

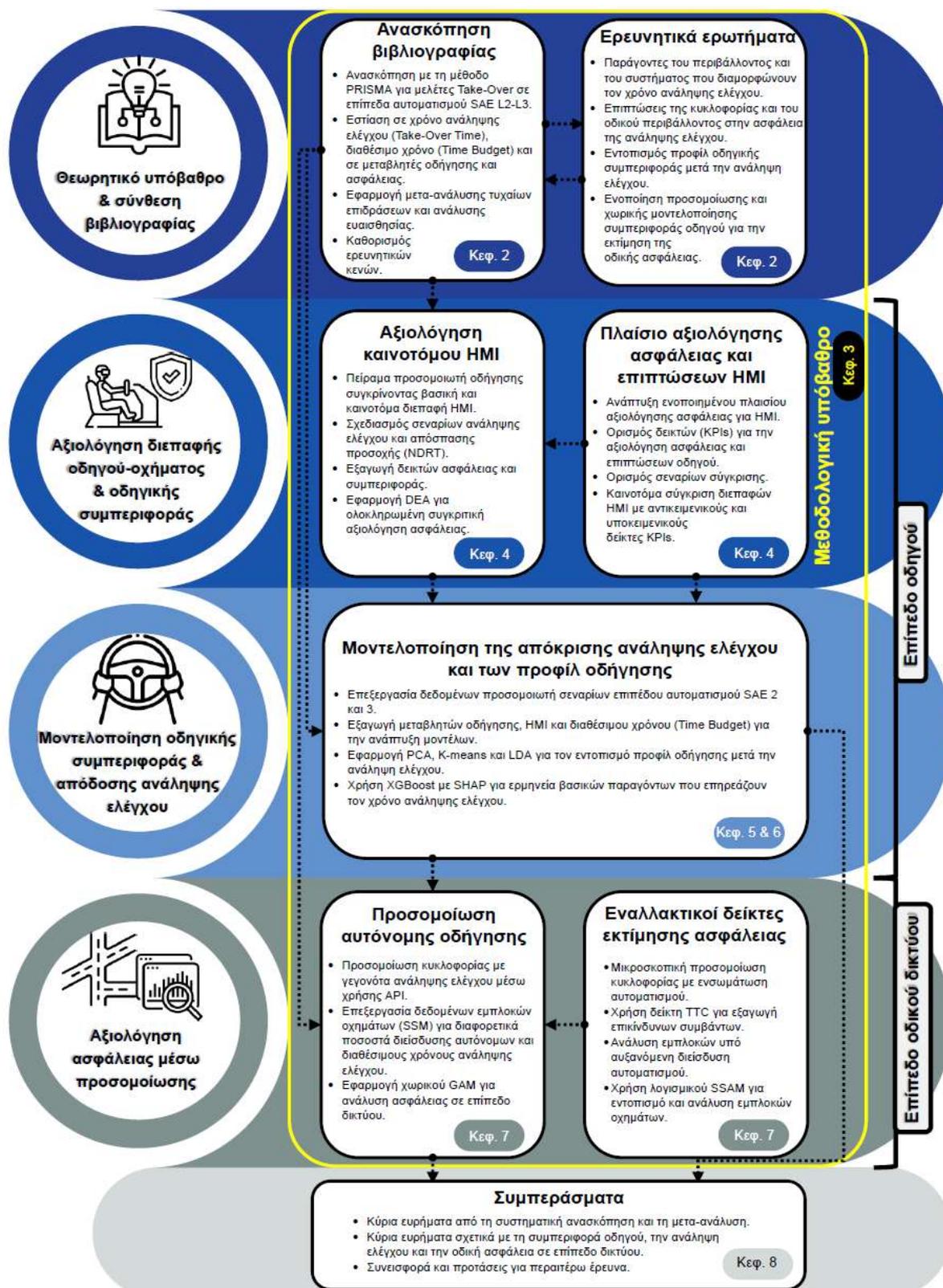
# Αξιολόγηση Ασφάλειας και Μοντελοποίηση της Συμπεριφοράς Ανάληψης Ελέγχου στην Αυτοματοποιημένη Οδήγηση: Από την Ανθρώπινη Αντίδραση στην Προσομοίωση Δικτύου

Μάριος Σεκαδάκης

## Εκτεταμένη Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα στην **υπό συνθήκη αυτοματοποίηση** (conditional automation) αφορά στη διασφάλιση ότι ο οδηγός μπορεί να επανακτήσει τον έλεγχο με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα κατά τη διάρκεια ενός **αιτήματος ανάληψης ελέγχου** (Take-Over Request, TOR). Η μετάβαση από την αυτοματοποιημένη στη χειροκίνητη οδήγηση αποτελεί μία πολυσταδιακή διαδικασία η οποία εξαρτάται από την αλληλεπίδραση ανάμεσα στον οδηγό, τη διεπαφή (Human-Machine Interface, HMI), τη δυναμική κατάσταση του οχήματος (vehicle-state dynamics) και το εκάστοτε περιβάλλον κυκλοφορίας. Στα επίπεδα αυτοματισμού SAE 2 ή SAE 3, συχνά παρατηρείται ανεπαρκής έλεγχος του οδηγικού περιβάλλοντος από τον οδηγό και μη ετοιμότητα για ανάληψη ελέγχου, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές διαφορές τόσο στον χρόνο ανάληψης ελέγχου όσο και στη σταθερότητα του ελιγμού που ακολουθεί μετά από ένα αίτημα ανάληψης ελέγχου από το αυτόνομο όχημα. **Στόχος της διατριβής** είναι να εξηγήσει με ποιον τρόπο η αντίδραση κατά την ανάληψη ελέγχου διαμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά της ανάληψης ελέγχου, την κατάσταση του οδηγού, τα χαρακτηριστικά της διεπαφής (Human-Machine Interface, HMI) και τη δυναμική κατάσταση του οχήματος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η διατριβή ενσωματώνει σύνθεση βιβλιογραφίας, πειράματα προσομοίωσης, μοντελοποίηση βασισμένη σε δεδομένα, ανάλυση προφίλ οδηγικής συμπεριφοράς και αξιολόγηση ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου μέσα σε ένα ενιαίο και συνεχές αναλυτικό πλαίσιο.

