

Εκτεταμένη Περίληψη

Αναγνωρίζοντας την οδική ασφάλεια ως κρίσιμο ζήτημα δημόσιας υγείας με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις, είναι απαραίτητο να κατανοηθεί η **πολύπλευρη φύση των οδικών ατυχημάτων**. Τα οδικά ατυχήματα επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους που μπορούν να χωριστούν σε τρεις διακριτές κατηγορίες: (i) χρήστες της οδού, (ii) οχήματα και (iii) οδική υποδομή και οδικό περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα σημαντικό ποσοστό των οδικών ατυχημάτων, έως και 94%, μπορεί να αποδοθεί, είτε αποκλειστικά είτε εν μέρει, στον ανθρώπινο παράγοντα και σε ανθρώπινα λάθη.

Λαμβάνοντας υπόψη το προαναφερθέν πλαίσιο, ο κύριος στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η **αξιολόγηση του κινδύνου οδικού ατυχήματος συνδυάζοντας δεδομένα οδικής υποδομής, κυκλοφορίας και συμπεριφοράς του οδηγού**. Αυτός ο συνδυασμός των δεδομένων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για έρευνα. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή αυτού του συνδυασμού δεδομένων παρεμποδίζεται συχνά από δυσκολίες και προκλήσεις όπως η ανεπαρκής διαθεσιμότητα δεδομένων ή η μη βέλτιστη ποιότητά τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, διεξήχθη εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να παράσχει μια ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας των μελετών που αξιοποιούν τους Έμμεσους Δείκτες Ασφαλείας (ΕΔΑ) σε διερευνήσεις ιστορικών οδικών ατυχημάτων. Οι ΕΔΑ περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων και παραμέτρων, οι οποίες δεν προκύπτουν άμεσα από δεδομένα οδικών ατυχημάτων ή δεν βασίζονται σε αυτά. Από τη διαδικασία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης προέκυψε το συμπέρασμα ότι **οι ΕΔΑ κερδίζουν συνεχώς έδαφος στην έρευνα για την οδική ασφάλεια**, καθώς αποτελούν έναν βιώσιμο τρόπο μέτρησης της οδικής ασφάλειας και επιτρέπουν τη διεξαγωγή αναλύσεων χωρίς να χρειάζονται απαραίτητα ιστορικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων. Οι δείκτες αυτοί μπορούν είτε να αποτελέσουν εναλλακτική λύση για τις αναλύσεις οδικής ασφάλειας είτε ακόμη και να συμπληρώσουν τις αναλύσεις που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων. Επιπλέον, η ταχεία και συνεχής πρόοδος στον τομέα της τεχνολογίας καθιστά όλο και πιο εύκολη τη συλλογή τέτοιων δεικτών. Οι ΕΔΑ, όπως ο χρόνος για σύγκρουση με το προπορευόμενο όχημα, η απότομη επιβράδυνση κτλ., προτείνονται ευρέως στην επιστήμη των μεταφορών και είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι προκειμένου να αξιολογηθεί ο κίνδυνος οδικών ατυχημάτων.

Στη συνέχεια, διατυπώθηκαν τα ακόλουθα **ερευνητικά ερωτήματα**:

Ερώτημα 1

Πώς μπορούν να συνδυαστούν και να αναλυθούν τα δεδομένα υποδομής, κυκλοφορίας και συμπεριφοράς των οδηγών ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την αξιολόγηση του κινδύνου οδικού ατυχήματος;

Ερώτημα 2

- α) Μπορούν τα συμβάντα απότομης συμπεριφοράς του οδηγού να θεωρηθούν αξιόπιστοι ΕΔΑ;
- β) Υπάρχει στατιστικά σημαντική και θετική συσχέτιση μεταξύ συμβάντων απότομης συμπεριφοράς του οδηγού και ιστορικών δεδομένων οδικών ατυχημάτων;

Ερώτημα 3

Είναι δυνατή η πρόβλεψη της επικινδυνότητας οδικών τμημάτων με την αξιοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού και των ΕΔΑ που βασίζονται στη συμπεριφορά του οδηγού, και, αν ναι, ποιοι ταξινομητές μηχανικής μάθησης είναι οι καταλληλότεροι;

Ερώτημα 4

Είναι τα συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων πιο σημαντικά από εκείνα των απότομων επιταχύνσεων για την πρόβλεψη της κατηγορίας επικινδυνότητας των οδικών τμημάτων;

