

Εκτεταμένη Περίληψη

Στόχοι και Μεθοδολογία

Η οδική ασφάλεια αποτελεί κρίσιμο ζήτημα δημόσιας υγείας και κοινωνίας, καθώς τα οδικά ατυχήματα κοστίζουν εκατομμύρια ζωές και προκαλούν σοβαρούς τραυματισμούς παγκοσμίως κάθε χρόνο. Πέρα από την τραγική απώλεια ζωών, αυτά τα περιστατικά επιβαρύνουν συναισθηματικά και οικονομικά τις οικογένειες και τις κοινότητες. Έρευνες δείχνουν ότι **το ανθρώπινο λάθος ευθύνεται για περίπου το 95% των οδικών ατυχημάτων**, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο της συμπεριφοράς των οδηγών στην πρόληψη των ατυχημάτων. Η κατανόηση και αντιμετώπιση επικίνδυνων οδηγικών συμπεριφορών—όπως η απόσπαση προσοχής, η υπερβολική ταχύτητα και τα απότομα συμβάντα—είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

Με βάση τα παραπάνω, **ο κύριος στόχος αυτής της διατριβής είναι η διερεύνηση του μηχανισμού ανατροφοδότησης της συμπεριφοράς των οδηγών μέσω τηλεματικής** στο πλαίσιο της οδηγικής συμπεριφοράς και της οδικής ασφάλειας. Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον από κατασκευαστές αυτοκινήτων και ερευνητές μεταφορών για τη συμπεριφορά των οδηγών, υπάρχει περιορισμένη έρευνα σχετικά με την ποσοτικοποίηση της συνολικής επίδρασης της ανατροφοδότησης κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής της—συμπεριλαμβανομένων των φάσεων πριν την ανατροφοδότηση, κατά τη διάρκεια της ανατροφοδότησης και μετά την ανατροφοδότηση. Για να καλυφθεί αυτό το κενό, η διατριβή υιοθετεί μια **ολιστική προσέγγιση για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της ανατροφοδότησης** στην τροποποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς και στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, εφαρμόστηκε μια **σειρά μεθοδολογικών βημάτων**. Τα βήματα αυτά περιγράφονται και απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα I. Το μεθοδολογικό πλαίσιο παρέχει μια δομημένη προσέγγιση για την επίτευξη των στόχων της διατριβής.

Ως πρώτο βήμα, πραγματοποιήθηκε μια **συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας** για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της ανατροφοδότησης των οδηγών στο πλαίσιο φυσικών πειραμάτων οδήγησης. Οι μέθοδοι ανατροφοδότησης έχουν εξελιχθεί από συσκευές εντός οχήματος και αναφορές σε προηγμένες, φιλικές προς τον χρήστη εφαρμογές για κινητά τηλέφωνα. Αυτές οι εξελίξεις επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης και την παροχή εξατομικευμένης ανατροφοδότησης βασισμένης σε δεδομένα.

Ωστόσο, **παραμένουν σημαντικά κενά όσον αφορά τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα αυτών των αποτελεσμάτων αλλά και τις διαφοροποιημένες επιδράσεις** των χαρακτηριστικών της ανατροφοδότησης. Ενώ οι μελέτες αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της ανατροφοδότησης στη μείωση της υπερβολικής ταχύτητας, των απότομων συμβάντων και της χρήσης κινητού τηλεφώνου, η επίδραση του τύπου ανατροφοδότησης, της συχνότητάς της και των κινήτρων στη συμπεριφορά παραμένει ανεξερεύνητη. Επιπλέον, πολλές μελέτες παρατηρούν υποτροπή στις επικίνδυνες συμπεριφορές μόλις αφαιρεθεί η ανατροφοδότηση, απαιτώντας περαιτέρω διερεύνηση.

Με βάση τα αποτελέσματα της συστηματικής ανασκόπησης βιβλιογραφίας, διατυπώθηκαν τα ακόλουθα **ερευνητικά ερωτήματα**:

1. Πώς επηρεάζει η ανατροφοδότηση τη συμπεριφορά του οδηγού όσον αφορά στην υπερβολική ταχύτητα και τη χρήση κινητού τηλεφώνου κατά την οδήγηση;
2. Πώς επηρεάζει η ανατροφοδότηση την ασφάλεια του οδηγού όσον αφορά στα απότομα συμβάντα, όπως οι απότομες επιταχύνσεις και τα απότομα φρεναρίσματα;
3. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της ανατροφοδότησης (π.χ. βαθμολογίες, χάρτες, συγκρίσεις με άλλους οδηγούς, κίνητρα, παιχνιδοποίηση, επιβραβεύσεις) έχουν διαφορετικές επιδράσεις στη συμπεριφορά και την ασφάλεια του οδηγού; Ποιο χαρακτηριστικό έχει τον σημαντικότερο αντίκτυπο;
4. Πώς επηρεάζει η επίδραση της ανατροφοδότησης μετά την ολοκλήρωση της φάσης της την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά και ασφάλεια των οδηγών, και σε ποιο βαθμό διατηρούνται οι αλλαγές αφού αφαιρεθεί η ανατροφοδότηση;
5. Πώς μπορούν να εφαρμοστούν προηγμένες στατιστικές τεχνικές για την κατανόηση των μηχανισμών της ανατροφοδότησης και την ανάπτυξη πιο εξατομικευμένων, βασισμένων σε δεδομένα προσεγγίσεων για την αλλαγή της οδηγικής συμπεριφοράς;