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει αναλυτικά τα βήματα του μεθοδολογικού πλαισίου της διατριβής, συνδέοντας τη **συστηματική ανασκόπηση, το πείραμα με τη χρήση προσομοιωτή οδήγησης, μοντελοποίηση και ανάλυση ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου**. Η διαδικασία ξεκινά με τη μετα-ανάλυση συνθέτοντας μελέτες για την επίδοση ανάληψης ελέγχου στα επίπεδα αυτοματισμού SAE 2 και SAE 3, όπου εντοπίζονται οι κρίσιμες μεταβλητές και τα κενά της βιβλιογραφίας. Ακολουθεί πειραματικό περιβάλλον προσομοίωσης που συγκρίνει μια βασική διεπαφή με την προηγμένη HADRIAN HMI με βάση δεδομένα που προέρχονται από προσομοιωτή οδήγησης, κίνησης οφθαλμών (eye-tracking) και δείκτες ασφάλειας (KPIs). Στη συνέχεια εφαρμόζεται μοντελοποίηση με XGBoost και SHAP για την ποσοτικοποίηση των παραγόντων που διαμορφώνουν τη διάρκεια ανάληψης ελέγχου, ενώ οι τεχνικές Principal Component Analysis (PCA), k-means και Linear Discriminant Analysis (LDA) αποκαλύπτουν προφίλ συμπεριφοράς οδηγού. Το πλαίσιο ολοκληρώνεται με την ενσωμάτωση των ευρημάτων σε βαθμονομημένη μικροσκοπική προσομοίωση αυτοκινητόδρομου και χωρική ανάλυση ασφάλειας με εναλλακτικούς δείκτες ασφάλειας (surrogate safety).



**Εικόνα 1:** Γραφική αναπαράσταση του γενικού μεθοδολογικού πλαισίου της διδακτορικής διατριβής

Η διατριβή οργανώνεται γύρω από **πέντε ερευνητικά ερωτήματα** που προκύπτουν από τα κενά της υφιστάμενης βιβλιογραφίας και καθοδηγούν τη μετάβαση από τη θεωρητική σύνθεση στην πειραματική αξιολόγηση, και από εκεί στη μοντελοποίηση και την εκτίμηση ασφάλειας σε επίπεδο οδικού δικτύου. Το πρώτο ερώτημα εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο το επίπεδο αυτοματισμού, ο τύπος οδού και οι κυκλοφοριακές συνθήκες επηρεάζουν τον χρόνο που απαιτείται για την ανάληψη

ελέγχου. Το δεύτερο ερώτημα επικεντρώνεται στον ρόλο του διαθέσιμου χρονικού παραθύρου Time Budget και τις συνθήκες κυκλοφορίας στη διαμόρφωση κρίσιμων αλληλεπιδράσεων κατά τη φάση της ανάληψης ελέγχου take-over. Το τρίτο διερευνά εάν η μοντελοποίηση των προφίλ συμπεριφοράς μπορεί να αποτυπώσει τη μεταβλητότητα μεταξύ των οδηγών και να εξηγήσει τους μηχανισμούς της συμπεριφοράς και την αντίδραση τους μετά από ένα αίτημα ανάληψης ελέγχου του αυτονόμου οχήματος. Το τέταρτο ερώτημα αναλύει πώς η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και οχήματος επηρεάζει την κατάσταση του οδηγού, την ποιότητα της μετάβασης και την υποκειμενική εμπειρία της αυτοματοποιημένης οδήγησης. Το πέμπτο ενώνει τα προηγούμενα επίπεδα διερευνώντας πώς η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς, η μικροσκοπική προσομοίωση και η χωρική ανάλυση ασφάλειας μπορούν να συνδυαστούν σε ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο για την αξιολόγηση της ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου. Παρακάτω παρουσιάζεται και η λίστα των ερευνητικών ερωτημάτων (EE) που εξετάζονται στη διατριβή.

**EE1.** Πώς το επίπεδο αυτοματισμού, ο τύπος οδού και ο κυκλοφοριακός φόρτος, επηρεάζουν τον χρόνο που απαιτείται για να ανακτήσει ο οδηγός τον έλεγχο μετά την απενεργοποίηση του αυτοματισμού και την απόδοση ανάληψης ελέγχου;

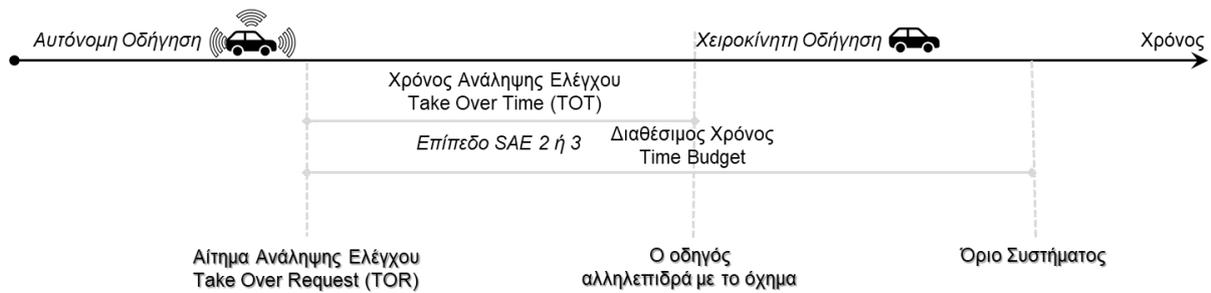
**EE2.** Πώς ο διαθέσιμος χρόνος αντίδρασης (time budget), η διείσδυση αυτοματοποιημένης κυκλοφορίας, τα χαρακτηριστικά του οδικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με την αλληλεπίδραση μεταξύ οχημάτων, επηρεάζουν τις κρίσιμες για την ασφάλεια αλληλεπιδράσεις κατά τις φάσεις ανάληψης ελέγχου και διαμορφώνουν τη διάδοση του ρίσκου στην κυκλοφορία;