Ερώτημα 5

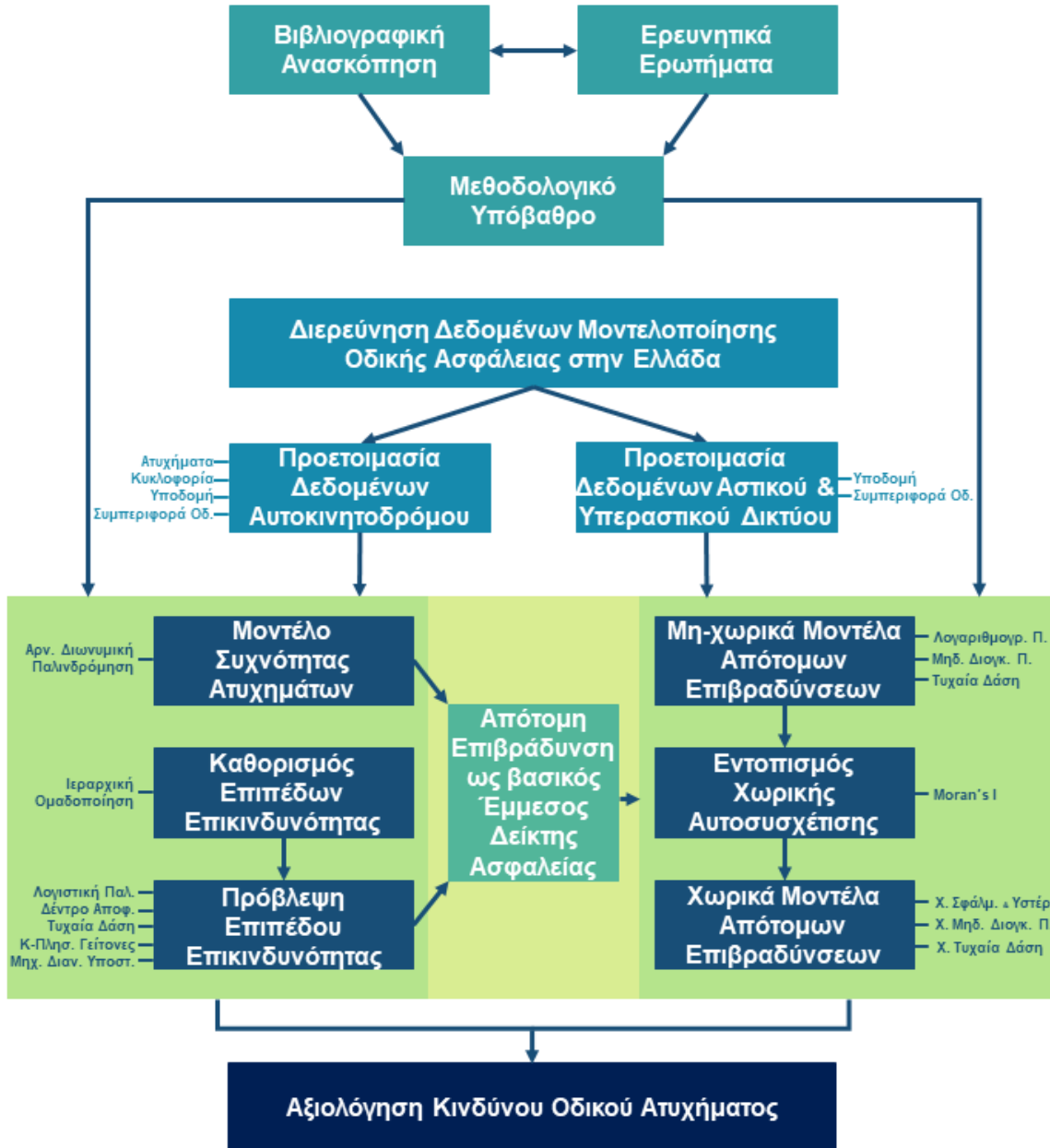
- α) Ελλείπει ιδιαίτερα λεπτομερών ιστορικών δεδομένων οδικών ατυχημάτων, πώς μπορούν να αναλυθούν οι απότομες επιβραδύνσεις σε διάφορα οδικά περιβάλλοντα;
- β) Υπάρχει χωρική αυτοσυσχέτιση στις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων για τα οδικά τμήματα και, αν ναι, οι προσεγγίσεις χωρικής μοντελοποίησης υπερτερούν έναντι των αντίστοιχων μη χωρικών προσεγγίσεων;

Ερώτημα 6

Ποιες παράμετροι της οδικής υποδομής και της συμπεριφοράς του οδηγού παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική επιρροή στον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων ανά οδικό τμήμα;

Αυτά τα ερευνητικά ερωτήματα αποτέλεσαν την κινητήρια δύναμη πίσω από την παρούσα ερευνητική προσπάθεια, διερευνώντας τον συνδυασμό και την ανάλυση των δεδομένων υποδομής, κυκλοφορίας και συμπεριφοράς των οδηγών για την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων στην εκτίμηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων.

Προκειμένου να απαντηθούν αυτά τα ερευνητικά ερωτήματα, σχεδιάστηκε ένα σύνθετο **μεθοδολογικό πλαίσιο**, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα Ι.



Σχήμα Ι: Γραφική αναπαράσταση του γενικού μεθοδολογικού πλαισίου της διδακτορικής διατριβής

Ο πυρήνας του μεθοδολογικού πλαισίου περιλάμβανε μια διαδικασία πολλών σταδίων, η οποία ξεκίνησε με τη **διερεύνηση των διαθέσιμων δεδομένων μοντελοποίησης της οδικής ασφάλειας στην Ελλάδα**, θέτοντας τις βάσεις για τις επόμενες κατευθύνσεις. Η διερεύνηση αυτή ανέδειξε τους περιορισμούς που

σχετίζονται με την ανάπτυξη λεπτομερών μοντέλων πρόβλεψης ατυχημάτων στην Ελλάδα. Η ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων είναι εφικτή μόνο για τους αυτοκινητοδρόμους καθώς για αυτούς υπάρχουν υψηλής ποιότητας διαθέσιμα δεδομένα ατυχημάτων, ειδικά όσον αφορά στην ακριβή θέση των ατυχημάτων και τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας ανά οδικό τμήμα. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικές βάσεις δεδομένων.

Η πρώτη βάση δεδομένων επικεντρώθηκε σε **668 οδικά τμήματα** του αυτοκινητοδρόμου της Ολυμπίας Οδού, για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τα οδικά ατυχήματα, την κυκλοφορία, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διάφορους δείκτες συμπεριφοράς των οδηγών. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν δεδομένα ατυχημάτων όλων των επιπέδων σοβαρότητας, συμπεριλαμβανομένων των ατυχημάτων με υλικές ζημιές μόνο, για τα έτη 2018-2020. Παράλληλα με τα δεδομένα οδικών ατυχημάτων, στη βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε συμπεριλήφθηκαν δεδομένα Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας (ΕΜΗΚ) για την ίδια χρονική περίοδο. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της οδικής υποδομής, συνδυάστηκαν πληροφορίες από διάφορες πηγές, όπως δεδομένα από τον φορέα διαχείρισης του αυτοκινητοδρόμου και δεδομένα που προήλθαν από τη χρήση διάφορων λογισμικών, συμπεριλαμβανομένων των Open GIS, Google Earth και GoogleStreetView. Η συμπερίληψη των δεδομένων οδικής υποδομής και των σχεδίων αναφοράς του αυτοκινητόδρομου επέτρεψε επίσης τον εντοπισμό και την απομόνωση των δεδομένων συμπεριφοράς του οδηγού υπό πραγματικές συνθήκες μέσω μιας εφαρμογής για έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Τα δεδομένα συμπεριφοράς των οδηγών συλλέχθηκαν για την περίοδο από την 1η Ιουνίου 2019 έως τις 31 Δεκεμβρίου 2020, από δείγμα 327 οδηγών το 2019 και 330 οδηγών το 2020. Ο μέσος αριθμός διαδρομών ανά τμήμα αυτοκινητόδρομου καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης ήταν 769 διαδρομές.

