



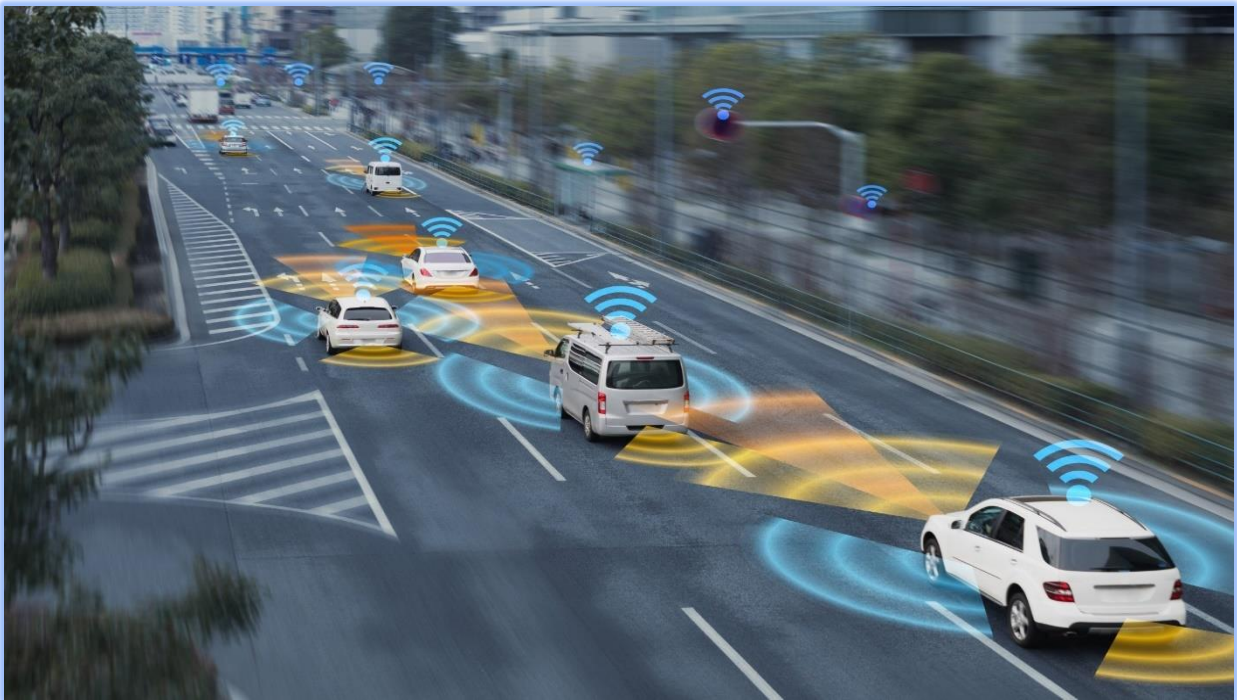
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

Διπλωματική Εργασία

# Διερεύνηση επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια με προσομοίωση κυκλοφορίας δικτύου



**Μαρία Τάκκα**

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γιώργο Γιαννή, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, την υποστήριξη του και την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της, καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία μας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Απόστολο Ζιακόπουλο, Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την καθοριστική βοήθεια που μου προσέφερε, για τη διαρκή συνεργασία και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Οικονόμου, υποψήφια Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια της μελέτης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθειά τους, για όλες τις παρατηρήσεις, συμβουλές και παραγωγικές υποδείξεις κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη και προσφορά τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, στους οποίους οφείλω και όλη μου τη διαδρομή μέχρι σήμερα. Επίσης, ευχαριστώ από καρδιάς όλους τους φίλους και συναδέλφους μου για την πολύτιμη υποστήριξη και ενθάρρυνση τους κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

Μαρία Τάκκα

# Διερεύνηση επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια με προσομοίωση κυκλοφορίας δικτύου

Μαρία Τάκκα

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

## Σύνοψη

Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η **διερεύνηση της επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια, με προσομοίωση της κυκλοφορίας**. Το δίκτυο προσομοίωσης αντιπροσωπεύει ένα μέρος της πόλης της Αθήνας. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν τρία σενάρια που διέφεραν ως προς το ποσοστό συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων. 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 οι κυκλοφοριακές συνθήκες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τμήματος του οδικού δικτύου. Για την ανάλυση των δεδομένων, αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης για το κάθε σενάριο ξεχωριστά. Από την εφαρμογή των μοντέλων, προέκυψε ότι το όριο ταχύτητας, η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος, η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος όπως παρατηρείται τη χρονική στιγμή ελάχιστου χρόνου σύγκρουσης, ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος, ο τύπος της εμπλοκής και η κυκλοφοριακή ικανότητα **έχουν σημαντική επιρροή στη προσομοιασμένη επικινδυνότητα, η οποία υποδηλώνει κρίσιμες συνθήκες για την πρόκληση ατυχήματος.**

**Λέξεις κλειδιά:** αυτόνομα οχήματα, κυκλοφορία, οδική ασφάλεια, μικροσκοπική προσομοίωση

# **Safety Impact Investigation of an automated shuttle service based on network traffic simulation**

Maria Takka

Supervisor: George Yannis, Professor NTUA

## **Abstract**

The aim of this Thesis is to **investigate the impact of autonomous minibus service on safety, with traffic simulation**. The simulation network represents a part of the city of Athens. Specifically, three scenarios were carried out that differed in terms of the percentage of conventional and autonomous vehicles. For each scenario, vehicle collisions were recorded, in which the time to collision was less than 1,5 seconds. For each such involvement, the traffic conditions and the geometric characteristics of the section of the road network were recorded. For data analysis, polynomial logistic regression models were developed for each scenario. From the application of the models, it emerged that the speed limit, the maximum deceleration of the second vehicle, the difference in vehicle speeds as observed at the minimum time-to-collision, the initial deceleration rate of the second vehicle, the type of conflict and the traffic capacity **have a significant influence on the simulated hazard, which indicates critical conditions for the occurrence of a crash.**

**Keywords:** autonomous vehicles, traffic, road safety, microscopic traffic simulation

## Περίληψη

Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η **διερεύνηση της επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια, με προσομοίωση της κυκλοφορίας**. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα μέσω των οποίων έχει προσδιοριστεί η **επιρροή διαφόρων μεταβλητών στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα**, η οποία υποδηλώνει κρίσιμες συνθήκες για την πρόκληση ατυχήματος.

Το δίκτυο προσομοίωσης αντιπροσωπεύει ένα μέρος της πόλης της Αθήνας. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν **τρία σενάρια** που διέφεραν ως προς το ποσοστό συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων. 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 οι κυκλοφοριακές συνθήκες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τμήματος του οδικού δικτύου. Με βάση το χρόνο έως την εμπλοκή, παράχθηκε η συνεχής μεταβλητή της προσομοιασμένης επικινδυνότητας, από την οποία προέκυψε η **διακριτή εξαρτημένη μεταβλητή κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash cat)** με βάση την διακριτοποίηση σε τρεις κατηγορίες.

Καταρχήν, πραγματοποιήθηκε περιγραφική **στατιστική ανάλυση** των διαθέσιμων δεδομένων που οδήγησε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, μετά από κατάλληλη επεξεργασία και δοκιμές, αναπτύχθηκαν **μαθηματικά μοντέλα**, για το κάθε σενάριο ξεχωριστά με τη μέθοδο **πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης**.

Πίνακας 1-1: Μοντέλα Πολυωνυμικής Λογιστικής Παλινδρόμησης

Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Μοντέλα Πολυωνυμικής Λογιστικής Παλινδρόμησης											
	Α-Σενάριο				Β-Σενάριο				Γ-Σενάριο			
	middle vs low:		high vs low:		middle vs low:		high vs low:		middle vs low:		high vs low:	
	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )
(Intercept)	1.205	0.106	0.311	0.810	1.296	<b>0.017</b>	0.456	0.279	1.532	<b>0.014</b>	0.183	0.929
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-2.465	<b>0.010</b>	-2.555	0.093	-2.109	<b>0.005</b>	-0.818	0.181	-1.810	<b>0.019</b>	-3.840	0.123
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-2.854	<b>0.001</b>	-3.262	<b>0.030</b>	-2.576	<b>&lt;0.001</b>	-2.107	<b>&lt;0.001</b>	-1.991	<b>0.006</b>	-4.086	0.099
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	-1.322	0.127	0.294	0.844	0.986	0.135	0.802	0.124	-1.710	<b>0.020</b>	1.486	0.538
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-2.127	<b>0.014</b>	-1.535	0.304	-1.623	<b>0.010</b>	-0.986	<b>0.043</b>	-1.876	<b>0.010</b>	-0.083	0.973
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-2.097	<b>0.015</b>	-3.247	<b>0.030</b>	-1.692	<b>0.008</b>	-2.068	<b>&lt;0.001</b>	-1.381	0.058	-4.291	0.083
MaxD	-0.003	<b>&lt;0.001</b>	0.064	<b>&lt;0.001</b>	0.005	0.087	0.161	<b>&lt;0.001</b>	-0.005	<b>&lt;0.001</b>	0.129	<b>&lt;0.001</b>
DR	-0.001	0.683	-0.042	<b>&lt;0.001</b>	-0.013	<b>0.007</b>	-0.140	<b>&lt;0.001</b>	0.016	<b>&lt;0.001</b>	-0.111	<b>&lt;0.001</b>
DeltaS	0.063	<b>&lt;0.001</b>	0.054	<b>&lt;0.001</b>	0.054	<b>&lt;0.001</b>	-0.017	<b>&lt;0.001</b>	0.062	<b>&lt;0.001</b>	0.046	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTypeplane change	0.881	<b>&lt;0.001</b>	0.545	<b>&lt;0.001</b>	0.465	<b>&lt;0.001</b>	-0.444	<b>&lt;0.001</b>	0.783	<b>&lt;0.001</b>	0.181	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTyperear end	0.658	<b>&lt;0.001</b>	1.385	<b>&lt;0.001</b>	0.642	<b>&lt;0.001</b>	1.914	<b>&lt;0.001</b>	0.583	<b>&lt;0.001</b>	1.068	<b>&lt;0.001</b>
Capacity	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>

Κατά τα διάφορα στάδια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας προέκυψε μια σειρά συμπερασμάτων, όπως συνοψίζονται ακολούθως:

1. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών σεναρίων διάδοσης αυτόνομων οχημάτων (A, B, Γ), παρατηρείται ότι υπάρχει **συνάφεια των στατιστικά σημαντικών μεταβλητών** ως προς την εμφάνιση μέσης ή υψηλής επικινδυνότητας σε σχέση με τη χαμηλή επικινδυνότητα. Η μόνη έντονη διαφοροποίηση σημαντικότητας παρατηρείται στη μεταβλητή ορίου ταχύτητας. Συνεπώς οι εξεταζόμενες μεταβλητές παραμένουν **κρίσιμες ως προς την επιρροή τους στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα ανεξαρτήτως του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων** στο δίκτυο.
2. Οι εξεταζόμενες μεταβλητές, μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος (MaxD), διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος όπως παρατηρείται τη χρονική στιγμή ελάχιστου χρόνου σύγκρουσης (DeltaS), τύπος εμπλοκής (Conflict Type) και κυκλοφοριακή ικανότητα (Capacity) έχουν σημαντική επιρροή στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα.
3. Στο Σενάριο B (συμβατικά και αυτόνομα οχήματα) η μεταβλητή **ConflictType rear end** για τη κατηγορία μεσαίου κινδύνου (middle) έχει πολύ υψηλό λόγο πιθανοτήτων (odds ratio). Το υψηλό αυτό odds ratio σε συνδυασμό με τη στατιστική σημαντικότητα και τη θετική τιμή συντελεστή (coefficient estimate), δείχνει ότι **η νωτομετωπική εμπλοκή αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη κατηγορία μεσαίου κινδύνου**. Στο σενάριο A (συμβατικά) ο λόγος πιθανοτήτων ισούται με 4 και στο Γ σενάριο (αυτόνομα) είναι πολύ χαμηλότερος 2.91. Η συνύπαρξη αυτών των δύο ειδών οχημάτων δημιουργεί αυξημένους κινδύνους, πιθανώς λόγω διαφορετικών συμπεριφορών. Σε ένα πλήρως αυτόνομο δίκτυο, οι πιθανότητες μειώνονται σημαντικά.
4. Όσο το **όριο ταχύτητας (Speed Limit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται. Αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία των ορίων ταχύτητας για τη πρόληψη των ατυχημάτων.
5. Όσον αφορά τον **τύπο εμπλοκής (Conflict type)**, όταν είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης και άρα η επικινδυνότητα αυξάνονται σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).
6. Όσον αφορά τη **διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος (DeltaS)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες. Αυτή είναι μια λογική συσχέτιση καθώς τα οχήματα όπου κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες είναι πιο πιθανό να βρεθούν σε καταστάσεις κινδύνου όπως προσπεράσεις και φρεναρίσματα. Όσο αφορά το Odds Ratio οι τιμές είναι ελαφρώς πάνω από το ένα, άρα η αύξηση είναι μικρή αλλά σταθερή. Το p-value είναι πολύ χαμηλό, επομένως η μεταβλητή αυτή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη πρόκληση συγκρούσεων.
7. Όσον αφορά την **κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού (Capacity)** στο πίνακα των εκτιμήσεων, η επιρροή της έχει αρνητική τιμή (κάτω από 0.001) και είναι στατιστικά σημαντική σε όλα τα σενάρια. Στο πίνακα με τα Odds Ratios έχει τιμή ίση με τη μονάδα σε όλα τα σενάρια. Άρα κάθε αλλαγή μιας μεμονωμένης μονάδας της κυκλοφοριακής

ικανότητας έχει πολύ μικρό αντίκτυπο. Όταν όμως η κυκλοφοριακή ικανότητα αυξηθεί αισθητά, η επικινδυνότητα πέφτει με βάση το αρνητικό της πρόσημο.

8. Όσον αφορά τη **μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος (DR)** για τη μεσαία κατηγορία κινδύνου το odds ratio είναι ελάχιστα πάνω τη μονάδα. Ενώ όσο αφορά την υψηλή κατηγορία κινδύνου το odds ratio ισούται με τη μονάδα άρα η επίδραση είναι πολύ μικρή.
9. Και στα τρία σενάρια οι **κεντρικές οδοί (Arterials)** εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσομοιωμένη επικινδυνότητα ατυχημάτων, δηλαδή είναι πιο πιθανό να συμβούν ατυχήματα με βάση την προσομοίωση στο συγκεκριμένο τύπο οδού. Οι σηματοδοτημένοι οδοί (Signalized Street) και οι κανονικοί (Street) εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων άρα είναι πιο ασφαλείς. Ενώ όσον αφορά τους αυτοκινητόδρομους (Freeway), δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το μέσο όρο του δείγματος.
10. Η **πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση** αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για την ανάλυση των στοιχείων όταν η εξαρτημένη μεταβλητή λαμβάνει πολλές κατηγορίες. Τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία προσφέρουν μια αξιόπιστη εικόνα χρήσιμη για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b> .....	14
1.1	Γενική Ανασκόπηση.....	14
1.1.1	Ορισμοί.....	14
1.1.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	15
1.1.3	Αξιολόγηση Ασφάλειας .....	17
1.1.4	Τρέχουσα Κατάσταση αυτόνομων οχημάτων στην Ευρώπη.....	17
1.2	Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας.....	18
1.3	Μεθοδολογία.....	19
1.4	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	20
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b> .....	22
2.1	Εισαγωγή.....	22
2.2	Ανάλυση ερευνών.....	22
2.3	Σύνοψη αποτελεσμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	29
<b>3</b>	<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο</b> .....	30
3.1	Εισαγωγή.....	30
3.2	Βασικές έννοιες στατιστικής.....	30
3.3	Βασικές Μέθοδοι Στατιστικής Ανάλυσης.....	31
3.3.1	Γραμμική Παλινδρόμηση.....	32
3.3.2	Πιθανοτική Ανάλυση.....	32
3.3.3	Λογιστική Παλινδρόμηση.....	32
3.3.4	Σύνοψη.....	33
3.4	Λογιστική Παλινδρόμηση (Logistic Regression).....	33
3.5	Πολυσυσχετιστικότητα (Multicollinearity) & VIF (Variance Inflation Factor).....	35
3.6	Στατιστική αξιολόγηση και Κριτήρια αποδοχής μοντέλου.....	36
<b>4</b>	<b>Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων</b> .....	37
4.1	Εισαγωγή.....	37
4.2	Συλλογή Δεδομένων.....	37
4.2.1	Δίκτυο προσομοίωσης.....	37
4.2.2	Σενάρια προσομοίωσης.....	38
4.2.3	Παράμετροι προσομοίωσης.....	39
4.2.4	Εξαγωγή εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας.....	40
4.3	Κωδικοποίηση δεδομένων.....	41
4.4	Επεξεργασία στοιχείων και περιγραφική στατιστική ανάλυση.....	48

4.4.1	Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της γωνιάς υποθετικής εμπλοκής μεταξύ συγκρουόμενων οχημάτων, με βάση την εκτιμώμενη πορεία κάθε οχήματος (ConflictAngle)..	49
4.4.2	Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της μέγιστης τιμής DeltaV (FirstDeltaV ή SecondDeltaV) οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή (MaxDeltaV).....	52
4.4.3	Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και του τύπου εμπλοκής (ConflictType).....	55
4.4.4	Σχέση του ορίου ταχύτητας (Speed_Limit_C) και της κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash_Cat).....	58
4.5	Σύνοψη .....	61
<b>5</b>	<b>Εφαρμογή Μεθοδολογιών-Αποτελέσματα.....</b>	<b>63</b>
5.1	Εισαγωγή.....	63
5.2	Στατιστικό πρότυπο πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης .....	63
5.2.1	Αλγόριθμος ανάλυσης.....	63
5.2.2	Αποτελέσματα μοντέλων πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης .....	65
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>82</b>
6.1	Σύνοψη.....	82
6.2	Συμπεράσματα.....	83
6.3	Προτάσεις χρησιμότητας και αξιοποίησης αποτελεσμάτων.....	84
6.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	85
	<b>Βιβλιογραφικές Αναφορές .....</b>	<b>86</b>
	<b>Παράρτημα.....</b>	<b>88</b>

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4-1: Σενάρια Προσομοίωσης .....	39
Πίνακας 4-2: Παράμετροι αυτόνομων οχημάτων για τη μοντελοποίηση τους στη μικροσκοπική προσομοίωση .....	40
Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Α .....	66
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Β.....	70
Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Γ .....	74
Πίνακας 6-1: Μοντέλα Πολυωνυμικής Λογιστικής Παλινδρόμησης.....	82

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-1: Ροή Σταδίων Διπλωματικής Εργασίας.....	20
Διάγραμμα 4-1: Αριθμός παρατηρήσεων σε κάθε κατηγορία επικινδυνότητας για κάθε σενάριο ....	48
Διάγραμμα 4-2: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle , A-Σενάριο .....	49
Διάγραμμα 4-3: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle, B-Σενάριο .....	50
Διάγραμμα 4-4: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle, Γ-Σενάριο.....	51
Διάγραμμα 4-5: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), A-Σενάριο .....	52
Διάγραμμα 4-6: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), B-Σενάριο .....	53
Διάγραμμα 4-7: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), Γ-Σενάριο .....	54
Διάγραμμα 4-8: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC), A-Σενάριο ..	55
Διάγραμμα 4-9: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC),B-Σενάριο ...	56
Διάγραμμα 4-10: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC),Γ-Σενάριο..	57
Διάγραμμα 4-11: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed_Limit_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash_Cat),A-Σενάριο .....	58
Διάγραμμα 4-12: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed_Limit_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash_Cat),B-Σενάριο .....	59
Διάγραμμα 4-13: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed_Limit_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash_Cat),Γ-Σενάριο .....	60
Διάγραμμα 5-1: Τυχηματικές επιδράσεις, A-Σενάριο .....	69
Διάγραμμα 5-2: Τυχηματικές επιδράσεις, B-Σενάριο .....	73
Διάγραμμα 5-3: Τυχηματικές επιδράσεις, Γ-Σενάριο .....	77
Διάγραμμα 5-4: Odds Ratios, A-Σενάριο .....	78
Διάγραμμα 5-5: Odds Ratios, B-Σενάριο .....	80
Διάγραμμα 5-6: Odds Ratios, Γ-Σενάριο .....	81

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 4-1: Δίκτυο προσομοίωσης .....	38
Εικόνα 4-2: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής Conflict Angle. ....	43
Εικόνα 4-3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής ClockAngle.....	44
Εικόνα 5-1: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Α (Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικυνδινότητας Middle και High)	67
Εικόνα 5-2: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Β (Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικυνδινότητας Middle και High)	71
Εικόνα 5-3: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Γ (Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικυνδινότητας Middle και High)	75

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενική Ανασκόπηση

Η **αυτοματοποίηση** των οχημάτων, της κυκλοφορίας και της κινητικότητας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη τόσο στην κοινωνία όσο και στην οικονομία σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ενσωμάτωση αυτόματων οχημάτων στη κυκλοφορία αποτελεί μια νέα πραγματικότητα, επιφέροντας σταδιακές ριζικές αλλαγές στον τρόπο μετακίνησης των ανθρώπων. Τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να κυκλοφορούν στο οδικό δίκτυο χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, αξιοποιώντας κατάλληλα διαμορφωμένα συστήματα αισθητήρων (ραντάρ, λέιζερ, κάμερες), λογισμικού και άλλων οργάνων. Ωστόσο, η **αξιολόγηση της ασφάλειας** είναι η πιο κρίσιμη πτυχή στην διείσδυση της αυτοματοποίησης στην κυκλοφορία. Η εξασφάλιση ότι τα οχήματα αυτά μπορούν να λειτουργούν με ασφάλεια σε διάφορες συνθήκες αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποδοχή και την ενσωμάτωση τους στην καθημερινή ζωή. Απώτερος στόχος είναι η πλήρης αυτοματοποίηση, που ενδεχομένως να προσφέρει αύξηση αποδοτικότητας, μείωση των ατυχημάτων και δημιουργία πιο βιώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον πόλεων.

### 1.1.1 Ορισμοί

#### **Αυτόνομο Όχημα:**

Ένα **αυτόνομο όχημα** είναι ένα όχημα που μπορεί να λειτουργεί με μειωμένη ή χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Είναι υπεύθυνο για όλες τις λειτουργίες οδήγησης, όπως η αντίληψη του περιβάλλοντος, η παρακολούθηση σημαντικών συστημάτων και ο έλεγχος του οχήματος. Η αυτοματοποίηση των οχημάτων, της κυκλοφορίας και της κινητικότητας έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει την αυτοκινητοβιομηχανία, το κόστος μετακίνησης, τον αστικό σχεδιασμό, την κυκλοφορία, την ασφάλεια και άλλους τομείς. Προσφέρουν οφέλη όπως μεγαλύτερη ασφάλεια, αυξημένη αποδοτικότητα και μειωμένες εκπομπές ρύπων, ενώ παρέχουν την ευκαιρία σε ηλικιωμένους και ανθρώπους με αναπηρίες να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της μετακίνησής τους χωρίς να πρέπει να οδηγήσουν.

#### **Επίπεδα Αυτονομίας:**

Η **κατηγοριοποίηση** των αυτόνομων οχημάτων γίνεται σύμφωνα με τον διεθνή Σύνδεσμο Μηχανικών Αυτοκινήτων – Σ.Μ.Α. (Society of Automotive Engineers – S.A.E.) σε **έξι επίπεδα** (Summary of SAE International’s Levels of Driving Automation for On-Road Vehicles, 2014) όπου κυμαίνονται από το Επίπεδο 0 (χωρίς αυτοματοποίηση οδήγησης) έως το Επίπεδο 5 (πλήρης αυτοματοποίηση οδήγησης).

Η Εθνική Διοίκηση Κυκλοφοριακής Ασφάλισης Αυτοκινητοδρόμων των Η.Π.Α. (NHTSA) έχει υιοθετήσει την κατηγοριοποίηση της SAE από το 2016. Στόχος της κατηγοριοποίησης είναι η

ύπαρξη σαφήνειας και η ενημέρωση του κοινού για τις διάφορες εποχές της τεχνολογίας αυτής.

Κάθε όχημα διαθέτει διαφορετικής πολυπλοκότητας συστήματα ανάλογα με το επίπεδο στο οποίο έχει σχεδιαστεί να ανταποκρίνεται. Τα επίπεδα χωρίζονται με βάση το «ποιος κάνει τί, πότε».

Τα επίπεδα αυτά είναι:

- **Επίπεδο 0 - Χωρίς αυτοματισμό οδήγησης:** Ο οδηγός είναι πλήρως υπεύθυνος για τον έλεγχο του οχήματος. Τα οχήματα του επιπέδου αυτού είναι χειροκίνητα.
- **Επίπεδο 1 - Υποστήριξη οδηγού:** Το αυτόνομο σύστημα του οχήματος παρέχει βοήθεια στον οδηγό σε συγκεκριμένα σημεία της οδήγησης.
- **Επίπεδο 2 - Μερικός αυτοματισμός οδήγησης:** Το αυτόνομο σύστημα του οχήματος μπορεί να εκτελέσει συγκεκριμένα σημεία της οδήγησης, ενώ ο οδηγός συνεχίζει να παρακολουθεί το περιβάλλον και να εκτελεί το υπόλοιπο της οδήγησης.
- **Επίπεδο 3 - Αυτοματισμός οδήγησης υπό όρους:** Το αυτόνομο σύστημα του οχήματος μπορεί να εκτελέσει συγκεκριμένα σημεία της οδήγησης και να επιβλέπει το περιβάλλον σε ορισμένες περιπτώσεις. Ο οδηγός πρέπει να είναι έτοιμος να αναλάβει την οδήγηση όταν κρίνεται αναγκαίο και το σύστημα δεν μπορεί πλέον να λειτουργήσει.
- **Επίπεδο 4 - Υψηλός αυτοματισμός οδήγησης:** Υπό συγκεκριμένες κυκλοφοριακές συνθήκες το αυτόνομο σύστημα του οχήματος μπορεί να έχει τον πλήρη έλεγχο της οδήγησης χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από τον οδηγό.
- **Επίπεδο 5 - Πλήρης αυτοματισμός οδήγησης:** Σε όλες τις κυκλοφοριακές συνθήκες το αυτόνομο σύστημα του οχήματος μπορεί να έχει τον πλήρη έλεγχο της οδήγησης χωρίς να απαιτείται παρέμβαση από τον οδηγό. Παρά τη δυνατότητα αυτή, ο οδηγός έχει την επιλογή να αναλάβει τον έλεγχο αν το επιθυμεί χωρίς η επιλογή αυτή να είναι απαραίτητη.

Η εξέλιξη των επιπέδων αυτοματισμού επιτρέπει σταδιακά την αποδοχή και ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων, οδηγώντας τελικά σε ένα κόσμο με πλήρης αυτοματοποίηση. Τα οχήματα **επιπέδου 3 και άνω θεωρούνται αυτόνομα** οχήματα. Η διαφορά μεταξύ των επιπέδων 2 και 3 είναι σημαντική. Στο επίπεδο 2 την ευθύνη για την οδήγηση έχει ο οδηγός, αντίθετα στο επίπεδο 3 το αυτόνομο σύστημα μπορεί να διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες οδήγησης.

#### 1.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όπως κάθε καινούργια τεχνολογία, τα αυτόνομα οχήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα.

