



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

Πολυεπίπεδη Ολοκληρωμένη Αξιολόγηση της Ασφαλούς και Πράσινης Κινητικότητας



Βιργινία Πετράκη
Διδακτορική Διατριβή

Τριμελής Επιτροπή

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ - Επιβλέπων
Ελένη Βλαχογιάννη, Καθηγήτρια ΕΜΠ
Αθανάσιος Θεοφιλάτος, Επ. Καθηγητής Παν. Θεσσαλίας

Εκτεταμένη Σύνοψη

Στόχοι και Μεθοδολογία

Η βιώσιμη κινητικότητα αποτελεί ένα πολυδιάστατο φαινόμενο που περιλαμβάνει την οδική ασφάλεια, καθώς και την οικονομική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα. Οι υφιστάμενες μεθοδολογίες έχουν επιχειρήσει να προσεγγίσουν τις εν λόγω διαστάσεις μεμονωμένα, παραβλέποντας τις πιθανές συνέργειες και συμβιβασμούς (trade-offs) που ενδέχεται να ανακύπτουν κατά τη συνδυαστική τους αξιολόγηση. Η απουσία μίας ολοκληρωμένης προσέγγισης αναδεικνύει την ανάγκη για την ανάπτυξη αναλυτικών πλαισίων ικανών να αξιολογούν ολιστικά τις πολλαπλές διαστάσεις της βιώσιμης κινητικότητας. Καθοριστικό στοιχείο μίας ολοκληρωμένης προσέγγισης αποτελεί η οδηγική συμπεριφορά συνιστώντας τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει τόσο την ασφάλη όσο και την πράσινη κινητικότητα.

Υπό το παραπάνω πλαίσιο, κύριο στόχο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αποτελεί η **πολυεπίπεδη ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας**. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση υλοποιείται σε πολλαπλά επίπεδα ανάλυσης, από το επίπεδο της μεμονωμένης διαδρομής έως το επίπεδο του οδικού δικτύου, μέσω της ενοποίησης δεδομένων οδικής υποδομής, κυκλοφορίας και καιρικών συνθηκών με δεδομένα οδηγικής συμπεριφοράς ευρείας κλίμακας, καταγεγραμμένα υπό πραγματικές συνθήκες.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μία **εκτενής συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση** με στόχο τη διερεύνηση των συνδυαστικών επιδράσεων της οδηγικής συμπεριφοράς στην οδική ασφάλεια, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης της βιωσιμότητας. Αναπτύχθηκε μια καινοτόμος μεθοδολογία δύο σταδίων βάση της μεθόδου PRISMA, μέσω της οποίας εντοπίστηκαν 78 κοινοί δείκτες οδηγικής συμπεριφοράς και εξωτερικών συνθηκών οδήγησης, μέθοδοι συλλογής δεδομένων και τεχνικές μοντελοποίησης σε έρευνες οδικής ασφάλειας και οικολογικής-οικονομικής οδήγησης. Παράλληλα, αναδείχθηκε ένα σαφές ερευνητικό κενό όσον αφορά την ανάπτυξη αναλυτικών πλαισίων που να αξιολογούν ολοκληρωμένα την ασφάλη και πράσινη κινητικότητα, καθώς και σημαντικές προοπτικές για μελλοντική έρευνα.

Εν συνεχεία, διατυπώθηκαν τα ακόλουθα **ερευνητικά ερωτήματα**:

Ερευνητικό Ερώτημα 1

Πώς μπορούν να συγχωνευθούν δεδομένα οδηγικής συμπεριφοράς, οδικής υποδομής, οδικών ατυχημάτων, κυκλοφορίας και καιρικών συνθηκών ώστε να καταστεί δυνατή η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας σε επίπεδο διαδρομής και σε χωρικό επίπεδο; Ποιοι δείκτες είναι οι πλέον κατάλληλοι για την αποτύπωση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας στα διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης;

Ερευνητικό Ερώτημα 2

Πώς μπορούν να εντοπιστούν βιώσιμα μοτίβα διαδρομών μέσω της ενσωμάτωσης Έμμεσων Δεικτών Ασφαλείας (ΕΔΑ), και κατανάλωσης καυσίμου; Είναι εφικτό τα εν λόγω μοτίβα διαδρομών, να προβλεφθούν και να ερμηνευθούν μέσω δεικτών οδηγικής συμπεριφοράς και εξωτερικών συνθηκών οδήγησης και, εφόσον είναι εφικτό, ποιοι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης (MM) είναι οι πλέον κατάλληλοι;

Ερευνητικό Ερώτημα 3

Πώς μπορούν να εντοπιστούν και να συσχετιστούν συστηματικά χωρικά μοτίβα περιοχών αυξημένης επικινδυνότητας και κατανάλωσης καυσίμου (hotspots) σε επίπεδο οδικού κόμβου; Ποιοι οδικοί κόμβοι επιτυγχάνουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ επικινδυνότητας και κατανάλωσης καυσίμου;

Ερευνητικό Ερώτημα 4

Πώς μπορούν να μοντελοποιηθούν συνδυαστικά τα αποτελέσματα ασφαλούς και πράσινης οδήγησης σε επίπεδο εξατομικευμένης διαδρομής και οδικού τμήματος; Ποιους κοινούς μηχανισμούς εμφανίζουν που εξηγούν την απόκλιση ή τη συνύπαρξή τους στα διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης;

Ερευνητικό Ερώτημα 5

Πώς μπορεί να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα βιώσιμης οδήγησης σε επίπεδο διαδρομής, μέσω της ενσωμάτωσης της οδικής ασφάλειας, της κατανάλωσης καυσίμου και του χρόνου διαδρομής, και εν συνεχεία να μεταφραστεί σε αποδοτικότητα του οδικού δικτύου; Ποιοι εξωτερικοί παράγοντες επηρεάζουν την αποδοτικότητα της βιώσιμης οδήγησης;

Τα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα αποτέλεσαν τον θεωρητικό και μεθοδολογικό άξονα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, δομώντας την πολυεπίπεδη ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας. Για την παροχή επιστημονικά τεκμηριωμένων απαντήσεων, αναπτύχθηκε ένα εκτενές μεθοδολογικό πλαίσιο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Ι.

Το αναλυτικό πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αποτελείται από **τρεις συμπληρωματικές αναλυτικές συνιστώσες** με διακριτούς αλλά αλληλένδετους στόχους.



1^η Συνιστώσα

Εντοπισμός Μοτίβων Ασφαλούς και Πράσινης Κινητικότητας:

Η πρώτη αναλυτική συνιστώσα επικεντρώνεται στον εντοπισμό βιώσιμων μοτίβων κινητικότητας σε επίπεδο διαδρομής και οδικών κόμβων, ενσωματώνοντας δείκτες οδικής ασφάλειας και κατανάλωσης καυσίμου. Τα αναγνωρισμένα μοτίβα διαδρομών καθώς και τα χωρικά μοτίβα αποτελούν τη βάση για την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας στα διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης, τροφοδοτώντας τις επόμενες συνιστώσες της παρούσας διατριβής.



