν τηρούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι, ώστε το μοντέλο να θεωρείται αξιόπιστο
- V. Σχολιασμός αποτελεσμάτων μοντέλου

Τα μοντέλα πρόβλεψης, σε σχέση με τις ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες παρουσιάστηκαν προηγουμένως, διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Μοντέλο 1 - Προσδιορισμός των παραγόντων επιρροής του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC)
- Μοντέλο 2 - Προσδιορισμός των παραγόντων επιρροής της διαφοράς στις ταχύτητες των οχημάτων της εμπλοκής (DeltaS)

- Μοντέλο 3 - Προσδιορισμός των παραγόντων που καθορίζουν τον τύπο της εμπλοκής (ConflictType)

Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά τα καλύτερα μαθηματικά μοντέλα που προέκυψαν για την κάθε μεταβλητή.

5.3.1 Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC) – Μοντέλο 1

Πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές προκειμένου να προκύψει το καλύτερο μοντέλο, ώστε να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο ως την εμπλοκή δύο οχημάτων (TTC). Το μοντέλο που προέκυψε είναι αυτό που έχει ως εξαρτημένη μεταβλητή τον χρόνο ως την εμπλοκή (TTC) και ανεξάρτητες μεταβλητές τις εξής:

- **MPR_AV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **MPR_CAV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **FirstLength** (συνεχής μεταβλητή): Μήκος του πρώτου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **FirstWidth** (συνεχής μεταβλητή): Πλάτος του πρώτου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **SecondLength** (συνεχής μεταβλητή): Μήκος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **SecondWidth** (συνεχής μεταβλητή): Πλάτος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **Length** (συνεχής μεταβλητή): Συνολικό μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος (σε μέτρα).
- **SpeedLimit** (συνεχής μεταβλητή): Επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας στο οδικό τμήμα (σε km/h).
- **Capacity** (συνεχής μεταβλητή): Κυκλοφοριακή χωρητικότητα του οδικού τμήματος, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να διέλθουν ανά μονάδα χρόνου (σε οχήματα/ώρα).
- **MaxS** (συνεχής μεταβλητή): Η μέγιστη ταχύτητα μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων τη στιγμή της εμπλοκής (σε km/h)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου πρόβλεψης:

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης TTC

Variables	Estimate	Std. Error	t	Pr(> t)	
Intercept	1,753	0,005	338,599	0,000	***
MPR_AV	-0,003	0,005	-56,786	0,000	***
MPR_CAV	-0,005	0,000	-111,851	0,000	***
FirstLength	0,013	0,000	18,573	0,000	***
FirstWidth	-0,095	0,003	-37,734	0,000	***
SecondLength	0,018	0,001	18,220	0,000	***
SecondWidth	-0,339	0,003	-130,177	0,000	***
Length	0,000	0,000	7,794	0,017	*
SpeedLimit	0,000	0,000	2,383	0,000	***
Capacity	0,000	0,000	-34,940	0,000	***
MaxS	-0,012	0,004	-29,592	0,000	***
R - squared	0,4214				

Μαθηματική σχέση:

$$TTC = 1,753 - 0,003MPR_AV - 0,005MPR_CAV + 0,013FirstLength - 0,095FirstWidth + 0,018SecondLength - 0,339SecondWidth - 0,00003902Length + 0,00005846SpeedLimit - 0,0000403Capacity - 0,012MaxS$$

5.3.1.1 Ποιότητα Μοντέλου

Για να ελεγχθεί η ποιότητα του μοντέλου έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι:

- Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 είναι, ίσος με 0,4214 και υποδηλώνει ότι περίπου το 42% της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από το μοντέλο. Αν και δεν πρόκειται για μία υψηλή τιμή, δείχνει ότι το μοντέλο διαθέτει μία ικανοποιητική ικανότητα πρόβλεψης.
- Ο έλεγχος του t επαληθεύεται για όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς οι τιμές του είναι μεγαλύτερες από 1,7.
- Το επίπεδο σημαντικότητας των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05, το οποίο υποδηλώνει ότι οι μεταβλητές αυτές είναι στατιστικά σημαντικές στο μοντέλο με 95% επίπεδο εμπιστοσύνης.

- Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο και τα πρόσημά τους εξηγούνται λογικά.

5.3.1.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Μοντέλου

Από τους συντελεστές παλινδρόμησης (Estimate) του μοντέλου προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Όσο **αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων (MPR_AV), μειώνεται ο χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)**. Ομοίως, όσο **αυξάνεται το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV)** ο χρόνος ως την εμπλοκή επίσης μειώνεται κατά 0,005 δευτερόλεπτα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αυτόματα οχήματα χρησιμοποιούν μικρότερες αποστάσεις ασφαλείας, στην προσπάθεια να βελτιστοποιήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου, γεγονός που οδηγεί σε πιο γρήγορες αντιδράσεις και σε μικρότερο χρόνο ως την εμπλοκή.
- Επίσης, **για τα εμπλεκόμενα οχήματα με μεγαλύτερο μήκος (FirstLength και SecondLength), παρατηρείται μεγαλύτερος χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)**. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μεγαλύτερα οχήματα λόγω δυσκινησίας, κινούνται σε πιο συντηρητικά πλαίσια στο δίκτυο και ενδεχομένως με πιο μικρή ταχύτητα. Επίσης, τα υπόλοιπα οχήματα είναι πιθανό να κινούνται σε διαφορετικές λωρίδες με μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτά τα οχήματα και με μικρότερη ταχύτητα, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο ως την εμπλοκή (TTC).
- Παρατηρείται ότι, **για τα εμπλεκόμενα οχήματα με μεγαλύτερο πλάτος (FirstWidth και SecondWidth), ο χρόνος ως την εμπλοκή (TTC) είναι μικρότερος**. Το γεγονός αυτό εξηγείται, από την υπόθεση ότι, μεγαλύτερο πλάτος οχήματος, οδηγεί σε μικρότερο ελεύθερο διάστημα κάλυψης μεταξύ των δύο οχημάτων της εμπλοκής, άρα και μικρότερο χρόνο ως την εμπλοκή (TTC).
- Για **οδικά τμήματα με μεγαλύτερο μήκος (Length)**, παρατηρείται ότι **ο χρόνος ως την εμπλοκή μειώνεται (TTC)**. Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως εξηγείται, επειδή όσο μεγαλύτερο το μήκος του οδικού τμήματος, τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός οχημάτων που συγκεντρώνονται σε αυτό, επομένως οι αποστάσεις ανάμεσα στα οχήματα είναι μικρότερες, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερο χρόνο ως την εμπλοκή (TTC).
- Επιπλέον, **όσο αυξάνεται το όριο ταχύτητας (SpeedLimit), αυξάνεται ο χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)**. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να συνδέεται με το είδος του οδικού τμήματος. Τα υψηλότερα όρια ταχύτητας συναντώνται συχνότερα σε κύριες αρτηρίες, όπου η ροή των οχημάτων είναι πιο ομαλή και οι αποστάσεις μεταξύ τους συνήθως μεγαλύτερες. Σε τέτοιες συνθήκες, η πιθανότητα απότομων επιβραδύνσεων και αλληλεπιδράσεων μειώνεται, αυξάνοντας το χρόνο μέχρι μία πιθανή εμπλοκή.

