Πολυεπίπεδη εκτίμηση κινδύνου ατυχήματος σε συνθήκες μετάβασης από τη μερική στην πλήρη αυτοματοποίηση μέσω προσομοίωσης αστικής κυκλοφορίας

Μαρία Γ. Οικονόμου

Διδακτορική Διατριβή

Τριμελής Επιτροπή:

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
Ελένη Βλαχογιάννη, Καθηγήτρια ΕΜΠ
Κωνσταντίνος Γκιοτσαλίτης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Ιανουάριος 2026

Εκτενής περίληψη

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην αυτοκινητοβιομηχανία πρόκειται να αλλάξουν ριζικά τα συστήματα μεταφορών. Η **εισαγωγή των αυτόνομων οχημάτων** στην κυκλοφορία αναμένεται να βελτιώσει την κυκλοφοριακή ικανότητα, ενώ ταυτόχρονα να μειώσει τον χρόνο διαδρομής, τις εκπομπές ρύπων και τα ατυχήματα, περιορίζοντας το ανθρώπινο σφάλμα. Ωστόσο, καθώς τα αυτόνομα οχήματα αρχίζουν να συνυπάρχουν με τα συμβατικά οχήματα αλλά και με τους ευάλωτους χρήστες του οδικού δικτύου, **η διασφάλιση της ασφάλειας όλων των χρηστών αποτελεί μία κρίσιμη πρόκληση**. Η αξιολόγηση της θα είναι επομένως απαραίτητη σε όλα τα μελλοντικά στάδια αυτοματοποίησης.

Λόγω όμως της έλλειψης ιστορικών και αξιόπιστων δεδομένων ατυχημάτων για υψηλά επίπεδα αυτοματισμού και ποσοστών διείσδυσης στην αγορά, **η μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας** (microscopic simulation) αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, η μικροσκοπική προσομοίωση μοντελοποιεί λεπτομερώς τα οχήματα και τις αλληλεπιδράσεις τους, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για τη διερεύνηση της ασφάλειας μέσω εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας (Surrogate Safety Measures). Καθώς η προσομοίωση δεν αναπαριστά ατυχήματα, οι εναλλακτικοί δείκτες εκτίμησης της ασφάλειας, όπως είναι ο χρόνος έως την εμπλοκή οχημάτων (Time-To-Collision) ή ο αριθμός των εμπλοκών, παρέχουν έναν έμμεσο τρόπο εκτίμησης της πιθανότητας ατυχήματος. Η ανάλυση αυτών των δεικτών είναι ιδιαίτερα πολύτιμη και για την περίπτωση της διερεύνησης της εισαγωγής των αυτόνομων οχημάτων, διότι δεν είναι ακόμη διαθέσιμα αξιόπιστα δεδομένα ατυχημάτων. Το ίδιο ισχύει και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται η συγχώνευση πολλαπλών πηγών δεδομένων.

Επομένως, παρουσιάζονται πολλά πλεονεκτήματα από την αξιολόγηση της ασφάλειας μέσω προσομοίωσης κυκλοφορίας με την εκτίμηση εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας, υπάρχουν όμως και αρκετές προκλήσεις. Τα βασικά ζητήματα είναι τα εξής:

- Οι **εναλλακτικοί δείκτες εκτίμησης ασφάλειας** προέρχονται από περιβάλλον προσομοίωσης χωρίς καταγεγραμμένες συγκρούσεις, προκαλώντας ανησυχίες σχετικά με τη δυνατότητα ακριβούς εκτίμησης του κινδύνου ατυχήματος.

- Απουσία εδραιωμένης **γνώσης παραμέτρων μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των αυτόνομων οχημάτων,** με περιορισμένες μέχρι σήμερα έρευνες για τη βαθμονόμηση σχετικών μοντέλων και την κατανόηση των διαφορών τους σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.

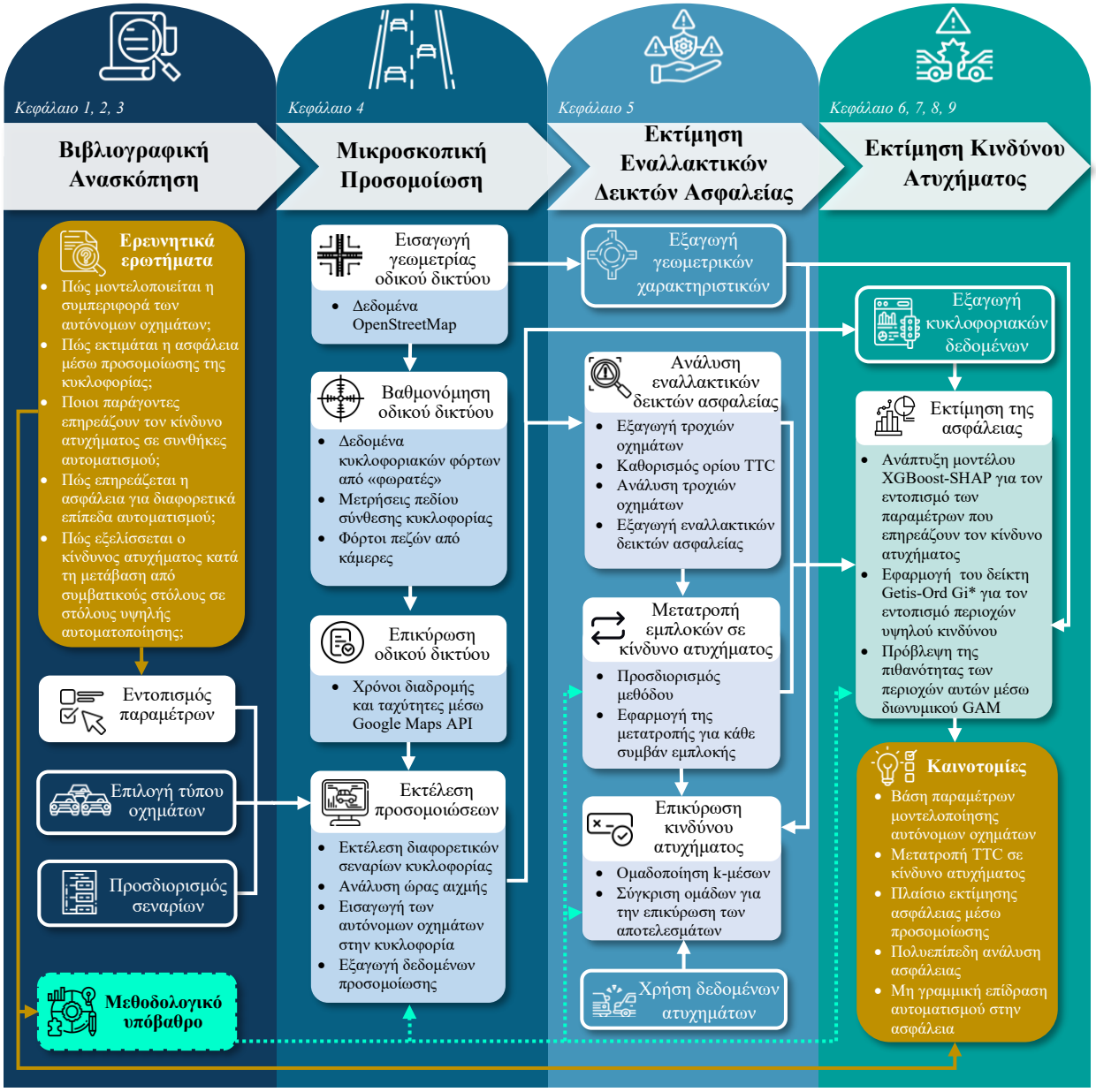
- Οι τρέχουσες μέθοδοι προσομοίωσης και εκτίμησης της ασφάλειας δεν λαμβάνουν υπόψη την **εμπειρική επικύρωση**, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με παρατηρούμενα δεδομένα ατυχημάτων.

- Ανάγκη αξιολόγησης της ασφάλειας σε **διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού (SAE)** και σενάρια οδήγησης, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία των αυτόνομων οχημάτων.

