



Διδακτορική Διατριβή

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

Μάριος Σεκαδάκης
Υποψήφιος Διδάκτορας

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Γκιτσιάλιτης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ
Άγγελος Αμδίτης, Διευθυντής Έρευνας ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ

23 Ιανουαρίου 2026, Αθήνα



Κίνητρο και Πλαίσιο Διατριβής

- Η **αυτοματοποιημένη οδήγηση (AD)** εισάγεται σταδιακά στην κυκλοφορία με την προσδοκία βελτίωσης της οδικής ασφάλειας.
- Η ασφάλεια των οχημάτων βρίσκεται σε φάση θεμελιώδους μετάβασης, από την παθητική προστασία προς την **ενεργή πρόληψη συγκρούσεων** μέσω αισθητήρων, πρόβλεψης και αυτοματοποιημένου ελέγχου.
- Παρότι τα υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού, όπως το επίπεδο 4, παρουσιάζουν σημαντικά **οφέλη ασφάλειας** (88% λιγότεροι σοβαροί τραυματισμοί) τα υπό συνθήκη αυτοματοποιημένα συστήματα εξακολουθούν να χρειάζονται ανάληψη ελέγχου.



Επίπεδα Αυτοματισμού SAE

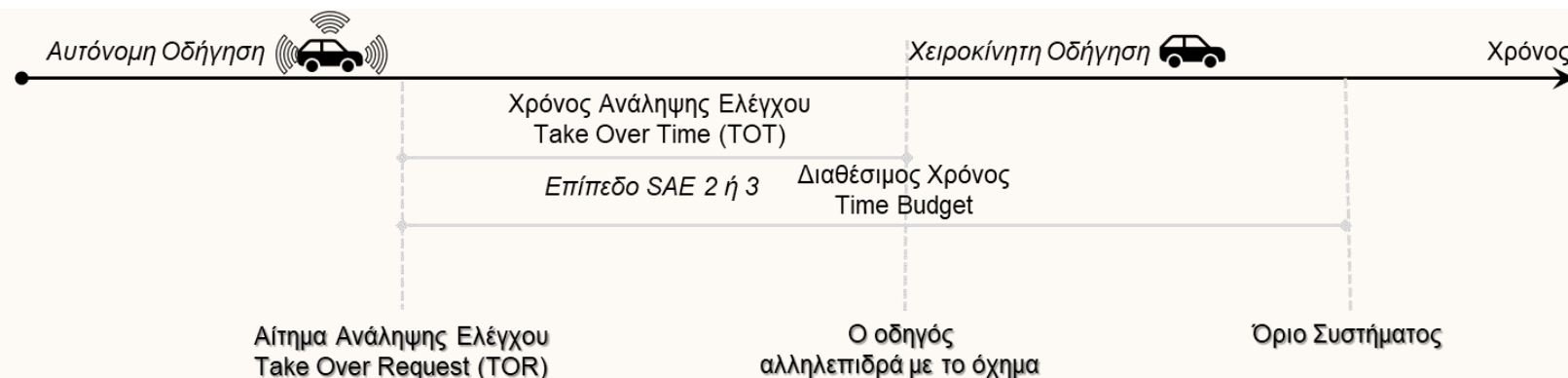
- Το **επίπεδο 5** αντιπροσωπεύει την πλήρη αυτοματοποίηση του οχήματος.
- Τα συστήματα επιπέδου 4 έχουν μέχρι σήμερα **περιορισμένη εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες**, κυρίως με τη μορφή ρομποταξί σε γεωγραφικά οριοθετημένες περιοχές στις Η.Π.Α. και στην Κίνα, και παραμένουν σε μεγάλο βαθμό πειραματικά.
- Στα **επίπεδα 2 και 3**, η αυτοματοποίηση αναλαμβάνει την οδήγηση υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά απαιτεί από τον οδηγό να επανακτήσει τον έλεγχο κατόπιν αιτήματος.
- Μία από τις βασικότερες προκλήσεις στα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3 είναι η διασφάλιση **ασφαλούς απόκρισης του οδηγού** κατά την ανάληψη ελέγχου.

Πίνακας: Επίπεδα Αυτοματοποίησης κατά SAE

Επίπεδο SAE	Ονομασία	Λειτουργικότητα	Ρόλος Οδηγού
0	Χωρίς αυτοματοποίηση	Καμία αυτοματοποιημένη λειτουργία, όλες οι ενέργειες εκτελούνται από τον οδηγό	Απαιτείται πλήρης προσοχή
1	Υποβοήθηση οδηγού	Έλεγχος από ένα μόνο σύστημα, όπως adaptive cruise control	Ο οδηγός πρέπει να παρακολουθεί και να κατευθύνει το τιμόνι
2	Μερική αυτοματοποίηση	Συνδυασμένος έλεγχος ταχύτητας και διατήρησης λωρίδας	Απαιτείται συνεχής επίβλεψη από τον οδηγό
3	Υπό συνθήκη αυτοματοποίηση	Πλήρης έλεγχος σε καθορισμένες συνθήκες, π.χ. οδήγηση σε αυτοκινητόδρομο	Ο οδηγός πρέπει να αναλάβει έλεγχο όταν ζητηθεί
4	Υψηλή αυτοματοποίηση	Πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία σε περιορισμένες περιοχές ή συνθήκες	Συνήθως δεν απαιτείται παρέμβαση οδηγού
5	Πλήρης αυτοματοποίηση	Πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία σε όλα τα περιβάλλοντα	Δεν απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση

Ανάληψη Ελέγχου του Αυτοματισμού

- Οι **αποτελεσματικές αναλήψεις ελέγχου** απαιτούν ταχεία αποκατάσταση της προσοχής, της επίγνωσης της κατάστασης και του ελέγχου του οχήματος.
- Ακόμη και μικρές καθυστερήσεις ή ασταθείς αποκρίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε **μείωση των περιθωρίων ασφάλειας**.
- Η διαδικασία ανάληψης ελέγχου εξελίσσεται διαδοχικά μέσω αντίληψης, γνωστικής επεξεργασίας, λήψης απόφασης, κινητικής ετοιμότητας και ενέργειας ελέγχου, με τον **Χρόνο Ανάληψης Ελέγχου (Take-Over Time, TOT)** να εκφράζει τη διάρκεια αυτής της ακολουθίας, η οποία πρέπει να ολοκληρωθεί εντός του **Διαθέσιμου Χρόνου (Time Budget)**.



Εικόνα: Διαδικασία ανάληψης ελέγχου και κρίσιμα χρονικά σημεία.

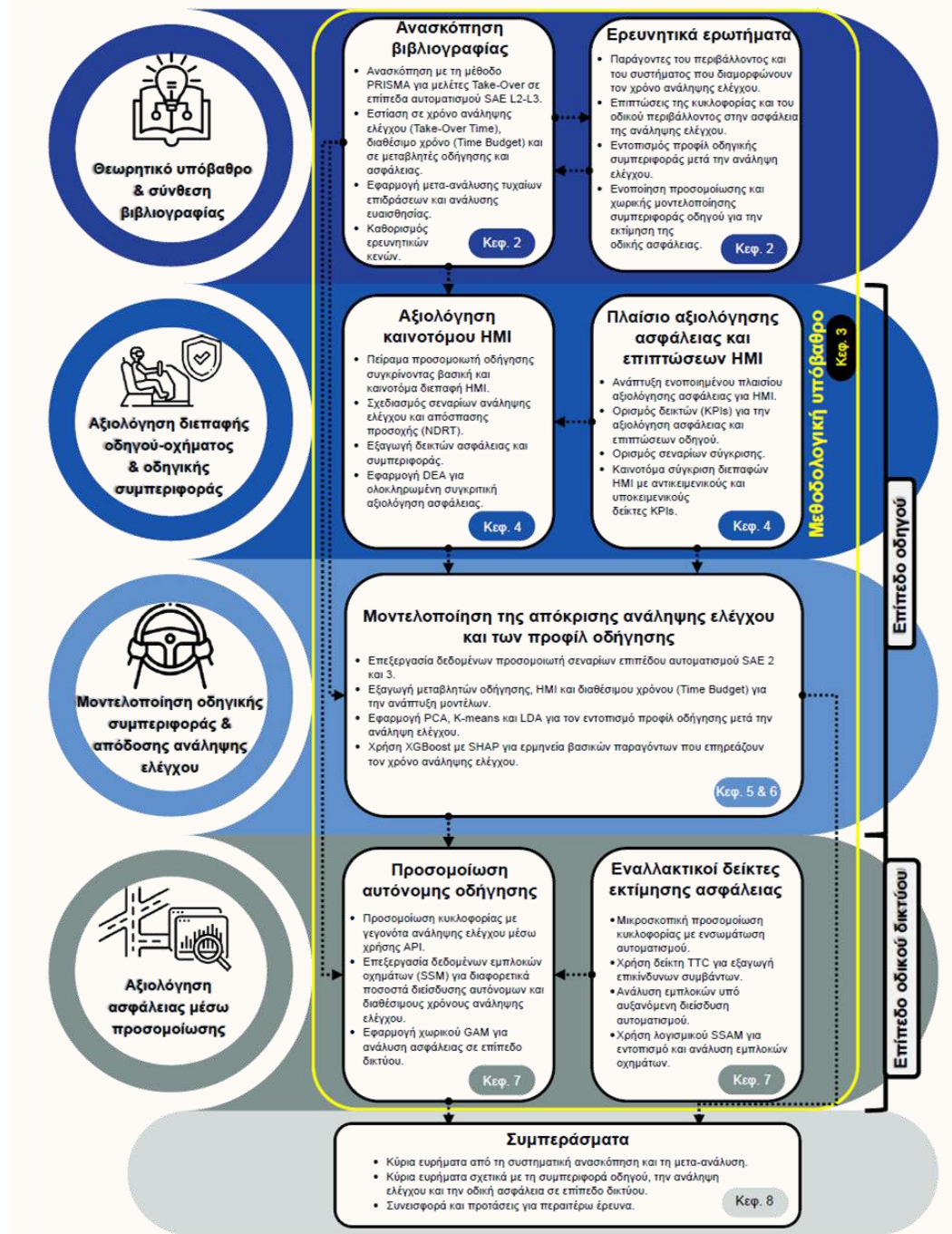
Ερευνητικά Ερωτήματα της Διατριβής

- ΕΕ1.** Πώς το **επίπεδο αυτοματισμού, το οδικό περιβάλλον και οι κυκλοφοριακές συνθήκες** επηρεάζουν τον χρόνο και την επίδοση ανάληψης ελέγχου;
- ΕΕ2.** Πώς ο **διαθέσιμος χρόνος (Time Budget) και η σύνθεση της κυκλοφορίας** επηρεάζουν τις κρίσιμες για την ασφάλεια εμπλοκές κατά τις φάσεις ανάληψης ελέγχου;
- ΕΕ3.** Πώς η **ομαδοποίηση της συμπεριφοράς οδήγησης** μπορεί να αποτυπώσει τη μεταβλητότητα μεταξύ των οδηγών στην ανάληψη ελέγχου και στη συμπεριφορά οδήγησης μετά την ανάληψη;
- ΕΕ4.** Πώς ο σχεδιασμός της **διεπαφής οδηγού-οχήματος** επηρεάζει τη συμπεριφορά ανάληψης ελέγχου και την κατάσταση του οδηγού;
- ΕΕ5.** Πώς η συμπεριφορά ανάληψης ελέγχου μπορεί να ενσωματωθεί σε **κυκλοφοριακή προσομοίωση** ώστε να αξιολογηθούν επιπτώσεις ασφάλειας σε επίπεδο δικτύου;

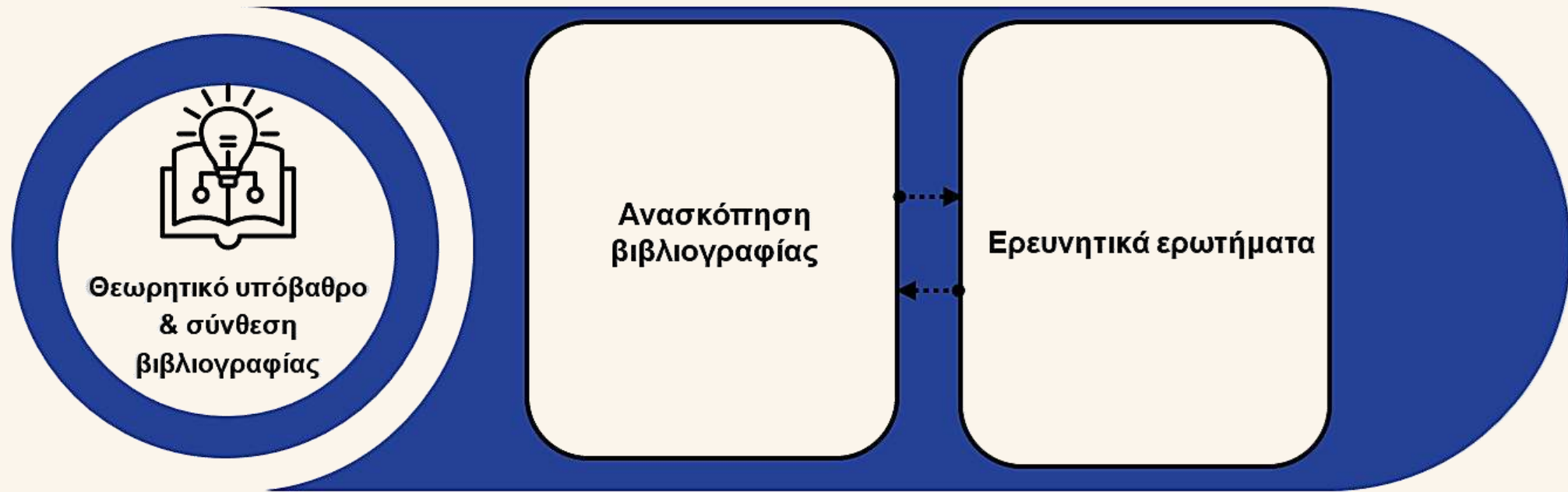


Μεθοδολογικό Πλαίσιο

- Το **θεωρητικό επίπεδο** θεμελιώνεται σε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και μετα-ανάλυση.
- Το **επίπεδο οδηγού** εστιάζει στην αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης οδηγού-οχήματος και της οδηγικής συμπεριφοράς μέσω πειράματος σε προσομοιωτή.
- Το **επίπεδο μοντελοποίησης της συμπεριφοράς οδήγησης** εφαρμόζει μεθόδους μηχανικής μάθησης για τη μοντελοποίηση της δυναμικής ανάληψης ελέγχου και την αναγνώριση προφίλ οδήγησης μετά την ανάληψη ελέγχου.
- Το **επίπεδο δικτύου** ενσωματώνει τα συμπεριφορικά ευρήματα σε βαθμονομημένη μικροσκοπική προσομοίωση κυκλοφορίας.

