



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

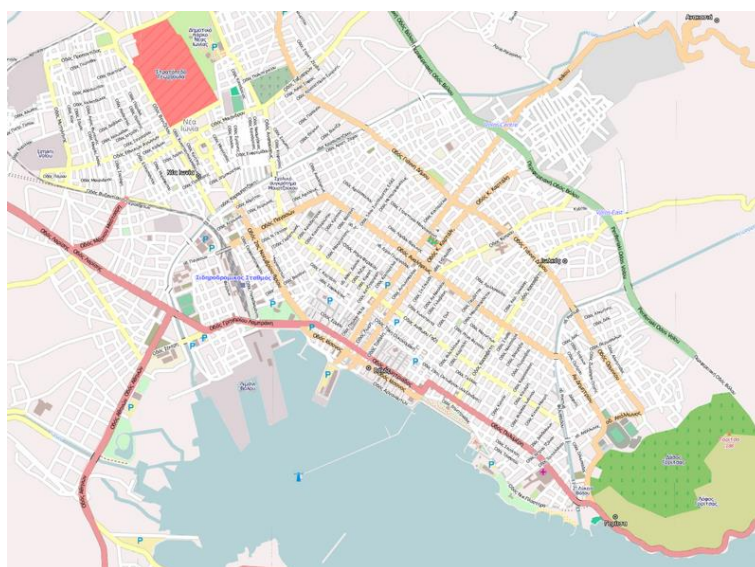
Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΔΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ
ΠΟΛΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΟΥΤΣΟΓΑΚΗΣ

&

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΡΚΟΥ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 Χρήστος Κουτσογάκης και Γεώργιος Μάρκου

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Ευτυχία Ναθαναήλ
(Επιβλέπουσα) Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Παντελής Κοπελιάς
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Αθανάσιος Θεοφιλάτος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας οφείλουμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όσους συνέβαλαν με τον τρόπο τους στην πραγματοποίησή της.

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κα. Ευτυχία Ναθαναήλ για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες παρατηρήσεις και τη συνεχή στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, κ.Κοπελιά και κ.Θεοφιλάτο ,για τον χρόνο που αφιέρωσαν και το ενδιαφέρον που έδειξαν για την εργασία μας.

Ευχαριστούμε επίσης το διδακτικό προσωπικό του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τις γνώσεις και τα εφόδια που μας παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ένα ιδιαίτερο «ευχαριστώ» οφείλουμε στις οικογένειές μας, που με την αγάπη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους μας στήριξαν καθοριστικά σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας και συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτού του σημαντικού σταδίου της ζωής μας.

Χρήστος Κουτσογάκης & Γεώργιος Μάρκου

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΟΔΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ

Χρήστος Κουτσογάκης & Γεώργιος Μάρκου
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ευτυχία Ναθαναήλ, Καθηγήτρια

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη συστηματική αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών διασταυρώσεων στην πόλη του Βόλου, με στόχο τον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μια πολυκριτηριακή μεθοδολογία βασισμένη σε επίσημα δεδομένα 191 τροχαίων ατυχημάτων της περιόδου 2019-2023. Η πρωτοτυπία της έρευνας έγκειται στη δημιουργία ενός Σύνθετου Δείκτη Επικινδυνότητας, ο οποίος συνδυάζει σταθμισμένα τέσσερις επιμέρους δείκτες: σοβαρότητας, ηλικιακού κινδύνου, τύπου σύγκρουσης και αιτίας. Η μεθοδολογία ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή χωρικών τεχνικών σε περιβάλλον GIS, όπως η ανάλυση συστάδων (cluster analysis) και ο εντοπισμός θερμών σημείων (hotspot analysis). Τα αποτελέσματα ανέδειξαν συγκεκριμένες «κρίσιμες» και «υψηλού κινδύνου» ζώνες, κυρίως στο κέντρο της πόλης και κατά μήκος των κύριων οδικών αρτηριών, παρέχοντας ένα πρακτικό εργαλείο για την ιεράρχηση στοχευμένων παρεμβάσεων βελτίωσης της οδικής ασφάλειας.

Λέξεις Κλειδιά: *Οδική Ασφάλεια, Αξιολόγηση Επικινδυνότητας, Τροχαία Ατυχήματα, Διασταυρώσεις, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), Πολυκριτηριακή Ανάλυση, Βόλος.*

MAPPING AND ANALYSIS OF HAZARDOUS INTERSECTIONS IN THE CITY OF VOLOS

Christos Koutsogakis & George Markou

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Eftychia Nathanael, Professor

Abstract

This diploma thesis aims to systematically assess the risk of road intersections in the city of Volos, Greece, in order to identify high-risk areas. For this purpose, a multi-criteria methodology was developed based on official data from 191 traffic accidents during the 2019-2023 period. The novelty of this research lies in the creation of a Comprehensive Risk Index, which combines four weighted sub-indices: severity, age-related risk, collision type, and cause. The methodology was complemented by the application of spatial techniques in a GIS environment, such as cluster analysis and hotspot analysis. The results revealed specific "critical" and "high-risk" zones, primarily located in the city center and along major arterial roads, providing a practical tool for prioritizing targeted interventions to improve road safety.

Keywords: *Road Safety, Risk Assessment, Traffic Accidents, Intersections, Geographic Information Systems (GIS), Multi-Criteria Analysis, Volos.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικοί ορισμοί και εννοιολογικό πλαίσιο	1
1.1.1	Οδική Ασφάλεια	1
1.1.2	Τροχαία Ατυχήματα	2
1.1.3	Επικίνδυνες Διασταυρώσεις	3
1.2	Κίνητρο και σημασία της έρευνας	3
1.2.1	Το Πρόβλημα των Τροχαίων Ατυχημάτων	3
1.2.2	Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις	4
1.2.3	Ανάγκη για Μελέτη σε τοπικό επίπεδο	5
1.3	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	7
1.3.1	Γενικός Σκοπός	7
1.3.2	Ειδικοί Στόχοι	7
1.4	Οργάνωση διπλωματικής εργασίας	7
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1	Θεωρητικό πλαίσιο οδικής ασφάλειας	9
2.1.1	Εξέλιξη των Θεωριών Οδικής Ασφάλειας	9
2.1.2	Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ «Ασφαλούς Συστήματος» (Safe System Approach)	11
2.1.3	Ανθρώπινος Παράγοντας vs Περιβαλλοντικοί Παράγοντες	13
2.2	Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά οδικών διασταυρώσεων	14
2.2.1	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	15
2.2.2	Ρυθμιστικά Μέτρα	17
2.2.3	Κυκλοφοριακά Χαρακτηριστικά	18
2.3	Παράγοντες κινδύνου στις διασταυρώσεις	20
2.3.1	Γεωμετρικοί Παράγοντες	20
2.3.2	Κυκλοφοριακοί Παράγοντες	22
2.3.3	Περιβαλλοντικοί Παράγοντες	23
2.3.4	Ανθρώπινοι Παράγοντες	25
2.4	Μέθοδοι αξιολόγησης επικινδυνότητας	27

2.4.1	Παραδοσιακές Μέθοδοι	27
2.4.2	Προληπτικές Μέθοδοι	29
2.4.3	Πολυκριτηριακές Μέθοδοι	29
2.4.4	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	32
2.5	Διεθνείς πρακτικές και μελέτες περιπτώσεων	33
2.5.1	Ευρωπαϊκές Πρακτικές	33
2.5.2	Ελληνικές Μελέτες	35
2.5.3	Καλές Πρακτικές Βελτίωσης	36
Κεφάλαιο 3 Περιοχή μελέτης – Πόλη του Βόλου		38
3.1	Γεωγραφικά και φυσικά χαρακτηριστικά	38
3.1.1	Γεωγραφική Θέση	38
3.1.2	Τοπογραφία και Κλίμα	39
3.1.3	Αστική Δομή	40
3.2	Δημογραφικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά	41
3.2.1	Πληθυσμιακά Στοιχεία	41
3.2.2	Οικονομικές Δραστηριότητες	42
3.3	Οδικό δίκτυο και κυκλοφοριακές συνθήκες	43
3.3.1	Ιεράρχηση Οδικού Δικτύου	43
3.3.2	Κύριες Αρτηρίες	44
3.3.3	Σημαντικές Διασταυρώσεις	45
3.3.4	Κυκλοφοριακές Παράμετροι	46
3.4	Υφιστάμενα προβλήματα οδικής ασφάλειας	47
3.4.1	Γενικά Προβλήματα	47
3.4.2	Υποδομή και Σήμανση	48
3.5	Θεσμικό πλαίσιο και αρμόδιοι φορείς	49
3.5.1	Αρμόδιοι Φορείς	49
3.5.2	Υφιστάμενα Σχέδια	50
3.5.3	Πόροι και Περιορισμοί	51
Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία		52
4.1	Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο	53
4.1.1	επιλογή μεθοδολογικής προσέγγισης	53
4.1.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	54

4.2	Προετοιμασία δεδομένων	56
4.2.1	ΠΗΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	56
4.2.2	Δομή και Περιεχόμενα Dataset	57
4.2.3	προεπεξεργασία dataset	58
4.2.4	Προετοιμασία Δεδομένων στο SPSS	59
4.3	Ανάπτυξη δεικτών επικινδυνότητας	60
4.3.1	Βασικός Δείκτης Σοβαρότητας (Severity Score)	60
4.3.2	Δείκτης Κινδύνου Ηλικιακών Ομάδων (Age Risk Score)	60
4.3.3	Δείκτης Κινδύνου Τύπου Σύγκρουσης (Collision Risk Score)	61
4.3.4	Δείκτης Κινδύνου Αιτίας Ατυχήματος (Cause Risk Score)	63
4.4	Σύνθετος Δείκτης Επικινδυνότητας (Comprehensive Risk Index)	64
4.4.1	Weighted Scoring System	64
4.4.2	Κατηγοριοποίηση Επικινδυνότητας	64
4.5	Στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση	65
4.5.1	Ανάλυση Συσχετίσεων (Correlation Analysis)	65
4.5.2	Principal Component Analysis (PCA)	66
4.5.3	Predictive Modeling	67
4.5.4	Decision Tree Analysis	68
4.6	Χωρική ανάλυση (Spatial analysis)	69
4.6.1	Cluster Analysis	69
4.6.2	Hotspot Analysis	70
4.6.3	Spatial Risk Assessment	71
4.7	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)	72
4.7.1	QGIS	73
4.7.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ	74
Κεφάλαιο 5	Αποτελέσματα	75
5.1	Περιγραφική στατιστική ανάλυση	75
5.1.1	Κατανομές Βασικών Μεταβλητών	76
5.1.2	Χαρακτηριστικά Τροχαίων Ατυχημάτων	78
5.2	Αποτελέσματα δεικτών επικινδυνότητας	80
5.2.1	Ανάλυση δεικτη σοβαροτητας	80
5.2.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΙΚΤΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΗΛΙΚΙΑΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ	81
5.2.3	ευρηματα δεικτη κινδυνου τυπου συγκρουσησ	82

5.2.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΙΚΤΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΙΤΙΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ	82
5.3	Αποτελέσματα Σύνθετου Δείκτη Επικινδυνότητας	83
5.3.1	Συνθετος δεικτησ επικινδυνοτητας	83
5.3.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	85
5.3.3	Σταθμισμένη εκτίμηση κινδύνου	86
5.4	Αποτελέσματα στατιστικών μοντέλων	86
5.4.1	αποτελεσματα pca	86
5.4.2	ΕΥΡΗΜΑΤΑ PREDICTIVE MODELING	87
5.5	Αποτελέσματα χωρικής ανάλυσης	89
5.6	Χαρτογράφηση αποτελεσμάτων σε GIS	90
5.6.1	Χαρτογραφηση επικινδυνοτητας	90
5.6.2	ΖΩΝΕΣ ΧΩΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	91
5.6.3	αναλυση χαρτη θερμοτητας	92
Κεφάλαιο 6	Συζήτηση και συμπεράσματα	94
6.1	Ερμηνεία αποτελεσμάτων	94
6.1.1	Βασικά Ευρήματα Επικινδυνότητας	94
6.1.2	Χωρική Κατανομή Κινδύνων	95
6.1.3	Αποτελεσματικότητα Μεθοδολογίας	95
6.2	Πρακτικές εφαρμογές	96
6.2.1	Προτεραιότητες Παρεμβάσεων	96
6.2.2	Συστάσεις για Τοπικές Αρχές	97
6.3	Περιορισμοί μελέτης	97
6.4	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	98
6.5	Τελικά συμπεράσματα	100

Βιβλιογραφία 102

Παράρτημα Α Error! Bookmark not defined.

Παράρτημα Β Error! Bookmark not defined.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Πίνακας συχνότητων τραυματισμών (πάνω) και θανάτων (κάτω) στο σύνολο των ατυχημάτων.....	79
Πίνακας 5.2: Διασταύρωση τραυματισμών και θανάτων σε ατυχήματα.....	80
Πίνακας 5.3: Πίνακας περιγραφικών στατιστικών του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας.....	83
Πίνακας 5.4: Πίνακας συσχετίσεων (Pearson) μεταξύ δεικτών επικινδυνότητας.....	84
Πίνακας 5.5: Κατανομή ατυχημάτων ανά ομάδα κινδύνου (Risk Group).....	85
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της PCA για την επεξήγηση της συνολικής διακύμανσης.....	87
Πίνακας 5.7: Πίνακας συνιστωσών από της PCA.....	87
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης με εξαρτημένη μεταβλητή τον δείκτη επικινδυνότητας.....	88
Πίνακας 5.9: Πίνακας μεταβλητών εκτός εξίσωσης στο λογιστικό μοντέλο.....	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 5.1: Η κατανομή των καιρικών συνθηκών την ώρα των ατυχημάτων.....	76
Σχήμα 5.2: Κατανομή τύπων σύγκρουσης στα καταγεγραμμένα ατυχήματα.....	77
Σχήμα 5.3: Κατανομή υλικών ζημιών στα ατυχήματα.	77
Σχήμα 5.4: Κατανομή ατυχημάτων ανά φύλο εμπλεκομένων.	78
Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα δείκτη σοβαρότητας (Severity Score) στα ατυχήματα.	81
Σχήμα 5.6: Αναπαράσταση του δείκτη Severity Score με stem-and-leaf plot.	81
Σχήμα 5.7: Απόφαση δέντρου (CHAID) για την ταξινόμηση των ομάδων κινδύνου.....	89
Σχήμα 5.8: Χωρική απεικόνιση συστάδων ατυχημάτων στην περιοχή μελέτης. Τα χρώματα και τα σχήματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά clusters επικινδυνότητας (QCL_1): πράσινο τρίγωνο = Cluster 1, κόκκινο ρόμβος = Cluster 2, μπλε κύκλος = Cluster 3, πορτοκαλί εξάγωνο = Cluster 4, γαλάζιο αστέρι = Cluster 5. Παρατηρείται συγκέντρωση περιστατικών υψηλού και κρίσιμου κινδύνου κυρίως σε κεντρικές οδικές αρτηρίες και κοντά στο παραλιακό μέτωπο.	91
Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή ζωνών επικινδυνότητας (Spatial Risk Zones). Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν επίπεδα κινδύνου: πράσινο = Χαμηλός (Zone 1), γαλάζιο = Μέτριος (Zone 2), κίτρινο = Αυξημένος (Zone 3), πορτοκαλί = Υψηλός (Zone 4), κόκκινο = Κρίσιμος (Zone 5). Η χαρτογράφηση αποκαλύπτει συστάδες υψηλού και κρίσιμου κινδύνου σε συγκεκριμένες διασταυρώσεις, ενώ οι χαμηλού κινδύνου περιοχές κατανέμονται πιο διάσπαρτα.	92
Σχήμα 5.10: Χάρτης θερμότητας που δείχνει τα σημεία με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση επικίνδυνων ατυχημάτων. Οι έντονες κόκκινες περιοχές υποδηλώνουν hotspots υψηλής επικινδυνότητας, κυρίως στο κέντρο της πόλης και κατά μήκος βασικών αρτηριών.....	93

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η οδική ασφάλεια αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ζωής και την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη των σύγχρονων αστικών κέντρων. Παρά τις σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των μεταφορών και της οδικής υποδομής, τα τροχαία ατυχήματα εξακολουθούν να αποτελούν μια από τις κυριότερες αιτίες τραυματισμών και θανάτων παγκοσμίως, ενώ παράλληλα επιβαρύνουν σημαντικά τα εθνικά συστήματα υγείας και την οικονομία. Στο πλαίσιο αυτό, οι οδικές διασταυρώσεις αναδεικνύονται ως κρίσιμα σημεία του αστικού οδικού δικτύου, καθώς συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των αστικών τροχαίων ατυχημάτων λόγω της πολυπλοκότητας των κυκλοφοριακών κινήσεων και των πιθανών σημείων σύγκρουσης που δημιουργούνται. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη συστηματική μελέτη και αξιολόγηση της επικινδυνότητας των διασταυρώσεων στην πόλη του Βόλου, με στόχο τον εντοπισμό των προβληματικών σημείων και τη διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων βελτίωσης της οδικής ασφάλειας σε τοπικό επίπεδο.

1.1 Γενικοί ορισμοί και εννοιολογικό πλαίσιο

Προκειμένου να κατανοηθεί πλήρως το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, κρίνεται απαραίτητος ο σαφής προσδιορισμός των βασικών εννοιών και όρων που διαπερνούν την έρευνα για την επικινδυνότητα των οδικών διασταυρώσεων.

1.1.1 ΟΔΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Η οδική ασφάλεια ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία το οδικό σύστημα λειτουργεί με τρόπο που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο τραυματισμού ή θανάτου των χρηστών του. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η οδική ασφάλεια περιλαμβάνει όλες τις πολιτικές, τα μέτρα και τις παρεμβάσεις που στοχεύουν στην πρόληψη των τροχαίων ατυχημάτων και στη μείωση των συνεπειών τους για την ανθρώπινη υγεία και την κοινωνία (World Health Organization, 2022).

Η σύγχρονη προσέγγιση της οδικής ασφάλειας βασίζεται στην αρχή του "ασφαλούς συστήματος" (safe system approach), η οποία αναγνωρίζει ότι οι άνθρωποι είναι επιρρεπείς σε λάθη και ότι το οδικό σύστημα πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο που να ανέχεται αυτά τα λάθη χωρίς καταστροφικές συνέπειες. Αυτή η φιλοσοφία εστιάζει σε πέντε βασικούς πυλώνες: ασφαλή οδική υποδομή, ασφαλή οχήματα, ασφαλείς ταχύτητες, ασφαλείς χρήστες και αποτελεσματική φροντίδα μετά το ατύχημα (TRL UK, 2024).

Στο αστικό περιβάλλον, η οδική ασφάλεια αποκτά ιδιαίτερη πολυπλοκότητα λόγω της συνύπαρξης διαφορετικών κατηγοριών χρηστών του δρόμου - οχημάτων, πεζών, ποδηλατών και χρηστών μέσων μαζικής μεταφοράς - σε περιορισμένο χώρο. Η αλληλεπίδραση αυτών των διαφορετικών ειδών κίνησης, σε συνδυασμό με την πυκνότητα της αστικής ανάπτυξης και την ποικιλία των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα, δημιουργεί ένα σύνθετο περιβάλλον όπου η διασφάλιση της ασφάλειας απαιτεί ολιστική προσέγγιση και συντονισμένες παρεμβάσεις τόσο σε επίπεδο υποδομής όσο και σε επίπεδο συμπεριφοράς.

1.1.2 ΤΡΟΧΑΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

Τα τροχαία ατυχήματα ορίζονται ως απρόβλεπτα συμβάντα που εμπλέκουν ένα ή περισσότερα οχήματα σε κίνηση στο οδικό δίκτυο και έχουν ως αποτέλεσμα υλικές ζημιές, τραυματισμούς ή θανάτους. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ένα τροχαίο ατύχημα χαρακτηρίζεται από την παρουσία τουλάχιστον ενός κινούμενου οχήματος, την εμπλοκή του οδικού δικτύου ως τόπου διεξαγωγής του συμβάντος, και την πρόκληση κάποιας μορφής βλάβης ή τραυματισμού.

Τα τροχαία ατυχήματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια. Ως προς τη σοβαρότητα των συνεπειών, διακρίνονται σε θανατηφόρα (με τουλάχιστον έναν θάνατο εντός 30 ημερών από το ατύχημα), ατυχήματα με σοβαρούς τραυματισμούς, ατυχήματα με ελαφρούς τραυματισμούς και ατυχήματα με μόνο υλικές ζημιές (American National Standards Institute, 2007). Ως προς τον τύπο της σύγκρουσης, τα ατυχήματα κατηγοριοποιούνται σε μετωπικές συγκρούσεις, πλευρικές συγκρούσεις, συγκρούσεις από πίσω, συγκρούσεις με σταθερά εμπόδια, ανατροπές οχημάτων και συγκρούσεις με πεζούς ή ποδηλάτες.

Τα αίτια των τροχαίων ατυχημάτων είναι πολυπαραγοντικά και συνήθως αποτελούν συνδυασμό ανθρώπινων, τεχνικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί την κυρίαρχη αιτία, συμβάλλοντας σε ποσοστό που κυμαίνεται από 85% έως 95% των ατυχημάτων, και περιλαμβάνει παραβάσεις του

κώδικα οδικής κυκλοφορίας, εσφαλμένες κρίσεις, μειωμένη προσοχή, κούραση, οδήγηση υπό επήρεια αλκοόλ ή ουσιών, καθώς και ανεπαρκή εκπαίδευση ή εμπειρία. Οι τεχνικοί παράγοντες αφορούν την κατάσταση του οχήματος, τη συντήρηση των μηχανικών μερών, την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ασφάλειας, ενώ οι περιβαλλοντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τις καιρικές συνθήκες, την κατάσταση του οδοστρώματος, τον φωτισμό, τη σήμανση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού.

1.1.3 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ

Οι επικίνδυνες διασταυρώσεις ορίζονται ως εκείνα τα σημεία του οδικού δικτύου όπου δύο ή περισσότερες οδοί τέμνονται και παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης τροχαίων ατυχημάτων ή επικίνδυνων καταστάσεων σε σχέση με άλλα τμήματα του δικτύου. Η επικινδυνότητα μιας διασταύρωσης αποτελεί σύνθετη έννοια που προκύπτει από την αλληλεπίδραση πολλαπλών παραγόντων και μπορεί να εκτιμηθεί τόσο μέσω ιστορικών δεδομένων ατυχημάτων όσο και μέσω προληπτικών μεθόδων αξιολόγησης (Federal Highway Administration, 2025).

Τα κριτήρια αξιολόγησης της επικινδυνότητας των διασταυρώσεων διακρίνονται σε ποσοτικά και ποιοτικά. Τα ποσοτικά κριτήρια περιλαμβάνουν τη συχνότητα των ατυχημάτων (αριθμός ατυχημάτων ανά χρονική περίοδο), το ποσοστό ατυχημάτων (αριθμός ατυχημάτων ανά εκατομμύριο διερχόμενων οχημάτων), τη σοβαρότητα των ατυχημάτων (αναλογία θανατηφόρων και σοβαρών τραυματισμών προς το συνολικό αριθμό ατυχημάτων), καθώς και δείκτες που συνδυάζουν συχνότητα και σοβαρότητα. Τα ποιοτικά κριτήρια εστιάζουν στα χαρακτηριστικά της διασταύρωσης που ενδέχεται να συμβάλλουν στην αύξηση του κινδύνου, όπως η ορατότητα, η γεωμετρία, η σήμανση, οι κυκλοφοριακές συνθήκες και η συμπεριφορά των οδηγών.

1.2 Κίνητρο και σημασία της έρευνας

Η κατανόηση των βασικών εννοιών της οδικής ασφάλειας και των χαρακτηριστικών των επικίνδυνων διασταυρώσεων αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο για την αναγνώριση της σπουδαιότητας που έχει η συστηματική μελέτη αυτού του φαινομένου, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο.

1.2.1 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΤΡΟΧΑΙΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Η οδική ασφάλεια αποτελεί θεμελιώδη προτεραιότητα για κάθε σύγχρονη κοινωνία, ιδίως σε περιοχές με αυξημένη κυκλοφοριακή ροή. Τα τροχαία ατυχήματα δεν

αποτελούν απλώς αριθμούς ή στατιστικές μεταβλητές, καθώς οι συνέπειές τους υπερβαίνουν το οικονομικό κόστος. Κάθε τέτοιο συμβάν επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη ζωή, προκαλώντας συχνά σωματικές και ψυχολογικές επιβαρύνσεις, ενώ ταυτόχρονα υποβαθμίζει την καθημερινότητα και τη συνολική ποιότητα ζωής των πολιτών.

Ειδικά στις πόλεις με αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο, όπως ο Βόλος, το πρόβλημα της οδικής ασφάλειας συνδέεται άμεσα με την πολεοδομική μορφή της πόλης, τον τρόπο σχεδιασμού των οδικών διασταυρώσεων και τη συμπεριφορά των οδηγών. Οι διασταυρώσεις, λόγω της φύσης τους ως σημεία όπου τέμνονται διαφορετικές πορείες οχημάτων και πεζών, αποτελούν κομβικά σημεία με αυξημένο κίνδυνο ατυχημάτων.

Η ανάγκη εντοπισμού των επικίνδυνων διασταυρώσεων, αυτών δηλαδή που παρουσιάζουν μεγαλύτερη συχνότητα τροχαίων ή εμπλοκών, δεν αποτελεί μόνο τεχνικό ζήτημα, αλλά και εργαλείο πρόληψης. Η συστηματική αποτύπωση τέτοιων σημείων στο οδικό δίκτυο μπορεί να αποκαλύψει τόσο ελλείψεις στην υποδομή, όπως ανεπαρκής φωτισμός ή προβληματική σήμανση, όσο και ζητήματα συμπεριφοράς, όπως ταχύτητες εκτός ορίων ή παραβιάσεις προτεραιότητας.

Η συγκεκριμένη εργασία προσεγγίζει το ζήτημα μέσα από την αποτύπωση της επικινδυνότητας στις διασταυρώσεις της πόλης του Βόλου, με στόχο την αναγνώριση των περιοχών που συγκεντρώνουν αυξημένο κυκλοφοριακό κίνδυνο. Η τεκμηριωμένη απεικόνιση αυτών των σημείων μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για μελλοντικές στοχευμένες παρεμβάσεις και να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στην περιοχή.

1.2.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Οι οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις των τροχαίων ατυχημάτων αποτελούν σημαντική επιβάρυνση τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο, δημιουργώντας ένα πολυδιάστατο πρόβλημα που υπερβαίνει τις άμεσες συνέπειες των ατυχημάτων για τους εμπλεκόμενους.

Σε οικονομικό επίπεδο, τα τροχαία ατυχήματα επιβαρύνουν σημαντικά την εθνική οικονομία. Μελέτες εκτιμούν ότι το κόστος των τροχαίων ατυχημάτων κυμαίνεται μεταξύ 1% και 4,6% του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (ΑΕΠ) μιας χώρας, με μέσο όρο περίπου 2,5-3,7% όταν συμπεριλαμβάνεται η απώλεια ποιότητας ζωής (Elvik, 2000). Στις χώρες υψηλού εισοδήματος, το κοινωνικό κόστος των τροχαίων ατυχημάτων κυμαίνεται από 1,0 έως 4,6% του ΑΕΠ με μέσο όρο 2,6%, ενώ στις χώρες χαμηλού και

μεσαίου εισοδήματος το ποσοστό κυμαίνεται από 1,2 έως 3,0% (Wijnen & Stipdonk, 2016).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι οικονομικές επιπτώσεις είναι εντυπωσιακές. Οι οδικοί τραυματισμοί προβλέπεται να κοστίσουν στην παγκόσμια οικονομία 1,8 τρισεκατομμύρια δολάρια για την περίοδο 2015-2030, που αντιστοιχεί σε ετήσιο φόρο 0,12% του παγκόσμιου ΑΕΠ (Chen et al., 2019). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του Μαυρίκιου, όπου μια αύξηση 1% στα τροχαία ατυχήματα οδηγεί σε μείωση 0,42% του πραγματικού ΑΕΠ (Tandrayen-Ragoobur, 2025).

Σε επιχειρηματικό επίπεδο, οι εταιρείες αντιμετωπίζουν αυξημένα κόστη λόγω αναπηρίας εργαζομένων, κινητικότητας προσωπικού και απώλειας παραγωγικότητας. Στην Πολωνία, τα κόστη για τις επιχειρήσεις από αναπηρίες εργαζομένων λόγω τροχαίων ατυχημάτων αυξήθηκαν από 1,1 εκατομμύρια PLN σε 1,6 εκατομμύρια PLN μεταξύ 2014-2019 (Jażdżik-Osmólska et al., 2024). Παράλληλα, τα ατυχήματα αυξάνουν τις δαπάνες υγειονομικής περίθαλψης και επιβαρύνουν τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και κοινωνικές υπηρεσίες σε τοπικό επίπεδο.

Οι κοινωνικές επιπτώσεις των τροχαίων ατυχημάτων είναι εξίσου σημαντικές και πολυδιάστατες. Τα ατυχήματα προκαλούν θανάτους και μακροχρόνιες αναπηρίες, επηρεάζοντας οικογένειες και κοινότητες, ενώ οι επιζώντες και οι οικογένειές τους συχνά αντιμετωπίζουν διαρκή συναισθηματικά και ψυχικά προβλήματα υγείας. Τα ατυχήματα μπορούν να οδηγήσουν στην απώλεια των οικογενειάρχων, αυξημένη φτώχεια και μειωμένη ποιότητα ζωής, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ghee et al., 1997).

Σε κοινοτικό επίπεδο, οι τοπικές κοινότητες επωμίζονται το βάρος της άμεσης ανταπόκρισης έκτακτης ανάγκης, της φροντίδας και των αναγκών κοινωνικής υποστήριξης. Επιπλέον, οι οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις που συνδέονται με τα τροχαία ατυχήματα περιλαμβάνουν αυξημένες υλικές ζημιές, απώλεια παραγωγικότητας και μείωση του τουρισμού.

Η αναγνώριση αυτών των πολυδιάστατων επιπτώσεων καθιστά σαφή την ανάγκη για αποτελεσματική πρόληψη και επένδυση στην οδική ασφάλεια, καθώς τα οφέλη από τέτοιες παρεμβάσεις μπορούν να είναι σημαντικά τόσο για την κοινωνία όσο και για την οικονομία.

1.2.3 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΤΟΠΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η μελέτη και αντιμετώπιση των τροχαίων ατυχημάτων σε τοπικό επίπεδο αποτελεί κρίσιμη ανάγκη, καθώς οι τοπικές συνθήκες, συμπεριφορές και υποδομές επηρεάζουν άμεσα τα ποσοστά ατυχημάτων και την αποτελεσματικότητα των

παρεμβάσεων ασφάλειας. Η προσαρμογή των στρατηγικών στις τοπικές ανάγκες μπορεί να μειώσει σημαντικά τους τραυματισμούς και τους θανάτους.

Κάθε κοινότητα χαρακτηρίζεται από ειδικές οδικές συνθήκες, κυκλοφοριακά πρότυπα και ευάλωτες ομάδες (όπως παιδιά, ηλικιωμένοι) που απαιτούν στοχευμένες λύσεις (Čabarkapa & Avramović, 2017). Οι εθνικές στρατηγικές ενδέχεται να μην αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά αυτούς τους μοναδικούς κινδύνους. Ο στόχος της διαχείρισης της οδικής ασφάλειας σε τοπικό επίπεδο είναι η μείωση των θανάτων και των σοβαρών τραυματισμών των συμμετεχόντων στην κυκλοφορία, ιδιαίτερα των ευάλωτων συμμετεχόντων όπως τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με μειωμένη κινητικότητα (Čabarkapa & Avramović, 2017).

Οι τοπικές μελέτες συμβάλλουν στην προσαρμογή των συστημάτων στους ανθρώπινους περιορισμούς, στοχεύοντας στη μείωση των σοβαρών τραυματισμών και θανάτων ακόμη και αν τα ατυχήματα δεν μπορούν να αποφευχθούν εντελώς (Goniewicz et al., 2016). Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της οδικής ασφάλειας, που εστιάζει στη μείωση του κινδύνου, την πρόληψη και τη βελτίωση της μετα-ατυχήματος ιατρικής φροντίδας, μπορεί να μειώσει τα θανατηφόρα ατυχήματα και τους σοβαρούς τραυματισμούς (Goniewicz et al., 2016).

Η αποτελεσματική κατανομή πόρων αποτελεί άλλον κρίσιμο παράγοντα. Οι τοπικές κυβερνήσεις συχνά διαθέτουν περιορισμένους προϋπολογισμούς και προσωπικό, καθιστώντας απαραίτητο τον εντοπισμό και την ιεράρχηση των πιο επικίνδυνων τύπων ατυχημάτων και τοποθεσιών για παρέμβαση (Makowsky & Stratmann, 2010; Subin et al., 2020). Για την επίτευξη φιλόδοξων στόχων μείωσης των θανάτων, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων των τοπικών κυβερνήσεων απαιτείται να καθορίσουν "στοχευμένα ατυχήματα", όπως έναν τύπο ατυχήματος που είχε τους περισσότερους θανάτους την προηγούμενη χρονιά, για να εστιάσουν στην εφαρμογή κατάλληλων στρατηγικών οδικής ασφάλειας για επικίνδυνες περιοχές (Subin et al., 2020).

Οι αποτελεσματικές τοπικές παρεμβάσεις βασίζονται σε προσεγγίσεις καθοδηγούμενες από δεδομένα. Η χρήση τοπικών δεδομένων ατυχημάτων και προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης (όπως μηχανική μάθηση, χωρο-χρονική ανάλυση) επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό περιοχών και χρόνων υψηλού κινδύνου, καθιστώντας δυνατά τα προληπτικά μέτρα (P. Cui et al., 2024; Hu et al., 2023). Ο αλγόριθμος Decision Tree προβλέπει αποτελεσματικά τη σοβαρότητα των τροχαίων ατυχημάτων και αναδεικνύει την ανάγκη για προληπτικές στρατηγικές όπως τακτικοί έλεγχοι οχημάτων και ενίσχυση της κυκλοφοριακής πολιτικής (Megnidio-Tchoukouegno & Adedeji, 2023).

1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η αναγνώριση της σπουδαιότητας του προβλήματος των τροχαίων ατυχημάτων και των σημαντικών οφελών που προκύπτουν από τη μελέτη της οδικής ασφάλειας σε τοπικό επίπεδο, καθιστά αναγκαίο τον σαφή προσδιορισμό των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

1.3.1 ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ

Αντικείμενο μελέτης αποτελεί η αξιολόγηση αυτών των σημείων με βάση μετρήσιμα στοιχεία και παρατηρήσεις πεδίου, ώστε να διαπιστωθεί σε ποιο βαθμό συγκεντρώνουν χαρακτηριστικά που ενδέχεται να αυξάνουν την πιθανότητα τροχαίων εμπλοκών ή ατυχημάτων.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση ειδικά διαμορφωμένους δείκτες και κριτήρια, τα οποία επιτρέπουν την κατάταξη των διασταυρώσεων ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητας που παρουσιάζουν. Στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος, οι καιρικές συνθήκες, η παραβίαση προτεραιότητας, η επάρκεια ορατότητας, η ποιότητα της σήμανσης, καθώς και κοινωνικά χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων, όπως η ηλικία και το φύλο.

1.3.2 ΕΙΔΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της παρούσας εργασίας επιδιώκεται να:

1. Επιλεγούν διασταυρώσεις στον Βόλο με χαρακτηριστικά που χρήζουν μελέτης,
2. Να καταγραφούν δεδομένα που σχετίζονται με την κυκλοφορία και τις υποδομές,
3. Να αναπτυχθεί σύστημα αξιολόγησης επικινδυνότητας,
4. Να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα σε χαρτογραφική μορφή,
5. Να προταθούν προτάσεις βελτίωσης της οδικής ασφάλειας, που αφορά τις διασταυρώσεις.

Επομένως τελικά, μέσω αυτής της μεθοδολογίας θα αναδειχθούν κρίσιμα ζητήματα του οδικού δικτύου που σχετίζονται άμεσα με την πρόληψη των τροχαίων ατυχημάτων. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τη στήριξη τεχνικών και κυκλοφοριακών παρεμβάσεων στον αστικό χώρο του Βόλου.

1.4 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική αλληλουχία με στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο, την εισαγωγή, τίθεται το θεωρητικό πλαίσιο της έρευνας. Παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της οδικής ασφάλειας και των επικίνδυνων διασταυρώσεων, αναλύεται το κίνητρο και η σημασία της μελέτης σε τοπικό επίπεδο και καθορίζονται ο γενικός σκοπός και οι ειδικοί στόχοι της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εξετάζεται η εξέλιξη των θεωριών οδικής ασφάλειας, ταξινομούνται οι οδικές διασταυρώσεις με βάση τα χαρακτηριστικά τους και αναλύονται οι κυριότεροι παράγοντες κινδύνου (γεωμετρικοί, κυκλοφοριακοί, περιβαλλοντικοί, ανθρώπινοι). Τέλος, παρουσιάζονται οι σύγχρονες μέθοδοι αξιολόγησης της επικινδυνότητας και παραδείγματα από διεθνείς πρακτικές.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης, η πόλη του Βόλου. Περιγράφονται τα γεωγραφικά, δημογραφικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά της, το οδικό δίκτυο και οι κυκλοφοριακές συνθήκες. Επιπλέον, εξετάζονται τα υφιστάμενα προβλήματα οδικής ασφάλειας και το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείρισή τους.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας. Περιγράφεται η πηγή και η προεπεξεργασία των δεδομένων, η ανάπτυξη των επιμέρους δεικτών κινδύνου (σοβαρότητας, ηλικιακών ομάδων, τύπου σύγκρουσης, αιτίας) και η σύνθεσή τους σε έναν ολοκληρωμένο δείκτη. Ακολουθεί η στατιστική και χωρική ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση προηγμένων τεχνικών και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας. Μέσω περιγραφικής στατιστικής, στατιστικών μοντέλων και θεματικών χαρτών, αναλύονται οι κατανομές των ατυχημάτων, εντοπίζονται οι περιοχές υψηλού κινδύνου (hotspots) και αξιολογείται η χωρική κατανομή της επικινδυνότητας στην πόλη του Βόλου.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η συζήτηση και τα συμπεράσματα. Ερμηνεύονται τα ευρήματα της ανάλυσης, συζητούνται οι πρακτικές εφαρμογές τους και διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης και παρεμβάσεων προς τις τοπικές αρχές. Η εργασία ολοκληρώνεται με την αναφορά στους περιορισμούς της μελέτης και με προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που ακολουθεί στοχεύει στη συστηματική παρουσίαση της επιστημονικής γνώσης και των ερευνητικών εξελίξεων που σχετίζονται με την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών διασταυρώσεων. Η κατανόηση των θεωρητικών προσεγγίσεων, των μεθοδολογικών εργαλείων και των διεθνών πρακτικών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής μελέτης αξιολόγησης της οδικής ασφάλειας στον αστικό χώρο. Το κεφάλαιο δομείται σε πέντε βασικές ενότητες που εξετάζουν διαδοχικά το θεωρητικό πλαίσιο της οδικής ασφάλειας, τα χαρακτηριστικά και την ταξινόμηση των διασταυρώσεων, τους παράγοντες κινδύνου, τις μεθόδους αξιολόγησης επικινδυνότητας, καθώς και τις διεθνείς πρακτικές και μελέτες περιπτώσεων. Η ανασκόπηση αυτή θα αποτελέσει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη διαμόρφωση της μεθοδολογίας και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας.

2.1 Θεωρητικό πλαίσιο οδικής ασφάλειας

Η εννοιολογική προσέγγιση της οδικής ασφάλειας έχει υποστεί σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, εξελισσόμενη από απλουστευμένες θεωρίες αιτιότητας σε πολύπλοκα συστημικά μοντέλα που αναγνωρίζουν την αλληλεπίδραση πολλαπλών παραγόντων στη δημιουργία των τροχαίων ατυχημάτων.

2.1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΘΕΩΡΙΩΝ ΟΔΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Η εξέλιξη των θεωρητικών προσεγγίσεων στην οδική ασφάλεια αποτελεί μια διαδικασία που εκτείνεται σε περισσότερες από πέντε δεκαετίες και χαρακτηρίζεται από τη σταδιακή μετάβαση από απλουστευμένες θεωρίες αιτιότητας σε πολύπλοκα συστημικά μοντέλα. Αυτή η θεωρητική εξέλιξη έχει επηρεάσει καθοριστικά τη σύγχρονη φιλοσοφία

σχεδιασμού διασταυρώσεων, οδηγώντας σε ριζικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε και αντιμετωπίζουμε τα ζητήματα οδικής ασφάλειας.

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις οδικής ασφάλειας βασίζονταν κυρίως στην εστίαση στον ανθρώπινο παράγοντα, αντιμετωπίζοντας τα τροχαία ατυχήματα ως αποτέλεσμα λαθών των οδηγών και ατομικής ευθύνης. Σύμφωνα με αυτές τις θεωρίες, η μείωση των ατυχημάτων θα επιτυγχανόταν κυρίως μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς των οδηγών και της αύξησης της ευαισθητοποίησής τους (A. Khan et al., 2016). Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των διασταυρώσεων επικεντρωνόταν πρωτίστως στον έλεγχο της κυκλοφορίας και την ελαχιστοποίηση των λαθών των οδηγών, χρησιμοποιώντας κυρίως φωτεινή σηματοδότηση, οδική σήμανση και μέτρα μείωσης σφαλμάτων (Namgung et al., 2020).

Ωστόσο, η αναγνώριση των περιορισμών αυτών των παραδοσιακών προσεγγίσεων οδήγησε στην ανάπτυξη σύγχρονων συστημικών και κοινωνικοτεχνικών παραδειγμάτων. Οι νέες θεωρίες, όπως το Safe System και η κοινωνικοτεχνική θεωρία συστημάτων, αναγνωρίζουν ότι η οδική ασφάλεια διαμορφώνεται από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων, οχημάτων, υποδομής και του ευρύτερου περιβάλλοντος (Cornelissen et al., 2015; Read et al., 2020). Αυτές οι προσεγγίσεις δίνουν έμφαση στον σχεδιασμό συστημάτων που συνυπολογίζουν τους ανθρώπινους περιορισμούς και προβλέπουν τα σφάλματα, αντί να αναμένουν τέλεια συμπεριφορά από τους χρήστες (Cornelissen et al., 2015).