Η δεύτερη βάση δεδομένων κάλυψε ένα **ευρύτερο οδικό δίκτυο εντός της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης**, συμπεριλαμβανομένων τόσο αστικών όσο και υπεραστικών οδών. Για το εξεταζόμενο δίκτυο, πραγματοποιήθηκε μια αρχική ανάλυση όλων των οδικών τμημάτων που προήλθαν από το OpenStreetMap (OSM) για την εξαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα συμπεριφοράς των οδηγών υπό πραγματικές συνθήκες, τα οποία εξήχθησαν από εφαρμογή για έξυπνα κινητά τηλέφωνα, αντιστοιχήθηκαν με τα αντίστοιχα οδικά τμήματα του OSM. Το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο περιλάμβανε **6.103 οδικά τμήματα**, με μέσο μήκος 288,8 μέτρα, με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου να ανέρχεται σε 1.763 χιλιόμετρα. Όσον αφορά τις μετρήσεις της συμπεριφοράς του οδηγού, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 5.129 ταξίδια κατά τη διάρκεια του 2021. Η μέση διάρκεια ταξιδιού ήταν 634 δευτερόλεπτα, με τυπική απόκλιση 556 δευτερόλεπτα. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε για το εν λόγω οδικό δίκτυο δεν περιείχε λεπτομερή δεδομένα ατυχημάτων και κυκλοφορίας για τα εξεταζόμενα οδικά τμήματα.

Εφαρμόστηκαν διάφορα **μεθοδολογικά εργαλεία** για τα οδικά τμήματα του αυτοκινητόδρομου της Ολυμπίας Οδού. Σε αυτά περιλαμβάνονταν τεχνικές όπως η αρνητική διωνυμική παλινδρόμηση (ΑΔΠ) για την ανάπτυξη ενός μοντέλου συχνότητας ατυχημάτων, η ιεραρχική ομαδοποίηση (ΙΟ) για τον προσδιορισμό των επιπέδων επικινδυνότητας των τμημάτων με βάση ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων και χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας, και η χρήση ταξινομητών μηχανικής μάθησης όπως η Λογιστική Παλινδρόμηση (ΛΠ), το Δέντρο Αποφάσεων (ΔΑ), τα Τυχαία Δάση (ΤΔ), οι Κ-Πλησιέστεροι Γείτονες (Κ-ΠΓ) και οι Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης (ΜΔΥ). Αυτοί οι ταξινομητές χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του επιπέδου επικινδυνότητας των τμημάτων, αξιοποιώντας δεδομένα υποδομής και συμπεριφοράς των οδηγών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συμβάντων απότομης συμπεριφοράς του οδηγού ως ΕΔΑ.

Στη συνέχεια, το πλαίσιο επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει τα δεδομένα του οδικού δικτύου της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, αξιοποιώντας συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων για την αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων. Αυτό περιλάμβανε την εφαρμογή τόσο μη χωρικών όσο και **χωρικών μοντέλων** για τον εντοπισμό σημαντικών παραμέτρων οδικής υποδομής και συμπεριφοράς του οδηγού που επηρεάζουν τον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων ανά οδικό τμήμα.

Τελικώς, η σύνθεση όλων των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής οδήγησε σε μια **ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων** με πολλά πρωτότυπα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα, τα οποία αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια παρακάτω.

Για τις αναλύσεις του αυτοκινητοδρόμου, αξιοποιήθηκε μια ενοποιημένη βάση δεδομένων που περιλάμβανε δεδομένα για ιστορικά οδικά ατυχήματα με τραυματισμούς και ατυχήματα με υλικές ζημιές, χαρακτηριστικά κυκλοφορίας, χαρακτηριστικά γεωμετρίας της οδού και ΕΔΑ συμπεριφοράς οδηγού για 668 οδικά τμήματα του αυτοκινητοδρόμου της Ολυμπίας Οδού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συχνότητας ατυχημάτων (ΑΔΠ) έδειξαν ότι η συχνότητα οδικών ατυχημάτων στα εξεταζόμενα τμήματα του αυτοκινητοδρόμου συσχετίζεται θετικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο, το μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος, τον αριθμό των απότομων επιταχύνσεων και τον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων ανά διερχόμενες διαδρομές του κάθε τμήματος. Το εύρημα αυτό συμβάλλει στην υπάρχουσα βιβλιογραφία για την οδική ασφάλεια, καθώς διαπιστώνει **θετική και στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της συχνότητας οδικών ατυχημάτων και των συμβάντων απότομης συμπεριφοράς του οδηγού**. Κατά συνέπεια, συνάγεται ότι αυτά τα συμβάντα μπορούν να χρησιμεύσουν ως έγκυρη υποκατηγορία των ΕΔΑ υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης. Συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη συμπλήρωση των μοντέλων πρόβλεψης ατυχημάτων (ΜΠΑ) είτε ως εξαρτημένες μεταβλητές σε διάφορες προληπτικές αναλύσεις οδικής ασφάλειας, ιδίως

σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν λεπτομερή ιστορικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων.

