



## Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας

### Διαχείριση Τεχνικών Έργων (ΔΧΤ)

#### Διπλωματική Εργασία

Η τεχνολογία των Smart Roads ως εργαλείο πρόληψης ατυχημάτων  
στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (ΒΟΑΚ)

ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΙΑΟΥΣΤΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΩΣΤΟΓΛΟΥ

Πάτρα, Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Η τεχνολογία των Smart Roads ως εργαλείο πρόληψης ατυχημάτων  
στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (ΒΟΑΚ)

ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΙΑΟΥΣΤΑΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Βασίλειος Κώστογλου

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και  
Ηλεκτρονικών Συστημάτων  
Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδας

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Σεραφείμ Πολύζος

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας,  
Πολεοδομίας και Περιφερειακής  
Ανάπτυξης  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πάτρα, Μάιος 2026

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές μου κ.κ. Βασίλειο Κώστογλου και Σεραφείμ Πολύζο για την υπομονή τους και την στήριξή τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.*

*Επίσης όλους τους διδάσκοντες του Μεταπτυχιακού Προγράμματος για τις γνώσεις και τα εφόδια που μας προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.*

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται στη μικρή μου Καλλιόπη (Πόπη), στην αγαπημένη μου Μαρία, στην Μαμά μου και στον αείμνηστο Μπαμπά μου.*

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη δυνατότητα αξιοποίησης των τεχνολογιών Έξυπνων Δρόμων (Smart Roads) ως μέσο για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (BOAK). Ο BOAK αποτελεί την κύρια οδική αρτηρία της Κρήτης, παρουσιάζοντας διαχρονικά υψηλό αριθμό και σοβαρότητα τροχαίων ατυχημάτων λόγω των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του και του αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου.

Στο πλαίσιο της έρευνας, πραγματοποιήθηκε συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατάταξη των τεχνολογιών Smart Roads σε τρεις κατηγορίες: ψηφιακές (ICT-based), μη ψηφιακές (Non-ICT) και υβριδικές λύσεις. Η μεθοδολογία της εργασίας βασίστηκε στην ποσοτική ανάλυση δευτερογενών δεδομένων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) για την περίοδο 2015-2022. Για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας χρησιμοποιήθηκε ένας προσαρμοσμένος δείκτης στάθμισης  $\Delta$ , ο οποίος αποτιμά τη σοβαρότητα των συνεπειών με βάση τον αριθμό νεκρών και τραυματιών, επιτρέποντας την ιεράρχηση των πλέον επικίνδυνων χιλιομετρικών θέσεων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανέδειξαν συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις υψηλού κινδύνου (hotspots), όπως οι ΧΘ 49, 115.5, 156 και 37, όπου καταγράφονται επαναλαμβανόμενα μοτίβα ατυχημάτων που σχετίζονται με τη γεωμετρία της οδού, την ανεπαρκή οπτική καθοδήγηση και την κυκλοφοριακή πολυπλοκότητα.

Η εργασία καταλήγει στη διατύπωση μιας πρότασης σταδιακής μετάβασης, με άμεσες παρεμβάσεις Non-ICT (ενίσχυση διαγράμμισης, ανακλαστήρες, αντιολισθηρά υλικά) για τη βελτίωση της παθητικής ασφάλειας, υβριδικές λύσεις (έξυπνος φωτισμός, δυναμική σήμανση VMS) σε τμήματα με αυξημένη νυχτερινή επικινδυνότητα και μακροπρόθεσμες ICT υποδομές (αισθητήρες V2I, Digital Twin) για την ολοκληρωμένη ψηφιακή διαχείριση του άξονα.

Η μελέτη αποδεικνύει ότι η βελτίωση της οδικής ασφάλειας στον BOAK δεν απαιτεί απαραίτητα καθολική ψηφιακή μετατροπή, αλλά στοχευμένες παρεμβάσεις προσαρμοσμένες στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε επικίνδυνης χιλιομετρικής θέσης.

### Λέξεις - Κλειδιά

BOAK, Smart Roads, Οδική Ασφάλεια, Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS), Δείκτης Στάθμισης Σοβαρότητας, ICT, Υβριδικές Τεχνολογίες.

## Smart Roads technology as an accident prevention tool on the North Road Axis of Crete (NRAC)

Ioannis Niaoustas

## **Abstract**

This thesis examines the potential for utilizing Smart Roads technologies as a means of improving road safety on the Northern Road Axis of Crete (NRAC). The NRAC is the main highway in Crete, consistently exhibiting a high number and severity of traffic accidents due to its unique geometric characteristics and increased traffic volume.

As part of the research, a systematic literature review was conducted to classify Smart Roads technologies into three categories: digital (ICT-based), non-digital (Non-ICT), and hybrid solutions. The study's methodology was based on a quantitative analysis of secondary data from the Hellenic Statistical Authority (ELSTAT) for the period 2015-2022. To assess risk, an adapted weighting index  $\Delta$  was used, which quantifies the severity of consequences based on the number of fatalities and injuries, enabling the prioritization of the most dangerous road sections. The results of the analysis identified specific high-risk locations (hotspots), such as Km 49, 115.5, 156 and 37 where recurring accident patterns related to road geometry, inadequate visual guidance, and traffic complexity were recorded.

The study concludes with a phased transition proposal, comprising immediate Non-ICT interventions (enhanced road markings, reflectors, anti-skid materials) to improve passive safety, as well as hybrid solutions (smart lighting, dynamic VMS signage) in sections with increased nighttime risk, and long-term ICT infrastructure (V2I sensors, Digital Twin) for the integrated digital management of the corridor.

The study demonstrates that improving road safety on the NRAC does not necessarily require a comprehensive digital transformation, but rather targeted interventions tailored to the specific characteristics of each high-risk road location.

## **Keywords**

NRAC, Smart Roads, Road Safety, Intelligent Transportation Systems (ITS), Accident Severity Weighting Index, ICT, Hybrid Technology.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	7
Περιεχόμενα .....	8
Κατάλογος Εικόνων .....	10
Κατάλογος Γραφημάτων.....	12
Κατάλογος Πινάκων .....	13
Κατάλογος Σχημάτων .....	14
Συνομογραφίες & Ακρωνύμια.....	15
1. Εισαγωγή και ορισμός προβλήματος .....	16
1.1. Ερευνητικά ερωτήματα .....	18
1.2. Συνεισφορά της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.....	18
1.3. Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας .....	19
2. Θεωρητικό υπόβαθρο και ιστορική εξέλιξη των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών (ITS) .....	21
2.1. Μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	21
2.2. Ιστορική Εξέλιξη των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών (ITS).....	24
2.3. Πρώιμη περίοδος: Από τη στατική παρακολούθηση στη βασική αυτοματοποίηση	25
2.4. ITS 1.0: Τηλεματική και πρώιμα δίκτυα επικοινωνίας.....	26
2.5. ITS 2.0: Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) στις μεταφορές.....	27
2.6. ITS 3.0: Το Διαδίκτυο των Οχημάτων (Internet of Vehicles - IoV).....	28
2.7. ITS 4.0: Συνεργατικά Συστήματα Μεταφορών και Επικοινωνίες V2X (C-ITS).....	29
2.8. ITS 5.0: Τεχνητή Νοημοσύνη, Big Data και Αυτοματοποιημένη Λήψη Αποφάσεων .....	32
2.9. Smart Roads Τεχνολογίες βασισμένες στις ΤΠΕ.....	33
2.10. Smart Roads Τεχνολογίες που δεν βασίζονται στις ΤΠΕ .....	45
2.11. Υβριδικές Τεχνολογίες Έξυπνων Δρόμων (Hybrid ICT & Non-ICT Smart Roads Technologies).....	56
2.12. Αρχιτεκτονική Smart Roads.....	60
3. Ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης ως πεδίο εφαρμογής τεχνολογιών Smart Roads.....	62
3.1. Παρουσίαση του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης (BOAK).....	62

3.2. Κριτήρια Αξιολόγησης και Επιλογής Τεχνολογιών Smart Roads με Εφαρμογή στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (BOAK).....	65
3.3. Σύνδεση ερευνητικών ερωτημάτων με τον BOAK.....	68
4. Μεθοδολογία έρευνας .....	70
4.1. Ερευνητικός σχεδιασμός.....	70
4.2. Πηγές δεδομένων και διαδικασία συλλογής.....	71
4.3. Διαδικασία ανάλυσης και χωρική προσέγγιση .....	73
4.4. Περιορισμοί της έρευνας.....	76
5. Αποτελέσματα.....	78
5.1. Συνολική εικόνα ατυχημάτων στον BOAK (2015-2022) .....	78
5.2. Χωρική κατανομή ατυχημάτων κατά μήκος του BOAK.....	80
5.3. Συνθήκες κάτω από τις οποίες συμβαίνουν τα ατυχήματα .....	83
5.4. Ιεράρχηση χιλιομετρικών θέσεων και σύνδεση με τεχνολογικές παρεμβάσεις.....	88
5.5. Σύνθεση ευρημάτων και κατευθύνσεις.....	95
6. Προτεινόμενες παρεμβάσεις Smart Roads στον BOAK.....	98
6.1. Κατηγοριοποίηση σεναρίων εφαρμογής.....	98
6.2. Σταδιακή μετάβαση του BOAK σε Smart Roads .....	100
6.3. Αντιστοίχιση αναγκών του BOAK με τεχνολογίες Smart Roads .....	103
6.4. Στοχευμένες παρεμβάσεις Smart Roads στις κρισιμότερες χιλιομετρικές θέσεις του BOAK .....	105
6.5. Συνθετική επισκόπηση.....	116
7. Προκλήσεις και περιορισμοί των Smart Roads .....	117
7.1. ICT-Related Προκλήσεις στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) .....	117
7.2. Non-ICT προκλήσεις στην εφαρμογή Smart Roads .....	123
8. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις.....	125
8.1. Σύνδεση με ερευνητικά ερωτήματα .....	127
8.2. Συνεισφορά της μελέτης & προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	130
Αναφορές .....	132

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση του Internet of Vehicles (IoV) (Rani & Sharma, 2023)	29
Εικόνα 2. Απεικόνιση οικοσυστήματος C-ITS (Avcı & Koca, 2024).....	30
Εικόνα 3. Τεχνολογία Vehicle-to-Everything (V2X) (Pompigna & Mauro, 2022).....	30
Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση ανταλλαγής μηνυμάτων Cooperative Awareness Messages (CAM) (Hoang κ.ά., 2016).....	31
Εικόνα 5. Μαγνητικοί, πνευματικοί αισθητήρες και επαγωγικοί βρόχοι (Guerrero-Ibáñez κ.ά., 2018) .....	34
Εικόνα 6. Smart Roads Lighting System (Gagliardi κ.ά., 2020) .....	36
Εικόνα 7. Σύστημα μεταβλητών μηνυμάτων (Variable Message Sign - VMS) (Basso κ.ά., 2021) .....	38
Εικόνα 8. Ενημέρωση οδηγών με τη βοήθεια VMS (Basso κ.ά., 2021).....	39
Εικόνα 9. Δυναμική διαγράμμιση - Dynamic road marking (DRM) (Lin κ.ά., 2023) .....	40
Εικόνα 10. Προτεινόμενο οικοσύστημα έξυπνων ανακλαστήρων (Ahmed κ.ά., 2023).....	41
Εικόνα 11. Διάγραμμα της μετάδοσης πληροφοριών σε συστήματα συνεργασίας μεταξύ οχημάτων και υποδομών (Hu κ.ά., 2024). .....	43
Εικόνα 12. (α) παθητικοί ανακλαστήρες οδοστρώματος, (β) ενσωματωμένος παθητικός road stud (cat’s eye), (γ) ενεργοί ανακλαστήρες οδοστρώματος με ενσωματωμένες πηγές LED.....	48
Εικόνα 13. (α) Διαδικασία εγκατάστασης ενεργών ανακλαστήρων οδοστρώματος, (β) Παραδείγματα χρήσης ενεργών ανακλαστήρων (Llewellyn κ.ά., 2020).....	49
Εικόνα 14. Οδοδείκτες φωσφορίζοντος υλικού (Saleem & Hosoda, 2021) .....	50
Εικόνα 15. Φωσφορίζουσες διαγραμμίσεις (α) (Guo, 2021), (β) (Bhujbal κ.ά., 2022).....	52
Εικόνα 16. Είσοδος δίδυμων σηράγγων χωρίς την χρήση φωταυγών υλικών και η ίδια είσοδος με την χρήση φωταυγών υλικών (Li κ.ά., 2025). .....	52
Εικόνα 17. Συνολική αρχιτεκτονική Smart Highway (Marquez-Barja κ.ά., 2019).....	61
Εικόνα 18. Ενδεικτική απεικόνιση επισήμανσης χιλιομετρικών θέσεων (ΧΘ) στο Google Earth.....	77
Εικόνα 19. Γεωμετρία ΒΟΑΚ στη ΧΘ49+000.....	108
Εικόνα 20. Κοντινή απεικόνιση των ΧΘ49+000, 49+200 και 49+300 .....	108
Εικόνα 21. Γεωμετρία ΒΟΑΚ στη ΧΘ 115+500.....	110
Εικόνα 22. Απεικόνιση της εκτιμώμενης λόγω απουσίας σήμανσης ΧΘ 156+000 .....	112

Εικόνα 23. Παρουσία διαχωριστικού στηθαίου στην ΧΘ 156+000 .....	112
Εικόνα 24. Απεικόνιση της ΧΘ 37+000 .....	114

## Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1. Συνολικός αριθμός ατυχημάτων ανά έτος (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ). ..	79
Γράφημα 2. Κατανομή σοβαρότητας ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ).....	80
Γράφημα 3. Αριθμός ατυχημάτων ανά χιλιομετρική θέση (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) .....	81
Γράφημα 4. Σοβαρότητα ατυχημάτων ανά ΧΘ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) .....	82
Γράφημα 5. Ατυχήματα ανά κατάσταση τεχνητού φωτισμού (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) .....	84
Γράφημα 6. Ατυχήματα ανά χρονική ζώνη (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) .....	84
Γράφημα 7. Ατυχήματα ανά ατμοσφαιρικές συνθήκες (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ) ...	86
Γράφημα 8. Ατυχήματα ανά κατάσταση οδοστρώματος (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ). ..	87

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ενδεικτικοί όροι αναζήτησης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και συνδυασμοί	21
Πίνακας 2. Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού μελετών	23
Πίνακας 3. Αισθητήρες Οδικής Υποδομής (ICT-based Smart Roads)	35
Πίνακας 4. Τεχνολογίες Έξυπνου Οδικού Φωτισμού	37
Πίνακας 5. Έξυπνη Σήμανση & VMS	39
Πίνακας 6. Ενεργή Διαγράμμιση	42
Πίνακας 7. Τεχνολογίες και Υποδομές V2I / C-ITS	43
Πίνακας 8. Έξυπνα Οδοστρώματα & Καινοτόμα Υλικά	47
Πίνακας 9. Έξυπνοι Ανακλαστήρες & Παθητικά Οπτικά Συστήματα	50
Πίνακας 10. Καινοτόμες Διαγραμμίσεις & Φωσφορίζοντα Υλικά	53
Πίνακας 11. Παθητικά Συστήματα Προειδοποίησης & Μείωσης Ταχύτητας	55
Πίνακας 12. Σύνοψη Πλεονεκτημάτων & Περιορισμών (Non-ICT)	56
Πίνακας 13. Τυπικά υβριδικά σχήματα συνδυασμού ICT-based και Non-ICT-based Smart Roads Technologies	59
Πίνακας 14. Αρχεία δεδομένων ΕΛΣΤΑΤ	72
Πίνακας 15. Ιεράρχηση χιλιομετρικών θέσεων με βάση τον δείκτη Δ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	88
Πίνακας 16. Χιλιομετρικές θέσεις με >1 ατύχημα και προτεινόμενη κατεύθυνση παρέμβασης (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	91
Πίνακας 17. Αντιστοίχιση τύπων κινδύνου με κατηγορίες παρέμβασης	97
Πίνακας 18. Κατηγορίες σεναρίων εφαρμογής Smart Roads στον ΒΟΑΚ	100
Πίνακας 19. Συγκεντρωτική Παρουσίαση Προτεινόμενων Λύσεων για τον ΒΟΑΚ	102
Πίνακας 20. Αντιστοίχιση προβλημάτων του ΒΟΑΚ με τεχνολογίες Smart Roads	104
Πίνακας 21. Στοχευμένες παρεμβάσεις Smart Roads στις κρισιμότερες ΧΘ του ΒΟΑΚ	106
Πίνακας 22. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 49+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	107
Πίνακας 23. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 115+500 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	109
Πίνακας 24. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 156+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	111
Πίνακας 25. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 37+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)	113
Πίνακας 26. Σύνοψη προτύπων ατυχημάτων και ενδεικτικών παρεμβάσεων	115
Πίνακας 27. Συγκεντρωτική παρουσίαση Ερευνητικών Ερωτημάτων και βασικών συμπερασμάτων	128

## **Κατάλογος Σχημάτων**

Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής βιβλιογραφικής ανασκόπησης .....	24
Σχήμα 2. Κλίμακα τεχνολογικών «γενεών», από το ITS 1.0 έως το ITS 5.0 .....	25
Σχήμα 3. Αναπαράσταση της πολυεπίπεδης, πολυστρωματικής αρχιτεκτονικής των Smart Roads.....	60

## **Συντομογραφίες & Ακρωνύμια**

<b>ΒΟΑΚ</b>	Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης
<b>ΕΛΣΤΑΤ</b>	Ελληνική Στατιστική Αρχή
<b>AI</b>	Artificial Intelligence (Τεχνητή Νοημοσύνη)
<b>EPDO</b>	Equivalent Property Damage Only (Δείκτης στάθμισης σοβαρότητας ατυχημάτων)
<b>ICT</b>	Information and Communication Technologies (Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών)
<b>IoT</b>	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
<b>IoV</b>	Internet of Vehicles (Διαδίκτυο των Οχημάτων)
<b>ITS</b>	Intelligent Transportation Systems (Ευφυή Συστήματα Μεταφορών)
<b>PRISMA</b>	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

## 1. Εισαγωγή και ορισμός προβλήματος

Η οδική ασφάλεια αποτελεί ένα από τα βασικά ζητήματα στον τομέα των μεταφορών, τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Παρά τη βελτίωση των οχημάτων και τις εξελίξεις στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των οδικών υποδομών, τα τροχαία ατυχήματα εξακολουθούν να προκαλούν σημαντικές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές, καθώς και σοβαρές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Τα τελευταία χρόνια, η αξιοποίηση των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών (Intelligent Transport Systems - ITS) έχει αναδειχθεί ως ένα πρόσθετο μέσο αντιμετώπισης του προβλήματος, μέσω της χρήσης ψηφιακών τεχνολογιών, αισθητήρων και συστημάτων επικοινωνίας (Lindon & Omerhodžić, 2023).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η σημασία της οδικής ασφάλειας αποτυπώνεται και στη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission)<sup>1</sup> για την περίοδο 2021-2030, η οποία θέτει ως βασικό στόχο τη μείωση των θανάτων και των σοβαρών τραυματισμών από τροχαία ατυχήματα, στο πλαίσιο του οράματος «Vision Zero». Στο ίδιο πνεύμα, αναγνωρίζεται ο ρόλος των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών και των έξυπνων οδικών υποδομών ως μέσα πρόληψης και υποστήριξης της ασφαλούς μετακίνησης, στοιχείο που συνδέεται άμεσα με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Οι τεχνολογίες των Έξυπνων Δρόμων (Smart Roads), ως εφαρμογή των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών, ενσωματώνουν ευφυή συστήματα απευθείας στην οδική υποδομή και εφαρμόζονται όλο και περισσότερο διεθνώς. Στόχος τους είναι η έγκαιρη αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων, η καλύτερη ενημέρωση των οδηγών και η συνολική βελτίωση της λειτουργίας του οδικού δικτύου. Λειτουργούν συμπληρωματικά προς τις κλασικές παρεμβάσεις, όπως η βελτίωση της γεωμετρίας και της σήμανσης, αξιοποιώντας αισθητήρες, συστήματα επικοινωνίας και ψηφιακές εφαρμογές για τη βελτίωση της ορατότητας, τη συντήρηση της υποδομής και την ενίσχυση ασφαλέστερης οδηγικής συμπεριφοράς. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, μπορούν να συμβάλουν δραστικά στη μείωση της επικινδυνότητας, ιδιαίτερα σε υφιστάμενους οδικούς άξονες όπου οι δυνατότητες εκτεταμένων παρεμβάσεων είναι περιορισμένες.

Ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης (BOAK) αποτελεί τη βασική οδική αρτηρία του νησιού, εξυπηρετώντας καθημερινές μετακινήσεις, αυξημένη τουριστική κίνηση και

---

<sup>1</sup> European Commission. (2021). *EU Road Safety Policy Framework 2021–2030: Next steps towards “Vision Zero”*. [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/road-safety\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/road-safety_en)

εμπορευματικές ροές. Παρά τη στρατηγική του σημασία, κατά την μελετώμενη περίοδο 2015-2022 καταγράφηκαν στον ΒΟΑΚ 134 τροχαία ατυχήματα με 76 νεκρούς. Ο αριθμός αυτός αφορά τα συνολικά, επίσημα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ. Ωστόσο, για τις ανάγκες της χωρικής ανάλυσης εξαιρέθηκαν ακριβώς 8 ατυχήματα χωρίς εντοπίσιμη χιλιομετρική θέση, με αποτέλεσμα η τελική μελέτη να επικεντρώνεται σε 126 πλήρως εντοπίσιμα ατυχήματα και στους αντίστοιχους παθόντες (βλ. ενότητα 5.1). Η ανάλυση εστιάζει στα σημεία όπου τα ατυχήματα εμφανίζονται επαναλαμβανόμενα καθώς η συγκέντρωση συμβάντων στο ίδιο σημείο υποδηλώνει σταθερή επικινδυνότητα και όχι τυχαίο περιστατικό.

Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την εναλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δρόμου όπως συχνές καμπύλες, ανωφέρειες, κατωφέρειες, αυξομειώσεις του πλάτους της οδού λόγω του ανάγλυφου του νησιού, την υψηλή κυκλοφοριακή φόρτιση η οποία κορυφώνεται κατά την διάρκεια της τουριστικής περιόδου και τη συνύπαρξη διαφορετικών κατηγοριών χρηστών. Η συχνότητα αλλά και η σοβαρότητα των τροχαίων ατυχημάτων αναδεικνύει την ανάγκη διερεύνησης πρόσθετων μέτρων οδικής ασφάλειας, πέρα από τις κλασικές παρεμβάσεις οδοποιίας.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει κατά πόσο και με ποιον τρόπο οι τεχνολογίες Smart Roads μπορούν να αξιοποιηθούν ως ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες παρεμβάσεις για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στον ΒΟΑΚ, λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς ενός υφιστάμενου οδικού άξονα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- η συστηματική διερεύνηση των τεχνολογιών Smart Roads που έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για την οδική ασφάλεια, μέσω ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας,
- ο εντοπισμός επικίνδυνων χιλιομετρικών θέσεων του ΒΟΑΚ και η αξιολόγηση της δυνατότητας εφαρμογής επιλεγμένων τεχνολογιών, μέσω ανάλυσης πραγματικών δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων,
- η διαμόρφωση ενδεικτικών σεναρίων και κατευθύνσεων παρέμβασης που να ανταποκρίνονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς ενός υφιστάμενου οδικού άξονα, αξιοποιώντας τις τεχνολογίες Smart Roads.

Για την εκπλήρωση του σκοπού, η εργασία αξιοποιεί στοιχεία τροχαίων ατυχημάτων που αφορούν τον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης κατά την ανωτέρω περίοδο, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της χωρικής κατανομής των ατυχημάτων και τον

εντοπισμό τμημάτων του οδικού άξονα όπου παρατηρείται αυξημένη επικινδυνότητα. Η ανάλυση αυτή λειτουργεί ως βάση για την αξιολόγηση της δυνατότητας εφαρμογής επιλεγμένων τεχνολογιών Smart Roads στα συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου.

### **1.1. Ερευνητικά ερωτήματα**

Με βάση τον σκοπό της μελέτης, η έρευνα οργανώνεται γύρω από τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

- EE1.** Ποιες τεχνολογίες Smart Roads έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για την οδική ασφάλεια σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία;
- EE2.** Ποιες από τις τεχνολογίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν ρεαλιστικά στον ΒΟΑΚ, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του;
- EE3.** Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ την περίοδο 2015-2022 ως προς τη σοβαρότητα, τις συνθήκες εκδήλωσης και τη χωρική τους κατανομή;
- EE4.** Ποιες χιλιομετρικές θέσεις του ΒΟΑΚ παρουσιάζουν αυξημένη επικινδυνότητα βάσει των δεδομένων, και ποιες παρεμβάσεις ενδείκνυνται για το καθένα;
- EE5.** Πώς μπορούν οι παρεμβάσεις Smart Roads να εφαρμοστούν σταδιακά στον ΒΟΑΚ, λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα της έρευνας και τους πρακτικούς περιορισμούς του άξονα;

### **1.2. Συνεισφορά της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας**

Η συνεισφορά της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τεχνολογιών Smart Roads στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (ΒΟΑΚ), συνδυάζοντας τη θεωρητική γνώση με την ανάλυση πραγματικών περιστατικών ατυχημάτων του οδικού δικτύου.

