Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Υποστήριξη Διδακτορικής Διατριβής

22 Ιανουαρίου 2026

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

Μαρία Γ. Οικονόμου

Τριμελής Επιτροπή:

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

Διάρθρωση παρουσίασης

1. Υπόβαθρο και κίνητρα έρευνας
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση και μοντελοποίηση οδηγικής συμπεριφοράς αυτόνομων οχημάτων
3. Μεθοδολογικό πλαίσιο και προσομοίωση κυκλοφορίας
4. Εκτίμηση κινδύνου ατυχήματος και επικύρωση των αποτελεσμάτων
5. Πολυεπίπεδη αξιολόγηση οδικής ασφάλειας και βασικά ευρήματα
6. Εφαρμογή, περιορισμοί και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Εισαγωγή

- Τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν αιτία **άνω του 1 εκατομμυρίου θανάτων** ετησίως (1,19 εκατ. το 2023), ενώ το ανθρώπινο σφάλμα ευθύνεται για το 94% των περιστατικών.
- Τα αυτόνομα οχήματα αναμένεται **να μειώσουν το ανθρώπινο σφάλμα**, βελτιώνοντας την οδική ασφάλεια και την κυκλοφορία.
- Η αυτοματοποίηση ταξινομείται σε **έξι επίπεδα της SAE International**, τα οποία διαφέρουν στον τρόπο κατανομής των οδηγικών αρμοδιοτήτων μεταξύ ανθρώπου και οχήματος.
- Σήμερα κυριαρχεί το **Επίπεδο 2**, με περιορισμένες πιλοτικές εφαρμογές του Επιπέδου 3, ενώ το Επίπεδο 4 λειτουργεί μόνο σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα και το Επίπεδο 5 παραμένει μακροπρόθεσμος στόχος.

Προσομοίωση στην αξιολόγηση της ασφάλειας

Γιατί προσομοίωση κυκλοφορίας;

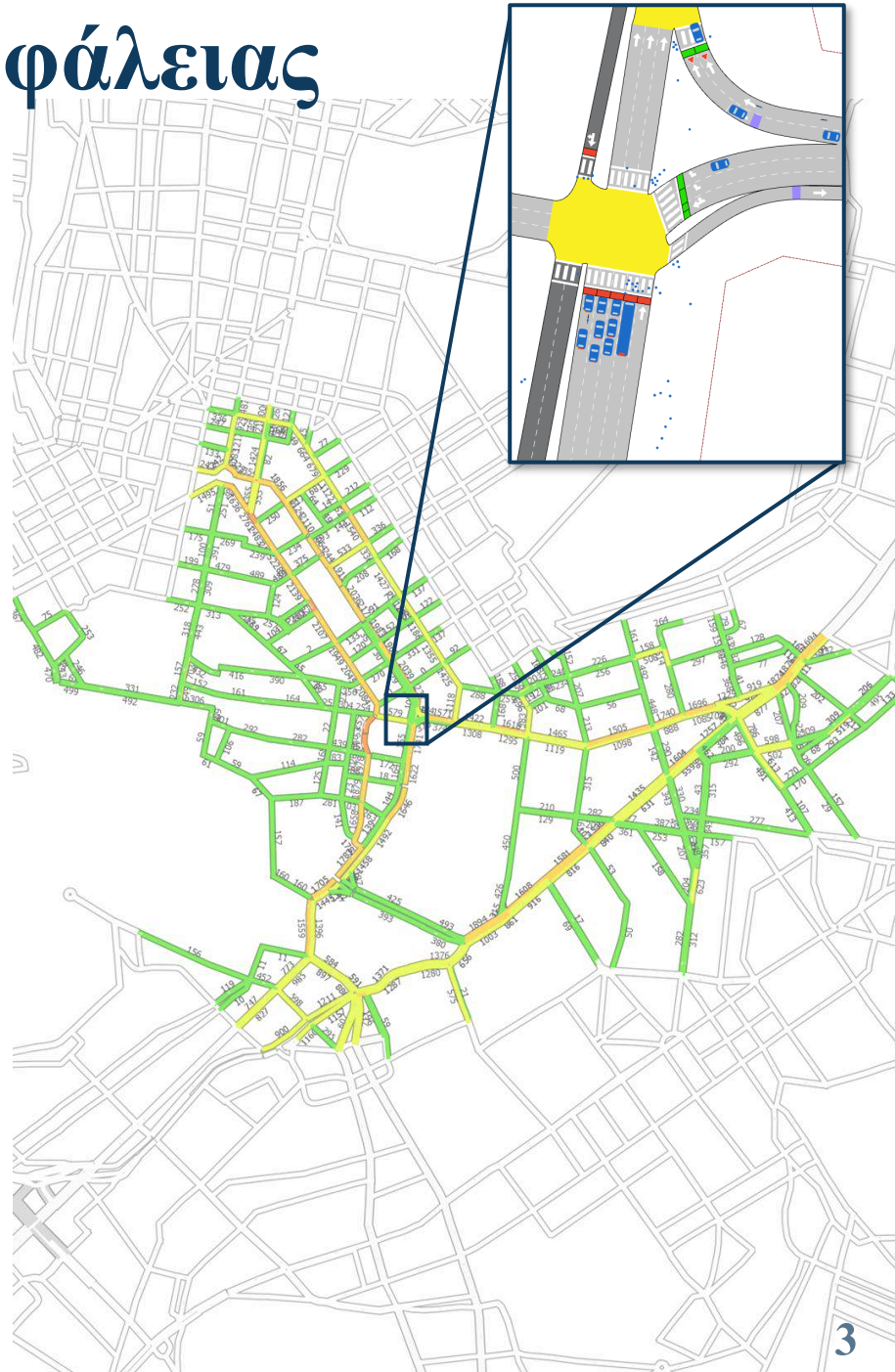
- Έλλειψη ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων για οχήματα υψηλού επιπέδου αυτοματισμού και υψηλά ποσοστά διείσδυσης.
- Οι δοκιμές πεδίου είναι γεωγραφικά περιορισμένες.

Πλεονεκτήματα

- Εκτέλεση σύνθετων σεναρίων.
- Αξιολόγηση γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του οδικού δικτύου.

Εναλλακτικοί δείκτες εκτίμησης της ασφάλειας

- Εκτίμηση οδικής ασφάλειας χωρίς την χρήση δεδομένων ατυχημάτων.
- Συσχέτιση με την πιθανότητα και τη σοβαρότητα ατυχήματος.



Προκλήσεις

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

2. Η έλλειψη δεδομένων ατυχημάτων οδηγεί σε μικροσκοπικές προσομοιώσεις, στις οποίες όμως **δεν καταγράφονται συγκρούσεις**, καθιστώντας μη εφικτή την εκτίμηση της ασφάλειας.

3. Απουσία εδραιωμένης γνώσης **παραμέτρων μοντελοποίησης** της συμπεριφοράς των αυτόνομων οχημάτων, με περιορισμένες μέχρι σήμερα έρευνες για τη βαθμονόμηση σχετικών μοντέλων.

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

Στόχοι

01

Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον εντοπισμό **παραμέτρων συμπεριφοράς** αυτόνομων οχημάτων σε μικροσκοπικές προσομοιώσεις.

02

Εντοπισμός **μεθόδων εφαρμογής της προσομοίωσης** κυκλοφορίας στην αξιολόγηση της οδικής ασφάλειας.

03

Ανάπτυξη και εφαρμογή **μεθοδολογίας εκτίμησης κινδύνου ατυχήματος** μέσω μικροσκοπικής προσομοίωσης.

04

Επικύρωση της μεθοδολογίας μέσω σύγκρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα ατυχημάτων.

05

Πολυεπίπεδη ανάλυση της **επίδρασης της αυτοματοποίησης** στην ασφάλεια, συνδυάζοντας προσομοίωση, μηχανική μάθηση και χωρική ανάλυση.

Ερευνητικά ερωτήματα

RQ1

Ποιες **παράμετροι** αποδίδουν με βέλτιστο τρόπο τη **συμπεριφορά των αυτόνομων** οχημάτων στη μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας;

RQ2

Πώς μπορεί η **μικροσκοπική προσομοίωση** της κυκλοφορίας να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για την εκτίμηση της **οδικής ασφάλειας**;

RQ3

Ποιοι **παράγοντες** επηρεάζουν καθοριστικά την οδική ασφάλεια σε διαφορετικά επίπεδα αυτοματοποίησης και ποσοστά διείσδυσης;

RQ4

Πώς **επηρεάζουν οι παράγοντες** κυκλοφορίας και αυτοματοποίησης τον κίνδυνο ατυχήματος και τη **χωρική του κατανομή** στα αστικά οδικά δίκτυα;

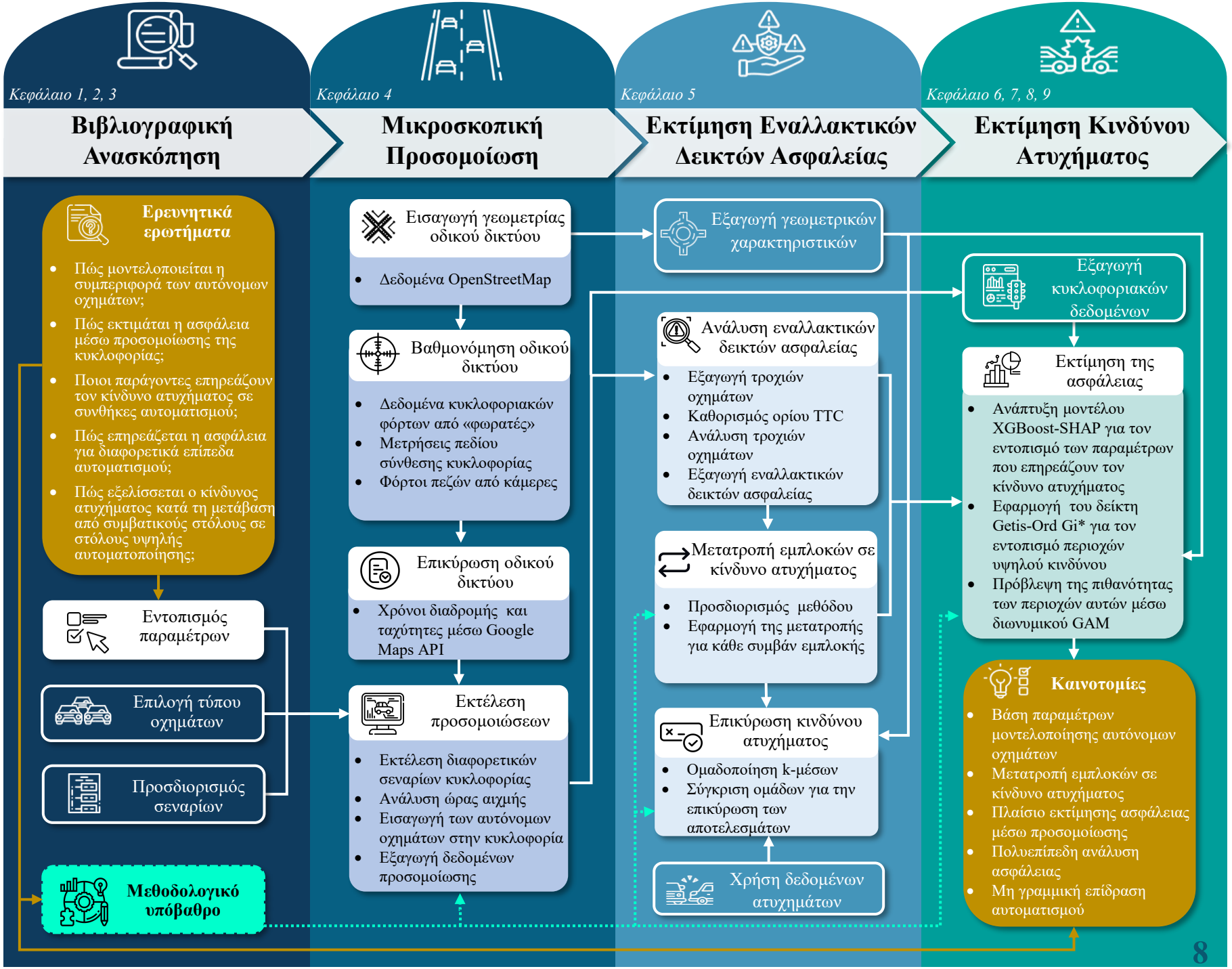
RQ5

Πώς επηρεάζεται ο κίνδυνος ατυχήματος **κατά τη μετάβαση** από τη συμβατική κυκλοφορία σε στόλους υψηλής αυτοματοποίησης;

Βασικά στοιχεία μικροσκοπικής προσομοίωσης

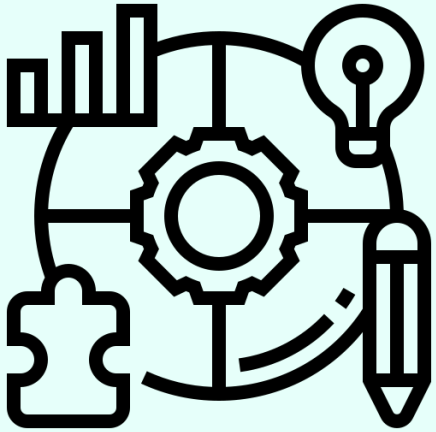
- Η μικροσκοπική προσομοίωση αναπαριστά την κυκλοφορία σε επίπεδο **μεμονωμένων οχημάτων** και λειτουργεί σε διακριτά χρονικά βήματα.
- Σε κάθε **χρονικό βήμα**, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η θέση κάθε οχήματος ενημερώνονται.
- Η κίνηση των οχημάτων καθορίζεται από **μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς**, τα οποία εφαρμόζονται στα στοιχεία του δικτύου, στα οδικά τμήματα και τους κόμβους.
- Στην παρούσα μελέτη, η ζήτηση αναπαρίσταται μέσω **πινάκων Προέλευσης-Προορισμού** (Π-Π), με τις μετακινήσεις να ξεκινούν και να καταλήγουν σε κεντροειδή.

Μεθοδολογικό πλαίσιο



Μεθοδολογικό υπόβαθρο

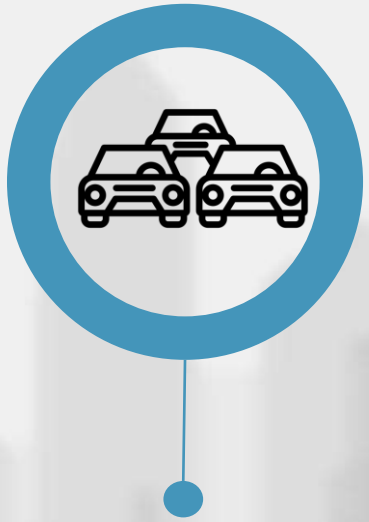
- Χρησιμοποιήθηκαν **στατιστικά και μοντέλα Μηχανικής Μάθησης**, η γραμμική και η λογιστική παλινδρόμηση, η χωρική λογιστική παλινδρόμηση, το Γενικευμένο Προσθετικό Μοντέλο (GAM) και μοντέλα δέντρων (Random Forest, XGBoost) σε συνδυασμό με SHAP για ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- Ο εντοπισμός ομάδων κινδύνου πραγματοποιήθηκε μέσω **ομαδοποίησης** k-means (μέθοδος Elbow) και Ανάλυση Γραμμικού Διαχωρισμού (LDA) για τη διάκριση των ομάδων.
- Η **αξιολόγηση** των μοντέλων βασίστηκε σε δείκτες παλινδρόμησης (MAE, RMSE, MSE, R^2) και ταξινόμησης (confusion matrix, precision, recall, F1Score, AUC/ROC, Precision-Recall/Average Precision).
- Για τη **χωρική ανάλυση** χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Getis-Ord Gi* για τον εντοπισμό σημείων συγκέντρωσης υψηλού κινδύνου ατυχήματος.
- Η **βαθμονόμηση** του μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του δείκτη GEH.



Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Βιβλιογραφική ανασκόπηση παραμέτρων

Εντοπισμός παραμέτρων

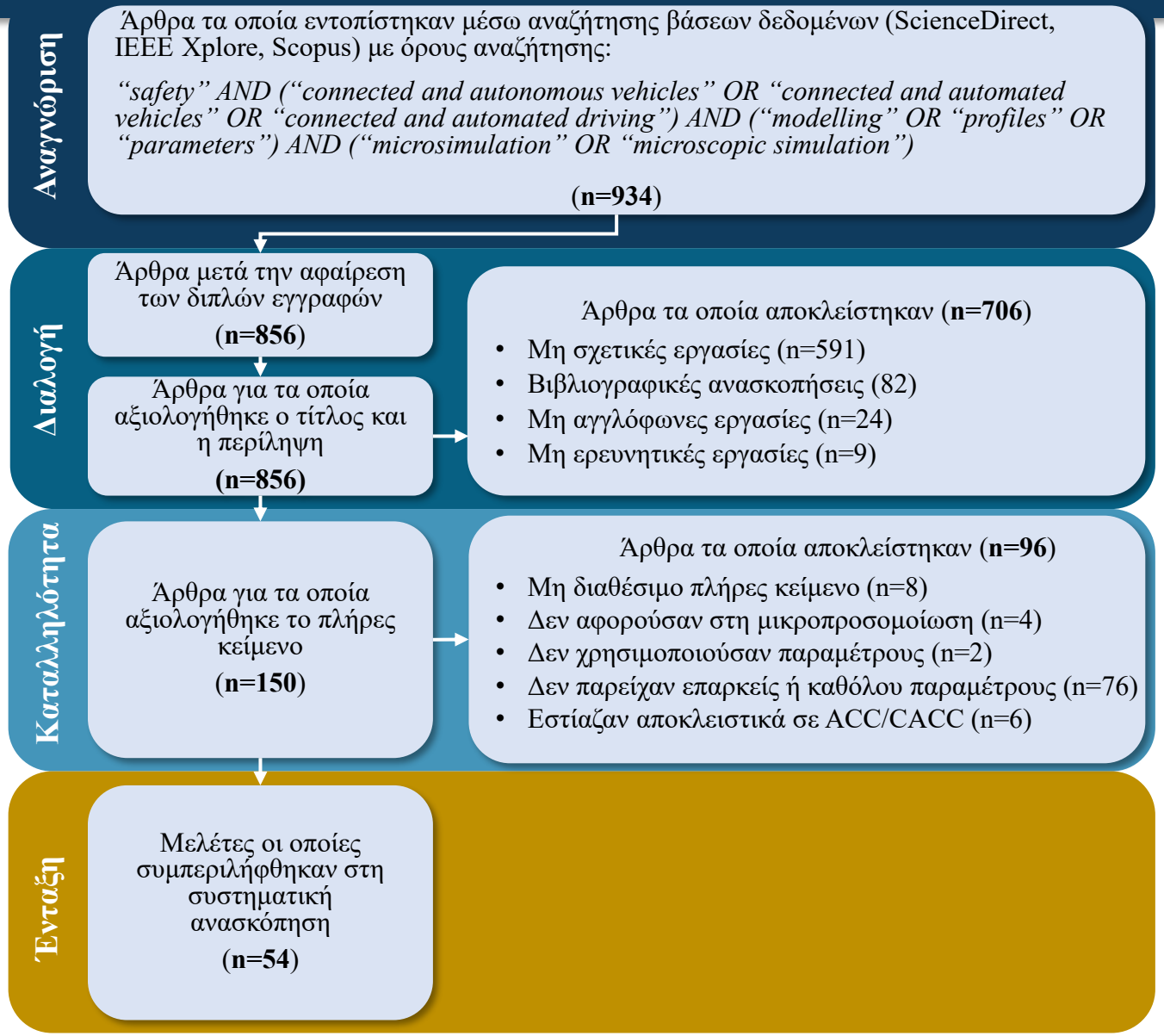


Επιλογή τύπου οχημάτων

Προσδιορισμός σεναρίων

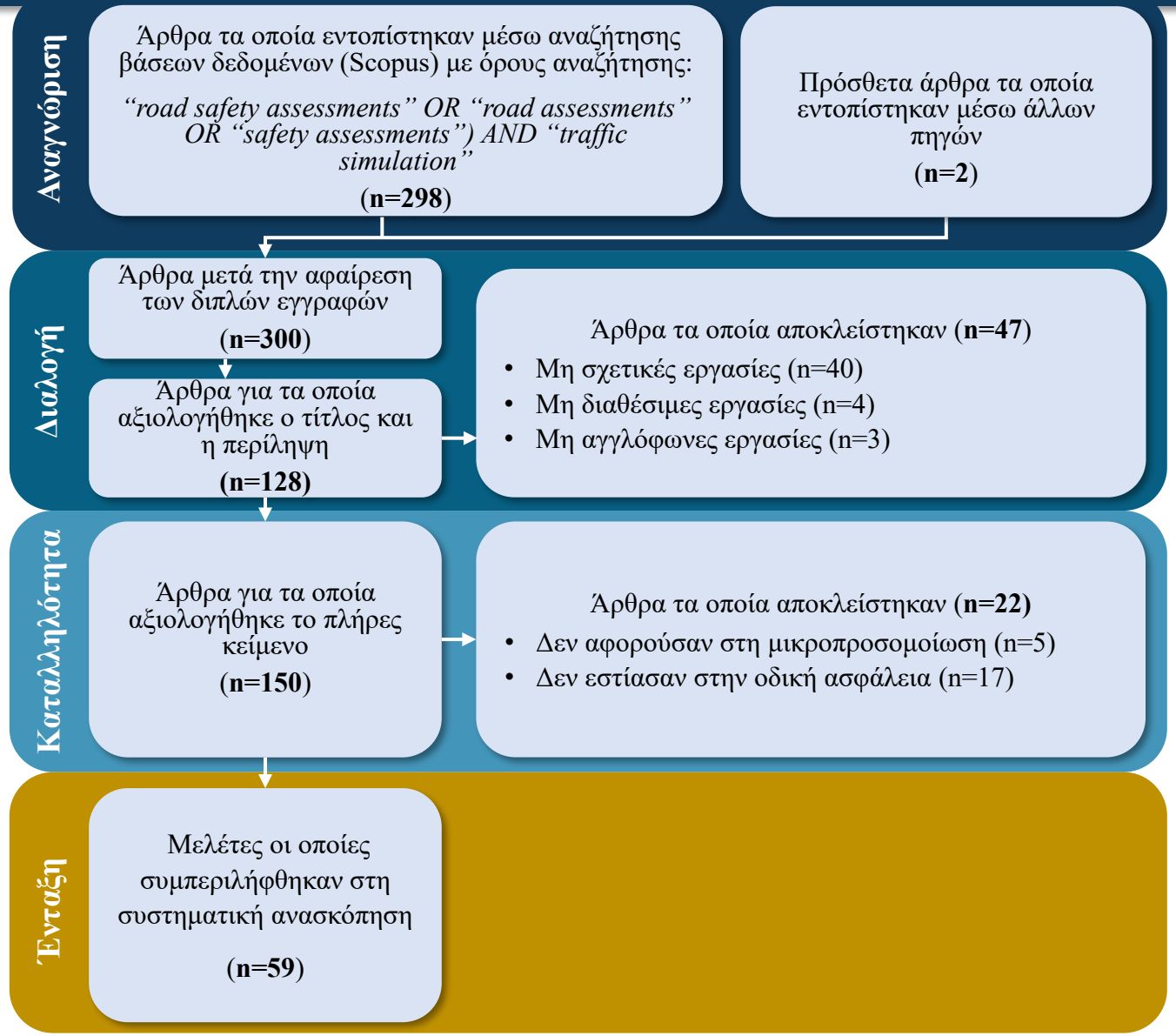
Βιβλιογραφική ανασκόπηση (1/2)

- Συστηματική ανασκόπηση βάσει της μεθοδολογίας PRISMA αξιολόγησε 934 μελέτες και εντόπισε 54 με **παραμέτρους συμπεριφοράς αυτόνομων οχημάτων**.
- Οι παράμετροι **διαφοροποιούνται** ανά επίπεδο SAE, προφίλ οδήγησης και συνδεσιμότητα.
- Οι περισσότερες μελέτες προσαρμόζουν **μοντέλα συμβατικών οχημάτων** (π.χ. Wiedemann, IDM, Gipps).
- Οι **πηγές παραμέτρων** βασίζονται κυρίως σε θεωρητικές παραδοχές, προεπιλογές λογισμικών και πειράματα μικρής κλίμακας.



Βιβλιογραφική ανασκόπηση (2/2)

- Ανασκόπηση βάσει της μεθοδολογίας PRISMA ανέδειξε την **εκτεταμένη χρήση της μικροσκοπικής προσομοίωσης** για την αξιολόγηση της οδικής ασφάλειας.
- Οι προσεγγίσεις βασισμένες σε **εμπλοκές οχημάτων** κυριαρχούν στη βιβλιογραφία, επιτρέποντας την ανάλυση αναδυόμενων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένης της αυτοματοποιημένης κινητικότητας.
- Οι **μελέτες οι οποίες εστιάζουν στον αυτοματισμό** παραμένουν ετερογενείς, με σημαντική διαφοροποίηση στις παραδοχές οδηγικής συμπεριφοράς και στις επιλογές παραμέτρων.



Επιλογή τύπου οχημάτων

- Η βιβλιογραφία ανέδειξε **πλήθος τύπων** αυτόνομων οχημάτων, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τα επίπεδα αυτοματοποίησης κατά SAE, τη συνδεσιμότητα, τον βαθμό επιθετικότητας, κ.ά.

- Στην παρούσα Διατριβή, η ανάλυση επικεντρώνεται στη συμπερίληψη όλων των επιπέδων αυτοματοποίησης:
  - **SAE Επίπεδα 0-1:** Χωρίς ή με περιορισμένη αυτοματοποίηση, με πλήρη έλεγχο από τον οδηγό.
  - **SAE Επίπεδα 2-3**: Μερική ή υπό όρους αυτοματοποίηση, με τον οδηγό υπεύθυνο για την ανάληψη ελέγχου.
  - **SAE Επίπεδα 4-5**: Υψηλή έως πλήρης αυτοματοποίηση υπό συγκεκριμένες ή όλες τις συνθήκες.
  - **SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)**: Υψηλή έως πλήρης αυτοματοποίηση με επιθετικές ρυθμίσεις λειτουργίας.

Εντοπισμός παραμέτρων

RQ1

Μοντέλο ακολουθούντος οχήματος

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

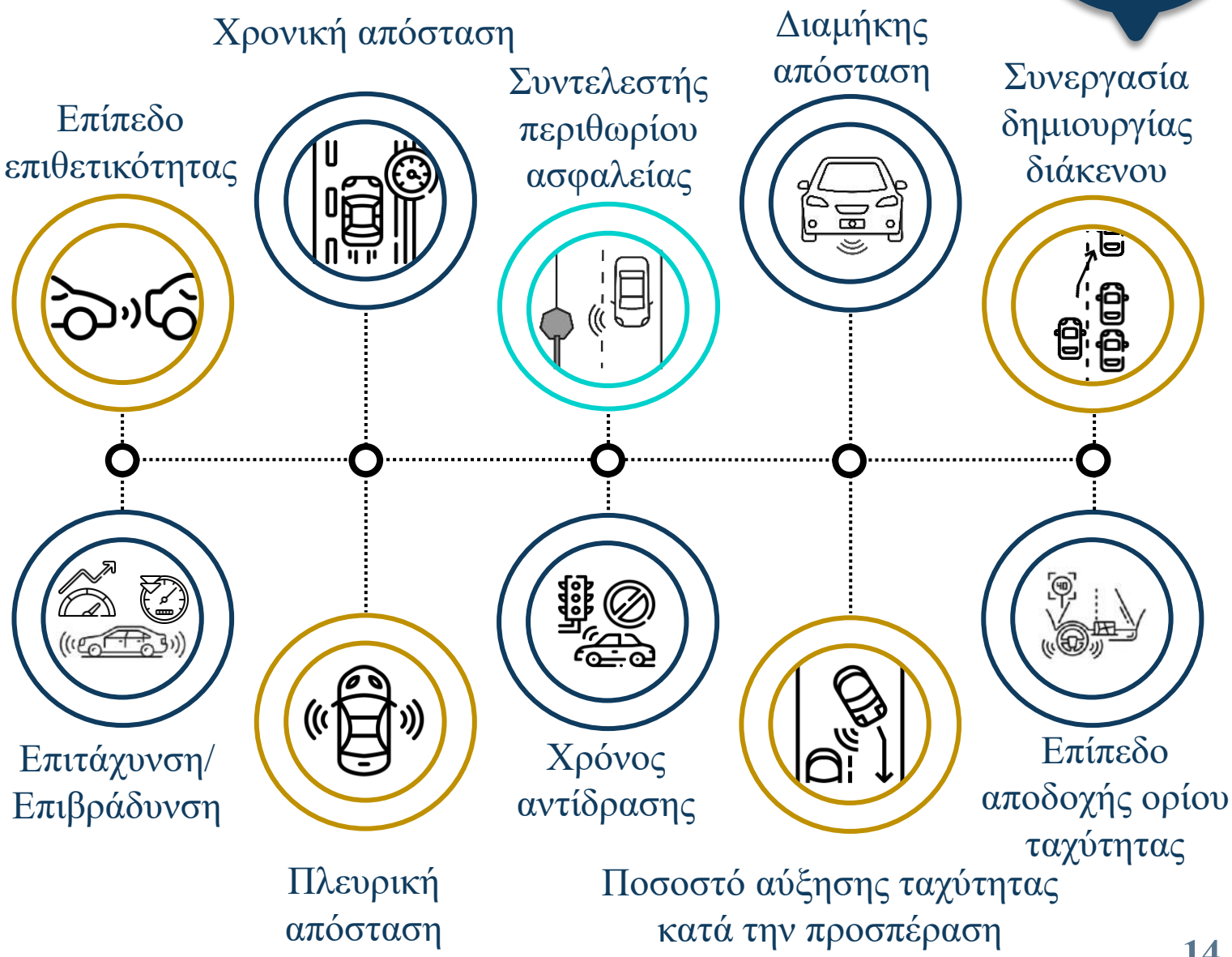
Μοντέλο αλλαγής λωρίδας

Η αλλαγή λωρίδας εξαρτάται από:

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

Μοντέλο αποδοχής διάκενου

- Καθορίζει τη διέλευση σε διασταυρώσεις
- Εφαρμόζεται σε πινακίδες παραχώρησης προτεραιότητας και διακοπής πορείας
- Αξιολογεί τη διέλευση λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση



