



Η επιρροή της διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στην ασφάλεια κυκλοφορίας

Διπλωματική Εργασία

Αντωνία Αντωννάκη

Επιβλέπων: Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2024

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Γιώργο Γιαννή, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, για την υποστήριξή του και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε σε όλα τα στάδια εκπόνησής της. Επιπλέον, οφείλω να τον ευχαριστήσω για την πολύτιμη καθοδήγηση αλλά και για τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω εξίσου θερμά την Μαρία Οικονόμου, Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την καθοριστική συμβολή της στην ολοκλήρωση της εργασίας, για την ηθική υποστήριξή της, για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές της, την επιμονή και την υπομονή της δίνοντας απαντήσεις σε οποιοδήποτε ερώτημα προέκυπτε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τη βοήθειά τους να πετύχω τους στόχους μου. Επίσης, ευχαριστώ όλους τους φίλους και τους συναδέλφους μου για την υποστήριξή τους και τις πολύ όμορφες στιγμές των φοιτητικών μου χρόνων και κατά την διεξαγωγή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Αθήνα, Μάρτιος 2024

Αντωνία Αντωνακάκη

Σύνοψη

Η επιρροή της διείσδυσης των αυτόματων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ασφάλεια

Αντωνία Αντωνακάκη

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

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο προσδιορισμός της επιρροής που έχει η διείσδυση αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, στην κυκλοφοριακή ασφάλεια. Για το σκοπό αυτό έγινε ανάλυση δεδομένων προσομοίωσης η οποία διεξήχθη γύρω από το δίκτυο της Villaverde, στη Μαδρίτη. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν έντεκα μικροσκοπικά σενάρια προσομοίωσης που διέφεραν ως προς το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά (MPR από 0% έως 100%, με αυξανόμενο βήμα 10%). Για κάθε σενάριο καταγράφηκαν οι εμπλοκές των οχημάτων, στις οποίες ο χρόνος έως την εμπλοκή, ήταν κάτω από 1.5 δευτερόλεπτα. Για κάθε τέτοια εμπλοκή καταγράφηκαν επίσης τόσο κυκλοφοριακά, όσο και χαρακτηριστικά οδού. Για την ανάλυση των δεδομένων, αναπτύχθηκαν τέσσερα μαθηματικά μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης που αποτυπώνουν τη συσχέτιση μεταξύ του χρόνου έως την εμπλοκή, του αριθμού των εμπλοκών, της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής και του τύπου των εμπλοκών με τους κρίσιμους παράγοντες επιρροής τους. 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 (τύπος οδών, χωρητικότητα οδών). Τέλος, η αύξηση του βαθμού διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, προσδιορίστηκε ότι, σε γενικές γραμμές έχει θετικές επιδράσεις στην οδική ασφάλεια. Παρόλα αυτά, επιφέρει ανομοιογένεια στην κυκλοφορία μέσω της συνύπαρξης συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων, ενώ η σχέση τους χρήζει περαιτέρω έρευνας πριν αυτά τεθούν στην κυκλοφορία.

Λέξεις κλειδιά: αυτόνομα οχήματα, κυκλοφορία, οδική ασφάλεια, μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας, τύπος εμπλοκών

Abstract

The influence of the penetration of autonomous vehicles on road safety

Antonia Antonakaki

Supervisor: George Yannis, Professor NTUA

The aim of this Diploma Thesis is to determine the influence of the penetration of autonomous vehicles in the network on traffic safety. For this purpose, an analysis of simulation data was carried out around the Villaverde network in Madrid. Specifically, eleven microscopic simulation scenarios were carried out that varied in terms of the percentage of autonomous vehicle penetration in the market (MPR from 0% to 100%, with an increasing step of 10%). For each scenario, vehicle conflicts were recorded in which the time to collision was less than 1.5 seconds. For each such entanglement, both traffic and roadway characteristics were also recorded. To analyze the data, four mathematical models of multiple linear regression and multinomial logistic regression were developed to capture the correlation between time to collision, number of conflicts, maximum recorded conflict speed, and the type of conflicts with their critical influencing factors. The application of the models revealed that the factors influencing the above variables have to do with both traffic composition data (vehicle type) and road infrastructure data (road type, road capacity). Finally, increasing the Market Penetration Rate (MPR) of autonomous vehicles in the network was found to have, in general, positive effects on road safety. However, it does lead to traffic heterogeneity through the coexistence of compatible vehicles.

Keywords: autonomous vehicles, traffic, road safety, microscopic traffic simulation, conflict type

Περίληψη

Από τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία, η τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων, στην Ευρώπη, συνεχίζει να εξελίσσεται. Απόδειξη αυτού, αποτελεί και το γεγονός ότι ολοένα και περισσότερες λειτουργίες των συμβατικών οχημάτων, αντικαθίστανται από λειτουργίες τις οποίες το όχημα εκτελεί αυτόνομα. Διάφοροι παράγοντες συμβάλλουν στον ρυθμό εξέλιξης της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κανονιστικών προκλήσεων, της ετοιμότητας των υποδομών και της αποδοχής από το κοινό.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο προσδιορισμός της επιρροής της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ασφάλεια, αξιολογώντας δεδομένα προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση του αριθμού αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο επηρεάζει δείκτες της κυκλοφοριακής ασφάλειας του δικτύου, όπως τον χρόνο έως την εμπλοκή, την μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής, τον αριθμό και τον τύπο των εμπλοκών. Ακόμη, πραγματεύεται πόσο σημαντική είναι η εισχώρηση των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο σε σχέση με άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως η οδική υποδομή.

Για το σκοπό αυτό έγινε **ανάλυση δεδομένων προσομοίωσης**, η οποία αφορούσε το κυκλοφοριακό δίκτυο της περιοχής της Villaverde, στη Μαδρίτη. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν την ώρα αιχμής του υφιστάμενου κυκλοφοριακού δικτύου της περιοχής, και του δικτύου μεταφορών αυτής, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση έντεκα σεναρίων για διαφορετικούς ρυθμούς εισχώρησης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate-MPR), από 0% έως 100%. Καταγράφηκαν συνολικά 242.150 συμβάντα εμπλοκών, για τα οποία ο χρόνος έως τη εμπλοκή των δύο οχημάτων (TTC), ήταν μικρότερος από 1,5s. Για κάθε ένα από αυτά τα συμβάντα καταγράφηκαν επίσης κυκλοφοριακά δεδομένα (ταχύτητα, είδος εμπλεκόμενων οχημάτων κ.α.) και δεδομένα οδικής υποδομής (είδος οδού, χωρητικότητα, σήμανση κ.α.).

Καταρχήν, πραγματοποιήθηκε περιγραφική στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων που οδήγησε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, μετά από κατάλληλη επεξεργασία και μία σειρά δοκιμών, αναπτύχθηκαν, με τις μεθόδους της γραμμικής παλινδρόμησης και της πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης, **τέσσερα μαθηματικά μοντέλα** που αποτυπώνουν τη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών του χρόνου έως τη εμπλοκή, της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής, του αριθμού και του τύπου των εμπλοκών, με τους παράγοντες του δικτύου από τους οποίους επηρεάζονται σε στατιστικά σημαντικό βαθμό (Πίνακας 1).

Πίνακας 1.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας

Ανεξάρτητες μεταβλητές	Μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης						Μοντέλο πολυωνμικής λογιστικής παλινδρόμησης			
	Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC)		Αριθμός εμπλοκών		Μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής (MaxS)		Τύπος Εμπλοκής (ConflictType)			
							ConflictType=lane change		ConflictType=rear end	
	βι	t	βι	t	βι	t	βι	z	βι	z
MaxS	-0.826	-279.266	-0.678	-91.967	-	-	-0.091	-42.932	-0.350	-177.737
FirstWidth	0.025	7.270	-	-	-	-	-	-	-	-
SecondLength	-0.417	-125.452	-	-	-	-	-	-	-	-
MPR	0.125	62.953	0.007	5.537	-0.040	-32.243	0.009	27.924	0.018	61.456
ConflictType_lane change	-0.087	-40.636			0.064	48.277				
SecondVehType_159	-0.062	-15.756	-6.385	-56.951	-0.008	-3.518	-0.663	-15.706	-1.305	-34.808
SecondVehType_9311	0.398	64.724	-9.163	-53.939	0.045	12.004				
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.079	44.962	-7.104	-88.979	0.064	60.025				
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-0.119	-57.139	-	-	0.118	84.706	-0.745	-26.308	-1.425	-56.008
ControlType_Stop	0.070	18.931	-10.259	-79.480	-	-	-0.680	-6.015	0.808	9.802
TTC	-	-	-	-	-0.310	-267.848				
Capacity	-	-	-	-	0.215	138.616				
Speed Limit	-	-	-	-	-	-	-0.040	-26.259	0.012	8.262
R-squared	0.461		0.335		0.447					
Accuracy Score							0.821			

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 το **χρόνο έως την εμπλοκή δύο οχημάτων (TTC)**, σχετίζονται σημαντικά με **κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά**, όπως είναι η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσουν τα οχήματα, το είδος των εμπλεκόμενων οχημάτων (αυτόνομα ή μη), τον βαθμό διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR), αλλά και **με χαρακτηριστικά της οδικής υποδομής** όπως τον τύπο οδού και την ύπαρξη ή μη, σήμανσης στο ενδιαφερόμενο τμήμα της οδού.
2. Όσον αφορά τον **αριθμό των εμπλοκών**, επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της οδού και των οχημάτων, και σε μικρότερο βαθμό από παράγοντες όπως η ταχύτητα και ο βαθμός διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, **όταν το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής** (αυτό που καταφτάνει δεύτερο στο σημείο εμπλοκής) **είναι αυτόνομο**, αυτό έχει πολύ μεγάλο αντίκτυπο στην μείωση του αριθμού των εμπλοκών διέλευσης και αλλαγής λωρίδας. Κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό, ίσως είναι η ικανότητα των αυτόνομων οχημάτων να αντιλαμβάνονται και να αντιμετωπίζουν συμβάντα στο δίκτυο, καταναλώνοντας πολύ μικρότερο χρόνο, σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.
3. Όσον αφορά την **μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS)**, σχετίζεται σημαντικά με τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC) όπως είναι λογικό. Ακόμη, η **αύξηση του βαθμού διεύθυνσης** των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR), συμβάλλει στην **μείωση** της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής, πράγμα το οποίο περιορίζει τις σοβαρές επιπτώσεις που ενδέχεται να παρουσιάσει μία εμπλοκή σε όρους τραυματισμών και καταστροφής περιουσίας. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι, **όταν το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής είναι αυτόνομο** η μέγιστη ταχύτητα

αυξάνεται ενώ, όταν είναι **συμβατικό** η μέγιστη ταχύτητα **μειώνεται**. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η αύξηση του βαθμού διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων οδηγεί στη μείωση της μέγιστης ταχύτητας, πιθανόν να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι, δεν είναι ξεκάθαρη η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων σε όρους πρωτευόντων και δευτερευόντων οχημάτων εμπλοκών και χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω. Τέλος, η μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής σχετίζεται τόσο με κυκλοφοριακά δεδομένα (χωρητικότητα δικτύου), όσο και με χαρακτηριστικά οδικής υποδομής.

4. Η εισχώρηση αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, επηρεάζει **τον τύπο των εμπλοκών**. Στόχο της τεχνολογίας αυτόνομων οχημάτων αποτελεί η πιο ομαλή κυκλοφοριακή ροή και η αξιοποίηση του δικτύου σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Για τον λόγο αυτό, έχοντας ικανότητα γρηγορότερης αντίληψης και αντίδρασης σε ενδεχόμενο συμβάν, τα αυτόνομα οχήματα προγραμματίζονται λαμβάνοντας υπόψιν μικρότερα κενά χωρίς κατάληψη οχήματος ανάμεσα σε οχήματα. Αυτό, οδηγεί σε αύξηση των οπίσθιων (rear end) εμπλοκών, **αφενός λόγω των μικρότερων ελεύθερων διαστημάτων** είτε μεταξύ αυτόνομων, είτε μεταξύ αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων και αφετέρου, γιατί ενδεχομένως οι χρήστες συμβατικών οχημάτων υιοθετώντας ένα πιο «επιθετικό» προφίλ οδήγησης, **δεν μπορούν να αντιδράσουν εγκαίρως** στις αλληλεπιδράσεις τους με αυτόνομα οχήματα.
5. Σύμφωνα με τα όσα προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση, όταν το δευτερεύον όχημα της εμπλοκής είναι **αυτόνομο**, τότε παρουσιάζει **καλύτερη συμπεριφορά** συγκριτικά με ένα **συμβατικό όχημα**. Συγκεκριμένα, τα αυτόνομα οχήματα έχοντας, όπως προαναφέρθηκε ικανότητα γρηγορότερης αντίληψης και αντίδρασης, σε σχέση με τα συμβατικά, αυξάνουν το χρόνο έως τη σύγκρουση ενώ επιδρούν σε μεγαλύτερη μείωση του αριθμού των εμπλοκών. Παρόλα αυτά, τα αυτόνομα οχήματα, όντας δευτερεύοντα οχήματα μιας εμπλοκής, αυξάνουν την μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρότερες επιπλοκές (τραυματισμοί, καταστροφή περιουσίας).
6. Ο τύπος των οχημάτων που παρουσίασε στατιστική σημαντικότητα κατά την διεξαγωγή της ανάλυσης στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ήταν τα **βαρέα οχήματα**, είτε αυτά ήταν συμβατικά, είτε ήταν αυτόνομα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι, τα οχήματα αυτά, έχοντας **μεγαλύτερο όγκο** και λόγω αυτού, **μικρότερη δυνατότητα επιβράδυνσης**, συμμετέχουν σε **περισσότερες εμπλοκές**.
7. Ο τύπος ελέγχου της οδού, ο οποίος αποδείχτηκε ότι ήταν στατιστικά σημαντικός παράγοντας στην επιρροή των εξαρτημένων μεταβλητών, ήταν η **πινακίδα σήμανσης «Stop»**. Η ύπαρξη τέτοιας πινακίδας σήμανσης **επιδρά θετικά** τόσο στην **αύξηση του χρόνου** έως την εμπλοκή, όσο και στη **μείωση του συνολικού αριθμού**. Παρόλα αυτά, αυξάνει, λόγω της στάσης οχημάτων που επιβάλλει, την πιθανότητα οπίσθιων (rear end) εμπλοκών.

8. Όσον αφορά τον **τύπο της οδού**, οι μόνοι τύποι οδού οι οποίοι αποδείχθηκαν στατιστικά σημαντικοί, ήταν οι δευτερεύουσες και οι τριτεύουσες οδοί. Η κυκλοφορία σε **δευτερεύουσες οδούς**, δηλαδή σε οδούς οι οποίες συγκροτούν το βασικό δίκτυο περαιτέρω κατανομής των μετακινήσεων μεταξύ επιμέρους πολεοδομικών ενότητων, **αυξάνει τον χρόνο έως την εμπλοκή και μειώνει τον συνολικό αριθμό εμπλοκών**, πιθανότατα λόγω των μικρότερων ορίων ταχύτητας.
9. Η κυκλοφορία σε **τριτεύουσες οδούς**, δηλαδή σε τοπικές οδους οι οποίες εξυπηρετούν μόνο την πρόσβαση και παραμονή στις επιμέρους γειτονίες και πολεοδομικές ενότητες, εξυπηρετούν χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους με ενδεικνυόμενο όριο ταχύτητας τα 30 χλμ/ώρα, **μειώνει τον χρόνο έως την εμπλοκή**, πιθανότητα λόγω επικράτησης μη ομοιόμορφης κυκλοφορίας, λόγω στάσεων, διασταύρωσης με τοπικές οδούς και ύπαρξη πινακίδων «Stop». Όσον αφορά τον τύπο των εμπλοκών, ο συγκεκριμένος τύπος οδού **ευνοεί την ανάπτυξη εμπλοκών διέλευσης (crossing)**, σε σχέση με τις εμπλοκές αλλαγής λωρίδας (lane change) και τις οπίσθιες εμπλοκές (rear end), πιθανότατα λόγω της ύπαρξης μίας μόνο λωρίδας κυκλοφορίας ανά ρεύμα κυκλοφορίας και της μη ύπαρξης διαχωριστικής νησίδας.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.2	Στόχος.....	3
1.3	Μεθοδολογία.....	4
1.4	Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	5
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	6
2.1	Εισαγωγή.....	6
2.2	Αυτόνομα οχήματα.....	6
2.2.1	Επίπεδα Αυτοματισμού.....	7
2.3	Αυτόνομα οχήματα και οδική ασφάλεια.....	8
2.4	Βαθμός διεξόδου αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο.....	9
3	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	10
3.1	Εισαγωγή.....	10
3.2	Βασικές Έννοιες Στατιστικής.....	10
3.3	Μαθηματικά μοντέλα.....	12
3.3.1	Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression).....	12
3.3.2	Πολυωνυμική Λογιστική Παλινδρόμηση (Multinomial Logistic Regression).....	13
3.4	Στατιστική αξιολόγηση και Κριτήρια αποδοχής προτύπου.....	14
4	Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων.....	16
4.1	Εισαγωγή.....	16
4.2	Συλλογή Δεδομένων.....	17
4.2.1	Δίκτυο προσομοίωσης.....	17
4.2.2	Σενάρια προσομοίωσης.....	18
4.2.3	Παράμετροι προσομοίωσης.....	19
4.2.4	Εξαγωγή εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας.....	20
4.3	Κωδικοποίηση δεδομένων.....	20
4.4	Επεξεργασία Στοιχείων.....	25
4.4.1	Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC).....	25
4.4.2	Συχνότητα εμπλοκών.....	27
4.4.3	Τύπος εμπλοκής (ConflictType).....	27
4.5	Σύνοψη.....	30
5	Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Αποτελέσματα.....	30
5.1	Εισαγωγή.....	30
5.2	Ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης με τη γλώσσα προγραμματισμού Python.....	31

5.2.1	Δεδομένα εισόδου – Καθορισμός μεταβλητών	31
5.2.2	Συσχέτιση μεταβλητών – Διακύμανση μεταβλητών	32
5.2.3	Μοντέλα Γραμμικής και Πολυωνυμικής λογιστικής Παλινδρόμησης	35
5.3	Εφαρμογή στατιστικών μοντέλων προσδιορισμού των παραγόντων που επηρεάζουν τις εξαρτημένες μεταβλητές	36
5.3.1	Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC) – Μοντέλο 1	37
5.3.2	Αριθμός εμπλοκών – Μοντέλο 2	40
5.3.3	Μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής (MaxS) – Μοντέλο 3	43
5.3.4	Τύπος εμπλοκής (ConflictType) – Μοντέλο 4	46
6	Συμπεράσματα	51
6.1	Σύνοψη Αποτελεσμάτων	51
6.2	Συνολικά Συμπεράσματα	52
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	54
7	Βιβλιογραφία	56

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας	10
Πίνακας 3.1: Κρίσιμες τιμές του συντελεστή t	15
Πίνακας 4.1: Παράγοντες μοντελοποίησης αυτόνομων οχημάτων.....	19
Πίνακας 5.1: Πίνακας συσχέτισης μεταβλητών	33
Πίνακας 5.2: Μοντέλο πρόβλεψης TTC-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών.....	37
Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης TTC.....	38
Πίνακας 5.4: Μοντέλο πρόβλεψης Αριθμού εμπλοκών-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών	41
Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης Αριθμού εμπλοκών	41
Πίνακας 5.6: Μοντέλο πρόβλεψης Μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών	44
Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης Μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS).....	44
Πίνακας 5.8: Μοντέλο πρόβλεψης Τύπου εμπλοκών-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών	46
Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλων πρόβλεψης τύπων εμπλοκών	47
Πίνακας 5.10: Πίνακας σύγκρισης πολυωνυμικού λογιστικού μοντέλου	49
Πίνακας 5.11: Απόδοση μοντέλου.....	50
Πίνακας 6.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας	52

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Απεικόνιση χρονικού – τεχνικού πλαισίου Διπλωματικής Εργασίας.....	5
Διάγραμμα 4.1: Αριθμός εμπλοκών για διαφορετικές τιμές χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), για διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (MPR).....	26
Διάγραμμα 4.2: Αριθμός εμπλοκών για κάθε διαφορετικό σενάριο βαθμού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων MPR.....	27
Διάγραμμα 4.3: Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear-end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείσδυσης (MPR).....	28
Διάγραμμα 4.4: Αριθμός αλλαγής λωρίδας (lane-change conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείσδυσης (MPR).....	28
Διάγραμμα 4.5: Αριθμός εμπλοκών διέλευσης (crossing conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του του	29

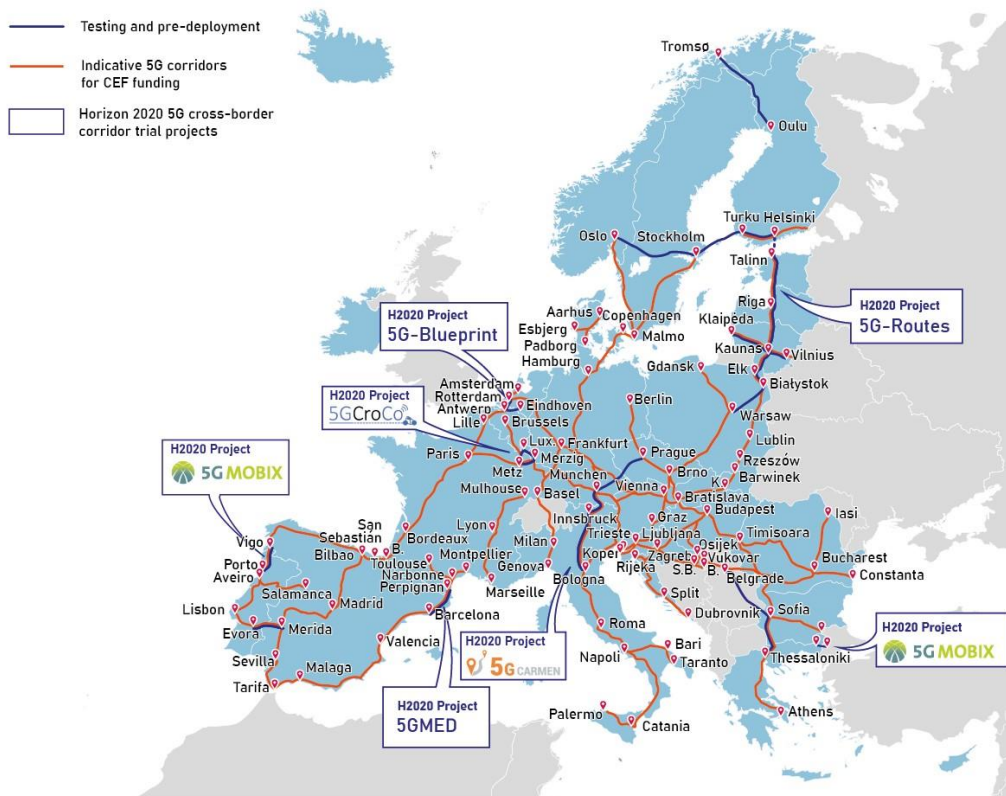
1 Εισαγωγή

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Από τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία, η **τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων**, στην Ευρώπη, συνεχίζει να εξελίσσεται. Απόδειξη αυτού, αποτελεί και το γεγονός ότι ολοένα και περισσότερες λειτουργίες των συμβατικών οχημάτων, αντικαθίστανται από λειτουργίες τις οποίες το όχημα εκτελεί αυτόνομα. Διάφοροι παράγοντες συμβάλλουν στον ρυθμό εξέλιξης της τεχνολογίας των αυτόνομων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κανονιστικών προκλήσεων, της ετοιμότητας των υποδομών και της αποδοχής από το κοινό.

