

Χωρική Ανάλυση Εναλλακτικών Δεικτών Οδικής Ασφάλειας μέσω Τηλεματικής σε Οδικά Περιβάλλοντα

Spatial analysis of telematics surrogate safety measures across road environments

Δημήτριος Νικολάου¹, Αρμίρα Κονταξή², Απόστολος Ζιακόπουλος³, Γιώργος Γιαννής⁴

¹ Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
dnikolaou@mail.ntua.gr

² Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
akontaxi@mail.ntua.gr

³ Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
apziak@central.ntua.gr

⁴ Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
geyannis@central.ntua.gr

Dimitrios Nikolaou, Armira Kontaxi, Apostolos Ziakopoulos, George Yannis
Department of Transportation Planning and Engineering,
National Technical University of Athens

Περίληψη

Η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο την αξιοποίηση χωροχρονικών δεδομένων ευρείας κλίμακας από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων, γεωμετρικών χαρακτηριστικών οδών, δεδομένων από έρευνες πεδίου και δεδομένων οδικών ατυχημάτων για τη χωρική ανάλυση εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας σε διάφορα οδικά περιβάλλοντα. Αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά είδη χωρικών μοντέλων: το χωρικό μοντέλο σφάλματος και το χωρικό μοντέλο υστέρησης. Η εξαρτημένη μεταβλητή των μοντέλων ήταν ο αριθμός των απότομων επιβραδύνσεων σε κάθε εξεταζόμενο τμήμα. Προέκυψε ότι ο αριθμός των απότομων επιβραδύνσεων συσχετίζεται θετικά με το μήκος και τον αριθμό των καταμετρημένων ταξιδιών ανά τμήμα. Επιπλέον, οι μεταβλητές σχετικά με την υπέρβαση των ορίων ταχύτητας, τη χρήση κινητού τηλεφώνου και τον ιστορικό δείκτη ατυχημάτων της ευρύτερης περιοχής συσχετίζονται θετικά με το πλήθος των απότομων επιβραδύνσεων στα εξεταζόμενα τμήματα. Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας ανέδειξαν ότι τα χωρικά μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα και οδηγούν σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από τα μη χωρικά μοντέλα.

Λέξεις κλειδιά: χωρικά μοντέλα, οδική ασφάλεια, εναλλακτικοί δείκτες, απότομες επιβραδύνσεις.

Abstract

This paper aims to exploit large-scale spatio-temporal data from smartphone sensors, geometric design characteristics, field survey data and road crash data for the spatial analysis of surrogate safety measures across different road environments. Two different types of spatial models were developed: the spatial error model and the spatial lag model. The dependent variable of the models was the count of harsh brakings in each considered segment. It was revealed that the number of harsh brakings was positively correlated with the length and number of counted trips per segment. In addition, variables related to speeding, cell phone use, and the area's historic crash index are positively correlated with the number of harsh brakings on the segments examined. Finally, the results of this study indicated that spatial models demonstrate better fit to the data and lead to more reliable results than non-spatial models.

Keywords: spatial models, road safety, surrogate measures, harsh brakings.

1. Εισαγωγή

Η οδική ασφάλεια είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις πυλώνες: (i) ο χρήστης της οδού (οδηγός, αναβάτης, επιβάτης ή πεζός), (ii) τα οχήματα και (iii) η οδική υποδομή και περιβάλλον. Μεταξύ αυτών των πυλώνων, έχει παρατηρηθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό των ατυχημάτων οφείλεται σε ανθρώπινο λάθος (αποκλειστικά ή όχι), ένα ποσοστό που αναφέρεται ότι φτάνει το 95% (Singh, 2015). Χιλιάδες ατυχήματα με σοβαρούς τραυματισμούς και θανάτους συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο καθημερινά. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization, 2020), ο συνολικός αριθμός των θανάτων από οδικά ατυχήματα παγκοσμίως συνεχίζει να αυξάνεται, φτάνοντας τα 1,35 εκατομμύρια το 2018, αριθμός που ισοδυναμεί με ένα θάνατο κάθε 24 δευτερόλεπτα. Συγκεκριμένα για την Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε ότι το 2022, 20.600 χρήστες της οδού έχασαν τη ζωή τους (European Commission, 2023).

Συνεπώς, η κατανόηση των διαφόρων παραγόντων επικινδυνότητας που προκαλούν οδικά ατυχήματα είναι καθοριστικής σημασίας και έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον στη διεθνή βιβλιογραφία. Παρόλο που μέχρι στιγμής έχουν γίνει πολύ σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες, υπάρχουν ακόμα πολλά που πρέπει να διερευνηθούν, ιδίως για να αποκτηθεί καλύτερη γνώση των συνθηκών που επικρατούσαν πριν από το ατύχημα, προκειμένου να υπάρξει καλύτερη διαχείριση της προληπτικής ασφάλειας στους κύριους άξονες του δικτύου μεταφορών.

Τα τελευταία χρόνια αξιοποιούνται ανερχόμενες μέθοδοι για την παρακολούθηση των οδηγών με βάση αισθητήρες μέσα στο όχημα για τη συλλογή δεδομένων από την καθημερινή οδήγηση υπό πραγματικές συνθήκες. Οι επικρατούσες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επικινδυνότητας οδήγησης είναι: α) πειράματα προσομοιωτή οδήγησης (Papantoniou et al., 2014), β) πειράματα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες (Simmons et al., 2016) και γ) ανάλυση παραγόντων επικινδυνότητας από δεδομένα προηγούμενων ατυχημάτων (Consiglio et al., 2003; Elvik, 2011; Backer-Grøndahl & Sagberg, 2011). Κάθε μέθοδος παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ωστόσο οι μελέτες οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες τείνουν να έχουν υψηλότερα οφέλη από την καταγραφή κινητών τηλεφώνων.

Αρκετοί παράγοντες επικινδυνότητας που επηρεάζουν την πιθανότητα εμπλοκής σε οδικό ατύχημα έχουν εντοπιστεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Μεταξύ άλλων, οι σημαντικότεροι παράγοντες επικινδυνότητας που αναγνωρίζονται (Tselentis et al., 2017; Elvik, 2004; Pedden et al., 2004) είναι παράγοντες σχετικοί με τον άνθρωπο (ταχύτητα, απόσπαση προσοχής οδηγού, οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ κλπ.), διακυμάνσεις της ταχύτητας και της κυκλοφορίας, μη ασφαλής οδική υποδομή και οχήματα και ανεπαρκής εφαρμογή της νομοθεσίας περί κυκλοφορίας. Οι άνθρωποι παράγοντες θεωρούνται μια από τις κύριες αιτίες θανάτων και τραυματισμών από οδικά ατυχήματα και συνεπώς είναι καίριας σημασίας να ερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την οδική επικινδυνότητα. Επιπλέον, θα ήταν πολύτιμη η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της οδηγικής συμπεριφοράς στα ατυχήματα κατ' ελάχιστο συγκριτικά με τον υπόλοιπο πληθυσμό των οδηγών.