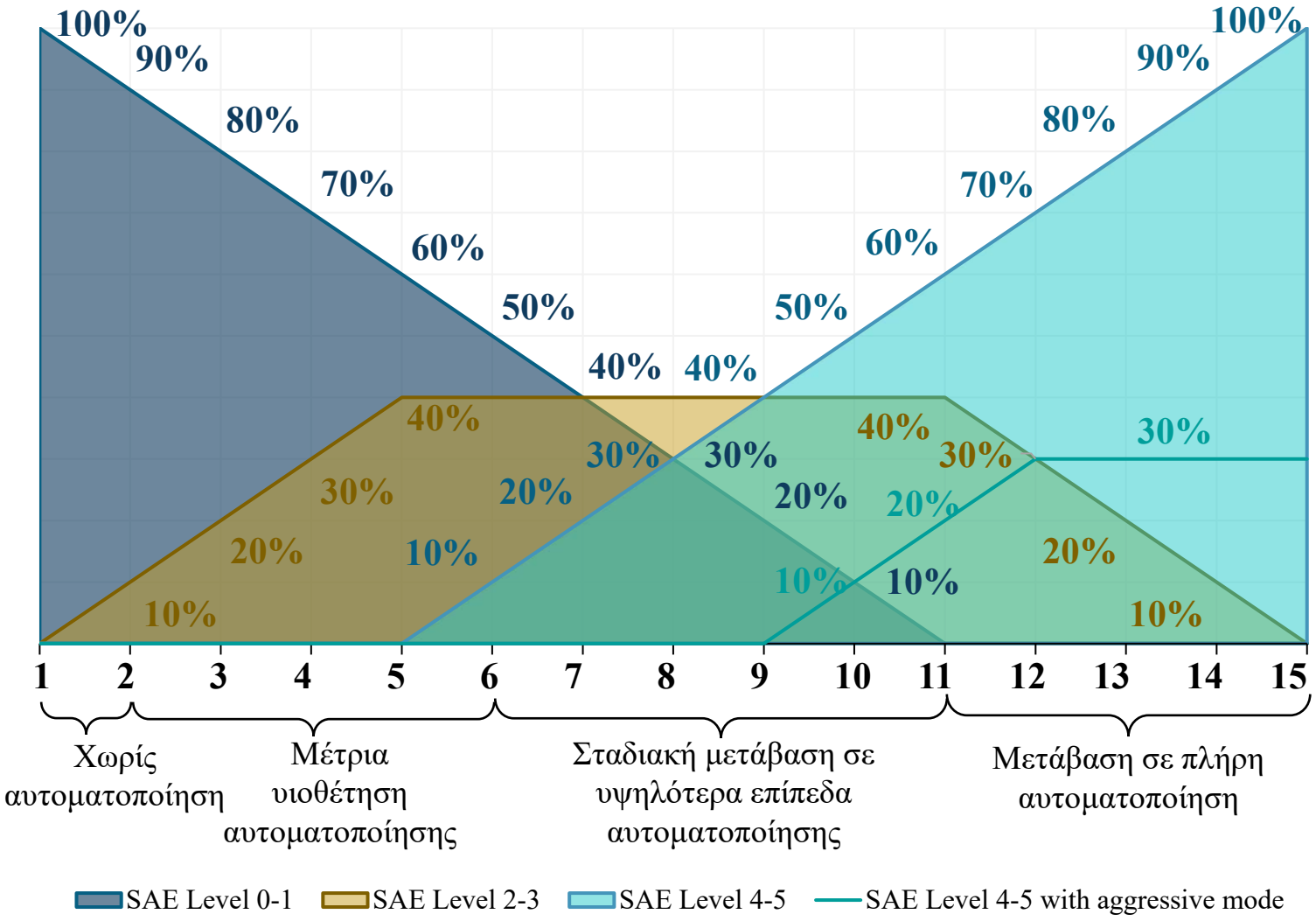
Τιμές παραμέτρων

- Για ορισμένες παραμέτρους, τα επίπεδα **SAE 2-3 αποκλίνουν περισσότερο** από τα SAE 0-1 σε σύγκριση με τα SAE 4-5 (π.χ. εντονότερη πέδηση, χαμηλότερα περιθώρια ασφάλειας), γεγονός που συνδέεται με την υποβοηθούμενη οδήγηση και λιγότερο συντηρητικές ρυθμίσεις ασφάλειας. Αντίθετα, τα επίπεδα SAE 4-5 μοντελοποιούνται με έμφαση στην άνεση και την ασφάλεια, ενώ η επιθετική λειτουργία τους απομονώνει συμπεριφορά αυξημένης επιθετικότητας.

Παράμετρος		Τύπος οχήματος	Μέση	Τυπ. Απόκλιση	Ελάχιστη	Μέγιστη
Μέγιστη επιτάχυνση (m/s²)	Ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο ένα όχημα μπορεί να αυξήσει την ταχύτητά του.	SAE Επίπεδα 0-1	2.27	1.33	0.40	5.00
		SAE Επίπεδα 2-3	2.11	0.58	1.40	3.50
		SAE Επίπεδα 4-5	2.23	1.16	0.40	6.00
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	2.92	0.93	2.00	4.00
Μέγιστη επιβράδυνση (m/s²)	Ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο ένα όχημα μπορεί να μειώσει την ταχύτητά του.	SAE Επίπεδα 0-1	-4.98	2.08	-9.00	-2.00
		SAE Επίπεδα 2-3	-5.21	2.46	-9.00	-2.50
		SAE Επίπεδα 4-5	-4.63	2.03	-9.00	-2.44
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	-7.44	1.78	-9.00	-4.00
Κανονική επιβράδυνση (m/s²)	Η μέγιστη επιβράδυνση που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα όχημα υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης.	SAE Επίπεδα 0-1	-2.88	1.83	-7.50	-1.00
		SAE Επίπεδα 2-3	-4.00	2.26	-7.50	-2.00
		SAE Επίπεδα 4-5	-2.35	1.66	-7.50	-0.61
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	-3.66	1.31	-4.50	-1.00
Χρόνος αντίδρασης (s)	Ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα όχημα να αντιδράσει σε μεταβολές ταχύτητας του προπορευόμενου οχήματος.	SAE Επίπεδα 0-1	0.90	-	-	-
		SAE Επίπεδα 2-3	0.30	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5	0.30	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	0.20	-	-	-
Χρόνος αντίδρασης σε φωτεινό σηματοδότη (s)	Ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα όχημα να αντιδράσει κατά την επανεκκίνηση στο πράσινο φανάρι.	SAE Επίπεδα 0-1	1.30	-	-	-
		SAE Επίπεδα 2-3	0.20	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5	0.50	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	0.10	-	-	-
Διαμήκης απόσταση (m)	Η απόσταση μεταξύ ακινητοποιημένων οχημάτων στη μέγιστη πυκνότητα κυκλοφορίας.	SAE Επίπεδα 0-1	1.92	1.05	0.00	5.10
		SAE Επίπεδα 2-3	1.23	0.78	0.00	2.92
		SAE Επίπεδα 4-5	1.35	0.68	0.00	2.92
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	1.25	0.53	0.50	2.00
Χρονική απόσταση (s)	Το χρονικό κενό που διατηρεί ένα όχημα από το προπορευόμενο.	SAE Επίπεδα 0-1	1.45	1.42	0.50	9.00
		SAE Επίπεδα 2-3	0.89	0.41	0.45	1.69
		SAE Επίπεδα 4-5	0.95	0.50	0.00	2.10
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	0.66	0.20	0.42	1.00
Ποσοστό αύξησης ταχύτητας κατά την προσπέραση (%)	Το ποσοστό της επιθυμητής ταχύτητας κατά την προσπέραση.	SAE Επίπεδα 0-1	90.00	-	-	-
		SAE Επίπεδα 2-3	85.00	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5	86.00	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	85.00	-	-	-
Πλευρική απόσταση (m)	Η ελάχιστη απόσταση που διατηρεί ένα όχημα κατά την προσπέραση ακινητοποιημένου οχήματος.	SAE Επίπεδα 0-1	0.60	0.40	0.20	1.00
		SAE Επίπεδα 2-3	0.15	0.00	0.15	0.15
		SAE Επίπεδα 4-5	0.45	0.30	0.15	0.75
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	0.45	0.30	0.15	0.75
Επίπεδο επιθετικότητας	Παράγοντας που αποτυπώνει τον βαθμό επιθετικότητας ενός οχήματος κατά την αλλαγή λωρίδας.	SAE Επίπεδα 0-1	-	-	0.60	0.63
		SAE Επίπεδα 2-3	-	-	0.21	0.45
		SAE Επίπεδα 4-5	-	-	0.10	1.00
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	-	-	0.10	0.75
Συνεργασία δημιουργίας διακένου	Όταν είναι ενεργοποιημένη, τα ακολουθούντα οχήματα διευκολύνουν την αλλαγή λωρίδας του προπορευόμενου.	SAE Επίπεδα 0-1	no	-	-	-
		SAE Επίπεδα 2-3	yes	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5	yes	-	-	-
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	yes	-	-	-
Συντελεστής περιθωρίου ασφαλείας	Παράγοντας που καθορίζει πότε ένα όχημα μπορεί να κινηθεί σε κόμβο με προτεραιότητα.	SAE Επίπεδα 0-1	1.00	0.00	1.00	1.00
		SAE Επίπεδα 2-3	2.00	0.00	2.00	2.00
		SAE Επίπεδα 4-5	1.43	0.57	0.50	2.00
		SAE Επίπεδα 4-5 (επιθετική λειτουργία)	1.47	0.64	0.88	2.50

Προσδιορισμός σεναρίων

- Για την ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων στις προσομοιώσεις, επιλέχθηκαν **δεκαπέντε σενάρια**, ώστε να διερευνηθούν πολλαπλά πιθανά σενάρια διείσδυσης, συμπεριλαμβάνοντας και τους τέσσερις επιλεγμένους τύπους οχημάτων.



Μικροσκοπική Προσομοίωση

Εισαγωγή γεωμετρίας οδικού δικτύου

Βαθμονόμηση οδικού δικτύου

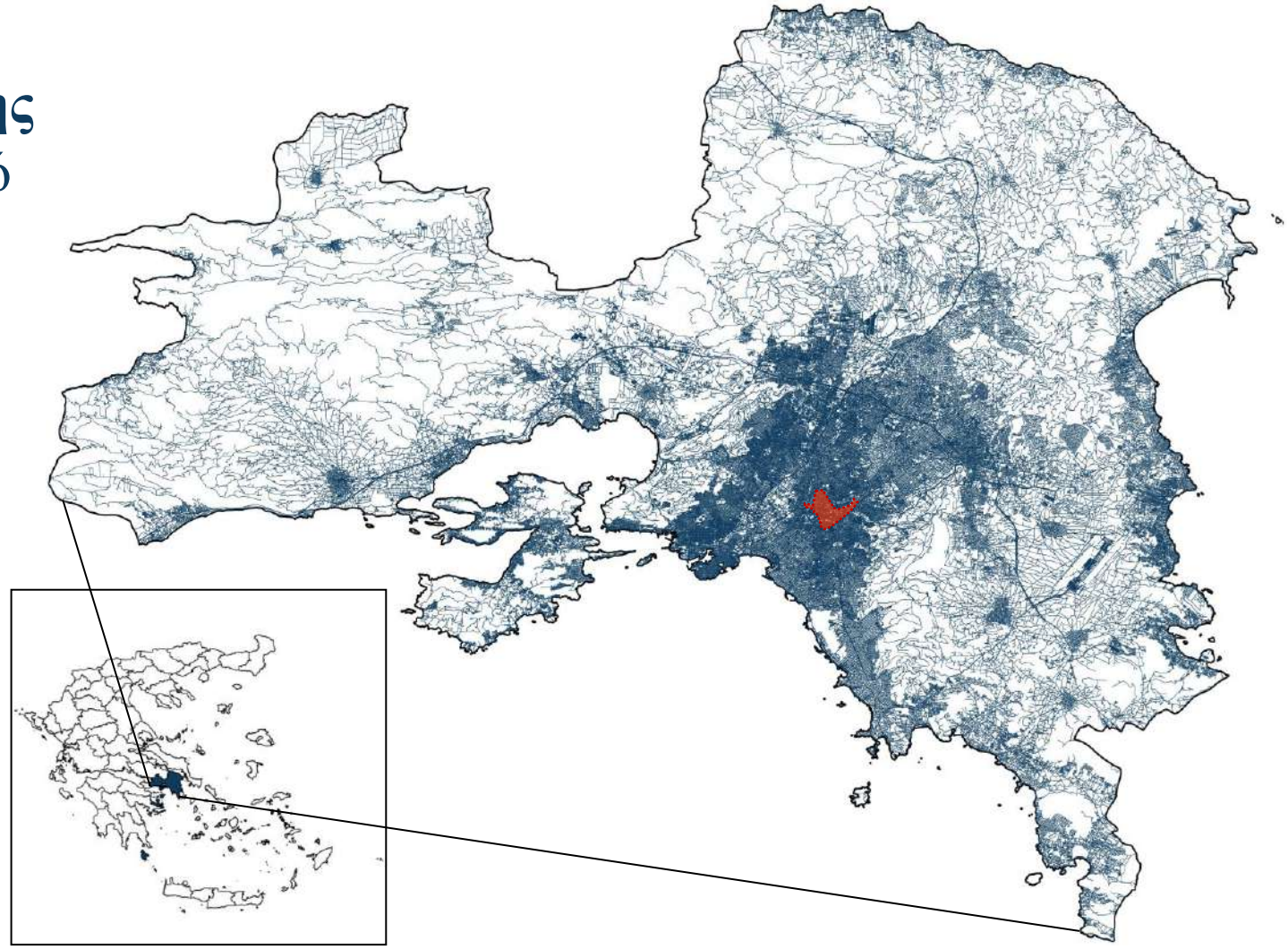
Επικύρωση οδικού δικτύου

Εκτέλεση προσομοιώσεων

Περιοχή μελέτης

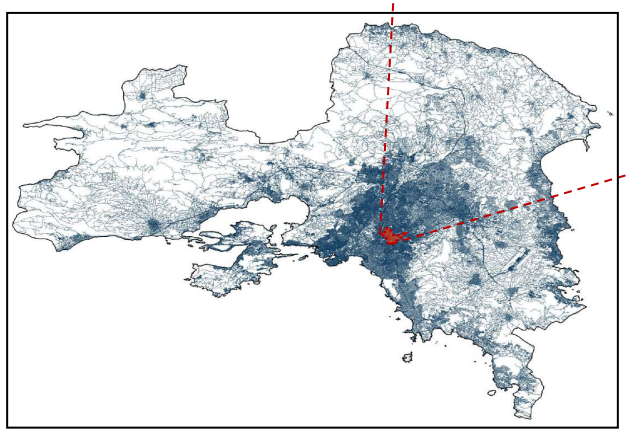
- Η περιοχή μελέτης είναι το **κέντρο της Αθήνας**, το οποίο χαρακτηρίζεται από πυκνή κυκλοφορία, υψηλά επίπεδα συμφόρησης, έντονη παρουσία δικύκλων και πεζών, καθώς και εκτεταμένη χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς.

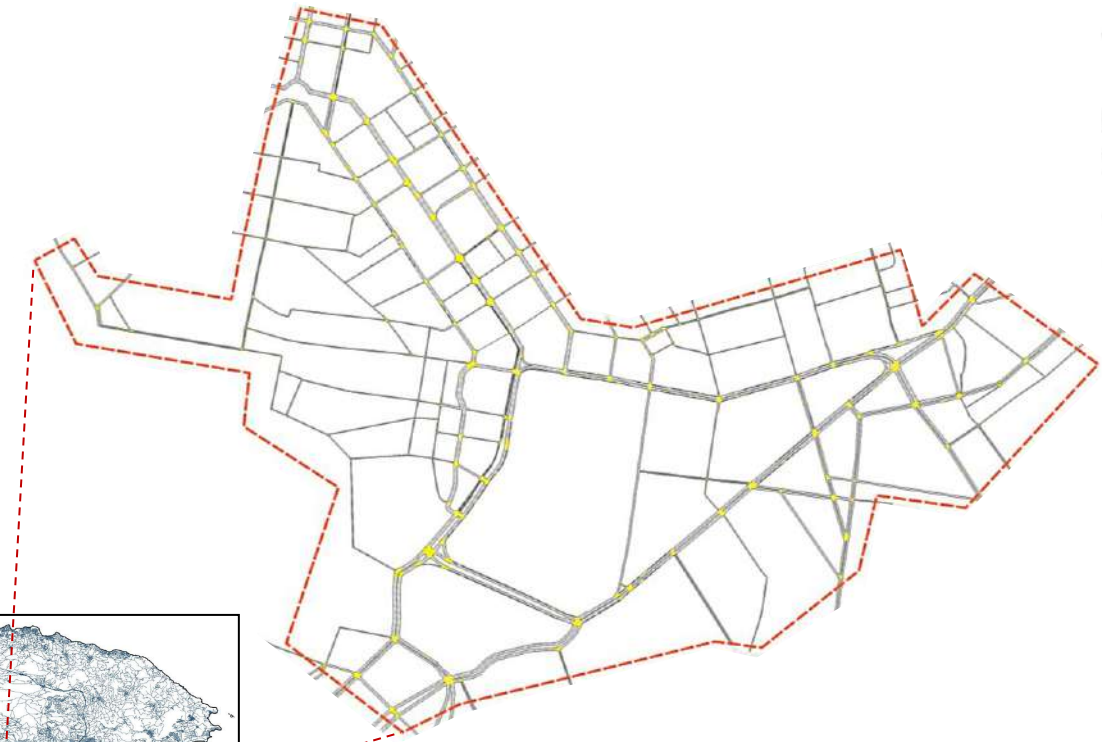
- Η περιοχή αυτή θεωρείται **ιδανικό οδικό δίκτυο** για την ενσωμάτωση των αυτόνομων οχημάτων υπό σύνθετες συνθήκες.



