

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

με τίτλο

**"Χωρική ανάλυση οδικής ασφάλειας και συμπεριφοράς κυκλοφορίας με χρήση πολύ-παραμετρικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας"**

του Απόστολου Ζιακόπουλου, Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ

Η οδική ασφάλεια αποτελεί ένα μόνιμο ζήτημα στις σύγχρονες κοινωνίες οι οποίες διαθέτουν μεγάλο αριθμό οχημάτων. Τα οδικά ατυχήματα προξενούν δυσβάσταχτα ανθρώπινα κόστη, μέσω τραυμάτων, αναπτηριών και τραυματισμών, καθώς και μια σειρά πρόσθετων δαπανών και συνεπειών, όπως άμεσες υλικές και περιουσιακές ζημιές, κόστη διακοπής κυκλοφορίας, καθώς και υπηρεσιακά και διαχειριστικά κόστη, μεταξύ άλλων.

Προκειμένου να μετριαστούν οι συνέπειες των τροχαίων ατυχημάτων και να αυξηθούν τα επίπεδα οδικής ασφάλειας, η ανίχνευση επικίνδυνων θέσεων (*hotspots*) αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο. Καθώς αυτός ο τύπος προβλήματος περιλαμβάνει την εξέταση ολόκληρων περιοχών μελέτης, οι διαστάσεις και οι αποστάσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Οι χωρικές αναλύσεις προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για τον υπολογισμό των συχνοτήτων συμβάντων σε διάφορες περιοχές και για την αντίστοιχη ανίχνευση των επικίνδυνων θέσεων. Κατά το παρελθόν, λόγω της έλλειψης λεπτομερών δεδομένων ατυχημάτων σε κάθε θέση, οι χωρικές αναλύσεις διεξαγόρταν συνήθως σε μεγάλη κλίμακα πταγκοσμίως (περιοχές αντίστοιχες με νομούς ή δήμους). Επί του παρόντος, οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στην παρακολούθηση της οδηγικής συμπεριφοράς επιτρέπουν την απόκτηση πλούσιων δεδομένων οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες από αισθητήρες έξυπνων κινητών τηλεφώνων (*smartphones*) και αποκαλύπτουν νέες δυνατότητες για πιο λεπτομερείς και ακριβείς ερευνητικές προσεγγίσεις. Υπάρχει πλέον η δυνατότητα εκτέλεσης χωρικών αναλύσεων με βάση τα μεμονωμένα οδικά τμήματα, χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές τα χαρακτηριστικά γεωμετρίας και οδικού δικτύου σε κάθε οδικό τμήμα. Ως εξαρτημένες μεταβλητές χρησιμοποιούνται οι συχνότητες απότομων συμβάντων κατά την οδήγηση (συγκεκριμένα απότομες επιβραδύσεις και επιταχύνσεις). Οι συγκεκριμένες μεταβλητές είναι πολυπληθέστερες σε σύγκριση με τα οδικά ατυχήματα, και δύναται να λειτουργήσουν ως διαμεσολαβητές για τον εντοπισμό επικίνδυνων οδικών τμημάτων.

Με βάση τα προαναφερθέντα, ο κύριος στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η χωρική ανάλυση των συχνοτήτων απότομων οδηγικών συμβάντων ανά οδικό τμήμα με την αξιοποίηση πολυπαραμετρικών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων (i) δεδομένων υψηλής ανάλυσης οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες από αισθητήρες *smartphones* (ii) γεωμετρίας οδικών τμημάτων και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου από ψηφιακούς χάρτες και (iii) δεδομένων κυκλοφορίας υψηλής ανάλυσης.

Για το σκοπό αυτό, διεξήχθη εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σε τρεις πυλώνες, συγκεκριμένα: (i) Χωρικές προσεγγίσεις στην οδική ασφάλεια, (ii) Ποσοτικές μεταπαλινδρομήσεις παραμέτρων έκθεσης που χρησιμοποιούνται σε χωρικές αναλύσεις στην οδική ασφάλεια και (iii) Επισκόπηση των εργαλείων καταγραφής οδηγικής συμπεριφοράς. Από την ανασκόπηση, προέκυψε ότι οι χωρικές αναλύσεις αστικών δικτύων είναι ένα καινοτόμο, ανεξερεύνητο και υποσχόμενο ερευνητικό πεδίο. Οι

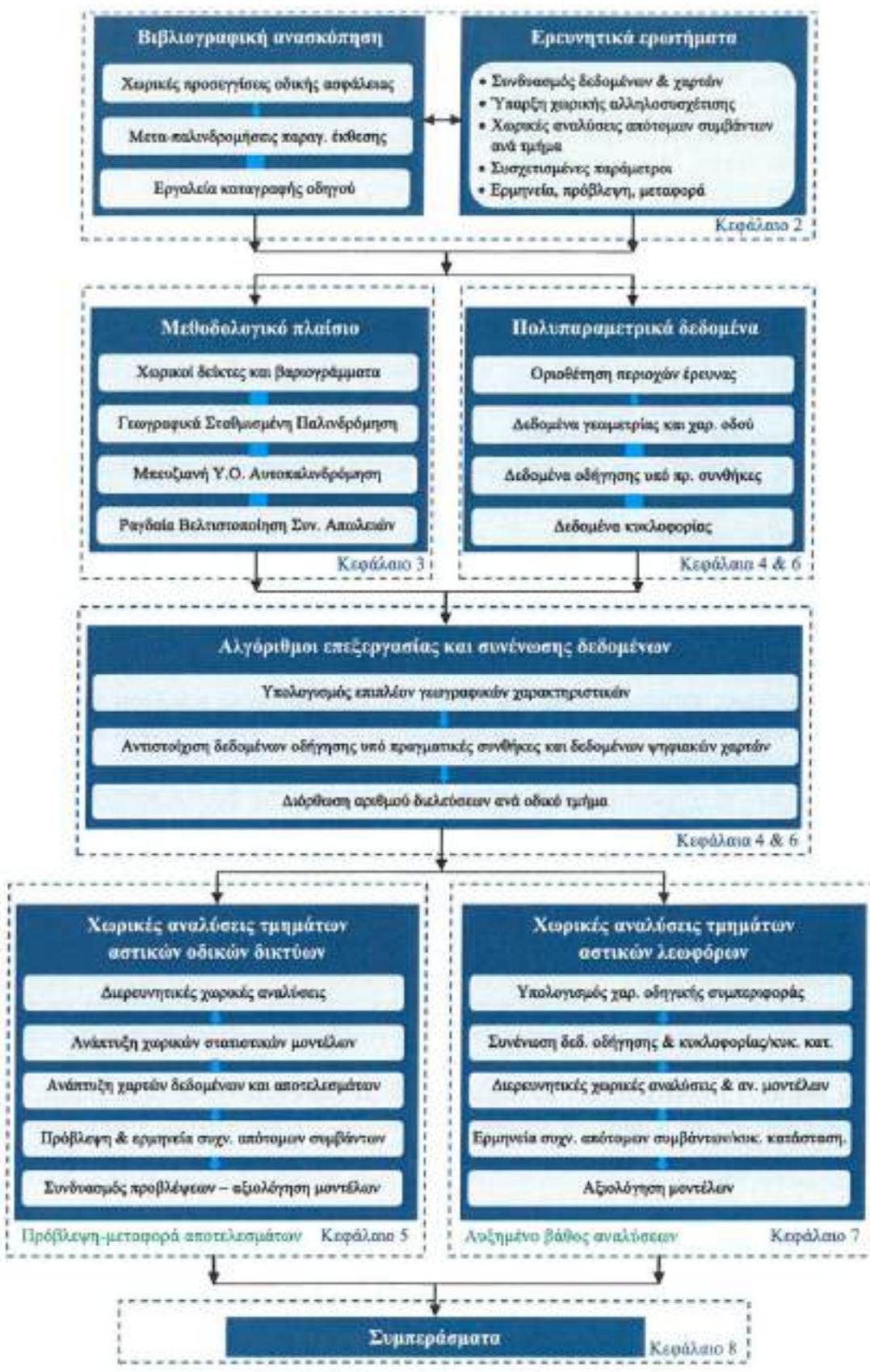
αισθητήρες των smartphones μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα οδηγικών διαδρομών, καθώς και επιπλέον δεδομένα περί της χρήσης τηλεφώνου και παραμέτρους ταχύτητας κατά την οδήγηση. Για την εξερεύνηση του συγκεκριμένου ερευνητικού πεδίου, προτιμώνται δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες, τα οποία δέχονται τις λιγότερες επιρροές. Δεδομένα οδήγησης μεγάλης κλίμακας (*big data*) απαιτούνται για την εκτεταμένη κάλυψη της περιοχής μελέτης και την πληρέστερη ανάπτυξη των αντίστοιχων χωρικών μοντέλων.