### **Πλεονεκτήματα:**

- Μεγαλύτερη ασφάλεια: Τα αυτόνομα οχήματα αναμένεται να μειώσουν τα οδικά ατυχήματα, ελαχιστοποιώντας τους θανάτους και τους τραυματίες.
- Απαλλαγή από το άγχος και τη πίεση του οδηγού: Τα αυτόνομα οχήματα διαχειρίζονται την αυξημένη κίνηση στις οδούς, προσφέροντας πιο άνετες μετακινήσεις χωρίς την ανάγκη για συνεχή προσοχή από τον οδηγό. Αυτό μειώνει τη ψυχολογική πίεση που βιώνουν οι οδηγοί, ειδικά σε δύσκολες κυκλοφοριακές συνθήκες και σε πυκνοκατοικημένες πόλεις όπου η εύρεση χώρου στάθμευσης αποτελεί πρόβλημα.
- Αυξημένη κινητικότητα του πληθυσμού: Δίνεται ευκαιρία σε ηλικιωμένους και ανθρώπους με αναπηρίες να αποκτήσουν το δικό τους όχημα και να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες της μετακίνησης τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αποδέσμευση των συνοδηγών τους και τη μείωση χρήσης ταξί ή Μέσων Μαζικής Μεταφοράς.
- Αύξηση της αποδοτικότητας κατανάλωσης καυσίμων και μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων.
- Μείωση κυκλοφοριακής συμφόρησης και αύξηση χωρητικότητας οδού: Αυτό επιτυγχάνεται με μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των οχημάτων.

### **Μειονεκτήματα:**

- Αύξηση κόστους υποδομών: Αναβάθμιση και προσαρμογή υποδομών (οδοί, σήματα και κυκλοφοριακά συστήματα), προκειμένου να μπορούν να υποστηρίξουν τη τεχνολογία των αυτόνομων οχημάτων.
- Ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων: Τα αυτόνομα οχήματα συλλέγουν και επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των κινήσεων των χρηστών. Αυτό προκαλεί ανησυχίες σχετικά με τη προστασία της ιδιωτικότητας.
- Μείωση θέσεων εργασίας οδηγών, μηχανικών και εργαζομένων Μέσων Μαζικής Μεταφοράς: Αυτή η αλλαγή θα επιφέρει σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις για τους εργαζόμενους.
- Ζητήματα αξιοπιστίας ή αστοχίας του λογισμικού: Τα αυτόνομα οχήματα βασίζονται σε σύνθετα λογισμικά που μπορεί να περιέχουν σφάλματα. Τυχόν αποτυχίες μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα.
- Εφαρμογή κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου: Η ανάπτυξη και η χρήση αυτόνομων οχημάτων απαιτεί ρυθμιστικό πλαίσιο για θέματα ασφάλειας και ευθύνης. Η έλλειψη αυτού του πλαισίου μπορεί να οδηγήσει σε νομικά προβλήματα.
- Απώλεια εμπειρίας οδήγησης: Σε περίπτωση ανάγκης οι οδηγοί μπορεί να μην είναι σε θέση να αναλάβουν τον έλεγχο του οχήματος, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνες καταστάσεις.



### 1.1.3 Αξιολόγηση Ασφάλειας

Η **αξιολόγηση της ασφάλειας** είναι η πιο **κρίσιμη πτυχή στην ανάπτυξη του αυτοματισμού**. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) σε ετήσια βάση, περίπου 1.19 εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους λόγω ατυχημάτων. Μάλιστα τα τροχαία ατυχήματα είναι η κύρια αιτία θανάτου για άτομα ηλικίας 5 μέχρι 29 ετών. Περισσότεροι από τους μισούς θανάτους αφορούν ευάλωτους χρήστες όπως πεζούς, μοτοσικλετιστές και ποδηλάτες. Τα περισσότερα ατυχήματα συμβαίνουν λόγω υπερβολικής ταχύτητας, χρήσης κινητού τηλεφώνου και κατανάλωσης αλκοόλ. Η αύξηση κατά 1% στη μέση ταχύτητα οδηγεί σε αύξηση κινδύνου για θάνατο κατά 4% και για σοβαρό τραυματισμό 4%. Επίσης η χρήση κινητού τηλεφώνου κατά τη διάρκεια της οδήγησης αυξάνει το κίνδυνο για ατύχημα περίπου τέσσερις φορές. Η προσοχή των οδηγών αποσπάται, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση χρόνων αντίδρασης και τη δυσκολία να είναι στη σωστή λωρίδα κυκλοφορίας.

Ο οργανισμός **National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)** εκτιμά ότι το 94% των ατυχημάτων οφείλεται σε **ανθρώπινο λάθος**. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα αυτόνομα οχήματα θα πρέπει να συμβάλουν στη μείωση των τροχαίων καθώς θα υπάρχει πλήρης επίγνωση του περιβάλλοντος και συνεχής επικοινωνία. Οι ανθρώπινες συμπεριφορές αυξάνουν τα ατυχήματα, ενώ η αυτοματοποιημένη οδήγηση εξαλείφοντας τον ανθρώπινο παράγοντα μειώνει τα ατυχήματα. Επιπλέον, η βελτίωση της ασφάλειας επιφέρει βελτιώσεις και σε άλλους τομείς. Για παράδειγμα, στον τομέα της Υγείας θα εξοικονομηθούν σημαντικά ποσά για την φροντίδα ατόμων λόγω οδικών ατυχημάτων. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η αυτόνομη οδήγηση θα εισάγει νέους κινδύνους, καθώς οποιαδήποτε αστοχία του λειτουργικού τους συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε ατύχημα. Τέλος, προκειμένου η αυτοματοποιημένη οδήγηση να είναι ασφαλής θα πρέπει να εξαλειφθούν οι κίνδυνοι.

### 1.1.4 Τρέχουσα Κατάσταση αυτόνομων οχημάτων στην Ευρώπη

Η **ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων** βρίσκεται σε ένα σημαντικό στάδιο. Στόχος είναι η Ευρώπη να είναι παγκόσμιος ηγέτης στην ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας. Αρκετές εταιρείες δοκιμάζουν τα οχήματα αυτά στις οδούς και βελτιώνουν τις τεχνολογίες τους. Με την εξέλιξη των αυτόνομων οχημάτων όμως αναμένονται μερικά προβλήματα. Αρχικά, το **σημαντικότερο στοιχείο είναι η ασφάλεια**. Οι αποφάσεις που παίρνει το όχημα επηρεάζουν τις ανθρώπινες ζωές. Επίσης, μπορεί να υπάρξουν δυσκολίες σε απρόβλεπτες συμπεριφορές των πεζών ή σε κακές καιρικές συνθήκες. Ακόμη, η διαδικασία νομοθετικών πλαισίων είναι αργή. Υπάρχει δυσκολία ώστε η νομοθεσία να είναι σαφής για την ασφαλή ενσωμάτωσή τους. Όσον αφορά το κοινό, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την αξιοπιστία των αυτόνομων οχημάτων. Είναι απαραίτητο οι άνθρωποι να αναπτύξουν εμπιστοσύνη και να αποδεχθούν τη χρήση τους. Όσον αφορά την υποδομή η υπάρχουσα κατάσταση δεν είναι επαρκής. Θα πρέπει να υπάρξουν αναβαθμίσεις και βελτιώσεις. Η ραγδαία ανάπτυξη τους

αναμένεται να συνεχίσει αλλά η επιτυχής ενσωμάτωση τους θα εξαρτηθεί από την επίλυση αυτών των προβλημάτων.

Η επίτευξη του **Vision Zero** στοχεύει στην **πλήρη εξάλειψη των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων** στους ευρωπαϊκούς δρόμους, θέτοντας την **ασφάλεια** και την **αξία της ανθρώπινης ζωής** στο επίκεντρο. Για τη πραγματοποίηση αυτής της φιλοδοξίας θα πρέπει η Ευρωπαϊκή Ένωση, ιδιωτικοί φορείς, κράτη μέλη, περιφερειακές και τοπικές αρχές, να συνεργαστούν για ένα κοινό όραμα. Σε μια σύγχρονη εποχή, η Ευρώπη πρέπει να είναι ηγέτης στην παροχή ασφαλούς, αποτελεσματικής, κοινωνικά υπεύθυνης και φιλικής προς το περιβάλλον κινητικότητας χωρίς οδηγό για τους πολίτες της ΕΕ.

Τον Νοέμβριο του 2019, ο κανονισμός (ΕΕ) 2019/2144 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με τις απαιτήσεις έγκρισης τύπου μηχανοκίνητων οχημάτων καθόρισε ειδικές απαιτήσεις σχετικά με τα αυτόνομα οχήματα και τα πλήρως αυτόνομα οχήματα. Ο νόμος αυτός εφαρμόζεται από το 2022. Τον Απρίλιο του 2022, η ΕΕ κυκλοφόρησε μια πρόχειρη έκδοση νομοθεσίας για οχήματα με συστήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης (ADS). Τον Ιούλιο του 2022, τίθεται σε ισχύ ο νέος «Κανονισμός Γενικής Ασφάλειας Οχημάτων» που θεσπίζει το νομικό πλαίσιο για την έγκριση αυτοματοποιημένων και πλήρως χωρίς οδηγό οχημάτων (Επίπεδο 3 και άνω) στην ΕΕ. Μάλιστα, η ΕΕ εισήγαγε κανονισμούς που απαιτούν όλα τα νέα αυτοκίνητα από τις 6 Ιουλίου 2022 να διαθέτουν έξυπνη υποβοήθηση ταχύτητας (ISA) (Επίπεδο 2). Η αυτοματοποιημένη ανάπτυξη οχημάτων αντιμετωπίζεται από διάφορους ευρωπαϊκούς κανονισμούς.

## 1.2 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Οι επιπτώσεις στην οδική ασφάλεια από την αυξανόμενη κυκλοφορία των αυτόνομων οχημάτων στο οδικό δίκτυο δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα. Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η **διερεύνηση της επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια, με προσομοίωση της κυκλοφορίας.**

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, πραγματοποιήθηκε **στατιστική ανάλυση** των δεδομένων εμπλοκών που προέκυψαν από προσομοίωση της κυκλοφορίας σε οδικό δίκτυο στο κέντρο της Αθήνας. Για τη διερεύνησή αυτή, θα αναπτυχθούν **μαθηματικά μοντέλα** μέσω των οποίων θα προσδιοριστεί η **επιρροή διαφόρων μεταβλητών στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα**, η οποία υποδηλώνει κοντινές συνθήκες για τη δημιουργία ενός ατυχήματος.

Τελικός στόχος είναι τα **συμπεράσματα** που θα εξαχθούν από τη παρούσα Διπλωματική Εργασία να είναι χρήσιμα στη **βελτίωση της ασφάλειας** και στη **διαχείριση αυτής της νέας τεχνολογικής εξέλιξης.**

### 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.

Διεξήχθη αρχικά μια σύντομη έρευνα στο Διαδίκτυο με σκοπό την εμβάθυνση στο ευρύτερο πεδίο των αυτόνομων οχημάτων και την απόκτηση μιας ολοκληρωμένης εικόνας σχετικά με την τεχνολογία και τις τελευταίες εξελίξεις. Επιπλέον, συγκεντρώθηκε επαρκής διεθνής **βιβλιογραφία** με τη μορφή επιστημονικών άρθρων και ερευνών.

Χρησιμοποιήθηκε η **μέθοδος της προσομοίωσης** ώστε να κατανοηθεί η αλληλεπίδραση συγκεκριμένων παραγόντων στη δημιουργία ατυχήματος σε **τρία διαφορετικά σενάρια**. Στο **A-Σενάριο**, τα συμβατικά οχήματα ήταν σε ποσοστό 100%, στο **B-Σενάριο** υπήρχαν 40% συμβατικά, 40% 1ης γενιάς αυτόνομα οχήματα και 20% 2ης γενιάς αυτόνομα οχήματα, ενώ στο **Γ-Σενάριο** τα αυτόνομα οχήματα ήταν μόνο 2<sup>ης</sup> γενιάς σε ποσοστό 100%. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση των αυτόνομων οχημάτων, καθώς παρέχει ένα ελεγχόμενο περιβάλλον που μπορούν να δοκιμαστούν διάφορα σενάρια χωρίς το κίνδυνο πραγματικών ατυχημάτων.

Τα στοιχεία κωδικοποιήθηκαν κατάλληλα με σκοπό την **στατιστική τους ανάλυση**. Με βάση τα μοντέλα ακολούθησε η διαδικασία της αξιολόγησης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων **σχετικά με το βαθμό επιρροής της εκάστοτε μεταβλητής στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα**, η οποία υποδηλώνει κοντινές συνθήκες για τη δημιουργία ενός ατυχήματος. Τα αποτελέσματα θα αναλυθούν **ανά σενάριο και συγκριτικά**. Τα στοιχεία αυτά είναι χρήσιμα για τη διατύπωση προτάσεων για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, αλλά και για περαιτέρω έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

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



περιλαμβάνεται η κωδικοποίηση των δεδομένων, ώστε να εισαχθούν στη γλώσσα προγραμματισμού R.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται και αναλύονται τα τελικά **μαθηματικά μοντέλα** που παρήχθησαν από τη στατιστική επεξεργασία των στοιχείων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρατίθενται συνοπτικά τα **συμπεράσματα** της διπλωματικής εργασίας, ενώ παράλληλα τονίζεται η χρησιμότητά τους. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζονται **προτάσεις** που αφορούν την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της έρευνας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθενται οι βιβλιογραφικές **αναφορές** και τα **παραρτήματα**, η παρουσίαση των οποίων συμβαδίζει με όλα τα διεθνή πρότυπα.

## 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αφορά τη **βιβλιογραφική ανασκόπηση** που πραγματοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας. Περιλαμβάνει σχετικές έρευνες, με σκοπό τον προσδιορισμό του αντικειμένου της εργασίας και την επιλογή μεθοδολογιών. Αναζητήθηκαν μελέτες τόσο σε εγχώριο όσο και σε διεθνές επίπεδο. Μέσω της ανάλυσης και σύνθεσης τους, προκύπτει μια ολοκληρωμένη εικόνα καθώς και χρήσιμα συμπεράσματα.

### 2.2 Ανάλυση ερευνών

Κοντινή από άποψη μεθοδολογίας είναι η έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους **Yannis et al. (2023)**, με αντικείμενο την **ανάπτυξη αυτόνομων και διασυνδεδεμένων οχημάτων (CAVs)**, με τη **μέθοδο μικροσκοπικής προσομοίωσης**. Συγκεκριμένα από τις συγκρούσεις προκύπτουν τα ατυχήματα. Σύμφωνα με μια μελέτη (Talebian and Mishra, 2018), οι τιμές θα μειωθούν με σημαντικούς ρυθμούς περίπου 15-20% ετησίως. Τα οχήματα αυτά αναμένεται να οδηγήσουν στην αύξηση της οδικής χωρητικότητας, στη μείωση των χρόνων ταξιδιών και ταυτόχρονα στη μείωση της ρύπανσης. Ακόμη, θα βελτιωθεί η οδική ασφάλεια καθώς θα υπάρχουν λιγότερες συγκρούσεις και χαμηλότερη σοβαρότητα ατυχημάτων, εξαλείφοντας τα ανθρώπινα λάθη, τα οποία είναι η βασική αιτία ατυχημάτων .

Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SSAM, συγκεκριμένα **εντοπίστηκαν οι συγκρούσεις και μετατράπηκαν σε ποσοστό ατυχημάτων**. Τα ποσοστά είναι χαμηλότερα όταν έχω υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης της αγοράς MPRs των CAVs (περισσότερο από 20% μείωση) και όταν το επόμενο όχημα στη σύγκρουση είναι 2ης γενιάς CAV. Προσομοιώθηκαν οκτώ σενάρια που δοκιμάζουν την ανάπτυξη CAV στο δίκτυο για διαφορετικά MPR από 0 έως 100%.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AimsunNext. Καταγράφηκαν δεδομένα όγκου κυκλοφορίας και οι μετρήσεις πεδίου ενσωματώθηκαν στο μοντέλο. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Google Maps API επαληθεύτηκαν οι μέσοι χρόνοι ταξιδιού. Υπήρχαν **σενάρια με διαφορετικούς ρυθμούς εισχώρησης των αυτόνομων οχημάτων (MPR)** στο δίκτυο. Εφαρμόστηκε μια μέθοδος που προτάθηκε από τον Tarko (2018), η οποία βασίζεται σε κατανομές του χρόνου έως τη σύγκρουση Time-To-Collision (TTC).

Για τη πρόβλεψη μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων χρησιμοποιείται η γραμμική παλινδρόμηση. Μορφές γραμμικής παλινδρόμησης είναι η Log Linear Regression (LLR) και η Μικτή Λογιστική- Γραμμική Παλινδρόμηση (MLLR). Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε η προγραμματιστική γλώσσα R και συγκεκριμένα το πακέτο lme4 . Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της λογαριθμικής πιθανότητας

(ANOVA) μεταξύ των μοντέλων μικτών επιδράσεων με το μοντέλο σταθερών επιδράσεων. Το καταλληλότερο μοντέλο επιλέχθηκε αυτό με την ελάχιστη τιμή AIC.

Μελετήθηκε το κέντρο της Αθήνας και η περιοχή σχεδιάστηκε στο λογισμικό Aimsun Next. Χρησιμοποιήθηκε η πρωινή ώρα αιχμής και έγινε σύγκριση των χρόνων ταξιδιού. Τα οχήματα κατηγοριοποιήθηκαν σε επιβατικά αυτοκίνητα, βαρέα φορτηγά, λεωφορεία και τρόλεϊ. Συλλέχθηκαν χαρακτηριστικά γεωμετρίας δικτύου, συγκεκριμένα ο αριθμός των λωρίδων, ο αριθμός γραμμών δημόσιας συγκοινωνίας, το όριο ταχύτητας, η χωρητικότητα, και το μήκος λωρίδας. Υπήρχαν δεδομένα κίνησης κάθε δευτερόλεπτο. Τα δεδομένα κυκλοφορίας αφορούσαν τη ροή, τη πυκνότητα, τη διαδρομή, το χρόνο και την απόσταση.

Έχουν πραγματοποιηθεί **δοκιμές** ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να αντιστοιχούν σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Σύμφωνα με την Federal Highway administration (FHWA), εάν πάνω από 85% των περιπτώσεων παρουσιάζουν τιμές του στατιστικού Geoffrey E. Heavers (GEH) μικρότερες από πέντε, τότε είναι επιτυχής.

Τα οχήματα χωρίζονται σε **δύο γενιές**. Όσον αφορά την 1η γενιά (προσεκτική), τα οχήματα εστιάζουν στην ασφάλεια και στην αξιοπιστία πάνω από την απόδοση ή την ταχύτητα. Θα μπορούσαν να έχουν μια συντηρητική προσέγγιση ως προς τις αποφάσεις που λαμβάνουν σε περίπλοκες καταστάσεις κυκλοφορίας. Οι αλγόριθμοι είναι συντηρητικοί καθώς και οι προδιαγραφές αυστηρότερες για τις συνθήκες λειτουργίας και τον έλεγχο του οχήματος. Τα οχήματα μεταφοράς εμπορευμάτων δηλαδή τα φορτηγά προσομοιώθηκαν ως CAV 1ης γενιάς. Ενώ όσον αφορά τη 2η γενιά (επιθετική) εστιάζουν πιθανότατα στην απόδοση τους και στην αποφυγή καθυστερήσεων στις μετακινήσεις. Πραγματοποιούν πιο τολμηρές κινήσεις όπως αλλαγές λωρίδας ή αύξηση ταχύτητας για ελαχιστοποίηση του χρόνου.

Ακολούθως, **πραγματοποιήθηκε ανάλυση της ασφάλειας**. Το λογισμικό SSAM επεξεργάστηκε δεδομένα που αφορούν τη τροχιά του οχήματος, δηλαδή τη διαδρομή που ακολουθεί καθώς κινείται και εντόπισε συγκρούσεις. Το λογισμικό παρέχει και τη θέση των συγκρούσεων ως προς το οδικό τμήμα που συνέβησαν. Ως μια σύγκρουση ορίζεται όταν ο χρόνος TTC και ο χρόνος PET είναι χαμηλότερος από τα προκαθορισμένα ελάχιστα όρια. Ο χρόνος PET (Post Encroachment Time) αναφέρεται στο χρονικό διάστημα μετά από μια σύγκρουση όταν οι οδηγοί πρέπει να αντιδράσουν και να αντιμετωπίσουν τις συνέπειες της σύγκρουσης. Ενώ, ο χρόνος TTC (Time To Collision) περιγράφει το χρονικό διάστημα που απομένει μέχρι την πιθανή σύγκρουση. Αναλύει την απόσταση και την ταχύτητα των οχημάτων για να προβλέψει πότε θα συμβεί μια πιθανή σύγκρουση. Ο χρόνος TTC ισούται με 1,5 δευτερόλεπτα για συμβατικά οχήματα, 1 δευτερόλεπτο για τη 1η γενιά οχημάτων και 0,5 για τη 2η γενιά ενώ ο χρόνος PET ισούται με 5 δευτερόλεπτα.

Πρόέκυψαν διάφορα **συμπεράσματα**. Αρχικά, οι πίσω συγκρούσεις ήταν σε χαμηλά ποσοστά ενώ οι συγκρούσεις αλλαγή λωρίδας σε υψηλά ποσοστά. Ακόμη, το ποσοστό μειώνεται όταν το επόμενο όχημα είναι αυτόνομο 2ης γενιάς, ενώ αυξάνεται όταν το επόμενο όχημα είναι επιβατικό με ανθρώπους. Επίσης, υψηλές διακυμάνσεις στην ταχύτητα προκαλούν περισσότερες συγκρούσεις και περισσότερες λωρίδες αυξάνουν τις ευκαιρίες σύγκρουσης.

Τέλος, τα ποσοστά ατυχημάτων είναι χαμηλότερα όταν υπάρχουν περισσότερες γραμμές δημόσιας συγκοινωνίας.

Πρόσφατη έρευνα, από τους **Yannis et al. (2024)** με αντικείμενο την **αξιολόγηση ασφάλειας σε αυτοματοποιημένες υπηρεσίες μεταφοράς με λεωφορείο**, χρησιμοποιεί τη μέθοδο **μικροσκοπικής προσομοίωσης**, για τη διερεύνηση των επιπτώσεων. Τα Συνδεδεμένα και Αυτόνομα Οχήματα (CAV) έχουν τη δυνατότητα να επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων μεταφορών και οδικών μεταφορών. Συγκεκριμένα, αναμένεται να ενισχύσουν την οδική χωρητικότητα, να βελτιώσουν την απόδοση καυσίμων και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές εκπομπές. Η κυριαρχία τους αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική μείωση ατυχημάτων. Εστιάζοντας στις δημόσιες συγκοινωνίες, ο αυτοματισμός αναμένεται να προχωρήσει γρήγορα.

Μελετήθηκε ένα πυκνό αστικό δίκτυο κυκλοφορίας που βρίσκεται στη Μαδρίτη της Ισπανίας. Υλοποιήθηκε αυτόνομη γραμμή λεωφορείου η οποία σχεδιάστηκε για να λειτουργεί παράλληλα με τα υπάρχοντα μέσα μαζικής μεταφοράς. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Aimsun Next στο οποίο ενσωματώθηκαν ρεαλιστικά δεδομένα από το δίκτυο και την κίνηση. Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού SSAM έχουν **εντοπιστεί οι συγκρούσεις** και έχουν κατηγοριοποιηθεί. Υπήρχαν τρεις διαφορετικοί τύποι σύγκρουσης, αλλαγής λωρίδας (lane change), νωτομετωπική (rear end), και τύπου διέλευσης (crossing conflict). Εντός του λογισμικού, εντοπίζεται μια σύγκρουση όταν ο χρόνος TTC και ο χρόνος μετά PET είναι χαμηλότεροι από τα προκαθορισμένα όρια, με 1,5 δευτερόλεπτα και 5,0 δευτερόλεπτα προεπιλεγμένες τιμές, αντίστοιχα. Στην παρούσα έρευνα, η τιμή TTC ήταν διαφορετική λόγω της μικρότερης απόστασης ακινησίας και ορίστηκε σε 0,5 δευτερόλεπτα αντί για 1,5 δευτερόλεπτο. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν **στατιστικά μοντέλα** με στόχο τον εντοπισμό των παραγόντων που συμβάλλουν στις συγκρούσεις.

Χρησιμοποιήθηκε πολυωνυμική λογαριθμική παλινδρόμηση μικτών επιδράσεων (MEMLMs). Το κατάλληλο μοντέλο επιλέγεται ως εκείνο με τη μικρότερη υπολειπόμενη απόκλιση και μεγαλύτερες διαφορές στην απόκλιση κατά τη σύγκριση διαδοχικών μοντέλων. Αυτό προσδιορίζεται με τη μέθοδο ANOVA (Analysis of Variance), χρησιμοποιώντας τη δοκιμή λογαριθμικής πιθανότητας.

Τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα στο χαμηλότερο MPR για συγκρούσεις νωτομετωπικές, ενώ οι συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας έχουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα σε υψηλότερο MPR. Οι αυξήσεις του PET σχετίζονται με τα μειωμένα περιθώρια αλλαγής λωρίδας. Υψηλότερο MPR και υψηλότερη μέγιστη διαφορά ταχύτητας (MaxDeltaV) μεταξύ οχημάτων οδηγεί σε μειωμένες πιθανότητες ότι μια σύγκρουση θα είναι της αλλαγής λωρίδας ή πίσω μέρους. Με άλλα λόγια, περισσότερα CAV στο δίκτυο ή οχήματα με μεγαλύτερες διαφορές ταχύτητας οδηγούν σε περισσότερες συγκρούσεις τύπου διέλευσης. Επιπλέον, διαφορετικοί τύποι ελέγχου και κανένας τύπος ελέγχου γενικά αυξάνουν την πιθανότητα αλλαγής λωρίδας ή συγκρούσεις πίσω μέρους, σε σχέση με τον τύπο ελέγχου



«Give way». Η μόνη εξαίρεση είναι ο τύπος ελέγχου «Stop» που μειώνει την πιθανότητα αλλαγής λωρίδας μόνο σε σύγκριση με τις συγκρούσεις τύπου διέλευσης, ενώ αυξάνει το πίσω άκρο.

Σε σύγκριση με τις κύριες οδούς, η κυκλοφορία σε οποιονδήποτε άλλο τύπο οδού οδηγεί σε μειωμένες πιθανότητες, αν η σύγκρουση είναι τύπου αλλαγής λωρίδας ή πίσω άκρου σε σύγκριση με τις συγκρούσεις διέλευσης. Επιπλέον υψηλότερα όρια ταχύτητας οδηγούν σε περισσότερες συγκρούσεις στο πίσω μέρος, αλλά λιγότερες συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας σε σύγκριση με συγκρούσεις τύπου διέλευσης. Όσον αφορά τις παραμέτρους του πρώτου (προπορευόμενου) και του δεύτερου (επόμενου) οχήματος, η κατεύθυνση, το πλάτος, το μήκος και ο τύπος πρώτου οχήματος φαίνεται ότι μειώνουν την αλλαγή λωρίδας ή τις συγκρούσεις στο πίσω άκρο σε σύγκριση με τις συγκρούσεις τύπου διέλευσης. Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη κατεύθυνση αυξάνει τις πιθανότητες αλλαγής λωρίδας ή συγκρούσεις στο πίσω μέρος. Οι δεύτεροι (ακόλουθοι) τύποι οχημάτων εκτός από τα συμβατικά λεωφορεία δημιουργούν περισσότερες συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας, αλλά λιγότερες συγκρούσεις στο πίσω μέρος σε σύγκριση με τις συγκρούσεις διέλευσης, εκτός από τα λεωφορεία που παράγουν και τα δύο. Η λωρίδα κίνησης για τα πρώτα οχήματα αυξάνει την πιθανότητα αλλαγής λωρίδας και συγκρούσεων στο πίσω μέρος. Για τα δεύτερα οχήματα, η πιθανότητα συγκρούσεων στο πίσω μέρος μειώνεται ομοίως, ενώ οι συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας αυξάνονται.

Σύμφωνα με την μελέτη που πραγματοποίησαν **οι Essa & Sayed (2015)** αξιολογήθηκε η **ασφάλεια με χρήση προσομοιωμένων συγκρούσεων**. Στόχος τους ήταν η μεγιστοποίηση της συσχέτισης μεταξύ των συγκρούσεων στο πεδίο και των προσομοιωμένων συγκρούσεων.