Τα παραπάνω ζητήματα διαμορφώνουν το ερευνητικό υπόβαθρο και το κίνητρο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η οποία επιδιώκει να αντιμετωπίσει τα κενά γνώσης στον τομέα αυτό, θέτοντας τους παρακάτω **στόχους**:

- Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση για την αναγνώριση, ενοποίηση και σύγκριση **παραμέτρων συμπεριφοράς αυτόνομων οχημάτων** σε μικροσκοπικές προσομοιώσεις, σε σχέση με τις αντίστοιχες παραμέτρους των συμβατικών οχημάτων.
- Έμφαση στις **εφαρμογές της προσομοίωσης κυκλοφορίας για την αξιολόγηση της οδικής ασφάλειας**, μέσω ολοκληρωμένης σύνθεσης προηγούμενων ερευνητικών ευρημάτων μέσα από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση.
- Καθιέρωση μιας ισχυρής, εφαρμόσιμης και επιστημονικά τεκμηριωμένης **μεθοδολογίας αξιολόγησης της ασφάλειας** για την εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης σε μελλοντικά σενάρια κυκλοφορίας αυτόνομων οχημάτων.
- **Επικύρωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας** εκτίμησης του κινδύνου ατυχήματος μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης, μέσω μιας ολοκληρωμένης συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των παρατηρούμενων δεδομένων ατυχημάτων.
- Εκτέλεση **πολυεπίπεδης ανάλυσης της επιρροής των αυτόνομων οχημάτων στην ασφάλεια** με τη χρήση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου συνδυάζοντας μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας, μέθοδο Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) και χωρική στατιστική, για τη διερεύνηση του κινδύνου ατυχημάτων σε πολλαπλές συνθήκες και επίπεδα αυτοματοποίησης, δημιουργώντας μια ερμηνεύσιμη και αξιόπιστη κατανόηση της επίδρασης της αυτοματοποίησης στην οδική ασφάλεια.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το **μεθοδολογικό πλαίσιο**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διατριβή. Το διάγραμμα περιγράφει τα βασικά στοιχεία και τις μεταξύ τους διασυνδέσεις, δείχνοντας τον τρόπο κατά τον οποίο το κάθε στάδιο συμβάλλει στη συνολική διαδικασία, η οποία στοχεύει στην αξιολόγηση του κινδύνου ατυχημάτων σε συνθήκες αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας και σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού. Ακολουθώντας αυτό το πλαίσιο, η διατριβή δομείται γύρω από **τέσσερα θεμελιώδη στάδια**, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής του μεθοδολογικού πλαισίου της διδακτορικής διατριβής

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Αυτό το στάδιο αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο της διατριβής, καθώς καλύπτει κρίσιμα ερευνητικά κενά στην αξιολόγηση του κινδύνου ατυχημάτων σε συνθήκες αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας. Ξεκινά με τα **Ερευνητικά ερωτήματα**, τα οποία καθορίζουν τις βασικές πτυχές της έρευνας σχετικά με τη μοντελοποίηση των αυτόνομων οχημάτων, την αξιολόγηση της ασφάλειας μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης και την εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού στα αστικά οδικά δίκτυα. Ο **Εντοπισμός παραμέτρων** αναδεικνύει τις συγκεκριμένες παραμέτρους, οι οποίες διαφοροποιούν τα αυτόνομα από τα συμβατικά οχήματα,

προσφέροντας κρίσιμες πληροφορίες για την ακριβή ενσωμάτωσή τους στα μοντέλα προσομοίωσης. Η διερεύνηση αυτή συμπληρώνεται από την **Επιλογή τύπου οχημάτων**, όπου εξετάζονται διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού (SAE) προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις τους στην οδική ασφάλεια. Επιπλέον, ο **Προσδιορισμός σεναρίων** συνδυάζει τις παραπάνω γνώσεις με στόχο την ανάπτυξη ποικίλων σεναρίων αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας, ώστε να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος υπό διαφορετικές συνθήκες. Τέλος, το **Μεθοδολογικό υπόβαθρο**, βασισμένο στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, παρουσιάζει και τεκμηριώνει τις προσεγγίσεις που υιοθετήθηκαν σε όλη τη διατριβή.

Ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα διατριβή στοχεύει στην αντιμετώπιση των προαναφερθέντων ερευνητικών κενών που σχετίζονται με την εκτίμηση της οδικής ασφάλειας υπό συνθήκες αυτοματισμού. Για τον σκοπό αυτό, διατυπώνονται τα ακόλουθα **Ερευνητικά Ερωτήματα (ΕΕ)**:

- **ΕΕ1:** Η αποτελεσματική ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στις προσομοιώσεις κυκλοφορίας συχνά απαιτεί προσαρμογή παραμέτρων στα υπάρχοντα μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς. Ωστόσο, η αξιοπιστία τέτοιων προσομοιώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια αυτών των προσαρμογών και από τις υποθέσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων και τις αλληλεπιδράσεις τους με τα συμβατικά οχήματα. *Ποιες παράμετροι μπορούν να αναπαραστήσουν και να μοντελοποιήσουν με βέλτιστο τρόπο τη συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων στο πλαίσιο μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας;*
- **ΕΕ2:** Σε οδικά περιβάλλοντα με μεγάλους στόλους αυτόνομων οχημάτων και υψηλά επίπεδα αυτοματοποίησης (SAE), αξιόπιστα δεδομένα ατυχημάτων συχνά απουσιάζουν, καθιστώντας την άμεση αξιολόγηση της ασφάλειας αδύνατη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μικροσκοπική προσομοίωση αποτελεί πολύτιμη εναλλακτική μέθοδο. *Πώς μπορεί η μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για την εκτίμηση της οδικής ασφάλειας;*
- **ΕΕ3:** Παρόλο που τα αυτόνομα οχήματα στοχεύουν στη μείωση του ανθρώπινου σφάλματος, της κύριας αιτίας ατυχημάτων, η συνολική τους επίδοση εξαρτάται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ κυκλοφορίας, υποδομής και χαρακτηριστικών αυτοματοποίησης. *Ποιοι παράγοντες σχετιζόμενοι με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, την κυκλοφορία και την αυτοματοποίηση επηρεάζουν καθοριστικά την οδική ασφάλεια σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματοποίησης και ποσοστά διείσδυσης στην αγορά;*
- **ΕΕ4:** Καθώς εξελίσσονται τα επίπεδα αυτοματοποίησης και οι συνθέσεις των στόλων, ενδέχεται να εμφανιστούν χωρικές διαφοροποιήσεις στις συνθήκες οδικής ασφάλειας εντός των αστικών δικτύων. *Πώς μεταβάλλεται το επίπεδο και η χωρική κατανομή του κινδύνου ατυχήματος σε συνθήκες διαφορετικών στόλων και επιπέδων αυτοματοποίησης στα αστικά οδικά δίκτυα;*
- **ΕΕ5:** Η μετάβαση από τη συμβατική κυκλοφορία σε κυκλοφορία υψηλού αυτοματισμού είναι σταδιακή και περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια μικτής κυκλοφορίας, τα οποία παρουσιάζουν διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά και κινδύνους. *Πώς εξελίσσεται ο κίνδυνος σύγκρουσης κατά τη μετάβαση από τη συμβατική κυκλοφορία σε στόλους υψηλής αυτοματοποίησης;*

Επιλογή τύπου οχημάτων

Μέσω μιας συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η παρούσα διατριβή επιχειρεί να καλύψει το ερευνητικό κενό που αφορά στον **καθορισμό παραμέτρων στις μικροσκοπικές προσομοιώσεις για την ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων**. Για τον σκοπό αυτό, εντοπίστηκαν αρχικά 934 έρευνες και, μετά από ενδελεχή αξιολόγηση, ανασκοπήθηκαν συνολικά 54 μελέτες με κατάλληλες παραμέτρους. Με τη σύγκριση αυτών των παραμέτρων με εκείνες που αφορούν τα συμβατικά οχήματα, παρέχονται πολύτιμες γνώσεις καθοριστικές για την ορθή ενσωμάτωσή τους στα μοντέλα προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένων συγκεκριμένων τιμών ανά παράμετρο, που θα διευκολύνουν τη διαδικασία καθορισμού παραμέτρων από μελλοντικούς ερευνητές μειώνοντας σχετικό κόστος και απαιτούμενο χρόνο.

Επιπλέον, η παρούσα διατριβή επιχειρεί να ανασκοπήσει συστηματικά τα ευρήματα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και να εντοπίσει περαιτέρω τις πτυχές της αξιολόγησης οδικής ασφάλειας στις οποίες η προσομοίωση κυκλοφορίας μπορεί να εφαρμοστεί. Μέσω συστηματικής ανασκόπησης εντοπίστηκαν κατάλληλα **πλαίσια και μέθοδοι εκτίμησης της ασφάλειας**, στις οποίες μπορεί να αξιοποιηθεί η προσομοίωση κυκλοφορίας.

Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έχουν εντοπιστεί αρκετές παράμετροι, ενώ παρατηρείται ότι έχουν μελετηθεί πολλοί τύποι αυτόνομων οχημάτων. Αυτοί διαφοροποιούνται ως προς το επίπεδο αυτοματοποίησης (SAE), τη συνδεσιμότητα και τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς τους, όπως η επιθετικότητα, η διαδικασία εισαγωγής στο δίκτυο κ.ά. Για την παρούσα διατριβή, οι προσπάθειες επικεντρώνονται στη συμπερίληψη όσο το δυνατόν περισσότερων μελλοντικών τεχνολογιών, και πιο συγκεκριμένα όλων των επιπέδων αυτοματοποίησης. Μάλιστα, επιλέχθηκαν οι **τύποι οχημάτων** που αντιπροσωπεύουν ανά δύο επίπεδα αυτοματοποίησης: επίπεδα SAE 0-1 που αντιστοιχούν στη συμβατική οδήγηση, επίπεδα SAE 2-3 που αφορούν στη μερική αυτοματοποίηση, επίπεδα SAE 4-5 που αντιστοιχούν στην πλήρη αυτοματοποίηση και επίπεδα SAE 4-5 με επιθετική συμπεριφορά, τα οποία αντιπροσωπεύουν προηγμένες συνθήκες αυτοματοποίησης υψηλής απόδοσης.

Εντοπισμός παραμέτρων

Για καθέναν από τους επιλεγμένους τύπους οχημάτων που περιγράφηκαν παραπάνω, οι **αντίστοιχες παράμετροι** εντοπίστηκαν βάσει των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές αυτών των παραμέτρων, οι οποίες είναι διαθέσιμες στο λογισμικό Aimsun Next (το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή), με σκοπό τη μοντελοποίηση και η ενσωμάτωσή τους στις προσομοιώσεις. Οι παράμετροι που διαπιστώθηκε ότι διαφοροποιούνται μεταξύ αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2, μαζί με τα αντίστοιχα μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς, όπως τα μικροσκοπικά μοντέλα ακολουθούντος οχήματος (car-following), αλλαγής λωρίδας (lane-changing) και αποδοχής διάκενου (gap acceptance).

Προσδιορισμός σεναρίων

Για την ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στις προσομοιώσεις, είναι απαραίτητο να καθοριστούν **σενάρια, τα οποία να αναπαριστούν πιθανές μελλοντικές συνθήκες κυκλοφορίας**, προκειμένου να αξιολογηθεί ο κίνδυνος ατυχήματος. Στην παρούσα διατριβή επιλέγονται δεκαπέντε διαφορετικά σενάρια, ώστε να διερευνηθούν πολλαπλές πιθανές διαμορφώσεις της αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας, συμπεριλαμβάνοντας όλους τους επιλεγμένους τύπους οχημάτων και τα αντίστοιχα επίπεδα αυτοματοποίησης. Τα σενάρια αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.

Μοντέλο ακολουθούντος οχήματος

- Εξαρτάται από παραμέτρους όπως τα χαρακτηριστικά του οδηγού και τη γεωμετρία του οδικού δικτύου
- Περιλαμβάνει στοιχεία επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, με προσαρμογές στην ταχύτητα εξαιτίας των συνθηκών κυκλοφορίας

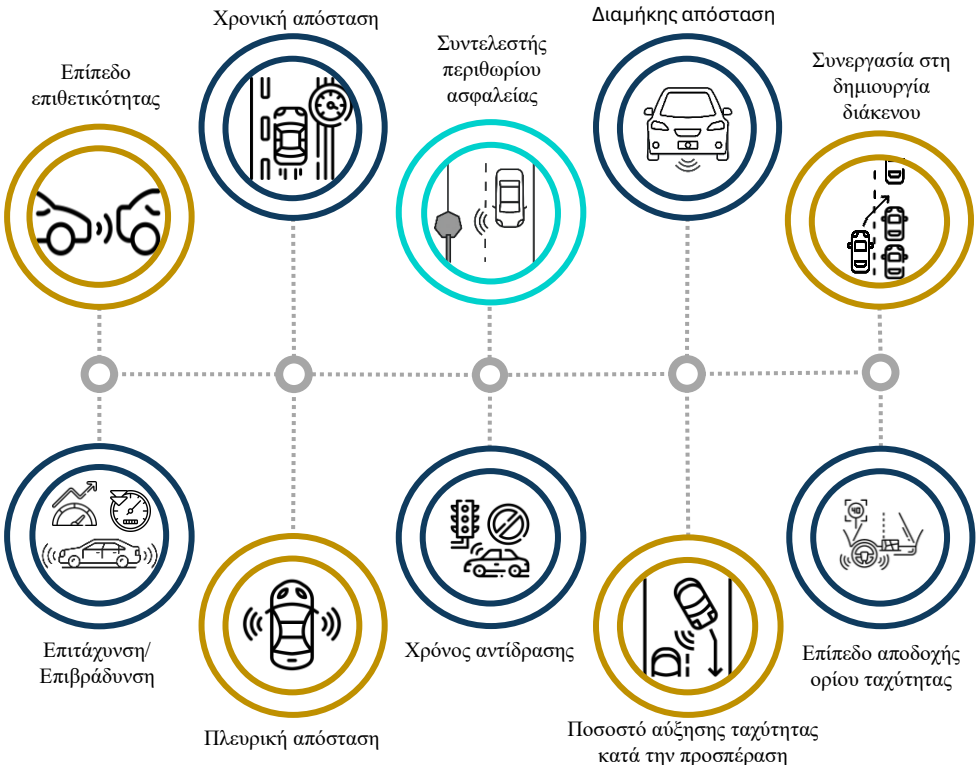
Μοντέλο αλλαγής λωρίδας

Αλλαγή λωρίδας πραγματοποιείται λόγω:

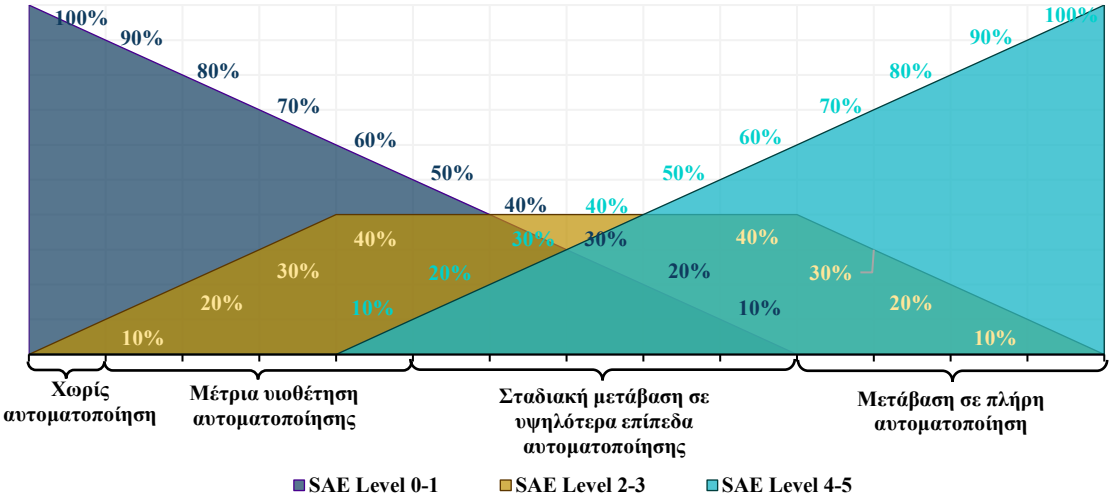
- Ανάγκης αλλαγής λωρίδας εξαιτίας:
  - Λωρίδας «στόχος»
  - Εμποδίου
  - Προσπέρασης
- Βαθμός αναγκαιότητας αλλαγής λωρίδας
- Δυνατότητα αλλαγής λωρίδας

Μοντέλο αποδοχής διάκενου

- Καθορίζει την απόφαση διέλευσης σε διασταυρώσεις
- Εφαρμόζεται σε πινακίδες παραχώρησης προτεραιότητας και υποχρεωτικής διακοπής πορείας
- Αξιολογεί τη διέλευση λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και τα επίπεδα κινδύνου



Σχήμα 2: Παράμετροι που διαφοροποιούν τη μοντελοποίηση των αυτόνομων οχημάτων στο λογισμικό Aimsun Next



Σχήμα 3: Σενάρια διείσδυσης αυτόνομων οχημάτων

Μεθοδολογικό υπόβαθρο

Η έρευνα βασίζεται σε ένα **ευρύ μεθοδολογικό υπόβαθρο** που περιλαμβάνει προσομοίωση κυκλοφορίας, στατιστικές μεθόδους και τεχνικές μηχανικής μάθησης (Machine Learning), καθώς και προσεγγίσεις χωρικής ανάλυσης. Το σύνολο αυτών των μεθοδολογιών καθοδήγησε κάθε στάδιο της ερευνητικής διαδικασίας, από τη βαθμονόμηση και την επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης έως την εκτίμηση, τη μοντελοποίηση και τη χωρική ερμηνεία του κινδύνου ατυχήματος. Οι επιλεγμένες μέθοδοι προέρχονται από καθιερωμένες και ευρέως αποδεκτές πρακτικές στην ανάλυση οδικής ασφάλειας και έχουν προσαρμοστεί στο ειδικό πλαίσιο αξιολόγησης των αυτόνομων οχημάτων. Με την ενσωμάτωση αυτών των μεθοδολογικών αρχών, η διατριβή διασφαλίζει ότι όλες οι επόμενες αναλύσεις στηρίζονται σε επιστημονικά τεκμηριωμένες τεχνικές, υποστηρίζοντας έτσι την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου πολυεπίπεδου πλαισίου για την αξιολόγηση του κινδύνου ατυχήματος υπό διαφορετικά επίπεδα αυτοματοποίησης.