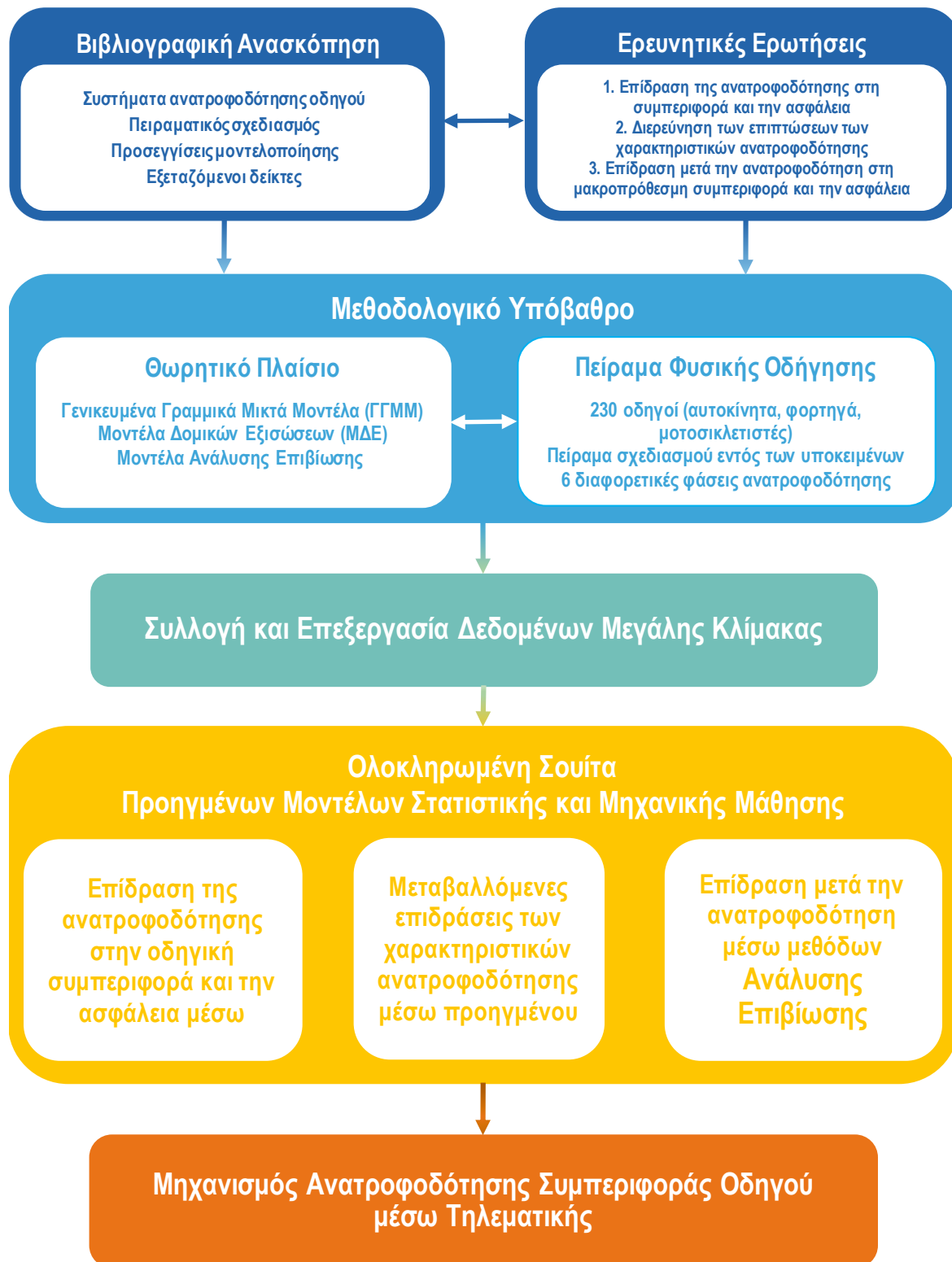
Για την απάντηση αυτών των ερωτημάτων αναπτύχθηκε ένα ισχυρό μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο συνδύασε θεωρητικές προσεγγίσεις και αρχές πειραματικού σχεδιασμού. Αυτό περιλάμβανε την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών μοντελοποίησης, όπως Γενικευμένα Γραμμικά Μοντέλα Μικτών αποτελεσμάτων (ΓΓΜΜs), Μοντέλα Δομικών Εξισώσεων (ΜΔΕ) και Μοντέλα Ανάλυσης Επιβίωσης, καθώς και τον σχεδιασμό ενός πειράματος φυσικής οδήγησης.

Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα φυσικής οδήγησης διάρκειας 21 μηνών, στο οποίο συμμετείχαν **230 οδηγοί**. Οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες (οδηγοί αυτοκινήτων, επαγγελματίες οδηγοί βαν και μοτοσυκλετιστές) και η οδηγική τους συμπεριφορά παρακολούθηθηκε σε έξι διακριτές φάσεις ανατροφοδότησης. Αυτές οι φάσεις ορίστηκαν ως εξής:

- Φάση 1: Πρόσβαση σε βασικά δεδομένα διαδρομών και χαρακτηριστικά.
- Φάση 2: Εισαγωγή βαθμολογιών με σκορ ανά διαδρομή.
- Φάση 3: Προσθήκη χαρτών και επισήμανση επικίνδυνων συμπεριφορών για περαιτέρω πληροφορίες διαδρομής.
- Φάση 4: Ενεργοποίηση συγκρίσεων με συναδέλφους για την αξιολόγηση της απόδοσης των οδηγών.
- Φάση 5: Εισαγωγή διαγωνισμών και προκλήσεων με επιβραβεύσεις για ασφαλή οδήγηση.
- Φάση 6: Επιστροφή στη Φάση 1, με την αφαίρεση όλων των πρόσθετων χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης.

Συλλέχθηκαν **δεδομένα υψηλής ανάλυσης από 106.776 διαδρομές**, καλύπτοντας συνολικά **1.317.573 χιλιόμετρα** και **30.532 ώρες οδήγησης**. Οι μετρήσεις συμπεριφοράς καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας μη παρεμβατικούς αισθητήρες smartphone, διασφαλίζοντας μια αδιάκοπη και

ακριβή καταγραφή των οδηγικών συμπεριφορών. Αυτά τα δεδομένα αισθητήρων συμπληρώθηκαν από αυτό-αναφερόμενες πληροφορίες των συμμετεχόντων, παρέχοντας μια ολιστική κατανόηση των αντιλήψεων, συνηθειών και αλλαγών στη συμπεριφορά των οδηγών. **Ο πειραματικός σχεδιασμός τηρήθηκε αυστηρά στις ηθικές προδιαγραφές**, καθώς είχε εγκριθεί από την Επιτροπή Ερευνών και Δεοντολογίας του ΕΜΠ, και διασφάλιζε την πλήρη συμμόρφωση με τις κατευθυντήριες γραμμές του Γενικού Κανονισμού για την Προστασία των Δεδομένων. Η συνεχής επικοινωνία με τους συμμετέχοντες διατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης για την επίλυση τεχνικών ζητημάτων, τη διατήρηση της συμμετοχής και την παρακολούθηση της ομαλής εκτέλεσης του πειράματος.



Εικόνα Ι: Γραφική αναπαράσταση του συνολικού μεθοδολογικού πλαισίου της διδακτορικής διατριβής

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε **επεξεργασία και καθαρισμός δεδομένων** εκτενώς για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η αξιοπιστία του συνόλου δεδομένων. Τα άκυρα ή ελλιπή δεδομένα διαδρομών εντοπίστηκαν συστηματικά και εξαιρέθηκαν, ενώ βασικές μετρήσεις συμπεριφοράς όπως η υπερβολική ταχύτητα, η χρήση κινητού τηλεφώνου κατά την οδήγηση, οι απότομες επιταχύνσεις και τα απότομα φρεναρίσματα τυποποιήθηκαν για την ανάλυση. Τα βήματα προ επεξεργασίας δεδομένων περιλάμβαναν τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων των αισθητήρων σε ουσιαστικές μεταβλητές και την ενσωμάτωση των αυτό-αναφερόμενων δεδομένων για τον εμπλουτισμό των αναλύσεων. Αυτή η αυστηρή προσέγγιση στη διαχείριση δεδομένων επέτρεψε τη δημιουργία ενός ισχυρού συνόλου δεδομένων, διευκολύνοντας λεπτομερείς στατιστικές αναλύσεις και διασφαλίζοντας την ακρίβεια των ευρημάτων που παρουσιάζονται στη διατριβή.