Η **παραδοσιακή ανάλυση οδικής ασφάλειας**, βασίζεται στη χρήση ιστορικών δεδομένων σύγκρουσης, και είναι μια προσέγγιση που προσφέρει ελλιπής κατανόηση των μηχανισμών σύγκρουσης και της λειτουργίας των μέτρων ασφαλείας. Επιπλέον, συνδέεται με πολλές ελλείψεις όπως η κακή ποιότητα και η περιορισμένη διαθεσιμότητα δεδομένων. Ακόμη, οι συγκρούσεις πρέπει να καταγράφονται σε μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να διεξαχθεί μια σωστή αξιολόγηση ασφαλείας.

Η **τεχνική του TCT** περιλαμβάνει την καταγραφή και αξιολόγηση της συχνότητας και σοβαρότητας. Το TCT επικρίνεται συνήθως για το υψηλό κόστος συλλογής δεδομένων και την αξιοπιστία της μη αυτόματης συλλογής των δεδομένων σύγκρουσης. Με την ανάπτυξη του μοντέλου αξιολόγησης ασφάλειας SSAM, γίνεται εκτίμηση των κυκλοφοριακών συγκρούσεων χρησιμοποιώντας προσομοιωμένες τροχιές οχημάτων από τέσσερα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα προσομοίωσης: VISSIM, AIMSUN, PARAMICS και TEXAS. Χρησιμοποιούνται ο χρόνος μέχρι τη σύγκρουση TTC, χρόνος PET, ρυθμός επιβράδυνσης DR, ταχύτητα MaxS και διαφορά ταχύτητας (DeltaS). Οι συγκρούσεις ταξινομούνται σε τρεις τύπους, πίσω άκρο, αλλαγή λωρίδας, και τύπου διέλευσης. Οι συγκρούσεις προσδιορίζονται με βάση τη γωνία σύγκρουσης και τα συγκεκριμένα όρια για TTC και PET.

Αρκετοί ερευνητές έθεσαν ανησυχίες σχετικά με τη χρήση προσομοιωμένων συγκρούσεων (Tarko et al., 2005; Saunier et al., 2007). Πρώτο, τα οχήματα στα μοντέλα προσομοίωσης ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες με στόχο την αποφυγή σύγκρουσης. Επομένως, είναι δύσκολο να αναπαρασταθεί ένα μη ασφαλές όχημα. Δεύτερον, υπάρχουν πολλοί παράμετροι στα μοντέλα, οι οποίοι έχουν σημαντικό αντίκτυπο. Επίσης, υπάρχουν διάφοροι τρόποι μοντελοποίησης (γεωμετρία δρόμου, κανόνες προτεραιότητας, περιοχές συγκρούσεων, κατανομή κυκλοφορίας). Επομένως, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.

Έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους **Youssef El-Hansali et al. (2021)** δείχνει ότι **τα αυτόνομα οχήματα βελτιώνουν την ασφάλεια, συγκεκριμένα ο αριθμός ατυχημάτων μειώθηκε κατά περίπου 12%**. Μεταφέρθηκαν τα δεδομένα από το εργαλείο VISSIM στο SSAM. Το SSAM επεξεργάζεται ένα χρονικό βήμα προσομοίωσης κάθε φορά και ελέγχει για συγκρούσεις κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες οριακές τιμές TTC(1,5 δευτερόλεπτα) και PET(5 δευτερόλεπτα). Το SSAM παρέχει δεδομένα για την ίδια την κυκλοφοριακή εμπλοκή (ή προσομοιαζόμενη σύγκρουση) όπως ο τύπος σύγκρουσης, η θέση της σύγκρουσης, η γωνία, η ταχύτητα και η επιτάχυνση οχημάτων πριν και μετά τη σύγκρουση. Υπάρχουν τρεις τύποι συγκρούσεων διέλευση, πίσω άκρο και αλλαγή λωρίδας. Αρκετές έρευνες έχουν διερευνήσει τα πιθανά οφέλη των αυτόνομων οχημάτων και έχουν δείξει ότι μπορούν να μειώσουν συγκρούσεις, να διευκολύνουν τη συμφόρηση, να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου και να παρέχουν ευελιξία σε άτομα που δεν έχουν πρόσβαση στις μεταφορές, συμπεριλαμβανομένων των ηλικιωμένων και των ατόμων με αναπηρία.

Σε μελέτη τους, **Zhang et al. (2015)** κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατό να εξαλειφθεί το 90% της ζήτησης στάθμευσης με χαμηλό ποσοστό διείσδυσης στην αγορά (MPR) 2%.

Στις **ΗΠΑ**, σε μελέτη **Singh, S. (2015)**, οι ανθρώπινοι παράγοντες αποδείχθηκε ότι επηρεάζουν το 94% των ατυχημάτων.

**Yang et al. (2017)**, ανακάλυψε ότι όταν το MPR φτάσει στο 25%, ο κίνδυνος δευτερογενών ατυχημάτων μπορεί να μειωθεί κατά περισσότερο από 33% σε συνθήκες μεγάλου όγκου. Επιπλέον, εάν ο όγκος της κυκλοφορίας είναι υψηλός, ο κίνδυνος δευτερογενών ατυχημάτων μπορεί να είναι μειωμένος κατά περίπου 10% σε χαμηλά επίπεδα MPR περίπου 5%.

Ακόμη μία έρευνα που τους διεξήχθη από τους **Ye & Yamamoto (2019)** είχε ως στόχο τη μελέτη της **επίδρασης των αυτόνομων οχημάτων στην οδική ασφάλεια**. Οι άνθρωποι αναμένουν ότι με την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, θα μειωθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση αλλά και τα ατυχήματα. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η εξοικονόμηση καυσίμων

και η μείωση της ρύπανσης. Ωστόσο, σε ποιο βαθμό μπορεί να βελτιωθεί το τρέχον σύστημα μεταφορών μέσω της ανάπτυξης αυτής της νέας τεχνολογίας είναι άγνωστη. Η κατάσταση μιας μικτής ροής κυκλοφορίας στο δρόμο ταυτόχρονα θα διαρκέσει για μεγάλη χρονική περίοδο. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) εξακολουθεί να **εξελίσσεται** με τη πάροδο του χρόνου, με διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού οχημάτων.

Υπάρχουν πολλές προβλέψεις σχετικά με τον **αντίκτυπο των αυτόνομων και συνδεδεμένων οχημάτων (CAV) στην ασφάλεια της κυκλοφορίας**. Μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι προκαλούν μείωση των ατυχημάτων κατά 90% γιατί περισσότερο από το 90% των τροχαίων ατυχημάτων προκαλούνται από ανθρώπινα λάθη οδηγών, ενώ τα αυτόνομα οχήματα είναι σε θέση να αποφύγουν τέτοια σφάλματα οδήγησης. Μια τέτοια πρόβλεψη μπορεί να φαίνεται πολύ αισιόδοξη αφού βασίζεται σε μια απλή υπόθεση, και αφορά αποκλειστικά το ουτοπικό μέλλον, αλλά δεν έδωσε καμία σημασία στη μεταβατική περίοδο. Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν εντελώς διαφορετική άποψη για αυτό το πρόβλημα. Οι μελέτες τους αποδεικνύουν ότι το αυτοματοποιημένο όχημα χαμηλού επιπέδου στη μικτή ροή κυκλοφορίας θα είχε μάλλον αρνητικό αντίκτυπο στη ροή της κυκλοφορίας και στη χωρητικότητα της οδού. Βελτίωση της ροής της κυκλοφορίας μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν τα αυτόνομα και συνδεδεμένα οχήματα (CAV) θα είναι σε υψηλό ποσοστό στη μικτή ροή. Σε μελέτη τους, **Talebpour & Mahmassani** μελέτησαν τον πιθανό αντίκτυπο των οχημάτων αυτών στη ροή της κυκλοφορίας χρησιμοποιώντας ένα **πλαίσιο προσομοίωσης**. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι αυξάνουν την απόδοση των εγκαταστάσεων των αυτοκινητοδρόμων και βελτιώνουν τη ροή της κυκλοφορίας.

Έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους **Wang et al. (2018)**, για την αξιολόγηση οδικής ασφάλειας με συνδυασμό μεθόδων. Στόχος είναι ο εντοπισμός συγκρούσεων καθώς είναι πολύ πιο συχνές και πιο εύκολο να αποτυπωθούν στον πραγματικό κόσμο (Tarko et al., 2009).

Οι **παραδοσιακές μελέτες συγκρούσεων** απαιτούν τη συλλογή δεδομένων συγκρούσεων στο πεδίο, η οποία είναι χρονοβόρα, με πολλή ένταση εργασίας και μερικές φορές ανακριβής. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, **νέες τεχνολογίες** έχουν υιοθετηθεί για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της ακρίβειας της συλλογής δεδομένων, όπως οι αυτοματοποιημένες τεχνικές βίντεο (Suaniar & Sayed, 2008) και δοκιμασίες οδήγησης (Bagdadi, 2013). Από την άλλη πλευρά, οι μελέτες συγκρούσεων που βασίζονται **σε προσομοίωση** χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια. Το λογισμικό προσομοίωσης συλλέγει προσομοιωμένες τροχιές οχημάτων άμεσα και με ακρίβεια κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, από την οποία μπορούν να εξαχθούν δεδομένα προσομοίωσης σύγκρουσης για περαιτέρω ανάπτυξη. Το πιο σημαντικό, οι μελέτες **που βασίζονται σε προσομοίωση είναι πολύ πιο ευέλικτες** από τις μελέτες πεδίου.

Πραγματοποιήθηκε μια έρευνα από το Πανεπιστήμιο Σινγκαπούρης και Αυστραλίας, από τους **Morando et al. (2018)**, με αντικείμενο τις **επιπτώσεις των αυτόνομων οχημάτων στην ασφάλεια χρησιμοποιώντας προσομοίωση** για δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις σε σηματοδοτημένη διασταύρωση και σε κυκλικό κόμβο. Τα οχήματα αυτά αναμένεται να μειώσουν τα τροχαία ατυχήματα καθώς η πλειονότητα των ατυχημάτων σχετίζονται με σφάλματα οδηγού, κόπωση, αλκοόλ ή ναρκωτικά. Διάφορες μελέτες υποδεικνύουν ότι βελτιώνουν σημαντικά την ασφάλεια με υψηλά ποσοστά διείσδυσης. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, για τη σηματοδοτημένη διασταύρωση, τα οχήματα μειώνουν τον αριθμό των συγκρούσεων κατά 20% έως 65% με τα ποσοστά διείσδυσης να κυμαίνονται μεταξύ 50% και 100% (στατιστικά σημαντικά στο  $< 0,05$ ). Για τον κυκλικό κόμβο, ο αριθμός των συγκρούσεων μειώνεται κατά 29% σε 64% με το ποσοστό διείσδυσης AV 100% (στατιστικά σημαντικό σε  $< 0,05$ ). Μέχρι το 2014, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε τέσσερις πολιτείες των ΗΠΑ. Στην Αυστραλία, το τεστ έχει εισήχθη για πρώτη φορά στη Νότια Αυστραλία το 2016. Το ποσοστό διείσδυσης στην αγορά εκτιμάται ότι θα είναι μεταξύ 24% και 87% έως το 2045. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η βελτιωμένη κινητικότητα, οι λιγότερες εκπομπές ρύπων, η καλύτερη απόδοση καυσίμου και το μειωμένο κόστος στάθμευσης.

Οι **Fagnant & Kockelman (2015)** υπέθεσαν σχεδόν την **εξάλειψη των ανθρώπινων λαθών**, που σχετίζονται με πάνω από το 90% των ατυχημάτων στις ΗΠΑ. Με βάση την συγκεκριμένη έρευνα, τα ετήσια οικονομικά οφέλη θα μπορούσαν να είναι περίπου 25 δισεκατομμύρια δολάρια, με μόνο 10% της αγοράς διείσδυση. Όταν υπάρχουν υψηλά ποσοστά διείσδυσης, τα AV έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την οικονομία με διαφορά 450 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως. Όσον αφορά την ασφάλεια, θα βελτιωθεί ραγδαία. Περισσότερο από 40% των θανατηφόρων ατυχημάτων σχετίζεται με αλκοόλ, κόπωση ή απροσεξία του οδηγού και από υπερβολική ταχύτητα.

Οι **Rau et al., (2015)** ανέπτυξαν μια μέθοδο για **εντοπισμό ατυχημάτων**, τα οποία θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με τα αυτόνομα οχήματα, με χαρτογράφηση των αυτοματοποιημένων λειτουργιών του οχήματος. Συγκεκριμένα, αφορά αυτοματοποιημένες λειτουργίες οχημάτων στα επίπεδα αυτοματισμού 2 έως 4, ενώ λαμβάνονται υπόψη τα πιθανά οφέλη για την ασφάλεια που θα μπορούσαν να προκύψουν από την πλήρη ανάπτυξη επιλεγμένων συναρτήσεων L0 και L1. Αυτή η μέθοδος συσχετίζει συγκεκριμένες αυτοματοποιημένες λειτουργίες του οχήματος με πέντε επίπεδα σύγκρουσης. Τα επίπεδα αυτά, δεδομένων σύγκρουσης αποτελούνταν από τη τοποθεσία σύγκρουσης, το σενάριο πριν από τη σύγκρουση, τη κατάσταση οδήγησης, τη ταχύτητα ταξιδιού και τη κατάσταση οδηγού. Ακόμη, η αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων σφαλμάτων GES και FARS, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτιμήσεων TCP.

### 2.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Υπάρχουν ποικίλες έρευνες σχετικά με τον **αντίκτυπο των αυτόνομων οχημάτων στην ασφάλεια**. Ένα κύριο συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι τα αυτόνομα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την οδική ασφάλεια σημαντικά, μειώνοντας τα ανθρώπινα λάθη που αποτελούν τη βασική αιτία των τροχαίων ατυχημάτων. Υψηλότερα όρια ταχύτητας οδηγούν σε περισσότερες συγκρούσεις και συγκεκριμένα στο πίσω μέρος. Ακόμη, βελτιώνεται η ροή της κυκλοφορίας καθώς διατηρούν σταθερές ταχύτητες και αποστάσεις. Ωστόσο, η πλήρης επίδραση τους εξαρτάται από το ποσοστό διεύθυνσης τους στο σύνολο των οχημάτων.

Η **μέθοδος της προσομοίωσης** είναι ένα σημαντικό εργαλείο στην ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων. Μερικές από τις έρευνες, μελετούν την ανάμειξη αυτόνομων και μη αυτόνομων οχημάτων, δείχνοντας ότι η μετάβαση στη πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση θα πρέπει να είναι **σταδιακή** και θα χρειαστεί εκτενή έρευνα. Επίσης, κατηγοριοποιούνται οι συγκρούσεις (αλλαγή λωρίδας, πίσω άκρο, διέλευση) ώστε να εντοπιστούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στη δημιουργία τους. Χρησιμοποιούνται διάφορα δεδομένα όπως ο χρόνος μέχρι τη σύγκρουση TTC, ο χρόνος PET, ο ρυθμός επιβράδυνσης DR, η ταχύτητα MaxS και η διαφορά ταχύτητας DeltaS. Ως μια σύγκρουση ορίζεται όταν οι τιμές PET και TTC είναι χαμηλότερες από προκαθορισμένα όρια.

## 3 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε η παρούσα Διπλωματική Εργασία. Συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά σε ορισμένες θεμελιώδεις **στατιστικές έννοιες** και στις **μεθόδους ανάλυσης** που αξιοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων.

### 3.2 Βασικές έννοιες στατιστικής

#### **Πληθυσμός (population) και δείγμα (sample):**

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

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

#### **Μεταβλητές (variables):**

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

1. **Ποιοτικές ή κατηγορικές μεταβλητές (qualitative variables):** Είναι οι μεταβλητές των οποίων οι δυνατές τιμές είναι κατηγορίες διαφορετικές μεταξύ τους. Η χρήση αριθμών για την παράσταση των τιμών μίας τέτοιας μεταβλητής είναι καθαρά συμβολική και δεν έχει την έννοια της μέτρησης.
2. **Ποσοτικές μεταβλητές (quantitative variables):** Είναι οι μεταβλητές που λαμβάνουν αυστηρά αριθμητικές τιμές, που έχουν τη σημασία της μέτρησης. Οι ποσοτικές μεταβλητές διακρίνονται με τη σειρά τους σε δύο μεγάλες **κατηγορίες τις διακριτές και τις συνεχείς.**



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

### **Μέτρα Αξιοπιστίας (Measures of Reliability):**

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης χρησιμοποιούνται δύο αντιστρόφως ανάλογα μέτρα αξιοπιστίας.

- **Επίπεδο Εμπιστοσύνης (Level of Confidence):** Το επίπεδο εμπιστοσύνης αντικατοπτρίζει την ποσοστιαία πιθανότητα ότι η εκτίμηση της εκάστοτε εξεταζόμενης παραμέτρου είναι αληθής (σωστή), το οποίο συνεπάγεται ότι η συγκεκριμένη παράμετρος εντοπίζεται εντός ενός δεδομένου διαστήματος εμπιστοσύνης. Η πιο συνηθισμένη χρήση επιπέδου εμπιστοσύνης είναι στο 95%, κατά το οποίο υπάρχουν 95% πιθανότητες η εκτίμηση που προέκυψε από την ανάλυση του δείγματος να είναι αξιόπιστη.
- **Επίπεδο Σημαντικότητας (Level of Significance):** Το επίπεδο σημαντικότητας αντικατοπτρίζει την ποσοστιαία πιθανότητα ότι η εκτίμηση της εκάστοτε εξεταζόμενης παραμέτρου είναι ψευδής (εσφαλμένη), το οποίο συνεπάγεται ότι η εν λόγω παράμετρος βρίσκεται εκτός ενός δεδομένου διαστήματος εμπιστοσύνης. Για παράδειγμα, επίπεδο σημαντικότητας 5% σημαίνει ότι η εκτίμηση μακροπρόθεσμα θα είναι λανθασμένη 5% των φορές.

### 3.3 Βασικές Μέθοδοι Στατιστικής Ανάλυσης

Η **ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis)** είναι μια στατιστική μέθοδος, που διερευνά τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών, ώστε να προσδιοριστεί ένας τρόπος πρόβλεψης της μίας μεταβλητής με τη βοήθεια των υπολοίπων. Με τον όρο **εξαρτημένη μεταβλητή (Dependent variable)** εννοείται εκείνη της οποίας η τιμή πρόκειται να προβλεφθεί και συμβολίζεται ως  $y$ . Είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης των ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι τιμές της είναι τυχαίες και δεν προβλέπονται με ακρίβεια εκ των προτέρων. Ενώ, η **ανεξάρτητη (Independent variable)** χρησιμοποιείται για την εύρεση της εξαρτημένης μεταβλητής και συμβολίζεται ως  $x$ . Οι τιμές της είναι καθορισμένες και ελεγχόμενες. Η **ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων** είναι μια στατιστική διαδικασία όπου κρίνεται απαραίτητη για το προσδιορισμό σχέσεων μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Η **μέθοδος ανάπτυξης** ενός μοντέλου εξαρτάται από το αν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής ή διακριτό μέγεθος καθώς διαφορετικοί τύποι μοντέλων είναι κατάλληλοι ανά περίπτωση.

Οι **βασικές μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης** είναι η Γραμμική Παλινδρόμηση, η Πιθανοτική Ανάλυση και η Λογιστική Παλινδρόμηση.

### 3.3.1 Γραμμική Παλινδρόμηση

Η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές στατιστικής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται όταν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής και ακολουθεί κανονική κατανομή. Με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας ενός γεγονότος σε σχέση με παράγοντες που το επηρεάζουν. Έτσι προκύπτει ένα μαθηματικό γραμμικό μοντέλο με το οποίο υπολογίζεται η πιθανότητα πραγματοποίησης του γεγονότος (πρότυπο πρόβλεψης πιθανότητας). Με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων γίνεται η εκτίμηση των παραμέτρων ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών που έχουν παρατηρηθεί από αυτές οι οποίες έχουν υπολογιστεί να είναι το ελάχιστο. Η γραμμική παλινδρόμηση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, στην απλή και πολλαπλή, με κριτήριο τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τη πρόβλεψη της εξαρτημένης. Η **απλή γραμμική παλινδρόμηση** ισχύει όταν χρησιμοποιείται μόνο μια ανεξάρτητη μεταβλητή για την πρόβλεψη της εξαρτημένης. Ενώ η **πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση** ισχύει όταν χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές για την πρόβλεψη της εξαρτημένης. Χρησιμοποιείται όταν εξετάζεται η επίδραση πολλών μεταβλητών ταυτόχρονα.

### 3.3.2 Πιθανοτική Ανάλυση

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν η εξαρτημένη μεταβλητή παίρνει τιμές διακριτές ή συνεχείς. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μετασχηματισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών σε πιθανότητες, έτσι οι τιμές θα κυμαίνονται από "0" έως και "1". Βέβαια θα πρέπει μετά το μετασχηματισμό να έχει διατηρηθεί η επιρροή των ανεξάρτητων μεταβλητών ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή.

### 3.3.3 Λογιστική Παλινδρόμηση

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται **όταν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι διακριτή**. Αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης της πιθανότητας επιλογής ενός εναλλακτικού σεναρίου. Εκφράζεται ο **τρόπος και το μέγεθος της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών** στην επιλογή αυτή. Εφαρμόζεται συχνά σε συγκοινωνιακές έρευνες που μελετούν τη πρόβλεψη της επιρροής ορισμένων χαρακτηριστικών στην επιλογή ενός γεγονότος.



### 3.3.4 Σύνοψη

Με βάση τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες και τους στόχους της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας προκύπτουν τα εξής:

- Η γραμμική παλινδρόμηση δεν καλύπτει τις ανάγκες της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.
- Η πιθανοτική ανάλυση καλύπτει τις προϋποθέσεις γενικά, αλλά απορρίπτεται εξαιτίας της πολυπλοκότητας της και του χρόνου που θα απαιτούσε.
- Η **λογιστική παλινδρόμηση επιλέχθηκε** για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### 3.4 Λογιστική Παλινδρόμηση (Logistic Regression).

Η συνάρτηση χρησιμότητας της λογιστικής παλινδρόμησης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$U_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n$$

Όπου:

- $U_i$ , η συνάρτηση χρησιμότητας του γεγονότος  $i$
- $x_1 \dots x_n$ , οι μεταβλητές του προβλήματος
- $\alpha_0$ , ο σταθερός όρος ο οποίος δείχνει την επίδραση όλων εκείνων των παραγόντων που επηρεάζουν την επιλογή και δεν έχουν συμπεριληφθεί ως μεταβλητές στο μαθηματικό πρότυπο.
- $\alpha_1 \dots \alpha_n$ , οι συντελεστές των μεταβλητών

Η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί το γεγονός  $i$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_i = e^{U_i} / (1 + e^{U_i})$$

Εύκολα προκύπτει ότι η πιθανότητα να μην πραγματοποιηθεί το γεγονός  $i$  δίνεται από τη σχέση  $1 - P_i$ .

Όσον αφορά τη **Πολυωνυμική λογαριθμική παλινδρόμηση μικτών επιδράσεων** (Mixed-Effects Multinomial Logit Regression) συνδυάζει τόσο σταθερές (Fixed-Effects) όσο και τυχαίες επιδράσεις (Random-Effects). Αυτό επιτρέπει την ανάλυση των επιπτώσεων των μεταβλητών που παραμένουν σταθερές αλλά και των μεταβλητών που διαφέρουν.

Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\text{logit}(\text{Pr}(Y_i = c)) = \beta_c X_i + u_i Z_i$$

- $Pr(Y_i = c)$  δηλώνει την πιθανότητα του  $Y_i$ , η εξαρτημένη μεταβλητή, να ανήκει στην κατηγορία  $c$ , μια από τις κατηγορίες  $C$  που υπάρχουν στο δείγμα συνολικά.
- Το τμήμα σταθερών επιδράσεων του μοντέλου εκφράζεται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές  $X_i$ , όπου ρυθμίζονται από τους συντελεστές σταθερών επιδράσεων  $\beta_c$ , που σχετίζονται με τη κάθε κατηγορία  $c$ .
- Το μέρος των τυχαίων επιδράσεων του μοντέλου εκφράζεται από τις τυχαίες μεταβλητές πρόβλεψης  $Z_i$ , που ρυθμίζονται από τους συντελεστές τυχαίων επιδράσεων  $u_i$  που ακολουθούν μια κανονική πολυμεταβλητή κατανομή.

Η έννοια της **συμπερίληψης των τυχαίων επιδράσεων** αναφέρεται στον εντοπισμό στατιστικών μεγεθών ανά συγκεκριμένες υπο-ομάδες του δείγματος, όπως υποπληθυσμοί. Ένα παράδειγμα αυτού είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά φύλο (άνδρας/γυναίκα).

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, οι **τυχαίες επιδράσεις** θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τη διερεύνηση **διαφορετικών στατιστικών επιδράσεων ανά τύπο οδού** (όπως οι αυτοκινητόδρομοι, οι αστικές οδοί, οι κεντρικές οδοί, και οι οδοί με φωτεινή σηματοδότηση).

Η μετατροπή των προσομοιωμένων δεδομένων σε τυποποίηση z-score, είναι μια κοινή διαδικασία τυποποίησης. Ισχύει για κάθε παράμετρο  $x$  η παρακάτω σχέση, όπου  $\bar{x}$  είναι η μέση τιμή και  $S$  η τυπική απόκλιση.

$$x_{scaled} = (x - \bar{x})/S$$

Η μορφή των εξισώσεων για Random και Mixed Effects ξεχωριστά είναι:

$$\text{Random Effects} = \beta_0 + \beta_1 z_i + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_u z_u$$

$$\text{Mixed Effects} = \alpha_0 + \alpha_v x_v + \dots + \beta_0 + \beta_u z_u$$

### Λόγος πιθανοτήτων (odds ratios):

Ο λόγος πιθανοτήτων αναφέρεται σε ένα κλάσμα, στον αριθμητή του οποίου βρίσκεται η πιθανότητα να συμβεί το γεγονός και στον παρονομαστή η πιθανότητα να μην συμβεί. Αν, λοιπόν,  $P$  ορίσουμε την πιθανότητα να συμβεί το γεγονός και  $1-P$  την πιθανότητα να μην συμβεί, τότε η αναλογία είναι  $P/(1-P)$ . Αυτός ο λόγος χρησιμοποιείται κυρίως στη λογαριθμική της μορφή ως εξής:

$$\text{logit}(P) = \log_e \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_v x_v$$

Για παράδειγμα, τα odds να προκύψει 'κορώνα' στο ρίξιμο ενός νομίσματος είναι  $0.5/0.5=1$ , αφού η πιθανότητα να έρθει 'κορώνα' είναι 50 τοις εκατό και η πιθανότητα να μην έρθει 'κορώνα' είναι 50 τοις εκατό.

Γενικά ισχύει:

- όταν  $odds > 1$  οι πιθανότητες αυξάνονται
- όταν  $odds < 1$  οι πιθανότητες μειώνονται

### 3.5 Πολυσυσχετιστικότητα (Multicollinearity) & VIF (Variance Inflation Factor)

Η **Πολυσυσχετιστικότητα** είναι ένα στατιστικό φαινόμενο το οποίο συμβαίνει όταν δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης είναι υψηλά συσχετισμένες μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι μια μεταβλητή μπορεί να προβλέψει ή να εξηγήσει την άλλη με υψηλή ακρίβεια. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα κατά την ανάλυση παλινδρόμησης, καθώς μπορεί να δυσκολέψει τον προσδιορισμό του αντίκτυπου των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτώμενη μεταβλητή. Τα κύρια σημεία της πολυσυσχετιστικότητας είναι:

- Υψηλά συσχετισμένοι συντελεστές παλινδρόμησης: Οι συντελεστές παλινδρόμησης των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι υψηλά και συσχετισμένοι μεταξύ τους.
- Αντιφατικά πρόσημα των συντελεστών: Οι συντελεστές παλινδρόμησης έχουν αντίθετα πρόσημα, δηλαδή αυξήσεις σε μια μεταβλητή συνδέονται με μειώσεις σε μια άλλη.