2^η Συνιστώσα

Συνδυαστική Μοντελοποίηση Αποτελεσμάτων Ασφαλούς και Πράσινης Οδήγησης:

Η δεύτερη αναλυτική συνιστώσα μεταβαίνει προς την ποσοτικοποίηση των κοινών μηχανισμών που επηρεάζουν την ασφαλή οδήγηση και την κατανάλωση καυσίμου σε επίπεδο διαδρομής και οδικού τμήματος. Μέσω της συνδυαστικής μοντελοποίησης των αποτελεσμάτων ασφαλούς και πράσινης οδήγησης καθίσταται δυνατή η εκτίμηση των άμεσων και έμμεσων επιδράσεων της οδηγικής συμπεριφοράς, της οδικής υποδομής και των εξωτερικών συνθηκών οδήγησης.

Αξιολόγηση της Αποδοτικότητας Βιώσιμης Οδήγησης:

Η τρίτη αναλυτική συνιστώσα επαναπροσδιορίζει την έννοια της βιώσιμης οδήγησης ως μια σύνθετη έννοια αποδοτικότητας, ενοποιώντας τους ΕΔΑ, την κατανάλωση καυσίμου και τον χρόνο διαδρομής σε έναν ενιαίο δείκτη απόδοσης, και καθιστώντας εφικτή την μεταφερσιμότητά του από το επίπεδο της μεμονωμένης διαδρομής στο επίπεδο του οδικού δικτύου. Η εσωτερική δομή του δείκτη αποδοτικότητας διερευνάται περαιτέρω, παράλληλα με τους εξωτερικούς παράγοντες που τον επηρεάζουν.

Ο πυρήνας του μεθοδολογικού πλαισίου βασίστηκε σε διαδικασία πολλαπλών σταδίων, ξεκινώντας με τη **διερεύνηση και συλλογή των δεδομένων** που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, καθώς και την ανάπτυξη κατάλληλων διαδικασιών συγχώνευσης δεδομένων, ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια ως προς τα επίπεδα ανάλυσης και τις διαστάσεις των μεταβλητών σε κάθε αναλυτική συνιστώσα. Δεδομένα ευρείας κλίμακας (ανά δευτερόλεπτο) οδηγικής συμπεριφοράς καταγράφηκαν υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης και συλλέχθηκαν για την Περιφέρεια Αττική, που ορίστηκε και ως ερευνητική περιοχή, εντός χρονικού διαστήματος διάρκειας τριών μηνών, συγκεκριμένα από τον Μάρτιο έως τον Μάιο του 2024. Συνολικά περιλάμβαναν 35.637 διαδρομές, παρέχοντας δεδομένα ταχυτήτων και επιταχύνσεων καθώς και ΕΔΑ, όπως απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, υπερβάσεις ορίων ταχύτητας και απόσπαση προσοχής λόγω χρήσης κινητού τηλεφώνου. Για τη συμπλήρωση των δεικτών οδικής ασφάλειας αξιοποιήθηκαν 10.893 ιστορικές καταγραφές οδικών ατυχημάτων για την περίοδο 2016-2022, που αντιστοιχίστηκαν χωρικά σε 5.517 οδικούς κόμβους εντός της ερευνητικής περιοχής.

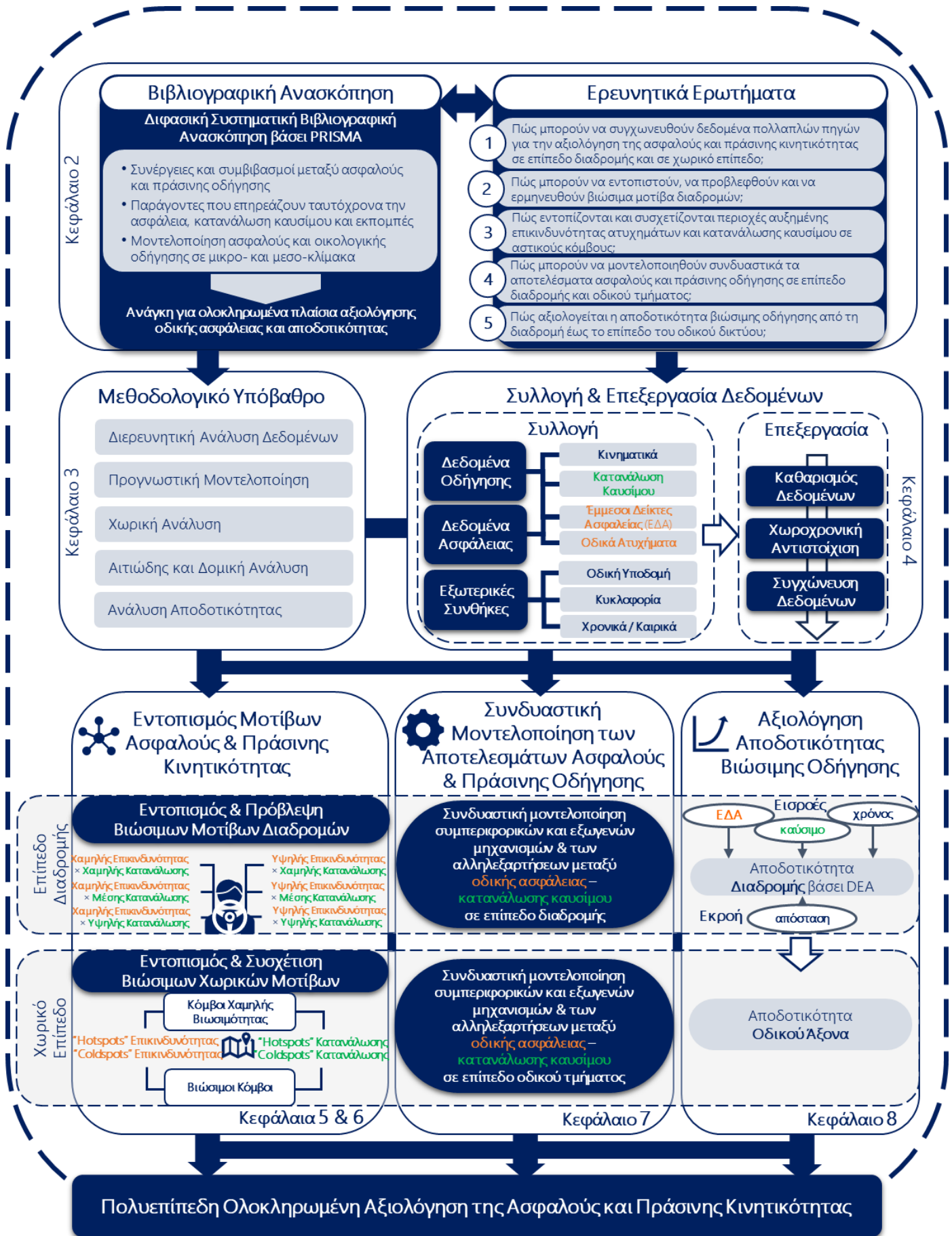
Στη συνέχεια, τα ευρείας κλίμακας δεδομένα τηλεματικής **αντιστοιχίστηκαν χωρικά** σε 34.889 οδικά τμήματα μέσω της πλατφόρμας OpenStreetMap (OSM), επιτρέποντας την ταυτόχρονη ενσωμάτωση δεδομένων οδηγικής συμπεριφοράς και χαρακτηριστικών της οδικής υποδομής, συμπεριλαμβανομένης της κλίσης της οδού. Η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου εκτιμήθηκε μέσω του μοντέλου Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model (VT-CPFM), αξιοποιώντας τα χωρικά αντιστοιχισμένα ευρείας κλίμακας δεδομένα ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες αποτυπώθηκαν μέσω ταχυτήτων κυκλοφορίας που ανακτήθηκαν από την Google για 42 κρίσιμους οδικούς άξονες εντός της ερευνητικής περιοχής και για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση και συνθήκες φυσικού φωτισμού, αντιστοιχίστηκαν χρονικά με τα δεδομένα τηλεματικής.