Η εργασία συγκεντρώνει και οργανώνει τη διεθνή βιβλιογραφία που σχετίζεται με τις τεχνολογίες Smart Roads, ώστε να διευκολύνεται η σύγκριση και η επιλογή τους με βάση τη λειτουργία και τη δυνατότητα ένταξής τους σε υφιστάμενες υποδομές και με απώτερο στόχο τις προτάσεις για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

Ταυτόχρονα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η εργασία αξιοποιεί στοιχεία οδικών ατυχημάτων που αφορούν το σύνολο του ΒΟΑΚ, με στόχο την ανάδειξη χωρικών και τυπολογικών προτύπων επικινδυνότητας. Η ανάλυση δεν εξετάζει μόνο τον αριθμό των ατυχημάτων αλλά χρησιμοποιείται ως μέσο κατανόησης των πραγματικών συνθηκών υπό

τις οποίες συμβαίνουν, κατά μήκος του άξονα. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται μεθοδολογία ανάλυσης σε επίπεδο χιλιομετρικών θέσεων, σε συνδυασμό με δείκτη στάθμισης της σοβαρότητας των παθόντων, ώστε να προκύπτει ιεράρχηση των επικίνδυνων σημείων.

Το αποτέλεσμα είναι ο εντοπισμός τμημάτων όπου οι παρεμβάσεις, είτε σε επίπεδο υποδομής είτε μέσω τεχνολογιών ICT, μπορούν να έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση των ατυχημάτων.

Τέλος, η εργασία εξετάζει ενδεικτικά σενάρια εφαρμογής τεχνολογιών Smart Roads στο υφιστάμενο οδικό περιβάλλον του ΒΟΑΚ, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, λειτουργικούς και θεσμικούς περιορισμούς, με στόχο εφαρμόσιμες λύσεις για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας.

### **1.3. Δομή της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική πορεία από την παρουσίαση του προβλήματος και του θεωρητικού πλαισίου έως την ανάλυση των δεδομένων και τη διατύπωση συμπερασμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το αντικείμενο της έρευνας και ορίζεται το βασικό πρόβλημα που εξετάζεται. Διατυπώνονται επίσης ο σκοπός της εργασίας, τα ερευνητικά ερωτήματα και η συνεισφορά της μελέτης.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας και η ιστορική εξέλιξη των Ευφύων Συστημάτων Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems - ITS). Παράλληλα γίνεται ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που σχετίζονται με τους «έξυπνους δρόμους» (Smart Roads).

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και αναλύονται τα γεωμετρικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του ΒΟΑΚ που συνδέονται με την οδική ασφάλεια. Επίσης, διαμορφώνονται τα κριτήρια αξιολόγησης για την εφαρμογή των τεχνολογιών Smart Roads στον συγκεκριμένο οδικό άξονα.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η μεθοδολογία της έρευνας και παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των τροχαίων ατυχημάτων. Επίσης αναλύεται ο δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σοβαρότητας των ατυχημάτων και την ιεράρχηση των χιλιομετρικών θέσεων.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ για την περίοδο 2015-2022. Η ανάλυση περιλαμβάνει τη χωρική κατανομή των

ατυχημάτων, την αξιολόγηση της σοβαρότητάς τους και τον εντοπισμό των χιλιομετρικών θέσεων (ΧΘ) του άξονα που παρουσιάζουν αυξημένη επικινδυνότητα.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται οι προτεινόμενες παρεμβάσεις Smart Roads στον ΒΟΑΚ. Βάσει των ευρημάτων της ανάλυσης, οι παρεμβάσεις κατηγοριοποιούνται και αντιστοιχίζονται στις κρισιμότερες χιλιομετρικές θέσεις του άξονα, ακολουθώντας ένα σταδιακό μοντέλο μετάβασης.

Στο **Κεφάλαιο 7** εξετάζονται οι προκλήσεις και οι περιορισμοί εφαρμογής των τεχνολογιών Smart Roads, με έμφαση στις τεχνολογικές, οργανωτικές και θεσμικές παραμέτρους που διαμορφώνουν το πλαίσιο υλοποίησης σε υφιστάμενα οδικά δίκτυα όπως ο ΒΟΑΚ.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το **Κεφάλαιο 8** στο οποίο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται συγκεκριμένα σενάρια σταδιακής μετάβασης του ΒΟΑΚ σε μοντέλο Smart Roads, με βάση τα ευρήματα της ανάλυσης και τους πρακτικούς περιορισμούς του άξονα.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο και ιστορική εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (ITS)

### 2.1. Μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Η μεθοδολογία της έρευνας, βάσει της οποίας διαμορφώθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας, βασίστηκε στην εκτεταμένη διαδικτυακή αναζήτηση κατάλληλων βιβλιογραφικών πηγών όπως επιστημονικά άρθρα, βιβλία, πρακτικά συνεδρίων και διατριβές.

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της μηχανής αναζήτησης επιστημονικών δημοσιεύσεων Google Scholar<sup>2</sup> καθώς και της διαδικτυακής πύλης Heal-Link<sup>3</sup>.

Ο παρακάτω Πίνακας 1 καταγράφει ενδεικτικούς όρους αναζήτησης και συνδυασμούς αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά το στάδιο της έρευνας.

Πίνακας 1. Ενδεικτικοί όροι αναζήτησης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και συνδυασμοί

Θεματική Κατηγορία	Κύριοι Όροι Αναζήτησης	Συνδυαστικοί / Επεκτεινόμενοι Όροι
<i>Έξυπνοι Δρόμοι &amp; Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS)</i>	smart road, smart highway, intelligent road, smart infrastructure, intelligent transportation systems, ITS, cooperative ITS, C-ITS	smart road technologies, intelligent transportation systems, ITS road safety, ITS existing network, ITS implementation, V2X communication, V2I infrastructure
<i>Οδική Ασφάλεια</i>	road safety, traffic safety, accident prevention, road safety improvement	road safety existing network, road safety rural road, road safety measures, Vision Zero
<i>Διαγράμμιση &amp; Οπτική Καθοδήγηση</i>	road markings, lane markings, pavement markings, road delineation	retroreflective markings, road marking visibility, wet night visibility, road marking safety
<i>Φωτισμός Οδού</i>	road lighting, street lighting, highway lighting, smart lighting	adaptive road lighting, LED road lighting, dynamic lighting, IoT road lighting, motion-activated lighting

<sup>2</sup> <https://scholar.google.com/>

<sup>3</sup> <https://www.heal-link.gr/>

<b>Ανακλαστήρες &amp; Παθητικά Οπτικά Συστήματα</b>	road studs, retroreflectors, cat's eye, delineators	active road studs, passive road markers, glow-in-the-dark markers, photoluminescent road markers, smart reflectors
<b>Σήμανση &amp; VMS</b>	variable message signs, VMS, dynamic message signs, DMS, road signs	smart signage, dynamic road signs, variable speed limit signs, V2I signage, connected road signs
<b>Αισθητήρες Οδικής Υποδομής</b>	road sensors, traffic sensors, pavement sensors, infrastructure sensors	inductive loop, radar sensor, LiDAR infrastructure, IoT sensors road, environmental sensors road
<b>Οδόστρωμα &amp; Υλικά</b>	smart pavement, road surface, pavement materials, asphalt	anti-skid pavement, road surface friction, pavement texture, self-healing asphalt, porous asphalt road safety
<b>Υφιστάμενο Οδικό Δίκτυο</b>	existing road network, road upgrade, road rehabilitation	existing highway smart technology, road retrofit ITS, smart road existing infrastructure, road network upgrade safety
<b>Ατυχήματα &amp; Επικίνδυνες Θέσεις</b>	accident hotspot, black spot road, road accident analysis	accident severity, accident spatial analysis, road accident cluster, road risk index, accident weighted index
<b>Προκλήσεις &amp; Περιορισμοί</b>	ITS challenges, smart road limitations, road technology barriers	cybersecurity ITS, ITS interoperability, smart road maintenance, road technology cost

Η βιβλιογραφική αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα ακόλουθα βασικά κριτήρια: η γλώσσα των πηγών να είναι ελληνική ή αγγλική, το έτος δημοσίευσης να είναι το 2014 και μεταγενέστερο, ενώ αναζητήθηκαν άρθρα συνεδρίων, επιστημονικών περιοδικών, βιβλία και διατριβές. Η καταλληλότητα των άρθρων καθορίστηκε με τα ακόλουθα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού:

*Κριτήρια ένταξης:*

- Η συνάφεια με το θέμα της εργασίας που προέκυψε από την ανάγνωση του τίτλου και της περίληψης των άρθρων.

*Κριτήρια αποκλεισμού:*

Διπλωματική Εργασία

- Γλώσσα άρθρου εκτός ελληνικής ή αγγλικής.
- Άρθρα και έρευνες όπου το πλήρες κείμενο δεν ήταν διαθέσιμο.
- Άρθρα τα οποία δεν αναφέρονται στις τεχνολογίες Smart Roads και τη συμβολή τους στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας σε υφιστάμενα εθνικά οδικά δίκτυα.

Η αρχική βιβλιογραφική αναζήτηση οδήγησε στον εντοπισμό **n = 280** πηγών. Σε αυτό το πλήθος περιλαμβάνονται τόσο οι μελέτες που εξετάζουν τεχνολογικές εφαρμογές και λύσεις, όσο και 31 άρθρα που εστιάζουν ειδικά στις προκλήσεις, τις αδυναμίες και τους περιορισμούς των έξυπνων οδικών υποδομών.

Η διαδικασία επιλογής πραγματοποιήθηκε ως ακολούθως.

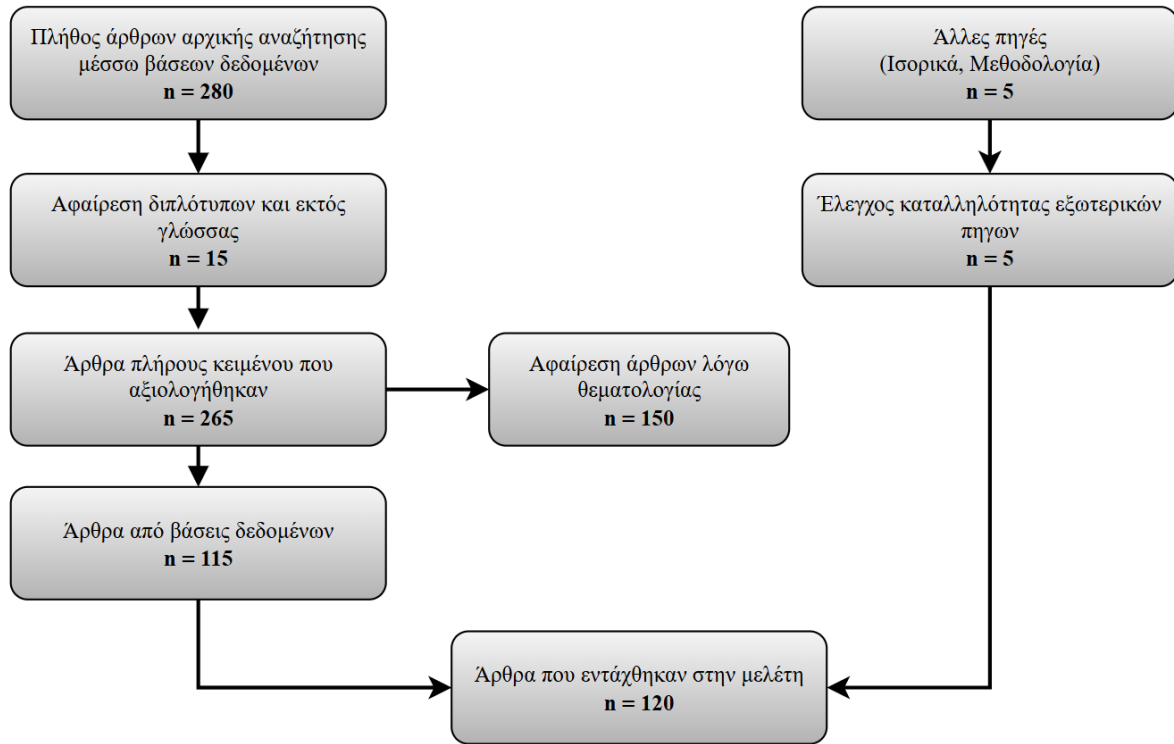
Αρχικά αφαιρέθηκαν οι διπλότυπες εγγραφές και τα άρθρα σε γλώσσα εκτός ελληνικής ή αγγλικής ( $n = 15$ ), με αποτέλεσμα να παραμείνουν  $n = 265$  εγγραφές προς περαιτέρω αξιολόγηση. Στη συνέχεια αξιολογήθηκε το πλήρες κείμενο των 265 διαθέσιμων εγγραφών βάσει τριών κριτηρίων: α) διαθεσιμότητα πλήρους κειμένου, β) θεματική συνάφεια με τις τεχνολογίες Smart Roads και την ασφάλεια σε υφιστάμενα εθνικά οδικά δίκτυα, και γ) επιστημονική συμβολή στην κατανόηση τόσο των δυνατοτήτων όσο και των περιορισμών των τεχνολογιών αυτών. Αποκλείστηκαν συνολικά 150 εγγραφές λόγω μη διαθέσιμου πλήρους κειμένου ή μη συνάφειας με το αντικείμενο της εργασίας (Πίνακας 2). Διατηρήθηκαν κυρίως άρθρα που αφορούν ζητήματα εφαρμογής, τεχνικών περιορισμών και λειτουργικών δυσκολιών.

**Πίνακας 2. Κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού μελετών**

<i>a/a</i>	<i>Κριτήρια ένταξης</i>	<i>Κριτήρια αποκλεισμού</i>
<b>1</b>	Οδικές μεταφορές	Άλλα μέσα μεταφοράς
<b>2</b>	Smart Roads / ITS	Μη σχετικές τεχνολογίες
<b>3</b>	Οδική ασφάλεια	Περιορισμένη συνάφεια
<b>4</b>	Προκλήσεις & περιορισμοί	Μη εφαρμοστικό περιεχόμενο

Η τελική βιβλιογραφία περιλαμβάνει **n = 120** πηγές, οι οποίες αξιοποιούνται άμεσα στο κείμενο της εργασίας. Από αυτές, οι 115 εντάχθηκαν μέσω της συστηματικής ανασκόπησης PRISMA, ενώ οι υπόλοιπες 5 αφορούν ιστορικό πλαίσιο, προδιαγραφές και μεθοδολογικά εργαλεία και χρησιμοποιούνται εκτός του πεδίου της συστηματικής ανασκόπησης.

Η διαδικασία επιλογής και φιλτραρίσματος αποτυπώνεται στο Διάγραμμα Ροής PRISMA που ακολουθεί.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής βιβλιογραφικής ανασκόπησης

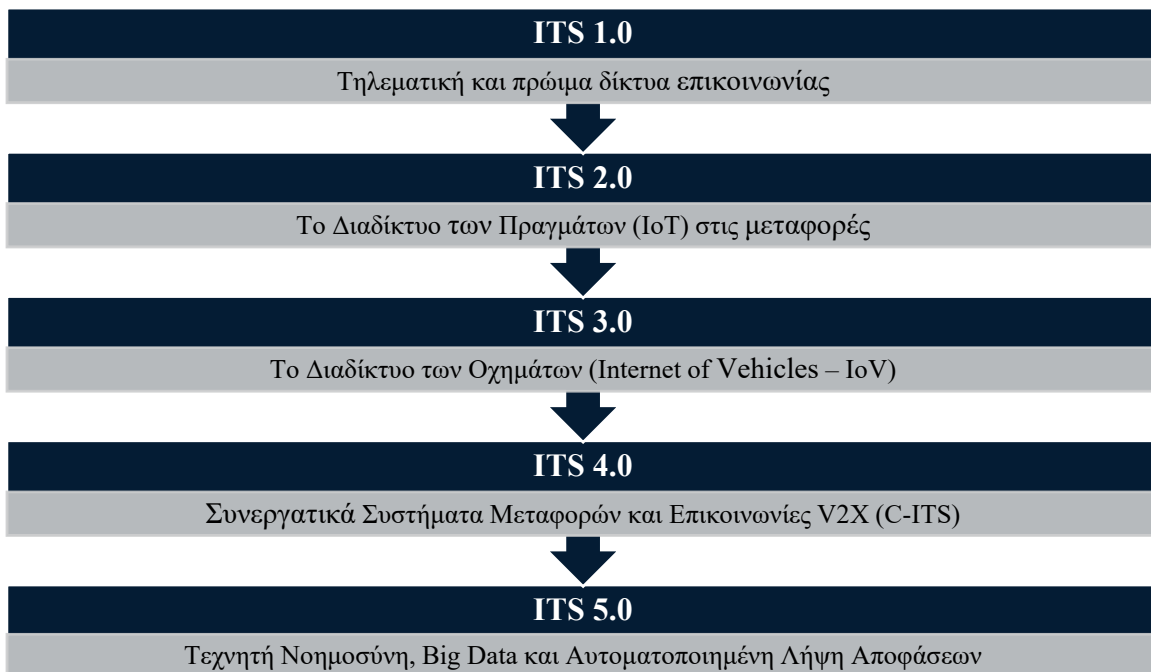
## 2.2. Ιστορική Εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (ITS)

Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των οχημάτων, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων μεταφορικών δικτύων και η συνεχώς εντεινόμενη απαίτηση για μείωση των χρόνων μετακίνησης έχουν οδηγήσει σε σημαντική επιβάρυνση της οδικής ασφάλειας και, κατ' επέκταση, σε αύξηση των τροχαίων ατυχημάτων και δυστυχημάτων. Είναι επομένως σημαντικό να αναζητηθούν λύσεις ή να εφαρμοστούν παρεμβάσεις οι οποίες θα περιορίσουν το φαινόμενο. Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems - ITS) αποτελούν κρίσιμο εργαλείο με το οποίο οι παραδοσιακές παθητικές οδικές υποδομές μπορούν να «μεταλλαχθούν» σε ενεργά, διασυνδεδεμένα και προσαρμοστικά συστήματα μεταφορών και να αυξήσουν δραστικά τα επίπεδα ασφάλειας.

Ειδικότερα, οι τεχνολογίες των Smart Roads συνιστούν εξειδικευμένη κατηγορία εφαρμογών των ITS, εστιάζοντας στην ενσωμάτωση ευφυών λειτουργιών απευθείας στην οδική υποδομή.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογική πρόοδος έχει επιταχύνει την εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών, τα οποία όπως επισημάνθηκε στοχεύουν στην παροχή

ασφαλέστερων, αποδοτικότερων και περιβαλλοντικά βιώσιμων μετακινήσεων. Τα πρώτα συστήματα ITS περιορίζονταν σε βασικές λειτουργίες παρακολούθησης και διαχείρισης της κυκλοφορίας μέσω συμβατικών καμερών και σηματοδοτών. Σήμερα, τα συστήματα αυτά έχουν εξελιχθεί σε σύνθετα τεχνολογικά οικοσυστήματα που αξιοποιούν αισθητήρες, δίκτυα επικοινωνίας, αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και διαδικτυακές πλατφόρμες, με δυνατότητα συλλογής, ανάλυσης και αξιοποίησης μεγάλου όγκου δεδομένων (Big Data). Η εξέλιξη αυτή δεν έγινε απότομα ούτε με ενιαίο τρόπο αλλά διαμορφώθηκε μέσα από διαδοχικές τεχνολογικές προσθήκες. Για την αποτύπωσή της χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία μια κλίμακα τεχνολογικών «γενεών» από το ITS 1.0 έως το ITS 5.0 ως ένα εννοιολογικό εργαλείο που δεν καταγράφεται αυτούσιο στη βιβλιογραφία, αλλά συνθέτει τα βασικά χρονικά και τεχνολογικά άλματα της εξέλιξης των ITS, όπως αυτά προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία που εξετάστηκε. Η εν λόγω κλίμακα συνοψίζεται και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Κλίμακα τεχνολογικών «γενεών», από το ITS 1.0 έως το ITS 5.0

### 2.3. Πρώιμη περίοδος: Από τη στατική παρακολούθηση στη βασική αυτοματοποίηση

Η πρώιμη περίοδος ανάπτυξης των ITS, από τις δεκαετίες του 1960 έως τις αρχές του 1990, συνδέεται με τις πρώτες οργανωμένες προσπάθειες παρακολούθησης και ελέγχου της

κυκλοφορίας. Η έμφαση δόθηκε κυρίως στη συλλογή δεδομένων και στη βασική επιχειρησιακή διαχείριση της κυκλοφορίας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ηλεκτρομαγνητικοί βρόχοι επαγωγής, οι οποίοι τοποθετούνταν στο οδόστρωμα και παρείχαν βασικές μετρήσεις κυκλοφοριακού φόρτου και ταχύτητας. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 άρχισαν να αναπτύσσονται τα πρώτα Κέντρα Διαχείρισης Κυκλοφορίας (Traffic Management Centers - TMC), τα οποία λειτουργούσαν ως κεντρικοί κόμβοι συγκέντρωσης και επεξεργασίας δεδομένων από αισθητήρες πεδίου, βοηθώντας την παρακολούθηση της λειτουργίας του δικτύου και τον συντονισμό των παρεμβάσεων (Auer κ.ά., 2016).

Η πρόοδος στους τομείς των ηλεκτρονικών και των υπολογιστικών συστημάτων κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980 επέτρεψε τα πρώτα βήματα αυτοματοποίησης. Η χρήση καμερών παρακολούθησης, συστημάτων ρύθμισης σηματοδότησης και πρώιμων μηχανισμών ελέγχου ενίσχυσε την ικανότητα εποπτείας της κυκλοφορίας, κυρίως σε αστικά περιβάλλοντα. Τα συστήματα αυτά βασιζόνταν σε δεδομένα που συλλέγονταν από αισθητήρες και χρησιμοποιούνταν για τη ρύθμιση της λειτουργίας της υποδομής σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (Parageorgiou κ.ά., 2004).

Παρά τις περιορισμένες δυνατότητες των συστημάτων εκείνης της περιόδου σε σχέση με τις σημερινές εφαρμογές, εισήγαγαν μια βασική λογική που καθόρισε την εξέλιξη των ITS, δηλαδή τη σύνδεση της συλλογής δεδομένων με τον έλεγχο της κυκλοφορίας, μέσω συνεχούς παρακολούθησης και παρέμβασης.

Οι πρώιμοι αλγόριθμοι ελέγχου βασιζόνταν σε προκαθορισμένους κανόνες και αποτέλεσαν το θεμέλιο για τη μεταγενέστερη ανάπτυξη πιο εξελιγμένων στρατηγικών διαχείρισης.

Η περίοδος αυτή δεν ήταν ακόμα "ευφυής" με τη σύγχρονη έννοια, ήταν όμως η φάση που έθεσε τις τεχνικές και λειτουργικές βάσεις για ό,τι ακολούθησε.

## **2.4. ITS 1.0: Τηλεματική και πρώιμα δίκτυα επικοινωνίας**

Η φάση που αντιστοιχεί στο ITS 1.0 σηματοδοτεί τη μετάβαση από μεμονωμένες εφαρμογές παρακολούθησης της κυκλοφορίας σε πιο οργανωμένες και δικτυωμένες μορφές διαχείρισης. Χρονικά τοποθετείται από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 έως τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και συνδέεται με την αρχική ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών στις οδικές υποδομές (Nowacki, 2012; Ariyoshi, 2022).

Κεντρικό χαρακτηριστικό της περιόδου αποτέλεσε η ανάπτυξη των πρώτων δικτύων επικοινωνίας που συνέδεσαν αισθητήρες πεδίου, οδικές υποδομές και κέντρα ελέγχου. Η

αξιοποίηση ψηφιακών δικτύων χαμηλών ταχυτήτων, ραδιοεπικοινωνιών και πρώιμων κυβελωτών συστημάτων επέτρεψε την αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων και τη βασική αξιοποίηση της κυκλοφοριακής πληροφορίας για επιχειρησιακούς σκοπούς, όπως η ρύθμιση της φωτεινής σηματοδότησης και η λειτουργία μεταβλητών πινακίδων μηνυμάτων (Maimaris & Papageorgiou, 2016).