Προηγμένες στατιστικές τεχνικές εφαρμόστηκαν για την ανάλυση των επιδράσεων της ανατροφοδότησης σε κρίσιμους δείκτες οδήγησης, όπως η υπερβολική ταχύτητα, η χρήση κινητού τηλεφώνου, οι απότομες επιταχύνσεις και τα απότομα φρεναρίσματα. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε **τρεις βασικούς πυλώνες**:

1. **Επίδραση της Ανατροφοδότησης:** Αυτός ο πυλώνας αξιολόγησε τις άμεσες επιδράσεις της ανατροφοδότησης i) στη συμπεριφορά του οδηγού, με έμφαση στην υπερβολική ταχύτητα για τους μοτοσικλετιστές και την απόσπαση προσοχής λόγω χρήσης κινητού τηλεφώνου για οδηγούς αυτοκινήτων, και ii) στην ασφάλεια των οδηγών, με έμφαση στα απότομα φρεναρίσματα και επιταχύνσεις για οδηγούς αυτοκινήτων και επαγγελματίες οδηγούς σε αυτοκινητόδρομους. Χρησιμοποιήθηκαν Γενικευμένα Γραμμικά Μικτά Μοντέλα (ΓΓΜΜ) για την αξιολόγηση των επιδράσεων της ανατροφοδότησης, λαμβάνοντας υπόψη τις ατομικές διαφορές και τους συμφραζόμενους παράγοντες.
2. **Διαφοροποιημένες Επιδράσεις των Χαρακτηριστικών Ανατροφοδότησης:** Αναπτύχθηκε ένα Μοντέλο Δομικών Εξισώσεων (ΜΔΕ) για την εξερεύνηση των πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης (π.χ. βαθμολογίες, χάρτες, συγκρίσεις με άλλους οδηγούς, κίνητρα, παιχνιδιοποίηση, επιβραβεύσεις), μετρικών έκθεσης και αποτελεσμάτων ασφάλειας. Το μοντέλο επέτρεψε την ταυτόχρονη ανάλυση πολλών μεταβλητών και των αλληλεπιδράσεών τους.
3. **Επιδράσεις Μετά την Ανατροφοδότηση:** Μελέτη των μακροπρόθεσμων αλλαγών στη συμπεριφορά και ασφάλεια των οδηγών, με ιδιαίτερη έμφαση στην υποτροπή των συμπεριφορών οδήγησης μετά την απόσυρση της ανατροφοδότησης κατά την τελευταία φάση του πειράματος. Χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι Ανάλυσης Επιβίωσης για την εξέταση μοτίβων υποτροπής σε διάφορους δείκτες, όπως οι απότομες επιταχύνσεις, τα απότομα φρεναρίσματα, η υπερβολική ταχύτητα και η χρήση κινητού τηλεφώνου κατά την οδήγηση. Αυτές οι αναλύσεις βασίστηκαν σε καμπύλες Kaplan-Meier, μοντέλα Cox-PH με παραγοντική τυχαιότητα, μοντέλα Επιταχυνόμενου Χρόνου Αποτυχίας (Weibull AFT) με ετερογένεια, και Τυχαία Δάση Επιβίωσης για την αξιολόγηση και σύγκριση της προβλεπτικής ικανότητας και των ευρημάτων κάθε μοντέλου.

Η σύνθεση όλων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διατριβής κατέληξε σε έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης συμπεριφοράς του οδηγού με πολυάριθμα πρωτότυπα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία συζητούνται παρακάτω.

Κύρια Ευρήματα

Επίδραση Ανατροφοδότησης στη Συμπεριφορά και την Ασφάλεια των Οδηγών

Η διερεύνηση των επιπτώσεων της ανατροφοδότησης στη συμπεριφορά και την ασφάλεια των οδηγών απέδωσε σημαντικά ευρήματα σε διαφορετικές ομάδες χρηστών, περιβάλλοντα οδήγησης και μετρικές συμπεριφοράς. Συνολικά, κατά τη διάρκεια των δύο φάσεων του πειράματος καταγράφηκε και αναλύθηκε ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων **3.537 διαδρομών από ένα δείγμα 13 μοτοσικλετιστών**. Η χρήση Γενικευμένων Γραμμικών Μοντέλων Μεικτών (ΓΓΜΜ) αποτελεσμάτων με τυχαίες παρεμβολές και τυχαίες κλίσεις για τη συνολική διάρκεια του ταξιδιού αποκάλυψε ότι η παροχή ανατροφοδότησης στους μοτοσικλετιστές σχετικά με τις επιδόσεις οδήγησής τους κατά τη διάρκεια της φάσης 2 του πειράματος οδήγησε σε **στατιστικά σημαντική μείωση του ποσοστού υπερβολικής ταχύτητας κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού**. Ειδικότερα, στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν η ανατροφοδότηση του αναβάτη φαίνεται να μειώνει το ποσοστό υπερβολικής ταχύτητας, έχοντας λόγο κινδύνου $\exp(\beta=-0,145) = 0,865$ για το συνολικό μοντέλο (μείωση 13,5%) και $\exp(\beta=-0,031) = 0,970$ και $\exp(\beta=-0,420) = 0,657$ για τους αστικούς (μείωση 3,0%) και αγροτικούς (34,3%) τύπους δρόμων αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της ανατροφοδότησης στη στόχευση συμπεριφορών υψηλού κινδύνου, προσφέροντας μια βάση για επεκτάσιμες παρεμβάσεις στην εκπαίδευση των αναβατών και στο σχεδιασμό πολιτικής.

Αντίστοιχα, η **απόσπαση προσοχής, συγκεκριμένα λόγω χρήσης κινητού τηλεφώνου**, εξετάστηκε σε αστικά και υπεραστικά περιβάλλοντα και αυτοκινητόδρομους μέσω μοντέλων ΓΓΜΜ για **65 οδηγούς αυτοκινήτων σε 21.167 διαδρομές**. Η ανατροφοδότηση προέκυψε ως ισχυρός περιοριστικός παράγοντας στη χρήση κινητού τηλεφώνου κατά την οδήγηση συνολικά ($\beta = -0,4276$, $p < 2e-16$), ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα ($\beta = -0,3687$, $p < 2e-16$). Ωστόσο, η επίδρασή της ήταν ασθενέστερη σε υπεραστικά περιβάλλοντα ($\beta = -0,1180$, $p < 2e-16$) και απροσδόκητα θετική σε αυτοκινητόδρομους ($\beta = 0,5490$, $p < 2e-16$), υποδεικνύοντας αντισταθμιστικές συμπεριφορές ή μια μειωμένη αντιληπτή επικινδυνότητα απόσπασης σε οδικούς άξονες υψηλής ταχύτητας. Η σημαντική μεταβλητότητα στους τυχαίους συντελεστές ($SD = 1,402$ συνολικά) υπογραμμίζει τις σημαντικές ατομικές διαφορές στη βασική συμπεριφορά, ενώ οι τυχαίες κλίσεις για τη διάρκεια διαδρομής ($SD = 0,282$ συνολικά) δείχνουν ποικίλες αντιδράσεις σε παρατεταμένες διαδρομές.