Λαμβάνοντας υπόψη τον πολυεπίπεδο χαρακτήρα του αναλυτικού πλαισίου, **αναπτύχθηκαν τέσσερις βάσεις δεδομένων**: μία βάση σε επίπεδο διαδρομής (αξιοποίησή της στην 1^η και 2^η συνιστώσα), μία σε επίπεδο οδικού τμήματος (αξιοποίησή της στην 2^η συνιστώσα), μία σε επίπεδο οδικού κόμβου (αξιοποίησή της στην 1^η συνιστώσα) και μία βάση διαδρομών σε επίπεδο οδικού άξονα (road-based trips), που περιορίστηκε σε οδικούς άξονες για τους οποίους ήταν διαθέσιμα κυκλοφοριακά δεδομένα (αξιοποίησή της στην 3^η συνιστώσα). Η δημιουργία των βάσεων δεδομένων περιλάμβανε την εφαρμογή τριών διαφορετικών διαδικασιών χωρικής και χρονικής αντιστοίχισης και συγχώνευσης δεδομένων: (i) διαδικασία χωρικής αντιστοίχισης των δεδομένων οδήγησης ευρείας κλίμακας με το αντίστοιχο οδικό τμήμα, (ii) διαδικασία αντιστοίχισης των ιστορικών οδικών ατυχημάτων και των δεδομένων οδήγησης με τους αντίστοιχους οδικούς κόμβους και (iii) διαδικασία χωροχρονικής αντιστοίχισης δεδομένων εξατομικευμένης διαδρομής με τα ευρύτερα κυκλοφοριακά δεδομένα.

Το επόμενο στάδιο περιλάμβανε την **επιλογή κατάλληλων στατιστικών και αναλυτικών εργαλείων** ικανών να αποτυπώσουν την πολυδιάστατη και πολυεπίπεδη φύση της ολοκληρωμένης αξιολόγησης της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας σε κάθε επιμέρους αναλυτική συνιστώσα. Στην

πρώτη αναλυτική συνιστώσα, οι διαδρομές κατηγοριοποιήθηκαν διαδοχικά με βάση (i) την έκθεση ανά τύπο οδικού δικτύου, (ii) τους ΕΔΑ, και (iii) την κατανάλωση καυσίμου, αξιοποιώντας μη επιβλεπόμενες μεθόδους, όπως ο αλγόριθμος ομαδοποίησης k-means. Η πρόβλεψη των προσδιορισμένων βιώσιμων μοτίβων διαδρομών έλαβε χώρα μέσω της εφαρμογής επιβλεπόμενων τεχνικών MM, όπως οι Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbors (k-NN) και eXtreme Gradient Boosting (XGBoost). Η απόδοση των μοντέλων MM αξιολογήθηκε μέσω μετρικών διασταυρούμενης επικύρωσης, ενώ η ερμηνευσιμότητά τους ενισχύθηκε με τη χρήση της μεθόδου SHapley Additive exPlanations (SHAP). Σε χωρικό επίπεδο, πραγματοποιήθηκε χωρική ανάλυση, αξιοποιώντας ολικούς χωρικούς δείκτες όπως ο Global Moran's I , για τη διερεύνηση της συνολικής χωρικής αυτοσυσχέτισης, καθώς και τοπικούς δείκτες όπως οι LISA και Getis-Ord G_i^* , για τον εντοπισμό κόμβων υψηλής (hotspots) και χαμηλής (coldspots) επικινδυνότητας και κατανάλωσης καυσίμου. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση διασταυρούμενης χωρικής συσχέτισης (Cross-L function) με σκοπό τη διερεύνηση της χωρικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο διαφορετικών τύπων «hotspots». Τέλος, εφαρμόστηκε ανάλυση βασισμένη στην αρχή Pareto για τον εντοπισμό των κόμβων που παρουσιάζουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ οδικής ασφάλειας και κατανάλωσης καυσίμου.

Στη δεύτερη αναλυτική συνιστώσα, η συνδυαστική μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων ασφαλούς και πράσινης οδήγησης πραγματοποιήθηκε μέσω δύο Μοντέλων Δομικών Εξισώσεων (Structural Equation Models - SEM) τόσο σε επίπεδο διαδρομής όσο και σε επίπεδο οδικού τμήματος, στο οποίο λήφθηκε υπόψη χωρική διόρθωση. Τέλος, στην τρίτη αναλυτική συνιστώσα, η αποδοτικότητα βιώσιμης οδήγησης σε επίπεδο διαδρομής ποσοτικοποιήθηκε μέσω της Ανάλυσης Περιβάλλουσας Δεδομένων (Data Envelopment Analysis - DEA), εντοπίζοντας τους ΕΔΑ, όπως την χρήση κινητού τηλεφώνου και τις απότομες επιβραδύνσεις, την κατανάλωση καυσίμου και τον χρόνο οδήγησης, σε έναν σύνθετο δείκτη αποδοτικότητας. Η εσωτερική δομή των παραγόμενων δεικτών αποδοτικότητας διερευνήθηκε περαιτέρω μέσω ενός σταδίου ερμηνεύσιμης MM, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο XGBoost και τις τιμές SHAP. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μοντέλο μικτών επιδράσεων βήτα παλινδρόμησης (mixed-effects beta regression), με στόχο τον προσδιορισμό των εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των διαδρομών. Συνολικά, η εν λόγω αναλυτική αρχιτεκτονική επέτρεψε τη συστηματική συγχώνευση ετερογενών συνόλων δεδομένων και υποστηρίζοντας την πολυεπίπεδη ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας.



Σχήμα 1. Συνολικό μεθοδολογικό πλαίσιο της Διδακτορικής Διατριβής

Κύρια Ευρήματα

Η σύνθεση του συνόλου των αναλύσεων που υλοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου αξιολόγησης της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας, παράγοντας έναν σημαντικό αριθμό **πρωτότυπων ευρημάτων**, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1^η Συνιστώσα



Κύρια Ευρήματα από τον Εντοπισμό Μοτίβων Ασφαλούς και Πράσινης Κινητικότητας

Στο πλαίσιο της πρώτης αναλυτικής συνιστώσας διερευνήθηκε **ο τρόπος με τον οποίο τα μοτίβα ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας συν-εξελίσσονται** σε επίπεδο διαδρομής και σε χωρικό επίπεδο. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι η μεταξύ τους σχέση δεν είναι ούτε ομοιόμορφα συνεργατική ούτε εγγενώς ανταγωνιστική· αντιθέτως, εξαρτάται από τους υποκείμενους μηχανισμούς και από το επίπεδο ανάλυσης.