Ακολούθως, διατυπώθηκαν τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

1. Πώς μπορούν να συνδυαστούν και να εξεταστούν τα δεδομένα από smartphones και τα δεδομένα ψηφιακών χαρτών (αντιστοίχιση χαρτών – matching) προκειμένου να παραχθούν ουσιαστικά συμπεράσματα για τα επίπεδα οδικής ασφάλειας και να εντοπίσουν πιθανές επικίνδυνες θέσεις σε αστικά οδικά περιβάλλοντα;
2. Πώς μπορούν να αναλυθούν χωρικά οι συχνότητες απότομων οδηγικών συμβάντων σε αυτά τα περιβάλλοντα και ποιες μέθοδοι είναι κατάλληλες για αυτό το σκοπό;
3. Υπάρχει χωρική αυτοσυσχέτιση σε συχνότητες απότομων συμβάντων ανά οδικό τμήμα σε αστικά οδικά περιβάλλοντα;
4. Ποια χαρακτηριστικά γεωμετρίας και οδικού δικτύου επηρεάζουν τις συχνότητες απότομων συμβάντων σε αστικά οδικά περιβάλλοντα; Είναι τα ίδια για απότομες επιβραδύνσεις και απότομες επιταχύνσεις, και είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματά τους; Πόσο μεταβιβάσιμα είναι τα προηγούμενα αποτελέσματα σε διαφορετική περιοχή μελέτης;
5. Έχουν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας και της συμπεριφοράς του οδηγού στατιστικά σημαντικές επιρροές στις συχνότητες απότομων συμβάντων; Είναι τα ίδια χαρακτηριστικά και οι ίδιες επιρροές ανά κατάσταση κυκλοφορίας;

Προκειμένου να απαντηθούν αυτά τα ερευνητικά ερωτήματα, επινοήθηκε ένα σύνθετο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα I.

Το αρχικό στάδιο των χωρικών αναλύσεων περιελάμβανε την επιλογή στατιστικών εργαλείων τα οποία θα ήταν χρήσιμα και θα παρήγαγαν αξιόλογα αποτελέσματα. Ως αρχικό διερευνητικό μέρος των χωρικών αναλύσεων, επιλέχθηκαν οι ολικοί και τοπικοί συντελεστές I του Moran και τα βαριογράμματα (variograms) συγχωνευμένα και ανά κατεύθυνση. Όσον αφορά τα στατιστικά μοντέλα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα ισορροπημένο μίγμα μεταξύ κλασικών συναρτησιακών μεθόδων, Μπευζιανών μεθόδων και Μηχανικής Μάθησης. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν μοντέλα Γεωγραφικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης Poisson (Geographically Weighted Poisson Regression – GWPR), μοντέλα Μπευζιανής Υπό Όρους Αυτοπαλινδρόμησης (Bayesian Conditional Autoregressive Prior – CAR), καθώς και αλγόριθμοι Raydalas Βελτιστοποίησης Συναρτήσεων Απωλειών με τυχαία επικύρωση (Random Cross-validation Extreme Gradient Boosting – RCV-XGBoost) και με χωρική επικύρωση (Spatial Cross-validation Extreme Gradient Boosting – SPCV-XGBoost). Δεδομένου ότι οι εξαρτημένες μεταβλητές ήταν μεταβλητές συχνότητας (δεδομένα φυσικών αριθμών), όλες οι αναλύσεις διεξήχθησαν μέσα σε ένα λογαριθμικό-Poisson πλαίσιο.



Σχήμα 1: Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής

Οι δείκτες σφαλμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων τόσο κατά την προσαρμογή όσο και κατά τις προβλέψεις ήταν οι (α) (ρίζα) μέσου τετραγώνου σφάλματος (RMSE / MSE), (β) μέσο απόλυτο σφάλμα (ή απόκλιση) (MAE / MAD) και (γ) (ρίζα) μέσου τετραγώνου λογαριθμικού σφάλματος (RMSLE / MSLE). Επινοήθηκε επίσης ένας δείκτης προσαρμοσμένης ακρίβειας (Custom Accuracy – CA).

Ο καθορισμός των απαραίτητων περιοχών μελέτης αποτέλεσε το επόμενο στάδιο. Ωστόσο, προέκυψε ένα δίλημμα κατά την προσπάθεια ενσωμάτωσης των δεδομένων κυκλοφορίας και συμπεριφοράς των οδηγών. Παρότι μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές για την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων, δεν μπορούσαν να εκτιμηθούν ουσιαστικά για περιοχές χωρίς δεδομένα, επειδή αποτελούν στιγμιότυπα μιας συγκεκριμένης κυκλοφοριακής χρονικής στιγμής.

Παράλληλα, αυτός ο περιορισμός δεν προκύπτει για τα χαρακτηριστικά γεωμετρίας και οδικού δικτύου που αποτελούν σταθερά χαρακτηριστικά της υποδομής. Ως εκ τούτου, ελήφθη μια κρίσιμη απόφαση: Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο παράλληλους πυλώνες: (i) Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης απότομων συμβάντων σε περιοχή δοκιμής αστικού οδικού δικτύου, με σκοπό την μεταφορά τους σε περιοχή ελέγχου και την αξιολόγηση της προβλεπτικής τους ικανότητας και (ii) Ανάπτυξη μοντέλων εμβαθυμένης επεξήγησης απότομων συμβάντων, με συμπεριληφτή της οδηγικής συμπεριφοράς και της κυκλοφορίας, τα οποία αναπτύχθηκαν σε περιοχή αστικής λεωφόρου ανά κατάσταση κυκλοφορίας, λόγω του μονοσήμαντου καθορισμού των δεδομένων κυκλοφορίας σε αυτό το περιβάλλον. Σκοπός αυτής της ανάλυσης ήταν να διερευνηθούν επιπλέον υποκείμενες στατιστικές συσχετίσεις για την περαιτέρω κατανόηση των φαινομένων των απότομων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων.

Στη συνέχεια, εξήχθησαν και επεξεργάστηκαν ψηφιακά δεδομένα χαρτών από την πλατφόρμα OpenStreetMap (OSM), αποτελούμενα από κόμβους και τμήματα των οδών που εξετάστηκαν. Η περιοχή δοκιμής αστικού οδικού δικτύου βρίσκεται στο Χαλάνδρι της Αθήνας και περιλαμβάνει 869 οδικά τμήματα. Παρομοίως, η περιοχή ελέγχου αστικού οδικού δικτύου ήταν στην Ομόνοια της Αθήνας και περιλαμβάνει 1.237 οδικά τμήματα. Η περιοχή έρευνας αστικής λεωφόρου είναι τμήμα της Λεωφόρου Κηφισίας στην Αθήνα και περιλαμβάνει 152 οδικά τμήματα. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται η κατάτμηση OSM, μια πρακτική που εξασφαλίζει ομοιογενή τμήματα δρόμων που χωρίζονται μόνο όταν συντρέχει συγκοινωνιακός λόγος, όπως αλλαγή σήμανσης ή αριθμού λωρίδων.

Με βάση τις συντεταγμένες κόμβων ως πρωτογενή δεδομένα, καθώς επίσης και με την ενίσχυση των δεδομένων OSM με τοπογραφικά δεδομένα υψόμετρου από το SRTM της NASA, υπολογίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδικών τμημάτων: μήκος, κλίση, καμπυλότητα και πολυπλοκότητα γειτονιάς. Επιπλέον, πληροφορίες σχετικές με την παρουσία σηματοδοτών και διαβάσεων πεζών αντλήθηκαν σε διαδικτή μορφή.

Τα δεδομένα μεγάλης κλίμακας οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες που αξιοποιήθηκαν σε αυτή τη διατριβή συλλέχθηκαν και παρασχέθηκαν από την OSeven Telematics μέσω μιας καινοτόμου εφαρμογής για smartphones που καταγράφει αδιάκοπα και χωρίς παρεμβολές τις διαδρομές καθώς οι χρήστες οδηγούν τα

οχήματά τους κανονικά. Ένας μεγάλος αριθμός δεικτών συμπεριφοράς συλλέγεται μέσω της χρήσης αισθητήρων smartphone χωρίς να απαιτείται άλλος εξοπλισμός.

Ακολούθως, εφαρμόστηκε ένας πρότυπος αλγόριθμος αντιστοίχισης χαρτών ειδικά σχεδιασμένος έτσι ώστε να αντιστοιχίζεται κάθε δευτερόλεπτο διαδρομής από τα δεδομένα μεγάλης κλίμακας οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες με το αντίστοιχο οδικό τμήμα. Κάθε σειρά του προκύπτοντος αρχείου χωρικών δεδομένων αντιπροσώπευε ένα διαφορετικό οδικό τμήμα δρόμου με βάση την κατάτμηση OSM, σύμφωνα με τις απαιτήσεις χωρικής ανάλυσης και την προσέγγιση της διδακτορικής διατριβής. Σε τοποθεσίες πολλών παράλληλων αξόνων οδικών τμημάτων με υψηλή πυκνότητα, όπως η Λεωφόρος Κηφισίας και οι βοηθητικές παράλληλες οδοί της, εφαρμόστηκε ένας επιπλέον πρότυπος αλγόριθμος καταμέτρησης ψήφων που συνέκρινε τα δευτερόλεπτα διαδρομής που αντιστοιχούσαν σε ανταγωνιστικά οδικά τμήματα και τελικά ανέθετε τη διαδρομή στο οδικό τμήμα με την πλειοψηφία των ψήφων.