Ως περαιτέρω στάδιο των ερευνών για τον αυτοκινητόδρομο, έγινε προσπάθεια να διαμορφωθούν **επίπεδα επικινδυνότητας** των εξεταζόμενων οδικών τμημάτων. Αυτό επιτεύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των οδικών ατυχημάτων ανά μήκος τμήματος και την κυκλοφορία κάθε τμήματος με τη χρήση της τεχνικής της συσσωρευτικής ιεραρχικής ομαδοποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του μήκους του οδικού τμήματος και του κυκλοφοριακού φόρτου, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του μοντέλου ΑΔΠ, και οι δύο αυτές μεταβλητές συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση ομαδοποίησης λόγω της στατιστικά σημαντικής επίδρασής τους στη συχνότητα ατυχημάτων στα εξεταζόμενα οδικά τμήματα. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας ομαδοποίησης καθόρισαν τέσσερα διακριτά επίπεδα επικινδυνότητας με ένα σαφές μοτίβο, σύμφωνα με το οποίο η πρώτη κατηγορία επικινδυνότητας παρουσιάζει υψηλό μέσο κυκλοφοριακό φόρτο και αριθμό οδικών ατυχημάτων ανά μήκος τμήματος, ενώ τα μεγέθη αυτά μειώνονται προοδευτικά για κάθε επόμενη κατηγορία επικινδυνότητας.

Στη συνέχεια, τα τέσσερα επίπεδα επικινδυνότητας χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένη μεταβλητή/ μεταβλητή απόκρισης σε πέντε μοντέλα ταξινόμησης μηχανικής μάθησης (ΛΠ, ΔΑ, ΤΔ, ΜΔΥ και Κ-ΠΓ). Οι ταξινομητές αυτοί, περιλάμβαναν προγνωστικούς παράγοντες σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και μη ασφαείς συμπεριφορές οδήγησης, όπως δείκτες απότομων επιβραδύνσεων, απότομων επιταχύνσεων και διάρκεια υπέρβασης των ορίων ταχύτητας ανά διαδρομή εντός των εξεταζόμενων οδικών τμημάτων. Μεταξύ των πέντε μοντέλων, το **μοντέλο ΤΔ επέδειξε ανώτερες επιδόσεις ταξινόμησης** σε όλες τις κατηγορίες επικινδυνότητας, επιτυγχάνοντας σταθερά βαθμολογίες άνω του 89% (συνολική ορθότητα: 89,9%, μακρο-μεσοσταθμική ακρίβεια: 90,7%, μακρο-μεσοσταθμική ανάκληση: 89,9%, μακρο-μεσοσταθμική βαθμολογία F1: 90,2%). Το αποτέλεσμα αυτό αποκαλύπτει τις δυνατότητες του μοντέλου ΤΔ που αναπτύχθηκε ως ένα πολλά υποσχόμενο προληπτικό εργαλείο οδικής ασφάλειας, ικανό να εντοπίζει αποτελεσματικά και να ιεραρχεί δυνητικά επικίνδυνα τμήματα αυτοκινητοδρόμων.

Τέλος, για να διευκολυνθεί η ερμηνεία του μοντέλου ΤΔ, το οποίο λειτουργεί εγγενώς ως μοντέλο-μαύρο κουτί μηχανικής μάθησης, υπολογίστηκαν οι τιμές SHAP για ένα τυπικό τμήμα αυτοκινητόδρομου. Με βάση τις τιμές SHAP των προβλεπτικών παραγόντων συμπεριφοράς οδηγού, προέκυψε ότι οι **απότομες επιβραδύνσεις χρησιμεύουν ως πιο κατάλληλος ΕΔΑ από τις απότομες επιταχύνσεις** όσον αφορά την πρόβλεψη της επικινδυνότητας των οδικών τμημάτων.

Στο πλαίσιο του ευρύτερου οδικού δικτύου της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, αναλύθηκε ένα σύνολο χωρικών δεδομένων που αποτελείται από συγκεντρωτικούς δείκτες συμπεριφοράς του οδηγού υπό πραγματικές συνθήκες,

καθώς και γεωμετρικά χαρακτηριστικά και λοιπά χαρακτηριστικά του δικτύου σε επίπεδο οδικού τμήματος. Για τα εξεταζόμενα 6.103 οδικά τμήματα, και με βάση τον δείκτη Moran's I , εντοπίστηκε στατιστικά σημαντική και θετική **χωρική αυτοσυσχέτιση στις συχνότητες των απότομων επιβραδύνσεων**. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν μη χωρικές τεχνικές μοντελοποίησης, όπως το λογαριθμογραμμικό μοντέλο, η Μηδενικά Διογκωμένη Αρνητική Διωνυμική (ΜΔΑΔ) παλινδρόμηση και το συμβατικό μοντέλο παλινδρόμησης ΤΔ στις συχνότητες των απότομων επιβραδύνσεων. Ωστόσο, η ύπαρξη χωρικής αυτοσυσχέτισης ανέδειξε την ανάγκη ανάπτυξης χωρικών μοντέλων, όπως το Χωρικό Μοντέλο διόρθωσης του Σφάλματος (ΧΜΣ), το Χωρικό Μοντέλο Υστέρησης (ΧΜΥ), το Χωρικό μοντέλο Μηδενικά Διογκωμένης Αρνητικής Διωνυμικής παλινδρόμησης (ΧΜΔΑΔ) και το Χωρικό μοντέλο Τυχαίων Δασών (ΧΤΔ), προκειμένου να ληφθούν υπόψη αυτές οι χωρικές εξαρτήσεις.