Η πολυσυσχετιστικότητα μπορεί να δυσκολέψει την ερμηνεία των συντελεστών παλινδρόμησης, να καθιστά δύσκολη την απόδοση αιτιών σχέσεων μεταξύ μεταβλητών και να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Για τη διαχείριση της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης VIF.

Ο **δείκτης VIF**, είναι ένα στατιστικό μέτρο όπου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της Multicollinearity σε μοντέλα παλινδρόμησης. Το VIF υπολογίζει το ποσοστιαίο ποσοστό της διακύμανσης του εκτιμητή του συντελεστή παλινδρόμησης μιας μεταβλητής προς τη διακύμανση που προκαλείται από την πολυσυσχετιστικότητα με τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές. Συγκεκριμένα, το VIF για μια μεταβλητή υπολογίζεται μέσω του παρακάτω τύπου:

$$VIF = 1 / (1 - R^2)$$

Όπου,  $R^2$  είναι ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) του εκτιμητή του συντελεστή παλινδρόμησης της συγκεκριμένης μεταβλητής προς τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές. Ένα υψηλό VIF (συνήθως πάνω από 10) υποδηλώνει ότι η μεταβλητή έχει υψηλή Multicollinearity με τις υπόλοιπες μεταβλητές στο μοντέλο. Αυτό σημαίνει ότι η ερμηνεία του συντελεστή παλινδρόμησης για αυτή τη μεταβλητή μπορεί να είναι δυσκολότερη ή αναξιόπιστη. Γενικά στα μοντέλα διατηρούνται οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν τιμές VIF μικρότερες του 5.

### 3.6 Στατιστική αξιολόγηση και Κριτήρια αποδοχής μοντέλου

Τα μοντέλα που έχουν διαμορφωθεί θα πρέπει να αξιολογηθούν με συγκεκριμένα κριτήρια ώστε να είναι αποδεκτά. Αρχικά, βασική προϋπόθεση είναι οι τιμές της μεταβλητής  $Y$  των γραμμικών μοντέλων να ακολουθούν κανονική κατανομή. Ακόμη, δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν μεταβλητές με μεγάλη συσχέτιση, πρέπει να πραγματοποιηθεί κατάλληλος έλεγχος μεταξύ των συσχετίσεων των μεταβλητών, αλλιώς προκύπτουν προβλήματα μεροληψίας και επάρκειας, Δηλαδή, οι ανεξάρτητες μεταβλητές πρέπει να είναι γραμμικώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται τα **βασικά κριτήρια ελέγχου αποδοχής των μοντέλων**.

- **Λογική εξήγηση των συντελεστών του μοντέλου:**

Ελέγχοντας τα **πρόσημα** όλων των μεταβλητών, εξετάζεται η δυνατότητα **λογικής ερμηνείας του μοντέλου**. Αν αυτό δεν ισχύει, το μοντέλο απορρίπτεται. Συγκεκριμένα, αν αναμένεται αύξηση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης το πρόσημο της πρέπει να είναι θετικό, ενώ εάν αναμένεται μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης πρέπει να είναι αρνητικό.

- **Στατιστική σημαντικότητα:**

Το επίπεδο εμπιστοσύνης πρέπει να έχει υψηλή τιμή. Στα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιείται το t-test (κριτήριο κατανομής Student) με τον συντελεστή  $t$  να προσδιορίζει τη στατιστική σημαντικότητα των μεταβλητών για την επιλογή των κατάλληλων, δηλαδή αυτών με την υψηλότερη τιμή. Αντίστοιχα, για τα διωνυμικά λογιστικά μοντέλα, η αξιολόγηση γίνεται βάσει του συντελεστή  $z$  value.

- **Ποιότητα μοντέλου:**

Στα γραμμικά μοντέλα, πραγματοποιείται και ο υπολογισμός του συντελεστή προσδιορισμού για τον έλεγχο της ποιότητας του. Ο συντελεστής  $R^2$  εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής  $Y$  που εξηγείται από την μεταβλητή  $X$  και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του  $R^2$  στη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών  $Y$  και  $X$ , δηλαδή τόσο πιο ορθή είναι η πρόβλεψη του μοντέλου και ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Αντίθετα, για τα λογιστικά μοντέλα δεν πραγματοποιείται έλεγχος του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  καθώς σε αυτήν την περίπτωση επιζητείται η εκτίμηση της σχέσης που αναπτύσσεται μεταξύ της εξαρτημένης με τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Συνεπώς, στα λογιστικά μοντέλα γίνεται έλεγχος του ποσοστού πρόβλεψης του μοντέλου, το οποίο ζητείται να έχει τιμή μεγαλύτερη του 65%.

## 4 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για να διερευνηθεί η επιρροή της εισαγωγής των αυτόνομων οχημάτων στην κυκλοφορία και συγκεκριμένα σε μεταβλητές οι οποίες **αφορούν την ασφάλεια της κυκλοφορίας**. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η διαδικασία **συλλογής και η επεξεργασία των απαραίτητων στοιχείων** για την εκπλήρωση του στόχου της Διπλωματικής Εργασίας. Θα πραγματοποιηθεί λεπτομερής ανάλυση της διαδικασίας, έτσι ώστε να δοθεί μία πλήρης εικόνα της αξιοπιστίας και της ποιότητας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, περιγράφεται η διαδικασία συλλογής των στοιχείων που αξιοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στην **περιγραφική στατιστική ανάλυση** των στοιχείων αυτών και παρουσιάζονται **συγκεντρωτικά διαγράμματα** που απεικονίζουν τη σχέση των ανεξάρτητων μεταβλητών που προσδιορίστηκαν παραπάνω, σε σχέση με τον βαθμό διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο (Market Penetration Rate - MPR). Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα συγκεκριμένα διαγράμματα.

### 4.2 Συλλογή Δεδομένων

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία δεδομένων **εμπλοκών προσομοίωσης της κυκλοφορίας**, η οποία πραγματοποιήθηκε σε ένα μέρος της πόλης της Αθήνας. Συγκεκριμένα, για **τρία διαφορετικά σενάρια**, τα οποία είχαν να κάνουν με **διαφορετικούς ρυθμούς εισχώρησης των αυτόνομων οχημάτων** στο δίκτυο (Market Penetration Rate-MPR), έγινε **προσομοίωση** του αστικού δικτύου και καταγράφηκαν συνολικά 1.292.979 συμβάντα εμπλοκών, για τα οποία ο χρόνος έως τη εμπλοκή των δύο οχημάτων (Time-To-Collision - TTC), ήταν μικρότερος από 1,5 δευτερόλεπτα. Για κάθε τέτοιο συμβάν, το οποίο αντιπροσωπεύει μία εμπλοκή, καταγράφηκαν οι κυκλοφοριακές συνθήκες και τα γεωμετρικά 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 ένα μέρος της πόλης της Αθήνας, και σχεδιάστηκε στο λογισμικό Aimsun Next. Το δίκτυο προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Εικόνα 4.1 και αποτελείται από 728 κόμβους και 1.636 οδικά τμήματα. Το συνολικό μήκος των οδικών τμημάτων είναι 70 km και το μέγεθος του δικτύου φτάνει περίπου τα 3 km<sup>2</sup>.

Επιπλέον, οι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού αποτελούνταν από 58×59 κεντροειδή του δικτύου μελέτης και συνολικό αριθμό 27.500 ταξιδιών με Ι.Χ. και 5.990 ταξιδιών με βαρέα οχήματα για την πρωινή ώρα αιχμής. Πιο συγκεκριμένα, ελήφθησαν υπόψη 14 λεωφορεία, 1 γραμμή τρόλεϊ και 150 στάσεις δημόσιας συγκοινωνίας καθώς οι συχνότητες και οι χρόνοι αναμονής στις στάσεις.



Εικόνα 4-1: Δίκτυο προσομοίωσης

#### 4.2.2 Σενάρια προσομοίωσης

Είναι σημαντικό να επισημανθούν **δύο γενικές παραδοχές** που πραγματοποιήθηκαν. Η πρώτη ήταν ότι όλα τα αυτοματοποιημένα οχήματα είναι ηλεκτρικά και η δεύτερη ότι παρουσιάζουν δύο προφίλ συμπεριφοράς που φαίνονται παρακάτω:

- **1<sup>η</sup> γενιά (Προσεκτική συμπεριφορά):** περιορισμένη ικανότητα ανίχνευσης και νόησης, διατήρηση μεγαλύτερων αποστάσεων, έγκαιρη πρόβλεψη αλλαγών λωρίδας κυκλοφορίας από ότι τα συμβατικά οχήματα και μεγαλύτερος χρόνος σε καταστάσεις υποχώρησης.
- **2<sup>η</sup> γενιά (Επιθετική συμπεριφορά):** προηγμένη ικανότητα ανίχνευσης και νόησης, χρήση συγχώνευσης δεδομένων, αυτοπεποίθηση στη λήψη αποφάσεων, διατήρηση μικρότερων αποστάσεων, έγκαιρη πρόβλεψη αλλαγών λωρίδας από ότι τα συμβατικά οχήματα και λιγότερος χρόνος σε καταστάσεις υποχώρησης.

Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν ήταν τρία: Α, Β και Γ. Όσον αφορά το **Α-Σενάριο**, τα συμβατικά οχήματα ήταν σε ποσοστό 100%, στο **Β-Σενάριο** υπήρχαν 40% συμβατικά, 40% 1ης γενιάς αυτόνομα οχήματα και 20% 2ης γενιάς αυτόνομα οχήματα, ενώ στο **Γ-Σενάριο** τα αυτόνομα οχήματα ήταν μόνο 2<sup>ης</sup> γενιάς σε ποσοστό 100%.

Τα ποσοστά κάθε τύπου οχήματος για το κάθε σενάριο παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-1: Σενάρια Προσομοίωσης

Τύπος οχήματος	A-Σενάριο 100-0-0	B-Σενάριο 40-40-20	Γ-Σενάριο 0-0-100
Αυτοκίνητο με οδηγό άνθρωπο	100%	40%	0%
1η γενιά (Προσεκτική συμπεριφορά)	0%	40%	0%
2η γενιά (Επιθετική συμπεριφορά)	0%	20%	100%
Φορτηγό με οδηγό άνθρωπο	100%	0%	0%
Συνδεδεμένο Αυτόνομο Όχημα Φορτίου	0%	100%	100%

Για κάθε σενάριο, προσομοιώθηκαν δέκα διαφορετικές επαναλήψεις που παράγουν στοχαστικά αποτελέσματα για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Η διάρκεια της προσομοίωσης κάθε σεναρίου ήταν μία ώρα και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ήταν πέντε λεπτά.

#### 4.2.3 Παράμετροι προσομοίωσης

Όπως προαναφέρθηκε, για τη μοντελοποίηση των συνδεδεμένων και αυτόνομων οχημάτων για τα επιβατικά οχήματα, χρησιμοποιήθηκαν δύο προφίλ συμπεριφοράς, το οποίο διαθέτει προηγμένη αισθητήρια και γνωστική ικανότητα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι παράμετροι στη διαδικασία μικροσκοπικής προσομοίωσης, οι οποίες αποτελούν ευρήματα που **προέρχονται από το έργο [LEVITATE](#)**, 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 4-2: Παράμετροι αυτόνομων οχημάτων για τη μοντελοποίηση τους στη μικροσκοπική προσομοίωση

Παράμετροι	2 <sup>η</sup> γενιά (Επιθετικό)	1 <sup>η</sup> γενιά (Προσεκτικό)	Αυτοκίνητο με οδηγό άνθρωπο	Σχόλιο/Υπόθεση
<b>Ακολουθεί Αυτοκίνητο</b>				
Αποδοχή ταχύτητας	1	1		Τα AV δεν κινούνται πιο γρήγορα από τα όρια ταχύτητας
Συντελεστής ευαισθησίας-Κανονικά καταναμημένος	0.5 (min 0.1, max 0.9)	0.7 (min 0.3, max 0.9)	1 (καμία τυπική απόκλιση)	
<b>Αλλαγή Λωρίδας</b>				
Συντελεστής ζώνης απόστασης	[1;1.25]	[1.1;1.3]	[0.8;1.2]	Τα AV έχουν καλύτερες γνώσεις και θεωρούν ότι αλλάζουν λωρίδα καλύτερα από τους ανθρώπους.
Συνεργασία	Όχι	Όχι	Ναι	Τα CAV πρέπει να μπορούν να συνεργάζονται.
Όριο ταχύτητας προσπέρασης	85%	85%	90%	
Όριο ταχύτητας ανάκτησης λωρίδας	95%	95%	95%	
Επίπεδο επιθετικότητας	[0;0.25]	0	[0.0-1.0]	
Απερίσκεπτη αλλαγή λωρίδας	Όχι	Όχι	Διαφέρει	
Συντελεστής περιθωρίου ασφαλείας	[0.75;1.25]	[1.25;1.75]	1	
<b>Χρόνοι Αντίδρασης</b>				
Κατά την ακολουθία αυτοκινήτου	0.1 sec	0.1 sec	0.8 sec	Στοχεύουμε να καταγράψουμε τη συνδεσιμότητα του οχήματος
Σε στάση	0.1 sec	0.1 sec	1.2 sec	
Σε φωτεινό σηματοδότη κυκλοφορίας	0.1 sec	0.1 sec	1.6 sec	

#### 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 εμπλοκή (TTC) και ο χρόνος μετά την εμπλοκή (PET) είναι χαμηλότεροι από τα προκαθορισμένα όρια, με προεπιλεγμένες τιμές στο λογισμικό τα 1,5 δευτερόλεπτα και 5,0 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση των συνδεδεμένων και αυτοματοποιημένων επιβατικών οχημάτων θεωρήθηκε διαφορετική τιμή του TTC λόγω της μικρότερης απόστασης αντίδρασης και ακινητοποίησής τους και ορίστηκε σε 0,5 δευτερόλεπτα για τη 2<sup>η</sup> γενιά και 1,0 δευτερόλεπτα για τη πρώτη γενιά αντί για 1,5 δευτερόλεπτα (προεπιλεγμένη τιμή στο λογισμικό), με βάση το πλαίσιο που διεξήχθη στο ερευνητικό έργο [LEVITATE](#).

### 4.3 Κωδικοποίηση δεδομένων

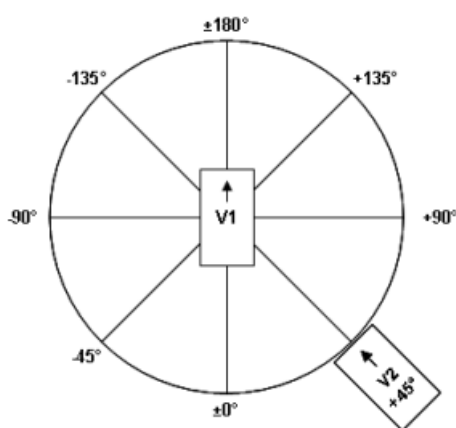
Τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση παραδόθηκαν σε μορφή πίνακα και αποτελούνταν από 1.292.979 παρατηρήσεις, κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια εμπλοκή οχημάτων. Για κάθε μία από τις εμπλοκές καταγράφηκαν τα εξής δεδομένα:

- **trjFile:** όνομα αρχείου τροχιάς (π.χ. αρχείο.trj) στο οποίο εντοπίστηκε η εμπλοκή.
- **tMinTTC:** ο χρόνος προσομοίωσης όπου παρατηρήθηκε η ελάχιστη τιμή TTC (χρόνος μέχρι τη εμπλοκή) για την εμπλοκή αυτή. Στην αρχή κάθε προσομοίωσης, ο χρόνος είναι γενικά 0 και παρατηρήθηκαν αυξήσεις από 0,1 έως 1,0 δευτερόλεπτα ανά χρονικό βήμα, ανάλογα με την ανάλυση του λογισμικού προσομοίωσης.
- **XMinPET:** είναι η συντεταγμένη  $x$  που καθορίζει την κατά προσέγγιση θέση της εμπλοκής τη στιγμή που παρατηρήθηκε ο ελάχιστος χρόνος PET (χρόνος μετά τη εμπλοκή). Πιο συγκεκριμένα αυτή η θέση αντιστοιχεί στο κέντρο του πρώτου οχήματος, όπου η επακόλουθη άφιξη του δεύτερου οχήματος στην ίδια θέση ήταν η συντομότερη επέμβαση που παρατηρήθηκε.
- **YMinPET:** είναι η συντεταγμένη  $y$  που καθορίζει την κατά προσέγγιση θέση της εμπλοκής τη στιγμή που παρατηρήθηκε ο ελάχιστος χρόνος PET (χρόνος μετά τη καταπάτηση). Πιο συγκεκριμένα αυτή η θέση αντιστοιχεί στο κέντρο του πρώτου οχήματος, όπου η μετέπειτα άφιξη του δεύτερου οχήματος στην ίδια θέση ήταν η συντομότερη παρεμπόδιση που παρατηρήθηκε.
- **TTC:** είναι η ελάχιστη τιμή χρόνου έως τη εμπλοκή. Βασίζεται στη τρέχουσα θέση, τη ταχύτητα και τη τροχιά δύο οχημάτων σε μια δεδομένη στιγμή.
- **PET:** είναι ο ελάχιστος χρόνος μετά τη εμπλοκή. 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 μηδενική τιμή υποδεικνύει μια πραγματική εμπλοκή.

- **MaxS:** είναι η μέγιστη ταχύτητα κάθε οχήματος καθ' όλη τη διάρκεια της εμπλοκής (δηλαδή 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:** είναι η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος όπως παρατηρείται τη χρονική στιγμή tMinTTC. Πιο συγκεκριμένα, μαθηματικά ορίζεται ως το μέγεθος της διαφοράς στις ταχύτητες (ή τροχιές) του οχήματος, έτσι ώστε αν  $v_1$  και  $v_2$  είναι τα διανύσματα της ταχύτητας του πρώτου και δεύτερου οχήματος αντίστοιχα, τότε  $\Delta S = ||v_1 - v_2||$ . Στην περίπτωση όπου δύο οχήματα έχουν ίδια ταχύτητα  $v$ , εάν ταξιδεύουν προς ίδια κατεύθυνση το  $\Delta S$  είναι μηδέν, εάν έχουν κάθετη διαδρομή διασταύρωσης  $\Delta S = (\sqrt{2})v$  και αν πλησιάζουν το ένα τον άλλο κατά μέτωπο  $\Delta S = 2v$ .
- **DR:** είναι ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος. Στην πραγματικότητα αυτή η τιμή καταγράφεται ως στιγμιαίος ρυθμός επιτάχυνσης. Εάν το όχημα φρενάρει αυτή είναι η πρώτη αρνητική τιμή επιτάχυνσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Εάν δεν φρενάρει αυτή είναι η χαμηλότερη τιμή επιτάχυνσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Η μεταβλητή αυτή, εκφράζεται σε πόδια ανά δευτερόλεπτο ή μέτρα ανά δευτερόλεπτο, ανάλογα με τις μονάδες που καθορίζονται στο αντίστοιχο αρχείο τροχιάς.
- **MaxD:** είναι η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος. Στην πραγματικότητα αυτή η τιμή καταγράφεται ως ο ελάχιστος στιγμιαίος ρυθμός επιτάχυνσης. Μια αρνητική τιμή υποδεικνύει επιβράδυνση, ενώ μια θετική τιμή υποδεικνύει ότι το όχημα δεν επιβραδύνθηκε 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:** είναι η μέγιστη τιμή  $\Delta V$  (FirstDeltaV ή SecondDeltaV) οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή.
- **ConflictType:** είναι ο τύπος της εμπλοκής, η οποία μπορεί να είναι α) οπίσθια εμπλοκή (rear-end conflict) β) εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane-change conflict) ή γ) εμπλοκή διέλευσης (crossing conflict). Εάν οι πληροφορίες μητρώου της εμπλοκής, δηλαδή, ο κωδικός της οδού (link) και της λωρίδας (lane), δεν είναι διαθέσιμες και για τα δύο οχήματα, τότε ο τύπος της εμπλοκής ταξινομείται αποκλειστικά βάσει της απόλυτης τιμής του ConflictAngle ως εξής. Ο τύπος της εμπλοκής είναι οπίσθια (rear-end conflict) αν ισχύει  $||\text{ConflictAngle}|| < 30^\circ$ , εμπλοκή διέλευσης (crossing conflict) εάν ισχύει  $||\text{ConflictAngle}|| > 85^\circ$ . Σε διαφορετική περίπτωση, η εμπλοκή κατατάσσεται ως μια εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane-change conflict). Εάν είναι διαθέσιμες πληροφορίες οδού και λωρίδας, οι πληροφορίες αυτές είναι χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση στην περίπτωση που και τα δύο οχήματα καταλαμβάνουν την ίδια λωρίδα (της ίδιας οδού), είτε στην αρχή είτε στο τέλος του συμβάντος εμπλοκής. Εάν τα οχήματα καταλαμβάνουν και τα δύο την ίδια λωρίδα κατά την αρχή και στο τέλος του συμβάντος,

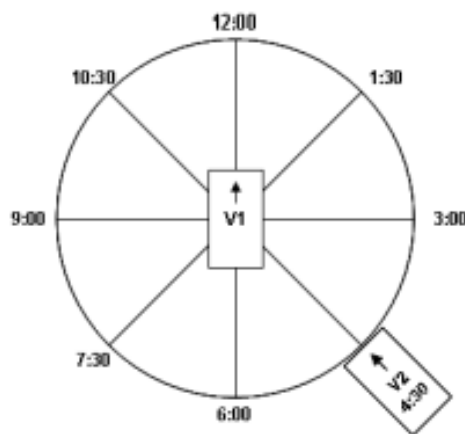
τότε αυτό ταξινομείται ως συμβάν οπίσθιας εμπλοκής. Εάν ένα από τα δύο οχήματα τερματίσει σε διαφορετική λωρίδα από αυτήν που ξεκίνησε (ενώ δεν έχει αλλάξει οδούς), τότε το συμβάν ταξινομείται ως εμπλοκή αλλαγής λωρίδας. Εάν κάποιος από τα οχήματα αλλάξει οδό κατά τη διάρκεια του συμβάντος, τότε η γωνία 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.

- **Conflict Angle:** είναι 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. Η γωνία κυμαίνεται από  $-180^\circ$  έως  $+180^\circ$ , όπου αρνητική γωνία υποδηλώνει προσέγγιση από αριστερά και η θετική γωνία υποδηλώνει προσέγγιση από τα δεξιά. Μια γωνία  $180^\circ$  (ή  $-180^\circ$ ) υποδηλώνει άμεση μετωπική προσέγγιση και μια γωνία  $0^\circ$  (ή  $-0^\circ$ ) 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 δεξιό, 6:00 είναι ακριβώς πίσω και 9:00 είναι αριστερά.



Εικόνα 4-3: Σχηματική απεικόνιση της μεταβλητής ClockAngle.

- **PostCrashV:** είναι 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  $t_{MinTTC}$ , 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:** είναι η εκτιμώμενη πορεία και των δύο οχημάτων μετά από μια υποθετική εμπλοκή (όπως αναφέρεται στο PostCrashV). Αυτή η κατεύθυνση εκφράζεται ως η γωνία που μετρείται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τον άξονα x (ο οποίος υποτίθεται ότι δείχνει δεξιά), έτσι ώστε  $0^\circ$  είναι δεξιά,  $90^\circ$  είναι πάνω,  $180^\circ$  είναι αριστερά και  $270^\circ$  είναι κάτω. Η γωνία κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ .
- **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 συγκρούσεις) και τα δύο οχήματα μπορεί να φθάσουν σε μια θέση ταυτόχρονα, οπότε η ισοπαλία μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου οχήματος κατατάσσεται αυθαίρετα.
- **FirstLink (SecondLink):** υποδεικνύει τον κωδικό της οδού στην οποία ταξιδεύει το πρώτο (δεύτερο) όχημα, κατά την χρονική στιγμή  $t_{MinTTC}$ .

- **FirstLane (SecondLane):** υποδεικνύει σε ποια λωρίδα κυκλοφορίας βρίσκεται το πρώτο (δεύτερο) όχημα, κατά την χρονική στιγμή  $t_{MinTTC}$ .
- **FirstLength (SecondLength):** υποδεικνύει το μήκος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος σε πόδια ή μέτρα.
- **FirstWidth (SecondWidth):** υποδεικνύει το πλάτος του πρώτου (δεύτερου) οχήματος σε πόδια ή μέτρα.
- **FirstHeading (SecondHeading):** υποδεικνύει την πορεία του πρώτου (δεύτερου) οχήματος κατά τη διάρκεια της εμπλοκής. Αυτή η κατεύθυνση προσεγγίζεται από την αλλαγή της θέσης από την έναρξη της εμπλοκής έως το τέλος της εμπλοκής. Σημειώνεται ότι, στις περισσότερες συγκρούσεις που δεν είναι οπίσθιες, τουλάχιστον ένα όχημα στρίβει καθ' όλη τη διάρκεια της εμπλοκής. Η πραγματική του πορεία μεταβάλλεται ανάλογα. 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  $0^\circ$  είναι δεξιά,  $90^\circ$  είναι επάνω,  $180^\circ$  είναι αριστερά και  $270^\circ$  είναι κάτω. Η γωνία κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ .
- **FirstVMinTTC (SecondVMinTTC):** υποδεικνύει την ταχύτητα του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο  $t_{MinTTC}$ .
- **FirstDeltaV (SecondDeltaV):** υποδεικνύει τη μεταβολή μεταξύ της ταχύτητας εμπλοκής (που δίνεται από την ταχύτητα  $FirstVMinTTC$  και την πορεία  $FirstHeading$ ) και της ταχύτητας μετά τη εμπλοκή (που δίνεται από τη ταχύτητα  $PostCrashV$  και την πορεία  $PostCrashHeading$ ): υποκατάστατο για τη σοβαρότητα της εμπλοκής, που υπολογίζεται υποθέτοντας μια υποθετική σύγκρουση των δύο οχημάτων στην μεταξύ τους εμπλοκή.
- **xFirstCSP (xSecondCSP):** συντεταγμένη  $x$  του πρώτου (δεύτερου) οχήματος στο σημείο εκκίνησης της εμπλοκής (Conflict Starting Point-CSP). Η θέση CSP είναι η θέση του οχήματος τη χρονική στιγμή  $t_{MinTTC}$ .
- **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  $t_{MinTTC}$ .
- **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.