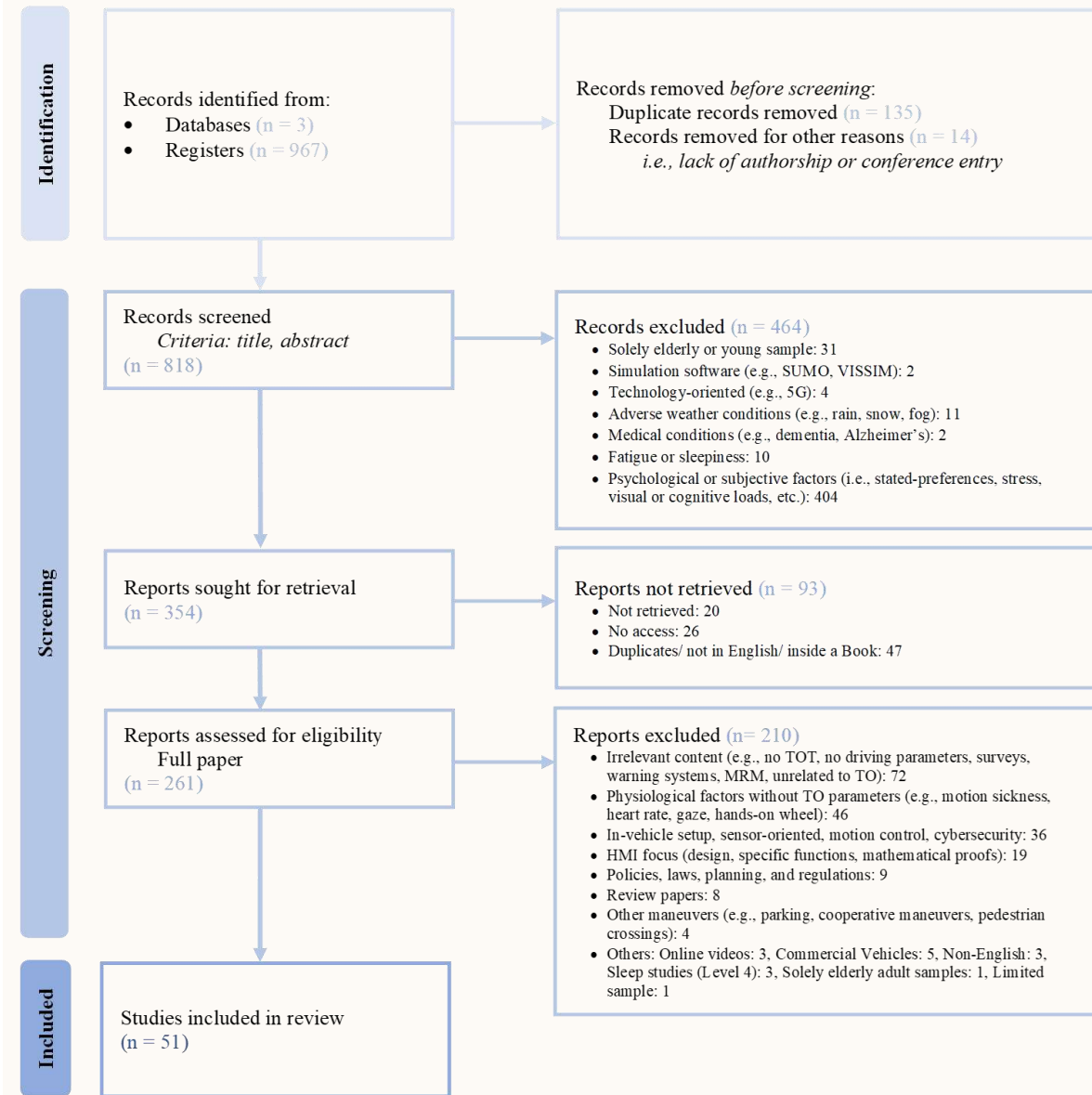


Θεωρητικό υπόβαθρο και σύνθεση βιβλιογραφίας



Συστηματική Ανασκόπηση και Μετα-ανάλυση

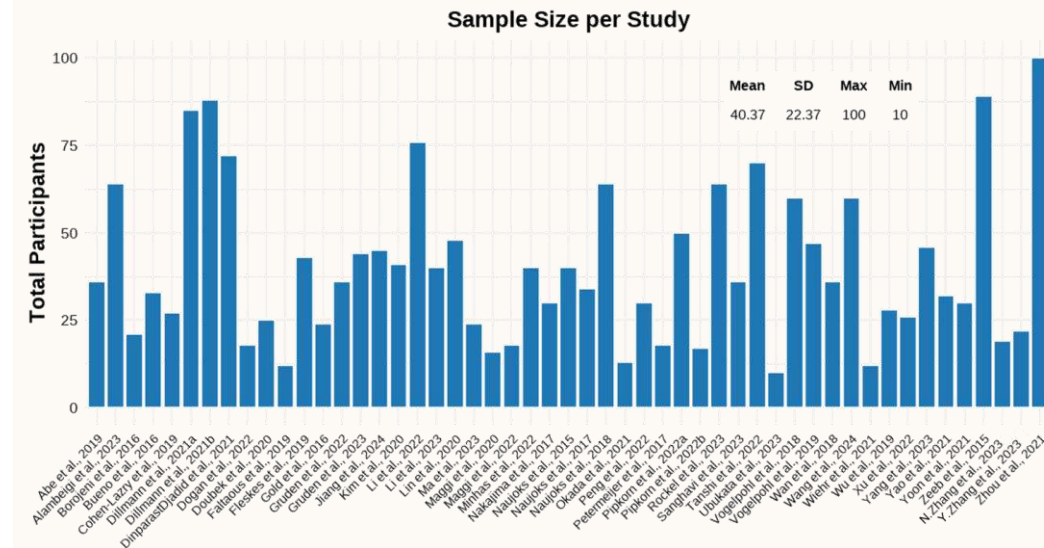
- Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολουθεί μια συστηματική προσέγγιση βασισμένη στο **PRISMA** και **συνδυάζεται με μετα-ανάλυση**.
- Οι αναζητήσεις πραγματοποιήθηκαν στις βάσεις Scopus, ScienceDirect και IEEE Xplore και κάλυψαν **εμπειρικές μελέτες μετά το 2015**.
- Η αρχική αναζήτηση απέδωσε συνολικά **967 έρευνες** από τις βάσεις δεδομένων.
- Μετά τη διαδικασία ελέγχου και αξιολόγησης καταλληλότητας, συμπεριλήφθηκαν τελικά **51 μελέτες**.
- Οι μελέτες επικεντρώνονται σε αιτήματα ανάληψης ελέγχου σε συστήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης στα **επίπεδα SAE 2 και 3**.



Εικόνα: PRISMA 2020 διάγραμμα ροής.

Εξαγωγή Δεδομένων και Χαρακτηριστικά Δείγματος

- Η εξαγωγή των μεταβλητών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις **κατευθυντήριες οδηγίες του PRISMA**, διασφαλίζοντας μια συστηματική και διαφανή διαδικασία σύνθεσης.
- Το **μέγεθος δείγματος** κάθε μελέτης καθόρισε το στατιστικό βάρος που της αποδόθηκε στη μετα-ανάλυση.
- Μελέτες με μεγαλύτερα δείγματα παρείχαν **ακριβέστερες και πιο αξιόπιστες** εκτιμήσεις και, ως εκ τούτου, συνέβαλαν περισσότερο στο σύνολο.

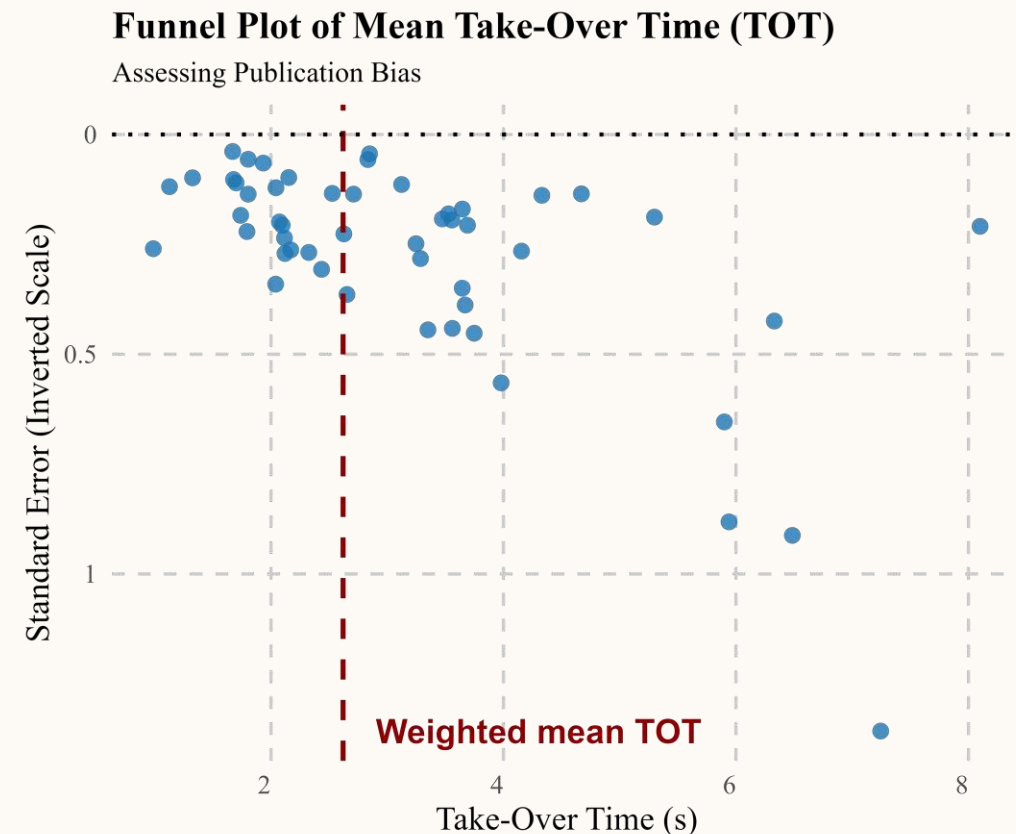


Ετερογένεια και Μετα-παλινδρόμηση

- Παρατηρήθηκε ιδιαίτερα υψηλή ετερογένεια μεταξύ των μελετών, με $I^2 = 98.33\%$ και στατιστικά σημαντικό έλεγχο Cochran's $Q = 3003.46$ ($p < .0001$), γεγονός που υποδηλώνει μεταβλητότητα πέραν του τυχαίου σφάλματος.
- Η ασυμμετρία του funnel plot αξιολογήθηκε με τον **έλεγχο του Egger** ($t = 3.44$, $df = 49$, $p = 0.001$) και επιβεβαιώθηκε μέσω οπτικής επιθεώρησης του διαγράμματος.
- Η παρατηρούμενη ασυμμετρία ερμηνεύθηκε σε συνάρτηση με τη **θετικά ασύμμετρη κατανομή** του χρόνου ανάληψης ελέγχου, ο οποίος περιορίζεται από ελάχιστη τιμή και παρουσιάζει μακριά δεξιά ουρά.

Πίνακας: Στατιστικά ετερογένειας και έλεγχος μεροληψίας δημοσίευσης.

I^2	98.33
Q	3,003.46 (p -value < 0.0001)
Egger's test	
Test for Funnel Plot Asymmetry:	$t = 3.44$, $df = 49$, $p = 0.001$
Limit Estimate (as $se_i \rightarrow 0$):	$b = 1.79$ (CI: 1.38, 2.20)
Model: weighted regression with multiplicative dispersion	
Predictor: standard error	



Μοντέλο Μετα-Παλινδρόμησης Τυχαίων Επιδράσεων

- Εφαρμόστηκε **μετα-παλινδρόμηση τυχαίων επιδράσεων** με χρήση disaggregated δεδομένων, με στόχο την ερμηνεία της μεταβλητότητας του χρόνου ανάληψης ελέγχου μεταξύ των μελετών.
- Πολλές από τις εξεταζόμενες μεταβλητές παρουσίασαν **στατιστικά σημαντικές επιδράσεις** στον χρόνο ανάληψης ελέγχου.
- Το μοντέλο εξήγησε **σημαντικό ποσοστό της ετερογένειας** μεταξύ των μελετών, υποδεικνύοντας ότι η μεταβλητότητα του χρόνου ανάληψης ελέγχου οφείλεται κυρίως σε συστηματικούς παράγοντες και όχι σε τυχαίο θόρυβο.

Πίνακας: Μοντέλο μετα-παλινδρόμησης τυχαίων επιδράσεων για τον μέσο χρόνο ανάληψης ελέγχου (TOT, s).

Μεταβλητές	Estimate	Standard error	z-value	p-value	
Σταθερός όρος	3.080	1.276	2.414	0.016	*
Κυκλοφοριακός φόρτος	-0.684	0.134	-5.089	<.0001	***
Μέση ηλικία	0.034	0.018	1.906	0.057	.
Άνιση κατανομή φύλου [αναφορά: Όχι]	0.900	0.437	2.058	0.040	*
Ειδοποίηση οδηγού [αναφορά: Όχι]	-4.080	0.873	-4.674	<.0001	***
Διαθέσιμος Χρόνος (Time Budget)	0.111	0.042	2.667	0.008	**
Αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση	0.898	0.203	4.418	<.0001	***
Επείγουσα ανάγκη ανάληψης ελέγχου (Ναι) [αναφορά: Όχι]	2.318	0.773	3.000	0.003	**
Επίπεδο αυτοματισμού οδήγησης (Επίπεδο 3) [αναφορά: Επίπεδο 2]	0.307	0.457	0.672	0.502	
Τύπος διεπαφής HMI (Head-Up Display) [αναφορά: κλασικός πίνακας οργάνων]	-0.934	0.283	-3.294	0.001	***
Τύπος διεπαφής HMI (οθόνη αφής) [αναφορά: κλασικός πίνακας οργάνων]	-0.111	0.564	-0.196	0.844	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

τ^2 (estimated amount of residual heterogeneity): 0.3614 (SE = 0.1148)

I^2 (residual heterogeneity / unaccounted variability): 96.91%

H^2 (unaccounted variability / sampling variability): 32.33

R^2 (amount of heterogeneity accounted for): 67.94%

Πίνακας: Ανάλυση ευαισθησίας του μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου (TOT).

Μεταβλητή	Μεταβολή	Ποσοστιαία μεταβολή του μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου	Προσαρμοσμένη τιμή μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου (s)
Κυκλοφοριακός φόρτος	Ελεύθερη Ροή → Χαμηλός Κυκλοφοριακός Φόρτος	-10.8%	2.62s→2.34s
Μέση ηλικία	↑+1 έτος	+0.5%	2.62s→2.63s
Άνιση κατανομή φύλου	Όχι (Ισο δείγμα) → Ναι (Άνισο δείγμα)	+14.3%	2.62s→2.99s
Ειδοποίηση οδηγού	Όχι (Χωρίς ειδοποίηση οδηγού) → Ναι (Με ειδοποίηση)	-64.7%	2.62s→0.93s
Διαθέσιμος Χρόνος (Time Budget)	↑+1 s	+1.8%	2.62s→2.67s
Αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση	↑+1 λωρίδα	+14.2%	2.62s→3.52s
Επείγουσα ανάγκη ανάληψης ελέγχου	Όχι (Επείγουσα ανάληψη ελέγχου) → Ναι (Επείγουσα ανάληψη ελέγχου)	+36.7%	2.62s→3.58s
Τύπος διεπαφής HMI (Head-Up Display)	Κλασικός πίνακας οργάνων → HUD HMI	-14.8%	2.62s→2.23s

- Η **παρουσία ειδοποίησης του οδηγού** παρουσίασε τη μεγαλύτερη επίδραση, μειώνοντας τον χρόνο ανάληψης ελέγχου κατά 64.7%, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο των αιτημάτων ανάληψης ελέγχου στην προετοιμασία του οδηγού για τη μετάβαση.
- Η **επείγουσα ανάγκη ανάληψης ελέγχου** αύξησε σημαντικά τον χρόνο ανάληψης ελέγχου κατά 36.7%, αντανακλώντας το αυξημένο γνωστικό φορτίο και την πολυπλοκότητα λήψης αποφάσεων σε σενάρια υψηλής κρισιμότητας.

Πίνακας: Ανάλυση ευαισθησίας του μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου (TOT).