**EE3.** Πώς η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπου και οχήματος επηρεάζει τη συμπεριφορά ανάληψης ελέγχου, την κατάσταση του οδηγού και την υποκειμενική αντίληψη του οδηγού κατά την ανάληψη ελέγχου στην αυτοματοποιημένη οδήγηση;

**EE4.** Πώς η εξαρτώμενη από δεδομένα μοντελοποίηση των προφίλ συμπεριφοράς μπορεί να αποτυπώσει τη μεταβλητότητα μεταξύ οδηγών στην απόδοση ανάληψης ελέγχου και να περιγράψει τους μηχανισμούς που επηρεάζουν τη συμπεριφορά οδήγησης μετά το αίτημα ανάληψης;

**EE5.** Πώς μπορούν η μοντελοποίηση συμπεριφοράς, η ανάλυση της επίδοσης και της απόκρισης ανάληψης ελέγχου να συνδυαστούν με τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις και να ενσωματωθούν σε μία ευρύτερη κυκλοφοριακή προσομοίωση, και πώς η χωρική ανάλυση ασφάλειας μπορεί να υποστηρίξει την ένταξή τους σε ένα ενοποιημένο πολυεπίπεδο πλαίσιο για την αξιολόγηση της ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου κατά την ανάληψη ελέγχου του οχήματος;

Η Εικόνα 2 παρουσιάζει τη διαδοχή των **επιμέρους σταδίων της διαδικασίας ανάληψης ελέγχου** (take-over), η οποία περιλαμβάνει την αρχική αντίληψη (perception), τη γνωστική επεξεργασία (cognitive processing), τη λήψη απόφασης (decision-making), την κινητική προετοιμασία (motor preparation) και την τελική παρέμβαση (physical intervention). Το χρονικό παράθυρο αυτής της διαδικασίας καθορίζεται από τον διαθέσιμο Χρόνο Περιθωρίου (Time Budget), ενώ η αποτυχία του οδηγού να αναλάβει τον έλεγχο έγκαιρα μπορεί να οδηγήσει σε κρίσιμες επιπτώσεις για την οδική ασφάλεια.



**Εικόνα 2:** Διαδικασία ανάληψης ελέγχου (take-over) από την αυτοματοποιημένη οδήγηση (AD) στη χειροκίνητη και κρίσιμα χρονικά σημεία.

Το πρώτο μεθοδολογικό στάδιο ενοποιεί τα διαθέσιμα ευρήματα σχετικά με την ανάληψη ελέγχου σε επίπεδα αυτοματισμού SAE 2 και SAE 3 μέσω **συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης** χρησιμοποιώντας το PRISMA και **μετα-ανάλυσης** με χρήση μετα-παλινδρόμησης τυχαίων επιδράσεων (random effects meta-regression). Η ανάλυση αυτή δείχνει ότι το χρονικό παράθυρο Time Budget, το βαθμό επικινδυνότητας του σεναρίου, η ετοιμότητα του οδηγού, οι κυκλοφοριακές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά της οδού, τα δημογραφικά χαρακτηριστικά του οδηγού και ο σχεδιασμός της διεπαφής (Human-Machine Interface, HMI) εισάγουν συστηματικές μεταβολές στον χρόνο ανάληψης ελέγχου. Το μοντέλο μετα-παλινδρόμησης και η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) ποσοτικοποιεί τη συνεισφορά κάθε παράγοντα και αναδεικνύει τις συνθήκες που παρατείνουν ή επιταχύνουν τη ανάληψη ελέγχου. Παράλληλα, αποκαλύπτει σημαντικές ελλείψεις στα ευρήματα της βιβλιογραφίας, των αναλύσεων συμπεριφοράς και των ορισμών βασικών εννοιών, περιορίζοντας έτσι τη σύγκριση των μελετών και υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ενοποιημένα πρωτόκολλα, κοινά σύνολα δεικτών και ελεγχόμενες συνθήκες. Για την ποσοτικοποίηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη μέση διάρκεια ανάληψης ελέγχου παρουσιάζεται στη συνέχεια το **μοντέλο μετα-παλινδρόμησης**, στο οποίο περιλαμβάνονται ο κυκλοφοριακός φόρτος (Traffic Volume), ο μέσος όρος ηλικίας (Mean Age), η άνιση κατανομή φύλου (Unequal Gender Distribution), η κατάσταση εγρήγορσης του οδηγού (Driver Alert), το διαθέσιμο χρονικό περιθώριο (Time Budget), ο αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση (Lanes Per Direction), τον βαθμό επικινδυνότητας του σεναρίου (Takeover Urgency), το επίπεδο αυτοματισμού (Automated Driving Level 3), καθώς και ο τύπος διεπαφής Head Up Display (HMI Type HUD) και ο τύπος διεπαφής οθόνης αφής (HMI Type Touchscreen):