Για τις δύο περιοχές αστικών οδικών δικτύων, παρείχθησαν δεδομένα διαδρομών εντός χρονικού διαστήματος διάρκειας δύο μηνών, συγκεκριμένα τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο του 2019. Στην περιοχή δοκιμών του Χαλανδρίου, αποκτήθηκαν 3.294 διαδρομές από 230 διαφορετικούς οδηγούς κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, με αποτέλεσμα να παραχθούν 1.000.273 δευτερόλεπτα διαδρομών που περιείχαν 1.348 απότομες επιβραδύνσεις και 921 απότομες επιταχύνσεις. Στην περιοχή Ελέγχου της Ομόνοιας, πραγματοποιήθηκαν 2.615 διαδρομές από 257 διαφορετικούς οδηγούς κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, με αποτέλεσμα να παραχθούν 964.693 δευτερόλεπτα διαδρομής που περιείχαν 1.036 απότομες επιβραδύνσεις και 938 απότομες επιταχύνσεις.

Για τα τμήματα αστικών λεωφόρων, παρείχθησαν δεδομένα διαδρομών εντός χρονικού διαστήματος διάρκειας τριών μηνών, συγκεκριμένα από τον Σεπτέμβριο έως τον Νοέμβριο του 2019. Κατά την περίοδο αυτή, αποκτήθηκαν δεδομένα 8.756 διαδρομών από 314 διαφορετικούς οδηγούς με αποτέλεσμα να παραχθούν 930.346 δευτερόλεπτα διαδρομών τα οποία περιείχαν 1.543 απότομες επιβραδύνσεις και 1.033 απότομες επιταχύνσεις. Τα δεδομένα οδήγησης ενισχύθηκαν με δεδομένα κυκλοφορίας από την πλησιέστερη χωροχρονικά αντίστοιχη θέση μέτρησης. Τα δεδομένα κυκλοφορίας παρασχέθηκαν από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Αθήνας και περιελάμβαναν μετρήσεις υψηλής ανάλυσης (90s) ώστε να ταιριάζουν με τα δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες. Όλα τα δευτερόλεπτα διαδρομών στη συνέχεια ταξινομήθηκαν σε τρεις ξεχωριστές καταστάσεις ροής κυκλοφορίας (i) ελεύθερη ροή, (ii) συγχρονισμένη ροή και (iii) ροή υπό συμφόρηση, με βάση όρια που είχαν καθοριστεί από προηγούμενη έρευνα στη Λεωφόρο Βασιλέως Κωνσταντίνου, η οποία αποτελεί νότια επέκταση της Λεωφόρου Κηφισίας. Τα αρχεία χωρικών δεδομένων στη συνέχεια διαμορφώθηκαν χωριστά για ελεύθερη ροή και συγχρονισμένη ροή (η κορεσμένη ροή περιελάμβανε ελάχιστα απότομα συμβάντα) και αναπτύχθηκαν τα αντίστοιχα μοντέλα.

Πρόσθετα χαρακτηριστικά υπολογίστηκαν βάσει των μέσων δευτερολέπτων υπέρβασης ταχύτητας και των μέσων δευτερολέπτων χρήσης κινητού τηλεφώνου από τους οδηγούς. Τα χαρακτηριστικά εισήχθησαν στα μοντέλα ως επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές. Όλες οι μεταβλητές κίνησης και οδήγησης, οι οποίες είναι μη σταθερές παράμετροι, υπολογίστηκαν ως μέσοι όροι οι οποίοι ενημερωνόταν ανά διέλευση από το αντίστοιχο οδικό τμήμα. Αυτή η διαδικασία ουσιαστικά συνεπαγόταν

τη μετατροπή τους από σπιγμιότυπα και την μεταχείριση αυτών των μέσων όρων ως χαρακτηριστικά οδικών τμημάτων – άρα υποδομής. Βήμα απαραίτητο για τις χωρικές αναλύσεις.

Με αυτό το βήμα, διαμορφώθηκαν τα αρχεία χωρικών δεδομένων και εκτελέστηκαν οι χωρικές αναλύσεις, από τις οποίες προέκυψαν διάφορα πρωτότυπα και ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Στα αστικά οδικά δίκτυα εντοπίστηκε χωρική αυτοσυσχέτιση με βάση τους ολικούς και τοπικούς συντελεστές I του Moran, εάν λαμβάνονται υπόψη μόνο τα χωρικά συσχετισμένα οδικά τμήματα. Με βάση τα βαρογραφήματα ανά κατεύθυνση, η μέση χωρική αυτοσυσχέτιση έχει απόσταση επιρροής τα 190 m για τις απότομες επιβραδύνσεις και στα 200 m για τις απότομες επιταχύνσεις. Πέρα από αυτή την απόσταση, η χωρική αυτοσυσχέτιση εξομαλύνεται. Επιπλέον, υπάρχει γεωγραφική ανισοτροπία στην περιοχή δοκιμής: διακυμάνσεις της ημι-διακύμανσης της συχνότητας απότομων συμβάντων εντοπίζονται κατά μήκος του άξονα Βορρά-Νότου αλλά όχι του άξονα Ανατολής-Δύσης.

Για τις απότομες επιβραδύνσεις, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι έκθεσης του μήκους τμήματος και του αριθμού περάσματος αυξάνουν τις συχνότητες εμφάνισής τους ανά οδικό τμήμα. Αντίθετα, αυξήσεις στην κλίση και την πτολυπλοκότητα της γειτονιάς μειώνουν τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων. Η επίδραση του αριθμού λωρίδων δεν είναι μονοσήμαντη (αν και σημαντική) και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τους χωρικούς όρους και τις αντίστοιχες τοπικές συσχετίσεις που εμφανίζονται τοπικά σε κάθε οδικό τμήμα. Αυτό ισχύει σε μεγάλο βαθμό και για την επίδραση του τύπου οδού, αν και οι οικιστικές οδοί μειώνουν σταθερά τη συχνότητα των απότομων επιβραδύνσεων σε σύγκριση με τις κεντρικές (πρωτεύουσες) οδούς. Η παρουσία σηματοδοτών και διαβάσεων πεζών έχει οριακά σημαντική επίρροή – συγκεκριμένα, είναι στατιστικά σημαντικά σε ένα από τα μοντέλα παλινδρόμησης και εμφανίζεται χαμηλά στην κατάταξη πληροφορίας στους αλγορίθμους XGBoost. Η καμπυλότητα και η κατεύθυνση της οδού δεν είναι στατιστικά σημαντικές μεταβλητές για την εξήγηση της συχνότητας των απότομων επιβραδύνσεων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι έκθεσης του μήκους τμήματος και του αριθμού περάσματος αυξάνουν επίσης τις συχνότητες των απότομων επιταχύνσεων. Η καμπυλότητα του οδικού τμήματος και η παρουσία σηματοδοτών συσχετίζονται θετικά με απότομες επιταχύνσεις. Ο τύπος οδού και ο αριθμός λωρίδων έχουν μη μονοσήμαντη επίδραση, αν και οι δευτερεύουσες και τρίτερεύουσες οδοί είναι σταθερά συσχετισμένες με αυξημένες απότομες επιταχύνσεις σε σύγκριση με τις κεντρικές οδούς. Η παρουσία διαβάσεων πεζών έχει οριακά σημαντική επίρροή, ενώ η κατεύθυνση της οδού δεν ήταν στατιστικά σημαντική μεταβλητή με τη συχνότητα απότομων επιταχύνσεων.

Τα μοντέλα GWPR και CAR παρέχουν περισσότερες πληροφορίες προστικοποιώντας τις ακριβείς στατιστικές επιδράσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω των ευρέως χρησιμοποιούμενων συντελεστών συσχέτισης και των διαστημάτων εμπιστοσύνης/ αξιοπιστίας. Υπό αυτή την έννοια, οι αλγόριθμοι XGBoost μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την επαλήθευση αυτών των επιδράσεων μέσω της μέτρησης και κατάταξης της απόκτησης πληροφοριών από κάθε μεταβλητή. Παρόλα αυτά, τα μοντέλα GWPR και CAR παρουσιάζουν προβλήματα μεταφοράς σε άλλες περιοχές. Ωστόσο, τα αντίστοιχα GLM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη απότομων συμβάντων σε περιοχές ελέγχου εκτός της περιοχής δοκιμών.

Αντιθέτως, οι αλγόριθμοι XGBoost μπορούν να μεταφέρθουν απρόσκοπτα σε νέες περιοχές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το XGBoost δεν ενσωματώνει ρητά τοπικές χωρικές παραμέτρους, αλλά εξάγει συμπεράσματα βάσει των δεδομένων. Το SPCV XGBoost παρέχει βελτιωμένες προβλέψεις σε σύγκριση με το RCV XGBoost διότι επιτρέπει τις χωρικές ομαδοποιήσεις δεδομένων στα δένδρα αποφάσεων τόσο για απότομες επιβραδύνσεις όσο και για απότομες επιταχύνσεις. Η απόδοσή των αλγορίθμων XGBoost δείχνει ότι οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης είναι συγκρίσιμες με τις παραδοσιακές μεθόδους και όχι πανάκεια – παρόλο που το τελικό αρχείου χωρικών δεδομένων δεν είχε το τυπικό πλήθος σειρών που χρησιμοποιείται σε προβλήματα μηχανικής μάθησης.