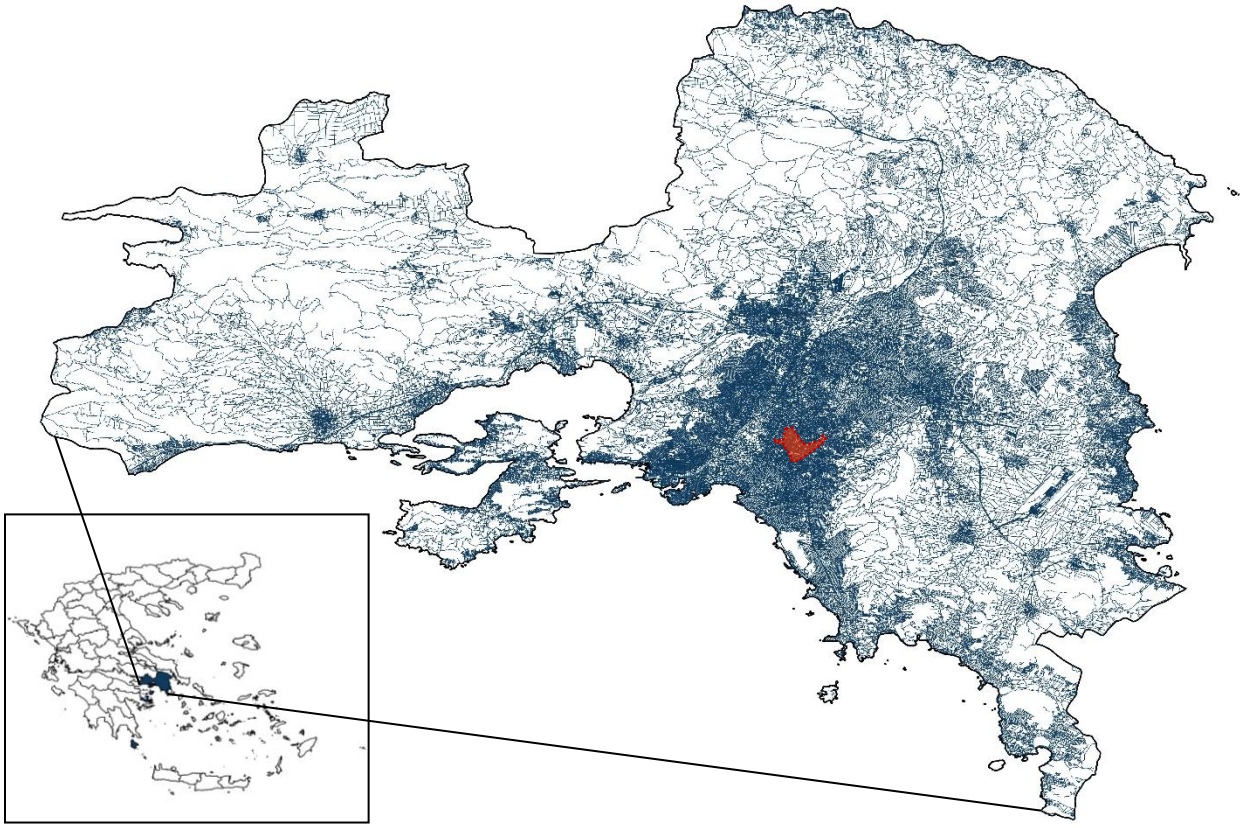
Μικροσκοπική Προσομοίωση

Αυτό το στάδιο αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο της διατριβής, καθώς επιτρέπει μια λεπτομερή ανάλυση της κυκλοφορίας υπό διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης αυτόνομων οχημάτων στο δίκτυο της Αθήνας. Το στάδιο αυτό ξεκινά με την **Εισαγωγή της γεωμετρίας του οδικού δικτύου**, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το OpenStreetMap, διασφαλίζοντας επίσης ότι τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε οδικού τμήματος και διασταυρώσεων αποτυπώνονται ορθά. Στη συνέχεια, η **Βαθμονόμηση του οδικού δικτύου** αξιοποιεί περαιτέρω δεδομένα κυκλοφορίας και μετακινήσεων πεζών, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας (ΚΔΚ) της Αθήνας, καθώς και δεδομένων από μετρήσεις πεδίου, για την βέλτιστη αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών στο μοντέλο προσομοίωσης. Η **Επικύρωση του δικτύου** ενισχύει περαιτέρω την αξιοπιστία του μοντέλου μέσω σύγκρισης των εκτιμώμενων χρόνων ταξιδιού με πραγματικά δεδομένα, αποδεικνύοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τέλος, πραγματοποιείται η **Εκτέλεση των προσομοιώσεων** και

συγκεκριμένα των δεκαπέντε διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας αυτόνομων οχημάτων, όπου για το καθένα εκτελούνται πολλαπλές επαναλήψεις για τη βέλτιστη αξιολόγηση του κινδύνου ατυχήματος και των αλληλεπιδράσεων οχημάτων υπό αυτοματοποιημένες συνθήκες κυκλοφορίας.

Εισαγωγή γεωμετρίας οδικού δικτύου

Η **περιοχή μελέτης** που επιλέχθηκε για την παρούσα διατριβή είναι το κέντρο της Αθήνας, μια κρίσιμη αστική ζώνη με υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας οχημάτων και φαινόμενα συμφόρησης. Η περιοχή παρουσιάζει επίσης υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας δίκυκλων και πεζών. Παράλληλα, το κέντρο αποτελεί σημαντικό κόμβο δημόσιας συγκοινωνίας, εξυπηρετούμενο από λεωφορεία, τρόλεϊ, τραμ και μετρό. Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τον χάρτη της Ελλάδας, όπου το οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Αττικής απεικονίζεται με μπλε χρώμα, ενώ το υπό μελέτη δίκτυο στο κέντρο της Αθήνας σημειώνεται με κόκκινο. Η επιλεγμένη περιοχή αποτελεί κατάλληλο αστικό περιβάλλον για τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης της κυκλοφορίας των αυτόνομων οχημάτων, παρέχοντας μία ολοκληρωμένη αποτύπωση των αστικών περιοχών υψηλής πυκνότητας και ποικιλίας μέσων μαζικής μεταφοράς και χρηστών του δικτύου, με σύνθετες κυκλοφοριακές συνθήκες.