Η μετάβαση από τις παραδοσιακές στις σύγχρονες θεωρίες έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη φιλοσοφία σχεδιασμού διασταυρώσεων. Ενώ οι παραδοσιακές διασταυρώσεις σχεδιάζονταν με τους οδηγούς ως κύρια εστία, συχνά παραμελώντας τις ανάγκες των πεζών, των ποδηλατών και άλλων ευάλωτων χρηστών (Read et al., 2020), οι σύγχρονοι σχεδιασμοί χρησιμοποιούν συστημικές μεθόδους, όπως η γνωσιακή ανάλυση εργασίας (cognitive work analysis), για την αξιολόγηση και βελτίωση των διασταυρώσεων για όλους τους χρήστες, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες και αλληλεπιδράσεις τους (Cornelissen et al., 2015).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα των σύγχρονων προσεγγίσεων περιλαμβάνουν τους κυκλικούς κόμβους, οι οποίοι μειώνουν τα σημεία σύγκρουσης και τις ταχύτητες των οχημάτων, βελτιώνοντας την ασφάλεια για όλους τους χρήστες (Aziz et al., 2025). Επιπλέον, η ανάπτυξη αυτο-επεξηγηματικών οδών (self-explaining roads) χρησιμοποιεί σχεδιαστικά στοιχεία για να καθοδηγήσει τη συμπεριφορά των χρηστών με διαισθητικό τρόπο, μειώνοντας την εξάρτηση από πινακίδες και σηματοδότηση (Yu et al., 2020). Παράλληλα, η ενσωμάτωση

τεχνολογίας, όπως η επικοινωνία οχήματος-υποδομής και η τεχνητή νοημοσύνη, επιτρέπει την προληπτική διαχείριση κινδύνων και την προσαρμογή σε πραγματικού χρόνου συνθήκες (He et al., 2018; Shahriar et al., 2023).

Συμπερασματικά, η εξέλιξη από τις θεωρίες εστιασμένες στον ανθρώπινο παράγοντα στις ολιστικές, συστημικές προσεγγίσεις οδικής ασφάλειας έχει μεταμορφώσει τον σχεδιασμό διασταυρώσεων. Οι σύγχρονες φιλοσοφίες ενσωματώνουν πλέον τη διαφορετικότητα των χρηστών, την τεχνολογία και την προληπτική διαχείριση κινδύνων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ασφαλέστερων και πιο συμπεριληπτικών διασταυρώσεων (Kathuria & Vedagiri, 2020; Read et al., 2020).

2.1.2 Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ «ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ» (SAFE SYSTEM APPROACH)

Η προσέγγιση του «ασφαλούς συστήματος» (Safe System Approach - SSA) αποτελεί ένα σύγχρονο πλαίσιο οδικής ασφάλειας που στοχεύει στη μηδενική θνησιμότητα και στους σοβαρούς τραυματισμούς μέσω του σχεδιασμού συστημάτων μεταφοράς που λαμβάνουν υπόψη τα ανθρώπινα λάθη και την ευπάθεια των χρηστών (M. N. Khan & Das, 2024). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις, το SSA μεταθέτει την ευθύνη από τους μεμονωμένους χρήστες του δρόμου στους σχεδιαστές και διαχειριστές του συστήματος, δίνοντας έμφαση στη συλλογική ευθύνη και την προληπτική διαχείριση κινδύνων, ιδιαίτερα στις διασταυρώσεις (Job et al., 2022).

Η θεμελιώδης αρχή του SSA είναι ο ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός, ο οποίος αναγνωρίζει ότι τα ανθρώπινα λάθη είναι αναπόφευκτα και σχεδιάζει συστήματα για την ελαχιστοποίηση των συνεπειών αυτών των σφαλμάτων. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στους ανθρώπινους περιορισμούς και τις ανοχές των φυσικών δυνάμεων στον σχεδιασμό των οχημάτων, του οδικού περιβάλλοντος και των ορίων ταχύτητας (Smart et al., 2010).

Η αρχή της συλλογικής ευθύνης αποτελεί έναν ακόμη πυλώνα του SSA, σύμφωνα με την οποία οι ιδιοκτήτες, οι διαχειριστές και οι χρήστες του συστήματος έχουν όλοι συγκεκριμένους ρόλους, αλλά η απόλυτη ευθύνη βαρύνει εκείνους που σχεδιάζουν και διαχειρίζονται το σύστημα. Ωστόσο, η αποτελεσματική υιοθέτηση της προσέγγισης SSA εμποδίζεται από διαφορετικές ερμηνείες της αρχής της συλλογικής ευθύνης και την εξάρτηση από χρήστες του δρόμου που αναγνωρίζονται ως επιρρεπείς σε λάθη (Job et al., 2022).

Οι συστημικές παρεμβάσεις αποτελούν τον πυρήνα της φιλοσοφίας του SSA, εστιάζοντας σε ασφαλείς δρόμους, ασφαλείς ταχύτητες, ασφαλή οχήματα, ασφαλείς χρήστες

του δρόμου και αποτελεσματική φροντίδα μετά τα ατυχήματα (Dunn et al., 2022; M. N. Khan & Das, 2024). Η προληπτική διαχείριση κινδύνων διαφοροποιεί το SSA από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις, καθώς εντοπίζει και αντιμετωπίζει τους κινδύνους πριν από την εκδήλωση των ατυχημάτων, αντί να αντιδρά στο ιστορικό των συγκρούσεων (Dunn et al., 2022; Montella et al., 2020).

Στον τομέα της ασφάλειας των διασταυρώσεων, το SSA χρησιμοποιεί εξειδικευμένα εργαλεία όπως το δείκτη ασφάλειας (Safety Index - SI) και τη μέθοδο ασφαλούς συστήματος για διασταυρώσεις (Safe System for Intersections - SSI) για την αξιολόγηση και κατάταξη των διασταυρώσεων βάσει παραγόντων κινδύνου όπως η έκθεση, η ταχύτητα και η πολυπλοκότητα των κινήσεων, και όχι μόνο βάσει των δεδομένων ατυχημάτων (Dunn et al., 2022; Montella et al., 2020).

Ένας σχεδιασμός δρόμων που μπορεί και «συγχωρεί» υλοποιείται μέσω χαρακτηριστικών όπως οι κυκλικοί κόμβοι, οι υπερυψωμένες πλατείες και η μείωση των σημείων σύγκρουσης για τη μείωση της σοβαρότητας και της πιθανότητας ατυχημάτων (Stokes et al., 2019). Η διαχείριση ταχύτητας βασίζεται στο τι μπορεί να αντέξει το ανθρώπινο σώμα σε μια σύγκρουση, ιδιαίτερα στις διασταυρώσεις όπου είναι συχνές οι σοβαρές γωνιώδεις συγκρούσεις (Dunn et al., 2022; M. N. Khan & Das, 2024).

Η προστασία των ευάλωτων χρηστών αποτελεί προτεραιότητα του SSA, με τον σχεδιασμό των διασταυρώσεων να στοχεύει στην προστασία των πεζών και των ποδηλατών, όχι μόνο των οχημάτων (M. N. Khan & Das, 2024; Montella et al., 2020).

Το SSA αντιμετωπίζει ειδικά τις προκλήσεις ασφάλειας των διασταυρώσεων μέσω της μείωσης των σημείων σύγκρουσης και της διαχείρισης της κινητικής ενέργειας για τη μείωση της σοβαρότητας των ατυχημάτων. Η αξιολόγηση της πολυπλοκότητας των κινήσεων και της έκθεσης των χρηστών επιτρέπει την ιεράρχηση των παρεμβάσεων, ενώ η ενσωμάτωση συστημικής αξιολόγησης κινδύνου, αντί της αποκλειστικής βασίλευσης στο ιστορικό ατυχημάτων, προσφέρει πιο προληπτική προσέγγιση (Dunn et al., 2022; Montella et al., 2020).

Η εμπειρική έρευνα στη Νορβηγία υποστηρίζει την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης SSA στη διαχείριση της οδικής ασφάλειας και πιθανότατα έχει συμβάλει σε μεγαλύτερη βελτίωση της οδικής ασφάλειας από ότι θα είχε συμβεί διαφορετικά (Elvik & Nævestad, 2023). Παρόλα αυτά, οι αντιλήψεις των οδηγών για την ασφάλεια είναι μεγαλύτερες με τη χρήση κυκλικών κόμβων, αλλά μειώνονται με λιγότερο γνωστούς σχεδιασμούς που ευθυγραμμίζονται με το SSA, όπως οι υπερυψωμένες πλατείες (Stokes et al., 2019).

Συμπερασματικά, το SSA αντιπροσωπεύει μια παραδειγματική αλλαγή στην οδική ασφάλεια, ιδιαίτερα στις διασταυρώσεις, μέσω της προληπτικής διαχείρισης κινδύνων, του σχεδιασμού συγχωρητικών περιβαλλόντων και της έμφασης στην ευθύνη σε επίπεδο συστήματος (EHSANI et al., 2023). Αυτό οδηγεί σε πιο αποτελεσματικά και δίκαια αποτελέσματα ασφάλειας από τις παραδοσιακές μεθόδους που εστιάζουν στον χρήστη.

2.1.3 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ VS ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις οδικής ασφάλειας στις διασταυρώσεις επιδιώκουν την εξισορρόπηση μεταξύ των ανθρώπινων παραγόντων, όπως η συμπεριφορά των οδηγών και των πεζών, και των περιβαλλοντικών ή υποδομικών παραγόντων, όπως ο σχεδιασμός του δρόμου και η σήμανση. Η τρέχουσα έρευνα αποκαλύπτει ότι τόσο οι συμπεριφορικές παρεμβάσεις όσο και οι βελτιώσεις υποδομής είναι σημαντικές, αλλά η σχετική τους επίδραση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το πλαίσιο και τον τύπο του χρήστη του δρόμου (Lin et al., 2022; J. Wang et al., 2022).

Οι ανθρώπινοι παράγοντες, όπως οι επικίνδυνες συμπεριφορές οδήγησης ή ποδηλασίας και η κατανομή προσοχής, αποτελούν συχνά τους πιο άμεσους συντελεστές των συγκρούσεων και ατυχημάτων στις διασταυρώσεις. Οι επικίνδυνες συμπεριφορές, όπως η παραβίαση της σηματοδότησης ή η εισβολή στον χώρο των οχημάτων, αποτελούν ισχυρούς προγνωστικούς δείκτες σοβαρών περιστατικών, ιδιαίτερα μεταξύ ποδηλατών και πεζών (Wang et al., 2022). Η έρευνα των Kludt et al. (2006) επισημαίνει την κρισιμότητα των ανθρώπινων παραγόντων στον σχεδιασμό διασταυρώσεων και τη συμπεριφορά των οδηγών, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένη κατανόηση αυτών των παραγόντων.

Η κατανομή της προσοχής των πεζών κατά τη διάσχιση των δρόμων αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο ανθρώπινο παράγοντα που επηρεάζει την ασφάλεια των διασταυρώσεων (Mao et al., 2024). Οι βιολογικοί, ψυχολογικοί και πολιτισμικοί παράγοντες πρέπει να εξετάζονται ολιστικά για την αποτελεσματική αύξηση της ευαισθητοποίησης για την ασφάλεια, όπως υποδεικνύει η θεωρία της ανθρώπινης οικολογίας.

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως το πλάτος του δρόμου, ο αριθμός των λωρίδων, η παρουσία καταστημάτων ή πρατηρίων καυσίμων, ο τύπος διάβασης πεζών και τα συστήματα προειδοποίησης, επηρεάζουν την ασφάλεια τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Η μελέτη του Lin et al. (2022) καταδεικνύει ότι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως το πλάτος του δρόμου και ο

αριθμός των λωρίδων, επηρεάζουν σημαντικά τον κίνδυνο τροχαίων ατυχημάτων σε τριπλές διασταυρώσεις στην Ταϊβάν.

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να διαμορφώσουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι συμπεριφέρονται στις διασταυρώσεις, καθιστώντας τους χρήστες πιο προσεκτικούς εάν οι συνθήκες φαίνονται επικίνδυνες. Σύμφωνα με τη μελέτη των Mao et al. (2024), οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως ο τύπος γης, ο τύπος διάβασης πεζών και τα συστήματα προειδοποίησης πεζών, επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή της προσοχής των πεζών κατά τις διασχίσεις δρόμων.

Οι συμπεριφορικές παρεμβάσεις, οι οποίες στοχεύουν στις επικίνδυνες συμπεριφορές μέσω εκπαίδευσης, επιβολής και εκστρατειών ευαισθητοποίησης, είναι πιο αποτελεσματικές για την άμεση μείωση του κινδύνου, ιδιαίτερα για ποδηλάτες και πεζούς (Wang et al., 2022). Η έρευνα καταδεικνύει ότι οι συμπεριφορικές παρεμβάσεις είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των άμεσων κινδύνων, ιδιαίτερα όπου τα ανθρώπινα λάθη ή οι επικίνδυνες επιλογές είναι συχνές (Wang et al., 2022).

Από την άλλη πλευρά, οι βελτιώσεις υποδομής που τροποποιούν το περιβάλλον μέσω σχεδιασμού δρόμων, σήμανσης, συστημάτων προειδοποίησης και διαβάσεων πεζών, είναι απαραίτητες για τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια και μπορούν έμμεσα να μειώσουν τις επικίνδυνες συμπεριφορές. Οι βελτιώσεις υποδομής παρέχουν ένα θεμελιώδες επίπεδο ασφάλειας και μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα επικίνδυνων συμπεριφορών καθιστώντας τις διασταυρώσεις πιο διαισθητικές και συγχωρητικές (Lin et al., 2022; Mao et al., 2024).

Η σύγχρονη έρευνα υπογραμμίζει ότι οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές ασφάλειας διασταυρώσεων συνδυάζουν και τις δύο προσεγγίσεις: αλλαγές υποδομής για τη μείωση των κινδύνων και συμπεριφορικά προγράμματα για την αντιμετώπιση των επικίνδυνων ενεργειών. Οι φιλικόι προς τον χρήστη σχεδιασμοί και τα καλά τοποθετημένα συστήματα προειδοποίησης μπορούν να καθοδηγήσουν την προσοχή και να μειώσουν τα σφάλματα, ενώ η εκπαίδευση και η επιβολή στοχεύουν στις επίμονες επικίνδυνες συμπεριφορές (Wang et al., 2022; Mao et al., 2024).

2.2 Ταξινόμηση και χαρακτηριστικά οδικών διασταυρώσεων

Έχοντας εξετάσει το θεωρητικό πλαίσιο που διέπει τη σύγχρονη αντίληψη της οδικής ασφάλειας και την εξισορρόπηση μεταξύ ανθρώπινων και περιβαλλοντικών παραγόντων, κρίνεται απαραίτητη η εις βάθος ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών και των

λειτουργικών ιδιοτήτων των διασταυρώσεων, προκειμένου να κατανοηθεί πώς αυτά τα στοιχεία επηρεάζουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα του οδικού δικτύου.

2.2.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διασταυρώσεων αποτελούν θεμελιώδεις παραμέτρους που καθορίζουν τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια του οδικού δικτύου. Οι διαφορετικοί τύποι διασταυρώσεων – όπως οι διασταυρώσεις τύπου T, οι τετράπλευρες διασταυρώσεις, οι διασταυρώσεις τύπου Y και οι κυκλικοί κόμβοι – ορίζονται από τα ιδιαίτερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις ροές κυκλοφορίας και την επίδοση ασφάλειας.

2.2.1.1 Διασταυρώσεις τύπου T

Οι διασταυρώσεις τύπου T χαρακτηρίζονται από τρία σκέλη, συνήθως με έναν κύριο και έναν δευτερεύοντα δρόμο (Himes et al., 2018). Τα βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν το πλάτος προσέγγισης, την απόσταση ορατότητας και τις ακτίνες στροφής. Η επαρκής απόσταση ορατότητας διασταύρωσης (Intersection Sight Distance - ISD) είναι κρίσιμη για την ασφάλεια, καθώς μικρότερες αποστάσεις ISD αυξάνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων, ιδιαίτερα σε υψηλότερες ταχύτητες και όγκους κυκλοφορίας. Η μελέτη των Himes et al. (2018) καταδεικνύει ότι η αύξηση της απόστασης ορατότητας διασταύρωσης μειώνει τον αναμενόμενο αριθμό στοχευμένων ατυχημάτων σε μη σηματοδοτημένες διασταυρώσεις, με μεγαλύτερα οφέλη ασφάλειας όταν η ISD είναι μικρότερη.

2.2.1.2 Τετράπλευρες διασταυρώσεις

Οι τετράπλευρες διασταυρώσεις αποτελούνται από τέσσερα σκέλη και συχνά είναι σηματοδοτημένες. Σημαντικοί παράγοντες είναι το μέγεθος της διασταύρωσης, ο αριθμός των λωρίδων, το μήκος της διάβασης πεζών, η απόσταση υποχώρησης και η παρουσία νησίδων ή κοινόχρηστων λωρίδων (Khattak et al., 2020). Οι μεγαλύτερες και πιο πολύπλοκες διασταυρώσεις μπορούν να αυξήσουν τα σημεία σύγκρουσης και τον κίνδυνο ατυχημάτων, ενώ οι συμπαγείς σχεδιασμοί μειώνουν τον κίνδυνο σύγκρουσης (F. Guo et al., 2010). Η έρευνα των Shiomí et al. (2017) επιβεβαιώνει ότι το μέγεθος της διασταύρωσης, το μήκος της διάβασης πεζών και η απόσταση υποχώρησης επηρεάζουν σημαντικά τον κίνδυνο τροχαίων ατυχημάτων, με τις συμπαγείς διασταυρώσεις να μειώνουν τον κίνδυνο όλων των τύπων συγκρούσεων.

2.2.1.3 Διασταυρώσεις τύπου Υ

Οι διασταυρώσεις τύπου Υ αποτελούνται από τρία σκέλη που συναντώνται σε οξείες γωνίες. Η λοξότητα (γωνία μεταξύ των δρόμων) μπορεί να μειώσει την ορατότητα και να αυξήσει την πιθανότητα ατυχημάτων. Η κατάλληλη διοχέτευση και η σαφής σήμανση είναι σημαντικές για την ασφάλεια. Η μελέτη των Khattak et al. (2020) υπογραμμίζει την ανάγκη ιδιαίτερης προσοχής στη λοξότητα της διασταύρωσης, καθώς υψηλή λοξότητα συσχετίζεται με κακή ορατότητα και περισσότερα ατυχήματα.

2.2.1.4 Κυκλικοί κόμβοι

Οι κυκλικοί κόμβοι χαρακτηρίζονται από κυκλική διάταξη με κεντρική νησίδα (Demir & Demir, 2020). Τα βασικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν το πλάτος εισόδου/εξόδου, τη διάμετρο της νησίδας και τη γωνία εκτροπής. Οι κυκλικοί κόμβοι μειώνουν τα σημεία σύγκρουσης, μειώνουν τις ταχύτητες και γενικά βελτιώνουν την ασφάλεια και τη ροή κυκλοφορίας σε σύγκριση με τις σηματοδοτημένες διασταυρώσεις. Η συγκριτική μελέτη των Demir & Demir (2020) καταδεικνύει ότι οι σύγχρονοι κυκλικοί κόμβοι εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση ροής κυκλοφορίας από τις σηματοδοτημένες διασταυρώσεις, αυξάνοντας τη χωρητικότητα, μειώνοντας την καθυστέρηση και μειώνοντας τις ουρές αναμονής.

2.2.1.5 Επίδραση στη ροή κυκλοφορίας και την ασφάλεια

Οι συμπαγείς διασταυρώσεις και οι κυκλικοί κόμβοι γενικά μειώνουν τις καθυστερήσεις και τον κίνδυνο ατυχημάτων ελαχιστοποιώντας τα σημεία σύγκρουσης και ελέγχοντας τις ταχύτητες. Οι ευρύτερες προσεγγίσεις και περισσότερες λωρίδες μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα αλλά ενδέχεται επίσης να αυξήσουν τη συχνότητα ατυχημάτων εάν δεν διαχειριστούν με κατάλληλα μέτρα ελέγχου (F. Guo et al., 2010; Shiomi et al., 2017).

Η απόσταση ορατότητας είναι κρίσιμη για όλους τους τύπους διασταυρώσεων, καθώς περιορισμένη ορατότητα αυξάνει τον κίνδυνο ατυχημάτων, ιδιαίτερα για τις κινήσεις στροφής (Himes et al., 2018). Ειδικό σχεδιασμοί όπως οι διασταυρώσεις συνεχούς ροής (Continuous Flow Intersections - CFIs) μπορούν να βελτιώσουν τη χωρητικότητα και να μειώσουν τις συγκρούσεις αριστερής στροφής, αλλά ενδέχεται να εισαγάγουν νέες προκλήσεις ασφάλειας εάν δεν σχεδιαστούν προσεκτικά (Carroll & Lahusen, 2013; Chuco et al., 2020).

Οι γεωμετρικοί παράγοντες, όπως το πλάτος του δρόμου, η κλίση και η ακτίνα στροφής, επηρεάζουν σημαντικά τον ρυθμό κορεσμού ροής σε σηματοδοτημένες διασταυρώσεις υπό ετερογενείς κυκλοφοριακές συνθήκες. Επιπλέον, η κατάσταση του οδοστρώματος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά στις σηματοδοτημένες διασταυρώσεις επηρεάζουν τα ατυχήματα με θύματα, με την επανεπιφανείωση να μειώνει σημαντικά τη συχνότητα και τα επίπεδα σοβαρότητας των ατυχημάτων (Hussein et al., 2021).

Συμπερασματικά, ο γεωμετρικός σχεδιασμός των διασταυρώσεων – όπως το μέγεθος, η διαμόρφωση λωρίδων, η απόσταση ορατότητας και η διάταξη – επηρεάζει έντονα τόσο την αποτελεσματικότητα της ροής κυκλοφορίας όσο και την ασφάλεια. Οι συμπαγείς, καλά σχεδιασμένες διασταυρώσεις και οι κυκλικοί κόμβοι τείνουν να προσφέρουν την καλύτερη εξισορρόπηση ομαλής κίνησης κυκλοφορίας και μειωμένου κινδύνου ατυχημάτων.

2.2.2 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ

Τα ρυθμιστικά μέτρα κυκλοφορίας αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την ασφάλεια και τη λειτουργική αποτελεσματικότητα των διασταυρώσεων. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ελέγχου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της διασταύρωσης, τον όγκο κυκλοφορίας, τη σύνθεση των οχημάτων και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Τα συστήματα φωτεινής σηματοδότησης διακρίνονται σε σταθερά και προσαρμοστικά, με τα δεύτερα να παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα προσαρμοστικά σήματα που χρησιμοποιούν δεδομένα πραγματικού χρόνου και ενισχυτική μάθηση μειώνουν τις καθυστερήσεις, τις συγκρούσεις και τους κινδύνους ατυχημάτων πιο αποτελεσματικά από τα σήματα σταθερού χρονισμού, ιδιαίτερα σε μεικτή κυκλοφορία (ανθρώπινα και αυτοματοποιημένα οχήματα) και σενάρια αυξημένης κυκλοφορίας.

Η έρευνα των Zhang et al. (2024) καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσαρμοστικού ελέγχου σηματοδότησης επιτυγχάνει περισσότερο από 16% μείωση των κυκλοφοριακών συγκρούσεων και 4% μείωση των εκπομπών άνθρακα στις διασταυρώσεις. Παράλληλα, ο αλγόριθμος πολλαπλού στόχου ενισχυτικής μάθησης των Gong et al. (2020) βελτιώνει τόσο την κυκλοφοριακή αποτελεσματικότητα όσο και την ασφάλεια σε διασταυρώσεις με προσαρμοστικό έλεγχο σηματοδότησης.

Τα σήματα STOP και προτεραιότητας είναι γενικά κατάλληλα για διασταυρώσεις χαμηλής κυκλοφορίας ή απλής γεωμετρίας, αλλά μπορούν να αυξήσουν τις καθυστερήσεις και τον κίνδυνο ατυχημάτων καθώς αυξάνεται ο όγκος κυκλοφορίας, λόγω λιγότερο δυναμικού

ελέγχου και υψηλότερου δυναμικού για λάθη οδηγών (J. Wang et al., 2021). Τα συστήματα προτεραιότητας είναι αποτελεσματικά για συγκεκριμένα σενάρια, όπως η προτεραιότητα οχημάτων έκτακτης ανάγκης ή δρόμους χαμηλού όγκου, αλλά είναι λιγότερο προσαρμόσιμα σε διακυμαινόμενη κυκλοφορία και πολύπλοκες διατάξεις διασταυρώσεων (J. Wang et al., 2021).

Η πολυπλοκότητα της διασταύρωσης, με περισσότερες προσεγγίσεις ή ακανόνιστες διατάξεις, ωφελείται από δυναμικό, βασισμένο σε δεδομένα έλεγχο (Long et al., 2020; Wei et al., 2022). Οι περιβαλλοντικοί και εξωτερικοί παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η δραστηριότητα πεζών και τα περιστατικά πραγματικού χρόνου, μπορούν να επηρεάσουν τον βέλτιστο χρονισμό και την επιλογή ελέγχου (Long et al., 2020; A. Novikov et al., 2019).

Η ενσωματωμένη βελτιστοποίηση σηματοδότησης και τροχιάς οχημάτων αποτελεί μια προηγμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την ασφάλεια κατά την αλλαγή σήματος. Η έρευνα των Long et al. (2020) δείχνει ότι αυτή η ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση βελτιώνει την αποτελεσματικότητα διασταύρωσης, την ασφάλεια οχημάτων κατά την αλλαγή σήματος και την απόδοση κατανάλωσης καυσίμου κατά 24,9% και 5,5% αντίστοιχα.

Η ανάπτυξη προσεγγίσεων για τη διασφάλιση της ασφάλειας οδικής κυκλοφορίας σε ελεγχόμενες διασταυρώσεις μειώνει το ποσοστό ατυχημάτων και τις καθυστερήσεις οχημάτων στις προσεγγίσεις, βελτιώνοντας την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα στα μέτρα ελέγχου κυκλοφορίας (Novikov et al., 2019).

2.2.3 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά αποτελούν κεντρικό παράγοντα στην επίδοση και την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Παράμετροι όπως ο όγκος κυκλοφορίας, η σύνθεση των οχημάτων και τα προφίλ ταχύτητας αλληλεπιδρούν με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού και τα συστήματα ελέγχου, επηρεάζοντας τόσο τη συμφόρηση όσο και τον κίνδυνο ατυχημάτων.

Ο όγκος κυκλοφορίας συνδέεται στενά με την αύξηση των ποσοστών ατυχημάτων και των κυκλοφοριακών συγκρούσεων, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής ή όταν συνδυάζεται με μεγάλες ουρές αναμονής και κυματισμούς κρούσης στη σηματοδότηση. Η έρευνα των Y. Guo et al. (2020) καταδεικνύει ότι υψηλότερα ποσοστά συγκρούσεων συσχετίζονται με διάφορα κύματα ακινητοποίησης όταν το φανάρι γίνεται κόκκινο και υψηλότερο όγκο κυκλοφορίας,

ενώ χαμηλότερα ποσοστά συγκρούσεων σχετίζονται με φαρδύτερες οδικές λωρίδες (ή/και καλύτερου χρονισμού σηματοδότησης).

Η μελέτη των Yuan & Abdel-Aty (2018) επιβεβαιώνει ότι η εμφάνιση ατυχημάτων σε σηματοδοτημένες διασταυρώσεις επηρεάζεται σημαντικά από κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά όπως ο όγκος κυκλοφορίας, ο όγκος στροφών και τις μεγάλες «ουρές», καθώς και από τον χρονισμό σήματος και τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η καθυστέρηση έχει σημαντική επίδραση στα ποσοστά τροχαίων ατυχημάτων των διασταυρώσεων, με παράγοντες όπως ο λογάριθμος της ετήσιας μέσης ημερήσιας κυκλοφορίας να συσχετίζεται θετικά με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων (Mhana et al., 2020).

Η σύνθεση των οχημάτων παίζει καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια των διασταυρώσεων. Ένα υψηλότερο ποσοστό βαρέων οχημάτων (φορτηγά, λεωφορεία) αυξάνει τα ποσοστά ατυχημάτων, ιδιαίτερα τόσο στις κύριες όσο και στις δευτερεύουσες προσεγγίσεις (Mustakim et al., 2024). Η έρευνα των Mhana et al. (2020) αποκαλύπτει ότι το ποσοστό βαρέων οχημάτων συσχετίζεται θετικά με περισσότερα ποσοστά ατυχημάτων.

Η ηλικία και η εμπειρία των οδηγών επηρεάζουν επίσης τον κίνδυνο, με λιγότερο έμπειρους ή μεγαλύτερους σε ηλικία οδηγούς να συμβάλλουν σε υψηλότερα ποσοστά συγκρούσεων. Η μελέτη των Ulak et al. (2019) καταδεικνύει ότι διαφορετικές ηλικίες και εμπειρία οδηγών επηρεάζουν σημαντικά τα μέτρα κυκλοφοριακής ασφάλειας και επίδοσης, με την προτεινόμενη προσέγγιση να προσομοιώνει αποτελεσματικά τα πραγματικά σημεία σύγκρουσης ατυχημάτων.

Οι χαμηλότερες μέσες ταχύτητες στις εισόδους διασταυρώσεων συσχετίζονται με μειωμένο κίνδυνο ατυχημάτων, ενώ οι ακανόνιστες αλλαγές ταχύτητας (π.χ., ξαφνική επιβράδυνση) μπορούν να αυξήσουν τις συγκρούσεις, ιδιαίτερα κατά τις αλλαγές σήματος. Η έρευνα των Essa & Sayed (2019) αποκαλύπτει ότι η υψηλότερη συχνότητα και σοβαρότητα συγκρούσεων παρατηρείται στην αρχή του πράσινου χρόνου σε σηματοδοτημένες διασταυρώσεις.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού, όπως η διοχέτευση, το πλάτος λωρίδας και η απόσταση ορατότητας, μπορούν να μετριάσουν ή να επιδεινώσουν τις επιπτώσεις του υψηλού όγκου και των πολύπλοκων μιγμάτων οχημάτων. Η διοχέτευση, για παράδειγμα, βελτιώνει την ασφάλεια για οχήματα που στρίβουν δεξιά σε μη σηματοδοτημένες διασταυρώσεις. Η μελέτη των Mustakim et al. (2024) καταδεικνύει ότι οι μη σηματοδοτημένες

διασταυρώσεις με υποδομή ασφάλειας είναι ασφαλέστερες για τα μηχανοκίνητα οχήματα που στρίβουν δεξιά σε σύγκριση με εκείνες χωρίς υποδομή ασφάλειας.

Ο χρονισμός σήματος και ο έλεγχος παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση των κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών. Ο προσαρμοστικός χρονισμός σήματος (π.χ., μεγαλύτεροι χρόνοι πρασίνου, φάσεις αριστερής στροφής) μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ατυχημάτων εξομαλύνοντας τη ροή κυκλοφορίας και μειώνοντας το μήκος των ουρών (Yuan et al., 2018; Essa et al., 2019). Κακώς χρονομετρημένα σήματα ή ανεπαρκείς φάσεις πρασίνου αυξάνουν τις καθυστερήσεις και τις συγκρούσεις, ιδιαίτερα για τις κινήσεις στροφής (Yuan et al., 2018; Mhana et al., 2020).

2.3 Παράγοντες κινδύνου στις διασταυρώσεις

Αφού εξετάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη μορφολογία και τη λειτουργικότητα των διασταυρώσεων, καθίσταται αναγκαία η εις βάθος ανάλυση των συγκεκριμένων παραγόντων κινδύνου που συμβάλλουν στην εκδήλωση τροχαίων ατυχημάτων, προκειμένου να κατανοηθεί πώς οι γεωμετρικοί, κυκλοφοριακοί, περιβαλλοντικοί και ανθρώπινοι παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν την ασφάλεια στις διασταυρώσεις.

2.3.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι γεωμετρικοί παράγοντες κινδύνου στις διασταυρώσεις – όπως οι γωνίες διασταύρωσης, οι ακτίνες στροφής, η απόσταση ορατότητας και η ευθυγράμμιση των προσεγγίσεων – παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκδήλωση ατυχημάτων. Ο κακός γεωμετρικός σχεδιασμός, όπως οι οξείες γωνίες, η μειωμένη ορατότητα και πλατιές λωρίδες, αυξάνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων, ενώ τα στοχευμένα σχεδιασμένα γεωμετρικά πρότυπα και οι επανασχεδιασμοί μπορούν να μειώσουν σημαντικά αυτούς τους κινδύνους (Álvarez et al., 2020).

Οι οξείες (αιχμηρές) γωνίες διασταύρωσης συνδέονται με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων λόγω περιορισμένης ορατότητας και πιο πολύπλοκων ελιγμών οχημάτων. Η έρευνα των Keramati et al. (2020) επιβεβαιώνει ότι οι γεωμετρικές παράμετροι, συμπεριλαμβανομένης της οξείας γωνίας διασταύρωσης, του αριθμού των γραμμών και της απόστασης οδοστρώματος, επηρεάζουν σημαντικά την εμφάνιση ατυχημάτων και τα επίπεδα σοβαρότητας στις διασταυρώσεις αυτοκινητοδρόμων-σιδηροδρόμων.

Αντίθετα, οι ορθογώνιες διασταυρώσεις (90°) μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων παρέχοντας καλύτερη ορατότητα και απλούστερες διαδρομές οχημάτων (Álvarez et al., 2020). Η βέλτιστη γεωμετρική διαμόρφωση με ορθές γωνίες διασταύρωσης αποτελεί ένα από τα πιο αποτελεσματικά πρότυπα σχεδιασμού για τη μείωση του κινδύνου ατυχημάτων.

Οι μικρές ακτίνες στροφής μπορούν να αυξήσουν την πιθανότητα ατυχημάτων εκτροπής, ιδιαίτερα για μεγαλύτερα οχήματα, ενώ οι υπερβολικά μεγάλες ακτίνες ενδέχεται να ενθαρρύνουν υψηλότερες ταχύτητες και πιο επικίνδυνες στροφές (Jima & Sipos, 2022).

Η εξισορρόπηση μεταξύ ευελιξίας και ελέγχου ταχύτητας απαιτεί επαρκείς ακτίνες στροφής που δεν είναι ούτε πολύ μικρές ούτε πολύ μεγάλες, προκειμένου να διατηρείται η ασφάλεια χωρίς να εμποδίζεται η λειτουργικότητα (Jima & Sipos, 2022).

Η ανεπαρκής απόσταση ορατότητας στις διασταυρώσεις αποτελεί σημαντικό συντελεστή ατυχημάτων, καθώς περιορίζει την ικανότητα των οδηγών να εντοπίσουν και να αντιδράσουν στους κινδύνους εγκαίρως (Jima et al., 2022; Keramati et al., 2020). Η έρευνα των Jima et al. (2022) αναφέρει ότι η ακατάλληλη χρήση σήμανσης οδικής κυκλοφορίας, η κατάσταση του οδοστρώματος και τα προβλήματα απόστασης ορατότητας στάσης αποτελούν πρωταρχικούς λόγους για τα τροχαία ατυχήματα στις διασταυρώσεις.

Οι οριζόντιες καμπύλες κοντά σε διασταυρώσεις συνδέονται έντονα με υψηλότερη σοβαρότητα ατυχημάτων, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με κακή απόσταση ορατότητας ή ανεπαρκή σήμανση (Jima et al., 2022). Η βελτίωση της απόστασης ορατότητας μέσω κατάλληλου σχεδιασμού και αφαίρεσης εμποδίων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μείωση της συχνότητας ατυχημάτων.

Οι διασταυρώσεις με δύο ή περισσότερες λωρίδες ανά κατεύθυνση και πλατιές λωρίδες ($>3,75\text{m}$) έχουν σημαντικά υψηλότερες πιθανότητες ατυχημάτων εκτροπής και σοβαρών ατυχημάτων (Álvarez et al., 2020). Η μελέτη των Álvarez et al. (2020) αποκαλύπτει ότι οι πιθανότητες ατυχήματος εκτροπής είναι περισσότερες από πέντε φορές υψηλότερες σε δρόμο με δύο ή περισσότερες λωρίδες, και σε δρόμους με μακριά προηγούμενα ευθεία τμήματα.

Τα μακριά ευθεία τμήματα πριν από τις διασταυρώσεις ($>500\text{m}$) συσχετίζονται με υψηλότερο κίνδυνο ατυχημάτων λόγω αυξημένων ταχυτήτων και μειωμένης εγρήγορσης των οδηγών (Álvarez et al., 2020). Αυτός ο παράγοντας υπογραμμίζει τη σημασία του σχεδιασμού προσεγγίσεων που ενθαρρύνουν την κατάλληλη μείωση ταχύτητας πριν από τη διασταύρωση.

Τα αποτελεσματικά πρότυπα γεωμετρικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν ορθογώνιες διασταυρώσεις (90°) που μειώνουν τον κίνδυνο ατυχημάτων, επαρκείς ακτίνες στροφής που

εξισορροπούν την ευελιξία και την ταχύτητα, βελτιωμένη απόσταση ορατότητας που μειώνει τη συχνότητα ατυχημάτων, στένωση λωρίδων και λιγότερες λωρίδες που μειώνουν τα ατυχήματα εκτροπής και τα σοβαρά ατυχήματα, καθώς και διαχωριστικές νησίδες με προσεκτικό σχεδιασμό που μπορούν να μειώσουν συγκεκριμένους τύπους ατυχημάτων (Yuan et al., 2018; Álvarez et al., 2020).

2.3.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι κυκλοφοριακοί παράγοντες αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές που επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Η σχέση μεταξύ των κυκλοφοριακών χαρακτηριστικών και της πιθανότητας εμπλοκής σε ατύχημα είναι πολύπλοκη και πολυδιάστατη, με τον όγκο κίνησης, τις καθυστερήσεις και τις συγκρουόμενες κινήσεις να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του επιπέδου επικινδυνότητας.

Ο όγκος κίνησης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες κινδύνου στις διασταυρώσεις. Υψηλότεροι κυκλοφοριακοί φόρτοι, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής, αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο ατυχημάτων (Mohammadnazar et al., 2022; Y. Wang et al., 2024). Τόσο οι ευθείες κινήσεις όσο και οι στρεφόμενες κινήσεις συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας σύγκρουσης, ειδικά όταν εμπλέκονται πολλαπλές προσβάσεις στη διασταύρωση (Yuan et al., 2018). Η αυξημένη συχνότητα αλληλεπιδράσεων μεταξύ οχημάτων κατά τις περιόδους υψηλού φόρτου δημιουργεί περισσότερες ευκαιρίες για σφάλματα και παρερμηνείες των προθέσεων άλλων οδηγών.

Οι καθυστερήσεις και το μήκος των ουρών αναμονής συνδέονται στενά με την αύξηση του κινδύνου ατυχημάτων. Μεγαλύτερες καθυστερήσεις και εκτεταμένες ουρές, ιδιαίτερα στις λωρίδες ευθείας κίνησης, σχετίζονται με υψηλότερη πιθανότητα σύγκρουσης (Yuan et al., 2018). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη απογοήτευση των οδηγών που οδηγεί σε επικίνδυνους ελιγμούς και παραβιάσεις του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας. Η παρατεταμένη αναμονή μπορεί να προκαλέσει ανυπομονησία και να ωθήσει τους οδηγούς σε ριψοκίνδυνες αποφάσεις, όπως η διέλευση με κίτρινο ή κόκκινο σηματοδότη.

Οι αντικρουόμενες κινήσεις αποτελούν ίσως τον πλέον κρίσιμο κυκλοφοριακό παράγοντα κινδύνου. Διασταυρώσεις με πιο σύνθετες ή συχνές αντικρουόμενες τροχιές οχημάτων, όπως οι αριστερές στροφές που διασχίζουν την ευθεία κίνηση, παρουσιάζουν υψηλότερες πιθανότητες ατυχημάτων. Η ταχύτητα και ο χρονισμός αυτών των συγκρούσεων,

ειδικά μεταξύ διαφορετικών τύπων οχημάτων, είναι καθοριστικής σημασίας για την ασφάλεια της διασταύρωσης.

Οι ώρες αιχμής επιδεινώνουν σημαντικά τους κυκλοφοριακούς παράγοντες κινδύνου. Κατά τις περιόδους αυτές, ο αυξημένος όγκος κίνησης οδηγεί σε συμφόρηση και περισσότερες συγκρούσεις μεταξύ των κινήσεων των οχημάτων. Η μεταβλητότητα των ταχυτήτων κατά τις ώρες αιχμής, με μεγαλύτερες διαφορές ταχύτητας μεταξύ των οχημάτων, αυξάνει περαιτέρω τον κίνδυνο (Mohammadnazar et al., 2022; Y. Wang et al., 2024).

Η σύνθεση της κυκλοφορίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του επιπέδου κινδύνου. Η παρουσία μοτοσυκλετών, πεζών ή μικτής κυκλοφορίας αυξάνει την επικινδυνότητα (Kronprasert et al., 2021; Y. Wang et al., 2024). Η υψηλότερη παρουσία ευάλωτων χρηστών της οδού, όπως πεζοί και ποδηλάτες, όχι μόνο αυξάνει την πιθανότητα ατυχήματος αλλά και τη σοβαρότητά του (H. Li et al., 2023).

Η ασταθής οδήγηση (volatile driving), που χαρακτηρίζεται από απότομες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις, καθώς και οι επιθετικοί ελιγμοί, συνδέονται με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων, ιδιαίτερα υπό συνθήκες συμφόρησης ή μικτής κυκλοφορίας (Yang et al., 2024; Mohammadnazar et al., 2022). Η ενσωμάτωση μέτρων μεταβλητότητας οδήγησης στις συναρτήσεις επίδοσης ασφάλειας μπορεί να μειώσει τη μεροληψία του μοντέλου και να βελτιώσει την προγνωστική απόδοση για σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις (Mohammadnazar et al., 2022).

Συμπερασματικά, οι κυκλοφοριακοί παράγοντες αλληλεπιδρούν με πολύπλοκο τρόπο για να επηρεάσουν την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των παραγόντων μέσω κατάλληλου σχεδιασμού, χρονισμού σηματοδότησης και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση της πιθανότητας ατυχημάτων και στη βελτίωση της συνολικής ασφάλειας των διασταυρώσεων.

2.3.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του επιπέδου ασφάλειας των διασταυρώσεων. Οι καιρικές συνθήκες, ο φωτισμός και η κατάσταση του οδοστρώματος επηρεάζουν σημαντικά τόσο την πιθανότητα όσο και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων, καθιστώντας απαραίτητη την κατανόηση και αντιμετώπιση αυτών των παραγόντων μέσω στοχευμένων υποδομών και παρεμβάσεων.

Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες αποτελούν σημαντικό παράγοντα κινδύνου για την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Το βρεγμένο ή ολισθηρό οδόστρωμα από βροχή ή χιόνι αυξάνει τη συχνότητα και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων, μειώνοντας την πρόσφυση των ελαστικών και την ορατότητα (Hussein & Hassan, 2017; Sharafeldin et al., 2022). Η επίδραση των καιρικών συνθηκών στην οδική ασφάλεια είναι ιδιαίτερα έντονη σε σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις, όπου οι απαιτήσεις για ακριβείς ελιγμούς και έγκαιρη ανταπόκριση στη σηματοδότηση είναι αυξημένες (Yuan et al., 2018).