Τα τελευταία χρόνια, οι εναλλακτικοί δείκτες οδικής ασφάλειας (surrogate safety measures) έχουν λάβει αυξημένη ερευνητική προσοχή. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτήν την

κατεύθυνση της έρευνας, που αφορούν κυρίως τις τεχνολογικές εξελίξεις που κάνουν την απόκτηση και την ανάλυση δεδομένων πολύ πιο εφικτή και φθηνή (Nikolaou et al., 2023c). Τα δεδομένα εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας έχουν αρκετά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των δεδομένων ατυχημάτων: οι εναλλακτικοί δείκτες είναι προληπτικές παράμετροι οδικής ασφάλειας και επιτρέπουν την ανάλυση οδικής ασφάλειας πριν συμβούν ατυχήματα ή τη διερεύνηση οδικής ασφάλειας όταν τα γεγονότα δεν οδηγούν απαραίτητα σε ατύχημα. Επιπλέον, οι διαδικασίες συλλογής δεδομένων ατυχημάτων παραμένουν σε μεγάλο βαθμό μη αυτοματοποιημένες και ενδέχεται να φέρουν εγγενή μειονεκτήματα και προκαταλήψεις, όπως μη διαθέσιμα ή λανθασμένα δεδομένα (Imprialou & Quddus, 2019) ή διαφορετικά ποσοστά (μη) αναφοράς ατυχημάτων μεταξύ χωρών (Yannis et al., 2014). Αυτά είναι ζητήματα που μπορούν να αποφευχθούν όταν αξιοποιούνται αυτόματα συλλεγόμενα εναλλακτικοί δείκτες ασφαλείας. Ο Tarko (2018) τόνισε ότι οι εναλλακτικοί δείκτες ασφαλείας βοηθούν στον εντοπισμό του υπερβολικού κινδύνου ατυχημάτων στην οδό, στη βελτίωση της γνώσης σχετικά με τις συνθήκες ατυχημάτων και στην καλύτερη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των πειραματικών και των υπαρχόντων αντίμετρων.

Οι Yang et al. (2021) έχουν προτείνει τη συγχώνευση δεδομένων ατυχημάτων και εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας μέσω ενός Μοντέλου Δομικών Εξισώσεων (structural equation model - SEM). Η μελέτη τους ανέδειξε την ανάπτυξη της «Κατάστασης Κινδύνου» (Risk status - RS) ως λανθάνουσας μεταβλητής από δεδομένα ατυχημάτων και εναλλακτικών δεικτών. Το SEM που δημιουργήθηκε βασίστηκε σε ένα Μπεϋζιανό πλαίσιο και ενσωμάτωσε τυχαίες παραμέτρους χωρικής αυτοπαλινδρόμησης και τυχαίες παραμέτρους σε επίπεδο διαδρόμου. Διαισθητικά, το RS συσχετίστηκε με υψηλότερες συχνότητες τριών εναλλακτικών δεικτών ασφαλείας και ατυχημάτων που σχετίζονται με την νωτομετοπική σύγκρουση και με το ισχύον όριο ταχύτητας και τον αριθμό λωρίδων. Οι παράμετροι έκθεσης (σημεία GPS και μίλια οχημάτων που διανύθηκαν από την κυκλοφορία) διαπιστώθηκε ότι αυξάνουν τον κίνδυνο, όπως προσδιορίζεται από τα τέσσερα στοιχεία RS. Οι συγγραφείς υπογράμμισαν ότι ο διαχωρισμός της έκθεσης για εναλλακτικούς δείκτες και ατυχήματα επιτρέπει τη χρήση δεδομένων με διαφορετικά χρονικά εύρη. Επιπλέον, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το RS ήταν ένα πιο αξιόπιστο κριτήριο για την αξιολόγηση της ασφάλειας και την αναγνώριση hotspot.

Σε μια έρευνα που αφορούσε 668 τμήματα του αυτοκινητοδρόμου της Ολυμπίας Οδού στην Ελλάδα, αναπτύχθηκε ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο Negative Binomial με εξαρτημένη μεταβλητή το πλήθος των οδικών ατυχημάτων (υλικές ζημιές και με τραυματισμό) και ανεξάρτητες μεταβλητές δύο εναλλακτικούς δείκτες ασφαλείας μέσω τηλεματικής (απότομες επιταχύνσεις και απότομες επιβραδύνσεις), την Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) και το μήκος ανά εξεταζόμενο τμήμα (Nikolaou et al., 2023a). Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν στατιστικά σημαντική και θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο απότομων οδηγικών συμπεριφορών και της συχνότητας οδικών ατυχημάτων. Ωστόσο, σε συνέχεια της έρευνας αυτής, προέκυψε ότι οι απότομες επιβραδύνσεις συμβάλλουν σημαντικά στην πρόβλεψη του επιπέδου επικινδυνότητας των εξεταζόμενων οδικών τμημάτων, κάτι που δεν ισχύει για τις απότομες επιταχύνσεις (Nikolaou et al., 2023b). Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι απότομες επιβραδύνσεις αποτελούν έναν εύλογο εναλλακτικό δείκτη οδικής ασφάλειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες προληπτικές αναλύσεις οδικής ασφάλειας πριν ακόμα συμβούν τα οδικά ατυχήματα.

Μια ακόμη αξιολόγηση έρευνα είναι αυτή των Stipancic et al. (2018). Οι συγγραφείς μοντελοποίησαν τις συχνότητες ατυχημάτων χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο Full Bayes με εναλλακτικούς δείκτες ως συνεξεταζόμενες μεταβλητές. Η μελέτη χρησιμοποίησε δεδομένα GPS μεγάλης κλίμακας από smartphone και έλαβε διάφορους εναλλακτικούς δείκτες ασφαλείας, όπως απότομες επιβραδύνσεις και παραμέτρους ροής κυκλοφορίας. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα Latent Gaussian χωρικό μοντέλο για να μοντελοποιήσουν τις συχνότητες ατυχημάτων και ανέφεραν ότι η ενσωμάτωση χωρικών συσχετίσεων παρείχε τη μεγαλύτερη βελτίωση στην προσαρμογή του μοντέλου. Στο επίπεδο της διασταύρωσης, τα HBs, η συμφόρηση και η διακύμανση της ταχύτητας βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικά με αυξήσεις στις συχνότητες συγκρούσεων. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η συγκέντρωση ήταν απαραίτητη για τις παραμέτρους κυκλοφορίας, καθώς έπρεπε να περάσουν από το επίπεδο σύνδεσης στο επίπεδο διασταύρωσης για την ανάλυσή τους. Σε τέτοιες μελέτες αυτό είναι ένα σύνηθες εμπόδιο όταν συνδυάζονται δεδομένα από διαφορετικές πηγές.

Οι Ziakopoulos et al. (2021, 2022) πραγματοποίησαν έρευνες χωρικών αναλύσεων εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας, εστιάζοντας κυρίως σε απότομες επιβραδύνσεις. Συλλέχθηκαν δεδομένα οδήγησης σε πραγματικές συνθήκες μέσω έξυπνων κινητών τηλεφώνων. Οι ερευνητές ανέλυσαν τα συμβάντα απότομων επιβραδύνσεων σε αστικές περιοχές με βαριογράμματα και ολικούς και τοπικούς δείκτες I του Moran. Έπειτα εφάρμοσαν πρότυπα μοντελοποίησης του αριθμού των συμβάντων αυτών σε πλαίσια λογαριθμοκανονικής ανάλυσης Poisson με μορφές GWR και CAR, καθώς και μοντέλα μηχανικής μάθησης XGBoost με τυχαία και χωρική επικύρωση. Αποκτήθηκε ένας μεγάλος αριθμός αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων ανά οδικό τμήμα: Το μήκος του τμήματος και ο προσαρμοσμένος αριθμός περασμάτων συσχετίζονται θετικά με τις απότομες επιβραδύνσεις ενώ η κλίση και η πολυπλοκότητα της οδού συσχετίζονται αρνητικά με αυτές. Επίσης πραγματοποιήθηκαν προβλέψεις συμβάντων σε νέα δίκτυα και προέκυψε ότι ο συνδυασμός των προβλέψεων των προαναφερθέντων μεθόδων οδηγεί σε ακριβέστερο αποτέλεσμα συνολικά.