Μεταβλητή	Μεταβολή	Ποσοστιαία μεταβολή του μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου	Προσαρμοσμένη τιμή μέσου χρόνου ανάληψης ελέγχου (s)
Κυκλοφοριακός φόρτος	Ελεύθερη Ροή → Χαμηλός Κυκλοφοριακός Φόρτος	-10.8%	2.62s→2.34s
Μέση ηλικία	↑+1 έτος	+0.5%	2.62s→2.63s
Άνιση κατανομή φύλου	Όχι (Ισο δείγμα) → Ναι (Άνισο δείγμα)	+14.3%	2.62s→2.99s
Ειδοποίηση οδηγού	Όχι (Χωρίς ειδοποίηση οδηγού) → Ναι (Με ειδοποίηση)	-64.7%	2.62s→0.93s
Διαθέσιμος Χρόνος (Time Budget)	↑+1 s	+1.8%	2.62s→2.67s
Αριθμός λωρίδων ανά κατεύθυνση	↑+1 λωρίδα	+14.2%	2.62s→3.52s
Επείγουσα ανάγκη ανάληψης ελέγχου	Όχι (Επείγουσα ανάληψη ελέγχου) → Ναι (Επείγουσα ανάληψη ελέγχου)	+36.7%	2.62s→3.58s
Τύπος διεπαφής HMI (Head-Up Display)	Κλασικός πίνακας οργάνων → HUD HMI	-14.8%	2.62s→2.23s

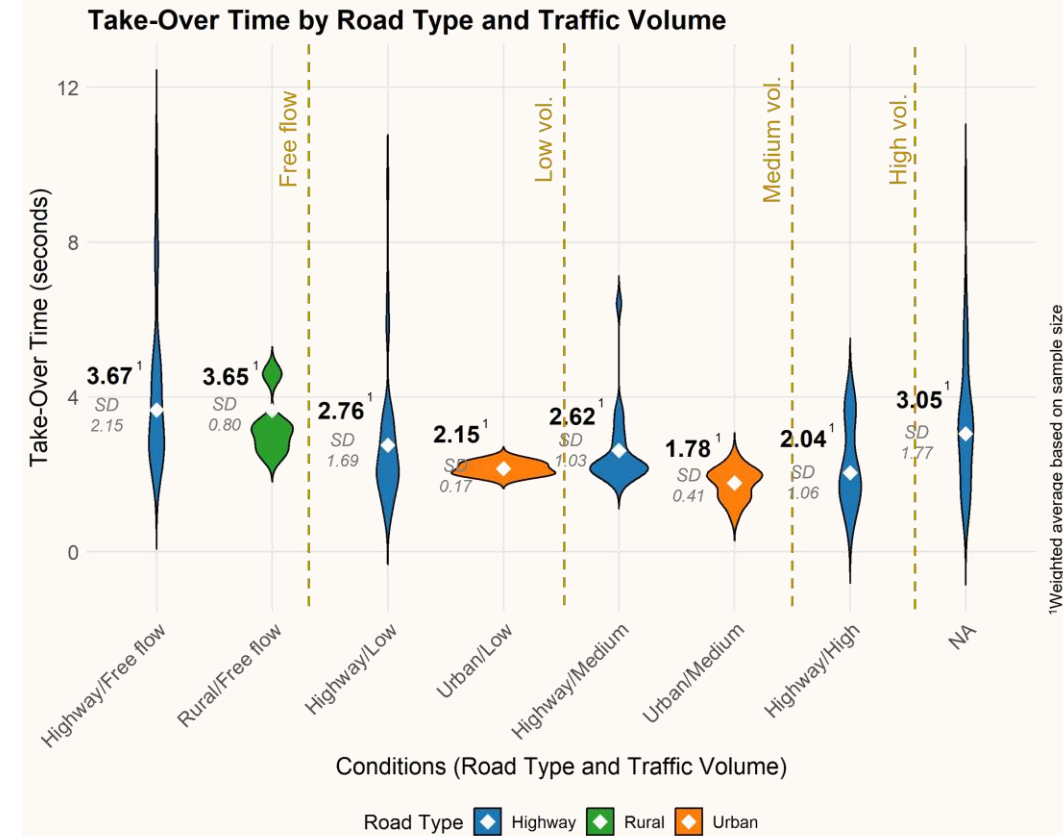
Ανάλυση Ευαισθησίας του TOT (2/2)

- Ο **διαθέσιμος χρόνος (Time Budget)** αύξησε τον TOT κατά 1.8% ανά επιπλέον δευτερόλεπτο, υποδεικνύοντας μειωμένη χρονική πίεση και καθυστερημένη παρέμβαση.
- Ο **χαμηλός κυκλοφοριακός φόρτος** συνδέεται με συντομότερες αντιδράσεις (-10.8%) σε σύγκριση με τις συνθήκες ελεύθερης ροής.
- Ο **σχεδιασμός της διεπαφής οδηγού-οχήματος (Human-Machine Interface, HMI)** και συγκεκριμένα οι οθόνες Head-Up Display μειώνουν τον TOT κατά 14.8% ενισχύοντας την άμεση πληροφόρηση κατά την ανάληψη ελέγχου.



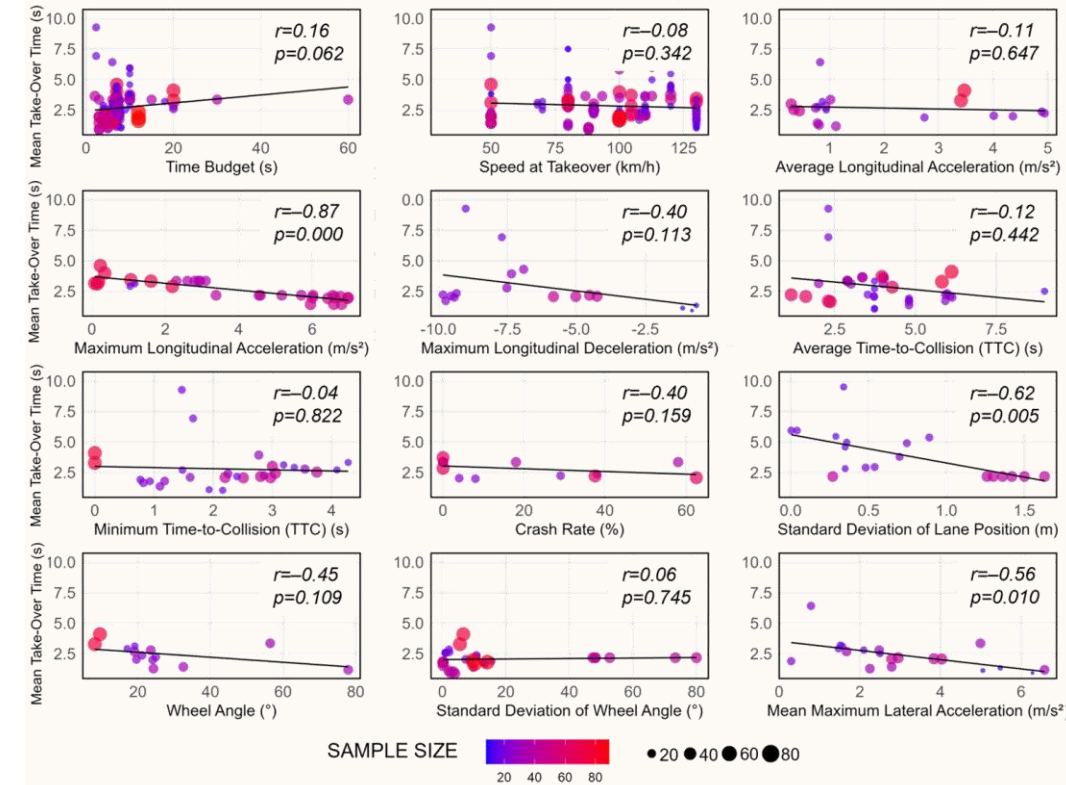
ΤΟΤ σε Διαφορετικούς Τύπους Οδών και Κυκλοφοριακούς Φόρτους

- Η ευαισθησία του ΤΟΤ είναι εμφανής μεταξύ διαφορετικών **τύπων οδών και επιπέδων κυκλοφορίας**, καλύπτοντας κενά της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.
- Τα **περιβάλλοντα αυτοκινητοδρόμου** εμφανίζουν υψηλότερες τιμές ΤΟΤ και μεγαλύτερη διακύμανση, κυρίως λόγω υψηλότερων ταχυτήτων και μειωμένης εμπλοκής του οδηγού, που καθυστερούν την ετοιμότητα ανάληψης.
- Ο **υψηλότερος κυκλοφοριακός φόρτος** συνδέεται με μικρότερο ΤΟΤ, αντανακλώντας ταχύτερες αντιδράσεις των οδηγών υπό αυξημένη πολυπλοκότητα και αίσθηση άμεσης απόκρισης.



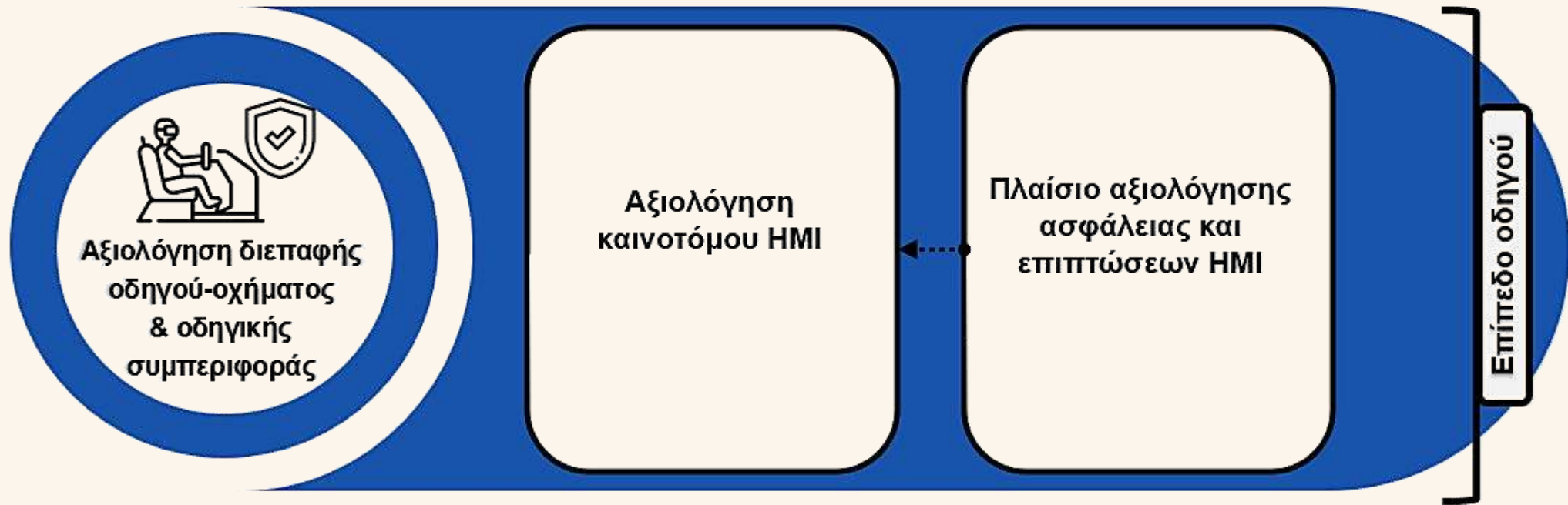
TOT με Μετρήσεις Οδήγησης και Ασφάλειας

- Μικρότερος TOT συνδέεται με **υψηλότερες διαμήκεις και πλευρικές επιταχύνσεις και αυξημένη διακύμανση στη θέση λωρίδας** υποδηλώνοντας πιο απότομες ενέργειες ελέγχου και μειωμένη πλευρική ευστάθεια σε επείγουσες μεταβάσεις.
- Το ποσοστό ατυχημάτων εμφανίζει στατιστικά μη σημαντική αρνητική συσχέτιση με τον χρόνο ανάληψης ελέγχου, υποδηλώνοντας **τάση για αυξημένη εμφάνιση ατυχημάτων** σε ταχύτερες αντιδράσεις, χωρίς όμως οριστικό συμπέρασμα.



Εικόνα: Διαγράμματα διασποράς του χρόνου ανάληψης ελέγχου (TOT, s) και των μετρήσεων οδήγησης/ασφάλειας.

Αξιολόγηση διεπαφής οδηγού-οχήματος & οδηγικής συμπεριφοράς

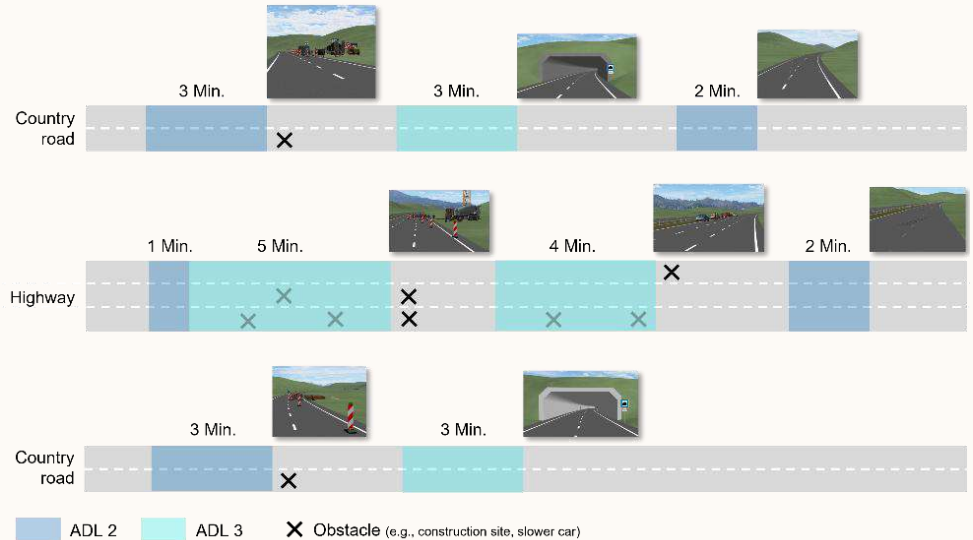


Πείραμα Προσομοιωτή για την Αξιολόγηση της Ασφάλειας της Διεπαφής HMI

- Πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη σύγκριση μεταξύ μιας καθιερωμένης **διεπαφής Baseline HMI** και της **διεπαφής HADRIAN HMI**, με διασφάλιση ίδιων σεναρίων, χρονικών περιθωρίων και συνθηκών αυτοματισμού.
- Η συμπεριφορά και η αλληλεπίδραση του οδηγού εξετάστηκαν κατά τις μεταβάσεις στα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3, σε **8 TOR αιτήματα ανάληψης ελέγχου**, συμπεριλαμβανομένων δευτερευουσών δραστηριοτήτων απόσπασης προσοχής.



Εικόνα: Τεχνολογίες της διεπαφής HADRIAN HMI και της διαμόρφωσης του προσομοιωτή



Εικόνα: Διαδρομή προσομοιωτή με τμήματα αυτοματοποιημένης οδήγησης SAE Level 2 και SAE Level 3 και θέσεις αιτημάτων ανάληψης ελέγχου (TOR)

Διαμορφώσεις Διεπαφής HMI

- Αξιολογήθηκαν **δύο διαμορφώσεις διεπαφής HMI**, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την προβλεψιμότητα, την πολυτροπική ανατροφοδότηση, την παρακολούθηση του οδηγού και την προσαρμοστική καθοδήγηση του οδηγού.
- Το τελικό δείγμα περιλάμβανε **39 συμμετέχοντες**, εκ των οποίων 20 οδηγοί εκτέθηκαν στη διεπαφή Baseline HMI και 19 στη διεπαφή HADRIAN HMI.
- Συλλέχθηκαν **αντικειμενικά δεδομένα οδήγησης**, κίνησης οφθαλμών και ανίχνευσης χεριών εκτός τιμονιού, σε συνδυασμό με υποκειμενικές μετρήσεις, ώστε να αποτυπωθούν τόσο η ασφάλεια όσο και ο **αντιλαμβανόμενος αντίκτυπος**.

Πίνακας: Σύγκριση λειτουργιών μεταξύ της βασικής διεπαφής (Baseline) και της διεπαφής HADRIAN HMI.

Component	Baseline HMI	HADRIAN HMI
SAE Level 2 Time Budget	5s (no countdown)	5s with countdown and haptic reinforcement
SAE Level 3 Time Budget	15s (no countdown)	15s with countdown and a visual indicator
Predictability	None	Remaining AD level 3 time displayed on tablet
Driver Monitoring	Hands-off-wheel warning (sound only)	Hands-off-wheel and eyes-off-road warnings via sound, LEDs, HUD, and tablet
Tutoring	None	Interactive audiovisual tutoring (video and feedback for first take-overs)
LED Cues	None	Front LED strip for status and warnings + magenta backlight for NDRT
Haptic Cues	None	Steering wheel vibration patterns for mode changes and TORs
HUD Content	Speed and limit only	Speed, limit, mode symbol, countdown, and obstacle preview

Καταστάσεις Συστήματος HADRIAN HMI

- Η **διεπαφή Baseline HMI** βασίζόταν σε ελάχιστη υποστήριξη του οδηγού, παρέχοντας βασική πληροφόρηση για την κατάσταση του αυτοματισμού και απλές ηχητικές ειδοποιήσεις για συμβάντα hands-off-wheel, χωρίς καθοδήγηση, αντίστροφη μέτρηση ή προσαρμοστική ανατροφοδότηση.
- Η **διεπαφή HADRIAN HMI** παρείχε πολυτροπικά ερεθίσματα και υποστήριξη επαναπροσέγγισης, συνδυάζοντας μηνύματα σε Head-Up Display, ανατροφοδότηση μέσω tablet, φωτισμό LED, απτικά σήματα στο τιμόνι και καθοδήγηση στις αρχικές αναλήψεις ελέγχου.



a) Before driving



b) ADL2 active



c) Distraction warning



d) Hands-off-wheel warning



e) ADL3 active

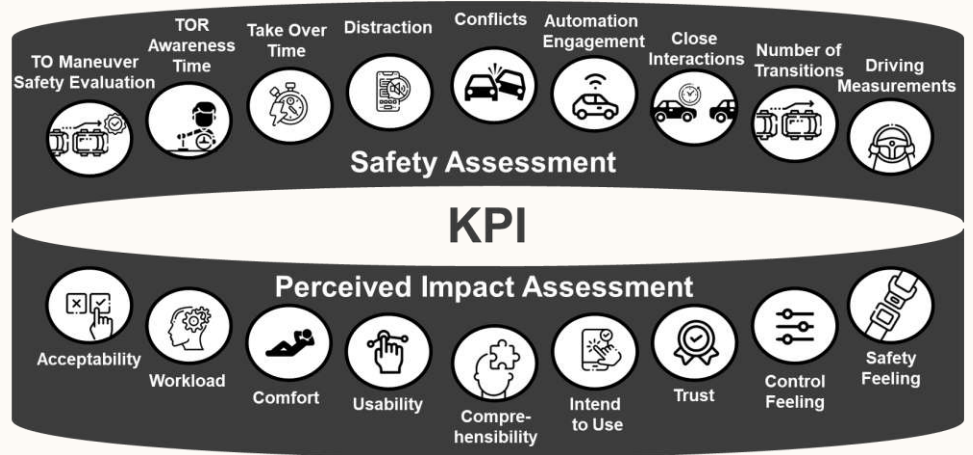


f) Take over request

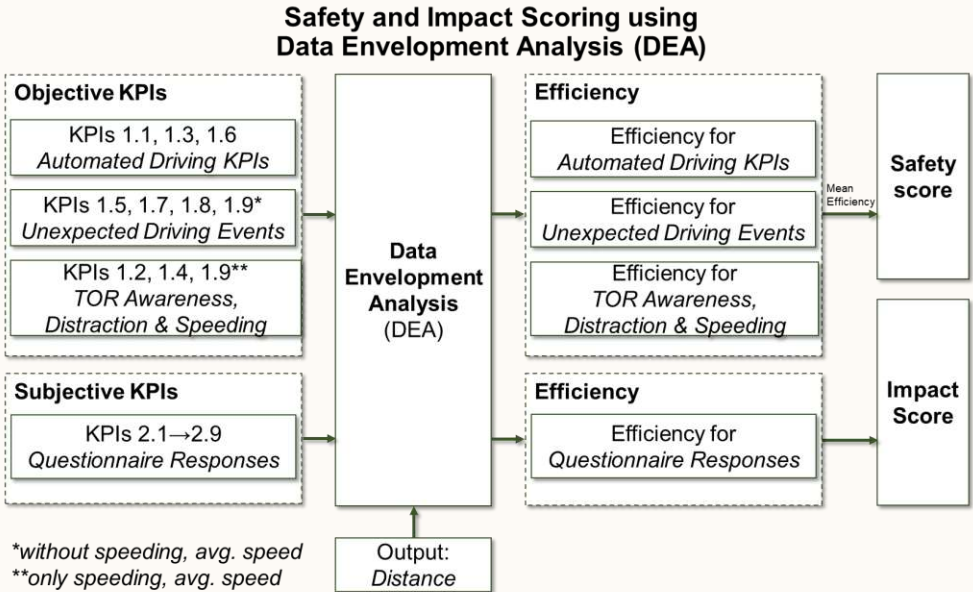
Εικόνα: Διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας της διεπαφής HADRIAN HMI.