Γεωμετρία οδικού δικτύου

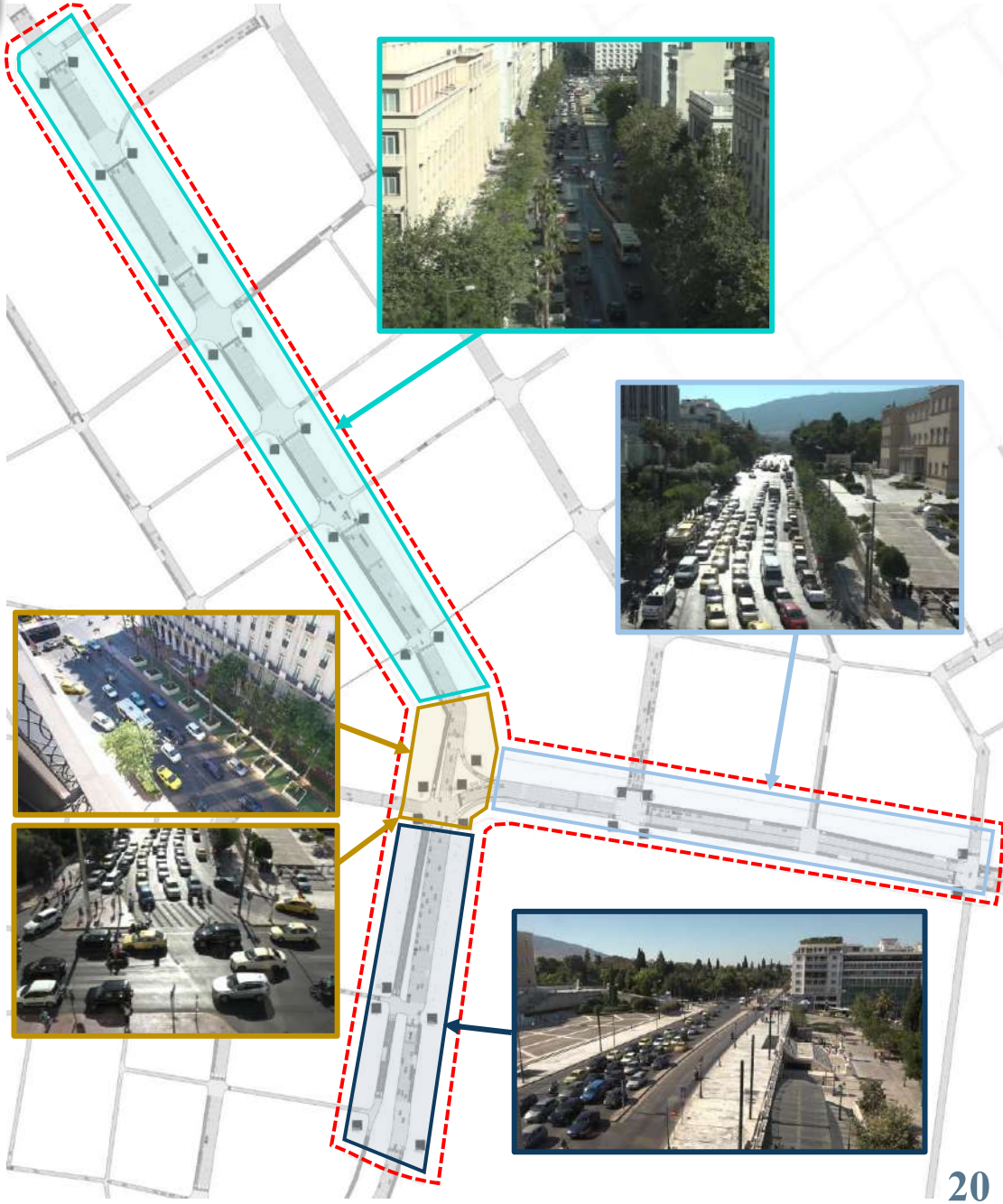
- Τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου εξήχθησαν από το **OpenStreetMap** και εισήχθησαν στο Aimsun Next.
- Το δίκτυο προσομοίωσης καλύπτει **έκταση 3.2 χλμ²** και περιλαμβάνει 192 κόμβους, 434 οδικά τμήματα και συνολικό μήκος 47 χλμ.
- Ο πίνακας Π-Π αποτελείται από **102 κεντροειδή**.
- Στο μοντέλο ενσωματώθηκαν στοιχεία των **δικτύων ΜΜΜ**, όπως διαδρομές, στάσεις, συχνότητες και χρόνοι παραμονής.





Δεδομένα βαθμονόμησης δικτύου

- Ο **κυκλοφοριακός φόρτος πεζών** ενσωματώθηκε στο μοντέλο μέσω ανάλυσης βίντεο από κάμερες, καταγράφοντας 6,912 πεζούς στις ορατές διαβάσεις κατά την πρωινή ώρα αιχμής.
- Ο **κυκλοφοριακός φόρτος οχημάτων** για την πρωινή αιχμή (08:00-09:00) συλλέχθηκε από το ΚΔΚ μέσω 19 «φωρατών» (καμερών καταγραφής κυκλοφοριακού φόρτου).
- Ενσωματώθηκαν δεδομένα μετρήσεων πεδίου για την αποτύπωση της **σύνθεσης της κυκλοφορίας** (δίκυκλα, βαρέα οχήματα, επιβατικά οχήματα και ταξί) κατά την πρωινή ώρα αιχμής.

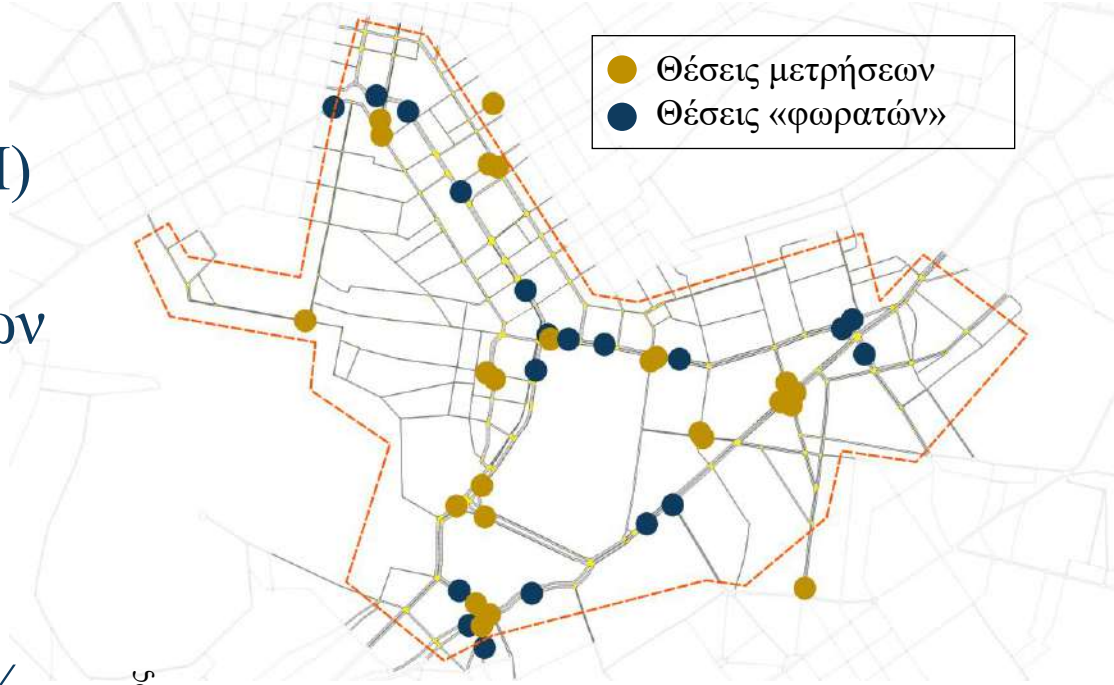


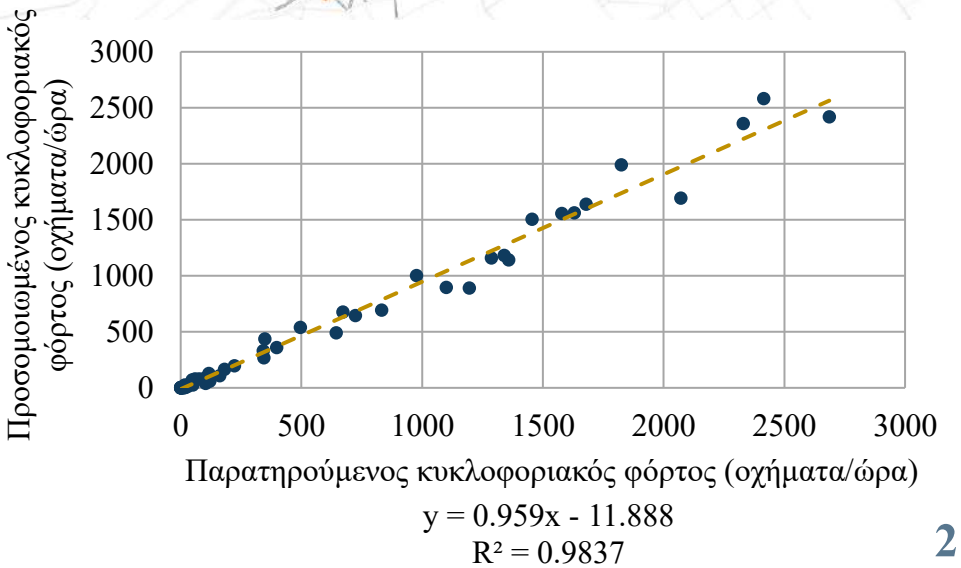
Αποτελέσματα βαθμονόμησης και επικύρωση

- Η βαθμονόμηση του μοντέλου ήταν **επιτυχής** (R^2=0.98), με τον δείκτη Geoffrey E. Havers (GEH) να πληροί τα κριτήρια της Federal Highway Administration (FHWA (το 85,2% των περιπτώσεων με GEH<5 και το 100% με GEH<10).

- Από την βαθμονόμηση των πινάκων Π-Π προέκυψαν **20,987 μετακινήσεις** κατά την πρωινή αιχμή (37% επιβατικά οχήματα, 31% δίκυκλα, 28% ταξί και 4% φορτηγά).

- Η επικύρωση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης προσομοιωμένων και παρατηρούμενων **χρόνων διαδρομής** (μέσω Google Maps API), με μικρές αποκλίσεις.





Εκτίμηση εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας

Ανάλυση εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας

Μετατροπή εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος

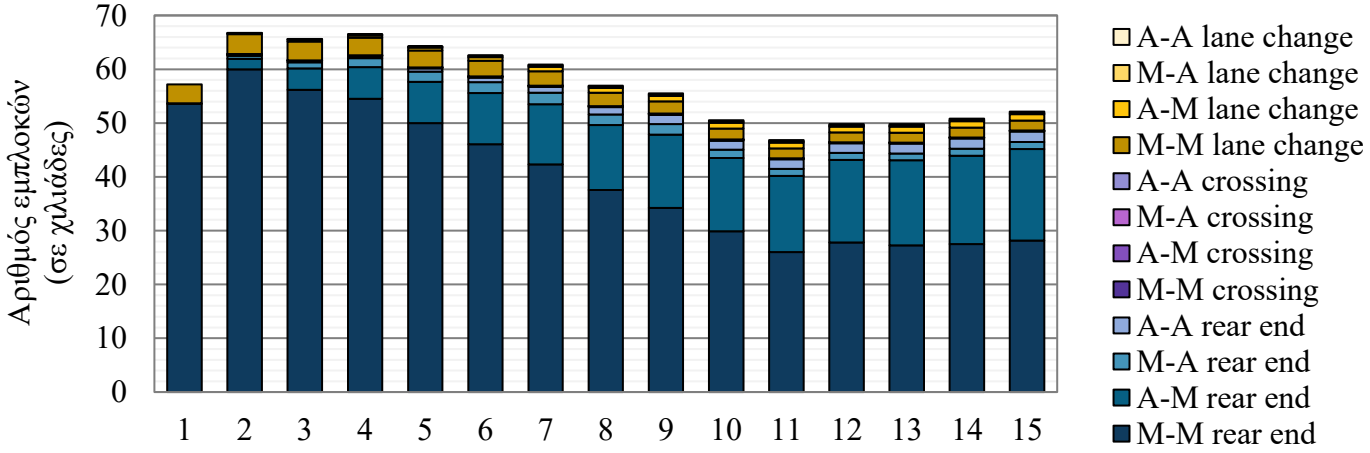
Επικύρωση κινδύνου ατυχήματος

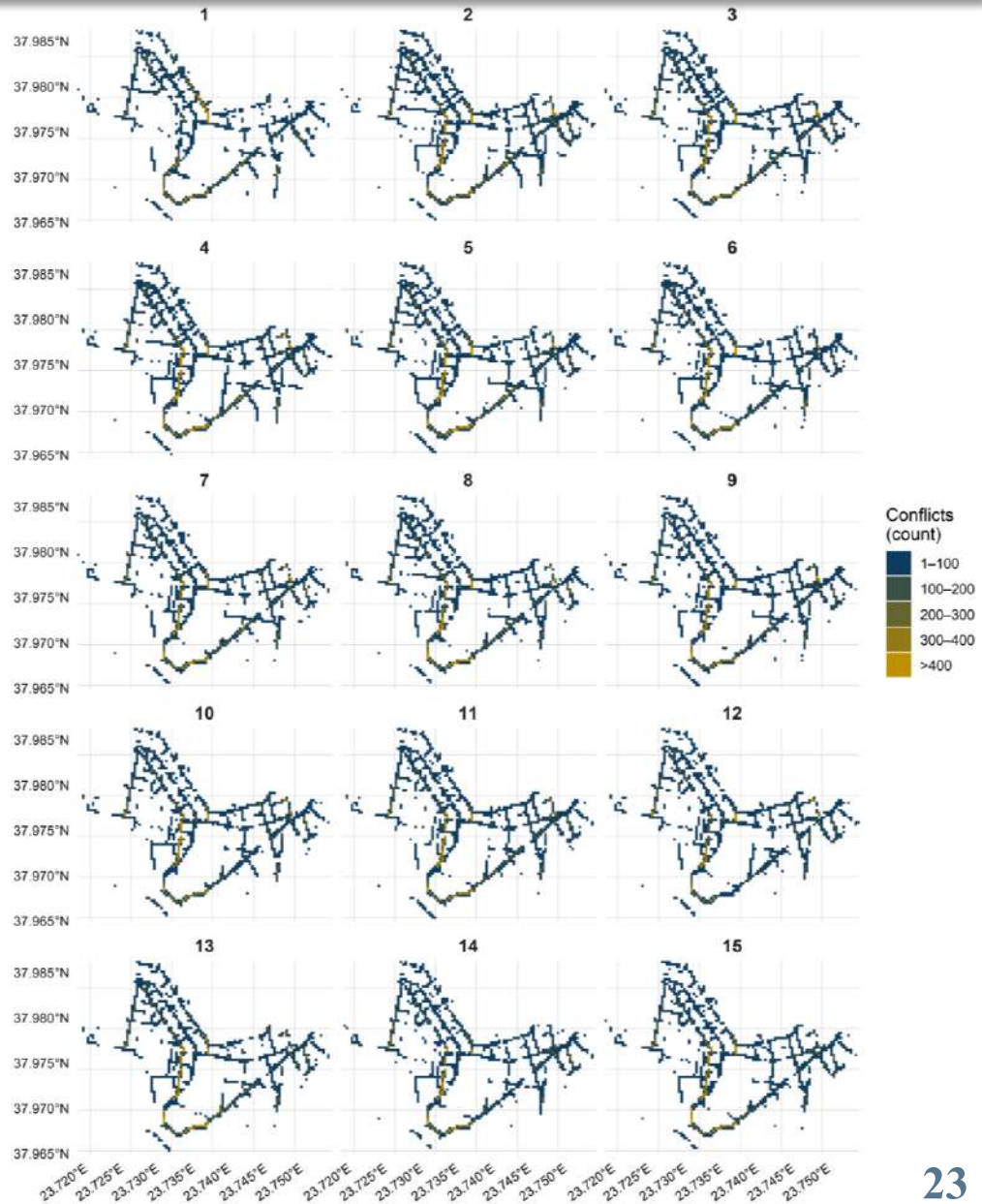
Χρήση δεδομένων ατυχημάτων

Ανάλυση εναλλακτικών δεικτών ασφάλειας

- Οι **τροχιές των οχημάτων** εξήχθησαν από την προσομοίωση σε χρονικά διαστήματα 0.1 δευτ. και αναλύθηκαν με τη χρήση του Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) της FHWA.