- Όσο αυξάνεται η **χωρητικότητα του οδικού τμήματος (Capacity)**, ο χρόνος ως την εμπλοκή **μειώνεται (TTC)**. Αυτό εξηγείται, από το γεγονός, ότι λόγω μεγαλύτερης χωρητικότητας, περισσότερα οχήματα καταλαμβάνουν το οδικό τμήμα, επομένως ο ελεύθερος χώρος ανάμεσα στα οχήματα είναι μικρότερος και ο χρόνος ως την εμπλοκή μειώνεται (TTC).
- Τέλος, όσο αυξάνεται η **μέγιστη ταχύτητα** μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων τη στιγμή της εμπλοκής (**MaxS**), ο χρόνος ως την εμπλοκή **μειώνεται (TTC)**. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός, ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες, μειώνονται οι αποστάσεις ανάμεσα στα οχήματα και το ένα όχημα πλησιάζει το άλλο, γεγονός που μειώνει το χρόνο ως την εμπλοκή (TTC).

5.3.2 Διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS) – Μοντέλα 2

Έπειτα από πολλές δοκιμές προέκυψε ότι το καλύτερο μοντέλο, για να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαφορά ανάμεσα στα δύο εμπλεκόμενα οχήματα (DeltaS), είναι αυτό που έχει ως εξαρτημένη μεταβλητή το DeltaS και ανεξάρτητες τις εξής:

- **MPR_AV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **MPR_CAV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **FirstLength** (συνεχής μεταβλητή): Μήκος του πρώτου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **SecondLength** (συνεχής μεταβλητή): Μήκος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **SecondWidth** (συνεχής μεταβλητή): Πλάτος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **Length** (συνεχής μεταβλητή): Συνολικό μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος (σε μέτρα).
- **SpeedLimit** (συνεχής μεταβλητή): Επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας στο οδικό τμήμα (σε km/h).
- **Capacity** (συνεχής μεταβλητή): Κυκλοφοριακή χωρητικότητα του οδικού τμήματος, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να διέλθουν ανά μονάδα χρόνου (σε οχήματα/ώρα).

- **ConflictType** (διακριτή μεταβλητή): Ο τύπος εμπλοκής (crossing – κατηγορία αναφοράς: μετωπική ή πλαγιομετωπική εμπλοκή, lane change: πλάγια εμπλοκή, rear end: οπίσθια εμπλοκή)
- **SecondVehType** (διακριτή μεταβλητή): Ο τύπος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος (53 – κατηγορία αναφοράς: Συμβατικό ΙΧ, 56: Φορτηγό, 58: Λεωφορείο, 6831130: Συνδεδεμένο και αυτόνομο όχημα – ΙΧ, 686018: Μοτοσυκλέτα, Αυτόνομο όχημα – ΙΧ)
- **Control** (διακριτή μεταβλητή): Ο τύπος ελέγχου στο οδικό τμήμα που πραγματοποιήθηκε η εμπλοκή (Yield – κατηγορία αναφοράς: με πινακίδα παραχώρησης προτεραιότητας, None: χωρίς έλεγχο, Stop: με πινακίδα Stop, trafficlight: με φωτεινό σηματοδότη)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου πρόβλεψης:

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης DeltaS

Variables	Estimate	Std. Error	t	Pr(> t)	
Intercept	2,228	0,575	3,877	0,000	***
MPR_AV	-0,002	0,000	-6,242	0,000	***
MPR_CAV	0,003	0,000	11,219	0,000	***
FirstLength	0,101	0,003	32,235	0,000	***
SecondLength	0,153	0,021	7,205	0,000	***
SecondWidth	1,397	0,281	4,967	0,000	***
Length	0,000	0,000	3,331	0,001	***
SpeedLimit	0,017	0,001	27,828	0,000	***
Capacity	0,000	0,000	-5,172	0,000	***
ConfictTypelane change	-3,697	0,056	-66,369	0,000	***
ConflictTyperear end	-5,567	0,054	-103,815	0,000	***
SecondVehType56	0,266	0,136	1,962	0,050	*
SecondVehType58	-0,767	0,226	-3,399	0,001	***
SecondVehType683130	-1,374	0,026	-52,187	0,000	***
SecondVehType686018	1,688	0,424	3,980	0,000	***
SecondVehType691603	-0,249	0,041	-6,092	0,000	***
ControlNone	0,582	0,062	9,446	0,000	***
ControlStop	0,197	0,080	2,477	0,013	*
Controltrafficlight	0,486	0,061	7,953	0,000	***
R-Squared	0,2789				

Μαθηματική σχέση:

$$\begin{aligned} \text{DeltaS} = & 2,228 - 0,002\text{MPR_AV} + 0,003\text{MPR_CAV} + 0,101\text{FirstLength} + \\ & 0,153\text{SecondLength} + 1,397\text{SecondWidth} - 0,00009756\text{Length} + 0,0017\text{SpeedLimit} - \\ & 0,00004869\text{Capacity} - 3,697\text{ConflictTypelane_change} - 5,567\text{ConflictTyperear_end} + \\ & 0,266\text{SecondVehType56} - 0,767\text{SecondVehType58} - 1,374\text{SecondVehType683130} + \\ & 1,688\text{SecondVehType686018} - 0,249\text{SecondVehType691603} + 0,582\text{ControlNone} + \\ & 0,197\text{ControlStop} + 0,486\text{Controltrafficlight} \end{aligned}$$

5.3.2.1 Ποιότητα Μοντέλου

Για να ελεγχθεί η ποιότητα του μοντέλου έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι:

- Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 είναι ίσος με 0,2798 και υποδηλώνει ότι περίπου το 28% της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από το μοντέλο. Αν και δεν πρόκειται για υψηλή τιμή, δείχνει ότι το μοντέλο διαθέτει μια αποδεκτή ικανότητα πρόβλεψης.
- Ο έλεγχος του t επαληθεύεται για όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς οι τιμές του είναι μεγαλύτερες από 1,7.
- Το επίπεδο σημαντικότητας των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05, το οποίο υποδηλώνει ότι οι μεταβλητές αυτές είναι στατιστικά σημαντικές στο μοντέλο με 95% επίπεδο εμπιστοσύνης.
- Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο και τα πρόσημά τους εξηγούνται λογικά.

5.3.2.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Μοντέλου

Από τους συντελεστές του μοντέλου προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Όσο αυξάνεται το **ποσοστό διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων (MPR_AV)** μειώνεται η διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες του πρώτου και του δεύτερου οχήματος (**DeltaS**). Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται ενδεχομένως, στο γεγονός ότι τα αυτόματα οχήματα αφήνουν μικρότερο ελεύθερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος, κρατάνε πιο σταθερές ταχύτητες και έχουν προβλέψιμες αντιδράσεις, επομένως η διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες να μειώνεται (**DeltaS**).
- Αντίθετα, όσο **αυξάνεται** το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (**MPR_CAV**) **αυξάνεται** η διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες του πρώτου και του δεύτερου οχήματος (**DeltaS**). Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα συνδεδεμένα οχήματα λαμβάνουν πληροφορίες για οχήματα σε μεγάλες αποστάσεις,

γεγονός που οδηγεί στο να αυξήσουν ή να μειώσουν ταχύτητα προληπτικά, και επομένως η διαφορά στις ταχύτητες με τα γύρω οχήματα αυξάνεται.