Άρχισαν έτσι να διαμορφώνονται οι πρώτες ολοκληρωμένες πλατφόρμες διαχείρισης κυκλοφορίας, οι οποίες συγκέντρωναν δεδομένα από πολλαπλές πηγές επιτρέποντας στους διαχειριστές του συστήματος να έχουν πλήρη εποπτεία της κατάστασης. Οι παρεμβάσεις εξακολουθούσαν να βασίζονται σε προκαθορισμένους κανόνες και ανθρώπινη λήψη αποφάσεων ωστόσο η δυνατότητα συντονισμού ενεργειών σε επίπεδο δικτύου βελτίωσε τη λειτουργικότητα των υποδομών και συνέβαλε στον περιορισμό των καθυστερήσεων και των ατυχημάτων.

Την ίδια περίοδο, η τηλεματική αξιοποιήθηκε για την παροχή πρώιμων υπηρεσιών πληροφόρησης προς τους οδηγούς. Μέσω πινακίδων μεταβλητών μηνυμάτων και με την επικουρική μετάδοση ραδιοφωνικών ανακοινώσεων, μεταδίδονταν πληροφορίες για κυκλοφοριακές συνθήκες, ατυχήματα και εναλλακτικές διαδρομές, ενισχύοντας σταδιακά την επίγνωση των οδηγών μετατρέποντας τον δρόμο από παθητικό φορέα σε ενεργό μέσο διαχείρισης.

Το ITS 1.0 χαρακτηρίζεται από περιορισμένη τυποποίηση και χαμηλή διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων, ένεκα των περιορισμένων τεχνολογικών δυνατοτήτων, ωστόσο εδραίωσε τη λογική της δικτυωμένης διαχείρισης και ανέδειξε την τηλεματική ως βασικό πυλώνα των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών.

## **2.5. ITS 2.0: Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) στις μεταφορές**

Η χρήση του IoT στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών οδηγεί σε πιο διασυνδεδεμένες και «έξυπνες» υποδομές, όπου διαφορετικά συστήματα, όπως αισθητήρες κυκλοφορίας, φωτεινοί σηματοδότες, οχήματα και κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας, μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Επιπρόσθετα η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, όπως το cloud computing και οι δικτυωμένες υποδομές αισθητήρων, επιτρέπει στα ITS να διαχειρίζονται και να επεξεργάζονται δεδομένα που προέρχονται από οδικούς αισθητήρες, κινητές συσκευές και άλλες πηγές πεδίου, βελτιώνοντας τον συντονισμό του συστήματος μεταφορών (Guerreiro κ.ά., 2016).

Ο δρόμος μετατρέπεται από μια υποδομή που περιέχει και περιβάλλεται από παθητικά τεχνικά έργα, σε έξυπνη οδική υποδομή που περιλαμβάνει κέντρα πληροφοριών και δίκτυα επικοινωνίας τα οποία επιτρέπουν τη συλλογή, μετάδοση και αξιοποίηση δεδομένων (Guo, 2021). Η αρχιτεκτονική των IoT-based ITS βασίζεται συχνά σε δομές πολλών επιπέδων, όπως η τριών επιπέδων service-oriented architecture (3SOA), στην οποία τα επίπεδα ανίχνευσης, επικοινωνίας και εφαρμογής λειτουργούν συνδυαστικά για την παροχή υπηρεσιών (Hammoudeh κ.ά., 2021).

Για την παρακολούθηση των οδικών υποδομών αξιοποιούνται τεχνολογίες όπως τα GIS, το remote sensing και το GPS, τα οποία παρέχουν γεωγραφικά και χωρικά δεδομένα στους αρμόδιους φορείς διαχείρισης, επιτρέποντας ταχύτερη ανάλυση και πιο στοχευμένες παρεμβάσεις (John κ.ά., 2022).

Τα περιβάλλοντα IoT ευνοούν την ανάπτυξη εφαρμογών που υποστηρίζουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας και τη μείωση των ατυχημάτων μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος (Aldegheshem κ.ά., 2018).

Όταν οχήματα, οδικές υποδομές και δίκτυα επικοινωνίας λειτουργούν συνδεδεμένα μεταξύ τους, διευκολύνεται η ανταλλαγή δεδομένων και η συνολική λειτουργία των ITS. Η ανάπτυξη συνδεδεμένων οχημάτων και η ασφαλής επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων αποτελούν βασικά στοιχεία για την εφαρμογή τεχνολογιών IoT στις μεταφορές. (Harvey & Kumar, 2020; Mecheva & Kakanakov, 2020; Shaaban κ.ά., 2021).

## **2.6. ITS 3.0: Το Διαδίκτυο των Οχημάτων (Internet of Vehicles - IoV)**

Η εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών προς το Internet of Vehicles (IoV) φέρνει το όχημα στο κέντρο του δικτύου μεταφορών, επιτρέποντας την επικοινωνία τόσο μεταξύ οχημάτων (Vehicle-to-Vehicle - V2V) όσο και με την οδική υποδομή (Vehicle-to-Infrastructure - V2I), ώστε να ανταλλάσσονται δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του οχήματος και του γύρω περιβάλλοντος. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε δίκτυα τύπου VANET (Vehicular Ad-hoc Network), όπου οχήματα και υποδομές λειτουργούν μαζί για την υποστήριξη εφαρμογών οδικής ασφάλειας και διαχείρισης της κυκλοφορίας.

Στο IoV η ανταλλαγή βασικών μηνυμάτων περιλαμβάνει πληροφορίες όπως η ταχύτητα, η θέση και η κατεύθυνση κίνησης των οχημάτων. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν τη συνεχή ενημέρωση για τις συνθήκες του οδικού δικτύου και υποστηρίζουν εφαρμογές για την οδική ασφάλεια, όπως η αποφυγή συγκρούσεων, και διαχείρισης κυκλοφορίας, όπως η έγκαιρη προειδοποίηση σε διασταυρώσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση επικοινωνιών V2V και V2I σε

περιβάλλοντα vehicular cloud, δηλαδή σε συστήματα επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων και οδικών υποδομών, ενισχύει την παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Mohapatra κ.ά., 2022).

Το IoV αξιοποιείται επίσης για πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως η βελτιστοποίηση διαδρομών και η αποδοτική δρομολόγηση οχημάτων. Αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης και τεχνικές βελτιστοποίησης εφαρμόζονται σε IoV περιβάλλον για την καλύτερη κατανομή της κυκλοφορίας και τη μείωση των καθυστερήσεων στο οδικό δίκτυο (Husnain κ.ά., 2023; Rani & Sharma, 2023).



Εικόνα 1. Σχηματική απεικόνιση του Internet of Vehicles (IoV) (Rani & Sharma, 2023)

Ειδικότερα η σύνδεση του IoV με τις έξυπνες πόλεις το καθιστά βασικό στοιχείο για καλύτερα οργανωμένη διαχείριση της κυκλοφορίας και των μετακινήσεων. Μέσα από την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων, υποδομών και κέντρων ελέγχου, γίνεται ευκολότερη η παρακολούθηση του οδικού δικτύου και ταχύτερη η αντιμετώπιση προβλημάτων κυκλοφορίας και οδικής ασφάλειας. (Hassan κ.ά., 2023; Mishra & Singh, 2025; Song κ.ά., 2024).

## 2.7. ITS 4.0: Συνεργατικά Συστήματα Μεταφορών και Επικοινωνίες V2X (C-ITS)

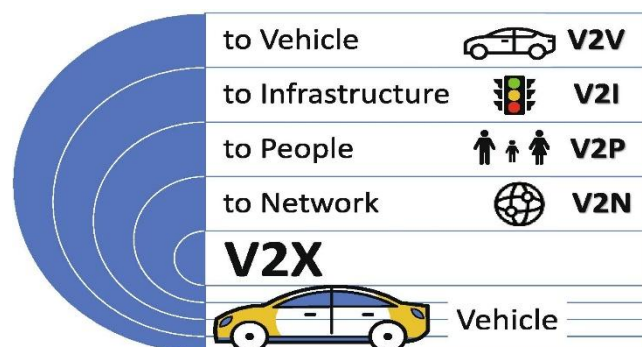
Με την πρόοδο των Ευφών Συστημάτων Μεταφορών η λειτουργία τους περνά από την απλή ανταλλαγή δεδομένων σε πιο οργανωμένη και συνεργατική διαχείριση πληροφοριών. Σκοπός των Cooperative Intelligent Transportation Systems (C-ITS) είναι η καλύτερη

ενημέρωση για τις συνθήκες κυκλοφορίας μέσω της ασύρματης επικοινωνίας και της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ οχημάτων και υποδομών.



Εικόνα 2. Απεικόνιση οικοσυστήματος C-ITS (Avcı & Koca, 2024).

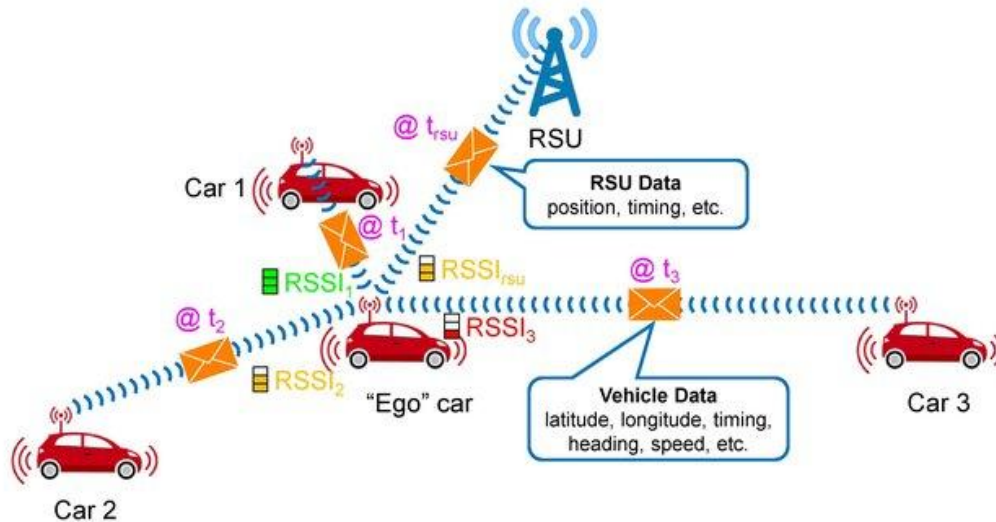
Η επικοινωνία αυτή υλοποιείται μέσω τεχνολογιών Vehicle-to-Everything (V2X), οι οποίες περιλαμβάνουν V2V και V2I επικοινωνίες και επιτρέπουν τη συνεχή μετάδοση δεδομένων κατάστασης, όπως θέση και ταχύτητα.



Εικόνα 3. Τεχνολογία Vehicle-to-Everything (V2X) (Pompigna & Mauro, 2022)

Τα Cooperative Awareness Messages (CAM) είναι μηνύματα που μεταδίδονται περιοδικά και περιέχουν βασικές πληροφορίες για την κατάσταση του οχήματος όπως θέση, ταχύτητα και κατεύθυνση κίνησης. Μέσω αυτών των μηνυμάτων τα οχήματα και οι μονάδες οδικής υποδομής (RSUs) μπορούν να συνεργάζονται ανταλλάσσοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και της κυκλοφορίας. Η γρήγορη

μετάδοση των δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές συνεργατικής οδήγησης και έγκαιρης προειδοποίησης (Charpentier κ.ά., 2022).



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση ανταλλαγής μηνυμάτων Cooperative Awareness Messages (CAM) (Hoang κ.ά., 2016)

Οι δυνατότητες του έξυπνου δρόμου δεν σταματούν όμως εδώ επεκτείνονται ακόμη περισσότερο καθώς, μέσω κατάλληλων εφαρμογών, μπορούν να υποστηριχθούν λειτουργίες όπως η έγκαιρη ειδοποίηση για πεζούς και άλλους ευάλωτους χρήστες του (Tang κ.ά., 2021).

Τα C-ITS αξιοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως ITS-G5 (IEEE 802.11p) και Cellular-V2X οι οποίες λειτουργούν στη ζώνη των 5.9 GHz και επιτρέπουν άμεση επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και υποδομών. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ήδη δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες τόσο για την υποστήριξη εφαρμογών συνεργατικής οδήγησης όσο και για την αξιολόγησή τους σε πραγματικό κυκλοφοριακό περιβάλλον (Marquez-Barja κ.ά., 2019).

Τα C-ITS επιτρέπουν την υλοποίηση σεναρίων πρόληψης κινδύνων και ενίσχυσης της οδικής ασφάλειας όπως ειδοποιήσεις για οχήματα που κινούνται αντίθετα, εμπόδια στο οδόστρωμα, επικίνδυνες διασταυρώσεις ή σημεία αυξημένης επικινδυνότητας. Μέσω της συνεργατικής ανταλλαγής πληροφορίας, το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει τον οδηγό με έγκαιρα και εξατομικευμένα μηνύματα, βελτιώνοντας την αντίδραση σε κρίσιμες καταστάσεις (Gogas, 2020).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η ανάπτυξη των C-ITS υποστηρίχθηκε θεσμικά μέσω της Οδηγίας 2010/40/ΕΕ, η οποία έθεσε τις βάσεις για τη διαλειτουργικότητα και την ασφαλή εφαρμογή

των σχετικών υπηρεσιών. Με την εμφάνιση των C-ITS, η διαχείριση της κυκλοφορίας εξελίχθηκε προς πιο συνεργατικούς τρόπους διαχείρισης της κυκλοφορίας.

## **2.8. ITS 5.0: Τεχνητή Νοημοσύνη, Big Data και Αυτοματοποιημένη Λήψη Αποφάσεων**

Στο πιο ώριμο στάδιό τους τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών δεν περιορίζονται πλέον μόνο στη συλλογή και μετάδοση πληροφοριών, αλλά μπορούν και να αναλύουν δεδομένα, να προβλέπουν καταστάσεις και να υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων. Το ITS 5.0 αξιοποιεί την τεχνητή νοημοσύνη και τα μεγάλα δεδομένα, ώστε η διαχείριση της κυκλοφορίας και της οδικής ασφάλειας να αποκτά δυνατότητες πρόγνωσης και προσαρμοστικότητας (Musa κ.ά., 2023).

Η βασική διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες φάσεις είναι ο τρόπος που χρησιμοποιούνται τα δεδομένα. Τα σύγχρονα συστήματα επεξεργάζονται πληροφορίες από αισθητήρες, συνδεδεμένα οχήματα και ψηφιακές πλατφόρμες. Με τη βοήθεια αλγορίθμων μηχανικής και βαθιάς μάθησης μπορούν να εντοπίζουν μοτίβα που δεν φαίνονται εύκολα με τις παραδοσιακές μεθόδους, βοηθώντας έτσι στην πρόβλεψη κινδύνων και στη βελτίωση της κυκλοφορίας (Lian κ.ά., 2020; Lv κ.ά., 2021).

Η διαχείριση αυτού του μεγάλου όγκου δεδομένων απαιτεί κατάλληλες υπολογιστικές αρχιτεκτονικές. Με τον συνδυασμό edge και cloud computing εξασφαλίζεται τόσο η άμεση απόκριση σε επείγοντα ζητήματα όσο και η βαθύτερη ανάλυση των πληροφοριών. Χάρη σε αυτές τις τεχνολογίες, η κατάσταση των δρόμων παρακολουθείται συνεχώς, γεγονός που επιτρέπει την έγκαιρη παρέμβαση και τη γρήγορη αποκατάσταση τυχόν προβλημάτων στις υποδομές (Guerreiro κ.ά., 2016; John κ.ά., 2022).

Μια σημαντική εξέλιξη στο ITS 5.0 είναι η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin), δηλαδή ενός ψηφιακού μοντέλου της οδικής υποδομής που ενημερώνεται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δοκιμάζονται διαφορετικά σενάρια, να προβλέπονται φθορές και να λαμβάνονται αποφάσεις συντήρησης. Όταν τα ψηφιακά δίδυμα συνδυάζονται με τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης, ενισχύεται η προγνωστική συντήρηση βελτιώνοντας τον κύκλο ζωής των έργων (Bao κ.ά., 2021; Mahmud κ.ά., 2025). Η χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης επεκτείνεται και στο στάδιο του σχεδιασμού, καθώς πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση του πάχους του οδοστρώματος, του κόστους και του προγραμματισμού της συντήρησης (Ndem & Akpan, 2025). Με τη βοήθεια της Τεχνητής Νοημοσύνης εξάγονται

αποτελέσματα από δεδομένα που συλλέγονται μέσω αισθητήρων και συστημάτων επικοινωνίας των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών υποστηρίζοντας την ανάλυση και τη λήψη αποφάσεων (Zhu, 2024).

Το ITS 5.0 δείχνει τη μετάβαση από συστήματα που απλώς ενημερώνουν, σε συστήματα που μπορούν να μαθαίνουν, να προβλέπουν και να βοηθούν στη λήψη αποφάσεων.

## **2.9. Smart Roads Τεχνολογίες βασισμένες στις ΤΠΕ**

Οι τεχνολογίες Smart Roads που βασίζονται στις Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών αποτελούν την πιο σύγχρονη μορφή οδικής υποδομής και επιτρέπουν πιο ευέλικτη διαχείριση των μεταφορών. Σε αντίθεση με τις παθητικές παρεμβάσεις, αξιοποιούν αισθητήρες και συστήματα επικοινωνίας, ώστε η ίδια η υποδομή να μπορεί να διαχειρίζεται τα δεδομένα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, λειτουργώντας έτσι πιο ενεργά μέσα σε ένα ευρύτερο ψηφιακό περιβάλλον μεταφορών (Pompigna & Mauro, 2022; Trubia κ.ά., 2020; Zhu, 2024).

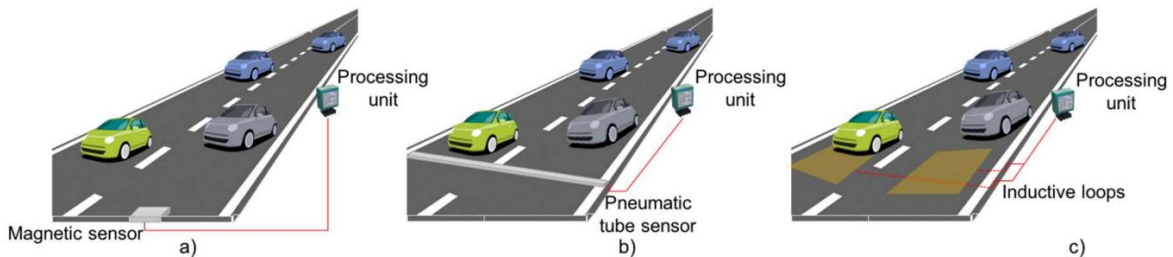
Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών συνδέεται με τη γενικότερη εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών και την αυξανόμενη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών στον τομέα των μεταφορών. Όπως αναφέρεται στο έργο του Ariyoshi (2022) τα ITS έχουν εξελιχθεί από απλές εφαρμογές ενημέρωσης σε πιο σύνθετα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

Στην πράξη, τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και τα συστήματα επικοινωνίας ενσωματώνονται στην οδική υποδομή μέσω αισθητήρων και δικτύων. Έτσι γίνεται δυνατή η συνεχής παρακολούθηση των συνθηκών και η έγκαιρη αναγνώριση επικίνδυνων καταστάσεων (Finogeev κ.ά., 2019; Mao κ.ά., 2022).

Τα δεδομένα έχουν βασικό ρόλο στα Smart Roads, αφού πληροφορίες από αισθητήρες, κάμερες, μονάδες δρόμου και συνδεδεμένα οχήματα συγκεντρώνονται και επεξεργάζονται σε κοινές πλατφόρμες (Guerreiro κ.ά., 2016). Η αξία τους όμως δεν βρίσκεται μόνο στη συλλογή, αλλά κυρίως στην ανάλυση μέσω εργαλείων big data και τεχνητής νοημοσύνης. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να εντοπίζονται πρότυπα, να εκτιμάται ο κίνδυνος και να ενεργοποιούνται έγκαιρα παρεμβάσεις, όπως προειδοποιήσεις ή προσαρμογές στην κυκλοφορία (Lian κ.ά., 2020; Lv κ.ά., 2021).

Εξυπνοι Αισθητήρες Οδικής Υποδομής (Smart Roads Sensors)

Οι έξυπνοι αισθητήρες αποτελούν βασικό στοιχείο των Smart Roads, καθώς επιτρέπουν τη συστηματική συλλογή δεδομένων για την κατάσταση του δρόμου και την κυκλοφορία (John κ.ά., 2022). Τοποθετούνται στο οδόστρωμα και στα γύρω στοιχεία όπως φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες, στύλους ή άλλα σημεία της υποδομής, και δίνουν τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης, ώστε τα δεδομένα να αξιοποιούνται για τη διαχείριση και τη λήψη αποφάσεων. Όσον αφορά την κυκλοφορία, οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την καταγραφή βασικών μεγεθών, όπως η ροή, η ταχύτητα και η πυκνότητα των οχημάτων. Οι παραδοσιακοί αισθητήρες, όπως οι επαγωγικοί βρόχοι, σταδιακά συμπληρώνονται ή αντικαθίστανται από πιο σύγχρονες λύσεις, όπως μαγνητικοί αισθητήρες, ραντάρ, lidar και συστήματα υπολογιστικής όρασης. Με τις τεχνολογίες αυτές η συλλογή δεδομένων γίνεται πιο ακριβής με μικρότερη επέμβαση στην υποδομή σε σύγκριση με παλαιότερες μεθόδους (Guerrero-Ibáñez κ.ά., 2018; Ma κ.ά., 2021).



**Εικόνα 5. Μαγνητικοί, πνευματικοί αισθητήρες και επαγωγικοί βρόχοι (Guerrero-Ibáñez κ.ά., 2018)**

Σημαντικό ρόλο έχουν και οι περιβαλλοντικοί και καιρικοί αισθητήρες, που καταγράφουν στοιχεία όπως η θερμοκρασία του οδοστρώματος, η υγρασία, η ορατότητα, η ένταση του ανέμου και η βροχόπτωση. Τα δεδομένα αυτά συμβάλλουν στον έγκαιρο εντοπισμό δυσμενών καιρικών συνθηκών και προβλημάτων στην υποδομή και μπορούν να αξιοποιηθούν για την ενεργοποίηση κατάλληλων λειτουργικών μέτρων, όπως η προσαρμογή της σήμανσης, της φωτεινής σηματοδότησης ή του οδικού φωτισμού (Isreal, 2022).

Μια άλλη σημαντική κατηγορία αισθητήρων αφορά την παρακολούθηση της κατάστασης των υποδομών, όπου αισθητήρες καταπόνησης, δονήσεων και μετατοπίσεων τοποθετούνται σε γέφυρες, σήραγγες και οδοστρώματα για τον έγκαιρο εντοπισμό φθορών ή πιθανών αστοχιών (Isreal, 2022; Nestovito & Occhiuzzi, 2016). Έτσι, η συντήρηση βασίζεται στην

πραγματική κατάσταση της υποδομής και όχι σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (Ndume & Mlavi, 2021).

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές κατηγορίες έξυπνων αισθητήρων οδικής υποδομής, όπως προκύπτουν από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, και τον ρόλο τους στη συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων στο πλαίσιο των Smart Roads.

**Πίνακας 3. Αισθητήρες Οδικής Υποδομής (ICT-based Smart Roads)**

<i>a/a</i>	<i>Τεχνολογία</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Άρθρο</i>
<i>1</i>	Αισθητήρες κυκλοφορίας (βρόχοι, ραντάρ, κάμερες)	Παρακολούθηση ροής, ταχύτητας και συμβάντων	(Guerrero-Ibáñez κ.ά., 2018)
<i>2</i>	LiDAR υποδομής	Τρισδιάστατη αποτύπωση γεωμετρίας οδού	(Barazzetti κ.ά., 2020)
<i>3</i>	Νέες τεχνολογίες αισθητήρων	Ενσωμάτωσή τους στα Συνδεδεμένα Αυτόνομα Οχήματα (CAV)	(Khanmohamadi & Guerrieri, 2024)
<i>4</i>	Αισθητήρες ποιότητας οδοστρώματος	Αξιολόγηση τραχύτητας και πρόσφυσης	(Consilvio κ.ά., 2023)
<i>5</i>	Δομικοί αισθητήρες (strain, tilt, vibration)	Παρακολούθηση δομικής κατάστασης γεφυρών	(Isreal, 2022)
<i>6</i>	Αισθητήρες φωτεινότητας	Διαχείριση επιπέδων φωτισμού οδού	(Achar κ.ά., 2024)
<i>7</i>	Δικτυωμένα συστήματα αισθητήρων αυτοκινητοδρόμων	Ενσωμάτωση sensing σε συνδεδεμένη υποδομή	(Wiegand, 2019)

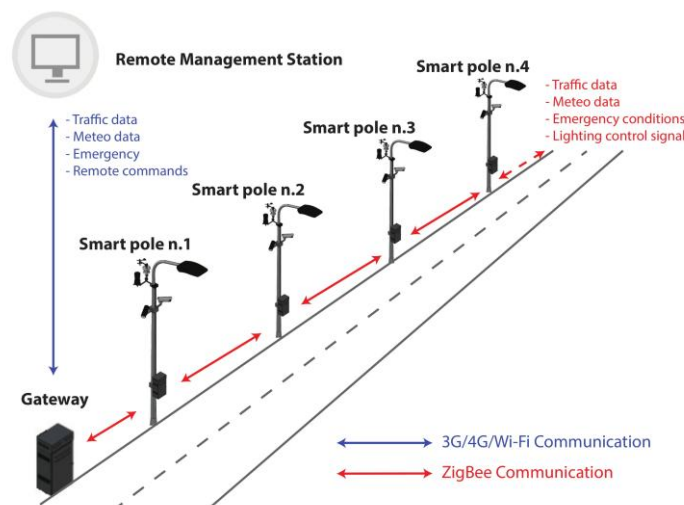
### *Έξυπνος Οδικός Φωτισμός (Smart Roads Lighting Systems)*

Ο έξυπνος οδικός φωτισμός είναι από τις πιο ώριμες και διαδεδομένες εφαρμογές Smart Roads, καθώς επιτρέπει εξοικονόμηση ενέργειας και προσαρμογή του φωτισμού ανάλογα

με την κυκλοφορία και τις καιρικές συνθήκες (Al-Haji, 2014; Gagliardi κ.ά., 2020). Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα σταθερού φωτισμού, λειτουργεί μέσω δικτύων που επιτρέπουν τον έλεγχο τόσο κεντρικά όσο και τοπικά.