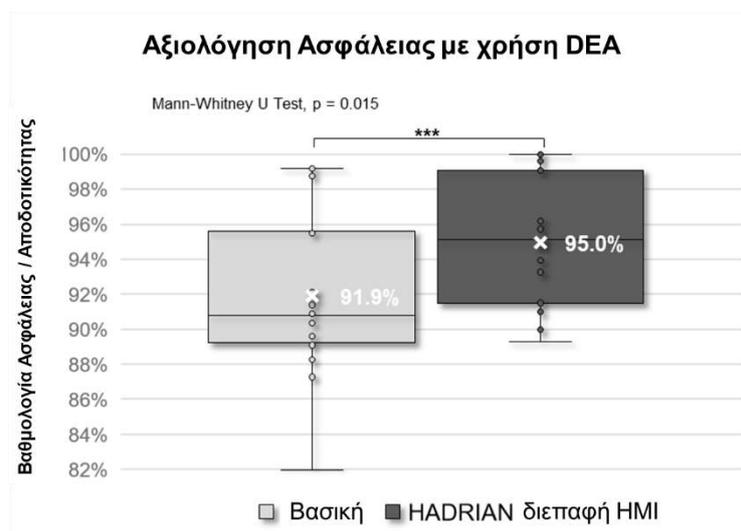
$$\begin{aligned}
 \text{Mean } TOT_{ij} = & 3.080 - 0.684 \cdot \text{Traffic Volume}_i \\
 & + 0.034 \cdot \text{Mean Age}_i + 0.900 \cdot \text{Unequal Gender Distribution}_i \\
 & - 4.081 \cdot \text{Driver Alert}_i + 0.111 \cdot \text{Time Budget}_i \\
 & + 0.898 \cdot \text{Lanes Per Direction}_i \\
 & + 2.318 \cdot \text{Takeover Urgency (Yes)}_i \\
 & + 0.307 \cdot \text{Automated Driving Level (Level 3)}_i \\
 & - 0.934 \cdot \text{HMI Type (HUD)}_i \\
 & - 0.111 \cdot \text{HMI Type (Touchscreen interface)}_i + u_i + e_{ij}
 \end{aligned}$$

Το **πείραμα προσομοίωτη** που εκτελέστηκε αξιολογεί πώς μια βασική διεπαφή συγκρίνεται με την **πρωτότυπη διεπαφή** επονομαζόμενη ως HADRIAN HMI, η οποία έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει στον οδηγό σαφέστερη ενημέρωση για την κατάσταση συστήματος, πιο δομημένη επικοινωνία και πιο προσαρμοζόμενη ανατροφοδότηση στα επίπεδα αυτοματισμού SAE 2 και SAE 3. Η διαμόρφωση περιλαμβάνει οπτικά ερεθίσματα (visual cues), ηχητικά ερεθίσματα (auditory cues), απτικά ερεθίσματα (haptic cues), καταγραφή κίνησης οφθαλμών (eye tracking) ανίχνευση χεριών εκτός τιμονιού (hands-off-wheel detection) και διαδραστική καθοδήγηση, επιτρέποντας την αναλυτική αποτύπωση των αντιληπτικών (perceptual) και συμπεριφορικών (behavioural) παραμέτρων της ανάληψης ελέγχου. Η Εικόνα 3 παρουσιάζει το περιβάλλον προσομοίωσης και τα στοιχεία της διεπαφής που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.



Εικόνα 3: Στοιχεία της πρωτότυπης διεπαφής HMI και της διαμόρφωσης του προσομοιωτή.

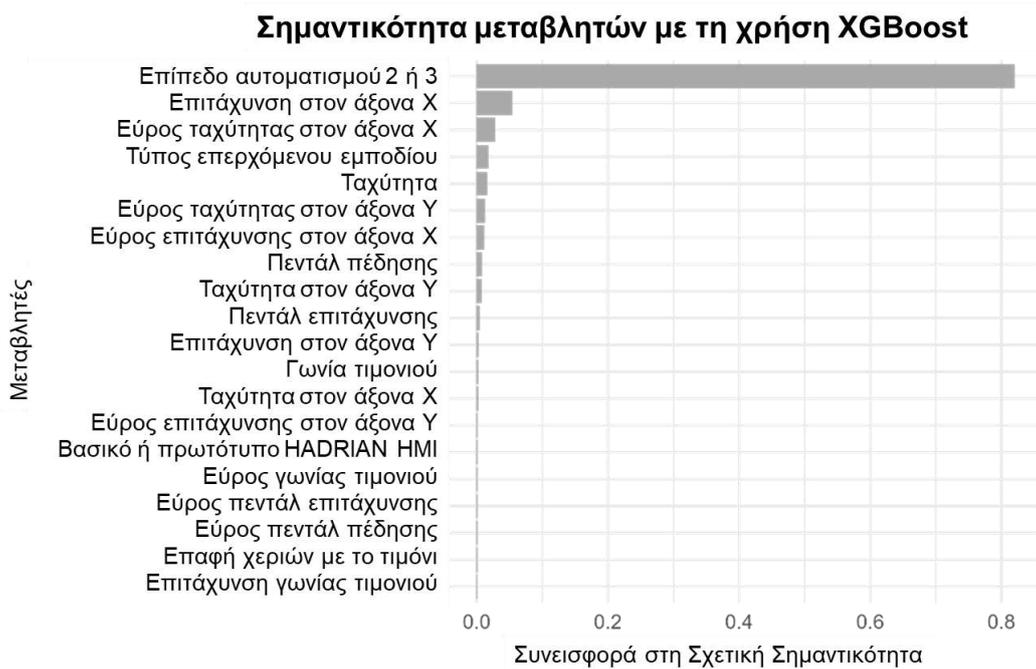
Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πρωτότυπη διεπαφή HADRIAN HMI **τροποποιεί ουσιαστικά το μοτίβο της ανάληψης ελέγχου**. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος επίγνωσης μειώνεται, η διάρκεια ανάληψης ελέγχου αυξάνεται με πιο στοχευμένο τρόπο, η απόσπαση προσοχής περιορίζεται και οι αλληλεπιδράσεις με αλλά οχήματα κινούνται σε πιο χαμηλές τιμές Time to Collision (TTC). Για την ποσοτικοποίηση αυτής της βελτίωσης, χρησιμοποιήθηκαν Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs) ασφάλειας και δείκτες υποκειμενικού ερωτηματολογίου δείχνοντας την επίδραση τους στον οδηγό. Τα KPIs συντίθενται μέσω Ανάλυσης Περιβάλλουσας Αποτελεσματικότητας (DEA), παράγοντας συγκρίσιμες βαθμολογίες ασφάλειας. Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα, δείχνοντας σαφή βελτίωση της ασφάλειας υπέρ της πρωτότυπης HADRIAN διεπαφής, παρότι η υποκειμενική εμπειρία παραμένει πιο διαφοροποιημένη.