Με βάση όλα τα προαναφερθέντα, στόχος της παρούσας έρευνας είναι η αξιοποίηση χωροχρονικών δεδομένων ευρείας κλίμακας από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων, γεωμετρικών δεδομένων οδών, δεδομένων από έρευνες πεδίου και δεδομένων ατυχημάτων για τη χωρική ανάλυση εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας σε πολλαπλά οδικά περιβάλλοντα στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης.

2. Μεθοδολογία

2.1 Συλλογή Δεδομένων

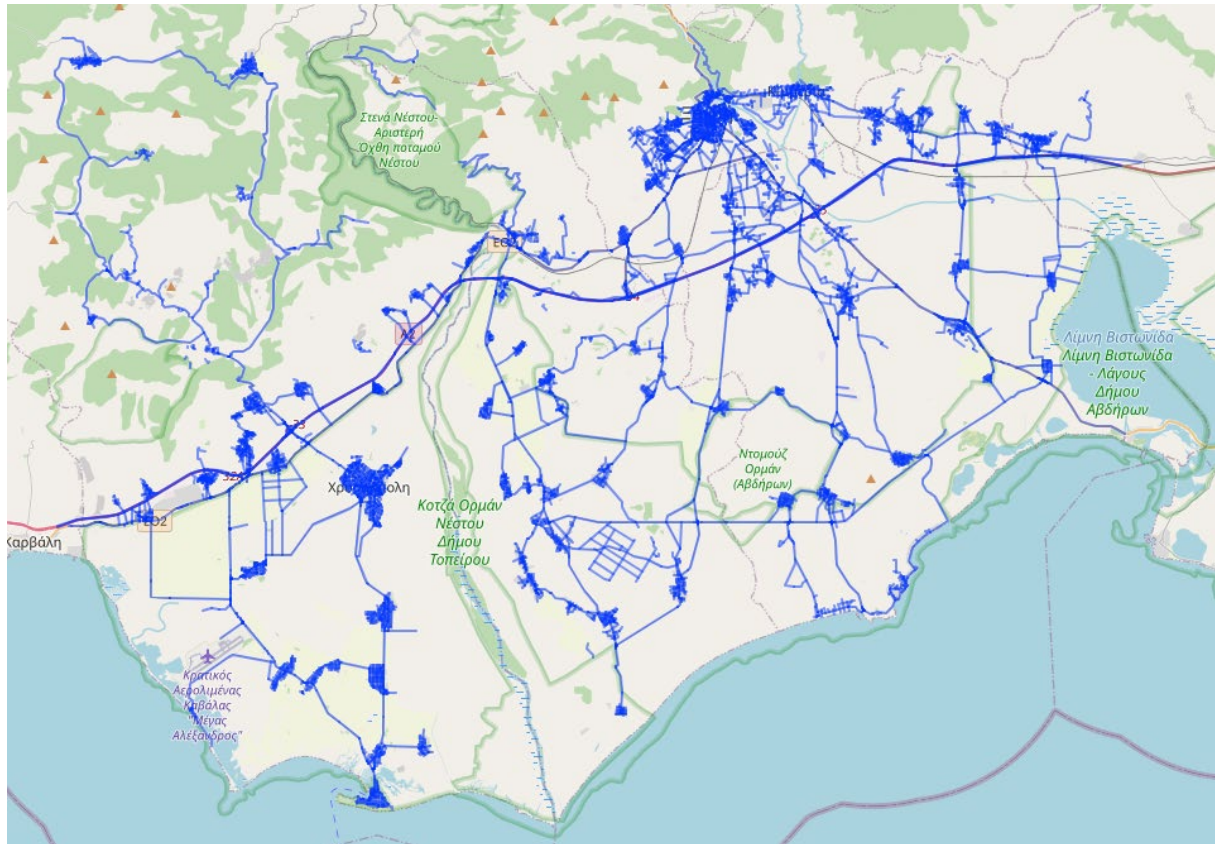
Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος SmartMaps, έχει πραγματοποιηθεί συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές με στόχο την ανάπτυξη έξυπνων χαρτών συμπεριφοράς οδηγών με online διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες ασφάλειας και της οικολογικής οδήγησης (με τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων). Απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός πλήρους και συνολικού εργαλείου προώθησης της οδηγικής συμπεριφοράς ώστε αυτή να είναι ασφαλής και περιβαλλοντικά φιλική, και παράλληλα η συνολική κυκλοφορία να καθίσταται περισσότερο αποδοτική και διαχειρίσιμη, με εφαρμογή στην Ελλάδα και σε ολόκληρο τον κόσμο.

Πιο συγκεκριμένα, στον κεντρικό πυλώνα της υλοποίησης της παρούσας έρευνας τοποθετείται η εκμετάλλευση ήδη υπαρχόντων δεδομένων οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες μεγάλου πλήθους οδηγών (με τουλάχιστον 1000 συμμετέχοντες οδηγούς/100,000 διαδρομές σε βάθος 2 ετών). Στα δεδομένα διαδρομών συμπεριλαμβάνονται μεταβλητές οδηγικής συμπεριφοράς όπως παρατηρήσεις απότομων συμβάντων (απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις), υπερβάσεις ορίων ταχύτητας και απόσπαση προσοχής με τη χρήση κινητού τηλεφώνου. Επιπρόσθετα, πέρα από τα δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες, συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν δεδομένα γεωμετρίας οδού (μήκος, καμπυλότητα, κλίση), ερευνών πεδίου (χρήση ζώνης ασφαλείας, χρήση κράνους, υπέρβαση ταχύτητας, απόσπαση προσοχής) και δεδομένα οδικών ατυχημάτων από την Ελληνική Στατιστική Αρχή.

2.1.1 Δεδομένα Γεωμετρίας Οδού

Η περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης, επιλέχθηκε σκόπιμα ως μια δύσκολη τοποθεσία λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας δεδομένων, η οποία αποτέλεσε σημαντικό εμπόδιο για τις αρχικές έρευνες. Η ολοκληρωμένη διαδικασία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων που διεξήχθη στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης θα χρησιμεύσει ως πρότυπο για μεταγενέστερες μελέτες σε άλλες περιοχές της Ελλάδας.

Το σύνολο δεδομένων που ελήφθη από την περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης αποτελείται από 6.099 οδικά τμήματα, με μέσο μήκος 290 μέτρα και μέσο ποσοστό γωνίας 0,50 [1/m], με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος του οδικού άξονα να ανέρχεται σε 1.700 χιλιόμετρα. Όσον αφορά στους τύπους οδών, η κατανομή έχει ως εξής: οι οικιστικές οδοί αντιπροσωπεύουν το 68%, οι τριτεύουσες το 12%, οι δευτερεύουσες το 7%, οι αυτοκινητόδρομοι το 3% και το υπόλοιπο 10% περιλαμβάνει άλλους τύπους οδών. Κατά την εξέταση των κλίσεων των οδών, διαπιστώθηκε ότι το 76% αυτών χαρακτηρίζονται ως επίπεδες με κλίση μεταξύ 0-3%. Επιπλέον, το 10% κατηγοριοποιείται ως ήπιες κλίσεις (3-5%), το 7% ως μεσαίες κλίσεις (5-8%), το 3% ως απότομες κλίσεις (8-10%) και το 4% ως ακραίες κλίσεις με κλίσεις που υπερβαίνουν το 10%. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τον εξεταζόμενο οδικό άξονα της περιοχής της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης όπως έχει εξαχθεί από το πρόγραμμα Leaflet του προγράμματος χαρτογράφησης OpenStreetMap (OSM).