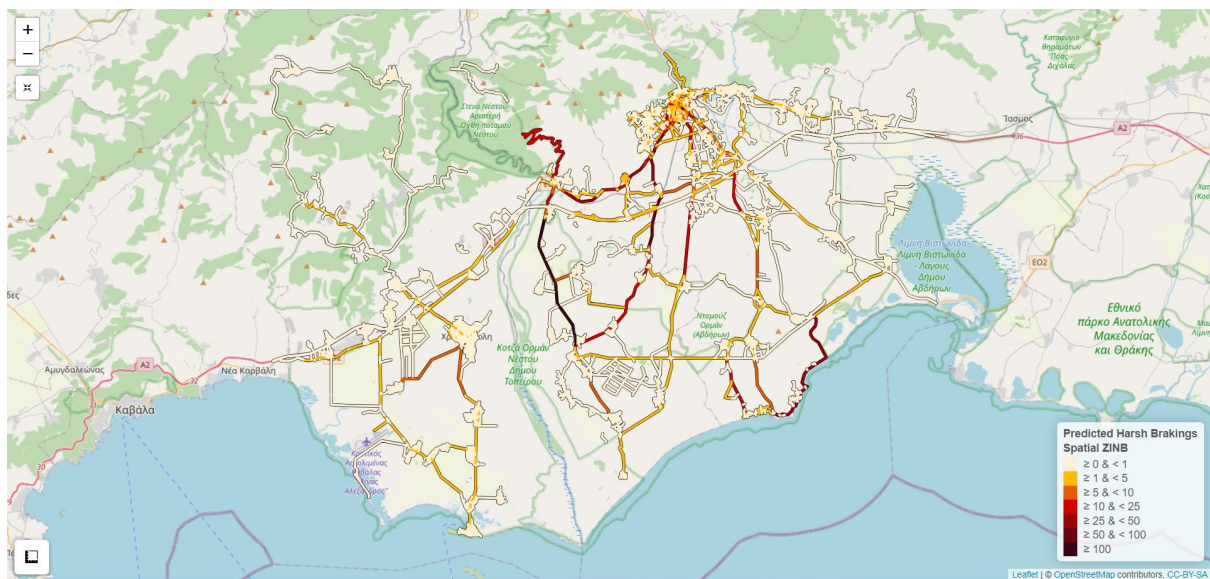
Σε όλα τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν προέκυψαν **σταθερά πρόσημα στους συντελεστές των μεταβλητών**. Συγκεκριμένα, το μήκος του οδικού τμήματος και ο αριθμός των διαδρομών ανά τμήμα προσδιορίστηκαν ως υποκατάστατοι δείκτες της έκθεσης σε κίνδυνο, οι οποίοι συσχετίζονται θετικά με τις απότομες επιβραδύνσεις. Επιπλέον, ο δείκτης αποτελεσματικότητας (στατιστικά σημαντικός μόνο στο λογαριθμογραμμικό μοντέλο, στο ΜΧΣ και στο ΜΧΥ), που σχετίζεται με τη γραμμικότητα των οδικών τμημάτων, παρουσίασε θετική συσχέτιση με τα συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων, υποδηλώνοντας ότι οι οδηγοί προβαίνουν συχνότερα σε απότομες επιβραδύνσεις σε οδικά τμήματα με λιγότερες καμπύλες. Οι μεταβλητές που σχετίζονται με την υπέρβαση των ορίων ταχύτητας και τη χρήση κινητού τηλεφώνου συσχετίστηκαν επίσης θετικά με τις απότομες επιβραδύνσεις, ενώ οι αυτοκινητόδρομοι παρουσίασαν λιγότερα συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων σε σύγκριση με άλλους τύπους οδού.

Και στα δύο μοντέλα ΤΔ, **ο αριθμός των διαδρομών ανά εξεταζόμενο οδικό τμήμα βρέθηκε να είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας πρόβλεψης**, αναδεικνύοντας την υψηλή σημασία του στην πρόβλεψη της συχνότητας των απότομων επιβραδύνσεων, καθώς χρησιμεύει ως μέτρο έκθεσης στον κίνδυνο. Από την άλλη πλευρά, η μεταβλητή «αυτοκινητόδρομος» παρουσίασε τη χαμηλότερη επιρροή, υποδεικνύοντας ότι ο τύπος της οδού είναι σχετικά λιγότερο κρίσιμος για την πρόβλεψη του αριθμού των απότομων επιβραδύνσεων. Το εύρημα αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι άλλοι παράγοντες πέραν του τύπου της οδού, όπως η απόσπαση της προσοχής του οδηγού και η υπέρβαση των ορίων ταχύτητας, ενδεχομένως να κατέχουν σημαντικότερο ρόλο στην επιρροή της συχνότητας των απότομων επιβραδύνσεων.