- Για τα εμπλεκόμενα οχήματα με **μεγαλύτερο μήκος (FirstLength και SecondLength)** παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά στις ταχύτητες των δύο οχημάτων (**DeltaS**). Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερα οχήματα αυξάνουν και μειώνουν ταχύτητα με πιο αργό ρυθμό, γεγονός που δημιουργεί μεγαλύτερη διαφορά στις ταχύτητες αν τα γύρω οχήματα είναι μικρότερου μεγέθους. Επίσης, τα μεγαλύτερα οχήματα καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο και ως αποτέλεσμα τα γύρω οχήματα ίσως να επιβραδύνουν ή να κάνουν προσπεράσεις, γεγονός που δημιουργεί μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των οχημάτων.
- Για τα δεύτερα οχήματα στην εμπλοκή με το μεγαλύτερο πλάτος (**SecondWidth**), η διαφορά των ταχυτήτων αυξάνεται (**DeltaS**). Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι, τα οχήματα με μεγαλύτερο πλάτος εμποδίζουν την ορατότητα και καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει να υπόλοιπα οχήματα να κάνουν κάποια απότομη κίνηση ή προσπέραση. Επίσης, τα οχήματα με μεγαλύτερο πλάτος συμπεριφέρονται διαφορετικά στις αλλαγές λωρίδας, γεγονός που οδηγεί σε πιο περίπλοκες αλληλεπιδράσεις με τα γύρω οχήματα, επομένως υπάρχουν διαφορές στις ταχύτητες.
- Η **αύξηση του ορίου ταχύτητας (SpeedLimit)**, οδηγεί σε **αύξηση** της διαφοράς των ταχυτήτων ανάμεσα στα εμπλεκόμενα οχήματα (**DeltaS**). Πιθανή εξήγηση για αυτό το γεγονός, είναι ότι αύξηση του ορίου ταχύτητας, επιτρέπει στα οχήματα να αναπτύξουν μεγαλύτερες ταχύτητες, επομένως η διαφορά στις ταχύτητες ανάμεσα σε πιο αργά και πιο γρήγορα οχήματα μεγαλώνει.
- Όσο **αυξάνεται η χωρητικότητα (Capacity)**, **μειώνεται** η διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των οχημάτων (**DeltaS**). Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι οι οδοί που είναι σχεδιασμένοι για μεγάλη χωρητικότητα, παρουσιάζουν συνήθως πιο ομαλή ροή και τα οχήματα κινούνται με παρόμοιες ταχύτητες, επομένως η διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των οχημάτων μειώνεται.
- Στις **πλάγιες εμπλοκές (ConflictType_lanechange)** παρατηρείται **μικρότερη διαφορά ανάμεσα** στις ταχύτητες των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων (**DeltaS**), σε σχέση με τις μετωπικές ή πλαγιομετωπικές εμπλοκές. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι οι πλάγιες εμπλοκές, όπως αυτές που συμβαίνουν κατά την αλλαγή λωρίδας, συμβαίνουν συχνά μεταξύ οχημάτων που κινούνται με παρόμοια ταχύτητα και στην ίδια κατεύθυνση. Επομένως, η σχετική διαφορά ταχύτητας (**DeltaS**) είναι μικρότερη, σε αντίθεση με τις μετωπικές ή πλαγιομετωπικές εμπλοκές, όπου τα οχήματα μπορεί να κινούνται με σημαντικά διαφορετικές ταχύτητες ή ακόμα και σε αντίθετες κατευθύνσεις.

- Στις **οπίσθιες εμπλοκές (ConflictType_rearend)** παρατηρείται **μικρότερη διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες** των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων (**DeltaS**) σε σχέση με τις μετωπικές ή πλαγιομετωπικές εμπλοκές. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι οπίσθιες εμπλοκές συνήθως συμβαίνουν όταν τα οχήματα κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση με παρόμοια ταχύτητα και η εμπλοκή προκύπτει λόγω καθυστέρησης στην αντίδραση ή μικρής απόστασης ασφαλείας, όχι λόγω μεγάλης διαφοράς ταχύτητας. Αντίθετα, στις μετωπικές ή πλαγιομετωπικές εμπλοκές, είναι συχνότερες οι σημαντικές αποκλίσεις στις ταχύτητες.
- Στην περίπτωση κατά την οποία το δεύτερο όχημα είναι **φορτηγό (SecondVehType_56)**, η διαφορά στις ταχύτητες των οχημάτων (**DeltaS**) είναι **μεγαλύτερη σε σχέση με όταν είναι συμβατικό ΙΧ (SecondVehType_56)**. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι τα φορτηγά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα ΙΧ, όπως χαμηλότερη επιτάχυνση και μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης.
- Στην περίπτωση κατά την οποία το δεύτερο εμπλεκόμενο όχημα είναι **λεωφορείο (SecondVehType_58)**, φαίνεται μέσω του μοντέλου να είναι μικρότερη η διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (**DeltaS**), **σε σχέση με όταν είναι συμβατικό ΙΧ (SecondVehType_56)**. Αυτό πιθανόν σχετίζεται με το γεγονός ότι τα λεωφορεία κινούνται γενικά με πιο σταθερές και προβλέψιμες ταχύτητες, κυρίως σε καθορισμένες λωρίδες (λεωφορειολωρίδες) με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα οχήματα να προσαρμόζουν τη δική τους ταχύτητα αντίστοιχα
- Επιπλέον, στην περίπτωση κατά την οποία το δεύτερο εμπλεκόμενο όχημα είναι **αυτόνομο και συνδεδεμένο όχημα - ΙΧ (SecondVehType_686130)**, παρουσιάζεται μικρότερη διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (**DeltaS**) **σε σχέση με το όταν είναι συμβατικό ΙΧ (SecondVehType_56)**. Η μικρότερη διαφορά ταχύτητας πιθανόν αποδίδεται στη βελτιωμένη ικανότητα των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων να διατηρούν σταθερές αποστάσεις και ομαλή ροή κυκλοφορίας, μέσω αισθητήρων και τεχνολογιών επικοινωνίας. Έτσι, μειώνονται οι απότομες αλλαγές ταχύτητας και οι αποκλίσεις σε σχέση με τα συμβατικά ΙΧ.
- Στην περίπτωση κατά την οποία το δεύτερο εμπλεκόμενο όχημα είναι **μοτοσυκλέτα (SecondVehType_686018)**, φαίνεται μέσω του μοντέλου να **αυξάνεται** η διαφορά στις ταχύτητες των οχημάτων (**DeltaS**) **σε σχέση με όταν είναι συμβατικό ΙΧ (SecondVehType_56)**. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι οι μοτοσυκλέτες τείνουν να κινούνται με μεταβαλλόμενη ταχύτητα και να αλλάζουν λωρίδες πιο συχνά, γεγονός που αυξάνει τις πιθανότητες εμπλοκής με σημαντική διαφορά ταχύτητας σε σχέση με τα άλλα οχήματα.
- Επιπλέον, όταν ο τύπος του δεύτερου οχήματος της εμπλοκής είναι **όχημα - ΙΧ (SecondVehType_691603)**, παρουσιάζεται μικρότερη διαφορά στις ταχύτητες των εμπλεκόμενων οχημάτων (**DeltaS**) **σε σχέση με το όταν είναι συμβατικό ΙΧ**

(SecondVehType_56). Η μικρότερη αυτή διαφορά πιθανόν οφείλεται στη βελτιστοποιημένη και πιο συντηρητική οδηγική συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων.