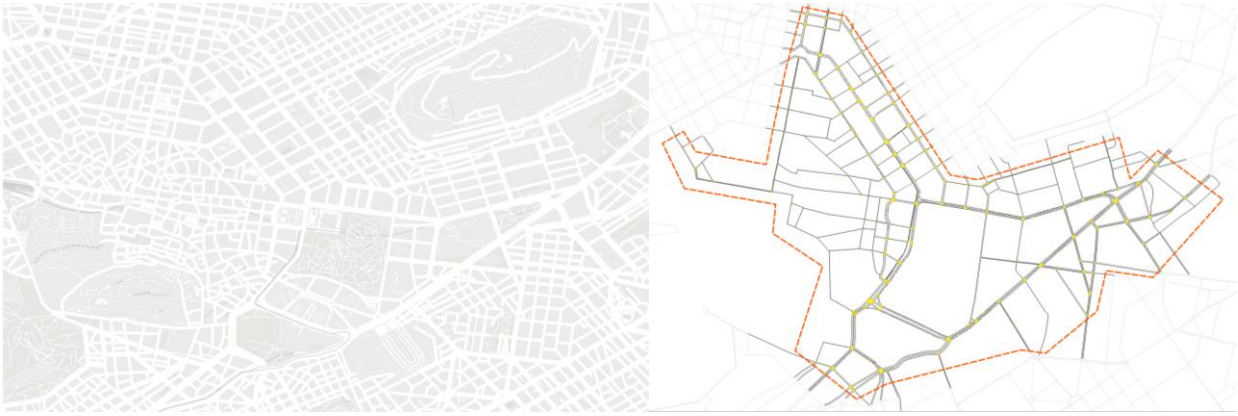


Σχήμα 4: Χάρτης της Ελλάδας με το οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Αττικής (με μπλε χρώμα) και το υπό μελέτη οδικό δίκτυο (με κόκκινο χρώμα) στο κέντρο της Αθήνας

Η **γεωμετρία του δικτύου** εξήχθη από το OpenStreetMap και ενσωματώθηκε στο λογισμικό προσομοίωσης Aimsun Next. Η ακρίβειά της επιβεβαιώθηκε μέσω τυχαίων δειγματοληπτικών συγκρίσεων με πρόσθετους χάρτες. Το μοντέλο περιλαμβάνει αναλυτικά γεωμετρικά και

λειτουργικά χαρακτηριστικά για κάθε οδικό τμήμα, όπως μήκος, πλάτος, αριθμό λωρίδων, κατεύθυνση, λωρίδες δημόσιας συγκοινωνίας, ταχύτητα ελεύθερης ροής, όριο ταχύτητας και κυκλοφοριακή ικανότητα. Αντίστοιχα, για κάθε διασταύρωση έχουν αποτυπωθεί χαρακτηριστικά όπως επιτρεπόμενες κινήσεις, αριθμός λωρίδων ανά κίνηση, προτεραιότητα, σήμανση, προγράμματα φωτεινής σηματοδότησης, ταχύτητα ελεύθερης ροής και κυκλοφοριακή ικανότητα.

Η έκταση του **δικτύου προσομοίωσης** είναι περίπου 3,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα και περιλαμβάνει 192 διασταυρώσεις και 434 οδικά τμήματα, με συνολικό μήκος 47 χιλιομέτρων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5. Οι Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού (Π-Π) του δικτύου περιλαμβάνουν 102 κεντροειδή. Επιπλέον, το μοντέλο ενσωματώνει γραμμές δημόσιας συγκοινωνίας: 43 γραμμές λεωφορείων και 14 γραμμές τρόλεϊ, μαζί με τις 129 στάσεις τους, τα δρομολόγια και τους χρόνους αναμονής, όπως παρέχονται από τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (ΟΑΣΑ).



(α) (β)

Σχήμα 5: (α) Περιοχή μελέτης και (β) προσομοιωμένο οδικό δίκτυο του κέντρου της Αθήνας

Βαθμονόμηση οδικού δικτύου

Στο μοντέλο ενσωματώθηκαν επίσης **ροές πεζών**. Οι μετρήσεις πεζών πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα μέσω ανάλυσης βιντεοληπτικού υλικού από στρατηγικά τοποθετημένες κάμερες στη περιοχή μελέτης. Η ενσωμάτωση των περιοχών κίνησης πεζών στο μοντέλο βασίστηκε στην διαθεσιμότητα και στην κάλυψη των συγκεκριμένων καμερών. Οι μετρήσεις προήλθαν από βίντεο που καταγράφηκαν στις 11 Ιουνίου 2020, μεταξύ 8:00-9:00 π.μ., εξασφαλίζοντας ότι κάθε ορατή διάβαση πεζών περιλήφθηκε στην ανάλυση. Από αυτές τις μετρήσεις καταγράφηκαν συνολικά 6.912 πεζοί κατά την περίοδο προσομοίωσης (πρωινή ώρα αιχμής).

Εστιάζοντας στα δεδομένα **κυκλοφορίας οχημάτων**, τα κυκλοφοριακά δεδομένα για την πρωινή ώρα αιχμής (8:00-9:00 π.μ.) συλλέχθηκαν από το ΚΔΚ της Αθήνας για τις Τρίτες και Πέμπτες του μήνα Μαΐου του 2019. Τα δεδομένα προήλθαν από 19 «φωρατές» (κάμερες καταγραφής κυκλοφοριακού φόρτου). Μετά τη συλλογή, οι μετρήσεις ελέγχθηκαν ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν υπήρχαν σημαντικές αποκλίσεις και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Επιπλέον, ενσωματώθηκαν και **δεδομένα από μετρήσεις πεδίου** για την αποτύπωση της σύνθεσης της κυκλοφορίας. Οι μετρήσεις αυτές διεξήχθησαν σε διάστημα μίας εβδομάδας, από

τη Δευτέρα 30 Νοεμβρίου 2019 έως την Παρασκευή 3 Δεκεμβρίου 2019, μεταξύ 7:30-9:30 π.μ. Υπό τον συντονισμό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κρίσιμες διασταυρώσεις της περιοχής μελέτης. Σε κάθε κόμβο, καταγράφηκε ο αριθμός των οχημάτων που εξέρχονταν προς κάθε κατεύθυνση σε δεκαπεντάλεπτα διαστήματα. Οι κατηγορίες οχημάτων που καταγράφηκαν ήταν: (α) δίκυκλα, (β) βαρέα οχήματα μεταφοράς και (γ) επιβατικά οχήματα, ελαφρά φορτηγά και ταξί.

Στο παρόν μοντέλο, ο δείκτης **Geoffrey E. Havers (GEH) επιβεβαίωσε επιτυχή βαθμονόμηση**, καθώς στο 85,2% των περιπτώσεων (46 από τις 54) ο δείκτης GEH ήταν μικρότερος του 5, ενώ στο 100% των περιπτώσεων (54 από τις 54) ήταν μικρότερος του 10. Η αυστηρή αυτή διαδικασία βαθμονόμησης εξασφαλίζει ότι το μοντέλο αναπαριστά με ακρίβεια τις πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες, ενισχύοντας τη αξιοπιστία και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, ο συντελεστής R^2 του μοντέλου προσομοίωσης ήταν 0,9837 βάσει απλού γραμμικού μοντέλου, υποδεικνύοντας καλή προσαρμογή. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι ποσοστό 98,37% της διακύμανσης των παρατηρούμενων κυκλοφοριακών φόρτων εξηγείται από την προσομοίωση.

Η διαδικασία βαθμονόμησης οδήγησε σε **προσαρμοσμένους πίνακες Π-Π** για τα 102 κεντροειδή του δικτύου για κάθε μέσο μεταφοράς. Συγκεκριμένα, κατά την πρωινή ώρα αιχμής (8:00-9:00 π.μ.), το μοντέλο προσομοίωσης έλαβε υπόψη συνολικά περίπου 20.987 μετακινήσεις. Από αυτές, 7.850 αντιστοιχούσαν σε επιβατικά οχήματα (37% της κυκλοφορίας), 6.522 σε δίκυκλα (31%), 5.853 σε ταξί (28%) και 762 σε φορτηγά (4%).

Επικύρωση οδικού δικτύου

Για την επικύρωση του μοντέλου προσομοίωσης, και ειδικά των εκτιμώμενων **μέσων χρόνων διαδρομής**, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από βασικούς οδικούς άξονες της περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε διάστημα μίας εβδομάδας, από τη Δευτέρα 30 Νοεμβρίου 2019 έως την Παρασκευή 3 Δεκεμβρίου 2019, μεταξύ 8:00-9:00 π.μ. Οι χρόνοι διαδρομής καταγράφηκαν ανά δεκάλεπτο μέσω του Google Maps API. Οι παρατηρούμενοι χρόνοι συγκρίθηκαν με τους αντίστοιχους χρόνους που προέκυψαν από το μοντέλο προσομοίωσης και παρουσίασαν μικρές αποκλίσεις, επιβεβαιώνοντας την ικανοποιητική ακρίβεια του μοντέλου.

Εκτέλεση προσομοιώσεων

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, εκτελέστηκαν τα δεκαπέντε σενάρια προσομοίωσης (Σχήμα 3) με στόχο τη διερεύνηση πολλαπλών πιθανών συνθηκών διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων, ενσωματώνοντας και τους τέσσερις επιλεγμένους τύπους οχημάτων. Επίσης, για κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν **δέκα επαναλήψεις** με διαφορετικούς σπόρους τυχαιότητας, ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της ανάλυσης.