Ο ανεπαρκής φωτισμός συνιστά κρίσιμο περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Οι κακές συνθήκες φωτισμού, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες, συνδέονται με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων και σοβαρότερους τραυματισμούς λόγω της μειωμένης ορατότητας για οδηγούς και πεζούς (Hussein et al., 2017; Sharafeldin et al., 2022). Η επίδραση του φωτισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ασφάλεια των ευάλωτων χρηστών της οδού, όπως οι πεζοί και οι ποδηλάτες, που γίνονται λιγότερο ορατοί υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Ο ανεπαρκής φωτισμός συνιστά κρίσιμο περιβαλλοντικό παράγοντα που επηρεάζει την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Οι κακές συνθήκες φωτισμού, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες, συνδέονται με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων και σοβαρότερους τραυματισμούς λόγω της μειωμένης ορατότητας για οδηγούς και πεζούς (Hussein et al., 2017; Sharafeldin et al., 2022). Η επίδραση του φωτισμού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ασφάλεια των ευάλωτων χρηστών της οδού, όπως οι πεζοί και οι ποδηλάτες, που γίνονται λιγότερο ορατοί υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Η ποιότητα του οδοστρώματος αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Η χαμηλή τριβή του οδοστρώματος, η τραχύτητα, οι αυλακώσεις και η ανεπαρκής αντίσταση ολίσθησης συνδέονται ισχυρά με υψηλότερα ποσοστά ατυχημάτων σε σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις (Hussein et al., 2017; Sharafeldin et al., 2022). Οι παράμετροι επιφανειακής κατάστασης, όπως η τραχύτητα, το βάθος αυλάκωσης και η αντίσταση ολίσθησης, συμβάλλουν σημαντικά στην εμφάνιση ατυχημάτων (Hussein et al., 2017).

Πέραν των άμεσων περιβαλλοντικών συνθηκών, τα χαρακτηριστικά του ευρύτερου δομημένου περιβάλλοντος επηρεάζουν την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως το πλάτος του δρόμου, το πλάτος των ερεισμάτων, η διαχωριστική γραμμή και ο αριθμός των λωρίδων, καθώς και η παρουσία καταστημάτων, βενζινάδικων και άλλων

πόλων έλξης, επηρεάζουν τον κίνδυνο τροχαίων ατυχημάτων σε διασταυρώσεις (Lin et al., 2022). Τα χαρακτηριστικά του αστικού τοπίου σε επίπεδο δρόμου, όπως ο όγκος κίνησης και η εμπορική χρήση γης, συνδέονται με υψηλότερους κινδύνους εμφάνισης ατυχημάτων πεζών (Yue, 2024).

Η σχέση μεταξύ περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών και ασφάλειας επεκτείνεται και στην αντίληψη του κινδύνου. Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, όπως οι αναλογίες ουρανού και οδοστρώματος στο οπτικό πεδίο, συνδέονται σημαντικά με τον αντιληπτό κίνδυνο σύγκρουσης μεταξύ παιδιών σχολικής ηλικίας, με το πλάτος του δρόμου να κυριαρχεί σε αυτή τη συσχέτιση (Kwon & Cho, 2020).

Οι εμπορικές και θεσμικές χρήσεις γης, οι στάσεις λεωφορείων και οι σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις έχουν θετική επίδραση στη συχνότητα ατυχημάτων διασταύρωσης. Το δομημένο περιβάλλον στην περιοχή μιας διασταύρωσης έχει ισχυρή συσχέτιση με την πεζή δραστηριότητα, αλλά μικρή άμεση επίδραση στη συχνότητα συγκρούσεων πεζών-οχημάτων.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η κατάσταση του οδοστρώματος και ο φωτισμός επηρεάζουν τη σοβαρότητα των τραυματισμών από ατυχήματα σε διασταυρώσεις, με την τριβή του οδοστρώματος να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο (Sharafeldin et al., 2022). Το βελτιωμένο οδικό περιβάλλον μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης σε διασταυρώσεις, με τους χρήστες των δευτερευουσών οδών να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης σε σύγκριση με τους χρήστες των κύριων οδών (Pawar et al., 2018).

Συνοψίζοντας, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες ασκούν σημαντική επίδραση στην ασφάλεια των διασταυρώσεων μέσω πολλαπλών μηχανισμών. Η κατανόηση αυτών των επιδράσεων είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών παρεμβάσεων που θα βελτιώσουν την οδική ασφάλεια υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.3.4 ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι ανθρώπινοι παράγοντες αποτελούν την κύρια αιτία των τροχαίων ατυχημάτων στις διασταυρώσεις, με τη συμπεριφορά των οδηγών, τις παραβάσεις και το επίπεδο εμπειρίας να αλληλεπιδρούν με τον σχεδιασμό των υποδομών, δημιουργώντας ή αποτρέποντας επικίνδυνες καταστάσεις. Η πολυπλοκότητα των διασταυρώσεων ενισχύει την επίδραση αυτών των ανθρώπινων παραγόντων στην οδική ασφάλεια.

Η επικίνδυνη οδηγική συμπεριφορά συνιστά σημαντικό παράγοντα κινδύνου για την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Ριψοκίνδυνες ενέργειες όπως η υπερβολική ταχύτητα, η απόσπαση προσοχής, οι επιθετικοί ελιγμοί και η αποτυχία παραχώρησης προτεραιότητας αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στα ατυχήματα διασταύρωσης. Η απρόσεκτη ή αμελής οδήγηση, ιδιαίτερα σε διασταυρώσεις υψηλής ταχύτητας ή πολύπλοκες διασταυρώσεις, αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο σύγκρουσης (Adanu et al., 2021; Hossain et al., 2023).

Οι παραβάσεις του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας αποτελούν κρίσιμο παράγοντα κινδύνου στις διασταυρώσεις. Οι συνήθεις παραβάσεις περιλαμβάνουν την παραβίαση σημάτων STOP, την αποτυχία παραχώρησης προτεραιότητας και την αγνόηση φωτεινών σηματοδοτών. Αυτές οι παραβάσεις συνδέονται ιδιαίτερα με σοβαρές πλευρικές συγκρούσεις και ατυχήματα κατά τη δεξιά στροφή, που συχνά εμπλέκουν πεζούς ή άλλα οχήματα (Adanu et al., 2021; Jashami et al., 2023).

Η ηλικία και η εμπειρία των οδηγών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια των διασταυρώσεων. Τόσο οι νέοι (έφηβοι) όσο και οι ηλικιωμένοι οδηγοί (ιδιαίτερα άνω των 70 ετών) είναι υπερεκπροσωπούμενοι στα ατυχήματα διασταύρωσης. Οι νεότεροι οδηγοί είναι πιο επιρρεπείς σε απόσπαση προσοχής και σφάλματα αναζήτησης, ενώ οι ηλικιωμένοι οδηγοί συχνά κρίνουν εσφαλμένα τα κενά ή αποτυγχάνουν να εντοπίσουν άλλα οχήματα λόγω αισθητηριακής ή γνωστικής έκπτωσης (Braitman et al., 2007; Lombardi et al., 2017).

Οι ηλικιακοί παράγοντες, όπως οι αισθητηριακές, αντιληπτικές, γνωστικές και κινητικές εκπτώσεις, επηρεάζουν την εμπλοκή των ηλικιωμένων οδηγών σε θανατηφόρα ατυχήματα διασταύρωσης (Lombardi et al., 2017). Οι παράγοντες που οδηγούν σε ατυχήματα διασταύρωσης ποικίλλουν ανάλογα με την ηλικία, με παράγοντες όπως τα σφάλματα αξιολόγησης και η χαμένη αντίχνευση να διαφέρουν ανά ηλικιακή ομάδα (Braitman et al., 2007).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπινων παραγόντων και σχεδιασμού υποδομών είναι καθοριστική για την ασφάλεια των διασταυρώσεων. Διασταυρώσεις με κακή ορατότητα, ανεπαρκή σήμανση ή πολύπλοκες διατάξεις αυξάνουν την πιθανότητα σφαλμάτων και παραβάσεων των οδηγών. Οι νυχτερινές ή ελλιπώς φωτισμένες διασταυρώσεις ενισχύουν περαιτέρω αυτούς τους κινδύνους (Jashami et al., 2023; Z. Li et al., 2018).

Διάφορα χαρακτηριστικά των οδηγών επηρεάζουν σημαντικά τη σοβαρότητα των ατυχημάτων. Μεταβλητές όπως η κατάσταση του οδηγού, η ηλικία και το φύλο έχουν

σημαντική επίδραση στη σοβαρότητα των τραυματισμών σε ατυχήματα διασταύρωσης. Η χρήση ναρκωτικών ή αλκοόλ αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα που αυξάνει τόσο την πιθανότητα όσο και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων (Li et al., 2018; Hossain et al., 2023).

Η μη χρήση ή η ακατάλληλη χρήση ζώνης ασφαλείας συνδέεται με αυξημένη σοβαρότητα τραυματισμών σε ατυχήματα διασταύρωσης. Αυτός ο παράγοντας αναδεικνύει τη σημασία της συμμόρφωσης με τα μέτρα ασφαλείας για τη μείωση των συνεπειών των ατυχημάτων.

Οι ανθρώπινοι παράγοντες δεν περιορίζονται μόνο στους οδηγούς αλλά επεκτείνονται και στους πεζούς. Τα ατυχήματα πεζών σε διασταυρώσεις υψηλής ταχύτητας συνδέονται με παραβάσεις πεζών και εμπλοκή αλκοόλ/ναρκωτικών, καθώς και με συνθήκες χαμηλού φωτισμού (Hossain et al., 2023).

Συμπερασματικά, οι ανθρώπινοι παράγοντες αποτελούν κεντρικό στοιχείο του κινδύνου ατυχημάτων στις διασταυρώσεις, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με πολύπλοκες ή ελλιπώς σχεδιασμένες υποδομές. Η κατανόηση αυτών των παραγόντων και της αλληλεπίδρασής τους με το οδικό περιβάλλον είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών βελτίωσης της οδικής ασφάλειας.

2.4 Μέθοδοι αξιολόγησης επικινδυνότητας

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας των διασταυρώσεων αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών βελτίωσης της οδικής ασφάλειας. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μεθοδολογικές προσεγγίσεις που εξελίχθηκαν σταδιακά από απλές στατιστικές αναλύσεις σε σύνθετα πολυκριτηριακά συστήματα, με τις παραδοσιακές μεθόδους να αποτελούν το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκαν οι μεταγενέστερες εξελίξεις.

2.4.1 ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι παραδοσιακές μέθοδοι αξιολόγησης ασφάλειας που βασίζονται σε δεδομένα ατυχημάτων, όπως η ανάλυση συχνότητας και σοβαρότητας, αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της αξιολόγησης επικινδυνότητας διασταυρώσεων. Παρά την ευρεία χρήση τους και την καθιερωμένη θέση τους στην πρακτική της οδικής ασφάλειας, οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν τόσο σημαντικά πλεονεκτήματα όσο και αξιοσημείωτους περιορισμούς που επηρεάζουν την αξιοπιστία τους στον εντοπισμό επικίνδυνων θέσεων.

Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων που βασίζονται σε δεδομένα ατυχημάτων είναι η άμεση χρήση πραγματικών στοιχείων. Οι αναλύσεις συχνότητας και σοβαρότητας ατυχημάτων στηρίζονται σε πραγματικά αρχεία συγκρούσεων, παρέχοντας μια αντικειμενική βάση για τον εντοπισμό επικίνδυνων διασταυρώσεων (Astarita et al., 2020; T. Lee et al., 2023; So et al., 2015). Η χρήση πραγματικών δεδομένων προσδίδει αξιοπιστία και εγκυρότητα στα αποτελέσματα, καθώς αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες ασφάλειας.

Επιπλέον, οι μέθοδοι αυτές είναι καλά κατανοητές, τυποποιημένες και αποτελούν τη βάση για πολλές συναρτήσεις επίδοσης ασφάλειας και αποφάσεις πολιτικής (Lee et al., 2023; So et al., 2015). Η μακρά παράδοση χρήσης τους έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εκτεταμένων βάσεων δεδομένων και στην καθιέρωση διαδικασιών που διευκολύνουν τη συγκριτική ανάλυση και την παρακολούθηση των τάσεων στην οδική ασφάλεια.

Η ανάλυση σοβαρότητας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες που βοηθούν στην ιεράρχηση των τοποθεσιών όπου τα ατυχήματα είναι πιο πιθανό να οδηγήσουν σε σοβαρούς τραυματισμούς ή θανάτους (Lee et al., 2023; Astarita et al., 2020). Αυτή η δυνατότητα ιεράρχησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανομή περιορισμένων πόρων στις πλέον κρίσιμες τοποθεσίες.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς. Τα δεδομένα ατυχημάτων μπορεί να είναι ελλιπή, ασυνεπή ή να μην αναφέρονται πλήρως, ιδιαίτερα για λιγότερο σοβαρά περιστατικά, οδηγώντας σε μεροληπτικές αξιολογήσεις (Alhajyaseen, 2015). Η έλλιπής καταγραφή ατυχημάτων αποτελεί χρόνιο πρόβλημα που μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη εκτίμηση του πραγματικού επιπέδου κινδύνου.

Η αναδρομική φύση αυτών των μεθόδων συνιστά θεμελιώδη αδυναμία, καθώς εντοπίζουν προβλήματα μόνο αφού έχουν συμβεί ατυχήματα, καθιστώντας τις αντιδραστικές παρά προληπτικές. Αυτή η καθυστέρηση στον εντοπισμό επικίνδυνων τοποθεσιών σημαίνει ότι πρέπει να συμβούν αρκετά ατυχήματα προτού μια διασταύρωση χαρακτηριστεί ως επικίνδυνη.

Οι παραδοσιακές αναλύσεις συχνά δεν λαμβάνουν υπόψη συγκεκριμένες κινήσεις οχημάτων, παρ' ολίγον συγκρούσεις ή την επίδραση του σχεδιασμού της διασταύρωσης και του ελέγχου κυκλοφορίας, περιορίζοντας την ικανότητά τους να εντοπίσουν με ακρίβεια τους παράγοντες κινδύνου (Lee et al., 2023; Astarita et al., 2020; Alhajyaseen, 2015). Η έλλειψη

λεπτομερούς ανάλυσης των συνθηκών που οδηγούν σε ατυχήματα περιορίζει την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μέτρων βελτίωσης.

2.4.2 ΠΡΟΛΗΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι προληπτικές μέθοδοι αξιολόγησης ασφάλειας, όπως οι έλεγχοι οδικής ασφάλειας (Road Safety Audits - RSAs) και η ανάλυση κυκλοφοριακών συγκρούσεων (Traffic Conflict Analysis), αποτελούν καινοτόμες προσεγγίσεις που στοχεύουν στον εντοπισμό προβλημάτων ασφάλειας των διασταυρώσεων πριν συμβούν ατυχήματα. Σε αντίθεση με τις αντιδραστικές προσεγγίσεις που βασίζονται στην ανάλυση δεδομένων ατυχημάτων εκ των υστέρων, οι προληπτικές μέθοδοι μπορούν να ανιχνεύσουν κρυμμένους κινδύνους και πιθανές απειλές που οι αντιδραστικές μέθοδοι ενδέχεται να παραβλέψουν, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τα δεδομένα ατυχημάτων είναι περιορισμένα ή αναξιόπιστα.

Οι προληπτικές μέθοδοι εντοπίζουν κινδύνους με βάση τον σχεδιασμό της οδού, τη συμπεριφορά των χρηστών και τα συμβάντα παρ' ολίγον σύγκρουσης, και όχι μόνο τα παρελθόντα ατυχήματα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων ασφάλειας και την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων πριν από την εμφάνιση ατυχημάτων.

Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιοχές με ελλιπή ή αναξιόπιστα δεδομένα ατυχημάτων και μπορούν να αναδείξουν ζητήματα σε νέες ή τροποποιημένες διασταυρώσεις προτού συμβούν συγκρούσεις (Kamrani et al., 2017; Mukherjee & Mitra, 2020; Quezon & Haji, 2018). Επιπλέον, μπορούν να αποκαλύψουν ανισότητες και κινδύνους που επηρεάζουν ευάλωτες ομάδες χρηστών της οδού, τους οποίους τα δεδομένα ατυχημάτων από μόνα τους ενδέχεται να παραβλέψουν (Ferenchak & Marshall, 2019).

Η ανάλυση κυκλοφοριακών συγκρούσεων περιλαμβάνει την εξέταση συγκρούσεων οχημάτων-πεζών, συμπεριφορών μη συμμόρφωσης και μεταβλητότητας στα πρότυπα οδήγησης. Τα υποκατάστατα μέτρα ασφάλειας (Surrogate Safety Measures - SSM) μπορούν να βελτιώσουν τις αξιολογήσεις ασφάλειας κυκλοφορίας σε μη σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις, παρέχοντας ποσοτικά δεδομένα για την επικινδυνότητα χωρίς την ανάγκη αναμονής για την εμφάνιση ατυχημάτων (Bonela & Kadali, 2022).

2.4.3 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA), όπως οι AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order of

Preference by Similarity to Ideal Solution) και PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), έχουν αποκτήσει ευρεία αποδοχή στην αξιολόγηση της ασφάλειας των διασταυρώσεων. Οι μέθοδοι αυτές διαχειρίζονται συστηματικά πολύπλοκες αποφάσεις που περιλαμβάνουν πολλαπλούς παράγοντες ασφάλειας και προτεραιότητες ενδιαφερομένων, βοηθώντας τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να συγκρίνουν και να κατατάξουν διαφορετικούς σχεδιασμούς διασταυρώσεων ή παρεμβάσεις ασφάλειας λαμβάνοντας υπόψη ποικίλα, συχνά αντικρουόμενα, κριτήρια.

Οι μέθοδοι MCDA προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην αξιολόγηση της ασφάλειας των διασταυρώσεων:

1. **Ολοκληρωμένη Αξιολόγηση:** Οι μέθοδοι MCDA επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση διαφόρων ποσοτικών και ποιοτικών παραγόντων ασφάλειας, όπως η ροή κυκλοφορίας, τα ποσοστά ατυχημάτων, ο γεωμετρικός σχεδιασμός και το κόστος (Barić, 2021; Osetrin et al., 2021; Sarraf & McGuire, 2020). Αυτή η ολιστική προσέγγιση εξασφαλίζει ότι όλες οι σημαντικές πτυχές της ασφάλειας λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.
2. **Δομημένη Λήψη Αποφάσεων:** Παρέχουν ένα διαφανές, βήμα προς βήμα πλαίσιο που βοηθά στην τεκμηρίωση των επιλογών και καθιστά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων πιο αντικειμενική και εφικτή (Barić, 2021; Osetrin et al., 2021). Η δομημένη προσέγγιση ενισχύει την αξιοπιστία και την αποδοχή των αποτελεσμάτων από όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη.
3. **Συμμετοχή Ενδιαφερομένων:** Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να ενσωματώσουν εισροές από πολλαπλούς ενδιαφερόμενους, διασφαλίζοντας ότι διαφορετικές προτεραιότητες (π.χ. ασφάλεια, αποδοτικότητα, κόστος) αντικατοπτρίζονται στην τελική απόφαση (Osetrin et al., 2021; Sarraf & McGuire, 2020).

Η μέθοδος AHP εφαρμόζεται αποτελεσματικά στην κατάταξη εναλλακτικών σχεδιασμών διασταυρώσεων και στην αξιολόγηση επιλογών ανακατασκευής (Chellappa & Ginda, 2023). Η μέθοδος διασπά πολύπλοκα προβλήματα σε μια ιεραρχία κριτηρίων και υποκριτηρίων, χρησιμοποιώντας συγκρίσεις κατά ζεύγη για την ποσοτικοποίηση των προτεραιοτήτων (Barić, 2021; Chellappa et al., 2023). Η προσθήκη της AHP σε συστήματα σχεδιασμού ασφαλών διαδρομών βοηθά τους χρήστες να επιλέξουν την πλέον κατάλληλη διαδρομή μεταξύ πολλαπλών εναλλακτικών, λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα οδικής ασφάλειας (Sarraf et al., 2020).

Η TOPSIS χρησιμοποιείται για τη σύγκριση σεναρίων σχεδιασμού για αναβαθμίσεις διασταυρώσεων (Sarraf et al., 2020; Osetrin et al., 2021). Κατατάσσει τις εναλλακτικές λύσεις με βάση την απόστασή τους από μια ιδανική λύση, εξισορροπώντας πολλαπλά αντικρουόμενα κριτήρια.

Η PROMETHEE εφαρμόζεται στην επιλογή διαδρομών και διασταυρώσεων, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν αντικρουόμενα συμφέροντα μεταξύ των ενδιαφερομένων (Sarraf et al., 2020). Χρησιμοποιεί συναρτήσεις προτίμησης για τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων σε όλα τα κριτήρια, επιτρέποντας λεπτομερείς συμβιβασμούς.

Οι μέθοδοι MCDA διαχειρίζονται αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα των πολλαπλών παραγόντων ασφάλειας μέσω διαφόρων μηχανισμών:

1. **Στάθμιση κριτηρίων:** Οι μέθοδοι MCDA αποδίδουν βάρη σε κάθε παράγοντα ασφάλειας με βάση την κρίση ειδικών ή τη συμβολή των ενδιαφερομένων, αντικατοπτρίζοντας τη σχετική τους σημασία (Barić, 2021; Sarraf et al., 2020; Osetrin et al., 2021). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την προσαρμογή της ανάλυσης στις ιδιαίτερες συνθήκες και προτεραιότητες κάθε περίπτωσης.
2. **Ανάλυση ευαισθησίας:** Αυτές οι μέθοδοι συχνά περιλαμβάνουν ελέγχους ευαισθησίας για να εξετάσουν πώς οι αλλαγές στα βάρη ή τα κριτήρια επηρεάζουν το αποτέλεσμα, διασφαλίζοντας ισχυρές αποφάσεις (Stević et al., 2022). Η ανάλυση ευαισθησίας ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και βοηθά στον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων.
3. **Ενσωμάτωση ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων:** Οι μέθοδοι MCDA μπορούν να συνδυάσουν σκληρά δεδομένα (π.χ. στατιστικά ατυχημάτων) με υποκειμενικές αξιολογήσεις (π.χ. προτιμήσεις ενδιαφερομένων) (Barić, 2021; Sarraf et al., 2020; Osetrin et al., 2021). Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στην αξιολόγηση της οδικής ασφάλειας, όπου συχνά συνυπάρχουν αντικειμενικά και υποκειμενικά κριτήρια.

Συμπερασματικά, οι μέθοδοι MCDA όπως οι AHP, TOPSIS και PROMETHEE προσφέρουν μια δομημένη, διαφανή και ευέλικτη προσέγγιση στην αξιολόγηση της ασφάλειας των διασταυρώσεων. Διαχειρίζονται αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα των πολλαπλών παραγόντων ασφάλειας και των προτεραιοτήτων των ενδιαφερομένων, οδηγώντας σε πιο ισορροπημένες και τεκμηριωμένες αποφάσεις που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την οδική ασφάλεια.

2.4.4 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση ασφάλειας των διασταυρώσεων, επιτρέποντας τη λεπτομερή χωρική ανάλυση και τον αποτελεσματικό εντοπισμό θερμών σημείων (hot spots) ατυχημάτων. Τα GIS ενισχύουν την ικανότητα οπτικοποίησης, ανάλυσης και ιεράρχησης των παρεμβάσεων ασφάλειας στις διασταυρώσεις μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων ατυχημάτων, χαρακτηριστικών οδικού δικτύου και χωρικών προτύπων. Η χωρική ανάλυση μέσω GIS παρέχει ισχυρά εργαλεία για την κατανόηση των προτύπων ατυχημάτων στις διασταυρώσεις, επιτρέποντας την ακριβή χαρτογράφηση των θέσεων ατυχημάτων και διευκολύνοντας τον εντοπισμό διασταυρώσεων με υψηλές συχνότητες ή σοβαρότητα ατυχημάτων (Ertunç et al., 2013; Gu et al., 2022; J. Lee et al., 2017). Η ακριβής γεωγραφική απεικόνιση των ατυχημάτων αποτελεί το θεμέλιο για κάθε περαιτέρω χωρική ανάλυση και επιτρέπει την αναγνώριση χωρικών προτύπων που δεν είναι εμφανή στα παραδοσιακά στατιστικά δεδομένα.

Τα εργαλεία χωρικής ανάλυσης στα GIS, όπως η εκτίμηση πυκνότητας πυρήνα (kernel density estimation) και η ανάλυση ομαδοποίησης (cluster analysis), βοηθούν στον εντοπισμό θερμών σημείων ατυχημάτων – περιοχών με στατιστικά σημαντικές συγκεντρώσεις συγκρούσεων (I. Novikov et al., 2021). Τα GIS μπορούν να εντοπίσουν θερμά σημεία για ατυχήματα διασταυρώσεων και να παρέχουν στατιστικές αξιολογήσεις τόσο σε οπτική όσο και σε γραφική μορφή (Ertunç et al., 2013). Επιπλέον, τα GIS μπορούν να συνδυάσουν δεδομένα ατυχημάτων με τη γεωμετρία του οδικού δικτύου, τον όγκο κυκλοφορίας και δημογραφικές πληροφορίες για να παρέχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των παραγόντων κινδύνου των διασταυρώσεων (J. Lee et al., 2017; Lefler et al., 2013; Xie et al., 2013). Η ενσωμάτωση μακροεπίπεδων μεταβλητών, όπως η πυκνότητα πληθυσμού, οι αναλογίες ηλικιακών ομάδων και οι μετακινούμενοι με ποδήλατο ή πεζή, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα μοντέλα ατυχημάτων διασταυρώσεων (Lee et al., 2017).

Οι κύριες μεθοδολογίες GIS που εφαρμόζονται στην ανάλυση ασφάλειας διασταυρώσεων περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών. Η χαρτογράφηση πυκνότητας ατυχημάτων οπτικοποιεί τις συγκεντρώσεις ατυχημάτων στις διασταυρώσεις, επιτρέποντας την άμεση αναγνώριση προβληματικών περιοχών (Ertunç et al., 2013; Gu et al., 2022). Η εκτίμηση πυκνότητας πυρήνα εντοπίζει χωρικές ομάδες ατυχημάτων μέσω στατιστικών μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη τη χωρική κατανομή των συμβάντων, ενώ η χωρική στατιστική ανάλυση ποσοτικοποιεί τα χωρικά πρότυπα και τη μη τυχαιότητα στην κατανομή των ατυχημάτων (Gu

et al., 2022; Ertunç et al., 2013; Novikov et al., 2021). Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση μέσω της χρήσης δεδομένων LiDAR και άλλων τεχνολογιών επιτρέπει την αξιολόγηση αποστάσεων ορατότητας και φυσικών εμποδίων, με τα δεδομένα LiDAR να μπορούν να οπτικοποιηθούν επιτυχώς σε ένα GIS για αξιολογήσεις απόστασης ορατότητας σε αυτοκινητόδρομους.

2.5 Διεθνείς πρακτικές και μελέτες περιπτώσεων

Η εφαρμογή των μεθόδων αξιολόγησης επικινδυνότητας που αναλύθηκαν προηγουμένως έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις της οδικής ασφάλειας σε διάφορες χώρες, με την ανάπτυξη καινοτόμων προσεγγίσεων και στρατηγικών που έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη μείωση των τροχαίων ατυχημάτων στις διασταυρώσεις. Η μελέτη αυτών των διεθνών πρακτικών και η ανάλυση επιτυχημένων περιπτώσεων παρέχει πολύτιμα διδάγματα και κατευθυντήριες γραμμές για την ανάπτυξη αποτελεσματικών πολιτικών οδικής ασφάλειας.

2.5.1 ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ

Τα προγράμματα οδικής ασφάλειας της Σουηδίας (Vision Zero) και της Ολλανδίας (Sustainable Safety) αποτελούν δύο από τις πλέον επιδραστικές στρατηγικές οδικής ασφάλειας στην Ευρώπη, με κοινό στόχο την εξάλειψη των σοβαρών τραυματισμών και των θανάτων από τροχαία ατυχήματα. Κεντρικό χαρακτηριστικό και των δύο στρατηγικών είναι η συστηματική, βασισμένη σε δεδομένα προσέγγιση της ασφάλειας των διασταυρώσεων, η οποία έχει διαμορφώσει άμεσα τα εθνικά και διεθνή πρότυπα σχεδιασμού διασταυρώσεων.

2.5.1.1 Vision Zero της Σουηδίας

Το πρόγραμμα Vision Zero της Σουηδίας, που ξεκίνησε το 1997, βασίζεται στη φιλοσοφία ότι κανένας θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός δεν είναι αποδεκτός στο οδικό δίκτυο. Όσον αφορά την ασφάλεια των διασταυρώσεων, το πρόγραμμα εστιάζει στη μείωση των ταχυτήτων των οχημάτων μέσω φυσικών μέτρων όπως υπερυψωμένες διαβάσεις, κυκλικούς κόμβους και ειδική διαγράμμιση οδοστρώματος, καθώς και προηγμένο χρονισμό σηματοδότησης (Fong et al., 2003). Η έμφαση δίνεται στη δημιουργία συγχωρητικών οδικών περιβαλλόντων, τον διαχωρισμό των τρόπων κυκλοφορίας και την προτεραιοποίηση των ευάλωτων χρηστών της οδού, όπως οι πεζοί και οι ποδηλάτες (Fong et al., 2003; Klanjčić et al., 2021). Το πρόγραμμα προωθεί επίσης τη συνεπή και σαφή πληροφόρηση για όλους τους

χρήστες της οδού στις διασταυρώσεις, διασφαλίζοντας ότι οι οδηγοί, οι πεζοί και οι ποδηλάτες κατανοούν πλήρως τους κανόνες και τις προτεραιότητες.

2.5.1.2 Sustainable Safety της Ολλανδίας

Το πρόγραμμα Sustainable Safety της Ολλανδίας, που εφαρμόστηκε από τη δεκαετία του 1990, υιοθετεί μια προληπτική προσέγγιση στην οδική ασφάλεια. Στις διασταυρώσεις, το πρόγραμμα υποστηρίζει την απλοποίηση του σχεδιασμού, τους σαφείς κανόνες προτεραιότητας και τον διαχωρισμό των κυκλοφοριακών ροών ανάλογα με την ταχύτητα και τη λειτουργία τους. Υποστηρίζει ιδιαίτερα τους κυκλικούς κόμβους και τη διαβάθμιση για την ελαχιστοποίηση των σημείων σύγκρουσης (Fong et al., 2003; Popovych et al., 2023). Το πρόγραμμα ενσωματώνει τον αστικό σχεδιασμό για την ενθάρρυνση της πεζοπορίας και της ποδηλασίας, κάτι που συσχετίζεται με βελτιωμένη ασφάλεια για τους ευάλωτους χρήστες (Klanjčić et al., 2021).

2.5.1.3 Η επίδραση τους στο κυκλοφοριακό οικοσύστημα

Και τα δύο προγράμματα έχουν επιδείξει εντυπωσιακά αποτελέσματα στη βελτίωση της ασφάλειας των διασταυρώσεων. Το Vision Zero της Σουηδίας πέτυχε μείωση κατά περίπου 30% στους θανάτους από ατυχήματα σε διασταυρώσεις μεταξύ 1999 και 2008, με λιγότερους σοβαρούς τραυματισμούς και χαμηλότερες ταχύτητες (Antonioni et al., 2011; Fong et al., 2003). Το Sustainable Safety της Ολλανδίας οδήγησε σε σημαντική μείωση των ατυχημάτων σε διασταυρώσεις, με αυξημένη χρήση κυκλικών κόμβων και ασφαλέστερα αποτελέσματα για τους ευάλωτους χρηστές της οδού (Fong et al., 2003; Popovych et al., 2023; Klanjčić et al., 2021). Και τα δύο προγράμματα έχουν συμβάλει σε μια σταθερή μείωση των θανάτων και σοβαρών τραυματισμών που σχετίζονται με διασταυρώσεις τις τελευταίες δύο δεκαετίες.

Οι επιτυχίες αυτών των προγραμμάτων έχουν οδηγήσει σε θεμελιώδεις αλλαγές στα πρότυπα σχεδιασμού διασταυρώσεων σε ολόκληρη την Ευρώπη και πέραν αυτής. Οι κυκλικοί κόμβοι έχουν υιοθετηθεί ευρέως ως ασφαλέστερη εναλλακτική λύση στις σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις, μειώνοντας τα σημεία σύγκρουσης και τις ταχύτητες (Fong et al., 2003; Popovych et al., 2023). Οι κυκλικοί κόμβοι έχουν αποδειχθεί ασφαλέστεροι από άλλους τύπους διασταυρώσεων, μειώνοντας τον αριθμό των τροχαίων ατυχημάτων και βελτιώνοντας την απόδοση της οδού (Popovych et al., 2023).

Η διαχείριση ταχύτητας μέσω φυσικών και ψηφιακών μέτρων για την επιβολή χαμηλότερων ταχυτήτων στις διασταυρώσεις έχει γίνει τυπική πρακτική. Οι σχεδιασμοί διασταυρώσεων περιλαμβάνουν πλέον συνήθως χαρακτηριστικά όπως προστατευμένες διαβάσεις, αποκλειστικές λωρίδες ποδηλάτων και βελτιωμένη ορατότητα για την προστασία των ευάλωτων χρηστών της οδού (Fong et al., 2003; Klanjčić et al., 2021).

Αυτές οι στρατηγικές έχουν επηρεάσει τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές και έχουν εμπνεύσει παρόμοιες προσεγγίσεις σε άλλες χώρες (Fong et al., 2003; Antoniou et al., 2011). Οι ευρωπαϊκές χώρες δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια των διασταυρώσεων μειώνοντας την ταχύτητα των οχημάτων, χρησιμοποιώντας μηχανογραφημένα προγράμματα βελτιστοποίησης χρονισμού σημάτων και παρέχοντας συνεπή πληροφόρηση, πρακτικές που μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες χώρες (Fong et al., 2003).

Η εμπειρία από αυτά τα προγράμματα δείχνει ότι οι πόλεις με υψηλά ποσοστά μετακινήσεων με περπάτημα και ποδηλασία είναι ασφαλέστερες για τους ευάλωτους χρήστες της οδού, ενώ οι δρόμοι με περιορισμό χαμηλής ταχύτητας μειώνουν τους τραυματισμούς μόνο για τους επιβάτες αυτοκινήτων (Klanjčić et al., 2021). Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της ολιστικής προσέγγισης που υιοθετούν τόσο το Vision Zero όσο και το Sustainable Safety.

2.5.2 ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Η έρευνα στον τομέα της οδικής ασφάλειας στον ελληνικό χώρο, αν και δεν διαθέτει την έκταση και το βάθος μελετών άλλων ευρωπαϊκών χωρών, έχει προσφέρει σημαντικά ευρήματα που θέτουν τις βάσεις για στοχευμένες αναλύσεις, όπως η παρούσα εργασία. Οι ελληνικές μελέτες επικεντρώνονται κυρίως στην ανάλυση παραγόντων κινδύνου, στην οικονομική αξιολόγηση παρεμβάσεων και στην εφαρμογή σύγχρονων εργαλείων, όπως οι έλεγχοι οδικής ασφάλειας.

Μια θεμελιώδης έρευνα για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη σοβαρότητα των ατυχημάτων στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκε από τους Theofilatos et al. (2012). Οι ερευνητές, χρησιμοποιώντας δεδομένα του 2008 και εφαρμόζοντας μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης, προχώρησαν σε μια κρίσιμη διάκριση μεταξύ ατυχημάτων εντός και εκτός αστικών περιοχών. Για τις αστικές περιοχές, όπως ο Βόλος, η μελέτη κατέδειξε ότι παράγοντες όπως η ηλικία του οδηγού (ιδιαίτερα οι νέοι 18-30 ετών και οι ηλικιωμένοι άνω των 60), η εμπλοκή ευάλωτων χρηστών (δίκυκλα, ποδήλατα), η ύπαρξη διασταυρώσεων και η σύγκρουση με σταθερά αντικείμενα αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα σοβαρού ή

θανατηφόρου τραυματισμού. Η έρευνα αυτή υπογραμμίζει την ανάγκη για διαφοροποιημένες και στοχευμένες παρεμβάσεις, αναγνωρίζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αστικού περιβάλλοντος.

Σε ένα διαφορετικό επίπεδο, οι Yannis et al. (2019) ανέπτυξαν μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την οικονομική αξιολόγηση παρεμβάσεων οδικής ασφάλειας, εστιάζοντας σε επικίνδυνες θέσεις του υπεραστικού δικτύου της Βοιωτίας και της Ημαθίας. Αξιοποιώντας μοντέλα πρόβλεψης ατυχημάτων από το διεθνώς αναγνωρισμένο εγχειρίδιο Highway Safety Manual (HSM) και διενεργώντας ανάλυση κόστους-οφέλους, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι στοχευμένες, χαμηλού κόστους παρεμβάσεις (π.χ. βελτίωση σήμανσης, αντιολισθηρές στρώσεις ασφάλτου) παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλούς δείκτες οικονομικής απόδοσης. Αν και η μελέτη αφορά το υπεραστικό δίκτυο, παρέχει ένα ισχυρό μεθοδολογικό πλαίσιο για την ιεράρχηση και τεκμηρίωση των προτάσεων βελτίωσης που αποτελούν και ζητούμενο της παρούσας εργασίας.

Τέλος, η μελέτη των Kehagia et al. (2022) προσφέρει μια πρακτική εφαρμογή της διαδικασίας του Ελέγχου Οδικής Ασφάλειας (ΕΟΑ) σε έναν τυπικό ελληνικό υπεραστικό δρόμο δύο λωρίδων. Μέσα από την επιτόπια έρευνα, οι ελεγκτές εντόπισαν μια σειρά από κοινά προβλήματα του ελληνικού οδικού δικτύου που σχετίζονται άμεσα με τον ανθρώπινο παράγοντα: μεικτή λειτουργία οδού (διέλευση μέσα από οικισμούς), ανεξέλεγκτη πρόσβαση παρόδιων ιδιοκτησιών, ασυνέπεια στη γεωμετρική χάραξη, ανεπαρκής ορατότητα σε καμπύλες και διασταυρώσεις, καθώς και ελλιπής συντήρηση του οδοστρώματος και της σήμανσης. Η έρευνα ανέδειξε πώς τα ελλείμματα της υποδομής δημιουργούν συνθήκες που διαψεύδουν τις προσδοκίες των οδηγών και οδηγούν σε σφάλματα. Τα ευρήματα της μελέτης αυτής είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την αναγνώριση και καταγραφή των παραγόντων κινδύνου στις διασταυρώσεις της πόλης του Βόλου.

2.5.3 ΚΑΛΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

Η βελτίωση της ασφάλειας των διασταυρώσεων αποτελεί παγκόσμια προτεραιότητα, με πολλές παρεμβάσεις να έχουν αξιολογηθεί τόσο για την οικονομική τους αποδοτικότητα όσο και για την επίδρασή τους στην ασφάλεια. Οι διεθνείς μελέτες περιπτώσεων αποκαλύπτουν ότι τα μηχανικά μέτρα χαμηλού κόστους - όπως η βελτιωμένη σήμανση, οι διαγραμμίσεις οδοστρώματος και οι αναβαθμίσεις σηματοδότησης - επιδεικνύουν σταθερά την υψηλότερη οικονομική αποδοτικότητα και σημαντικά οφέλη ασφάλειας.

Οι συστημικές επεμβάσεις χαμηλού κόστους έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στη βελτίωση της ασφάλειας των διασταυρώσεων. Οι αναβαθμίσεις όπως η βελτιωμένη σήμανση, η ανανέωση των διαγραμμίσεων οδοστρώματος και οι βελτιώσεις σηματοδότησης τόσο σε σηματοδοτούμενες όσο και σε ελεγχόμενες με STOP διασταυρώσεις αποφέρουν σημαντικές μειώσεις ατυχημάτων. Οι λόγοι οφέλους-κόστους κυμαίνονται από 4,1 έως 33,3, με μειώσεις ατυχημάτων της τάξης του 10-24% για θανατηφόρα ατυχήματα και ατυχήματα με τραυματισμούς, και έως 164 ατυχήματα που αποτράπηκαν σε διάστημα πέντε ετών σε ορισμένα προγράμματα (Dedeitch, 2004; Le et al., 2017; Nyberg & Riddle, 2014; Saha, 2022).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα βελτίωσης ασφάλειας για διασταυρώσεις στο Fort Wayne της Indiana, το οποίο με κόστος μόλις \$81.232 παρείχε όφελος μείωσης ατυχημάτων άνω των \$15 εκατομμυρίων σε πενταετή περίοδο, αποτρέποντας 164 συνολικά ατυχήματα και 61 θανατηφόρα ατυχήματα ή ατυχήματα με τραυματισμούς (Saha, 2022). Οι βελτιώσεις ασφάλειας διασταυρώσεων, όπως η ανανέωση διαγραμμίσεων οδοστρώματος, η προσθήκη σήμανσης, η τροποποίηση φωτεινών σηματοδοτών και η αλλαγή υψών διαμέσων, έχουν σημαντική αξία με μέσο λόγο οφέλους-κόστους 33,3 (Dedeitch, 2004).

Η προσθήκη σημάτων πεζών και ο επανασχεδιασμός της γεωμετρίας των διασταυρώσεων μπορούν να μειώσουν τα σοβαρά ατυχήματα κατά 13-25% και να αποφέρουν λόγους οφέλους-κόστους άνω του 4 (El-Basyouny & Sayed, 2011; Sayed et al., 2016). Οι παρεμβάσεις βελτίωσης ασφάλειας διασταυρώσεων, όπως οι νέες εγκαταστάσεις σημάτων πεζών, οι βελτιώσεις γεωμετρικού σχεδιασμού και οι αναβαθμίσεις φωτεινής σηματοδότησης, έχουν επιτύχει λόγο οφέλους-κόστους 4,32:1, με περίοδο αποπληρωμής 5 ετών (Sayed et al., 2016).

Η αντικατάσταση παραδοσιακών διασταυρώσεων με κυκλικούς κόμβους μπορεί να μειώσει τα σημεία σύγκρουσης και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων, αν και μπορεί να αυξήσει τους χρόνους ταξιδιού εάν δεν σχεδιαστούν προσεκτικά (Yaibok et al., 2024). Οι κυκλικοί κόμβοι μπορούν να μειώσουν τα σημεία σύγκρουσης και ενδεχομένως να μειώσουν τις κυκλοφοριακές συγκρούσεις, αλλά μπορεί να αυξήσουν τους χρόνους ταξιδιού και τα μήκη ουρών (Yaibok et al., 2024).

Κεφάλαιο 3 Περιοχή μελέτης – Πόλη του Βόλου

Έχοντας παρουσιάσει στο προηγούμενο κεφάλαιο το θεωρητικό πλαίσιο, τις διεθνείς πρακτικές και τις μεθόδους αξιολόγησης της επικινδυνότητας στις οδικές διασταυρώσεις, το ενδιαφέρον μεταφέρεται πλέον στην εφαρμογή αυτών των θεωριών και μεθόδων στην ειδική περίπτωση της πόλης του Βόλου. Το επόμενο κεφάλαιο εστιάζει στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα γεωγραφικά, δημογραφικά και κυκλοφοριακά δεδομένα της πόλης. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη, προκειμένου η ανάλυση που θα ακολουθήσει να είναι ολοκληρωμένη και να αντικατοπτρίζει τις ιδιαιτερότητες της υπό εξέταση περιοχής.

3.1 Γεωγραφικά και φυσικά χαρακτηριστικά

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η γεωγραφική θέση της πόλης του Βόλου, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο που επηρεάζει τα κυκλοφοριακά δεδομένα και την οδική ασφάλεια της περιοχής.