Σχήμα 1: Παράδειγμα του περιβάλλοντος OSM για την εξεταζόμενη περιοχή

2.1.2 Παρατηρούμενα Δεδομένα Πεδίου

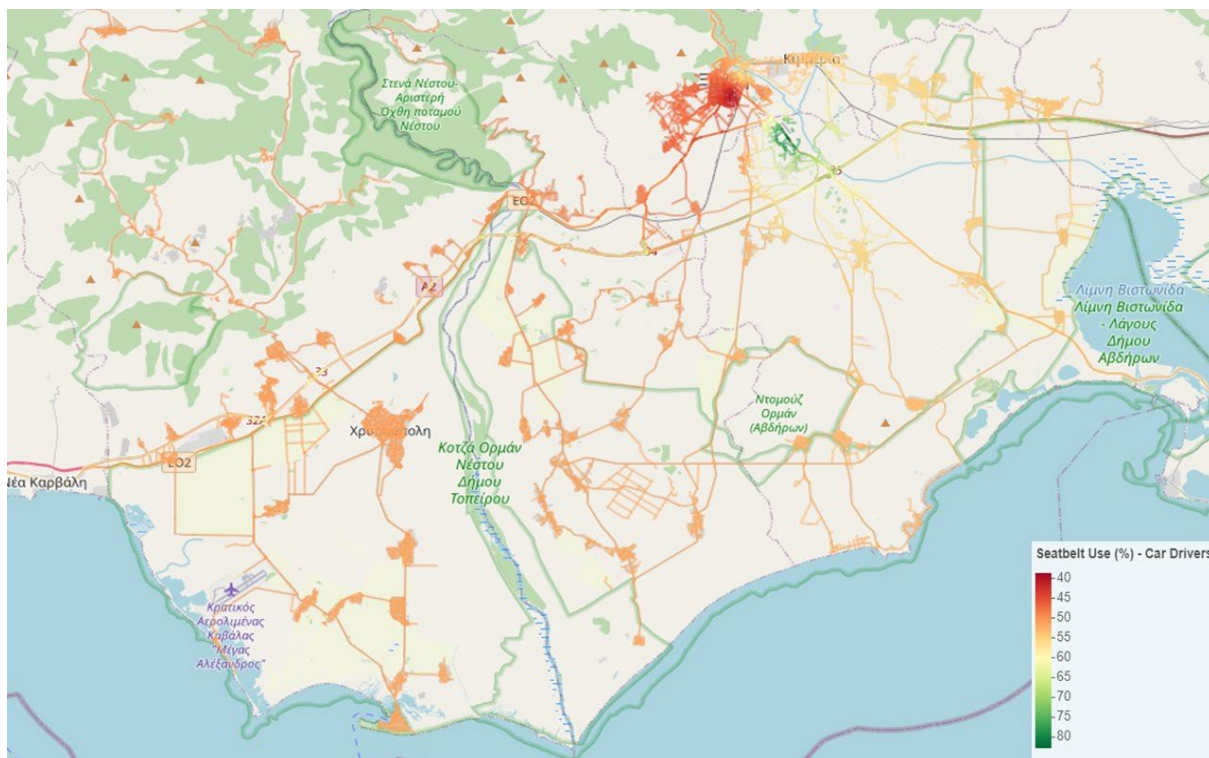
Η μελέτη περιελάμβανε τη διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου για την αξιολόγηση δεικτών συμπεριφοράς των χρηστών της οδού σε δέκα διαφορετικές τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων τριών αυτοκινητοδρόμων, τεσσάρων υπεραστικών και τριών αστικών περιοχών.

Για την ανάλυση της χωρικής κατανομής των δεικτών σε ολόκληρο το οδικό δίκτυο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων ή αλλιώς Inverse Distance Weighting (IDW). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε δύο φορές. Στην πρώτη λήφθηκαν υπόψη μόνο οι μετρήσεις πεδίου στους αυτοκινητόδρομους και έγινε κατανομή των δεικτών στις οδούς που κατηγοριοποιούνται στο OSM ως motorway ή motorway_link. Στη δεύτερη, αξιοποιήθηκαν οι μετρήσεις των τεσσάρων υπεραστικών και των τριών αστικών περιοχών για την χωρική κατανομή των δεικτών στο υπόλοιπο οδικό δίκτυο της περιοχής.

Η προσέγγιση IDW εκτιμά την τιμή μιας συγκεκριμένης μεταβλητής σε μια δεδομένη θέση υπολογίζοντας έναν σταθμισμένο μέσο όρο των γνωστών τιμών που περιβάλλουν τη συγκεκριμένη θέση. Τα βάρη καθορίζονται με βάση τις αποστάσεις μεταξύ της θέσης-στόχου και των γειτονικών θέσεων. Η υπόθεση που διέπει τη μέθοδο αυτή είναι ότι οι θέσεις που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση τείνουν να έχουν παρόμοιες τιμές για τη μεταβλητή που αναλύεται (Lu & Wong, 2008).

Η μελέτη συγκέντρωσε περίπου 3.500 παρατηρήσεις που αφορούσαν οδηγούς επιβατικών αυτοκινήτων, εστιάζοντας σε δείκτες όπως η χρήση ζώνης ασφαλείας, η απόσπαση της

προσοχής του οδηγού και η υπερβολική ταχύτητα. Επιπλέον, συλλέχθηκαν περίπου 260 παρατηρήσεις ειδικά από οδηγούς δικύκλων με κινητήρα, με έμφαση στη χρήση κράνους.



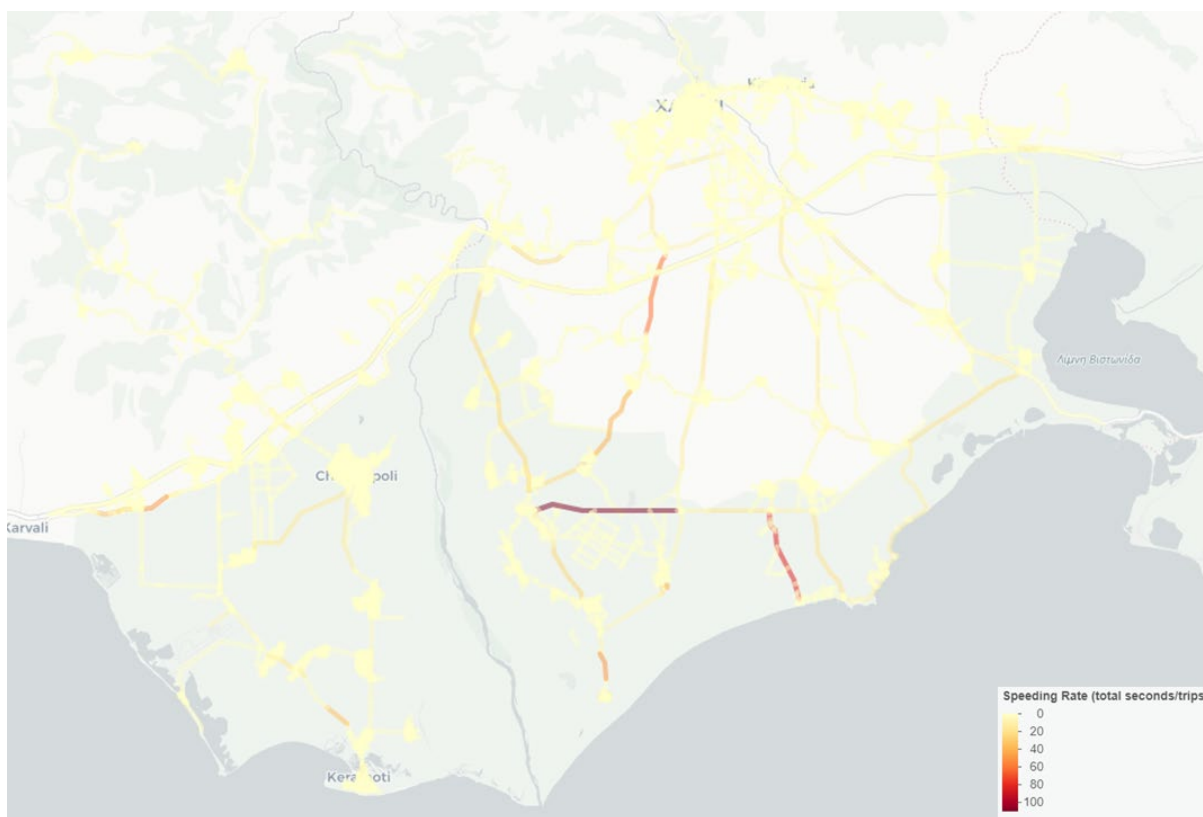
Σχήμα 2: Χρήση ζώνης ασφαλείας οδηγών επιβατικών ΙΧ στην εξεταζόμενη περιοχή