- Οι εμπλοκές εντοπίστηκαν βάσει κατωφλιών του χρόνου έως την εμπλοκή (TTC) με προεπιλεγμένη τιμή 1.5 δευτ., η οποία **προσαρμόστηκε για τα αυτόνομα οχήματα** (Επίπεδα 2-3: 0.9 δευτ., Επίπεδα 4-5: 1.0 δευτ., Επίπεδα 4-5 επιθετική λειτουργία: 0.7 δευτ.).



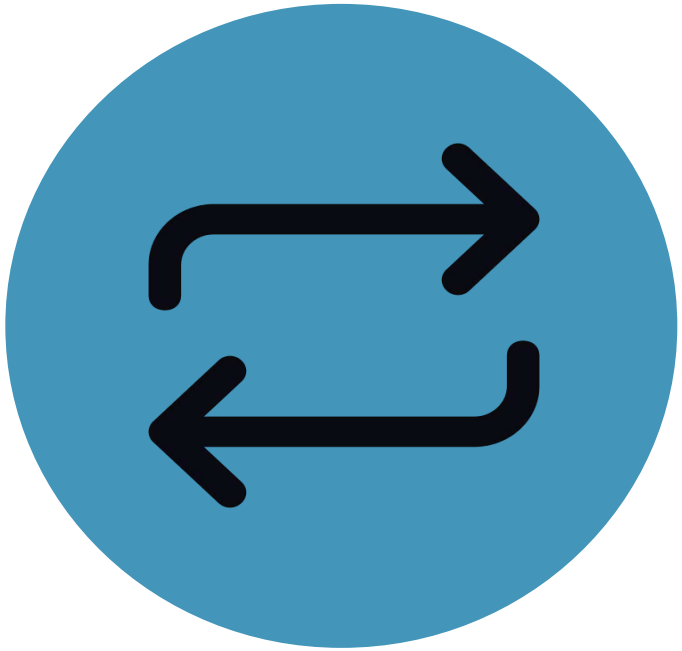


Μετατροπή εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος

RQ2

- Η πλειονότητα των μελετών βασίζεται σε απλούς λόγους συσχέτισης συγκρούσεων-εμπλοκών, ενώ συγκεκριμένη μελέτη[1] εισήγαγε προσέγγιση βασισμένη στον **δείκτη χρόνου έως τη σύγκρουση** (TTC), με στόχο τη μετατροπή του συνολικού αριθμού εμπλοκών σε εκτιμώμενο αριθμό ατυχημάτων.

- Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε και προσαρμόστηκε σε **επίπεδο μεμονωμένης εμπλοκής**, επιτρέποντας την εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος για κάθε εμπλοκή, μέσω της χρήσης διαφορετικών κατωφλιών TTC ανά επίπεδο αυτοματισμού:



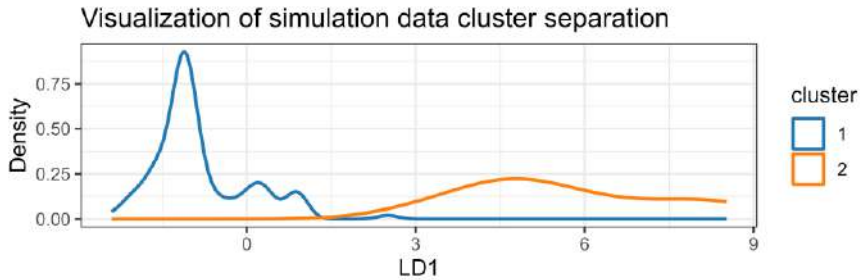
$$\text{Κίνδυνος ατυχήματος} = 2^{\frac{\log(0.5)}{\log\left(1+\frac{TTC_t - TTC_i}{TTC_i}\right)}}$$

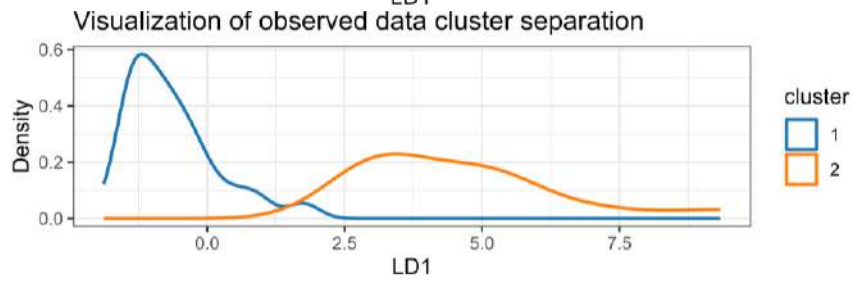
- TTC_i: ο χρόνος έως τη σύγκρουση (TTC) για την i-οστή εμπλοκή
- TTC_t: το κατώφλι TTC του ακολουθούντος οχήματος στη συγκεκριμένη εμπλοκή

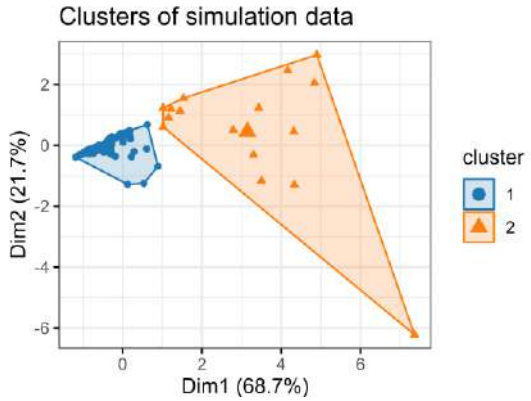
[1] *Tarko, A.P., 2018. Estimating the expected number of crashes with traffic conflicts and the Lomax Distribution – A theoretical and numerical exploration. Accid. Anal. Prev. 113 January , 63–73. doi:10.1016/j.aap.2018.01.008*

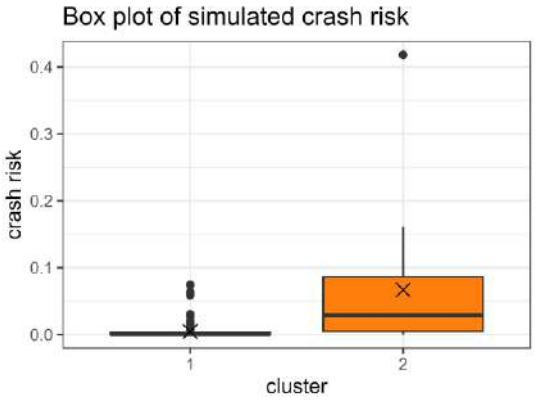
Επικύρωση κινδύνου ατυχήματος

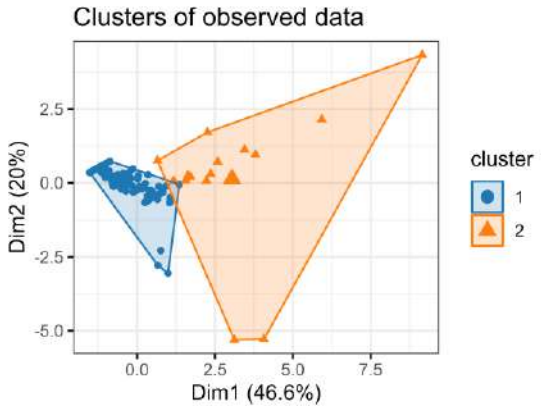
- Η εκτίμηση του κινδύνου ατυχήματος επικυρώθηκε με βάση παρατηρούμενα δεδομένα ατυχημάτων, μέσω ομαδοποίησης **k-means**.
- Χρησιμοποιήθηκαν **δεδομένα ατυχημάτων** από την ΕΛΣΤΑΤ, τα οποία περιλαμβάνουν ατυχήματα με τουλάχιστον έναν ελαφρά τραυματία, σε επίπεδο οδικού άξονα.
- Η μέθοδος Elbow καθόρισε δύο ομάδες και στα δύο σύνολα δεδομένων, οι οποίες αντιστοιχούν **σε οδούς χαμηλού και υψηλού κινδύνου**.
- Η Ανάλυση Γραμμικού Διαχωρισμού (LDA) χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση του διαχωρισμού των ομάδων, παρουσιάζοντας **σαφή διάκριση** χωρίς επικάλυψη.

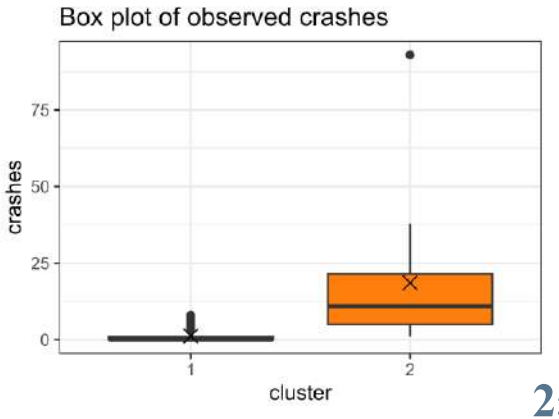






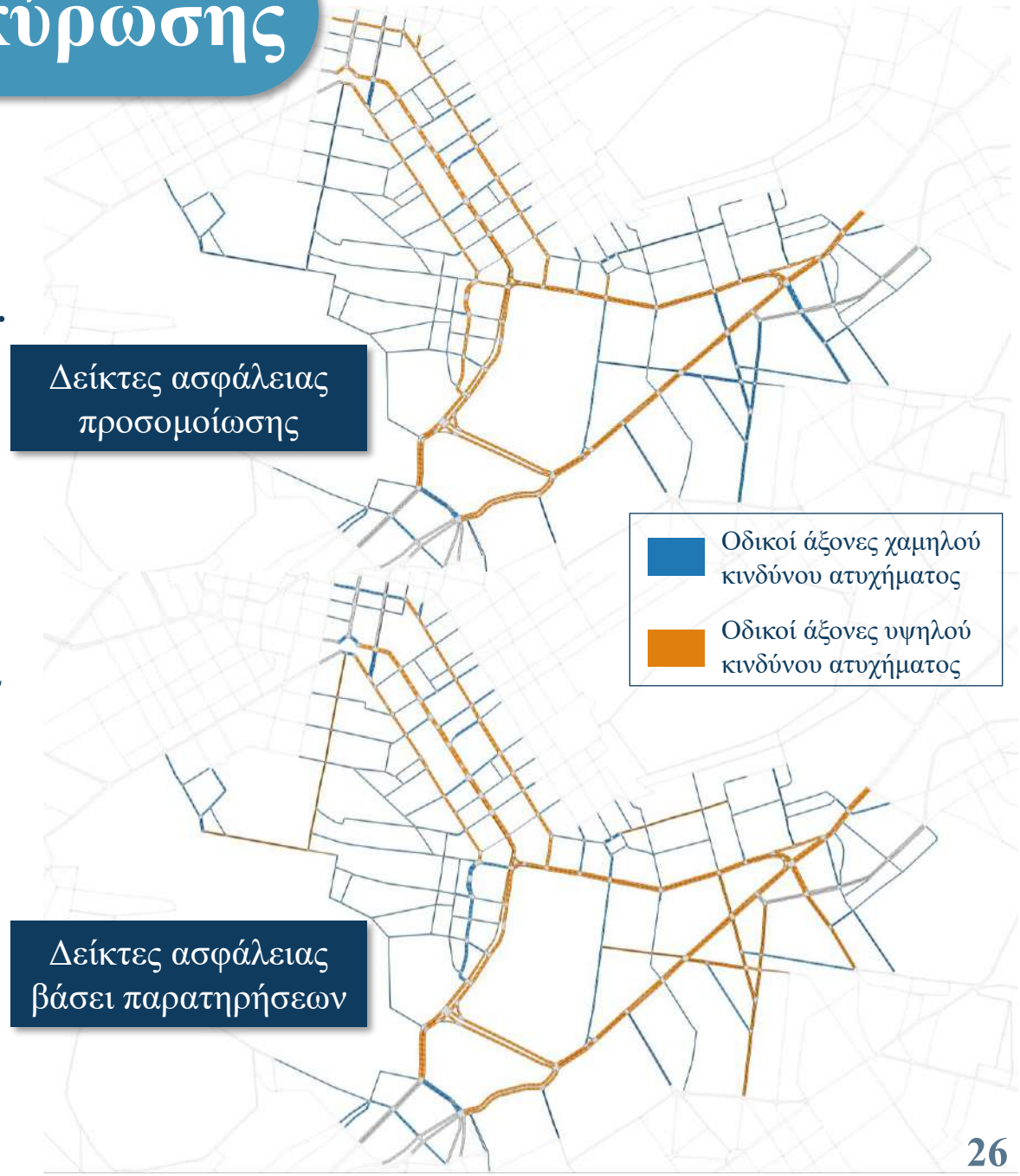






Απεικόνιση αποτελεσμάτων επικύρωσης

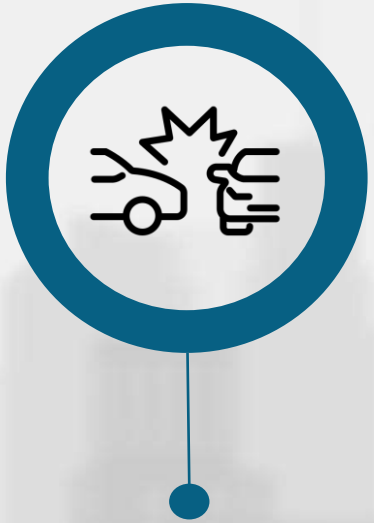
- Η ταξινόμηση του κινδύνου συμφωνεί για το **87.7% των οδικών αξόνων** (107 από τους 122).
- Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε χάρτες, διευκολύνοντας τον **εντοπισμό αποκλίσεων.**
- Οι λανθασμένες ταξινομήσεις (15 άξονες) εντοπίζονται σε οδικούς άξονες χωρίς διαθέσιμα δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου για τη βαθμονόμηση, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της **επάρκειας δεδομένων** για αξιόπιστη εκτίμηση ασφάλειας.



Εκτίμηση Κινδύνου Ατυχήματος

Ανάλυση σε επίπεδο οδικού άξονα

Εντοπισμός παραγόντων οι οποίοι σχετίζονται με τον κίνδυνο ατυχήματος και ανάλυση της επίδρασής τους.