3.1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΣΗ

Η πόλη του Βόλου βρίσκεται στη Θεσσαλία, στο εσωτερικό του Παγασητικού Κόλπου, αμφισβητίας των ακτών του Αιγαίου Πελάγους. Χτισμένη εκεί όπου κάποτε υπήρξαν οι αρχαίες πόλεις Δημητριάδα και Ιωλκός, αποτελεί τη μοναδική θαλάσσια έξοδο της Θεσσαλίας προς τη θάλασσα, γεγονός που ενίσχυσε τη σημασία της τόσο σε εμπορικό όσο και σε στρατηγικό επίπεδο (Wikipedia, 2025).

Ο οικιστικός ιστός εκτείνεται σε μια επίπεδη πεδινή περιοχή, στους πρόποδες του όρους Πηλίου, το οποίο υψώνεται σε ύψος περίπου 1.610–1.624 μ. και οριοθετεί τα ανατολικά της πολεοδομικής ζώνης (Hellas Vacations, 2012). Η συνύπαρξη της θάλασσας και του βουνού

δημιουργεί ένα μοναδικό φυσικό περιβάλλον, με μικρές ποικιλίες μικροκλίματος που επηρεάζουν τόσο την καθημερινότητα όσο και τις κυκλοφοριακές συνθήκες της πόλης.

Η πόλη συνδέεται άμεσα με το εθνικό οδικό δίκτυο, καθώς βρίσκεται κοντά στον άξονα Ε75 (ΠΑΘΕ), με απευθείας οδικές συνδέσεις προς Αθήνα (περίπου 330 χλμ.) και Θεσσαλονίκη (220 χλμ.). Το λιμάνι, ένα από τα σημαντικότερα στην κεντρική Ελλάδα, λειτουργεί ως κρίσιμο σημείο διαμετακόμισης επιβατών και εμπορευμάτων, ενώ τα τοπικά ποτάμια (Κραυσιδώνας, Ξηριάς, Αναύρος) διατρέχουν την πόλη, επηρεάζοντας τόσο την πολεοδομική διάρθρωση όσο και τις οδικές υποδομές (Hellas Vacations, 2012).

3.1.2 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑ

Η περιοχή του Βόλου χαρακτηρίζεται από έντονη τοπογραφική ποικιλομορφία, συνδυάζοντας παράκτιες εκτάσεις με ορεινές περιοχές. Το κέντρο της πόλης βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο περίπου 7 μ πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, με την ευρύτερη περιοχή έως και τους πρόποδες του Πηλίου να φτάνει τα 1.604 μ (VM&A, 2020). Μόνο στα 3 χλμ γύρω από το Βόλο καταγράφονται διαφορές υψομέτρου έως και ~194 μ, ενώ σε ακτίνα 16 χλμ φθάνουν τα ~1.626 μ (weatherspark, 2025).

Η κάλυψη εδάφους ποικίλλει ανάλογα με την κλίση: εντός της πολεοδομικής ζώνης, 50 % είναι τεχνητές επιφάνειες, 14% θαλάσσια επιφάνεια και 11% αραιή βλάστηση. Απομακρυνόμενοι προς το Πήλιο, αυξάνεται η δασική κάλυψη και τα υψόμετρα.

Οι γεωμορφολογικές αυτές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα το μικροκλίμα. Ο Βόλος έχει Μεσογειακό κλίμα με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, βροχερούς χειμώνες (κλάση Csa). Οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 8°C έως 26°C, με ετήσια ημερήσια βροχόπτωση σε περίπου 92 ημέρες και 924 μμ συνολικά, ενώ απολαμβάνει πάνω από 3.800 ώρες ηλιοφάνειας ετησίως (nomadseason.com, 2024). Το Πήλιο έχει βροχοσκία, περιορίζοντας τις βροχοπτώσεις σε σχέση με την ανατολική πλευρά του βουνού.

Η τοπογραφία επί των μικροκλιμάτων επηρεάζει θερμοκρασία, υγρασία και άνεμο, ενώ οι έντονες κλίσεις και οι περιοχές υψηλού υψομέτρου έχουν συχνά διαφορετικό κλίμα από τις πεδινές μεσογειακές ζώνες. Συνολικά, αυτή η τοπογραφική και κλιματική ποικιλία επιβάλλει διαφοροποιήσεις στη σχεδίαση υποδομών, οδικής ασφάλειας και κυκλοφορίας, ανάλογα με τη ζώνη μελέτης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε τμήμα της περιοχής Μελέτης.

3.1.3 ΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η πολεοδομική διάρθρωση της πόλης του Βόλου βασίζεται σε ένα ορθογωνικό (Ιπποδάμειου τύπου) δίκτυο δρόμων, που καθορίζει ένα σχετικά ομοιογενές ιστό από οικοδομικά τετράγωνα στο κέντρο της πόλης (Δήμος Βόλου, 2017). Αυτό το σχήμα διευκολύνει την κυκλοφορία και την προσβασιμότητα, καθώς πολλοί δρόμοι προσφέρουν εναλλακτικές διαδρομές και σύνδεση των βασικών αστικών πυρήνων.

Η αστική έκταση του Βόλου περιλαμβάνει δύο κύριες δήμους: τον Δήμο Βόλου και τη Νέα Ιωνία, οι οποίοι συγκροτούν το Πολεοδομικό Συγκρότημα. Ο συνολικός πληθυσμός της αστικής περιοχής ανέρχεται σε περίπου 139.670 κατοίκους στη δημοτική περιφέρεια και 85.800 στο κέντρο σύμφωνα με την απογραφή του 2021. Η έκταση του αστικού ιστού φτάνει τα 90,99 τ. χλμ.², κάτι που εδραιώνει το Βόλο ως σημαντικό κέντρο πληθυσμιακής και αστικής συγκέντρωσης στην Κεντρική Ελλάδα (Δήμος Βόλου, 2023).

Ο πολεοδομικός ιστός χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή πυκνότητα δόμησης, με μετρήσεις να δείχνουν ότι στην κεντρική ζώνη η πυκνότητα φτάνει τους 33 κατοίκους/εκτάριο. Η κατανομή των χρήσεων γης είναι σχετικά ισοβαρής ανάμεσα σε αστική κατοικία (C1), μεικτές αστικές χρήσεις (C2) και χαμηλής πυκνότητας επεκτάσεις (C3), με ποσοστά 35 %, 26 % και 39 % αντίστοιχα. Ωστόσο, σε επίπεδο μικρότερου αστικού ιστού, παρατηρείται έντονη συγκέντρωση βιομηχανικών/εμπορικών ζωνών κοντά στο κέντρο και στον λιμενικό χώρο.

Ο λιμένας του Βόλου και η βιομηχανική ζώνη συμβάλλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση της αστικής μορφής, υπογραμμίζοντας το συνδυασμό κατοικίας με λειτουργικό προσανατολισμό στην παραγωγή και τις υπηρεσίες. Παράλληλα, η συνέχεια του ορθογωνικού πλέγματος διευκολύνει τη σύνδεση δημόσιων χώρων, εμπορικών αξόνων και συνδέσεων με τις παραθαλάσσιες και παράκτιες ζώνες.

Η αστική δομή του Βόλου, σε σύγκριση με άλλες μεσαίου μεγέθους ελληνικές πόλεις, χαρακτηρίζεται από την υψηλή συνεκτικότητα και compact μορφή της, με ένα μεγάλο κεντρικό συσσωρευμένο «μπλοκ» (C1) περίπου 385 ha που αντιπροσωπεύει το 50 % της συνολικής κεντρικής πυκνής αστικής επιφάνειας. Αυτό παρέχει σταθερές βάσεις για την αστική κινητικότητα και την ποιότητα ζωής, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλει αυξημένες απαιτήσεις σε υποδομές, διαχείριση κυκλοφορίας και δημόσιους χώρους.

Τέλος, η δομή του Βόλου ενσωματώνει μικτή χρήση γης και λειτουργίες κατοικίας, εμπορίου και βιομηχανίας, σε συνδυασμό με τα λιμενικά χαρακτηριστικά της πόλης. Αυτή η

πολυλειτουργική ένταση δημιουργεί δυναμικές πολεοδομικές συνθήκες, απαιτώντας έναν στρατηγικό χωρικό και λειτουργικό σχεδιασμό ώστε να υποστηριχθεί ο συνδυασμός αστικής ζωής, οικονομικής δραστηριότητας και ασφάλειας στις μετακινήσεις.

3.2 Δημογραφικά και κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά

Για την κατανόηση της δυναμικής της πόλης και της επίδρασης των κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στην κυκλοφορία και την οδική ασφάλεια, είναι κρίσιμο να εξεταστούν πρώτα τα βασικά πληθυσμιακά χαρακτηριστικά του Βόλου.

3.2.1 ΠΛΗΘΥΣΜΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η πόλη του Βόλου έχει πληθυσμό 85.806 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2021 — σημειώνοντας μια μικρή πτώση σε σχέση με την απογραφή του 2011 (86.046 κάτοικοι) (citypopulation.de, 2025). Σε δημοτικό επίπεδο (Δήμος Βόλου), ο συνολικός πληθυσμός αγγίζει τους 139.670 κατοίκους. Η αστική ζώνη αστικού συγκροτήματος (Δημοτική Ενότητα Βόλου μαζί με Νέα Ιωνία κ.α.) αριθμεί περίπου 123.587 κατοίκους (Wikipedia, 2025).

Η κατανομή ανά φύλο παρουσιάζει 40.738 άνδρες και 45.065 γυναίκες, ενώ σύμφωνα με σχετική ανάλυση, 11.157 άτομα (13%) είναι ηλικίας 0–14 ετών, 55.590 άτομα (65 %) είναι μεταξύ 15–59 ετών και 19.061 άτομα (22%) είναι 60 ετών και άνω (citypopulation.de, 2025). Αυτό δείχνει μια σημαντική παρουσία ηλικιωμένου πληθυσμού — περίπου 22% είναι άνω των 60 ετών — ενδεικτικό της δημογραφικής γήρανσης που αντιμετωπίζει η περιοχή.

Η μέση πυκνότητα πληθυσμού στο κέντρο της πόλης εκτιμάται σε περίπου 3.066 κατοίκους ανά τ.χλμ. (27,1 τ. χλμ.) , ενώ στο επίπεδο του Δήμου Βόλου – συνολικά 385,6 τ.χλμ. – η πυκνότητα μειώνεται λόγω των πιο αραιοκατοικημένων περιοχών και αγροτικών ζωνών.

Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ήπια, σταθερή μείωση στον πληθυσμό της πόλης, κάτι που ακολουθεί τη γενική τάση υπογεννητικότητας και γήρανσης που καταγράφεται σε εθνικό επίπεδο: η Περιφέρεια Θεσσαλίας από το 2011 έως το 2021 παρουσίασε πτώση κατά 6,1% (732.762 → 688.255 κατοίκους). Οι κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες αυτής της τάσης αντιστοιχούν και στις δημογραφικές συνθήκες του Βόλου.

Τέλος, η δομή των ηλικιακών ομάδων αντιστακλά σημαντικές προκλήσεις: με περίπου 22% του πληθυσμού άνω των 60 ετών και μικρή συμμετοχή της νεολαίας στις ηλικίες 0–14 (~13%), η πόλη αντιμετωπίζει πιέσεις όσον αφορά τη ζήτηση για υπηρεσίες υγείας, κοινωνικής

πρόνοιας και προσαρμογής υποδομών -- παράγοντες που θα επηρεάσουν άμεσα τις μετακινήσεις και την οδική ασφάλεια στις επόμενες ενότητες.

3.2.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

Η οικονομία του Βόλου χαρακτηρίζεται από τριτογενή και δευτερογενή τομείς, με κυρίαρχο τον τομέα των υπηρεσιών (εμπόριο, λιμενικές δραστηριότητες, υπηρεσίες πανεπιστημίου, τουρισμός), ο οποίος καλύπτει περίπου το 74% της απασχόλησης στον Δήμο Βόλου (ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ, 2021). Ο δευτερογενής τομέας, με έμφαση στη βιομηχανία, αντιστοιχεί στο ~21 %, ενώ ο πρωτογενής τομέας (γεωργία, αλιεία) είναι πολύ περιορισμένος (~5 %).

Η πόλη φιλοξενεί σημαντικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις: τρεις μεγάλες μονάδες χάλυβα (METKA, SIDENOR, Ελληνική Χαλυβουργία) και το εργοστάσιο τσιμέντου AGET Heracles, με ιδιωτικό λιμένα και ετήσια παραγωγή άνω των 7 εκ. τόνων (Wikipedia, 2025). Αυτή η έντονη βιομηχανική δραστηριότητα στο βορειοανατολικό παράκτιο τμήμα συμβάλλει στον δευτερογενή πυλώνα της τοπικής οικονομίας, ενισχύοντας την απασχόληση στον τομέα της μεταποίησης.

Ο τριτογενής τομέας κυριαρχεί στο κέντρο και στην ευρύτερη αστική περιοχή, με έμφαση στο εμπόριο και τις υπηρεσίες. Οι λιμενικές λειτουργίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές: το λιμάνι του Βόλου είναι το τρίτο μεγαλύτερο στην Ελλάδα σε φορτίο και αποτελεί ζωτικό κέντρο μεταφοράς εμπορευμάτων και επιβατών προς τις Σποράδες και άλλους προορισμούς. Παράλληλα, η παρουσία του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας προσφέρει προστιθέμενη αξία μέσω εκπαιδευτικών, ερευνητικών υπηρεσιών και συνεδριακών δραστηριοτήτων.

Στον πρωτογενή τομέα, η συμμετοχή του Δήμου στο γεωργικό/αλιευτικό τομέα είναι μικρή (~4,7 %), ενώ συμπεριλαμβάνει οριζόντιες δραστηριότητες όπως εκτροφή ψαριών και γεωργική παραγωγή στα περιφερειακά προάστια. Οι γεωργικές ζώνες της Θεσσαλίας ενισχύουν την αγροτική δραστηριότητα εντός του ευρύτερου πλαισίου της Περιφέρειας.

Ένα ακόμα στοιχείο είναι η έντονη παρουσία μικρομεσαίων επιχειρήσεων και εμπορικών δραστηριοτήτων, ιδιαίτερα στο κέντρο της πόλης και στη ζώνη ΣΒΑΑ, με 40 επιχειρήσεις να αναζητούν αρκετές εκατοντάδες θέσεις εργασίας σε τοπικές εκδηλώσεις πρόσφατων ετών. Επιπλέον, ο ρόλος του Job Center του Δήμου στην υποστήριξη της τοπικής

απασχόλησης αναδεικνύει τη δράση για την επαγγελματική ένταξη των κατοίκων (Δήμος Βόλου, 2025).

Η κατανομή αυτή των οικονομικών δραστηριοτήτων δηλώνει ένα πολυδιάστατο παραγωγικό μοντέλο, με βασικούς άξονες: βιομηχανία – λιμάνι – υπηρεσίες – εκπαίδευση – εμπόριο. Οι υποδομές μεταφοράς (λιμάνι, εθνική οδός Ε75, αεροδρόμιο Νέας Αγχιάλου) ενισχύουν το οικονομικό δίκτυο και ανοίγουν δρόμους για περαιτέρω ανάπτυξη και τουρισμό, ειδικά προς τις Σποράδες.

Καταληκτικά, η δομή της τοπικής οικονομίας υπογραμμίζει την ανάγκη για δυναμικό χωρικό σχεδιασμό, συνδυάζοντας εδαφικές και λειτουργικές ζώνες – βιομηχανικές, λιμενικές, εμπορικές και αστικές – με στόχο τη μεγιστοποίηση της απασχόλησης και την οδική ασφάλεια μέσα από συντονισμένη πολιτική ανάπτυξης.

3.3 Οδικό δίκτυο και κυκλοφοριακές συνθήκες

Λαμβάνοντας υπόψη τη δημογραφική σύνθεση και τις οικονομικές δραστηριότητες της πόλης, καθίσταται αναγκαία η ανάλυση του οδικού δικτύου και των κυκλοφοριακών συνθηκών, καθώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν καθοριστικά τη λειτουργικότητα της αστικής κινητικότητας και την οδική ασφάλεια στο Βόλο.

3.3.1 ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το ενδοαστικό οδικό δίκτυο της πόλης του Βόλου διαρθρώνεται σε ένα πλέγμα οδών διαβαθμισμένης σημασίας και λειτουργίας, το οποίο ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό τον υποδάμειο πολεοδομικό σχεδιασμό. Η ιεράρχηση των οδών εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος περιλαμβάνει τέσσερις βασικές κατηγορίες: κύριες αρτηρίες, δευτερεύουσες αρτηρίες ή συλλεκτήριες, τοπικές οδούς, και πεζοδρομημένους ή μεικτής χρήσης διαδρόμους.

Οι κύριες αρτηρίες είναι οδοί υψηλής κυκλοφοριακής σημασίας, που συνδέουν το κέντρο της πόλης με τους κύριους άξονες εξόδου και εισόδου, καθώς και με περιοχές οικονομικής και διοικητικής σημασίας. Τέτοιες αρτηρίες είναι η οδός Λαρίσης, η Ιάσονος (που λειτουργεί μονόδρομα προς τα ανατολικά), η Δημητριάδος (μονόδρομη προς τα δυτικά), η 2ας Νοεμβρίου και η Καρτάλη. Οι οδοί αυτές έχουν υψηλό φόρτο κυκλοφορίας, διέρχονται από πυκνοκατοικημένες περιοχές και εξυπηρετούν δημόσιες μεταφορές και βαριά οχήματα.

Οι δευτερεύουσες αρτηρίες ή συλλεκτήριες οδοί λειτουργούν ως ενδιάμεσοι άξονες μεταξύ των κύριων αρτηριών και του τοπικού δικτύου, συνδέοντας συνοικίες, εξυπηρετώντας τη διαμπερή κίνηση και την πρόσβαση σε εμπορικές και κατοικημένες περιοχές. Παραδείγματα τέτοιων οδών είναι η Κωνσταντά, η Αθανασάκη, η Αναλήψεως και η Πολυμέρη. Παρότι η διατομή τους είναι μικρότερη από τις κύριες αρτηρίες, συχνά υποδέχονται σημαντικό κυκλοφοριακό όγκο, ειδικά σε ώρες αιχμής.

Το τοπικό οδικό δίκτυο περιλαμβάνει μικρής σημασίας δρόμους, οι οποίοι διεισδύουν στο εσωτερικό των οικοδομικών τετραγώνων, εξυπηρετώντας την άμεση προσπέλαση κατοικιών και καταστημάτων. Αυτοί οι δρόμοι είναι συχνά στενοί, με περιορισμένη ορατότητα και αμφίδρομη κυκλοφορία, και παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα στάθμευσης και διέλευσης, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες συνοικίες όπως η Νέα Δημητριάδα και η Νέα Ιωνία.

Επιπλέον, στο ιστορικό και εμπορικό κέντρο παρατηρείται έντονη παρουσία πεζοδρομημένων ζωνών ή περιοχών μεικτής κυκλοφορίας (shared space), κυρίως στην περιοχή πέριξ του Αγίου Νικολάου και της Πλατείας Ρήγα Φεραίου. Οι παρεμβάσεις πεζοδρόμησης και ήπιας κυκλοφορίας στοχεύουν στην αναβάθμιση του δημόσιου χώρου και τη βελτίωση της βιώσιμης κινητικότητας, αλλά απαιτούν παράλληλα επανασχεδιασμό της κυκλοφορίας στο ευρύτερο δίκτυο για την αποφυγή συμφόρησης.

Η λειτουργική αυτή ιεράρχηση εντός του αστικού ιστού του Βόλου δεν βασίζεται μόνο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδών, αλλά και στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται στην πράξη. Σε αρκετές περιπτώσεις, η αυθαίρετη στάθμευση, οι ελλείψεις σε σήμανση και οι μεταβολές κατεύθυνσης λόγω κυκλοφοριακών ρυθμίσεων οδηγούν σε απορρύθμιση της προβλεπόμενης ιεραρχίας, επιτείνοντας φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης και καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για επικαιροποίηση των δεδομένων κυκλοφορίας και παρέμβαση στον σχεδιασμό του δικτύου.

3.3.2 ΚΥΡΙΕΣ ΑΡΤΗΡΙΕΣ

Η καρδιά της κυκλοφορίας του Βόλου στηρίζεται σε δύο παράλληλους ουσιαστικούς άξονες: τη Δημητριάδος και την Ιάσονος, οι οποίοι καταλαμβάνουν κεντρική θέση στο παράκτιο μέτωπο και λειτουργούν ως κύριες διαμπερείς ροές μέσα στην πόλη. Η Δημητριάδος εξυπηρετεί κυρίως τη δυτική κατεύθυνση και διαθέτει μονόδρομη κυκλοφορία προς δυτικά, ενώ η Ιάσονος κινείται ανάλογα προς τα ανατολικά, εξασφαλίζοντας ομαλή διασύνδεση του κέντρου με την κεντρική πλατεία και το λιμάνι.

Στο ίδιο πλαίσιο, η Λαρίσης αποτελεί βασική πρόσβαση στο Δ.Ε. Αγχιάλου, τον Παγασητικό κόλπο και την Εθνική οδό, λειτουργώντας ως αρχή και τέλος των διαδρομών εξόδου από την πόλη. Η άνετη γεωμετρία της (πλάτος, λωρίδες) την καθιστά κατάλληλη για βαριά κυκλοφορία φορτηγών και δημόσιων συγκοινωνιών.

Οι κάθετες κύριες αρτηρίες – όπως η Καρτάλη, η Ιωλκού (Ε. Βενιζέλου) και η Αναλήψεως – λειτουργούν ως συνδετικοί άξονες μεταξύ των βασικών παράλληλων δρόμων, επιτρέποντας την κυκλοφοριακή ροή προς τις λοιπές συνοικίες και την είσοδο στην περιοχή Πηλίου. Οι αρτηρίες αυτές έχουν σημαντικό κυκλοφοριακό φόρτο, ιδίως κατά τις ώρες αιχμής, καθώς συνδέουν κατοίκους της ανατολικής και δυτικής ζώνης με τον εμπορικό πυρήνα και τις εργασιακές ζώνες.

Παράλληλα, ο δρόμος 2ας Νοεμβρίου διατρέχει βόρεια το κέντρο, αποτελώντας συνδετικό τόξο ανάμεσα σε κύριες αρτηρίες, και η Αθηνών εξυπηρετεί ως δευτερεύουσα, αλλά με σημαντικό αστικό ρόλο καθώς διασχίζει περιοχές κατοικίας και μικρών επιχειρήσεων στο βόρειο άκρο.

Οι παραπάνω κύριοι άξονες διαθέτουν πολλαπλές λωρίδες κυκλοφορίας, σαφή σήμανση και, σε πολλούς τομείς, λεωφορειολωρίδες και διαχωρισμένες ποδηλατικές ζώνες στα όρια και μεταξύ των οδών. Ωστόσο, παρά τη δομημένη αυτή προσέγγιση, παρατηρούνται προβλήματα όπως ατυχήματα σε ορισμένες διασταυρώσεις, συμφόρηση κατά τις ώρες αιχμής και ανάγκη αναδιαμόρφωσης των γεωμετρικών στοιχείων σε κόμβους για βελτίωση της ροής.

Η αναγνώριση των κύριων αυτών αξόνων είναι καίρια για στοχευμένες παρεμβάσεις σχεδιασμού, όπως: επανασχεδιασμός κόμβων, βελτίωση σήμανσης, δημιουργία ζωνών λεωφορείων και ποδηλάτων, καθώς και μέτρα για αύξηση της οδικής ασφάλειας και της βιώσιμης κινητικότητας στην πόλη του Βόλου.

3.3.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΕΙΣ

Στην πόλη του Βόλου ξεχωρίζουν οι ισόπεδοι κυκλικοί κόμβοι που έχουν κατασκευαστεί σε σημεία με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, αντικαθιστώντας συμβατικούς σηματοδοτούμενους κόμβους. Συγκεκριμένα, τέσσερις τέτοιοι κόμβοι – στο Δημαρχείο (Δημητριάδος – Ιάσωνος – 2ας Νοεμβρίου – Λαμπράκη), το Τελωνείο (Λαμπράκη – Παπαδιαμάντη), το ΚΤΕΛ (Αθηνών – Λαμπράκη – Σέκερη) και τον κόμβο Διμηνίου (Λαρίσης – Μπότσαρη – Δερβενακίων) – παραδόθηκαν μετά το 2017. Σύμφωνα με τον Δήμο, αντικαθιστούν φανάρια και μειώνουν τις καθυστερήσεις, διασφαλίζοντας καλύτερη ροή.

Εκτός από τους κυκλικούς, άλλες σημαντικές διασταυρώσεις της πόλης είναι οι κόμβοι στα σημεία όπου οι κύριες αρτηρίες (Δημητριάδος, Ιάσωνος, Λαρίσης, Καρτάλη) συνδέονται με δευτερεύουσες οδούς. Αυτές οι διασταυρώσεις συχνά λειτουργούν με φωτεινή σηματοδότηση ή STOP, και παρουσιάζουν προβλήματα συμφόρησης, ειδικά στις ώρες αιχμής, λόγω έντονης αστικής κίνησης και στάθμευσης.

Επιπλέον, το Δημοτικό Σχέδιο Βιώσιμης Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) του 2021 προβλέπει την εγκατάσταση υπερυψωμένων διαβάσεων σε επιλεγμένα σημεία, με στόχο την ενίσχυση της ασφάλειας των πεζών στις κύριες διασταυρώσεις και στους προαναφερθέντες κυκλικούς κόμβους.

Τα κύρια σημεία προβληματισμού παραμένουν:

- Παλαιές σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις με χαμηλή ορατότητα και αυξημένα ατυχήματα.
- Ασυνέπεια στην εφαρμογή κυκλικών και διαζωμένων κόμβων (π.χ. λανθασμένη σήμανση ή έλλειψη κανόνων προτεραιότητας).
- Περιοχές όπου απαιτείται περαιτέρω παρέμβαση, π.χ. στην Ανάλυση και Ιάσωνος, για βελτίωση της ροής και της κυκλοφορίας πεζών.

Συνοψίζοντας, οι σημαντικές διασταυρώσεις του Βόλου συνδυάζουν νέες παρεμβάσεις (κυκλικούς κόμβους, υπερυψωμένες διαβάσεις) με παραδοσιακά σημεία συμφόρησης – φωτεινών σηματοδοτήσεων. Η διευρυμένη εφαρμογή σύγχρονων λύσεων κυκλοφορικής ιεράρχησης και η αναθεώρηση υπαρχόντων διασταυρώσεων μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και της ταχύτητας μετακίνησης στην πόλη.

3.3.4 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η ανάλυση των κυκλοφοριακών παραμέτρων στο εσωτερικό δίκτυο του Βόλου καταδεικνύει την ύπαρξη αυξημένων φόρτων, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής. Σύμφωνα με μελέτη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, οι κυριότερες ώρες συμφόρησης καταγράφονται μεταξύ 08:00–09:00 και 20:00–21:00, με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση να εντοπίζεται στους κύριους άξονες της Ιάσωνος και της Δημητριάδος (Karatsoli et al., 2019).

Στην ίδια μελέτη επισημαίνεται ότι στην ευρύτερη περιοχή του κέντρου υπάρχουν περίπου 1.380 οχήματα μόνιμων κατοίκων, αλλά μόλις 395 θέσεις στάθμευσης, γεγονός που προκαλεί έντονη κυκλοφορία αναζήτησης θέσης (cruising) και ενισχύει τη συμφόρηση, ιδίως

σε δευτερεύοντες άξονες (Karatsoli et al., 2019). Το φαινόμενο επιδεινώνεται από την παράνομη στάθμευση και την κατάληψη λωρίδων κυκλοφορίας.

Η ανάλυση της λειτουργικότητας του οδικού δικτύου μέσω προσομοιώσεων (π.χ. VISSIM) ανέδειξε ότι σημαντικές καθυστερήσεις οφείλονται στη μη τήρηση των λεωφορειολωρίδων, την απουσία συνεκτικής σηματοδότησης και την ανεπαρκή γεωμετρία ορισμένων κόμβων (Anagnostopoulos & Kehagia, 2020). Η ποιότητα της ροής χαρακτηρίζεται ως μέτρια έως χαμηλή σε βασικές αρτηρίες, κάτι που συνεπάγεται όχι μόνο κυκλοφοριακή δυσλειτουργία, αλλά και αυξημένο περιβαλλοντικό και ηχητικό φορτίο στο αστικό περιβάλλον.

Συμπερασματικά, οι βασικές κυκλοφοριακές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία της πόλης του Βόλου περιλαμβάνουν: υψηλούς φόρτους σε ώρες αιχμής, ανεπαρκείς θέσεις στάθμευσης, προβλήματα σε κρίσιμες διασταυρώσεις και ανεπαρκή διαχείριση της ροής. Οι παραπάνω συνθήκες καθιστούν αναγκαία την προώθηση ολοκληρωμένων παρεμβάσεων κυκλοφοριακής διαχείρισης, με στόχο την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας και της αστικής βιωσιμότητας.

3.4 Υφιστάμενα προβλήματα οδικής ασφάλειας

Με βάση τα κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά και τη δομή του οδικού δικτύου του Βόλου, κρίνεται απαραίτητο να εξεταστούν τα υφιστάμενα προβλήματα οδικής ασφάλειας, τα οποία επηρεάζουν καθοριστικά τόσο τη λειτουργικότητα των μετακινήσεων όσο και την ευημερία των πολιτών.

3.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Η ευρύτερη εικόνα των τροχαίων ατυχημάτων στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, όπου ανήκει ο Βόλος, καταγράφει αύξηση των σοβαρών συμβάντων: τον Νοέμβριο του 2024 σημειώθηκαν τέσσερα θανατηφόρα τροχαία (έναντι τριών το 2023), ένα σοβαρό και οκτώ ελαφρά τροχαία, με πέντε νεκρούς και δύο βαριά τραυματίες (Γιάτσιοι, 2024). Αυτό καταδεικνύει ότι, παρά τις προσπάθειες, τα θανατηφόρα ατυχήματα παραμένουν προβληματικά και απαιτούν στοχευμένη αντιμετώπιση.

Ο Βόλος αντιμετωπίζει συγκεκριμένα προβλήματα: παραβίαση ορίων ταχύτητας και κανόνων προτεραιότητας, καθώς και επιθετική οδήγηση, που οδηγούν σε τροχαία ατυχήματα,

συχνά σοβαρά. Επιπλέον, η απουσία κράνους από τα 2/3 των οδηγών δικύκλων σε ελέγχους στη Μαγνησία καταδεικνύει εύκολη παραβίαση του ΚΟΚ.

Τραγικά περιστατικά, όπως το θανάσιμο τροχαίο με εγκατάλειψη μοτοσικλετιστή το 2023 και η εκτροπή δικύκλου στην οδό Λαρίσης με σοβαρά τραυματισμένο οδηγό τον περασμένο μήνα, αναδεικνύουν τόσο τις επικίνδυνες συνθήκες όσο και την έλλειψη αστυνόμευσης και ενημέρωσης (Proto Thema, 2025).

Τα παραπάνω συνθέτουν την εικόνα μιας πόλης που, παρά τις βελτιώσεις στο οδικό δίκτυο και τις υποδομές, εξακολουθεί να βρίσκεται αντιμέτωπη με θεμελιώδη ζητήματα στη συμπεριφορά των οδηγών, την αστυνόμευση και τη συμμόρφωση με τα μέτρα οδικής ασφάλειας.

3.4.2 ΥΠΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΣΗΜΑΝΣΗ

Η ποιότητα της οδικής υποδομής και της σήμανσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την οδική ασφάλεια στον Βόλο. Παρά τις νέες παρεμβάσεις (κυκλικοί κόμβοι, υπερυψωμένες διαβάσεις), παρατηρούνται σημαντικές ελλείψεις στην καθημερινή χρήση και συντήρηση. Σύμφωνα με τοπικούς φορείς, "η υποδομή υπάρχει, ωστόσο δεν εφαρμόζεται σωστά ο νέος ΚΟΚ, και κάποιοι είναι υπεράνω νόμων και τιμωρίας" (ΤΑΧΥΔΡΟΜΟΣ, 2025).

Σε περιόδους βαρυτικών καιρικών συνθηκών, όπως αυτές που πλήττουν τη Μαγνησία και το Πήλιο, το οδικό δίκτυο παρουσιάζει βλάβες: κατολισθήσεις, πτώσεις πρανών και φερτά υλικά εμποδίζουν την κυκλοφορία, ενώ η σήμανση καταστρέφεται ή είναι ανεπαρκής (Παπακωνσταντίνου, 2024). Τα προβλήματα αυτά μειώνουν την ορθή λειτουργία των κόμβων και των αρτηριών, θέτοντας σε κίνδυνο οδηγούς και πεζούς.

Επιπλέον, η σήμανση εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος παρουσιάζει τοπικά ελλείμματα: σταματημένες ή κρυμμένες πινακίδες, φθαρμένες διαγραμμίσεις και ανεπαρκής φωτεινή σήμανση σε διασταυρώσεις με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο. Αυτά τα προβλήματα συνοδεύονται από φαινόμενα απόσπασης οδηγού, όπως διαφημιστικές πινακίδες που μοιάζουν με επίσημα σήματα και προκαλούν σύγχυση.

Ένα τμήμα του περιφερειακού δικτύου του Δήμου επηρεάζεται από παράνομη ανάπτυξη γύρω από την οδό Διμηνίου–Βόλου–Παλιουρίου, όπου η άναρχη κατασκευή επιχειρήσεων, η έλλειψη πεζοδρομίων με προστατευτικές μπάρες και οι ελλιπείς διαβάσεις καθιστούν την οδό εξαιρετικά επικίνδυνη, με πρόσφατα θανατηφόρα τροχαία (iSTIGMES, 2023).

Σημαντικό πρόβλημα παρουσιάζει ο torrent Κραυσιδώνας, όπου η στενότητα της κοίτης και η τσιμεντόστρωση περιόρισαν την παροχετευτικότητα, με αποτέλεσμα οι γέφυρες του να μπλοκάρονται από φερτά υλικά σε έντονες βροχοπτώσεις, απειλώντας τους οδηγούς και πεζούς στις γύρω οδούς (Παπακωνσταντίνου, 2024).

Τέλος, παρά τις προθέσεις για χρήση συστημάτων ευφυούς διαχείρισης (ITS) στην Περιφέρεια, η εφαρμογή τους παραμένει περιορισμένη και αποσπασματική, χωρίς επαρκή ολοκλήρωση για την αστική ζώνη του Βόλου.

3.5 Θεσμικό πλαίσιο και αρμόδιοι φορείς

Πέρα από τις τεχνικές και συμπεριφορικές παραμέτρους που επηρεάζουν την οδική ασφάλεια, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει και το θεσμικό πλαίσιο, καθώς και οι εμπλεκόμενοι φορείς που είναι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό, την εφαρμογή και την εποπτεία των σχετικών πολιτικών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο.

3.5.1 ΑΡΜΟΔΙΟΙ ΦΟΡΕΙΣ

Η οδική ασφάλεια και η διαχείριση του αστικού οδικού δικτύου του Βόλου εμπίπτουν σε ένα σύνθετο πλέγμα αρμοδιοτήτων μεταξύ διαφόρων φορέων:

1. Δήμος Βόλου

Είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη συντήρηση του δημοτικού οδικού δικτύου, των πεζοδρομίων, των διαβάσεων και της τοπικής σήμανσης. Επιπλέον, μέσω του Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ), που εκπονούν μελέτες υποδομών για πεζούς, ποδήλατα και λεωφορεία, αλλά και προωθούν εκστρατείες ενημέρωσης στην τοπική κοινωνία (Δήμος Βόλου, 2021).

2. Τροχαία Μαγνησίας

Έχει αρμοδιότητα για τον έλεγχο της τάξης και των οδικών κανόνων (Κ.Ο.Κ.), πραγματοποιεί ελέγχους ταχείας ταχύτητας, κράνους και παρενόχλησης λεωφορειολωρίδων, και συντάσσει στατιστικά στοιχεία για τροχαία. Η συνεργασία της με τον Δήμο και την Περιφέρεια αφορά την αξιολόγηση επικίνδυνων διαδρομών και τη δρομολόγηση σημειακών αστυνομικών δράσεων.

3. Περιφέρεια Θεσσαλίας

Ευθύνεται για το επαρχιακό οδικό δίκτυο και τη διασύνδεση με εθνικές οδούς. Χρηματοδοτεί και συντονίζει έργα βελτίωσης υποδομής, συστημάτων ITS και

αποκατάστασης ζημιών από καιρικά φαινόμενα. Στο πλαίσιο του ΣΒΑΚ συμμετέχει στον σχεδιασμό διαδημοτικών παρεμβάσεων (Δήμος Βόλου, 2021).

4. Ι.Ο.ΑΣ. «Πάνος Μυλωνάς» και άλλοι εθνικοί φορείς οδικής ασφάλειας

Συμμετέχουν σε εκπαιδευτικές και ευαισθητοποιητικές δράσεις για μικρούς και μεγάλους, ενώ παρέχουν πρότυπες πρακτικές και ενημέρωση για ορθή χρήση του δρόμου (ασφαλιστική αγορά, 2024).

Συνολικά, το θεσμικό πλαίσιο και οι αρμοδιότητες απλώνονται σε πολλαπλά επίπεδα (τοπικό, περιφερειακό, εθνικό, εκπαιδευτικό), με απαιτήσεις συντονισμού για αποτελεσματική εφαρμογή πολιτικών οδικής ασφάλειας. Οι συνεργασίες μεταξύ αυτών των φορέων είναι καθοριστικές για την αντιμετώπιση των κυκλοφοριακών προκλήσεων του Βόλου.

3.5.2 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΣΧΕΔΙΑ

Ο Δήμος Βόλου έχει εκπονήσει το ΣΒΑΚ, το οποίο βρίσκεται σε στάδιο υλοποίησης και περιλαμβάνει σειρά δημόσιων διαβουλεύσεων με εμπλεκόμενους φορείς και κατοίκους, στο πλαίσιο της διαμόρφωσης ενός ολοκληρωμένου προγραμματισμού κινητικότητας (Δήμος Βόλου, 2021).

Στο στάδιο Ι του ΣΒΑΚ πραγματοποιήθηκε καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, ανάλυση προβλημάτων, και διαμόρφωση κοινού οράματος και στόχων για την πόλη, όπως: βελτίωση της οδικής ασφάλειας, αποσυμφόρηση, ανάπτυξη ήπιων μορφών μετακίνησης, and εισαγωγή ευφών συστημάτων ITS (Δήμος Βόλου, 2019, 2021). Μέχρι στιγμής, οι υφιστάμενες μελέτες περιλαμβάνουν:

- Διεξαγωγή τριών δημόσιων διαβουλεύσεων, με στόχο τη διαμόρφωση σεναρίων και στόχων βασισμένων στα πραγματικά δεδομένα και ανάγκες (~2021).
- Στο Τεύχος Τεχνικών Δεδομένων προβλέπονται μέτρα όπως διαχείριση στάθμευσης, ποδηλατόδρομοι, πεζοδρομήσεις, ασφαλείς διαβάσεις, και κυκλικοί κόμβοι με στόχο αύξηση της οδικής ασφάλειας και της βιώσιμης κινητικότητας στην πόλη.
- Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει όραμα για “Εξυπνη και Βιώσιμη πόλη”, με ενίσχυση των MMM, ποδηλάτου, πεζού, ITS, ηλεκτροκίνησης, και διαχείρισης εμπορευματικών ροών (λιμάνι).

Το ΣΒΑΚ συνδέεται και με άλλα ευρωπαϊκά προγράμματα για αστική κινητικότητα (π.χ. ELTIS, CIVITAS), ενισχύοντας τη χρηματοδότηση και υποστήριξη των παρεμβάσεων (Polyzos, 2020).

3.5.3 ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Η χρηματοδότηση και οι πόροι που διατίθενται για την εφαρμογή του ΣΒΑΚ στον Βόλο, αν και υποστηρίζονται από ευρωπαϊκά και εθνικά προγράμματα, αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς.

Χρηματοδοτικά εργαλεία

- ✓ Ο Δήμος Βόλου έχει εξασφαλίσει χρηματοδότηση μέσω του «Πράσινου Ταμείου» για υποδομές επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (προϋπολογισμός ~3,19 εκ. €), ενώ η σχετική μελέτη φόρτισης συγχρηματοδοτείται από το ΥΠΕΝ (Δήμος Βόλου, 2019, 2023).
- ✓ Επιπλέον, συμμετέχει σε ευρωπαϊκά προγράμματα (ELTIS, Horizon Europe) τα οποία παρέχουν υποστήριξη σε πόλεις με ΣΒΑΚ.
- ✓ Ωστόσο, με τη νομοθετική υποχρέωση εκπόνησης ΣΒΑΚ σε πόλεις άνω των 30.000 κατοίκων, η -πλέον- χρηματοδότηση δεν είναι εξασφαλισμένη, και πολλοί ΟΤΑ θα αναγκαστούν να καλύψουν το κόστος με ίδιους πόρους (Κουκοϊδίδης, 2020).

Περιορισμοί σε πόρους

- Σύμφωνα με διεθνείς οδηγίες για SUMP, η έλλειψη διαρκούς χρηματοδότησης, επάρκειας προσωπικού και τεχνικής εμπειρίας αποτελεί σημαντικό εμπόδιο (Papaioannou et al., 2016).
- Στην ελληνική πραγματικότητα, ο συντονισμός μεταξύ ΣΒΑΚ και άλλων πολεοδομικών σχεδίων είναι περιορισμένος, με κίνδυνο καθυστερήσεων και αλληλοεπικαλύψεων (Polyzos, 2020).

Εμπειρία εκπόνησης και υλοποίησης

- Το ΣΒΑΚ του Βόλου εκπονήθηκε από τοπικούς φορείς και μελετητές με χρηματοδότηση ευρωπαϊκών προγραμμάτων, ωστόσο η συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση εξαρτώνται από την τοπική διοίκηση (Polyzos, 2020).
- Οι διαθέσιμες μελέτες εξαρχής περιλαμβάνουν ανάλυση SWOT και χαρτογράφηση υποδομών, αλλά η εφαρμογή των δράσεων συχνά επισκιάζεται από την έλλειψη πόρων και προσωπικού.

Κεφάλαιο 4 Μεθοδολογία

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών διασταυρώσεων αποτελεί μια πολυπαραγοντική διαδικασία που απαιτεί την ολοκληρωμένη ανάλυση διαφορετικών τύπων δεδομένων και την εφαρμογή προηγμένων στατιστικών και χωρικών μεθόδων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογική προσέγγιση που αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των διασταυρώσεων στην πόλη του Βόλου, η οποία βασίζεται στη δημιουργία σύνθετων δεικτών επικινδυνότητας μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης και την ενσωμάτωση χωρικών αναλύσεων με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

Η επιλεγμένη μεθοδολογία ακολουθεί μια συστηματική προσέγγιση που ξεκινά από την επεξεργασία και τον καθαρισμό των πρωτογενών δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων, συνεχίζει με την ανάπτυξη ειδικών δεικτών κινδύνου για κάθε κατηγορία παραγόντων (σοβαρότητα, ηλικιακές ομάδες, τύπος σύγκρουσης, αίτια), και καταλήγει στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου δείκτη επικινδυνότητας μέσω σταθμισμένης συνδυαστικής βαθμολογίας. Παράλληλα, εφαρμόζονται προηγμένες στατιστικές τεχνικές όπως η ανάλυση συσχετίσεων, η ανάλυση κύριων συνιστωσών, η λογιστική παλινδρόμηση και τα δέντρα αποφάσεων για την επικύρωση των αποτελεσμάτων και την ανάπτυξη προβλεπτικών μοντέλων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χωρική διάσταση της ανάλυσης μέσω της εφαρμογής τεχνικών cluster analysis για την αναγνώριση γεωγραφικών ζωνών κινδύνου και hotspot analysis για τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων επικινδυνότητας. Η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον GIS επιτρέπει την οπτικοποίηση των χωρικών προτύπων επικινδυνότητας και τη δημιουργία θεματικών χαρτών που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων για την ιεράρχηση των παρεμβάσεων. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε είναι επαναληψιμή και προσαρμόσιμη, επιτρέποντας την εφαρμογή της σε παρόμοια αστικά

περιβάλλοντα με τις αναγκαίες τροποποιήσεις βάσει των τοπικών χαρακτηριστικών και της διαθεσιμότητας δεδομένων.