Μεθοδολογία Αξιολόγησης και Βαθμολόγησης

- Συλλέχθηκαν **KPIs** τόσο από τον προσομοιωτή όσο και από ερωτηματολόγια.
- Η **Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων** (Data Envelopment Analysis, DEA) χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση ετερογενών KPIs, επιτρέποντας την από κοινού αξιολόγηση διακριτών συμβάντων και συνεχών μετρήσεων.
- Η DEA επιτρέπει τη σύνθεση ετερογενών KPIs **χωρίς προκαθορισμένα βάρη** και την αξιολόγηση σε επίπεδο οδηγού.



Εικόνα: Σύνολο KPIs για την αξιολόγηση ασφάλειας και επιπτώσεων των καινοτομιών της διεπαφής HADRIAN HMI.



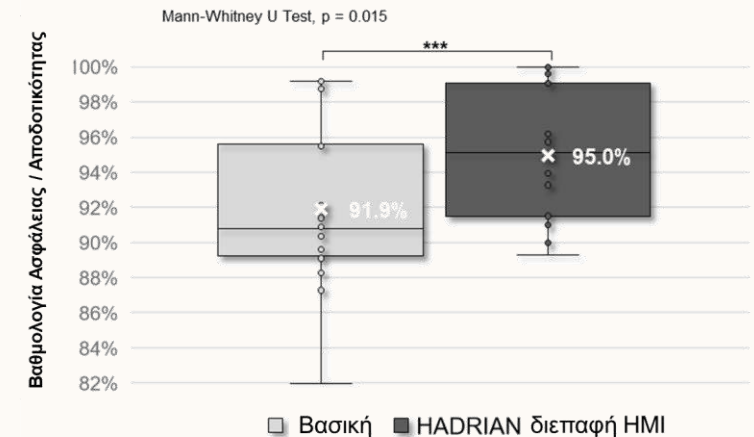
Εικόνα: Αρχιτεκτονική βαθμολόγησης ασφάλειας και υποκειμενικών αξιολογήσεων με χρήση DEA.



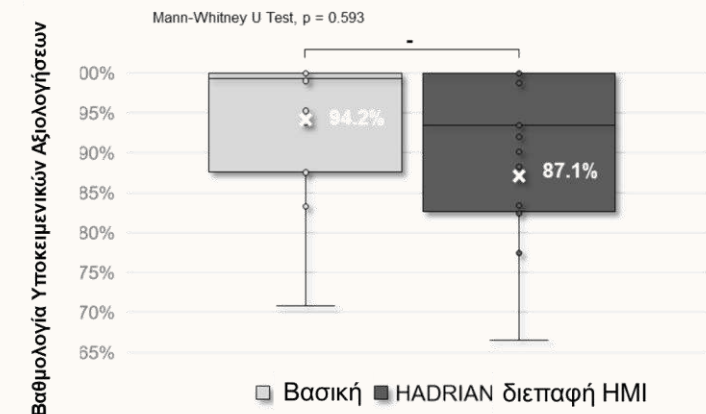
Αποτελέσματα Αξιολόγησης με χρήση DEA

- Οι **βαθμολογίες ασφάλειας** ήταν σημαντικά υψηλότερες για τη διεπαφή HADRIAN HMI, κυρίως λόγω βελτιώσεων i) στην ασφάλεια του ελιγμού ανάληψης ελέγχου, ii) στη μείωση του χρόνου επίγνωσης του TOR, iii) στη μεγαλύτερη διάρκεια TOT, iv) στη μικρότερη διάρκεια απόσπασης προσοχής και v) στη μείωση των εμπλοκών.
- Οι βαθμολογίες **αντιλαμβανόμενου αντίκτυπου** ήταν χαμηλότερες για τη διεπαφή HADRIAN HMI, επηρεαζόμενες κυρίως από i) μειωμένη κατανόηση και ii) πρόθεση χρήσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αυξημένη πυκνότητα πληροφορίας και η καινοτομία του συστήματος επηρέασαν τις βραχυπρόθεσμες υποκειμενικές αξιολογήσεις, παρά τις βελτιώσεις σε νοητικό φόρτο, άνεση, εμπιστοσύνη και αίσθηση ελέγχου.

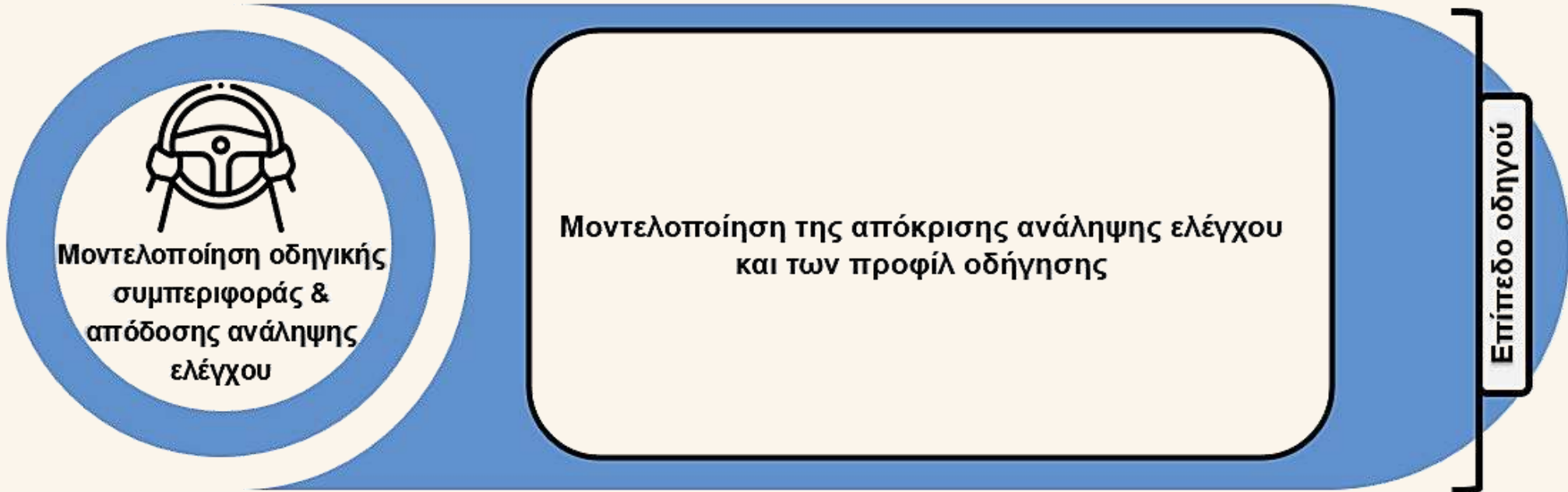
Αξιολόγηση Ασφάλειας με χρήση DEA



Αξιολόγηση Αντιλαμβανόμενου Αντίκτυπου με χρήση DEA



Μοντελοποίηση οδηγικής συμπεριφοράς και απόδοσης ανάληψης ελέγχου



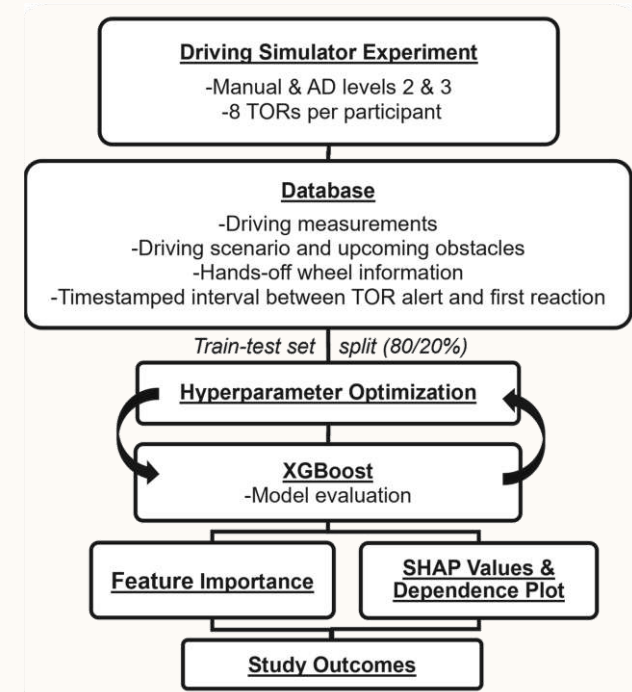
Μοντελοποίηση οδηγικής συμπεριφοράς & απόδοσης ανάληψης ελέγχου

Μοντελοποίηση της απόκρισης ανάληψης ελέγχου και των προφίλ οδήγησης

Επίπεδο οδηγού

Μοντελοποίηση της Απόκρισης Ανάληψης Ελέγχου

- Ο χρόνος ανάληψης ελέγχου μοντελοποιήθηκε **σε επίπεδο γεγονότος TOR**.
- Εξετάστηκαν μεταβλητές περιβάλλοντος, δυναμικές καταστάσεις του οχήματος και η συνθήκη διεπαφής HMI, ώστε να αποτυπωθούν **μη γραμμικές επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις**.
- Εφαρμόστηκε εποπτευόμενη μηχανική μάθηση με χρήση του αλγορίθμου **eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)**, με βελτιστοποίηση υπερπαραμέτρων μέσω cross validation και αξιολόγηση της επίδοσης σε test set.
- Τα αποτελέσματα του μοντέλου ερμηνεύτηκαν με χρήση **SHapley Additive exPlanations (SHAP)**, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η σχετική συμβολή κάθε μεταβλητής στο TOT.



Εικόνα: Επισκόπηση της ροής της μεθοδολογίας.

Πίνακας: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης υπερπαραμέτρων του XGBoost για τον χρόνο ανάληψης ελέγχου στο training set.

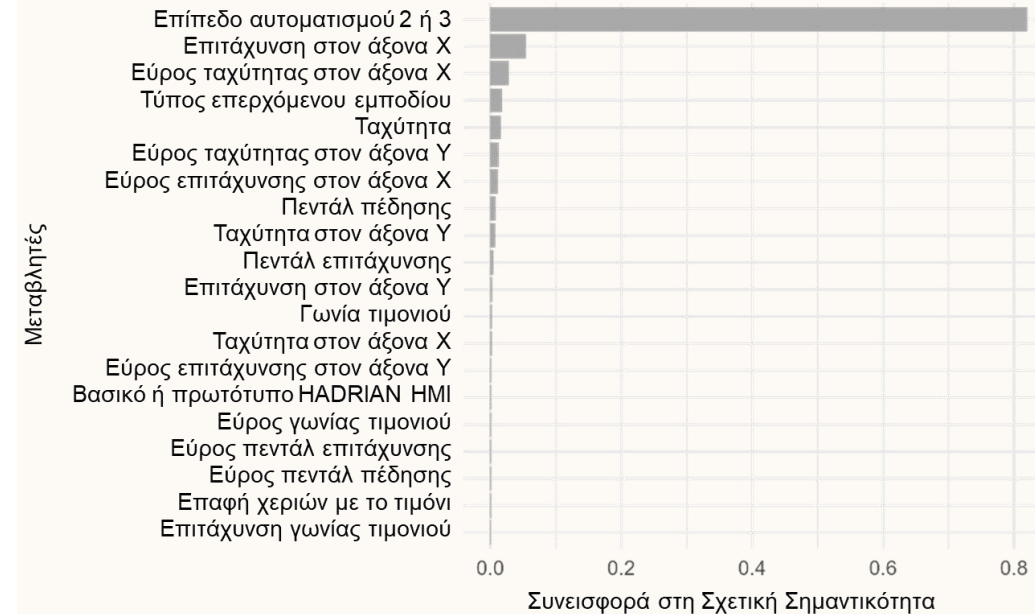
Hyperparameter	Examined Range	Optimized Value
Learning rate (eta)	0.010-0.011	0.011
Number of rounds	1-200	200
Maximum tree depth	1-5	5
Gamma	0-1	1
Column sample by tree	0.5-0.8	0.8
Minimum child weight	5-10	5
Subsample	0.7-0.9	0.9

A 5-fold cross-validation method was used to validate the model performance.

Σημαντικότητα Μεταβλητών για TOT

- Το **επίπεδο αυτοματισμού SAE 2 ή 3** κυριαρχεί στο μοντέλο, δείχνοντας ότι οι δραστηριότητες απόσπασης NDRT και το διαθέσιμο χρόνο αποτελούν τους βασικούς προσδιοριστές του TOT.
- Οι **διαμήκεις δυναμικές** ακολουθούν σε σημαντικότητα, με τη διαμήκη επιτάχυνση και το εύρος ταχύτητας να αποτυπώνουν ενδείξεις κατάστασης του οχήματος και μεταβλητότητα που ενεργοποιούν την απόκριση του οδηγού.
- Το **οδικό περιβάλλον**, όπως η παρουσία εμποδίου, διαμορφώνει περαιτέρω τον χρόνο ανάληψης ελέγχου αυξάνοντας τις απαιτήσεις επίγνωσης και προσοχής.
- Οι μεταβλητές **διεπαφής HMI και αλληλεπίδρασης οδηγού** εμφανίζουν χαμηλότερη συνεισφορά, υποδηλώνοντας δευτερεύον αλλά μη αμελητέο ρόλο.