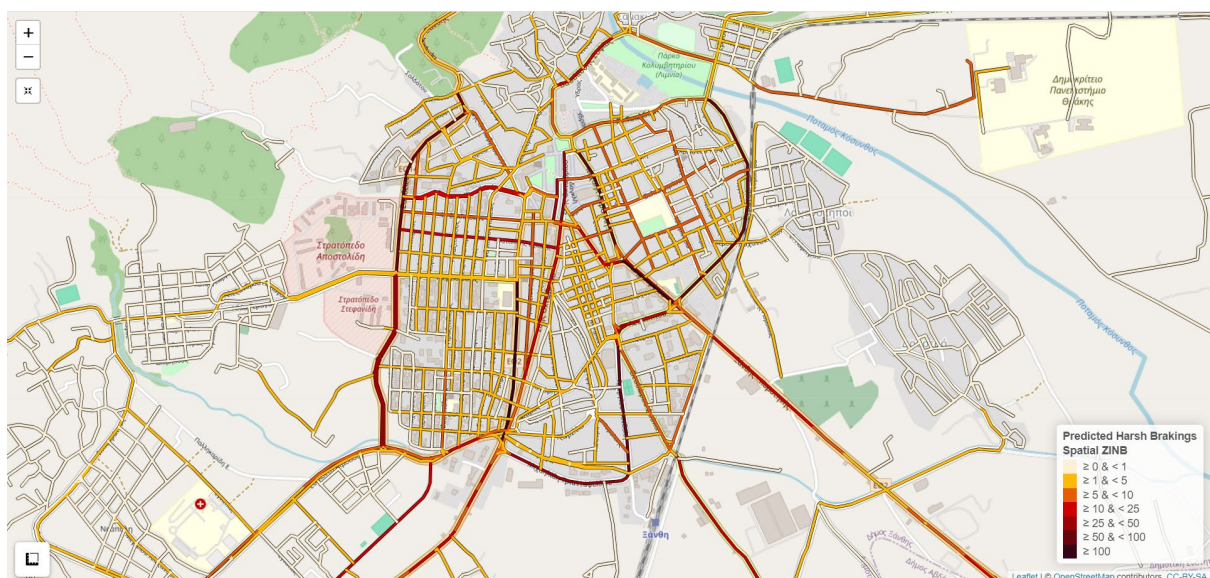
Όσον αφορά την επίδοση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, το **ΧΜΥ ξεπέρασε** τόσο το λογαριθμογραμμικό μοντέλο όσο και το ΧΜΣ, με χαμηλότερες τιμές του δείκτη AIC και απουσία χωρικής αυτοσυσχέτισης στα κατάλοιπά του. Χαμηλότερες τιμές του δείκτη AIC, που υποδηλώνουν καλύτερη προσαρμογή, παρατηρήθηκαν επίσης για το μοντέλο ΧΜΔΑΔ σε σύγκριση με το μη χωρικό μοντέλο ΜΔΑΔ. Επιπλέον, το **ΧΤΔ**

μείωσε τις απόλυτες τιμές της χωρικής αυτοσυσχέτισης στα κατάλοιπα σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του συμβατικού μοντέλου ΤΔ. Επιπλέον, το ΧΤΔ υπερέχει του μη χωρικού μοντέλου ΤΔ όσον αφορά την προσαρμογή του μοντέλου στα παρατηρούμενα δεδομένα, αλλά το μη χωρικό μοντέλο είχε καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά τη γενίκευση σε μη παρατηρούμενα δεδομένα.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων που αναπτύχθηκαν για το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης **απεικονίζονται επίσης σε χάρτες**. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα του μοντέλου ΧΜΔΑΔ παρουσιάζονται στο Σχήμα II, ενώ το Σχήμα III παρέχει μια μεγεθυμένη άποψη του Σχήματος II, εστιάζοντας συγκεκριμένα στο κέντρο της πόλης της Ξάνθης.



Σχήμα II: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου ΧΜΔΑΔ στο εξεταζόμενο οδικό δίκτυο



Σχήμα III: Μεγεθυμένη άποψη των αποτελεσμάτων του μοντέλου ΧΜΔΑΔ για το κέντρο της Ξάνθης

Η παρούσα διδακτορική διατριβή προσφέρει **αξιοσημείωτες και καινοτόμες συνεισφορές** στον τομέα της οδικής ασφάλειας. Οι συνεισφορές αυτές παρουσιάζονται με περισσότερη λεπτομέρεια παρακάτω.

Ολιστική Προσέγγιση Συλλογής Δεδομένων

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, πραγματοποιήθηκε μια **εκτενής συλλογή δεδομένων** για τη διερεύνηση της επιρροής της συμπεριφοράς του οδηγού, των χαρακτηριστικών της οδικής υποδομής και των χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας στην αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων. Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν διευκολύνει σημαντικά τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές, δημιουργώντας νέες ερευνητικές ευκαιρίες που προηγουμένως δεν είχαν διερευνηθεί.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διατριβή αξιοποιήθηκαν **βάσεις δεδομένων ευρείας κλίμακας με στοιχεία υψηλής ευκρίνειας** για την οδήγηση υπό πραγματικές συνθήκες που συλλέχθηκαν από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων για την αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων σε αυτοκινητόδρομους και σε ένα ευρύτερο οδικό δίκτυο, που περιλαμβάνει τόσο αστικές όσο και υπεραστικές οδούς. Για τα δεδομένα οδικών υποδομών στον εξεταζόμενο αυτοκινητόδρομο, αξιοποιήθηκαν διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων δεδομένων που παρέχονται από την αρχή διαχείρισης και λειτουργίας του αυτοκινητοδρόμου και λογισμικών όπως το Open GIS, το Google Earth και το GoogleStreetView. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά του δικτύου για το ευρύτερο οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης προέκυψαν με τη χρήση αλγορίθμων στη γλώσσα προγραμματισμού R. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες βιβλιοθήκες για την εξαγωγή δεδομένων από το OSM και την επεξεργασία τους ως απλά χωρικά στοιχεία. Όσον αφορά τα δεδομένα οδικών ατυχημάτων και κυκλοφορίας στον εξεταζόμενο αυτοκινητόδρομο, αξιοποιήθηκαν δεδομένα υψηλής ποιότητας που παραχωρήθηκαν από τον φορέα διαχείρισης και λειτουργίας της οδού. Αυτά περιλάμβαναν δεδομένα οδικών ατυχημάτων όλων των βαθμών σοβαρότητας, συμπεριλαμβανομένων των ατυχημάτων μόνο με υλικές ζημιές, με ακρίβεια στη θέση των ατυχημάτων, που καλύπτουν την περίοδο από το 2018 έως το 2020. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ΕΜΗΚ που προέκυψαν από τους σταθμούς διοδίων του αυτοκινητοδρόμου για την αντίστοιχη χρονική περίοδο.