Τα μοντέλα CAR εφαρμόζουν σε μεγάλο βαθμό στα δεδομένα μιας συγκεκριμένης περιοχής μελέτης σε πολύ υψηλό βαθμό για τις συχνότητες απότομων συμβάντων (CA>95%) χάρη στο συνδυασμό χωρικά δομημένων και μη δομημένων τοπικών παραμέτρων, και της Μπευζιανής ανανέωσης του μοντέλου με βάση νεότερες πληροφορίες (Bayesian inference). Κατά μια έννοια, οι τοπικές παραμέτροι οδηγούν σε πλήρη ταύτιση μοντέλου και δεδομένων, παρόλα αυτά οι προβλέψεις πραγματοποιούνται εν τέλει χωρίς αυτές.

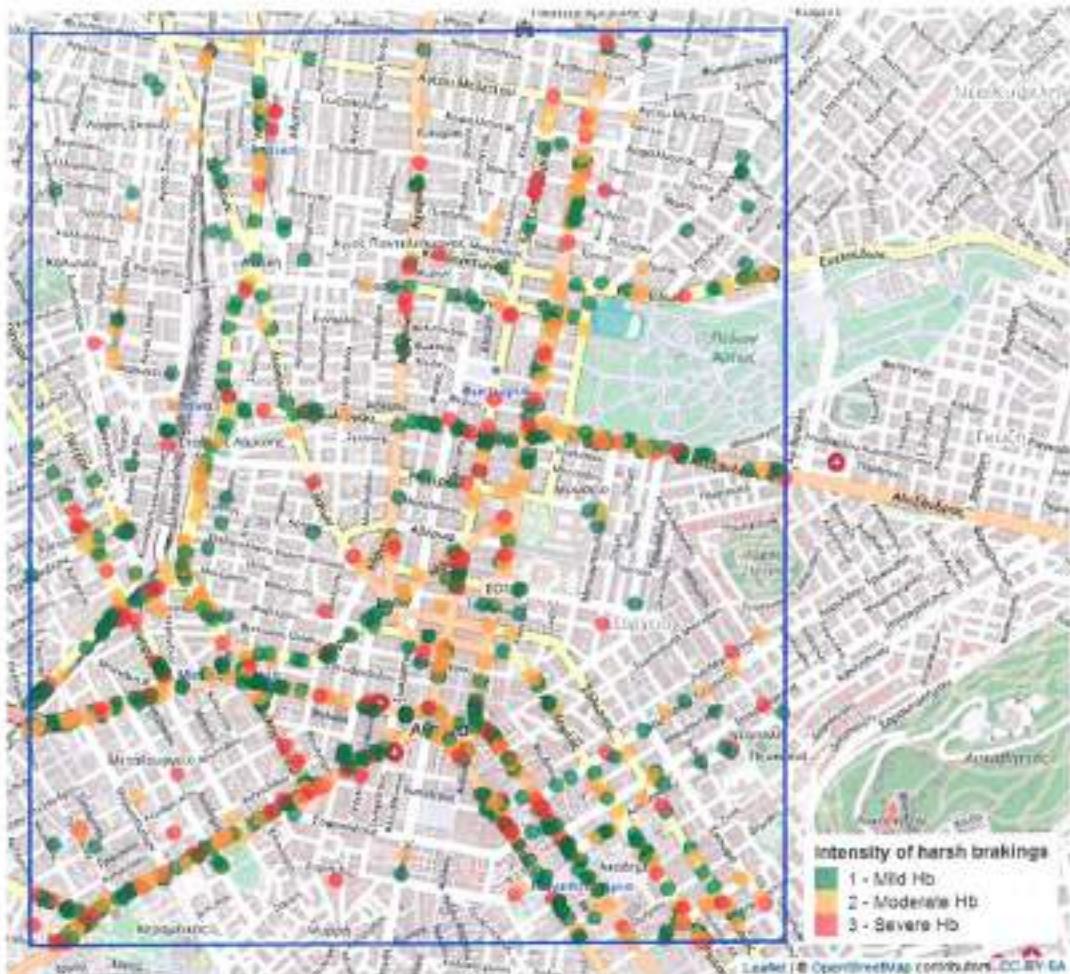
Τόσο για απότομες επιβραδύνσεις όσο και για απότομες επιταχύνσεις, οι βέλτιστες προβλέψεις αποκτήθηκαν με τη μεσοστάθμιση (μέσο όρο) των προβλέψεων από το σύνολο των τεσσάρων τύπων μοντέλων. Επιτεύχθηκε ακρίβεια CA 87,55% για απότομες επιβραδύνσεις και 89% για απότομες επιταχύνσεις. Σε σύγκριση με τα καλύτερα μεμονωμένα μοντέλα, υπάρχει αύξηση ακρίβειας άνω του 2% όταν οι προβλέψεις μεσοσταθμίζονται. Η μεσοστάθμιση των μοντέλων άμβλυνε τις μεμονωμένες αδυναμίες και τα ακρότατα στατιστικά σημεία και οδήγησε σε ένα ισορροπημένο προγνωστικό εργαλείο για απότομες επιβραδύνσεις και για απότομες επιταχύνσεις, με πολλά υποσχόμενες δυνατότητες μεταφοράς σε άλλες περιοχές.

Εκτός από τα πολυάριθμα στατιστικά αποτελέσματα, ένας μεγάλος αριθμός χαρτών σημειακής απεικόνισης και χαρτών θερμότητας (heatmaps) έχουν παραχθεί στην παρούσα διατριβή, τόσο από τα αρχικά δεδομένα όσο και από στατιστικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά, το Σχήμα II απεικονίζει τις καταγεγραμμένες απότομες επιβραδύνσεις στα οδικά τμήματα της περιοχής ελέγχου και το Σχήμα III απεικονίζει τις αντιστοιχες συνδυασμένες προβλέψεις για αυτά τα τμήματα (CA 87,55%).

Μεμονωμένα, τα μοντέλα με τις καλύτερες αποδόσεις σχετικά με τις προγνωστικές δυνατότητές τους είναι διαφορετικά για τις απότομες επιβραδύνσεις και για τις απότομες επιταχύνσεις, όπως και η ίδια η απόδοση τους. Συγκεκριμένα, εάν ληφθεί υπόψη η ακρίβεια CA: ο αλγόριθμος SPCV XGBoost παρουσίασε την καλύτερη απόδοση για τις απότομες επιβραδύνσεις (CA>85%), ενώ οι κλασικές συναρτησιακές μέθοδοι και οι Μπευζιανές μέθοδοι ισοβάθμησαν με το SPCV XGBoost για τις απότομες επιταχύνσεις (CA>87%).

Οι δείκτες RMSE, RMSLE και MAE είναι μαθηματικά κατάλληλοι δείκτες σφαλμάτων για την μοντελοποίηση συχνοτήτων απότομων συμβάντων. Δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις τους διαφέρουν ανάλογα με την ύπαρξη και την κατανομή στατιστικά ακραίων τιμών, συνιστώνται και οι τρεις κατά τη σύγκριση της απόδοσης των μοντέλων. Η επινόηση της προσαρμοσμένης ακρίβειας για δεδομένα συχνοτήτων

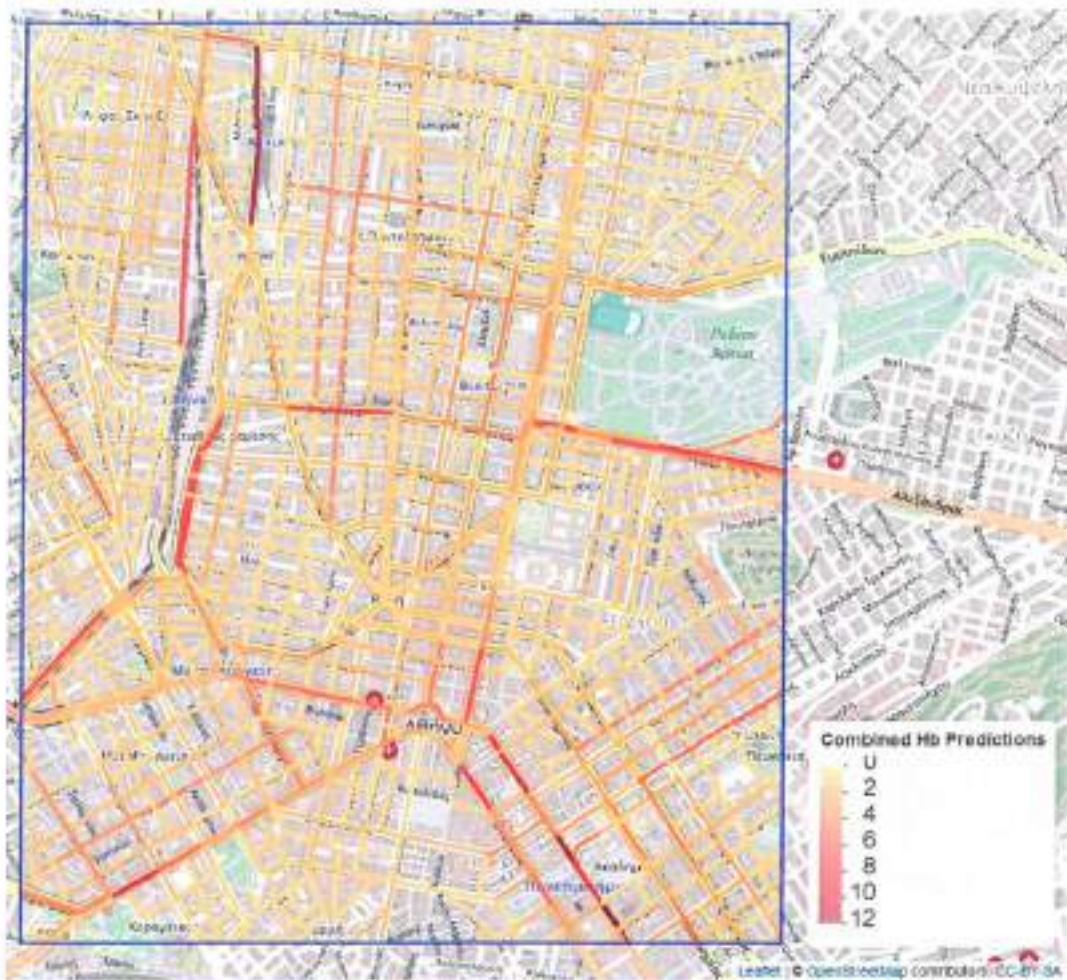
αυξάνει την ικανότητα αιξιολόγησης κάθε μοντέλου παρέχοντας ένα απλό και εύκολα κατανοητό ποσοστό ακρίβειας.