Στον τομέα των απότομων συμβάντων, όπως οι επιταχύνσεις και τα φρεναρίσματα, οι μηχανισμοί ανατροφοδότησης έδειξαν επίσης σημαντικές βελτιώσεις στη συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα από την **ανάλυση 65 οδηγών αυτοκινήτων** κατά τις πρώτες δύο φάσεις του πειράματος αποκάλυψαν **σημαντική μείωση στις απότομες επιταχύνσεις (12%) και στα απότομα φρεναρίσματα (10%)**, και οι δύο αλλαγές ήταν στατιστικά σημαντικές ($p < 0,001$). Τα μοντέλα ΓΓΜΜ ενισχύουν περαιτέρω αυτά τα ευρήματα, καθώς η ανατροφοδότηση συνδέθηκε σταθερά με μειωμένες συχνότητες απότομων γεγονότων, ιδιαίτερα σε αστικά και υπεραστικά περιβάλλοντα. Σημαντικό είναι ότι οι δείκτες σχετικού κινδύνου για τη διάρκεια της ταχύτητας

και της διαδρομής υποδεικνύουν ισχυρές θετικές συσχετίσεις με τα απότομα γεγονότα, αν και η ανατροφοδότηση φαίνεται να μετριάζει αυτές τις επιδράσεις σε κάποιο βαθμό κατά τη Φάση 2 του πειράματος.

Οι επαγγελματίες οδηγοί, λόγω των παρατεταμένων ωρών και αποστάσεων οδήγησης, αποτέλεσαν επίσης βασικό πεδίο εξερεύνησης. Χρησιμοποιώντας μοντέλα ΓΓΜΜ που βαθμονομήθηκαν σε ένα σύνολο δεδομένων από 5.345 διαδρομές από 19 επαγγελματίες οδηγούς, η ανάλυση αποκάλυψε ότι η συμμετοχή σε ένα **κοινωνικό πλαίσιο παιχνιδοποίησης με κίνητρα οδήγησε σε αξιοσημείωτες βελτιώσεις στα απότομα συμβάντα των επαγγελματιών οδηγών**. Κατά τη φάση του διαγωνισμού, η πιθανότητα απότομων επιταχύνσεων μειώθηκε κατά έναν συντελεστή ($\beta = 0,348$, $p < 0,001$), ενώ τα απότομα φρεναρίσματα μειώθηκαν κατά έναν συντελεστή ($\beta = 0,404$, $p < 0,001$), υποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της παιχνιδοποίησης στην προώθηση ασφαλέστερων πρακτικών οδήγησης. Επιπλέον, η διάρκεια της διαδρομής παρουσίασε θετική συσχέτιση με τα απότομα γεγονότα, καθώς η αύξηση της διάρκειας οδήγησης κατά 1 δευτερόλεπτο αύξησε τις πιθανότητες απότομων επιταχύνσεων και φρεναρισμάτων κατά 1,558 και 1,564, αντίστοιχα, αναδεικνύοντας τις σωρευτικές επιδράσεις της παρατεταμένης οδήγησης. Η ενσωμάτωση τυχαίων μεταβλητών στα μοντέλα ανέδειξε σημαντική μεταβλητότητα στη βασική οδηγική συμπεριφορά, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για εξατομικευμένες παρεμβάσεις.

Διαφοροποιημένες Επιδράσεις των Χαρακτηριστικών Ανατροφοδότησης στη Συμπεριφορά και την Ασφάλεια των Οδηγών

Η **ανάλυση μέσω του Μοντέλου Δομικών Εξισώσεων (ΜΔΕ)** παρείχε σημαντικές γνώσεις για την επίδραση των διαφοροποιημένων χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης στη συμπεριφορά και την ασφάλεια των οδηγών, συγκεκριμένα στην υπερβολική ταχύτητα, τα απότομα φρεναρίσματα και τις απότομες επιταχύνσεις. Το σύνολο δεδομένων, που περιλάμβανε **73.869 διαδρομές από 175 οδηγούς αυτοκινήτων για διάστημα 21 μηνών**, προσέφερε μια ισχυρή βάση δεδομένων για τη μοντελοποίηση. Τα αποτελέσματα του ΜΔΕ εντόπισαν δύο λανθάνουσες μεταβλητές, δηλαδή την ανατροφοδότηση και την έκθεση ως κρίσιμες επιρροές. Το μοντέλο παρουσίασε άριστα μέτρα καλής προσαρμογής, με δείκτη συγκριτικής προσαρμογής (CFI) = 0,940, δείκτη Tucker-Lewis (TLI) = 0,944, μέσο τετραγωνικό σφάλμα προσέγγισης (RMSEA) = 0,049 και τυποποιημένο μέσο τετραγωνικό υπόλοιπο (SRMR) = 0,025 υποδεικνύοντας μια ισχυρή και καλά καθορισμένη δομή.

Μεταξύ των χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης που αναλύθηκαν, η **Κάρτα αποτελεσμάτων αναδείχθηκε ως το πιο επιδραστικό χαρακτηριστικό**, με την υψηλότερη θετική εκτίμηση ($\beta = 2,076$, $p < 0,001$), αποδεικνύοντας τον ισχυρό του ρόλο στην προώθηση ασφαλέστερων συνηθειών οδήγησης μέσω της άμεσης τροποποίησης επικίνδυνων συμπεριφορών. Παρομοίως, το χαρακτηριστικό των χαρτών έδειξε ισχυρή επίδραση ($\beta = 1,646$, $p < 0,001$), τονίζοντας τη σημασία της χωρικής επίγνωσης για τη βελτίωση των πρακτικών οδήγησης. Η λειτουργία σύγκρισης με άλλους οδηγούς (peer comparison) επηρέασε θετικά τη συμπεριφορά ($\beta = 1,215$, $p < 0,001$), ενώ **τα χαρακτηριστικά των διαγωνισμών και προκλήσεων αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικά** ($\beta = ,053$, $p < 0,001$) ενισχύοντας τους οδηγούς να υιοθετήσουν ασφαλέστερες οδηγικές συμπεριφορές μέσω παιχνιδοποίησης.

Σε ό,τι αφορά τις μετρικές οδηγικής συμπεριφοράς, η ανατροφοδότηση μέσω τηλεματικής **μείωσε σημαντικά τον χρόνο υπερβολικής ταχύτητας** ($\beta = -0,214$, $p < 0,001$) **και τα απότομα φρεναρίσματα** ($\beta = -0,027$, $p < 0,001$). Ωστόσο, **μία αύξηση στις απότομες επιταχύνσεις** ($\beta = 0,026$, $p < 0,001$) υποδηλώνει την ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης των συστημάτων ανατροφοδότησης για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων συνεπειών. Οι παράγοντες έκθεσης διαδραμάτισαν επίσης σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς των οδηγών, με την έκθεση στην πρωινή αιχμή να συσχετίζεται με αυξημένη ανάληψη κινδύνου ($\beta = 2,473$, $p < 0,001$), πιθανότατα λόγω της πίεσης του χρόνου κατά τις ώρες μετακίνησης. Αντίθετα, η έκθεση στην απογευματινή αιχμή συσχετίστηκε με λιγότερο επιθετική συμπεριφορά ($\beta = -1,360$, $p < 0,001$), παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις χρονικές διακυμάνσεις στα πρότυπα οδήγησης.