- Τα οδικά τμήματα χωρίς έλεγχο κυκλοφορίας (**ControlType_none**), παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφορές ταχυτήτων (**DeltaS**) σε σχέση με το όταν ελέγχονται σε παραχώρηση προτεραιότητας. Σε τέτοια τμήματα, τα οχήματα μπορεί να προσεγγίζουν με διαφορετικές ταχύτητες είτε επιβραδύνοντας απότομα είτε συνεχίζοντας χωρίς να μειώσουν ταχύτητα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα εμπλοκής με μεγάλη διαφορά ταχύτητας.
- Επίσης τα οδικά τμήματα με πινακίδα σήμανσης **STOP (ControlType - Stop)**, παρουσιάζονται μεγαλύτερες διαφορές στις ταχύτητες των οχημάτων (**DeltaS**) σε σχέση με τα οδικά τμήματα με πινακίδα παραχώρησης προτεραιότητας. Η υποχρεωτική πλήρης ακινητοποίηση κάποιων οχημάτων σε συνδυασμό με την αδιάκοπη πορεία άλλων που έχουν προτεραιότητα, δημιουργεί πιθανώς σενάρια με απότομες αλλαγές ταχύτητας.
- Τέλος, τα οδικά τμήματα με φωτεινή σηματοδότηση (**ControlType - trafficlight**), επίσης παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφορές ταχυτήτων μεταξύ των οχημάτων στις εμπλοκές (**DeltaS**), σε σχέση με τα οδικά τμήματα με πινακίδα παραχώρησης προτεραιότητας. Η αυξημένη αυτή διαφορά ταχύτητας (**DeltaS**) πιθανόν σχετίζεται με τις συχνές εναλλαγές της κυκλοφορίας λόγω των φάσεων του σηματοδότη.

5.3.3 Τύπος Εμπλοκής (Conflict Type) – Μοντέλο 3

Έπειτα από πολλές δοκιμές, ως το καλύτερο μοντέλο για να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο της εμπλοκής, προέκυψε ότι είναι εκείνο με εξαρτημένη μεταβλητή τον τύπο των εμπλοκών οι οποίες παρουσιάστηκαν στην προσομοίωση, με ανεξάρτητες μεταβλητές:

- **MPR_AV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **MPR_CAV** (συνεχής μεταβλητή): Ο ρυθμός διείσδυσης των αυτόματων και συνδεδεμένων οχημάτων στο δίκτυο (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- **SecondLength** (συνεχής μεταβλητή): Μήκος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **DeltaS** (συνεχής μεταβλητή): Η διαφορά στις ταχύτητες μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων τη στιγμή πριν την εμπλοκή (σε km/h).
- **Capacity** (συνεχής μεταβλητή): Κυκλοφοριακή χωρητικότητα του οδικού τμήματος, δηλαδή ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να διέλθουν ανά μονάδα χρόνου (σε οχήματα/ώρα).

- **SecondWidth** (συνεχής μεταβλητή): Πλάτος του δεύτερου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **FirstWidth** (συνεχής μεταβλητή): Πλάτος του πρώτου εμπλεκόμενου οχήματος στην εμπλοκή (σε μέτρα).
- **SpeedLimit** (συνεχής μεταβλητή): Επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας στο οδικό τμήμα (σε km/h).

Δεδομένου ότι, η μεταβλητή του τύπου της εμπλοκής (ConflictType), αποτελεί μία κατηγορική μεταβλητή με τρεις πιθανές κατηγορίες (rear end, crossing, lane change), χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της, η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμησης.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης Conflict Type

Dependent Variable	Independent Variables	Coefficient	St. Error	z	P> z	Sig
Conflict Type = lane change	Intercept	2,119	0,002	1310,216	0,000	***
	MPR_AV	0,003	0,001	3,532	0,000	***
	MPR_CAV	0,005	0,001	5,357	0,002	**
	SecondLength	-0,108	0,010	-11,067	0,000	***
	DeltaS	-0,195	0,006	-32,212	0,000	***
	Capacity	0,001	0,000	17,660	0,000	***
	SecondWidth	0,067	0,011	6,317	0,011	*
	FirstWidth	-0,107	0,006	-17,073	0,000	***
	SpeedLimit	0,005	0,001	3,631	0,000	***
Conflict Type = rear end	Intercept	4,317	0,002	2616,166	0,000	***
	MPR_AV	0,003	0,001	3,140	0,002	**
	MPR_CAV	0,007	0,001	8,404	0,000	***
	SecondLength	-0,082	0,010	-8,293	0,000	***
	DeltaS	-0,539	0,007	-76,585	0,000	***
	Capacity	0,001	0,000	20,209	0,000	***
	SecondWidth	-0,027	0,011	-2,553	0,011	*
	FirstWidth	-0,276	0,006	-43,226	0,000	***
	SpeedLimit	0,009	0,001	6,283	0,000	***
Accuracy	0,8155					

Μαθηματική σχέση:

Μοντέλο 1 – ConflictType = lane change

$$\ln[P(\text{ConflictType}=\text{lane change})/P(\text{ConflictType}=\text{crossing})] = 2,119 + 0,003\text{MPR_AV} + 0,005\text{MPR_CAV} - 0,108\text{SecondLength} - 0,195\text{DeltaS} + 0,001\text{Capacity} + 0,067\text{SecondWidth} - 0,107\text{FirstWidth} + 0,005\text{SpeedLimit}$$

Μοντέλο 2 – ConflictType=rear end

$$\ln[P(\text{ConflictType}=\text{rear end})/ P(\text{ConflictType}=\text{crossing})] = 4,317 + 0,003\text{MPR_AV} + 0,007\text{MPR_CAV} - 0,082\text{SecondLength} - 0,539\text{DeltaS} + 0,001\text{Capacity} - 0,027\text{SecondWidth} - 0,276\text{FirstWidth} + 0,009\text{SpeedLimit}$$

5.3.3.1 Ποιότητα Μοντέλου

Εφόσον το μοντέλο που προέκυψε είναι μοντέλο πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης, δεν μπορεί να αξιολογηθεί με τον ίδιο τρόπο με τα προηγούμενα μοντέλα. Παρόλα αυτά, ισχύουν τα εξής:

- Το μοντέλο παρουσιάζει ακρίβεια (accuracy) ίση με 0,8155, γεγονός που υποδηλώνει ότι περίπου το 81,6% των προβλέψεων του μοντέλου είναι ορθές. Η τιμή αυτή θεωρείται ικανοποιητική.
- Ο έλεγχος του z επαληθεύεται για όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς οι τιμές του είναι μεγαλύτερες από το 1,7.
- Το επίπεδο σημαντικότητας των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05, το οποίο υποδηλώνει ότι οι μεταβλητές αυτές είναι στατιστικά σημαντικές στο μοντέλο με 95% επίπεδο εμπιστοσύνης.
- Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο και τα πρόσημα τους εξηγούνται λογικά

5.3.3.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Μοντέλου

Από τους συντελεστές του μοντέλου προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Η **αύξηση του βαθμού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων (MPR_AV)** συσχετίζεται με **αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης πλάγιων εμπλοκών (lane-change) και οπίσθιων συγκρούσεων (rear-end)**, σε σύγκριση με τις **πλαγιομετωπικές ή μετωπικές εμπλοκές (crossing)**. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική δυναμική που αναπτύσσεται σε μικτά κυκλοφοριακά περιβάλλοντα, όπου τα αυτόνομα οχήματα τηρούν με αυστηρότητα τους κανόνες

οδικής κυκλοφορίας (π.χ. σταθερή ταχύτητα, σταδιακή επιβράδυνση, τήρηση ορίων). Αυτή η προβλέψιμη συμπεριφορά μπορεί να ωθεί τους οδηγούς συμβατικών οχημάτων είτε να επιχειρούν συχνότερες αλλαγές λωρίδας για να τα προσπεράσουν, είτε να επιδεικνύουν ανυπομονησία σε καταστάσεις καθυστέρησης, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα εμπλοκών, κυρίως οπίσθιου τύπου.

- **Η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (MPR_CAV)** συσχετίζεται με αυξημένη πιθανότητα εμπλοκών **τύπου πλάγιας (lane change) ή οπίσθιας (rear-end)**, συγκριτικά με τις **πλαγιομετωπικές ή μετωπικές εμπλοκές (crossing)**. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι οι οδηγοί συμβατικών οχημάτων ίσως επιχειρούν περισσότερες προσπεράσεις των συνδεδεμένων οχημάτων, οδηγώντας σε αυξημένες εμπλοκές κατά την αλλαγή λωρίδας. Παράλληλα, παρόλο που τα συνδεδεμένα οχήματα ενσωματώνονται αποτελεσματικά στην κυκλοφορία, το πιο ομαλό φρενάρισμά τους ενδέχεται να αιφνιδιάζει τους οδηγούς συμβατικών οχημάτων, αυξάνοντας τον κίνδυνο οπίσθιας σύγκρουσης.
- **Για τα δεύτερα οχήματα στην εμπλοκή με μεγαλύτερο μήκος (SecondLength)** παρατηρείται **μείωση της πιθανότητας τόσο πλάγιων όσο και οπίσθιων εμπλοκών**, σε σχέση **πλαγιομετωπικές ή μετωπικές (crossing) συγκρούσεις**. Ο λόγος πιθανόν σχετίζεται με το γεγονός ότι τα μεγαλύτερα οχήματα εμφανίζουν μειωμένη ευελιξία και τείνουν να αποφεύγουν ελιγμούς όπως η προσπέραση ή η απότομη αλλαγή λωρίδας. Επιπλέον, οι οδηγοί των υπόλοιπων οχημάτων τείνουν να διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις ασφαλείας από τέτοια οχήματα, περιορίζοντας έτσι τις πιθανότητες εμπλοκής μέσω πλάγιων ή οπίσθιων συγκρούσεων.
- **Η αύξηση της διαφοράς ταχύτητας** μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS) **συνδέεται με μειωμένη πιθανότητα πλάγιων (lane change) και οπίσθιων (rear-end) εμπλοκών**, σε σύγκριση με τις **πλαγιομετωπικές ή μετωπικές συγκρούσεις (crossing)**. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι αυτού του τύπου οι εμπλοκές παρατηρούνται κυρίως όταν τα οχήματα κινούνται με παρόμοιες ταχύτητες, καθώς τότε υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα αλληλεπίδρασης στον ίδιο χώρο κυκλοφορίας. Όταν η διαφορά ταχύτητας αυξάνεται, μειώνεται η διάρκεια συνύπαρξης των οχημάτων στον ίδιο διάδρομο κυκλοφορίας, περιορίζοντας τον κίνδυνο εμπλοκής.
- **Η αύξηση της χωρητικότητας της οδού (Capacity)** σχετίζεται με **αύξηση της πιθανότητας πλάγιων εμπλοκών (lane change) και οπίσθιων (rear-end)**, συγκριτικά με εμπλοκές τύπου **crossing**. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι, σε οδούς με υψηλότερη χωρητικότητα, αυξάνεται και η κυκλοφοριακή ροή, γεγονός που καθιστά πιο συχνές τις αλλαγές λωρίδας, αυξάνοντας παράλληλα τον σχετικό κίνδυνο εμπλοκής.
- Όσον αφορά τα **γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων οχημάτων**, για τα δεύτερα εμπλεκόμενα οχήματα με μεγαλύτερο πλάτος (**SecondLength**) φαίνεται να **αυξάνεται η πιθανότητα της πλάγιας εμπλοκής**, ενώ **μειώνεται η πιθανότητα εμπλοκής τύπου rear-end**, σε σύγκριση με τις εμπλοκές **crossing**. Η παρουσία ενός οχήματος μεγαλύτερου πλάτους ενδέχεται να ωθήσει τους οδηγούς των γύρω

οχημάτων σε ελιγμούς αποφυγής μέσω αλλαγής λωρίδας, αυξάνοντας την πιθανότητα σχετικής εμπλοκής. Ταυτόχρονα, το μεγαλύτερο μέγεθος του οχήματος ενδέχεται να λειτουργεί αποτρεπτικά ως προς τις οπίσθιες συγκρούσεις, καθώς οι οδηγοί τείνουν να διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις ασφαλείας.

- Για μεγαλύτερου πλάτους οχήματα τα οποία είναι πρώτα στην εμπλοκή (**FirstWidth**) παρουσιάζεται **μειωμένη πιθανότητα πλάγιας εμπλοκής (lane change) και οπίσθιας σύγκρουσης (rear-end)**, σε σύγκριση με τις **πλαγιομετωπικές ή μετωπικές (crossing) εμπλοκές**. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερου μεγέθους οχήματα, λόγω του όγκου και της περιορισμένης ευελιξίας τους, προκαλούν στους οδηγούς των υπολοίπων οχημάτων μεγαλύτερη προσοχή. Οι οδηγοί τείνουν να διατηρούν αυξημένες αποστάσεις ασφαλείας και να αποφεύγουν την πραγματοποίηση ελιγμών (όπως αλλαγές λωρίδας) γύρω από τέτοια οχήματα, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο εμπλοκής.
- Τέλος, η **αύξηση του ορίου ταχύτητας (SpeedLimit)** φαίνεται να **ενισχύει την πιθανότητα εμπλοκών τύπου αλλαγής λωρίδας (lane-change) και οπίσθιας σύγκρουσης (rear – end)**, έναντι **πλαγιομετωπικών ή μετωπικών συγκρούσεων**. Όσο αυξάνεται το επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας, οι οδηγοί επιδεικνύουν αυξημένη τάση για αλλαγές λωρίδας, τόσο για λόγους προσπέρασης όσο και για τη διατήρηση υψηλότερης ταχύτητας κίνησης. Επιπλέον, στις υψηλές ταχύτητες, μειώνεται ο χρόνος αντίδρασης και συχνά περιορίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων, αυξάνοντας τον κίνδυνο οπίσθιων εμπλοκών, ιδίως σε περιπτώσεις λανθασμένης εκτίμησης ή αιφνίδιου φρεναρίσματος.