Όσον αφορά τη **γεωμετρία** του δικτύου, υπήρχαν συγκεκριμένες μεταβλητές:

- **Capacity** (Κυκλοφοριακή ικανότητα): ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να περάσουν από το οδικό τμήμα κατά τη διάρκεια μιας ώρας (οχήματα/ώρα).
- **Length 2D**: το μήκος του οδικού τμήματος (μ.)
- **Number of Lanes**: ο αριθμός λωρίδων του οδικού τμήματος
- **Number of Main Lanes**: ο αριθμός των κύριων λωρίδων του οδικού τμήματος
- **Number of Public Transport Lines**: ο αριθμός των λεωφορειακών γραμμών που διέρχονται από το οδικό τμήμα
- **Number of Signals**: ο αριθμός κινήσεων κυκλοφορίας του οδικού τμήματος
- **Road Type**: ο τύπος του οδικού τμήματος
- **Speed Limit**: το όριο ταχύτητας του οδικού τμήματος (χλμ./ώρα)

Με βάση τον διαθέσιμο χρόνο έως τη σύγκρουση, υπολογίζεται η **προσομοιασμένη επικινδυνότητα (simulated crash rate)**. Η παράμετρος αυτή αποτελεί **έμμεσο δείκτη οδικής ασφάλειας**. Πρόκειται για συνεχή μεταβλητή που εκφράζει την επικινδυνότητα κάθε οχήματος ανά βήμα προσομοίωσης, και υπολογίστηκε ως εξής (Οικονομου et al., 2023):

$$Crash\ rate = 2 \frac{-\log(0.5) * \log\left(1 + \frac{TTC_i}{TTC_t - TTC_i}\right)}{\log\left(1 + \frac{TTC_i}{TTC_t - TTC_i}\right)^2}$$

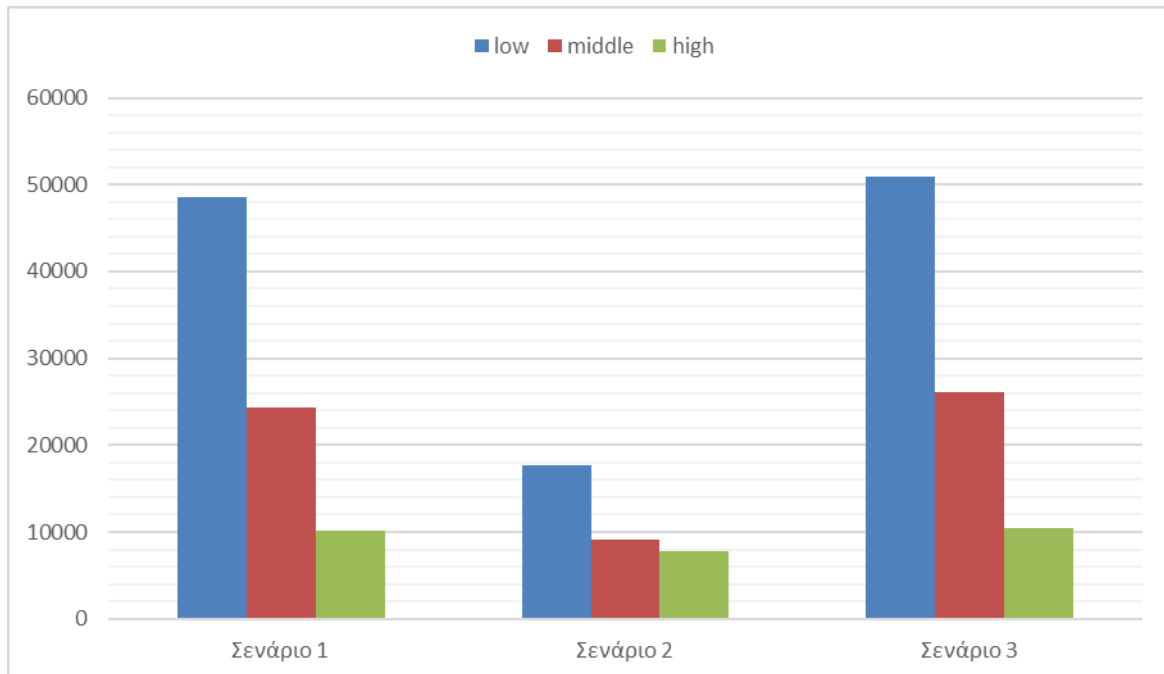
Όπου:

- Το  $TTC_i$  είναι η χρονική απόσταση μέχρι τη σύγκρουση για την παρατηρούμενη σύγκρουση (i). Δηλαδή, είναι ο χρόνος που απομένει μέχρι να συμβεί μια σύγκρουση εάν τα δύο οχήματα συνεχίσουν να κινούνται με την ίδια ταχύτητα και πορεία χωρίς να αλλάξουν την κατάστασή τους.
- Το  $TTC_t$  είναι το όριο για τη χρονική απόσταση μέχρι τη σύγκρουση για το όχημα που ακολουθεί στη συγκεκριμένη παρατήρηση (ii). Συνήθως, για τα οχήματα που οδηγούνται από ανθρώπους, είναι 1,5 δευτερόλεπτα. Ενώ για αυτόνομα οχήματα 1ης γενιάς (1st generation CAV), είναι 1 δευτερόλεπτο και 2ης γενιάς (2nd generation CAV) είναι 0,5 δευτερόλεπτα.

Στα τρία σενάρια Α, Β και Γ χρησιμοποιήθηκε  $TTC_t = 1,5$  ώστε να υπάρχει **συγκρισιμότητα** στα αποτελέσματα σε ίσες συνθήκες. Η τιμή αυτή είναι συντηρητική για τα αυτόνομα οχήματα καθώς είναι ικανά να αντιδρούν άμεσα και να λειτουργούν με μικρότερα χρονικά περιθώρια ασφαλείας. Επιλέχθηκε η μέθοδος αυτή, ώστε να αναλυθούν τα σενάρια συγκριτικά με ισότιμους όρους.

Στη συνέχεια, η **συνεχής εξαρτημένη μεταβλητή 'Crash rate'** διακριτοποιήθηκε σε τρεις κατηγορίες. Οι **κατηγορίες επικινδυνότητας (Crash cat)** έχουν διαβαθμιστεί σε **υψηλή, μεσαία και χαμηλή** (high, low και middle) ανάλογα με τα καθορισμένα διαστήματα (breaks). Όταν η κατηγορία επικινδυνότητας είναι υψηλή (high), σημαίνει ότι η ασφάλεια είναι χαμηλή και το ποσοστό ατυχήματος υψηλό. Αντίθετα, όταν η κατηγορία επικινδυνότητας είναι χαμηλή (low), σημαίνει ότι η ασφάλεια είναι υψηλή και το ποσοστό ατυχήματος χαμηλό. Από 0 έως 0.08 η κατηγορία επικινδυνότητας είναι χαμηλή, από 0.08-0.75 η κατηγορία είναι μεσαία και από 0.75 έως 1 η κατηγορία είναι υψηλή.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα γράφημα, το οποίο απεικονίζει τον **αριθμό των παρατηρήσεων σε κάθε κατηγορία επικινδυνότητας, αντίστοιχα σε κάθε σενάριο**. Το γράφημα αυτό προσφέρει μια οπτική αναπαράσταση της κατανομής των τιμών.



Διάγραμμα 4-1: Αριθμός παρατηρήσεων σε κάθε κατηγορία επικινδυνότητας για κάθε σενάριο

#### 4.4 Επεξεργασία στοιχείων και περιγραφική στατιστική ανάλυση

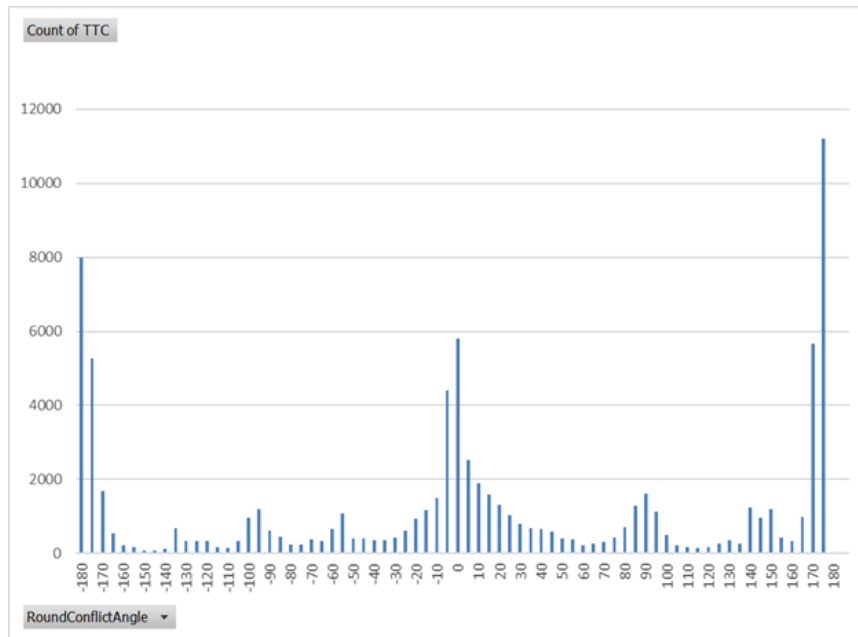
Πραγματοποιήθηκε μία **προκαταρκτική ανάλυση σε περιβάλλον Excel**, με στόχο τη δημιουργία μιας γενικής εικόνας. Η πρώτη ανασκόπηση των δεδομένων συμβάλλει στην εξοικείωση με τους αριθμούς και με την τάξη μεγέθους τους. Παράλληλα, διερευνήθηκαν οι σχέσεις μεταξύ μεταβλητών. Η ανάλυση αυτή, αποτελεί κρίσιμο βήμα για τα επόμενα στάδια της στατιστικής ανάλυσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα **διαγράμματα** που έχουν προκύψει.



4.4.1 Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της γωνιάς υποθετικής εμπλοκής μεταξύ συγκρουόμενων οχημάτων, με βάση την εκτιμώμενη πορεία κάθε οχήματος (ConflictAngle).

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

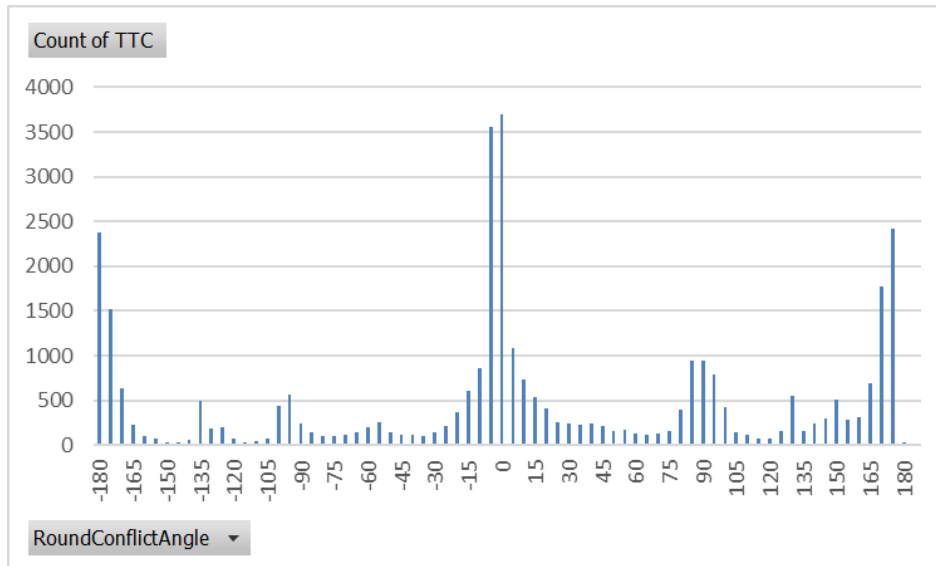


Διάγραμμα 4-2: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle , A-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.2 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλές τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC, παρατηρούνται σε γωνίες που πλησιάζουν τις 0° όπου τα οχήματα κινούνται παράλληλα και 180° όπου τα οχήματα κινούνται μετωπικά. Οι υψηλές τιμές σε αυτές τις γωνίες δείχνουν ότι σε αυτές τις καταστάσεις υπάρχουν περισσότερα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση.
- Μειωμένες τιμές που αφορούν το χρονικό περιθώριο TTC, παρατηρούνται σε ενδιάμεσες γωνίες.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

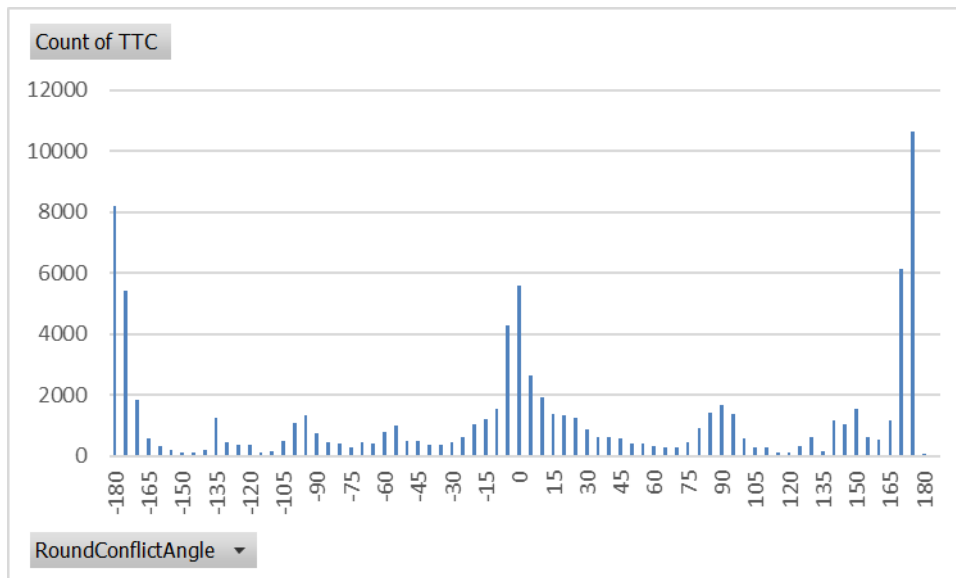


Διάγραμμα 4-3: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle, Β-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.3 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλές τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC, παρατηρούνται σε γωνίες που πλησιάζουν τις  $0^\circ$  όπου τα οχήματα κινούνται παράλληλα και  $180^\circ$  όπου τα οχήματα κινούνται μετωπικά. Οι υψηλές τιμές σε αυτές τις γωνίες δείχνουν ότι σε αυτές τις καταστάσεις υπάρχουν περισσότερα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση.
- Μειωμένες τιμές που αφορούν το χρονικό περιθώριο TTC, παρατηρούνται σε ενδιάμεσες γωνίες.

Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:



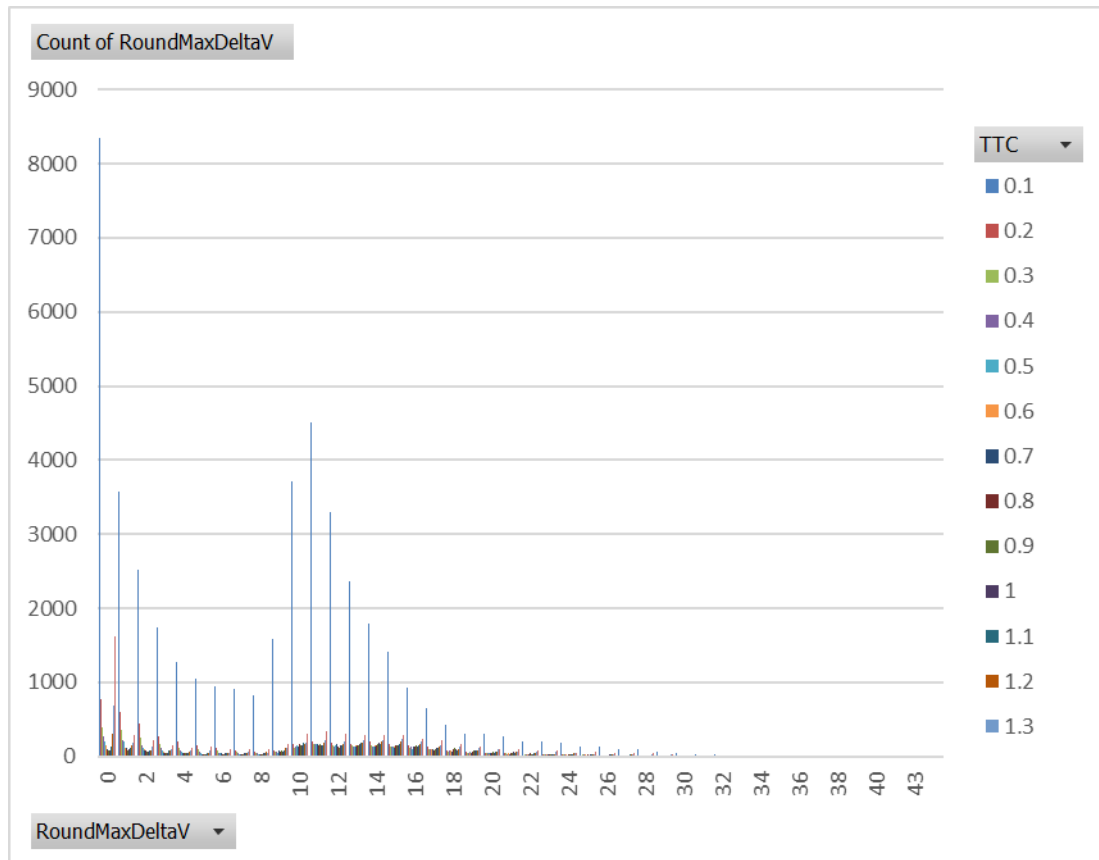
Διάγραμμα 4-4: Count of TTC για κάθε γωνιά εμπλοκής ConflictAngle, Γ-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.4 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλές τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC, παρατηρούνται σε γωνίες που πλησιάζουν τις  $0^\circ$  όπου τα οχήματα κινούνται παράλληλα και  $180^\circ$  όπου τα οχήματα κινούνται μετωπικά. Οι υψηλές τιμές σε αυτές τις γωνίες δείχνουν ότι σε αυτές τις καταστάσεις υπάρχουν περισσότερα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση.
- Μειωμένες τιμές που αφορούν το χρονικό περιθώριο TTC, παρατηρούνται σε ενδιάμεσες γωνίες.

4.4.2 Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της μέγιστης τιμής DeltaV (FirstDeltaV ή SecondDeltaV) οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή (MaxDeltaV).

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

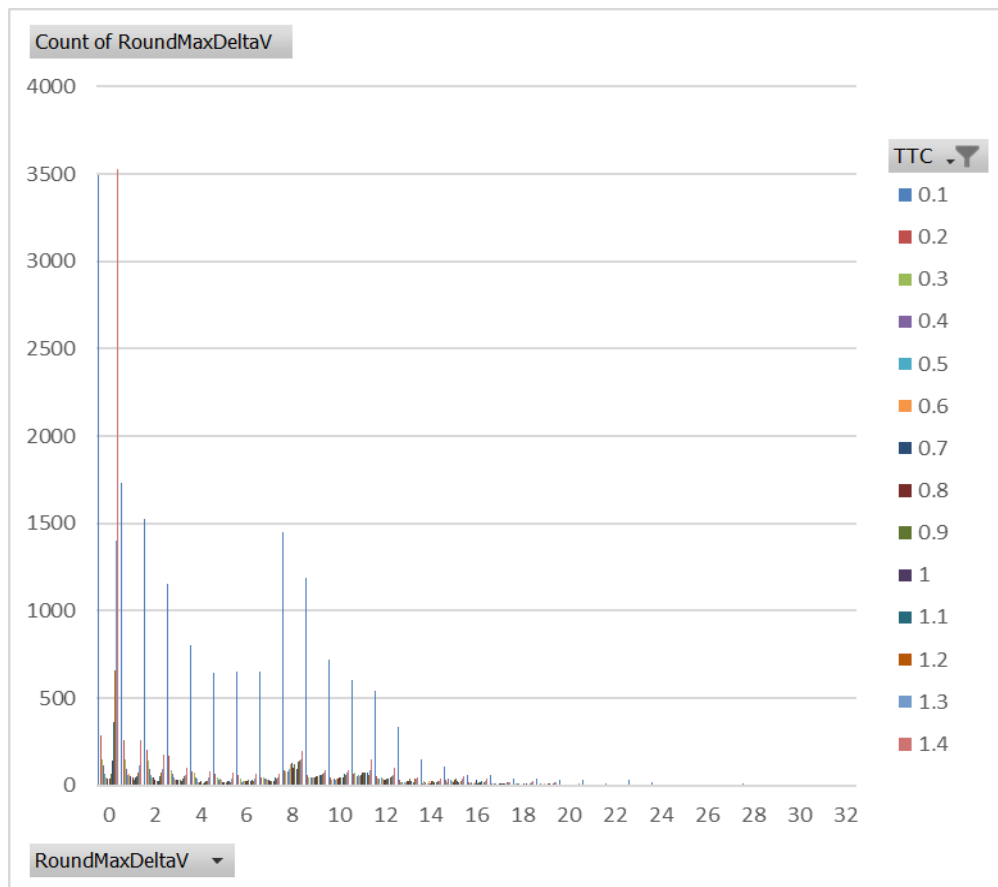


Διάγραμμα 4-5: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), A-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.5 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι υψηλότερες τιμές του MaxDeltaV παρατηρούνται κάθε φορά σε μικρότερες τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα οχήματα με μεγάλες διαφορές ταχύτητας προσομοιάζεται ότι εμφανίζονται σε κυκλοφοριακές εμπλοκές συχνότερα.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

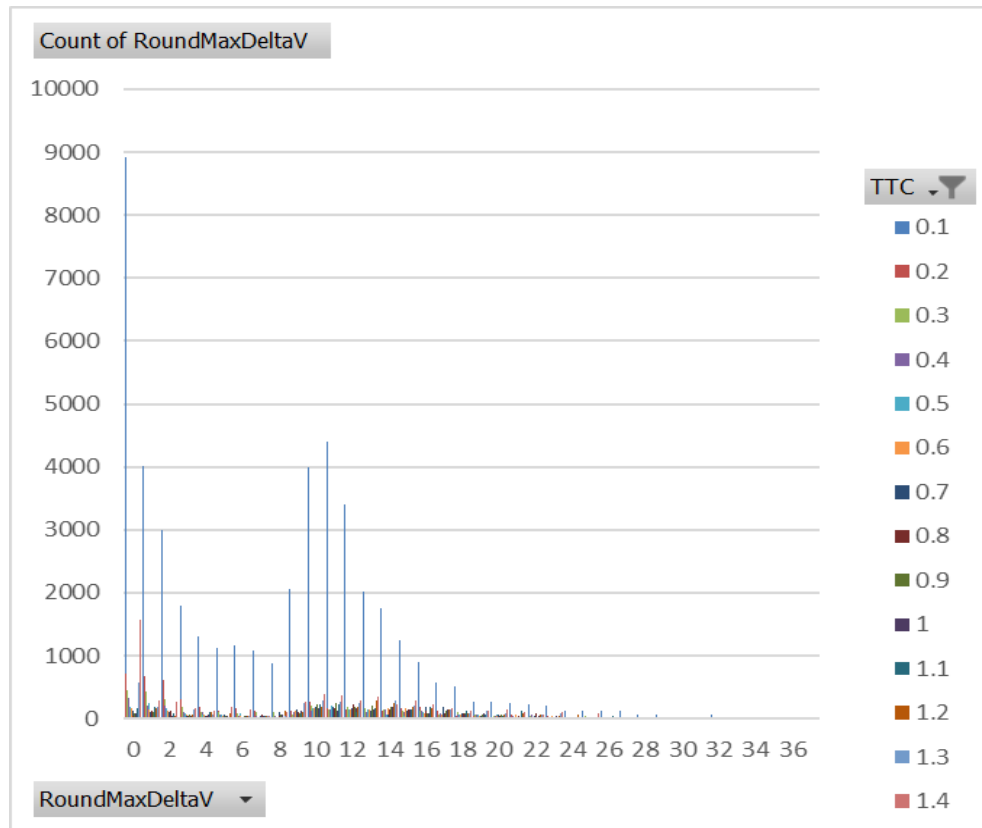


Διάγραμμα 4-6: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), Β-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.6 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι υψηλότερες τιμές του MaxDeltaV παρατηρούνται κάθε φορά σε μικρότερες τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα οχήματα με μεγάλες διαφορές ταχύτητας προσομοιάζεται ότι εμφανίζονται σε κυκλοφοριακές εμπλοκές συχνότερα.

Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:



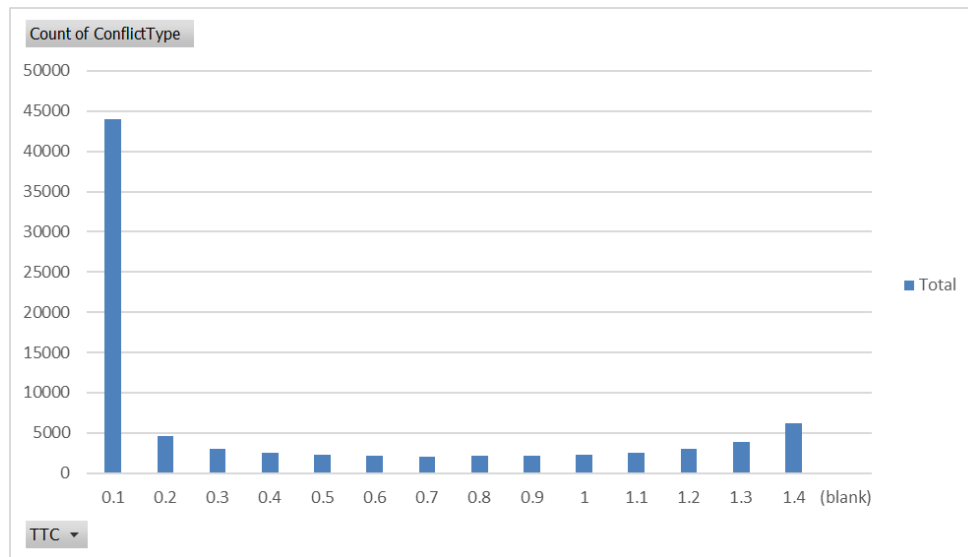
Διάγραμμα 4-7: Σχέση MaxDeltaV με το χρόνο έως την εμπλοκή (TTC), Γ-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.7 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι υψηλότερες τιμές του MaxDeltaV παρατηρούνται κάθε φορά σε μικρότερες τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα οχήματα με μεγάλες διαφορές ταχύτητας προσομοιάζεται ότι εμφανίζονται σε κυκλοφοριακές εμπλοκές συχνότερα.

4.4.3 Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και του τύπου εμπλοκής (ConflictType).