4.1 Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο

Η ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής μεθοδολογίας για την αξιολόγηση επικινδυνότητας διασταυρώσεων προϋποθέτει τη σαφή αιτιολόγηση των επιλογών που γίνονται τόσο σε επίπεδο γενικής προσέγγισης όσο και σε επίπεδο συγκεκριμένων τεχνικών και εργαλείων.

4.1.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών διασταυρώσεων αποτελεί εκ φύσεως ένα πολυδιάστατο πρόβλημα που περιλαμβάνει ετερογενείς παράγοντες με διαφορετικές κλίμακες μέτρησης και σχετική σπουδαιότητα. Η επιλογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) βασίστηκε στην ικανότητά της να ενσωματώνει ταυτόχρονα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια, να διαχειρίζεται την πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων κινδύνου και να παρέχει διαφανείς και επαναληψίμους αλγορίθμους αξιολόγησης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αντικειμενική σύγκριση διαφορετικών σεναρίων κινδύνου και τη δημιουργία ιεραρχημένων καταλόγων προτεραιότητας για τις παρεμβάσεις.

Η σύγκριση με εναλλακτικές προσεγγίσεις όπως η απλή στατιστική ανάλυση συχνότητας ατυχημάτων, η ανάλυση σοβαρότητας (severity analysis) ή οι μέθοδοι προληπτικής αξιολόγησης (proactive methods) αναδεικνύει σημαντικά πλεονεκτήματα της πολυκριτηριακής προσέγγισης. Ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι εστιάζουν σε μονοδιάστατα κριτήρια (π.χ. μόνο τη συχνότητα ή μόνο τη σοβαρότητα), η πολυκριτηριακή ανάλυση επιτρέπει την ολιστική θεώρηση του φαινομένου. Επιπλέον, οι προληπτικές μέθοδοι όπως τα Road Safety Audits, παρότι πολύτιμες, απαιτούν εκτεταμένη εργασία πεδίου και υποκειμενική αξιολόγηση, ενώ η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε αντικειμενικά δεδομένα ατυχημάτων και επιτρέπει τη συστηματική ανάλυση μεγάλου αριθμού διασταυρώσεων.

Η χρήση σύνθετων δεικτών επικινδυνότητας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της ανάλυσης μεμονωμένων παραμέτρων. Πρώτον, επιτρέπει τη συνδυαστική αξιολόγηση πολλών διαφορετικών παραγόντων κινδύνου σε έναν ενιαίο δείκτη, διευκολύνοντας τη σύγκριση και την ιεράρχηση των διασταυρώσεων. Δεύτερον, μέσω της σταθμισμένης βαθμολογίας, επιτρέπει την αντανάκλαση της σχετικής σπουδαιότητας κάθε παράγοντα βάσει της επιστημονικής βιβλιογραφίας και της τοπικής εμπειρίας. Τρίτον, οι

σύνθετοι δείκτες είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε ακραίες τιμές μεμονωμένων παραμέτρων και παρέχουν πιο σταθερά και αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος, διευκολύνουν την επικοινωνία των αποτελεσμάτων προς τους φορείς λήψης αποφάσεων μέσω της απλοποίησης της πολύπλοκης πληροφορίας σε κατανοητές βαθμολογίες και κατηγορίες κινδύνου.

Η ενσωμάτωση της χωρικής διάστασης στη μεθοδολογική προσέγγιση αποτελεί καινοτόμο στοιχείο που προσδίδει επιπλέον αξία στην ανάλυση. Η χωρική ανάλυση επιτρέπει τον εντοπισμό γεωγραφικών προτύπων επικινδυνότητας (spatial clustering), την αναγνώριση hotspots υψηλού κινδύνου και την κατανόηση των χωρικών συσχετίσεων μεταξύ γειτονικών διασταυρώσεων. Μέσω της χρήσης GIS, τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης μετατρέπονται σε χωρικές πληροφορίες που μπορούν να οπτικοποιηθούν σε θεματικούς χάρτες. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει την κατανόηση των χωρικών προτύπων κινδύνου, υποστηρίζει τον χωροταξικό σχεδιασμό παρεμβάσεων και επιτρέπει την ανάλυση της αποτελεσματικότητας των μέτρων βελτίωσης σε γεωγραφικό επίπεδο.

4.1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA) αποτελεί έναν κλάδο της επιχειρησιακής έρευνας που παρέχει ένα δομημένο και συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά, συχνά αντικρουόμενα, κριτήρια. Η ανάγκη για τέτοιες μεθόδους προκύπτει από την πολυπλοκότητα των σύγχρονων προβλημάτων λήψης αποφάσεων, ειδικά σε τομείς όπως οι μεταφορές, η διαχείριση και η μηχανική, όπου οι αποφάσεις επηρεάζουν πολυάριθμους παράγοντες και εμπλεκόμενους φορείς (Yannis et al., 2020). Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους (CBA), που απαιτούν την αποτίμηση όλων των επιπτώσεων σε νομισματικές μονάδες, η MCDA επιτρέπει την ταυτόχρονη συνεκτίμηση ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων, όπως η ασφάλεια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η κοινωνική αποδοχή, καθιστώντας τις αποφάσεις πιο διαφανείς, τεκμηριωμένες και δικαιολογημένες (Więckowski et al., 2023; Yannis et al., 2020).

Η θεμελιώδης δομή μιας πολυκριτηριακής ανάλυσης περιλαμβάνει τον σαφή ορισμό του προβλήματος, τον προσδιορισμό των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων (alternatives) και τη διαμόρφωση ενός συνόλου κριτηρίων αξιολόγησης (criteria). Τα δεδομένα αυτά οργανώνονται σε έναν πίνακα αποφάσεων, όπου κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια εναλλακτική και κάθε στήλη σε ένα κριτήριο (Alemdar et al., 2020). Ένα από τα πιο κρίσιμα και απαιτητικά

στάδια της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας (weights) των κριτηρίων, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν τη σχετική τους σπουδαιότητα στη συνολική απόφαση. Η ανάθεση βαρύτητας είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς τα κριτήρια σε πραγματικά προβλήματα σπανίως έχουν την ίδια σημασία, και η επιλογή των συντελεστών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική κατάταξη των εναλλακτικών (Nenadić, 2019). Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη χρήση μιας μεθόδου συaggregation, η οποία συνδυάζει τις επιδόσεις των εναλλακτικών και τη βαρύτητα των κριτηρίων για να παραγάγει μια τελική κατάταξη ή μια βέλτιστη λύση.

Οι μέθοδοι MCDA μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Η πρώτη κατηγορία, γνωστή ως Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων με Πολλαπλά Γνωρίσματα (Multiple-Attribute Decision-Making - MADM), εφαρμόζεται σε προβλήματα με έναν πεπερασμένο και διακριτό αριθμό προκαθορισμένων εναλλακτικών λύσεων. Αυτή είναι και η πιο διαδεδομένη κατηγορία στον τομέα των μεταφορών, με μεθόδους όπως οι AHP, VIKOR, TOPSIS, WASPAS και MABAC να χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση έργων, πολιτικών και τεχνολογιών. Η δεύτερη κατηγορία, γνωστή ως Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων με Πολλαπλούς Στόχους (Multiple-Objective Decision-Making - MODM), αφορά προβλήματα βελτιστοποίησης όπου οι εναλλακτικές λύσεις δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές και αντλούνται από ένα συνεχές ή πολύ μεγάλο σύνολο δυνατοτήτων (Yannis et al., 2020).

Ο προσδιορισμός της βαρύτητας των κριτηρίων μπορεί να γίνει μέσω υποκειμενικών ή αντικειμενικών μεθόδων. Οι υποκειμενικές μέθοδοι, όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), βασίζονται στις προτιμήσεις και την κρίση ειδικών ή των φορέων λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας την ενσωμάτωση πολιτικών προτεραιοτήτων και εμπειρικής γνώσης. Από την άλλη, οι αντικειμενικές μέθοδοι, όπως η CRITIC, υπολογίζουν τη βαρύτητα αποκλειστικά από τις μαθηματικές ιδιότητες των δεδομένων του πίνακα αποφάσεων, όπως η διασπορά και η συσχέτιση μεταξύ των κριτηρίων, μειώνοντας την υποκειμενική μεροληψία (H. Cui et al., 2023). Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου στάθμισης εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος και τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων και κρίσεων.

Τέλος, για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, ένα αναπόσπαστο μέρος της θεωρίας της MCDA είναι η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis). Η ανάλυση αυτή εξετάζει την ευρωστία (robustness) της τελικής κατάταξης σε σχέση με τις μεταβολές των παραμέτρων εισόδου, όπως οι συντελεστές

βαρύτητας των κριτηρίων ή οι τιμές των επιδόσεων των εναλλακτικών (Więckowski & Sałabun, 2023). Η διαδικασία αυτή αποκαλύπτει ποια κριτήρια επηρεάζουν περισσότερο την τελική απόφαση και αυξάνει την εμπιστοσύνη του λήπτη της απόφασης στο αποτέλεσμα, καθώς επιβεβαιώνει ότι η προτεινόμενη λύση παραμένει η βέλτιστη ακόμη και κάτω από διαφορετικές συνθήκες ή παραδοχές (Alemdar et al., 2020). Προηγμένες τεχνικές, όπως η προσομοίωση Monte Carlo, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν περαιτέρω τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των αποφάσεων, ειδικά όταν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα (H. Cui et al., 2023).

4.2 Προετοιμασία δεδομένων

Η επιτυχημένη εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας επικινδυνότητας εξαρτάται κρίσιμα από την ποιότητα, την πληρότητα και την κατάλληλη προετοιμασία των δεδομένων που θα αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη των δεικτών κινδύνου.

4.2.1 ΠΗΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την έρευνα βασίζεται σε επίσημες καταγραφές τροχαίων ατυχημάτων στον Βόλο. Περιλαμβάνει αναλυτικές πληροφορίες για κάθε περιστατικό, όπως την ημερομηνία, την ώρα και τη θέση του ατυχήματος, τα εμπλεκόμενα οχήματα και άτομα, τις καιρικές συνθήκες, καθώς και τις συνέπειες σε επίπεδο τραυματισμών και υλικών ζημιών. Η δομή των δεδομένων ακολουθεί τα πρότυπα που χρησιμοποιούν οι αρμόδιες αρχές, με κωδικοποιημένες κατηγορίες για παράγοντες όπως τα αίτια του ατυχήματος, ο τύπος σύγκρουσης και οι ηλικιακές ομάδες των εμπλεκομένων.

Τα δεδομένα προέρχονται από επίσημες πηγές, γεγονός που εγγυάται την αξιοπιστία και τη συνέπεια στην καταγραφή. Συλλέγονται συστηματικά από την Ελληνική Αστυνομία (Τμήμα Τροχαίας) μέσω τυποποιημένων διαδικασιών και εντύπων, διασφαλίζοντας την ομοιομορφία των πληροφοριών. Η ακρίβεια τους ενισχύεται και από το ότι η καταγραφή τροχαίων ατυχημάτων αποτελεί νομική υποχρέωση, η οποία συνοδεύεται από επιτόπια διερεύνηση, μαρτυρίες και λεπτομερή τεκμηρίωση των συνθηκών κάθε περιστατικού.

Η μελέτη καλύπτει μια πενταετία, από το 2019 έως το 2023. Η επιλογή αυτής της περιόδου εξασφαλίζει επαρκές δείγμα για την εξαγωγή στατιστικά αξιόπιστων συμπερασμάτων, ενώ αποτυπώνει τις σύγχρονες συνθήκες κυκλοφορίας και οδικής ασφάλειας. Επιπλέον, περιλαμβάνει τόσο την κανονική λειτουργία της πόλης όσο και την ιδιαίτερη περίοδο

της πανδημίας COVID-19 (2020–2021), παρέχοντας έτσι μια πιο σφαιρική εικόνα των προτύπων κινδύνου σε διαφορετικά περιβάλλοντα κυκλοφοριακής ζήτησης.

Το dataset καλύπτει ολόκληρη την αστική περιοχή του Βόλου: το κέντρο της πόλης, τις συνοικίες γύρω από αυτό, καθώς και τις βασικές οδικές αρτηρίες που τη συνδέουν με το υπόλοιπο δίκτυο. Για κάθε ατύχημα καταγράφονται γεωγραφικές συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος και πλάτος), γεγονός που επιτρέπει ακριβή χωρική αποτύπωση και ανάλυση. Η κάλυψη είναι ισόρροπη σε όλη την πόλη, χωρίς σημαντικές γεωγραφικές παραμορφώσεις, κάτι που καθιστά το dataset κατάλληλο για χωρικές μελέτες και τη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας για το σύνολο της αστικής περιοχής.

4.2.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ DATASET

Η δομή του dataset αποτελείται από ένα σύνθετο σύνολο μεταβλητών, οι οποίες καλύπτουν όλες τις βασικές διαστάσεις των τροχαίων ατυχημάτων. Το αρχείο περιλαμβάνει συνολικά 191 καταγεγραμμένα περιστατικά, με κάθε εγγραφή να περιέχει 12 κύριες μεταβλητές που αποτυπώνουν τόσο τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος όσο και τις συνέπειές του. Μεταξύ αυτών βρίσκονται ο μοναδικός κωδικός αναγνώρισης (ID), η περιγραφή του σημείου του ατυχήματος, τα εμπλεκόμενα οχήματα, οι καιρικές συνθήκες, καθώς και οι συνέπειες σε επίπεδο υλικών ζημιών, τραυματισμών και θανάτων.

Όσον αφορά τους τύπους δεδομένων, το dataset παρουσιάζει ετερογένεια που αντανακλά την πολυπλοκότητα του φαινομένου. Οι αριθμητικές μεταβλητές περιλαμβάνουν τις γεωγραφικές συντεταγμένες και τον αριθμό των θυμάτων (νεκρών, τραυματιών), ενώ οι κατηγορικές μεταβλητές σχετίζονται με τον τύπο σύγκρουσης, τα αίτια του ατυχήματος και τις ηλικιακές ομάδες των εμπλεκόμενων. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι ότι ορισμένες μεταβλητές τύπου string μπορούν να περιλαμβάνουν πολλαπλές τιμές σε μία μόνο καταχώρηση· για παράδειγμα, η μεταβλητή των ηλικιακών ομάδων μπορεί να έχει τιμή "1,3", όταν εμπλέκονται άτομα από διαφορετικές ηλικιακές κατηγορίες.

Η ποιότητα των δεδομένων είναι γενικά υψηλή, με καλά επίπεδα πληρότητας. Ωστόσο, υπάρχουν και εξαιρέσεις: η μεταβλητή που αφορά την ημερομηνία του ατυχήματος παρουσιάζει αρκετά κενά, περιορίζοντας έτσι τη δυνατότητα λεπτομερούς χρονικής ανάλυσης. Αντίθετα, οι κρίσιμες μεταβλητές που σχετίζονται με τη σοβαρότητα, τη θέση και τα χαρακτηριστικά της σύγκρουσης είναι σχεδόν πλήρεις, γεγονός που επιτρέπει αξιόπιστη εκτίμηση δεικτών επικινδυνότητας.

4.2.3 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ DATASET

Η προεπεξεργασία των δεδομένων αποτέλεσε κρίσιμο βήμα για τη διασφάλιση της ποιότητας και της καταλληλότητας του dataset πριν από τη στατιστική ανάλυση. Η διαδικασία χωρίστηκε σε δύο κύριες φάσεις: τον καθαρισμό και την τυποποίηση των δεδομένων και την εξαγωγή γεωγραφικών συντεταγμένων μέσω γεωκωδικοποίησης.

Στην πρώτη φάση, ο στόχος ήταν ο καθαρισμός και η ενοποίηση της δομής του dataset. Συγχωνεύτηκαν δύο διαφορετικά αρχεία δεδομένων, όπου η στήλη «ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ» ενσωματώθηκε στη μεταβλητή «ΘΕΣΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ», ώστε κάθε εγγραφή να διαθέτει πλήρη γεωγραφική πληροφορία. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν οι περιττές στήλες και γραμμές που περιείχαν μόνο κενές τιμές (NaN), ενώ διορθώθηκαν λανθασμένες εγγραφές στη γεωγραφική περιγραφή. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε τυποποίηση του κειμένου, αντικαθιστώντας το «με» με «και» στις περιγραφές των θέσεων, για λόγους συνέπειας.

Η δεύτερη φάση περιλάμβανε τη γεωκωδικοποίηση των διευθύνσεων μέσω του QGIS, ώστε να εξαχθούν με ακρίβεια οι γεωγραφικές συντεταγμένες (X και Y) για κάθε σημείο ατυχήματος. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με το σύστημα αναφοράς WGS84 (EPSG:4326), διασφαλίζοντας τη συμβατότητα με διεθνή γεωγραφικά πρότυπα και καθιστώντας εφικτή την επακόλουθη χωρική ανάλυση και τη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας.

Στην τελική φάση, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μεταβλητή «ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΘΟΝΤΩΝ», η οποία περιείχε περιγραφικό κείμενο. Με χρήση regular expressions, οι πληροφορίες εξήχθησαν και χωρίστηκαν σε δύο νέες αριθμητικές μεταβλητές: «ΤΡΑΥΜΑΤΙΕΣ» και «ΝΕΚΡΟΙ». Παράλληλα, η μεταβλητή «ΥΛΙΚΕΣ ΖΗΜΙΕΣ» κωδικοποιήθηκε αριθμητικά με βάση τον αριθμό των εμπλεκόμενων οχημάτων, σε κλίμακα από 0 (καμία ζημιά) έως 3 (τρεις ζημιωθέντες οχήματα). Επιπλέον βήματα περιλάμβαναν:

- Τυποποίηση της μεταβλητής «ΗΛΙΚΙΑΚΗ ΟΜΑΔΑ», με την εισαγωγή κενών ανάμεσα σε συνεχόμενα ψηφία, ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση περιπτώσεων με πολλαπλές ηλικιακές ομάδες.
- Μετατροπή της μεταβλητής «ΚΑΙΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ» σε αριθμητικό δείκτη επικινδυνότητας, με κλίμακα 0 (καλοκαιρία) έως 3 (καταιγίδα/χιονόπτωση).
- Καθαρισμό της μεταβλητής «ΤΥΠΟΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ», με αντικατάσταση των κομμάτων με κενά για συνέπεια στη γραφή.

Τέλος, η διάταξη του dataset αναδιοργανώθηκε, ώστε οι γεωγραφικές συντεταγμένες X και Y να τοποθετηθούν στο τέλος των στηλών, διευκολύνοντας την εισαγωγή στο στατιστικό περιβάλλον SPSS και την περαιτέρω ανάλυση.

4.2.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ SPSS

Η εισαγωγή του προεπεξεργασμένου dataset στο στατιστικό περιβάλλον SPSS πραγματοποιήθηκε μέσω της λειτουργίας Text Import Wizard, η οποία επιτρέπει τη μετατροπή αρχείων CSV σε μορφή συμβατή με το λογισμικό. Κατά τη διαδικασία αυτή, ορίστηκε το κόμμα ως delimiter, χρησιμοποιήθηκαν τα διπλά εισαγωγικά ως text qualifier και ενεργοποιήθηκε η επιλογή αυτόματης αναγνώρισης των ονομάτων μεταβλητών από την πρώτη γραμμή του αρχείου.

Αμέσως μετά, ακολούθησε αναλυτικός έλεγχος της ακεραιότητας των δεδομένων, μέσα από τα περιβάλλοντα Variable View και Data View του SPSS. Στο Variable View επιβεβαιώθηκαν τα ονόματα, οι τύποι δεδομένων και οι ετικέτες των μεταβλητών, ενώ στο Data View πραγματοποιήθηκε έλεγχος για ακραίες τιμές, κενές καταχωρήσεις (missing values) και άλλα πιθανά προβλήματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ανάλυση. Σε αυτό το στάδιο εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν στήλες με υψηλό ποσοστό κενών τιμών, όπως οι μεταβλητές που σχετίζονταν με τις ημερομηνίες.

Για την ονοματοδοσία των μεταβλητών υιοθετήθηκε μια συνεπής και εργονομική προσέγγιση, με στόχο τη διευκόλυνση της ανάλυσης και την ευθυγράμμιση με διεθνείς πρακτικές. Έτσι, οι αρχικές ελληνικές ονομασίες όπως «ΑΑ/ΑΑ», «ΘΕΣΗ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ», «ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ» και «ΚΑΙΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ» μετονομάστηκαν σε «ID», «Location», «VehicleType» και «Season». Αντίστοιχα, οι νέες μεταβλητές που δημιουργήθηκαν κατά την προεπεξεργασία, όπως «ΥΛΙΚΕΣ ΖΗΜΙΕΣ», «ΤΡΑΥΜΑΤΙΕΣ» και «ΝΕΚΡΟΙ», μετονομάστηκαν σε «MaterialDamage», «Injuries» και «Deaths».

Ειδική μέριμνα δόθηκε στη διαχείριση των σύνθετων κατηγορικών μεταβλητών, οι οποίες περιείχαν πολλαπλές τιμές σε μία καταχώρηση. Μεταβλητές όπως ο «ΤΥΠΟΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ», η «ΗΛΙΚΙΑΚΗ ΟΜΑΔΑ» και τα «ΑΙΤΙΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ» κωδικοποιήθηκαν αριθμητικά και αποδόθηκαν ως «CollisionType», «AgeGroup» και «CauseCode», ώστε κάθε κατηγορία να αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο κωδικό. Η

πολυπλοκότητα αυτών των μεταβλητών απαιτούσε την ανάπτυξη ειδικών τεχνικών επεξεργασίας, οι οποίες θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες της μεθοδολογίας.

Τέλος, η δομή του dataset αναδιοργανώθηκε ώστε οι γεωγραφικές συντεταγμένες «X» και «Y» να μετονομαστούν σε «Longitude» και «Latitude» και να τοποθετηθούν στο τέλος του πίνακα δεδομένων. Αυτή η διάταξη διευκολύνει τόσο τη στατιστική ανάλυση στο SPSS όσο και την εξαγωγή των δεδομένων για χωρικές αναλύσεις σε περιβάλλον GIS. Το τελικό dataset περιλαμβάνει 191 παρατηρήσεις και 12 κύριες μεταβλητές, αποτελώντας μια πλήρη και αξιόπιστη βάση για την ανάπτυξη δεικτών επικινδυνότητας.

4.3 Ανάπτυξη δεικτών επικινδυνότητας

Η μετάβαση από τα προεπεξεργασμένα δεδομένα στην ανάπτυξη δεικτών επικινδυνότητας αποτελεί το κομβικό στάδιο της μεθοδολογίας. Σε αυτό το σημείο, οι αρχικές πληροφορίες μετατρέπονται σε ποσοτικοποιημένες μετρήσεις κινδύνου, οι οποίες επιτρέπουν μια πιο αντικειμενική αξιολόγηση και σύγκριση των ατυχημάτων.

4.3.1 ΒΑΣΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑΣ (SEVERITY SCORE)

Ο δείκτης σοβαρότητας αποτελεί τον θεμελιώδη πυλώνα της μεθοδολογίας αξιολόγησης επικινδυνότητας, καθώς αντικατοπτρίζει άμεσα τις πραγματικές συνέπειες κάθε ατυχήματος σε ανθρώπινο και υλικό επίπεδο. Η ανάπτυξή του βασίστηκε στη δημιουργία ενός σταθμισμένου συστήματος βαθμολογίας που εκφράζεται μέσω του τύπου: $SeverityScore = Deaths \times 10 + Injuries \times 5 + MaterialDamage \times 1$. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη συνδυαστική αξιολόγηση όλων των τύπων επιπτώσεων σε μία ενιαία μετρική, διευκολύνοντας την ταξινόμηση των ατυχημάτων κατά σοβαρότητα.

4.3.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΗΛΙΚΙΑΚΩΝ ΟΜΑΔΩΝ (AGE RISK SCORE)

Η ανάπτυξη του δείκτη κινδύνου για τις ηλικιακές ομάδες αποτέλεσε μια από τις πιο απαιτητικές διαδικασίες, καθώς έπρεπε να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα μεταβλητών τύπου string με πολλαπλές τιμές στην ίδια καταχώρηση. Η μεταβλητή AgeGroup περιλάμβανε συνδυασμούς κωδικών όπως "1,3" ή "2,4", οι οποίοι αντιστοιχούσαν σε ατυχήματα όπου εμπλέκονταν άτομα από διαφορετικές ηλικιακές κατηγορίες. Για την επεξεργασία τους αναπτύχθηκαν εξειδικευμένες τεχνικές ανάλυσης κειμένου στο περιβάλλον SPSS.

Η μεθοδολογική προσέγγιση στηρίχθηκε στη χρήση της συνάρτησης CHAR.INDEX, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό χαρακτήρων ή υποσυμβολοσειρών μέσα σε μεγαλύτερα strings. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν λογικές (boolean) εκφράσεις που έλεγχαν αν ένας συγκεκριμένος κωδικός ηλικιακής ομάδας υπήρχε στην καταχώρηση. Η κατηγοριοποίηση του κινδύνου ανά ηλικιακή ομάδα έγινε ως εξής:

- Η ομάδα 18–25 ετών (κωδ. 1) έλαβε συντελεστή κινδύνου 4, καθώς οι νεαροί οδηγοί εμφανίζουν συχνότερη εμπλοκή σε ατυχήματα λόγω απειρίας, ροπής προς επικίνδυνη οδήγηση και ψυχοκοινωνικών παραγόντων.
- Η ομάδα 25–50 ετών (κωδ. 2) κατατάχθηκε με συντελεστή 2, ως η πιο έμπειρη και σταθερή κατηγορία οδηγών.
- Η ομάδα 50–70 ετών (κωδ. 3) έλαβε τον χαμηλότερο συντελεστή, 1, αντικατοπτρίζοντας τη γενικά προσεκτική οδηγική συμπεριφορά.
- Η ομάδα άνω των 70 ετών (κωδ. 4) αντιστοιχίστηκε με συντελεστή 3, λόγω των μειωμένων αντιδραστικών ικανοτήτων, των φθινουσών αισθητηριακών λειτουργιών και της φυσικής επιβάρυνσης που συνδέεται με την προχωρημένη ηλικία.

Ο υπολογισμός του συνολικού δείκτη κινδύνου σε ατυχήματα με εμπλοκή πολλών ηλικιακών ομάδων έγινε με τη χρήση της συνάρτησης MAX, η οποία επιλέγει τον υψηλότερο συντελεστή κινδύνου από όλες τις εμπλεκόμενες κατηγορίες. Η λογική πίσω από αυτή την επιλογή είναι ότι η συνολική επικινδυνότητα καθορίζεται κυρίως από την πιο ριψοκίνδυνη ομάδα που συμμετέχει στο ατύχημα.

Ο τελικός τύπος που εφαρμόστηκε είχε τη μορφή:

$$\begin{aligned}
 &AgeRiskScore \\
 &= \max((CHAR.INDEX(AgeGroup,1) > 0) \\
 &\quad \times 4, (CHAR.INDEX(AgeGroup,2) > 0) \\
 &\quad \times 2, (CHAR.INDEX(AgeGroup,3) > 0) \\
 &\quad \times 1, (CHAR.INDEX(AgeGroup,4) > 0) \times 3)
 \end{aligned}$$

4.3.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ (COLLISION RISK SCORE)

Ο δείκτης κινδύνου τύπου σύγκρουσης αναπτύχθηκε ώστε να αξιοποιεί την κρίσιμη πληροφορία που περιέχεται στον τρόπο εκδήλωσης κάθε ατυχήματος, καθώς είναι γνωστό ότι οι διαφορετικοί τύποι συγκρούσεων συνδέονται με διακριτά επίπεδα επικινδυνότητας και

σοβαρότητας συνεπειών. Η μεθοδολογική προσέγγιση στηρίχθηκε σε ευρήματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, όπου αναλύεται η σχέση μεταξύ τύπου σύγκρουσης και επιπτώσεων, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ταχύτητα εμπλοκής, η γωνία πρόσκρουσης και η ευαλωτότητα των εμπλεκομένων.

Η κωδικοποίηση υλοποιήθηκε μέσω της τεχνικής Recode Into Different Variables στο SPSS, η οποία επιτρέπει τη μετατροπή κατηγορικών μεταβλητών σε αριθμητικές τιμές επικινδυνότητας. Κάθε κωδικός της αρχικής μεταβλητής CollisionType αντιστοιχίστηκε σε μία αριθμητική βαθμολογία που αποτυπώνει τον σχετικό κίνδυνο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε μια αντικειμενική και επαναλήψιμη διαδικασία, αποφεύγοντας την πιθανή υποκειμενικότητα μιας χειροκίνητης ταξινόμησης.

Η βαθμολογική κλίμακα κυμαίνεται από 2 έως 5:

- **5:** Συγκρούσεις με πεζούς – η πιο επικίνδυνη κατηγορία λόγω της ακραίας ευαλωτότητας των πεζών και της υψηλής πιθανότητας σοβαρών τραυματισμών ή θανάτου.
- **4:** Πλαγιομετωπικές συγκρούσεις, συγκρούσεις με σταθερό εμπόδιο και εκτροπές – κατηγορίες με ιδιαίτερα αυξημένη επικινδυνότητα, κυρίως λόγω υψηλών ταχυτήτων εμπλοκής και δυσμενών γωνιών πρόσκρουσης.
- **3:** Μετωπικές και πλάγιες συγκρούσεις – παραμένουν σοβαρές, αλλά τείνουν να συμβαίνουν σε χαμηλότερες ταχύτητες στο αστικό περιβάλλον.
- **2:** Οπίσθιες συγκρούσεις – η λιγότερο επικίνδυνη κατηγορία, καθώς προκαλούν συνήθως ηπιότερους τραυματισμούς, χάρη τόσο στις χαμηλότερες ταχύτητες όσο και στην προστατευτική δομή των οχημάτων στο πίσω μέρος.

Η τεκμηρίωση αυτής της κατηγοριοποίησης υποστηρίζεται από εκτεταμένες αναλύσεις δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων που καταδεικνύουν σαφείς διαφορές στη σοβαρότητα των συνεπειών ανάλογα με τον τύπο σύγκρουσης.

Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στις περιπτώσεις όπου η μεταβλητή CollisionType περιείχε πολλαπλούς κωδικούς, υποδηλώνοντας σύνθετα ατυχήματα με περισσότερες από μία φάσεις σύγκρουσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόστηκε η αρχή του μέγιστου κινδύνου: η συνολική βαθμολογία αντιστοιχεί στον τύπο σύγκρουσης με την υψηλότερη επικινδυνότητα. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η σοβαρότητα σύνθετων ατυχημάτων δεν υποεκτιμάται και ότι αποτυπώνεται επαρκώς η πιο κρίσιμη φάση του συμβάντος.

4.3.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΙΤΙΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ (CAUSE RISK SCORE)

Ο δείκτης κινδύνου αιτίας ατυχήματος αναπτύχθηκε για να αξιολογήσει τη σχετική επικινδυνότητα των διαφόρων παραγόντων που συμβάλλουν στην πρόκληση τροχαίων ατυχημάτων, αναγνωρίζοντας ότι ορισμένες αιτίες συνδέονται με υψηλότερη πιθανότητα σοβαρών συνεπειών. Η μεταβλητή "CauseCode" παρουσίαζε παρόμοια πολυπλοκότητα με τις ηλικιακές ομάδες, περιλαμβάνοντας πολλαπλές αιτίες σε μία καταχώρηση μέσω αριθμητικών κωδικών διαχωρισμένων με κόμματα. Αυτή η δομή απαιτούσε την εφαρμογή της ίδιας τεχνικής επεξεργασίας string variables με χρήση των συναρτήσεων CHAR.INDEX για τον εντοπισμό κάθε συγκεκριμένου αιτίου εντός της σύνθετης καταχώρησης.

Τα αίτια που σχετίζονται με αλκοόλ και ουσίες (κωδικός 3) καθώς και η υπερβολική ταχύτητα (κωδικός 2) έλαβαν την υψηλότερη βαθμολογία κινδύνου (5), αναγνωρίζοντας τις καταστροφικές συνέπειες που συνήθως προκαλούν. Η κατάχρηση αλκοόλ και ουσιών επηρεάζει κρίσιμες οδηγικές ικανότητες όπως τους χρόνους αντίδρασης, την κρίση και τον συντονισμό, ενώ η υπερβολική ταχύτητα αυξάνει εκθετικά τη σοβαρότητα των συγκρούσεων λόγω της κινητικής ενέργειας που εμπλέκεται.

Οι παραβιάσεις προτεραιότητας (κωδικός 1) και η απροσεξία οδηγών (κωδικός 4) βαθμολογήθηκαν με 4, καθώς αποτελούν σημαντικές αιτίες ατυχημάτων ιδιαίτερα στις διασταυρώσεις όπου η σωστή εφαρμογή των κανόνων προτεραιότητας είναι κρίσιμη για την ασφάλεια. Η απροσεξία, που μπορεί να περιλαμβάνει παράγοντες όπως η χρήση κινητών τηλεφώνων, η κόπωση ή η απλή έλλειψη προσοχής, αποτελεί έναν από τους πιο συχνούς παράγοντες σε αστικά ατυχήματα. Η κακή σήμανση και τα προβλήματα οδικής υποδομής (κωδικός 4) έλαβαν βαθμολογία 3, αναγνωρίζοντας ότι παρότι δεν αποτελούν άμεσες συμπεριφορικές αιτίες, συμβάλλουν στη δημιουργία συνθηκών που ευνοούν την πρόκληση ατυχημάτων.

Ο υπολογισμός του συνολικού δείκτη κινδύνου αιτίας ακολούθησε την ίδια λογική με τον ηλικιακό δείκτη, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση MAX για την επιλογή της υψηλότερης βαθμολογίας κινδύνου μεταξύ όλων των καταγεγραμμένων αιτιών. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην αρχή ότι η επικινδυνότητα ενός ατυχήματος καθορίζεται από το πιο σοβαρό αίτιο που συνέβαλε στην πρόκλησή του. Ο μαθηματικός τύπος εφαρμογής περιλαμβάνει όλες τις πιθανές συνδυασμούς αιτιών:

$$\text{CauseRiskScore} = \begin{aligned} & \text{MAX}(\text{CHAR.INDEX}(\text{CauseCode}, "1") > 0 \times 4, \\ & \text{CHAR.INDEX}(\text{CauseCode}, "2") > 0 \times 5, \quad \text{CHAR.INDEX}(\text{CauseCode}, "3") > 0 \times 5, \end{aligned}$$

CHAR.INDEX(CauseCode,"4")>0×3, κ.λπ.) για όλους τους κωδικούς αιτιών που περιλαμβάνονται στο dataset.

Η μεθοδολογία επεξεργασίας πολλαπλών αιτιών αντιμετωπίζει την πραγματικότητα ότι τα περισσότερα τροχαία ατυχήματα είναι αποτέλεσμα συνδυασμού παραγόντων παρά μεμονωμένων αιτιών. Ωστόσο, η επιλογή του μέγιστου κινδύνου εξασφαλίζει ότι δεν υποεκτιμάται η σοβαρότητα ατυχημάτων όπου εμπλέκονται κρίσιμοι παράγοντες όπως το αλκοόλ ή η υπερβολική ταχύτητα, ακόμη και όταν συνυπάρχουν με λιγότερο σοβαρές αιτίες.

4.4 Σύνθετος Δείκτης Επικινδυνότητας (Comprehensive Risk Index)

Η συνδυαστική αξιολόγηση των επιμέρους δεικτών κινδύνου σε έναν ενιαίο σύνθετο δείκτη αποτελεί το καθοριστικό στάδιο της μεθοδολογίας, καθώς συγκεντρώνει την πολυδιάστατη φύση της επικινδυνότητας σε μία ενιαία, κατανοητή και πρακτικά αξιοποιήσιμη μετρική για τη λήψη αποφάσεων.

4.4.1 WEIGHTED SCORING SYSTEM

Η ανάπτυξη του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας βασίστηκε σε ένα προσεκτικά σχεδιασμένο σύστημα σταθμισμένης βαθμολογίας που λαμβάνει υπόψη τη σχετική σπουδαιότητα κάθε παράγοντα κινδύνου στη συνολική αξιολόγηση. Ο μαθηματικός τύπος που εφαρμόστηκε έχει τη μορφή: $\text{ComprehensiveRiskIndex} = (\text{SeverityScore} \times 0.4) + (\text{AgeRiskScore} \times 0.2) + (\text{CollisionRiskScore} \times 0.25) + (\text{CauseRiskScore} \times 0.15)$. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι κάθε διάσταση του κινδύνου συμβάλλει στο συνολικό αποτέλεσμα ανάλογα με τη σπουδαιότητά της, ενώ παράλληλα διατηρεί την ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών παραγόντων.

4.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Ο συντελεστής 0.4 για τη σοβαρότητα αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι πραγματικές συνέπειες ενός ατυχήματος αποτελούν τον πιο άμεσο και αντικειμενικό δείκτη της επικινδυνότητάς του. Η σοβαρότητα είναι το μόνο κριτήριο που μπορεί να μετρηθεί απολύτως και δεν υπόκειται σε υποκειμενικές ερμηνείες, καθιστώντας το τη βάση για την αξιολόγηση. Ο συντελεστής 0.25 για τον τύπο σύγκρουσης αναγνωρίζει τη σημαντική πληροφορία που

περιέχεται στον τρόπο εκδήλωσης του ατυχήματος, καθώς διαφορετικοί τύποι συγκρούσεων συνδέονται με διαφορετικές πιθανότητες επανάληψης και δυσκολία πρόληψης.

Ο συντελεστής 0.2 για τις ηλικιακές ομάδες αντανακλά τη σημασία του ανθρώπινου παράγοντα στην αξιολόγηση κινδύνου, ενώ παραμένει σε λογικά όρια καθώς η ηλικία από μόνη της δεν καθορίζει την επικινδυνότητα αλλά συμβάλλει σε αυτήν. Ο χαμηλότερος συντελεστής 0.15 για τα αίτια ατυχημάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η καταγραφή των αιτιών συχνά περιλαμβάνει στοιχεία υποκειμενικότητας και μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα μαρτύρων ή η πολυπλοκότητα του συμβάντος. Παρά τη σημασία των αιτιών για την κατανόηση των ατυχημάτων, η βαθμολογία τους πρέπει να αντιμετωπίζεται με μεγαλύτερη προσοχή.

4.5 Στατιστική ανάλυση και μοντελοποίηση

Η δημιουργία του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας αποτελεί μόνο το πρώτο βήμα της ανάλυσης. Για να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία και η χρησιμότητά του, αλλά και για να κατανοηθούν καλύτερα οι υποκείμενες στατιστικές σχέσεις, απαιτείται η εφαρμογή προηγμένων στατιστικών τεχνικών και η ανάπτυξη προβλεπτικών μοντέλων, τα οποία θα επιτρέψουν τη γενίκευση των αποτελεσμάτων.

4.5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ (CORRELATION ANALYSIS)

Η ανάλυση συσχετίσεων αποτελεί βασικό στάδιο για την κατανόηση των σχέσεων ανάμεσα στους επιμέρους δείκτες κινδύνου και τον σύνθετο δείκτη επικινδυνότητας. Η χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson επιτρέπει την αποτίμηση της γραμμικής σχέσης μεταξύ όλων των ζευγών μεταβλητών, παρέχοντας ποσοτικές ενδείξεις για την ένταση και την κατεύθυνση των συσχετίσεων. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό ενός πίνακα συσχετίσεων (correlation matrix) που παρουσιάζει τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών SeverityScore, AgeRiskScore, CollisionRiskScore, CauseRiskScore και ComprehensiveRiskIndex.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο SPSS μέσω της διαδρομής Analyze → Correlate → Bivariate, με την επιλογή του Pearson correlation coefficient και δισπλεύριο έλεγχο στατιστικής σημαντικότητας. Έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό ισχυρών συσχετίσεων, καθώς η ύπαρξη πολυσυγγραμμικότητας (multicollinearity) ανάμεσα σε ανεξάρτητες μεταβλητές μπορεί να περιορίσει την αξιοπιστία των επόμενων στατιστικών μοντέλων. Η ερμηνεία των

αποτελεσμάτων στηρίχθηκε τόσο στη στατιστική σημαντικότητα όσο και στη θεωρητική και πρακτική σημασία των σχέσεων, επιτρέποντας τη διάκριση ανάμεσα σε αναμενόμενα και μη αναμενόμενα μοτίβα.

Για τη διευκόλυνση της ερμηνείας, τα αποτελέσματα οπτικοποιήθηκαν με heatmaps των πινάκων συσχετίσεων, τα οποία επιτρέπουν την άμεση αναγνώριση των πιο έντονων σχέσεων. Η ανάλυση επεκτάθηκε και στη διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ των δεικτών κινδύνου και χωρικών χαρακτηριστικών, όπως οι γεωγραφικές συντεταγμένες, ώστε να εντοπιστούν πιθανά πρότυπα επικινδυνότητας με γεωγραφική διάσταση.

Τέλος, η στατιστική σημαντικότητα αξιολογήθηκε με το όριο $p < 0.05$, ενώ η πρακτική σημασία εκτιμήθηκε βάσει του μεγέθους των συντελεστών συσχέτισης και της θεωρητικής συνάφειας των σχέσεων που αναδείχθηκαν.

4.5.2 PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS (PCA)

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών εφαρμόστηκε για την εξερεύνηση της διαστατικότητας των δεδομένων και τον εντοπισμό των υποκείμενων παραγόντων που εξηγούν τη μεγαλύτερη διακύμανση στους δείκτες επικινδυνότητας. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε στη factor analysis με χρήση της μεθόδου Principal Components extraction, η οποία επιτρέπει τη μείωση της διαστατικότητας των δεδομένων διατηρώντας όσο το δυνατόν περισσότερη από την αρχική πληροφορία. Η διαδικασία εκτελέστηκε μέσω του μενού Analyze → Dimension Reduction → Factor του SPSS, περιλαμβάνοντας όλες τις βασικές μεταβλητές κινδύνου: SeverityScore, AgeRiskScore, CollisionRiskScore και CauseRiskScore.

Ο καθορισμός του αριθμού των κύριων συνιστωσών που θα διατηρηθούν βασίστηκε σε πολλαπλά κριτήρια, συμπεριλαμβανομένου του κριτηρίου Kaiser (eigenvalues >1), του scree plot test και του ποσοστού της συνολικής διακύμανσης που εξηγείται. Η ανάλυση των eigenvalues επιτρέπει την αξιολόγηση της σχετικής σημασίας κάθε συνιστώσας, ενώ το scree plot παρέχει γραφική αναπαράσταση της κλίσης της εξηγούμενης διακύμανσης, διευκολύνοντας την οπτική αναγνώριση του βέλτιστου αριθμού συνιστωσών. Το κριτήριο της εξηγούμενης διακύμανσης καθορίζει ότι οι διατηρούμενες συνιστώσες πρέπει να εξηγούν τουλάχιστον 60% της συνολικής διακύμανσης για να θεωρηθούν επαρκείς.