Η ανάλυση παλινδρόμησης επιβεβαίωσε αυτά τα ευρήματα, αναδεικνύοντας την **αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών έκθεσης και των χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης**. Ενώ η έκθεση επηρέασε θετικά την υπερβολική ταχύτητα ($\beta = 0,326$, $p < 0,001$), οι μηχανισμοί ανατροφοδότησης μετρίασαν αποτελεσματικά αυτή τη συμπεριφορά. Το χαρακτηριστικό «ανταγωνισμός και προκλήσεις», ειδικότερα, έδειξε υποσχόμενο να μετριάσει τις απότομες επιταχύνσεις ($\beta = -0,001$, $p < 0,001$). Τα περιστατικά απότομου φρεναρίσματος μειώθηκαν επίσης σημαντικά από την ανατροφοδότηση, ενισχύοντας το ρόλο της ανατροφοδότησης στην προώθηση ασφαλέστερων οδηγικών πρακτικών. Η ανάλυση συνδιακύμανσης αποκάλυψε περαιτέρω ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ επικίνδυνων συμπεριφορών, όπως η υπερβολική ταχύτητα και το απότομο φρενάρισμα, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένα συστήματα ανατροφοδότησης που αντιμετωπίζουν πολλαπλές πτυχές της συμπεριφοράς του οδηγού.

Οι πρακτικές επιπτώσεις αυτών των ευρημάτων είναι ουσιαστικές. Τα χαρακτηριστικά ανατροφοδότησης, ιδίως εκείνα που αξιοποιούν εξατομικευμένους πίνακες αποτελεσμάτων, χωρικά εργαλεία και στοιχεία παιχνιδοποίησης, υπόσχονται πολλά για τη βελτίωση της ασφάλειας των οδηγών. Οι εξατομικευμένες παρεμβάσεις που στοχεύουν σε συγκεκριμένες συμπεριφορές και ώρες της ημέρας θα μπορούσαν να ενισχύσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων. Ωστόσο, περιορισμοί όπως ο αποκλεισμός της χρήσης κινητού τηλεφώνου από το τελικό μοντέλο και οι πιθανές μεροληψίες επιλογής λόγω της εθελοντικής φύσης της συμμετοχής θα πρέπει να αντιμετωπιστούν σε μελλοντικές έρευνες.

Μετά την Ανατροφοδότηση Επιδράσεις στη Μακροπρόθεσμη Συμπεριφορά και Ασφάλεια των Οδηγών

Οι **τεχνικές Ανάλυσης Επιβίωσης** εφαρμόστηκαν σε ένα **σύνολο δεδομένων 24.904 διαδρομών από 31 οδηγούς αυτοκινήτων**, με κάθε οδηγό να έχει υλοποιήσει τουλάχιστον 20 διαδρομές κατά τη φάση μετά την ανατροφοδότηση, για τη διερεύνηση των μακροπρόθεσμων επιδράσεων της τηλεματικής ανατροφοδότησης στη συμπεριφορά του οδηγού. Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε μοτίβα υποτροπής όσον αφορά στη χρήση κινητού τηλεφώνου, την υπερβολική ταχύτητα, τα απότομα φρεναρίσματα και τις απότομες επιταχύνσεις. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν περιλάμβαναν καμπύλες Kaplan-Meier, μοντέλα Cox-PH με frailty, μοντέλα Weibull AFT με ετερογένεια σε ομάδες, και Random Survival Forests. Τα ευρήματα καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων ανατροφοδότησης στην επίτευξη σημαντικών βραχυπρόθεσμων βελτιώσεων συμπεριφοράς κατά τη φάση της ανατροφοδότησης. Ωστόσο, **η φάση μετά την ανατροφοδότηση αποκάλυψε ποικίλες τάσεις υποτροπής**, υπογραμμίζοντας

την ανάγκη για συνεχιζόμενες παρεμβάσεις για τη διατήρηση αυτών των βελτιώσεων με την πάροδο του χρόνου.

Η **ανάλυση επιβίωσης Kaplan-Meier** τόνισε τις **τάσεις υποτροπής**, δείχνοντας μια σταδιακή μείωση της βελτιωμένης συμπεριφοράς στις διαδοχικές διαδρομές κατά τη φάση μετά την ανατροφοδότηση. Για τις απότομες επιταχύνσεις, **οι πιθανότητες επιβίωσης μειώθηκαν από 84,8% στις 50 διαδρομές στο 49,2% στις 150 διαδρομές**. Παρόμοιες τάσεις παρατηρήθηκαν για τα απότομα φρεναρίσματα και την υπερβολική ταχύτητα, με τις πιθανότητες επιβίωσης να μειώνονται περίπου στο 40,3% και 46,8%, αντίστοιχα, έως τη διαδρομή 150. Αυτά τα μοτίβα υπογραμμίζουν τη **μεταβατική φύση των επιδράσεων της ανατροφοδότησης** και την ανάγκη για μηχανισμούς συνεχούς ενίσχυσης. Η χρήση κινητού τηλεφώνου παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, με τις πιθανότητες επιβίωσης να παραμένουν πάνω από 80% στις 100 διαδρομές, αλλά η σταδιακή υποτροπή ήταν εμφανής με την πάροδο του χρόνου.

Μεταξύ των μοντέλων ανάλυσης επιβίωσης που εφαρμόστηκαν, το **μοντέλο Επιταχυνόμενου Χρόνου Αποτυχίας (Weibull AFT)** με **ετερογένεια αναδείχθηκε ως ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο** για την ανάλυση των δυναμικών υποτροπής, ισορροπώντας την προβλεπτική ακρίβεια και την ερμηνευσιμότητα. Οι τιμές C-index κυμάνθηκαν μεταξύ 0,677 και 0,773, με το μοντέλο να επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη προβλεπτική ικανότητα για την υποτροπή στη χρήση κινητού τηλεφώνου (C-index = 0,773), υποδεικνύοντας ισχυρή διακριτική ικανότητα στον εντοπισμό οδηγών με αυξημένο κίνδυνο υποτροπής. Κύριοι προβλεπτικοί παράγοντες όπως η ηλικιακή ομάδα [35-54] ($\beta = 0,165$, $p = 0,041$), η διάρκεια διαδρομής ($\beta = -0,022$, $p < 0,001$), και η αυτοαναφερόμενη επιθετικότητα (πλησιάζοντας τη στατιστική σημαντικότητα στο $p = 0,089$) αναδείχθηκαν, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά υποτροπής. Το μοντέλο επίσης **κατέγραψε ετερογένεια μεταξύ οδηγών μέσω ενσωμάτωσης τυχαίων παραμέτρων**, με τα αποτελέσματα ετερογένειας να δείχνουν σημαντική μεταβλητότητα στους χρόνους επιβίωσης.