Σημαντικότητα μεταβλητών με τη χρήση XGBoost

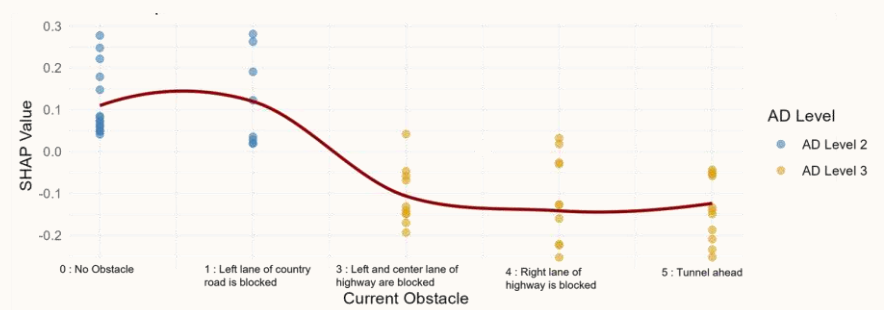
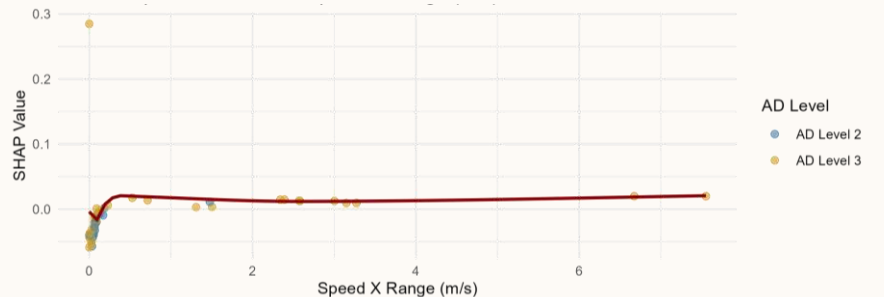
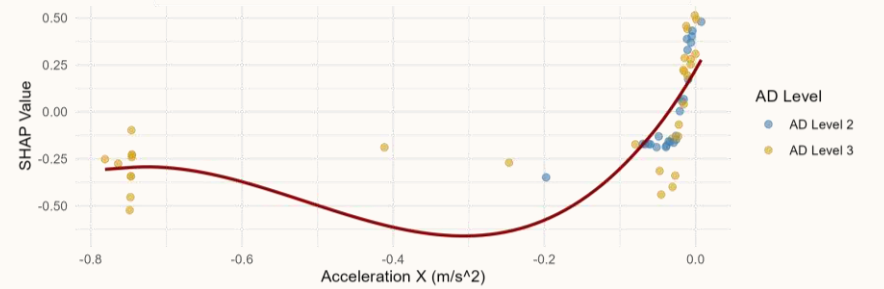
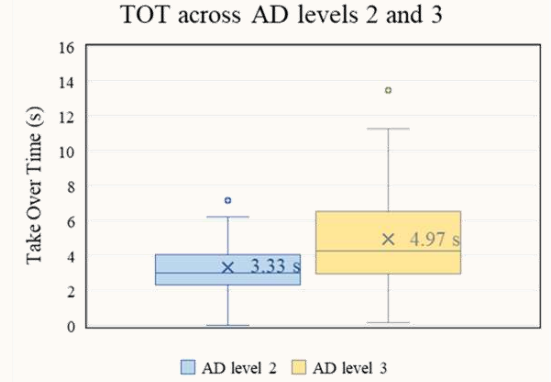


Πίνακας: Δείκτες επίδοσης του XGBoost στο training και test set.

Performance Metrics	Train Set	Test Set
RMSE	0.676	0.772
MSE	0.457	0.597
MAE	0.507	0.571
R ²	0.914	0.871

Ερμηνεία της Δυναμικής Ανάλυσης Ελέγχου βάσει SHAP

- Το **επίπεδο αυτοματισμού 3** συνδέεται με μεγαλύτερους TOT, λόγω εκτεταμένου διαθέσιμου χρόνου και εμπλοκής σε δραστηριότητες απόσπασης πριν την απόκριση του οδηγού.
- Η **δυναμική του οχήματος και ο τύπος εμποδίου** τροποποιούν τον TOT, καθώς έντονες επιβραδύνσεις και συνθήκες υψηλού κινδύνου λειτουργούν ως σήματα επείγουσας απόκρισης και επιταχύνουν την απόκριση.
- Οι παρατηρούμενες διαφορές στα μεγέθη οδήγησης στο **επίπεδο αυτοματοποίησης 3** διαμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεχιζόμενη λειτουργία του συστήματος κατά τη TOR φάση.

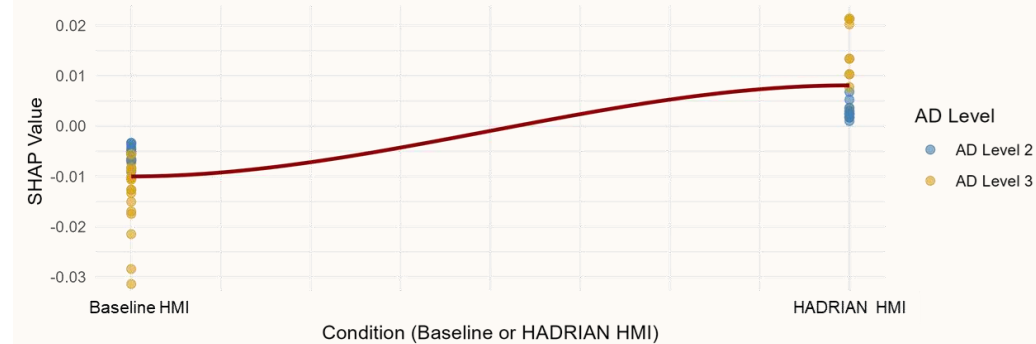


Εικόνα: Διαγράμματα εξάρτησης SHAP για τις σημαντικότερες μεταβλητές στο test set.

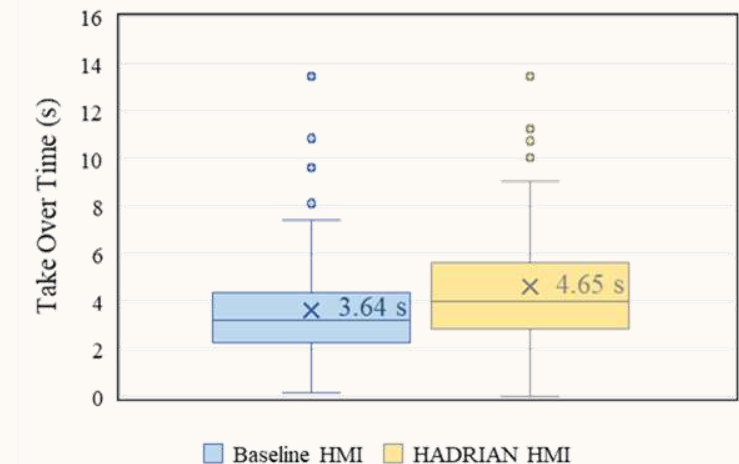


Επίδραση του ΗΜΙ στον ΤΟΤ

- Η **διεπαφή HADRIAN ΗΜΙ** συνδέεται με μεγαλύτερο μέσο ΤΟΤ σε σύγκριση με τη βασική διεπαφή, 4.65 s έναντι 3.64 s.
- Η αύξηση αυτή αντανακλά **πρόσθετη γνωστική επεξεργασία** λόγω της πλουσιότερης πολυτροπικής καθοδήγησης και όχι καθυστερημένη επίγνωση του αιτήματος ανάληψης.



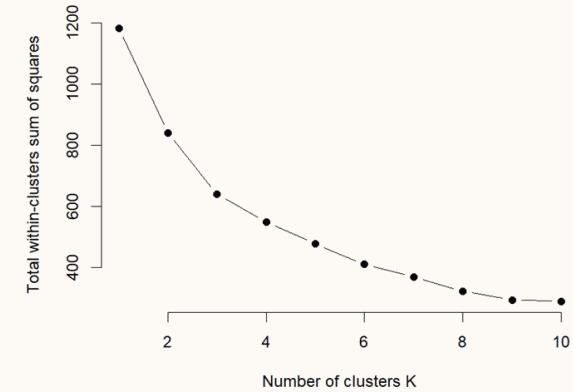
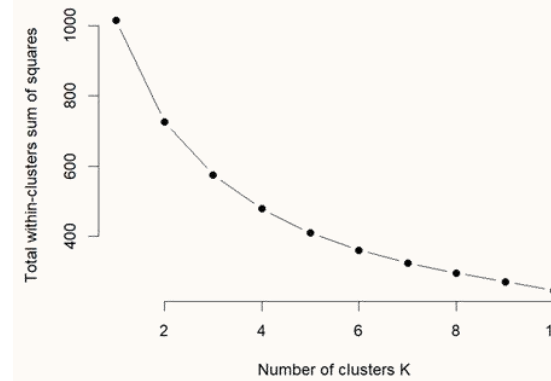
Εικόνα: Διάγραμμα εξάρτησης SHAP για τη μεταβλητή τύπου διεπαφής (HMI) στο test set.



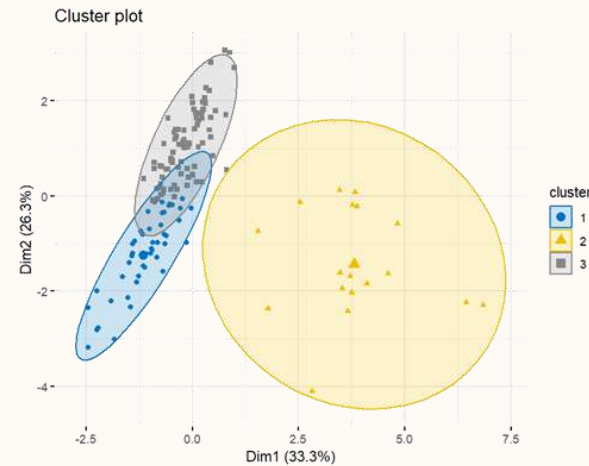
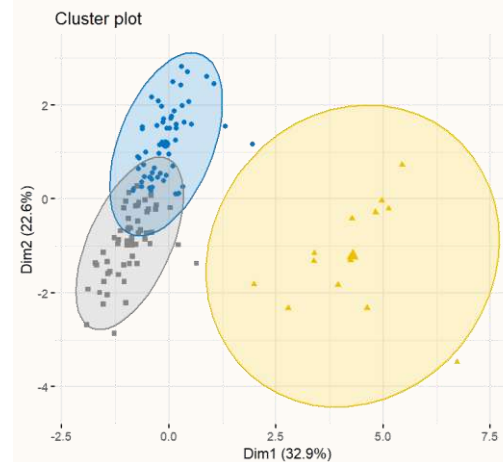
Εικόνα: Διάγραμμα boxplot του χρόνου ανάληψης ελέγχου (TOT) για τους διαφορετικούς τύπους διεπαφής (HMI).

Προφίλ μετά την Ανάλυση Ελέγχου

- Η ανάλυση μετατοπίζεται από τον TOT στη **αναγνώριση προφίλ οδήγησης** μετά την ανάληψη, εστιάζοντας στον TOT, στη διάρκεια χειροκίνητης οδήγησης, στη ρύθμιση ταχύτητας και στα μοτίβα επιτάχυνσης.
- Εφαρμόστηκε **μείωση διαστασιμότητας** με Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών PCA και μη επιβλεπόμενη **ομαδοποίηση με K-means**, ξεχωριστά για τα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3, επιτρέποντας την ανάδειξη διακριτών προφίλ.
- Τα προφίλ συνδέουν τον **TOT της απόκρισης ανάληψης με την ποιότητα ελέγχου** μετά την ανάληψη.



Εικόνα: Προσδιορισμός του αριθμού ομάδων με τη μέθοδο elbow για δύο διακριτά μοντέλα ομαδοποίησης, επίπεδο αυτοματισμού 2 (αριστερά) και επίπεδο αυτοματισμού 3 (δεξιά).



Εικόνα: Αποτελέσματα ανάλυσης ομαδοποίησης για επίπεδο αυτοματισμού 2 (αριστερά) και επίπεδο αυτοματισμού 3 (δεξιά).

Προφίλ μετά την Ανάλυση Ελέγχου

- Η συμπεριφορά μετά την ανάληψη ελέγχου παρουσιάζει συστηματικές διαφορές στον έλεγχο ταχύτητας, στην επιτάχυνση και στη σταθερότητα.

- Τρία προφίλ συμπεριφοράς αναδεικνύονται και στα δύο επίπεδα αυτοματισμού:

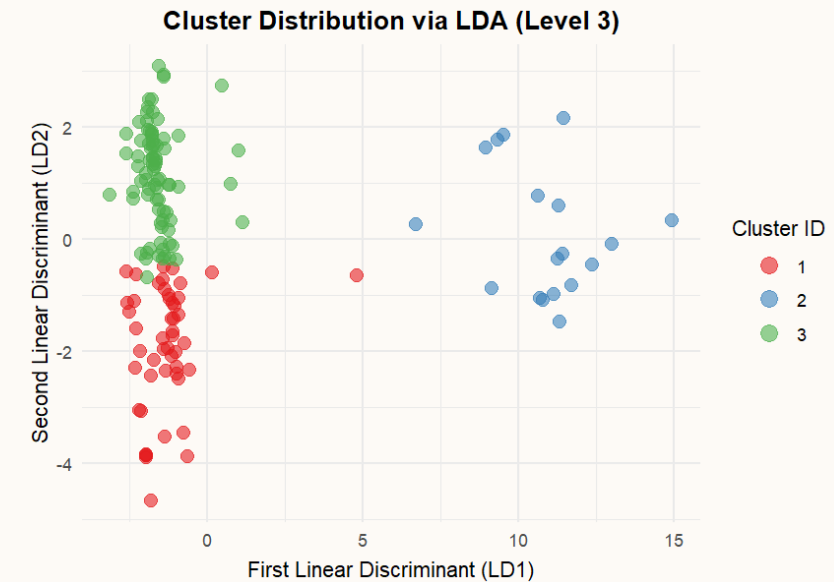
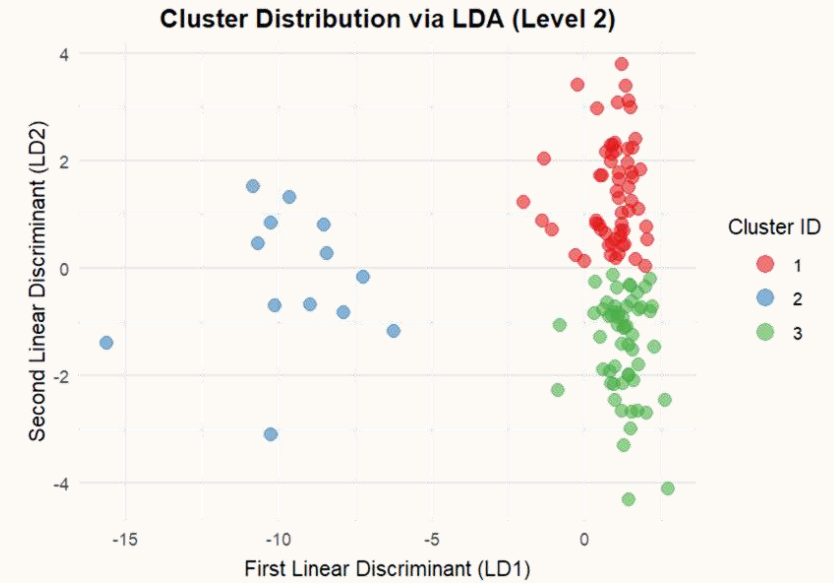
1. Παθητικό-Αργό
2. Νευρικό-Μέτριο
3. Κανονικό-Γρήγορο

Πίνακας: Μέσες τιμές ομάδων για τα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3.