**Σχήμα II:** Απότομες επιβραδύνσεις στην περιοχή της Ομόνοιας

Σε τμήματα αστικών λεωφόρων, υπάρχει χωρική αυτοσυσχέτιση με βάση τους ολικούς και τοπικούς συντελεστές I του Moran, εάν λαμβάνονται υπόψη μόνο τα χωρικά συσχετισμένα οδικά τμήματα, όπως προτείνεται στη βιβλιογραφία. Μεγάλη χωρική αυτοσυσχέτιση εντοπίζεται στο μέσον (σε κεντρικά τμήματα) της λεωφόρου υπό εξέταση. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τα ευρήματα για τα αστικά οδικά δίκτυα.

Από τα συγχωνευμένα βαριογραφήματα προκύπτει ότι η μέση χωρική αυτοσυσχέτιση βρίσκεται σε απόσταση 310 m για τις απότομες επιβραδύνσεις και εντός 320 m για τις απότομες επιταχύνσεις. Πέρα από αυτή την απόσταση, η χωρική αυτοσυσχέτιση εξομαλύνεται. Τα βαριογραφήματα για οδικά τμήματα αστικών λεωφόρων φαίνεται να είναι πιο ασταθή σε σύγκριση με εκείνα των αστικών οδικών δικτύων. Επιπλέον, παρατηρείται χωρική κυκλικότητα στον άξονα τόσο για απότομες επιβραδύνσεις όσο και για απότομες επιταχύνσεις. Με άλλα λόγια, παρατηρείται κάποια επανάληψη στα μοτίβα (patterns) των συχνοτήτων απότομων συμβάντων.



**Σχήμα III:** Χάρτης συνδυασμένων προβλέψεων στην περιοχή της Ομόνοιας

Υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι έκθεσης κινδύνου του μήκους οδικού τμήματος και του αριθμού διελεύσεων, καθώς και τα μέσα δευτερόλεπτα χρήσης κινητού τηλεφώνου από τους οδηγούς είναι παράμετροι θετικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων. Όσον αφορά τις παραμέτρους κυκλοφορίας, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ κυκλοφορίας και οδηγού συσχετίζεται θετικά με τις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων, ενώ η επιρροή του μέσου όρου τρέχοντος όγκου κυκλοφορίας προέκυψε ότι είναι αρνητική. Τα τμήματα της περιοχής μελέτης με κατεύθυνση προς το Νότο βρέθηκε ότι εμφανίζουν συστηματικά λιγότερες απότομες επιβραδύνσεις σε σύγκριση με αυτά που κατευθύνονται προς Βορρά. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η μέση κατάληψη ασκεί μια περιστασιακά θετική επιρροή και ότι η κλίση ασκεί μια περιστασιακά αρνητική επιρροή στις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων ανά οδικό τμήμα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Αντίστοιχα, καθορίστηκε ότι οι παράμετροι έκθεσης κινδύνου του μήκους οδικού τμήματος και του αριθμού διελεύσεων, καθώς και τα μέσα δευτερόλεπτα χρήσης κινητού τηλεφώνου από τους οδηγούς διατηρούν τη θετική επιρροή τους στις συχνότητες απότομων επιβραδύνσεων υπό συνθήκες συγχρονισμένης ροής. Όσον αφορά τις παραμέτρους κυκλοφορίας, η μέση κατάληψη φαίνεται ότι αναλαμβάνει ενιαχυμένη επιρροή με στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση με την εξεταζόμενη

συχνότητα. Η επιρροή του κυκλοφοριακού φόρτου (ωριαίου ή τρέχοντος) εμφανίζεται ως αρνητική κατά περίπτωση. Οι επιρροές της καμπυλότητας, της κλίσης, του αριθμού λωρίδων και της κατεύθυνσης των οδικών τμημάτων εξασθενούν και είναι πολύ περιστασιακές, αναλόγως με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Υπό συνθήκες ελεύθερης ροής, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι έκθεσης κινδύνου του μήκους οδικού τμήματος και του αριθμού διελεύσεων, καθώς και τα μέσα δευτερόλεπτα χρήσης κινητού τηλεφώνου από τους οδηγούς (με μια εξαίρεση) είναι παράμετροι θετικά συσχετισμένες με τις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων. Αναφορικά με τις παραμέτρους κυκλοφορίας, η επιρροή της μέσης κατάληψης εμφανίζεται ως σταθερά θετική, ενώ τα μέσα δευτερόλεπτα υπέρβασης του ορίου ταχύτητας από τους οδηγούς προέκυψε ότι έχουν οριακά θετικά συσχέτιση. Η μέση ταχύτητα κίνησης εμφανίζει μια περιστασιακά αρνητική επιρροή, αναλόγως με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Οι μεταβλητές γεωμετρίας και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου βρέθηκαν ότι είναι πολύ περιστασιακά συσχετισμένες με τη συχνότητα απότομων επιταχύνσεων.

Αντίστοιχα, διαπιστώθηκε ότι ο αριθμός διελεύσεων και τα μέσα δευτερόλεπτα χρήσης κινητού τηλεφώνου από τους οδηγούς διατηρούν τη θετική επιρροή τους στις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων υπό συνθήκες συγχρονισμένης ροής. Για πρώτη φορά σε όλες τις χωρικές αναλύσεις, το μήκος οδικού τμήματος δεν εμφανίζεται να επηρεάζει τις συχνότητες απότομων επιταχύνσεων ανά οδικό τμήμα. Ο κυκλοφοριακός φόρτος (ωριαίος ή τρέχων) βρέθηκε θετικά συσχετισμένος με τις απότομες επιταχύνσεις. Αντιθέτως, ο αριθμός λωρίδων προέκυψε αρνητικά συσχετισμένος με τις απότομες επιταχύνσεις μόνο στα μοντέλα CAR.

Για ακόμα μια φορά, διαπιστώθηκε ότι και οι τρεις μέθοδοι, GWPR, CAR και XGBoost - με τυχαία ή χωρική εγκάρσια επικύρωση - είναι κατάλληλες και δόκιμες μέθοδοι για την ανάλυση των συχνοτήτων απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύσεων σε ένα μέσα σε ένα λογαριθμικό-Poisson πλαίσιο. Παρόλα αυτά, η διεξαγωγή προβλέψεων με τη βάση δεδομένων τμημάτων αστικών λεωφόρων δεν είναι τόσο δόκιμη όσο με την αντίστοιχη βάση αστικών οδικών δικτύων. Ο λόγος είναι η συμπερίληψη μεταβλητών κυκλοφορίας και συμπεριφοράς οδηγών οι οποίες δεν είναι γνωστές και διαθέσιμες εκ των προτέρων σε κάθε τοποθεσία. Αντιθέτως, θα απαιτούνταν επιπλέον μοντέλα εκτιμήσεων-προβλέψεων για αυτές τις μεταβλητές.

Μια αξιοσημείωτη γενική παρατήρηση είναι ότι η συμπερίληψη μεταβλητών κυκλοφορίας και συμπεριφοράς οδηγών στα μοντέλα αποδύναμωνται τις συσχετίσεις που προκύπτουν με τις μεταβλητές γεωμετρίας και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου, αντικαθιστώντας τις κατά κάποιον τρόπο. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ότι οι απότομες επιβραδύνσεις και οι απότομες επιταχύνσεις είναι δύο διαφορετικά φαινόμενα οδικής ασφάλειας. Οι συχνότητες τους συσχετίζονται με ορισμένες κοινές μεταβλητές, αν και με διαφορετικούς συντελεστές, αλλά επίσης και με ορισμένες εντελώς διαφορετικές μεταβλητές.