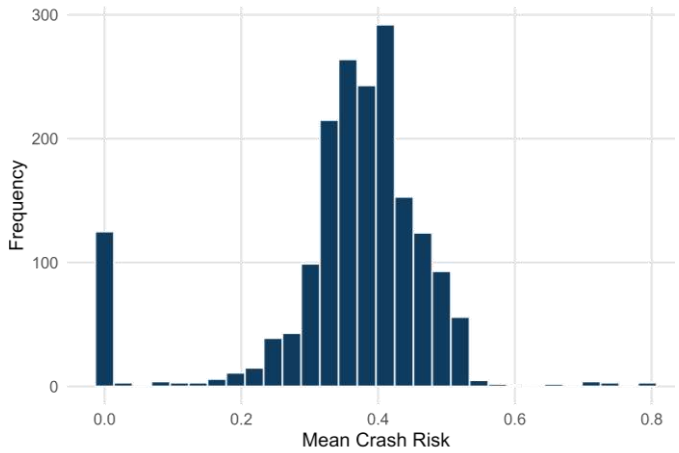


Ανάλυση σε επίπεδο εμπλοκών

Διερεύνηση της χωρικής κατανομής του κινδύνου ατυχήματος, με τον εντοπισμό και τη μοντελοποίηση περιοχών υψηλού κινδύνου.

Ανάλυση σε επίπεδο οδικού άξονα: Παράγοντες κινδύνου

- Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε **8.8 εκατ. εμπλοκές** για 1,812 οδικούς άξονες (15 σενάρια).
- Αρχική ανάλυση των δεδομένων ανέδειξε μη κανονικότητα, μη γραμμικές σχέσεις και πολυσυγγραμμικότητα.
- Αξιολογήθηκαν τα μοντέλα δέντρων, Random Forest και XGBoost, χρησιμοποιώντας τυπικούς δείκτες σφάλματος (RMSE, MAE, R^2).
- Το **XGBoost παρουσίασε την καλύτερη απόδοση** (R^2=0.73, RMSE=0.18, MAE=0.10) και επιλέχθηκε για την ανάλυση των παραγόντων κινδύνου ατυχήματος.
- **Οι τιμές SHAP** χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της σχετικής επίδρασης των παραγόντων.

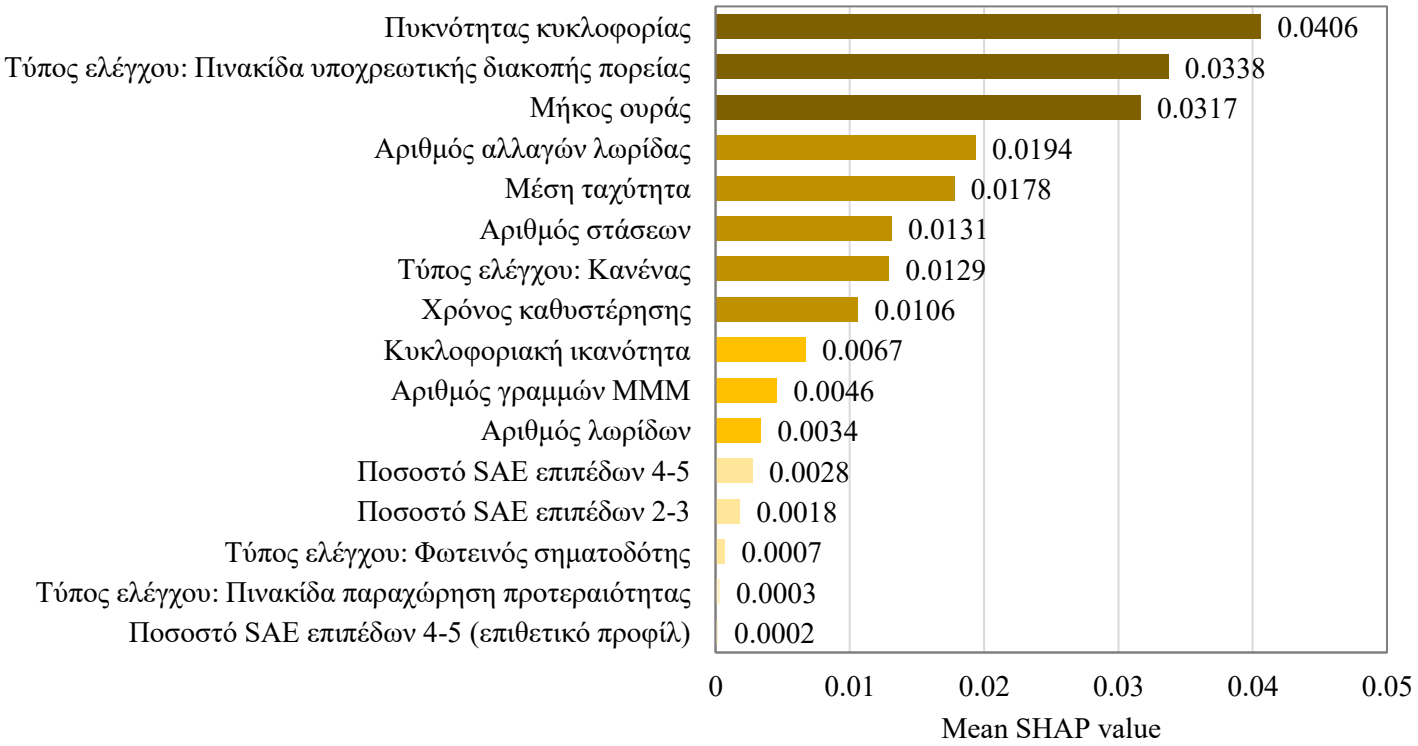


Μοντέλο	RMSE	MAE	R^2
XGBoost (tuned)	**0.176**	**0.095**	**0.733**
Random Forest (tuned)	0.201	0.049	0.650

Κατάταξη παραγόντων κινδύνου ατυχήματος

RQ3

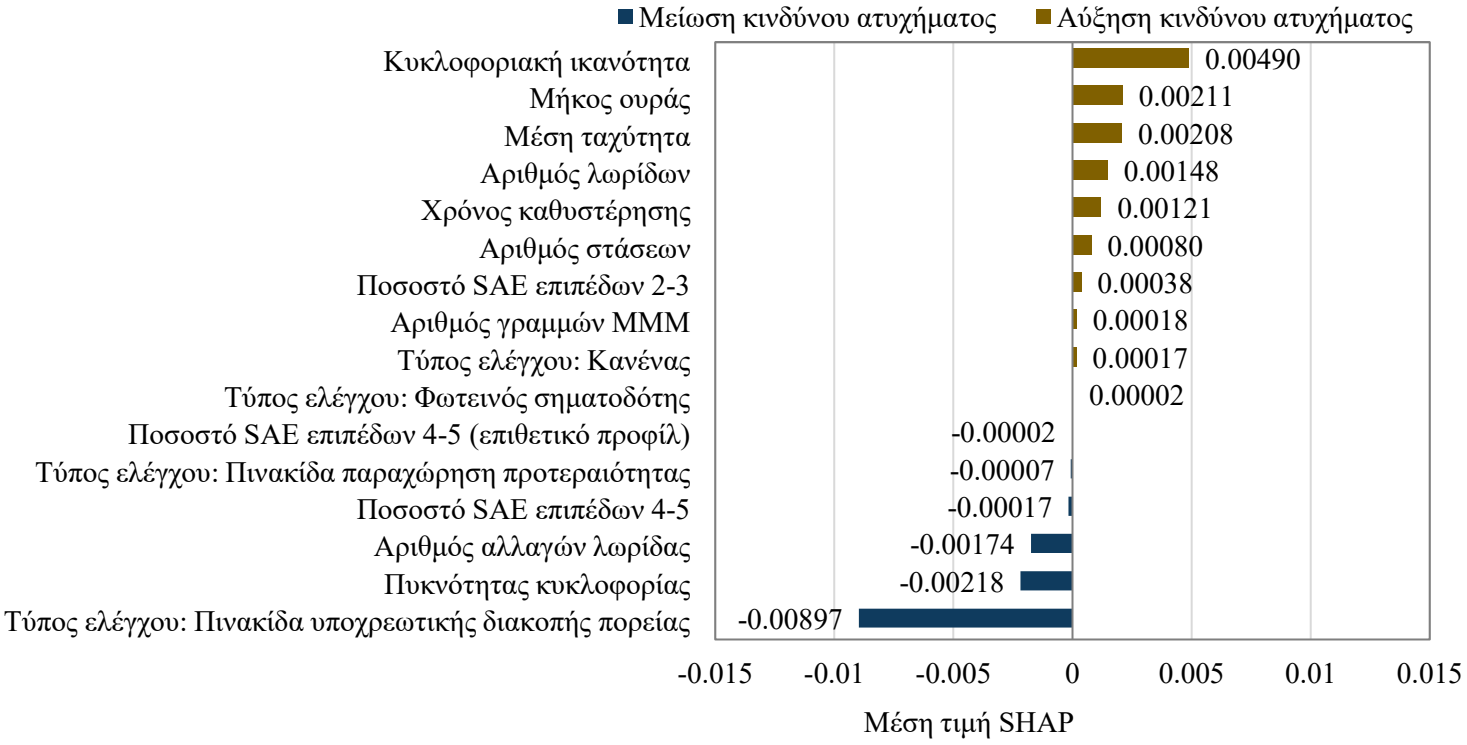
- Οι κυκλοφοριακές συνθήκες παραμένουν οι **κύριοι παράγοντες** του κινδύνου ατυχήματος, ακόμη και με την παρουσία των αυτόνομων οχημάτων.
- Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οδικών αξόνων εμφανίζουν **μέτρια επίδραση**.
- Οι μεταβλητές σχετικές με τον **αυτοματισμό συμβάλλουν έμμεσα**, με μεγαλύτερη επίδραση των επιπέδων 4-5 σε σύγκριση με τα επίπεδα 2-3, ενώ η επιθετική λειτουργία των επιπέδων 4-5 εμφανίζει ελάχιστη επίδραση.

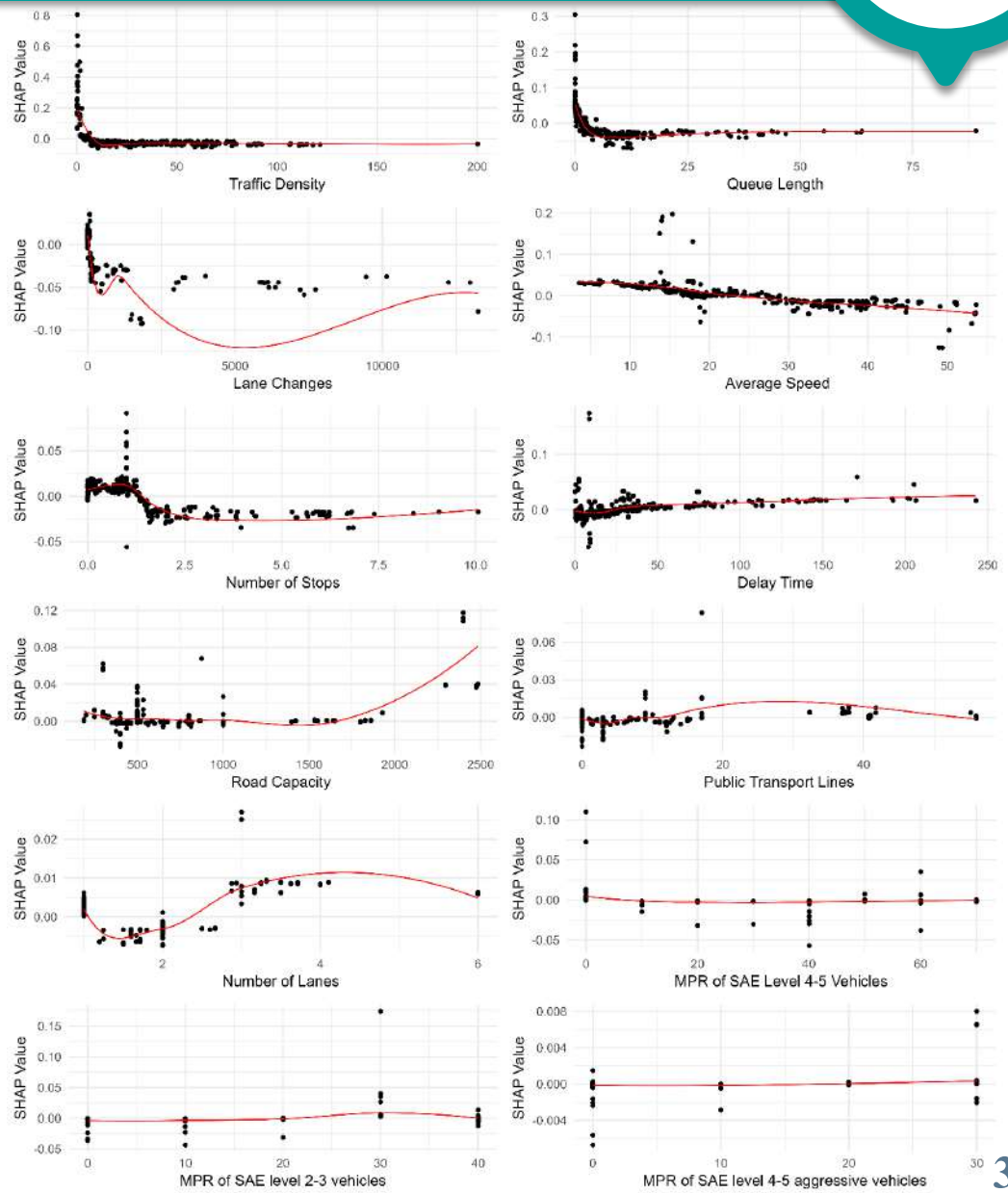


Επίδραση των παραγόντων στον κίνδυνο ατυχήματος

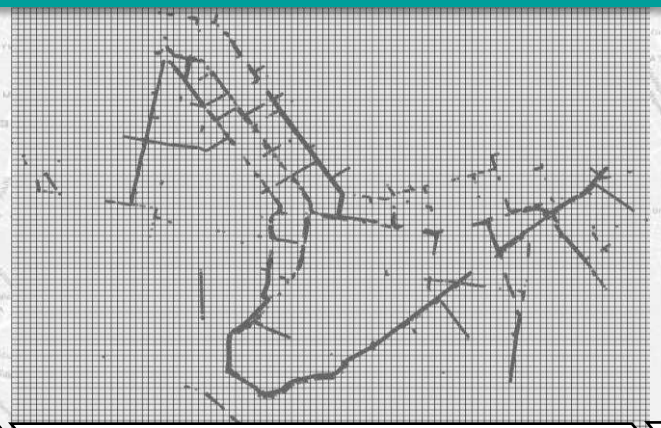
RQ4

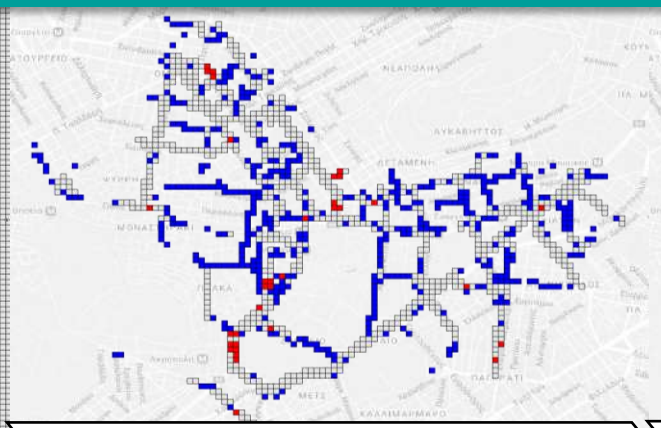
- Η διείσδυση των επιπέδων SAE 2-3 συνδέεται με **ήπια αύξηση** του κινδύνου λόγω μεικτής κυκλοφορίας, ενώ η διείσδυση των επιπέδων SAE 4-5 **μειώνει τον κίνδυνο**, με την επιθετική λειτουργία τους να παρουσιάζει αμελητέα επίδραση.