Η λειτουργία των Smart Roads Lighting Systems βασίζεται σε αισθητήρες κίνησης, κυκλοφορίας και φωτεινότητας, μαζί με συστήματα ελέγχου που ρυθμίζουν τη λειτουργία του φωτισμού και επιτρέπουν απομακρυσμένο έλεγχο. Η ένταση του φωτισμού προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την παρουσία οχημάτων ή πεζών (Mustafa κ.ά., 2017; Mathaba, 2023). Σε υπεραστικές ή αγροτικές περιοχές, όπου ο συνεχής συμβατικός φωτισμός δεν είναι πάντοτε εφικτός ή οικονομικά βιώσιμος, ο δυναμικός φωτισμός επιτρέπει να φωτίζονται κυρίως τα κρίσιμα σημεία της οδού, όπως καμπύλες, κόμβοι και περιοχές αυξημένου κινδύνου (Al-Haji, 2014). Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα βασίζονται σε φωτιστικά σώματα LED, τα οποία προσφέρουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και δυνατότητα ακριβούς ρύθμισης της φωτεινής έντασης (Viswanathan κ.ά., 2021). Επίσης η ενσωμάτωσή τους σε αρχιτεκτονικές IoT επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας, ώστε να γίνεται έγκαιρα η συντήρηση του εξοπλισμού (Roy κ.ά., 2024).

Τα Smart Roads Lighting Systems εντάσσονται ολόενα και συχνότερα σε ευρύτερες πλατφόρμες Smart Roads και Smart Cities και η διασύνδεσή τους με κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας και συστήματα σήμανσης επιτρέπει τον συντονισμό του φωτισμού με άλλα στοιχεία της οδικής υποδομής, συμβάλλοντας στην πιο οργανωμένη λειτουργία του οδικού δικτύου. (Gagliardi κ.ά., 2020).



Εικόνα 6. Smart Roads Lighting System (Gagliardi κ.ά., 2020)

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει συνοπτικά τις κύριες τεχνολογικές προσεγγίσεις έξυπνου οδικού φωτισμού, όπως αναδεικνύονται από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, και τη συμβολή τους στη δυναμική και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του οδικού δικτύου.

**Πίνακας 4. Τεχνολογίες Έξυπνου Οδικού Φωτισμού**

<i><b>α/α</b></i>	<i><b>Τεχνολογία</b></i>	<i><b>Περιγραφή</b></i>	<i><b>Άρθρο</b></i>
<i><b>1</b></i>	Προσαρμοστικός φωτισμός αυτοκινητοδρόμων (IoT)	Δυναμική ρύθμιση φωτεινότητας μέσω IoT και απομακρυσμένου ελέγχου	(Achar κ.ά., 2024)
<i><b>2</b></i>	Φωτισμός ενεργοποιούμενος από κίνηση	Τοπικοί κόμβοι που αυξομειώνουν τον φωτισμό κατά τη διέλευση οχημάτων	(Sophiya Susan κ.ά., 2022)
<i><b>3</b></i>	Έξυπνος φωτισμός LED προσαρμοζόμενος βάσει κίνησης και περιβαλλοντικών συνθηκών	Προσαρμογή φωτισμού βάσει καιρικών συνθηκών	(Tripathy κ.ά., 2017)
<i><b>4</b></i>	Φωτισμός με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Τροφοδοσία μέσω ΑΠΕ με IoT παρακολούθηση	(Mittal κ.ά., 2022)

*Έξυπνες Πινακίδες και Συστήματα Μεταβλητών Μηνυμάτων (Smart Signage & Variable Message Signs)*

Τα συστήματα έξυπνης σήμανσης και μεταβλητών μηνυμάτων αποτελούν βασικό στοιχείο των ICT-based Smart Roads, καθώς λειτουργούν ως κύριο κανάλι επικοινωνίας μεταξύ της οδικής υποδομής και των χρηστών της. Σε αντίθεση με τη στατική σήμανση, επιτρέπουν τη δυναμική προσαρμογή του περιεχομένου με βάση κυκλοφοριακά, περιβαλλοντικά και λειτουργικά δεδομένα, ενισχύοντας την έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών (Kassens-Noor κ.ά., 2021) .

Τα συστήματα μεταβλητών μηνυμάτων (Variable Message Signs - VMS) είναι ψηφιακές πινακίδες (LED ή LCD) που συνδέονται με κέντρα διαχείρισης κυκλοφορίας και πλατφόρμες δεδομένων. Μέσα από τα VMS προβάλλονται πληροφορίες για συμβάντα,

έργα, κυκλοφοριακές συνθήκες και καιρικούς κινδύνους, ενώ σε πολλές περιπτώσεις εμφανίζονται και δυναμικές ρυθμίσεις, όπως όρια ταχύτητας ή προειδοποιήσεις ασφάλειας.

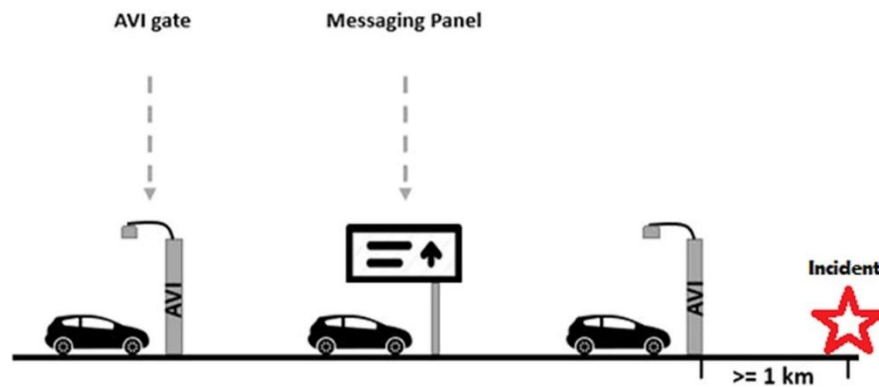


Εικόνα 7. Σύστημα μεταβλητών μηνυμάτων (Variable Message Sign - VMS) (Basso κ.ά., 2021)

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο παρουσίασης της πληροφορίας. Παράγοντες όπως η αναγνωσιμότητα και η σαφήνεια είναι κρίσιμοι, καθώς η υπερφόρτωση πληροφοριών μπορεί να οδηγήσει σε απόσπαση της προσοχής. Έτσι τα σύγχρονα συστήματα έξυπνης σήμανσης βασίζονται σε εργονομικές αρχές και απλή δομή μηνυμάτων (Almallah κ.ά., 2021).

Η λειτουργία των Smart Signage & VMS στηρίζεται σε δεδομένα που έρχονται από αισθητήρες, συστήματα παρακολούθησης και πλατφόρμες ITS, ενώ σε πιο προχωρημένες εφαρμογές αξιοποιούνται και επικοινωνίες οχήματος-υποδομής (V2I). Τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε στοχευμένα οπτικά μηνύματα, τα οποία προβάλλονται σε κρίσιμα σημεία του δικτύου με σκοπό την άμεση ενημέρωση των οδηγών (Kassens-Noor κ.ά., 2021; Basso κ.ά., 2021). Σύγχρονες εφαρμογές ενσωματώνουν δικτυωμένες και «συνδεδεμένες» πινακίδες, οι οποίες μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα από τοπικούς αισθητήρες και να προσαρμόζουν το περιεχόμενό τους σε πραγματικό χρόνο, λειτουργώντας ως ενεργοί κόμβοι πληροφόρησης (Michael, 2022). Επιπλέον, με μηνύματα όπως εναλλακτικές διαδρομές ή δυναμικά όρια ταχύτητας, βοηθούν και στη συνολική διαχείριση της κυκλοφορίας στο δίκτυο.

Οι έξυπνες πινακίδες και τα συστήματα μεταβλητών μηνυμάτων λειτουργούν ως το δυναμικό σημείο επαφής ανάμεσα στην ψηφιακή υποδομή του δρόμου και τους χρήστες του.



Εικόνα 8. Ενημέρωση οδηγών με τη βοήθεια VMS (Basso κ.ά., 2021)

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές μορφές έξυπνης σήμανσης και μεταβλητών μηνυμάτων, όπως προκύπτουν από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, καθώς και τον ρόλο τους στη δυναμική ενημέρωση και διαχείριση της κυκλοφορίας.

Πίνακας 5. Έξυπνη Σήμανση & VMS

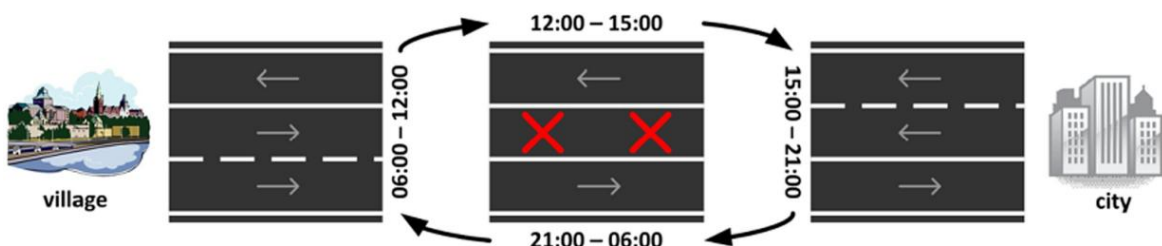
α/α	Τεχνολογία	Περιγραφή	Άρθρο
1	Πινακίδες Μεταβλητών Μηνυμάτων (VMS)	Ψηφιακές πινακίδες LED που προβάλλουν δυναμικά κυκλοφοριακά και συμβάντα σε αυτοκινητοδρόμους	(Basso κ.ά., 2021)
2	Μηνύματα Οδικής Ασφάλειας σε DMS	Δυναμικά μηνύματα ενημέρωσης των οδηγών για μείωση ταχύτητας και αύξηση προσοχής	(Kassens-Noor κ.ά., 2021)
3	Κινούμενα / Μεταφερόμενα VMS	Μετακινούμενες πινακίδες για διαχείριση έργων ή προσωρινών κυκλοφοριακών ρυθμίσεων	(Costa κ.ά., 2020)
4	Διασυνδεδεμένες Πινακίδες με V2I	Πινακίδες με έξυπνη συνδεσιμότητα που ανταλλάσσουν δεδομένα με οχήματα και υποδομή	(Kumar κ.ά., 2023)
5	Ψηφιακή Σήμανση σε Smart Highways	Αναφορά στην χρήση έξυπνων οθονών για την προβολή πληροφοριών	(Singh κ.ά., 2021)

Ενεργή Διαγράμμιση και Δυναμική Οπτική Καθοδήγηση (Active Road Markings & Dynamic Visual Guidance)

Οι τεχνολογίες ενεργής διαγράμμισης και δυναμικής οπτικής καθοδήγησης αποτελούν μέρος των ICT-based Smart Roads, καθώς ενσωματώνουν ενεργά στοιχεία και μηχανισμούς ελέγχου που επιτρέπουν την προσαρμογή της οριζόντιας σήμανσης στις εκάστοτε συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος. Σε αντίθεση με συμβατικές ή μη διασυνδεδεμένες λύσεις (Non-ICT), όπως στατικά LED ή απλούς ανακλαστήρες χωρίς δυνατότητα ελέγχου, τα συστήματα αυτά λειτουργούν δυναμικά και ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την οπτική αντίληψη του οδηγού, ιδιαίτερα σε συνθήκες μειωμένης ορατότητας ή αυξημένης πολυπλοκότητας του οδικού περιβάλλοντος.

Η υλοποίησή τους βασίζεται κυρίως σε ενσωματωμένα φωτεινά στοιχεία, όπως LED ή οπτικές ίνες, σε συνδυασμό με αισθητήρες και μονάδες ελέγχου. Μέσω της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, τα συστήματα αυτά μπορούν να ρυθμίζουν δυναμικά τη λειτουργία και την ένταση της διαγράμμισης, μετατρέποντάς την από παθητικό στοιχείο υποδομής σε ενεργό μέσο επικοινωνίας με τον οδηγό.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι δυναμικές διαγραμμίσεις που μπορούν να δημιουργούν, να καταργούν ή να αναδιατάσσουν λωρίδες. Αυτές οι εφαρμογές εμφανίζονται κυρίως σε συστήματα Dynamic Road Markings (DRMs), τα οποία χρησιμοποιούνται όταν ο φόρτος αλλάζει ή όταν υπάρχουν έκτακτα συμβάντα, με στόχο καλύτερη ροή και μεγαλύτερη ασφάλεια.

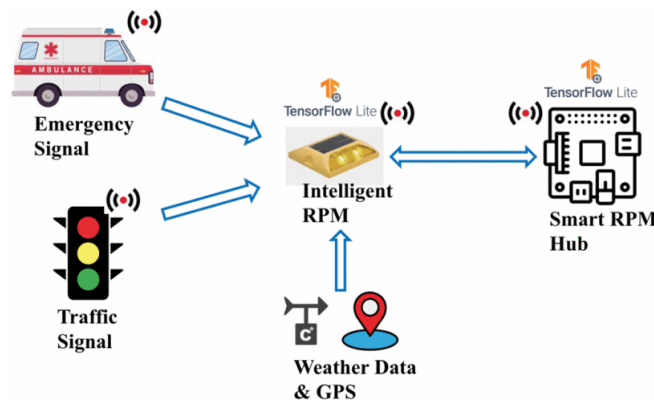


Εικόνα 9. Δυναμική διαγράμμιση - Dynamic road marking (DRM) (Lin κ.ά., 2023)

Η λειτουργία των συστημάτων ενεργής διαγράμμισης υποστηρίζεται από πλατφόρμες Ευφώνων Συστημάτων Μεταφορών (ITS), μέσω των οποίων συλλέγονται και διακινούνται τα δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες οδοστρώματος και περιβάλλοντος. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε κεντρικές μονάδες ή υποδομές cloud, όπου αναλύονται και

αξιοποιούνται για τη δυναμική ρύθμιση της διαγράμμισης χωρίς συνεχή ανθρώπινη παρέμβαση (Lin κ.ά., 2023).

Σε παρόμοια λογική κινείται και η πρόταση των Ahmed κ.ά. (2023) η οποία βασίζεται σε δίκτυο έξυπνων ανακλαστήρων εξοπλισμένων με αισθητήρες, GPS και μονάδες επικοινωνίας. Το σύστημα αυτό συλλέγει δεδομένα (π.χ. καιρικές συνθήκες, θέση οχημάτων και τήρηση λωρίδας) και τα μεταδίδει σε κεντρικό κόμβο για επεξεργασία, επιτρέποντας προηγμένες λειτουργίες οδικής καθοδήγησης και πρόβλεψης συνθηκών σε πραγματικό χρόνο. Η πρόταση αυτή διαφοροποιείται σαφώς από απλές ανακλαστικές ή φωτεινές λύσεις, αναδεικνύοντας τον ρόλο της διασύνδεσης και της επεξεργασίας δεδομένων ως βασικό χαρακτηριστικό των ICT-based συστημάτων.



Εικόνα 10. Προτεινόμενο οικοσύστημα έξυπνων ανακλαστήρων (Ahmed κ.ά., 2023)

Η ενεργή διαγράμμιση ενσωματώνεται σε ευρύτερα συστήματα ICT-based Smart Roads και λειτουργεί συμπληρωματικά με άλλες τεχνολογίες, όπως ο έξυπνος φωτισμός και η δυναμική σήμανση. Ο συνδυασμός αυτός βελτιώνει την οπτική καθοδήγηση η οποία γίνεται πιο καθαρή και ο δρόμος μπορεί να προσαρμόζεται πιο εύκολα στις αλλαγές.

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές μορφές ενεργής διαγράμμισης και δυναμικής οπτικής καθοδήγησης, όπως προκύπτουν από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, καθώς και τον ρόλο τους στη βελτίωση της ορατότητας, της καθοδήγησης πορείας και της προσαρμοστικής διαχείρισης της κυκλοφορίας.

**Πίνακας 6. Ενεργή Διαγράμμιση**

<i>a/a</i>	<i>Τεχνολογία</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Άρθρο</i>
<i>1</i>	Ενεργές φωτεινές διαγραμμίσεις (Active Luminous Road Markings - ALRMs)	Φωτεινή οριζόντια σήμανση με αυτοφωτιζόμενα ή ηλεκτρικά στοιχεία για βελτίωση ορατότητας	(Lin κ.ά., 2023)
<i>2</i>	Έξυπνα ενεργά studs λωρίδων	Ενεργά studs οριοθέτησης λωρίδας για βελτίωση νυχτερινής ορατότητας	(Shahar & Bremond, 2014)
<i>3</i>	Δίκτυο έξυπνων οδικών ανακλαστήρων	Ανάπτυξη καινοτόμου δικτύου αισθητήρων έξυπνων οδικών ανακλαστήρων για την παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο	(Tao κ.ά., 2022)

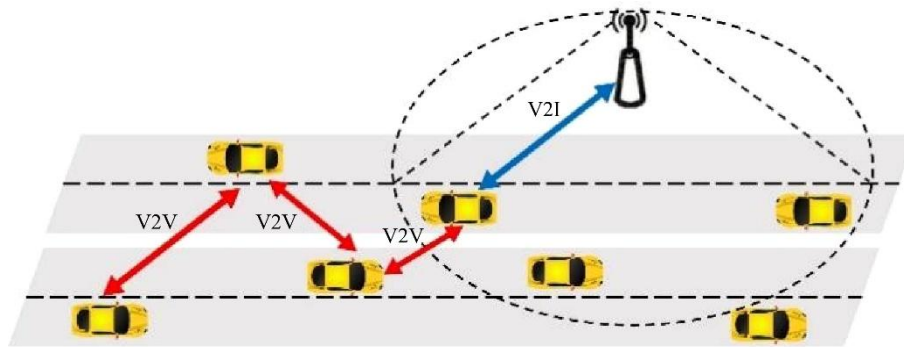
*Συστήματα Επικοινωνίας Οχήματος-Υποδομής (V2I) και Συνεργατικά ITS (C-ITS) ως ψηφιακή υποδομή του δρόμου*

Η λειτουργία των σύγχρονων ICT-based Smart Roads βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα συστήματα επικοινωνίας Οχήματος-Υποδομής (Vehicle-to-Infrastructure - V2I) και στα Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Cooperative Intelligent Transportation Systems - C-ITS). Έτσι η υποδομή δεν μένει παθητική αλλά εμπλέκεται σε ένα διασυνδεδεμένο περιβάλλον, όπου η πληροφορία πηγαινοέρχεται συνεχώς ανάμεσα στον δρόμο και τους χρήστες του, δημιουργώντας τις κατάλληλες συνθήκες για πιο δυναμικές μορφές διαχείρισης (Pompigna & Mauro, 2022; Trubia κ.ά., 2020).

Στον πυρήνα των V2I βρίσκονται οι μονάδες οδικής πλευράς (Roadside Units - RSUs) δηλαδή σταθερές εγκαταστάσεις με αισθητήρες, υπολογιστικούς πόρους και ασύρματη επικοινωνία, ώστε να συνδέουν την υποδομή με τα κινούμενα οχήματα και τα κέντρα ελέγχου. Αυτές τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία του δρόμου και λειτουργούν σαν ενδιάμεσοι κόμβοι οι οποίοι μεσολαβούν μεταξύ υποδομής, κέντρων ελέγχου και κινούμενων οχημάτων (J. Liu κ.ά., 2020). Μέσω των RSUs καθίσταται δυνατή η άμεση

μετάδοση κρίσιμων πληροφοριών, όπως συνθήκες οδοστρώματος, όρια ταχύτητας, συμβάντα ή καιρικά φαινόμενα, χωρίς να απαιτείται ενεργή αναζήτηση από τον οδηγό.

Τα C-ITS επεκτείνουν αυτή τη λογική πέρα από τη μονόδρομη σχέση υποδομής-οχήματος εισάγοντας ένα ευρύτερο συνεργατικό πλαίσιο στο οποίο ενσωματώνονται επικοινωνίες Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Network (V2N) και Vehicle-to-Everything (V2X), με αποτέλεσμα οχήματα και υποδομές να λειτουργούν σαν κόμβοι στο ίδιο δίκτυο ανταλλαγής δεδομένων (Hahn κ.ά., 2021). Η εκτεταμένη αυτή λογική επιτρέπει τη δημιουργία μιας πλήρους εικόνας της κυκλοφοριακής κατάστασης, επειδή τα δεδομένα δεν έρχονται από μία μόνο πηγή, αλλά από πολλές.



Εικόνα 11. Διάγραμμα της μετάδοσης πληροφοριών σε συστήματα συνεργασίας μεταξύ οχημάτων και υποδομών (Hu κ.ά., 2024).

Σε αυτοκινητοδρόμους, οι επικοινωνίες V2I και C-ITS βασίζονται συνήθως σε συνδυασμό τεχνολογιών, με λύσεις μικρής εμβέλειας για τοπική ανταλλαγή δεδομένων και κυψελοειδή δίκτυα για μεγαλύτερη κάλυψη. Έτσι προκύπτουν υβριδικά σχήματα, όπου τα οχήματα και η οδική υποδομή ανταλλάσσουν πληροφορίες είτε άμεσα σε κοντινή απόσταση είτε μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας (Marquez-Barja κ.ά., 2019).

Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τις βασικές τεχνολογίες και υποδομές που εντοπίζονται στη σχετική βιβλιογραφία.

Πίνακας 7. Τεχνολογίες και Υποδομές V2I / C-ITS

α/α	Τεχνολογία	Περιγραφή	Άρθρο
1	Μονάδες Οδικής Πλευράς (RSU)	Σταθεροί ασύρματοι κόμβοι που διασυνδέουν οχήματα, υποδομή και κέντρα ελέγχου	(J. Liu κ.ά., 2020)

2	Υβριδική Επικοινωνία ITS-G5 & Cellular σε ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα V2X (V2V-V2I-V2N)	Συνεργατική ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων και δικτύου	(Marquez-Barja κ.ά., 2019)
3	Συστήματα Προειδοποίησης Κινδύνου V2I	Μετάδοση ειδοποιήσεων ασφάλειας από υποδομή προς οχήματα σε πραγματικό χρόνο	(JiGui Liang κ.ά., 2024)
4	Αρχιτεκτονική C-ITS με Edge Computing	Κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων σε επίπεδο δρόμου για χαμηλή καθυστέρηση	(Cai κ.ά., 2020)

Πλατφόρμες Ανάλυσης Δεδομένων, Τεχνητή Νοημοσύνη και Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (AI-based DSS) για ICT-based Smart Roads

Στα ICT-based Smart Roads, η λειτουργία του συστήματος δεν περιορίζεται στη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες και υποδομές επικοινωνίας, αλλά επεκτείνεται στην επεξεργασία και αξιοποίησή τους σε επίπεδο λήψης αποφάσεων. Στη στρωματική αρχιτεκτονική των έξυπνων δρόμων, το ανώτερο επίπεδο αφορά ακριβώς αυτή την ανάλυση με την οποία προκύπτουν μηχανισμοί υποστήριξης για τη λειτουργία της οδικής υποδομής (Z. Liu κ.ά., 2021).

Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS) αξιοποιούν τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τους φορείς διαχείρισης της κυκλοφορίας. Στη βιβλιογραφία, τα AI-based DSS συνδέονται τόσο με στρατηγικές όσο και με επιχειρησιακές επιλογές, καθώς επιτρέπουν την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων και την ενίσχυση της αποδοτικότητας των παρεμβάσεων στο σύστημα μεταφορών (Shulajkovska κ.ά., 2024). Ο συνδυασμός των DSS με ψηφιακά δίδυμα (digital twins) διευρύνει τη χρήση τους πέρα από τον αστικό σχεδιασμό και τα φέρνει πιο κοντά στη διαχείριση της ίδιας της υποδομής. Τα ψηφιακά δίδυμα συνδέουν δεδομένα πεδίου με υπολογιστικά μοντέλα και εργαλεία ανάλυσης, ώστε να υποστηρίζονται η αξιολόγηση της κατάστασης του δρόμου, η ιεράρχηση επικίνδυνων

τμημάτων και ο προγραμματισμός συντηρήσεων με βάση δείκτες κινδύνου και απόδοσης (Consilvio κ.ά., 2023).

Παρότι τα AI-based DSS προσφέρουν σαφή πλεονεκτήματα, η εφαρμογή τους στην πράξη επηρεάζεται από περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα, την ποιότητα των δεδομένων και με την ενσωμάτωσή τους σε υφιστάμενα συστήματα διαχείρισης. Επιπλέον, καθώς τα αλγοριθμικά μοντέλα γίνονται πιο σύνθετα, η ανθρώπινη εποπτεία και η θεσμική υποστήριξη, όπως σαφείς διαδικασίες εφαρμογής και καθορισμένες αρμοδιότητες, παραμένουν απαραίτητες, ώστε τα αποτελέσματα να αξιοποιούνται αποτελεσματικά σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

## **2.10. Smart Roads Τεχνολογίες που δεν βασίζονται στις ΤΠΕ**

Εκτός των ψηφιακών και δικτυωμένων συστημάτων, μια σημαντική κατηγορία τεχνολογιών Smart Roads βασίζεται στη φυσική υποδομή και λειτουργεί χωρίς συνεχή ψηφιακό έλεγχο. Αυτές οι Non-ICT-based λύσεις βασίζονται κυρίως σε υλικά, παθητικούς μηχανισμούς και παρεμβάσεις στη μορφή του δρόμου, επηρεάζοντας πιο άμεσα τη συμπεριφορά του οδηγού και τη φυσική αλληλεπίδραση οχήματος-οδοστρώματος.

Σε αντίθεση με τις ICT-based τεχνολογίες, οι οποίες προϋποθέτουν σύνθετες ψηφιακές υποδομές και συνεχή συνδεσιμότητα, οι μη ICT-based λύσεις χαρακτηρίζονται από αυξημένη αξιοπιστία και χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Θεωρούνται ως ιδιαίτερα κατάλληλες για υφιστάμενα και επικίνδυνα οδικά δίκτυα, όπου απαιτούνται άμεσες παρεμβάσεις ασφάλειας χωρίς πλήρη ψηφιοποίηση της υποδομής. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα λεγόμενα έξυπνα οδοστρώματα, προηγμένα υλικά διαγράμμισης, παθητικά ή ημι-παθητικά ανακλαστικά στοιχεία, καθώς και γεωμετρικές παρεμβάσεις. Κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι η «ευφυΐα» ενσωματώνεται στο ίδιο το υλικό ή στη μορφή της υποδομής, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικά συστήματα ελέγχου.

Το όφελος στην οδική ασφάλεια είναι πρακτικό και μετρήσιμο, καθώς βελτιώσεις στην πρόσφυση, στην ορατότητα και στην αντιληπτική καθοδήγηση έχουν συνδεθεί με μείωση ατυχημάτων, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας ή αυξημένης κόπωσης οδηγού (Babić κ.ά., 2020; Vaitkus κ.ά., 2016). Σε πολλές περιπτώσεις, παθητικές παρεμβάσεις υψηλής ποιότητας αποδεικνύονται εξίσου αποτελεσματικές με σύνθετα ψηφιακά συστήματα, ιδίως σε υπεραστικά δίκτυα.

Στην παρούσα εργασία οι Non-ICT-based τεχνολογίες αντιμετωπίζονται ως συμπληρωματικές προς τις ψηφιακές λύσεις. Σε έργα αναβάθμισης υφιστάμενων αξόνων

με χαρακτηριστικά επικινδυνότητας όπως αυτά που παρουσιάζει ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης, μπορούν να προσφέρουν άμεση βελτίωση στην ασφάλεια, ενώ στη συνέχεια μπορούν να προστεθούν σταδιακά πιο σύνθετα ICT συστήματα (Pompigna & Mauro, 2022). Εδώ θα πρέπει να τονιστεί η διάκριση ότι ενώ στη βιβλιογραφία απαντάται ο όρος smart reflectors, τα ανακλαστικά στοιχεία δεν κατατάσσονται στις ICT based τεχνολογίες όταν δεν ενσωματώνουν μηχανισμούς συλλογής ή επεξεργασίας δεδομένων, καθώς τότε η λειτουργία τους παραμένει παθητική ή ημιενεργή και η ευφυΐα προκύπτει από τις φυσικές και οπτικές ιδιότητες και όχι από ψηφιακά συστήματα (Trubia κ.ά., 2020).

### *Εξυπνα Οδοστρώματα και Καινοτόμα Υλικά (Smart Pavements & Advanced Road Materials)*

Τα έξυπνα οδοστρώματα αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα μη ICT-based τεχνολογιών έξυπνων δρόμων, καθώς η λειτουργία τους δεν στηρίζεται σε ψηφιακές υποδομές αλλά στις ίδιες τις φυσικές ιδιότητες των υλικών. Η «ευφυΐα» τους ενσωματώνεται στο οδόστρωμα και επηρεάζει άμεσα την αλληλεπίδραση οχήματος-επιφάνειας κύλισης, με κύριο στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας και της σταθερότητας της κυκλοφορίας (Guo, 2021).

Ο όρος smart pavements περιλαμβάνει υλικά με αυξημένη τραχύτητα, καλύτερη αντιολισθηρή συμπεριφορά και μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά. Μελέτες δείχνουν ότι η ποιότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος συνδέεται άμεσα με την πιθανότητα απώλειας ελέγχου, ιδιαίτερα σε καμπύλες και σε τμήματα με μεταβαλλόμενη γεωμετρία (Αί κ.ά., 2024; Wei κ.ά., 2024).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε υλικά που εμφανίζουν πιο προβλέψιμη συμπεριφορά υπό δυσμενείς συνθήκες. Οδοστρώματα με βελτιωμένη αποστράγγιση, μειωμένη ευαισθησία σε χαμηλές θερμοκρασίες και σταθερότερη θερμική απόκριση περιορίζουν τις αιφνίδιες μεταβολές πρόσφυσης, οι οποίες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα κινδύνου για ατυχήματα.

Εξίσου σημαντικός είναι ο ρόλος των υλικών στη μακροχρόνια δομική συμπεριφορά της υποδομής. Υλικά με αυξημένη αντοχή σε κόπωση και επαναλαμβανόμενες φορτίσεις μειώνουν την εμφάνιση αστοχιών, όπως ρηγματώσεις ή παραμορφώσεις, που επηρεάζουν αρνητικά τη σταθερότητα και την άνεση κύλισης. Η διατήρηση μιας ομοιόμορφης επιφάνειας συμβάλλει έτσι έμμεσα αλλά ουσιαστικά στην οδική ασφάλεια.

Ο Πίνακας 8 συνοψίζει τις βασικές τεχνολογίες έξυπνων οδοστρωμάτων και καινοτόμων υλικών που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και δείχνει πώς συμβάλλουν

στη βελτίωση της αντοχής, της λειτουργικότητας και της οδικής ασφάλειας στο πλαίσιο των Smart Roads.

**Πίνακας 8. Έξυπνα Οδοστρώματα & Καινοτόμα Υλικά**

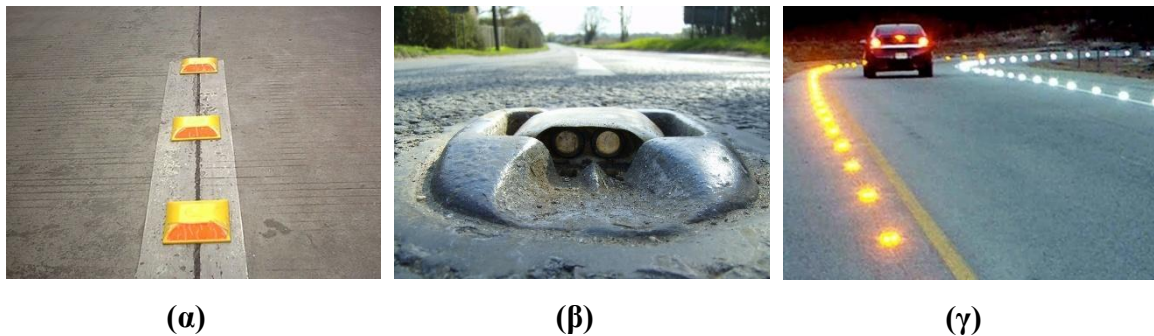
<i>α/α</i>	<i>Τεχνολογία / Υλικό</i>	<i>Σύντομη περιγραφή</i>	<i>Άρθρο/α</i>
<i>1</i>	Έξυπνα υλικά οδοστρώματος	Υλικά που προσδίδουν στο οδόστρωμα λειτουργίες αυτο-ανίχνευσης, αυτο-ίασης ή ενεργειακής αξιοποίησης	(Karbalaei Mohammad Hossein κ.ά., 2024)
<i>2</i>	Ηλεκτρικά αγώγιμο ασφαλτικό σκυρόδεμα (ECAC)	Ασφαλτικό μίγμα με μεταλλικά ή ανθρακικά πρόσθετα, κατάλληλο για αυτο-ίαση, αποπάγωση και ανίχνευση κυκλοφορίας	(Lu κ.ά., 2023)
<i>3</i>	Θερμοχρωμικά συνδετικό υλικό ασφάλτου	Έξυπνα ασφαλτικά υλικά που αλλάζουν χρώμα με τη θερμοκρασία ώστε να μειώνουν τη θερμική επιβάρυνση των δρόμων	(Zhang κ.ά., 2020)
<i>4</i>	Πιεζοηλεκτρικά οδοστρώματα / συστήματα συλλογής ενέργειας	Μετατρέπουν μέρος της μηχανικής ενέργειας από τα διερχόμενα οχήματα σε ηλεκτρική ενέργεια	(Huang κ.ά., 2022)

*Έξυπνοι Ανακλαστήρες και Παθητικά Οπτικά Συστήματα Καθοδήγησης (Smart Reflectors & Passive Visual Aids)*

Οι έξυπνοι ανακλαστήρες και τα παθητικά οπτικά συστήματα καθοδήγησης συγκαταλέγονται στις πιο ώριμες και άμεσα εφαρμόσιμες κατηγορίες μη ICT-based τεχνολογιών έξυπνων δρόμων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ενίσχυση της ορατότητας και της αντιληπτικής ικανότητας του οδηγού, χωρίς να απαιτείται συνεχής ψηφιακός έλεγχος ή υποδομές επικοινωνίας (Pompigna & Mauro, 2022; Trubia κ.ά., 2020). Η «ευφυΐα» δεν προκύπτει από λογισμικό ή δεδομένα, αλλά ενσωματώνεται στο ίδιο το

φυσικό στοιχείο της οδικής υποδομής, καθιστώντας τον δρόμο πιο αναγνώσιμο και προβλέψιμο για τον χρήστη.

Οι ανακλαστικές οδοστρώματος και πλευρικής σήμανσης χρησιμοποιούνται εδώ και χρόνια για τη βελτίωση της νυχτερινής ορατότητας. Οι σύγχρονες εκδοχές τους, που συχνά αναφέρονται ως smart reflectors, βασίζονται σε πιο αποδοτικά ανακλαστικά υλικά και σχεδιασμό (πολυστρωματικές δομές, γεωμετρία), ώστε να επιστρέφουν το φως προς τον οδηγό σε διαφορετικές γωνίες και υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες (Babić κ.ά., 2020; van Kampen, 2015). Η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η αυξημένη ανακλαστικότητα σχετίζεται με καλύτερη διατήρηση λωρίδας και μεγαλύτερο διαθέσιμο χρόνο αντίδρασης, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ή βροχόπτωσης.

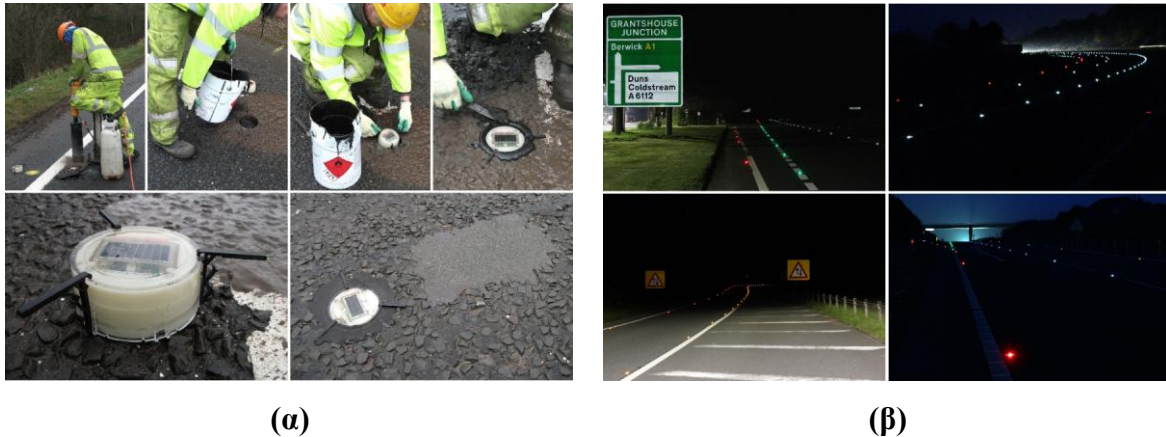


**Εικόνα 12. (α) παθητικοί ανακλαστήρες οδοστρώματος, (β) ενσωματωμένος παθητικός road stud (cat's eye), (γ) ενεργοί ανακλαστήρες οδοστρώματος με ενσωματωμένες πηγές LED.**

Η συμβολή των smart reflectors στην οδική ασφάλεια είναι ιδιαίτερα εμφανής σε υπεραστικά και αγροτικά δίκτυα, όπου ο τεχνητός φωτισμός είναι περιορισμένος ή ανύπαρκτος και η οπτική καθοδήγηση βασίζεται κυρίως στα στοιχεία της ίδιας της υποδομής. Η στρατηγική τοποθέτηση ανακλαστικών στοιχείων σε στροφές, διασταυρώσεις και μεταβατικά τμήματα όπως π.χ. στένωση του δρόμου, μειώνει σημαντικά τα ατυχήματα λόγω απώλειας πορείας, χωρίς την ανάγκη ενεργών ή ψηφιακών συστημάτων ελέγχου.

Τα παραπάνω ευρήματα ενισχύονται από εμπειρικές μελέτες που εστιάζουν άμεσα στην αντίληψη και τη συμπεριφορά των οδηγών κατά τη νυχτερινή οδήγηση. Οι Llewellyn κ.ά. (2020), αξιολογώντας τη χρήση ενεργών ανακλαστήρων οδοστρώματος (active road studs) ως εναλλακτική λύση έναντι του συνεχούς οδικού φωτισμού σε υπεραστικό αγροτικό δίκτυο, διαπίστωσαν ουσιαστική βελτίωση της ανάγνωσης της χάραξης. Οι οδηγοί μπορούσαν να αναγνωρίζουν έγκαιρα καμπύλες, μεταβολές πορείας και κρίσιμα γεωμετρικά χαρακτηριστικά πέρα από το άμεσο πεδίο φωτισμού των προβολέων του οχήματος. Η πλειονότητα των οδηγών ανέφερε αυξημένη αίσθηση ασφάλειας και

εμπιστοσύνης κατά τη νυχτερινή οδήγηση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι έξυπνοι ανακλαστές συμβάλλουν όχι μόνο στη βελτίωση της αντικειμενικής ασφάλειας, αλλά και στη μείωση του άγχους του οδηγού.



Εικόνα 13. (α) Διαδικασία εγκατάστασης ενεργών ανακλαστήρων οδοστρώματος, (β) Παραδείγματα χρήσης ενεργών ανακλαστήρων (Llewellyn κ.ά., 2020).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το εύρημα ότι οι ανακλαστές αυξάνουν τον διαθέσιμο χρόνο οπτικής προεπισκόπησης της οδού (preview time), παράμετρο που συνδέεται άμεσα με την καλύτερη διατήρηση λωρίδας και την μείωση αιφνιδίων διορθωτικών ελιγμών. Εντυπωσιακό επίσης είναι ότι η παρεχόμενη οπτική καθοδήγηση περιορίζει την αρνητική επίδραση της θάμβωσης από τα αντίθετα οχήματα, επιτρέποντας τη διατήρηση σταθερής πορείας ακόμη και σε συνθήκες έντονης φωτεινής αντίθεσης.

Σημαντικά είναι επίσης τα παθητικά οπτικά βοηθήματα πλευρικής καθοδήγησης, όπως ανακλαστικοί πασσάλτοι, οπτικά μοτίβα και ειδικά σχεδιασμένα στοιχεία οριοθέτησης. Η έρευνα στον τομέα της οδικής ασφάλειας δείχνει ότι τέτοιες παρεμβάσεις επηρεάζουν την αντιληπτική εκτίμηση της γεωμετρίας της οδού και της ταχύτητας, οδηγώντας συχνά σε πιο συντηρητική και ασφαλή οδηγική συμπεριφορά, ιδίως κατά τη νυχτερινή οδήγηση.

Σημαντικό πλεονέκτημα των smart reflectors και των παθητικών οπτικών συστημάτων είναι η υψηλή αξιοπιστία και οι χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Σε αντίθεση με τα ενεργά ή ψηφιακά συστήματα, τα παθητικά στοιχεία δεν εξαρτώνται από παροχή ενέργειας, δίκτυα επικοινωνίας ή λογισμικό, γεγονός που τα καθιστά ανθεκτικά σε διακοπές λειτουργίας και εξωτερικές παρεμβολές. Επιπλέον, σε σύγκριση με τον εκτεταμένο οδικό φωτισμό, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα ως προς το κόστος κύκλου ζωής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λειτουργώντας είτε συμπληρωματικά είτε ως εναλλακτική λύση σε τμήματα όπου η πλήρης φωτιστική κάλυψη δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά βιώσιμη.



Εικόνα 14. Οδοδείκτες φωσφορίζοντος υλικού (Saleem & Hosoda, 2021)

Συνοψίζοντας οι έξυπνοι ανακλαστήρες και τα παθητικά οπτικά συστήματα είναι ένας πρακτικός πυλώνας των Non-ICT τεχνολογιών καθώς βελτιώνουν την ορατότητα και την καθοδήγηση με τρόπο απλό και αξιόπιστο, και γι' αυτό ταιριάζουν ιδιαίτερα σε υποφωτισμένα τμήματα υφιστάμενων οδικών δικτύων ή πιο επικίνδυνα τμήματα, ως συμπλήρωμα των πιο σύνθετων ψηφιακών λύσεων.

Ο Πίνακας 9 συνοψίζει τις βασικές κατηγορίες έξυπνων ανακλαστήρων και παθητικών οπτικών συστημάτων καθοδήγησης που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, καθώς και τον ρόλο τους στη βελτίωση της νυχτερινής ορατότητας και της οπτικής καθοδήγησης στο πλαίσιο των Non-ICT Smart Road τεχνολογιών.

Πίνακας 9. Έξυπνοι Ανακλαστήρες & Παθητικά Οπτικά Συστήματα

α/α	Τεχνολογία / Υλικό	Σύντομη περιγραφή	Άρθρο/α
1	Φωσφορίζοντες οδοδείκτες (Glow-in-the-dark markers)	Οδοδείκτες από φωσφορίζοντα υλικά που αποθηκεύουν φως και το εκπέμπουν τη νύχτα (χωρίς εξωτερική ενέργεια)	(Saleem & Hosoda, 2021)

2	Ανακλαστικοί οδοδείκτες	Συνδυάζουν ανακλαστικότητα (headlights) και αυτοφωτισμό για συνεχή ορατότητα	(Bermoy & Sanchez, 2026)
3	Παθητικοί οδοδείκτες με φωσφορίζοντα υλικά και ανακυκλωμένο γυαλί	Βελτιωμένοι ανακλαστήρες με συνδυασμό ανακλαστικών και φωταυγών ιδιοτήτων	(Imjai κ.ά., 2025)
4	Ανακλαστικοί οδοδείκτες	Πρόταση νέου τύπου οδικού ανακλαστήρα	(Υao κ.ά., 2024)

#### Καινοτόμες Διαγραμμίσεις, Φωσφορίζοντα Υλικά και Παθητική Νυχτερινή Ορατότητα

Οι καινοτόμες διαγραμμίσεις και τα φωσφορίζοντα υλικά αποτελούν διακριτή υποκατηγορία των Non-ICT-based τεχνολογιών έξυπνων δρόμων, καθώς στοχεύουν στη βελτίωση της νυχτερινής και χαμηλής ορατότητας μέσω παθητικών οπτικών μηχανισμών, χωρίς ανάγκη ενεργού φωτισμού ή ψηφιακού ελέγχου. Η λειτουργία τους βασίζεται είτε σε υλικά υψηλής ανακλαστικότητας είτε σε υλικά που εκπέμπουν παθητικά φως και ενσωματώνονται στη διαγράμμιση ή/και στο οδόστρωμα.

Μια σοβαρή αδυναμία της οδικής διαγράμμιση είναι ότι παρουσιάζει περιορισμένη αποτελεσματικότητα σε συνθήκες βροχής, ομίχλης ή χαμηλού φωτισμού, καθώς η ορατότητά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση και τη γωνία πρόσπτωσης των προβλέων των οχημάτων. Οι καινοτόμες διαγραμμίσεις επιχειρούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό μέσω υλικών υψηλής ανακλαστικότητας, βελτιστοποιημένων μικροσφαιριδίων και ειδικών προσθέτων, τα οποία διατηρούν ικανοποιητική ορατότητα ακόμη και υπό δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες (Babić κ.ά., 2020; van Kampen, 2015). Ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν τα φωσφορίζοντα υλικά, τα οποία απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας και την επανεκπέμπουν ως ορατό φως τη νύχτα. Τέτοιες εφαρμογές έχουν εξεταστεί κυρίως σε ποδηλατοδρόμους, πεζόδρομους και επιλεγμένα υπεραστικά τμήματα, προσφέροντας συνεχή παθητική οπτική καθοδήγηση χωρίς ενεργειακή κατανάλωση. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι μπορούν να κάνουν τη χάραξη πιο ευδιάκριτη, ειδικά σε σημεία χωρίς τεχνητό φωτισμό, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με άλλες παθητικές παρεμβάσεις.



(α)



(β)

Εικόνα 15. Φωσφορίζουσες διαγραμμίσεις (α) (Guo, 2021), (β) (Bhujbal κ.ά., 2022)

Η συμβολή των καινοτόμων διαγραμμίσεων στην οδική ασφάλεια σχετίζεται άμεσα με τη σαφήνεια της οπτικής πληροφόρησης και τη μείωση της γνωστικής επιβάρυνσης του οδηγού. Όταν τα όρια της λωρίδας και η γεωμετρία της οδού παραμένουν σταθερά και ευδιάκριτα, η οδήγηση γίνεται πιο ομαλή και προβλέψιμη, περιορίζοντας απότομες διορθωτικές κινήσεις. Μελέτες δείχνουν ότι η ποιότητα και η συνέπεια της διαγράμμισης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε συνθήκες κόπωσης ή μειωμένης προσοχής (Vaitkus κ.ά., 2016).



Εικόνα 16. Είσοδος δίδυμων σηράγγων χωρίς την χρήση φωταγών υλικών και η ίδια είσοδος με την χρήση φωταγών υλικών (Li κ.ά., 2025).

Η απόδοση τόσο των φωσφορίζόντων όσο και των υλικών υψηλής ανακλαστικότητας επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ηλικιακή έκθεση, η φθορά λόγω κυκλοφορίας και οι κλιματικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι οι τεχνολογίες αυτές δεν αντιμετωπίζονται ως υποκατάστατο του οδικού φωτισμού ή των ψηφιακών συστημάτων προειδοποίησης, αλλά λειτουργούν επικουρικά ως παθητικά μέσα ενίσχυσης της οπτικής καθοδήγησης, ενταγμένα σε ένα ευρύτερο πεδίο παρεμβάσεων.

Οι καινοτόμες διαγραμμίσεις και τα φωσφορίζοντα υλικά αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωματωμένης παθητικής «ευφυΐας» στην οδική υποδομή. Με απλούς φυσικούς μηχανισμούς, βελτιώνουν τη νυχτερινή αναγνωσιμότητα του δρόμου και την αντιληπτική καθοδήγηση του οδηγού, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές σε υφιστάμενα και υποφωτισμένα οδικά δίκτυα.