2.1.3 Δεδομένα Οδήγησης από Καταγραφή Έξυπνου Κινητού Τηλεφώνου

Συνολικά εξετάστηκαν 5.129 διαδρομές οδηγών στην εξεταζόμενη περιοχή εντός του έτους 2021, ενώ πραγματοποιήθηκε χωρική αντιστοίχιση των φυσικών δεδομένων οδήγησης και των εξεταζόμενων οδικών τμημάτων. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα περιγραφικά στατιστικά των συλλεχθέντων δεδομένων ανά οδικό τμήμα.

Πίνακας 1: Περιγραφικά στατιστικά των δεδομένων φυσικής οδήγησης ανά οδικό τμήμα

Δεδομένα ανά οδικό τμήμα	Min.	Mean	Max.
Καταμέτρηση διαδρομών	0	32	1272
Δείκτης υπέρβασης ταχύτητας (δευτερόλεπτα / διαδρομές)	0	0.26	110
Δείκτης χρήσης κινητού τηλεφώνου (δευτερόλεπτα / διαδρομές)	0	0.34	133
Δείκτης απότομων επιταχύνσεων (συμβάντα / διαδρομές)	0	0.004	1.00
Δείκτης απότομων επιβραδύνσεων (συμβάντα / διαδρομές)	0	0.007	1.42



Σχήμα 3: Δείκτης υπέρβασης ορίων ταχύτητας (δευτερόλεπτα / διαδρομές) στην εξεταζόμενη περιοχή

2.1.4 Δεδομένα Οδικών Ατυχημάτων

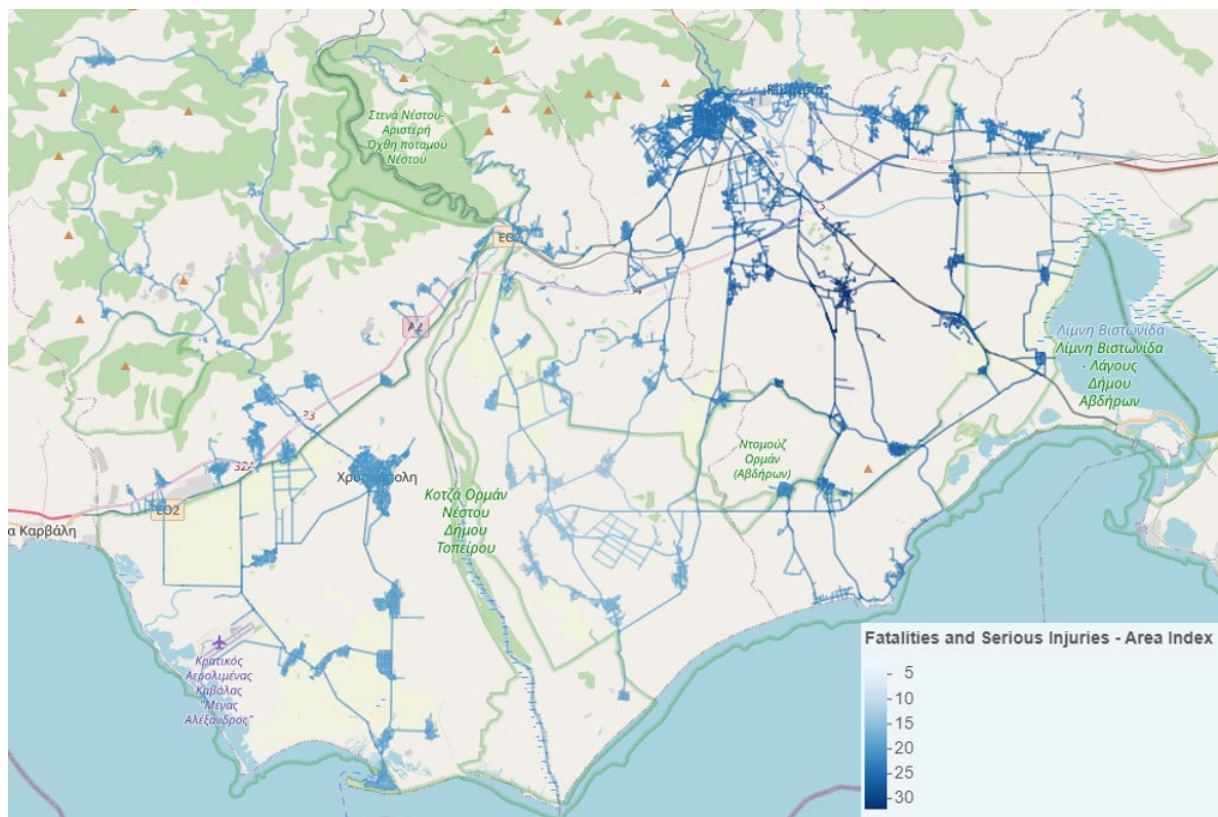
Η ανακριβής καταγραφή των σημείων οδικών ατυχημάτων λόγω της έλλειψης γεωγραφικών συντεταγμένων στην εθνική βάση δεδομένων της ΕΛΣΤΑΤ αποτελεί σημαντικό ζήτημα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η ερευνητική ομάδα συγκέντρωσε τα δεδομένα ατυχημάτων για πέντε δήμους της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης: Ξάνθης, Αβδήρων, Μύκης, Τοπείρου και Νέστου.

Πίνακας 2: Δεδομένα οδικών ατυχημάτων και παθόντων στους πέντε εξεταζόμενους δήμους

Δήμος	Αυτοκινητό- δρομος	Ατυχήματα (2016-2020)	Νεκροί (2016-2020)	Βαριά Τραυματίες (2016-2020)	Ελαφρά Τραυματίες (2016-2020)	Νεκροί + Βαριά Τραυματίες (KSI) (2016-2020)
Ξάνθης	Όχι	108	10	15	128	25
Ξάνθης	Ναι	1	0	2	0	2
Αβδήρων	Όχι	70	12	20	73	32
Αβδήρων	Ναι	5	1	2	10	3
Μύκης	Όχι	20	4	6	16	10
Μύκης	Ναι	0	0	0	0	0
Τοπείρου	Όχι	32	7	7	36	14
Τοπείρου	Ναι	4	3	4	7	7
Νέστου	Όχι	44	12	9	49	21
Νέστου	Ναι	12	3	4	15	7

Για να αναλυθούν αποτελεσματικά τα ιστορικά δεδομένα οδικών ατυχημάτων, πραγματοποιήθηκε μια χωρική παρεμβολή των "δεικτών περιοχής που σχετίζονται με ατυχήματα" με βάση τους συνολικούς αριθμούς χρησιμοποιώντας την τεχνική Σταθμισμένων Αντίστροφων Αποστάσεων (IDW). Αυτή η διαδικασία παρεμβολής πραγματοποιήθηκε δύο φορές, κάνοντας διάκριση μεταξύ των ατυχημάτων που συμβαίνουν σε αυτοκινητόδρομους και εκείνων που συμβαίνουν σε μη αυτοκινητόδρομους.