Για την υποτροπή στην υπερβολική ταχύτητα, το μοντέλο Weibull AFT πέτυχε C-index = 0,700, με σημαντικούς προβλεπτικούς παράγοντες, όπως η διάρκεια διαδρομής ($\beta = -0,022$, $p < 0,001$) και οι πρωινές ώρες αιχμής ($\beta = -0,096$, $p = 0,004$). **Η διάρκεια διαδρομής αναδείχθηκε ως ο κυρίαρχος προβλεπτικός παράγοντας, μειώνοντας σταθερά τους χρόνους επιβίωσης σε όλους τους δείκτες υποτροπής**, υπογραμμίζοντας τον ρόλο της παρατεταμένης οδήγησης στη συμπεριφορική υποτροπή. Αντίστοιχα, στην ανάλυση υποτροπής των απότομων φρεναρισμάτων, το μοντέλο πέτυχε μέτρια προβλεπτική ακρίβεια (C-index = 0,724) με σημαντικές συνεισφορές από μεταβλητές όπως η ηλικιακή ομάδα [35-54] ($\beta = 0,360$, $p = 0,010$) και η χωρητικότητα κινητήρα (>1400cc) ($\beta = -0,508$, $p = 0,012$). Αυτά τα ευρήματα δείχνουν ότι οι νεότερες ηλικιακές ομάδες και οι οδηγοί οχημάτων με μεγαλύτερους κινητήρες είναι πιο επιρρεπείς σε υποτροπή.

Το **μοντέλο Τυχαίων Δασών Επιβίωσης (Random Survival Forest)** παρουσίασε **ανώτερη προβλεπτική απόδοση** σε ορισμένους εξεταζόμενους δείκτες, διακρινόμενο στην καταγραφή μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων και πολύπλοκων σχέσεων μεταξύ προβλεπτικών παραγόντων. Με τιμές Root Mean Squared Error (RMSE) έως 85,87 και σφάλματα πρόβλεψης εκτός δείγματος (OOB) της τάξης του 24,3% για την υποτροπή στη χρήση κινητού τηλεφώνου, το RSF εντόπισε κρίσιμους προβλεπτικούς παράγοντες, όπως η διάρκεια διαδρομής, οι τάσεις επιθετικής οδήγησης, και το μέγεθος του κινητήρα του οχήματος. Η **ευελιξία του μοντέλου στην επεξεργασία ποικίλων προβλεπτικών παραγόντων** και η αποκάλυψη λεπτομερών δυναμικών το καθιστούν

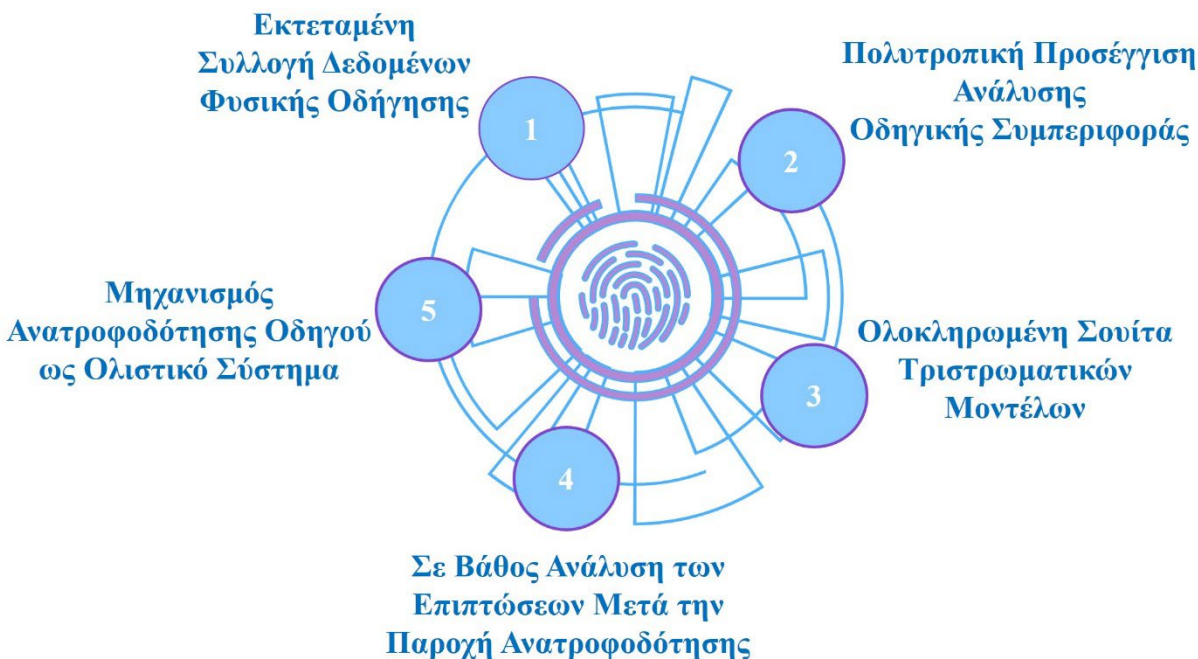
πολύτιμο εργαλείο για προβλεπτικές αναλύσεις. Ωστόσο, η «μαύρο κουτί» φύση του μοντέλου και η εξάρτησή του από μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων περιορίζουν την ερμηνευσιμότητά του και τη χρησιμότητά του για επεξηγηματικούς σκοπούς.

Συνολικά, συγκρίνοντας τα μοντέλα, **το Weibull AFT ξεχωρίζει για την ισορροπία ερμηνευσιμότητας και προβλεπτικής ακρίβειας**, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλοντα που απαιτούν εφαρμόσιμες γνώσεις σχετικά με τη δυναμική της επιβίωσης. Αντίθετα, το μοντέλο Τυχαίων Δασών Επιβίωσης είναι πιο κατάλληλο για καθαρά προβλεπτικούς στόχους όπου η καταγραφή μη γραμμικών σχέσεων και πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων είναι κρίσιμη, αν και η έλλειψη διαφάνειας περιορίζει τη χρησιμότητά του στην κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών συμπεριφοράς. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη **σημασία της ευθυγράμμισης της επιλογής μοντέλου με τους ερευνητικούς στόχους**. Για μελέτες που επικεντρώνονται στην κατανόηση των δυναμικών της συμπεριφοράς και στον σχεδιασμό παρεμβάσεων, το μοντέλο Weibull AFT παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες. Αντίθετα, όταν η ακρίβεια πρόβλεψης είναι πρωταρχικής σημασίας, το RSF αποτελεί ανώτερη εναλλακτική λύση.

Παρόλο που η μελέτη παρέχει πολύτιμες γνώσεις για τη δυναμική της ανατροφοδότησης και της υποτροπής των οδηγών, περιορισμοί όπως το σχετικά μικρό δείγμα, η απουσία δεδομένων κυκλοφοριακών συνθηκών και η μακροσκοπική εστίαση πρέπει να σημειωθούν. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ενσωματώσει πιο λεπτομερή δεδομένα, όπως τις κυκλοφοριακές δυναμικές και τις αποφάσεις των οδηγών κατά τη διάρκεια της οδήγησης, για την παροχή βαθύτερης κατανόησης των συμπεριφορικών μοτίβων. Η εφαρμογή προηγμένων τεχνικών μοντελοποίησης, όπως οι τυχαίες παράμετροι με ετερογένεια-μέση, θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω την ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα μεταξύ οδηγών.