Η ερμηνεία των κύριων συνιστωσών πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης των component loadings, τα οποία αποκαλύπτουν τη σχέση μεταξύ των αρχικών μεταβλητών και των εξαγόμενων παραγόντων. Υψηλά loadings (>0.5) υποδεικνύουν ισχυρή σχέση μεταξύ της

μεταβλητής και της συνιστώσας, ενώ η κατανομή των loadings επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των παραγόντων σε θεματικές ομάδες. Η διαδικασία rotation (varimax method) εφαρμόζεται για τη βελτιστοποίηση της ερμηνευσιμότητας των συνιστωσών, διασφαλίζοντας ότι κάθε αρχική μεταβλητή συσχετίζεται κυρίως με μία συνιστώσα.

Η πρακτική αξία της PCA επεκτείνεται στην επικύρωση του θεωρητικού πλαισίου που υποστηρίζει τη δομή του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας. Η αναγνώριση διακριτών παραγόντων που αντιστοιχούν σε διαφορετικές διαστάσεις κινδύνου ενισχύει την αξιοπιστία της μεθοδολογικής προσέγγισης, ενώ η ανάλυση της συνεισφοράς κάθε αρχικής μεταβλητής στους εξαγόμενους παράγοντες μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση των συντελεστών στάθμισης του σύνθετου δείκτη. Επιπλέον, οι κύριες συνιστώσες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές σε επακόλουθα μοντέλα, μειώνοντας το πρόβλημα της multicollinearity και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα των στατιστικών αναλύσεων.

4.5.3 PREDICTIVE MODELING

Η ανάπτυξη προβλεπτικών μοντέλων αποτελεί καθοριστικό στάδιο για την αξιολόγηση της ικανότητας του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας να προβλέπει και να κατηγοριοποιεί με ακρίβεια τα ατυχήματα υψηλού κινδύνου. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκαν δύο βασικές μεθοδολογίες: η δυαδική λογιστική παλινδρόμηση (Binary Logistic Regression) και η ανάλυση δέντρων αποφάσεων (Decision Trees), καθεμία εκ των οποίων προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα για την κατανόηση και ερμηνεία των δεδομένων.

Για τη λογιστική παλινδρόμηση δημιουργήθηκε μια δυαδική εξαρτημένη μεταβλητή (HighRiskBinary) που κατηγοριοποιεί τα ατυχήματα σε υψηλού κινδύνου ($RiskCategory \geq 3$) και χαμηλού/μέτριου κινδύνου ($RiskCategory < 3$). Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο εκτιμά την πιθανότητα ένα ατύχημα να ανήκει στην υψηλή κατηγορία κινδύνου με βάση τους επιμέρους δείκτες επικινδυνότητας. Το μοντέλο υλοποιήθηκε στο SPSS μέσω της εντολής Analyze → Regression → Binary Logistic, με ανεξάρτητες μεταβλητές τους SeverityScore, AgeRiskScore, CollisionRiskScore, CauseRiskScore καθώς και τις γεωγραφικές συντεταγμένες Longitude και Latitude.

Η αξιολόγηση της ποιότητας του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με πολλαπλά κριτήρια:

- Ο Nagelkerke R^2 εκτίμησε το ποσοστό διακύμανσης που εξηγείται από το μοντέλο.
- Το Hosmer–Lemeshow test αξιολόγησε την καλότητα προσαρμογής.

- Ο πίνακας ταξινόμησης (classification table) κατέγραψε τα ποσοστά σωστής κατηγοριοποίησης.
- Η ROC curve analysis παρείχε συνολική εικόνα της διαγνωστικής ικανότητας.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον εντοπισμό ενδεχόμενης υπερπροσαρμογής (overfitting), καθώς σε μικρά δείγματα η «τέλεια» ταξινόμηση μπορεί να υποδηλώνει προσαρμογή αποκλειστικά στα συγκεκριμένα δεδομένα, περιορίζοντας τη γενικευσιμότητα των ευρημάτων.

Η επιλογή των σημαντικότερων προβλεπτικών μεταβλητών βασίστηκε στην ανάλυση των odds ratios και των επιπέδων στατιστικής σημαντικότητας (p-values). Οι μεταβλητές με $p < 0.05$ θεωρήθηκαν στατιστικά σημαντικές, ενώ το μέγεθος των odds ratios παρείχε ένδειξη για την πρακτική σημασία κάθε παράγοντα. Ωστόσο, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων συνδύασε τη στατιστική με την πρακτική σημαντικότητα, αναγνωρίζοντας ότι μια στατιστικά σημαντική σχέση δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη πρακτική χρησιμότητα, ιδιαίτερα σε μικρά δείγματα όπου μεμονωμένες ακραίες τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε παραπλανητικά ισχυρές συσχετίσεις.

4.5.4 DECISION TREE ANALYSIS

Η ανάλυση δέντρων αποφάσεων εφαρμόστηκε ως συμπληρωματική τεχνική προβλεπτικής μοντελοποίησης, προσφέροντας διαφορετικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη λογιστική παλινδρόμηση, κυρίως στην παραγωγή ερμηνεύσιμων και εύκολα κατανοητών κανόνων απόφασης. Η μέθοδος CHAID (Chi-square Automatic Interaction Detection) επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς της να χειρίζεται ταυτόχρονα κατηγορικές και αριθμητικές μεταβλητές και να παράγει δέντρα υψηλής ερμηνευτικής αξίας, ιδανικά για τη στήριξη αποφάσεων από μη τεχνικούς φορείς.

Η ανάλυση εκτελέστηκε στο SPSS μέσω της διαδρομής Analyze → Classify → Tree, με εξαρτημένη μεταβλητή τη RiskCategory και ανεξάρτητες τις SeverityScore, CauseRiskScore, AgeRiskScore, CollisionRiskScore καθώς και τη χωρική μεταβλητή cluster (QCL_1). Η χρήση της μεθόδου CHAID επιτρέπει την αυτόματη ανίχνευση αλληλεπιδράσεων μεταξύ μεταβλητών και τη δημιουργία διαχωρισμών που μεγιστοποιούν την ομοιογένεια κάθε υποομάδας. Για την αποτίμηση της γενικευσιμότητας του μοντέλου και την αποφυγή overfitting, εφαρμόστηκε 10-fold cross-validation.

Η ποιότητα του δέντρου αποφάσεων αξιολογήθηκε με βάση πολλαπλά κριτήρια:

- Η συνολική ακρίβεια (overall accuracy), ως ποσοστό σωστά ταξινομημένων παρατηρήσεων.
- Το cross-validation error, που παρέχει πιο ρεαλιστική εκτίμηση της απόδοσης σε νέα δεδομένα.
- Η ανάλυση σημαντικότητας μεταβλητών (variable importance), που δείχνει ποιες ανεξάρτητες μεταβλητές συνέβαλαν περισσότερο στην ταξινόμηση.
- Η δομή του δέντρου (αριθμός κόμβων, τερματικών κόμβων και βάθος), καθώς απλούστερα δέντρα θεωρούνται πιο ερμηνεύσιμα και λιγότερο επιρρεπή σε υπερπροσαρμογή.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στην εξαγωγή και ερμηνεία κανόνων απόφασης. Κάθε διαδρομή από τη ρίζα προς έναν τερματικό κόμβο αντιστοιχεί σε έναν κανόνα τύπου if-then, ο οποίος καθορίζει τις συνθήκες υπό τις οποίες ένα ατύχημα ταξινομείται σε συγκεκριμένη κατηγορία κινδύνου. Οι κανόνες αυτοί μπορούν να μεταφραστούν απευθείας σε πρακτικές οδηγίες, όπως για τον εντοπισμό επικινδύνων διασταυρώσεων, παρέχοντας σαφείς και εφαρμόσιμες κατευθύνσεις στους αρμόδιους φορείς. Η διαφάνεια και η απλότητά τους καθιστούν τα δέντρα αποφάσεων ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία τόσο για την επικοινωνία των αποτελεσμάτων σε μη-τεχνικό κοινό όσο και για την ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων στην πράξη.

4.6 Χωρική ανάλυση (Spatial analysis)

Η ολοκλήρωση της στατιστικής μοντελοποίησης και η επιβεβαίωση της προβλεπτικής αξίας των δεικτών επικινδυνότητας μάς οδηγεί φυσικά να εξετάσουμε και τη χωρική διάσταση των δεδομένων. Εκεί, η γεωγραφική κατανομή των ατυχημάτων και οι χωρικές τους συσχετίσεις αποκαλύπτουν μοτίβα που δεν θα μπορούσαν να φανούν μέσα από μια απλή στατιστική ανάλυση.

4.6.1 CLUSTER ANALYSIS

Η χωρική ανάλυση συστάδων (cluster analysis) εφαρμόστηκε για να εντοπιστούν γεωγραφικά συμπαγείς ομάδες ατυχημάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά επικινδυνότητας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος K-Means clustering, η οποία συνδυάζει τις χωρικές συντεταγμένες με τους δείκτες κινδύνου. Η προσέγγιση βασίστηκε στη χρήση τόσο των γεωγραφικών συντεταγμένων (Longitude, Latitude) όσο και του σύνθετου δείκτη

επικινδυνότητας (ComprehensiveRiskIndex), ώστε να δημιουργηθούν συστάδες που αποτυπώνουν ταυτόχρονα τη γεωγραφική εγγύτητα και την ομοιότητα σε επίπεδο κινδύνου.

Ο βέλτιστος αριθμός συστάδων καθορίστηκε με τη μέθοδο του elbow criterion και την ανάλυση της within-cluster sum of squares (WCSS), εξετάζοντας λύσεις από 3 έως 7 συστάδες. Με τον τρόπο αυτό εντοπίστηκε το σημείο όπου η περαιτέρω αύξηση του αριθμού συστάδων δεν προσέφερε ουσιαστική βελτίωση στην εσωτερική ομοιογένεια. Η εκτέλεση της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε στο SPSS (Analyze → Classify → K-Means Cluster), με την επιλογή 5 συστάδων ως την πλέον ισορροπημένη λύση, συνδυάζοντας ερμηνευσιμότητα και στατιστική επάρκεια.

Η γεωγραφική κατανομή των συστάδων αναλύθηκε για τον εντοπισμό χωρικών προτύπων και την αναγνώριση περιοχών με διαφορετικά επίπεδα επικινδυνότητας. Κάθε συστάδα περιγράφηκε με βάση τον μέσο όρο των δεικτών επικινδυνότητας, τη γεωγραφική της έκταση και την πυκνότητα των ατυχημάτων. Η σύγκριση των χαρακτηριστικών τους οδήγησε σε μια κατηγοριοποίηση περιοχών, από «ασφαλείς ζώνες» χαμηλής επικινδυνότητας έως «κρίσιμα hotspots» που απαιτούν άμεση παρέμβαση.

Η ποιότητα της ομαδοποίησης αξιολογήθηκε με την ανάλυση της εσωτερικής συνοχής (within-cluster homogeneity) και της διακριτότητας μεταξύ συστάδων (between-cluster separation). Η silhouette analysis χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί ο βαθμός καταλληλότητας κάθε παρατήρησης στη συστάδα της, ενώ η ANOVA analysis επέτρεψε τον έλεγχο των στατιστικά σημαντικών διαφορών στους δείκτες επικινδυνότητας μεταξύ των συστάδων. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίστηκε ότι οι συστάδες που προέκυψαν αντιπροσωπεύουν πραγματικά διακριτές γεωγραφικές ενότητες με διαφορετικά χαρακτηριστικά κινδύνου.

4.6.2 HOTSPOT ANALYSIS

Η ανάλυση hotspots αποτελεί το επόμενο βήμα μετά την cluster analysis, με στόχο τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό περιοχών που παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση επικίνδυνων ατυχημάτων. Η μεθοδολογική προσέγγιση στηρίχθηκε στη δημιουργία χωρικών ζωνών κινδύνου, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης (clustering) με τους δείκτες επικινδυνότητας. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη δυνατή η ιεράρχηση των γεωγραφικών περιοχών ως προς την ανάγκη παρέμβασης.

Η διαδικασία ταυτοποίησης των hotspots πραγματοποιήθηκε μέσω crosstabulation analysis, η οποία συσχέτισε τη συστάδα στην οποία ανήκει κάθε ατύχημα (QCL_1) με την

κατηγορία κινδύνου του (RiskCategory). Η ανάλυση εκτελέστηκε στο SPSS (Analyze → Descriptive Statistics → Crosstabs), με τις συστάδες στις γραμμές και τις κατηγορίες κινδύνου στις στήλες. Υπολογίστηκαν τόσο τα ποσοστά ανά γραμμή (row percentages) όσο και ανά στήλη (column percentages), δίνοντας τη δυνατότητα να κατανοηθεί τόσο η εσωτερική κατανομή κινδύνου μέσα σε κάθε συστάδα όσο και η συμβολή κάθε συστάδας στις συνολικές κατηγορίες κινδύνου.

Η αναγνώριση των κρίσιμων hotspots βασίστηκε στον εντοπισμό συστάδων με υψηλή συγκέντρωση ατυχημάτων υψηλού και κρίσιμου κινδύνου. Συστάδες όπου το 100% των ατυχημάτων ανήκε στην κατηγορία «κρίσιμου κινδύνου» ή όπου τα ατυχήματα υψηλού κινδύνου ξεπερνούσαν το 80%, ταξινομήθηκαν ως «Critical Hotspots», δηλαδή περιοχές που απαιτούν άμεση παρέμβαση. Αντίθετα, συστάδες με αποκλειστικά ατυχήματα χαμηλού κινδύνου κατηγοριοποιήθηκαν ως «Safe Zones», προσφέροντας πολύτιμη πληροφόρηση για ασφαλείς περιοχές που μπορούν να λειτουργήσουν ως πρότυπα.

Για την επικύρωση των hotspots εξετάστηκε η γεωγραφική συνοχή των περιοχών υψηλού κινδύνου και η ύπαρξη χωρικής αυτοσυσχέτισης, ώστε να διαπιστωθεί αν τα παρατηρούμενα πρότυπα clustering είναι τυχαία ή συστηματικά. Παρότι η χρήση δεικτών όπως οι Moran's I και Getis-Ord Gi* θα μπορούσε να δώσει ποσοτικά μέτρα χωρικής αυτοσυσχέτισης, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης δόθηκε έμφαση στην πρακτική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων για τη λήψη αποφάσεων. Τέλος, η γεωγραφική απεικόνιση των hotspots μέσω θεματικής χαρτογραφίας επιτρέπει την άμεση οπτική αναγνώριση των προβληματικών περιοχών και διευκολύνει την κατανόηση των προτύπων επικινδυνότητας από τους φορείς λήψης αποφάσεων.

4.6.3 SPATIAL RISK ASSESSMENT

Η χωρική αξιολόγηση κινδύνου ολοκληρώνει τη διαδικασία χωρικής ανάλυσης, δημιουργώντας ένα συνεκτικό σύστημα κατηγοριοποίησης που συνδυάζει τα αποτελέσματα του clustering με τους δείκτες επικινδυνότητας. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα πρακτικό εργαλείο για τη διαχείριση και ιεράρχηση του κινδύνου σε επίπεδο χώρου. Η μεθοδολογία στηρίχθηκε στη δημιουργία της μεταβλητής SpatialRiskZone, η οποία αντιστοιχίζει κάθε ατύχημα σε μία από πέντε χωρικές ζώνες κινδύνου, βάσει του συνδυασμού της συστάδας στην οποία ανήκει και της κατηγορίας επικινδυνότητάς του.

Η κατασκευή του συστήματος χωρικών ζωνών ακολουθεί ιεραρχική λογική, δίνοντας προτεραιότητα στα πιο κρίσιμα σενάρια. Έτσι, οι συστάδες που περιλαμβάνουν αποκλειστικά ατυχήματα κρίσιμου κινδύνου (Cluster 4) ταξινομούνται αυτόματα ως «Critical Hotspots» (Zone 5), ανεξάρτητα από άλλους παράγοντες. Συστάδες με κυριαρχία ατυχημάτων υψηλού κινδύνου (Cluster 5) χαρακτηρίζονται ως «High-Risk Zones» (Zone 4). Στην ενδιάμεση κατηγορία ανήκουν συστάδες με μικτά χαρακτηριστικά (Cluster 3), οι οποίες, εφόσον περιλαμβάνουν σημαντικό αριθμό ατυχημάτων υψηλής επικινδυνότητας, προσδιορίζονται ως «Elevated Risk Zones» (Zone 3).

Για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων αναπτύχθηκε ο Risk Priority Index, ένα αντίστροφο σύστημα αρίθμησης όπου οι χαμηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε υψηλότερη προτεραιότητα παρέμβασης. Έτσι, οι φορείς μπορούν να ιεραρχούν εύκολα τις δράσεις, ξεκινώντας από την προτεραιότητα 1 (Critical Hotspots) και προχωρώντας σε φθίνουσα σειρά. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται μέσω conditional statements, τα οποία αντιστοιχίζουν κάθε SpatialRiskZone σε έναν αριθμό προτεραιότητας από 1 έως 5.

Η γεωγραφική κατανομή των χωρικών ζωνών κινδύνου αναλύθηκε προκειμένου να εντοπιστούν πρότυπα και να διασφαλιστεί η συνοχή των αποτελεσμάτων. Η ανάλυση περιέλαβε τον υπολογισμό της έκτασης κάθε ζώνης, την πυκνότητα ατυχημάτων και τη διερεύνηση των σχέσεων με γειτονικές ζώνες. Η επικύρωση πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης με γνωστά προβληματικά σημεία από την τοπική εμπειρία, επιβεβαιώνοντας ότι οι αναγνωρισμένες ζώνες υψηλού κινδύνου αντιστοιχούν σε γεωγραφικά λογικές περιοχές του αστικού ιστού. Η χωρική συνεκτικότητα θεωρείται κρίσιμο κριτήριο για την πρακτική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, καθώς διασκορπισμένες ή μη συνεχείς ζώνες κινδύνου θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να διαχειριστούν στην πράξη.

4.7 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)

Η ολοκλήρωση της στατιστικής και χωρικής ανάλυσης στο περιβάλλον SPSS οδηγεί αναγκαστικά στην ανάγκη μεταφοράς και οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων σε ένα εξειδικευμένο γεωγραφικό περιβάλλον που θα επιτρέψει την πλήρη αξιοποίηση της χωρικής διάστασης των δεδομένων και τη δημιουργία χαρτογραφικών προϊόντων κατάλληλων για τη λήψη αποφάσεων.

4.7.1 QGIS

Η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης στο QGIS απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, τόσο στη φάση εξαγωγής δεδομένων από το SPSS όσο και στην εισαγωγή τους στο GIS περιβάλλον. Η εξαγωγή γίνεται μέσω της διαδρομής File → Export → Data στο SPSS, με επιλογή μορφής CSV (Comma Delimited), που εξασφαλίζει τη συμβατότητα με το QGIS. Το αρχείο που προκύπτει περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν ή παράχθηκαν στη διαδικασία ανάλυσης: βασικούς δείκτες επικινδυνότητας, τον σύνθετο δείκτη, τις χωρικές ζώνες κινδύνου, τα αποτελέσματα του clustering, καθώς και τις πρωτογενείς μεταβλητές που είναι απαραίτητες για την ερμηνεία.

Η εισαγωγή στο QGIS γίνεται με τη λειτουργία Add Delimited Text Layer, η οποία μετατρέπει απευθείας το CSV σε γεωγραφικό επίπεδο (layer). Στο στάδιο αυτό, ορίζονται τα πεδία Longitude και Latitude ως X και Y coordinates, επιλέγεται το κατάλληλο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων (EPSG:4326 – WGS84) και ελέγχεται η σωστή αναγνώριση των τύπων δεδομένων σε κάθε πεδίο. Η επιτυχής εισαγωγή επικυρώνεται με οπτικό έλεγχο στον χάρτη, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα σημεία έχουν τοποθετηθεί σωστά και ότι όλες οι μεταβλητές διατηρούνται στη σωστή μορφή.

Η επιλογή του συστήματος αναφοράς συντεταγμένων είναι κρίσιμη για την ακρίβεια τόσο στις οπτικοποιήσεις όσο και στις αναλύσεις. Αν και τα δεδομένα εξ αρχής βρίσκονται σε WGS84 (EPSG:4326), σε ορισμένες αναλύσεις – όπως οι μετρήσεις αποστάσεων ή οι χωρικές επεξεργασίες – μπορεί να απαιτείται μετασχηματισμός σε προβολικό σύστημα κατάλληλο για την Ελλάδα, όπως το ΕΓΣΑ87 (EPSG:2100). Έτσι, τα γεωγραφικά συστήματα είναι πιο κατάλληλα για γενική οπτικοποίηση, ενώ τα προβολικά συστήματα εξυπηρετούν καλύτερα τις ακριβείς μετρήσεις και γεωμετρικές αναλύσεις.

Η οργάνωση των layers στο QGIS ακολουθεί μια ιεραρχική λογική που διευκολύνει τη διαχείριση και την ανάλυση. Στη βάση βρίσκεται το βασικό point layer με τα ατυχήματα, ενώ μπορούν να δημιουργηθούν πρόσθετα layers για διαφορετικούς σκοπούς, όπως τα cluster boundaries, οι heat surfaces ή οι buffer zones γύρω από σημεία υψηλής προτεραιότητας. Η χρήση groups και κατάλληλης ονοματοδοσίας διασφαλίζει ευκολία πλοήγησης και δίνει τη δυνατότητα γρήγορης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης επιμέρους στοιχείων για συγκριτικές αναλύσεις.

4.7.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων επικινδυνότητας απαιτεί την εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών χαρτογραφικής αναπαράστασης, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένους στόχους ανάλυσης και επικοινωνίας.

Η βασική μέθοδος είναι η κατηγοριοποιημένη συμβολογία (categorized symbology), όπου η μεταβλητή *SpatialRiskZone* χρησιμοποιείται ως βάση για την απεικόνιση των χωρικών ζωνών κινδύνου. Η χρωματική κλίμακα είναι διαισθητική: πράσινο για τις ασφαλείς περιοχές (Zone 1), μπλε για τις λιγότερο επικίνδυνες (Zone 2), κίτρινο για τις μέσου κινδύνου (Zone 3), πορτοκαλί για τις υψηλού κινδύνου (Zone 4) και κόκκινο για τις κρίσιμες περιοχές (Zone 5). Αυτή η κωδικοποίηση επιτρέπει την άμεση αναγνώριση των προβληματικών περιοχών και είναι πλήρως εναρμονισμένη με τις διεθνείς πρακτικές απεικόνισης κινδύνου.

Η τεχνική των αναλογικών συμβόλων (proportional symbols) χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της έντασης κινδύνου, καθώς το μέγεθος του συμβόλου μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή του *ComprehensiveRiskIndex*. Τα μεγέθη κλιμακώνονται από 2 έως 8 pixels, επιτρέποντας στον χάρτη να συνδυάζει δύο επίπεδα πληροφορίας: το χρώμα για την κατηγορία κινδύνου και το μέγεθος για την ένταση. Έτσι, ο αναγνώστης μπορεί να ξεχωρίσει περιοχές με παρόμοια κατηγορία αλλά διαφορετική βαρύτητα κινδύνου.

Οι χάρτες θερμότητας (heat maps) παράγονται μέσω της τεχνικής heatmap symbology, που μετατρέπει τα μεμονωμένα σημεία ατυχημάτων σε συνεχή επιφάνεια πυκνότητας. Ορίστηκε ακτίνα επίδρασης 200 μέτρων, ώστε να αντανakλάται η κλίμακα της αστικής δομής του Βόλου. Επιπλέον, το *ComprehensiveRiskIndex* χρησιμοποιείται ως βάρος, δίνοντας μεγαλύτερη σημασία στα ατυχήματα υψηλής επικινδυνότητας. Η χρήση χρωματικής κλίμακας τύπου “Reds/Hot” προσφέρει άμεση και κατανοητή οπτική αναπαράσταση, με τις πιο θερμές αποχρώσεις να υποδεικνύουν υψηλότερα επίπεδα κινδύνου.

Τέλος, η απεικόνιση των συστάδων γίνεται με διαφορετικά σχήματα συμβόλων για κάθε ομάδα, όπως κύκλοι, τετράγωνα, τρίγωνα, διαμάντια ή πεντάγωνα. Η τεχνική αυτή ενισχύει την οπτική διάκριση και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε χάρτες που προορίζονται για εκτύπωση ή για άτομα με δυσχρωματοψία, καθώς η πληροφορία δεν μεταδίδεται μόνο μέσω χρώματος αλλά και μέσω μορφής. Ο συνδυασμός χρωμάτων και σχημάτων μεγιστοποιεί την ευκρίνεια και την προσβασιμότητα της χαρτογραφικής αναπαράστασης.

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα

Η εφαρμογή της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αξιολόγησης της επικινδυνότητας στα 191 τροχαία ατυχήματα του Βόλου έδωσε ένα ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων, καλύπτοντας όλες τις πτυχές της ανάλυσης: από τις βασικές περιγραφικές στατιστικές έως πιο σύνθετα προβλεπτικά μοντέλα και χωρικές αναλύσεις. Τα ευρήματα ανέδειξαν ξεκάθαρα πρότυπα στην κατανομή της επικινδυνότητας, τόσο σε αριθμητικό όσο και σε γεωγραφικό επίπεδο, επιβεβαιώνοντας την αξία της πολυκριτηριακής προσέγγισης και προσφέροντας σαφείς ενδείξεις για το πού πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στις παρεμβάσεις.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθεί τη λογική ροή της μεθοδολογίας: ξεκινά με την περιγραφή των χαρακτηριστικών του δείγματος και των επιμέρους δεικτών επικινδυνότητας, συνεχίζει με τον σύνθετο δείκτη και τα στατιστικά μοντέλα, και ολοκληρώνεται με τις χωρικές αναλύσεις και τις προβλεπτικές εκτιμήσεις. Κάθε βήμα συνοδεύεται από στατιστικά στοιχεία, γραφήματα και ποσοτικές μετρήσεις που τεκμηριώνουν τα συμπεράσματα και επιτρέπουν μια αντικειμενική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθοδολογίας.

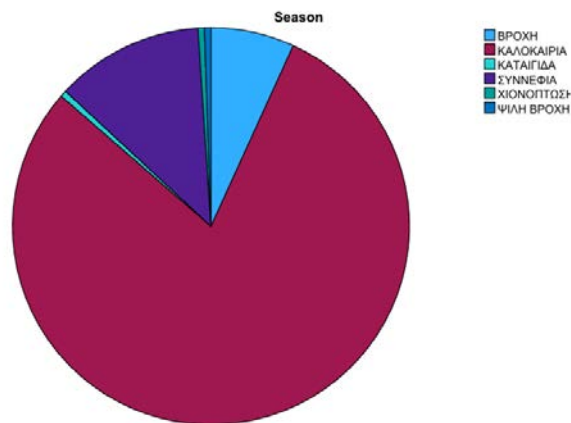
Η ολοκληρωμένη αυτή προσέγγιση δημιουργεί ένα ισχυρό υπόβαθρο για τη διαμόρφωση πρακτικών προτάσεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων με στόχο τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στις διασταυρώσεις του Βόλου.

5.1 Περιγραφική στατιστική ανάλυση

Η εφαρμογή της αναπτυγμένης μεθοδολογίας στα δεδομένα των 191 τροχαίων ατυχημάτων του Βόλου έφερε στο φως ένα πλούσιο σύνολο αποτελεσμάτων, τα οποία αποτυπώνουν με σαφήνεια τα χαρακτηριστικά και τα πρότυπα επικινδυνότητας στις διασταυρώσεις της πόλης.

5.1.1 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

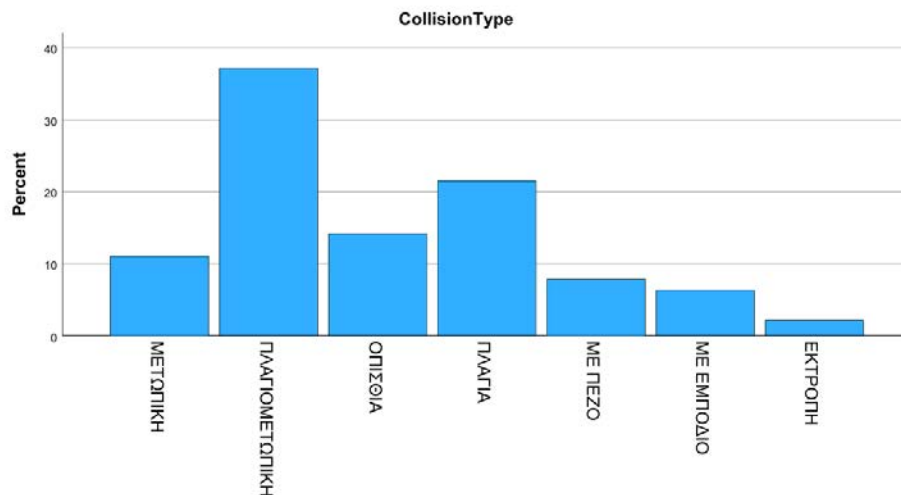
Η ανάλυση των καιρικών συνθηκών κατά τη στιγμή των ατυχημάτων δείχνει ότι η συντριπτική πλειονότητα (79,6% – 152 περιπτώσεις) σημειώθηκε σε καλοκαιρινές, ευνοϊκές συνθήκες. Οι συννεφιασμένες μέρες ακολουθούν με 12,0% (23 ατυχήματα), ενώ τα περιστατικά σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες είναι σαφώς λιγότερα: βροχή 6,8% (13 περιπτώσεις), καταιγίδα, χιονόπτωση και ψιλή βροχή μόλις από 0,5% η καθεμία (1 περίπτωση). Η κατανομή αυτή δείχνει ότι τα περισσότερα ατυχήματα συμβαίνουν κάτω από κανονικές συνθήκες οδήγησης, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία άλλων παραγόντων πέρα από τον καιρό.



Σχήμα 5.1: Η κατανομή των καιρικών συνθηκών την ώρα των ατυχημάτων.

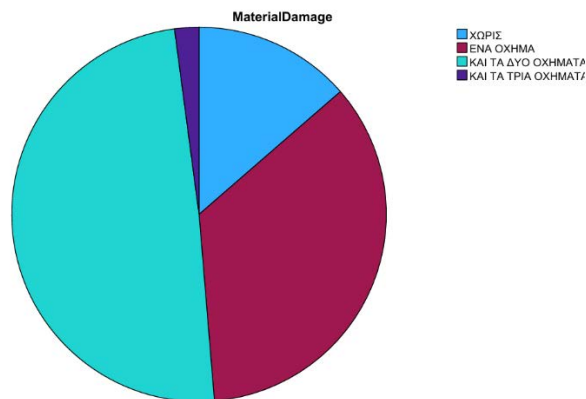
Σχετικά με τα οχήματα που εμπλέκονται, παρατηρείται μεγάλη ποικιλία. Κυριαρχούν τα ατυχήματα ανάμεσα σε επιβατικό αυτοκίνητο και μοτοσικλέτα, με ποσοστό 40,8% (78 περιπτώσεις). Ακολουθούν οι συγκρούσεις μεταξύ δύο αυτοκινήτων με 16,2% (31 ατυχήματα), ενώ οι εκτροπές μοτοσικλετών αποτελούν το 10,5% (20 περιπτώσεις). Τα περιστατικά με παρασυρμένους πεζούς από αυτοκίνητα φτάνουν το 4,7% (9 ατυχήματα), ενώ τα ατυχήματα που εμπλέκουν τρία οχήματα είναι σπάνια, μόλις 0,5% του συνόλου.

Όσον αφορά τον τύπο της σύγκρουσης, οι πλαγιομετωπικές συγκρούσεις εμφανίζονται πιο συχνά (37,2% – 71 περιπτώσεις). Στη συνέχεια συναντώνται οι πλάγιες συγκρούσεις με 21,5% (41 περιπτώσεις) και οι οπίσθιες με 14,1% (27 περιπτώσεις). Οι μετωπικές συγκρούσεις φτάνουν το 11,0% (21 ατυχήματα), τα περιστατικά με πεζούς το 7,9% (15 ατυχήματα), ενώ οι συγκρούσεις με εμπόδια (6,3% – 12 περιπτώσεις) και οι εκτροπές (2,1% – 4 περιπτώσεις) εμφανίζονται σε χαμηλότερα ποσοστά.



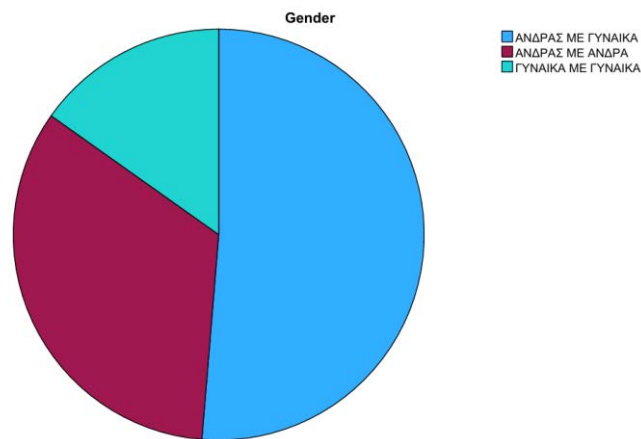
Σχήμα 5.2: Κατανομή τύπων σύγκρουσης στα καταγεγραμμένα ατυχήματα.

Η μελέτη των υλικών ζημιών δείχνει ότι σχεδόν τα μισά ατυχήματα (49,2% – 94 περιπτώσεις) προκαλούν ζημιές και στα δύο εμπλεκόμενα οχήματα, ενώ το 35,1% (67 ατυχήματα) περιορίζεται σε ζημιά ενός οχήματος. Ατυχήματα χωρίς υλικές ζημιές εμφανίζονται σε ποσοστό 13,6% (26 περιπτώσεις), και μόνο 2,1% (4 ατυχήματα) αφορούν τρία οχήματα.



Σχήμα 5.3: Κατανομή υλικών ζημιών στα ατυχήματα.

Τέλος, η κατανομή με βάση το φύλο των εμπλεκόμενων οδηγών δείχνει ότι τα περισσότερα ατυχήματα συμβαίνουν ανάμεσα σε άνδρα και γυναίκα (51,3% – 98 περιπτώσεις), ακολουθούν οι συγκρούσεις μεταξύ δύο ανδρών με 33,5% (64 περιπτώσεις), ενώ οι συγκρούσεις μεταξύ δύο γυναικών αποτελούν το 15,2% (29 περιπτώσεις).



Σχήμα 5.4: Κατανομή ατυχημάτων ανά φύλο εμπλεκομένων.

5.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΧΑΙΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση της σοβαρότητας των ατυχημάτων, με βάση τις ανθρώπινες συνέπειες, δείχνει ότι η μεγάλη πλειονότητα δεν έχει θανατηφόρα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το 91,1% (174 περιπτώσεις) καταγράφεται χωρίς θανάτους, το 8,4% (16 περιπτώσεις) περιλαμβάνει έναν θάνατο, ενώ μόνο μία περίπτωση (0,5%) αφορά δύο θανάτους. Η εικόνα διαφοροποιείται όταν εξετάζονται οι τραυματισμοί: στο 71,7% των ατυχημάτων (137 περιπτώσεις) υπάρχει ένας τραυματίας, στο 18,3% (35 περιπτώσεις) δεν σημειώνονται τραυματισμοί, ενώ το 9,9% (19 περιπτώσεις) περιλαμβάνει δύο τραυματίες.

Πίνακας 5.1: Πίνακας συχνοτήτων τραυματισμών (πάνω) και θανάτων (κάτω) στο σύνολο των ατυχημάτων.

Injuries					
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	35	18,3	18,3	18,3
	1	137	71,7	71,7	90,1
	2	19	9,9	9,9	100,0
	Total	191	100,0	100,0	

Deaths					
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	0	174	91,1	91,1	91,1
	1	16	8,4	8,4	99,5
	2	1	,5	,5	100,0
	Total	191	100,0	100,0	

Ο συνδυασμός θανάτων και τραυματιών μέσω της ανάλυσης crosstabulation αποκαλύπτει χρήσιμα συμπεράσματα. Από τα 174 ατυχήματα χωρίς θανάτους, το 78,7% (137 περιπτώσεις) περιλαμβάνει έναν τραυματία, το 10,9% (19 περιπτώσεις) δεν έχει τραυματισμούς και το 10,3% (18 περιπτώσεις) έχει δύο τραυματίες. Αντίθετα, από τα 16 ατυχήματα με έναν θάνατο, τα 15 (93,8%) δεν έχουν επιπλέον τραυματισμούς, ενώ μόνο ένα (6,3%) περιλαμβάνει και έναν τραυματία. Τέλος, το μοναδικό ατύχημα με δύο θανάτους δεν συνοδεύεται από τραυματισμούς.

Πίνακας 5.2: Διασταύρωση τραυματισμών και θανάτων σε ατυχήματα.

Deaths * Injuries Crosstabulation						
			Injuries			
			0	1	2	Total
Deaths	0	Count	19	137	18	174
		% within Deaths	10,9%	78,7%	10,3%	100,0%
		% within Injuries	54,3%	100,0%	94,7%	91,1%
	1	Count	15	0	1	16
		% within Deaths	93,8%	0,0%	6,3%	100,0%
		% within Injuries	42,9%	0,0%	5,3%	8,4%
	2	Count	1	0	0	1
		% within Deaths	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%
		% within Injuries	2,9%	0,0%	0,0%	0,5%
Total	Count	35	137	19	191	
	% within Deaths	18,3%	71,7%	9,9%	100,0%	
	% within Injuries	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	

5.2 Αποτελέσματα δεικτών επικινδυνότητας

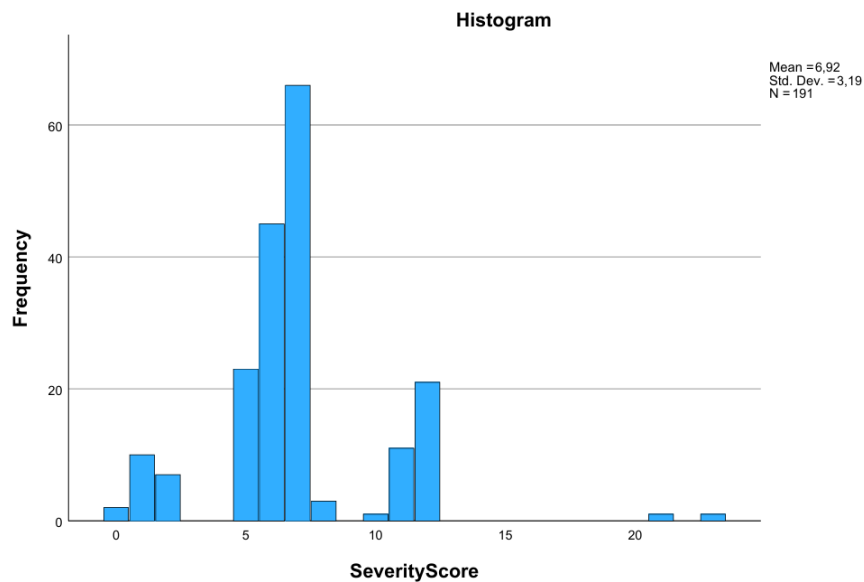
Η περιγραφική ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του dataset αποτελεί το θεμέλιο για την κατανόηση των επιμέρους δεικτών επικινδυνότητας που αναπτύχθηκαν. Οι δείκτες αυτοί λειτουργούν ως δομικά στοιχεία για τη δημιουργία του σύνθετου δείκτη αξιολόγησης κινδύνου.

5.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΣΟΒΑΡΟΤΗΤΑΣ

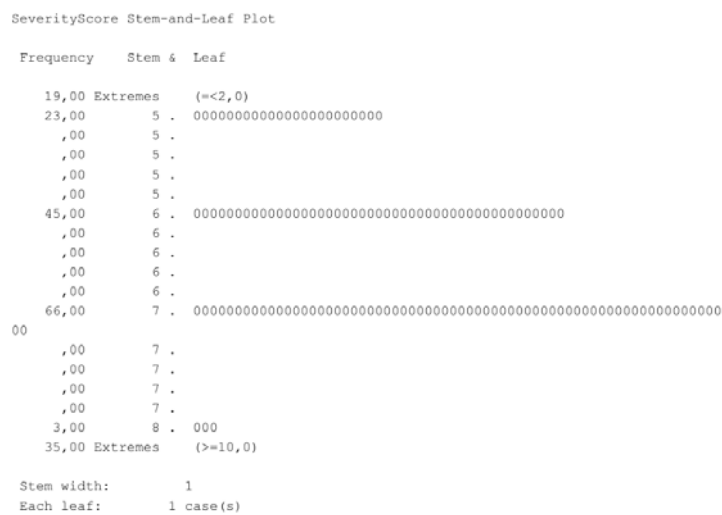
Οι περιγραφικές στατιστικές του Severity Score δείχνουν μέσο όρο 6,92 και τυπική απόκλιση 3,19, υποδηλώνοντας μέτρια μεταβλητότητα. Οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 23, με διάμεσο 7,0 και ενδοτεταρτημοριακό εύρος 1. Στις ακραίες τιμές περιλαμβάνονται ένα ατύχημα με βαθμολογία 23 (case 70), ένα με 21 (case 69) και αρκετά με τιμή 12. Η κατανομή εμφανίζει θετική ασυμμετρία ($skewness = 1,098$) και υψηλή κύρτωση ($kurtosis = 4,532$), υποδεικνύοντας ότι οι περισσότερες περιπτώσεις συγκεντρώνονται σε χαμηλές βαθμολογίες, με λίγες εξαιρετικά σοβαρές.

Το ιστόγραμμα και το stem-and-leaf plot επιβεβαιώνουν την εικόνα αυτή: η πλειονότητα των ατυχημάτων εντοπίζεται στις βαθμολογίες 5–7, ενώ λιγότερα ατυχήματα έχουν πολύ χαμηλές (0–2) ή πολύ υψηλές (10+) τιμές. Συγκεκριμένα, 23 ατυχήματα έχουν

βαθμολογία 5, 45 ατυχήματα 6, και 66 ατυχήματα 7, συνολικά το 70,2% του δείγματος. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι κυριαρχούν ατυχήματα μέτριας σοβαρότητας, με λίγες αλλά σημαντικές περιπτώσεις υψηλής επικινδυνότητας που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή.



Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα δείκτη σοβαρότητας (Severity Score) στα ατυχήματα.



Σχήμα 5.6: Αναπαράσταση του δείκτη Severity Score με stem-and-leaf plot.