Επίπεδο Διαδρομής

Σε επίπεδο διαδρομής, εντοπίστηκαν **έξι βιώσιμα μοτίβα διαδρομών**:

1. «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης»
2. «Υψηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης»
3. «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Μέσης Κατανάλωσης»
4. «Υψηλής Επικινδυνότητας × Μέσης Κατανάλωσης»
5. «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Υψηλής Κατανάλωσης» και
6. «Υψηλής Επικινδυνότητας × Υψηλής Κατανάλωσης»

Τα εντοπισμένα μοτίβα διαδρομών αποσκοπούσαν στην αποτύπωση διακριτών συνδυασμών έκθεσης σε επικινδυνότητα και κατανάλωσης καυσίμου, αναδεικνύοντας **δομημένες συνέργειες και συμβιβασμούς** μεταξύ οδικής ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας. Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι οι επιθετικές και υπό απόσπαση προσοχής διαδρομές καταναλώνουν έως και 1,6 λίτρα/100χλμ περισσότερο καύσιμο σε σύγκριση με διαδρομές χαμηλής επικινδυνότητας. Παράλληλα, η υπέρβαση ορίων ταχύτητας σε αστικά και υπεραστικά περιβάλλοντα δύναται να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου έως και 2,2 λίτρα/100χλμ, παρά την ταυτόχρονη αύξηση της επικινδυνότητας, ενώ το αντίθετο παρατηρείται σε διαδρομές με μεγαλύτερη έκθεση σε αυτοκινητοδρόμους, καταδεικνύοντας ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ οδικής ασφάλειας και κατανάλωσης καυσίμου είναι ισχυρά εξαρτώμενες από το οδικό περιβάλλον.

Για την **πρόβλεψη των έξι μοτίβων διαδρομών**, αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν τέσσερις πολυωνυμικοί επιβλεπόμενοι ταξινομητές MM. Ο αλγόριθμος XGBoost υπερέιχε έναντι των υπολοίπων ταξινομητών, επιτυγχάνοντας συνολική ακρίβεια 60%, ενώ το μοτίβο διαδρομής «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης» παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό ορθής ταξινόμησης (71,4%). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης SHAP ανέδειξαν ως πλέον καθοριστικούς παραγόντες την μέση ταχύτητα, τη μεταβλητότητα ταχύτητας, τη συχνότητα στάσεων, την πολυπλοκότητα της διαδρομής, συμπεριλαμβανομένης της κλίσης της οδού και την έκθεση σε οδικούς κόμβους, υπερκαλύπτοντας την επίδραση των μετεωρολογικών και χρονικών παραγόντων στη διαμόρφωση βιώσιμης οδήγησης σε επίπεδο διαδρομής.

Δύο μοτίβα διαδρομών ανέδειξαν σαφείς συνέργειες. Το μοτίβο διαδρομής «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης» αντιπροσωπεύει την πλέον βιώσιμη οδηγική

συμπεριφορά, συνδυάζοντας χαμηλές τιμές ΕΔΑ και ταυτόχρονα συγκριτικά χαμηλή κατανάλωση καυσίμου (≈ 6 λίτρα/100χλμ), τείνοντας να εκδηλώνεται υπό μέτριες μέσες ταχύτητες, χαμηλές μέγιστες ταχύτητες και περιορισμένη συχνότητα στάσεων κατά τη διάρκεια της διαδρομής. Από την άλλη πλευρά, το μοτίβο διαδρομής «Υψηλής Επικινδυνότητας × Υψηλής Κατανάλωσης» χαρακτηρίζεται από τα υψηλότερα επίπεδα χρήσης κινητού τηλεφώνου και απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων, σε συνδυασμό με την υψηλή κατανάλωση καυσίμου, και συνδέεται με χαμηλές μέσες ταχύτητες, συχνές στάσεις, αυξημένη μεταβλητότητα ταχύτητας, υψηλές αιχμές ταχύτητας, καθώς και οδήγηση σε οδούς μεγαλύτερης κλίσης.

Αντιθέτως, **εντοπίστηκαν δύο μοτίβα διαδρομών συμβιασμού**. Το μοτίβο «Υψηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης» επιτυγχάνει σχετικά χαμηλή κατανάλωση καυσίμου παρά τη συχνή υπέρβαση ορίων ταχύτητας, χαρακτηριζόμενο από υψηλές μέσες ταχύτητες και αυξημένες τιμές στα ανώτερα ποσοστημόρια της κατανομής ταχύτητας, περιορισμένες στάσεις και μικρή έκθεση σε αυτοκινητόδρομους, γεγονός που υποδηλώνει συνθήκες ελεύθερης ροής αλλά μη ασφαλείς επιλογές ταχύτητας σε αστικό οδικό περιβάλλον. Αντίστροφα, το μοτίβο «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Υψηλής Κατανάλωσης» εμφάνισε την υψηλότερη μέση κατανάλωση καυσίμου ($\approx 12,3$ λίτρα/100χλμ) παρά τη σχεδόν μηδενική παρουσία επικίνδυνων συμβάντων, που συνδέεται με χαμηλές ταχύτητες, συχνές στάσεις, χαμηλές αιχμές ταχύτητας και οδήγηση σε αυξημένες κλίσεις οδού. Τα εναπομείναντα μοτίβα διαδρομών, «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Μέσης Κατανάλωσης» και «Υψηλής Επικινδυνότητας × Μέσης Κατανάλωσης», αντιπροσωπεύουν ενδιάμεσες συνθήκες με μέτρια κατανάλωση καυσίμου και οδήγηση χαμηλού έως υψηλού κινδύνου.

Χωρικό Επίπεδο

Όσον αφορά τον εντοπισμό χωρικών μοτίβων ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας, πραγματοποιήθηκε **χωρική ανάλυση σε 5.517 οδικούς κόμβους**, ενοποιώντας ιστορικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων και δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου. Τόσο ο δείκτης επικινδυνότητας ατυχήματος (οδικά ατυχήματα ανά 1.000 διαδρομές) όσο και ο δείκτης κατανάλωσης καυσίμου (λίτρα ανά 1.000 διαδρομές) παρουσίασαν στατιστικά σημαντική χωρική ομαδοποίηση, με τον δείκτη Global Moran's I να επιβεβαιώνει θετική χωρική αυτοσυσχέτιση. Μέσω της μεθόδου Getis-Ord G_i^* εντοπίστηκαν, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%, 182 «hotspots» υψηλής επικινδυνότητας και 232 «hotspots» υψηλής κατανάλωσης καυσίμου εντός της ερευνητικής περιοχής. Ωστόσο, η άμεση χωρική επικάλυψή τους ήταν περιορισμένη, υποδεικνύοντας ότι οι πλέον επιρρεπείς οδικοί κόμβοι σε οδικά ατυχήματα δεν ταυτίζονται απαραίτητα με τους πλέον ενεργειακά μη αποδοτικούς.

Συγκεκριμένα, η **χωρική αλληλεπίδραση** μεταξύ των «hotspots» αυξημένης επικινδυνότητας και κατανάλωσης διερευνήθηκε περαιτέρω μέσω της ανάλυσης διασταυρούμενης L-συνάρτησης (cross-type L-function), καταδεικνύοντας μη τυχαία χωρική συσχέτιση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ύπαρξη χωρικού διαχωρισμού μικρής κλίμακας, υποδεικνύοντας ότι οι δύο τύποι «hotspots» τείνουν να εμφανίζονται εντός των ίδιων ευρύτερων αστικών περιοχών, αλλά διαχωρίζονται σε μικρές αποστάσεις (< 3 χλμ), καταλαμβάνοντας διαφορετικούς, γειτονικούς κόμβους. Η εν λόγω χωρική συσχέτιση αποδυναμώνεται και γίνεται τελικώς στατιστικά μη σημαντική σε μεγαλύτερες αποστάσεις (> 6 χλμ). Ειδικότερα, τα περισσότερα σημεία αυξημένης επικινδυνότητας εντοπίζονται κυρίως σε κόμβους δευτερεύοντος/τριτεύοντος οδικού δικτύου, ενώ τα σημεία αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου φαίνεται να σχετίζονται περισσότερο με κόμβους στους οποίους εμπλέκονται κύριες οδικές αρτηρίες.