Πολυδιάστατος Συνδυασμός Δεδομένων για Αναλύσεις σε Επίπεδο Οδικού Τμήματος

Η συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές και σε διαφορετικά επίπεδα απαιτεί **κατάλληλη επεξεργασία για την ενοποίηση των δεδομένων**. Η πρώτη βάση δεδομένων ήταν σε επίπεδο οδικού τμήματος και περιλάμβανε 668 τμήματα αυτοκινητοδρόμου μήκους από 200 έως 600 μέτρα. Συγκεκριμένα, περιλάμβανε δεδομένα σχετικά με οδικά ατυχήματα, κυκλοφοριακούς φόρτους και γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, έπρεπε να αντιστοιχηθούν στα εξεταζόμενα οδικά τμήματα δείκτες συμπεριφοράς των οδηγών που προέκυψαν από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων. Η αντιστοίχιση αυτή επιτεύχθηκε μέσω GIS και της

απομόνωσης κάθε μέρους των διαδρομών στο αντίστοιχο οδικό τμήμα από την εταιρεία που παρείχε τα δεδομένα με τη χρήση πολυγώνων ESRI σε διαστήματα των 200 μέτρων.

Για το ευρύτερο αστικό και υπεραστικό οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, το οποίο περιλάμβανε δεδομένα υποδομής και συμπεριφοράς των οδηγών, εφαρμόστηκε μια **σειρά αλγορίθμων επεξεργασίας**. Αρχικά, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων για το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο, η οποία περιλάμβανε 6.103 οδικά τμήματα. Αυτή η βάση δεδομένων περιείχε βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως μήκος, καμπυλότητα, τύπος οδού κ.λπ. για κάθε τμήμα. Η εξαγωγή δεδομένων από το OSM και η δημιουργία της βάσης δεδομένων περιλάμβανε την αξιοποίηση βιβλιοθηκών της R που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για αντίστοιχους σκοπούς. Στη συνέχεια, έπρεπε να αντιστοιχηθούν στα οδικά τμήματα τα δεδομένα συμπεριφοράς των οδηγών υπό πραγματικές συνθήκες οδήγησης, τα οποία εξήχθησαν από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων και κάλυπταν δείκτες όπως οι απότομες επιβραδύνσεις, η υπέρβαση ορίων ταχύτητας, η απόσπαση προσοχής λόγω χρήσης κινητού τηλεφώνου κ.λπ. για κάθε δευτερόλεπτο των διαδρομών που πραγματοποιήθηκαν το 2021 στην περιοχή μελέτης. Η διαδικασία αυτή επιτεύχθηκε μέσω χωρικής αντιστοίχισης-χαρτών. Αρχικά, προσδιορίστηκε το κεντροειδές κάθε σειράς-γραμμών των οδικών τμημάτων με τη χρήση της συνάρτησης "st_centroid" από τη βιβλιοθήκη "sf" της γλώσσας προγραμματισμού R. Σημειώνεται ότι τα κεντροειδή είναι σημειακά μεγέθη και αντιπροσωπεύουν το γεωμετρικό κέντρο κάθε οδικού τμήματος. Στη συνέχεια, οι συγκεντρωτικοί δείκτες της συμπεριφοράς των οδηγών αντιστοιχήθηκαν στο πλησιέστερο κεντροειδές του οδικού τμήματος με βάση τις συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους και μήκους για κάθε δευτερόλεπτο διαδρομής. Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε με τη χρήση της συνάρτησης "st_join" και της συνάρτησης "st_nearest_feature" από τη βιβλιοθήκη της R "sf".

Συνολικά, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ιδίως για το ευρύτερο αστικό και υπεραστικό οδικό δίκτυο, διευκολύνουν την **απρόσκοπτη δυνατότητα μεταφοράς** του μεθοδολογικού πλαισίου και του πλαισίου επεξεργασίας δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή. Με ελάχιστες τροποποιήσεις, μπορούν να δημιουργηθούν χωρικές βάσεις δεδομένων για διάφορες περιοχές, επιτρέποντας αναλύσεις με τη χρήση των ίδιων ή διαφορετικών μεταβλητών, περιόδων μελέτης και στατιστικών μεθοδολογιών.

Συνδυασμός Προηγμένων και Καινοτόμων Τεχνικών Μοντελοποίησης

Ο πλούτος των πολυπαραμετρικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας και η ακρίβεια της επεξεργασίας και του συνδυασμού των δεδομένων επέτρεψαν την ανάπτυξη **προηγμένων και καινοτόμων τεχνικών μοντελοποίησης**.

Αρχικά, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο συχνότητας ατυχημάτων (ΑΔΠ). Το μοντέλο αυτό διευκόλυνε τη διερεύνηση της επιρροής διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών,

χαρακτηριστικών της κυκλοφορίας και δεικτών της συμπεριφοράς του οδηγού στα οδικά ατυχήματα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η συσσωρευτική ιεραρχική ομαδοποίηση για την κατηγοριοποίηση της επικινδυνότητας των οδικών τμημάτων που αναλύθηκαν, τα οποία στη συνέχεια ενσωματώθηκαν ως μεταβλητή απόκρισης/εξαρτημένη μεταβλητή σε διάφορους ταξινομητές μηχανικής μάθησης. Εκτός από τη χρήση **τεχνικών μηχανικής μάθησης**, οι αναλύσεις περιλάμβαναν τον υπολογισμό των **τιμών SHAP**, μια πρόσφατη και ισχυρή προσθήκη στον τομέα της ερμηνεύσιμης μηχανικής μάθησης. Οι τιμές αυτές παρείχαν πληροφορίες σχετικά με τους παράγοντες επιρροής που συμβάλλουν στο επίπεδο επικινδυνότητας. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση αυξάνει την πολυπλοκότητα των τεχνικών μοντελοποίησης και ενισχύει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους.

Όσον αφορά το ευρύτερο οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, οι απότομες επιβραδύνσεις χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένες μεταβλητές στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, εξ όσων γνωρίζει ο συγγραφέας, **εφαρμόζονται για πρώτη φορά σε συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων**. Μεταξύ αυτών των καινοτόμων προσεγγίσεων μοντελοποίησης είναι τα ΜΧΣ, ΜΧΥ, ΧΜΔΑΔ και ΧΤΔ. Αξίζει να τονιστεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου ΧΤΔ είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη, καθώς αποτελεί μια πρωτότυπη και πολλά υποσχόμενη τεχνική μοντελοποίησης που μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες αναλύσεις οδικής ασφάλειας πέραν εκείνων των απότομων επιβραδύνσεων.