Εκτίμηση Εναλλακτικών Δεικτών Ασφαλείας

Το στάδιο αυτό λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος ανάμεσα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της εκτίμησης της ασφάλειας, μετατρέποντας τις αλληλεπιδράσεις οχημάτων σε ισοδύναμες τιμές κινδύνου ατυχήματος και επικυρώνοντας την ακρίβειά τους μέσω σύγκρισης με παρατηρούμενα δεδομένα ατυχημάτων. Το στάδιο αυτό ξεκινά με την **Εξαγωγή γεωμετρικών**

και λειτουργικών χαρακτηριστικών του δικτύου προσομοίωσης της Αθήνας. Ακολουθεί η **Ανάλυση εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας**, κατά την οποία επεξεργάζονται οι τροχιές οχημάτων από τη μικροσκοπική προσομοίωση μέσω του εργαλείου SSAM για τον εντοπισμό εμπλοκών. Στη συνέχεια, το στάδιο **Μετατροπής εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος** μεταφράζει τις εντοπισμένες εμπλοκές σε ισοδύναμα μέτρα κινδύνου εφαρμόζοντας μία μεθοδολογία, η οποία συνδυάζει τη συχνότητα και τη σφοδρότητα των συμβάντων. Το στάδιο **Επικύρωσης του εκτιμώμενου κινδύνου** αξιολογεί την ακρίβεια αυτών των εκτιμήσεων μέσω ανάλυσης ομαδοποίησης, επιβεβαιώνοντας ισχυρή συσχέτιση ανάμεσα σε προσομοιωμένα και παρατηρηθέντα ατυχήματα. Τέλος, η **Χρήση δεδομένων ατυχημάτων** επιτρέπει την πλήρη επικύρωση του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου.

Εξαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών οδικού δικτύου

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας του δικτύου, ενσωματώθηκαν στις αναλύσεις τα εξής χαρακτηριστικά: **η κυκλοφοριακή ικανότητα, ο αριθμός λωρίδων, ο τύπος ελέγχου κυκλοφορίας και η παρουσία μέσων μαζικής μεταφοράς**, τα οποία εξήχθησαν μέσω δεδομένων OpenStreetMap.

Ανάλυση εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας

Οι **τροχιές των οχημάτων** εξήχθησαν από τη μικροσκοπική προσομοίωση ανά 0,1 δευτερόλεπτα, ίσο με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, και αναλύθηκαν στο **λογισμικό SSAM**. Το λογισμικό αυτό επεξεργάστηκε τα δεδομένα τροχιών και εντόπισε τις εμπλοκές μεταξύ των οχημάτων. Μία εμπλοκή καταγράφεται όταν οι δείκτες TTC και PET (Post-Encroachment Time) βρίσκονται κάτω από προκαθορισμένα κατώφλια. Οι προεπιλεγμένες τιμές είναι 1,5 δευτερόλεπτα για το TTC και 5,0 δευτερόλεπτα για το PET. Τα κατώφλια αυτά προσαρμόστηκαν ώστε να αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά τόσο των συμβατικών όσο και των αυτόνομων οχημάτων, σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματισμού, διασφαλίζοντας συνέπεια μεταξύ οδηγικής συμπεριφοράς και εντοπισμού συμβάντων. Οι εμπλοκές ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες: οπίσθιες, πλαγιομετωπικές ή πλευρικές και μετωπικές. Το τελικό σύνολο δεδομένων περιλάμβανε αναλυτικές πληροφορίες για κάθε εμπλοκή, όπως τον τύπο των εμπλεκόμενων οχημάτων, τις γεωγραφικές συντεταγμένες της θέσης εμπλοκής, καθώς και πρόσθετα χαρακτηριστικά όπως η ταχύτητα πριν την εμπλοκή, η κατεύθυνση κίνησης και η επιβράδυνση των οχημάτων.

Μετατροπή εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος

Λόγω της έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων ατυχημάτων, ιδίως σε μελλοντικές συνθήκες αυτοματοποίησης, η άμεση αξιολόγηση της ασφάλειας είναι συχνά αδύνατη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η προσομοίωση της κυκλοφορίας προσφέρει μία αποτελεσματική εναλλακτική, παρέχοντας δείκτες ασφάλειας προερχόμενους από τις αλληλεπιδράσεις οχημάτων αντί από παρατηρούμενα ατυχήματα. Δεδομένου ότι η μικροσκοπική προσομοίωση αναπαριστά την κυκλοφορία χωρίς συγκρούσεις, η εκτίμηση της ασφάλειας γίνεται αποκλειστικά μέσω εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας, όπως αυτών που προκύπτουν από την ανάλυση του λογισμικού SSAM που περιγράφηκε παραπάνω. Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, η παρούσα διατριβή **ανέπτυξε και εφάρμοσε μια μεθοδολογία μετατροπής των εμπλοκών σε εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος**, η οποία συνδέει τα χαρακτηριστικά κάθε εμπλοκής με την αναμενόμενη πιθανότητα ατυχήματος.

Επικύρωση κινδύνου ατυχήματος

Η εγκυρότητα του προτεινόμενου πλαισίου μετατροπής εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος αξιολογήθηκε μέσω σύγκρισης των εκτιμήσεων του μοντέλου προσομοίωσης με τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα ατυχημάτων για 122 οδικούς άξονες του δικτύου. Τα δύο σύνολα δεδομένων κανονικοποιήθηκαν μέσω Min-Max scaling και στη συνέχεια αναλύθηκαν με ομαδοποίηση k-μέσων για τον εντοπισμό ομάδων οδών με παρόμοια χαρακτηριστικά ασφάλειας. Η μέθοδος Elbow χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού ομάδων, ενώ η Ανάλυση Γραμμικού Διαχωρισμού (Linear Discriminant Analysis) αξιοποιήθηκε για την αξιολόγηση της διαφοροποίησης και της σταθερότητας των ομάδων αυτών. Η ανάλυση παρήγαγε δύο ομάδες, οδούς χαμηλού και υψηλού κινδύνου, οι οποίες παρουσίασαν υψηλή συσχέτιση ανάμεσα στα προσομοιωμένα και τα παρατηρούμενα δεδομένα. Η ισχυρή αυτή συμφωνία επιβεβαιώνει την ικανότητα του μεθοδολογικού πλαισίου να **αναπαράγει με ακρίβεια τις συνθήκες οδικής ασφάλειας** μέσω προσομοίωση της κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα, το μοντέλο πέτυχε ακρίβεια 87,7%, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία και τη χρησιμότητα της προσέγγισης.

Χρήση δεδομένων ατυχημάτων

Για την επικύρωση χρησιμοποιήθηκαν **δεδομένα ατυχημάτων από την ΕΛΣΤΑΤ** για τα έτη 2017 έως 2019, τα οποία περιλάμβαναν μεταβλητές όπως ο αριθμός σοβαρά τραυματιών, τα εμπλεκόμενα οχήματα και ο συνολικός αριθμός ατυχημάτων. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως τα όρια ταχύτητας και τα μήκη των οδών, ώστε να ενισχυθεί η διαδικασία ομαδοποίησης. Επίσης, τα δεδομένα αντιστοιχίστηκαν με τα τμήματα του οδικού δικτύου στο μοντέλο προσομοίωσης. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των παρατηρηθέντων δεδομένων έδειξε συνεπή κατανομή κινδύνου ατυχήματος στο δίκτυο, πέρα από μικρές αποκλίσεις, οι οποίες εντοπίστηκαν κυρίως σε **οδούς με ανεπαρκή δεδομένα βαθμονόμησης** κατά την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης. Το εύρημα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της υψηλής ποιότητας δεδομένων για την αξιόπιστη λειτουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης. Συνολικά, η διαδικασία αυτή επιβεβαίωσε ότι η συνδυαστική μέθοδος προσομοίωσης και εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας παρέχει ένα αξιόπιστο πλαίσιο εκτίμησης του κινδύνου ατυχήματος σε συνθήκες όπου τα παρατηρηθέντα δεδομένα είναι περιορισμένα, όπως στις μελλοντικές συνθήκες κυκλοφορίας των αυτόνομων οχημάτων.