Τέλος, η ανάλυση Pareto ανέδειξε ένα **σύνολο «μη κυριαρχούμενων»** (non-dominated) **οδικών κόμβων**, που προσφέρουν τους βέλτιστους συμβιασμούς μεταξύ οδικής ασφάλειας και κατανάλωσης καυσίμου. Παράλληλα, υλοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας βάσει στάθμισης, προκειμένου να καταδειχθεί πώς μεταβάλλεται η κατάταξη των κόμβων υπό σενάρια λήψης

αποφάσεων προσανατολισμένα είτε στην οδική ασφάλεια είτε στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Οι αναδεικνυόμενοι κόμβοι μπορούν να λειτουργήσουν ως πρακτικά σημεία αναφοράς για ολοκληρωμένες παρεμβάσεις, καθώς οι βελτιώσεις σε αυτές τις θέσεις είναι πιθανότερο να αποδώσουν οφέλη και στους δύο στόχους χωρίς να δημιουργούν σημαντικούς νέους συμβιβασμούς.

2^η Συνιστώσα



Κύρια Ευρήματα από τη Συνδυαστική Μοντελοποίηση των Αποτελεσμάτων Ασφαλούς και Πράσινης Οδήγησης

Δύο μοντέλα SEM αναπτύχθηκαν σε επίπεδο διαδρομής και χωρικής κλίμακας με στόχο τη διερεύνηση της επίδραση τεσσάρων λανθανουσών μεταβλητών που σχετίζονται με τη μεταβλητότητα της οδηγικής συμπεριφοράς, το οδικό περιβάλλον, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδικής υποδομής, καθώς και τις εξωγενείς μετεωρολογικές και χρονικές συνθήκες, στα αποτελέσματα έμμεσης οδικής ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας της οδήγησης. Τα δύο μοντέλα παρουσίασαν εξαιρετική προσαρμογή τόσο σε επίπεδο διαδρομής (CFI = 0.947, TLI = 0.922, RMSEA = 0.060, SRMR = 0.037) όσο και σε επίπεδο οδικού τμήματος (CFI = 0.947, TLI = 0.923, RMSEA = 0.044, SRMR = 0.036).

Επίπεδο Διαδρομής

Σε επίπεδο διαδρομής, η μεταβλητότητα της οδηγικής συμπεριφοράς, που αποτυπώθηκε μέσω της συχνότητας στάσεων, του ποσοστού χρόνου ακινησίας και του χρόνου συνεχούς κίνησης (cruising), **αναδείχθηκε ως ο κυρίαρχος προσδιοριστικός παράγοντας** τόσο για την ασφαλή όσο και για την πράσινη οδήγηση. Υψηλότερη μεταβλητότητα οδήγησης συσχετίστηκε θετικά με την κατανάλωση καυσίμου, την επιθετική οδηγική συμπεριφορά (υψηλή συχνότητα απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων) και την απόσπαση προσοχής (μέσω της χρήσης κινητού τηλεφώνου), ενώ παρουσίασε αρνητική συσχέτιση με την υπέρβαση ορίων ταχύτητας.

Η υψηλότερη έκθεση σε κύριες οδικές αρτηρίες συσχετίστηκε στατιστικά σημαντικά με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερα επίπεδα επιθετικής οδήγησης και οδήγηση υπό απόσπαση προσοχής, αλλά με υψηλότερη συχνότητα υπέρβασης ορίων ταχύτητας, σε σύγκριση με διαδρομές που πραγματοποιούνται κυρίως σε κατοικημένες περιοχές ή τοπικές μετακινήσεις. Επιπλέον, η οδήγηση σε οδούς μικρότερης κλίσης και με χαμηλότερη μεταβλητότητα κλίσης κατά τη διάρκεια της διαδρομής συσχετίστηκε σημαντικά με μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερα επίπεδα επιθετικής και οδήγησης υπό απόσπασης προσοχής, χωρίς ωστόσο να εμφανίζει στατιστικά σημαντική συσχέτιση με την υπέρβαση ορίων ταχύτητας όταν λήφθηκαν οι υπόλοιπες μεταβλητές υπόψη. Ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η οδήγηση κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι υψηλότερες θερμοκρασίες και η χαμηλότερη σχετική υγρασία, φαίνεται να μετριάζουν ελαφρώς τη μη ασφαλή οδήγηση και την κατανάλωση καυσίμου. Οι υπολειμματικές (residuals) συσχετίσεις σε επίπεδο διαδρομής κατέδειξαν ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και επιθετικής οδήγησης, καθώς και μικρότερη αλλά στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση με την υπέρβαση ορίων ταχύτητας και την απόσπαση προσοχής. Επομένως, εκτός από τους λειτουργικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, σταθερά χαρακτηριστικά της οδηγικής συμπεριφοράς σε επίπεδο διαδρομής συμβάλλουν στην **ταυτόχρονη εμφάνιση αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου και υψηλότερης επικινδυνότητας**.

Χωρικό Επίπεδο

Σε επίπεδο οδικού τμήματος **εξετάστηκαν παρόμοιες λανθάνουσες μεταβλητές**, ωστόσο η σχετική σημασία και στατιστική σημαντικότητα των υποκείμενων μηχανισμών διαφοροποιείται. Σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης, τα χαρακτηριστικά της οδικής υποδομής, ακολουθούμενα από τη μεταβλητότητα

της οδηγικής συμπεριφοράς, άσκησαν τη σημαντικότερη στατιστική επίδραση. Η οδηγική μεταβλητότητα, που αποτυπώθηκε μέσω των συχνών στάσεων και της υψηλής μεταβλητότητας ταχύτητας μεταξύ των διαδρομών που διέρχονται από κάθε οδικό τμήμα, παρέμεινε θετικά συσχετισμένη με τη συνολική κατανάλωση καυσίμου, την επιθετική οδήγηση και την οδήγηση υπό απόσπαση προσοχής, ενώ παρουσίασε αρνητική συσχέτιση με την υπέρβαση ορίων ταχύτητας. Επιπρόσθετα, τα οδικά τμήματα κύριων αρτηριών συνδέθηκαν με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και λιγότερα συμβάντα απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων καθώς και χρήση κινητού τηλεφώνου, ωστόσο υψηλότερη συχνότητα υπέρβασης ορίων ταχύτητας σε σύγκριση με οδικά τμήματα κατοικημένων περιοχών, μονής κατεύθυνσης. Μεγαλύτερες κλίσεις, μικρότερα μήκη οδικών τμημάτων και υψηλότερη πυκνότητα κόμβων περιόρισαν σημαντικά την υπέρβαση ορίων ταχύτητας, ενώ ταυτόχρονα αύξησαν την κατανάλωση καυσίμου, καθώς και τα επίπεδα επιθετικής και οδήγησης υπό απόσπαση προσοχής. Οι περιβαλλοντικές και χρονικές συνθήκες άσκησαν μικρή επιρροή σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης. Η ανάλυση χωρικής διόρθωσης κατέδειξε την ύπαρξη χωρικής εξάρτησης τόσο στις λανθάνουσες μεταβλητές όσο και στα αποτελέσματα ασφαλούς και πράσινη οδήγησης, χωρίς ωστόσο η ενσωμάτωσή της να μεταβάλλει ουσιαστικά τις στατιστικά σημαντικές σχέσεις που εντοπίστηκαν.