Καινοτόμες Επιστημονικές Συνεισφορές

Οι καινοτόμες συνεισφορές της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελούνται από πέντε πρωτότυπες επιστημονικές συνεισφορές, όπως περιγράφονται παρακάτω και απεικονίζονται στο Σχήμα II.



Εικόνα II: Καινοτόμες επιστημονικές συνεισφορές της διδακτορικής διατριβής

Εκτεταμένη Συλλογή Δεδομένων Φυσικής Οδήγησης

Η παρούσα διατριβή αποτελεί ένα **σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στην έρευνα πειραμάτων φυσικής οδήγησης (Naturalistic Driving - ND)**, αξιοποιώντας μη παρεμβατικές μεθόδους συλλογής δεδομένων που βασίζονται σε αισθητήρες smartphone. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις, αυτή η μεθοδολογία ελαχιστοποιεί τις παρεμβάσεις στους συμμετέχοντες, επιτρέποντας την ανεμπόδιστη καταγραφή πραγματικών οδηγικών συμπεριφορών. **Το σύνολο δεδομένων καλύπτει ένα μεγάλο δείγμα οδηγών (230), σε ποικίλα οδηγικά περιβάλλοντα και τύπους οχημάτων**, συμπεριλαμβανομένων οδηγών αυτοκινήτων, μοτοσυκλετιστών και επαγγελματιών οδηγών βαν. Αυτή η ποικιλία διασφαλίζει ότι τα ευρήματα είναι όχι μόνο αντιπροσωπευτικά, αλλά λαμβάνουν επίσης υπόψη τις διαφοροποιήσεις μεταξύ δημογραφικών χαρακτηριστικών οδηγών και κατηγοριών οχημάτων.

Η υψηλή χρονική ανάλυση των δεδομένων προσφέρει λεπτομερείς πληροφορίες για τη συμπεριφορά οδήγησης σε επίπεδο διαδρομής, παρέχοντας μια βαθιά κατανόηση της δυναμικής της οδηγικής συμπεριφοράς. Επιπλέον, η μακροπρόθεσμη συλλογή δεδομένων για 21 μήνες, που καλύπτει πολλές φάσεις ανατροφοδότησης και διαφορετικά οδικά περιβάλλοντα, προσδίδει μοναδική αξία στη μελέτη. Καταγράφοντας αλλαγές στη συμπεριφορά με την πάροδο του χρόνου, **η διατριβή γεφυρώνει ένα κρίσιμο κενό στην υπάρχουσα έρευνα ND**, η οποία συχνά βασίζεται σε βραχυπρόθεσμες παρατηρήσεις. Αυτή η μακροπρόθεσμη προοπτική επιτρέπει την αξιολόγηση της διατηρησιμότητας των αλλαγών στη συμπεριφορά και των τάσεων υποτροπής, προσφέροντας μια ισχυρή βάση για την ανάπτυξη προσαρμοστικών και βιώσιμων παρεμβάσεων για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. **Η μεθοδολογία αυτή θέτει νέα πρότυπα για τα πειράματα ND**, ανοίγοντας τον δρόμο για πιο κλιμακούμενες, οικονομικά αποδοτικές και τεχνολογικά προηγμένες μελέτες οδηγικής συμπεριφοράς.

Πολυτροπική Προσέγγιση Ανάλυσης Οδηγικής Συμπεριφοράς

Αυτή η διατριβή υιοθετεί μια πολυτροπική προσέγγιση, δίνοντας έμφαση στη σημασία της κατανόησης της οδηγικής συμπεριφοράς σε διαφορετικές ομάδες χρηστών οδού και διαφορετικά περιβάλλοντα. **Συμπεριλαμβάνοντας οδηγούς αυτοκινήτων, μοτοσικλετιστές και επαγγελματίες οδηγούς βαν**, η έρευνα αναγνωρίζει την ανάγκη μελέτης ευάλωτων χρηστών οδού, τους οι μοτοσικλετιστές, οι οποίοι αντιμετωπίζουν αυξημένους κινδύνους, καθώς και επαγγελματιών οδηγών, οι οποίοι περνούν εκτεταμένες ώρες οδηγώντας. Αυτή η **περιεκτική προσέγγιση διασφαλίζει μια πλήρη αξιολόγηση της ανατροφοδότησης μέσω τηλεματικής**, αναδεικνύοντας τη σημασία της σε διαφορετικά προφίλ κινδύνου και επίπεδα έκθεσης.

Η έρευνα εξετάζει την επίδραση των αστικών και υπεραστικών περιβαλλόντων, αλλά και αυτοκινητόδρομων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές προκλήσεις που θέτει κάθε τύπος οδού. Αυτή η περιληπτική προσέγγιση αποκαλύπτει ότι **η αποτελεσματικότητα της ανατροφοδότησης δεν είναι ομοιόμορφη**: συμπεριφορές όπως η χρήση κινητού τηλεφώνου ή η υπερβολική ταχύτητα αντιδρούν διαφορετικά στις παρεμβάσεις, **ανάλογα με το οδικό περιβάλλον**. Για παράδειγμα, οι μοτοσικλετιστές μπορεί να επωφεληθούν περισσότερο από ανατροφοδότηση που στοχεύει στην επίγνωση τους κατάστασης, ενώ οι επαγγελματίες οδηγοί ενδέχεται να απαιτούν εξατομικευμένες παρεμβάσεις που αντιμετωπίζουν την κόπωση και την επαναλαμβανόμενη έκθεση σε καταστάσεις υψηλού κινδύνου.

Ενσωματώνοντας αυτήν την ποικιλία ομάδων χρηστών και συμφραζομένων, η διατριβή παρέχει **πρακτικές πληροφορίες για υπεύθυνους χάραξης πολιτικής**, υποστηρικτές τους οδικής ασφάλειας και προγραμματιστές στον κλάδο της τεχνολογίας. Τονίζει τη σημασία της ανάπτυξης εξατομικευμένων συστημάτων ανατροφοδότησης που ανταποκρίνονται στις μοναδικές ανάγκες ευάλωτων χρηστών οδού, τους μοτοσικλετιστές, και επαγγελματίες οδηγούς, οι οποίοι συμβάλλουν σημαντικά στη δραστηριότητα οδικής κυκλοφορίας. Αυτή η περιεκτική προσέγγιση υποστηρίζει τη δημιουργία προσαρμοστικών, ευαίσθητων στο πλαίσιο παρεμβάσεων, βελτιώνοντας τελικά την οδική ασφάλεια για όλους τους χρήστες.