Στην Ευρώπη, διάφορες χώρες και περιφέρειες δοκιμάζουν και αναπτύσσουν ενεργά αυτόνομα οχήματα σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, όπως κλειστές πίστες δοκιμών και καθορισμένες αστικές περιοχές. Οι δοκιμές αυτές συχνά περιλαμβάνουν συνεργασίες μεταξύ κατασκευαστών αυτοκινήτων, εταιρειών τεχνολογίας και τοπικών κυβερνήσεων για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας, της ασφάλειας και της πρακτικότητας των αυτόνομων οχημάτων σε πραγματικές συνθήκες. Ακόμη, σε επίπεδο έρευνας, έχουν πλέον αναπτυχθεί περιβάλλοντα προσομοίωσης αυτόνομων οχημάτων, στα οποία είναι δυνατόν να συμμετέχουν οδηγοί, προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ οδηγού και αυτόνομου οχήματος (Toshiya Arakawa, 2018).

Μία από τις **βασικές προκλήσεις** που αντιμετωπίζει η ευρεία υιοθέτηση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (Connected and Automated Vehicles-CAVs) στην Ευρώπη, είναι η κανονιστική αβεβαιότητα. Κάθε χώρα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) έχει το δικό της σύνολο κανόνων και προτύπων σχετικά με την αυτόνομη οδήγηση, γεγονός που οδηγεί σε κατακερματισμό και ασυνέπεια μεταξύ των συνόρων. Η εναρμόνιση των κανονισμών και ο καθορισμός σαφών κατευθυντήριων γραμμών για τις δοκιμές και την ανάπτυξη είναι ουσιαστικής σημασίας για την προώθηση της καινοτομίας και την απρόσκοπτη ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στα υφιστάμενα συστήματα μεταφορών. Για τον λόγο αυτό, καλλιεργούνται από την ΕΕ μέθοδοι ώστε να υπάρξει σε μεταγενέστερο χρόνο η δυνατότητα τέτοιου τύπου οχήματα να κινούνται εκτός συνόρων, με την ανάπτυξη και την εγκατάσταση της απαραίτητης υποδομής, όπως 5G διασυνοριακοί διάδρομοι, αρχικά σε δοκιμαστική λειτουργία, σε χώρες όπως η Ιταλία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ισπανία, η Φιλανδία, η Λετονία, η Εσθονία, το Βέλγιο, το Λουξεμβούργο και η Ολλανδία, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 1 (European Commission, 2023).



Εικόνα 1 - Απεικόνιση του υπό δοκιμή δικτύου 5G στην Ευρώπη

Η ετοιμότητα των υποδομών είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων στην Ευρώπη. Η διασφάλιση ότι το οδικό δίκτυο είναι κατάλληλα εξοπλισμένο για την υποστήριξη των δυνατοτήτων αυτόνομης οδήγησης, συμπεριλαμβανομένης της αξιόπιστης συνδεσιμότητας και της χαρτογράφησης υψηλής ευκρίνειας, είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων (Autonomous Vehicles-AVs) σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Η αποδοχή και η εμπιστοσύνη του κοινού είναι επίσης σημαντικά ζητήματα για την ευρεία υιοθέτηση των αυτόνομων οχημάτων (AVs) στην Ευρώπη. Ακόμη και όταν όλα τα οδικά οχήματα θα είναι αυτόνομα, θα εξακολουθούν να υπάρχουν ατυχήματα, ορισμένα από τα οποία θα έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές ζημιές. Οι κρίσεις περί ευθύνης και υπαιτιότητας θα διαμορφώνονται τόσο από αντικειμενικά στοιχεία όσο και από πεποιθήσεις σχετικά με το ρόλο που διαδραματίζει το αυτόνομο όχημα (AV) στον καθορισμό του αποτελέσματος, ο οποίος μπορεί με τη σειρά του να επηρεαστεί από τις προσδοκίες για τις λειτουργικές ικανότητες του αυτόνομου οχήματος και πώς αυτές έρχονται σε αντίθεση με εκείνες ενός ανθρώπινου χειριστή και την τεχνολογία των συμβατικών οχημάτων (Zhang et al., 2024).

Ενώ οι έρευνες δείχνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αυτόνομη τεχνολογία, οι ανησυχίες για την ασφάλεια εξακολουθούν να υφίστανται στον γενικό πληθυσμό, ειδικά σε περιπτώσεις όπου ο έλεγχος λειτουργίας περνάει εξολοκλήρου στο αυτόνομο όχημα και εξαλείφεται ο ανθρώπινος παράγοντας (Eurobarometer, 2020). Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών μέσω διαφανούς επικοινωνίας, αυστηρών δοκιμών ασφαλείας και εκπαιδευτικών πρωτοβουλιών, όπως η περαιτέρω έρευνα γύρω από την επιρροή των αυτόνομων οχημάτων, είναι απαραίτητη για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης και την προώθηση της αποδοχής των CAV μεταξύ των Ευρωπαϊκών καταναλωτών. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε και η ανάπτυξη της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η οποία αποσκοπεί στον προσδιορισμό της επίδρασης της επίδρασης των αυτόνομων οχημάτων στην ασφάλεια κυκλοφορίας.

Συνολικά, αν και εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης, σημειώνεται πρόοδος στην ανάπτυξη και δοκιμή αυτόνομων οχημάτων, απομένουν να αντιμετωπιστούν αρκετές προκλήσεις. Η συνεργασία μεταξύ των φορέων του κλάδου, και του κοινού θα είναι το κλειδί για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων και την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της τεχνολογίας αυτόνομων οχημάτων στο ευρωπαϊκό οικοσύστημα μεταφορών.

1.2 Στόχος

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει και να αναλύσει **τη επιρροή της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην ασφάλεια κυκλοφορίας.**

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων εμπλοκών που προέκυψαν από προσομοίωση της κυκλοφορίας με την εισαγωγή αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο της περιοχής Villaverde, στη Μαδρίτη. Εμπλοκή είναι μια κατάσταση όπου δύο ή περισσότερα οχήματα βρίσκονται σε κίνδυνο να συγκρουστούν. Μια εμπλοκή θα καταλήξει σε ατύχημα, εκτός εάν ένα από τα εμπλεκόμενα μέρη επιβραδύνει, αλλάξει λωρίδα κυκλοφορίας ή επιταχύνει για να αποφύγει τη σύγκρουση. Συγκεκριμένα, έγινε διερεύνηση των άμεσων και έμμεσων επιπτώσεων των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια, λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό εισαγωγής των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, και άλλων κυκλοφοριακών μεγεθών, όπως οι ταχύτητες των δύο εμπλεκόμενων οχημάτων, οι ρυθμοί επιτάχυνσης και επιβράδυνσης αυτών, ο τύπος και τα χαρακτηριστικά της οδού στην οποία παρατηρήθηκε η εκάστοτε εμπλοκή, και άλλα. Προκειμένου να γίνει η διερεύνηση αυτή, αναπτύχθηκαν κατάλληλα **μαθηματικά στατιστικά μοντέλα**, τα οποία περιγράφουν και ποσοτικοποιούν επαρκώς την επιρροή των παραμέτρων που καθορίζουν τον ελάχιστο χρόνο έως την εμπλοκή, τη συχνότητα των εμπλοκών, και τον τύπο της εμπλοκής.

Τα **συμπεράσματα** της εργασίας αναμένεται να αποτελέσουν βάση ενός ευρύτερου πλαισίου βιβλιογραφίας το οποίο αυξάνεται διαρκώς, όσο η έρευνα γύρω από την τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων εξελίσσεται.

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 στην συνέχεια.

Αρχικά, αντλήθηκαν **δεδομένα προσομοίωσης** κυκλοφορίας εισροής αυτόνομων οχημάτων στο υφιστάμενο δίκτυο κυκλοφορίας της περιοχής Villaverde, στην πόλη της Μαδρίτης, στην Ισπανία, μέσα από 11 διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης για διαφορετικό βαθμό εισροής αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate-MPR από 0% έως 100%, με βήμα 10%).

Στην συνέχεια, οριστικοποιήθηκε το θέμα της παρούσας εργασίας καθώς και ο επιδιωκόμενος στόχος. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ευρεία βιβλιογραφική ανασκόπηση τόσο σε ελληνική όσο και σε διεθνή βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση ερευνών, επιστημονικών άρθρων καθώς και γενικών πληροφοριών σχετικά με την τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων, που θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες για την συγκεκριμένη έρευνα. Μέσω της διαδικασίας αυτής καταβλήθηκε προσπάθεια να αποκτηθεί μια σχετική εμπειρία στην επεξεργασία τέτοιων θεμάτων, καθώς επίσης και να αποφασιστεί η μέθοδος με βάση την οποία θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των στοιχείων και να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος στόχος.

Στην συνέχεια, ακολούθησε η **επιλογή της μεθόδου στατιστικής επεξεργασίας** και η εισαγωγή της βάσης δεδομένων σε ηλεκτρονική βάση. Έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία της βάσης δεδομένων μέχρι να αποκτήσει την τελική μορφή της, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή της στο ειδικό λογισμικό στατιστικής ανάλυσης της γλώσσα προγραμματισμού Python.

Επόμενο στάδιο αποτέλεσε η **ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων** πολλαπλής γραμμικής και λογιστικής παλινδρόμησης, που περιέγραφαν σε αποδεκτό επίπεδο εμπιστοσύνης την επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εκάστοτε εξαρτημένη.

Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν **τρία μοντέλα**, με εξαρτημένες μεταβλητές τον ελάχιστο χρόνο έως την σύγκρουση, τη συχνότητα εμφάνισης ατυχημάτων και τον τύπο της σύγκρουση. Ανεξάρτητες μεταβλητές των μοντέλων αυτών, αποτέλεσαν άλλες μεταβλητές οι οποίες περιλαμβάνονταν στα δεδομένα που προέκυψαν από τα σενάρια προσομοίωσης όπως τα κυκλοφοριακά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού.

Έπειτα, έγινε **αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων** και με βάση τα αποτελέσματα των προτύπων εξήχθησαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα για την επιρροή των εκάστοτε ανεξάρτητων μεταβλητή στην εξαρτημένη. Πιο συγκεκριμένα, έγινε σαφής σε ένα βαθμό, η αλληλεπίδραση των αυτόνομων οχημάτων με την συμβατική κυκλοφορία και το υφιστάμενο οδικό δίκτυο. Μέσα από την ανάλυση αυτή, προέκυψαν επομένως, πληροφορίες για το υπό εξέταση ζήτημα, αλλά και διατυπώθηκαν αξιολογες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά τα στάδια της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκαν για της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.



Διάγραμμα 1.1: Απεικόνιση χρονικού – τεχνικού πλαισίου Διπλωματικής Εργασίας

1.4 Δομή 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 αποτελεί τη βάση για να γίνει άμεσα αντιληπτό και κατανοητό το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας. Γίνεται σύντομη αναφορά στη σημερινή κατάσταση της ολοένα και αυξανόμενης αυτοματοποίησης των οχημάτων στην Ευρώπη και τις επιδράσεις αυτής τόσο σε επίπεδο ασφάλειας οδικού δικτύου, όσο και σε κοινωνικό επίπεδο. Επιπλέον, γίνεται σαφής ο στόχος της παρούσας εργασίας, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί και περιγράφεται συνοπτικά η δομή της.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από εκτενή **βιβλιογραφική ανασκόπηση** ερευνών με αντικείμενο τα αυτόνομα οχήματα, την επιρροή τους στην οδική ασφάλεια και κυκλοφορία, καθώς και τις επιπτώσεις που προκύπτουν στο περιβάλλον και την κοινωνία, από την υιοθέτηση και την εγκαθίδρυση προφίλ οδήγησης αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο.

Το **τρίτο κεφάλαιο** αποτελεί το **θεωρητικό υπόβαθρο**, στο οποίο βασίζεται η ανάλυση των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, επεξηγείται το κριτήριο επιλογής της στατιστικής ανάλυσης που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί με βάση τα χαρακτηριστικά της. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι μαθηματικές και στατιστικές έννοιες, οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση και επεξήγηση των μοντέλων που θεωρήθηκαν καταλληλότερα.

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

και διαγράμματα, που βοηθούν στην καλύτερη περιγραφή των χαρακτηριστικών του δείγματος.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την **ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων** και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου κι εξόδου, με ιδιαίτερη έμφαση στους στατιστικούς ελέγχους αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων για την αποδοχή των μοντέλων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα κυριότερα **συμπεράσματα**, τα οποία προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια, και πιο συγκεκριμένα από την περιγραφική ανάλυση των στοιχείων και την εξαγωγή των τελικών μοντέλων. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου επισημαίνονται προτάσεις, τόσο σχετικά με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής Εργασίας, όσο και σχετικά με την ενθάρρυνση διεξαγωγής περαιτέρω έρευνας που σχετίζεται με το θέμα.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρατίθενται οι **βιβλιογραφικές αναφορές**, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Ειδικότερα πρόκειται για έναν κατάλογο, ο οποίος περιλαμβάνει έρευνες σχετικές με το θέμα της παρούσας εργασίας, καθώς και οποιεσδήποτε άλλες πηγές λήφθηκαν υπόψιν στην διαδικασία σύνταξης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αφορά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και περιλαμβάνει δημοσιευμένες έρευνες της ελληνικής και της διεθνούς βιβλιογραφίας, το αντικείμενο και η μεθοδολογία των οποίων παρουσιάζει συνάφεια με την παρούσα Διπλωματική Εργασία. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μελέτη ερευνών και δημοσιεύσεων οι οποίες μέσω δεδομένων προσομοιώσεων, αναλύουν την επιρροή της χρήσης Αυτόνομων Οχημάτων, σε πληθώρα κυκλοφοριακών μεταβλητών και την οδική ασφάλεια.

2.2 Αυτόνομα οχήματα

Τα τελευταία χρόνια η αυτοκινητοβιομηχανία και η τεχνολογική βιομηχανία έχουν κάνει σημαντικά άλματα όσον αφορά την ψηφιοποίηση και τη μηχανογράφηση της οδήγησης, κάτι που αποτελούσε αποκλειστικά ανθρώπινη λειτουργία για περισσότερο από έναν αιώνα. Τα νέα μοντέλα αυτοκινήτων περιλαμβάνουν όλο και περισσότερα χαρακτηριστικά, όπως το προσαρμοζόμενο cruise control και τα συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης, που επιτρέπουν στα αυτοκίνητα να οδηγούνται μόνα τους σε χώρους στάθμευσης. Ορισμένες εταιρείες έχουν προχωρήσει ακόμη περισσότερο δημιουργώντας αυτόνομα οχήματα (AVs, που ονομάζονται επίσης αυτοματοποιημένα ή self-driving vehicles), τα οποία μπορούν να οδηγούν μόνα τους σε υπάρχοντες δρόμους και να πλοηγούνται σε πολλούς τύπους οδών

και περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς σχεδόν καμία άμεση ανθρώπινη συμβολή. Παρόλα τα οφέλη που μπορούν να προκύψουν από τη χρήση αυτόνομων οχημάτων για τον άνθρωπο (μείωση ατυχημάτων, μείωση κατανάλωσης καυσίμου), και το περιβάλλον (λιγότερες εκπομπές), η διάδοση της χρήσης τους παρεμποδίζεται από παράγοντες όπως το υψηλό κόστος παραγωγής και ερωτήματα παραμένουν σχετικά με τη νομική ρύθμιση, την ευθύνη, την προστασία της ιδιωτικής ζωής, την αδειοδότηση, την ασφάλεια και την ασφάλιση. (Fagnant et al., 2015).

2.2.1 Επίπεδα Αυτοματισμού

Σύμφωνα με το βαθμό οδηγικής παρέμβασης που απαιτείται, η αυτόνομη οδήγηση έχει ταξινομηθεί σε έξι επίπεδα αυτοματισμού σύμφωνα με τον διεθνή Σύνδεσμο Μηχανικών Αυτοκινήτων – Σ.Μ.Α. (Society of Automotive Engineers – S.A.E.). Ο σύνδεσμος αυτός εξέδωσε ένα εναρμονισμένο σύστημα ταξινόμησης για αυτόνομα οχήματα οδήγησης, το οποίο ορίζεται ως εξής:

- Επίπεδο 0: Κανένας αυτοματισμός
Ο οδηγός έχει τον πλήρη έλεγχο του οχήματος, ακόμα και αν υπάρχουν συστήματα προειδοποίησης ή παρέμβασης.
- 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 αυτόματο 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

Το όχημα λειτουργεί με αυτόματο σύστημα οδήγησης για όλες τις λειτουργίες, κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες οδού και περιβάλλοντος που μπορεί να ελέγξει ένας οδηγός.

2.3 Αυτόνομα οχήματα και οδική ασφάλεια

Όσο η τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων εξελίσσεται, αναμένεται να ενταχθούν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στα αστικά οδικά δίκτυα τις επόμενες δεκαετίες, τόσο σε ιδιωτικό, όσο και σε επίπεδο Μέσων Μαζικής Μεταφοράς. Παρόλα αυτά, η σταδιακή είσοδος τους στην αγορά και η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας Αυτόνομων Οχημάτων, οδηγεί σε ύπαρξη ετερογενούς κυκλοφορίας στο αστικό οδικό δίκτυο, η οποία αποτελείται από μη αυτόνομα και διαφορετικών επιπέδων αυτόνομα οχήματα. Η αύξηση του βαθμού εισαγωγής στο ετερογενές αυτό δίκτυο αυτόνομων οχημάτων, αν και ενδέχεται να μειώσει την χωρητικότητα του, αποτελεί μεγάλο όφελος για την Οδική Ασφάλεια, εφόσον συμβάλει σε πιο ομαλή κυκλοφοριακή ροή.