Πολύ-παραγοντική Εκτίμηση Κινδύνου Ατυχήματος στους Αυτοκινητόδρομους

Αξιοποιώντας την υψηλής ποιότητας και λεπτομερή βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε για τα οδικά τμήματα του αυτοκινητοδρόμου, με στόχο την απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων που τέθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, εξήχθησαν πολύτιμα και καινοτόμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, οι στατιστικές συσχετίσεις από το μοντέλο συχνότητας οδικών ατυχημάτων αποκάλυψαν μια θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των ιστορικών δεδομένων οδικών ατυχημάτων και του αριθμού των απότομων συμβάντων οδήγησης. Αυτό ισχύει τόσο για τον αριθμό των απότομων επιταχύνσεων όσο και για τον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων ανά διερχόμενο ταξίδι εντός των εξεταζόμενων τμημάτων. Αυτό το εύρημα φανερώνει ότι **οι δείκτες απότομης συμπεριφοράς του οδηγού μπορούν να αξιοποιηθούν ως ΕΔΑ**, είτε συμπληρώνοντας τα παραδοσιακά μοντέλα συχνότητας ατυχημάτων είτε χρησιμεύοντας ως εξαρτημένες μεταβλητές σε μοντέλα αξιολόγησης του κινδύνου οδικών ατυχημάτων σε περιοχές όπου είτε δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα οδικών ατυχημάτων είτε τα διαθέσιμα δεδομένα ατυχημάτων είναι χαμηλής ποιότητας.

Επιπλέον, η παρούσα διατριβή ανέδειξε μια καινοτόμο διαπίστωση, τονίζοντας ότι η συμβολή των απότομων επιβραδύνσεων, σε σύγκριση με τις απότομες επιταχύνσεις, είναι υψηλότερη στην πρόβλεψη της επικινδυνότητας των οδικών τμημάτων. Αυτό

καθιστά τις **απότομες επιβραδύνσεις καταλληλότερο ΕΔΑ** για προληπτικές αναλύσεις οδικής ασφάλειας, ενισχύοντας την κατανόηση του κινδύνου πρόκλησης οδικών ατυχημάτων και παρέχοντας πρακτικές πληροφορίες για στοχευμένες παρεμβάσεις.

Έμμεση Εκτίμηση Κινδύνου Ατυχήματος στο Αστικό και Υπεραστικό Οδικό Δίκτυο

Η αξιολόγηση της συμβολής αυτής της διατριβής δεν θα ήταν πλήρης χωρίς την αναγνώριση των ευρύτερων συμπερασμάτων των μοντέλων που αναπτύχθηκαν για το ευρύτερο οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Σε αυτά τα μοντέλα, οι εξαρτημένες μεταβλητές αντιπροσωπεύονταν από τον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων, που χρησιμεύουν ως ΕΔΑ. Ο εντοπισμός στατιστικά σημαντικής και θετικής **χωρικής αυτοσυσχέτισης στις συχνότητες των απότομων επιβραδύνσεων** επέβαλε την ανάπτυξη προσεγγίσεων χωρικής μοντελοποίησης. Κομβικό σημείο στις αναλύσεις συχνοτήτων είναι η **μέτρηση της έκθεσης στον κίνδυνο**, με την παρούσα διατριβή να χρησιμοποιεί δύο βασικές μεταβλητές έκθεσης για τα αντίστοιχα μοντέλα: το μήκος οδικού τμήματος και τον αριθμό διαδρομών ανά τμήμα. Η παρούσα έρευνα αναδεικνύει τη στατιστικά σημαντική επίδραση αυτών των μεταβλητών έκθεσης στον κίνδυνο, στον αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων, ποσοτικοποιώντας τις αντίστοιχες επιρροές τους. Επιπλέον, ενσωματώνει διάφορους δείκτες που σχετίζονται με το οδικό περιβάλλον και τη συμπεριφορά του οδηγού, συμβάλλοντας σε μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων.

Η δημιουργία **ολοκληρωμένων χαρτών οδικής ασφάλειας** που απεικονίζουν τα συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων αποτελεί πολύτιμο εργαλείο τόσο για τις αρχές διαχείρισης της οδικής κυκλοφορίας και τα ενδιαφερόμενους φορείς όσο και τους χρήστες της οδού. Οι οπτικοποιήσεις αυτές, παρουσιάζουν πολύπλοκα δεδομένα και προβλέψεις μοντέλων με απλό και κατανοητό τρόπο, διευκολύνοντας την επικοινωνία και την ενσωμάτωση τους σε διάφορες διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Μέσω αυτών των χαρτών, οι πολύπλευρες προσπάθειες της παρούσας διατριβής για την αξιολόγηση του κινδύνου οδικών ατυχημάτων κοινοποιούνται αποτελεσματικά τόσο στην επιστημονική κοινότητα όσο και στο ευρύ κοινό. Συνολικά, οι ΕΔΑ, όπως οι απότομες επιβραδύνσεις, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την παρακολούθηση της οδικής ασφάλειας, την αξιολόγηση και την ενίσχυση των μέτρων και την ταχεία επέκταση της κάλυψης δεδομένων οδικής ασφάλειας. Στην ακαδημαϊκή κοινότητα, τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί διάφορες προσπάθειες μοντελοποίησης των ΕΔΑ. Εκτός από τη συμβολή στον τομέα αυτό, η παρούσα διδακτορική διατριβή κατέδειξε ότι με την απαιτούμενη προσπάθεια, χωρικά μοντέλα με βάση τους ΕΔΑ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές που έχουν μελετηθεί ελάχιστα από άποψη οδικής ασφάλειας.