Οι "δείκτες που σχετίζονται με τα ατυχήματα στην περιοχή" περιλαμβάνουν διάφορες μετρήσεις, όπως ο αριθμός των ατυχημάτων, ο αριθμός των νεκρών σε οδικά ατυχήματα, ο αριθμός των τραυματιών (βαριά ή ελαφρά) και ο αριθμός των ατόμων που σκοτώθηκαν ή τραυματίστηκαν βαριά (KSI). Με τη χρήση της μεθόδου IDW, μπορούμε να εκτιμήσουμε τις τιμές αυτών των δεικτών για τις περιοχές εντός των δήμων όπου τα δεδομένα ατυχημάτων δεν είναι διαθέσιμα ή είναι ανακριβή. Η προσέγγιση αυτή παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της κατάστασης που σχετίζεται με τα ατυχήματα στην εξεταζόμενη περιοχή, επιτρέποντάς μας να εντοπίσουμε περιοχές υψηλού κινδύνου και να αναπτύξουμε κατάλληλα μέτρα για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.



Σχήμα 4: Δείκτης περιοχής νεκρών και βαριά τραυματιών

2.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 2.1. και περιλαμβάνουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, παρατηρούμενα δεδομένα πεδίου, δεδομένα οδήγησης μέσω αισθητήρων έξυπνων κινητών τηλεφώνων και ιστορικά δεδομένα οδικά ατυχημάτων αναλuthήκαν εφαρμόζοντας χωρικά στατιστικά μοντέλα. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ήταν το χωρικό μοντέλο σφάλματος (Spatial Error Model) και το χωρικό μοντέλο υστέρησης (Spatial Lag Model).

Το μοντέλο σφάλματος (Spatial Error Model) χειρίζεται την χωρική αυτοσυσχέτιση στα κατάλοιπα. Η ιδέα είναι ότι τέτοια σφάλματα (κατάλοιπα παλινδρόμησης) είναι αυτοσυσχετιζόμενα, με την έννοια ότι το σφάλμα από ένα χωρικό στοιχείο μπορεί να περιγραφεί ως ένας σταθμισμένος μέσος όρος των σφαλμάτων των γειτόνων του. Αυτό το μοντέλο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$y = X\beta + u, \quad u = \lambda_{\text{Err}} W u + \varepsilon \quad (1)$$

όπου:

y είναι ένα διάνυσμα ($N \times 1$) παρατηρήσεων μιας εξαρτημένης μεταβλητής που λαμβάνεται σε κάθε μια από τις N θέσεις,

X είναι ένας πίνακας ($N \times k$) συνδιακυμάνσεων,

β είναι ένα διάνυσμα ($k \times 1$) παραμέτρων,

u είναι ένα χωρικά αυτοσυσχετιζόμενο διάνυσμα διαταραχών ($N \times 1$),

ε είναι ένα διάνυσμα ($N \times 1$) ανεξάρτητων και πανομοιότυπα κατανομημένων διαταραχών,

λ_{Err} είναι μια κλιμακωτή χωρική παράμετρος.

Σχετικά με το μοντέλο υστέρησης (Spatial Lag Model), η χωρική υστέρηση είναι μια μεταβλητή που ουσιαστικά υπολογίζει τον μέσο όρο των γειτονικών τιμών μιας θέσης (η τιμή κάθε γειτονικής θέσης πολλαπλασιάζεται με το χωρικό βάρος και στη συνέχεια τα προϊόντα αθροίζονται). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των γειτονικών τιμών με εκείνες της ίδιας της τοποθεσίας.

Για αυτές τις χωρικές υστερήσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο χωρικής υστέρησης για να αντιμετωπίσουμε τη χωρική αυτοσυσχέτιση στην εξαρτημένη μεταβλητή:

$$y = \rho_{\text{Lag}} W y + X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

όπου ρ_{Lag} είναι κλιμακωτή χωρική παράμετρος, που δείχνει πόσο επηρεάζεται ένα χωρικό χαρακτηριστικό από τους γείτονές του.

Τόσο το χωρικό μοντέλο σφάλματος όσο και το χωρικό μοντέλο υστέρησης μπορούν να συγκριθούν με ένα απλό γραμμικό μοντέλο μέσω της τιμής του δείκτη Akaike Information Criterion (AIC). Το κριτήριο πληροφoρίας Akaike είναι ένας εκτιμητής του σφάλματος πρόβλεψης και συνεπώς της σχετικής ποιότητας των στατιστικών μοντέλων για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Δεδομένης μιας συλλογής μοντέλων για τα δεδομένα, το AIC εκτιμά την ποιότητα κάθε μοντέλου, σε σχέση με κάθε ένα από τα άλλα μοντέλα. Έτσι, το AIC παρέχει ένα μέσο για την επιλογή μοντέλων. Χαμηλότερες τιμές του κριτηρίου AIC, υποδηλώνουν καλύτερη ποιότητα στατιστικού μοντέλου (Sakamoto et al., 1986).

3. Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της Εισαγωγής, οι απότομες επιβραδύνσεις αποτελούν εναλλακτικούς δείκτες οδικής ασφάλειας που μπορούν να αξιοποιηθούν σε αναλύσεις πριν συμβούν οδικά ατυχήματα. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι απότομες επιβραδύνσεις χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένη μεταβλητή τόσο στο χωρικό μοντέλο σφάλματος όσο και στο χωρικό μοντέλο υστέρησης της παρούσας έρευνας. Πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών, περιλαμβανομένων διαφόρων μαθηματικών μετασχηματισμών των μεταβλητών (π.χ., χρήση

λογαρίθμων κτλ.), έως τον εντοπισμό του βέλτιστου συνδυασμού που οδηγεί σε όσο το δυνατόν περισσότερες στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές και χαμηλότερο δείκτη AIC.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εισήχθησαν στα τελικά μοντέλα αφορούν στο μήκος, στην κλίση και στην καμπυλότητα του κάθε εξεταζόμενου οδικού τμήματος, στην υπέρβαση των ορίων ταχύτητας, στη χρήση κινητού τηλεφώνου, στη χρήση ζώνης ασφαλείας, στον δείκτη ατυχημάτων της περιοχής και στον αριθμό των καταμετρημένων διαδρομών ανά οδικό τμήμα. Για την καμπυλότητα έχει υπολογιστεί ένας δείκτης απόδοσης καμπυλότητας που υποδηλώνει πόσο αποτελεσματικά ένα τμήμα οδού διευκολύνει την ομαλή μετακίνηση. Συγκεκριμένα, προκύπτει από τις υπολογιζόμενες γωνίες κατά μήκος της οδού και λαμβάνει τιμές από 0-100%. Πρακτικά, υψηλότερες τιμές του δείκτη, υποδηλώνουν μια ομαλότερη οδό με λιγότερες απότομες καμπύλες.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και 4.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα χωρικού μοντέλου σφάλματος (Spatial Error Model)