Παρόλο που τα αυτόνομα οχήματα βρίσκονται ακόμα στη φάση των δοκιμών και το δείγμα ατυχημάτων είναι περιορισμένο, ορισμένοι συγγραφείς έχουν ήδη εξετάσει τροχαία ατυχήματα με αυτόνομα οχήματα (Dixit et al., 2016; Favarò et al., 2018, 2017). Η πρώτη ερευνητική εργασία που εξέτασε αυτό το θέμα (Dixit et al., 2016) περιλάμβανε δεδομένα σχετικά με αυτόνομα οχήματα στην περίοδο από τον Σεπτέμβριο του 2014 έως το Νοέμβριο του 2015 στην πολιτεία της Καλιφόρνιας. Οι συντάκτες αυτής της ερευνητικής εργασίας ανέλυσαν 12 τροχαία ατυχήματα. Σε μεταγενέστερες ερευνητικές εργασίες, ερευνητές ανέλυσαν επίσης τροχαία ατυχήματα με αυτόνομα οχήματα στην πολιτεία της Καλιφόρνιας, αλλά σε διαφορετικά χρονικά εύρη. Σύμφωνα με το Τμήμα Μηχανοκίνητων Οχημάτων της Καλιφόρνια (Californian Department of Motor Vehicles) (CA DMV, 2018a) υπήρξαν 129 τροχαία ατυχήματα με αυτόνομα οχήματα έως τον Δεκέμβριο του 2018. Παρά τις μεγάλες προσδοκίες σχετικά με τις θετικές επιπτώσεις των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια, όλες οι έρευνες έχουν διαπιστώσει ότι τα τροχαία ατυχήματα με αυτόνομα οχήματα συμβαίνουν συχνότερα από τα ατυχήματα με συμβατικό όχημα.

Οι Favarò 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. Εφαρμόζοντας προηγμένα πακέτα λογισμικού, ορισμένοι ερευνητές ανέλυσαν τον αντίκτυπο της εισαγωγής αυτόνομων οχημάτων στην καθημερινή κυκλοφορία στον αριθμό και τους τύπους των συγκρούσεων (Tibljaš et al., 2018). Η προσομοίωση της εισαγωγής αυτόνομων οχημάτων (10% - 50% στην κυκλοφοριακή ροή) σε 4 κυκλικούς κόμβους στην Κροατία κατέγραψε αύξηση των ατυχημάτων οπίσθιου τύπου (Tibljaš et al., 2018). 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 (64,2%) σε αντίθεση με ατυχήματα μόνο με συμβατικά οχήματα (28,3%). Η υπόθεση για αυτή τη διαφορά είναι ότι οι οδηγοί των συμβατικών οχημάτων δεν είναι συνηθισμένοι στο στυλ οδήγησης των αυτόνομων οχημάτων όταν υπάρχει κυκλοφοριακή συμφόρηση. Τα αυτόνομα οχήματα συμμορφώνονται απολύτως με τους κανονισμούς κυκλοφορίας και δεν παρουσιάζουν συμπεριφορές των χρηστών

συμβατικών οχημάτων όπως υπερβολική ταχύτητα, επιθετική οδήγηση, υπερβολική αντιστάθμιση, απειρία, αργό χρόνο αντίδρασης, και απόσπαση προσοχής (Fagnant and Kockelman, 2015). Από την άλλη πλευρά, το αυτοαναφερόμενο ποσοστό υπερβολικής ταχύτητας των οδηγών συμβατικών οχημάτων σε 38 χώρες του κόσμου είναι 61% (Meesmann et al., 2018). Στην πραγματικότητα, το ποσοστό αυτό είναι υψηλότερο. Θεωρείται ότι η αρχική εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων συμβάλλει στη μείωση της κυκλοφοριακής ροής και της εμφάνισης συμφόρησης (Martínez-Díaz and Soriguera, 2018- Ntousakis et al., 2015- UK Department of Transport, 2016). Κατά συνέπεια, τα λάθη των οδηγών συμβατικών οχημάτων λόγω επιθετικής οδήγησης σε συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης οδηγούν στην εμφάνιση οδικών ατυχημάτων τύπου οπίσθιας σύγκρουσης.

2.4 Βαθμός διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο

Λόγω της κακής αυτής αλληλεπίδρασης που παρουσιάζεται ανάμεσα σε αυτόνομα και συμβατικά οχήματα, μελετήθηκε από τους Hua Sha et al., η επιρροή στην οδική ασφάλεια της παραχώρησης λωρίδων κυκλοφορίας αποκλειστικά για τα αυτόνομα οχήματα για διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης αυτόνομων αυτών στο δίκτυο (MPR). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκάλυψαν ότι με την παραχώρηση αποκλειστικής λωρίδας στα αυτόνομα οχήματα, 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. Ακόμη, η ερευνητική ομάδα A. Sinha, et al, κατά την ανάλυση δεδομένων προσομοίωσης, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, η αύξηση του βαθμού διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο συμβάλλει στην σταδιακή μείωση των εμπλοκών, όταν σε αυτές και το πρώτο και το δεύτερο όχημα είναι συμβατικά. Όσον αφορά τις εμπλοκές όμως, στις οποίες ένα αυτόνομο όχημα ακολουθείται από ένα συμβατικό, κατά την αύξηση του βαθμού διείσδυσης από το 0% στο 100%, η συχνότητα των εμπλοκών αυξάνεται. Συγκεντρωτικά, σταθμίζοντας και τους δύο τύπους εμπλοκών, ο συνολικός αριθμός αυτών, παρουσιάζει μείωση καθώς ο βαθμός διείσδυσης αυξάνεται από το 0% στο 10%, παραμένει σταθερός για βαθμούς διείσδυσης από 20% έως 60% και τέλος, αυξάνεται για βαθμούς διείσδυσης από 70% έως 90%. Παρόλα αυτά, κατά τη μελέτη του μεγέθους του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), παρουσιάστηκε μεγαλύτερη πιθανότητα το μέγεθος αυτό να παίρνει χαμηλότερες τιμές για βαθμό διείσδυσης 90%, σε σχέση με το σενάριο όπου ο βαθμός διείσδυσης είναι 0%. Χαμηλότερες τιμές χρόνου έως την εμπλοκή υποδηλώνουν την υψηλότερη πιθανότητα εμπλοκής σε ατύχημα και, ως εκ τούτου, υψηλότερη έκθεση σε κρίσιμα γεγονότα.

Όσον αφορά τον βαθμό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να μελετήσουν τις εξελίξεις της αγοράς στον αυτοματισμό οχημάτων και να προβλέψουν μελλοντικά ποσοστά διείσδυσης. Σύμφωνα με τους Milakis et al. (2017), οι οποίοι διατύπωσαν σενάρια αγοράς με μια ομάδα εμπειρογνομόνων, τα πλήρως αυτόνομα οχήματα θα εισαχθούν στην αγορά κάπου μεταξύ 2018 και 2045, με ποσοστά διείσδυσης μεταξύ 10% και 71% έως το 2050. Ο Litman (2018), ο οποίος βασίζεται σε προηγούμενες εξελίξεις στην αυτοκινητοβιομηχανία, πιστεύει ότι αυτή η εισαγωγή στην αγορά πιθανότατα θα γίνει πριν από το 2030, με πωλήσεις νέων αυτοκινήτων 30% έως το 2040 και 50% έως το

2050. Τέλος, οι Nieuwenhuijsen et al. (2018), οι οποίοι διεξήγαγαν μια ποσοτική μελέτη δυναμικής του συστήματος, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η διείσδυση στην αγορά έως το 2040 θα πρέπει να είναι κάπου μεταξύ 3% και 66% και μεταξύ 5% και 90% έως το 2050. Το εύρος ζώνης των ποσοστών διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων και carsharing είναι υψηλό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην τεχνολογική ανάπτυξη, την προθυμία για επενδύσεις και τη δημόσια αποδοχή. Είναι σαφές ότι το εύρος ζώνης είναι πολύ ευρύ, υποδεικνύοντας μεγάλη αβεβαιότητα στην ανάπτυξη της αγοράς.

Η έρευνα αγοράς σχετικά με τα κοινόχρηστα αυτόνομα οχήματα είναι λιγότερο απλή, καθώς στοχεύει κυρίως στην αγορά κοινής χρήσης οχημάτων γενικότερα. Σύμφωνα με στοιχεία της KpVV CROW (KpVV CROW, 2017a), η τακτική κοινή χρήση οχημάτων κερδίζει γρήγορα δημοτικότητα στην Ολλανδία, ειδικά στις αστικές περιοχές όπου το 2017 υπήρχαν σχεδόν 400 κοινόχρηστα αυτοκίνητα ανά 100.000 κατοίκους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή είναι πολύ ικανοποιημένη σχετικά με το τι θα μπορούσε να σημαίνει ο συνδυασμός αυτοματοποίησης και κοινής χρήσης οχημάτων για την αστική κινητικότητα και έχει θέσει ως στόχο έως το 2030, το 25% όλων των αστικών μετακινήσεων να εκτελείται από κοινόχρηστα αυτόνομα οχήματα (European Commission, 2018).

Αυτό στο οποίο συμφωνούν όλοι οι ερευνητές είναι ότι οι νέες έννοιες κινητικότητας, όπως η αυτοματοποίηση και η κοινή χρήση, ενισχύουν η μία την άλλη. Πράγματι, η κοινή χρήση οχημάτων γίνεται πολύ πιο εύκολη όταν τα οχήματα είναι αυτόνομα και μπορούν να οδηγήσουν μόνα τους από πελάτη σε πελάτη. Ως εκ τούτου, αναμένεται θετική συσχέτιση μεταξύ της ανάπτυξης της αγοράς αυτών των τεχνολογιών.

3 Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η ανάλυση του αντικειμένου της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες στατιστικής, ώστε να γίνουν εύκολα κατανοητές. Έπειτα, αναφέρονται λεπτομερώς οι μέθοδοι ανάλυσης που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση των δεδομένων, δηλαδή η γραμμική και η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση. Τέλος, παρουσιάζονται οι απαραίτητοι στατιστικοί έλεγχοι και τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης ενός μοντέλου.

3.2 Βασικές Έννοιες Στατιστικής

Ο όρος πληθυσμός αναφέρεται στο σύνολο των παρατηρήσεων του χαρακτηριστικού που ενδιαφέρει την στατιστική έρευνα. Πρόκειται για ένα σύνολο στοιχείων που είναι τελείως καθορισμένα. Ένας πληθυσμός μπορεί να είναι πραγματικός ή θεωρητικός.

Το “δείγμα” αναφέρεται σε ένα υποσύνολο του πληθυσμού. Οι περισσότερες στατιστικές έρευνες βασίζονται σε δείγματα, αφού οι ιδιότητες του πληθυσμού είναι συνήθως αδύνατο να

καταγραφούν. Όλα τα στοιχεία που ανήκουν στο δείγμα ανήκουν και στον πληθυσμό, χωρίς να ισχύει το αντίστροφο. Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από τη μελέτη του δείγματος θα ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια για ολόκληρο τον πληθυσμό μόνο εάν το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού.

Με τον όρο μεταβλητές εννοούνται τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν να μετρηθούν και να καταγραφούν σε ένα σύνολο ατόμων. Οι μεταβλητές διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Ποιοτικές μεταβλητές (qualitative variables): Ορίζονται οι μεταβλητές των οποίων οι δυνατές τιμές είναι κατηγορίες διαφορετικές μεταξύ τους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αριθμοί ώστε να παρουσιαστεί μία τέτοια μεταβλητή, αλλά η χρήση αυτών είναι καθαρά συμβολική και δεν αποτελεί μονάδα μέτρησης. Τέτοιες για παράδειγμα είναι το επίπεδο μόρφωσης.

Ποσοτικές μεταβλητές (quantitative variables): Ορίζονται οι μεταβλητές οι οποίες εκφράζονται με αριθμούς που όμως έχουν τη σημασία της μέτρησης, όπως για παράδειγμα η ηλικία ή το πλήθος των ατόμων μίας οικογένειας. Επιπλέον οι ποσοτικές μεταβλητές διακρίνονται με τη σειρά τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις διακριτές και τις συνεχείς.

Μία 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.

Μία μεταβλητή ορίζεται **συνεχής** όταν δύο τιμές μπορούν να διαφέρουν κατά οποιαδήποτε μικρή ποσότητα, δηλαδή μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή σε ένα διάστημα τιμών. Για παράδειγμα, τέτοια μεταβλητή μπορεί να θεωρηθούν τα λεπτά, τα δευτερόλεπτα, η ταχύτητα.

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 υποδιαστολή. 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:

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

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 σ_{xy} και των διασπορών σ_x , σ_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

3.3.1 Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)

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

Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου συνιστά μία στατιστική διαδικασία, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης. Σημειώνεται ότι η επιλογή της μεθόδου ανάπτυξης ενός μοντέλου βασίζεται στο αν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχές ή διακριτό μέγεθος.

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. 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:

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

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 (Multinomial Logistic Regression)

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:

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

Όπου:

- P_i η πιθανότητα η i -οστή περίπτωση να έχει έκβαση του αποτελέσματος

ιση 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 $\text{Ln}[P_i/(1- P_i)]$ 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 προτύπου

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση ενός μαθηματικού μοντέλου μετά τη διαμόρφωσή του είναι τα πρόσημα και οι τιμές των συντελεστών β_i της εξίσωσης, η στατιστική σημαντικότητα, η ποιότητα του μοντέλου και το σφάλμα της εξίσωσης.

- Όσον αφορά στους **συντελεστές της εξίσωσης**, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα **λογικής ερμηνείας των πρόσημων τους**. 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 β_i μονάδες.
- Η **στατιστική εμπιστοσύνη του μοντέλου** αξιολογείται μέσω του ελέγχου t-test (κριτήριο t της κατανομής Student). Με τον 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. Στον πίνακα που δίνεται στην συνέχεια (Πίνακας 3.1) παρουσιάζονται οι κρίσιμες τιμές του συντελεστή t (t^*) για κάθε επίπεδο εμπιστοσύνης.

Πίνακας 3.1: Κρίσιμες τιμές του συντελεστή t

Βαθμοί Ελευθερίας	Επίπεδο Εμπιστοσύνης				
	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995
80	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
Άπειροι	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

- Ως βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom) τίθενται το πλήθος δείγματος μείον ένα. Έτσι, για μέγεθος δείγματος 81 (άρα βαθμοί ελευθερίας 80) και για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% είναι $t^*=1,7$ ενώ για επίπεδο εμπιστοσύνης 90% είναι $t^*=1,3$. Αν, λοιπόν, $t = -3,2$ για κάποια ανεξάρτητη μεταβλητή X_i τότε παρατηρείται ότι η **απόλυτη τιμή** του t είναι μεγαλύτερη από την τιμή του $t^*(1,7)$ και επομένως είναι αποδεκτή η μεταβλητή ως στατιστικά σημαντική για το 95% των περιπτώσεων.
- Σημαντικός έλεγχος για την αξιολόγηση του 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 p -value). Η πιθανότητα p είναι το μικρότερο επίπεδο σημαντικότητας α που οδηγεί στην απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 έναντι της εναλλακτικής H_1 . Είναι μία σημαντική τιμή, διότι ποσοτικοποιεί τη στατιστική απόδειξη που υποστηρίζει την εναλλακτική υπόθεση. Γενικά, όσο πιο μικρή είναι η τιμή της πιθανότητας p , τόσο περισσότερες είναι οι αποδείξεις για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 έναντι της εναλλακτικής H_1 . Εάν η τιμή p είναι μικρότερη ή ίση του επιπέδου σημαντικότητας α , τότε η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται. 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. Στην R ο αριθμός των αστεριών προσδιορίζει τη σημαντικότητά της και βρίσκεται στο τέλος κάθε μεταβλητής.
- Η **ποιότητα του μοντέλου** καθορίζεται βάσει του συντελεστή προσαρμογής R^2 . 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:

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

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

Τα αρχικά SSR και SST έχουν προέλθει από τις φράσεις υπόλοιπο άθροισμα τετραγώνων (Residual Sum of Squares) και συνολικό άθροισμα τετραγώνων (Total Sum of Squares), αντίστοιχα. Με \hat{y} συμβολίζεται η προβλεπόμενη τιμή της εξαρτημένες μεταβλητές από τις ανεξάρτητες. Ο συντελεστής R^2 εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής Y που εξηγείται από τη 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 . 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.

- Για να πραγματοποιηθούν με επιτυχία οι μέθοδοι γραμμικής και λογιστικής παλινδρόμησης (Linear regression, Logistic regression) οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος πρέπει να είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστες. Στην περίπτωση που δεν είναι ασυσχέτιστες, στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, η διαδικασία οδηγείται σε αποτυχία με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου.
- Στην περίπτωση της **λογιστικής παλινδρόμησης** και μόνο, εφόσον δεν μπορεί να ληφθεί υπόψιν η τιμή του συντελεστή R^2 , θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του μοντέλου που θα προκύψει, ένας **πίνακας σύγχυσης (confusion matrix)**. Ο πίνακας σύγχυσης παρέχει μια σύγκριση μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών και χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των μοντέλων μηχανικής μάθησης. είναι ένας πίνακας $N \times N$, όπου N είναι ο αριθμός των κλάσεων ή των εξόδων. Για παράδειγμα, για 2 κλάσεις, έχουμε έναν πίνακα σύγχυσης 2×2 , όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

4 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για να αξιολογηθεί η επιρροή του βαθμού διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο προσομοίωσης και συγκεκριμένα σε μεταβλητές οι οποίες αφορούν την ασφάλεια της κυκλοφορίας, όπως ο **χρόνος έως την εμπλοκή (TTC)**, η **συχνότητα των εμπλοκών**, και ο **τύπος της εμπλοκής (ConflictType)**. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η διαδικασία **συλλογής και η επεξεργασία** των απαραίτητων **στοιχείων** για την εκπλήρωση του στόχου της Διπλωματικής. Το βήμα αυτό είναι σημαντικό, καθώς θα γίνει λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας, έτσι ώστε να δοθεί μία πλήρης εικόνα της αξιοπιστίας και της ποιότητας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Το εν λόγω κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο ενότητες. Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στη **διαδικασία συλλογής** των στοιχείων που αξιοποιήθηκαν. Η δεύτερη ενότητα επικεντρώνεται στην **περιγραφική στατιστική ανάλυση** των στοιχείων αυτών και παρουσιάζονται

συγκεντρωτικά διαγράμματα και πίνακες που απεικονίζουν τη σχέση **των ανεξάρτητων μεταβλητών** που προσδιορίστηκαν παραπάνω, σε σχέση με τον **βαθμό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR)**. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν από την περιγραφική ανάλυση.

4.2 Συλλογή Δεδομένων

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία **δεδομένων εμπλοκών προσομοίωσης της κυκλοφορίας**, η οποία πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο της περιοχής Villaverde, στη Μαδρίτη. Συγκεκριμένα, για 11 διαφορετικά σενάρια, τα οποία είχαν να κάνουν με διαφορετικούς ρυθμούς εισχώρησης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate-MPR), από 0% έως 100%, έγινε προσομοίωση του αστικού δικτύου και καταγράφηκαν συνολικά 242.150 συμβάντα εμπλοκών, για τα οποία **ο χρόνος έως τη εμπλοκή** των δύο οχημάτων (TTC), **ήταν μικρότερος από 1,5s**. Για κάθε τέτοιο συμβάν, το οποίο αντιπροσωπεύει μία εμπλοκή, καταγράφηκαν τόσο κυκλοφοριακά δεδομένα, όσο και τα χαρακτηριστικά του τμήματος του οδικού δικτύου. Αναλυτικά, οι μεταβλητές που καταγράφηκαν και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε επίπεδο στατιστικής ανάλυσης, παρουσιάζονται παρακάτω.

4.2.1 Δίκτυο προσομοίωσης

Το δίκτυο μελέτης αντιπροσωπεύει την **περιοχή Villaverde**, της πόλης της Μαδρίτης, στην Ισπανία, και σχεδιάστηκε στο λογισμικό Aimsun Next. Το προσομοιωμένο δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, έχει έκταση περίπου 2 km² και αποτελείται από 668 οδικά τμήματα συνολικού μήκους 23 χιλιομέτρων και 365 κόμβους. Η γεωμετρία του δικτύου εξήχθη από την πλατφόρμα ψηφιακών χαρτών OpenStreetMap.

Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψιν κυκλοφοριακές συνθήκες της ώρας αιχμής, οι οποίες αντιστοιχήθηκαν σε πίνακες Προέλευσης-Προορισμού 30 κεντροειδών με **κυκλοφοριακή ζήτηση** 5.784 διαδρομών για τα επιβατικά οχήματα και 716 διαδρομών για τα βαρέα οχήματα. Η ζήτηση αυτή, δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου που συλλέχθηκαν για το έτος 2018 (αντιπροσωπευτικός κυκλοφοριακός φόρτος πριν από την πανδημία COVID-19) από περίπου 80 φορατές και παρασχέθηκαν από την EMT Madrid (Empresa Municipal de Transportes de Madrid - www.emtmadrid.es). Επιπλέον, στο δίκτυο προσομοίωσης συμπεριλήφθηκε και το δίκτυο μεταφορών της περιοχής Villaverde. Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν υπόψη 23 συμβατικές γραμμές λεωφορείων και 39 στάσεις μέσων μαζικής μεταφοράς, καθώς και οι συχνότητες και οι χρόνοι αναμονής στις στάσεις αυτές.



Εικόνα 4.1: Δίκτυο προσομοίωσης

4.2.2 Σενάρια προσομοίωσης

Προέκυψαν δεδομένα εμπλοκών από **έντεκα μικροσκοπικά σενάρια προσομοίωσης** που διέφεραν ως προς το ποσοστό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά (MPR από 0% έως 100%, με αυξανόμενο βήμα 10%). Συγκεκριμένα, τα ποσοστά διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην αγορά αφορούσαν τόσο τα επιβατικά, όσο και τα βαρέα αυτοκίνητα και αντικατέστησαν τα αντίστοιχα ποσοστά των συμβατικών οχημάτων.