Εικόνα 4: Βαθμολόγηση ασφάλειας μέσω DEA για τις διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

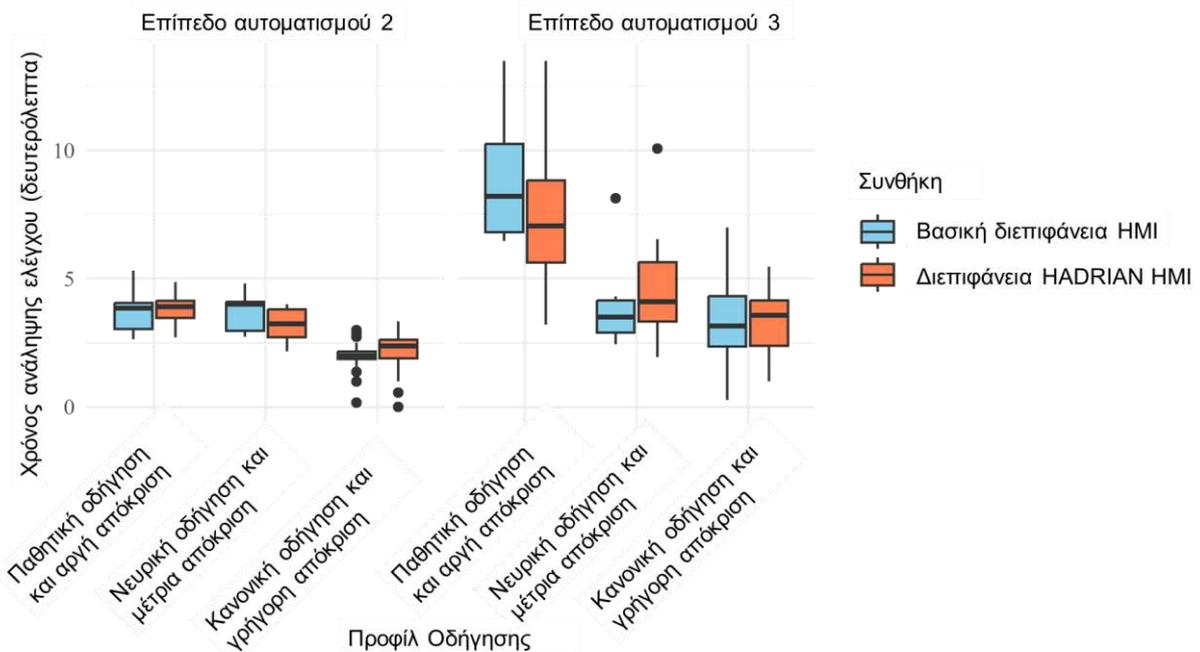
Το επόμενο στάδιο της διατριβής εξετάζει τη **μοντελοποίηση της απόκρισης κατά την ανάληψη ελέγχου** χρησιμοποιώντας τα δεδομένα υψηλής συχνότητας του πειράματος προσομοίωσης. Η ανάλυση και ο συνδυασμός XGBoost-SHAP ποσοτικοποιεί τον ρόλο του επιπέδου αυτοματισμού, των δυναμικών μετρήσεων οδήγησης, τον τύπο εμποδίου, του χρονικού παραθύρου Time Budget και του σχεδιασμού της διεπαφής HMI. Το επίπεδο αυτοματισμού 2 και 3 εμφανίζεται ως ο ισχυρότερος προσδιοριστής μεγαλύτερων και πιο μεταβλητών χρόνων ανάληψης, ενώ δείκτες όπως η

επιβράδυνση και η μεταβλητότητα ταχύτητας επηρεάζουν περαιτέρω την απόκριση. Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τη σημαντικότητα των χαρακτηριστικών που προέκυψαν.