Εκτίμηση Κινδύνου Ατυχήματος

Το στάδιο αυτό επεκτείνει την αξιολόγηση της ασφάλειας σε ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο που εξετάζει τον κίνδυνο ατυχήματος τόσο από μακροσκοπική όσο και από μικροσκοπική σκοπιά, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η αυτοματοποίηση επηρεάζει την ασφάλεια σε επίπεδο οδού και εμπλοκών. Το στάδιο αυτό ξεκινά με την **Εξαγωγή κυκλοφοριακών δεδομένων**, όπου λεπτομερείς δείκτες λειτουργικής απόδοσης εξάγονται από την προσομοίωση στο λογισμικό Aimsun Next για κάθε εξεταζόμενο σενάριο αυτόνομων οχημάτων. Στη συνέχεια, η **Αξιολόγηση της ασφάλειας** ενσωματώνει μεθόδους μηχανικής μάθησης και χωρικής στατιστικής για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου ατυχήματος για

διαφορετικές συνθήκες κυκλοφορίας με διαφορετικά ποσοστά αυτόνομων οχημάτων και επιπέδων αυτοματισμού. Τέλος, οι **Καινοτομίες** αυτού του σταδίου αφορούν στην ανάπτυξη ενός επικυρωμένου πλαισίου εκτίμησης της ασφάλειας βασισμένου σε προσομοίωση της κυκλοφορίας, μίας συνδυαστικής προσέγγισης προσομοίωσης-μηχανικής μάθησης-χωρικής ανάλυσης και μίας ολοκληρωμένης κατανόησης της εξέλιξης του κινδύνου ατυχήματος υπό συνθήκες αυτοματισμού.

Εξαγωγή κυκλοφοριακών δεδομένων

Για τη διερεύνηση της δυναμικής του δικτύου υπό διαφορετικές συνθήκες αυτοματοποίησης, εξήχθησαν λεπτομερείς δείκτες κυκλοφοριακής απόδοσης από το λογισμικό προσομοίωσης, τόσο για όλα τα οδικά τμήματα και διασταυρώσεις όσο και ξεχωριστά για κάθε σενάριο αυτοματοποίησης. Συγκεκριμένα, τα κυκλοφοριακά δεδομένα περιλάμβαναν **τον κυκλοφοριακό φόρτο, την ταχύτητα, την πυκνότητα, τον χρόνο καθυστέρησης, το μήκος ουράς, τον αριθμό αλλαγών λωρίδας και τον αριθμό στάσεων**. Τα μεγέθη αυτά ομαδοποιήθηκαν σε επίπεδο οδού, ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια μεταξύ των σεναρίων και να καταστεί δυνατή η ουσιαστική συγκριτική ανάλυση. Παράλληλα, ενσωματώθηκαν δείκτες σχετικοί με την αυτοματοποίηση, συγκεκριμένα τα **ποσοστά διείσδυσης των αυτόνομων οχημάτων επιπέδων SAE 2-3, SAE 4-5 και SAE 4-5 σε επιθετική λειτουργία**, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση των διαφορετικών συνθέσεων στόλων και οδηγικών χαρακτηριστικών της αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας. Συνολικά, τα δεδομένα αυτά διαμόρφωσαν μια ολοκληρωμένη βάση λειτουργικών, γεωμετρικών και σχετικών με την αυτοματοποίηση χαρακτηριστικών.

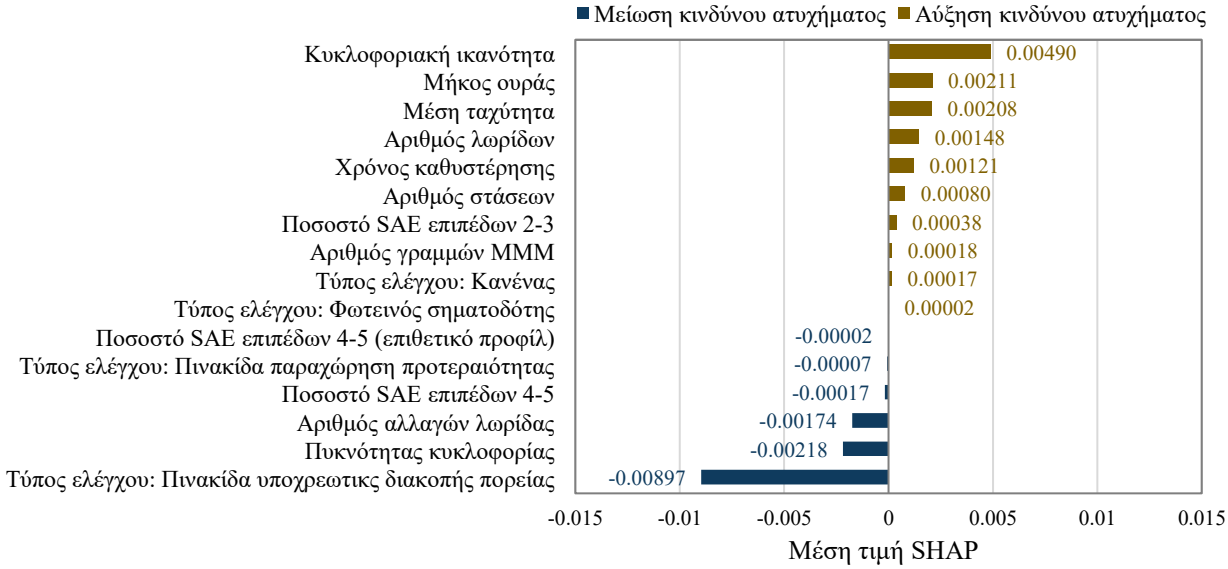
Εκτίμηση της ασφάλειας

Η εκτίμηση της ασφάλειας πραγματοποιήθηκε μέσω ενός **πολυεπίπεδου μεθοδολογικού πλαισίου που** περιλαμβάνει τόσο την εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος σε επίπεδο οδού όσο και τη χωρική ανάλυση περιοχών υψηλού κινδύνου (crash hotspots) σε επίπεδο εμπλοκών, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη αποτίμηση των επιπτώσεων της αυτοματοποίησης στην ασφάλεια.

Η ανάλυση κινδύνου σε επίπεδο οδού βασίστηκε σε σύνολο δεδομένων που περιλάμβανε 1.812 οδικά στοιχεία, τα οποία προέκυψαν από τα γεωμετρικά και κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του δικτύου καθώς και τις συνθήκες κυκλοφορίας. Ο κίνδυνος ατυχήματος εκτιμήθηκε μέσω της μεθοδολογίας μετατροπής των εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος, η οποία εφαρμόστηκε στα αποτελέσματα του SSAM. Ακολούθησε η ανάλυση παραγόντων με χρήση μηχανικής μάθησης. Ένα **XGBoost μοντέλο** προέβλεψε τον κίνδυνο ατυχήματος, ενώ οι τιμές SHAP παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την επιρροή του κάθε παράγοντα.

Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κυκλοφοριακές και γεωμετρικές συνθήκες, ιδίως η κυκλοφοριακή ικανότητα, τα μήκη ουρών, ο αριθμός αλλαγών λωρίδας και ο τύπος ελέγχου του οδικού τμήματος, αποτελούν τους κυρίαρχους παράγοντες του κινδύνου ατυχήματος για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια (Σχήμα 6). Όσον αφορά τις **μεταβλητές σχετικές με την αυτοματοποιημένη κυκλοφορία**, αν και παρουσίασαν μικρότερη επιρροή, εμφάνισαν κάποιες διαφορές. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού διείσδυσης οχημάτων SAE επιπέδου 2 και 3 συνδέθηκε με μία ήπια αύξηση του κινδύνου, πιθανότατα λόγω της μεικτής κυκλοφορίας και της αυξημένης ετερογένειας στο δίκτυο. Αντίθετα, η υψηλότερη διείσδυση οχημάτων SAE επιπέδου 4 και 5 οδήγησε σε μείωση του κινδύνου, εκφράζοντας μία πιο ομαλή, σταθερή και προβλέψιμη

λειτουργία του συστήματος. Τέλος, το επιθετικό προφίλ SAE επιπέδου 4 και 5 εμφάνισε αμελητέα επίδραση, παρουσιάζοντας μόνο μία ήπια πρόσθετη μείωση του κινδύνου σε υψηλά ποσοστά διείσδυσης.