Το **προφίλ οδήγησης** αυτόνομου οχήματος των επιβατικών οχημάτων θεωρήθηκε ως ένα «επιθετικό» προφίλ, που παρουσιάζει προηγμένη ικανότητα ανίχνευσης και νόησης, χρήση σύντηξης δεδομένων, αυτοπεποίθηση στη λήψη αποφάσεων, μικρότερα κενά, έγκαιρη πρόβλεψη αλλαγών λωρίδας από ότι τα συμβατικά οχήματα και λιγότερο χρόνο σε καταστάσεις υποχώρησης, ενώ το προφίλ των βαρέων οχημάτων θεωρήθηκε «προσεκτικό», παρουσιάζοντας περιορισμένη ικανότητα ανίχνευσης και νόησης, μεγαλύτερα κενά, έγκαιρη πρόβλεψη αλλαγών λωρίδας από ότι τα συμβατικά οχήματα και περισσότερο χρόνο σε καταστάσεις υποχώρησης. Τέλος, για κάθε ένα από τα έντεκα σενάρια προσομοιώθηκαν επίσης δέκα διαφορετικές επαναλήψεις με διαφορετικές "τυχαίες αρχικές τιμές" (random seeds). Ο χρόνος προσομοίωσης καταγραφής δεδομένων ορίστηκε 10 λεπτά και το βήμα προσομοίωσης 0,4 δευτερόλεπτα.

4.2.3 Παράμετροι προσομοίωσης

Όπως προαναφέρθηκε, για τη **μοντελοποίηση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων (CAV)** για τα επιβατικά οχήματα, χρησιμοποιήθηκε ένα προφίλ οδήγησης, το οποίο διαθέτει προηγμένη αισθητήρια και γνωστική ικανότητα. Για να επιτευχθεί—αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι παράμετροι στη διαδικασία μικροπροσομοίωσης, οι οποίες αποτελούν ευρήματα που προέρχονται από το έργο LEVITATE και βασίστηκαν σε εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάστηκαν σε μελέτη των Mourtakos et al. (2021). Όλες οι παράμετροι μοντελοποίησης των αυτόνομων οχημάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1: Παράγοντες μοντελοποίησης αυτόνομων οχημάτων

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	Max	1.0	1.0
Χρόνος αντίδρασης (sec)			0.8	0.4

Επιπλέον, όλα τα αυτόνομα οχήματα που προσομοιώθηκαν θεωρήθηκαν αποκλειστικά ηλεκτρικά.

Το βήμα προσομοίωσης ορίστηκε στα 0,4 δευτερόλεπτα, καθώς η τιμή του πρέπει να είναι πολλαπλάσια του χρόνου αντίδρασης των οχημάτων στο λογισμικό Aimsun. Ο χρόνος αντίδρασης των CAV θεωρήθηκε 0,4 δευτερόλεπτα με βάση τις παραπάνω παραμέτρους του CAV και ως εκ τούτου το βήμα προσομοίωσης ορίστηκε στα 0,4 δευτερόλεπτα.

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.

4.3 Κωδικοποίηση δεδομένων

Τα δεδομένα, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω, παραδόθηκαν σε μορφή πίνακα και αποτελούνταν, από 242.150 παρατηρήσεις, κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια εμπλοκή οχημάτων, για κάθε μία από τις οποίες καταγράφηκαν τα εξής δεδομένα:

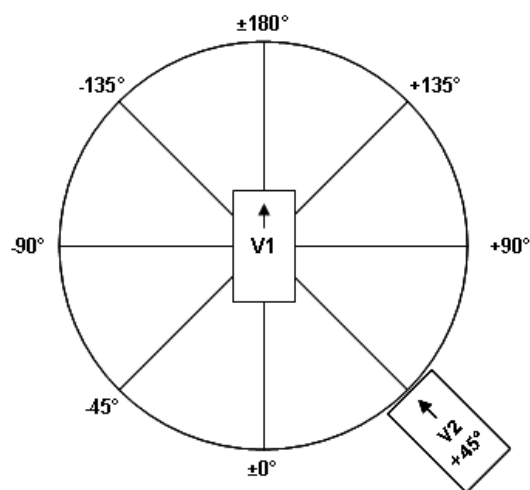
- **FirstVehType (SecondVehType):** τύπος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος. Οι 5 τύποι των οχημάτων που παρουσιάζονται στη βάση δεδομένων είναι οι εξής:
 - 1) 9308: Αυτόνομο επιβατικό όχημα (CAV-Passenger Car)
 - 2) 9311: Αυτόνομο φορτηγό όχημα (CAV-Freight Car)
 - 3) 153: Συμβατικό όχημα-λεωφορείο

4) 154: Συμβατικό όχημα-επιβατικό

5) 159: Συμβατικό όχημα-φορτηγό

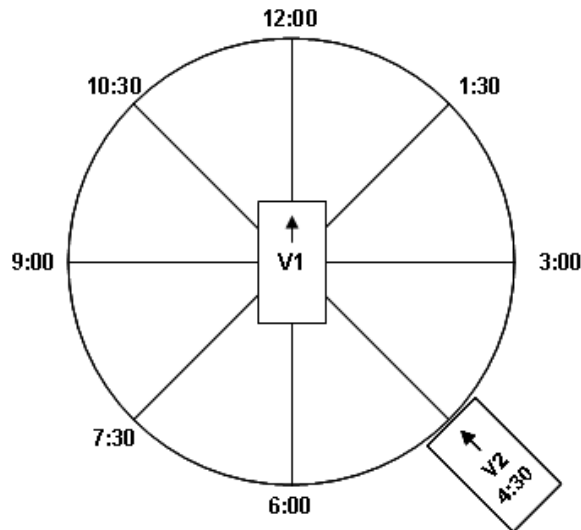
- **trjFile**: όνομα αρχείου τροχιάς (π.χ. αρχείο.trj) στο οποίο εντοπίστηκε η εμπλοκή.
- **tMinTTC**: ο χρόνος προσομοίωσης κατά τον οποίο παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή TTC (χρόνος μέχρι τη εμπλοκή) για την εμπλοκή αυτή. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης, ο χρόνος είναι (γενικά) 0 και αυξάνεται σε βήματα από 0,1 έως 1,0 δευτερόλεπτα ανά χρονικό βήμα, ανάλογα με την ανάλυση του λογισμικού προσομοίωσης.
- **xMinPET**: 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**: συντεταγμένη y που προσδιορίζει την κατά προσέγγιση θέση της εμπλοκής τη στιγμή που παρατηρήθηκε η ελάχιστη PET (χρόνος μετά την καταπάτηση). 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**: 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**: 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**: 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**: 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 = (√2)v**. Αν πλησιάζουν το ένα το άλλο κατά μέτωπο, τότε **DeltaS = 2v**.
- **DR**: 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 εμπλοκή. Η μεταβλητή αυτή, εκφράζεται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο ή μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις μονάδες που καθορίζονται στο αντίστοιχο αρχείο τροχιάς.

- **MaxD:** 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:** μέγιστη τιμή **DeltaV (FirstDeltaV ή SecondDeltaV)** οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή.
- **ConflictAngle:** 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:** 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 δεξιά, 6:00 είναι ακριβώς πίσω και 9:00 είναι αριστερά.



Εικόνα 4.3: Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής ClockAngle.

- ConflictType:** 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:** 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 **tMinTTC**.
- **FirstLane (SecondLane):** υποδεικνύει σε ποια λωρίδα κυκλοφορίας βρίσκεται το πρώτο (δεύτερο) όχημα, κατά την χρονική στιγμή **tMinTTC**.
- **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 **tMinTTC**.
- **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.

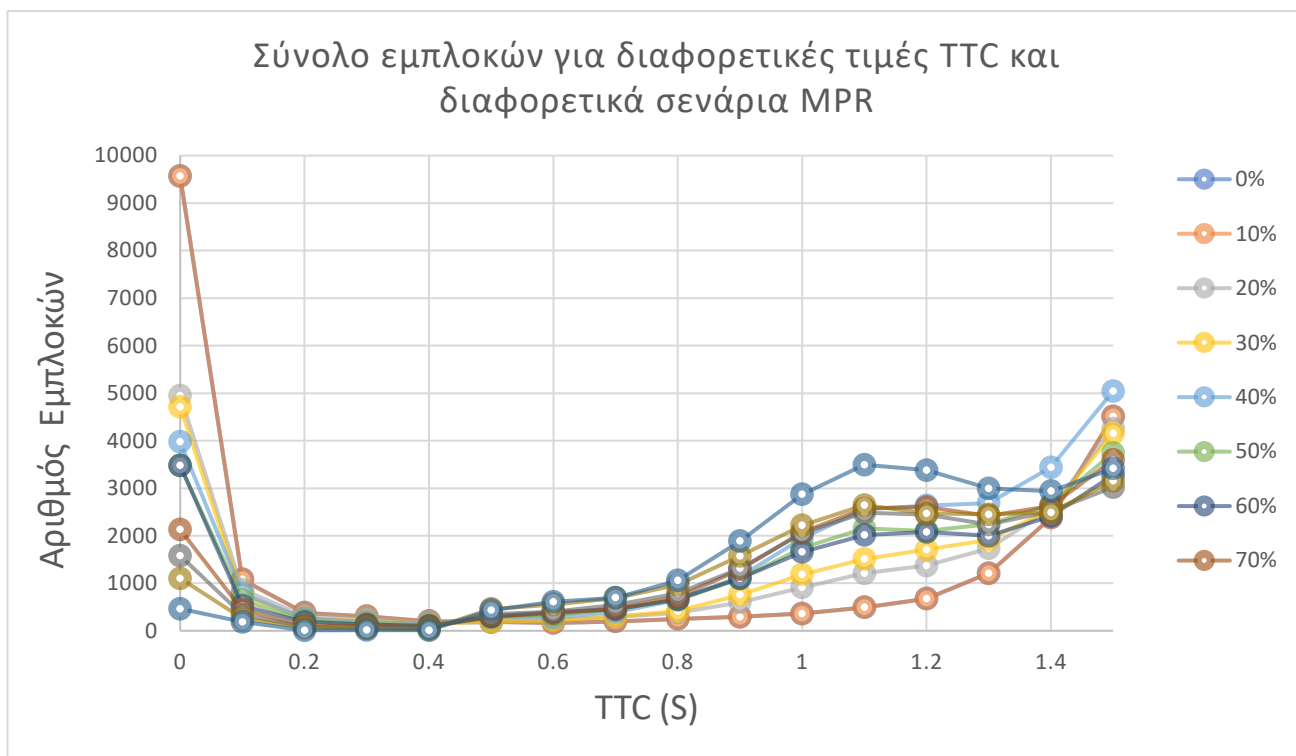
- **xFirstCSP (xSecondCSP):** συντεταγμένη x του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο σημείο εκκίνησης της εμπλοκής (Conflict Starting Point-CSP). Η θέση CSP είναι η θέση του οχήματος τη χρονική στιγμή **tMinTTC**.
- **yFirstCSP (ySecondCSP):** συντεταγμένη y του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο σημείο εκκίνησης 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 περιγραφικά στατιστικά στοιχεία επιτρέπουν μία πρώτη ανασκόπηση των δεδομένων και ως συνέπεια την αναγνώριση ορισμένων φαινομένων ή τάσεων, την εξοικείωση με τους αριθμούς και την τάξη μεγέθους τους.

4.4.1 Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC)

Εφόσον η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την επιρροή της διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ασφάλεια, θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθεί αρχικά **η σχέση μεταξύ του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC) και του βαθμού διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR)**, προκειμένου να διαπιστωθεί πως η αύξηση των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, επηρέασε την ασφάλεια των χρηστών του δικτύου και την προσαρμογή αυτών, στην εμφάνιση των αυτόνομων οχημάτων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση της σχέσης των δύο μεγεθών, χρησιμοποιήθηκαν και τα **αριθμητικά σύνολα των εμπλοκών** για κάθε τιμή του βαθμού διεύθυνσης (MPR). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω Διάγραμμα 4.1.

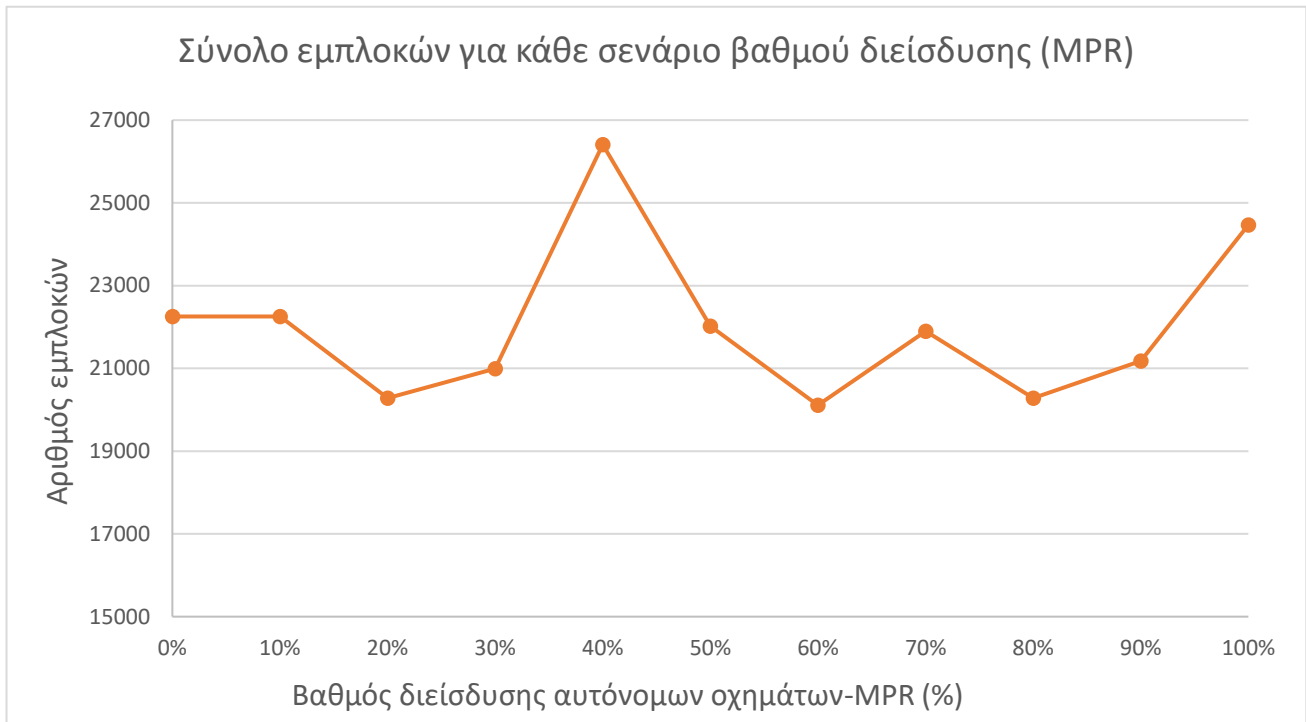


Διάγραμμα 4.1: Αριθμός εμπλοκών για διαφορετικές τιμές χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), για διαφορετικούς βαθμούς διείσδυσης (MPR)

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.1 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ο μεγαλύτερος αριθμός εμπλοκών, με τιμή χρόνου έως τη εμπλοκή (TTC) ίσο με το μηδέν, προκύπτει για το σενάριο όπου ο βαθμός διείσδυσης (MPR) είναι ίσος με 10%, οπότε και κυκλοφορεί στο δίκτυο ένας μικρός αριθμός αυτόνομων οχημάτων.
- Όσον αφορά το σενάριο με βαθμό διείσδυσης (MPR) ίσο με 100% προκύπτει ότι, ο αριθμός εμπλοκών στις οποίες ο χρόνος έως τη εμπλοκή (TTC) ήταν ίσος με το μηδέν, είναι μικρότερος σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα σενάρια με διαφορετικό βαθμό διείσδυσης. Παρόλα αυτά, γίνεται εύκολα αντιληπτό από το Διάγραμμα ότι, για το σενάριο αυτό, έχουν καταγραφεί οι μεγαλύτεροι αριθμοί εμπλοκών, με χρόνο έως τη εμπλοκή (TTC), ίσο με 0.9, 1, 1.1, 1.2 και 1.3.

4.4.2 Συχνότητα εμπλοκών



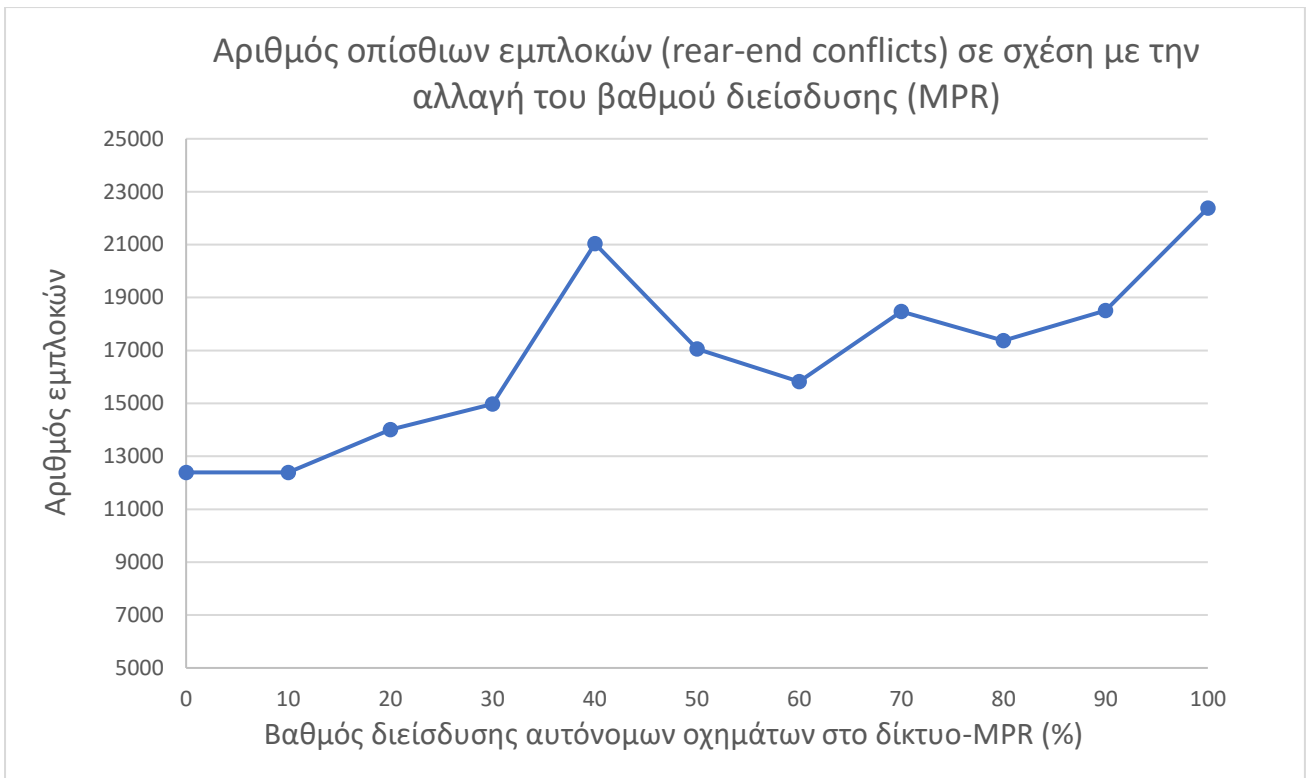
Διάγραμμα 4.2: Αριθμός εμπλοκών για κάθε διαφορετικό σενάριο βαθμού διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων MPR

Εξετάζοντας το παραπάνω Διάγραμμα 4.2, γίνονται αντιληπτά τα εξής:

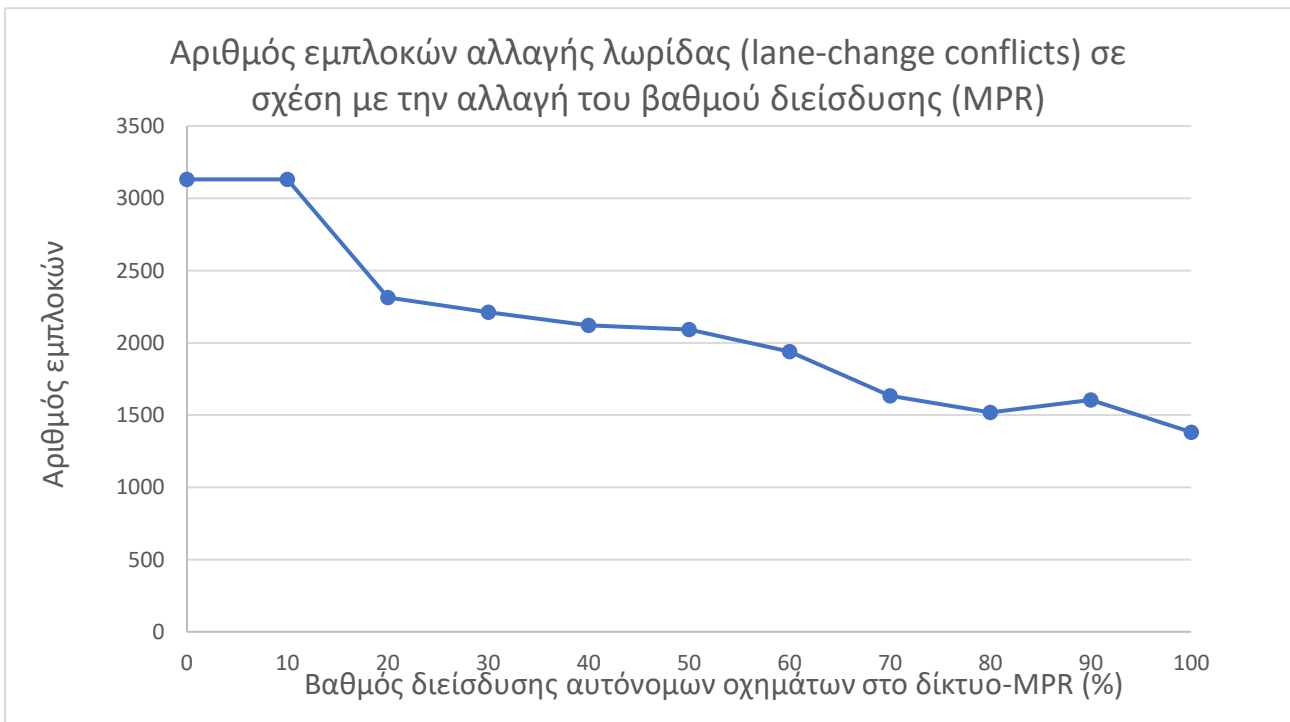
- Ο αριθμός των εμπλοκών που καταγράφηκαν δεν παρουσιάζουν σταθερή σχέση εξάρτησης από τον βαθμό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR). Παρόλα αυτά, τα **δύο μεγαλύτερα σύνολα εμπλοκών**, παρατηρούνται για βαθμό διείσδυσης (MPR) ίσο με **40% και 100%**.
- Αν και ο **αριθμός των εμπλοκών μειώνεται** όσο ο βαθμός διείσδυσης (MPR) **αυξάνεται** από το 40% στο 60%, **αυξάνεται** όταν στο δίκτυο προστίθενται αυτόνομα οχήματα και ο βαθμός διείσδυσης τους (MPR), πηγαίνει από **το 80% στο 100%**.