6 Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η **διερεύνηση της επίδρασης της διείσδυσης των αυτόνομων (Autonomous Vehicles – AVs) και των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (Connected and Automated Vehicles – CVs) στην οδική ασφάλεια**. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο η αύξηση του βαθμού διείσδυσης των δύο αυτών τεχνολογιών, ξεχωριστά, επηρεάζει κρίσιμες κυκλοφοριακές μεταβλητές, όπως ο χρόνος ως την εμπλοκή (Time to Collision – TTC), η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (Delta Speed – DS), καθώς και ο τύπος εμπλοκής (π.χ. οπίσθια, πλάγια, μετωπική ή πλαγιομετωπική σύγκρουση).

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, χρησιμοποιήθηκε **μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας**, με εφαρμογή σε επιλεγμένη περιοχή του κέντρου της Αθήνας. Η προσομοίωση βασίστηκε σε σενάρια κυκλοφορίας κατά την ώρα αιχμής, λαμβάνοντας υπόψη την υφιστάμενη λειτουργία του οδικού δικτύου. Συνολικά αναπτύχθηκαν εννέα σενάρια προσομοίωσης, με διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (Market Penetration Rate – MPR%) των αυτόνομων και των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων, από 0% έως 100%, με βήμα 25%, για κάθε τεχνολογία ξεχωριστά.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων καταγράφηκαν **93.492 συμβάντα εμπλοκών**, στα οποία ο χρόνος TTC ήταν μεγαλύτερος από 0,2 δευτερόλεπτα και μικρότερος από 1,5 δευτερόλεπτα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε περιγραφική στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση, οδηγώντας σε ενδιαφέροντα προκαταρκτικά ευρήματα. Στη συνέχεια, κατόπιν επαναληπτικών δοκιμών, αναπτύχθηκαν τρία μαθηματικά μοντέλα, μέσω **γραμμικής παλινδρόμησης και πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης**, τα οποία περιγράφουν τη στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εξαρτημένων μεταβλητών (ο χρόνος ως την εμπλοκή, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων, ο τύπος εμπλοκής) και κρίσιμων παραμέτρων του κυκλοφοριακού δικτύου. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας

Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Μοντέλα Γραμμικής Παλινδρόμησης				Μοντέλο πολυωνμικής λογιστικής παλινδρόμησης			
	Χρόνος ως την εμπλοκή (TTC)		Διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες των δύο οχημάτων (DeltaS)		Τύπος Εμπλοκής (Conflict Type)			
					ConflictType=lane change		ConflictType= rear end	
	β_i	t	β_i	t	β_i	z	β_i	z
Intercept	1,753	338,599	2,228	3,877	2,119	1310,216	4,317	2616,166
MPR_AV	-0,003	-56,786	-0,002	-6,242	0,003	3,532	0,003	3,140
MPR_CAV	-0,005	-111,851	0,003	11,219	0,005	5,357	0,007	8,404
FirstLength	0,013	18,573	0,101	32,235				
FirstWidth	-0,095	-37,734	-	-	-0,107	-17,073	-0,276	-43,226
SecondLength	0,018	18,220	0,153	0,021	-0,108	-11,067	-0,082	-8,293
SecondWidth	-0,339	-130,177	1,397	0,281	0,067	6,317	-0,027	-2,553
Length	0,000	7,794	0,000	0,000				
SpeedLimit	0,000	2,383	0,017	0,001	0,005	3,631	0,009	6,283
Capacity	0,000	-34,940	0,000	0,000	0,001	17,660	0,001	20,209
MaxS	-0,012	-29,592	-	-	-	-	-	-
ConflictTypelane change	-	-	-3,697	-66,369	-	-	-	-
ConflictType rear end	-	-	-5,567	-103,815	-	-	-	-
SecondVehType56	-	-	0,266	1,962	-	-	-	-
SecondVehType58	-	-	-0,767	-3,399	-	-	-	-
SecondVehType683130	-	-	-1,374	-52,187	-	-	-	-
SecondVehType686018	-	-	1,688	3,98	-	-	-	-
SecondVehType691603	-	-	-0,249	-6,092	-	-	-	-
ControlNone	-	-	0,582	9,446	-	-	-	-
ControlStop	-	-	0,197	2,477	-	-	-	-
Controltraffilight	-	-	0,486	7,953	-	-	-	-
DeltaS	-	-	-	-	-0,195	-32,212	-0,539	-76,585
R-squared	0,4214		0,2789					
Accuracy	-		-		0,8155			

6.2 Συνολικά Συμπεράσματα

Κατά τα διάφορα στάδια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας προέκυψε μια σειρά συμπερασμάτων που συνδέονται άμεσα με τους αρχικούς στόχους και τα ερωτήματά της. Στη παρούσα ενότητα, επιχειρείται να δοθεί απάντηση στα ερωτήματα αυτά, με τη σύνθεση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων. Τα γενικά συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

1. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τον **χρόνο έως την εμπλοκή** (Time to Collision – TTC) φαίνεται να σχετίζονται κυρίως με τα χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων οχημάτων, όπως το μήκος και το πλάτος του πρώτου και του δεύτερου οχήματος, καθώς και με το ποσοστό διείσδυσης αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων (CAV) οχημάτων στην κυκλοφορία. Αντιθέτως, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, όπως το συνολικό μήκος του οδικού τμήματος, το όριο ταχύτητας και η χωρητικότητα, φαίνεται να ασκούν πιο περιορισμένη επίδραση στον χρόνο TTC.
2. Η **διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS)** φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τον τύπο εμπλοκής, και

συγκεκριμένα στις πλάγιες (lane change) και οπίσθιες (rear-end) συγκρούσεις παρατηρούνται υψηλότερες τιμές της μεταβλητής. Επιπλέον, σημαντική επίδραση ασκεί και ο τύπος του δεύτερου οχήματος εμπλοκής, με διαφοροποιήσεις να καταγράφονται μεταξύ συμβατικών επιβατικών αυτοκινήτων (I.X.), λεωφορείων, φορτηγών, μοτοσυκλετών, καθώς και συνδεδεμένων ή αυτόνομων οχημάτων. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος του τύπου ελέγχου της κυκλοφορίας (π.χ. απουσία ελέγχου, παρουσία πινακίδας STOP ή φωτεινού σηματοδότη), ο οποίος επηρεάζει την ταχύτητα και τον συγχρονισμό των οχημάτων κατά την προσέγγιση σε σημεία πιθανής εμπλοκής. Αντιθέτως, οι παράγοντες διείσδυσης των αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) στην κυκλοφορία, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και των εμπλεκόμενων οχημάτων, εμφανίζουν πιο περιορισμένη επίδραση στη διαφορά ταχύτητας μεταξύ των δύο οχημάτων.