Οι υπολειμματικές συσχετίσεις διαφοροποιήθηκαν σε σχέση με το επίπεδο διαδρομής. Η κατανάλωση καυσίμου διατήρησε θετική υπολειμματική συσχέτιση με την επιθετική και την οδήγηση υπό τη χρήση κινητού τηλεφώνου. Ωστόσο, η κατανάλωση καυσίμου και η υπέρβαση ορίων ταχύτητας παρουσίασαν μικρή αλλά στατιστικά σημαντική αρνητική υπολειμματική συσχέτιση, ενώ η επιθετική οδήγηση εμφάνισε επίσης αρνητική συσχέτιση με την υπέρβαση ορίων ταχύτητας. Το εν λόγω εύρημα υποδηλώνει ότι τα οδικά τμήματα που χαρακτηρίζονται από αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και συχνά συμβάντα απότομης επιτάχυνσης και επιβραδύνσης δεν ταυτίζονται με εκείνα όπου εμφανίζονται συστηματικές υπερβάσεις ορίων ταχύτητας, γεγονός που αντανακλά μια τοπική διαφοροποίηση των οδηγικών μοτίβων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η **υψηλή κατανάλωση καυσίμου ευθυγραμμίζεται συστηματικά με την επιθετική οδήγηση και την οδήγηση υπό απόσπαση προσοχής** τόσο σε επίπεδο εξατομικευμένο διαδρομής όσο και σε χωρικό επίπεδο, αντανακλώντας κοινούς μηχανισμούς οδηγικής συμπεριφοράς και εξωτερικών συνθηκών. Η συσχέτιση αυτή μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι οι απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις αυξάνουν την ενεργειακή απαίτηση, ενώ η απόσπαση προσοχής δύναται να διαταράξει τον διαμήκη έλεγχο του οχήματος. Αντιθέτως, η υπέρβαση ορίων ταχύτητας διέπεται από εν μέρει αντίθετους μηχανισμούς, σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου, και στα δύο επίπεδα ανάλυσης. Ωστόσο, σε επίπεδο διαδρομής εξακολουθεί να παρουσιάζει θετική υπολειμματική συνδιακύμανση με την κατανάλωση καυσίμου, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι δύο διαστάσεις, ασφάλεια και οικονομία, μπορούν να συνυπάρχουν, πιθανώς λόγω κοινών μη παρατηρούμενων επιδράσεων σε επίπεδο διαδρομής και επομένως, οδηγού. Αντίθετα, σε επίπεδο οδικού τμήματος, οι τοπικοί γεωμετρικοί και λειτουργικοί περιορισμοί εμφανίζεται να αποτρέπουν τη συνύπαρξη υψηλής κατανάλωσης καυσίμου και συχνής υπέρβασης ορίων ταχύτητας.

Τα εν λόγω ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι **τα αποτελέσματα ασφαλούς και πράσινης οδήγησης είναι αλληλένδετα αλλά όχι ταυτόσημα.** Στρατηγικές που στοχεύουν στη μείωση της μεταβλητότητας της οδηγικής συμπεριφοράς και στον περιορισμό της έκθεσης σε γεωμετρικά σύνθετα οδικά περιβάλλοντα είναι πιθανό να αποφέρουν ταυτόχρονα οφέλη τόσο για την ενεργειακή αποδοτικότητα όσο και για την οδική ασφάλεια, ενώ η διαχείριση της υπέρβασης ορίων ταχύτητας απαιτεί παρεμβάσεις που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο και τη γεωμετρία του οδικού δικτύου.

3^η Συνιστώσα

Κύρια Ευρήματα από την Αξιολόγηση της Αποδοτικότητας Βιώσιμης Οδήγησης

Ενώ η πρώτη αναλυτική συνιστώσα εντόπισε δομημένα μοτίβα ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας και η δεύτερη ποσοτικοποίησε τους μηχανισμούς που διέπουν την αλληλεπίδρασή τους, η παρούσα συνιστώσα μετατρέπει την έννοια της βιωσιμότητας σε έναν **μετρήσιμο πολύ-κριτηριακό δείκτη αποδοτικότητας**, γεφυρώνοντας την αποδοτικότητα οδήγησης σε μικρο-κλίμακα εξατομικευμένης διαδρομής με την αποδοτικότητα σε μακρο-κλίμακα οδικού δικτύου. Αρχικά, η αποδοτικότητα διαδρομής αξιολογήθηκε μέσω της μεθόδου DEA τύπου BCC (Banker–Charnes–Cooper) προσανατολισμένη στις εισροές (input-oriented), λαμβάνοντας υπόψη ως εισροές τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα οδήγησης, όπως η συχνότητα εμφάνισης των ΕΔΑ (απότομες επιβραδύνσεις, απόσπαση προσοχής λόγω χρήσης κινητού τηλεφώνου), η κατανάλωση καυσίμου (λίτρα) και ο χρόνος διαδρομής (λεπτά), ενώ ως εκροή ορίστηκε το μήκος της διαδρομής (χιλιόμετρα).

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι **οι αποδοτικές διαδρομές** χαρακτηρίζονται συστηματικά από χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου (λίτρα/ 100 χλμ), μικρότερο χρόνο διαδρομής ανά χιλιόμετρο και σπανιότερη εμφάνιση των ΕΔΑ. Για την περαιτέρω διερεύνηση της εσωτερικής δομής των σύνθετων δεικτών αποδοτικότητας, αναπτύχθηκαν μοντέλα XGBoost σε συνδυασμό με ανάλυση SHAP. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο χρόνος διαδρομής ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση στον δείκτη αποδοτικότητας, ακολουθούμενη από την κατανάλωση καυσίμου, ενώ οι ΕΔΑ λειτουργούν κυρίως ως περιορισμοί, αντανakλώντας τη συγκριτικά σπάνια εμφάνισή τους σε επίπεδο διαδρομής. Επιπλέον, εφαρμόστηκε μία επιπλέον DEA, ως ανάλυση ευαισθησίας, περιορισμένη σε διαδρομές που παρουσίαζαν τουλάχιστον έναν ΕΔΑ αποκαλύπτοντας μια δομική μεταβολή στη συμβολή των εσωτερικών ερμηνευτικών παραγόντων, με τη χρήση κινητού τηλεφώνου να αποκτά μεγαλύτερη ισχύ. Συνεπώς, τα εν λόγω ευρήματα αναδεικνύουν τους δείκτες οδικής ασφάλειας ως κρισιμότερους στην διαμόρφωση του δείκτη αποδοτικότητας, όταν υπάρχει έκθεση σε κίνδυνο οδικού ατυχήματος.