4.4.3 Τύπος εμπλοκής (ConflictType)

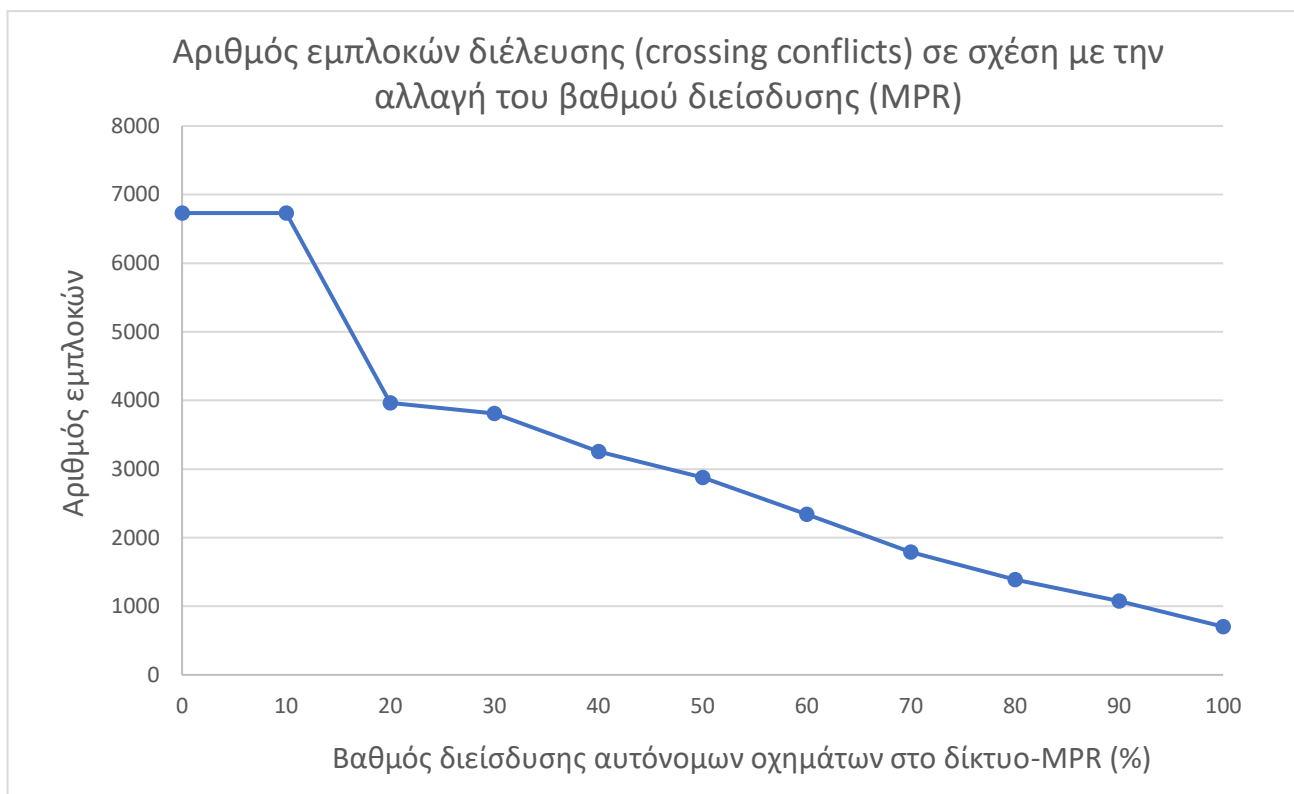
Οι τύποι εμπλοκών οι οποίοι καταγράφηκαν χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην παράγραφο 4.3. Οι τρεις αυτοί τύποι εμπλοκών είναι οι εξής: **α) οπίσθια εμπλοκή (rear-end conflict), β) εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane-changing conflict), και γ) εμπλοκή διέλευσης (crossing conflict)**. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο, κάθε τύπος διέλευσης επηρεάζεται από το βαθμό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR).



Διάγραμμα 4.3: Αριθμός οπίσθιων εμπλοκών (rear-end conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)



Διάγραμμα 4.4: Αριθμός αλλαγής λωρίδας (lane-change conflicts) σε σχέση με την αλλαγή του βαθμού διείδυσης (MPR)



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

Εξετάζοντας τα παραπάνω Διαγράμματα 4.3, 4.4 και 4.5 γίνονται αντιληπτά τα εξής:

- Η **αύξηση του βαθμού διείσδυσης** των αυτονόμων οχημάτων στο δίκτυο (MPR), επέφερε **αύξηση** του αριθμού των **οπίσθιων εμπλοκών (rear-end)** και ταυτόχρονη **μείωση** των αριθμών των **εμπλοκών αλλαγής λωρίδας (lane-change)** και των **εμπλοκών διέλευσης (crossing)**.

Εξετάζοντας όλα τα παραπάνω Διαγράμματα, προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Όσον αφορά τον **χρόνο έως τη εμπλοκή (TTC)**, για το σενάριο όπου ο **βαθμός διείσδυσης** είναι **100%**, πραγματοποιήθηκαν οι λιγότερες εμπλοκές με χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), ίσο με το μηδέν.
- Όταν ο βαθμός διείσδυσης **αυξάνεται προς το 100%**, και το δίκτυο κατά συνέπεια τείνει προς την κατάσταση στην οποία είναι κατειλημμένο μόνο από αυτόνομα οχήματα, **το σύνολο των εμπλοκών αυξάνεται**.
- Όσον αφορά τις εμπλοκές αυτές, ο τύπος των εμπλοκών που αυξάνεται με την αύξηση του βαθμού διείσδυσης είναι οι οπίσθιες εμπλοκές (rear-end). Παρόλα αυτά, οι εμπλοκές τύπου αλλαγής λωρίδας (lane-change) και διέλευσης (crossing), μειώνονται.

4.5 Σύνοψη

Όσον αφορά τον **χρόνο έως την εμπλοκή (TTC)**, στο σενάριο όπου έχουμε βαθμό διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (**MPR**), **ίσο με 100%**, παρατηρήθηκε ο μικρότερος αριθμός εμπλοκών με χρόνο έως την εμπλοκή ίσο με το μηδέν, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα σενάρια. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει αρχικά ότι, τα αυτόνομα οχήματα μπορούν πιο εύκολα να αντιληφθούν και να προλάβουν μία πιθανή εμπλοκή, και ιδιαίτερα πριν αυτή φτάσει στο σημείο με TTC ίσο με το μηδέν, όπου σε πραγματικές συνθήκες θα συνέβαινε μία πραγματική σύγκρουση.

Ακόμη, το γεγονός ότι με την **αύξηση του βαθμού διείσδυσης** των αυτόνομων οχημάτων (MPR), παρατηρείται **αύξηση** του αριθμού των **οπίσθιων εμπλοκών** και ταυτόχρονη **μείωση των εμπλοκών αλλαγής λωρίδας** (lane-change conflicts) και των **εμπλοκών διέλευσης** (crossing conflicts), υποδεικνύει ότι, ο **τρόπος οδήγησης των αυτόνομων οχημάτων** αν και είναι λιγότερο επιθετικός σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, επιφέρει την ανάπτυξη περισσότερων εμπλοκών στο δίκτυο. Αυτό αποδεικνύεται και από την παράγραφο 4.2.3, όπου και αναφέρεται ότι για την μοντελοποίηση των αυτόνομων οχημάτων λήφθηκε υπόψιν, μικρότερο ελεύθερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος, σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος των συμβατικών οχημάτων.

Τέλος, όσον αφορά την συμπεριφορά του δικτύου, σε σχέση με την εισροή σε αυτό των αυτόνομων οχημάτων, η **εισαγωγή αυτόνομων οχημάτων σε μικρό ποσοστό (10%)** δεν επηρεάζει τον αριθμό εμπλοκών που λαμβάνουν χώρα. Μπορεί επομένως, να θεωρηθεί ότι η επιρροή αυτών σε τόσο μικρό ποσοστό στο δίκτυο, **είναι αμελητέα**. Παρόλα αυτά, σε μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης (40%), ο αριθμός των εμπλοκών αυξάνονται, πράγμα που αποδεικνύει ότι η **ανομοιογένεια αυτή, της σύνθεσης της κυκλοφορίας, έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ασφάλεια** του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι, και σε αυτήν την περίπτωση ο τύπος των εμπλοκών που αυξήθηκαν ήταν οι οπίσθιες εμπλοκές.

5 Εφαρμογή Μεθοδολογίας – Αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

Ύστερα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση συναφών ερευνών και μεθοδολογιών, την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των στοιχείων και την περιγραφή συλλογής και επεξεργασίας των στοιχείων, έγινε η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, καθώς και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Διπλωματικής Εργασίας.

Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν, τελικά, για την ανάλυση των δεδομένων, όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3, είναι η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) και

πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην παρουσίαση ζητημάτων αξιοπιστίας των δεδομένων και στις διαδικασίες αντιμετώπισής τους. Αναπόσπαστο μέρος των αποτελεσμάτων αποτελούν οι στατιστικοί έλεγχοι που απαιτούνται για την αποδοχή ή την απόρριψη των μοντέλων πρόβλεψης.

5.2 Ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης με τη γλώσσα προγραμματισμού Python

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία ανάλυσης για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων που αφορούν στους παράγοντες επιρροής της μεταβλητής του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), του αριθμού των εμπλοκών (Number of Conflicts), της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS) και του τύπου εμπλοκής (ConflictType). Σκοπός της ανάλυσης με τις μεθόδους της γραμμικής παλινδρόμησης και της πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης είναι να υπολογιστούν στατιστικά σημαντικά μοντέλα και να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τις εξαρτημένες μεταβλητές.

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 χαρακτηριστικά της οδού.

Εφόσον τα δεδομένα τα οποία παραδόθηκαν αποτελούνταν από 242.150 συμβάντα, δηλαδή 242.150 σειρές στον πίνακα δεδομένων, για τα οποία είχαν καταγραφεί 58 χαρακτηριστικά (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, αναλύονται οι μεταβλητές που επιλέχθηκε να μην συμμετέχουν στη διαδικασία ανάλυσης, και ο λόγος που αυτό συνέβη.

- **trjFile:** Εφόσον η μεταβλητή αυτή αναπαριστά το χαρακτηριστικό αρχείο τροχιάς, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εκάστοτε εμπλοκή, δεν αποτελεί χρήσιμο δεδομένο εκτός της προσομοίωσης, οπότε αφαιρέθηκε από τη βάση δεδομένων.
- **FirstVID (SecondVID):** Εφόσον οι δύο μεταβλητές αυτές, αποτελούν τον χαρακτηριστικό αριθμό αναγνώρισης των οχημάτων που ενεπλάκησαν στη εμπλοκή, όσον αφορά το περιβάλλον προσομοίωσης, και δεν προσφέρουν κάποια άλλη πληροφορία για το όχημα (π.χ. αυτόνομο, συμβατικό), αφαιρέθηκαν από το σύνολο των δεδομένων που συμμετείχαν στην στατιστική ανάλυση.
- **ClockAngle:** Εφόσον η μεταβλητή αυτή είναι μία εναλλακτική έκφραση της μεταβλητής **ConflictAngle**, εξαιρέθηκε από το σύνολο των δεδομένων που συμμετείχαν στη στατιστική ανάλυση.

- **FirstLink (SecondLink):** Εφόσον οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιήθηκαν, για την ανάλυση των δεδομένων της προσομοίωσης, σε συνδυασμό με την μεταβλητή **FirstLane (SecondLane)**, για τον καθορισμό της μεταβλητής **ConflictType**, αφαιρέθηκαν από τη βάση των δεδομένων.
- **FirstLane (SecondLane):** Εφόσον οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιήθηκαν, για την ανάλυση των δεδομένων της προσομοίωσης, σε συνδυασμό με την μεταβλητή **FirstLink (SecondLink)**, για τον καθορισμό της μεταβλητής **ConflictType**, αφαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων.
- **tMinTTC:** Εφόσον η μεταβλητή αυτή, αφορά τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης κατά την οποία καταγράφηκε η ελάχιστη τιμή του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC), κρίθηκε σκόπιμο να αφαιρεθεί από τον πίνακα δεδομένων που συμμετείχε στην ανάλυση.
- **xFirstCEP (xSecondCEP), yFirstCEP (ySecondCEP):** Εφόσον οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν, την x και y συντεταγμένη των οχημάτων που εμπλέκονται στο τέλος της εκάστοτε εμπλοκής, αφαιρέθηκε από το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση.
- **PET:** Εφόσον η μεταβλητή PET εκφράζει την χρονική διαφορά της θέσης δύο οχημάτων για κάθε εμπλοκή και είναι σύμφωνα με αυτό μία διαφορετική έκφραση του χρόνου έως τη σύγκρουση (TTC), αφαιρέθηκε από τον πίνακα δεδομένων, εφόσον λαμβάνεται υπόψιν μέσω του μεγέθους TTC.

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 Συσχέτιση μεταβλητών – Διακύμανση μεταβλητών

Με σκοπό την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για τη διερεύνηση των κρίσιμων παραγόντων επιρροής των εξαρτημένων μεταβλητών, διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών υπό εξέταση. Εκείνο που επιδιώκεται είναι η μέγιστη δυνατή συσχέτιση μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών και μηδενική ή μικρότερη δυνατή συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Οι απόλυτες τιμές των συντελεστών συσχέτισης κοντά στη μονάδα δείχνουν ισχυρή συσχέτιση, ενώ τιμές κοντά στο μηδέν φανερώνουν ανύπαρκτη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Στην πράξη θεωρείται μικρή συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών όταν η απόλυτη τιμή του δείκτη συσχέτισης κατά Pearson r είναι μικρότερη ή ίση με 0.4 ($r \leq 0.4$).

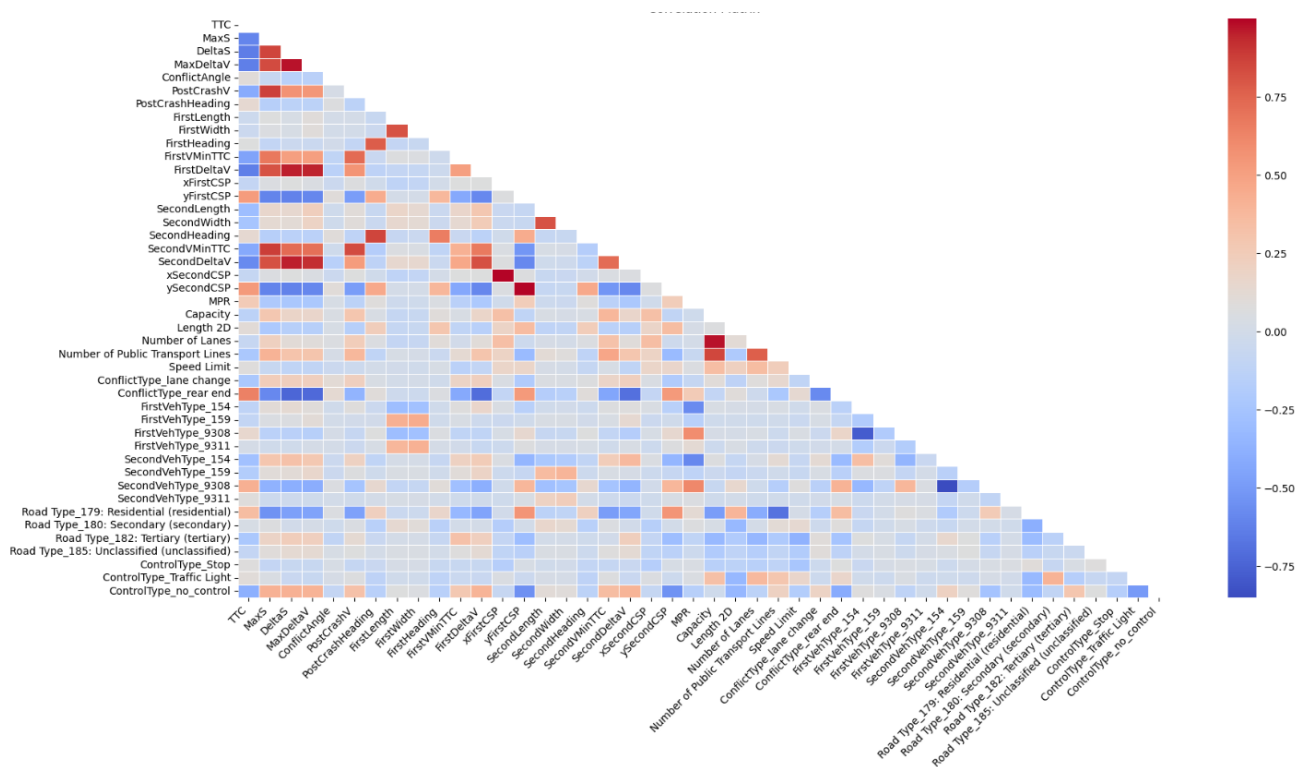
Για τον έλεγχο αυτό, στο προγραμματιστικό περιβάλλον Virtual Studio Code του προγράμματος Python, υπάρχουν αρκετές εντολές οι οποίες μπορούν να υπολογίσουν την

γραμμική συσχέτιση μεταξύ δύο ανεξάρτητων μεταβλητών. Από αυτές χρησιμοποιήθηκε η εντολή «.corr('pearson')», με την οποία εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών μεταξύ τους, ώστε να αφαιρεθούν εκείνες που παρουσιάζουν μεγάλη συσχέτιση.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης των μεταβλητών αξιοποιώντας την μέθοδο Pearson. Αξίζει να σημειωθεί πως στο παρόν στάδιο εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ των συνεχών και μεταξύ των διακριτών μεταβλητών, ανεξαρτήτως αν χρησιμοποιούνται ή όχι στα τελικά πρότυπα.

Όπως προαναφέρθηκε, για την ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου απαιτείται η μη ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών που θα συμπεριληφθούν σε αυτό. Συνεπώς, οι υψηλοί συντελεστές επισημάνθηκαν με βάση το εμπειρικό όριο του 0.4, στην συγκεκριμένη περίπτωση, και κατόπιν εξετάστηκε κατά πόσο τα δύο μεγέθη που τους δημιουργήσαν θα ήταν δυνατό να συσχετίζονται στην πραγματικότητα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εμφάνισαν υψηλή συσχέτιση (μεγαλύτερη από 0.4) δε λήφθηκαν υπόψιν στα τελικά μοντέλα. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ όλων των μεταβλητών της βάσης δεδομένων, από την οποία έχουν εξαιρεθεί οι μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 5.1: Πίνακας συσχέτισης μεταβλητών



Εφόσον τέθηκε στο πρόγραμμα σαν κάτω όριο η συσχέτιση των μεταβλητών να μην ξεπερνάει την τιμή 0,4, αφαιρέθηκαν οι εξής μεταβλητές οι οποίες παρουσίαζαν μεγαλύτερη από την αποδεκτή συσχέτιση με κάποια άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή:

- DeltaS,
- MaxDeltaV,
- PostCrashV,
- FirstHeading,
- FirstVMinTTC,
- FirstDeltaV,
- yFirstCSP,
- SecondWidth,
- SecondHeading,
- SecondVMinTTC,
- SecondDeltaV,
- xSecondCSP,
- ySecondCSP,
- Number of Lanes,
- Number of Public Transport Lines,
- ConflictType_crossing,
- ConflictType_rear end,
- FirstVehType_153,
- FirstVehType_154,
- FirstVehType_159,
- FirstVehType_9308,
- 'FirstVehType_9311,
- 'SecondVehType_153,
- 'SecondVehType_154,
- 'SecondVehType_9308,
- 'Road Type_177: Primary (primary),
- 'Road Type_179: Residential (residential),
- ControlType_Give Way,
- ControlType_Traffic Light,
- ControlType_no_control.