3. Για την **πιθανότητα εμφάνισης πλάγιας εμπλοκής** τύπου (lane change) σε σύγκριση με **πλαγιομετωπική ή μετωπική (crossing)** σύγκρουση, ως σημαντικοί θετικοί παράγοντες αναδείχθηκαν η διείσδυση αυτόνομων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV), η χωρητικότητα της οδού (Capacity), το όριο ταχύτητας (SpeedLimit) και το πλάτος του δεύτερου οχήματος (SecondWidth). Αντιθέτως, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), το μήκος του δεύτερου οχήματος (SecondLength) και το πλάτος του πρώτου οχήματος (FirstWidth) συσχετίζονται αρνητικά με την πιθανότητα εμφάνισης εμπλοκής αυτού του τύπου. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι τόσο τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, όσο και οι κυκλοφοριακές και τεχνολογικές συνθήκες, επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδηγών, ενισχύοντας την πιθανότητα πραγματοποίησης ελιγμών αλλαγής λωρίδας υπό συγκεκριμένες συνθήκες.
4. Για την πιθανότητα εμφάνισης εμπλοκής τύπου **οπίσθιας σύγκρουσης (rear end) σε σχέση με την πλαγιομετωπική ή μετωπική (crossing)** εμπλοκή, το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης ανέδειξε ως θετικά συνδεδεμένους παράγοντες τη διείσδυση αυτόνομων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV), τη χωρητικότητα της οδού (Capacity) και το όριο ταχύτητας (SpeedLimit). Οι παράγοντες αυτοί αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης οπίσθιων συγκρούσεων, πιθανόν λόγω αυξημένης κυκλοφοριακής ροής και ταχυτήτων, αλλά και διαφορών στην οδηγική συμπεριφορά σε περιβάλλοντα με παρουσία AV/CAV. Αντίθετα, σημαντικά αρνητική επίδραση ασκούν η διαφορά ταχύτητας μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), το μήκος (SecondLength) και το πλάτος (SecondWidth) του δεύτερου οχήματος, καθώς και το πλάτος του πρώτου οχήματος (FirstWidth), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι οδηγοί διατηρούν μεγαλύτερες αποστάσεις από οχήματα μεγάλων διαστάσεων ή όταν υπάρχει σημαντική διαφορά ταχύτητας, περιορίζοντας έτσι τον κίνδυνο εμπλοκής από πίσω.

5. **Η εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων (AV) οδηγεί σε σημαντική μείωση του συνολικού αριθμού εμπλοκών.** Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ακόμη και σε χαμηλό ποσοστό διείσδυσης (25%) παρατηρείται αισθητή μείωση σε σύγκριση με το βασικό σενάριο χωρίς αυτόνομα οχήματα (0%). Επιπλέον, καθώς το ποσοστό διείσδυσης αυξάνεται περαιτέρω (50%, 75%, 100%), ο αριθμός των εμπλοκών παραμένει σχετικά σταθερός, διατηρώντας το χαμηλό επίπεδο που παρατηρείται ήδη από το 25%. Αντίστοιχα, για τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα (CAV) παρατηρείται επίσης σημαντική μείωση των εμπλοκών στο σενάριο διείσδυσης 25%. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα AV, η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού διείσδυσης συνοδεύεται από ελαφρά ανοδική τάση στον αριθμό εμπλοκών, η οποία όμως δεν υπερβαίνει ποτέ τα επίπεδα του σεναρίου χωρίς CAV (0%), διατηρώντας έτσι το συνολικό όφελος σε επίπεδα θετικά.
6. Επιπλέον, **η εισαγωγή των αυτόνομων (AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) συμβάλλει στη σημαντική μείωση της συχνότητας όλων των τύπων εμπλοκών**, συμπεριλαμβανομένων των πλάγιων (lane change), οπίσθιων (rear-end), πλαγιομετωπικών και μετωπικών συγκρούσεων. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η ενίσχυση του οδικού δικτύου με AV και CAV έχει γενικευμένα οφέλη στην οδική ασφάλεια, ανεξαρτήτως του είδους της εμπλοκής.
7. **Το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων (MPR_AV) εμφανίζει αρνητική και στατιστικά σημαντική επίδραση στη διαφορά ταχύτητας** μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η αύξηση του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων (AV) στην κυκλοφορία συνδέεται με μείωση της διαφοράς ταχύτητας (DeltaS). Αυτό ερμηνεύεται από τη συνεπή και προβλέψιμη οδηγική συμπεριφορά των AV, τα οποία τείνουν να διατηρούν σταθερή ταχύτητα και ομαλή ροή, μειώνοντας τις απότομες επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις και συμβάλλοντας σε **πιο ομοιόμορφη κυκλοφοριακή δυναμική**.
8. **Το ποσοστό διείσδυσης των συνδεδεμένων και αυτόματων οχημάτων (MPR_CAV) παρουσιάζει θετική επίδραση στη διαφορά ταχύτητας** μεταξύ των εμπλεκόμενων οχημάτων (DeltaS), υποδηλώνοντας ότι η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης συνδεδεμένων οχημάτων συνοδεύεται από μεγαλύτερες αποκλίσεις στις ταχύτητες. Αυτό το φαινόμενο ενδέχεται να οφείλεται στη διαφορετική δυναμική λειτουργίας των CAV, τα οποία προσαρμόζονται σε κυκλοφοριακές συνθήκες βάσει δεδομένων που δεν είναι διαθέσιμα στα μη συνδεδεμένα οχήματα. Η πρόσβαση αυτή σε πληροφορίες μπορεί να οδηγεί τα CAV σε συμπεριφορές που διαφοροποιούνται προσωρινά από εκείνες των υπόλοιπων οχημάτων, δημιουργώντας αυξημένες διαφορές ταχύτητας στο σύνολο της κυκλοφορίας.

9. **Η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων (MPR_AV) και συνδεδεμένων οχημάτων (MPR_CAV) σχετίζεται με μείωση του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC).** Στην περίπτωση των AV, η αιτία μπορεί να εντοπίζεται στη διαφοροποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, γεγονός που ενδέχεται να προκαλεί αιφνιδιασμό ή καθυστερημένες αντιδράσεις από τους τελευταίους. Αντίστοιχα, αν και τα CAV ενσωματώνονται γενικά πιο ομαλά στην κυκλοφορία, η έλλειψη επικοινωνίας με τα συμβατικά οχήματα μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρες ή μη αναμενόμενες καταστάσεις εμπλοκής, μειώνοντας επίσης τον διαθέσιμο χρόνο αντίδρασης.