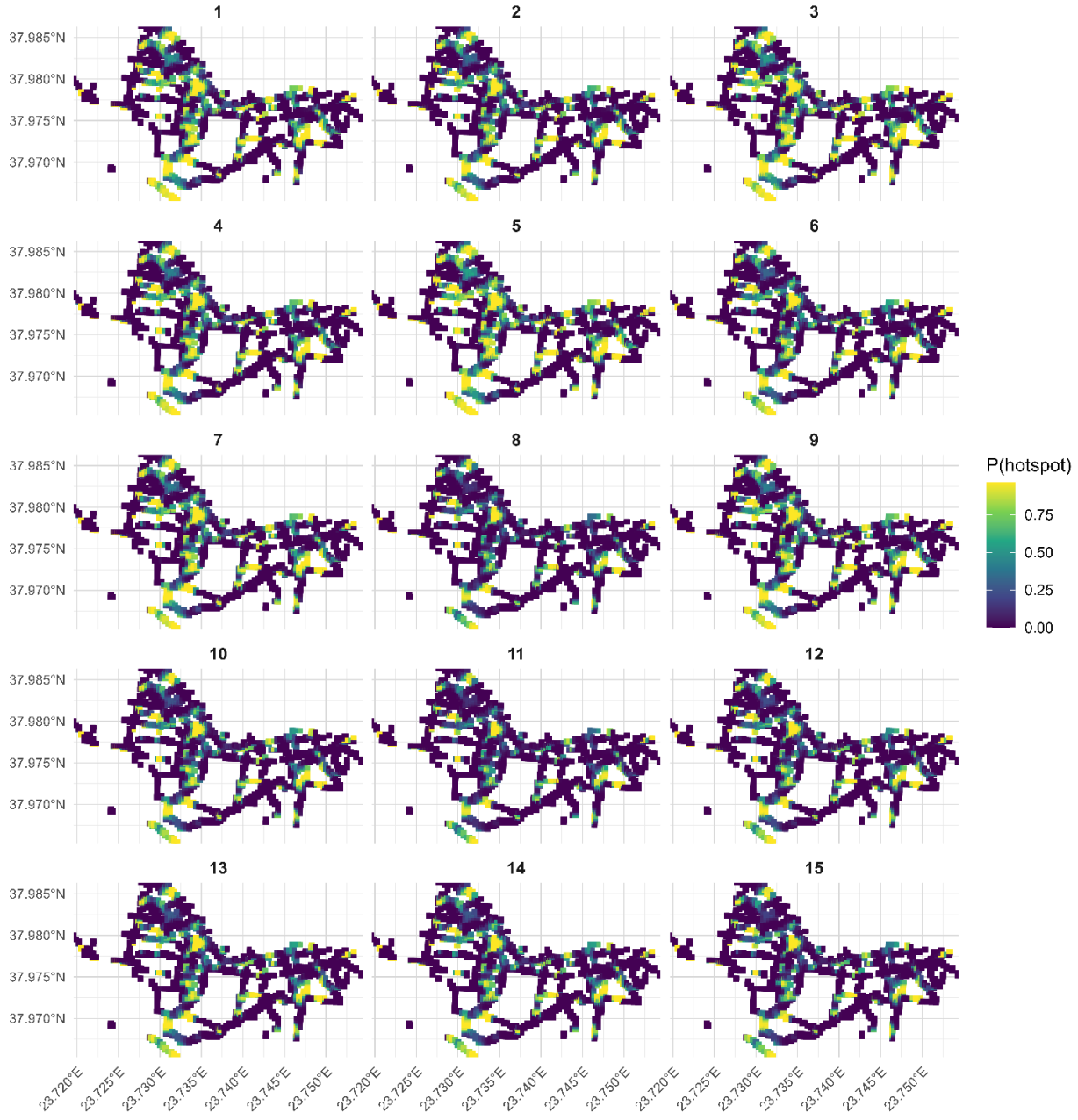


Σχήμα 6: Παράγοντες επιρροής κινδύνου ατυχήματος βάσει των μέσων τιμών SHAP

Σε επίπεδο εμπλοκών, η ασφάλεια αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας 883.603 συμβάντα εμπλοκών οχημάτων, τα οποία αποτυπώθηκαν σε τετραγωνικό πλέγμα 30 × 30 μέτρων και αναλύθηκαν με τον δείκτη **Getis-Ord Gi*** για τον εντοπισμό σημείων υψηλού κινδύνου. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε ένα διωνυμικό **Γενικευμένο Προσθετικό Μοντέλο** (GAM), το οποίο εξέτασε κατά πόσο το οδικό περιβάλλον, ο τύπος εμπλοκής, ο συνδυασμός οχημάτων και το σενάριο αυτοματοποίησης επηρεάζουν την πιθανότητα μια εμπλοκή να εξελιχθεί σε σημείο υψηλού κινδύνου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πιθανότητα μία εμπλοκή να αποτελεί σημείο υψηλού κινδύνου αυξάνεται σημαντικά σε διασταυρώσεις, σε μετωπικές εμπλοκές, καθώς και σε τοποθεσίες χωρίς μέτρο ελέγχου κυκλοφορίας, παράγοντες που ενισχύουν σημαντικά την έκθεση σε κίνδυνο σύγκρουσης. Επίσης, ένα βασικό εύρημα είναι ο εντοπισμός μίας **μη γραμμικής και σταδιακά εξαρτώμενης σχέσης** μεταξύ αυτοματοποίησης και εμφάνισης σημείων υψηλού κινδύνου. Οι αλληλεπιδράσεις μικτής κυκλοφορίας μεταξύ συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων παρουσίασαν τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης σημείων υψηλού κινδύνου, ενώ οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτόνομων οχημάτων αύξησαν τον κίνδυνο μόνο κατά τις μεταβατικές φάσεις. Η σχέση μεταξύ της πιθανότητας εμφάνισης των σημείων υψηλού κινδύνου και του σεναρίου αυτοματοποίησης ακολουθεί μια «U»-μορφής τάση: τα αρχικά και τα ενδιάμεσα επίπεδα αυτοματοποίησης αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων σημείων, ενώ τα υψηλά επίπεδα αυτοματοποίησης οδηγούν σε σταθερή και σημαντική μείωση. Τέλος, οι χάρτες αποτύπωσης των σημείων υψηλού κινδύνου για κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Σχήμα 7) ανέδειξαν μία σαφή εξελικτική πορεία: διάσπαρτα σημεία στα πρώιμα στάδια αυτοματοποίησης, τη συγκέντρωσή

αυτών σε ενδιάμεσα στάδια και μία σημαντική συρρίκνωση της έκτασης των σημείων όταν τα αυτόνομα οχήματα κυριάρχησαν στο δίκτυο.



Σχήμα 7: Πιθανότητα εμφάνισης σημείων υψηλού κινδύνου (crash hotspots) στα διαφορετικά σενάρια αυτόνομων οχημάτων

Καινοτομίες

Τέλος, η διατριβή παρουσιάζει **έξι μεθοδολογικές και εννοιολογικές καινοτομίες** για την αξιολόγηση της ασφάλειας των αυτόνομων οχημάτων (Σχήμα 8), οι οποίες περιλαμβάνουν:

1. **Μία συστηματική βάση παραμέτρων συμπεριφοράς αυτόνομων οχημάτων**, η οποία προέκυψε από συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και επιτρέπει τη ρεαλιστική, συνεπή

και εύκολα εφαρμόσιμη μοντελοποίηση των αυτόνομων οχημάτων στη μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας.

2. Ένα **νέο πλαίσιο μετατροπής εμπλοκών μεταξύ οχημάτων σε κίνδυνο ατυχήματος** σε επίπεδο εμπλοκής, που επιτρέπει τη μετατροπή των εμπλοκών από τη προσομοίωση κυκλοφορίας σε πιθανότητες ισοδύναμες με τον κίνδυνο ατυχήματος.
3. Μία **μεταφέρσιμη μεθοδολογία αξιολόγησης της ασφάλειας** σε μελλοντικά περιβάλλοντα κινητικότητας, η οποία ενσωματώνει τη μικροσκοπική προσομοίωση, τους εναλλακτικούς δείκτες εκτίμησης της ασφάλειας, τη μετατροπή των εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος και την εμπειρική επικύρωση της, κατάλληλη για περιβάλλοντα με περιορισμένα ή αναξιόπιστα δεδομένα ατυχημάτων.
4. **Μία πολυεπίπεδη μεθοδολογία εκτίμησης της ασφάλειας**, που συνδυάζει τεχνικές μηχανικής μάθησης και χωρικής ανάλυσης για την εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος τόσο σε επίπεδο οδικού τμήματος όσο και σε επίπεδο χωρικής κατανομής εμπλοκών.
5. Η ανάδειξη μιας **μη γραμμικής σχέσης ανάμεσα στην αυτοματοποίηση και στην εμφάνιση σημείων υψηλού κινδύνου**, με τον κίνδυνο να αυξάνεται σε συνθήκες μικτής κυκλοφορίας και να μειώνεται καθώς η υψηλή αυτοματοποίηση σταθεροποιεί τη λειτουργία του δικτύου.
6. Ευρήματα ότι **η αυτοματοποίηση λειτουργεί ως σταθεροποιητικός μηχανισμός του συστήματος**, μειώνοντας την ετερογένεια της οδηγικής συμπεριφοράς και τη συγκέντρωση επικίνδυνων σημείων, παρά ως άμεσος και ανεξάρτητος παράγοντας ασφάλειας.

Σχήμα 8: Καινοτομίες της διδακτορικής διατριβής