Ομάδα	Επίπεδο Αυτοματισμού 2			Επίπεδο Αυτοματισμού 3		
	1	2	3	1	2	3
Περιγραφή συστάδας	Παθητική οδήγηση και αργή απόκριση	Νευρική οδήγηση και μέτρια απόκριση	Κανονική οδήγηση και γρήγορη απόκριση	Παθητική οδήγηση και αργή απόκριση	Νευρική οδήγηση και μέτρια απόκριση	Κανονική οδήγηση και γρήγορη απόκριση
Συνθήκη (Baseline ή HADRIAN HMI)	0.492	0.615	0.482	0.857	0.667	0.220
Χρόνος ανάληψης ελέγχου TOT (s)	3.760	3.402	2.089	7.569	4.512	3.372
Χρόνος χειροκίνητης οδήγησης (s)	1.478	2.202	3.488	9.488	14.609	15.569
Μέση ταχύτητα (km/h)	84.066	84.795	87.010	91.541	97.889	103.216
Τυπική απόκλιση ταχύτητας (km/h)	0.051	0.437	0.054	0.045	0.480	0.058
Μέση θετική επιτάχυνση (m/s ²)	0.020	0.025	0.033	0.033	0.079	0.056
Μέση αρνητική επιτάχυνση (m/s ²)	1.042	4.773	0.936	0.655	5.209	0.799
Τυπική απόκλιση αρνητικής επιτάχυνσης (m/s ²)	0.019	0.526	0.011	0.005	0.509	0.005

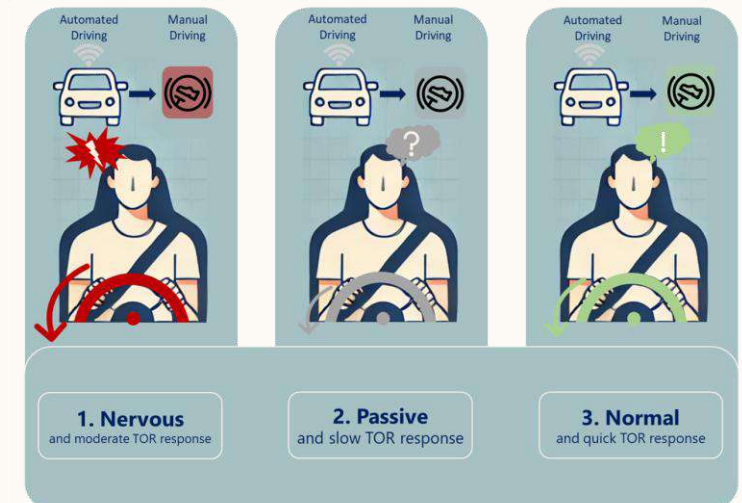
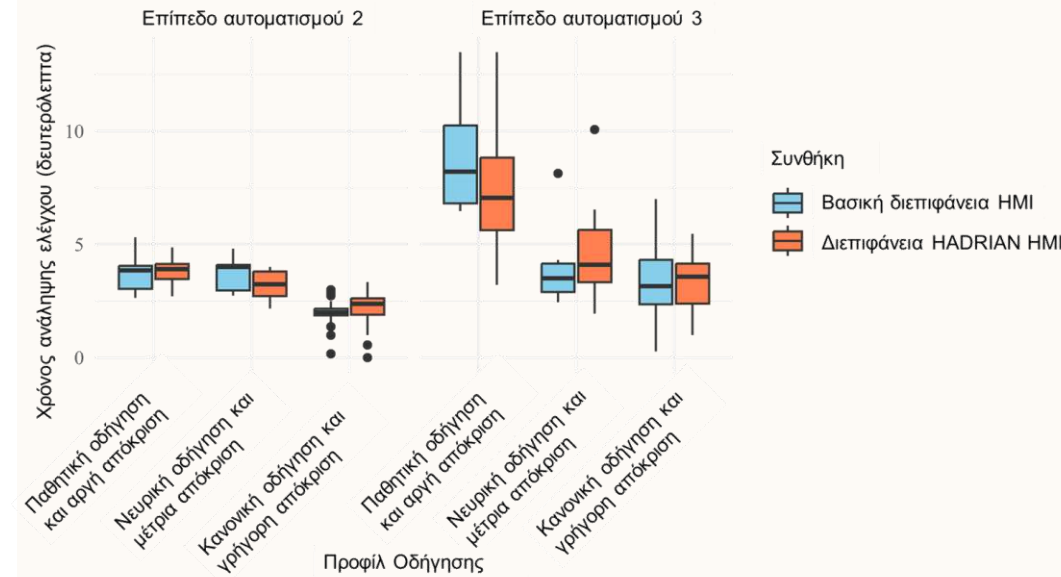
Διαχωρισμός Προφίλ Οδήγησης

- Η Γραμμική Διακριτή Ανάλυση (**Linear Discriminant Analysis, LDA**) επιβεβαιώνει την ισχυρή εσωτερική συνοχή των αναγνωρισμένων προφίλ, με υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης για το επίπεδο αυτοματισμού 2 (99.2%) και 3 (96.6%).



TOT ανά Προφίλ Οδήγησης

- Τα **προφίλ οδήγησης** διαφοροποιούν τον TOT, με το Παθητικό-Αργό να εμφανίζει τους μεγαλύτερους χρόνους, το Νευρικό-Μέτριο ενδιάμεση συμπεριφορά και το Κανονικό-Γρήγορο τους μικρότερους χρόνους, και στα δύο επίπεδα αυτοματισμού.
- Η **υψηλότερη αυτοματοποίηση** αυξάνει τόσο τον μέσο TOT όσο και τη διακύμανσή του.
- Η **διεπαφή HADRIAN HMI** συνδέεται με μεγαλύτερους χρόνους TOT σχεδόν σε όλα τα προφίλ, υποδηλώνοντας πιο στοχευμένες και ελεγχόμενες μεταβάσεις που υποστηρίζονται από καθοδήγηση και ενδείξεις χρονικής επίγνωσης στον οδηγό, και όχι καθυστερημένη απόκριση.



Εικόνα: Εντοπισμένα προφίλ οδηγικής συμπεριφοράς.

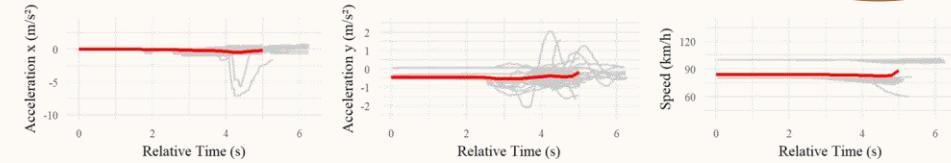
Δυναμική Ελέγχου ανά Προφίλ Οδήγησης

- Διακριτά πρότυπα ελέγχου εμφανίζονται μεταξύ των προφίλ:
 - το Παθητικό-Αργό να χαρακτηρίζεται από ήπιες επιταχύνσεις και σταδιακή μείωση ταχύτητας
 - το Νευρικό-Μέτριο να παρουσιάζει υψηλή μεταβλητότητα και απότομες ενέργειες ελέγχου
 - το Κανονικό-Γρήγορο να επιδεικνύει ομαλές σταθεροποιημένες επιταχύνσεις και αποφασιστική ρύθμιση ταχύτητας

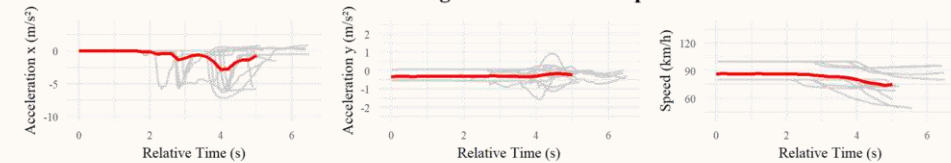
AD Level 2

EE1

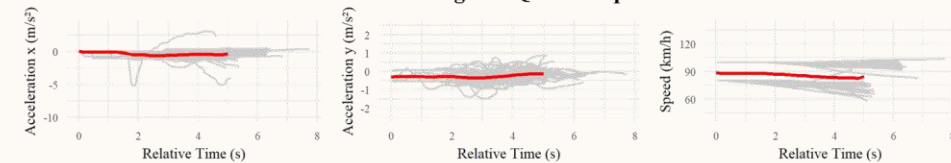
Passive Driving and Slow Response



Nervous Driving and Moderate Response

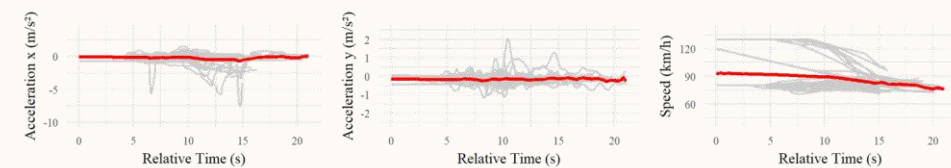


Normal Driving and Quick Response

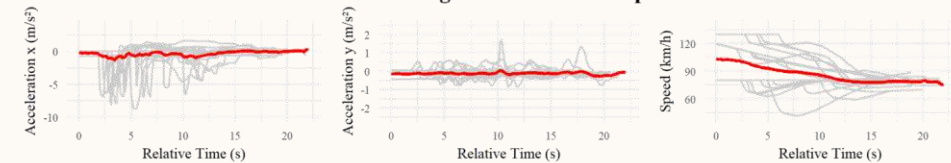


AD Level 3

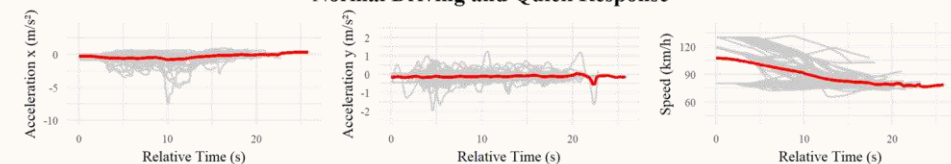
Passive Driving and Slow Response



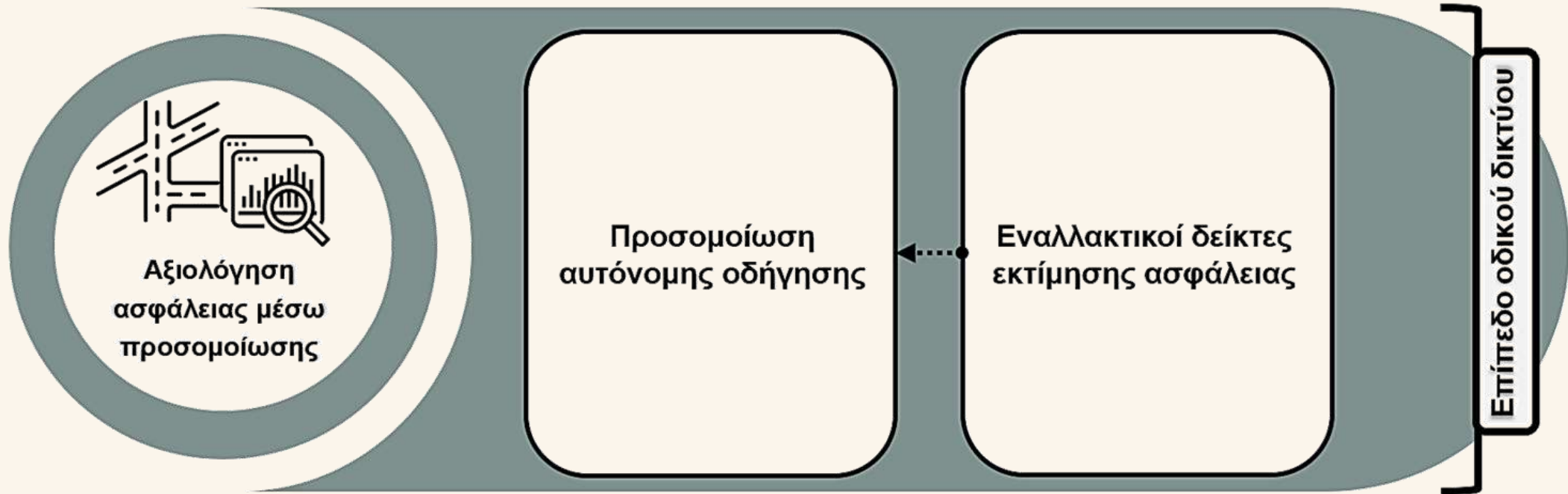
Nervous Driving and Moderate Response



Normal Driving and Quick Response

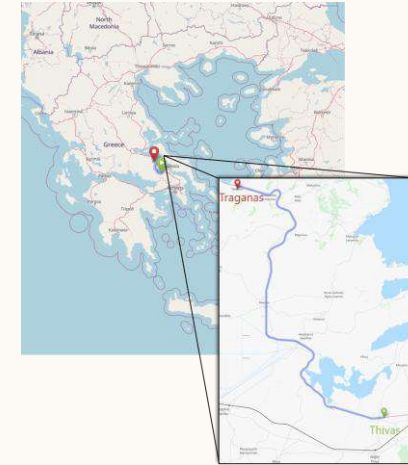


Αξιολόγηση ασφάλειας μέσω προσομοίωσης

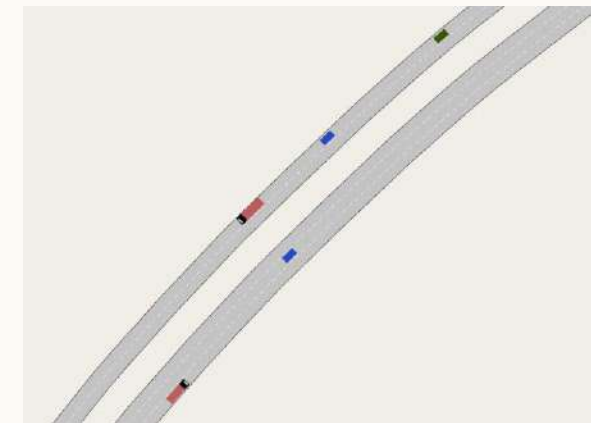


Από τη Συμπεριφορά Ανάλυσης Ελέγχου στην Ασφάλεια σε Επίπεδο Δικτύου

- Για την ανάλυση των επιμέρους επιδράσεων των TOR σε εμπλοκές επιπέδου δικτύου και αναγνώριση χωρικών μοτίβων ασφάλειας προσομοιώθηκε ένας **αυτοκινητόδρομος μήκους 50 km** της Νέας Οδού στον άξονα Αθήνα-Θεσσαλονίκη, με δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση, έξι σημεία εισόδου και εξόδου και μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ταχύτητας 120 km/h.
- Οι **δείκτες surrogate safety** που προκύπτουν από τη μικροσκοπική προσομοίωση επιτρέπουν την εκτίμηση των επιπτώσεων στην ασφάλεια σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα ατυχημάτων.



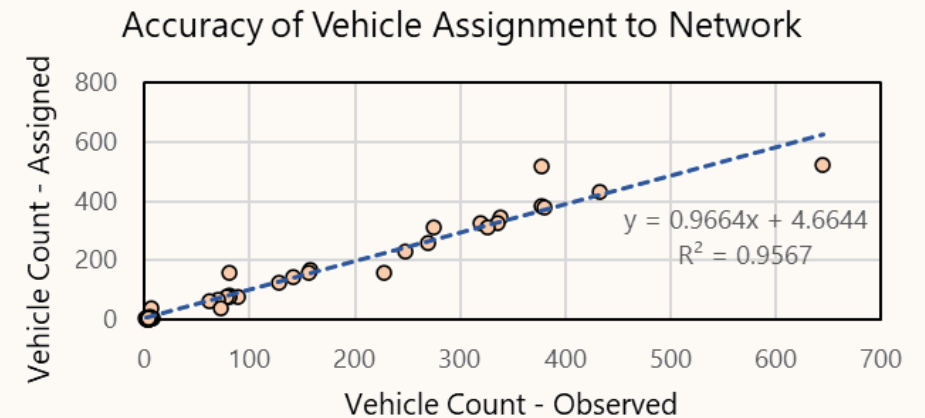
Εικόνα: Τμήμα του αυτοκινητοδρόμου της Νέας Οδού.



Εικόνα: Δίκτυο προσομοίωσης στο Aimsun Next.

Κυκλοφοριακές Συνθήκες και Βαθμονόμηση Δικτύου

- Τα ημερήσια προφίλ ζήτησης αποτυπώνουν μια **τυπική ημέρα λειτουργίας αυτοκινητοδρόμου** τον Οκτώβριο του 2021, με τον κυκλοφοριακό φόρτο να κορυφώνονται περίπου στις 14:00, ορίζοντας το αντιπροσωπευτικό σενάριο αιχμής.
- Το δίκτυο φορτώθηκε με έναν πίνακα **προέλευσης-προορισμού 10×10 και συνολικά 1782 οχήματα**, αντανακλώντας τη παρατηρούμενη σύνθεση στόλου, 74% ελαφρά οχήματα, 22% βαρέα οχήματα, 3% μοτοσικλέτες και 1% λεωφορεία.
- Η **βαθμονόμηση και επικύρωση** έναντι δεδομένων πεδίου έδειξε ισχυρή συμφωνία, με το 91.7% των περιπτώσεων να ικανοποιούν το κριτήριο $GEH < 5$ με $R^2 = 0.96$ μεταξύ ανατεθειμένων και παρατηρούμενων οχημάτων, και απόκλιση μέσης ταχύτητας περιορισμένη στο 4%, επιβεβαιώνοντας ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας του δικτύου.



Εικόνα: Ακρίβεια ανάθεσης οχημάτων στο προσομοιωμένο δίκτυο.

Σχεδιασμός Κυκλοφοριακών Σεναρίων

- Κατασκευάστηκαν **18 σενάρια προσομοίωσης**, συμπεριλαμβανομένων πλήρως χειροκίνητων σεναρίων baseline.
- Η αυτοματοποίηση και η συμπεριφορά** μεταβλήθηκαν από κοινού, ενσωματώνοντας τα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3 καθώς και τα εμπειρικά προσδιορισμένα προφίλ οδήγησης μετά την ανάληψη ελέγχου (Νευρικό, Παθητικό, Κανονικό), υπό ταυτόσημες συνθήκες δικτύου και ανάληψης ελέγχου.
- Εξετάστηκαν **προοδευτικά σενάρια διείσδυσης αυτοματισμού** (Market Penetration Rate, MPR), από πλήρως χειροκίνητους έως αυτοματοποιημένους στόλους.

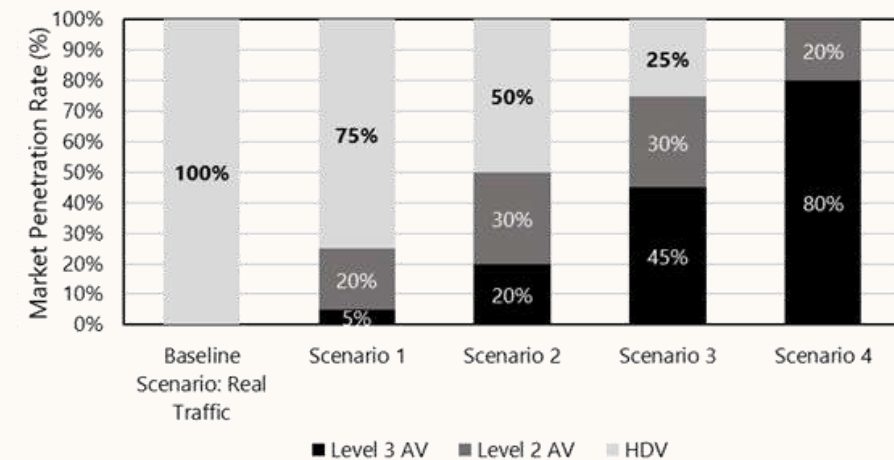
Πίνακας: Σύνοψη των προσομοιωμένων κυκλοφοριακών σεναρίων.