Ο Πίνακας 10 συνοψίζει τις βασικές λύσεις καινοτόμων διαγραμμίσεων και φωσφορίζοντων υλικών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, καθώς και τον ρόλο τους στη βελτίωση της ορατότητας και της οπτικής καθοδήγησης σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

**Πίνακας 10. Καινοτόμες Διαγραμμίσεις & Φωσφορίζοντα Υλικά**

<i>α/α</i>	<i>Τεχνολογία</i>	<i>Σύντομη περιγραφή</i>	<i>Άρθρο/α</i>
<i>1</i>	Διαγραμμίσεις με μικροσφαιρίδια (glass beads)	Ενσωματώνουν γυάλινα μικροσφαιρίδια που ενισχύουν τη ανακλαστικότητα, ιδιαίτερα σε ξηρές και υγρές συνθήκες	(Babić κ.ά., 2020)
<i>2</i>	Φωσφορίζουσες διαγραμμίσεις (glow-in-the-dark)	Απορροφούν ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και εκπέμπουν φως τη νύχτα, παρέχοντας συνεχή παθητική καθοδήγηση	(Bhujbal κ.ά., 2022)
<i>3</i>	Φωτοφωταυγείς επιστρώσεις και διαγραμμίσεις οδοστρώματος	Ενσωματώνουν φωτοφωταυγή υλικά σε βαφές, κονιάματα και ασφαλτικά μίγματα για αυτοφωτιζόμενη επιφάνεια δρόμου	(Martínez κ.ά., 2023)
<i>4</i>	Φωσφορίζουσες επιστρώσεις μεγάλης διάρκειας (long-afterglow coatings)	Προηγμένα υλικά (π.χ. SrAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) που διατηρούν φωτεινότητα για πολλές ώρες μετά τη φόρτιση, βελτιώνοντας τη νυχτερινή ορατότητα	(Li κ.ά., 2025)
<i>5</i>	Φωτιζόμενες διαγραμμίσεις χαμηλής ενεργειακής έντασης	Διαγραμμίσεις που λειτουργούν ως «γραμμικός φωτισμός» με χαμηλή	(van Kampen, 2015)

		ενεργειακή κατανάλωση, εναλλακτικά του συμβατικού φωτισμού	
6	Θερμοευαίσθητες βαφές	Διαγραμμίσεις ως μέρος συστημάτων Smart Roads infrastructure που ενισχύουν την οπτική καθοδήγηση μέσω υλικών και γεωμετρίας	(Guo, 2021)

Παθητικά Συστήματα Προειδοποίησης και Μείωσης Ταχύτητας (Passive Warning and Speed-Reduction Systems)

Σε αρκετές περιπτώσεις, η μείωση ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί χωρίς ψηφιακά συστήματα, μέσω παθητικών μέτρων που ανήκουν στις Non-ICT-based Smart Roads Technologies και βασίζονται σε οπτικά, ακπικά ή ακουστικά ερεθίσματα, τα οποία τραβούν την προσοχή των οδηγών και προτρέπουν σε προσαρμογή της ταχύτητας.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι εγκάρσιες ή διαμήκεις ανάγλυφες λωρίδες (rumble strips), οι οπτικές μπάρες ταχύτητας (optical speed bars), οι ζώνες αυξημένης τραχύτητας και οι αλλαγές στην υφή ή στο χρώμα του οδοστρώματος. Συνήθως τοποθετούνται πριν από επικίνδυνα σημεία, όπως καμπύλες, διασταυρώσεις ή ζώνες έργων, και έχουν συνδεθεί με μετρήσιμη μείωση ταχύτητας και ατυχημάτων, ιδιαίτερα σε υπεραστικά δίκτυα (Angioi κ.ά., 2023). Οι ανάγλυφες λωρίδες λειτουργούν ως άμεσο προειδοποιητικό μέσο μέσω κραδασμών και θορύβου, αυξάνοντας την εγρήγορση σε περιπτώσεις κόπωσης ή μειωμένης προσοχής. Αντίστοιχα, οι οπτικές μπάρες επηρεάζουν την αντίληψη της ταχύτητας, επειδή αλλάζει σταδιακά το οπτικό μοτίβο στον δρόμο, οδηγώντας συχνά σε ακούσια επιβράδυνση χωρίς μηχανισμούς επιβολής.

Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι είναι απλές λύσεις, με υψηλή αξιοπιστία και σχετικά χαμηλές απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, κατάλληλες για υφιστάμενα δίκτυα, ιδιαίτερα σε υποφωτισμένα επαρχιακά τμήματα με καμπύλες και περιορισμένη ορατότητα. Παρ' όλα αυτά, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από σωστό σχεδιασμό και στοχευμένη χωροθέτηση, γιατί η υπερβολική ή ακατάλληλη χρήση μπορεί με τον καιρό να μειώσει την επίδρασή τους.

Τα παθητικά συστήματα προειδοποίησης και μείωσης ταχύτητας αποτελούν αξιόπιστα μέτρα οδικής ασφάλειας με σχετικά γρήγορη εφαρμογή. Ειδικά σε επικίνδυνα τμήματα,

όπου οι πιο σύνθετες ICT-based λύσεις δεν είναι εύκολο να υλοποιηθούν άμεσα, μπορούν να λειτουργήσουν ως πρώτο βήμα για την πρόληψη ατυχημάτων. (Panchal κ.ά., 2024).

Ο Πίνακας 11 συνοψίζει τα βασικά παθητικά συστήματα προειδοποίησης και μείωσης ταχύτητας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, καθώς και τον ρόλο τους στην έγκαιρη προειδοποίηση και την επιβράδυνση των οχημάτων σε σημεία αυξημένου κινδύνου.

**Πίνακας 11. Παθητικά Συστήματα Προειδοποίησης & Μείωσης Ταχύτητας**

<i>a/a</i>	<i>Τεχνολογία</i>	<i>Σύντομη περιγραφή</i>	<i>Άρθρο</i>
<i>1</i>	Ηχητικές διαγραμμίσεις (rumble strips)	Προσωρινές ή μόνιμες εγκοπές στο οδόστρωμα που παράγουν θόρυβο και δόνηση, μειώνοντας την ταχύτητα και επαναφέροντας την προσοχή του οδηγού	(Al-Bayati κ.ά., 2024)
<i>2</i>	Οπτικές διαγραμμίσεις επιβράδυνσης (optical speed bars)	Εγκάρσιες γραμμές με μειούμενη απόσταση που δημιουργούν ψευδαίσθηση αυξανόμενης ταχύτητας, οδηγώντας σε επιβράδυνση	(Hallmark κ.ά., 2021)
<i>3</i>	Αντιληπτικές οπτικές διαγραμμίσεις (perceptual markings)	Σήμανση που επηρεάζει την αντίληψη του οδηγού ως προς τον κίνδυνο και την ταχύτητα (π.χ. transverse bars, OSB κ.ά.)	(Calvi κ.ά., 2019)
<i>4</i>	Οπτικές διαγραμμίσεις ελέγχου ταχύτητας	Εφαρμογή optical speed bars για traffic calming και περιορισμό ταχύτητας σε αγροτικές/ημιαστικές περιοχές	(Sazali & Firdaus, 2019)

Σε πολλά υφιστάμενα οδικά δίκτυα, η πλήρης ψηφιοποίηση δεν είναι πάντα ρεαλιστική είτε για τεχνικούς είτε για οικονομικούς λόγους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι Non-ICT λύσεις μπορούν να προσφέρουν πρακτικές βελτιώσεις στην οδική ασφάλεια. Η συμβολή τους εντοπίζεται κυρίως στη βελτίωση της πρόσφυσης, της ορατότητας και της οπτικής καθοδήγησης. Επίσης βοηθούν στην αύξηση του βαθμού αντίληψης επικινδυνότητας επηρεάζουν δηλαδή το πώς αντιλαμβάνεται ο οδηγός τον κίνδυνο, κάτι που συχνά οδηγεί σε πιο προσεκτική συμπεριφορά.

Ωστόσο υστερούν στο ότι δεν έχουν την δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής όταν αλλάζουν οι συνθήκες όπως αντιθέτως θα έκανε ένα ψηφιακό σύστημα.

Παρόλα αυτά μπορούν να λειτουργήσουν σαν βάση πάνω στην οποία μπορούν να προστεθούν σταδιακά πιο σύνθετες ICT-based λύσεις. Έτσι στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζονται όχι ως εναλλακτική, αλλά ως συμπληρωματικό υπόβαθρο για υβριδικές παρεμβάσεις Smart Roads.

**Πίνακας 12. Σύνοψη Πλεονεκτημάτων & Περιορισμών (Non-ICT)**

<i>α/α</i>	<i>Κατηγορία</i>	<i>Σχόλιο</i>
<i>1</i>	Πλεονεκτήματα	Χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία, άμεση εφαρμογή
<i>2</i>	Περιορισμοί	Έλλειψη δυναμικής προσαρμογής
<i>3</i>	Καταλληλότητα	Ιδανικές για υφιστάμενα δίκτυα (π.χ. BOAK)
<i>4</i>	Ρόλος	Βάση για υβριδικές λύσεις

## **2.11. Υβριδικές Τεχνολογίες Έξυπνων Δρόμων (Hybrid ICT & Non-ICT Smart Roads Technologies)**

Η εφαρμογή τεχνολογιών έξυπνων δρόμων σε πραγματικά οδικά δίκτυα δείχνει ότι οι μονοδιάστατες προσεγγίσεις έχουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα. Ούτε οι καθαρά ICT-based λύσεις ούτε οι αποκλειστικά Non-ICT παρεμβάσεις μπορούν από μόνες τους να εξασφαλίσουν σταθερή και μακροπρόθεσμη βελτίωση της οδικής ασφάλειας, ιδιαίτερα σε υφιστάμενες υποδομές που χαρακτηρίζονται από πλήθος περιορισμών.

Από αυτή την ανάγκη προκύπτουν οι υβριδικές τεχνολογίες Smart Roads, οι οποίες συνδυάζουν την ευελιξία των ψηφιακών συστημάτων με τη διαχρονική λειτουργία των παθητικών παρεμβάσεων. Ο δρόμος δεν βασίζεται αποκλειστικά σε αισθητήρες, δεδομένα και επικοινωνίες, αλλά ενσωματώνει και φυσικά στοιχεία που συνεχίζουν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το επίπεδο τεχνολογικής διαθεσιμότητας.

### *Τυπικές Κατηγορίες Υβριδικών Τεχνολογιών Smart Roads*

Στην πράξη, οι υβριδικές τεχνολογίες Smart Roads προκύπτουν από τον συνδυασμό ενεργών και παθητικών παρεμβάσεων που δρουν ταυτόχρονα στο ψηφιακό και στο φυσικό

επίπεδο της οδικής υποδομής. Ένα χαρακτηριστικό σχήμα είναι ο συνδυασμός έξυπνου οδικού φωτισμού με παθητικά ανακλαστικά στοιχεία και καινοτόμες διαγραμμίσεις. Σε αυτή την περίπτωση ο έξυπνος φωτισμός μπορεί να προσαρμόζεται στις συνθήκες ορατότητας και κυκλοφορίας, ενώ η διαγράμμιση και οι ανακλαστήρες κρατούν μια σταθερή, βασική οπτική καθοδήγηση. Έτσι ακόμη και ο έξυπνος φωτισμός δεν αποδώσει πλήρως, ο οδηγός εξακολουθεί να έχει σαφή οπτικά ερεθίσματα προερχόμενα από το οδόστρωμα.

Παρόμοια λογική συναντάται στον συνδυασμό συστημάτων V2I και C-ITS με παθητικές παρεμβάσεις, όπως ανακλαστήρες και οπτικές μπάρες ταχύτητας. Οι ψηφιακές προειδοποιήσεις ενισχύονται από φυσικά ερεθίσματα στο ίδιο το οδικό περιβάλλον, κάτι που μειώνει την πιθανότητα καθυστερημένης αντίδρασης ή αγνόησης της πληροφορίας, ιδιαίτερα σε νυχτερινή οδήγηση ή σε απαιτητικά τμήματα (Vaitkus κ.ά., 2016; Shestov κ.ά., 2021).

#### *Υβριδικές Λύσεις σε Υφιστάμενα Οδικά Δίκτυα*

Η σημασία των υβριδικών Smart Roads φαίνεται περισσότερο σε δίκτυα που ήδη λειτουργούν. Εκεί υπάρχουν πρακτικοί περιορισμοί, όπως χώρος, κόστος και η ανάγκη να μη διακοπεί η κυκλοφορία, γεγονός που περιορίζει τόσο τις επιλογές ανακατασκευής όσο και τις δυνατότητες ψηφιοποίησης. Σε αυτές τις συνθήκες, η σταδιακή προσθήκη ICT στοιχείων πάνω σε παθητικές παρεμβάσεις που έχουν ήδη ενισχυθεί μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια χωρίς μεγάλες αλλαγές στη γεωμετρία ή στον τρόπο λειτουργίας του δρόμου. Μελέτες αναβάθμισης δείχνουν ότι οι υβριδικές λύσεις έχουν συχνά μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και καλύτερη αποδοχή από τους χρήστες, γιατί συνδυάζουν γνώριμα στοιχεία του δρόμου με δυνατότητες της σύγχρονης τεχνολογίας (Sazali & Firdaus, 2019; Wiegand, 2019). Η σταδιακή εφαρμογή υβριδικών λύσεων διευκολύνει την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους και τη βελτιστοποίηση των παρεμβάσεων με βάση πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, χωρίς την ανάγκη άμεσων και υψηλού ρίσκου επενδύσεων.

Η ανάγκη υιοθέτησης υβριδικών λύσεων ενισχύεται περαιτέρω από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα οδικά δίκτυα σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τους Sazali και Firdaus (2019), το μέλλον των αυτοκινητοδρόμων δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στην κατασκευή νέων υποδομών, αλλά στην καλύτερη αξιοποίηση και σταδιακή αναβάθμιση των υπαρχόντων. Υπό αυτό το πρίσμα ο έξυπνος αυτοκινητόδρομος δεν περιορίζεται στις ψηφιακές εφαρμογές, αλλά προκύπτει από συνδυασμό τεχνολογικών, λειτουργικών και περιβαλλοντικών παρεμβάσεων, κάτι που ταιριάζει με τη λογική των υβριδικών Smart

Roads. Μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη προς αυτή την κατεύθυνση είναι οι ανακλαστές με προσαρμοστικά οπτικά χαρακτηριστικά, που μπορούν να μεταβάλλουν την ένταση ή το χρώμα της ανακλαστικότητας ανάλογα με τις συνθήκες. Τέτοιες λύσεις έχουν μελετηθεί κυρίως σε περιοχές με συχνή ομίχλη, έντονες βροχοπτώσεις ή αυξημένο κίνδυνο παγετού, όπου η συμβατική διαγράμμιση παρουσιάζει μειωμένη αποτελεσματικότητα (Ahmed κ.ά., 2023). Τα ερευνητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι έξυπνοι ανακλαστές μπορούν να λειτουργήσουν ως παθητικό αλλά άμεσο σύστημα οπτικής προειδοποίησης, καθιστώντας τον κίνδυνο αντιληπτό πριν ο οδηγός εισέλθει σε επικίνδυνη ζώνη.

#### Υβριδικές Smart Roads ως Γέφυρα προς την Επόμενη Γενιά ITS

Οι υβριδικές τεχνολογίες Smart Roads λειτουργούν ως μεταβατικό στάδιο μεταξύ της παραδοσιακής οδικής υποδομής και των μελλοντικών, πλήρως συνεργατικών συστημάτων μεταφορών. Αποτελούν μια «γέφυρα» προς τα επόμενης γενιάς ITS, όπου η συνεργασία οχήματος-υποδομής-χρήστη θα βασίζεται σε συνεχή και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων. Οι αρμόδιοι φορείς μπορούν έτσι να επενδύουν σταδιακά σε νέες τεχνολογίες, μειώνοντας τον τεχνολογικό και οικονομικό κίνδυνο. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι υβριδικές λύσεις μπορούν να υποστηρίξουν τη σταδιακή ενσωμάτωση έξυπνων υποδομών σε οδικά δίκτυα όπου συνυπάρχουν οχήματα και υποδομές με διαφορετικές τεχνολογικές δυνατότητες (Wiegand, 2019).

Ο παρακάτω Πίνακας 13 παρουσιάζει ενδεικτικά υβριδικά σχήματα Smart Roads τεχνολογιών, στα οποία συνδυάζονται ψηφιακές ICT-based εφαρμογές με Non-ICT-based παρεμβάσεις, με στόχο τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της διαχείρισης του οδικού δικτύου.

Πίνακας 13. Τυπικά υβριδικά σχήματα συνδυασμού ICT-based και Non-ICT-based Smart Roads Technologies

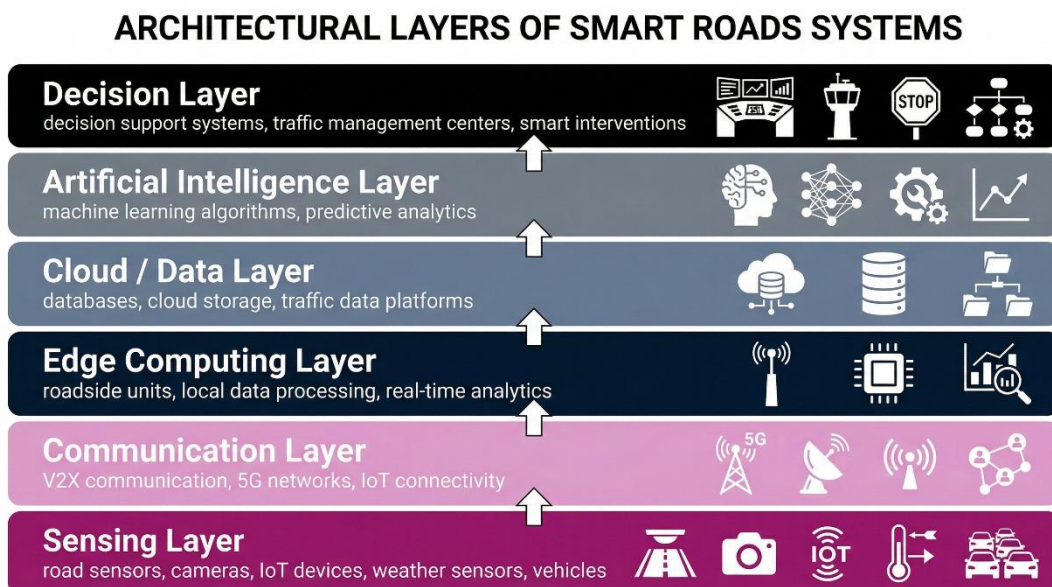
α/α	Τυπικό υβριδικό σχήμα Smart Roads	ICT-based τεχνολογίες	Non-ICT-based τεχνολογίες	Στόχος/λειτουργία
1	Έξυπνος προσαρμοζόμενος οδικός φωτισμός και προειδοποίηση κινδύνου	Αισθητήρες IoT, συστήματα επικοινωνίας V2I/V2X, δυναμικός έλεγχος φωτισμού	LED οδικός φωτισμός, ανακλαστική σήμανση, φωτεινοί οδοδείκτες (road studs)	Βελτίωση ορατότητας και έγκαιρη προειδοποίηση οδηγών
2	Έξυπνη παρακολούθηση και συντήρηση οδοστρώματος	Αισθητήρες καταγραφής φθορών, τεχνητή νοημοσύνη, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS)	Αντιολισθηρά και έξυπνα οδοστρώματα	Έγκαιρος εντοπισμός φθορών και προληπτική συντήρηση
3	Ευφύες σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας	Κάμερες CCTV, edge/cloud υπολογιστικά συστήματα, ανάλυση κυκλοφοριακών δεδομένων	Διαγράμμιση, φυσική διαμόρφωση λωρίδων και κόμβων	Βελτιστοποίηση κυκλοφορίας και μείωση συγκρούσεων
4	Υποδομές συνεργατικής και αυτόνομης οδήγησης	LiDAR, radar, Internet of Vehicles (IoV), συνδεδεμένα οχήματα	Οδική υποδομή υψηλών προδιαγραφών και προηγμένα οδοστρώματα	Υποστήριξη ασφαλούς συνεργατικής και αυτόνομης οδήγησης
5	Έξυπνη αναβάθμιση οδικών αξόνων	Μεγάλα δεδομένα (Big Data), ευφυής παρακολούθηση, ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης	Βελτιωμένη σήμανση, οδικός εξοπλισμός και παρεμβάσεις οδοστρώματος	Αναβάθμιση οδικής ασφάλειας και λειτουργίας δικτύου

## 2.12. Αρχιτεκτονική Smart Roads

Η λειτουργία των συστημάτων Smart Roads βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που συνδυάζει αισθητήρες, δίκτυα επικοινωνίας, υπολογιστικές υποδομές και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, επιτρέποντας τη συλλογή, τη μεταφορά και την επεξεργασία πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

Στο κατώτερο επίπεδο εντοπίζονται τα συστήματα ανίχνευσης, όπως αισθητήρες οδοστρώματος, κάμερες και συσκευές IoT, τα οποία καταγράφουν δεδομένα για την κυκλοφορία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται μέσω δικτύων επικοινωνίας (π.χ. V2X, 5G) προς υπολογιστικές υποδομές, όπου υφίστανται επεξεργασία και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Στα ανώτερα επίπεδα αξιοποιούνται τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, τα οποία συμβάλλουν στην πρόβλεψη επικίνδυνων καταστάσεων και στην ενεργοποίηση κατάλληλων παρεμβάσεων.

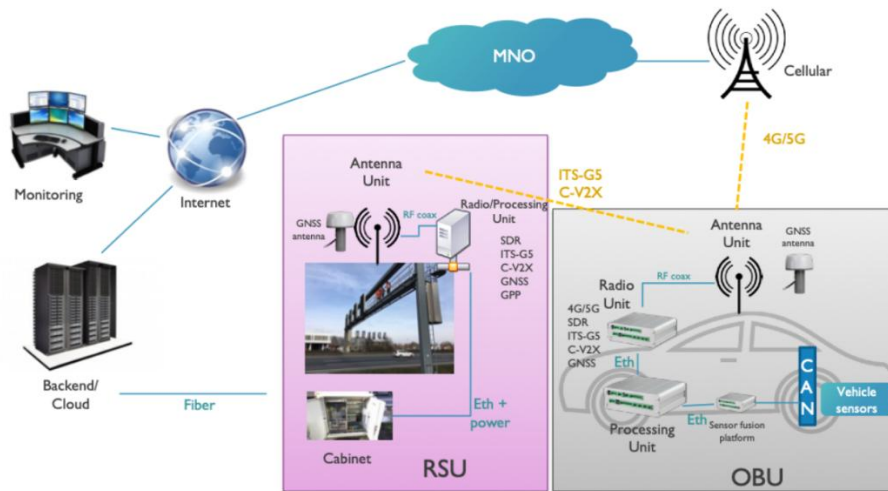
Η συνολική αρχιτεκτονική των συστημάτων Smart Roads παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Αναπαράσταση της πολυεπίπεδης, πολυστρωματικής αρχιτεκτονικής των Smart Roads

Οι τεχνολογίες Smart Roads δεν λειτουργούν απομονωμένα αλλά ως ένα ενιαίο σύστημα. Συνδυάζουν τη συλλογή δεδομένων από το οδικό περιβάλλον και τα οχήματα, τα μεταδίδουν σε ψηφιακές πλατφόρμες και τα αξιοποιούν για να βελτιώνεται η ασφάλεια και η ροή της κυκλοφορίας. Η λογική αυτή αποτυπώνεται συνοπτικά στη συγκεκριμένη

αρχιτεκτονική. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση του κεφαλαίου απαντά στο ΕΕ1, με την παρουσίαση βασικών τεχνολογιών Smart Roads για την οδική ασφάλεια, χωρίς όμως να αποτελεί πλήρη καταγραφή των διαθέσιμων λύσεων, καθώς βασίζεται στις διαθέσιμες πηγές της συστηματικής αναζήτησης.



Εικόνα 17. Συνολική αρχιτεκτονική Smart Highway (Marquez-Barja κ.ά., 2019)

### **3. Ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης ως πεδίο εφαρμογής τεχνολογιών Smart Roads**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείχθηκε η ιστορική εξέλιξη των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (Intelligent Transportation Systems - ITS) και ο ρόλος τους στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας των οδικών μεταφορών. Με βάση αυτό το θεωρητικό και ιστορικό υπόβαθρο, το παρόν κεφάλαιο μετατοπίζει το ενδιαφέρον από τη θεωρία, στην εφαρμογή των αρχών και των τεχνολογιών των ITS σε ένα πραγματικό και σύνθετο οδικό περιβάλλον. Ως πεδίο εφαρμογής έχει επιλεγεί ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης (BOAK), ένας οδικός άξονας ιδιαίτερης στρατηγικής σημασίας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από υψηλή κυκλοφοριακή ζήτηση και διαχρονικά ζητήματα οδικής ασφάλειας.