Τέλος, η αποδοτικότητα σε επίπεδο διαδρομής ανάχθηκε, προκειμένου να παραχθεί ένας **ανώτερου επιπέδου δείκτης βιωσιμότητας, σε επίπεδο οδικού άξονα**, όπου οι οδικοί άξονες αντιστοιχούν σε προκαθορισμένα οδικά τμήματα για τα οποία ήταν διαθέσιμα κυκλοφοριακά δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο επιτράπη η εξαγωγή δεικτών αποδοτικότητας βιώσιμης οδήγησης για το οδικό δίκτυο, αναδεικνύοντας τη χρησιμότητα των δεδομένων τηλεματικής ευρείας κλίμακας για την αξιολόγηση της βιώσιμης κινητικότητας σε επίπεδο δικτύου. Επιπλέον, η τρίτη συνιστώσα διερεύνησε τους παράγοντες εξωτερικών συνθηκών οδήγησης που επηρεάζουν την αποδοτικότητα, μέσω της ανάπτυξης μοντέλου μικτών επιδράσεων βήτα παλινδρόμησης, ορίζοντας ως εξαρτημένη μεταβλητή τον δείκτη αποδοτικότητας βιώσιμης οδήγησης σε επίπεδο διαδρομής και λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια σε επίπεδο οδικού άξονα. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση αναδείχθηκε ως ο σημαντικότερος εξωτερικός προσδιοριστικός παράγοντας, μειώνοντας συστηματικά τη βιωσιμότητα των διαδρομών μέσω της αύξησης της κατανάλωσης καυσίμου, του χρόνου διαδρομής, καθώς και της συχνότητας απότομων επιβραδύνσεων και χρήσης κινητού τηλεφώνου. Επιπλέον, μεταβλητές σχετικά με τον χρόνο και την οδική υποδομή παρουσίασαν επίσης συστηματικές επιδράσεις. Συνολικά, η παρούσα αναλυτική συνιστώσα κατέδειξε ότι η αποδοτικότητα βιώσιμης οδήγησης δεν αποτελεί μια απροσδιόριστη έννοια, αλλά έναν ποσοτικοποιημένο και ερμηνεύσιμο δείκτη απόδοσης.

Καινοτόμες Επιστημονικές Συνεισφορές

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή συμβάλλει ουσιαστικά στην πρόοδο της έρευνας στον τομέα της βιώσιμης κινητικότητας μέσω της ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου πολυεπίπεδου αναλυτικού πλαισίου για τη συνδυαστική αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας. Οι βασικές **επιστημονικές συνεισφορές** της διατριβής συνοψίζονται στο Σχήμα II.



Σχήμα II Καινοτόμες συνεισφορές της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής

- **Ολιστική Ενοποίηση Δεδομένων για την Ασφαλή και Πράσινη Κινητικότητα**

Μία από τις βασικές καινοτόμες συνεισφορές της διατριβής είναι η **ανάπτυξη ενός ενοποιημένου και πολυεπίπεδου οικοσυστήματος δεδομένων**, που καθιστά λειτουργικά μετρήσιμη την ασφαλή και πράσινη κινητικότητα στο πλαίσιο ενός ενιαίου αναλυτικού συστήματος. Η καινοτομία δεν έγκειται στα μεμονωμένα σύνολα δεδομένων, αλλά στη δομημένη συγχώνευσή τους σε μια συνεκτική αρχιτεκτονική χωρικής και χρονικής συνέπειας.

Δεδομένα τηλεματικής ευρείας κλίμακας αντιστοιχίστηκαν χωρικά μέσω της πλατφόρμας OSM, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ενσωμάτωση δεδομένων οδηγικής συμπεριφοράς και χαρακτηριστικών της οδικής υποδομής, συμπεριλαμβανομένης της κλίσης της οδού. Η στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου υπολογίστηκε μέσω του μοντέλου VT-CPFM, αξιοποιώντας χωρικά αντιστοιχισμένα δεδομένα μεταβλητών κίνησης σε χρονική ανάλυση δευτερολέπτου. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η άμεση ευθυγράμμιση των ΕΔΑ και της κατανάλωσης καυσίμου σε κοινές χρονικές και χωρικές κλίμακες, κάτι που σπανίως επιτυγχάνεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Επιπρόσθετα, η διατριβή επεκτείνει το πλαίσιο ανάλυσης ενσωματώνοντας ιστορικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων που έχουν καταγραφεί από την

αστυνομία στο ίδιο σύστημα χωρικής αναφοράς. Δεδομένου ότι η ακρίβεια χωρικού εντοπισμού των ατυχημάτων είναι υψηλότερη σε επίπεδο οδικού κόμβου, τα οδικά ατυχήματα, οι συγκεντρωτικοί δείκτες οδηγικής συμπεριφοράς και κατανάλωσης καυσίμου αντιστοιχίστηκαν και συγχωνεύθηκαν στο επίπεδο αυτό, δημιουργώντας ένα νέο σύνολο δεδομένων που συνδέει καταγεγραμμένα ατυχήματα με δείκτες οδήγησης και κατανάλωσης καυσίμου. Παράλληλα, οι διαστάσεις της κυκλοφορίας και των καιρικών συνθηκών ενσωματώθηκαν δομικά στην αρχιτεκτονική των δεδομένων. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες ευθυγραμμίστηκαν χωροχρονικά με τις διαδρομές τηλεματικής σε επιλεγμένους κρίσιμους οδικούς άξονες της ερευνητικής περιοχής. Αντίστοιχα, η χρονική αντιστοίχιση των μετεωρολογικών δεδομένων επέτρεψε στο αναλυτικό πλαίσιο να αποτυπώσει τη μεταβλητότητα που προκαλείται από μετεωρολογικούς και χρονικούς παράγοντες.

● Πολυεπίπεδη Ανάλυση της Ασφαλούς και Πράσινης Κινητικότητας

Μια επιπλέον καινοτόμος συνεισφορά αποτελεί η ανάπτυξη ενός **δομημένου αναλυτικού πλαισίου τριών αναλυτικών συνιστωσών**, που διερευνά συστηματικά την ασφαλή και πράσινη κινητικότητα σε δύο συμπληρωματικά επίπεδα, το επίπεδο διαδρομής και το χωρικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο αυτό οργανώνεται σε τρεις αναλυτικές συνιστώσες, οι οποίες συνδυάζουν την αναγνώριση προτύπων, την ποσοτικοποίηση των υποκείμενων μηχανισμών και την πολυκριτηριακή αξιολόγηση αποδοτικότητας μέσα σε μια ενιαία αναλυτική δομή που καλύπτει τα επίπεδα της εξατομικευμένης διαδρομής, του οδικού τμήματος, και του οδικού κόμβου. Συνεπώς, η διασύνδεσή τους στο ίδιο αναλυτικό πλαίσιο καθιστά δυνατή μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ασφαλούς και πράσινης κινητικότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η κατακόρυφη εν λόγω ενοποίηση τους, από την ατομική οδηγική συμπεριφορά έως την απόδοση σε επίπεδο οδικού συστήματος, συνιστά μια μεθοδολογική πρόοδο στην ανάλυση της βιώσιμης κινητικότητας, που παραμένει σχετικά περιορισμένη στη διεθνή βιβλιογραφία.