Περιβάλλον	Επίπεδο SAE	Κυκλοφοριακός φόρτος	Κυκλοφοριακό σενάριο	Μίγμα προφίλ οδήγησης**	Time Budget (L2)	Time Budget (L3)	Ποσοστό διείσδυσης αυτοματισμού (MPR)
Αυτοκινητόδρομος	L2 (S1:80%, S2:60%, S3:40%, S4:20%)	Ώρα αιχμής	Κλείσιμο λωρίδας	Νευρικό (L2:10%, L3:10%)	7 s*	20 s*	0% <i>Baseline</i>
				Παθητικό (L2:33%, L3:46%)	5 s**	15 s**	25%
				Κανονικό (L2:57%, L3:44%)			50%
	L3 (S1:20%, S2:40%, S3:60%, S4:80%)		Έξοδος ODD				75%
							100%

S: Scenario, L: Level

*Εκτίμηση βάσει του Πίνακα 2.5 από τη μετα-παλινδρόμηση

**Βάσει της Ενότητας 5



Περιβάλλον Προσομοίωσης και Ενσωμάτωση TOR μέσω API

- Αναπτύχθηκε **Python API** για την προσομοίωση γεγονότων TOR και μεταβάσεων επιπέδων αυτοματισμού που δεν υποστηρίζονται εγγενώς στο Aimsun Next.
- Οι παράμετροι συμπεριφοράς των οχημάτων **τροποποιούνται προσωρινά σε προκαθορισμένα σημεία** ενεργοποίησης του δικτύου, ώστε να αναπαραχθούν σενάρια TOR.
- Το πλαίσιο αναπαράγει πλήρως τον κύκλο **αυτοματοποιημένη οδήγηση → TOR → χειροκίνητη οδήγηση → επαναφορά αυτοματισμού**, τόσο σε σενάρια κλειστής λωρίδας όσο και ODD έξοδο.



Παραμετροποίηση Οχημάτων και Προφίλ Οδήγησης

- Τα οχήματα μοντελοποιήθηκαν σε **τρεις φάσεις λειτουργίας**, με τα αυτοματοποιημένα οχήματα να διαθέτουν υψηλότερες επιδόσεις και ταχύτερους χρόνους αντίδρασης σε σχέση με τη χειροκίνητη οδήγηση.
- Η **συμπεριφορά μετά την ανάληψη ελέγχου παραμετροποιήθηκε** μέσω τριών προφίλ οδήγησης.
- Τα γεγονότα TOR ενεργοποιήθηκαν εντός ενός **κοινού τμήματος μήκους 500 m** τόσο για τα σενάρια κλειστής λωρίδας όσο και για τα σενάρια εξόδου ODD.

Πίνακας: Παράμετροι για τα επίπεδα αυτοματισμού 2 και 3 και για τη χειροκίνητη οδήγηση.

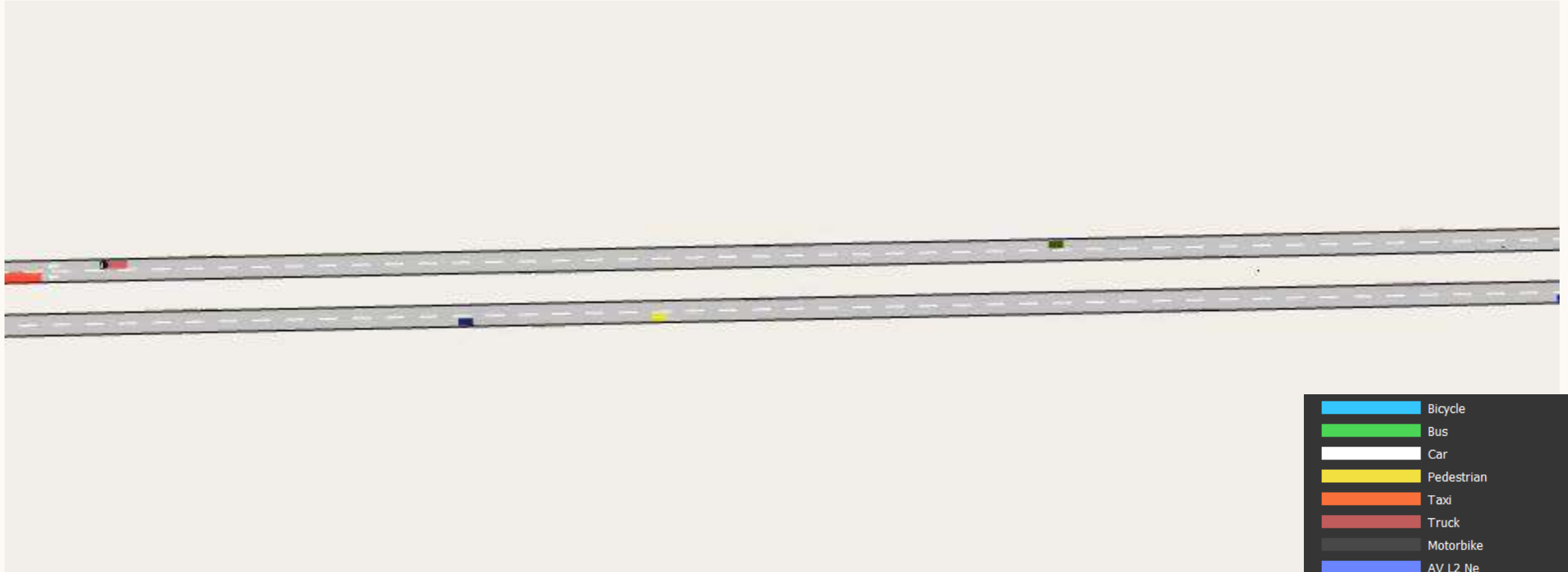
Parameter	AD level 2	Passive Driving Profile	Nervous Driving Profile	Normal Driving Profile	Manual Driving
Max Acceleration	1.8 ¹	-	-	-	3 ⁴
SD Max Acceleration	0.4 ⁶	-	-	-	0.2 ⁴
Max. Deceleration	2.5 ¹	1.06 ³	5.15 ³	0.94 ³	6 ⁴
SD Max. Deceleration	0.62 ⁶	0.88 ³	0.03 ³	0.61 ³	0.5 ⁴
Normal Deceleration	4.5 ²	1.042 ³	4.773 ³	0.936 ³	4 ⁴
SD Normal Deceleration	0.25 ⁶	0.019 ³	0.526 ³	0.011 ³	0.25 ⁴
Clearance	2 ¹	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁴
SD Clearance	0.5 ⁶	0.3 ⁵	0.3 ⁵	0.3 ⁵	0.3 ⁴
Gap Mean	1.5 ¹	1.5 ⁵	1.5 ⁵	1.5 ⁵	1.5 ⁴
Reaction Time	1 ¹	0.8 ⁵	0.8 ⁵	0.8 ⁵	0.8 ⁴







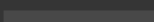






Sources: ¹Xie et al. (2019) level 2 parameters; ²Zhang (2022); ³As per Section 6; ⁴Manual parameters correspond to Aimsun defaults for manual driving; ⁵Xie et al. (2019) level 0 parameters; ⁶SD calculated analogically to parameters correspond to Aimsun defaults

Parameter	AD level 3	Passive Driving Profile	Nervous Driving Profile	Normal Driving Profile	Manual Driving
Max Acceleration	2 ¹	-	-	-	3 ⁴
SD Max Acceleration	0.4 ⁶	-	-	-	0.2 ⁴
Max. Deceleration	2.75 ¹	0.65 ³	5.43 ³	0.8 ³	6 ⁴
SD Max. Deceleration	0.62 ⁶	0.62 ³	0.9 ³	0.35 ³	0.5 ⁴
Normal Deceleration	4.5 ¹	0.66 ³	5.21 ³	0.80 ³	4 ⁴
SD Normal Deceleration	0.25 ⁶	0.01 ³	0.51 ³	0.01 ³	0.25 ⁴
Clearance	1.5 ¹	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁵	1 ⁴
SD Clearance	0.5 ⁶	0.3 ⁵	0.3 ⁵	0.3 ⁵	0.3 ⁴
Gap Mean	1.25 ¹	1.5 ⁵	1.5 ⁵	1.5 ⁵	1.5 ⁴
Reaction Time	0.5 ¹	0.8 ⁵	0.8 ⁵	0.8 ⁵	0.8 ⁴

Sources: ¹Xie et al. (2019) level 3 parameters; ²Zhang (2022); ³As per Section 6; ⁴Manual parameters correspond to Aimsun defaults for manual driving; ⁵Xie et al. (2019) level 0 parameters; ⁶SD calculated analogically to parameters correspond to Aimsun defaults

Προσομοίωση του TOR



	Bicycle
	Bus
	Car
	Pedestrian
	Taxi
	Truck
	Motorbike
	AV L2 Ne
	AV L2 Pa
	AV L2 No
	AV L3 Ne
	AV L3 Pa
	AV L3 No

Εξαγωγή Εμπλοκών και Μοντελοποίηση TTC (1/2)

- Οι τροχιές των οχημάτων που εξήχθησαν από τη μικροσκοπική προσομοίωση υποβλήθηκαν σε μεταγενέστερη επεξεργασία με το εργαλείο FHWA SSAM για τον εντοπισμό συμβάντων εμπλοκής βάσει του δείκτη Time To Collision, με κατώφλι $TTC < 1.5$ s.
- Η ασφάλεια σε επίπεδο δικτύου ποσοτικοποιήθηκε μέσω χωρικού Γενικευμένου Προσθετικού Μοντέλου (Generalised Additive Model, GAM), το οποίο αποτυπώνει τις μη γραμμικές επιδράσεις του TOT, της διείσδυσης αυτοματισμού, της γωνίας εμπλοκής και της χωρικής θέσης στον δείκτη TTC (εξηγούμενη απόκλιση 64.8% και προσαρμοσμένο $R^2 = 0.603$).

Πίνακας: Παραμετρικές επιδράσεις του μοντέλου GAM στις λογαριθμικά μετασχηματισμένες τιμές του TTC.

Variables	β	SE	p-value
Κανονικό Time Budget πρώτου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-7.945	2.460	0.001**
Εκτεταμένο Time Budget πρώτου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-7.941	2.461	0.001**
Κανονικό Time Budget δεύτερου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-0.240	0.126	0.057.
Εκτεταμένο Time Budget δεύτερου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-0.240	0.125	0.056.
Ποσοστό διείσδυσης αυτοματισμού (MPR)	0.097	0.026	0.000***
Σενάριο Κλεισίματος Λωρίδας [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.241	0.106	0.023*
Σενάριο Baseline ODD [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.033	0.126	0.792
Σενάριο Εξόδου ODD [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.258	0.107	0.016*
Όριο ταχύτητας	0.055	0.021	0.008**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L2 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.856	0.262	0.001**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L2 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.875	0.271	0.001**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Νευρικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	1.074	0.278	0.000***
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.660	0.263	0.012*
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.792	0.265	0.003**
Τύπος πρώτου οχήματος, I.X. [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-6.922	2.446	0.005**
Τύπος πρώτου οχήματος, Μοτοσικλέτα [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-7.143	2.466	0.004**
Τύπος πρώτου οχήματος, Φορτηγό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-6.849	2.447	0.005**
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L2 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.129	0.154	0.405
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L2 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.125	0.160	0.435
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Νευρικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.194	0.160	0.225
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.027	0.148	0.858
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.087	0.175	0.617
Τύπος δεύτερου οχήματος, Λεωφορείο [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.393	0.220	0.074.
Τύπος δεύτερου οχήματος, Μοτοσικλέτα [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.268	0.128	0.037*
Τύπος δεύτερου οχήματος, Φορτηγό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.039	0.066	0.560

Significance codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Αναφ.: Αναφορά

Εξαγωγή Εμπλοκών και Μοντελοποίηση TTC (2/2)

Πίνακας: Παραμετρικές επιδράσεις του μοντέλου GAM στις λογαριθμικά μετασχηματισμένες τιμές του TTC.

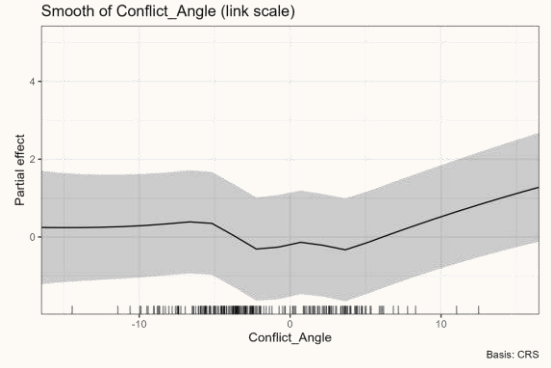
Μεταβλητές	β	SE	p-value
Κανονικό Time Budget πρώτου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-7.945	2.460	0.001**
Εκτεταμένο Time Budget πρώτου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-7.941	2.461	0.001**
Κανονικό Time Budget δεύτερου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-0.240	0.126	0.057.
Εκτεταμένο Time Budget δεύτερου οχήματος [Αναφ.: HDV]	-0.240	0.125	0.056.
Ποσοστό διείσδυσης αυτοματισμού (MPR)	0.097	0.026	0.000***
Σενάριο Κλεισίματος Λωρίδας [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.241	0.106	0.023*
Σενάριο Baseline ODD [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.033	0.126	0.792
Σενάριο Εξόδου ODD [Αναφ.: Baseline Κλεισίματος Λωρίδας]	-0.258	0.107	0.016*
Οριο ταχύτητας	0.055	0.021	0.008**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L2 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.856	0.262	0.001**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L2 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.875	0.271	0.001**
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Νευρικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	1.074	0.278	0.000***
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.660	0.263	0.012*
Τύπος πρώτου οχήματος, AV L3 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.792	0.265	0.003**
Τύπος πρώτου οχήματος, I.X. [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-6.922	2.446	0.005**
Τύπος πρώτου οχήματος, Μοτοσικλέτα [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-7.143	2.466	0.004**
Τύπος πρώτου οχήματος, Φορτηγό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-6.849	2.447	0.005**
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L2 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.129	0.154	0.405
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L2 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.125	0.160	0.435
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Νευρικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.194	0.160	0.225
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Κανονικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	-0.027	0.148	0.858
Τύπος δεύτερου οχήματος, AV L3 Παθητικό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.087	0.175	0.617
Τύπος δεύτερου οχήματος, Λεωφορείο [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.393	0.220	0.074.
Τύπος δεύτερου οχήματος, Μοτοσικλέτα [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.268	0.128	0.037*
Τύπος δεύτερου οχήματος, Φορτηγό [Αναφ.: AV L2 Νευρικό]	0.039	0.066	0.560

Significance codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Αναφ.: Αναφορά

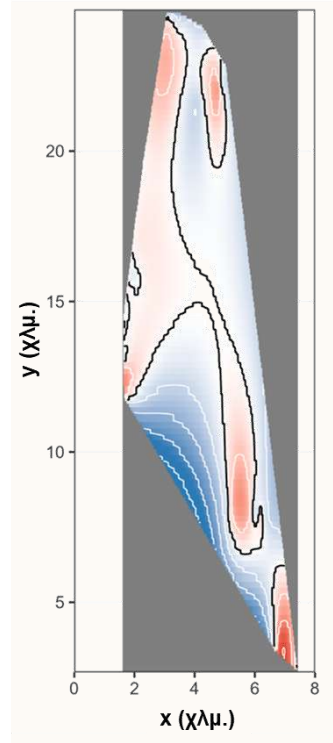
- Οι **μεταβάσεις ανάληψης ελέγχου κυριαρχούν** στα αποτελέσματα ασφάλειας, καθώς η ίδια η παρουσία ενός TOR, και όχι η συγκεκριμένη διάρκεια του time budget, οδηγεί στις ισχυρότερες μειώσεις του TTC.
- Ο **αυτοματισμός βελτιώνει τα χρονικά περιθώρια ασφάλειας**, με τα αυτοματοποιημένα οχήματα να εμφανίζουν υψηλότερες τιμές TTC σε σχέση με τα συμβατικά, ενώ το Νευρικό προφίλ στο Επίπεδο 2 παραμένει το πιο κρίσιμο μεταξύ των αυτοματοποιημένων προφίλ.
- Τα **σενάρια TOR μειώνουν το TTC**, καθώς οι συνθήκες κλειστής λωρίδας και η έξοδος ODD παράγουν συστηματικά πιο κρίσιμες εμπλοκές σε σύγκριση με το σενάριο baseline.