Επίσης, προκειμένου να υπάρχει καθαρότητα στη βάση δεδομένων αφαιρέθηκαν και κάποιες μεταβλητές οι οποίες παρουσίαζαν πολύ μικρή διακύμανση, μικρότερη του 0,01 οπότε η ύπαρξη τους στη βάση δεδομένων θα επηρέαζε αρνητικά την δημιουργία των μοντέλων, λόγω της ύπαρξης «θορύβου» στη βάση δεδομένων. Οι μεταβλητές που αφαιρέθηκαν, με τον έλεγχο αυτό της διακύμανσης τους, ήταν οι εξής:

- DR,
- MaxD,
- P.UEA,

- mTTC,
- Lane Width.

5.2.3 Μοντέλα Γραμμικής και Πολυωνυμικής λογιστικής Παλινδρόμησης

Η εύρεση των κατάλληλων μοντέλων προσδιορισμού των κρίσιμων παραγόντων που επηρεάζουν τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), της μέγιστης ταχύτητας (MaxS) και τον αριθμό των εμπλοκών, πραγματοποιήθηκε με τη γραμμική παλινδρόμηση. Όσον αφορά τον τύπο των εμπλοκών (ConflictType), εφόσον η μεταβλητή είναι κατηγορική και αποτελείται από τρεις πιθανές κλάσεις (κατηγορίες), χρησιμοποιήθηκε η πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μοντέλο κατάταξης για την κάθε κλάση της μεταβλητής.

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

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

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

Σύμφωνα με το Θεωρητικό Υπόβαθρο του Κεφαλαίου 3, 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
- Ο συντελεστής προσαρμογής R² (Adjusted R square) να είναι κατά το δυνατόν μεγαλύτερος (ιδανικά μεγαλύτερος του 0,4)
- Στην περίπτωση της λογιστικής παλινδρόμησης και μόνο, ο **πίνακας σύγχυσης (confusion matrix)** του μοντέλου πρόβλεψης.

Εκτός από τους μαθηματικούς ελέγχους, απώτερος στόχος κάθε μοντέλου είναι η ικανότητά του να προβλέπει με σχετική ακρίβεια το φαινόμενο που περιγράφει.

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

Παρακάτω παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα βέλτιστα μαθηματικά μοντέλα που αφορούν στους παράγοντες που επηρεάζουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως αυτές παρουσιάστηκαν παραπάνω. Για κάθε μοντέλο παρουσιάζονται τα εξής στοιχεία:

- I. **Ανάπτυξη μοντέλου:** Παρουσιάζονται οι μεταβλητές οι οποίες απαρτίζουν το εκάστοτε μοντέλο
- II. **Πίνακας συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών**
- III. **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
- IV. **Μαθηματική σχέση** περιγραφής του μοντέλου
- V. **Ποιότητα στατιστικού μοντέλου:** Ελέγχεται αν τηρούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι, ώστε το μοντέλο να θεωρείται αξιόπιστο
- VI. **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 συχνότητας των εμπλοκών
- Μοντέλο 3 - Προσδιορισμός των παραγόντων επιρροής της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)
- Μοντέλο 4 - Προσδιορισμός των παραγόντων που καθορίζουν τον τύπο της εμπλοκής (ConflictType)

5.3.1 Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC) – Μοντέλο 1

Έπειτα από πολλές δοκιμές ως το καλύτερο μοντέλο για να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο έως την εμπλοκή δύο οχημάτων, προέκυψε ότι είναι εκείνο με εξαρτημένη μεταβλητή τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC) και ανεξάρτητες μεταβλητές:

- MaxS
- FirstWidth
- SecondLength
- MPR
- ConflictType_lane change
- SecondVehType_159
- SecondVehType_9311
- Road Type_180: Secondary (secondary)
- Road Type_182: Tertiary (tertiary)
- ControlType_Stop

Οι συσχετίσεις των μεταβλητών και τα αποτελέσματα για την ακρίβεια που προσφέρει το μοντέλο φαίνονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.2: Μοντέλο πρόβλεψης TTC-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών

Correlation Matrix										
	MaxS	FirstWidth	SecondLength	MPR	ConflictType_lane change	SecondVehType_159	SecondVehType_9311	Road Type_180: Secondary (secondary)	Road Type_182: Tertiary (tertiary)	ControlType_Stop
MaxS	1.000	0.059	0.157	-0.209	0.240	0.097	-0.035	0.067	0.188	-0.085
FirstWidth	0.059	1.000	0.139	-0.026	0.002	0.041	0.022	0.097	0.010	0.020
SecondLength	0.157	0.139	1.000	-0.041	0.046	0.358	0.203	0.160	0.000	-0.014
MPR	-0.209	-0.026	-0.041	1.000	-0.083	-0.120	0.058	0.061	-0.112	0.043
ConflictType_lane change	0.240	0.002	0.046	-0.083	1.000	0.036	-0.011	-0.028	0.093	-0.040
SecondVehType_159	0.097	0.041	0.358	-0.120	0.036	1.000	-0.018	-0.001	0.067	0.012
SecondVehType_9311	-0.035	0.022	0.203	0.058	-0.011	-0.018	1.000	-0.016	0.006	0.047
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.067	0.097	0.160	0.061	-0.028	-0.001	-0.016	1.000	-0.143	-0.072
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	0.188	0.010	0.000	-0.112	0.093	0.067	0.006	-0.143	1.000	0.033
ControlType_Stop	-0.085	0.020	-0.014	0.043	-0.040	0.012	0.047	-0.072	0.033	1.000

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης TTC

Variables	Coefficient	St. Error	t	P> t
Constant	0.852	0.002	497.809	0.000
MaxS	-0.826	0.003	-279.266	0.000
FirstWidth	0.025	0.003	7.270	0.000
SecondLength	-0.417	0.003	-125.452	0.000
MPR	0.125	0.002	62.953	0.000
ConflictType_lane change	-0.087	0.002	-40.636	0.000
SecondVehType_159	-0.062	0.004	-15.756	0.000
SecondVehType_9311	0.398	0.006	64.724	0.000
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.079	0.002	44.962	0.000
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-0.119	0.002	-57.139	0.000
ControlType_Stop	0.070	0.004	18.931	0.000
Adj. R-squared	0,461			

Μαθηματική σχέση:

$$TTC = 0.852 - 0.826*MaxS + 0.025*FirstWidth - 0.417*SecondLength + 0.125*MPR - 0.087*ConflictType_lane\ change - 0.062*SecondVehType_159 + 0.398*SecondVehType_9311 + 0.079*Road\ Type_180:\ Secondary\ (secondary) - 0.119*Road\ Type_182:\ Tertiary\ (tertiary) + 0.070*ControlType_Stop$$

5.3.1.1 Ποιότητα μοντέλου

Στο μοντέλο που προέκυψε ικανοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι:

- Ο συντελεστής προσαρμογής **R²** είναι υψηλός, ίσος με **0,461**,
- Ο έλεγχος του **t** να είναι μεγαλύτερος από 1,7 για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή επαληθεύεται,
- Το **επίπεδο σημαντικότητας** των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05,
- Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο και τα **πρόσημά** τους εξηγούνται λογικά.

5.3.1.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μοντέλου

Από τους συντελεστές του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου προκύπτει μια σειρά από ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- Με την **αύξηση της μέγιστης ταχύτητας** εμπλοκής (MaxS), παρατηρείται **μείωση** του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC).
- Παρατηρείται ότι, για **αύξηση του πλάτους του πρώτου οχήματος** της εμπλοκής, παρατηρείται **αύξηση** του χρόνου έως την εμπλοκή (**TTC**). Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει διότι, τα οχήματα αυτά με μεγαλύτερο πλάτος, λόγω μεγαλύτερης δυσκινησίας, κινούνται σε πιο συντηρητικά πλαίσια στο δίκτυο.

- Μέσω του Πίνακα 5.3, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι, **για αύξηση του μήκους του δεύτερου οχήματος** το οποίο συμμετείχε στην εμπλοκή, έχουμε ταυτόχρονη **μείωση** του χρόνου έως την εμπλοκή (**TTC**). Το γεγονός αυτό, εξηγείται ενδεχομένως από την υπόθεση ότι, μεγαλύτερο μήκος οχήματος, οδηγεί και σε μικρότερο ελεύθερο χωρικό διάστημα κατάληψης μεταξύ των δύο οχημάτων της εμπλοκής, άρα και μικρότερο χρόνο έως την εμπλοκή (**TTC**).
- Η μεταβλητή του **βαθμού διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων** (**MPR**), φαίνεται ότι, **επηρεάζει με θετικό πρόσημο** τον χρόνο έως την εμπλοκή (**TTC**). Το αποτέλεσμα αυτό, συνάδει με το γεγονός ότι, τα αυτόνομα οχήματα παρουσιάζουν λιγότερο επιθετική συμπεριφορά σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, σε όρους επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων, όπως παρουσιάζεται και στα δεδομένα μοντελοποίησης του Κεφαλαίου 4.
- Ο **τύπος σύγκρουσης αλλαγή λωρίδας** (**ConflictType_lane change**) φαίνεται να **επηρεάζει αρνητικά** τον χρόνο έως την εμπλοκή. Εφόσον η μεταβλητή αυτή, είναι μία από τις κατηγορίες της μεταβλητής του τύπου της σύγκρουσης (**ConflictType**), μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση του 0, όπου η εμπλοκή δεν είναι τύπου αλλαγής λωρίδας, η μεταβλητή αυτή, δεν επηρεάζει τον χρόνο έως την εμπλοκή. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που η εμπλοκή είναι τέτοιου τύπου, και η μεταβλητή πάρει την τιμή 1, τότε ο χρόνος έως την εμπλοκή μειώνεται κατά 0,087 δευτερόλεπτα. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως η μείωση της ορατότητας σε εμπλοκές τύπου αλλαγής λωρίδας.
- Ο τύπος του δεύτερου οχήματος της εμπλοκής, όταν αυτό είναι **συμβατικό όχημα** και συγκεκριμένα **φορηγό** (**SecondVehType_159**), φαίνεται μέσω του μοντέλου να επηρεάζει **αρνητικά τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC)**. Εφόσον η μεταβλητή αυτή, είναι μία από τις κατηγορίες της μεταβλητής της κατηγορίας του δεύτερου οχήματος της εμπλοκής (**SecondVehType**), μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση του 0, όπου το δεύτερο όχημα δεν είναι τέτοιου τύπου, η μεταβλητή αυτή, δεν επηρεάζει τον χρόνο έως την εμπλοκή. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που το δεύτερο όχημα της εμπλοκής είναι συμβατικό φορηγό όχημα, και η μεταβλητή πάρει την τιμή 1, τότε ο χρόνος έως την εμπλοκή μειώνεται κατά 0,062 δευτερόλεπτα. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, τα **συμβατικά οχήματα** έχουν μοντελοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψιν **μεγαλύτερο χρόνο αντίδρασης** και πιο επιθετικό προφίλ οδήγησης (μεγαλύτερη μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση), σε σχέση με τα αυτόνομα οχήματα, των οποίων η τεχνολογία αυτοματοποίησης ελαχιστοποιεί τους χρόνους αντίληψης και λήψης αποφάσεων.
- Αντίστοιχα, όταν ο τύπος του δεύτερου οχήματος είναι **αυτόνομο όχημα**, και συγκεκριμένα **φορηγό** (**SecondVehType_9311**), **ο χρόνος έως την εμπλοκή (TTC), επηρεάζεται θετικά**. Εφόσον και αυτή η μεταβλητή, αποτελεί μία από τις κατηγορίες της κατηγορικής μεταβλητής (**SecondVehType**), όταν το δεύτερο όχημα της εμπλοκής είναι τέτοιου τύπου, τότε ο χρόνος έως την εμπλοκή (**TTC**), θα αυξηθεί κατά 0,398 δευτερόλεπτα. Η σχέση αυτή μεταξύ του αυτόνομου οχήματος και του χρόνου έως την εμπλοκή (**TTC**), επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι τα αυτόνομα οχήματα μοντελοποιήθηκαν, προκειμένου να εισαχθούν στην προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψιν ένα **λιγότερο επιθετικό προφίλ οδήγησης** (μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση), σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.

- Η μεταβλητή **Road Type_180: Secondary (secondary)** είναι μία από τις κατηγορίες τις κατηγορικής μεταβλητής του τύπου της οδού (Road Type), επομένως μπορεί να λάβει τις τιμές 1 και 0, σε σχέση με το αν η εμπλοκή συνέβη σε τέτοιο τύπου οδό ή όχι. Σε περίπτωση λοιπόν, **που λάβει την τιμή 1**, είναι κατανοητό από την παραπάνω μαθηματική εξίσωση ότι, ο χρόνος έως την εμπλοκή (TTC) **αυξάνεται κατά 0.079 δευτερόλεπτα**. Αυτό ενδεχομένως, οφείλεται στο γεγονός ότι, ο συγκεκριμένος τύπος οδού είναι αυτοκινητόδρομος, οπότε επικρατούν συνθήκες καλύτερης ορατότητας και πιο ομαλής κυκλοφορίας.
- Η μεταβλητή (**Road Type_182: Tertiary (tertiary)**), αναπαριστά οδό που συνδέει μικρότερους οικισμούς ή οδό εντός μεγάλων οικισμών που συνδέει τοπικά κέντρα. Είναι κατανοητό από την παραπάνω εξίσωση, όταν η κατηγορική μεταβλητή αυτή λάβει την τιμή 1, τότε ο χρόνος έως την εμπλοκή (TTC), μειώνεται κατά 0.119 δευτερόλεπτα. Αυτό ενδεχομένως, οφείλεται στο γεγονός ότι, εφόσον ο τύπος οδού αυτός δεν είναι αυτοκινητόδρομος, είναι πιθανό οι χρήστες να συμπεριφέρονται με τρόπο ώστε να παρεμποδίζεται η κυκλοφορία (στάσεις, είσοδοι-έξοδοι από κατοικίες).
- Η ύπαρξη **πινακίδας σήμανσης «Stop» (ControlType_Stop)**, επηρεάζει **θετικά** τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC). Εφόσον η μεταβλητή αυτή, είναι μία από τις κατηγορίες της μεταβλητής του τύπου ελέγχου της οδού της εμπλοκής (ControlType) μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση του 0, όπου το τμήμα της οδού, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εμπλοκή δεν ελεγχόταν από πινακίδα σήμανσης «Stop» η μεταβλητή αυτή, δεν επηρεάζει τον χρόνο έως την εμπλοκή. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που η εμπλοκή λαμβάνει χώρα σε οδό τέτοιου τύπου, και η μεταβλητή πάρει την τιμή 1, τότε ο χρόνος έως την εμπλοκή μειώνεται κατά 0,07 δευτερόλεπτα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η πινακίδα σήμανσης «Stop», επιβάλλει την στάση των οχημάτων, επομένως οι χρήστες του δικτύου κινούνται για ένα διάστημα με μικρότερες ταχύτητες και επιταχύνσεις, πράγμα που ευνοεί τον χρόνο αντίδρασης τους σε ενδεχόμενο συμβάν εμπλοκής.

5.3.2 Αριθμός εμπλοκών – Μοντέλο 2

Έπειτα από πολλές δοκιμές, ως το καλύτερο μοντέλο για να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συχνότητα των εμπλοκών που παρατηρούνται στο δίκτυο, προέκυψε ότι είναι εκείνο με εξαρτημένη μεταβλητή τον αριθμό των εμπλοκών οι οποίες παρουσιάστηκαν στην προσομοίωση, με ανεξάρτητες μεταβλητές:

- Road Type_180: Secondary (secondary)
- MPR
- MaxS
- SecondVehType_159
- SecondVehType_9311
- ControlType_Stop

Οι συσχετίσεις των μεταβλητών και τα αποτελέσματα για την ακρίβεια που προσφέρει το μοντέλο φαίνονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.4: Μοντέλο πρόβλεψης Αριθμού εμπλοκών-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών

Correlation Matrix						
	Road Type_180: Secondary (secondary)	MPR	MaxS	SecondVehType_159	SecondVehType_9311	ControlType_Stop
Road Type_180: Secondary (secondary)	1.000	0.061	0.067	-0.001	-0.016	-0.072
MPR	0.061	1.000	-0.209	-0.120	0.058	0.043
MaxS	0.067	-0.209	1.000	0.097	-0.035	-0.085
SecondVehType_159	-0.001	-0.120	0.097	1.000	-0.018	0.012
SecondVehType_9311	-0.016	0.058	-0.035	-0.018	1.000	0.047
ControlType_Stop	-0.072	0.043	-0.085	0.012	0.047	1.000

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης Αριθμού εμπλοκών

Variables	Coefficient	St. Error	t	P> t
Constant	15.070	0.105	143.327	0.000
Road Type_180: Secondary (secondary)	-7.104	0.080	-88.979	0.000
MPR	0.007	0.001	5.537	0.000
MaxS	-0.678	0.007	-91.967	0.000
SecondVehType_159	-6.385	0.112	-56.951	0.000
SecondVehType_9311	-9.163	0.170	-53.939	0.000
ControlType_Stop	-10.259	0.129	-79.480	0.000
Adj. R-squared	0,335			

Μαθηματική σχέση:

Number of Conflicts = 15.0697 - 7.104*Road Type_180: Secondary (secondary) + 0.007*MPR - 0.6780*MaxS + 6.385*SecondVehType_159 - 9.163*SecondVehType_9311 - 10.259*ControlType_Stop

5.3.2.1 Ποιότητα μοντέλου

Στο μοντέλο που προέκυψε ικανοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι:

- Ο συντελεστής προσαρμογής **R²** είναι αποδεκτός, ίσος με **0,335**,
- Ο έλεγχος του **t** να είναι μεγαλύτερος από 1,7 για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή επαληθεύεται,
- Το **επίπεδο σημαντικότητας** των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05,
- Οι μεταβλητές που εισήχθησαν στο μοντέλο και τα **πρόσημά** τους εξηγούνται λογικά.

5.3.2.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μοντέλου

Από τους συντελεστές του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου προκύπτει μια σειρά από ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- Η μεταβλητή **Road Type_180: Secondary (secondary)** είναι μία από τις κατηγορίες της κατηγορικής μεταβλητής του τύπου της οδού (Road Type), επομένως μπορεί να λάβει τις τιμές 1 και 0, σε σχέση με το αν η εμπλοκή συνέβη σε τέτοιο τύπου οδό ή όχι. Σε περίπτωση λοιπόν, **που λάβει την τιμή 1**, είναι κατανοητό από την παραπάνω μαθηματική εξίσωση ότι, ο αριθμός των εμπλοκών **μειώνεται κατά 5,361**. Αυτό ενδεχομένως, οφείλεται στο γεγονός ότι, ο συγκεκριμένος τύπος οδού έχει μόνο μία λωρίδα κυκλοφορίας, η οποία δεν ευνοεί την ανάπτυξη εμπλοκών αλλαγής λωρίδας. Ακόμη, το γεγονός ότι ο τύπος οδού αυτός, έχει μικρότερη χωρητικότητα, σε σχέση με έναν πρωτεύων (Primary) τύπο οδού, οδηγεί και στην ανάπτυξη μικρότερου αριθμού εμπλοκών.
- Η **αύξηση του βαθμού διεύθυνσης** των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR) **κατά 10%, αυξάνει τον αριθμό** των συγκρούσεων κατά **0,05**. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται ενδεχομένως στο γεγονός ότι, τα αυτόνομα οχήματα υιοθετούν με βάση τα δεδομένα του Κεφαλαίου 4, ένα λιγότερο επιθετικό προφίλ οδήγησης σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, παρόλα αυτά, αφήνουν μικρότερα ελεύθερα διαστήματα μεταξύ οχημάτων, στην προσπάθεια να βελτιστοποιήσουν την χωρητικότητα του δικτύου.
- Η **αύξηση** της μέγιστης παρατηρούμενης **ταχύτητας (MaxS)** της εμπλοκής, επιφέρει **μείωση** του αριθμού των **εμπλοκών**. Πιθανότητα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, αύξηση της ταχύτητας επιφέρει μία πιο ομοιόμορφα κατανομημένη κατάσταση κυκλοφορίας στο δίκτυο.
- Ο τύπος του δεύτερου οχήματος της εμπλοκής, όταν αυτό είναι **συμβατικό όχημα** και συγκεκριμένα **φορτηγό (SecondVehType_159)**, φαίνεται μέσω του μοντέλου να επηρεάζει **αρνητικά τον αριθμό των εμπλοκών**. Εφόσον η μεταβλητή αυτή, είναι μία από τις κατηγορίες της μεταβλητής της κατηγορίας του δεύτερου οχήματος της εμπλοκής (SecondVehType), μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση του 0, όπου το δεύτερο όχημα δεν είναι τέτοιου τύπου, η μεταβλητή αυτή, δεν επηρεάζει τον αριθμό των εμπλοκών. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που το δεύτερο όχημα της εμπλοκής είναι συμβατικό φορτηγό όχημα, και η μεταβλητή πάρει την τιμή 1, τότε ο **αριθμός των εμπλοκών μειώνεται κατά 6,385** συμβάντα. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά την μοντελοποίηση των συμβατικών οχημάτων για την εισαγωγή τους στο περιβάλλον προσομοίωσης, λήφθηκαν υπόψιν μεγαλύτερα ελεύθερα διαστήματα ασφαλείας σε σχέση με αυτόνομα οχήματα.
- Όταν ο τύπος του δεύτερου οχήματος είναι **αυτόνομο όχημα**, και συγκεκριμένα **φορτηγό (SecondVehType_9311)**, **ο αριθμός των εμπλοκών, επηρεάζεται αρνητικά**. Εφόσον και αυτή η μεταβλητή, αποτελεί μία από τις κατηγορίες της κατηγορικής μεταβλητής (SecondVehType), όταν το δεύτερο όχημα της εμπλοκής είναι τέτοιου τύπου, τότε ο αριθμός των εμπλοκών **μειώνεται κατά 9,163** συμβάντα. Η σχέση αυτή μεταξύ του αυτόνομου οχήματος και του αριθμού των εμπλοκών, επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι τα αυτόνομα οχήματα μοντελοποιήθηκαν, προκειμένου να εισαχθούν στην προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψιν ένα **λιγότερο**

επιθετικό προφίλ οδήγησης (μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση και επιβράδυνση), σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.