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

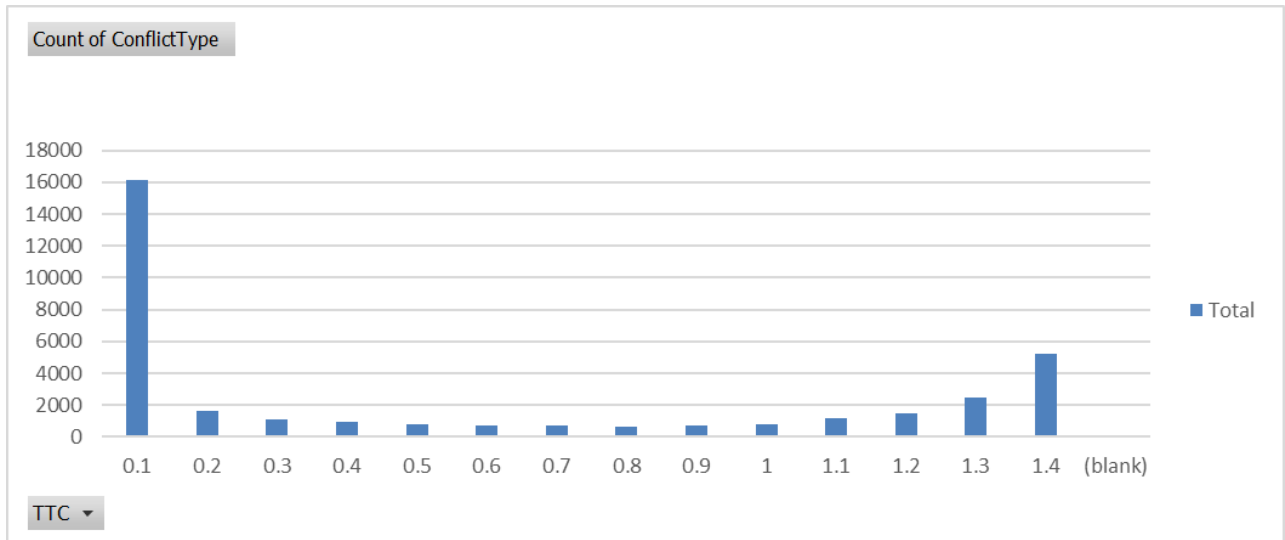


Διάγραμμα 4-8: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC), A-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.8 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλός αριθμός συμβάντων για πολύ μικρό χρόνο TTC. Συγκεκριμένα παρατηρούμε 44.000 συμβάντα στη τιμή TTC=0.1. Δηλαδή, έχουν συμβεί πολλές εμπλοκές όταν ο χρόνος έως τη θεωρητική σύγκρουση είναι πολύ μικρός, γεγονός που δείχνει αυξημένη επικινδυνότητα.
- Όσο αυξάνεται το TTC, ο αριθμός των εμπλοκών μειώνεται σημαντικά. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έως την πιθανή σύγκρουση τόσο λιγότερο πιθανή είναι η εμπλοκή.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:



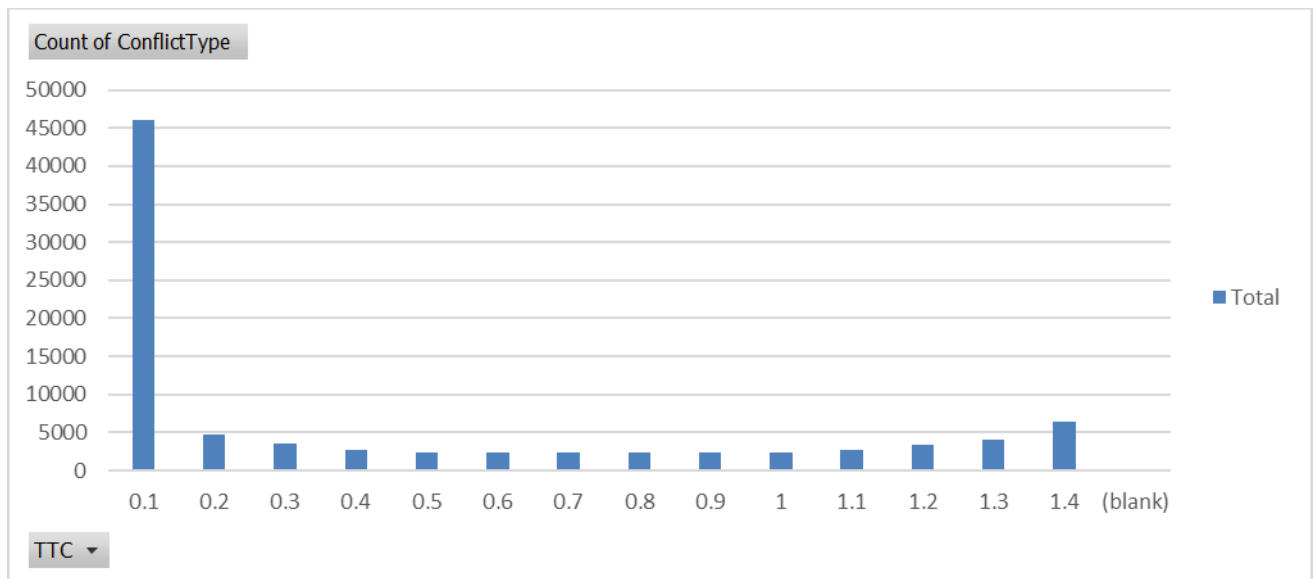
Διάγραμμα 4-9: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC), Β-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.9 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλός αριθμός συμβάντων για πολύ μικρό χρόνο TTC. Συγκεκριμένα παρατηρούμε 16.000 συμβάντα στη τιμή  $TTC=0.1$ . Δηλαδή, έχουν συμβεί αρκετές εμπλοκές όταν ο χρόνος έως τη θεωρητική σύγκρουση είναι πολύ μικρός, γεγονός που δείχνει αυξημένη επικινδυνότητα.
- Όσο αυξάνεται το TTC, ο αριθμός των εμπλοκών μειώνεται σημαντικά. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έως τη πιθανή σύγκρουση τόσο λιγότερο πιθανή είναι η εμπλοκή.



Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:



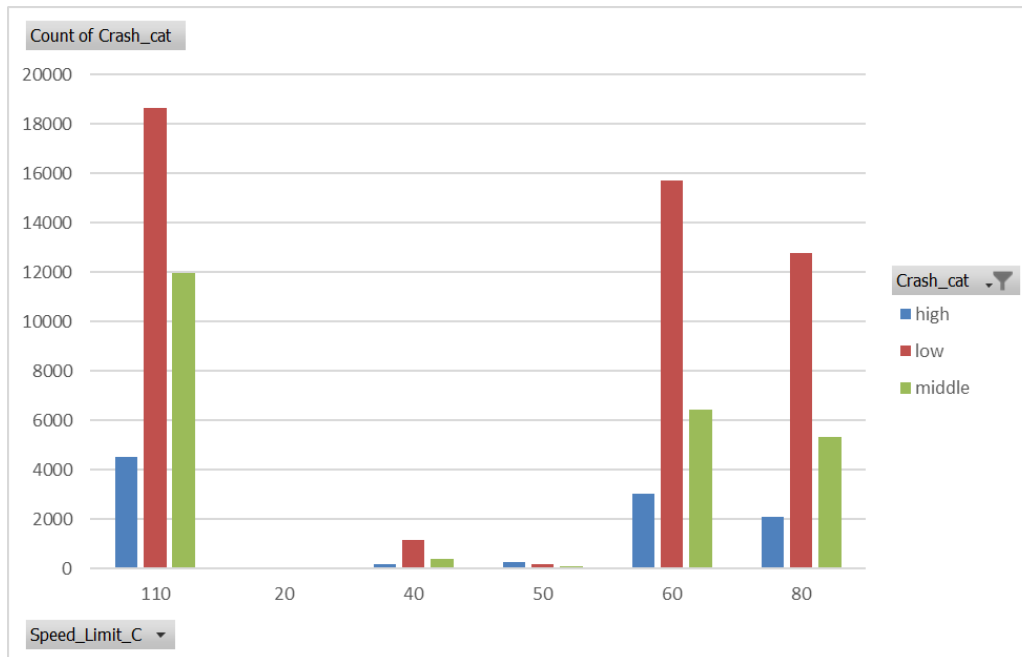
Διάγραμμα 4-10: Σχέση τύπου εμπλοκής (ConflictType) με χρόνο έως τη εμπλοκή(TTC),Γ-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.10 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Υψηλός αριθμός συμβάντων για πολύ μικρό χρόνο TTC. Συγκεκριμένα παρατηρούμε 46.000 συμβάντα στη τιμή TTC=0.1. Δηλαδή, έχουν συμβεί πολλές εμπλοκές όταν ο χρόνος έως τη θεωρητική σύγκρουση είναι πολύ μικρός, γεγονός που δείχνει αυξημένη επικινδυνότητα.
- Όσο αυξάνεται το TTC, ο αριθμός των εμπλοκών μειώνεται σημαντικά. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έως την πιθανή σύγκρουση τόσο λιγότερο πιθανή είναι η εμπλοκή.

#### 4.4.4 Σχέση του ορίου ταχύτητας (Speed\_Limit\_C) και της κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash\_Cat).

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

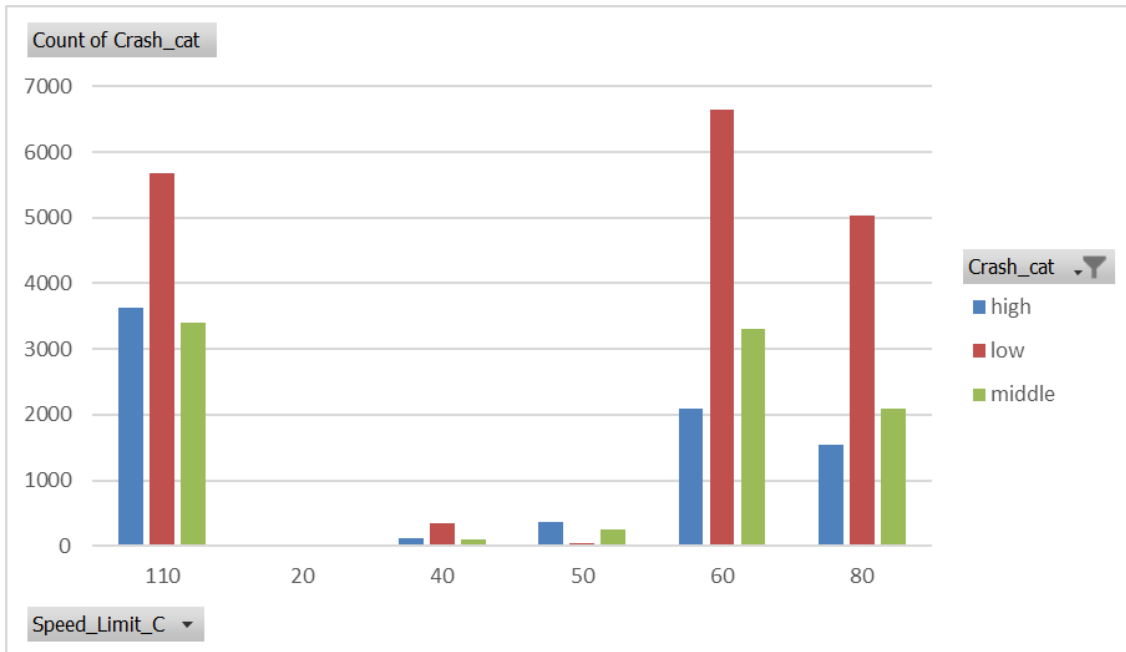


Διάγραμμα 4-11: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed\_Limit\_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash\_Cat), A-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.11 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Στο όριο ταχύτητας 110km/h όπου οι παρατηρήσεις είναι αυξημένες σε αυτή τη ταχύτητα, η πλειονότητα τους ανήκει στη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat), όπου εκφράζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας. Επίσης, στα όρια ταχύτητας 60 και 80 km/h οι περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat).
- Όσο αφορά την υψηλή κατηγορία επικινδυνότητας (High Crash\_Cat), η οποία εκφράζει χαμηλά επίπεδα ασφάλειας, παρατηρούνται λιγότερες περιπτώσεις.
- Παρατηρείται σχετικά μειωμένη συχνότητα παρατηρήσεων επικινδυνότητας στα πολύ χαμηλά όρια ταχύτητας (20-50 km/h), γεγονός που υποδεικνύει ότι το δείγμα κινείται σε υψηλότερες ταχύτητες εν γένει.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:

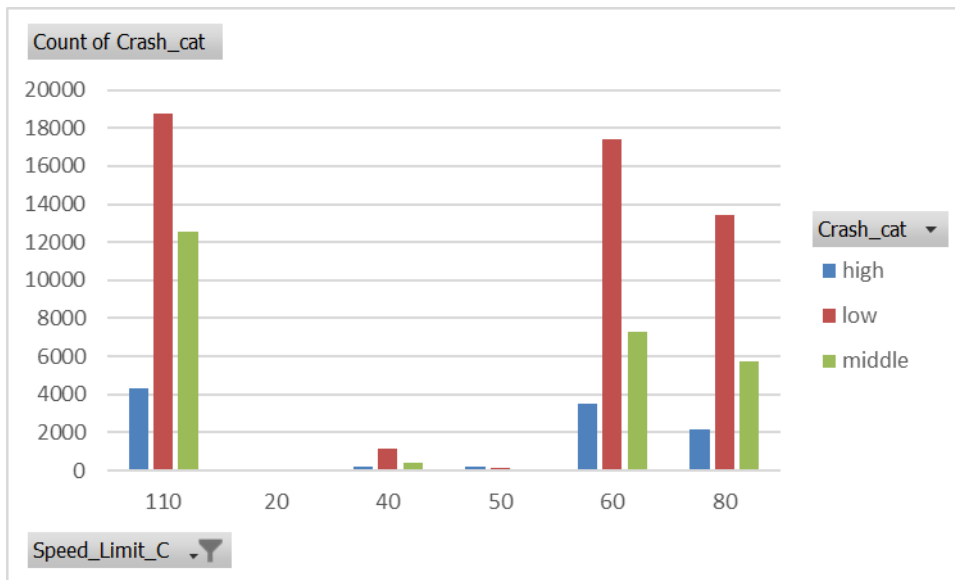


Διάγραμμα 4-12: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed\_Limit\_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash\_Cat), Β-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.12 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Στα όρια ταχύτητας 60,80 και 110 km/h η πλειονότητα των περιπτώσεων ανήκει στη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat), όπου εκφράζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας.
- Όσο αφορά την υψηλή κατηγορία επικινδυνότητας (High Crash\_Cat), η οποία εκφράζει χαμηλά επίπεδα ασφάλειας, παρατηρούνται λιγότερες περιπτώσεις σε σχέση με τη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat).
- Παρατηρείται σχετικά μειωμένη συχνότητα παρατηρήσεων επικινδυνότητας στα πολύ χαμηλά όρια ταχύτητας (20-50 km/h), γεγονός που υποδεικνύει ότι το δείγμα κινείται σε υψηλότερες ταχύτητες εν γένει.

Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω:



Διάγραμμα 4-13: Σχέση ορίου ταχύτητας (Speed\_Limit\_C) και κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash\_Cat), Γ-Σενάριο

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 4.13 προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Στο όριο ταχύτητας 110km/h όπου οι παρατηρήσεις είναι αυξημένες σε αυτή τη ταχύτητα, η πλειονότητα τους ανήκει στη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat), όπου εκφράζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας. Επίσης, στα όρια ταχύτητας 60 και 80 km/h οι περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στη χαμηλή επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat).
- Όσον αφορά την υψηλή κατηγορία επικινδυνότητας (High Crash\_Cat), η οποία εκφράζει χαμηλά επίπεδα ασφάλειας, παρατηρούνται λιγότερες περιπτώσεις.
- Παρατηρείται σχετικά μειωμένη συχνότητα παρατηρήσεων επικινδυνότητας στα πολύ χαμηλά όρια ταχύτητας (20-50 km/h), γεγονός που υποδεικνύει ότι το δείγμα κινείται σε υψηλότερες ταχύτητες εν γένει.

## 4.5 Σύνοψη

Προκύπτουν με αυτό τον τρόπο ποιοτικά συμπεράσματα όπου αποτελούν την αφετηρία για τη λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων.

**Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της γωνιάς υποθετικής εμπλοκής μεταξύ συγκρουόμενων οχημάτων, με βάση την εκτιμώμενη πορεία κάθε οχήματος (ConflictAngle):**

- Γενικά και στα τρία σενάρια, παρατηρούνται υψηλές τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC, σε γωνίες που πλησιάζουν τις  $0^\circ$  και  $180^\circ$ . Οι υψηλές τιμές σε αυτές τις γωνίες δείχνουν ότι σε αυτές τις καταστάσεις υπάρχουν περισσότερα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση. Ενώ, σε ενδιάμεσες γωνίες υπάρχουν λιγότερα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση.
- Συγκρίνοντας τα τρία σενάρια μεταξύ τους, στο Α-Σενάριο η μέγιστη τιμή του χρονικού περιθωρίου TTC φθάνει 11.000, στο Β-Σενάριο έως 3.500 και στο Γ-Σενάριο 10.500. Από το Α-Σενάριο στο Β-Σενάριο παρατηρούμε ότι μειώνονται τα περιστατικά οχημάτων που φθάνουν κοντά σε σύγκρουση. Τα σενάρια Α και Γ έχουν περίπου ίδια μέγιστη τιμή του χρονικού περιθωρίου TTC.

**Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και της μέγιστης τιμής DeltaV (FirstDeltaV ή SecondDeltaV) οποιουδήποτε οχήματος στη εμπλοκή (MaxDeltaV):**

- Οι υψηλότερες τιμές του MaxDeltaV παρατηρούνται κάθε φορά σε μικρότερες τιμές του χρονικού περιθωρίου TTC. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα οχήματα με μεγάλες διαφορές ταχύτητας προσομοιάζεται ότι εμφανίζονται σε κυκλοφοριακές εμπλοκές συχνότερα.

**Σχέση του χρόνου έως την εμπλοκή(TTC) και του τύπου εμπλοκής (ConflictType):**

- Γενικά και στα τρία σενάρια, παρατηρείται υψηλός αριθμός συμβάντων για πολύ μικρό χρόνο TTC, συγκεκριμένα στη τιμή  $TTC=0.1$ . Δηλαδή, έχουν συμβεί πολλές εμπλοκές όταν ο χρόνος έως τη θεωρητική σύγκρουση είναι πολύ μικρός, γεγονός που δείχνει αυξημένη επικινδυνότητα.
- Όσο αυξάνεται το TTC, ο αριθμός των εμπλοκών μειώνεται σημαντικά. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έως την πιθανή σύγκρουση τόσο λιγότερο πιθανή είναι η εμπλοκή.
- Συγκρίνοντας τα σενάρια μεταξύ τους, για  $TTC=0.1$ , στο Α-Σενάριο οι εμπλοκές είναι 44.000, στο Β-Σενάριο 16.000 και στο Γ-Σενάριο 46.000. Στα Σενάρια Α και Γ η επικινδυνότητα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το σενάριο Β.

**Σχέση του ορίου ταχύτητας(Speed\_Limit\_C) και της κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash\_Cat):**

- Στα όρια ταχύτητας 60,80 και 110km/h, και στα τρία σενάρια η πλειονότητα των παρατηρήσεων ανήκει στη χαμηλή κατηγορία επικινδυνότητας (Low Crash\_Cat), όπου εκφράζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας.
- Όσον αφορά την υψηλή κατηγορία επικινδυνότητας (High Crash\_Cat), η οποία εκφράζει χαμηλά επίπεδα ασφάλειας, παρατηρούνται λιγότερες περιπτώσεις.
- Συγκρίνοντας τα τρία σενάρια μεταξύ τους παρατηρείται ότι στο Σενάριο Β υπάρχει μικρότερη συχνότητα παρατηρήσεων επικινδυνότητας σε σχέση με τα άλλα σενάρια.
- Γενικά, στα τρία σενάρια παρατηρείται σχετικά μειωμένη συχνότητα παρατηρήσεων επικινδυνότητας στα πολύ χαμηλά όρια ταχύτητας (20-50 km/h), γεγονός που υποδεικνύει ότι το δείγμα κινείται σε υψηλότερες ταχύτητες εν γένει.

## 5 Εφαρμογή Μεθοδολογιών-Αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι εφαρμογές των υπολογιστικών μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα Διπλωματική Εργασία, καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους. Μετά την ολοκλήρωση της συλλογής των δεδομένων, όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθεί η στατιστική τους επεξεργασία με την εφαρμογή των στατιστικών προτύπων **πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης**.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι στατιστικοί έλεγχοι που διασφαλίζουν την καλή προσαρμογή των προτύπων.

Τέλος, παρατίθενται τα **αποτελέσματα** που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθοδολογιών, η **περιγραφή** τους και η **ερμηνεία** τους με βάση το γενικότερο πλαίσιο της έρευνας.

### 5.2 Στατιστικό πρότυπο πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης

Όσον αφορά τη **στατιστική ανάλυση** χρησιμοποιήθηκε η **γλώσσα προγραμματισμού R** σε συνδυασμό με το **περιβάλλον ανάπτυξης RStudio** (R Core Team, 2024). Το Rstudio προσφέρει ένα ευέλικτο προς τους χρήστες περιβάλλον, το οποίο διευκολύνει τις στατιστικές αναλύσεις επιτρέποντας την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων.

#### 5.2.1 Αλγόριθμος ανάλυσης

Το επόμενο βήμα είναι η **σύνταξη του κώδικα** για τον αλγόριθμο ανάλυσης, με σκοπό τη δημιουργία γραμμικών μοντέλων και διαφόρων διαγραμμάτων για την κατανόηση και ερμηνεία των μεταβλητών. Ολόκληρος ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα στο τέλος του τεύχους. Η δομή του κώδικα για τα τρία σενάρια είναι ίδια.

Όπου χρησιμοποιείται το σύμβολο # αποτελεί κομμάτι σχολιασμού και παρέχει πληροφορίες στο χρήστη χωρίς όμως να μεταφράζεται στο πρόγραμμα.

Επιλέγοντας File -> New File -> R Script δημιουργείται αρχείο κώδικα (Script).

**Παρακάτω, περιγράφονται οι εντολές και τα βήματα που οδήγησαν στο τελικό μοντέλο:**

Σχετικά με την εντολή **'library'** (όνομα πακέτου) ανακαλεί ήδη εγκατεστημένα υποπρογράμματα της R τα οποία είναι απαραίτητα για την δημιουργία του τελικού κώδικα.

**Τα υποπρογράμματα όπου χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται παρακάτω:**

- `library(data.table)`: διαχείριση δεδομένων σε μορφή πίνακα.
- `library(car)`: χρησιμοποιούνται εργαλεία για ανάλυση παλινδρόμησης.
- `library(readxl)`: μπορούν να εισαχθούν στη πλατφόρμα αρχεία μορφής `xlsx`.
- `library(mclgfit)`, `library(memisc)`, `library(sjPlot)`, `library(dplyr)`, `library(nnet)`, `library(ggplot2)`, `library(lattice)`, `library(plyr)`: διάφορες βιβλιοθήκες για στατιστική ανάλυση και γραφήματα.

Με την εντολή `'read_excel'` διαβάζεται το αρχείο `excel` με όνομα `df_geometry.xls`, σε ένα πλαίσιο δεδομένων `'Geom'`. Ακολούθως, με την εντολή `'fread'` διαβάζεται ένα αρχείο CSV σε ένα πλαίσιο δεδομένων `'A_dataset'`. Το `'NULL'` αφαιρά τη στήλη με όνομα `X`. Η εντολή `'str'` εμφανίζει τη δομή του `'A_dataset'`. Ακολούθως, με την εντολή `'merge'` συνδυάζονται τα `'A_dataset'` και `'Geom'`, ταυτόχρονα αντιστοιχίζοντας τη στήλη `'SecondLink'` στο `'A_dataset'` με τη στήλη `"ID"` στο `'Geom'`, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου πλαισίου δεδομένων. Αντίστοιχα και για τα άλλα δύο σενάρια Β και Γ.

Δημιουργείται μια νέα μεταβλητή `'logTTC'` η οποία είναι ο λογάριθμος της στήλης `TTC`, προσθέτοντας ένα μικρό αριθμό για την **αποφυγή μηδενικού λογάριθμου**. Χρησιμοποιείται η εντολή `'subset'` για να εμφανιστεί όπου η `'TTC'` είναι μεγαλύτερη από 0, και αργότερα όπου η `'TTC'` είναι μικρότερη από 1.5.

Χρησιμοποιείται η εντολή `'as.factor'` για τις μεταβλητές `"Road_Type_C"` και `"Speed_Limit_C"`.

Τέλος, με την εντολή `summary`, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μοντέλων. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται οι σταθερές τιμές, καθώς και οι συντελεστές των μεταβλητών.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό η **διαδικασία επιλογής των μεταβλητών** περιλάμβανε **διεξοδικές δοκιμές** με ένα μεγάλο εύρος μεταβλητών, των οποίων η σημαντικότητα κρινόταν με βάση την τιμή  **$Pr(> |t|)$** . Εάν η τιμή ήταν σε απόλυτη τιμή μεγαλύτερη του 0.05 η μεταβλητή δεν θεωρούνταν σημαντική για το μοντέλο. Ως εκ τούτου, οι τελικές μεταβλητές που συμπεριληφθήκαν στο μοντέλο προέκυψαν μετά από ποικίλες δοκιμές, ώστε να βρεθεί ένας **ικανοποιητικός συνδυασμός μεταβλητών** που να υλοποιεί τον στόχο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.



Σχετικά με τις **τυχηματικές επιδράσεις (random effects)** που υπολογίζονται από το μοντέλο, **εξετάζονται οι διαφορετικοί τύποι οδών** που εντοπίζονται στο δείγμα: "**Freeway**" όπου είναι ο αυτοκινητόδρομος, "**Street**" όπου είναι οι αστικές οδοί , "**Arterial**" οι κεντρικές οδοί , και "**Signalized Street**" οι οδοί με φωτεινή σηματοδότηση.

Δημιουργείται ένα γράφημα για το κάθε σενάριο, το οποίο παρουσιάζει τις τυχαίες επιδράσεις (random effects) ανά τύπο οδού, χρησιμοποιώντας τη **σοβαρότητα** και τη **συχνότητα** ως χαρακτηριστικά. Με την εντολή 'aes' ορίζονται τα χαρακτηριστικά του γραφήματος, δηλαδή οι άξονες x και y, χρώμα και μέγεθος. Στον άξονα x είναι "Road\_Type\_C" και στον άξονα y είναι "Random Effects". Με την εντολή 'geom\_point' προσθέτονται στο γράφημα σημεία. Ο κάθε τύπος οδού στον x-άξονα συνδέεται με ένα τυχαίο αποτέλεσμα στον y-άξονα και αυτό υποδεικνύει **αν ο τύπος οδού επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τις επιδράσεις**.

Όσον αφορά το διάγραμμα:

- Το χρώμα των σημείων σχετίζεται με τη κατηγορία σοβαρότητας επικινδυνότητας (ρίσκου). Τα σημεία είναι με **κόκκινο** χρώμα εάν η σοβαρότητα είναι υψηλή "high" και με **μπλε** χρώμα αν η σοβαρότητα είναι μεσαία "medium".
- Το μέγεθος των σημείων σχετίζεται με τη συχνότητα των παρατηρήσεων του δείγματος.
- Η οριζόντια διακεκομμένη γραμμή στο επίπεδο του μηδενός βοηθά στην ανάγνωση των αποτελεσμάτων και εμφανίζεται με **μαύρο** χρώμα.