5.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΙΚΤΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΗΛΙΚΙΑΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

Η ανάλυση του δείκτη κινδύνου ανά ηλικιακή ομάδα δείχνει μέσο όρο 2,95 και τυπική απόκλιση 1,019, στοιχείο που υποδηλώνει ότι οι περισσότερες περιπτώσεις κατατάσσονται σε

μέτρια επίπεδα κινδύνου. Σε πιο λεπτομερή επίπεδο, η κατηγορία 18–25 ετών συγκεντρώνει πάντα τη μέγιστη βαθμολογία (4,00), επιβεβαιώνοντας τον αυξημένο βαθμό επικινδυνότητας των νεαρών οδηγών. Αντίθετα, η ομάδα 50–70 ετών εμφανίζει τη χαμηλότερη βαθμολογία (1,00), ενώ η ηλικιακή κατηγορία 25–50 ετών αποδίδεται με 2,00. Τέλος, οι περιπτώσεις που περιλαμβάνουν οδηγούς άνω των 70 ετών βαθμολογούνται με 3,00, αντανακλώντας την αυξημένη ευαλωτότητα των ηλικιωμένων.

5.2.3 ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΔΕΙΚΤΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΤΥΠΟΥ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ

Η ανάλυση του δείκτη κινδύνου ανά τύπο σύγκρουσης επιβεβαιώνει την ιεράρχηση επικινδυνότητας που υιοθετήθηκε στη μεθοδολογία. Οι συγκρούσεις με πεζούς, αν και περιορίζονται στο 7,9% των περιστατικών (15 περιπτώσεις), καταγράφουν τη μέγιστη βαθμολογία κινδύνου (5), γεγονός που αντανακλά την ιδιαίτερη ευαλωτότητα των πεζών και την αυξημένη πιθανότητα σοβαρών συνεπειών.

Οι πλαγιομετωπικές συγκρούσεις, η συχνότερη κατηγορία με 37,2% του συνόλου (71 ατυχήματα), λαμβάνουν βαθμολογία 4, επιβεβαιώνοντας τον υψηλό βαθμό επικινδυνότητας που συνδέεται με τις μεγάλες ταχύτητες και τις δυσμενείς γωνίες πρόσκρουσης. Στην ίδια κατηγορία σοβαρότητας κατατάσσονται και οι συγκρούσεις με εμπόδια (6,3% – 12 περιπτώσεις) καθώς και οι εκτροπές (2,1% – 4 περιπτώσεις), παρά τη χαμηλή τους συχνότητα.

Οι μετωπικές (11,0% – 21 περιπτώσεις) και οι πλάγιες συγκρούσεις (21,5% – 41 περιπτώσεις) αξιολογούνται με βαθμολογία 3, καθώς στο αστικό περιβάλλον συνήθως συμβαίνουν σε χαμηλότερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα μέτριο επίπεδο επικινδυνότητας. Τέλος, οι οπίσθιες συγκρούσεις (14,1% – 27 περιπτώσεις) λαμβάνουν τη χαμηλότερη βαθμολογία (2), γεγονός που συνάδει με την παρατήρηση ότι τυπικά οδηγούν σε λιγότερο σοβαρούς τραυματισμούς λόγω των χαμηλότερων ταχυτήτων εμπλοκής.

5.2.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΙΚΤΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΙΤΙΑΣ ΑΤΥΧΗΜΑΤΟΣ

Η ανάλυση του δείκτη κινδύνου για τις αιτίες ατυχημάτων δείχνει υψηλό μέσο όρο (4,27) και σχετικά μικρή διασπορά (τυπική απόκλιση 0,839), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι περισσότερες καταγεγραμμένες αιτίες συνδέονται με αυξημένα επίπεδα κινδύνου.

Οι παραβιάσεις προτεραιότητας αποτελούν την πιο συχνή αιτία με 61 περιπτώσεις (βαθμολογία 4,00), ενώ η υπερβολική ταχύτητα ακολουθεί με 43 περιπτώσεις, λαμβάνοντας τη μέγιστη βαθμολογία κινδύνου (5,00). Στην ίδια κατηγορία μέγιστης επικινδυνότητας

εντάσσονται και τα ατυχήματα λόγω χρήσης ουσιών (16 περιπτώσεις), καθώς και οι συνδυασμοί παραβίασης προτεραιότητας με ταχύτητα (12 περιπτώσεις) και ταχύτητας με επήρεια ουσιών (9 περιπτώσεις).

Στον αντίποδα, οι χαμηλότερες βαθμολογίες κινδύνου αποδίδονται σε παράγοντες που σχετίζονται με την έλλειψη υποδομών (10 περιπτώσεις, βαθμολογία 2,00) και σε μηχανικές βλάβες οχημάτων (2 περιπτώσεις, βαθμολογία 2,00).

5.3 Αποτελέσματα Σύνθετου Δείκτη Επικινδυνότητας

Η ανάλυση των επιμέρους δεικτών επικινδυνότητας καταλήγει στη δημιουργία και αξιολόγηση του κεντρικού εργαλείου της μεθοδολογίας: του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας, ο οποίος συνδυάζει όλες τις διαστάσεις κινδύνου σε μια ενιαία μετρική αξιολόγησης.

5.3.1 ΣΥΝΘΕΤΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Ο σύνθετος δείκτης επικινδυνότητας εμφανίζει μέσο όρο 4,87 με τυπική απόκλιση 1,29, γεγονός που δείχνει μέτρια διασπορά γύρω από την κεντρική τάση. Η διάμεσος τιμή (4,75) βρίσκεται πολύ κοντά στον μέσο όρο, στοιχείο που υποδηλώνει σχετικά συμμετρική κατανομή. Το εύρος του δείκτη (1,90 – 11,05) εξασφαλίζει επαρκή διαφοροποίηση, ώστε να καθίσταται δυνατή η αποτελεσματική ιεράρχηση των ατυχημάτων με βάση την επικινδυνότητά τους.

Πίνακας 5.3: Πίνακας περιγραφικών στατιστικών του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας.

Statistics		
ComprehensiveRiskIndex		
N	Valid	191
	Missing	0
Mean		4,8668
Median		4,7500
Std. Deviation		1,29134
Range		9,15
Minimum		1,90
Maximum		11,05

Η διερεύνηση των συσχετίσεων ανάμεσα στον σύνθετο δείκτη και τους επιμέρους δείκτες αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της σοβαρότητας, η οποία παρουσιάζει σχεδόν τέλεια συσχέτιση ($r=0,976$, $p<0,001$). Αυτό επιβεβαιώνει ότι οι πραγματικές συνέπειες των ατυχημάτων αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα στη συνολική εκτίμηση

επικινδυνότητας. Ο δείκτης ηλικιακών ομάδων εμφανίζει μέτρια θετική συσχέτιση ($r=0,300$, $p<0,001$), αναδεικνύοντας τη συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα. Αντίθετα, ο δείκτης αιτιών παρουσιάζει ασθενή αρνητική συσχέτιση ($r=-0,149$, $p=0,040$), ενώ ο δείκτης τύπου σύγκρουσης δεν εμφανίζει στατιστικά σημαντική σχέση ($r=0,015$, $p=0,833$), γεγονός που δείχνει ότι οι παράγοντες αυτοί λειτουργούν περισσότερο ανεξάρτητα στον συνολικό υπολογισμό του κινδύνου.

Πίνακας 5.4: Πίνακας συσχετίσεων (Pearson) μεταξύ δεικτών επικινδυνότητας.

		Correlations		
		Comprehensive RiskIndex	CollisionRiskScore	AgeRiskScore
ComprehensiveRiskIndex	Pearson Correlation	1	,015	,300**
	Sig. (2-tailed)		,833	<,001
	N	191	191	191
CollisionRiskScore	Pearson Correlation	,015	1	-,027
	Sig. (2-tailed)	,833		,715
	N	191	191	191
AgeRiskScore	Pearson Correlation	,300**	-,027	1
	Sig. (2-tailed)	<,001	,715	
	N	191	191	191
SeverityScore	Pearson Correlation	,976**	-,117	,159*
	Sig. (2-tailed)	<,001	,108	,028
	N	191	191	191
CauseRiskScore	Pearson Correlation	-,149*	-,268**	-,106
	Sig. (2-tailed)	,040	<,001	,143
	N	191	191	191

		Correlations	
		SeverityScore	CauseRiskScore
ComprehensiveRiskIndex	Pearson Correlation	,976**	-,149*
	Sig. (2-tailed)	<,001	,040
	N	191	191
CollisionRiskScore	Pearson Correlation	-,117	-,268**
	Sig. (2-tailed)	,108	<,001
	N	191	191
AgeRiskScore	Pearson Correlation	,159*	-,106
	Sig. (2-tailed)	,028	,143
	N	191	191
SeverityScore	Pearson Correlation	1	-,189**
	Sig. (2-tailed)		,009
	N	191	191
CauseRiskScore	Pearson Correlation	-,189**	1
	Sig. (2-tailed)	,009	
	N	191	191

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

5.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Η λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών κάθε κατηγορίας κινδύνου αναδεικνύει σημαντικά πρότυπα επικινδυνότητας.

Η κατηγορία χαμηλού κινδύνου (RiskGroup 1) περιλαμβάνει ατυχήματα με περιορισμένες συνέπειες, κυρίως υλικές ζημιές χωρίς σοβαρούς τραυματισμούς ή θανάτους. Συνδέεται συνήθως με τους λιγότερο επικίνδυνους τύπους συγκρούσεων και με ηλικιακές ομάδες μέσου κινδύνου.

Η μέτρια κατηγορία (RiskGroup 2), που αποτελεί και την πολυπληθέστερη, αφορά περιστατικά με ελαφρούς τραυματισμούς αλλά χωρίς θανατηφόρα αποτελέσματα. Αντικατοπτρίζει το τυπικό μοτίβο των αστικών ατυχημάτων, όπου οι χαμηλότερες ταχύτητες περιορίζουν τη σοβαρότητα των συνεπειών, παρά τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται. Η υπεροχή αυτής της κατηγορίας δείχνει ότι τα περισσότερα ατυχήματα στον Βόλο είναι σχετικά διαχειρίσιμα.

Πίνακας 5.5: Κατανομή ατυχημάτων ανά ομάδα κινδύνου (Risk Group).

		RiskGroup			
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1	20	10,5	10,5	10,5
	2	115	60,2	60,2	70,7
	3	49	25,7	25,7	96,3
	4	7	3,7	3,7	100,0
	Total	191	100,0	100,0	

Η κατηγορία υψηλού κινδύνου (RiskGroup 3) χαρακτηρίζεται από σοβαρότερους τραυματισμούς ή από την εμπλοκή ιδιαίτερα ευάλωτων ηλικιακών ομάδων και επικίνδυνων τύπων συγκρούσεων. Αφορούν περίπου το ένα τέταρτο των ατυχημάτων και απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, καθώς έχουν αυξημένο δυναμικό να οδηγήσουν σε σοβαρές συνέπειες αν συνδυαστούν με δυσμενείς συνθήκες.

Τέλος, η κατηγορία κρίσιμης επικινδυνότητας (RiskGroup 4), αν και περιορισμένη αριθμητικά (7 περιπτώσεις), περιλαμβάνει τις πιο σοβαρές καταστάσεις με θανατηφόρα αποτελέσματα ή με συνδυασμούς παραγόντων υψηλού κινδύνου. Αποτελεί κρίσιμο πεδίο παρέμβασης, καθώς η γεωγραφική τους κατανομή και τα κοινά χαρακτηριστικά τους παρέχουν πολύτιμες ενδείξεις για τους παράγοντες που οδηγούν σε ακραία επικινδυνότητα.

5.3.3 ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Η εφαρμογή του σταθμισμένου συστήματος αξιολόγησης επιβεβαιώνει την ορθότητα των συντελεστών στάθμισης που επιλέχθηκαν. Ο δείκτης σοβαρότητας, με συντελεστή 0,4, αναδεικνύεται στον κυρίαρχο παράγοντα, καθώς παρουσιάζει εξαιρετικά ισχυρή συσχέτιση με τον συνολικό δείκτη· στοιχείο που επιβεβαιώνει ότι οι πραγματικές συνέπειες των ατυχημάτων αποτελούν το βασικό κριτήριο εκτίμησης της επικινδυνότητας. Ο ηλικιακός δείκτης, με συντελεστή 0,2, συνεισφέρει με ισορροπημένο τρόπο, αναδεικνύοντας τον ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα χωρίς να υπερισχύει στο αποτέλεσμα.

Οι δείκτες τύπου σύγκρουσης (0,25) και αιτιών (0,15) έχουν μικρότερη βαρύτητα, επιλογή που αποδεικνύεται δικαιολογημένη, καθώς παρουσιάζουν λιγότερο προβλέψιμη σχέση με τη συνολική επικινδυνότητα. Ωστόσο, η συμπερίληψή τους στη μεθοδολογία εξασφαλίζει ότι η αξιολόγηση λαμβάνει υπόψη όλες τις κρίσιμες διαστάσεις του κινδύνου, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα από ό,τι θα παρείχε η αποκλειστική εστίαση στη σοβαρότητα.

5.4 Αποτελέσματα στατιστικών μοντέλων

Η επικύρωση και η περαιτέρω ανάλυση του σύνθετου δείκτη επικινδυνότητας με τη χρήση προηγμένων στατιστικών τεχνικών προσφέρει κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία και την προβλεπτική ικανότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

5.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ PCA

Η ανάλυση κύριων συνιστωσών έδειξε ότι δύο συνιστώσες εξηγούν συνολικά το 63,1% της διακύμανσης των επιμέρους δεικτών επικινδυνότητας. Η πρώτη (Component 1) ερμηνεύει το 33,3% και χαρακτηρίζεται από υψηλά θετικά φορτία στη σοβαρότητα (0,539) και στις ηλικιακές ομάδες (0,481), καθώς και από έντονα αρνητικό φορτίο στα αίτια ατυχημάτων (-0,798). Αυτό υποδηλώνει έναν παράγοντα που συνδέει τη φυσική σοβαρότητα και την ηλικιακή επικινδυνότητα, διαφοροποιημένα από τις αιτίες των ατυχημάτων.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της PCA για την επεξήγηση της συνολικής διακύμανσης.

Total Variance Explained						
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	1,331	33,274	33,274	1,331	33,274	33,274
2	1,193	29,818	63,092	1,193	29,818	63,092
3	,865	21,628	84,720			
4	,611	15,280	100,000			

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Η δεύτερη συνιστώσα (Component 2) εξηγεί το 29,8% της διακύμανσης και χαρακτηρίζεται από υψηλά θετικά φορτία στη σοβαρότητα (0,580) και στις ηλικιακές ομάδες (0,443), αλλά και από ισχυρό αρνητικό φορτίο στον τύπο σύγκρουσης (-0,770). Η δομή αυτή υποδηλώνει έναν παράγοντα που διαφοροποιεί τα ατυχήματα ανάλογα με τον τρόπο εκδήλωσής τους σε σχέση με τη σοβαρότητα.

Η ανάλυση των communalities δείχνει ότι ο δείκτης τύπου σύγκρουσης εξηγείται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις δύο συνιστώσες (76,6%), ακολουθούμενος από τα αίτια ατυχημάτων (70,2%) και τη σοβαρότητα (62,7%). Οι ηλικιακές ομάδες εμφανίζουν το χαμηλότερο ποσοστό εξήγησης (42,8%), γεγονός που υποδηλώνει ότι λειτουργούν πιο ανεξάρτητα σε σχέση με τους υπόλοιπους δείκτες.

Πίνακας 5.7: Πίνακας συνιστωσών από της PCA.

Component Matrix ^a		
	Component	
	1	2
SeverityScore	,539	,580
CauseRiskScore	-,798	,258
AgeRiskScore	,481	,443
CollisionRiskScore	,416	-,770

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. 2 components extracted.

5.4.2 ΕΥΡΗΜΑΤΑ PREDICTIVE MODELING

Η δυαδική λογιστική παλινδρόμηση για την πρόβλεψη ατυχημάτων υψηλού κινδύνου παρήγαγε εντυπωσιακά αλλά ταυτόχρονα προβληματικά αποτελέσματα. Το μοντέλο πέτυχε τέλεια ταξινόμηση (100% ακρίβεια) με Nagelkerke $R^2 = 1,000$, γεγονός που υποδηλώνει έντονο φαινόμενο υπερπροσαρμογής (overfitting). Η διαδικασία εκτίμησης τερματίστηκε μετά από 20

iterations χωρίς σύγκλιση, ενώ οι υπερβολικά μεγάλοι συντελεστές (π.χ. SeverityScore: $B=62,109$, $\text{Exp}(B)=9,412e26$) καταδεικνύουν αριθμητική αστάθεια του μοντέλου.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα λογιστικής παλινδρόμησης με εξαρτημένη μεταβλητή τον δείκτη επικινδυνότητας.

		Variables in the Equation				
		B	S.E.	Wald	df	Sig.
Step 1 ^a	Longitude	-11,950	34970,412	,000	1	1,000
	Latitude	31,035	52777,512	,000	1	1,000
	SeverityScore	62,109	1772,307	,001	1	,972
	CauseRiskScore	30,279	1280,277	,001	1	,981
	AgeRiskScore	31,970	1410,612	,001	1	,982
	CollisionRiskScore	31,619	1219,018	,001	1	,979
	Constant	-1741,447	2305730,410	,000	1	,999

		Variables in the Equation	
		Exp(B)	
Step 1 ^a	Longitude	,000	
	Latitude	3,008e13	
	SeverityScore	9,412e26	
	CauseRiskScore	1,413e13	
	AgeRiskScore	7,665e13	
	CollisionRiskScore	5,395e13	
	Constant	,000	

a. Variable(s) entered on step 1: Longitude, Latitude, SeverityScore, CauseRiskScore, AgeRiskScore, CollisionRiskScore.

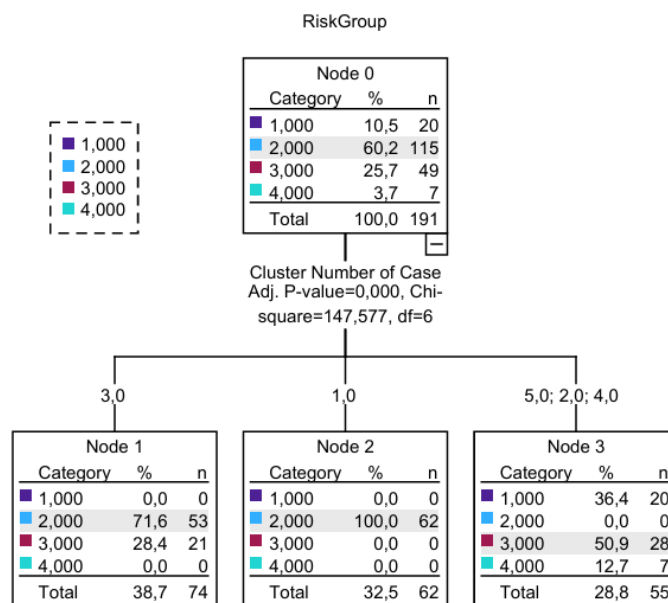
Παρά τα προβλήματα overfitting, η ανάλυση των μεταβλητών που δεν ήταν στην εξίσωση (Block 0) παρέχει χρήσιμες ενδείξεις. Ο δείκτης σοβαρότητας εμφανίζει την ισχυρότερη στατιστική σημαντικότητα (Score=88,569, $p<0,001$), ακολουθούμενος από τον ηλικιακό δείκτη (Score=9,708, $p=0,002$). Οι γεωγραφικές συντεταγμένες δείχνουν οριακή σημαντικότητα (Longitude: $p=0,122$, Latitude: $p=0,060$), ενώ οι δείκτες αιτιών και τύπου σύγκρουσης δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική σχέση.

Πίνακας 5.9: Πίνακας μεταβλητών εκτός εξίσωσης στο λογιστικό μοντέλο.

			Variables not in the Equation		
			Score	df	Sig.
Step 0	Variables	Longitude	2,392	1	,122
		Latitude	3,533	1	,060
		SeverityScore	88,569	1	<,001
		CauseRiskScore	,020	1	,886
		AgeRiskScore	9,708	1	,002
		CollisionRiskScore	,014	1	,907
	Overall Statistics		99,484	6	<,001

5.5 Αποτελέσματα χωρικής ανάλυσης

Το μοντέλο CHAID decision tree παρήγαγε πιο ερμηνεύσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα, με συνολική ακρίβεια 74,9%. Το σφάλμα cross-validation ανέρχεται σε 35,1%, γεγονός που δείχνει καλύτερη γενικευσιμότητα σε σχέση με το logistic regression. Το δέντρο αποτελείται από 4 nodes (3 terminal nodes) και βάθος 1, σχηματίζοντας μια απλή αλλά αποτελεσματική δομή ταξινόμησης.



Σχήμα 5.7: Απόφαση δέντρου (CHAID) για την ταξινόμηση των ομάδων κινδύνου.

Κύριος παράγοντας διαχωρισμού αναδείχθηκε η χωρική μεταβλητή (Cluster Number), με ισχυρή στατιστική σημαντικότητα ($p < 0,001$, Chi-square=147,577, df=6). Τα terminal nodes εμφανίζουν διακριτά χαρακτηριστικά:

- Node 1 (Cluster 3): 74 περιπτώσεις, με 71,6% μέτριας και 28,4% υψηλής επικινδυνότητας.
- Node 2 (Cluster 1): 62 περιπτώσεις, αποκλειστικά μέτριας επικινδυνότητας (100%).
- Node 3 (Clusters 2, 4, 5): 55 περιπτώσεις, με μικτή κατανομή (36,4% χαμηλή, 50,9% υψηλή και 12,7% κρίσιμη επικινδυνότητα).

Η εκτίμηση του σφάλματος δείχνει resubstitution error 25,1% και cross-validation error 35,1%, επιβεβαιώνοντας ότι το μοντέλο διαθέτει ικανοποιητική προβλεπτική ικανότητα χωρίς έντονο φαινόμενο υπερπροσαρμογής. Ωστόσο, ο πίνακας ταξινόμησης αποκαλύπτει ότι το μοντέλο αποδίδει εξαιρετικά στην κατηγορία μέτριας επικινδυνότητας (100% σωστή

ταξινόμηση), ενώ δυσκολεύεται να προβλέψει τις ακραίες κατηγορίες, δηλαδή χαμηλής και κρίσιμης επικινδυνότητας (0% σωστή ταξινόμηση).

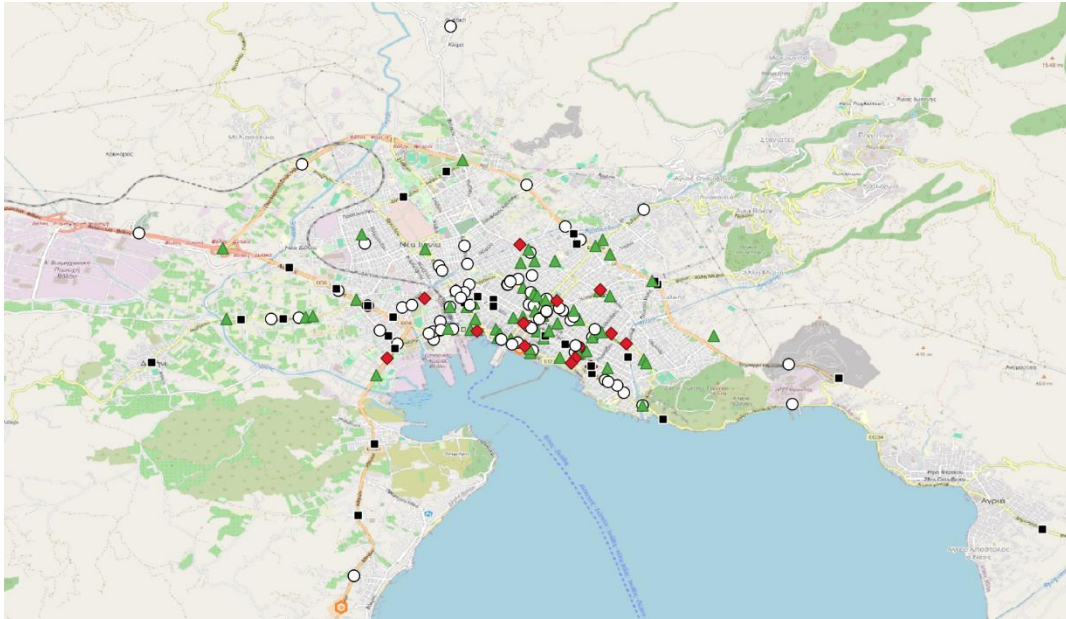
5.6 Χαρτογράφηση αποτελεσμάτων σε GIS

Η μεταφορά των αποτελεσμάτων στο γεωγραφικό περιβάλλον QGIS επιτρέπει την οπτικοποίηση των χωρικών προτύπων επικινδυνότητας και την ανάπτυξη ολοκληρωμένων χαρτών που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων.

5.6.1 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Η χωρική ανάλυση ανέδειξε πέντε διακριτές γεωγραφικές συστάδες με διαφορετικά χαρακτηριστικά επικινδυνότητας:

- Cluster 1 (62 ατυχήματα – 32,5%): Ζώνη μέτριου κινδύνου με μέσο δείκτη 4,37. Όλα τα περιστατικά (100%) κατατάσσονται στη μέτρια κατηγορία, δείχνοντας αξιοσημείωτη ομοιογένεια.
- Cluster 2 (20 ατυχήματα – 10,5%): Η «Safe Zone», με τον χαμηλότερο μέσο δείκτη (2,52) και 100% ατυχήματα χαμηλού κινδύνου. Πρόκειται για περιοχές-πρότυπα ασφάλειας.
- Cluster 3 (74 ατυχήματα – 38,7%): Η μεγαλύτερη συστάδα, με μέσο δείκτη 4,95 και μικτά χαρακτηριστικά: 71,6% μέτριας και 28,4% υψηλής επικινδυνότητας.
- Cluster 4 (2 ατυχήματα – 1,0%): Το «Critical Hotspot», με τον υψηλότερο δείκτη (10,90) και 100% ατυχήματα κρίσιμης επικινδυνότητας. Αποτελεί σημείο άμεσης προτεραιότητας για τις αρχές.
- Cluster 5 (33 ατυχήματα – 17,3%): «High-Risk Zone» με μέσο δείκτη 6,67, όπου το 84,8% των ατυχημάτων ανήκει σε υψηλή και το 15,2% σε κρίσιμη επικινδυνότητα.



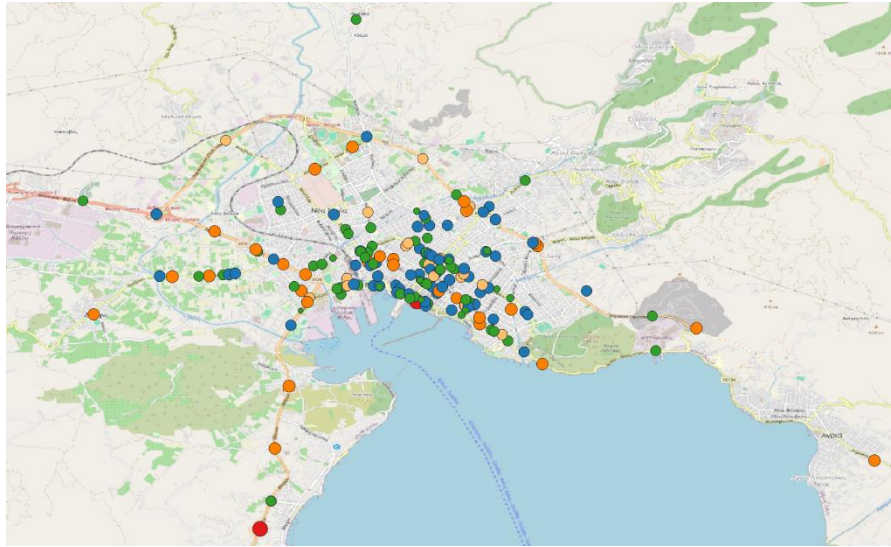
Σχήμα 5.8: Χωρική απεικόνιση συστάδων ατυχημάτων στην περιοχή μελέτης. Τα χρώματα και τα σχήματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά clusters επικινδυνότητας (QCL_1): πράσινο τρίγωνο = Cluster 1, κόκκινο ρόμβος = Cluster 2, μπλε κύκλος = Cluster 3, πορτοκαλί εξαγωνο = Cluster 4, γαλάζιο αστέρι = Cluster 5. Παρατηρείται συγκέντρωση περιστατικών υψηλού και κρίσιμου κινδύνου κυρίως σε κεντρικές οδικές αρτηρίες και κοντά στο παραλιακό μέτωπο.

5.6.2 ΖΩΝΕΣ ΧΩΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

Η hotspot analysis επιβεβαίωσε τη διαφοροποίηση των ζωνών:

- Το Critical Hotspot (Cluster 4) συγκεντρώνει αποκλειστικά κρίσιμες περιπτώσεις.
- Η Safe Zone (Cluster 2) περιλαμβάνει αποκλειστικά ασφαλείς περιπτώσεις.
- Η High-Risk Zone (Cluster 5) συγκεντρώνει το 71,4% των κρίσιμων ατυχημάτων του συνόλου.

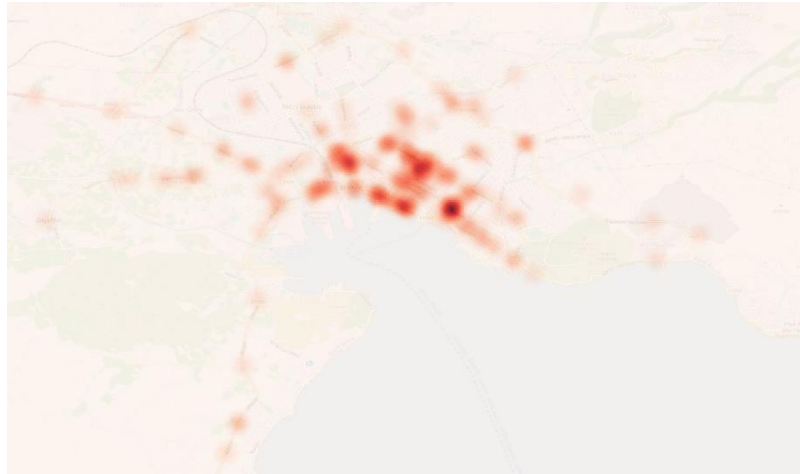
Χαρτογραφικά, το Critical Hotspot εμφανίζεται ως σημειακή περιοχή (κόκκινο σημείο στον χάρτη), ενώ οι High-Risk Zones εντοπίζονται κυρίως στο κέντρο και σε κύριες οδικές αρτηρίες. Οι Safe Zones κατανέμονται σε περιφερειακές περιοχές με χαμηλότερη κυκλοφοριακή πυκνότητα.



Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή ζωνών επικινδυνότητας (Spatial Risk Zones). Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν επίπεδα κινδύνου: πράσινο = Χαμηλός (Zone 1), γαλάζιο = Μέτριος (Zone 2), κίτρινο = Αυξημένος (Zone 3), πορτοκαλί = Υψηλός (Zone 4), κόκκινο = Κρίσιμος (Zone 5). Η χαρτογράφηση αποκαλύπτει συστάδες υψηλού και κρίσιμου κινδύνου σε συγκεκριμένες διασταυρώσεις, ενώ οι χαμηλού κινδύνου περιοχές κατανέμονται πιο διάσπαρτα.

5.6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ο χάρτης θερμότητας (Σχήμα 5.10) καταδεικνύει σαφή χωρικά πρότυπα: έντονες κόκκινες συγκεντρώσεις κινδύνου στο κέντρο και κατά μήκος κύριων αρτηριών, με ακτίνα επιρροής 200 μέτρων. Η χρήση του ComprehensiveRiskIndex ως βάρος εξασφαλίζει ότι τα σοβαρότερα ατυχήματα επηρεάζουν περισσότερο την τελική επιφάνεια. Η κατανομή κινδύνου δείχνει καθαρή μετάβαση από περιφερειακές ζώνες χαμηλού κινδύνου προς ένα πιο επικίνδυνο αστικό κέντρο.



Σχήμα 5.10: Χάρτης θερμότητας που δείχνει τα σημεία με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση επικίνδυνων ατυχημάτων. Οι έντονες κόκκινες περιοχές υποδηλώνουν hotspots υψηλής επικινδυνότητας, κυρίως στο κέντρο της πόλης και κατά μήκος βασικών αρτηριών.

Κεφάλαιο 6 Συζήτηση και συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέπτυξε και εφάρμοσε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας των οδικών διασταυρώσεων στην πόλη του Βόλου, αναλύοντας δεδομένα τροχαίων ατυχημάτων της πενταετίας 2019-2023. Η ανάλυση που προηγήθηκε στο Κεφάλαιο 5 αποκάλυψε σημαντικά πρότυπα και συσχετίσεις, τόσο σε περιγραφικό όσο και σε χωρικό επίπεδο. Στο παρόν κεφάλαιο, τα ευρήματα αυτά θα ερμηνευτούν σε βάθος, θα συζητηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας και θα διατυπωθούν πρακτικές προτάσεις για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Τέλος, θα αναγνωριστούν οι περιορισμοί της μελέτης και θα προταθούν κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, ολοκληρώνοντας με τα τελικά συμπεράσματα της έρευνας.

6.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των δεδομένων παρέχει μια πολυδιάστατη κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν το τοπίο της οδικής ασφάλειας στον Βόλο. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων εστιάζει στα βασικά ευρήματα επικινδυνότητας, στη γεωγραφική τους κατανομή και στην αξία της μεθοδολογικής προσέγγισης που υιοθετήθηκε.

6.1.1 ΒΑΣΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Τα αποτελέσματα της έρευνας επιβεβαιώνουν τον πολυπαραγοντικό χαρακτήρα των τροχαίων ατυχημάτων. Ο δείκτης σοβαρότητας αναδείχθηκε, όπως αναμενόταν, ως ο σημαντικότερος παράγοντας του συνολικού κινδύνου, με τη συσχέτισή του με τον Σύνθετο Δείκτη Επικινδυνότητας να είναι σχεδόν απόλυτη ($r=0,976$). Αυτό υπογραμμίζει ότι οι πραγματικές συνέπειες ενός ατυχήματος (θάνατοι και τραυματισμοί) αποτελούν τον πιο αδιαμφισβήτητο μετρητή του κινδύνου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα, όπως αποτυπώνεται στους δείκτες ηλικίας και αιτίας. Η κατηγορία των νέων οδηγών (18-25 ετών) εμφανίζει συστηματικά την υψηλότερη επικινδυνότητα, εύρημα που συνάδει με τη διεθνή βιβλιογραφία και αποδίδεται σε παράγοντες όπως η απειρία και η αυξημένη διάθεση ανάληψης ρίσκου. Ταυτόχρονα, οι παραβιάσεις προτεραιότητας και η υπερβολική ταχύτητα αναδεικνύονται ως οι κυρίαρχες αιτίες, τοποθετώντας την οδηγική συμπεριφορά στο επίκεντρο του προβλήματος. Είναι αξιοσημείωτο ότι η συντριπτική πλειονότητα των ατυχημάτων (79,6%) συμβαίνει υπό ιδανικές καιρικές συνθήκες, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω το συμπέρασμα ότι η ανθρώπινη αμέλεια και η παράβαση των κανόνων, και όχι οι εξωτερικές συνθήκες, αποτελούν την πρωταρχική πηγή κινδύνου.

6.1.2 ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΙΝΔΥΝΩΝ

Η χωρική ανάλυση ανέδειξε μια σαφή γεωγραφική συγκέντρωση του κινδύνου. Η επικινδυνότητα δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στην πόλη, αλλά ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα που συνδέονται άμεσα με την αστική δομή και τις κυκλοφοριακές ροές. Οι ζώνες υψηλού και κρίσιμου κινδύνου (High-Risk Zone & Critical Hotspot) εντοπίζονται κυρίως στο αστικό κέντρο και κατά μήκος των κύριων οδικών αρτηριών, όπως η Δημητριάδος, η Ιάσονος και οι κάθετοι άξονες που τις συνδέουν. Αυτές είναι περιοχές με υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας, αυξημένη εμπορική δραστηριότητα και πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ οχημάτων, πεζών και δικύκλων.

Αντίθετα, οι ασφαλέστερες ζώνες βρίσκονται σε περιφερειακές, κυρίως οικιστικές περιοχές με χαμηλότερη κυκλοφοριακή πίεση. Η ύπαρξη ενός «Critical Hotspot» (Cluster 4), έστω και με μικρό αριθμό ατυχημάτων, είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς υποδεικνύει ένα συγκεκριμένο σημείο ή μια μικρή περιοχή με συστηματικά προβλήματα που οδηγούν σε ατυχήματα κρίσιμης σοβαρότητας. Η χαρτογράφηση αυτή μετατρέπει την αφηρημένη έννοια του κινδύνου σε ένα απτό, γεωγραφικό πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπιστεί στοχευμένα.

6.1.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική. Η δημιουργία ενός Σύνθετου Δείκτη Επικινδυνότητας (Comprehensive Risk Index) επέτρεψε τη συνδυαστική αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων σε μια ενιαία, ποσοτική κλίμακα, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των μονοδιάστατων αναλύσεων που εστιάζουν μόνο στη

συχνότητα ή τη σοβαρότητα. Η στάθμιση των επιμέρους δεικτών, με μεγαλύτερη βαρύτητα στη σοβαρότητα, εξασφάλισε ότι ο τελικός δείκτης αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά τις πραγματικές συνέπειες των ατυχημάτων.

Η ενσωμάτωση της στατιστικής ανάλυσης με GIS αποτέλεσε τον ακρογωνιαίο λίθο της έρευνας. Ενώ η στατιστική ανάλυση αποκάλυψε τι συμβαίνει, η χωρική ανάλυση έδειξε πού συμβαίνει, παρέχοντας ένα ισχυρό οπτικό και αναλυτικό εργαλείο. Το μοντέλο δέντρου αποφάσεων (CHAID), με την υψηλή του ακρίβεια (74,9%) και την ανθεκτικότητά του στην υπερπροσαρμογή, ανέδειξε τη χωρική θέση (Cluster Number) ως τον κυριότερο διαχωριστικό παράγοντα του κινδύνου, επιβεβαιώνοντας εμπράκτως ότι «η γεωγραφία έχει σημασία» στην οδική ασφάλεια.

6.2 Πρακτικές εφαρμογές

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης δεν έχουν μόνο θεωρητική αξία, αλλά μπορούν να μεταφραστούν σε συγκεκριμένες, πρακτικές εφαρμογές για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στην πόλη του Βόλου.

6.2.1 ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΕΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΩΝ

Η ανάλυση παρέχει μια σαφή ιεράρχηση για την ανάληψη δράσης. Άμεση προτεραιότητα πρέπει να δοθεί στις περιοχές που ταυτοποιήθηκαν ως «Critical Hotspot» (Cluster 4) και «High-Risk Zone» (Cluster 5). Αυτές οι περιοχές απαιτούν άμεση επιτόπια έρευνα και στοχευμένες παρεμβάσεις. Οι παρεμβάσεις μπορεί να περιλαμβάνουν:

- **Μέτρα ήπιας κυκλοφορίας:** Δημιουργία υπερυψωμένων διαβάσεων, περιορισμός ορίων ταχύτητας, ή αλλαγές στη γεωμετρία των διασταυρώσεων για μείωση των ταχυτήτων.
- **Βελτιώσεις Υποδομής:** Επανασχεδιασμός διασταυρώσεων, βελτίωση της ορατότητας, αναβάθμιση της σήμανσης (οριζόντιας και κάθετης) και του φωτισμού.
- **Στοχευμένη Αστυνόμευση:** Αυξημένη παρουσία της Τροχαίας για την επιβολή του Κ.Ο.Κ., με έμφαση στην παραβίαση προτεραιότητας και την υπερβολική ταχύτητα, που αναδείχθηκαν ως κύριες αιτίες.

Οι περιοχές μέτριου κινδύνου (κυρίως Cluster 1 και 3) μπορούν να αντιμετωπιστούν με χαμηλότερου κόστους, συστημικές παρεμβάσεις, όπως καμπάνιες ενημέρωσης και περιοδικούς ελέγχους.

6.2.2 ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΠΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Οι τοπικές αρχές (Δήμος Βόλου, Περιφέρεια Θεσσαλίας, Τροχαία Μαγνησίας) μπορούν να αξιοποιήσουν τα αποτελέσματα της εργασίας ως ένα δυναμικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων. Συγκεκριμένα, προτείνεται:

1. **Υιοθέτηση των χαρτών επικινδυνότητας:** Οι θεματικοί χάρτες που δημιουργήθηκαν μπορούν να ενσωματωθούν στον επιχειρησιακό σχεδιασμό των αρμόδιων υπηρεσιών για τον προγραμματισμό έργων και δράσεων.
2. **Δημιουργία υπηρεσίας οδικής ασφάλειας:** Να δημιουργηθεί μια μόνιμη δομή που θα συλλέγει και θα αναλύει συστηματικά τα δεδομένα ατυχημάτων, επικαιροποιώντας τους χάρτες κινδύνου σε ετήσια βάση.
3. **Παρεμβάσεις βασισμένες στα δεδομένα:** Κάθε απόφαση για παρέμβαση σε μια διασταύρωση να τεκμηριώνεται από τα ευρήματα της ανάλυσης, διασφαλίζοντας τη μέγιστη αποτελεσματικότητα των διαθέσιμων πόρων.
4. **Εκστρατείες ενημέρωσης:** Διοργάνωση στοχευμένων εκστρατειών ευαισθητοποίησης που θα εστιάζουν στις ομάδες υψηλού κινδύνου (νέοι οδηγοί) και στις πιο συχνές παραβάσεις (προτεραιότητα, ταχύτητα).

6.3 Περιορισμοί μελέτης

Η αναγνώριση των ορίων και των περιορισμών της παρούσας έρευνας είναι θεμελιώδους σημασίας για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την οριοθέτηση της εγκυρότητάς τους.

Η ανάλυση βασίστηκε αποκλειστικά στα επίσημα στοιχεία που καταγράφονται από την Τροχαία. Είναι διεθνώς αναγνωρισμένο ότι υπάρχει μια σημαντική απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και των καταγεγραμμένων ατυχημάτων. Συμβάντα με ελαφρές ή καθόλου υλικές ζημιές, χωρίς τραυματισμούς, ή όσα επιλύονται ιδιωτικά μεταξύ των εμπλεκομένων, συχνά δεν καταγράφονται ποτέ. Αυτή η συστηματική παράλειψη εισάγει μια μεροληψία προς τα σοβαρότερα ατυχήματα, με αποτέλεσμα η πραγματική συχνότητα των λιγότερο σοβαρών συγκρούσεων να υποεκτιμάται. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη συνολική εικόνα της επικινδυνότητας, ειδικά σε περιοχές όπου κυριαρχούν μικροσυγκρούσεις.

Ο κρισιμότερος ίσως περιορισμός είναι η έλλειψη δεδομένων για τους κυκλοφοριακούς φόρτους ανά διασταύρωση. Η μεθοδολογία αξιολογεί την απόλυτη συχνότητα και τη

σοβαρότητα των ατυχημάτων, αλλά όχι τον σχετικό δείκτη κινδύνου (π.χ. ατυχήματα ανά εκατομμύριο διερχόμενα οχήματα). Μια διασταύρωση με υψηλό αριθμό ατυχημάτων μπορεί να μην είναι εγγενώς επικίνδυνη, αλλά απλώς να εξυπηρετεί έναν τεράστιο όγκο κυκλοφορίας. Αντίστροφα, μια διασταύρωση με λίγα ατυχήματα αλλά πολύ χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο μπορεί να έχει έναν εξαιρετικά υψηλό δείκτη κινδύνου. Χωρίς δεδομένα έκθεσης, η σύγκριση της εγγενούς ασφάλειας μεταξύ διαφορετικών διασταυρώσεων γίνεται μερικώς μόνο ακριβής.