Ολοκληρωμένη Σουίτα Τριστρωματικών Μοντέλων

Αυτή η διατριβή χρησιμοποιεί μια **ολοκληρωμένη σειρά προηγμένων στατιστικών και τεχνικών μηχανικής μάθησης**, προσαρμοσμένων για την αντιμετώπιση της πολυδιάστατης φύσης της ανάλυσης οδηγικής συμπεριφοράς. Ενσωματώνοντας Γενικευμένα Γραμμικά Μικτά Μοντέλα (GLMMs), Μοντέλα Δομικών Εξισώσεων (SEMs) και Τεχνικές Ανάλυσης Επιβίωσης (όπως καμπύλες Kaplan-Meier, μοντέλα Cox-PH με παραγοντική τυχαιότητα, μοντέλα Επιταχυνόμενου Χρόνου Αποτυχίας (Weibull AFT) με ετερογένεια, και Τυχαία Δάση Επιβίωσης), η διατριβή παρέχει ένα αυστηρό αναλυτικό πλαίσιο ικανό να αποκαλύψει τόσο γραμμικές όσο και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Κάθε μοντέλο επιλέγεται προσεκτικά ώστε να ευθυγραμμίζεται με τους ερευνητικούς στόχους, εξισορροπώντας την προβλεπτική ακρίβεια με την ερμηνευσιμότητα για να διασφαλίσει πρακτικές πληροφορίες.

Αυτή η σουίτα μοντέλων επιτρέπει την **εξερεύνηση πολύπλοκων φαινομένων**, όπως η αλληλεπίδραση μεταξύ χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης, οδηγικών συμπεριφορών και παραγόντων πλαισίου, όπως η ώρα της ημέρας ή ο τύπος δρόμου. Για παράδειγμα, τα μοντέλα

επιβίωσης καταγράφουν μοναδικά τη δυναμική της υποτροπής, προσφέροντας νέες γνώσεις για τις τάσεις συμπεριφοράς μετά την αφαίρεση της ανατροφοδότησης. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης ενισχύουν περαιτέρω την ανάλυση, συλλαμβάνοντας λεπτές, μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις, διασφαλίζοντας ότι τα μοντέλα είναι εξοπλισμένα για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των πραγματικών δεδομένων οδήγησης. Το **καινοτόμο αυτό αναλυτικό πλαίσιο** όχι μόνο αυξάνει τη μεθοδολογική αυστηρότητα της έρευνας αλλά και καταδεικνύει το δυναμικό της συνδυαστικής χρήσης παραδοσιακών στατιστικών μεθόδων και τεχνολογιών μηχανικής μάθησης για μελέτες οδηγικής συμπεριφοράς.

Σε Βάθος Ανάλυση των Επιπτώσεων Μετά την Παροχή Ανατροφοδότησης

Αυτή η διατριβή είναι **από τις πρώτες που αναλύει σε βάθος τις επιδράσεις μετά την παροχή ανατροφοδότησης στους οδηγούς**, χρησιμοποιώντας προηγμένες στατιστικές και τεχνικές μηχανικής μάθησης, αντιμετωπίζοντας ένα κρίσιμο κενό στην υπάρχουσα έρευνα. Μέσω μεθόδων ανάλυσης επιβίωσης, όπως τα Weibull AFT και Random Survival Forest, η μελέτη αξιολογεί μακροπρόθεσμες αλλαγές στη συμπεριφορά και μοτίβα υποτροπής μετά την απόσυρση της ανατροφοδότησης. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τη λεπτομερή εξερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την υποτροπή σε επικίνδυνες συμπεριφορές, όπως η υπερβολική ταχύτητα, τα απότομα γεγονότα και η χρήση κινητού τηλεφώνου, παρέχοντας πρακτικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό βιώσιμων στρατηγικών παρέμβασης.

Τα ευρήματα αποκαλύπτουν τη σημασία προσαρμοστικών συστημάτων ανατροφοδότησης που μπορούν να διατηρήσουν τις βελτιώσεις στη συμπεριφορά με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, η ανάλυση επιβίωσης έδειξε ότι η διάρκεια της διαδρομής και η ώρα της ημέρας επηρεάζουν σημαντικά τη δυναμική υποτροπής, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μηχανισμούς ανατροφοδότησης που να λαμβάνουν υπόψη το πλαίσιο. Αυτή η καινοτομία εστίαση στη φάση μετά την ανατροφοδότηση παρέχει ένα **νέο πλαίσιο για την κατανόηση της διατηρησιμότητας των βελτιώσεων που προκύπτουν από την ανατροφοδότηση**, επιτρέποντας πιο ανθεκτικές και αποτελεσματικές παρεμβάσεις οδικής ασφάλειας. Επιπλέον, καθορίζει ένα πρότυπο για τη μελλοντική έρευνα ώστε να ενσωματώσει μακροπρόθεσμες προοπτικές στην αξιολόγηση στρατηγικών τροποποίησης οδηγικής συμπεριφοράς.

Μηχανισμός Ανατροφοδότησης Οδηγού ως Ολιστικό Σύστημα

Η παρούσα διατριβή προσεγγίζει μοναδικά **τον μηχανισμό ανατροφοδότησης ως ένα ολιστικό σύστημα, εξετάζοντας ολόκληρο τον κύκλο ζωής του μέσω ενός πολυπαραμετρικού αναλυτικού πλαισίου**. Αναλύοντας συστηματικά τις φάσεις πριν την ανατροφοδότηση, κατά τη διάρκεια της ανατροφοδότησης και μετά την ολοκλήρωσή της, η διατριβή παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του πώς η ανατροφοδότηση επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδηγών με την πάροδο του χρόνου. Η ενσωμάτωση διαφόρων χαρακτηριστικών ανατροφοδότησης, όπως οι βαθμολογίες, οι χάρτες, τα εργαλεία σύγκρισης και τα στοιχεία παιχνιδοποίησης, επιτρέπει την αξιολόγηση των επιμέρους και συνδυαστικών τους επιδράσεων στην τροποποίηση της συμπεριφοράς.

Αυτή η πολυφασική προοπτική δεν εστιάζει μόνο στις άμεσες αλλαγές στη συμπεριφορά αλλά ρίχνει φως και στα μακροπρόθεσμα μοτίβα και τις τάσεις υποτροπής. Για παράδειγμα, ενώ οι βαθμολογίες και τα στοιχεία διαγωνισμού είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη μείωση της

υπερβολικής ταχύτητας, η επίδρασή τους σε άλλες συμπεριφορές, όπως οι απότομες επιταχύνσεις, απαιτεί περαιτέρω βελτίωση. Το συστημικό αυτό πλαίσιο προχωρά πέρα από τις απομονωμένες αξιολογήσεις της ανατροφοδότησης, προσφέροντας ένα **κλιμακούμενο, βασισμένο σε δεδομένα πλαίσιο σχεδιασμού και εφαρμογής παρεμβάσεων μέσω τηλεματικής του οδηγού**. Τα ευρήματα τονίζουν το δυναμικό προσαρμοστικών συστημάτων ανατροφοδότησης για τη βιώσιμη βελτίωση της οδηγικής συμπεριφοράς, συμβάλλοντας τελικά σε ασφαλέστερα οδικά περιβάλλοντα.