- Η ύπαρξη **πινακίδας σήμανσης «Stop» (ControlType_Stop)**, επηρεάζει **αρνητικά** τον αριθμό των εμπλοκών. Εφόσον η μεταβλητή αυτή, είναι μία από τις κατηγορίες της μεταβλητής του τύπου ελέγχου της οδού της εμπλοκής (ControlType) μπορεί να πάρει μόνο τις τιμές 0 και 1. Στην περίπτωση του 0, όπου το τμήμα της οδού, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εμπλοκή δεν ελεγχόταν από πινακίδα σήμανσης «Stop» η μεταβλητή αυτή, δεν επηρεάζει τον αριθμό των εμπλοκών. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση που η εκάστοτε εμπλοκή λαμβάνει χώρα σε οδό τέτοιου τύπου, και η μεταβλητή πάρει την τιμή 1, τότε ο συγκεντρωτικός αριθμός των εμπλοκών μειώνεται 10,259 εμπλοκές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η πινακίδα σήμανσης «Stop», επιβάλλει την στάση των οχημάτων, επομένως προσωρινή μείωση των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων αυτών.

5.3.3 Μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής (MaxS) – Μοντέλο 3

Έπειτα από πολλές δοκιμές, ως το καλύτερο μοντέλο για να εκφραστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής, προέκυψε ότι είναι εκείνο με εξαρτημένη μεταβλητή μέγιστη ταχύτητα που καταγράφηκε στο περιβάλλον της προσομοίωσης για το χρονικό διάστημα το οποίο ο χρόνος έως την εμπλοκή (TTC) ήταν μικρότερος του 1,5s, με ανεξάρτητες μεταβλητές:

- TTC
- MPR
- Capacity
- ConflictType_lane change
- SecondVehType_159
- SecondVehType_9311
- Road Type_180: Secondary (secondary)
- Road Type_182: Tertiary (tertiary)

Οι συσχετίσεις των μεταβλητών και τα αποτελέσματα για την ακρίβεια που προσφέρει το μοντέλο φαίνονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.6: Μοντέλο πρόβλεψης Μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών

Correlation Matrix								
	TTC	MPR	Capacity	ConflictType_lane change	Second VehType_159	SecondVeh Type_9311	Road Type_180: Secondary	Road Type_182: Tertiary (tertiary)
TTC	1.000	0.257	-0.133	-0.225	-0.184	0.088	0.025	-0.223
MPR	0.257	1.000	-0.020	-0.083	-0.120	0.058	0.061	-0.112
Capacity	-0.133	-0.020	1.000	0.102	-0.047	-0.023	0.027	-0.324
ConflictType_lane change	-0.225	-0.083	0.102	1.000	0.036	-0.011	-0.028	0.093
SecondVehType_159	-0.184	-0.120	-0.047	0.036	1.000	-0.018	-0.001	0.067
SecondVehType_9311	0.088	0.058	-0.023	-0.011	-0.018	1.000	-0.016	0.006
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.025	0.061	0.027	-0.028	-0.001	-0.016	1.000	-0.143
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-0.223	-0.112	-0.324	0.093	0.067	0.006	-0.143	1.000

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλου πρόβλεψης Μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)

Variables	Coefficient	St. Error	t	P> t
Constant	0.392	0.001	303.807	0.000
TTC	-0.310	0.001	-267.848	0.000
MPR	-0.040	0.001	-32.243	0.000
Capacity	0.215	0.002	138.616	0.000
ConflictType_lane change	0.064	0.001	48.277	0.000
SecondVehType_159	-0.008	0.002	-3.518	0.000
SecondVehType_9311	0.045	0.004	12.004	0.000
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.064	0.001	60.025	0.000
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	0.118	0.001	84.706	0.000
Adj. R-squared	0,447			

$$\text{MaxS} = 0.392 - 0.310 \cdot \text{TTC} - 0.040 \cdot \text{MPR} + 0.215 \cdot \text{Capacity} + 0.064 \cdot \text{ConflictType_lane change} - 0.008 \cdot \text{SecondVehType_159} + 0.045 \cdot \text{SecondVehType_9311} + 0.064 \cdot \text{Road Type_180: Secondary (secondary)} + 0.118 \cdot \text{Road Type_182: Tertiary (tertiary)}$$

5.3.3.1 Ποιότητα μοντέλου

Στο μοντέλο που προέκυψε ικανοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι:

- Ο συντελεστής προσαρμογής **R²** είναι υψηλός, ίσος με **0.447**,
- Ο έλεγχος του **t** να είναι μεγαλύτερος από 1,7 για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή επαληθεύεται,
- Το **επίπεδο σημαντικότητας** των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05,

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

5.3.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μοντέλου

Από τους συντελεστές του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου προκύπτει μια σειρά από ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- **Αύξηση του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC)**, προκαλεί **μείωση** της **μέγιστης παρατηρηθείσας ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)**. Το αποτέλεσμα αυτό, εξηγείται λογικά εφόσον, η ταχύτητα και ο χρόνος είναι εξ ορισμού αντιστρόφως ανάλογα μέγεθι.
- **Αύξηση του βαθμού διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων (MPR)**, προκαλεί **μείωση** της μέγιστης παρατηρηθείσας **ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)**. Το αποτέλεσμα αυτό, οφείλεται ενδεχομένως, στο γεγονός ότι τα αυτόνομα οχήματα αφενός αφήνουν μικρότερο ελεύθερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος και αφετέρου, στο γεγονός ότι, διαθέτουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται και να αντιδρούν σε πιθανά συμβάντα στην οδό, σε μικρότερο χρόνο.
- **Αύξηση της χωρητικότητας της οδού**, προκαλεί αύξηση της μέγιστης παρατηρηθείσας **ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)**. Αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, μεγαλύτερη χωρητικότητα οδού, συνδέεται με οδούς οι οποίες είναι προσαρμοσμένες σε μεγαλύτερες ταχύτητες.
- Ακόμη, εύκολα γίνεται κατανοητό μέσω του παραπάνω Πίνακα 5.6 ότι, αν ο τύπος της εμπλοκής είναι **αλλαγής λωρίδας (ConflictType_lane change)**, οπότε η κατηγορική μεταβλητή αυτή πάρει την τιμή 1, τότε η μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (**MaxS**), **αυξάνεται κατά 0.06 m/s**. Αυτό, ενδεχομένως έχει να κάνει με το γεγονός ότι, σε προσπάθεια προσπέρασης μέσω αλλαγής λωρίδας στο δίκτυο, οι χρήστες του δικτύου υιοθετούν μεγαλύτερη ταχύτητα.
- Στην περίπτωση που το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής είναι **συμβατικό βαρέου τύπου (SecondVehType_159)**, και η κατηγορική μεταβλητή αυτή λάβει την τιμή 1 τότε, η μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS), **μειώνεται** κατά 0.008 m/s. Αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, τα συμβατικά οχήματα υιοθετώντας ένα πιο επιθετικό προφίλ οδήγησης, παρουσιάζουν μεγαλύτερες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις.
- Στην περίπτωση που το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής είναι **αυτόνομο βαρέου τύπου (SecondVehType_9311)**, και η κατηγορική μεταβλητή αυτή λάβει την τιμή 1 τότε, η μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS), **αυξάνεται** κατά 0.044 m/s. Αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, τα αυτόνομα οχήματα αφήνοντας μικρότερα διαστήματα ελεύθερα μεταξύ οχημάτων, ταυτόχρονα χωρίς να εφαρμόζουν το ίδιο μεγάλες επιβραδύνσεις σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, φτάνουν στο σημείο εμπλοκής με μεγαλύτερη ταχύτητα.
- Στην περίπτωση που η **οδός είναι δευτερεύουσα (Road Type_180: Secondary (secondary))**, και η κατηγορική μεταβλητή αυτή πάρει την τιμή 1, η μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS), **αυξάνεται** κατά 0.064 m/s. Ο

συγκεκριμένος τύπος οδού αναπαριστά αυτοκινητόδρομο, επομένως είναι λογικό να επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων.

- Στην περίπτωση που η οδός είναι τριτεύουσα (Road Type_182: Tertiary (tertiary)), και η κατηγορική μεταβλητή αυτή πάρει την τιμή 1, η μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS), **αυξάνεται** κατά 0.118 m/s. Ο συγκεκριμένος τύπος οδού, αναπαριστά οδό που συνδέει μικρότερους οικισμούς ή οδό εντός μεγάλων οικισμών που συνδέει τοπικά κέντρα. Εφόσον ο τύπος αυτός, δεν είναι αυτοκινητόδρομος, είναι πιθανό οι χρήστες να συμπεριφέρονται με τρόπο ώστε να παρεμποδίζεται η κυκλοφορία (στάσεις, είσοδοι-έξοδοι από κατοικίες) επομένως, μπορεί να οδηγεί στην εμπλοκή των οχημάτων με λιγότερο ομαλό τρόπο (μεγαλύτερες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις).

5.3.4 Τύπος εμπλοκής (ConflictType) – Μοντέλο 4

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:

- MaxS
- MPR
- Capacity
- SpeedLimit
- SecondVehType_159
- ControlType_Stop
- RoadType_182: Tertiary

Οι συσχετίσεις των μεταβλητών και τα αποτελέσματα για την ακρίβεια που προσφέρει το μοντέλο φαίνονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.8: Μοντέλο πρόβλεψης Τύπου εμπλοκών-Συσχετίσεις ανεξάρτητων μεταβλητών

Correlation Matrix						
	MaxS	MPR	Speed Limit	SecondVehType_159	ControlType_Stop	Road Type_182: Tertiary (tertiary)
MaxS	1.000	-0.209	-0.069	0.097	-0.085	0.188
MPR	-0.209	1.000	0.053	-0.120	0.043	-0.112
Speed Limit	-0.069	0.053	1.000	-0.068	-0.241	-0.371
SecondVehType_159	0.097	-0.120	-0.068	1.000	0.012	0.067
ControlType_Stop	-0.085	0.043	-0.241	0.012	1.000	0.033
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	0.188	-0.112	-0.371	0.067	0.033	1.000

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 παλινδρόμηση. Σαν κατηγορία αναφοράς επιλέχθηκε ο τύπος εμπλοκής διέλευσης (crossing) επομένως, στον παραπάνω πίνακα

παρουσιάζονται τα μοντέλα πρόβλεψης των δύο άλλων τύπων της μεταβλητής, σε σχέση με την μεταβλητή αναφοράς.

Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά μεταβλητών μοντέλων πρόβλεψης τύπων εμπλοκών

Dependent Variable	Indendent Variables	Coefficient	St. Error	z	P> z
ConflictType=lane change	Constant	2.309	0.078	29.436	0.000
	MaxS	-0.091	0.002	-42.932	0.000
	MPR	0.009	0.000	27.924	0.000
	Speed Limit	-0.040	0.002	-26.259	0.000
	SecondVehType_159	-0.663	0.042	-15.706	0.000
	ControlType_Stop	-0.680	0.113	-6.015	0.000
	Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-0.745	0.028	-26.308	0.000
ConflictType=rear end	Constant	3.327	0.074	44.698	0.000
	MaxS	-0.350	0.002	-177.737	0.000
	MPR	0.018	0.000	61.456	0.000
	Speed Limit	0.012	0.001	8.262	0.000
	SecondVehType_159	-1.305	0.037	-34.808	0.000
	ControlType_Stop	0.808	0.082	9.802	0.000
	Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-1.425	0.025	-56.008	0.000

Μαθηματική σχέση:

- Μοντέλο 1 – ConflictType=lane change

$\ln[P(\text{ConflictType=lane change})/P(\text{ConflictType=crossing})] = 2.309 - 0.091 \cdot \text{MaxS} + 0.009 \cdot \text{MPR} - 0.04 \cdot \text{SpeedLimit} - 0.663 \cdot \text{SecondVehType_159} - 0.680 \cdot \text{ControlType_Stop} - 0.745 \cdot \text{Road Type_182: Tertiary (tertiary)}$

- Μοντέλο 2 – ConflictType=rear end

$\ln[P(\text{ConflictType=rear end})/ P(\text{ConflictType=crossing})] = 3.327 - 0.350 \cdot \text{MaxS} + 0.018 \cdot \text{MPR} + 0.012 \cdot \text{SpeedLimit} - 1.305 \cdot \text{SecondVehType_159} + 0.808 \cdot \text{ControlType_Stop} - 1.425 \cdot \text{Road Type_182: Tertiary (tertiary)}$

5.3.4.1 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:

- Ο έλεγχος του **z** να είναι μεγαλύτερος από 1,7 για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή επαληθεύεται,
- Το **επίπεδο σημαντικότητας** των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερο από 0,05.

5.3.4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μοντέλου

Από τους συντελεστές του παραπάνω μαθηματικού προκύπτει μια σειρά από ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- **Αύξηση της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής (MaxS)** κατά μία μονάδα, μειώνει κατά 0,091 μονάδες τον νεπερίο λογάριθμο του λόγου της πιθανότητας η εμπλοκή να είναι εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change), προς την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι εμπλοκή διέλευσης (crossing). Ακόμη, μειώνει κατά 0.305 μονάδες τον λογάριθμο της πιθανότητας η εμπλοκή να είναι οπίσθια (rear end), σε σχέση με την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι διέλευσης (crossing). Επομένως, αν υποθέσουμε ότι αυξάνεται μόνο η μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής (MaxS) κατά μία μονάδα και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές μένουν σταθερές, τότε **μειώνεται** η πιθανότητα η εμπλοκή να είναι **αλλαγής λωρίδας (lane change)**, συγκριτικά με το να είναι **εμπλοκή διέλευσης (crossing)**, κατά 1.095 ($e^{0.091}$) μονάδες. Το αποτέλεσμα αυτό, ενδεχομένως, προκύπτει από το γεγονός ότι, με την αύξηση της ταχύτητας επικρατεί μία πιο ομαλή κατάσταση στην κυκλοφορία του δικτύου, επομένως μειώνεται η επιθυμία των χρηστών για αλλαγή λωρίδας. Ακόμη, **μειώνεται** η πιθανότητα η εμπλοκή να είναι **αλλαγής οπίσθια (rear end)**, συγκριτικά με το να είναι εμπλοκή διέλευσης (crossing), κατά 1.356 ($e^{0.305}$) μονάδες, το οποίο πιθανότατα να έχει επίσης να κάνει με την πιο ομαλή κυκλοφοριακή ροή που πιθανότατα να επιφέρει η αύξηση της ταχύτητας. Συμπερασματικά, η αύξηση της ταχύτητας ευνοεί και την αύξηση των εμπλοκών διέλευσης (crossing).
- **Αύξηση του βαθμού διείσδυσης (MPR) κατά 10%, αυξάνει** την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι **αλλαγής λωρίδας (lane change)**, σε σχέση με την πιθανότητα να είναι διέλευσης (crossing), κατά 1.094 μονάδες. Αντίστοιχα, **αυξάνει την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι οπίσθια (rear end)**, σε σχέση με την πιθανότητα να είναι διέλευσης (crossing), κατά 1,197 μονάδες, πράγμα το οποίο συνάδει με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, και πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι τα αυτόνομα οχήματα αφήνουν μικρότερο ελεύθερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος.
- **Αύξηση του ορίου ταχύτητας (SpeedLimit) κατά μία μονάδα, μειώνει** την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι **αλλαγής λωρίδας (lane change)** κατά 1.040 μονάδες το οποίο ενδεχομένως, οφείλεται στο γεγονός ότι αύξηση του ορίου ταχύτητας επιφέρει πιο ομαλή κυκλοφοριακή ροή, επομένως μειώνεται η επιθυμία των χρηστών της οδού για αλλαγή λωρίδας. Παράλληλα, **αυξάνει** την πιθανότητα η εμπλοκή να είναι **οπίσθια (rear end)** κατά 1.012 φορές, το οποίο συνάδει με το γεγονός ότι σε υψηλότερες ταχύτητες δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος αντίδρασης των χρηστών της οδού.
- Όταν ο τύπος του δεύτερου οχήματος είναι **συμβατικό όχημα**, και συγκεκριμένα **φορτηγό (SecondVehType_159)**, και οι δύο λόγοι των πιθανοτήτων των **εμπλοκών αλλαγής λωρίδας (lane change)** και **οπίσθιας εμπλοκής (rear end)**, σε σχέση με την πιθανότητα να είναι εμπλοκή διέλευσης (crossing), **μειώνονται**. Επομένως, **αυξάνεται η πιθανότητα**, η εμπλοκή να είναι **διέλευσης (crossing)**. Το αποτέλεσμα αυτό, ενδεχομένως οφείλεται στο γεγονός ότι, τα φορτηγά οχήματα όντας πιο ογκώδη οχήματα, κινούνται πιο ομαλά στο δίκτυο, ενώ αφήνουν μεγαλύτερο διάστημα χωρίς κατάληψη οχήματος στην οδό, όπως ανφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.

- Όταν το τμήμα οδού της εμπλοκής ελέγχεται από πινακίδα **σήμανσης «Stop» (ControlType_Stop)**, τότε είναι κατά 1,973 μονάδες **λιγότερο πιθανό** η εμπλοκή να είναι **τύπου αλλαγής λωρίδας (lane change)**, συγκριτικά με την πιθανότητα να είναι εμπλοκή διέλευσης, ενώ παράλληλα είναι κατά 2,243 μονάδες **αυξημένη η πιθανότητα** η εμπλοκή να είναι **οπίσθια (rear end)** σε σχέση με την πιθανότητα να είναι εμπλοκή διέλευσης (crossing). Τα αποτελέσματα αυτά ενδεχομένως, οφείλονται στο γεγονός ότι, σε οδούς που ελέγχονται από πινακίδα σήμανσης «Stop», αφενός υπάρχει συνήθως μία λωρίδα κυκλοφορίας και αφετέρου εφόσον υπάρχει στάση οχήματος είναι μεγαλύτερη η πιθανότητα να υπάρχει οπίσθια σύγκρουση.
- Τέλος, στην περίπτωση που η οδός που λαμβάνει χώρα η εμπλοκή είναι τριτογενής (**Road Type_182: Tertiary (tertiary)**), δηλαδή είναι οδός που συνδέει μικρότερους οικισμούς ή οδός εντός μεγάλων οικισμών που συνδέει τοπικά κέντρα, και οι δύο λόγοι των πιθανοτήτων των **εμπλοκών αλλαγής λωρίδας (lane change)** και **οπίσθιας εμπλοκής (rear end)**, σε σχέση με την πιθανότητα η προβλεπόμενη, να είναι εμπλοκή διέλευσης (crossing), **μειώνονται**. Αυτό αφενός μπορεί να προκύπτει λόγω της ύπαρξης μίας λωρίδας στην οδό, όσον αφορά τις εμπλοκές τύπου αλλαγής λωρίδας και, αφετέρου λόγω του ότι επειδή η οδός είναι τριτογενής και δεν διασχίζει κατοικημένη περιοχή, είναι μικρότερη η πιθανότητα στάσης, όσον αφορά το αποτέλεσμα για τις οπίσθιες εμπλοκές.