Η ανάλυση εστιάζει στα χαρακτηριστικά του BOAK που συνδέονται με την οδική ασφάλεια, γεωμετρικά, λειτουργικά και ιστορικά με στόχο να τεκμηριωθεί ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογίες Smart Roads και οι εφαρμογές των ITS μπορούν να προσαρμοστούν στις τοπικές συνθήκες και να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας

#### **3.1. Παρουσίαση του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης (BOAK)**

Ο Βόρειος Οδικός Άξονας Κρήτης (BOAK), επίσημα χαρακτηρισμένος ως Αυτοκινητόδρομος Α90, αποτελεί τον κύριο οριζόντιο οδικό άξονα της Κρήτης και τη σημαντικότερη υποδομή χερσαίων μεταφορών του νησιού. Αναπτύσσεται κατά μήκος της βόρειας ακτογραμμής, από το Καστέλι Κισσάμου έως τη Σητεία, με συνολικό μήκος περίπου 312 km, συνδέοντας τα κύρια αστικά κέντρα, τους βασικούς λιμένες και τα αεροδρόμια της Κρήτης. Ο άξονας εντάσσεται στο Πρωτεύον Εθνικό Οδικό Δίκτυο και παράλληλα αποτελεί τμήμα των Διευρωπαϊκών Δικτύων Μεταφορών, καθώς περιλαμβάνει τμήματα των ευρωπαϊκών οδών Ε65 και Ε75, γεγονός που υπογραμμίζει τη στρατηγική του σημασία σε περιφερειακό και ευρωπαϊκό επίπεδο.

Η κατασκευή του ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και βασίστηκε στις τεχνικές και κανονιστικές προδιαγραφές της εποχής. Το μεγαλύτερο μέρος του έργου υλοποιήθηκε με διατομή πλάτους 11,10-12,50 m και γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατηγορίας III, τύπου Γ, σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς οδοποιίας του 1962. Εξαίρεση αποτέλεσε το ανατολικό τμήμα Αγίου Νικολάου-Σητείας, μήκους περίπου 70 km, το οποίο

κατασκευάστηκε με μικρότερο πλάτος διατομής, της τάξης των 8 m, και με υποδεέστερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Κατά τη δεκαετία του 1960 εκπονήθηκε σειρά μελετών από τις αρμόδιες κρατικές υπηρεσίες για τη διαμόρφωση ενός νέου οδικού άξονα, σε γενικές γραμμές αντίστοιχου με τον σημερινό ΒΟΑΚ, και εξετάστηκαν εναλλακτικές λύσεις χάραξης, συμπεριλαμβανομένης και της αναβάθμισης της τότε υφιστάμενης εθνικής οδού. Οι μελέτες της περιόδου βασίστηκαν σε περιορισμένα κυκλοφοριακά δεδομένα και εκπονήθηκαν χωρίς δεσμεύσεις περιβαλλοντικών όρων, ενώ κυρίαρχη αντίληψη της εποχής ήταν η αποφυγή μεγάλων τεχνικών έργων, όπως σήραγγες και κοιλαδογέφυρες, κυρίως για λόγους κόστους. Βασικές παραδοχές αποτέλεσαν η επιδίωξη μέσης ταχύτητας μελέτης περίπου 80 km/h και ο περιορισμός της κατά μήκος κλίσης σε μέγιστες τιμές της τάξης του 7,5%.

Ωστόσο, οι παραδοχές αυτές δεν κατέστη δυνατό να εφαρμοστούν πλήρως σε αρκετά ορεινά τμήματα της χάραξης, γεγονός που οδήγησε, σε μεταγενέστερο χρόνο, στην κατασκευή λωρίδων βραδυπορείας για βαρέα οχήματα. Παράλληλα, οι σχεδιαστικές αντιλήψεις της εποχής απέφευγαν την εκτεταμένη χρήση μεγάλων τεχνικών έργων, όπως σήραγγες και κοιλαδογέφυρες, κυρίως για λόγους περιορισμού του κόστους (Μάκαρη, 2023).

Παρά τις αρχικές επιφυλάξεις, στις αρχές της δεκαετίας του 1970 υλοποιήθηκαν τα πρώτα σημαντικά τεχνικά έργα στον ΒΟΑΚ, μεταξύ των οποίων κοιλαδογέφυρες που κατασκευάστηκαν με το σύστημα «μελέτη-κατασκευή», πρακτική καινοτόμα για τα δεδομένα της εποχής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αρχικές προβλέψεις για επιχώματα αντικαταστάθηκαν από γέφυρες, επιλογή που συνέβαλε τόσο στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας όσο και στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Ιδιαίτερη τεχνική σημασία παρουσίασε και η κατασκευή σήραγγας σε ορεινή περιοχή του Νομού Λασιθίου, η οποία υλοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 ως εναλλακτική λύση έναντι εκτεταμένου ορύγματος σε ασταθή εδάφη. Κατά τη διάνοιξη αντιμετωπίστηκαν σοβαρά γεωτεχνικά προβλήματα, όπως εκτεταμένες κατολισθήσεις, τα οποία αντιμετωπίστηκαν με εξειδικευμένες τεχνικές σταθεροποίησης και σταδιακή πρόοδο της εκσκαφής. Το έργο αυτό αποτέλεσε ένα από τα πρώτα παραδείγματα εφαρμογής σήραγγας οδοποιίας στην Ελλάδα.

Η ολοκλήρωση μεγάλου μέρους του ΒΟΑΚ κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980 συνέβαλε καθοριστικά στην οικονομική ανάπτυξη της βόρειας Κρήτης, με ιδιαίτερη έμφαση στον τουριστικό τομέα. Εκ των υστέρων, ωστόσο, διαπιστώθηκαν και αδυναμίες σε ορισμένες

επιλογές χάραξης, κυρίως σε παραλιακές περιοχές, όπου η εγγύτητα του δρόμου περιόρισε τη δυνατότητα μελλοντικής αξιοποίησης του παράκτιου χώρου. Αντίθετα, οι παρακάμψεις μεγάλων αστικών κέντρων αποδείχθηκαν ιδιαίτερα ωφέλιμες, προσφέροντας δυνατότητες πολεοδομικής επέκτασης και αναδιάρθρωσης. Σε κάθε περίπτωση, ο ΒΟΑΚ, όπως υλοποιήθηκε, συνέβαλε αποφασιστικά στη διαμόρφωση του αναπτυξιακού προτύπου της βόρειας Κρήτης, ενώ παράλληλα ανέδειξε κατασκευαστικές εμπειρίες και ζητήματα μακροχρόνιας συντήρησης, ιδιαίτερα σε τμήματα με εκτεταμένα ορύγματα και επιχώματα, όπου μέχρι και σήμερα παρατηρούνται τοπικά φαινόμενα αστάθειας. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000 συγκροτήθηκε ειδική υπηρεσία με αποκλειστική αρμοδιότητα τη μελέτη, κατασκευή και εποπτεία των έργων του ΒΟΑΚ, με έδρα το Ηράκλειο, η οποία ασκεί τις αρμοδιότητες της Διευθύνουσας Υπηρεσίας σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο δημοσίων έργων.

Η ραγδαία αύξηση των κυκλοφοριακών φόρτων, ως αποτέλεσμα της συνεχούς οικονομικής και τουριστικής ανάπτυξης, κατέστησε αναγκαία την αναβάθμιση του άξονα. Η αναβάθμιση αυτή περιλαμβάνει τη βελτίωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε οριζοντιογραφία, μηκοτομή και διατομή, είτε μέσω διαπλατύνσεων είτε μέσω νέων χαράξεων, με στόχο την επίτευξη μέσης ταχύτητας κυκλοφορίας της τάξης των 100 km/h. Σε προηγούμενες περιόδους υλοποιήθηκαν νέα οδικά τμήματα και επεκτάσεις, καθώς και αναβαθμίσεις υφιστάμενων τμημάτων σε τετραϊχνες διατομές με διαχωριστική νησίδα, με συνολικές δαπάνες που ανέρχονται σε εκατοντάδες εκατομμύρια ευρώ σε τρέχουσες τιμές. Αντίστοιχα, προβλέπεται η συνέχιση των παρεμβάσεων και σε επόμενες φάσεις, με στόχο τη σταδιακή μετατροπή του ΒΟΑΚ σε σύγχρονο αυτοκινητόδρομο. Σημαντικό ορόσημο αποτέλεσε το 2015, με την παράδοση στην κυκλοφορία του αναβαθμισμένου τμήματος Άγιος Νικόλαος-Καλό Χωριό, το οποίο σηματοδότησε τη σταδιακή μετάβαση σε σύγχρονες τεχνικές προδιαγραφές σε επιμέρους τμήματα του ΒΟΑΚ.

Σήμερα η αναβάθμιση του ΒΟΑΚ έχει εισέλθει σε φάση υλοποίησης μέσω συνδυασμού έργων παραχώρησης και Συμπράξεων Δημόσιου και Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ), με εκτιμώμενο συνολικό κόστος που υπερβαίνει τα 1,7 δισ. Ευρώ με σκοπό τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας του άξονα. Ο ΒΟΑΚ αποτελεί έναν οδικό άξονα υψηλής αναπτυξιακής σημασίας, του οποίου οι διαχρονικές λειτουργικές αδυναμίες συνδέονται άμεσα με τις ιστορικές συνθήκες σχεδιασμού και κατασκευής του. Η κατανόηση της ιστορικής του εξέλιξης και της θεσμικής

του θέσης συνιστά αναγκαία βάση για την ανάλυση των ζητημάτων οδικής ασφάλειας και για τη διερεύνηση σύγχρονων τεχνολογικών παρεμβάσεων.

### **3.2. Κριτήρια Αξιολόγησης και Επιλογής Τεχνολογιών Smart Roads με Εφαρμογή στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης (BOAK)**

Η αξιολόγηση τεχνολογιών Smart Roads στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι ο άξονας παρουσιάζει ανομοιογένεια, καθώς περιλαμβάνει τμήματα με διαφορετικά επίπεδα γεωμετρίας και λειτουργίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η επιτυχία των παρεμβάσεων δεν συνδέεται τόσο με τον βαθμό τεχνολογικής καινοτομίας όσο με το αν ταιριάζει με την υπάρχουσα υποδομή, τη διαχείριση και τη συντήρηση.

Τα κριτήρια επιλογής δεν εφαρμόζονται θεωρητικά, αλλά λειτουργούν ως οδηγός για το τι μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη. Έτσι, περιορίζουν τις επιλογές σε λύσεις που μπορούν να μπου σταδιακά και να δώσουν μετρήσιμα αποτελέσματα στον συγκεκριμένο άξονα, χωρίς να απαιτούν ριζικές αλλαγές στην υποδομή ή στη λειτουργία του δικτύου.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά και η χρονική σειρά της διαδικασίας. Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι σε υφιστάμενα οδικά δίκτυα υψηλής επικινδυνότητας, όπως ο BOAK, η αξιολόγηση των αναγκών και των περιορισμών πρέπει να προηγείται της τεχνολογικής επιλογής και όχι να την ακολουθεί. Όταν η τεχνολογία επιλέγεται εκ των προτέρων, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος αποσπασματικών εφαρμογών, οι οποίες δεν εντάσσονται σε ένα συνεκτικό και μακροπρόθεσμο σχέδιο οδικής ασφάλειας (Trubia κ.ά., 2020; Sanchez-Londono κ.ά., 2023).

Τα κριτήρια αξιολόγησης χρησιμοποιούνται για την προσαρμογή των Smart Roads στις πραγματικές συνθήκες του BOAK με στόχο την πρόταση παρεμβάσεων που να μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη, να ταιριάζουν στη λειτουργία του δικτύου και να έχουν σταθερό αποτέλεσμα στον χρόνο.

#### *Οδική Ασφάλεια ως Πρωτεύον Κριτήριο*

Η έμφαση στην οδική ασφάλεια ως πρωτεύον κριτήριο συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων που καταγράφονται σε άξονες όπως ο BOAK. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι σε τέτοια οδικά δίκτυα κυριαρχούν περιστατικά που σχετίζονται με ανθρώπινο σφάλμα, ελλιπή αντίληψη της οδού και καθυστερημένη αντίδραση σε αλλαγές της κυκλοφορίας (Vaitkus κ.ά., 2016; Babić κ.ά., 2020). Οι τεχνολογίες Smart

Roads αξιολογούνται έτσι πρωτίστως ως προς την ικανότητά τους να λειτουργούν επικουρικά προς την ανθρώπινη αντίληψη και να την αντικαθιστούν.

Οι Pomprigna & Mauro (2022) επισημαίνουν ότι σε άξονες με συχνά τροχαία, τα μεγαλύτερα οφέλη έρχονται από παρεμβάσεις που μειώνουν την πιθανότητα και τη σοβαρότητα των συγκρούσεων, ακόμη κι αν επηρεάζουν λίγο την κυκλοφορία. Αυτό ενισχύει την ανάγκη να προηγείται η οδική ασφάλεια έναντι άλλων κριτηρίων, όπως η αποδοτικότητα ή η έμφαση στην τεχνολογία.

#### Τεχνολογική Ωριμότητα & Ανθεκτικότητα

Η τεχνολογική ωριμότητα αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον ΒΟΑΚ, δεδομένου ότι οι παρεμβάσεις μπορούν να εφαρμοστούν σταδιακά και σε βάθος χρόνου. Οι Picone κ.ά. (2015) επισημαίνουν ότι τεχνολογίες σε πειραματικό στάδιο ή λύσεις που απαιτούν συχνές αναβαθμίσεις εμφανίζουν αυξημένο κίνδυνο εγκατάλειψης μετά την αρχική φάση εφαρμογής, ιδίως όταν απουσιάζει μηχανισμός υποστήριξης της λειτουργία τους.

Εξίσου κρίσιμη είναι η έννοια της λειτουργικής ανθεκτικότητας. Όπως τονίζουν οι Ganin κ.ά. (2019), συστήματα που συνεχίζουν να λειτουργούν, έστω και με περιορισμούς, όταν προκύπτουν βλάβες είναι πιο κατάλληλα για κρίσιμες υποδομές. Στην περίπτωση του ΒΟΑΚ, αυτό μεταφράζεται σε προτίμηση τεχνολογιών που δεν καταρρέουν πλήρως σε περίπτωση απώλειας επικοινωνίας ή αισθητήρων, αλλά συνεχίζουν να προσφέρουν στοιχειώδη επίπεδα οδικής ασφάλειας.

#### Διαλειτουργικότητα & Σταδιακή Ενσωμάτωση

Η σταδιακή ενσωμάτωση αποτελεί βασική στρατηγική σε άξονες μεγάλης γεωγραφικής έκτασης και έντονης ετερογένειας, όπως ο ΒΟΑΚ. Οι Maimaris & Papageorgiou (2016) επισημαίνουν ότι η διαλειτουργικότητα δεν αποτελεί αποκλειστικά τεχνικό ζήτημα, αλλά και οργανωτικό, καθώς προϋποθέτει συντονισμό μεταξύ των φορέων που διαχειρίζονται και συντηρούν το δίκτυο. Σύμφωνα με τους Hammoudeh κ.ά. (2021), η απουσία διαλειτουργικότητας οδηγεί συχνά στη δημιουργία «νησίδων τεχνολογίας», δηλαδή απομονωμένων συστημάτων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Για τον ΒΟΑΚ, αυτό θα μείωνε σημαντικά την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων, καθώς οι τεχνολογίες πρέπει να αξιολογούνται και ως προς το αν μπορούν να ενταχθούν σε ένα κοινό σύστημα που μπορεί να επεκταθεί και να λειτουργεί σταθερά στον χρόνο. Η προσαρμογή στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος, ιδιαίτερα σε υφιστάμενες υποδομές όπου η

σταδιακή ενσωμάτωση τεχνολογιών (smart retrofiting) είναι η πιο ρεαλιστική στρατηγική θεωρείται κρίσιμη (Pietrangeli κ.ά., 2023).

#### Κόστος Κύκλου Ζωής & Κλιμάκωση

Η έμφαση στο κόστος κύκλου ζωής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε άξονες όπως ο ΒΟΑΚ, όπου η συντήρηση έχει διαχρονικά αποτελέσει αδύναμο σημείο. Η Federal Highway Administration (2022) επισημαίνει ότι πολλές εφαρμογές ITS υποβαθμίζονται σταδιακά κατά τον κύκλο ζωής τους, με τον κίνδυνο βλάβης να αυξάνεται προοδευτικά, ιδιαίτερα όταν απουσιάζει προληπτική συντήρηση και οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι.

Η δυνατότητα κλιμάκωσης συνδέεται άμεσα με τη διοικητική και τεχνική ικανότητα των φορέων διαχείρισης. Οι Shaaban κ.ά. (2021) δείχνουν ότι λύσεις που απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό ή σύνθετες διαδικασίες λειτουργίας δυσκολεύονται να εφαρμοστούν σε πλήρη ανάπτυξη, ιδιαίτερα σε περιφερειακά οδικά δίκτυα όπως ο ΒΟΑΚ.

#### Κυβερνοασφάλεια & Ιδιωτικότητα

Στον ΒΟΑΚ, η κυβερνοασφάλεια δεν περιορίζεται στην προστασία των συστημάτων, αλλά συνδέεται και με το πόσο αξιόπιστα λειτουργούν στην πράξη. Οι Hahn κ.ά. (2021) επισημαίνουν ότι ακόμη και περιορισμένες επιθέσεις σε υποδομές ITS μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια εμπιστοσύνης από τους χρήστες, με δυσανάλογες επιπτώσεις στη συνολική αποδοχή των συστημάτων.

Επίσης οι Lederman κ.ά. (2016) υπογραμμίζουν ότι σε περιφερειακά οδικά δίκτυα, όπου η σχέση εμπιστοσύνης μεταξύ χρηστών και φορέων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, ζητήματα ιδιωτικότητας αποκτούν αυξημένο βάρος. Για τον ΒΟΑΚ, η ανεπαρκής διαχείριση τέτοιων θεμάτων μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά ακόμη και για τεχνολογικά ώριμες και λειτουργικά αποδοτικές λύσεις.

#### Ανθρώπινος Παράγοντας

Ο ανθρώπινος παράγοντας αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον ΒΟΑΚ λόγω της έντονης τοπικής και επαγγελματικής χρήσης του άξονα. Οι Janušová & Čičmancová (2016) επισημαίνουν ότι οι οδηγοί που περνούν συχνά από τον ίδιο δρόμο συνηθίζουν τον τρόπο λειτουργίας του, κάτι που επηρεάζει το πώς αντιδρούν σε νέες τεχνολογικές παρεμβάσεις. Όταν οι τεχνολογίες δεν είναι εύκολα κατανοητές ή δίνουν αντιφατικά σήματα, μπορεί να δημιουργηθεί σύγχυση και να μειωθεί η ασφάλεια (Shaaban κ.ά., 2021)

Για τον ΒΟΑΚ, αυτό σημαίνει ότι οι λύσεις πρέπει να είναι σαφείς και εύκολα κατανοητές, όχι μόνο αποτελεσματικές τεχνικά.

#### Δυνατότητα αξιολόγησης αποτελεσματικότητας

Ένα τελευταίο κρίσιμο κριτήριο αφορά τη δυνατότητα αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων. Η εφαρμογή τεχνολογιών που επιτρέπουν συλλογή και ανάλυση δεδομένων διευκολύνει την εκ των υστέρων αποτίμηση και τη βελτίωση της στρατηγικής. Για τον ΒΟΑΚ, αυτό σημαίνει ότι οι παρεμβάσεις πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να επιτρέπουν την παρακολούθηση μετρήσιμων δεικτών απόδοσης, όπως η μεταβολή της συχνότητας και σοβαρότητας ατυχημάτων σε στοχευμένα τμήματα ή συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις πριν και μετά την παρέμβαση. Η ενσωμάτωση αυτής της λογικής αξιολόγησης στο σχεδιασμό των παρεμβάσεων αποτελεί βασική αρχή σχεδιασμού και σταδιακής βελτίωσης.

Τα κριτήρια αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να αξιολογηθεί ποιες τεχνολογίες είναι εφαρμόσιμες στον ΒΟΑΚ απαντώντας και στο ΕΕ2.

### **3.3. Σύνδεση ερευνητικών ερωτημάτων με τον ΒΟΑΚ**

Τα ερευνητικά ερωτήματα (ΕΕ) που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1 αποτελούν τον βασικό άξονα της εργασίας και συνδέουν τη θεωρητική τεκμηρίωση με την ανάλυση των δεδομένων και τη διαμόρφωση προτάσεων. Στο παρόν κεφάλαιο εξειδικεύονται σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης και τη χαρτογράφηση των τεχνολογικών επιλογών.

Τα ΕΕ1 και ΕΕ2 εξετάζονται μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 2 και της εφαρμογής των κριτηρίων αξιολόγησης που αναπτύσσονται στην Ενότητα 3.2. Η πλήρης απάντηση στο ΕΕ2 διαμορφώνεται στο Κεφάλαιο 6 βάσει των ευρημάτων της ανάλυσης. Η ανάλυση δείχνει ότι οι υβριδικές τεχνολογίες, ως συνδυασμός ICT και Non-ICT παρεμβάσεων, προσαρμόζονται καλύτερα σε έναν υφιστάμενο οδικό άξονα με ανομοιογενή γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Παράμετροι όπως η τεχνολογική ωριμότητα, το κόστος κύκλου ζωής και ο ανθρώπινος παράγοντας λειτουργούν ως βασικά κριτήρια επιλογής, περιορίζοντας τις λύσεις σε πραγματικά εφαρμόσιμες παρεμβάσεις.

Τα ΕΕ3 και ΕΕ4 συνδέονται με την εμπειρική ανάλυση των τροχαίων ατυχημάτων. Η απάντησή τους βασίζεται στην επεξεργασία των στοιχείων της ΕΛΣΤΑΤ για την περίοδο 2015-2022, όπως παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 4 και 5. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την

αποτύπωση των βασικών προτύπων των ατυχημάτων ως προς τη συχνότητα, τη σοβαρότητα και τις συνθήκες εκδήλωσης (EE3), καθώς και τον εντοπισμό των χιλιομετρικών θέσεων με αυξημένη επικινδυνότητα μέσω του δείκτη  $\Delta$  (EE4) δίνοντας έτσι την δυνατότητα ιεράρχησης των κρίσιμων χιλιομετρικών θέσεων του άξονα.

Το EE5 συνδέει τα αποτελέσματα της ανάλυσης με την επιλογή κατάλληλων λύσεων. Στο Κεφάλαιο 6 προτείνονται συγκεκριμένες παρεμβάσεις για τα επικίνδυνα τμήματα του άξονα, με βάση τα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων και τις δυνατότητες εφαρμογής στον ΒΟΑΚ. Έτσι αποφεύγεται η οριζόντια εφαρμογή τεχνολογιών και δίνεται έμφαση σε στοχευμένες λύσεις ανάλογα με τις ανάγκες κάθε θέσης.

Τα ανωτέρω ερευνητικά ερωτήματα ενώνουν όλα τα στάδια της εργασίας, από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση έως τη διαμόρφωση των προτάσεων.

## 4. Μεθοδολογία έρευνας

Η έρευνα στηρίζεται σε δευτερογενή στοιχεία οδικών ατυχημάτων που διατέθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Αρχή κατόπιν σχετικής επικοινωνίας, και καλύπτουν την περίοδο 2015–2022 για τον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης. Η εργασία έχει εφαρμοσμένο χαρακτήρα της οποίας στόχος είναι η αποτύπωση των βασικών χαρακτηριστικών των συμβάντων και ο εντοπισμός των χιλιομετρικών θέσεων όπου παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση ατυχημάτων. Δεν επιδιώκεται η πρόβλεψη μελλοντικών ατυχημάτων ούτε η διερεύνηση των αιτιών τους.

Η επεξεργασία πραγματοποιείται σε επίπεδο χιλιομετρικών θέσεων. Κάθε ατύχημα συσχετίζεται με τη χιλιομετρική του θέση και τα δεδομένα ομαδοποιούνται ώστε να προκύψει η συχνότητα και η σοβαρότητα των ατυχημάτων ανά σημείο του άξονα.

Για την ομοιόμορφη ομαδοποίηση εφαρμόστηκε στρογγυλοποίηση των δεκαδικών χιλιομετρικών τιμών ως εξής:

- τιμές μικρότερες από 0,5 στρογγυλοποιούνται προς τα κάτω,
- μεγαλύτερες από 0,5 προς τα πάνω, ενώ οι
- τιμές ίσες με 0,5 διατηρούνται καθώς αντιστοιχούν σε πραγματικές σημάνσεις του οδικού δικτύου.

### 4.1. Ερευνητικός σχεδιασμός

Η έρευνα βασίζεται σε ποσοτική ανάλυση δευτερογενών δεδομένων που αφορούν τον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης για την περίοδο 2015-2022. Ο σχεδιασμός οργανώθηκε έτσι ώστε να απαντά στα ερευνητικά ερωτήματα που σχετίζονται με τα πραγματικά χαρακτηριστικά των ατυχημάτων και τη χωρική τους κατανομή.