Εξαρτημένη μεταβλητή: log (πλήθος απότομων επιβραδύνσεων + 1)				
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Σταθερά)	-0,3077	0,0849	-3,6229	0,0003
log (1 + μήκος)	0,0360	0,0039	9,3512	< 2,2e-16
log (1 + κλίση)	-0,0055	0,0059	-0,9399	0,3473
log (1 + απόδοση καμπυλότητας)	0,1067	0,0580	1,8408	0,0657
log (1 + δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίων ταχύτητας)	0,0847	0,0046	18,4841	< 2,2e-16
Δείκτης χρήσης κινητού τηλεφώνου (sec / διαδρομές)	0,0064	0,0015	4,3898	< 0,001
Χρήση ζώνης οδηγών επιβατικών ΙΧ (%)	-0,0237	0,0951	-0,2493	0,8031
log (δείκτης ατυχημάτων περιοχής 2016-2020)	0,0233	0,0085	2,7405	0,0061
Αριθμός καταμετρημένων διαδρομών	0,0024	0,0000	52,0655	< 2,2e-16
Lambda: 0,022785, LR test value: 5,1845, p-value: 0,022789				
AIC: 3891,5 (AIC for lm: 3894,7)				

Πίνακας 4: Αποτελέσματα χωρικού μοντέλου υστέρησης (Spatial Lag Model)

Εξαρτημένη μεταβλητή: log (πλήθος απότομων επιβραδύνσεων + 1)				
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Σταθερά)	-0,2929	0,0845	-3,4657	0,0005
log (1 + μήκος)	0,0356	0,0038	9,2738	< 2,2e-16
log (1 + κλίση)	-0,0061	0,0059	-1,0367	0,2999
log (1 + απόδοση καμπυλότητας)	0,1048	0,0579	1,8093	0,0704
log (1 + δευτερόλεπτα υπέρβασης ορίων ταχύτητας)	0,0846	0,0046	18,4784	< 2,2e-16
Δείκτης χρήσης κινητού τηλεφώνου (sec / διαδρομές)	0,0064	0,0015	4,4202	< 0,001
Χρήση ζώνης οδηγών επιβατικών ΙΧ (%)	-0,0371	0,0944	-0,3927	0,6945
log (δείκτης ατυχημάτων περιοχής 2016-2020)	0,0218	0,0085	2,5734	0,0101
Αριθμός καταμετρημένων διαδρομών	0,0024	0,0000	51,9864	< 2,2e-16
Rho: 0,016061, LR test value: 3,8597, p-value: 0,04946				
AIC: 3892,8 (AIC for lm: 3894,7)				

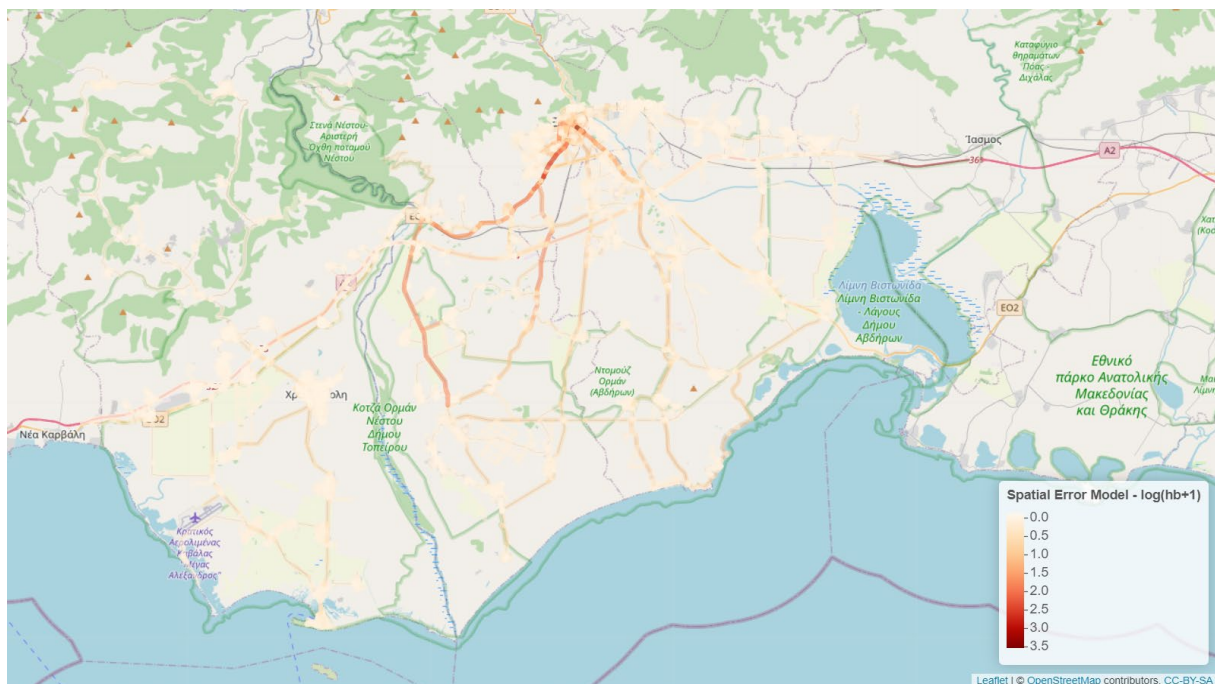
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα των Πινάκων 3 και 4, τα πρόσημα των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών παραμένουν ίδια ανάμεσα στα δύο διαφορετικά χωρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Συγκεκριμένα, τόσο το μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος όσο κι ο αριθμός των καταμετρημένων διαδρομών ανά τμήμα μπορούν να θεωρηθούν ως δείκτες έκθεσης στον κίνδυνο και όπως αναμένεται συσχετίζονται θετικά με τον

αριθμό των απότομων επιβραδύνσεων. Επιπλέον, το θετικό πρόσημο της ανεξάρτητης μεταβλητής του δείκτη «απόδοσης καμπυλότητας» υποδηλώνει ότι τα οδικά τμήμα με λιγότερες καμπύλες έχουν υψηλότερο αριθμό απότομων επιβραδύνσεων. Επιπρόσθετα, οι μεταβλητές που αφορούν στην υπέρβαση των ορίων ταχύτητας, στη χρήση κινητού τηλεφώνου και στον ιστορικό δείκτη ατυχημάτων της ευρύτερης περιοχής συσχετίζονται θετικά με το πλήθος των απότομων επιβραδύνσεων στα εξεταζόμενα οδικά τμήματα.

Όσον αφορά στο χωρικό μοντέλο σφάλματος, η τιμή του δείκτη Lambda ισούται με 0,022 και είναι στατιστικά σημαντική, υποδηλώνοντας ότι ο όρος σφάλματος είναι χωρικά αυτοπαλίνδρομος. Από την τιμή του κριτηρίου AIC συμπεραίνεται ότι το χωρικό μοντέλο σφάλματος αποδίδει καλύτερα από το γραμμικό μοντέλο, καθώς η χαμηλότερη AIC υποδηλώνει καλύτερη προσαρμογή.

Αντίστοιχα, η τιμή Rho του χωρικού μοντέλου υστέρησης ισούται με 0,016 και είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που φανερώνει ότι υπάρχει θετική χωρική αυτοσυσχέτιση. Και στην περίπτωση αυτή, εξετάζοντας την τιμή του κριτηρίου AIC, διαπιστώνεται ότι η προσαρμογή του χωρικού μοντέλου υστέρησης είναι καλύτερη από την αντίστοιχη του απλού γραμμικού μοντέλου.