6.3 Προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε ότι η ενσωμάτωση αυτόνομων και συνδεδεμένων αυτόνομων οχημάτων (AV/CAV) στην κυκλοφορία έχει καθοριστικά θετική επίδραση στην οδική ασφάλεια, οδηγώντας σε αισθητή μείωση των εμπλοκών. Τα αποτελέσματα αυτά υπογραμμίζουν την ανάγκη για λήψη στοχευμένων μέτρων από την πολιτεία, με στόχο την προώθηση της χρήσης τέτοιων οχημάτων. Οι παρακάτω προτάσεις μπορούν να συμβάλλουν στην επίτευξη αυτού του σκοπού:

- **Αυστηρότερη νομοθεσία και έλεγχοι:** Δημιουργία και επικαιροποίηση νομοθεσίας που να καθορίζει τους κανόνες κυκλοφορίας, τα όρια ευθύνης και την ασφάλιση των AV/CAV. Η σαφής νομική κάλυψη θα ενισχύσει την εμπιστοσύνη των πολιτών και των κατασκευαστών.
- **Πιλοτικά προγράμματα και ζώνες δοκιμών:** Δημιουργία καθορισμένων περιοχών για δοκιμές AV/CAV σε πραγματικό περιβάλλον, ώστε να αξιολογούνται οι τεχνολογίες και να εξάγονται δεδομένα για βελτιώσεις.
- **Συνεργασία με την ακαδημαϊκή κοινότητα:** Ενίσχυση της έρευνας και της καινοτομίας μέσω συνεργασιών με πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και κατασκευαστές, για τη συνεχή βελτίωση των τεχνολογιών AV/CAV.
- **Εκπαίδευση και ενημέρωση κοινού:** Καμπάνιες ευαισθητοποίησης για την αποδοχή των AV/CAV από το κοινό, καθώς και εκπαιδευτικά προγράμματα για τους οδηγούς, προκειμένου να κατανοήσουν τη λειτουργία και τα πλεονεκτήματα αυτών των οχημάτων.
- **Κίνητρα για υιοθέτηση:** Παροχή οικονομικών κινήτρων όπως επιδοτήσεις, φοροαπαλλαγές ή προτεραιότητα σε λωρίδες κυκλοφορίας για AV/CAV, ενθαρρύνοντας τόσο ιδιώτες όσο και επιχειρήσεις να επενδύσουν στην τεχνολογία.
- **Πιλοτικά προγράμματα και ζώνες δοκιμών:** Δημιουργία καθορισμένων περιοχών για δοκιμές AV/CAV σε πραγματικό περιβάλλον, ώστε να αξιολογούνται οι τεχνολογίες και να εξάγονται δεδομένα για βελτιώσεις.

Η εφαρμογή αυτών των πολιτικών επιλογών μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη μετάβαση προς ένα πιο ασφαλές σύστημα μεταφορών.

6.4 Προτάσεις για περεταίρω έρευνα

Κατά την εξέταση της βιβλιογραφίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν πολλά θέματα σχετικά με την αυτοματοποιημένη οδήγηση, τα οποία δεν έχουν αναλυθεί επαρκώς. Συνεπώς, παρέχονται ορισμένες προτάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για μελλοντικές έρευνες σχετικά με τα αυτόνομα οχήματα:

- Ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η παρουσία AV/CAV επηρεάζει τη συμπεριφορά και την ασφάλεια πεζών ή ποδηλατών.
- Εστίαση στο πώς η παρουσία AV/CAV μειώνει τις διακυμάνσεις ταχύτητας μεταξύ οχημάτων, οδηγώντας σε ομαλότερη κυκλοφορία και χαμηλότερο ρίσκο εμπλοκής.
- Σύγκριση της αποτελεσματικότητας των AV/CAV ανά τύπο οδικού δικτύου (αστικό, υπεραστικό, αυτοκινητόδρομος).
- Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης συγκρούσεων με τεχνικές μηχανικής μάθησης σε μικτά κυκλοφοριακά περιβάλλοντα (AV/CAV)
- Αξιολόγηση της επίδρασης AV/CAV στην κυκλοφοριακή ικανότητα και την εκπομπή ρύπων

7 Βιβλιογραφία

1. Md Sharikur Rahman, 2019, Safety benefits of arterials' crash risk under connected and automated vehicles
2. Eunbi Jeong, 2017, Is vehicle automation enough to prevent crashes? Role of traffic operations in automated driving environments for traffic safety
3. Alkis Papadoulis, 2019, Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways
4. Guiming Xiao, 2021, Safety improvements by intelligent connected vehicle technologies: A meta-analysis considering market penetration rates
5. Hua Sha, 2024, Network-wide safety impacts of dedicated lanes for connected and autonomous vehicles
6. Lanhang Ye, 2019, Evaluating the impact of connected and autonomous vehicles on traffic safety
7. Youssef El-Hansali, 2021, Using Surrogate Measures to Evaluate the Safety of Autonomous Vehicles
8. Vinayak V. Dixit, 2016, Autonomous Vehicles: Disengagements, Accidents and Reaction Times
9. Francesca M. Favarò, 2017, Examining accident reports involving autonomous vehicles in California
10. Aleksandra Deluka Tibljaš, 2018, Introduction of Autonomous Vehicles: Roundabouts Design and Safety Performance Evaluation
11. Mourtakos, V., Oikonomou, M.G., Kopelias, P., Vlahogianni, E.I., Yannis, G., 2021. Impacts of autonomous on-demand mobility service: A simulation experiment in the City of Athens. Transp. Lett., 1–13. <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.2000571>
12. LEVITATE project <https://levitate-project.eu/>
13. European Commission, 2018. Europe on the Move: Connected & Automated Mobility: For a More Competitive Europe.
14. SAE International: On-Road Automated Vehicle Standards Committee, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, Information Report (2014) Đorđe Petrović, Radomir Mijailović, Dalibor Pešić (2020). Traffic Accidents with Autonomous Vehicles: Type of Collisions, Manoeuvres and Errors of Conventional Vehicles' Drivers
15. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). <https://highways.dot.gov/research/safety/ssam/surrogate-safety-assessment-modeloverview>
16. European Commission, 5G-cross border corridors, <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/policies/cross-border-corridors>, 18.12.2023
17. UK Department of Transport, 2016. Research on the impacts of connected and autonomous vehicles on traffic flow: Summary Report. London. Waymo, 2018. On the road to Fully Self-driving - Waymo Safety Report, Waymo Safety Report. Yates, F.,

18. 1934. Contingency Tables Involving Small Numbers and the χ^2 Test. R. Stat. Soc. 1, 217–235.
19. Κοκκολάκης Γ., Σπηλιώτης Ι., “Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική με Εφαρμογές”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2010
20. Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Ι. Κ. Γκόλιας, “Οδική Ασφάλεια” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1994
21. Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ. Χ., Τσαμπούλας Δ. Α., “Διαχείριση Κυκλοφορίας” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1997
22. Φραντζεσκάκης, Ι. Μ., Γκόλιας Ι. Κ., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ. Χ., “Κυκλοφοριακή Τεχνική” Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2009