Η γραμμικότητα της λεωφόρου Κηφισίας οδήγησε σε μια πιο ομοιογενή περιοχή μελέτης, με λιγότερη αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό των δεδομένων κυκλοφορίας ανά δευτερόλεπτο διαδρομής και τη σύνθεση του αντίστοιχου αρχείου χωρικών δεδομένων. Ταυτόχρονα, είναι πιθανό ότι αυτή η γραμμικότητα προκαλεί επίσης απώλεια πληροφοριών ή διαφορετική απόδοση ορισμένων μοντέλων. Συγκεκριμένα,

δεν ήταν δυνατή η δημιουργία βαριογραφημάτων βάσει κατεύθυνσης και τα μοντέλα GWPR προσαρμόστηκαν στα δεδομένα με μειωμένη ακρίβεια.

Τα μοντέλα Bayesian CAR και XGBoost δεν φάνηκαν να επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από τη γραμμικότητα της περιοχής μελέτης αστικής λεωφόρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το XGBoost ταιριάζει καλύτερα στο σύνολο δεδομένων, αντλώντας πληροφορίες από μεγαλύτερο αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών, και ιδιαίτερα από μεταβλητές γεωμετρίας και χαρακτηριστικών οδικού δικτύου. Ο ρυθμός εκμάθησης (learning rate – ETA) εμφανίστηκε ως η πιο σημαντική υπερπαραμέτρος κατά τη φάση επιλογής υπερπαραμέτρων του XGBoost. Για το SPCV XGBoost, η υπερπαράμετρος γάμμα (gamma) – η οποία διέπει την ελάχιστη μείωση της συνάρτησης απώλειας που μπορεί να δικαιολογήσει τον διαχωρισμό σε ένα δένδρο – βρέθηκε να επηρεάζει επίσης την απόδοση του αλγορίθμου.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διδακτορική διατριβή προσφέρει σημαντικές καινοτομίες στον επιστημονικό τομέα της οδικής ασφάλειας και της ανάλυσης συμπεριφοράς της κυκλοφορίας:

1. Ένα νέο μεθοδολογικό ερευνητικό πλαίσιο σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε με σκοπό τη διεξαγωγή χωρικών αναλύσεων οδικής ασφάλειας των συχνοτήτων απότομων οδηγικών συμβάντων με χρήση πολυπαραμετρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης ανά οδικό τμήμα, παρέχοντας πολύ λεπτομερείς γνώσεις για την διαδικασία εντοπισμού επικίνδυνων θέσεων.
2. Για την υλοποίηση και ενίσχυση του ερευνητικού πλαισίου, επινοήθηκαν και εφαρμόστηκαν αλγόριθμοι δεδομένων μεγάλης κλίμακας, με σκοπό την εκτέλεση κρίσιμων λειτουργιών απαραίτητων για τις χωρικές αναλύσεις, όπως ο υπολογισμός πρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η επεξεργασία και συνέννωση δεδομένων και η αντιστοίχιση χαρτών (map-matching).
3. Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε καινοτόμους τύπους χωρικών αναλύσεων για αστικά οδικά δίκτυα: Για πρώτη φορά (i) χωρικές αναλύσεις απότομων συμβάντων πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο οδικού τμήματος και (ii) χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα χωρικών αναλύσεων για την επιτυχή πρόβλεψη συχνοτήτων απότομων συμβάντων σε διαφορετική περιοχή ελέγχου αστικού δικτύου.
4. Πραγματοποιήθηκε επίσης μια σειρά αναλύσεων με επιπλέον χαρακτηριστικά σε οδικά τμήματα αστικών λεωφόρων, οι οποίες αναλύθηκαν χωρικά για τις καταστάσεις κυκλοφορίας ελεύθερης ροής και συγχρονισμένης ροής.
5. Από τις λεπτομερείς μικροσκοπικές έρευνες της παρούσας διατριβής, προέκυψαν πρωτότυπες πληροφορίες και στατιστικές συσχετίσεις μεταξύ των συχνοτήτων απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων ανά οδικό τμήμα, και μεταβλητών γεωμετρίας, χαρακτηριστικών οδικού δικτύου, κυκλοφορίας και συμπεριφοράς οδηγών.

Η διαθεσιμότητα πολυπαραμετρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης – και η σχετική αφθονία των απότομων οδηγικών συμβάντων σε σύγκριση με τα οδικά ατυχήματα – χρησίμευσε ως έναυσμα προς την εξερεύνηση της διεξαγωγής χωρικών αναλύσεων απότομων συμβάντων στο πιο λεπτομερές, μικροσκοπικό επίπεδο οδικού τμήματος, σε αντίθεση με την πιο παραδοσιακή μακροσκοπική ανάλυση περιοχών (για παράδειγμα σε επίπεδο περιφερειών, νομών ή δήμων). Η χωρική διερεύνηση των απότομων συμβάντων εν γένει, αλλά και συγκεκριμένα ανά οδικά τμήματα, αποτελεί έναν πλήρως ανεξερεύνητο ερευνητικό χώρο.

Από επιστημονικής άποψης, ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της υιοθετούμενης προσέγγισης είναι η παράκαμψη του οριακού προβλήματος (border problem) και του προβλήματος τροποποιημένων επιφανειών (modifiable areal unit problem – MAUP). Τα συγκεκριμένα προβλήματα είναι πάντα παρόντα στις χωρικές αναλύσεις, και η παρουσία του MAUP επιβεβαιώθηκε από τη μετα-παλινδρόμηση της μεταβλητής της διανυθείσας απόστασης στο ποσοτικό μέρος της βιβλιογραφικής επισκόπησης της διατριβής. Με την διακριτοποίηση και κατάτμηση των περιοχών έρευνας οδικής ασφάλειας σε οδικά τμήματα κάθε φορά, δημιουργείται ένας μονοσήμαντος τρόπος αντιμετώπισης των συμβάντων που πραγματοποιούνται στα όρια μιας περιοχής μελέτης, μόλις καθοριστεί ότι το αντιστοιχό τμήμα ανήκει (ή δεν ανήκει) στην περιοχή. Επιπλέον, τυποποιείται η διαδικασία επιλογής μονάδων για ανάλυση μέσω των οδικών τμημάτων, αφαιρώντας τις αβεβαιότητες από το MAUP σε μελλοντικές αναλύσεις.

Η επινόηση και δημιουργία των διαφόρων αλγορίθμων που έχουν εφαρμοστεί σε αυτή τη διδακτορική διατριβή επιδέχονται σχολιασμού. Οι αλγόριθμοι επινοήθηκαν και εφαρμόστηκαν σε ενδιάμεσα στάδια, εκτελώντας κρίσιμες λειτουργίες, όπως ο υπολογισμός πρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, η συγχώνευση δεδομένων και η αντιστοίχιση χαρτών. Ως εκ τούτου, παρείχαν το μέσον για την υλοποίηση και εφαρμογή του καινοτόμου μεθοδολογικού πλαισίου και προετοίμασαν τα χωρικά πλαίσια δεδομένων ανά οδικό τμήμα για τις αναλύσεις που ακολούθησαν. Οι αλγόριθμοι επιτρέπουν την απρόσκοπτη μεταφορά αυτούσιου του πλαισίου μεθοδολογίας και επεξεργασίας δεδομένων που εφαρμόστηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή σε άλλες περιπτώσεις.

Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό πρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών αντλεί πληροφορίες από τους ψηφιακούς κόμβους που ορίζουν οδικά τμήματα (ή ways στο OpenStreetMap). Από τις συντεταγμένες κόμβων, υπολογίζεται το μήκος τμήματος, η κλίση, η καμπυλότητα και η πολυπλοκότητα της γειτονιάς. Η επαναληπτική φύση του αλγορίθμου διασφαλίζει τη λειτουργικότητά του σε όλα τα τμήματα ανεξάρτητα από τον συνολικό αριθμό κόμβου, τον τύπο του δρόμου ή την τοποθεσία του τμήματος.

Στη συνέχεια, ένας αλγόριθμος αντιστοίχισης χαρτών (map-matching) επινοήθηκε ώστε να ταιριάζει τα δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες με τα οδικά τμήματα των περιοχών μελέτης. Για αυτό το σκοπό, για κάθε δευτερόλεπτο διαδρομής, προσδιορίστηκε το πλησιέστερο οδικό τμήμα (Minimum-Distance-Way – MDW), χρησιμοποιώντας έναν σύνθετο υπολογισμό σε δύο στάδια: ελάχιστη απόσταση από σημείο προς σημείο και από σημείο προς καμπύλη. Επιπλέον, ο αλγόριθμος περιελάμβανε προσεγγίσεις κινούμενων παραθύρων που μείωναν τις διαστάσεις για τους πίνακες σύγκρισης αποστάσεων, ελαττώνοντας έτσι τους υπολογιστικούς χρόνους. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την πρακτική εφαρμογή της διαδικασίας αντιστοίχισης χαρτών με άμεσο έλεγχο των αποτελεσμάτων, χωρίς να χρειάζεται η εξάρτηση από τρίτες υπηρεσίες, οι οποίες είναι άγνωστες διαδικασίες «μαύρου κουτιού» και συχνά χρεώνουν κόστη επεξεργασίας.