Η βάση δεδομένων, αν και πλούσια σε στοιχεία για το τι συνέβη, στερείται πληροφοριών που θα μπορούσαν να εξηγήσουν το γιατί συνέβη. Μεταβλητές όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. αριθμός λωρίδων, ύπαρξη λωρίδας αριστερής στροφής, οπτικό πεδίο), τα λειτουργικά χαρακτηριστικά (π.χ. ρύθμιση φωτεινής σηματοδότησης, όρια ταχύτητας) και τα συμπεριφορικά δεδομένα (π.χ. μέσες ταχύτητες διέλευσης) δεν ήταν διαθέσιμες. Η απουσία τους περιορίζει την ικανότητα των προβλεπτικών μοντέλων να συνδέσουν τον κίνδυνο με συγκεκριμένα, διορθώσιμα προβλήματα της υποδομής, καθιστώντας τις προτάσεις βελτίωσης πιο γενικές.

Το χρονικό διάστημα της μελέτης (2019-2023) περιλαμβάνει την περίοδο της πανδημίας και των περιοριστικών μέτρων (lockdowns) του 2020 και 2021. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι κυκλοφοριακές συνθήκες και τα πρότυπα μετακίνησης μεταβλήθηκαν δραματικά, με σημαντική μείωση των κυκλοφοριακών φόρτων. Αυτή η ανωμαλία ενδέχεται να έχει επηρεάσει τόσο τον αριθμό όσο και τον τύπο των ατυχημάτων, καθιστώντας τα δεδομένα αυτών των ετών μη αντιπροσωπευτικά μιας «κανονικής» χρονιάς. Παρόλο που η πενταετής περίοδος εξομαλύνει μερικώς αυτή την επίδραση, δεν μπορεί να αποκλειστεί μια πιθανή στρέβλωση στα συνολικά πρότυπα.

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η μελέτη προσφέρει μια ισχυρή και αξιόπιστη πρώτη προσέγγιση στην ιεράρχηση του κινδύνου στις διασταυρώσεις του Βόλου, θέτοντας στέρεες βάσεις και υποδεικνύοντας σαφείς κατευθύνσεις για περαιτέρω, πιο εξειδικευμένη έρευνα.

6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα δεν απομειώνουν την αξία της παρούσας μελέτης, αλλά, αντίθετα, λειτουργούν ως πυξίδα, φωτίζοντας αναγκαίες και εξαιρετικά υποσχόμενες κατευθύνσεις για τη μελλοντική έρευνα. Κάθε περιορισμός

μετατρέπεται σε ερευνητική ευκαιρία για την οικοδόμηση ενός πιο ολοκληρωμένου και προληπτικού πλαισίου διαχείρισης της οδικής ασφάλειας στην πόλη του Βόλου.

Για να αντιμετωπιστεί ο θεμελιώδης περιορισμός της απουσίας δεδομένων έκθεσης, προτείνεται ως επόμενο βήμα η διεξαγωγή μιας εκτεταμένης μελέτης συλλογής κυκλοφοριακών δεδομένων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός συνδυασμού μεθόδων: εγκατάσταση αυτόματων καταγραφών κυκλοφορίας σε στρατηγικές διασταυρώσεις, χρήση δεδομένων από εφαρμογές πλοήγησης (ανωνυμοποιημένα GPS data) ή ακόμα και ανάλυση βιντεοσκοπικού υλικού από drones. Με τα δεδομένα αυτά, η έρευνα θα μπορέσει να προχωρήσει από την ανάλυση του απόλυτου αριθμού ατυχημάτων στην ανάπτυξη δεικτών σχετικού κινδύνου (π.χ. ατυχήματα ανά εκατομμύριο διερχόμενα οχήματα). Αυτό θα επιτρέψει μια πολύ πιο δίκαιη και ακριβή σύγκριση της εγγενούς επικινδυνότητας των διασταυρώσεων, αναδεικνύοντας σημεία που είναι επικίνδυνα λόγω του σχεδιασμού τους και όχι απλώς λόγω του υψηλού κυκλοφοριακού τους φόρτου.

Απαντώντας στον περιορισμό της έλλειψης επεξηγηματικών μεταβλητών, μια μελλοντική ερευνητική προσπάθεια πρέπει να εστιάσει στη δημιουργία μιας λεπτομερούς γεωγραφικής βάσης δεδομένων με τα χαρακτηριστικά των διασταυρώσεων. Για κάθε σημείο, θα πρέπει να καταγραφούν συστηματικά στοιχεία όπως ο αριθμός και το πλάτος των λωρίδων, η ύπαρξη και το μήκος των λωρίδων στροφής, τα όρια ταχύτητας, οι συνθήκες ορατότητας και ο τύπος ελέγχου (π.χ. χρόνοι σηματοδότησης). Με αυτό το εμπλουτισμένο σύνολο δεδομένων, θα είναι εφικτή η ανάπτυξη εξελιγμένων στατιστικών μοντέλων, όπως οι Συναρτήσεις Επίδοσης Ασφαλείας (Safety Performance Functions - SPF). Αυτά τα μοντέλα δεν θα περιγράφουν απλώς τον υφιστάμενο κίνδυνο, αλλά θα μπορούν να προβλέψουν τον αναμενόμενο αριθμό ατυχημάτων με βάση τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας διασταύρωσης, προσφέροντας ένα ισχυρότατο προληπτικό εργαλείο στους συγκοινωνιολόγους και πολεοδόμους.

Ο εντοπισμός της περιόδου της πανδημίας COVID-19 ως παράγοντα που ενδέχεται να στρεβλώνει τα δεδομένα, δημιουργεί μια αυτόνομη ερευνητική ευκαιρία. Μια εστιασμένη μελέτη θα μπορούσε να συγκρίνει τα πρότυπα ατυχημάτων σε τρεις διακριτές περιόδους: προ-πανδημίας (2019), κατά τη διάρκεια των lockdowns (2020-2021) και μετά την άρση των περιορισμών (2022-2023). Μια τέτοια ανάλυση θα μπορούσε να απαντήσει σε κρίσιμα ερωτήματα: Οδήγησε η μείωση της κυκλοφορίας σε αύξηση των ταχυτήτων και της σοβαρότητας των ατυχημάτων; Άλλαξε ο τύπος των ατυχημάτων που κυριαρχούσαν; Αυτά τα

ευρήματα θα προσφέρουν πολύτιμη γνώση για την οδηγική συμπεριφορά υπό ακραίες και μεταβαλλόμενες συνθήκες.

6.5 Τελικά συμπεράσματα

Η ολοκλήρωση μιας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί το τέλος ενός ακαδημαϊκού κύκλου, αλλά ταυτόχρονα και την αρχή μιας νέας αντίληψης για το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού. Το ταξίδι που ξεκίνησε με έναν απλό προβληματισμό για τα τροχαία ατυχήματα στην πόλη του Βόλου εξελίχθηκε σε μια βαθιά και αποκαλυπτική ερευνητική διαδρομή. Πέρα από τα διαγράμματα, τους δείκτες και τους χάρτες, αυτό που μένει ως η πιο πολύτιμη παρακαταθήκη είναι η ίδια η διαδικασία της ανακάλυψης.

Αρχικά, τα δεδομένα των ατυχημάτων έμοιαζαν με μια ψυχρή, αποστασιοποιημένη λίστα αριθμών και τοποθεσιών. Κάθε γραμμή σε εκείνο το αρχείο Excel, όμως, έκρυβε πίσω της μια ανθρώπινη ιστορία: μια στιγμή απροσεξίας, μια λάθος απόφαση, μια αλυσίδα γεγονότων που άλλαξε για πάντα τη ζωή κάποιου. Η μετατροπή αυτών των μεμονωμένων τραγωδιών σε αναγνωρίσιμα, στατιστικά πρότυπα ήταν μια διαδικασία που μας δίδαξε τη δύναμη της επιστημονικής μεθόδου να φέρνει τάξη στο χάος και να δίνει φωνή σε σιωπηλά δεδομένα.

Η ενασχόληση με τη μεθοδολογία μας έφερε αντιμέτωπους με την πραγματική πρόκληση της μηχανικής: την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης μέσα σε ένα πλαίσιο περιορισμών και αβεβαιότητας. Η συνειδητοποίηση ότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός, «τέλειος» δείκτης κινδύνου, αλλά μια σύνθεση παραγόντων που πρέπει να σταθμιστούν με κρίση και λογική, ήταν ένα μάθημα που ξεπερνά τα όρια της οδικής ασφάλειας. Μάθαμε ότι πίσω από κάθε τεχνική απόφαση κρύβεται μια σειρά από υποθέσεις και αξίες, και ότι η ευθύνη του μηχανικού είναι να τις αναγνωρίζει και να τις τεκμηριώνει με διαφάνεια.

Το πιο καθοριστικό σημείο, όμως, ήταν η στιγμή της χωρικής απεικόνισης. Όταν οι αριθμοί απέκτησαν επιτέλους συντεταγμένες και οι δείκτες μετατράπηκαν σε χρώματα πάνω στον χάρτη της πόλης μας, η έρευνα απέκτησε ψυχή. Οι δρόμοι που περπατάμε καθημερινά, οι διασταυρώσεις από τις οποίες περνάμε, αποκαλύφθηκαν κάτω από ένα νέο πρίσμα, αυτό του μετρήσιμου κινδύνου. Αυτή η οπτικοποίηση μετέτρεψε την ακαδημαϊκή άσκηση σε ένα έργο με άμεσο κοινωνικό αντίκτυπο.

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, το μήνυμα που θέλουμε να μοιραστούμε είναι απλό, αλλά ουσιώδες. Ως μηχανικοί, συχνά εστιάζουμε στην αντοχή των υλικών, στη στατική

επάρκεια των κατασκευών ή στη βελτιστοποίηση των ροών. Η εργασία αυτή μας υπενθύμισε ότι ο τελικός αποδέκτης κάθε έργου μας είναι ο άνθρωπος. Τα τροχαία ατυχήματα δεν είναι απλώς ένα τεχνικό πρόβλημα προς επίλυση, αλλά μια διαρκής υπενθύμιση ότι η ασφάλεια, η πρόληψη και η προστασία της ανθρώπινης ζωής πρέπει να αποτελούν την αφετηρία και τον τελικό σκοπό κάθε μας σχεδιασμού. Ας μην ξεχνάμε ποτέ ότι πίσω από τους υπολογισμούς και τα σχέδια, η μεγαλύτερη ευθύνη μας είναι να χτίζουμε έναν κόσμο όχι μόνο πιο λειτουργικό, αλλά κυρίως, πιο ασφαλή για όλους.

Βιβλιογραφία

- Adanu, E., Li, X., Liu, J., & Jones, S. (2021). An Analysis of the Effects of Crash Factors and Precrash Actions on Side Impact Crashes at Unsignalized Intersections. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2021/6648523>
- Alemdar, K., Kaya, Ö., & Çodur, M. (2020). A GIS and microsimulation-based MCDA approach for evaluation of pedestrian crossings. *Accident; Analysis and Prevention*, 148, 105771. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105771>
- Alhajyaseen, W. (2015). The Integration of Conflict Probability and Severity for the Safety Assessment of Intersections. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 421–430. <https://doi.org/10.1007/S13369-014-1553-1>
- Álvarez, P., Fernández, M., Gordaliza, A., Mansilla, A., & Molinero, A. (2020). Geometric road design factors affecting the risk of urban run-off crashes. A case-control study. *PLoS ONE*, 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234564>
- American National Standards Institute. (2007). *Manual on Classification of Motor Vehicle Traffic Accidents*. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/07d16>
- Anagnostopoulos, A., & Kehagia, F. (2020). CAVs and roundabouts: research on traffic impacts and design elements. *Transportation Research Procedia*, 49, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.008>
- Antoniou, C., Yannis, G., Evgenikos, P., Knowles, J., Broughton, J., & Kirk, A. (2011). *A Critical Assessment of Intersection Safety Across Europe*. <https://consensus.app/papers/a-critical-assessment-of-intersection-safety-across-evgenikos-antoniou/d37ba21793335cd28f57ac8a2a2b9f5a/>
- Astarita, V., Caliendo, C., Giofrè, V. P., & Russo, I. (2020). Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation: Validation of Safety Indicators with Intersection Traffic Crash Data. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su12176974>

- Aziz, F., Mahmudah, N., Augeri, M., & Comi, A. (2025). Advancing Road Safety in Urban Area: The Impact of Roundabouts on Intersection Design. *Journal of the Civil Engineering Forum*. <https://doi.org/10.22146/jcef.15904>
- Barić, D. (2021). Multi-criteria Analysis of Technical Solutions for Road Intersection Reconstruction: An Application of AHP Method. *DAAAM International Scientific Book*. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2021.06>
- Bonela, S. R., & Kadali, B. (2022). Review of traffic safety evaluation at T-intersections using surrogate safety measures in developing countries context. *IATSS Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2022.03.001>
- Braitman, K., Kirley, B., Ferguson, S., & Chaudhary, N. (2007). Factors Leading to Older Drivers' Intersection Crashes. *Traffic Injury Prevention*, 8, 267–274. <https://doi.org/10.1080/15389580701272346>
- Čabarkapa, M., & Avramović, Z. (2017). Focus Areas and Measures to Improve Road Traffic Safety at the Local Level. *Management Science*, 7, 75–83. <https://consensus.app/papers/focus-areas-and-measures-to-improve-road-traffic-safety-at-%C4%8Dabarkapa-avramovi%C4%87/f6f1b810ae625ab2b13b0b14d2cea8b2/>
- Carroll, D., & Lahusen, D. (2013). Operational Effects of Continuous Flow Intersection Geometrics. *Transportation Research Record*, 2348, 1–11. <https://doi.org/10.3141/2348-01>
- Chellappa, V., & Ginda, G. (2023). Application of multiple criteria decision making (MCDM) methods for construction safety research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*. <https://doi.org/10.1680/jmapl.23.00006>
- Chen, S., Kuhn, M., Prettnner, K., & Bloom, D. E. (2019). The global macroeconomic burden of road injuries: estimates and projections for 166 countries. *The Lancet Planetary Health*, 3(9), e390–e398. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30170-6](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30170-6)
- Chuco, B., Pérez, C., Silvera, M., & Campos, F. (2020). A Geometric Design of Traffic-Light Roads Crossing Using the Continuous Flow Intersections Methodology to Reduce Points of Primary Conflicts Caused by Left Turns. *Proceedings of the 5th Brazilian Technology Symposium*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57548-9_53
- citypopulation.de. (2025). *Vólos (Dímos Vólou, Thessaly, Greece) - Population Statistics, Charts, Map, Location, Weather and Web Information*. Citypopulation.De.

- https://www.citypopulation.de/en/greece/thessalia/d%C3%ADmos_v%C3%B3lou/2401010101__v%C3%B3los/
- Cornelissen, M., Salmon, P., Salmon, P., Stanton, N., & McClure, R. (2015). Assessing the “system” in safe systems-based road designs: using cognitive work analysis to evaluate intersection designs. *Accident; Analysis and Prevention*, 74, 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.002>
- Cui, H., Dong, S.-L., Hu, J., Chen, M., Hou, B., Zhang, J., Zhang, B., Xian, J., & Chen, F. (2023). A hybrid MCDM model with Monte Carlo simulation to improve decision-making stability and reliability. *Inf. Sci.*, 647, 119439. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119439>
- Cui, P., Yang, X., Abdel-Aty, M., Zhang, J., & Yan, X. (2024). Advancing urban traffic accident forecasting through sparse spatio-temporal dynamic learning. *Accident; Analysis and Prevention*, 200, 107564. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107564>
- Dedeitch, B. (2004). *ADOPTING LOW-COST INTERSECTION SAFETY IMPROVEMENTS*. <https://consensus.app/papers/adopting-lowcost-intersection-safety-improvements-dedeitch/1665a8ab20225e178b19e57f8cd3b16f/>
- Demir, H., & Demir, Y. (2020). A Comparison of Traffic Flow Performance of Roundabouts and Signalized Intersections: A Case Study in Nigde. *The Open Transportation Journal*. <https://doi.org/10.2174/1874447802014010120>
- Dunn, M., Huang, I., & Porter, R. (2022). Safe System for Intersections Method Scoring: Comparing Intersection Alternatives Based on Exposure, Kinetic Energy Management, and Movement Complexity. *Transportation Research Record*, 2677, 1266–1277. <https://doi.org/10.1177/03611981221111152>
- EHSANI, J. P., MICHAEL, J. P., & MacKENZIE, E. J. (2023). The Future of Road Safety: Challenges and Opportunities. *The Milbank Quarterly*, 101(S1), 613–636. <https://doi.org/10.1111/1468-0009.12644>
- El-Basyouny, K., & Sayed, T. (2011). A full Bayes multivariate intervention model with random parameters among matched pairs for before-after safety evaluation. *Accident; Analysis and Prevention*, 43 1, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.07.015>
- Elvik, R. (2000). How much do road accidents cost the national economy? *Accident Analysis & Prevention*, 32(6), 849–851. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(00\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(00)00015-4)

- Elvik, R., & Nævestad, T.-O. (2023). Does empirical evidence support the effectiveness of the Safe System approach to road safety management? *Accident; Analysis and Prevention*, 191, 107227. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107227>
- Ertunç, E., Mutluoglu, O., & Çay, T. (2013). Intersection road accident analysis using geographical information systems: Antalya (Turkey) example. *2013 7th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICAICT.2013.6722713>
- Essa, M., & Sayed, T. (2019). Full Bayesian conflict-based models for real time safety evaluation of signalized intersections. *Accident; Analysis and Prevention*, 129, 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.09.017>
- Federal Highway Administration. (2025). *Safety Analysis*. Highways.Dot.Gov. <https://highways.dot.gov/safety/local-rural/intersection-safety-manual-local-rural-road-owners/3-safety-analysis>
- Ferenchak, N., & Marshall, W. (2019). Equity Analysis of Proactively- vs. Reactively- Identified Traffic Safety Issues. *Transportation Research Record*, 2673, 596–606. <https://doi.org/10.1177/0361198119841296>
- Fong, G., Kopf, J., Clark, P., Collins, R., Cunard, R., Kobetsky, K., Lalani, N., Ranck, F., Seyfried, R., Slack, K., Sparks, J., Umbs, R., & Winkle, S. (2003). *SIGNALIZED INTERSECTION SAFETY IN EUROPE*. <https://consensus.app/papers/signalized-intersection-safety-in-europe-slack-kobetsky/0c39109935c453ccb8746afb4fb73c33/>
- Ghee, C., Silcock, D., Astrop, A., & Jacobs, G. (1997). Socio-economic aspects of road accidents in developing countries. *TRL Report*, 247.
- Gong, Y., Abdel-Aty, M., Yuan, J., & Cai, Q. (2020). Multi-Objective reinforcement learning approach for improving safety at intersections with adaptive traffic signal control. *Accident; Analysis and Prevention*, 144, 105655. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105655>
- Goniewicz, K., Goniewicz, M., Pawłowski, W., & Fiedor, P. (2016). Road accident rates: strategies and programmes for improving road traffic safety. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 42, 433–438. <https://doi.org/10.1007/s00068-015-0544-6>
- Gu, Y., Liu, D., Arvin, R., Khattak, A., & Han, L. (2022). Predicting intersection crash frequency using connected vehicle data: A framework for geographical random forest.

- Accident; Analysis and Prevention*, 179, 106880.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106880>
- Guo, F., Wang, X., & Abdel-Aty, M. (2010). Modeling signalized intersection safety with corridor-level spatial correlations. *Accident; Analysis and Prevention*, 42 1, 84–92.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.005>
- Guo, Y., Sayed, T., & Essa, M. (2020). Real-time conflict-based Bayesian Tobit models for safety evaluation of signalized intersections. *Accident; Analysis and Prevention*, 144, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105660>
- He, Z., Zheng, L., Lu, L., & Guan, W. (2018). Erasing Lane Changes From Roads: A Design of Future Road Intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(2), 173–184.
<https://doi.org/10.1109/TIV.2018.2804164>
- Hellas Vacations. (2012). *Βόλος*. Hellas Vacations.
- Himes, S., Porter, R., & Eccles, K. (2018). Safety Evaluation of Geometric Design Criteria: Intersection Sight Distance at Unsignalized Intersections. *Transportation Research Record*, 2672, 11–19. <https://doi.org/10.1177/0361198118783162>
- Hossain, A., Sun, X., Zafri, N. M., & Codjoe, J. (2023). Investigating Pedestrian Crash Patterns at High-speed Intersection and Road Segments: Findings from the unsupervised learning algorithm. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.04.007>
- Hu, Z., Zhou, J., & Zhang, E. (2023). Improving Traffic Safety through Traffic Accident Risk Assessment. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15043748>
- Hussein, N., & Hassan, R. (2017). Surface condition and safety at signalised intersections. *International Journal of Pavement Engineering*, 18, 1016–1026.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1141411>
- Hussein, N., Hassan, R., & Fahey, M. (2021). Effect of pavement condition and geometrics at signalised intersections on casualty crashes. *Journal of Safety Research*, 76, 276–288.
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.12.021>
- iSTIGMES. (2023, July 11). ΛΑΣ ΒΟΛΟΥ: Αδιαφορία Δήμου και Περιφέρειας για τον επικίνδυνο δρόμο Βόλου – Διμηνίου. *ISTIGMES*. <https://istigmes.com/las-volou-adiaforia-dimou-kai-perifereias-gia-ton-epikindyno-dromo-volou-diminiou/>
- Jashami, H., Anderson, J., Mohammed, H., Cobb, D., & Hurwitz, D. (2023). Contributing Factors to Right-Turn Crash Severity at Signalized Intersections: An Application of

- Econometric Modeling. *International Journal of Transportation Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2023.02.004>
- Jażdżik-Osmólska, A. M., Kalbarczyk, M. K., Trzaskowski, D., Wojtachnik, R., & Trzaskowska-Dmoch, A. (2024). Economic impact of road accidents on costs of employee turnover: A quantitative study from Poland. *Archives of Transport*, 72(4), 151–165. <https://doi.org/10.61089/aot2024.tvnay379>
- Jima, D., & Sipos, T. (2022). The Impact of Road Geometric Formation on Traffic Crash and Its Severity Level. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14148475>
- Job, R., Truong, J., & Sakashita, C. (2022). The Ultimate Safe System: Redefining the Safe System Approach for Road Safety. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14052978>
- Kamrani, M., Wali, B., & Khattak, A. (2017). Can Data Generated by Connected Vehicles Enhance Safety?: Proactive Approach to Intersection Safety Management. *Transportation Research Record*, 2659, 80–90. <https://doi.org/10.3141/2659-09>
- Karatsoli, M., Karakikes, I., & Nathanail, E. (2019). *Urban Traffic Management Utilizing Soft Measures: A Case Study of Volos City* (pp. 655–662). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02305-8_79
- Kathuria, A., & Vedagiri, P. (2020). Evaluating pedestrian vehicle interaction dynamics at unsignalized intersections: A proactive approach for safety analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 134, 105316. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105316>
- Kehagia, F., Braziotis, C., & Kopelias, P. (2022). Road Safety Audit Findings on Two-Lane Road: Case Study in Greece. *International Journal of Transport Development and Integration*, 6(4), 333–346. <https://doi.org/10.2495/TDI-V6-N4-333-346>
- Keramati, A., Lu, P., Tolliver, D., & Wang, X. (2020). Geometric effect analysis of highway-rail grade crossing safety performance. *Accident; Analysis and Prevention*, 138, 105470. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105470>
- Khan, A., P.K., A., & Chaki, S. (2016). *Strategies for Safety Evaluation of Road Intersection to have Sustainable Development*. 3, 64–76. <https://consensus.app/papers/strategies-for-safety-evaluation-of-road-intersection-to-chaki-pk/c762b2393b225909a4d826844abb7450/>
- Khan, M. N., & Das, S. (2024). Advancing traffic safety through the safe system approach: A systematic review. *Accident; Analysis and Prevention*, 199, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107518>

- Khattak, M. W., Pirdavani, A., Winne, P., Brijs, T., & Backer, H. (2020). *Examining the Effects of Geometric Features, Traffic Control, and Traffic Volume on Crash Frequency at Urban Intersections*. 95–106. <https://doi.org/10.1061/9780784483145.009>
- Klanjčič, M., Gauvin, L., Tizzoni, M., & Szell, M. (2021). Identifying urban features for vulnerable road user safety in Europe. *EPJ Data Science*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.31235/osf.io/89cyu>
- Kludt, K., Brown, J., Richman, J., & Campbell, J. (2006). *Human Factors Literature Reviews on Intersections, Speed Management, Pedestrians and Bicyclists, and Visibility*. <https://consensus.app/papers/human-factors-literature-reviews-on-intersections-speed-campbell-richman/55e67cebc06f54b186773616c954e5c0/>
- Koukoidimos, K. (2020). Η Ελλάδα σε κίνηση: Βιώσιμη Αστική Κινητικότητα – Μικροκινητικότητα και άλλες διατάξεις. In Κ. Έ. Δ. Ε. (Κ.Ε.Δ.Ε.) (Ed.), *Πρακτικά συνεδρίασης του Διοικητικού Συμβουλίου της Κεντρικής Ένωσης Δήμων Ελλάδας (Κ.Ε.Δ.Ε.)*. <https://kede.gr/wp-content/uploads/2020/12/%CE%94%CE%A3-659-%CE%92%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%99%CE%9C%CE%97-%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97-%CE%91%CE%9D%CE%91%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%9E%CE%97-%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%A1%CE%9F%CE%9A%CE%99%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%91.pdf>
- Kronprasert, N., Sutheerakul, C., Satiennam, T., & Luatthep, P. (2021). Intersection Safety Assessment Using Video-Based Traffic Conflict Analysis: The Case Study of Thailand. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su132212722>
- Kwon, J.-H., & Cho, G.-H. (2020). An examination of the intersection environment associated with perceived crash risk among school-aged children: using street-level imagery and computer vision. *Accident; Analysis and Prevention*, 146, 105716. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105716>
- Le, T., Gross, F., & Harmon, T. (2017). Safety Effects of Low-Cost Systemic Safety Improvements at Signalized and Stop-Controlled Intersections. *Transportation Research Record*, 2636, 80–87. <https://doi.org/10.3141/2636-10>
- Lee, J., Abdel-Aty, M., & Cai, Q. (2017). Intersection crash prediction modeling with macro-level data from various geographic units. *Accident; Analysis and Prevention*, 102, 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.03.009>

- Lee, T., Cunningham, C., & Roupail, N. (2023). Movement-based intersection crash frequency modeling. *Journal of Transportation Safety & Security*, 15, 493–514. <https://doi.org/10.1080/19439962.2022.2092571>
- Lefler, N., Fiedler, R., & Abbot, D. (2013). *Using Geographic Information Systems to Develop an Intersection Inventory for Safety*. <https://consensus.app/papers/using-geographic-information-systems-to-develop-an-lefller-fiedler/61bb0b0cabef5980930d4fa7f7392498/>
- Li, H., Wang, L., Hu, H., & Bie, Y. (2023). Optimal Matching between Vehicle Speed and Lighting at Intersection Based on Traffic Risk Analysis. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1061/ajrua6.rueng-939>
- Li, Z., Chen, C., Ci, Y., Zhang, G., Wu, Q., Liu, C., & Qian, Z. (2018). Examining driver injury severity in intersection-related crashes using cluster analysis and hierarchical Bayesian models. *Accident; Analysis and Prevention*, 120, 139–151. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.08.009>
- Lin, D., Yang, J.-R., Liu, H.-H., Chiang, H.-S., & Wang, L.-Y. (2022). Analysis of Environmental Factors on Intersection Accidents. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14031764>
- Lombardi, D., Horrey, W., & Courtney, T. (2017). Age-related differences in fatal intersection crashes in the United States. *Accident; Analysis and Prevention*, 99 Pt A, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.10.030>
- Long, K., Cheng-Qing, Jiang, Z.-H., Wang, Y., & Yang, X. (2020). Integrated Optimization of Traffic Signals and Vehicle Trajectories at Intersection With the Consideration of Safety During Signal Change. *IEEE Access*, 8, 170732–170741. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021082>
- Makowsky, M., & Stratmann, T. (2010). More Tickets, Fewer Accidents: How Cash-Strapped Towns Make for Safer Roads. *The Journal of Law and Economics*, 54, 863–888. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1232373>
- Mao, C., Zhang, X., & Huang, Y. (2024). Attention distribution of pedestrians during street crossings: impacts of facility and environment. 13421, 1342102. <https://doi.org/10.1117/12.3054807>

- Megnidio-Tchoukouegno, M., & Adedeji, J. (2023). Machine Learning for Road Traffic Accident Improvement and Environmental Resource Management in the Transportation Sector. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15032014>
- Mhana, M., Alwani, K., & Mahmoud, A. (2020). Evaluation the effect of some traffic characteristics on the safety performance of intersections. *Anbar Journal of Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.37649/aengs.2023.176832>
- Mohammadnazar, A., Patwary, A., Moradloo, N., Arvin, R., & Khattak, A. (2022). Incorporating driving volatility measures in safety performance functions: Improving safety at signalized intersections. *Accident; Analysis and Prevention*, 178, 106872. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106872>
- Montella, A., Guida, C., Mosca, J., Lee, J., & Abdel-Aty, M. (2020). Systemic approach to improve safety of urban unsignalized intersections: Development and validation of a Safety Index. *Accident; Analysis and Prevention*, 141, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105523>
- Mukherjee, D., & Mitra, S. (2020). Pedestrian safety analysis of urban intersections in Kolkata, India using a combined proactive and reactive approach. *Journal of Transportation Safety & Security*, 14, 754–795. <https://doi.org/10.1080/19439962.2020.1818907>
- Mustakim, F., Aziz, A. A., Siong, L., Bakhuraisa, Y., Mahmud, A., & Rahman, N. Z. B. A. (2024). Traffic Characteristic and The Impact of Safety Infrastructure at Unsignalized Intersection. *2024 Multimedia University Engineering Conference (MECON)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/MECON62796.2024.10776234>
- Namgung, H., Kim, C., Choe, K.-S., Ri, C., Kim, Y., & Ri, M. P. (2020). Research Progress of Road Intersection Design Analysis. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 7, 245–256. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET207643>
- Nenadić, D. (2019). Ranking dangerous sections of the road using MCDM model. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. <https://doi.org/10.31181/DMAME.V2I1.31>
- nomadseason.com. (2024, May 6). *Monthly climate in Volos, Thessaly, Greece*. Nomadseason.Com. <https://nomadseason.com/climate/greece/thessaly/volos.html>

- Novikov, A., Novikov, I., & Shevtsova, A. (2019). Measures to ensure road traffic safety on controlled intersections. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800046>
- Novikov, I., Borovskoy, A., Gorbun, Y., Terentyev, A., & Pletney, M. (2021). Geographic Information Systems to Improve Road Safety. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416096>
- Nyberg, D., & Riddle, J. (2014). *Accelerated Intersection Improvements Enhance Safety*. <https://consensus.app/papers/accelerated-intersection-improvements-enhance-safety-nyberg-riddle/2c922ca93ff7551c87e50813769c291c/>
- Osetrin, M., Tarasiuk, V., Bespalov, D., & Myroshnychenko, O. (2021). *MULTICRITERIA ANALYSIS AS A METHOD OF CHOICE JUSTIFICATION FOR ENGINEERING AND PLANNING DECISIONS OF CITY HIGHWAYS' INTERSECTIONS*. 215–231. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.59.215-231>
- Papaioannou, P., Politis, I., & Nikolaidou, A. (2016). Steps towards Sustaining a SUMP Network in Greece. *Transportation Research Procedia*, 14, 945–954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.074>
- Pawar, N., Gore, N., & Arkatkar, S. (2018). Influence of Driving Environment on Safety at Un-signalized T-intersection Under Mixed Traffic Conditions. *Innovative Research in Transportation Infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2032-3_3
- Polyzos, S. (2020). *Κείμενα Πολεοδομίας, Χωροταξίας και Ανάπτυξης*. <https://journals.lib.uth.gr/index.php/aeihoros/issue/view/4/21>
- Popovych, N., Belenchuk, O., & Tepluk, Y. (2023). IMPROVING TRAFFIC SAFETY AT INTERSECTIONS. *Dorogi i Mosti*. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234>
- Proto Thema. (2025, June 12). Βόλος: Καταζητείται από τις Αρχές 50χρονος Ρομά που σκότωσε και εγκατέλειψε μοτοσικλετιστή το 2023. *Proto Thema*. <https://www.protothema.gr/greece/article/1653627/volos-kataziteitai-apo-tis-arhes-50hronos-pou-skotose-kai-egateleipse-motosikletisti-meta-apo-trohaio/>
- Quezon, E. T., & Haji, S. (2018). *Traffic Safety Evaluation on Urban Road Un-signalized Intersection using Proactive Approach: A Case Study in Adama City*. <https://doi.org/10.20372/nadre/4225>

- Read, G., Salmon, P., Goode, N., Van Mulken, M., Lenné, M., Stevens, N., & Walker, G. (2020). Interaction-centred design: an end user evaluation of road intersection concepts developed using the cognitive work analysis design toolkit (CWA-DT). *Ergonomics*, 63, 1221–1239. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1782996>
- Saha, P. (2022). Developing a Low-Cost Safety Improvement Program for Intersections in an Urban Roadway Network: A Case Study. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2022/5713435>
- Sarraf, R., & McGuire, M. (2020). Integration and comparison of multi-criteria decision making methods in safe route planner. *Expert Syst. Appl.*, 154, 113399. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113399>
- Sayed, T., Sacchi, E., & deLeur, P. (2016). Evaluating Safety Benefits of the Insurance Corporation of British Columbia Road Improvement Program Using a Full Bayes Approach. *Transportation Research Record*, 2582, 26–33. <https://doi.org/10.3141/2582-04>
- Shahriar, M., Kale, A., & Chang, K. (2023). Enhancing Intersection Traffic Safety Utilizing V2I Communications: Design and Evaluation of Machine Learning Based Framework. *IEEE Access*, 11, 106024–106036. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3319382>
- Sharafeldin, M., Farid, A., & Ksaibati, K. (2022). Investigating the Impact of Roadway Characteristics on Intersection Crash Severity. *Eng.* <https://doi.org/10.3390/eng3040030>
- Shiomi, Y., Watanabe, K., Nakamura, H., & Akahane, H. (2017). Assessing Safety of Signalized Intersections: Influence of Geometric Attributes and Regionality on Traffic Accident Risk. *Transportation Research Record*, 2659, 71–79. <https://doi.org/10.3141/2659-08>
- Smart, W., Job, S., Roos, M., & Bryant, P. (2010). *The safe systems approach to road safety*. <https://consensus.app/papers/the-safe-systems-approach-to-road-safety-bryant-job/c8ec1817ffdd50cdb2ee3bf83691e39c/>
- So, J., Lim, I.-K., & Kweon, Y.-J. (2015). Exploring Traffic Conflict-Based Surrogate Approach for Safety Assessment of Highway Facilities. *Transportation Research Record*, 2513, 56–62. <https://doi.org/10.3141/2513-07>
- Stević, Ž., Subotić, M., Softić, E., & Božić, B. (2022). Multi-Criteria Decision-Making Model for Evaluating Safety of Road Sections. *Journal of Intelligent Management Decision*. <https://doi.org/10.56578/jimd010201>

- Stokes, C., Raftery, S., & Woolley, J. (2019). Road user perception of safety at Safe System intersections. *Journal of the Australasian College of Road Safety*. <https://doi.org/10.33492/JACRS-D-18-00178>
- Subin, P., Young, L., & Cheol, O. (2020). Classification of Local Governments by Road Traffic Safety Characteristics. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 38, 361–374. <https://doi.org/10.7470/JKST.2020.38.5.361>
- Tandrayen-Ragoobur, V. (2025). The economic burden of road traffic accidents and injuries: A small island perspective. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 17, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.03.002>
- Theofilatos, A., Graham, D., & Yannis, G. (2012). Factors Affecting Accident Severity Inside and Outside Urban Areas in Greece. *Traffic Injury Prevention*, 13(5), 458–467. <https://doi.org/10.1080/15389588.2012.661110>
- TRL UK. (2024, February 2). *The Safe System Approach: We need to embrace the foundations, not just the pillars*. TRL UK. <https://www.trl.co.uk/news/the-safe-system-approach--we-need-to-embrace-the-foundations--not-just-the-pillars>
- Ulak, M., Ozguven, E., Moses, R., Sando, T., Boot, W., AbdelRazig, Y., & Sobanjo, J. (2019). Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulation based analysis for an unsignalized T-intersection. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2018.05.004>
- VM&A. (2020). *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του έργου: «Ολοκληρωμένη Εγκατάσταση Διαχείρισης Αποβλήτων (ΟΕΔΑ) Βόλου»*. https://www.thessaly.gov.gr/data/mpe/2020/16368/MPE%20Volos%20OEDA_diorthoseis%20032020.pdf
- Wang, J., Chen, Y., & Chen, D. (2022). Analyzing Safety Concerns of (e-) Bikes and Cycling Behaviors at Intersections in Urban Area. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14074231>
- Wang, J., Guo, X., & Yang, X. (2021). Efficient and Safe Strategies for Intersection Management: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21. <https://doi.org/10.3390/s21093096>
- Wang, Y., Xu, Y., Li, Q., & Li, C. (2024). *Risk assessment, prediction, and factor analysis for lanes at urban intersection*. 13018, 130183. <https://doi.org/10.1117/12.3024086>

- weatherspark. (2025). *Climate and Average Weather Year Round in Volos*. Weatherspark.Com. <https://weatherspark.com/y/87923/Average-Weather-in-Volos-Greece-Year-Round>
- Wei, Z., Peng, T., & Wei, S. (2022). A Robust Adaptive Traffic Signal Control Algorithm Using Q-Learning under Mixed Traffic Flow. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14105751>
- Więckowski, J., & Sałabun, W. (2023). Sensitivity analysis approaches in multi-criteria decision analysis: A systematic review. *Appl. Soft Comput.*, 148, 110915. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110915>
- Więckowski, J., Wątróbski, J., Kizielewicz, B., & Sałabun, W. (2023). Complex sensitivity analysis in Multi-Criteria Decision Analysis: An application to the selection of an electric car. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136051>
- Wijnen, W., & Stipdonk, H. (2016). Social costs of road crashes: An international analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 94, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.005>
- Wikipedia. (2025). *Βόλος*. Wikipedia. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%92%CF%8C%CE%BB%CE%BF%CF%82>
- World Health Organization. (2022). *Documenting Road Safety*. https://www.emro.who.int/images/stories/about-who/Documenting-road-safety_prepress_DRAFT_oct-2022.pdf
- Xie, K., Wang, X., Huang, H., & Chen, X. (2013). Corridor-level signalized intersection safety analysis in Shanghai, China using Bayesian hierarchical models. *Accident; Analysis and Prevention*, 50, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.003>
- Yaibok, C., Suwanno, P., Pornbunyanon, T., Kanjanakul, C., Luatthep, P., & Fukuda, A. (2024). Improving urban intersection safety insights from simulation analysis. *IATSS Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.10.005>
- Yannis, G., Dragomanovits, A., Mavromatis, S., Roussou, J., & Nikolaou, D. (2019). *Economic Assessment of Road Infrastructure Safety Schemes in Greece Using Crash Prediction Methodology* 2. <https://www.nrso.ntua.gr/geyannis/wp-content/uploads/geyannis-pc359.pdf>
- Yannis, G., Kopsacheili, A., Dragomanovits, A., & Petraki, V. (2020). State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.005>

- Yu, W., Jiang, X., Li, R., Cheng, Q., Guo, J., & Wang, W. (2020). *Analyses on Drivers' Performance at Urban Road Intersections Based on Self-Explaining Roads*. 376–389. <https://doi.org/10.1061/9780784483145.033>
- Yuan, J., & Abdel-Aty, M. (2018). Approach-level real-time crash risk analysis for signalized intersections. *Accident; Analysis and Prevention*, 119, 274–289. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.031>
- Zhang, G., Li, F., Ren, D., Huang, H., Zhou, Z., & Chang, F. (2024). Cooperative control of self-learning traffic signal and connected automated vehicles for safety and efficiency optimization at intersections. *Accident; Analysis and Prevention*, 211, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107890>
- ασφαλιστική αγορά. (2024, October 17). Ι.Ο.ΑΣ. «Πάνος Μυλωνάς»: 18η Ευρωπαϊκή Νύχτα Χωρίς Ατυχήματα. *Ασφαλιστική Αγορά*. <https://aagora.gr/i-o-as-panos-mylonas-18i-evropaiki-nychta-choris-atychimata/>
- Γιάτσιοις, Ι. (2024, December 4). Θεσσαλία: Αυξήθηκαν τα θανατηφόρα τροχαία το Νοέμβριο. *ERT News*. <https://e-thessalia.gr/epithetiki-odigisi-stoys-dromoys-toy-voloy/>
- Δήμος Βόλου. (2017). *Επιχειρησιακός Σχεδιασμός Δήμου Βόλου για τη Βιώσιμη Αστική Ανάπτυξη (BAA)*. https://dimosvolos.gr/sites/default/files/BAA_%CE%94%CE%97%CE%9C%CE%9F%CE%A5_%CE%92%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%A5_2014%202020%20v.iii_.pdf
- Δήμος Βόλου. (2019). *ΤΕΥΧΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*. <https://dimosvolos.gr/sites/default/files/03.%20TEYXO%CE%A3%20%CE%A4%CE%95%CE%A7%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%94%CE%95%CE%94%CE%9F%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%A9%CE%9D.pdf>
- Δήμος Βόλου. (2021). *ΣΧΕΔΙΟ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΣΒΑΚ) ΔΗΜΟΥ ΒΟΛΟΥ*. <https://svak.dimosvolos.gr/wp-content/uploads/2023/11/%CE%A06.pdf>
- Δήμος Βόλου. (2023). *ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΒΙΩΣΙΜΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΗΜΟΥ ΒΟΛΟΥ*. https://www.thessalia-espa.gr/wp-content/uploads/2024/02/sbaa_volou_2021-2027.pdf
- Δήμος Βόλου. (2025). *Γραφείο Διευκόλυνσης, ενδυνάμωσης και τεκμηρίωσης της απασχόλησης*. Volos-Pronoia.Gr. <https://volos-pronoia.gr/index.php/grafeio-diefkolynsis-endynamosis-tekmiriosis-tis-apasxolisis-job-center>

- Παπακωνσταντίνου, Γ. (2024, November 27). Υποδομές: Πώς καταστράφηκαν οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο στην Κεντρική Ελλάδα – Τα έργα αποκατάστασης. *Insider*. <https://www.insider.gr/oikonomia/344383/ypodomes-pos-katastrafikan-odiko-kai-sidirodromiko-diktyo-stin-kentriki-ellada-ta>
- ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ Δ/ΝΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ. (2021). *ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ 2021-2025*. <https://www.thessaly.gov.gr/data/diavoul/2021/4460/an4460a.pdf>
- ΤΑΧΥΔΡΟΜΟΣ. (2025, June 3). Αλ. Μεϊκόπουλος: «Χωρίς υποδομές και έλεγχο, ο νέος Κ.Ο.Κ. θα εφαρμοστεί μόνο στα χαρτιά». *ΤΑΧΥΔΡΟΜΟΣ*. <https://www.taxydromos.gr/magnesia/volos/1205037/al-meikopoylos-choris-ypodomes-kai-elegcho-o-neos-k-o-k-tha-efarmostei-mono-sta-chartia/>