5.3.4.3 Ανάλυση αξιοπιστίας μοντέλου

Το μοντέλο μηχανικής μάθησης που δημιουργήθηκε διαχώρισε το σύνολο των δεδομένων σε 80% σύνολο εκπαίδευσης (train), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα, και 20% σύνολο δοκιμής (test). Το εκπαιδευμένο μοντέλο αξιολογεί ένα σύνολο πιθανών κλάσεων υποθέσεων για να ελέγξει την απόδοση και ικανότητα γενίκευσης του. Η εσωτερική διαδικασία επικύρωσης του μοντέλου έχει να κάνει με την δοκιμή των δεδομένων εκπαίδευσης, όσον αφορά την απόδοση τους στην πρόβλεψη κλάσεων. Έτσι, δημιουργείται ο πίνακας σύγχυσης, ο οποίος περιγράφει την απόδοση του μοντέλου χρησιμοποιώντας την ταξινόμηση Newton. Περιγράφει τη σύνοψη των αληθών και ψευδών εκτιμήσεων του μοντέλου. Ο πίνακας σύγχυσης της πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.10: Πίνακας σύγχυσης πολυωνυμικού λογιστικού μοντέλου

Confusion Matrix				
	predicted_crossing	predicted_lane change	predicted_rear end	Ποσοστό επιτυχίας
crossing	4159	81	2815	59%
lane-change	1592	44	2970	1%
rear-end	1168	57	35544	97%

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα 5.10, το μοντέλο που δημιουργήθηκε έχει την ικανότητα να προβλέπει αν μία εμπλοκή θα είναι εμπλοκή διέλευσης σε ποσοστό 59%, εμπλοκή αλλαγής λωρίδας σε ποσοστό 1%, και οπίσθια εμπλοκή, σε ποσοστό 97%.

Πίνακας 5.11: Απόδοση μοντέλου

Class Report				
	Precision	Recall	f1-score (Sensitivity)	Support
crossing	0.600	0.590	0.590	7055
lane-change	0.360	0.010	0.020	4606
rear-end	0.860	0.970	0.910	36796
Accuracy Score	0,82			

6 Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ο προσδιορισμός της επιρροής της διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφοριακή ασφάλεια, αξιολογώντας δεδομένα προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται να εξεταστεί κατά πόσο η αύξηση του αριθμού αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο επηρεάζει δείκτες της κυκλοφοριακής ασφάλειας του δικτύου, όπως τον χρόνο έως την εμπλοκή, τη μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής, τον αριθμό και τον τύπο των εμπλοκών. Ακόμη, πραγματεύεται πόσο σημαντική είναι η εισχώρηση των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο σε σχέση με άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως η οδική υποδομή.

Για το σκοπό αυτό έγινε **ανάλυση δεδομένων προσομοίωσης**, η οποία αφορούσε το κυκλοφοριακό δίκτυο της περιοχής της Villaverde, στη Μαδρίτη. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψιν την ώρα αιχμής του υφιστάμενου κυκλοφοριακού δικτύου της περιοχής, και του δικτύου μεταφορών αυτής, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση έντεκα σεναρίων για διαφορετικούς ρυθμούς εισχώρησης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate-MPR), από 0% έως 100%. Καταγράφηκαν συνολικά 242.150 συμβάντα εμπλοκών, για τα οποία ο χρόνος έως τη εμπλοκή των δύο οχημάτων (TTC), ήταν μικρότερος από 1,5s. Για κάθε ένα από αυτά τα συμβάντα καταγράφηκαν επίσης κυκλοφοριακά δεδομένα (ταχύτητα, είδος εμπλεκόμενων οχημάτων κ.α.) και δεδομένα οδικής υποδομής (είδος οδού, χωρητικότητα, σήμανση κ.α.).

Καταρχήν, πραγματοποιήθηκε περιγραφική στατιστική ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων που οδήγησε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, μετά από κατάλληλη επεξεργασία και μία σειρά δοκιμών, αναπτύχθηκαν, με τις μεθόδους της γραμμικής παλινδρόμησης και της πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης, **τέσσερα μαθηματικά μοντέλα** που αποτυπώνουν τη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών του χρόνου έως τη εμπλοκή, της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής, του αριθμού και του τύπου των εμπλοκών, με τους παράγοντες του δικτύου από τους οποίους επηρεάζονται σε στατιστικά σημαντικό βαθμό. (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Μοντέλα πρόβλεψης ασφάλειας κυκλοφορίας

Ανεξάρτητες μεταβλητές	Μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης						Μοντέλο πολυωνμικής λογιστικής παλινδρόμησης			
	Χρόνος έως την εμπλοκή (TTC)		Αριθμός εμπλοκών		Μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής (MaxS)		Τύπος Εμπλοκής (ConflictType)			
							ConflictType=lane change		ConflictType=rear end	
	βi	t	βi	t	βi	t	βi	z	βi	z
MaxS	-0.826	-279.266	-0.678	-91.967	-	-	-0.091	-42.932	-0.350	-177.737
FirstWidth	0.025	7.270	-	-	-	-	-	-	-	-
SecondLength	-0.417	-125.452	-	-	-	-	-	-	-	-
MPR	0.125	62.953	0.007	5.537	-0.040	-32.243	0.009	27.924	0.018	61.456
ConflictType_lane change	-0.087	-40.636			0.064	48.277				
SecondVehType_159	-0.062	-15.756	-6.385	-56.951	-0.008	-3.518	-0.663	-15.706	-1.305	-34.808
SecondVehType_9311	0.398	64.724	-9.163	-53.939	0.045	12.004				
Road Type_180: Secondary (secondary)	0.079	44.962	-7.104	-88.979	0.064	60.025				
Road Type_182: Tertiary (tertiary)	-0.119	-57.139	-	-	0.118	84.706	-0.745	-26.308	-1.425	-56.008
ControlType_Stop	0.070	18.931	-10.259	-79.480	-	-	-0.680	-6.015	0.808	9.802
TTC	-	-	-	-	-0.310	-267.848				
Capacity	-	-	-	-	0.215	138.616				
Speed Limit	-	-	-	-	-	-	-0.040	-26.259	0.012	8.262
R-squared	0.461		0.335		0.447					
Accuracy Score							0.821			

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 το **χρόνο έως την εμπλοκή δύο οχημάτων (TTC)**, σχετίζονται σημαντικά με **κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά**, όπως είναι η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσουν τα οχήματα, το είδος των εμπλεκόμενων οχημάτων (αυτόνομα ή μη), τον βαθμό διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR), αλλά και **με χαρακτηριστικά της οδικής υποδομής** όπως τον τύπο οδού και την ύπαρξη ή μη, σήμανσης στο ενδιαφερόμενο τμήμα της οδού.
2. Όσον αφορά **τον αριθμό των εμπλοκών**, επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της οδού και των οχημάτων, και σε μικρότερο βαθμό από παράγοντες όπως η ταχύτητα και ο βαθμός διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, **όταν το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής** (αυτό που καταφτάνει δεύτερο στο σημείο εμπλοκής) **είναι αυτόνομο**, αυτό έχει πολύ μεγάλο αντίκτυπο στην μείωση του αριθμού των εμπλοκών διέλευσης και αλλαγής λωρίδας. Κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό, ίσως είναι η ικανότητα των αυτόνομων οχημάτων να αντιλαμβάνονται και να αντιμετωπίζουν συμβάντα στο δίκτυο, καταναλώνοντας πολύ μικρότερο χρόνο, σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.
3. Όσον αφορά **την μέγιστη παρατηρηθείσα ταχύτητα εμπλοκής (MaxS)**, σχετίζεται σημαντικά με τον χρόνο έως την εμπλοκή (TTC) όπως είναι λογικό. Ακόμη, η **αύξηση του βαθμού διεύθυνσης** των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (MPR), συμβάλλει στην **μείωση** της μέγιστης ταχύτητας εμπλοκής, πράγμα το οποίο περιορίζει τις σοβαρές επιπτώσεις που ενδέχεται να παρουσιάσει μία εμπλοκή σε όρους

τραυματισμών και καταστροφής περιουσίας. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν **το δευτερεύων όχημα** της εμπλοκής είναι **αυτόνομο** η μέγιστη ταχύτητα **αυξάνεται** ενώ, όταν είναι **συμβατικό** η μέγιστη ταχύτητα **μειώνεται**. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η αύξηση του βαθμού διεύθυνσης των αυτόνομων οχημάτων οδηγεί στη μείωση της μέγιστης ταχύτητας, πιθανόν να οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, δεν είναι ξεκάθαρη η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων σε όρους πρωτευόντων και δευτερευόντων οχημάτων εμπλοκών και χρειάζεται να μελετηθεί περαιτέρω. Τέλος, η μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής σχετίζεται τόσο με κυκλοφοριακά δεδομένα (χωρητικότητα δικτύου), όσο και με χαρακτηριστικά οδικής υποδομής.

4. Η εισχώρηση αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο, επηρεάζει **τον τύπο των εμπλοκών**. Στόχο της τεχνολογίας αυτόνομων οχημάτων αποτελεί η πιο ομαλή κυκλοφοριακή ροή και η αξιοποίηση του δικτύου σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό. Για τον λόγο αυτό, έχοντας ικανότητα γρηγορότερης αντίληψης και αντίδρασης σε ενδεχόμενο συμβάν, τα αυτόνομα οχήματα προγραμματίζονται λαμβάνοντας υπόψιν μικρότερα κενά χωρίς κατάληψη οχήματος ανάμεσα σε οχήματα. Αυτό, οδηγεί σε αύξηση των οπίσθιων (rear end) εμπλοκών, **αφενός λόγω των μικρότερων ελεύθερων διαστημάτων** είτε μεταξύ αυτόνομων, είτε μεταξύ αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων και αφετέρου, γιατί ενδεχομένως οι χρήστες συμβατικών οχημάτων υιοθετώντας ένα πιο «επιθετικό» προφίλ οδήγησης, **δεν μπορούν να αντιδράσουν εγκαίρως** στις αλληλεπιδράσεις τους με αυτόνομα οχήματα.
5. Σύμφωνα με τα όσα προέκυψαν από την στατιστική ανάλυση, όταν το δευτερεύων όχημα της εμπλοκής είναι **αυτόνομο**, τότε παρουσιάζει **καλύτερη συμπεριφορά** συγκριτικά με ένα **συμβατικό όχημα**. Συγκεκριμένα, τα αυτόνομα οχήματα έχοντας, όπως προαναφέρθηκε ικανότητα γρηγορότερης αντίληψης και αντίδρασης, σε σχέση με τα συμβατικά, αυξάνουν το χρόνο έως τη σύγκρουση ενώ επιδρούν σε μεγαλύτερη μείωση του αριθμού των εμπλοκών. Παρόλα αυτά, τα αυτόνομα οχήματα, όντας δευτερεύοντα οχήματα μιας εμπλοκής, αυξάνουν την μέγιστη ταχύτητα εμπλοκής, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρότερες επιπλοκές (τραυματισμοί, καταστροφή περιουσίας).
6. Ο τύπος των οχημάτων που παρουσίασε στατιστική σημαντικότητα κατά την διεξαγωγή της ανάλυσης στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ήταν **τα βαρέα οχήματα**, είτε αυτά ήταν συμβατικά, είτε ήταν αυτόνομα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι, τα οχήματα αυτά, έχοντας **μεγαλύτερο όγκο** και λόγω αυτού, **μικρότερη δυνατότητα επιβράδυνσης**, συμμετέχουν σε **περισσότερες εμπλοκές**.
7. Ο τύπος ελέγχου της οδού, ο οποίος αποδείχτηκε ότι ήταν στατιστικά σημαντικός παράγοντας στην επιρροή των εξαρτημένων μεταβλητών, ήταν η **πινακίδα σήμανσης «Stop»**. Η ύπαρξη τέτοιας πινακίδας σήμανσης **επιδρά θετικά** τόσο στην **αύξηση του χρόνου** έως την εμπλοκή, όσο και στη **μείωση του συνολικού αριθμού**. Παρόλα αυτά, αυξάνει, λόγω της στάσης οχημάτων που επιβάλλει, την πιθανότητα οπίσθιων (rear end) εμπλοκών.

8. Όσον αφορά **τον τύπο της οδού**, οι μόνοι τύποι οδού οι οποίοι αποδείχθηκαν στατιστικά σημαντικοί, ήταν οι δευτερεύουσες και οι τριτεύουσες οδοί. Η κυκλοφορία σε **δευτερεύουσες οδούς**, δηλαδή σε οδούς οι οποίες συγκροτούν το βασικό δίκτυο περαιτέρω κατανομής των μετακινήσεων μεταξύ επιμέρους πολεοδομικών ενοτήτων, **αυξάνει τον χρόνο έως την εμπλοκή και μειώνει τον συνολικό αριθμό εμπλοκών**, πιθανότατα λόγω των μικρότερων ορίων ταχύτητας.
9. Η κυκλοφορία σε **τριτεύουσες οδούς**, δηλαδή σε τοπικές οδους οι οποίες εξυπηρετούν μόνο την πρόσβαση και παραμονή στις επιμέρους γειτονίες και πολεοδομικές ενότητες, εξυπηρετούν χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους με ενδεικνυόμενο όριο ταχύτητας τα 30 χλμ/ώρα, **μειώνει τον χρόνο έως την εμπλοκή**, πιθανότητα λόγω επικράτησης μη ομοιόμορφης κυκλοφορίας, λόγω στάσεων, διασταύρωσης με τοπικές οδούς και ύπαρξη πινακίδων «Stop». Όσον αφορά τον τύπο των εμπλοκών, ο συγκεκριμένος τύπος οδού **ευνοεί την ανάπτυξη εμπλοκών διέλευσης (crossing)**, σε σχέση με τις εμπλοκές αλλαγής λωρίδας (lane change) και τις οπίσθιες εμπλοκές (rear end), πιθανότατα λόγω της ύπαρξης μίας μόνο λωρίδας κυκλοφορίας ανά ρεύμα κυκλοφορίας και της μη ύπαρξης διαχωριστικής νησίδας.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για την επέκταση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας και την περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου της, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ακόλουθες προτάσεις:

1. Εφόσον η τεχνολογία αυτόνομων οχημάτων εισέρχεται σταδιακά στο οδικό δίκτυο, θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον η **ανάλυση της συμπεριφοράς των χρηστών** συμβατικών οχημάτων **γύρω από αυτόνομα οχήματα** σε βάθος.
2. Επιπλέον, θα ήταν πολύ χρήσιμο να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα γύρω από την αλληλεπίδραση **πρωτεύοντος και δευτερεύοντος οχήματος εμπλοκής**, και την αλληλεπίδραση αυτών, για διαφορετικούς τύπους αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων.
3. Εφόσον κατά την στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, **τα οχήματα βαρέου τύπου** κρίθηκαν ως τα μόνα **στατιστικά** σημαντικά και έτσι μόνο αυτά συμμετείχαν στη δημιουργία μοντέλων, κρίνεται σκόπιμο να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες γύρω από την συμπεριφορά επιβατικών οχημάτων αλλά και βαρέων οχημάτων, ξεχωριστά, προκειμένου να αναλυθεί σε μεγαλύτερο βαθμό η συμπεριφορά τους ως αυτόνομα και επιβατικά οχήματα στο δίκτυο.
4. Θα ήταν σκόπιμο να διεξαχθεί αντίστοιχη μελέτη **σε επίπεδο μεγαλύτερου οδικού** δίκτυο, σε σχέση με εκείνο της παρούσας εργασίας, διότι πιθανόν να καθιστούσαν **ισχυρότερη την επιρροή των μεταβλητών** στα μοντέλα παλινδρόμησης.
5. Ακόμη, συγκεκριμένα για την περίπτωση των **εμπλοκών αλλαγής λωρίδας**, τα δεδομένα κρίθηκαν ανεπαρκή για τη σύσταση ενός μοντέλου με ικανοποιητική συμπεριφορά πρόβλεψης, λόγω της μικρής καταγραφής τέτοιου είδους εμπλοκών στη βάση δεδομένων.

Η μελέτη σε ευρύτερο δίκτυο, ενδεχομένως να απέφερε αποτελέσματα που θα μπορούσαν επαρκώς να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο θα προέβλεπε την ανάπτυξη ή μη, εμπλοκών αλλαγής λωρίδας σε ικανοποιητικό βαθμό.

7 Βιβλιογραφία

1. Toshiya Arakawa, 2018. TRIAL VERIFICATION OF HUMAN RELIANCE ON AUTONOMOUS VEHICLES FROM THE VIEWPOINT OF HUMAN FACTORS
2. European Commission, 5G-cross border corridors, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cross-border-corridors>, 18.12.2023
3. Special Eurobarometer 496,(2020). Expectations and concerns of connected and automated driving.
4. Qiyuan Zhang, Christopher D. Wallbridge, Dylan M. Jones, Phillip L. Morgan (2024). Public perception of autonomous vehicle capability determines judgment of blame and trust in road traffic accidents
5. Oikonomou M., Sekadakis M., Katrakazas C. and Yannis G (2022). Safety impacts of autonomous shuttle bus with different operational speeds towards increasing market penetration rate of connected and automated vehicles, Athens, Greece
6. Lanhang Ye, Toshiyuki Yamamoto (2019). Evaluating the impact of connected and autonomous vehicles on traffic safety
7. Daniel J. Fagnant, Kara Kockelman (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations
8. 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>
9. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM). <https://highways.dot.gov/research/safety/ssam/surrogate-safety-assessment-model-overview>
10. LEVITATE project <https://levitate-project.eu/>
11. 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
12. Favarò, F., Eurich, S., Nader, N., 2018. Autonomous vehicles' disengagements: Trends, triggers, and regulatory limitations. *Accid. Anal. Prev.* 110, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.11.001>

13. Dixit, V. V., Chand, S., Nair, D.J., 2016. Autonomous vehicles: Disengagements, accidents and reaction times. *PLoS One* 11, 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168054>
14. Favarò, F.M., Nader, N., Eurich, S.O., Tripp, M., Varadaraju, N., 2017. Examining accident reports involving autonomous vehicles in California. *PLoS One* 12, e0184952. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184952>
15. CA DMV, 2018a. Report of Traffic Collision Involving an Autonomous Vehicle [WWW Document]. URL https://www.dmv.ca.gov/portal/dmv/detail/vr/autonomous/autonomousveh_ol316+
16. Tibljaš, A.D., Giuffrè, T., Surdonja, S., Trubia, S., 2018. Introduction of Autonomous Vehicles: Roundabouts design and safety performance evaluation. *Sustain.* 10, 1–14. <https://doi.org/10.3390/su10041060>
17. Fagnant, D.J., Kockelman, K., 2015. Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
18. Meesmann, U., Torfs, K., Nguyen, H., Van den Berghe, W., 2018. Do we care about road safety? Key findings from the ESRA1 project in 38 countries. Brussels, Belgium: Vias institute.
19. Martínez-Díaz, M., Soriguera, F., 2018. Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges. *Transp. Res. Procedia* 33, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.103>
20. Ntousakis, I.A., Nikolos, I.K., Papageorgiou, M., 2015. On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. *Transp. Res. Procedia* 6, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.010>
21. 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., 1934. Contingency Tables Involving Small Numbers and the χ^2 Test. *R. Stat. Soc.* 1, 217–235.
22. Irene Overtoom, Gonçalo Correia, Yilin Huang, Alexander Verbraeck (2020). Assessing the impacts of shared autonomous vehicles on congestion and curb use: A traffic simulation study in The Hague, Netherlands
23. Milakis, D., Snelder, M., Van Arem, B., Van Wee, B., Correia, G., 2017. Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* 17, 63.

24. Litman, T., 2018. Autonomous vehicle implementation predictions: implications for transport planning. Victoria Transport Policy Institute. Technical report. Martinez, L., Viegas, J., 2017. Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: an agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *Int. J. Transp. Sci. Technol.* 6 (1), 13–27.
25. KpVV CROW, 2017a. Autodelen: Trends en ontwikkelingen op het gebied van duurzame en slimme mobiliteit. Technical report, KpVV CROW. . KpVV CROW, 2017b. Basiskennmerken wegontwerp – Categorisering en inrichting van wegen. In: CROW Kennismodule Basisinformatie, chapter 1. Kennisplatform CROW, Ede.
26. Nieuwenhuijsen, J., de Almeida, Homem, Correia, G., Milakis, D., van Arem, B., van Daalen, E., 2018. Towards a quantitative method to analyze the long-term innovation diffusion of automated vehicles technology using system dynamics. *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.* 86, 300–327.
27. European Commission, 2018. Europe on the Move: Connected & Automated Mobility: For a More Competitive Europe.
28. Hua Sha, Mohit Kumar Singh, Rajae Haouari, Evita Papazikou, Mohammed Quddus, Claire Quigley, Amna Chaudhry, Pete Thomas, Wendy Weijermars, Andrew Morris, 2024. Network-wide safety impacts of dedicated lanes for connected and autonomous vehicles
29. Amolika Sinhaa, Sai Chanda, Kasun P. Wijayaratnab, Navreet Virdia, Vinayak Dixitc 2020. Comprehensive safety assessment in mixed fleets with connected and automated vehicles: A crash severity and rate evaluation of conventional vehicles.