### 5.2.2 Αποτελέσματα μοντέλων πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες και μετέπειτα σχολιάζονται.

Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Α

**middle vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	1.205	0.745	1.618	0.106	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-2.465	0.902	-2.733	<b>0.01</b>	**
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-2.854	0.866	-3.296	<b>0.001</b>	***
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	-1.322	0.867	-1.524	0.127	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-2.127	0.861	-2.469	<b>0.014</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-2.097	0.863	-2.431	<b>0.015</b>	*
MaxD	-0.003	0.001	-3.503	<b>&lt;0.001</b>	***
DR	-0.001	0.002	-0.409	0.683	
DeltaS	0.063	0.001	62.107	<b>&lt; 0.001</b>	***
ConflictTypelane change	0.881	0.031	28.880	<b>&lt; 0.001</b>	***
ConflictTyperear end	0.658	0.030	21.769	<b>&lt; 0.001</b>	***
Capacity	- <0.001	0.000	-48.891	<b>&lt; 0.001</b>	***

**high vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	0.311	1.292	0.241	0.810	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-2.555	1.523	-1.677	0.093	.
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-3.262	1.503	-2.170	<b>0.030</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	0.294	1.496	0.196	0.844	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-1.535	1.494	-1.027	0.304	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-3.247	1.501	-2.164	<b>0.030</b>	*
MaxD	0.064	0.007	9.411	<b>&lt; 0.001</b>	***
DR	-0.042	0.008	-5.019	<b>&lt;0.001</b>	***
DeltaS	0.054	0.001	38.168	<b>&lt; 0.001</b>	***
ConflictTypelane change	0.545	0.046	11.842	<b>&lt; 0.001</b>	***
ConflictTyperear end	1.385	0.039	35.268	<b>&lt; 0.001</b>	***
Capacity	- <0.001	0.000	-34.151	<b>&lt; 0.001</b>	***

<i>Predictors</i>	<b>Crash_cat: middle</b>			<b>Crash_cat: high</b>		
	<i>Odds Ratios</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>	<i>Odds Ratios</i>	<i>CI</i>	<i>p</i>
(Intercept)	1.36	0.11 – 17.18	0.810	3.34	0.78 – 14.37	0.106
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")20	0.08	0.00 – 1.54	0.093	0.09	0.01 – 0.50	<b>0.006</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")40	0.04	0.00 – 0.73	<b>0.030</b>	0.06	0.01 – 0.31	<b>0.001</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")50	1.34	0.07 – 25.19	0.844	0.27	0.05 – 1.46	0.127
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")60	0.22	0.01 – 4.03	0.304	0.12	0.02 – 0.64	<b>0.014</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")80	0.04	0.00 – 0.74	<b>0.030</b>	0.12	0.02 – 0.67	<b>0.015</b>
MaxD	1.07	1.05 – 1.08	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>
DR	0.96	0.94 – 0.97	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.00	0.683
DeltaS	1.05	1.05 – 1.06	<b>&lt;0.001</b>	1.07	1.06 – 1.07	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTypelane change	1.72	1.58 – 1.89	<b>&lt;0.001</b>	2.41	2.27 – 2.56	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTyperear end	4.00	3.70 – 4.32	<b>&lt;0.001</b>	1.93	1.82 – 2.05	<b>&lt;0.001</b>
Capacity	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>
N_Road_Type_C	4					
Observations	83029					

Εικόνα 5-1: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Α  
(Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικυδινότητας Middle και High)

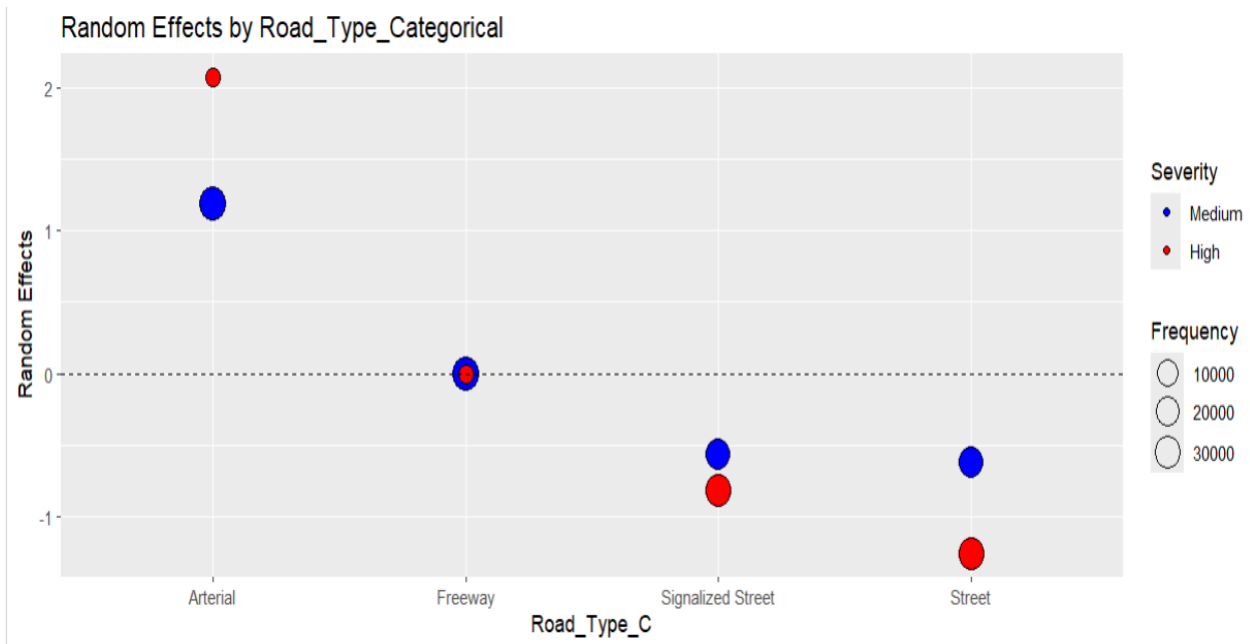
### Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης μεσαίας κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (middle vs low)

- Όσο το **όριο ταχύτητας (speedlimit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DR (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσο αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικυδινότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity** δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού.

### Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης υψηλής κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (high vs low)

- Όσο το **όριο ταχύτητας (speedlimit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται. Εκτός από τη περίπτωση με όριο ταχύτητας 50.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο μειώνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DR (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσο αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change), είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικινδυνότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%), οι **τυχηματικές επιδράσεις** παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 5-1: Τυχηματικές επιδράσεις, Α-Σενάριο

Αναλυτικά παρατηρούνται τα εξής:

- Το κόκκινο σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) εμφανίζεται να έχει τη μεγαλύτερη θετική τυχηματική επίδραση (πάνω από 2).
- Το μπλε σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) για μεσαίας σοβαρότητας ατυχήματα δείχνει επίσης θετική τυχηματική επίδραση.
- Οι τύποι των οδών όπως "Signalized Street" και "Street" παρουσιάζουν αρνητικές τυχηματικές επιδράσεις για ατυχήματα τόσο μεσαίας όσο και υψηλής σοβαρότητας.
- Οι αυτοκινητόδρομοι έχουν μηδενική τυχηματική επίδραση.

Επομένως,

- Τα σημεία που βρίσκονται πάνω από τη διακεκομμένη γραμμή είναι τα θετικά και αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένοι τύποι οδού έχουν αυξημένο κίνδυνο.
- Οι κεντρικές οδοί (Arterials) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσομοιωμένη επικινδυνότητα ατυχημάτων τόσο μεσαίας όσο και υψηλής επικινδυνότητας με θετική τυχηματική επίδραση, σε σύγκριση με την κατηγορία χαμηλής επικινδυνότητας, δηλαδή είναι πιο πιθανό να συμβούν ατυχήματα με βάση την προσομοίωση στο συγκεκριμένο τύπο οδού.
- Οι σηματοδοτημένοι οδοί (Signalized Street) και οι κανονικοί (Street) εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων με τις τυχηματικές επιδράσεις να είναι κάτω από μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιο ασφαλής.
- Όσον αφορά τους αυτοκινητόδρομους (Freeway), δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το μέσο όρο του δείγματος.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες και μετέπειτα σχολιάζονται.

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Β

**middle vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	1.296	0.545	2.379	<b>0.017</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-2.109	0.754	-2.796	<b>0.005</b>	**
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-2.576	0.656	-3.928	<b>0.000</b>	***
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	0.986	0.659	1.495	0.135	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-1.623	0.634	-2.559	<b>0.010</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-1.692	0.641	-2.639	<b>0.008</b>	**
MaxD	0.005	0.003	1.711	0.087	.
DR	-0.013	0.005	-2.683	<b>0.007</b>	**
DeltaS	0.054	0.002	29.686	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTypelane change	0.465	0.045	10.388	<b>&lt; 0.001</b>	***
ConflictTyperear end	0.642	0.041	15.759	<b>&lt; 0.001</b>	***
Capacity	<-0.001	0.000	-26.723	<b>&lt; 0.001</b>	***

**high vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	0.456	0.421	1.082	0.279	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-0.818	0.612	-1.337	0.181	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-2.107	0.510	-4.130	<b>&lt;0.001</b>	***
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	0.802	0.521	1.539	0.124	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-0.986	0.488	-2.019	<b>0.043</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-2.068	0.491	-4.208	<b>&lt;0.001</b>	***
MaxD	0.161	0.017	9.729	<b>&lt; 0.001</b>	***
DR	-0.140	0.018	-7.833	<b>&lt;0.001</b>	***
DeltaS	-0.017	0.002	-7.234	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTypelane change	-0.444	0.069	-6.433	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTyperear end	1.914	0.042	45.625	<b>&lt; 0.001</b>	***
Capacity	<-0.001	0.000	-14.940	<b>&lt; 0.001</b>	***

Predictors	Crash_cat: middle			Crash_cat: high		
	Odds Ratios	CI	p	Odds Ratios	CI	p
(Intercept)	1.58	0.69 – 3.60	0.279	3.66	1.26 – 10.64	<b>0.017</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")20	0.44	0.13 – 1.46	0.181	0.12	0.03 – 0.53	<b>0.005</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")40	0.12	0.04 – 0.33	<b>&lt;0.001</b>	0.08	0.02 – 0.28	<b>&lt;0.001</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")50	2.23	0.80 – 6.19	0.124	2.68	0.74 – 9.75	0.135
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")60	0.37	0.14 – 0.97	<b>0.043</b>	0.20	0.06 – 0.68	<b>0.010</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref= "110")80	0.13	0.05 – 0.33	<b>&lt;0.001</b>	0.18	0.05 – 0.65	<b>0.008</b>
Capacity	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>
MaxD	1.17	1.14 – 1.21	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.01	0.087
DR	0.87	0.84 – 0.90	<b>&lt;0.001</b>	0.99	0.98 – 1.00	<b>0.007</b>
DeltaS	0.98	0.98 – 0.99	<b>&lt;0.001</b>	1.06	1.05 – 1.06	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTypelane change	0.64	0.56 – 0.73	<b>&lt;0.001</b>	1.59	1.46 – 1.74	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTyperear end	6.78	6.25 – 7.36	<b>&lt;0.001</b>	1.90	1.76 – 2.06	<b>&lt;0.001</b>
N <sub>Road_Type_C</sub>	4					
Observations	34668					

Εικόνα 5-2: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Β (Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικινδυνότητας Middle και High)

### Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης μεσαίας κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (middle vs low)

- Όσο το **όριο ταχύτητας (speedlimit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει υψηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DR (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο μειώνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσον αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικινδυνότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).

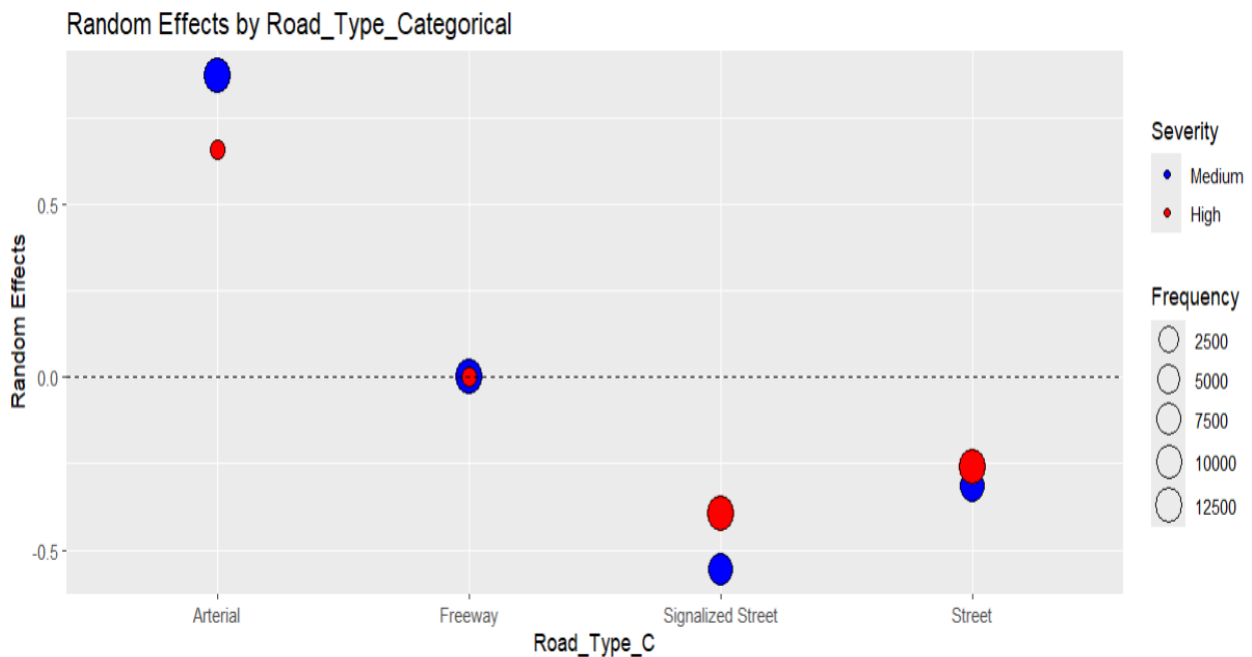
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού.

#### Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης υψηλής κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (high vs low)

- Όσο το **όριο ταχύτητας (speedlimit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται. Εκτός από τη περίπτωση με όριο ταχύτητας 50.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο μειώνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DR (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο μειώνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσον αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικινδυνότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict) ενώ αν είναι εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change), η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού.

Όσον αφορά το **Β-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), οι **τυχηματικές** επιδράσεις παρουσιάζονται παρακάτω:





Διάγραμμα 5-2: Τυχηματικές επιδράσεις, Β-Σενάριο

Αναλυτικά παρατηρούνται τα εξής:

- Το μπλε σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) εμφανίζεται να έχει τη μεγαλύτερη θετική τυχηματική επίδραση.
- Το κόκκινο σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) για υψηλής σοβαρότητας ατυχήματα δείχνει επίσης θετική τυχηματική επίδραση.
- Οι τύποι των οδών όπως "Signalized Street" και "Street" παρουσιάζουν αρνητική τυχηματική επίδραση για ατυχήματα τόσο μεσαίας όσο και υψηλής σοβαρότητας.
- Οι αυτοκινητόδρομοι έχουν μηδενική τυχηματική επίδραση.

Επομένως,

- Τα σημεία που βρίσκονται πάνω από τη διακεκομμένη γραμμή είναι τα θετικά και αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένοι τύποι οδού έχουν αυξημένο κίνδυνο.
- Οι κεντρικοί οδοί (Arterial) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσομοιωμένη επικινδυνότητα ατυχημάτων τόσο μεσαίας όσο και υψηλής επικινδυνότητας με θετική τυχηματική επίδραση, δηλαδή είναι πιο πιθανό να συμβούν ατυχήματα με βάση την προσομοίωση στο συγκεκριμένο τύπο οδού. Συμπερασματικά οι κεντρικοί οδοί είναι επικίνδυνοι για μέτρια και σοβαρά ατυχήματα.
- Οι σηματοδοτημένοι οδοί (Signalized Street) και οι κανονικοί (Street) εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων με τις τυχηματικές επιδράσεις να είναι κάτω από μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιο ασφαλής.

- Όσο αφορά τους αυτοκινητόδρομους (Freeway), δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το μέσο όρο του δείγματος.

Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες και μετέπειτα σχολιάζονται.

Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Γ

**middle vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	1.532	0.625	2.452	<b>0.014</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-1.810	0.773	-2.343	<b>0.019</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-1.991	0.731	-2.723	<b>0.006</b>	**
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	-1.710	0.736	-2.323	<b>0.020</b>	*
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-1.876	0.726	-2.584	<b>0.010</b>	**
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-1.381	0.728	-1.898	0.058	.
MaxD	-0.005	0.001	-5.899	<b>&lt;0.001</b>	***
DR	0.016	0.003	5.093	<b>&lt;0.001</b>	***
DeltaS	0.062	0.001	64.430	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTypelane change	0.783	0.029	26.841	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTyperear end	0.583	0.029	20.304	<b>&lt;0.001</b>	***
Capacity	<0.001	0.000	-52.224	<b>&lt;0.001</b>	***

**high vs low:**

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	0.183	2.069	0.089	0.929	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-3.840	2.492	-1.541	0.123	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-4.086	2.480	-1.648	0.099	.
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	1.486	2.414	0.616	0.538	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-0.083	2.412	-0.034	0.973	
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-4.291	2.478	-1.732	0.083	.
MaxD	0.129	0.012	10.349	<b>&lt;0.001</b>	***
DR	-0.111	0.013	-8.583	<b>&lt;0.001</b>	***
DeltaS	0.046	0.001	34.953	<b>&lt;0.001</b>	***
ConflictTypelane change	0.181	0.046	3.931	<b>0.000</b>	***
ConflictTyperear end	1.068	0.038	28.365	<b>&lt;0.001</b>	***
Capacity	<0.001	0.000	-30.577	<b>&lt;0.001</b>	***

Predictors	Crash_cat: middle			Crash_cat: high		
	Odds Ratios	CI	p	Odds Ratios	CI	p
(Intercept)	1.20	0.02 – 69.29	0.929	4.63	1.36 – 15.75	<b>0.014</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	0.02	0.00 – 2.84	0.123	0.16	0.04 – 0.74	<b>0.019</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	0.02	0.00 – 2.17	0.099	0.14	0.03 – 0.57	<b>0.006</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	4.42	0.04 – 501.19	0.538	0.18	0.04 – 0.77	<b>0.020</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	0.92	0.01 – 104.04	0.973	0.15	0.04 – 0.64	<b>0.010</b>
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	0.01	0.00 – 1.76	0.083	0.25	0.06 – 1.05	0.058
DR	0.90	0.87 – 0.92	<b>&lt;0.001</b>	1.02	1.01 – 1.02	<b>&lt;0.001</b>
Capacity	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>	1.00	1.00 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>
DeltaS	1.05	1.04 – 1.05	<b>&lt;0.001</b>	1.06	1.06 – 1.07	<b>&lt;0.001</b>
MaxD	1.14	1.11 – 1.17	<b>&lt;0.001</b>	1.00	0.99 – 1.00	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTypelane change	1.20	1.09 – 1.31	<b>&lt;0.001</b>	2.19	2.07 – 2.32	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTyperear end	2.91	2.70 – 3.13	<b>&lt;0.001</b>	1.79	1.69 – 1.89	<b>&lt;0.001</b>
N <sub>Road_Type_C</sub>	4					
Observations	87380					

Εικόνα 5-3: Αποτελέσματα πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης- Σενάριο Γ (Σύγκριση Odds Ratios, CI και p τιμών για κατηγορίες επικινδυνότητας Middle και High)

### Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης μεσαίας κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (middle vs low)

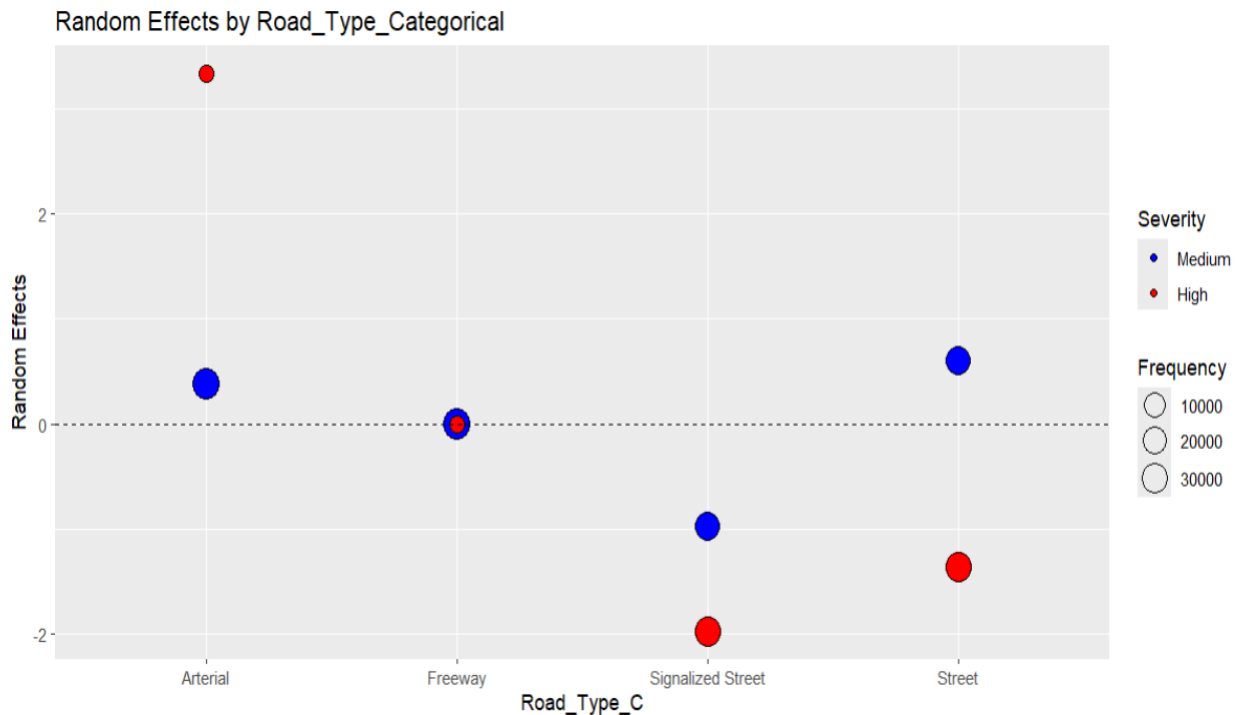
- Όσο το **όριο ταχύτητας (speedlimit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DR (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος)**, δείχνει μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσον αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικινδυνότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).

- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού.

#### **Επεξήγηση αποτελεσμάτων της σύγκρισης υψηλής κατηγορίας κινδύνου σε αντιπαράθεση με τη μικρή κατηγορία κινδύνου (high vs low)**

- Όσο το όριο ταχύτητας (**speedlimit**) μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται. Εκτός από τη περίπτωση με όριο ταχύτητας 50.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **MaxD** (μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος), δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο μειώνεται η μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος.
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **DR** (αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης του δεύτερου οχήματος), δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο αυξάνεται ο αρχικός ρυθμός επιβράδυνσης δεύτερου οχήματος.
- Το θετικό πρόσημο της μεταβλητής **DeltaS** (διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος), δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος.
- Όσον αφορά τη μεταβλητή **Conflict type**, όταν ο τύπος σύγκρουσης είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης αυξάνεται και η επικινδυνότητα ανεβαίνει σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).
- Το αρνητικό πρόσημο της μεταβλητής **Capacity**, δείχνει χαμηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης, όσο αυξάνεται η κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού.

Όσον αφορά το Γ-Σενάριο (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), οι **τυχηματικές** επιδράσεις παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 5-3: Τυχηματικές επιδράσεις, Γ-Σενάριο

Αναλυτικά παρατηρούνται τα εξής:

- Το κόκκινο σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) εμφανίζεται να έχει τη μεγαλύτερη θετική τυχηματική επίδραση (πάνω από 2).
- Το μπλε σημείο με τύπο οδού "Arterial" (κεντρικοί) για υψηλής σοβαρότητας ατυχήματα δείχνει επίσης θετική τυχηματική επίδραση.
- Οι σηματοδοτημένοι οδοί παρουσιάζουν αρνητική τυχηματική επίδραση για ατυχήματα τόσο μεσαίας όσο και υψηλής σοβαρότητας.
- Οι κανονικοί οδοί παρουσιάζουν θετική τυχηματική επίδραση για ατυχήματα μεσαίας σοβαρότητας και αρνητική τυχηματική επίδραση για ατυχήματα υψηλής σοβαρότητας.
- Οι αυτοκινητόδρομοι έχουν μηδενική τυχηματική επίδραση.

Επομένως,

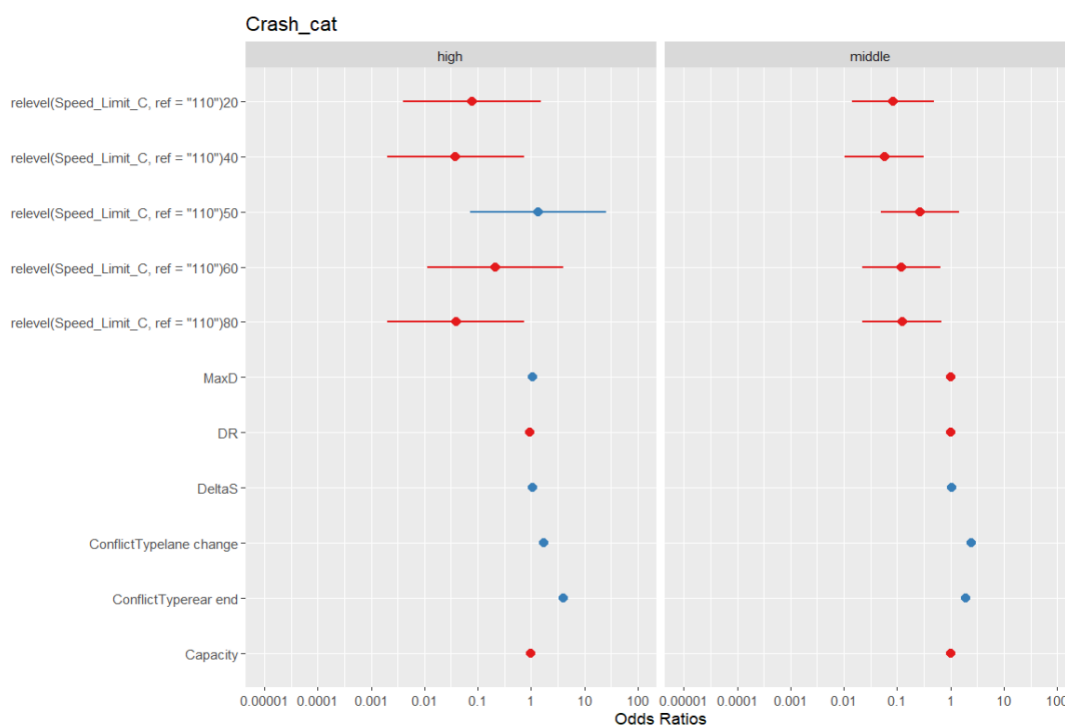
- Τα σημεία που βρίσκονται πάνω από τη διακεκομμένη γραμμή είναι τα θετικά και αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένοι τύποι οδού έχουν αυξημένο κίνδυνο.

- Οι κεντρικοί οδοί (Arterial) εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσομοιωμένη επικινδυνότητα ατυχημάτων, υψηλής επικινδυνότητας με θετική τυχηματική επίδραση. Δηλαδή, είναι πιο πιθανό να συμβούν ατυχήματα με βάση την προσομοίωση στο συγκεκριμένο τύπο οδού.
- Οι σηματοδοτημένοι οδοί (Signalized Street),εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων με τις τυχηματικές επιδράσεις να είναι κάτω από μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιο ασφαλής.
- Όσον αφορά τους αυτοκινητόδρομους (Freeway),δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το μέσο όρο του δείγματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα **διαγράμματα** που δείχνουν **αναλογίες πιθανοτήτων** σε σχέση με συγκεκριμένες παραμέτρους. Υπάρχουν δυο κατηγορίες "high" και "middle".

Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στις αναλογίες πιθανοτήτων, odds ratios με λογαριθμική κλίμακα (από 0.00001 έως 100). Η κλίμακα δείχνει πόσο πιθανό είναι να συμβεί ένα ατύχημα ανάλογα με τις μεταβλητές στον κατακόρυφο άξονα.

Όσον αφορά το **A-Σενάριο** (100% συμβατικά οχήματα, ήτοι MPR 0%),το διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 5-4: Odds Ratios, A-Σενάριο

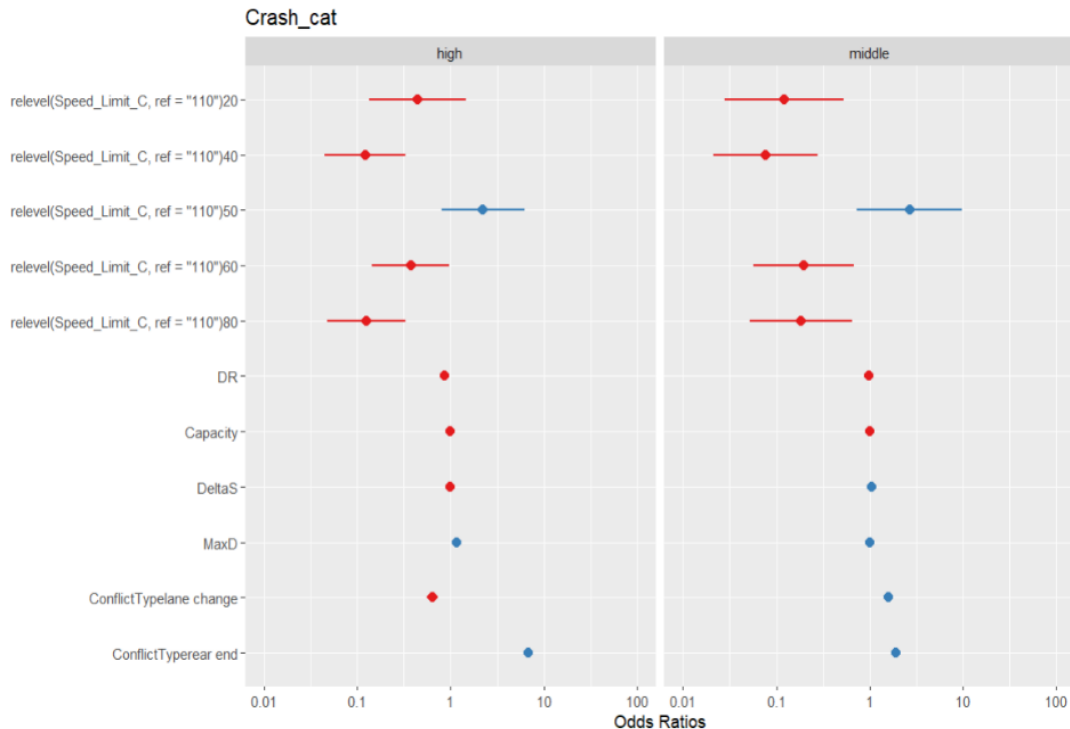
## High

- Στο όριο ταχύτητας 50χλμ/ώρα, το odds ratio είναι το μεγαλύτερο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα όρια, άρα αυτό το όριο αυξάνει τη πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων.
- Όσον αφορά τη πίσω σύγκρουση έχει μεγαλύτερο odds ratio από τη σύγκρουση αλλαγής λωρίδας. Αυτό σημαίνει ότι οι πίσω συγκρούσεις συνδέονται με υψηλότερο κίνδυνο σοβαρών ατυχημάτων σε σχέση με τις αλλαγές λωρίδας.
- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.