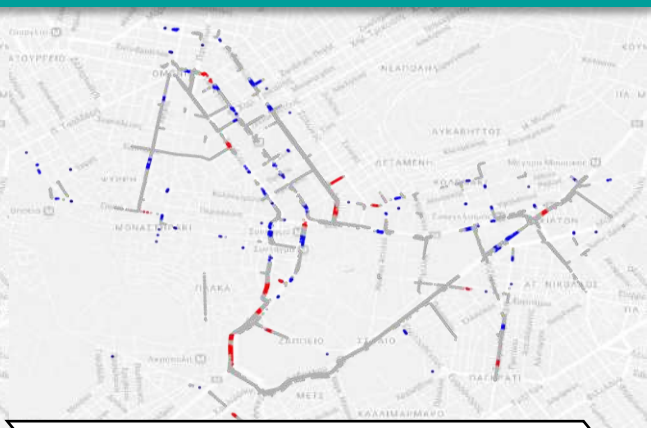




Ανάλυση σε επίπεδο εμπλοκών: Περιοχές υψηλού κινδύνου







Εντοπισμός εμπλοκών

- Επιλέχθηκε μία αντιπροσωπευτική επανάληψη προσομοίωσης, με αποτέλεσμα την ανάλυση περισσότερων από 880,000 εμπλοκών.

Ομαδοποίηση εμπλοκών

- Εφαρμογή τετραγωνικού πλέγματος 30μ.×30μ.
- Χωρική αντιστοίχιση εμπλοκών στα κελιά του πλέγματος.
- Υπολογισμός του κινδύνου ατυχήματος ανά κελί.

Εντοπισμός κελιών υψηλού κινδύνου

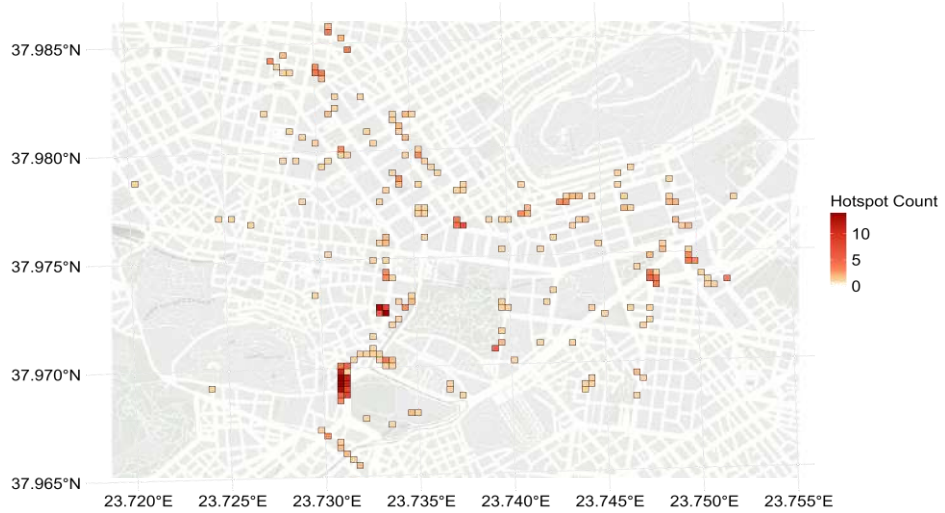
- Ταξινόμηση των κελιών σε περιοχές υψηλού κινδύνου ($Gi>1.96$), χαμηλού κινδύνου ($Gi<-1.96$) και σε περιοχές χωρίς στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση.

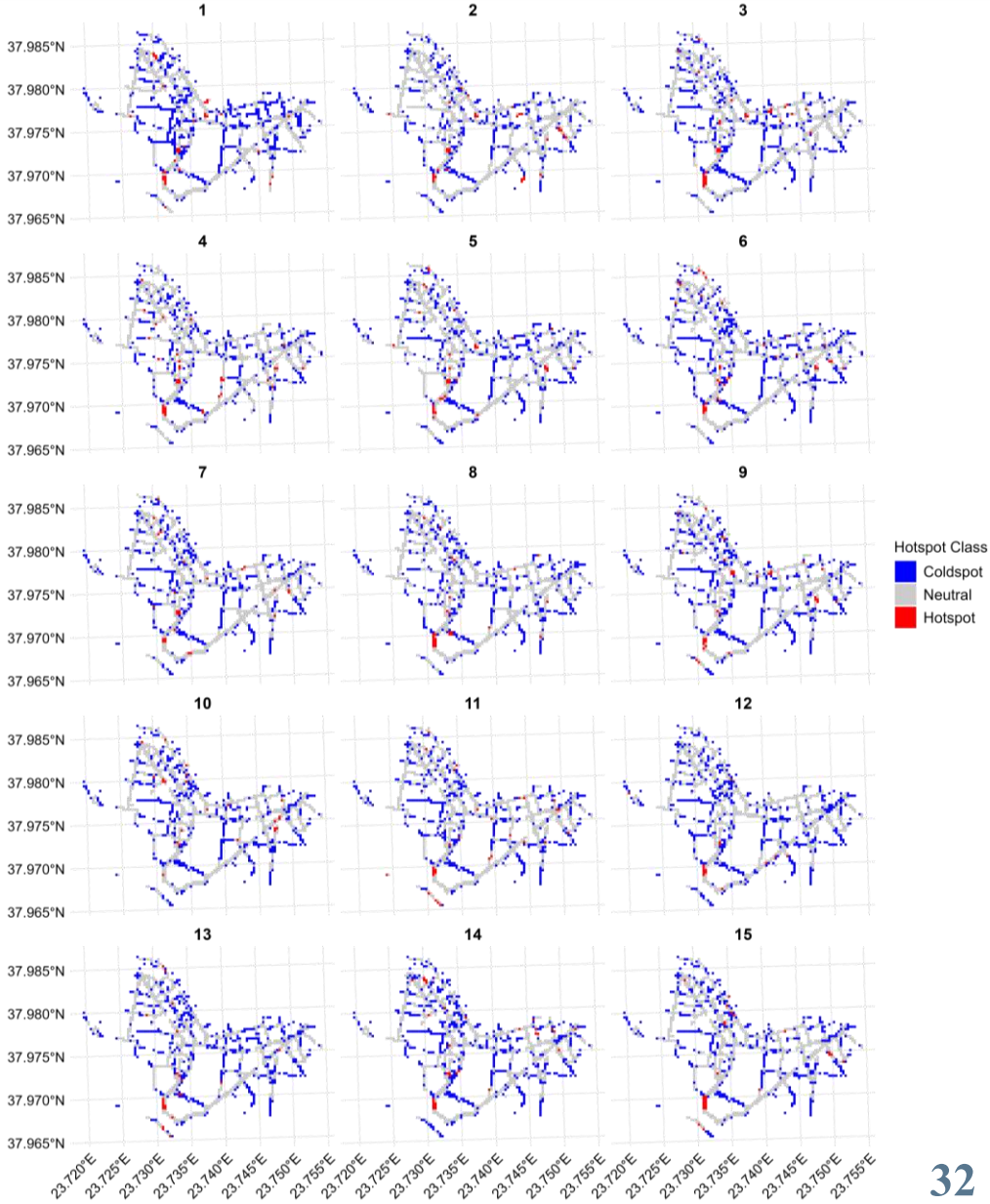
Εμπλοκές σε περιοχές υψηλού κινδύνου

- Αντιστοίχιση εμπλοκών στην κατηγορία της περιοχής υψηλού κινδύνου του κελιού.
- Μοντελοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης εμπλοκής σε περιοχή υψηλού κινδύνου.

Μεθοδολογία εντοπισμού περιοχών υψηλού κινδύνου

- Ο **δείκτης Getis-Ord Gi*** χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό στατιστικά σημαντικών περιοχών υψηλού, συγκρίνοντας την τιμή κινδύνου κάθε κελιού και των γειτονικών του με το συνολικό μέσο της περιοχής μελέτης.
- Ο αριθμός των περιοχών υψηλού κινδύνου **μειώνεται** με την αύξηση της κυκλοφορίας των αυτόνομων οχημάτων, ενώ σε **σύνθετα σημεία του δικτύου** οι περιοχές υψηλού κινδύνου διατηρούνται.



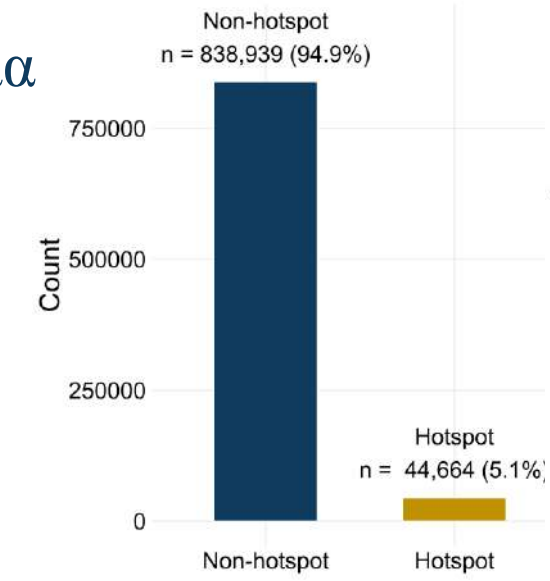


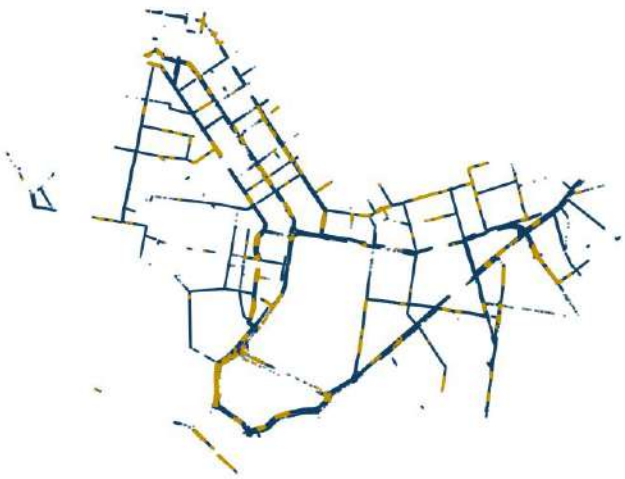
Μοντελοποίηση πιθανότητας περιοχών υψηλού κινδύνου

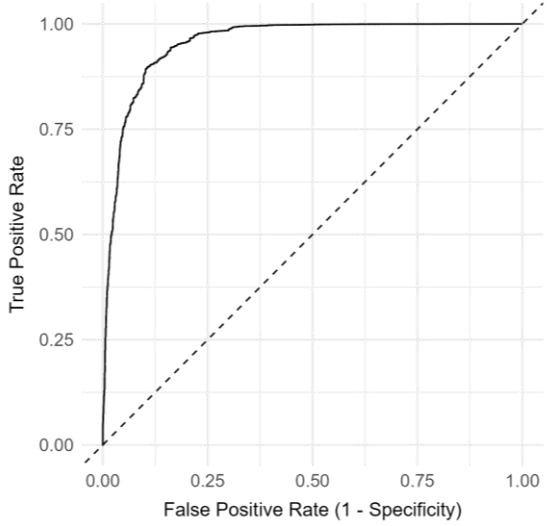
- Χρησιμοποιήθηκε ως μεταβλητή η ένδειξη αν μια εμπλοκή **βρίσκεται σε περιοχή υψηλού κινδύνου (ναι=1, όχι=0)**, η οποία εμφάνισε ανισορροπία κατηγοριών, απαιτώντας oversampling (≈1.6 εκατ. εμπλοκές).

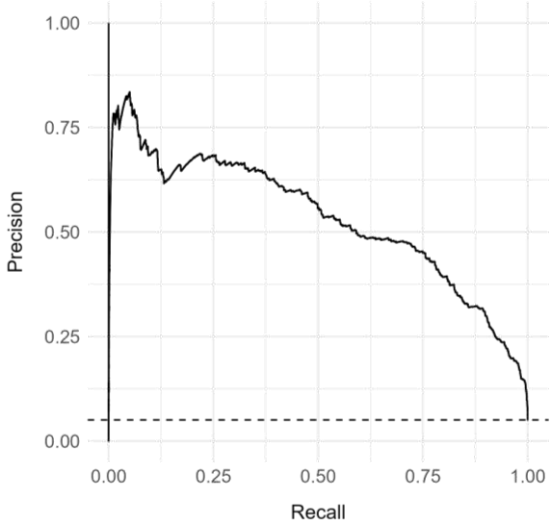
- Δοκιμάστηκαν και **συγκρίθηκαν μοντέλα** λογιστικής και χωρικής λογιστικής παλινδρόμησης, το γενικευμένο προσθετικό μοντέλο και δέντρων (Random Forest, XGBoost).

- Επιλέχθηκε το **διωνυμικό γενικευμένο προσθετικό μοντέλο**, το οποίο μοντελοποιεί μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών (δείκτης AUC=0.96, Adjusted R^2≈0.68).









Επίδραση παραμέτρων στις περιοχές υψηλού κινδύνου

- Οι **διασταυρώσεις και οι μετωπικές/πλαγιομετωπικές εμπλοκές** παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα δημιουργίας περιοχών υψηλού κινδύνου, ενώ ο έλεγχος στις διασταυρώσεις τη μειώνει.
- Οι εμπλοκές μεταξύ **αυτόνομων και συμβατικών οχημάτων**, καθώς και μεταξύ αυτόνομων οχημάτων, εμφανίζουν υψηλότερη πιθανότητα.
- Η πιθανότητα εμφάνισης περιοχών υψηλού κινδύνου αυξάνεται σε **χαμηλά ποσοστά διείσδυσης** αυτόνομων οχημάτων και μειώνεται σε υψηλότερα ποσοστά.