Ανάμεσα στα δύο χωρικά μοντέλα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η τιμή του κριτηρίου AIC είναι χαμηλότερη για το χωρικό μοντέλο σφάλματος συγκριτικά με το χωρικό μοντέλο υστέρησης, υποδηλώνοντας ότι εμφανίζει καλύτερη προσαρμογή. Τα αποτελέσματα του χωρικού μοντέλου σφάλματος για το εξεταζόμενο οδικό δίκτυο της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης οπτικοποιούνται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων χωρικού μοντέλου σφάλματος στο εξεταζόμενο οδικό δίκτυο

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο την αξιοποίηση χωροχρονικών δεδομένων ευρείας κλίμακας από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων, γεωμετρικών χαρακτηριστικών οδών, δεδομένων από έρευνες πεδίου και δεδομένων οδικών ατυχημάτων για τη χωρική ανάλυση εναλλακτικών δεικτών οδικής ασφάλειας σε διάφορα οδικά περιβάλλοντα στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας - Θράκης.

Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά είδη χωρικών μοντέλων: το χωρικό μοντέλο σφάλματος και το χωρικό μοντέλο υστέρησης. Η εξαρτημένη μεταβλητή των μοντέλων που αναπτύχθηκαν ήταν ο αριθμός των απότομων επιβραδύνσεων ανά εξεταζόμενο τμήμα καθώς αποτελεί έναν εναλλακτικό δείκτη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αναλύσεις οδικής ασφάλειας είτε σε περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμη η ακριβής θέση των οδικών ατυχημάτων είτε ως προληπτικός δείκτης πριν συμβούν τα οδικά ατυχήματα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αριθμός των απότομων επιβραδύνσεων στα εξεταζόμενα οδικά τμήματα συσχετίζεται θετικά με το μήκος και τον αριθμό των καταμετρημένων ταξιδιών ανά τμήμα. Το εύρημα αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί αναμενόμενο καθώς οι μεταβλητές αυτές αποτελούν δείκτες έκθεσης στον κίνδυνο που κατ' επέκταση η αύξησή τους επιφέρει περισσότερες απότομες επιβραδύνσεις. Ακόμη, οι μεταβλητές σχετικά με την υπέρβαση των ορίων ταχύτητας, τη χρήση κινητού τηλεφώνου και τον ιστορικό δείκτη ατυχημάτων της ευρύτερης περιοχής συσχετίζονται θετικά με το πλήθος των απότομων επιβραδύνσεων στα εξεταζόμενα οδικά τμήματα.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας ανέδειξαν ότι τα χωρικά μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα και οδηγούν σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από τα μη χωρικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, τόσο ο δείκτης Lambda του χωρικού μοντέλου σφάλματος όσο και ο δείκτης Rho του χωρικού μοντέλου ήταν στατιστικά σημαντικοί. Ανάμεσα στα δύο μοντέλα, το χωρικό μοντέλο σφάλματος παρουσίασε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η παρούσα έρευνα στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης αποτελεί αρχική διερεύνηση και στόχος της ερευνητικής ομάδας είναι να αξιοποιηθεί ως πρότυπο για μεταγενέστερες μελέτες και σε άλλες Περιφέρειες της Ελλάδας. Απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός πλήρους και συνολικού εργαλείου χαρτών που θα καλύπτει όλες τις Περιφέρειες της χώρας και θα προωθεί την ασφαλή και περιβαλλοντικά φιλική οδική συμπεριφορά.

Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Επιχειρηματικότητα, Ανταγωνιστικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο της πρόσκλησης «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» (κωδικός έργου: Τ2ΕΔΚ-04388).

5. Αναφορές-Βιβλιογραφία

- Backer-Grøndahl A., Sagberg F. (2011). Driving and telephoning: Relative accident risk when using hand-held and hands-free mobile phones. *Safety Science*, 49(2), 324-330.
- Consiglio, W., Driscoll, P., Witte, M., Berg, W.P. (2003). Effect of cellular telephone conversations and other potential interference on reaction time in a braking response. *Accident Analysis & Prevention*, 35, 495-500.
- Elvik, R. (2011). Effects of mobile phone use on accident risk: Problems of meta-analysis when studies are few and bad. *Transportation Research Record*, 2236, 20-26.
- Elvik, R., Christensen, P., Amundsen, A. (2004). Speed and road accidents. An evaluation of the Power Model. TØI report, 740, 2004.
- European Commission (2023). Road safety in the EU: fatalities below pre-pandemic levels but progress remains too slow, Brussels, Belgium.
- Imprialou, M., & Quddus, M. (2019). Crash data quality for road safety research: current state and future directions. *Accident Analysis & Prevention*, 130, 84-90.
- Lu, G. Y., & Wong, D. W. (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & geosciences*, 34(9), 1044-1055.
- Nikolaou, D., Dragomanovits, A., Ziakopoulos, A., Deliali, A., Handanos, I., Karadimas, C., ... & Yannis, G. (2023a). Exploiting Surrogate Safety Measures and Road Design Characteristics towards Crash Investigations in Motorway Segments. *Infrastructures*, 8(3), 40.
- Nikolaou, D., Ziakopoulos, A., Dragomanovits, A., Roussou, J., & Yannis, G. (2023b). Comparing Machine Learning Techniques for Predictions of Motorway Segment Crash Risk Level. *Safety*, 9(2), 32.
- Nikolaou, D., Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2023c). A Review of Surrogate Safety Measures Uses in Historical Crash Investigations. *Sustainability*, 15(9), 7580.
- Ouderkirk, B., Pedden, M. (2004). Windfall from the Wind Farm Sherman County, Oregon. Renewable Northwest Project.
- Papantoniou P., Papadimitriou E., Yannis G. (2014). Assessment of Driving Simulator Studies on Driver Distraction. *Advances in Transportation Studies*, 35, 129-144.
- Sakamoto, Y., Ishiguro, M., & Kitagawa, G. (1986). Akaike information criterion statistics. Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel, 81(10.5555), 26853.
- Simmons, S. M., Hicks, A., Caird, J. K. (2016). Safety-critical event risk associated with cell phone tasks as measured in naturalistic driving studies: A systematic review and meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 87, 161-169.
- Singh, S. (2015). Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey. DOT HS 812 115.
- Stipancic, J., Miranda-Moreno, L., Saunier, N., & Labbe, A. (2018). Surrogate safety and network screening: Modelling crash frequency using GPS travel data and latent Gaussian Spatial Models. *Accident Analysis & Prevention*, 120, 174-187.

Tarko, A. P. (2018). Surrogate measures of safety. In Safe mobility: challenges, methodology and solutions. Emerald Publishing Limited.

Tselentis, D.I., Yannis G., Vlahogianni E.I. (2017). Innovative motor insurance schemes: a review of current practices and emerging challenges. Accident Analysis & Prevention, 98, 139-148.

World Health Organization. (2020). Road traffic injuries [WWW Document]. URL

Yang, D., Xie, K., Ozbay, K., & Yang, H. (2021). Fusing crash data and surrogate safety measures for safety assessment: Development of a structural equation model with conditional autoregressive spatial effect and random parameters. Accident Analysis & Prevention, 152, 105971.

Yannis, G., Papadimitriou, E., Chaziris, A., & Broughton, J. (2014). Modeling road accident injury under-reporting in Europe. European transport research review, 6(4), 425-438.

Ziakopoulos A., Vlahogianni E., Antoniou C., Yannis G. (2022). Spatial predictions of harsh driving events using statistical and machine learning methods. Safety Science, Vol. 150.

Ziakopoulos, A. (2021). Spatial analysis of harsh driving behavior events in urban networks using high-resolution smartphone and geometric data. Accident Analysis & Prevention, 157, 106189.