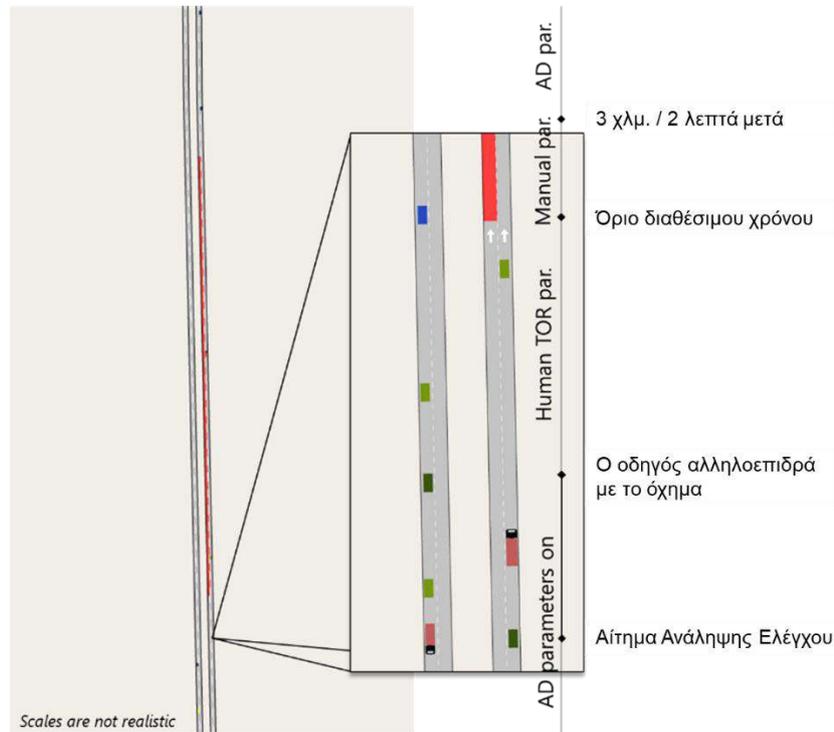
**Εικόνα 5:** Σημαντικότητα μεταβλητών (feature importance) από τον αλγόριθμο XGBoost για τη διάρκεια ανάληψης ελέγχου (Take-Over Time, TOT).

Η επόμενη ανάλυση προσδιορίζει τα προφίλ συμπεριφοράς του οδηγού που εμφανίζονται μετά το αίτημα για ανάληψη ελέγχου. Ο συνδυασμός PCA, k-means και LDA αποκαλύπτει **τρία διακριτά προφίλ οδηγών: παθητικό-αργό, νευρικό-μέτριο και κανονικό-γρήγορο**. Τα προφίλ αυτά αντικατοπτρίζουν διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου και διαφορετικούς βαθμούς σταθεροποίησης του οχήματος. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει τη σχετική κατανομή της διάρκειας ανάληψης ελέγχου (Take-Over Time, TOT) ανά προφίλ και επίπεδο αυτοματισμού.



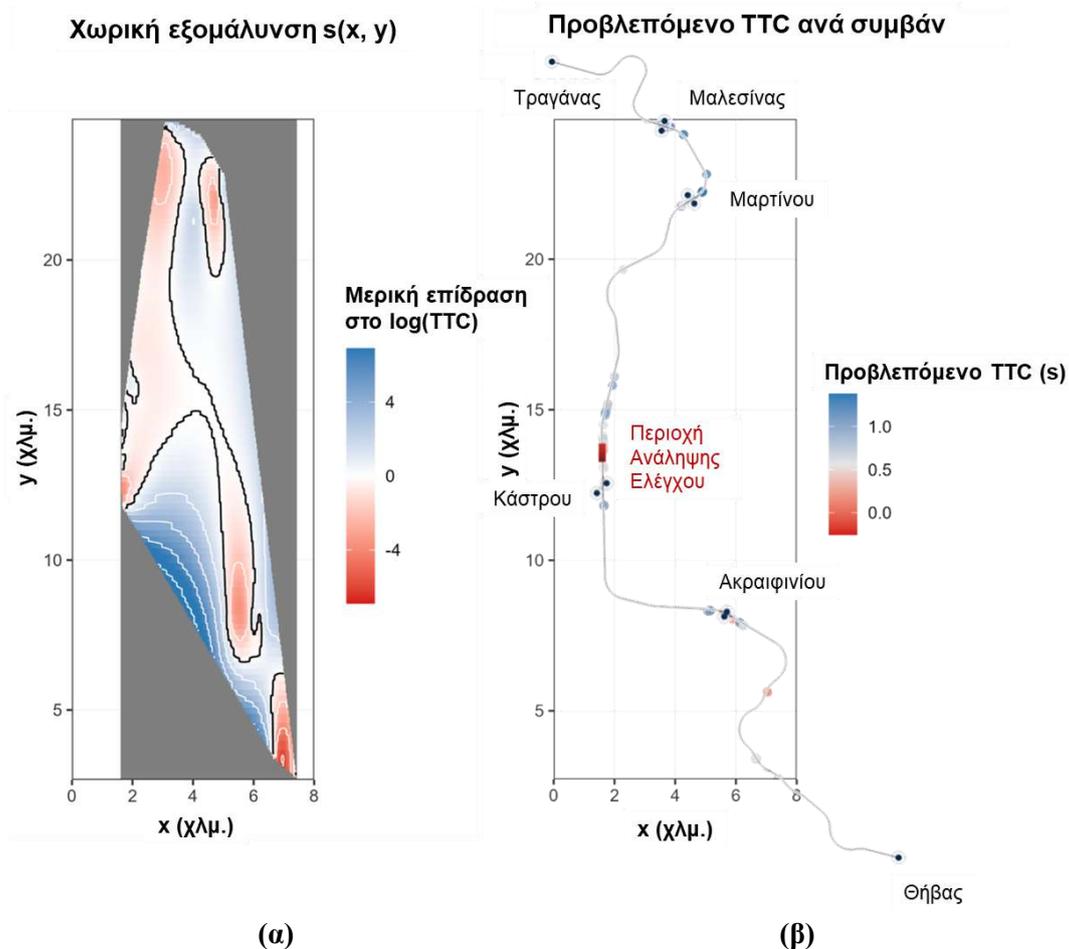
**Εικόνα 6:** Διάγραμμα boxplot του χρόνου ανάληψης ελέγχου (TOT) ανά προφίλ οδήγησης.