## Middle

- Στο όριο ταχύτητας 50χλμ/ώρα, το odds ratio είναι κάτω από 1, μειώνοντας τη πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων.
- Όσο αφορά τη σύγκρουση αλλαγής λωρίδας έχει λίγο μεγαλύτερο odds ratio από τη πίσω σύγκρουση. Αυτό σημαίνει ότι οι συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας συνδέονται με υψηλότερο κίνδυνο σοβαρών ατυχημάτων σε σχέση με τις πίσω συγκρούσεις.
- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.

Όσον αφορά το **B-Σενάριο** (40% συμβατικά οχήματα, 40% συντηρητικά αυτόνομα οχήματα και 20% επιθετικά αυτόνομα οχήματα), το διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 5-5: Odds Ratios, Β-Σενάριο

### High

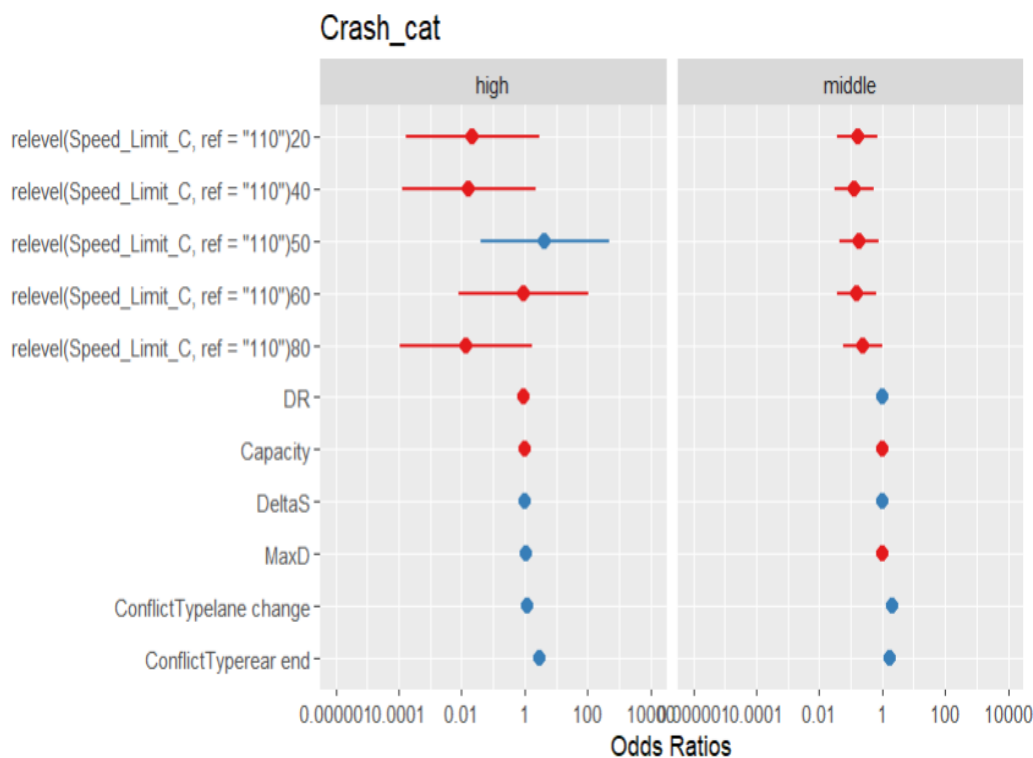
- Στο όριο ταχύτητας 50χλμ/ώρα, το odds ratio είναι πάνω από 1, αυξάνοντας τη πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων.
- Όσον αφορά τη πίσω σύγκρουση έχει πολύ μεγαλύτερο odds ratio από τη σύγκρουση αλλαγής λωρίδας. Αυτό σημαίνει ότι οι πίσω συγκρούσεις συνδέονται με υψηλότερο κίνδυνο σοβαρών ατυχημάτων σε σχέση με τις αλλαγές λωρίδας.
- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.

### Middle

- Στο όριο ταχύτητας 50χλμ/ώρα, το odds ratio είναι πάνω από 1, αυξάνοντας τη πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων.
- Όσον αφορά τη σύγκρουση αλλαγής λωρίδας έχει λίγο μικρότερο odds ratio από τη πίσω σύγκρουση. Αυτό σημαίνει ότι οι συγκρούσεις αλλαγής λωρίδας συνδέονται με χαμηλότερο κίνδυνο σοβαρών ατυχημάτων σε σχέση με τις πίσω συγκρούσεις.
- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.



Όσον αφορά το **Γ-Σενάριο** (100% αυτόνομα οχήματα, ήτοι MPR=100%), το διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 5-6: Odds Ratios, Γ-Σενάριο

### High

- Στο όριο ταχύτητας 50χλμ/ώρα, το odds ratio είναι πάνω από 1, αυξάνοντας τη πιθανότητα σοβαρών ατυχημάτων
- Όσον αφορά τη πίσω σύγκρουση έχει λίγο μεγαλύτερο odds ratio από τη σύγκρουση αλλαγής λωρίδας
- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.

### Middle

- Όσον αφορά τις μεταβλητές Capacity, DeltaS, DR και MaxD έχουν τιμή odds ratio περίπου 1 άρα δεν επηρεάζουν αρκετά τη πιθανότητα ατυχημάτων.

## 6 Συμπεράσματα

### 6.1 Σύνοψη

Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι η **διερεύνηση της επιρροής της υπηρεσίας αυτόνομων μικρών λεωφορείων στην ασφάλεια, με προσομοίωση της κυκλοφορίας**. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα μέσω των οποίων έχει προσδιοριστεί η **επιρροή διαφόρων μεταβλητών στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα**, η οποία υποδηλώνει κοντινές συνθήκες για τη δημιουργία ενός ατυχήματος.

Το δίκτυο προσομοίωσης αντιπροσωπεύει ένα μέρος της πόλης της Αθήνας. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν **τρία σενάρια** που διέφεραν ως προς το ποσοστό συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων. 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 οι κυκλοφοριακές συνθήκες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τμήματος του οδικού δικτύου. Με βάση το χρόνο έως την εμπλοκή, παράχθηκε η συνεχής μεταβλητή της προσομοιασμένης επικινδυνότητας, από την οποία πρέκυψε η **διακριτή εξαρτημένη μεταβλητή κατηγορίας επικινδυνότητας (Crash cat)** με βάση την διακριτοποίηση σε τρεις κατηγορίες.

Πραγματοποιήθηκε περιγραφική **στατιστική ανάλυση** των διαθέσιμων δεδομένων που οδήγησε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, μετά από κατάλληλη επεξεργασία και δοκιμές, αναπτύχθηκαν τα **μαθηματικά μοντέλα**, για το κάθε σενάριο ξεχωριστά με τη μέθοδο **πολυωνυμικής λογιστικής παλινδρόμησης**.

Πίνακας 6-1: Μοντέλα Πολυωνυμικής Λογιστικής Παλινδρόμησης

Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Μοντέλα Πολυωνυμικής Λογιστικής Παλινδρόμησης											
	Α-Σενάριο				Β-Σενάριο				Γ-Σενάριο			
	middle vs low:		high vs low:		middle vs low:		high vs low:		middle vs low:		high vs low:	
	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )	Estimate	Pr(> z )
(Intercept)	1.205	0.106	0.311	0.810	1.296	<b>0.017</b>	0.456	0.279	1.532	<b>0.014</b>	0.183	0.929
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")20	-2.465	<b>0.010</b>	-2.555	0.093	-2.109	<b>0.005</b>	-0.818	0.181	-1.810	<b>0.019</b>	-3.840	0.123
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")40	-2.854	<b>0.001</b>	-3.262	<b>0.030</b>	-2.576	<b>&lt;0.001</b>	-2.107	<b>&lt;0.001</b>	-1.991	<b>0.006</b>	-4.086	0.099
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")50	-1.322	0.127	0.294	0.844	0.986	0.135	0.802	0.124	-1.710	<b>0.020</b>	1.486	0.538
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")60	-2.127	<b>0.014</b>	-1.535	0.304	-1.623	<b>0.010</b>	-0.986	<b>0.043</b>	-1.876	<b>0.010</b>	-0.083	0.973
relevel(Speed_Limit_C, ref = "110")80	-2.097	<b>0.015</b>	-3.247	<b>0.030</b>	-1.692	<b>0.008</b>	-2.068	<b>&lt;0.001</b>	-1.381	0.058	-4.291	0.083
MaxD	-0.003	<b>&lt;0.001</b>	0.064	<b>&lt;0.001</b>	0.005	0.087	0.161	<b>&lt;0.001</b>	-0.005	<b>&lt;0.001</b>	0.129	<b>&lt;0.001</b>
DR	-0.001	0.683	-0.042	<b>&lt;0.001</b>	-0.013	<b>0.007</b>	-0.140	<b>&lt;0.001</b>	0.016	<b>&lt;0.001</b>	-0.111	<b>&lt;0.001</b>
DeltaS	0.063	<b>&lt;0.001</b>	0.054	<b>&lt;0.001</b>	0.054	<b>&lt;0.001</b>	-0.017	<b>&lt;0.001</b>	0.062	<b>&lt;0.001</b>	0.046	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTypeplane change	0.881	<b>&lt;0.001</b>	0.545	<b>&lt;0.001</b>	0.465	<b>&lt;0.001</b>	-0.444	<b>&lt;0.001</b>	0.783	<b>&lt;0.001</b>	0.181	<b>&lt;0.001</b>
ConflictTyperear end	0.658	<b>&lt;0.001</b>	1.385	<b>&lt;0.001</b>	0.642	<b>&lt;0.001</b>	1.914	<b>&lt;0.001</b>	0.583	<b>&lt;0.001</b>	1.068	<b>&lt;0.001</b>
Capacity	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>

## 6.2 Συμπεράσματα

Με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των μαθηματικών μοντέλων αναδεικνύονται οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

**Τα σημαντικότερα συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής σημεία:**

1. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών σεναρίων διάδοσης αυτόνομων οχημάτων (A, B, Γ), παρατηρείται ότι υπάρχει **συνάφεια των στατιστικά σημαντικών μεταβλητών** ως προς την εμφάνιση μέσης ή υψηλής επικινδυνότητας σε σχέση με τη χαμηλή επικινδυνότητα. Η μόνη έντονη διαφοροποίηση σημαντικότητας παρατηρείται στη μεταβλητή ορίου ταχύτητας. Συνεπώς οι εξεταζόμενες μεταβλητές παραμένουν **κρίσιμες ως προς την επιρροή τους στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα ανεξαρτήτως του ποσοστού αυτόνομων οχημάτων** στο δίκτυο.
2. Οι εξεταζόμενες μεταβλητές, μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος (MaxD), διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος όπως παρατηρείται τη χρονική στιγμή ελάχιστου χρόνου σύγκρουσης (DeltaS), τύπος εμπλοκής (Conflict Type) και κυκλοφοριακή ικανότητα (Capacity) έχουν σημαντική επιρροή στην προσομοιασμένη επικινδυνότητα.
3. Στο Σενάριο Β(συμβατικά και αυτόνομα οχήματα) η μεταβλητή **ConflictType rear end** για τη κατηγορία μεσαίου κινδύνου (middle) έχει πολύ υψηλό λόγο πιθανοτήτων (odds ratio). Το υψηλό αυτό odds ratio σε συνδυασμό με τη στατιστική σημαντικότητα και τη θετική τιμή συντελεστή (coefficient estimate), δείχνει ότι **η νωτομετωπική εμπλοκή αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη κατηγορία μεσαίου κινδύνου**. Στο σενάριο Α (συμβατικά) ο λόγος πιθανοτήτων ισούται με 4 και στο Γ σενάριο(αυτόνομα) είναι πολύ χαμηλότερος 2.91. Η συνύπαρξη αυτών των δύο ειδών οχημάτων δημιουργεί αυξημένους κινδύνους, πιθανώς λόγω διαφορετικών συμπεριφορών. Σε ένα πλήρως αυτόνομο δίκτυο, οι πιθανότητες μειώνονται σημαντικά.
4. Όσο το **όριο ταχύτητας (Speed Limit)** μειώνεται σε σχέση με το όριο αναφοράς, η πιθανότητα σύγκρουσης μειώνεται. Αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία των ορίων ταχύτητας για τη πρόληψη των ατυχημάτων.
5. Όσον αφορά τον **τύπο εμπλοκής (Conflict type)**, όταν είναι είτε εμπλοκή αλλαγής λωρίδας (lane change) είτε νωτομετωπική εμπλοκή (rear end), η πιθανότητα σύγκρουσης και άρα η επικινδυνότητα αυξάνονται σε σχέση με την εμπλοκή τύπου διάβασης (crossing conflict).
6. Όσον αφορά τη **διαφορά στις ταχύτητες του οχήματος (DeltaS)**, δείχνει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης όσο αυξάνεται η διαφορά στις ταχύτητες. Αυτή είναι μια λογική συσχέτιση καθώς τα οχήματα όπου κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες είναι πιο πιθανό να βρεθούν σε καταστάσεις κινδύνου όπως προσπεράσεις και φρεναρίσματα. Όσο αφορά το Odds Ratio οι τιμές είναι ελαφρώς πάνω από το ένα, άρα η αύξηση είναι μικρή αλλά σταθερή. Το p-value είναι πολύ χαμηλό, επομένως η μεταβλητή αυτή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη πρόκληση συγκρούσεων.
7. Όσον αφορά την **κυκλοφοριακή ικανότητα της οδού (Capacity)** στο πίνακα των εκτιμήσεων, η επιρροή της έχει αρνητική τιμή (κάτω από 0.001) και είναι στατιστικά

σημαντική σε όλα τα σενάρια. Στο πίνακα με τα Odds Ratios έχει τιμή ίση με τη μονάδα σε όλα τα σενάρια. Άρα κάθε αλλαγή μιας μεμονωμένης μονάδας της κυκλοφοριακής ικανότητας έχει πολύ μικρό αντίκτυπο. Όταν όμως η κυκλοφοριακή ικανότητα αυξηθεί αισθητά, η επικινδυνότητα πέφτει με βάση το αρνητικό της πρόσημο.

8. Όσον αφορά τη **μέγιστη επιβράδυνση του δεύτερου οχήματος (DR)** για τη μεσαία κατηγορία κινδύνου το odds ratio είναι ελάχιστο πάνω τη μονάδα. Ενώ όσο αφορά την υψηλή κατηγορία κινδύνου το odds ratio ισούται με τη μονάδα άρα η επίδραση είναι πολύ μικρή.
9. Και στα τρία σενάρια οι **κεντρικές οδοί (Arterials)** εμφανίζουν τη μεγαλύτερη προσομοιωμένη επικινδυνότητα ατυχημάτων, δηλαδή είναι πιο πιθανό να συμβούν ατυχήματα με βάση την προσομοίωση στο συγκεκριμένο τύπο οδού. Οι σηματοδοτημένοι οδοί (Signalized Street) και οι κανονικοί (Street) εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων άρα είναι πιο ασφαλείς. Ενώ όσον αφορά τους αυτοκινητόδρομους (Freeway), δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το μέσο όρο του δείγματος.
10. Η **πολυωνυμική λογιστική παλινδρόμηση** αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για την ανάλυση των στοιχείων όταν η εξαρτημένη μεταβλητή λαμβάνει πολλές κατηγορίες. Τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα Διπλωματική Εργασία προσφέρουν μια αξιόπιστη εικόνα χρήσιμη για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

### 6.3 Προτάσεις χρησιμότητας και αξιοποίησης αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την **αξιοποίηση των αποτελεσμάτων** της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι παρακάτω **προτάσεις** μπορούν να συμβάλουν στην **ενίσχυση της ασφάλειας** και να αξιοποιηθούν τόσο από τις αρμόδιες αρχές όσο και από φορείς που σχεδιάζουν τις αστικές συγκοινωνίες:

1. Βελτίωση κανονισμών κυκλοφορίας στην Αθήνα. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα σχετικά με τον τύπο εμπλοκής μπορούν να συμβάλλουν στη διαμόρφωση κανόνων προτεραιότητας ή βελτιωμένων οδικών σημάτων για οδούς με μεγαλύτερο φόρτο κυκλοφορίας.
2. Ενσωμάτωση αυτόνομων μικρών λεωφορείων για μικρές αποστάσεις και περιορισμένες διαδρομές, όπως σε αστικές περιοχές, πανεπιστημιούπολεις και τουριστικές περιοχές. Αυτά τα προγράμματα είναι συνήθως πιλοτικά, γιατί σκοπός τους είναι να δοκιμάσουν πώς αυτά τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να ενσωματωθούν με ασφάλεια σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Έτσι, τα δεδομένα θα μπορούσαν να βοηθήσουν στον σχεδιασμό τέτοιων πιλοτικών προγραμμάτων στην Αθήνα ή άλλες πόλεις, μειώνοντας τους κινδύνους.
3. Ενημέρωση των χρηστών του δικτύου. Τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για να ενημερωθούν οι οδηγοί σχετικά με τους κινδύνους. Αυτή η ενημέρωση μπορεί να γίνει μέσω εκπαιδευτικών καμπανιών που εστιάζουν στην οδική ασφάλεια.

#### 6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Υπάρχουν **περιθώρια για περαιτέρω έρευνα** σε ένα πεδίο που θα απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα. Ακολουθεί παρακάτω ένα σύνολο προτάσεων που ενδεχομένως θα αξιοποιηθεί σε μελλοντικές έρευνες.

1. Ανάλυση δεδομένων από πραγματικά αυτόνομα δίκτυα για τη στατιστική ανάλυση ατυχημάτων.
2. Υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω μελέτες που να συγκρίνουν την επίδραση των αυτόνομων οχημάτων σε πόλεις με διαφορετική δομή και κυκλοφοριακές συνθήκες, όπως η Αθήνα και μικρότερες ελληνικές πόλεις. Αυτό θα βοηθήσει στη κατανόηση της ευρύτερης επίδρασης των αυτόνομων οχημάτων.
3. Ανάλυση της επίδρασης αυτόνομων οχημάτων σε δίκτυα με πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας. Η έρευνα σε σύνθετα δίκτυα πολλαπλών λωρίδων θα προσφέρει νέα δεδομένα.
4. Προσθήκη περισσότερων σεναρίων με διαφορετικά ποσοστά αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων, καθώς και διάφορες κυκλοφοριακές συνθήκες.
5. Μελέτη επίδρασης των αυτόνομων οχημάτων σε σενάρια με ευάλωτους χρήστες όπως οι πεζοί και οι ποδηλάτες. Είναι σημαντικό, η έρευνα να επεκταθεί και σε σενάρια που περιλαμβάνουν αυτούς τους χρήστες της οδού.
6. Εξέταση παραμέτρων όπως η ολισθηρότητα οδού, η φωτεινότητα και η ποιότητα οδοστρώματος. Η επίδραση αυτών των παραμέτρων σε μικτά κυκλοφοριακά σενάρια (με συμβατικά και αυτόνομα οχήματα) δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς.
7. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εισαγωγής αυτόνομων οχημάτων και της συνύπαρξής τους με συμβατικά οχήματα.
8. Επίδραση καιρικών συνθηκών (όπως η βροχή) στη συμπεριφορά των οχημάτων.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Oikonomou, M. G., Ziakopoulos, A., Chaudhry, A., Thomas, P., & Yannis, G. (2023). From conflicts to crashes: Simulating macroscopic connected and automated driving vehicle safety. *Accident Analysis & Prevention*, *187*, 107087.
2. Ziakopoulos, A., Oikonomou, M. G., Sekadakis, M., & Yannis, G. (2024). Safety evaluation via conflict classification during automated shuttle bus service operations. *European Transport Research Review*, *16*(1), 38.
3. Essa, M., & Sayed, T. (2015). Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. *Accident Analysis & Prevention*, *84*, 41-53.
4. El-Hansali, Y., Farrag, S., Yasar, A., Shakshuki, E., & Al-Abri, K. (2021). Using surrogate measures to evaluate the safety of autonomous vehicles. *Procedia Computer Science*, *191*, 151-159.
5. Ye, L., & Yamamoto, T. (2019). Evaluating the impact of connected and autonomous vehicles on traffic safety. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *526*, 121009.
6. Wang, C., Xu, C., Xia, J., Qian, Z., & Lu, L. (2018). A combined use of microscopic traffic simulation and extreme value methods for traffic safety evaluation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *90*, 281-291.
7. Morando, M. M., Tian, Q., Truong, L. T., & Vu, H. L. (2018). Studying the safety impact of autonomous vehicles using simulation-based surrogate safety measures. *Journal of advanced transportation*, 2018.
8. D. J. Fagnant and K. Kockelman, "Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 77, pp. 167–181, 2015.
9. Rau, P., Yanagisawa, M., & Najm, W. G. (2015). Target crash population of automated vehicles. In *24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration* (No. 15-0430).
10. B. Schoettle and M. Sivak, *A Preliminary Analysis of RealWorld Crashes Involving Self-Driving Vehicles*, The University of Michigan, Ann Arbor, Mich, USA, 2015.
11. European Parliament & Council of the European Union. (2019). Regulation (EU) 2019/2144. Ανακτήθηκε από:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R2144>

12. Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)
13. Summary of SAE International's Levels of Driving Automation for On-Road Vehicles (2014). Ανακτήθηκε από [http://www.sae.org/misc/pdfs/automated\\_driving.pdf](http://www.sae.org/misc/pdfs/automated_driving.pdf)
14. U.S. Department of Transportation. Federal Automated Vehicles Policy - September 2016. Ανακτήθηκε από <https://www.transportation.gov/AV/federal-automatedvehicles-policy-september-2016>
15. LEVITATE project Ανακτήθηκε από: <https://levitate-project.eu/>
16. R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

## Παράρτημα

```
library(data.table) #load specific library
```

```
library(car) #load specific library
```

```
library(readxl) #load specific library
```

```
library(mclgfit) #
```

```
library(memisc) #
```

```
library(sjPlot)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(nnet)
```

```
library(ggplot2)
```

```
library(mclgfit)
```

```
library(lattice)
```

```
library(plyr)
```

```
Geom = read_excel("df_geometry.xlsx")
```

```
A_dataset = fread("A_6694657.csv")
```

```
A_dataset$X = NULL
```

```
str(A_dataset)
```

```
A_geom = merge(A_dataset, Geom, by.x = "SecondLink", by.y = "ID")
```

```
A_geom$log_TTC = log(A_geom$TTC+0.0000001)
```

```
A_geom=subset(A_geom, A_geom$TTC>0)
```

```
A_geom=subset(A_geom, A_geom$TTC<1.5)
```

```
A_geom$Road_Type_C = as.factor(A_geom`Road Type`)
```

```
A_geom$Speed_Limit_C = as.factor (A_geom$'Speed Limit')
```

```
A_geom$crashrate=2^((-1)*(-log(0.5)*log(1+(A_geom$TTC/(1.5-  
A_geom$TTC))))/(log((1+(A_geom$TTC/(1.5-A_geom$TTC))))))^2)
```

```
A_geom$Crash_cat = cut(A_geom$crashrate,
```

```
breaks= c(0, 0.08, 0.75, 1),
```



```

labels = c("low", "middle", "high"))
table(A_geom$Crash_cat)
table(A_geom$Speed_Limit_C)

MCmodel = mblogit(Crash_cat ~ relevel(Speed_Limit_C, ref="110") +MaxD +DR + DeltaS+
ConflictType +Capacity, data = A_geom)
summary(MCmodel)

MCmodel2 = mblogit(Crash_cat ~ relevel(Speed_Limit_C, ref="110") +MaxD+DR + DeltaS+
ConflictType +Capacity,random = ~1 | Road_Type_C, data = A_geom)
summary(MCmodel2)
mtable(MCmodel2)
sjPlot::tab_model(MCmodel2)
anova(MCmodel, MCmodel2, test = "Chisq")

##Graphs ##
#Mixed-Effects Multinomial Regression modelling
#https://blog.devgenius.io/multinomial-data-in-r-37d3ba1b6d42
#https://ladal.edu.au/regression.html#Mixed-Effects_Multinomial_Regression

fitted_perc_MLNM = predict(MCmodel2, newdata = A_geom)
highest_probabilities <- apply(fitted_perc_MLNM, 1, max)

#Get predictions overall in most likely category
fitted_perc_MLNM_2 = (highest_probabilities -
min(highest_probabilities))/(max(highest_probabilities) - min(highest_probabilities))
#max.col(fitted_perc_MLNM_2, "first")

#Categorical probability plot

```

```

mod_data_fit<-cbind(A_geom, fitted_perc_MLNM)
ggplot(mod_data_fit,
       aes(x=fitted_perc_MLNM,
           fill=as.factor(Crash_cat)))+
geom_density(alpha=0.6)+
theme_bw()+
labs(x="P(Category | model)",
     y="Density",
     fill="Crash rate Category")+
ggtitle("Probability allocation per crash rate category")

```

```

sjPlot::plot_model(MCmodel2)
sjPlot::tab_model(MCmodel2)

```

```

# Assuming 'model' is your mblogit model

```

```

random_effects <- data.frame(MCmodel2[["random.effects"]][[1]])

```

```

ranef = data.frame(random_effects); names(ranef) = "Random_Effects"

```

```

# Create a vector with "mid" and "high"

```

```

severity_levels <- c("Medium", "High")

```

```

# Generate your sequence

```

```

severity_seq <- seq(0, 1, by = 1)

```

```

# Convert the sequence to corresponding levels

```

```

severity_factor <- factor(severity_seq, labels = severity_levels)

```

```

# Assign the factor to ranef$Severity

```

```

ranef$Severity <- severity_factor

```

```

ranef$Road_Type_C = rep(c("Freeway", "Street", "Arterial", "Signalized Street"), each = 2)

```

```
ranef$Frequency=table(A_geom$Road_Type_C)
```

```
# Create a dotplot with random effect values on the y-axis, size increased per frequency, color  
by conflict type
```

```
ggplot(ranef, aes(x = Road_Type_C, y = Random_Effects, fill = Severity, size = Frequency)) +  
  geom_point(shape = 21) +  
  labs(x = "Road_Type_C", y = "Random Effects") +  
  scale_fill_manual(values = c("High" = "red", "Medium" = "blue")) + # Specify colors  
  scale_size_continuous(range = c(4, 7)) +  
  geom_hline(yintercept = 0, linetype = "dashed", color = "black") +  
  ggtitle("Random Effects by Road_Type_Categorical")
```