Ως απαραίτητη συμπληρωματική υπορουτίνα στον αλγόριθμο αντιστοίχισης χαρτών, επινοήθηκε ένας αλγόριθμος διόρθωσης αριθμού διελεύσεων με βάση την καταμέτρηση ψήφων. Η συγκεκριμένη υπορουτίνα ουσιαστικά εξυπηρετούσε την ελάττωση των αβεβαιοτήτων των αισθητήρων GPS, μέσω ενός προηγμένου

αλγορίθμου καταμέτρησης ψήφων που ανέθετε κάθε διέλευση στο οδικό τμήμα το οποίο θα λάμβανε την πλειοψηφία των περιπτώσεων αντιστοίχησης χαρτών. Η χρήση της υπορουτίνας αποδείχθηκε κρίσιμη σε τοποθεσίες πολλών παράλληλων αξόνων οδικών τμημάτων με υψηλή πυκνότητα, όπως η Λεωφόρος Κηφισίας και οι βοηθητικές παράλληλες οδοί της, ενώ αύξησε την συνολική ακρίβεια της διαδικασίας.

Η εφαρμογή ενός επιπλέον προσαρμοσμένου αλγορίθμου ήταν απαραίτητη για τις αναλύσεις τμημάτων αστικών λεωφόρων, προκειμένου να ενισχυθούν τα δεδομένα οδήγησης υπό πραγματικές συνθήκες με τα δεδομένα κυκλοφορίας πριν από την αντιστοίχιση χαρτών. Αυτός ο αλγόριθμος περιελάμβανε το διαχωρισμό τμημάτων και θέσεων μέτρησης ανά κατεύθυνση (προς Βορρά ή Νότο) και τον προσδιορισμό της μέτρησης με την ελάχιστη χωροχρονική απόσταση κάθε δευτερολέπτου διαδρομής μεταξύ των δύο πολύ μεγάλων βάσεων δεδομένων οδήγησης και κυκλοφορίας.

Η σημασία της εξέτασης της χωρικής αυτοσυσχέτισης απότομων συμβάντων (μέσω των ολικών και τοπικών δεικτών I του Moran) αποκλειστικά με βάση τα χωρικά συσχετισμένα τμήματα επιβεβαίωσε τόσο τις προτεινόμενες καλές πρακτικές χωρικών αναλύσεων όσο και τις πρακτικές οδικής ασφάλειας που εφαρμόζονται κατά την ανάλυση των ατυχημάτων. Υπολογίστηκαν για πρώτη φορά αποστάσεις επιρροής της χωρικής αυτοσυσχέτισης των απότομων επιβραδύνσεων και επιταχύνσεων με χρήση βαριογραφημάτων, τα οποία επίσης καθόρισαν ότι αυτές οι αποστάσεις διαφέρουν ανά τύπο οδού.

Επιπλέον, ο πλούτος των πολυταραμετρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης και η εγκυρότητα των φάσεων επεξεργασίας και συγχώνευσης δεδομένων επέτρεψαν την εκτέλεση καινοτόμων χωρικών αναλύσεων. Είναι η πρώτη φορά που αναλύονται απότομα οδηγικά συμβάντα σε επίπεδο οδικού τμήματος για αστικά οδικά δίκτυα. Η παρούσα διατριβή κατάφερε να ξεπεράσει τα τυπικά ζητήματα της έλλειψης δεδομένων για αστικά οδικά δίκτυα, τα οποία είναι σε μεγάλο βαθμό υπομελετημένες περιοχές οδικής ασφάλειας.

Είναι εξίσου σημαντικό ότι για πρώτη φορά, εξ όσων γνωρίζει ο συγγραφέας, χρησιμοποιούνται αρχεία χωρικών δεδομένων και χωρικές προσεγγίσεις για τη διεξαγωγή προβλέψεων οδικής ασφάλειας σε διαφορετική περιοχή αστικού δικτύου, με την επίτευξη υψηλού ποσοστού επιτυχίας. Αυτό το εύρημα αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη της μεγάλης δυνατότητας μεταφοράς αποτελεσμάτων πρόβλεψης σε παρόμοιες περιοχές. Εκτός των προηγουμένων, είναι η πρώτη φορά που οι αλγόριθμοι XGBoost χρησιμοποιούνται για χωρικές αναλύσεις στην οδική ασφάλεια. Το XGBoost αποδείχθηκε μια πολύ ισχυρή και πολλά υποσχόμενη μέθοδος ανάλυσης. Η διερεύνηση της τυχαίας επικύρωσης και της χωρικής επικύρωσης, η οποία είναι μια πολύ πρόσφατη ιδέα, παρέχει περαιτέρω εμβάθυνση στα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ανάλυσης αστικών οδικών δικτύων επιβεβαιώνουν ότι υπάρχει μια ισορροπία στη χρηστικότητα μεταξύ κλασικών συναρτησιακών μεθόδων (GWPR), Μπευζιανών μεθόδων (CAR) και Μηχανικής Μάθησης (XGBoost). Αυτές οι μέθοδοι δημιούργησαν μοντέλα που ταιριάζουν διαφορετικά στα δεδομένα και προέβλεψαν μεγαλύτερες συχνότητες για διαφορετικά τμήματα κατά περίπτωση. Ωστόσο, ο συνδυασμός τους μέσω του μέσου όρου προβλέψεων απέδωσε ακριβέστερα αποτελέσματα σε αύγκριση με τα μεμονωμένα μοντέλα, καθώς οι ακραίες τιμές μειώθηκαν και οι σωστές προβλέψεις βελτιώθηκαν.

Αναφορικά με τα τμήματα αστικών λεωφόρων, διαπιστώθηκε ότι διαφορετικές μεταβλητές σχετίζονται σημαντικά με τις συχνότητες απότομων συμβάντων ανά κατάσταση κυκλοφορίας. Η παρούσα διατριβή είναι μία από τις ελάχιστες ερευνητικές προσπάθειες που συμπεριλαμβάνουν τις συνθήκες κυκλοφορίας κατά τη σπιγμή του εξεταζόμενου φαινομένου και η μόνη για τα απότομα συμβάντα. Μεταβλητές όπως η διαφορά ταχύτητας μεταξύ κυκλοφορίας και μεμονωμένου οδηγού καθίστανται πολύ σημαντικές για την ερμηνεία των συχνοτήτων απότομων συμβάντων, ακόμη και αν τα δεδομένα συγκεντρώνονται ανά οδικό τμήμα. Συνολικά, ο περίπλοκος μη γραμμικός τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι κυκλοφορίας επηρεάζουν τις συχνότητες απότομων συμβάντων αποκαλύφθηκε από την παρούσα έρευνα.

Ως συνολική παρατήρηση από τις πολυάριθμες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι περισσότερες μεταβλητές γεωμετρίας, χαρακτηριστικών οδικού δικτύου, κυκλοφορίας και συμπεριφοράς οδηγού βρέθηκαν ως στατιστικά σημαντικές τουλάχιστον μία φορά. Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τις εγγενείς διαφορές των φαινομένων απότομης επιβράδυνσης και απότομης επιτάχυνσης, καθώς οι αντίστοιχες συχνότητες συσχετίζονται με σταθερά διαφορετικές μεταβλητές. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υποστηρίζουν ολιστικές προσεγγίσεις για την οδική ασφάλεια που περιλαμβάνουν πολυπαραμετρικά δεδομένα, σε μια προσπάθεια να αποτυπώνονται όσο το δυνατόν περισσότερες πλευρές του οδικού περιβάλλοντος και των χρηστών του σε στατιστικά μοντέλα.

Η δημιουργία ολοκληρωμένων χαρτών σημειακών δεδομένων και θερμικών χαρτών οδικής ασφάλειας με βάση τα απότομα οδηγικά συμβάντα προσφέρει ένα μοναδικό εργαλείο στις διαχειριστικές αρχές των οδών, στους χρήστες των οδών και στους λοιπούς ενδιαφερόμενους. Οι χάρτες απεικονίζουν πολύπλοκα δεδομένα και προβλέψεις προηγμένων μοντέλων με έναν εύκολο και κατανοητό τρόπο, ο οποίος μπορεί να μεταφερθεί και να ενωματωθεί σε οποιοδήποτε οδικό εργαστικό περιβάλλον ή σε προσωπικές αποφάσεις των χρηστών. Μέσω των παραγόμενων χαρτών, η πολυεπίπεδη προσπάθεια αυτής της διατριβής ενσταλάσσεται και μεταλαμπαδεύεται από τον επιστημονικό στο δημόσιο τομέα.

Μία τελευταία εξειδικευμένη καινοτομία της παρούσας έρευνας είναι η εφεύρεση και εφαρμογή του πρότυπου δείκτη απόδοσης μοντέλων που είναι η προσαρμοσμένη ακρίβεια (CA). Η προσαρμοσμένη ακρίβεια προσφέρει έναν άμεσο τρόπο μέτρησης της ακρίβειας των προβλέψεων ο οποίος αντλεί τη λειτουργία του τόσο από δείκτες μοντέλων ταξινόμησης (όπως ο πίνακας ακρίβειας – confusion matrix) όσο και από δείκτες μοντέλων παλινδρόμησης (όπως το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος) ο οποίος είναι διαισθητικός και εύκολα κατανοητός.