Στο επόμενο στάδιο, οι παράμετροι συμπεριφοράς ενσωματώνονται σε ένα **βαθμονομημένο μοντέλο μικροσκοπικής προσομοίωσης** ενός αυτοκινητόδρομου 50 χιλιομέτρων, ο οποίος αποτελεί τμήμα του άξονα Αθήνα-Θεσσαλονίκη. Η προσομοίωση αναπαράγει τα τρία προφίλ ανάληψης ελέγχου take-over μέσω προσαρμοσμένων API-σεναρίων, αλλαγών επιπέδου αυτοματισμού, χαρακτηριστικών προφίλ οδηγών και συνθηκών Time Budget. Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τη χρονική αλληλουχία ενεργοποίησης και επαναφοράς παραμέτρων κατά τα TOR events.



**Εικόνα 7:** Χρονική αλληλουχία ενεργοποίησης και επαναφοράς παραμέτρων κατά τη διάρκεια των γεγονότων TOR (Take-Over Request).

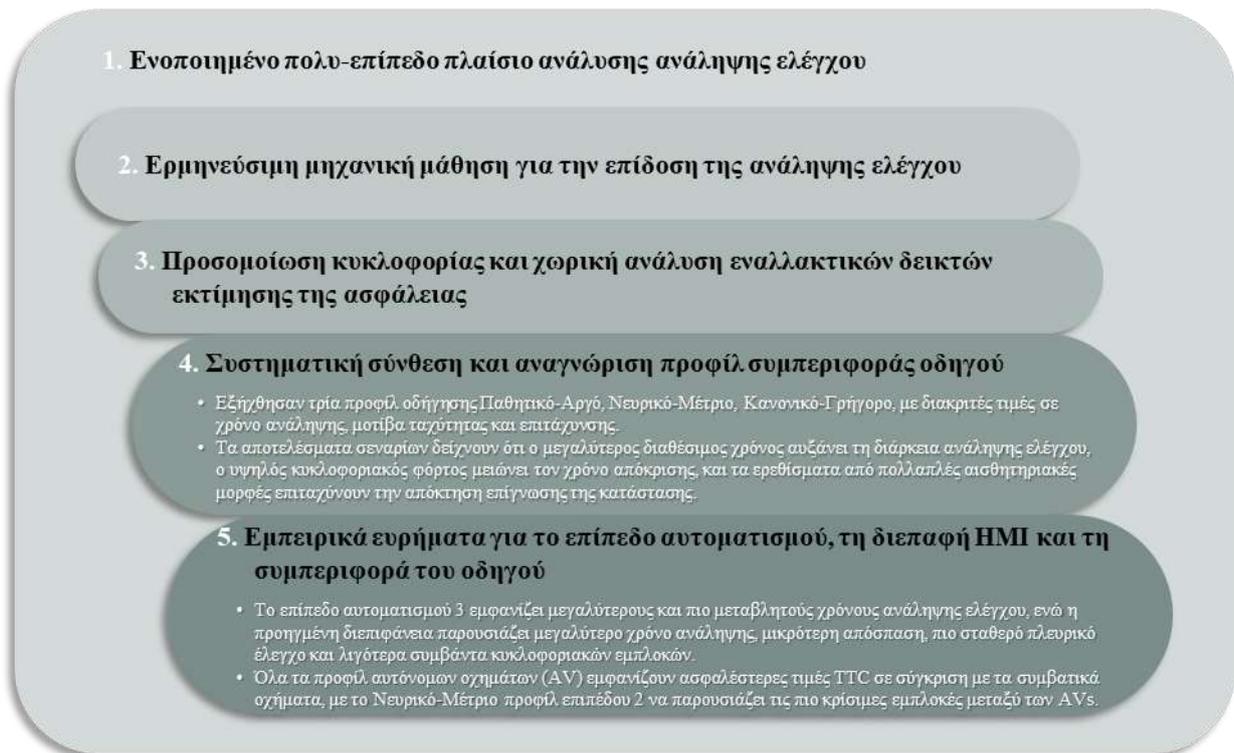
Δείκτες surrogate safety όπως ο **χρόνος μέχρι τη σύγκρουση (TTC)** εξάγονται για όλες τις αλληλεπιδράσεις σε διαφορετικά ποσοστά διείσδυσης αυτοματισμού (Market Penetration Rate, MPR) και διαφορετικές συνθήκες χρονικού παραθύρου Time Budget. Το χωρικό Γενικευμένο Προσθετικό Μοντέλο (Spatial Generalised Additive Model, sGAM) **ερμηνεύει αυτές τις αλληλεπιδράσεις κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου**, αποκαλύπτοντας ότι οι φάσεις take-over μειώνουν τα χρονικά περιθώρια ασφάλειας TTC. Τα σενάρια lane-closure και ODD-exit που προσομοιωθήκαν δημιουργούν ζώνες υψηλής επικινδυνότητας, ενώ οι περιοχές συγχώνευσης στον αυτοκινητόδρομο εντείνουν τα φαινόμενα αυτά. Η υψηλότερη διείσδυση αυτόνομων οχημάτων (MPR) αυξάνει τους μέσους χρόνους TTC αλλά δεν εξαλείφει τα τοπικά bottlenecks που προκύπτουν από τις αναλήψεις ελέγχου των αυτόνομων οχημάτων. Η Εικόνα 8 δείχνει τη χωρική επιφάνεια και τις προβλεπόμενες τιμές TTC κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου.



**Εικόνα 8:** (α) Χωρική εξομαλυσμένη επιφάνεια των μερικών επιδράσεων στο  $\log(\text{TTC})$  κατά μήκος της προσομοίωσης του αυτοκινητοδρόμου.  
 (β) Προβλεπόμενες τιμές TTC, με τους κύριους κόμβους και τη ζώνη ανάληψης ελέγχου (TOR zone) να επισημαίνονται με κόκκινο.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συμπεριφορά ανάληψης ελέγχου διαμορφώνεται από μια πολυεπίπεδη σύνθεση παραγόντων που σχετίζονται με τον οδηγό, τη διεπαφή, τη δυναμική του οχήματος και το οδικό περιβάλλον. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι μεταβάσεις από αυτοματοποιημένη σε χειροκίνητη οδήγηση παραμένουν η βασική πρόκληση για την ασφάλεια σε μικτή κυκλοφορία. Ακόμη και με υψηλότερη διεύθυνση αυτοματισμού, οι διαφοροποιήσεις στη διάρκεια ανάληψης ελέγχου, στο προφίλ συμπεριφοράς του οδηγού και στη γεωμετρική διαμόρφωση καθορίζουν τις περιοχές όπου τα χρονικά περιθώρια μειώνονται.