● Προηγμένος και Καινοτόμος Συνδυασμός Μεθόδων Μοντελοποίησης

Μια ακόμη σημαντική συνεισφορά της διατριβής είναι ο προηγμένος και ολοκληρωμένος **συνδυασμός στατιστικών, χωρικών, οικονομετρικών, συγκριτικών και τεχνικών MM** σε ένα ενιαίο αναλυτικό πλαίσιο. Αρχικά, τεχνικές μη επιβλεπόμενης μάθησης, όπως ο αλγόριθμος ομαδοποίησης k-means, συνδυάστηκαν με επιβλεπόμενες μεθόδους ταξινόμησης, όπως ο αλγόριθμος XGBoost, για τον εντοπισμό και την πρόβλεψη συνδυαστικών μοτίβων διαδρομών που ενσωματώνουν διαστάσεις οδικής ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας. Ο συνδυασμός της ομαδοποίησης διαδρομών με επεξηγηματικές τεχνικές MM ενισχύει τόσο την προβλεπτική ικανότητα όσο και τη διαφάνεια των μοντέλων. Επιπλέον, το μοντέλο SEM σε επίπεδο οδικού τμήματος βελτιώθηκε μέσω της χωρικής διόρθωσης ώστε να ληφθεί υπόψη η χωρική αυτοσυσχέτιση, ενισχύοντας τη μεθοδολογική αρτιότητα της ανάλυσης. Τέλος, πέρα από την κλασική εφαρμογή της μεθόδου DEA, η παρούσα διατριβή ενσωμάτωσε ερμηνευτικές τεχνικές SHAP και ανάλυση μέσω μοντέλων βήτα παλινδρόμησης, ενισχύοντας τη δυνατότητα ερμηνείας των μη παραμετρικών μοντέλων συγκριτικής αξιολόγησης. Η καινοτομία, συνεπώς, δεν έγκειται απλώς στη χρήση των επιμέρους τεχνικών, αλλά στον συνδυασμό τους, που προάγει την αναλυτική πολυπλοκότητα της έρευνας βιώσιμης κινητικότητας και προσφέρει ένα μεταβιβάσιμο πρότυπο μοντελοποίησης.

● Ανάδειξη Συνεργειών και Συμβιβασμών μεταξύ Ασφαλούς και Πράσινης Κινητικότητας

Μια σημαντική καινοτόμος συνεισφορά της παρούσας διατριβής αφορά στην **ολοκληρωμένη αξιολόγηση**, βασισμένη σε δεδομένα, της οδικής ασφάλειας και της οικονομικής/περιβαλλοντικής αποδοτικότητας μέσω της κατανάλωσης καυσίμου, αντιμετωπίζοντάς τες ως αλληλένδετες διαστάσεις της βιώσιμης κινητικότητας.

Η διατριβή παρέχει στατιστικά τεκμηριωμένες ενδείξεις ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ οδικής ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας εξαρτώνται τόσο από τους υποκείμενους μηχανισμούς όσο και από το επίπεδο ανάλυσης, αναδεικνύοντας συνέργειες αλλά και συμβιβασμούς. Σε επίπεδο διαδρομής, αναγνωρίζονται συνδυαστικά μοτίβα βιώσιμης κινητικότητας που αποτυπώνουν τόσο συνεργατικά βιώσιμα μοτίβα, όπως διαδρομές «Χαμηλής Επικινδυνότητας × Χαμηλής Κατανάλωσης», όσο και κρίσιμα χαμηλής βιωσιμότητας μοτίβα, όπως διαδρομές «Υψηλής Επικινδυνότητας × Υψηλής Κατανάλωσης». Μέσω ερμηνεύσιμων τεχνικών MM εντοπίζονται οι κυρίαρχοι συμπεριφορικοί και εξωτερικοί παράγοντες, όπως η επιλογή ταχύτητας, η συχνότητα στάσεων, και η πολυπλοκότητα οδικών περιβαλλόντων, δημιουργώντας ένα ερμηνεύσιμο πλαίσιο για την παροχή ανατροφοδότησης στους οδηγούς και την ανάπτυξη συστημάτων κινήτρων για τη βιώσιμη οδήγηση. Σε χωρικό επίπεδο, αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο αναλυτικό πλαίσιο εντοπισμού σημείων αυξημένης επικινδυνότητας και κατανάλωσης (hotspots), καθώς και βέλτιστων συμβιβασμών μεταξύ ασφάλειας και οικονομίας. Μέσω του εν λόγω πλαισίου, εντοπίζονται οι περιοχές επικάλυψης μεταξύ των δύο διαφορετικών τύπων «hotspots», καθώς και οι κόμβοι που παρουσιάζουν τους βέλτιστους συμβιβασμούς μεταξύ ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας, παρέχοντας αξιόπιστα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για φορείς διαχείρισης οδικών δικτύων.

Η διατριβή συμβάλλει περαιτέρω στην κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών που διασυνδέουν την ασφαλή οδηγική συμπεριφορά (μέσω των ΕΔΑ) με την κατανάλωση καυσίμου. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι η επιθετική οδήγηση και η οδήγηση υπό απόσπαση προσοχής συσχετίζονται συστηματικά με υψηλότερα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου στα διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης. Αντίθετα, η υπέρβαση των ορίων ταχύτητας εμφανίζει διαφοροποιημένο πρότυπο συσχέτισης. Παρότι συνδέεται με αυξημένη επικινδυνότητα, η σχέση της με την κατανάλωση καυσίμου μεταβάλλεται ανάλογα με το εκάστοτε συγκείμενο. Η εφαρμογή μοντέλων δομικών εξισώσεων επέτρεψε τον συστηματικό έλεγχο και την εμπειρική επιβεβαίωση των σχέσεων αυτών, συμβάλλοντας σε μια πληρέστερη κατανόηση των συνθηκών υπό τις οποίες οι στόχοι της οδικής ασφάλειας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά ή, αντίθετα, να οδηγήσουν σε αναπόφευκτους συμβιβασμούς.

● **Ανάπτυξη Πολυεπίπεδου Δείκτη Αποδοτικότητας Βιώσιμης Οδήγησης**

Τέλος, μια σημαντική καινοτόμος συνεισφορά της διατριβής είναι η **ανάπτυξη ενός ενιαίου δείκτη αποδοτικότητας βιώσιμης οδήγησης**, που ενσωματώνει συνεκτικά την οδική ασφάλεια, την κατανάλωση καυσίμου και τον χρόνο ταξιδιού σε ένα ενιαίο αναλυτικό πλαίσιο, επιτρέποντας την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας της οδηγικής συμπεριφοράς. Μέσω του αποτελεσματικού συνδυασμού πολύ-κριτηριακής μοντελοποίησης αποδοτικότητας με ερμηνεύσιμες τεχνικές MM, η αναπτυγμένη προσέγγιση ενισχύει την ερμηνευσιμότητα των αποτελεσμάτων αποδοτικότητας και επιτρέπει τον εντοπισμό των σημαντικότερων προσδιοριστικών παραγόντων της βιώσιμης οδηγικής απόδοσης. Επιπλέον, μια σημαντική συμβολή της διατριβής έγκειται στη δυνατότητα κατακόρυφης κλιμάκωσης της ανάλυσης, από τους δείκτες αποδοτικότητας στο μικροσκοπικό επίπεδο της εξατομικευμένης διαδρομής έως τις κατατάξεις αποδοτικότητας στο μακροσκοπικό επίπεδο του οδικού άξονα, συνδέοντας την ατομική οδηγική συμπεριφορά με τα αποτελέσματα βιωσιμότητας σε επίπεδο οδικού δικτύου. Από πρακτική σκοπιά, ο αναπτυγμένος δείκτης αποδοτικότητας βιώσιμης οδήγησης μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλείο παρακολούθησης και αξιολόγησης της βιώσιμης κινητικότητας, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη την οδική ασφάλεια, το περιβάλλον και τις κυκλοφοριακές συνθήκες.