Χωρικοί και γεωμετρικοί παράγοντες της σοβαρότητας συγκρούσεων

- Η **γωνία εμπλοκής** επηρεάζει το TTC, με πιο ευθυγραμμισμένες τροχιές να συνδέονται με μικρότερα χρονικά περιθώρια, εντός του εύρους που παρατηρείται στον αυτοκινητόδρομο.
- Ο **κίνδυνος ασφάλειας παρουσιάζει έντονη χωρική διασπορά** κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου, αντανακλώντας τοπικά χαρακτηριστικά, δραστηριότητα συγχωνεύσεων και τη σύνθεση της κυκλοφορίας, και όχι ομοιόμορφη συμπεριφορά σε επίπεδο δικτύου.
- Οι χαμηλότερες τιμές TTC **συγκεντρώνονται κυρίως στη ζώνη TOR** και στα τμήματα με λωρίδες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.



Χωρική εξομάλυνση $s(x, y)$



Προβλεπόμενο TTC ανά συμβάν



Πίνακας: Στατιστικά στοιχεία των όρων εξομάλυνσης (smooth terms) του μοντέλου GAM.

Όροι Εξομάλυνσης	EDF	Ref. DF	F-value	p-value
s(Γωνία Εμπλοκής)	6.836	11.000	11.266	0.000***
s(Χωρικές Συντεταγμένες)	45.429	198.000	2.257	0.000***

Significance codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

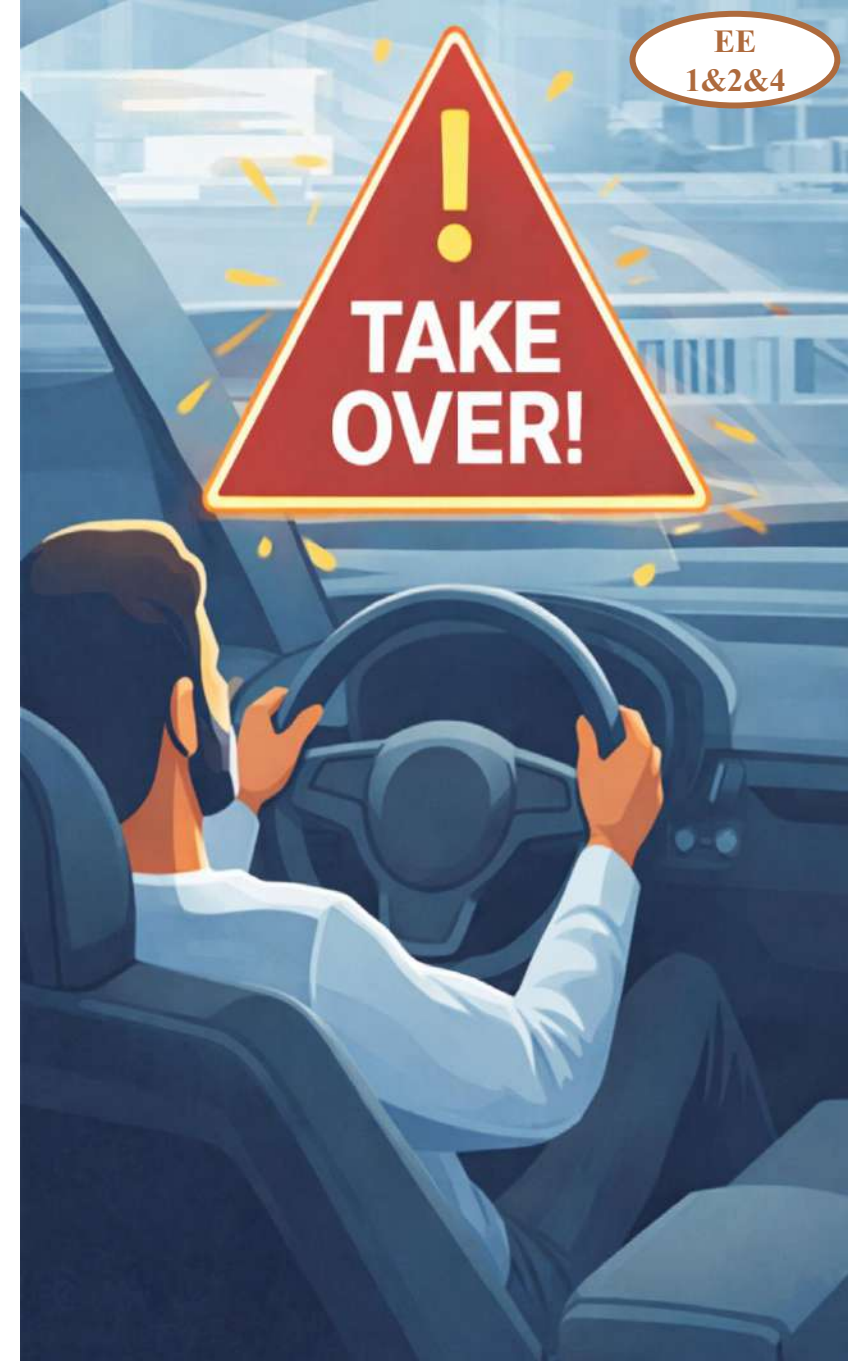


Συμπεράσματα και Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα

Συμπεράσματα

Βασικά Ευρήματα - Τι Διαμορφώνει την Απόδοση Ανάληψης Ελέγχου;

- Η απόδοση ανάληψης ελέγχου διαμορφώνεται από **το περιβάλλον, τον σχεδιασμό του συστήματος και την κατάσταση του οδηγού**, και όχι μόνο από τις οδηγικές ικανότητες.
- Το **Επίπεδο 3** μεταβάλλει τη διαδικασία μετάβασης, επεκτείνοντας τον έλεγχο του συστήματος κατά το παράθυρο ανάληψης και επιτρέποντας δευτερεύουσες δραστηριότητες, γεγονός που αυξάνει τόσο τον TOT όσο και τη διακύμανσή του.
- **Μεγαλύτερος διαθέσιμος χρόνος** (time budget) οδηγούν συστηματικά σε μεγαλύτερο TOT, καθώς οι οδηγοί αξιοποιούν τον διαθέσιμο χρόνο για γνωστική επεξεργασία.
- Ο **προηγμένος σχεδιασμός διεπαφής HMI** αναδιαρθρώνει μετάβαση, με την καθοδήγηση να μειώνει τις καθυστερήσεις επίγνωσης και να προάγει πιο ομαλή και λιγότερο βεβιασμένη επανάκτηση του ελέγχου.



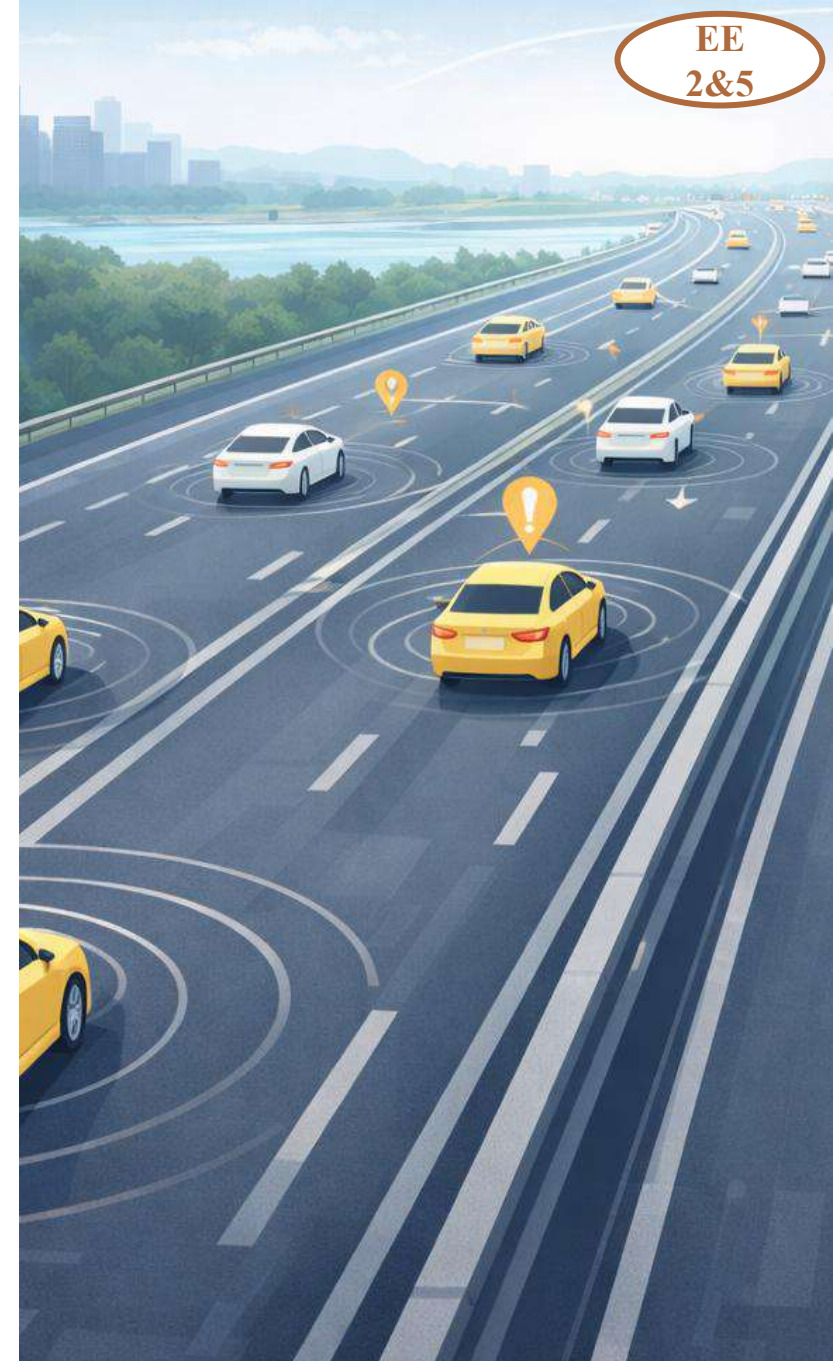
Βασικά Ευρήματα - Γιατί ο ΤΟΤ από μόνος του δεν Εξηγεί την Ασφάλεια;

- Ίδια **σενάρια TOR** και **διαθέσιμος χρόνος** οδηγούν σε διαφορετικά προφίλ οδήγησης μετά την ανάληψη ελέγχου, Παθητικό-Αργό, Νευρικό-Μέτριο και Κανονικό-Γρήγορο, τα οποία αντανακλούν ουσιαστικές διαφορές στην ποιότητα ελέγχου.
- Το **Νευρικό προφίλ στο Επίπεδο 2** χαρακτηρίζεται από απότομους χειρισμούς και τις χαμηλότερες τιμές TTC, παρά τον μέτριο χρόνο ανάληψης ελέγχου, ενώ το Κανονικό προφίλ διατηρεί σταθερό έλεγχο ακόμη και με μικρότερο ΤΟΤ.
- Η **υποστήριξη μέσω HMI** μετατοπίζει τους οδηγούς προς πιο ελεγχόμενα συμπεριφορικά προφίλ, χωρίς ωστόσο να εξαλείφει τη συμπεριφορική ποικιλία.



Βασικά Ευρήματα - Επιπτώσεις Ασφάλειας σε Επίπεδο Δικτύου

- Τα **γεγονότα ανάληψης ελέγχου** κυριαρχούν στην ασφάλεια του δικτύου, καθώς οι μειώσεις του TTC οφείλονται κυρίως στη μετάβαση του αυτοματισμού και όχι στη συγκεκριμένη διάρκεια του διαθέσιμου χρονικού περιθωρίου.
- Τα **αυτοματοποιημένα οχήματα** εμφανίζουν υψηλότερες και συνεπώς ασφαλέστερες τιμές TTC σε σχέση με τα συμβατικά, ανεξαρτήτως προφίλ συμπεριφοράς.
- Η **χωρική μοντελοποίηση** αναδεικνύει τα σημεία του δικτύου όπου τα χρονικά περιθώρια ασφαλείας μειώνονται, συνδέοντας τις TOR με συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου και όχι με μεμονωμένα γεγονότα.



1. Ενοποιημένο πολυ-επίπεδο πλαίσιο ανάλυσης ανάληψης ελέγχου

2. Ερμηνεύσιμη μηχανική μάθηση για την επίδοση της ανάληψης ελέγχου

3. Προσομοίωση κυκλοφορίας και χωρική ανάλυση εναλλακτικών δεικτών εκτίμησης της ασφάλειας

4. Συστηματική σύνθεση και αναγνώριση προφίλ συμπεριφοράς οδήγησης

- Εξήχθησαν τρία προφίλ οδήγησης Παθητικό-Αργό, Νευρικό-Μέτριο, Κανονικό-Γρήγορο, με διακριτές τιμές σε χρόνο ανάληψης, μοτίβα ταχύτητας και επιτάχυνσης.
- Τα αποτελέσματα σεναρίων δείχνουν ότι ο μεγαλύτερος διαθέσιμος χρόνος αυξάνει τη διάρκεια ανάληψης ελέγχου, ο υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος μειώνει τον χρόνο απόκρισης, και τα ερεθίσματα από πολλαπλές αισθητηριακές μορφές επιταχύνουν την απόκτηση επίγνωσης της κατάστασης.

5. Εμπειρικά ευρήματα για το επίπεδο αυτοματισμού, τη διεπαφή ΗΜΙ και τη συμπεριφορά του οδηγού

- Το επίπεδο αυτοματισμού 3 εμφανίζει μεγαλύτερους και πιο μεταβλητούς χρόνους ανάληψης ελέγχου, ενώ η προηγμένη διεπιφάνεια παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο ανάληψης, μικρότερη απόσπαση, πιο σταθερό πλευρικό έλεγχο και λιγότερα συμβάντα κυκλοφοριακών εμπλοκών.
- Όλα τα προφίλ αυτόνομων οχημάτων (AV) εμφανίζουν ασφαλέστερες τιμές TTC σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, με το Νευρικό-Μέτριο προφίλ επιπέδου 2 να παρουσιάζει τις πιο κρίσιμες εμπλοκές μεταξύ των AVs.

Περιορισμοί

- Τα δεδομένα που προέρχονται από προσομοιωτή ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως τη **μεταβλητότητα της πραγματικής οδηγικής συμπεριφοράς** και της δυναμικής της κυκλοφορίας.
- Μεμονωμένα γεγονότα ανάληψης ελέγχου δεν επαρκούν για την καταγραφή **φαινομένων μάθησης, προσαρμογής και μακροχρόνιας αλληλεπίδρασης** με τον αυτοματισμό.
- Η εστίαση σε έναν μόνο αυτοκινητόδρομο περιορίζει τα **μεταφέριμα αποτελέσματα** σε άλλα οδικά περιβάλλοντα και δομές δικτύου.
- Η επικύρωση με πραγματικά δεδομένα και η εφαρμογή σε **μεγαλύτερα και πιο σύνθετα δίκτυα** θα μπορούσαν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη στη γενίκευση των ευρημάτων.



Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

- Συνδυασμός **πραγματικών δεδομένων ανάληψης ελέγχου** με προσομοιώσεις, ώστε να επικυρωθούν οι δυναμικές της μετάβασης υπό πραγματικές κυκλοφοριακές συνθήκες.
- Ανάπτυξη **προσαρμοστικών στρατηγικών αιτήματος ανάληψης ελέγχου (TOR) και διεπαφής HMI**, βασισμένων στο προφίλ του οδηγού, την επίγνωση του περιβάλλοντος και την προγνωστική λειτουργία του αυτοματισμού.
- Επέκταση της ανάλυσης ανάληψης ελέγχου σε **άλλους τύπους οχημάτων**, όπως βαρέα οχήματα, λεωφορεία και αλληλεπιδράσεις μικτών στόλων, ώστε να αξιολογηθεί εάν οι παρατηρούμενες δυναμικές και επιδράσεις στην ασφάλεια γενικεύονται πέραν των επιβατικών οχημάτων.
- **Γεφύρωση αντικειμενικών δεικτών ασφάλειας** με την υποκειμενική εμπειρία του οδηγού, με στόχο μια πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ποιότητας της ανάληψης ελέγχου.





Διδακτορική Διατριβή

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

Μάριος Σεκαδάκης
Υποψήφιος Διδάκτορας

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Γκιτσιάλιτης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ
Άγγελος Αμδίτης, Διευθυντής Έρευνας ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ

23 Ιανουαρίου 2026, Αθήνα