Το τελευταίο μέρος της διατριβής συνοψίζει τις πέντε καινοτόμες συνεισφορές που προέκυψαν από όλα τα στάδια της ανάλυσης, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 9.



**Εικόνα 9:** Καινοτόμα συνεισφορά της διατριβής.

Οι συνεισφορές αυτές διατρέχουν όλο το φάσμα της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή, από τη σύνθεση βιβλιογραφίας και την πειραματική αξιολόγηση έως τη μοντελοποίηση, την ομαδοποίηση συμπεριφορών και την χωρική εκτίμηση ασφάλειας, διαμορφώνοντας ένα συνεκτικό σύνολο καινοτομιών που αποσαφηνίζουν τους μηχανισμούς επαναπροσέγγισης, τον ρόλο της διεπαφής και την εξάπλωση των φαινομένων αυτών σε μικτή κυκλοφορία. Οι καινοτόμες συμβολές συνοψίζονται παρακάτω:

1. Ενιαίο πολυ-επίπεδο πλαίσιο για την ανάλυση της δυναμικής ανάληψης ελέγχου και της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-αυτοματισμού:  
Η διατριβή συνδέει σύνθεση βιβλιογραφίας, πείραμα προσομοίωσης, μοντελοποίηση βασισμένη σε δεδομένα και ανάλυση ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου σε ένα συνεχές ενιαίο πλαίσιο για τη μελέτη των μεταβάσεων ανάληψης ελέγχου σε γνωσιακό, συμπεριφορικό και συστημικό επίπεδο.
2. Πλαίσιο μοντελοποίησης βασισμένο σε δεδομένα και πλήρως ερμηνεύσιμο για την απόδοση ανάληψης ελέγχου:  
Μια μεθοδολογία που συνδυάζει XGBoost και SHAP ποσοτικοποιεί το πώς οι δυναμικές μεταβλητές οδήγησης, οι συνθήκες του σεναρίου, το διαθέσιμο χρονικό παράθυρο time budget και ο σχεδιασμός της διεπαφής διαμορφώνουν τη διάρκεια της ανάληψης ελέγχου, με διαφάνεια και αναπαραγωγιμότητα.
3. Δυναμικό πλαίσιο προσομοίωσης κυκλοφορίας και χωρικής ανάλυσης δεικτών surrogate safety για τους κινδύνους μετάβασης αυτοματισμού:  
Οι παράμετροι της συμπεριφοράς, οι συνθήκες time budget και τα επίπεδα αυτοματισμού ενσωματώνονται σε ένα βαθμονομημένο μοντέλο μικρο-προσομοίωσης, ενώ η χωρική ανάλυση μέσω GAM αποκαλύπτει πώς οι διαταραχές ανάληψης ελέγχου διαδίδονται στη μικτή κυκλοφορία.
4. Συστηματική σύνθεση και αναγνώριση προτύπων συμπεριφοράς μετά την ανάληψη ελέγχου:

Η διατριβή συνδυάζει την εμπειρική σύνθεση με τεχνικές ομαδοποίησης για την ανάδειξη τριών προφίλ συμπεριφοράς ανάληψης ελέγχου, τα οποία αποτυπώνουν δια-ατομικές διαφορές στη ρύθμιση ταχύτητας, στη σταθερότητα ελέγχου και στον χρόνο αντίδρασης.

5. Νέα εμπειρικά ευρήματα για το πώς το επίπεδο αυτοματισμού, ο σχεδιασμός της διεπαφής και η συμπεριφορική μεταβλητότητα διαμορφώνουν την ασφάλεια ανάληψης ελέγχου: Τα αποτελέσματα δείχνουν πώς το επίπεδο αυτοματισμού, η υποστήριξη της διεπαφής HMI και τα προφίλ συμπεριφοράς επηρεάζουν την ποιότητα της ανάληψης ελέγχου και τα χρονικά περιθώρια ασφάλειας, εξηγώντας πώς η συμπεριφορική μεταβλητότητα αλληλεπιδρά με το οδικό περιβάλλον και επηρεάζει την ασφάλεια σε επίπεδο δικτύου.

Συνολικά, η διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη και εμπειρικά θεμελιωμένη βάση για την κατανόηση της απόκρισης στην ανάληψη ελέγχου στα επίπεδα αυτοματισμού SAE 2 και SAE 3. Δείχνει πώς **η κατάσταση του οδηγού, η υποστήριξη της διεπαφής, η συμπεριφορική μεταβλητότητα και το οδικό περιβάλλον αλληλοεπιδρούν στη μετάβαση** και πώς αυτές οι αλληλεπιδράσεις επηρεάζουν **την ασφάλεια τόσο σε επίπεδο οχήματος όσο και σε επίπεδο κυκλοφοριακού δικτύου**. Το πλαίσιο και τα ευρήματα υποστηρίζουν τον σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης αναλήψεων ελέγχου και συστημάτων αυτοματοποιημένης οδήγησης που είναι ευαίσθητα στις αλλαγές επιπέδων αυτοματισμού, ενισχύοντας την πιο σταθερή, προβλέψιμη και ασφαλή επαναπροσέγγιση στην αυτοματοποιημένη κινητικότητα του μέλλοντος.