## **Σύντομο βιογραφικό σημείωμα και επιστημονικές εργασίες**

του κ. Απόστολου Ζιακόπουλου

Ο Απόστολος Ζιακόπουλος είναι Υποψήφιος Διδάκτορας με επιβλέποντα τον Καθηγητή κ. Γιώργο Γιαννή και Επιστημονικός Συνεργάτης του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Είναι Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (2013) και κάτοχος Μεταπτυχιακού Διπλώματος στις Μεταφορές από το Imperial College London και το University College London (2014). Ο κ. Ζιακόπουλος έχει εργαστεί ως ερευνητής σε έργα στο Ε.Μ.Π., στο Imperial College London (Ηνωμένο Βασίλειο) και στο University of Sheffield (Ηνωμένο Βασίλειο). Διαθέτει 5 έτη ερευνητικής εμπειρίας στην επιστήμη της κυκλοφοριακής τεχνικής και της οδικής ασφάλειας με έμφαση στην ανάλυση ατυχημάτων και έχει συμμετάσχει σε 5 ερευνητικά έργα. Έχει δημοσιεύσει 12 επιστημονικές εργασίες σε επιστημονικά περιοδικά, 16 εργασίες σε συνέδρια, 2 κεφάλαια επιστημονικών συγγραμμάτων και επιπλέον έχει κάνει 9 παρουσιάσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια. Είναι επίσης προσκεκλημένος κριτής εργασιών σε 10 επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια. Συνεπικουρεί στη διδασκαλία του μαθήματος "Διαχείριση κυκλοφορίας και Οδική ασφάλεια" ενώ έχει επιβλέψει 5 διπλωματικές εργασίες.

Διαδικτυακός ιστότοπος ερευνητή: [www.nrsr.ntua.gr/apziak](http://www.nrsr.ntua.gr/apziak)

## **Επιστημονικές εργασίες**

### Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

1. Petraki, V., Ziakopoulos, A., Yannis, G. (2020 – in press). "Combined impact of road and traffic characteristics on driver behavior using smartphone sensor data." Accident Analysis and Prevention.
2. Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2020). "Meta-regressions of exposure parameters used in spatial road safety analyses." Advances in Transportation Studies, 51.
3. Ziakopoulos, A., Tselentis, D.I., Kontaxi A., Yannis, G. (2020). "A critical overview of driver recording tools." Journal of Safety Research – Special Issue: Human Factors.
4. Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2019). "A review of spatial approaches in road safety." Accident Analysis & Prevention, 105323.
5. Daniels, S., Martensen, H., Schoeters, A., Van den Berghe, W., Papadimitriou, E., Ziakopoulos, A., Kaiser, S., Aigner-Breuss E., Soteropoulos, A., Wijnen, W., Weijermars, W., Carnis, L., Elvik R., Perez, O.M. (2019). "A systematic cost-benefit analysis of 29 road safety measures." Accident Analysis & Prevention, 133, 105292.
6. Ziakopoulos, A., Theofilatos, A., Papadimitriou, E., Yannis, G. (2019). "A meta-analysis of the impacts of operating in-vehicle information systems on road safety." International Association of Traffic and Safety Sciences (IATSS) Research.
7. Papadimitriou, E., Filtness, A., Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Quigley, C., & Yannis, G. (2019). "Review and ranking of crash risk factors related to the road infrastructure." Accident Analysis & Prevention, 125, 85-97.

8. Bellos, V., Ziakopoulos, A., Yannis, G. (2019). "Investigation of the effect of tourism on road crashes." *Journal of Transportation Safety and Security*, 1-18.
9. Theofilatos, A., & Ziakopoulos, A. (2018). "Examining injury severity of moped and motorcycle occupants with real-time traffic and weather data." *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(11), 04018066.
10. Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Papadimitriou, E., & Yannis, G. (2018). "How many crashes are caused by driver interaction with passengers? A meta-analysis approach." *Journal of Safety Research*, 65, 11-20.
11. Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Papadimitriou, E., Yannis, G., & Diamandouros, K. (2017). "Meta-analysis of the effect of road work zones on crash occurrence." *Accident Analysis & Prevention*, 108, 1-8.
12. Yannis, G., Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., & Chaziris, A. (2014). "Investigation of road accident severity and likelihood in urban areas with real-time traffic data." *Traffic Engineering & Control*, 55 (1), 31-35.

#### Δημοσιεύσεις κεφαλαίων σε επιστημονικά συγγράμματα με κρίση

1. Theofilatos, A., Ziakopoulos, A. (2020 – in press). "Traffic flow volume and safety". *International Encyclopedia of Transportation*, Elsevier, Section 10198.
2. Anvari, B., Ziakopoulos, A., Morley, J., Pachakis, D., & Angeloudis, P. (2020 – in press). "Comparison of fleet size determination models for horizontal transportation of shipping containers using automated straddle carriers." In *Handbook of Terminal Planning*. Springer, 2019.

#### Δημοσιεύσεις σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων με κρίση της εργασίας

1. Ziakopoulos A., Kontaxi A., Yannis G., Fortsakis P., Kontonasios K.N., Kostoulas G. (2020). "Advanced driver monitoring using smartphone applications: The BeSmart project". Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland.
2. Kaiser S., Katrakazas C., Aigner-Breuss E., Pilkington-Cheney F., Ziakopoulos A., Yannis G., Brijs T. (2020). "State of the art on measuring driver state and technology-based risk prevention and mitigation: Findings from the i-DREAMS project". Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland.
3. Kourtis E.M., Ziakopoulos A., Theofilatos A., Yannis G. (2020). "Modelling the economic impacts of road crashes in Greece." Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland.
4. Nikolaou D., Goldenbeld C., Ziakopoulos A., Laiou A., Yannis G. (2020). "Road user attitudes towards driver fatigue." Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland.
5. Stefatou A., Ziakopoulos A., Theofilatos A., Nævestad T.O., Bjørnskau T., Laiou A., Yannis G. (2019). "Greek driver attitudes towards aggressive driving." 9th International Congress on Transportation Research (ICTR) 2019, Athens, Greece, 24-25 October 2019.
6. Kontaxi A., Ziakopoulos A., Tsalentis D., Yannis G. (2019). "A review of the impact of driver distraction on driving behavior and road safety." 9th International Congress on Transportation Research (ICTR) 2019, Athens, Greece, 24-25 October 2019.
7. Ziakopoulos A., Rosenbloom T., Yannis G. (2019). "A review of the interaction between Autonomous Vehicles and Vulnerable Road Users." *Road Safety and*

- Simulation International Conference (RSS), 14-17 October 2019 - Iowa City, Iowa, USA.
- 8. Yannis G., Theofilatos A., Ziakopoulos A., Papadimitriou E., Thomas P., Filtness A. (2018). "Overview of the SafetyCube project: Towards a European Road Safety Decision Support System." Proceedings of the 7th Panhellenic Road Safety Conference, Hellenic Institute of Transportation Engineers, 11-12 October 2018, Larissa, Greece.
  - 9. Ziakopoulos A., Theofilatos A., Yannis G., Margaritis D., Thomas P., Morris A., Brown L., Robibaro M., Usami, D. S., Phan, V., Davidse R., Buttler, I. (2018). "A preliminary analysis of in-depth accident data for powered two-wheelers and bicycles in Europe." International Research Council on Biomechanics of Injury – IRCOBI, International Conference Proceedings, IRC-18-73, 12-14 September 2018, Athens, Greece.
  - 10. Theofilatos A., Ziakopoulos A., Yannis G. (2018). "Combining data mining techniques to investigate crash severity in urban motorways." Expert Symposium of Accident Research (ESAR) conference, April 19-20, 2018, Hannover, Germany.
  - 11. Ziakopoulos A., Botteghi G., Macaluso G., Theofilatos A., Papadimitriou E., Yannis G., Diamandouros K., Arampidou K. (2018). "Can light engineering measures make a difference? An overview of the effect of delineation and signage on road safety." Proceedings of the 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1486650>
  - 12. Papadimitriou E., Machata K., Bauer R., Stadlbauer S., Soteropoulos A., Daniels S., Elvik R., Ziakopoulos A., Theofilatos A., Yannis G. (2018). "Safety effects of infrastructure road safety measures." Proceedings of the 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1486530>
  - 13. Theofilatos A., Nieuwkamp R., Ziakopoulos A., Papadimitriou E., Yannis G. (2017). "Effectiveness of intelligent speed adaptation, collision warning and alcolock systems on driving behaviour and safety." Smart Cities and Mobility as a Service, International Conference, Patras, Greece, 7-8 December, 2017.
  - 14. Ziakopoulos A., Theofilatos A., Papadimitriou E., Yannis G. (2017). "Driver distraction without presence of secondary tasks: Inattention, cognitive overload and factors outside the vehicle – an overview." Road Safety and Simulation International Conference (RSS), The Hague, Netherlands, 17-19 October 2017.
  - 15. Papadimitriou E., Filtness A., Theofilatos A., Ziakopoulos A., Yannis G. (2017). "Comparative assessment and ranking of infrastructure related crash risk factors." Road Safety and Simulation International Conference (RSS), The Hague, 17-19 October 2017.
  - 16. Ziakopoulos A., Theofilatos A., Papadimitriou E., Yannis G., Aigner-Breuss E., Kaiser S. (2017). "An overview of risk factors related to driver distraction: Reviews and meta-analyses." 8th International Congress on Transportation Research (ICTR) 2017, Thessaloniki, 27-29 September 2017.