Συντελεστές μοντέλου (Εξαρτημένη μεταβλητή: Εμφάνιση περιοχής υψηλού κινδύνου)

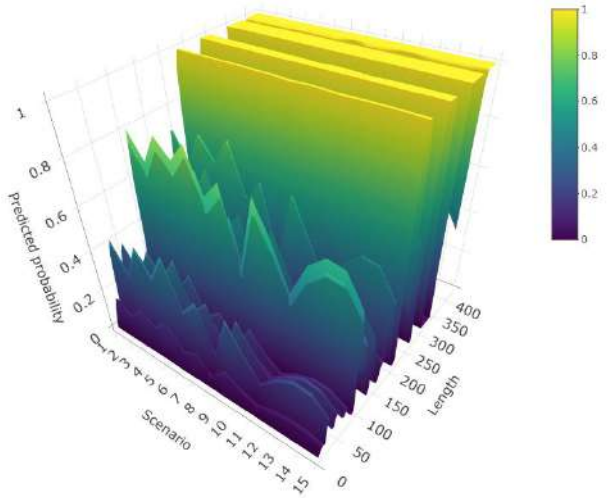
Μεταβλητή	Estimate	Std. Error	z value	p-value	Sig.
Σταθερός όρος	-15.615	0.255	-61.160	<0.001	***
Τύπος οδ. περιβάλλοντος: διασταύρωση *(Αναφ.: οδικό τμήμα)*	0.490	0.075	6.575	<0.001	***
Τύπος εμπλοκής: πλάγια *(Αναφ.: μετωπική/ πλαγιομετωπική)*	-0.674	0.062	-10.788	<0.001	***
Τύπος εμπλοκής: οπίσθια *(Αναφ.: μετωπική/ πλαγιομετωπική)*	-0.647	0.061	-10.572	<0.001	***
Έλεγχος κυκλοφορίας: STOP *(Αναφ.: χωρίς έλεγχο)*	-0.705	0.055	-12.711	<0.001	***
Έλεγχος κυκλοφορίας: φωτεινός σηματοδότης *(Αναφ.: χωρίς έλεγχο)*	-1.147	0.026	-43.966	<0.001	***
Ζεύγος οχημάτων: AV-συμβατικό *(Αναφ.: συμβατικό-συμβατικό)*	0.022	0.008	2.644	0.008	**
Ζεύγος οχημάτων: συμβατικό-AV *(Αναφ.: συμβατικό-συμβατικό)*	0.107	0.019	5.667	<0.001	***
Ζεύγος οχημάτων: AV-AV *(Αναφ.: συμβατικό-συμβατικό)*	0.098	0.023	4.267	<0.001	***
Σενάριο: 2 *(Αναφ.: 1)*	-0.592	0.017	-34.432	<0.001	***
Σενάριο: 3 *(Αναφ.: 1)*	0.114	0.017	6.709	<0.001	***
Σενάριο: 4 *(Αναφ.: 1)*	-0.321	0.017	-18.350	<0.001	***
Σενάριο: 5 *(Αναφ.: 1)*	0.222	0.017	13.184	<0.001	***
Σενάριο: 6 *(Αναφ.: 1)*	-0.777	0.018	-42.534	<0.001	***
Σενάριο: 7 *(Αναφ.: 1)*	-0.372	0.018	-20.679	<0.001	***
Σενάριο: 8 *(Αναφ.: 1)*	-1.745	0.019	-89.766	<0.001	***
Σενάριο: 9 *(Αναφ.: 1)*	-0.372	0.018	-20.393	<0.001	***
Σενάριο: 10 *(Αναφ.: 1)*	-1.043	0.020	-53.369	<0.001	***
Σενάριο: 11 *(Αναφ.: 1)*	-1.818	0.021	-85.199	<0.001	***
Σενάριο: 12 *(Αναφ.: 1)*	-1.184	0.021	-55.630	<0.001	***
Σενάριο: 13 *(Αναφ.: 1)*	-0.909	0.020	-45.913	<0.001	***
Σενάριο: 14 *(Αναφ.: 1)*	-0.961	0.020	-48.134	<0.001	***
Σενάριο: 15 *(Αναφ.: 1)*	-1.488	0.020	-76.235	<0.001	***

Μη γραμμική επίδραση παραμέτρων

RQ4

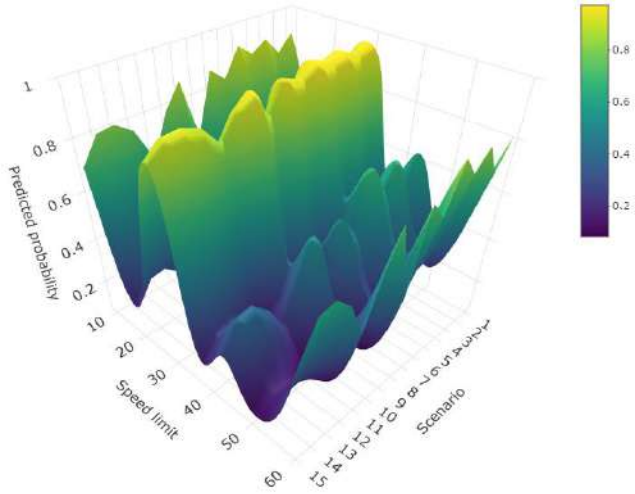
- Ο αυτοματισμός οδηγεί στη **μείωση πιθανότητας** εμφάνισης περιοχών υψηλού κινδύνου σε μικρού μήκους οδικά τμήματα, με υψηλότερα όρια ταχύτητας και μικρότερη κυκλοφοριακή ικανότητα.

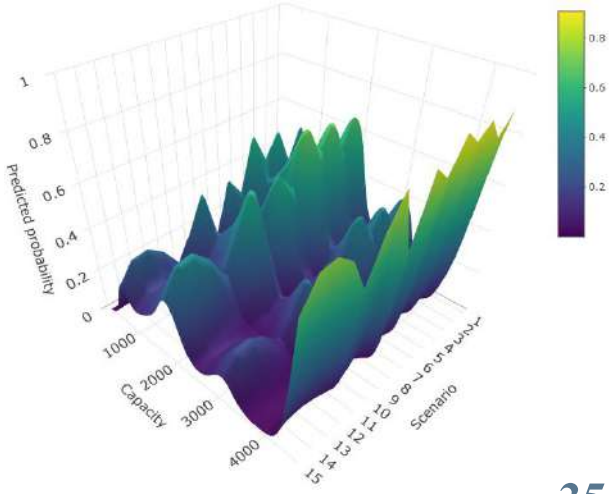
- Τα μεγάλου μήκους, με χαμηλές ταχύτητες και υψηλή ικανότητα τμήματα παρουσιάζουν σχετικά **σταθερή πιθανότητα** υψηλού κινδύνου για όλα τα σενάρια.



Smooth συντελεστές μοντέλου (Εξαρτημένη μεταβλητή: Εμφάνιση περιοχής υψηλού κινδύνου)

Smooth term	EDF	Ref.df	Chi.sq	p-value	Sig.
s(x, y)	196.25	199	131,089	<0.000	***
s(Μήκος οδικού τμήματος)	28.96	29	12,714	<0.000	***
s(Όριο ταχύτητας)	6.95	7	2,679	<0.001	***
s(Κυκλοφοριακή ικανότητα)	8.97	9	3,377	<0.001	***

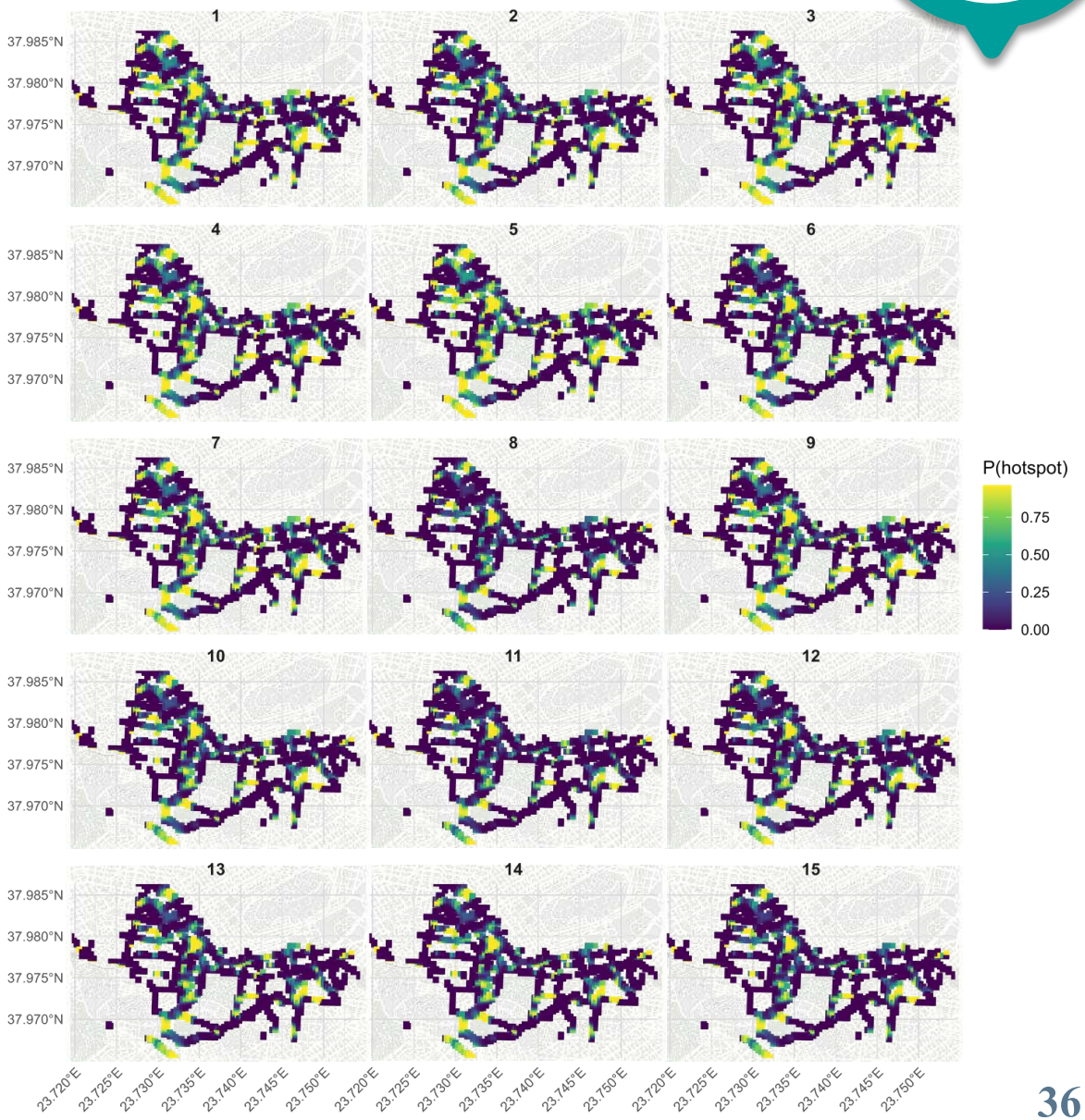




Χωρική απεικόνιση

RQ4

- Στα πρώιμα σενάρια αυτοματισμού παρατηρείται **εκτεταμένη εμφάνιση** περιοχών υψηλού κινδύνου, ενώ τα υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού οδηγούν σε σαφή μείωσή τους.
- Ωστόσο, περιοχές υψηλού κινδύνου εξακολουθούν να εμφανίζονται σε **διασταυρώσεις και σε οδικούς άξονες με υψηλή ζήτηση**, ακόμη και σε υψηλά επίπεδα αυτοματοποίησης.



Συμπεράσματα (1/2)

- Το επικυρωμένο πλαίσιο εκτίμησης κινδύνου δείχνει ότι η **προσομοίωση μπορεί να καλύψει** την έλλειψη δεδομένων ατυχημάτων για αυτόνομα οχήματα.
- Η επίδραση του αυτοματισμού είναι **μη γραμμική και εξαρτάται από** τις κυκλοφοριακές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του δικτύου και το επίπεδο αυτοματισμού.
- Οι κυκλοφοριακές συνθήκες παραμένουν ο **κυριότερος παράγοντας** διαμόρφωσης του κινδύνου, ακόμη και με αυξανόμενη αυτοματοποίηση.
- Παρά τη συνολική μείωση του κινδύνου, **επίμονες περιοχές υψηλού κινδύνου** παραμένουν σε διασταυρώσεις και οδικούς άξονες υψηλής ζήτησης.

Συμπεράσματα (2/2)

RQ5

Εξέλιξη του κινδύνου ατυχήματος στα στάδια αυτοματισμού:

Πρώιμη και μέτρια αυτοματοποίηση	Μεταβατικό στάδιο αυτοματοποίησης με μεικτή κυκλοφορία	Υψηλή αυτοματοποίηση
Αυξημένος κίνδυνος ατυχήματος με την αύξηση της διείσδυσης SAE επιπέδων 2-3.	Σταδιακή μείωση του κινδύνου ατυχήματος.	Σημαντική μείωση του κινδύνου ατυχήματος.
Μεγαλύτερη πιθανότητα περιοχών υψηλού κινδύνου σε εμπλοκές μεταξύ συμβατικών και αυτόνομων οχημάτων.	Μειωμένος κίνδυνος και συγκέντρωση εμπλοκών λόγω της διείσδυσης οχημάτων SAE 4-5, ενώ τα SAE 2-3 εξακολουθούν να σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο.	Σταθερά μειωμένος κίνδυνος από τα SAE 4-5, με ελάχιστη επίδραση από τα επιθετικά αυτόνομα οχήματα.
Χωρικά διάσπαρτες και εκτεταμένες περιοχές υψηλού κινδύνου.	Μείωση των περιοχών υψηλού κινδύνου, με επιμονή τους σε σημεία υψηλής ζήτησης του δικτύου.	Λιγότερες και ήπιες περιοχές υψηλού κινδύνου, περιορισμένες σε σύνθετες τοποθεσίες.
Σενάρια 2-5, 10-40% διείσδυση AV, SAE 0-3	**Σενάρια 6-10, 50-90% διείσδυση AV, Μεικτή κυκλοφορία SAE 0-1, 2-3, SAE 4-5 και επιθετικών AV**	**Σενάρια 11-15, 100% διείσδυση AV, Μεικτή κυκλοφορία SAE 2-3, 4-5 και επιθετικών AV**

Καινοτομίες

Η αυτοματοποίηση λειτουργεί ως σταθεροποιητής συστήματος

Βάση παραμέτρων μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των αυτόνομων οχημάτων

Μη γραμμική εξέλιξη του κινδύνου ατυχήματος

Νέο πλαίσιο μετατροπής εμπλοκών σε κίνδυνο ατυχήματος

Πολυεπίπεδη αξιολόγηση ασφάλειας με μηχανική μάθηση και χωρική ανάλυση

Μία μεταφέρσιμη μεθοδολογία αξιολόγηση της ασφάλειας

Πρακτικές εφαρμογές

- Η **βάση παραμέτρων μοντελοποίησης** των αυτόνομων οχημάτων επιτρέπει τυποποιημένη και τεκμηριωμένη παραμετροποίηση στις μελέτες μικροσκοπικής προσομοίωσης.

- Το προτεινόμενο πλαίσιο επιτρέπει την εκτίμηση του **πώς μεταβάλλεται ο κίνδυνος ατυχήματος** καθώς αυξάνεται η παρουσία αυτόνομων οχημάτων, βοηθώντας στη διαχείριση μελλοντικών συνθηκών κυκλοφορίας.

- Το πλαίσιο προσφέρει στις αρχές ένα **επικυρωμένο εργαλείο αξιολόγησης της ασφάλειας** σε συνθήκες υψηλής αυτοματοποίησης χωρίς διαθέσιμα δεδομένα ατυχημάτων.

- Στην αυτοματοποιημένη κυκλοφορία, ο σχεδιασμός υποδομών μπορεί να στοχεύσει κατά προτεραιότητα στα σημεία όπου η μεικτή κυκλοφορία **αυξάνει τον κίνδυνο**.

Περιορισμοί έρευνας

- Η συμπεριφορά των αυτόνομων οχημάτων προσομοιώθηκε με μοντέλα συμπεριφοράς τα οποία έχουν αναπτυχθεί για **συμβατικά οχήματα**.
- Οι διαθέσιμες παράμετροι συμπεριφοράς προέρχονται κυρίως από θεωρητικές παραδοχές, πειράματα μικρής κλίμακας και προηγούμενες προσομοιώσεις, με περιορισμένη τεκμηρίωση από **εφαρμογές πραγματικών συνθηκών**.
- Η ομαδοποίηση των επιπέδων αυτοματοποίησης (0-1, 2-3, 4-5) πραγματοποιήθηκε λόγω περιορισμένων δεδομένων και πιθανόν να αποκρύπτει **διαφορές στη συμπεριφορά** μεταξύ των επιπέδων.
- Η ανάλυση περιορίζεται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων, χωρίς να περιλαμβάνει **ευάλωτους χρήστες** του οδικού δικτύου.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Ενσωμάτωση παραμέτρων συμπεριφοράς **οριζόμενων από τους κατασκευαστές αυτόνομων οχημάτων**, με αξιολόγηση της επίδρασής τους μέσω αναλύσεων ευαισθησίας.
- Επικύρωση του πλαισίου με **δεδομένων ατυχημάτων** αυτόνομων οχημάτων, ειδικά για υψηλή διείσδυση SAE επιπέδων 4-5.
- Ενσωμάτωση περισσότερων κατηγοριών οχημάτων, τύπων **ευάλωτων χρηστών** και διαφορετικών **τύπων οδικών δικτύων**.
- Εμπλουτισμός της βαθμονόμησης του μοντέλου με δεδομένα αποτύπωσης **οδηγικής συμπεριφοράς** (π.χ. τηλεματική, παραβάσεις).
- Ανάπτυξη **χωροχρονικών μοντέλων** για την ανάλυση του κινδύνου ατυχήματος στον χώρο και στον χρόνο.

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Υποστήριξη Διδακτορικής Διατριβής

22 Ιανουαρίου 2026

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

Μαρία Γ. Οικονόμου

Τριμελής Επιτροπή:

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