Ο άξονας εξετάζεται ως μια βασική οδική υποδομή χωρισμένη σε διακριτές χιλιομετρικές θέσεις, σύμφωνα με την επίσημη σήμανση κατά μήκος της οδού. Η μελέτη βασίζεται στα δεδομένα τροχαίων ατυχημάτων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ), τα οποία καταγράφουν τη χιλιομετρική θέση (ΧΘ) κάθε συμβάντος και η οποία ορίζεται ως βασική μονάδα ανάλυσης και όχι ευρύτερα τμήματα.

Με βάση αυτές τις χιλιομετρικές θέσεις πραγματοποιείται η συγκέντρωση και επεξεργασία των παρεχόμενων δεδομένων, ώστε να υπολογιστεί ο δείκτης σοβαρότητας και να ιεραρχηθούν τα σημεία του άξονα ως προς το επίπεδο επικινδυνότητας.

Σημειώνεται ότι η ανάλυση παραμένει περιγραφική. Δεν επιχειρείται εξαγωγή αιτιωδών συμπερασμάτων ούτε σύγκριση με κυκλοφοριακό φόρτο, καθώς τέτοια δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα. Στόχος είναι η ανάδειξη συγκεντρώσεων συμβάντων και η διαμόρφωση τεκμηριωμένης βάσης για προτάσεις παρέμβασης. Η απουσία κυκλοφοριακών δεδομένων αποτελεί περιορισμό που αναλύεται διεξοδικότερα στην ενότητα 4.4.

Ο ερευνητικός σχεδιασμός συνδέεται άμεσα με τα ερευνητικά ερωτήματα EE3 και EE4, τα οποία εξετάζουν τα κύρια χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων και τη χωρική τους κατανομή (EE3) και τον εντοπισμό των τμημάτων αυξημένης επικινδυνότητας καθώς και τις ενδεικνυόμενες παρεμβάσεις, με επιλεγμένες τεχνολογίες Smart Roads, για κάθε ένα από αυτά (EE4) αντίστοιχα.

Για να απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά, απαιτήθηκε να γίνει:

- Καταγραφή της συχνότητας ατυχημάτων ανά χιλιομετρική θέση.
- Ανάλυση της σοβαρότητας των συνεπειών.
- Συνδυαστική αξιολόγηση συχνότητας και βαρύτητας.
- Συσχέτιση των αποτελεσμάτων με χαρακτηριστικά του τόπου ατυχήματος.

## 4.2. Πηγές δεδομένων και διαδικασία συλλογής

Τα δεδομένα της έρευνας προέρχονται από την Ελληνική Στατιστική Αρχή και διατέθηκαν κατόπιν απευθείας επικοινωνίας για στοιχεία που αφορούν τον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης. Για την λήψη των απαραίτητων δεδομένων από την ΕΛΣΤΑΤ υποβλήθηκε το υπ'αρ. 48856/17.02.2025 ηλεκτρονικό αίτημα το οποίο μετά από τη σύγκληση της 8ης Επιτροπής Στατιστικού Απορρήτου και σύμφωνα με τη ΓΠ-112/5.03.2025 σχετική επιστολή του Προέδρου της ΕΛΣΤΑΤ, εγκρίθηκε και υλοποιήθηκε με την υπογραφή της υπ'αρ. 1105 σύμβασης. Το δεδομένα παραδόθηκαν σε μορφή αρχείων υπολογιστικών φύλλων τα οποία περιλαμβάνουν αναλυτικές εγγραφές για κάθε καταγεγραμμένο ατύχημα κατά την περίοδο 2015-2022.

Ο ακόλουθος Πίνακας 14 καταγράφει τα ονόματα των αρχείων όπως παραδόθηκαν από την ΕΛΣΤΑΤ και σύντομη περιγραφή των περιεχομένων τους.

**Πίνακας 14. Αρχεία δεδομένων ΕΛΣΤΑΤ**

<b>a/a</b>	<i>Όνομα αρχείου</i>	<i>Σύντομη περιγραφή</i>
<b>1</b>	troch_Niaouostas.xlsx	Λεπτομέρειες ατυχημάτων όπως χρόνος, θέση, παθόντες, εμπλεκόμενα οχήματα, ατμοσφαιρικές συνθήκες, κατάσταση οδοστρώματος, φωτισμός, διαγράμμιση, νησίδες, στηθαία κ.α.
<b>2</b>	path_Niaouostas.xlsx	Λεπτομέρειες σχετικά με τους παθόντες του κάθε ατυχήματος
<b>3</b>	och_Niaouostas.xlsx	Λεπτομέρειες σχετικές με τα εμπλεκόμενα οχήματα
<b>4</b>	ex_Niaouostas.xlsx	Λεπτομέρειες για την χρήση ή ενεργοποίηση συστημάτων ασφαλείας των εμπλεκόμενων οχημάτων
<b>5</b>	PERIGRAFH_METABLHTON.xlsx	Περιγραφή μεταβλητών και τιμών αρχείων έρευνας

Οι εγγραφές περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη χιλιομετρική θέση του κάθε συμβάντος, τον τύπο σύγκρουσης και τη σοβαρότητα των συνεπειών, όπως αυτή αποτυπώνεται στον αριθμό νεκρών και τραυματιών. Η ερμηνεία των κωδικών βασίστηκε στο συνοδευτικό αρχείο περιγραφής μεταβλητών που δόθηκε μαζί με τα στοιχεία.

Κατά το στάδιο προετοιμασίας έγινε έλεγχος πληρότητας και συνέπειας των εγγραφών. Συμπεριλήφθηκαν μόνο οι περιπτώσεις με διαθέσιμη και σαφή χιλιομετρική αναφορά, ώστε να είναι δυνατή η κατάταξη ανά τμήμα του άξονα. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν 8 εγγραφές στις οποίες η χιλιομετρική θέση καταγράφεται ως 999 ή 999,9 (άγνωστη θέση). Αυτές δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς της χωρικής ανάλυσης, καθώς δεν είναι δυνατή η αντιστοίχισή τους σε συγκεκριμένο σημείο του οδικού άξονα. Ως εκ τούτου, από το αρχικό σύνολο των 134 ατυχημάτων, η έρευνα διεξήχθη με τα 126 εναπομείναντα, πλήρως εντοπίσιμα συμβάντα. Οι πληροφορίες για τον τύπο και τη σοβαρότητα συνδέθηκαν με τη χιλιομετρική θέση κάθε συμβάντος, ώστε κάθε εγγραφή να αντιστοιχεί σε αυτή.

Δεν έγινε συμπλήρωση ή εκτίμηση ελλειπουσών τιμών, ώστε τα αποτελέσματα να στηρίζονται αποκλειστικά σε πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα.

### **4.3. Διαδικασία ανάλυσης και χωρική προσέγγιση**

Η αξιολόγηση της οδικής επικινδυνότητας σε επίπεδο χιλιομετρικών θέσεων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στον απόλυτο αριθμό ατυχημάτων. Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναδείξει ότι η συχνότητα των συμβάντων, όταν εξετάζεται απομονωμένα δηλαδή ως απλό γεγονός, δεν αποτυπώνει επαρκώς το επίπεδο κινδύνου, καθώς αγνοεί τη σοβαρότητα των συνεπειών. Όπως επισημαίνουν οι Paliotto κ.ά. (2024), η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τα χαρακτηριστικά του οδικού δικτύου που πρέπει να μελετηθεί, με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων και με τα κύρια στοιχεία στα οποία οι αρχές επιθυμούν να δώσουν προτεραιότητα.

Έχουν αναπτυχθεί γι' αυτό μέθοδοι στάθμισης (severity weighting), οι οποίες ενσωματώνουν διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας ανάλογα με το αποτέλεσμα κάθε ατυχήματος. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η επιλογή των κατάλληλων συντελεστών είναι καθοριστική για τον ακριβή εντοπισμό των επικίνδυνων σημείων (hotspots), καθώς λανθασμένοι προσδιορισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένη ιεράρχηση κι ως εκ τούτου αναποτελεσματικές παρεμβάσεις.

Στο διεθνές επίπεδο, το πλέον αναγνωρισμένο πλαίσιο αποτελεί το Highway Safety Manual (HSM) της American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Το εγχειρίδιο χρησιμοποιεί δείκτες στάθμισης ατυχημάτων (weighted crash indices) και, ειδικότερα, τον δείκτη Equivalent Property Damage Only (EPDO). Ο δείκτης αυτός μετατρέπει ατυχήματα διαφορετικής σοβαρότητας σε ισοδύναμες μονάδες, αποδίδοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στα θανατηφόρα και στα σοβαρά, από άποψη τραυματισμών, συμβάντα. Έτσι, ένα σημείο με λίγα αλλά ιδιαίτερα σοβαρά συμβάντα μπορεί να καταταχθεί υψηλότερα από ένα σημείο με περισσότερα αλλά ηπιότερα περιστατικά. Η χρήση του παραμένει επίκαιρη, καθώς σύγχρονες προσεγγίσεις αξιοποιούν εξελιγμένα μοντέλα και αλγορίθμους για τη βελτίωση της ακρίβειας της ανάλυσης σε σύνθετα οδικά περιβάλλοντα (Yun κ.ά., 2025).

Η λογική της διαφοροποιημένης στάθμισης συνδέεται με τη φιλοσοφία Safe System και με την ευρωπαϊκή πολιτική οδικής ασφάλειας, όπως αυτή εκφράζεται και στην Οδηγία 2010/40/EU<sup>4</sup> για τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών.

Η παρούσα εργασία υιοθετεί τη λογική της στάθμισης, προσαρμοσμένη στα δεδομένα του ΒΟΑΚ για την περίοδο 2015–2022, με έμφαση στη μείωση των θανατηφόρων και σοβαρών τραυματισμών και σε συμφωνία με τις κατευθυντήριες γραμμές του Vision Zero.

Ο βασικός δείκτης σοβαρότητας υπολογίζεται με βάση μια προσαρμογή του δείκτη EPDO (Equivalent Property Damage Only), ο οποίος αποδίδει διαφορετικά βάρη στις συνέπειες των ατυχημάτων.

Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως:

$$EPDO = 3N+2B+E$$

όπου **N** είναι ο αριθμός των νεκρών, **B** ο αριθμός των βαριά τραυματιών και **E** ο αριθμός των ελαφρά τραυματιών.

Για να αποτυπωθεί καλύτερα η αυξημένη επικινδυνότητα των θέσεων όπου καταγράφονται θανατηφόρα περιστατικά, εφαρμόζεται ένας επιπλέον συντελεστής ενίσχυσης που εξαρτάται από τον αριθμό των νεκρών.

Ο τελικός δείκτης επικινδυνότητας αποτελεί προσαρμογή του δείκτη EDPO και υπολογίζεται ως:

$$\Delta = (3N+2B+E) \times (1+0.10N)$$

όπου **N** = αριθμός νεκρών, **B** = αριθμός βαριά τραυματιών, **E** = αριθμός ελαφρά τραυματιών ανά χιλιομετρική θέση.

Η προσαύξηση κατά 10% ανά νεκρό, δηλαδή ο συντελεστής (1+0.10N), εισάγεται ως απλή προσαρμογή του δείκτη EPDO στην παρούσα εργασία, ώστε να αποδίδεται επιπρόσθετη βαρύτητα στις θέσεις με πολλαπλά θύματα και να επιτυγχάνεται καλύτερη διάκριση μεταξύ θέσεων που παρουσιάζουν τον ίδιο βασικό δείκτη (EPDO). Με τον τρόπο αυτό οι θέσεις με θανατηφόρα ατυχήματα αποκτούν μεγαλύτερο βάρος στην ιεράρχηση, επιτρέποντας την καλύτερη ανάδειξη των τμημάτων του οδικού άξονα που απαιτούν άμεση παρέμβαση.

Ο συντελεστής 3 που αντιστοιχεί στους νεκρούς αντικατοπτρίζει την ποιοτική διαφορά μεταξύ απώλειας ζωής και απλού υλικού συμβάντος, ενώ ο συντελεστής 2 που αντιστοιχεί στους βαριά τραυματίες, αποτυπώνει την υψηλή επιβάρυνση που συνεπάγονται οι σοβαροί τραυματισμοί. Η επιλογή των συγκεκριμένων συντελεστών δεν στοχεύει στην απόλυτη

---

<sup>4</sup> <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj>

αποτίμηση των ατυχημάτων, αλλά στη διαβάθμιση της επικινδυνότητας σε επίπεδο συγκριτικής ιεράρχησης.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει επισημανθεί ότι η συσσώρευση ανθρώπινων απωλειών σε συγκεκριμένη θέση συνιστά ένδειξη συστημικής αποτυχίας της υποδομής ή της λειτουργίας της (systemic risk). Η ενίσχυση αυτή επιτρέπει στον δείκτη να αποτυπώνει όχι μόνο τη βαρύτητα των γεγονότων, αλλά και την ποιοτική μεταβολή του κινδύνου, δίνοντας απόλυτη προτεραιότητα στην προστασία της ανθρώπινης ζωής.

Για να καταστεί σαφής η λειτουργία του δείκτη, μπορεί να μελετηθεί με το παρακάτω ενδεικτικό παράδειγμα.

### Παράδειγμα

Έστω τρεις χιλιομετρικές θέσεις του άξονα.

- Στην πρώτη καταγράφονται τέσσερα ατυχήματα με τέσσερις ελαφρά τραυματίες και χωρίς νεκρούς ή βαριά τραυματίες.

Σε αυτή τη περίπτωση η τιμή του δείκτη υπολογίζεται ως:

$$\Delta_1 = (3 \times 0 + 2 \times 0 + 4) \times (1 + 0.10 \times 0) = 4.0$$

- Στη δεύτερη καταγράφονται δύο ατυχήματα με έναν νεκρό και έναν βαριά τραυματία.

Σε αυτή τη περίπτωση η τιμή του δείκτη υπολογίζεται ως:

$$\Delta_2 = (3 \times 1 + 2 \times 1 + 0) \times (1 + 0.10 \times 1) = 5 \times 1.1 = 5.5$$

- Στην τρίτη καταγράφονται δύο ατυχήματα με δύο νεκρούς και χωρίς τραυματίες.

Σε αυτή τη περίπτωση η τιμή του δείκτη υπολογίζεται ως:

$$\Delta_3 = (3 \times 2 + 2 \times 0 + 0) \times (1 + 0.10 \times 2) = 6 \times 1.2 = 7.2$$

Παρά το γεγονός ότι η πρώτη θέση παρουσιάζει τον μεγαλύτερο αριθμό ατυχημάτων και η τρίτη τον μικρότερο, η ιεράρχηση αντιστρέφεται πλήρως. Η τρίτη θέση λαμβάνει την υψηλότερη τιμή (7.2), ακολουθεί η δεύτερη (5.5) και τέλος η πρώτη (4.0). Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει τη διπλή λειτουργία του δείκτη. Αφενός η στάθμιση των συντελεστών (3 για νεκρούς, 2 για βαριά τραυματίες) αποτυπώνει τη βαρύτητα κάθε συμβάντος, αφετέρου ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής  $(1 + 0.10N)$  ενισχύει επιπλέον τις θέσεις που κοστίζουν περισσότερες ανθρώπινες ζωές.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι ο παρών δείκτης δεν υποκαθιστά τις μεθόδους πρόβλεψης κινδύνου (predictive crash models) ούτε ενσωματώνει κυκλοφοριακό φόρτο ή μεταβλητές έκθεσης (exposure). Λειτουργεί ως εργαλείο εσωτερικής σύγκρισης εντός του ίδιου οδικού άξονα, επιτρέποντας τη διαμόρφωση τεκμηριωμένης σειράς προτεραιότητας για την εφαρμογή τεχνολογιών Smart Roads. Η μεθοδολογική επιλογή ευθυγραμμίζεται με

τις διεθνείς πρακτικές weighted severity indices, διατηρώντας την αναλογικότητα και τη διαφάνεια που απαιτεί μία εφαρμοσμένη μεταπτυχιακή εργασία.

#### **4.4. Περιορισμοί της έρευνας**

Η ανάλυση βασίζεται αποκλειστικά στα διαθέσιμα στοιχεία της περιόδου 2015-2022, όπως αυτά διατέθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Αρχή. Δεν περιλαμβάνονται δεδομένα μετά το 2022, καθώς δεν ήταν διαθέσιμα κατά τον χρόνο της έρευνας. Επομένως τα συμπεράσματα αφορούν τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Υπενθυμίζεται ότι η ανάλυση είναι περιγραφική. Δεν εξετάζονται μεταβολές ανά έτος ούτε επιχειρείται διερεύνηση διαχρονικών τάσεων. Δεν περιλαμβάνονται δεδομένα κυκλοφοριακού φόρτου, ταχύτητας ή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του οδικού άξονα, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο υπολογισμός δεικτών κινδύνου σε σχέση με την έκθεση στην κυκλοφορία. Αυτό σημαίνει ότι μια χιλιομετρική θέση με υψηλό δείκτη  $\Delta$  ενδέχεται να αντιστοιχεί και σε αυξημένη κυκλοφορία, στοιχείο που δεν μπορεί να αποτυπωθεί με τα διαθέσιμα δεδομένα.

Η κατάταξη βασίζεται στον συνολικό αριθμό ατυχημάτων ανά χιλιομετρική θέση. Η μέθοδος αυτή αναδεικνύει συγκεντρώσεις συμβάντων, αλλά δεν αποδεικνύει αιτιώδη σχέση με συγκεκριμένους παράγοντες. Οι θέσεις που χαρακτηρίζονται ως αυξημένης προτεραιότητας αποτελούν σημεία περαιτέρω διερεύνησης και όχι οριστική τεχνική αξιολόγηση.

Η χωρική αποτύπωση των χιλιομετρικών θέσεων πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Google Earth με τη βοήθεια του εργαλείου Street View. Συγκεκριμένα, διατρέχοντας εικονικά το σύνολο του ΒΟΑΚ, εντοπίστηκαν οι πινακίδες σήμανσης χιλιομετρικής θέσης και για κάθε μία τοποθετήθηκε αντίστοιχο σημείο (pin) με τον αριθμό της ΧΘ. Επικουρικά χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Mapillary, η οποία διαθέτει λήψεις Street View από χρήστες, επιτρέποντας τον εντοπισμό χιλιομετρικών θέσεων που ήταν δυσδιάκριτες ή μη αναγνωρίσιμες μέσω του Google Street View. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί ως μέσο οπτικής επιβεβαίωσης των θέσεων και δεν υποκαθιστά πλήρη ανάλυση GIS.



**Εικόνα 18.** Ενδεικτική απεικόνιση επισήμανσης χιλιομετρικών θέσεων (X0) στο Google Earth

Ένας επιπλέον περιορισμός της παρούσας ανάλυσης αφορά τη μη διαθεσιμότητα δεδομένων κυκλοφοριακού φόρτου (traffic exposure), όπως ο μέσος ημερήσιος κυκλοφοριακός φόρτος. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση της επικινδυνότητας βασίζεται αποκλειστικά στη συχνότητα και τη σοβαρότητα των ατυχημάτων και όχι στον σχετικό κίνδυνο ανά μονάδα κυκλοφορίας. Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα εξαγωγής συγκριτικών συμπερασμάτων μεταξύ διαφορετικών τμημάτων του άξονα.

## 5. Αποτελέσματα

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των οδικών ατυχημάτων στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης για την περίοδο 2015-2022. Στόχος δεν είναι μόνο η περιγραφή των δεδομένων, αλλά η ερμηνεία τους με τρόπο που να επιτρέπει τη σύνδεση των ευρημάτων με επιλογές παρεμβάσεων.

Η ανάλυση οργανώνεται σε τρία διακριτά στάδια. Αρχικά εξετάζεται πόσο συχνά συμβαίνουν ατυχήματα και πόσο σοβαρές είναι οι συνέπειές τους. Στο δεύτερο εξετάζεται η χωρική κατανομή των ατυχημάτων κατά μήκος του άξονα. Στο τρίτο και τελικό στάδιο αναλύονται οι συνθήκες υπό τις οποίες συμβαίνουν τα ατυχήματα, ώστε να εντοπιστούν παράγοντες που σχετίζονται με αυξημένη επικινδυνότητα.

### 5.1. Συνολική εικόνα ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ (2015-2022)

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τη συνολική εικόνα των οδικών ατυχημάτων στον Βόρειο Οδικό Άξονα Κρήτης για την περίοδο 2015-2022. Πριν εξεταστεί η χωρική τους κατανομή ή οι συνθήκες υπό τις οποίες εκδηλώνονται, κρίνεται απαραίτητη η αποτύπωση της έκτασης και της σοβαρότητας του φαινομένου, ώστε να διαμορφωθεί ένα σαφές σημείο αναφοράς για την ανάλυση που ακολουθεί.

Αρχικά εξετάζεται ο συνολικός αριθμός ατυχημάτων ανά έτος, με στόχο την εκτίμηση της έντασης του προβλήματος. Στη συνέχεια αναλύεται η σοβαρότητα των συνεπειών, προκειμένου να διαπιστωθεί αν το ζήτημα αφορά μόνο τη συχνότητα των συμβάντων ή και τη βαρύτητα των επιπτώσεών τους. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει τον τρόπο αξιολόγησης της επικινδυνότητας.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από την ενότητα αυτή συμβάλλει στην απάντηση του πρώτου μέρους του ερευνητικού ερωτήματος ΕΕ3 και θέτει τη βάση για τη χωρική ανάλυση που ακολουθεί. Η περίοδος 2015-2022 παρουσιάζει διακύμανση στον συνολικό αριθμό ατυχημάτων που καταγράφηκαν στον ΒΟΑΚ. Η ανάλυση των ετήσιων δεδομένων επιτρέπει την αρχική αποτύπωση της έντασης του φαινομένου, χωρίς να εισέρχεται σε χωρική ή αιτιολογική ερμηνεία.

Ο συνολικός αριθμός των 126 πλήρως εντοπίσιμων ατυχημάτων, που προέκυψε μετά την εξαίρεση των 8 συμβάντων άγνωστης θέσης από το αρχικό σύνολο των 134, επιμερίζεται ανά έτος και παρουσιάζεται στο Γράφημα 1. Παρατηρείται ότι η συχνότητα δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, καθώς καταγράφονται έτη με

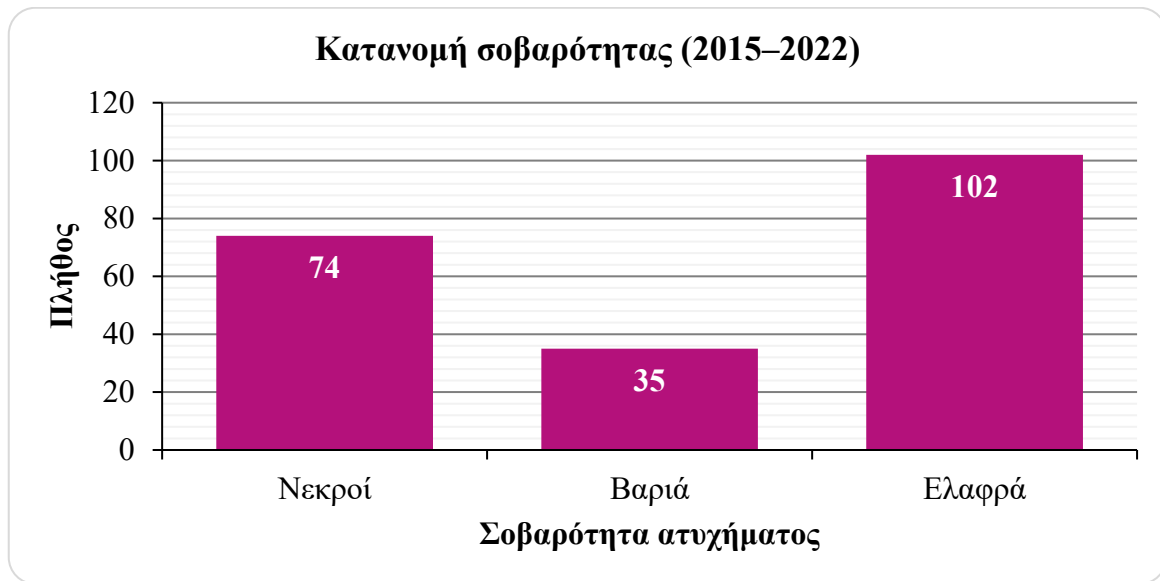
αυξημένο αριθμό περιστατικών και έτη με σχετική μείωση. Ενδεικτικά, το ιδιαίτερα μειωμένο πλήθος ατυχημάτων το έτος 2020 συνδέεται με τις συνθήκες περιορισμού της κυκλοφορίας λόγω της πανδημίας COVID-19. Η παρούσα ανάλυση δεν επιχειρεί διερεύνηση μακροχρόνιων τάσεων, καθώς ο στόχος της είναι η χωρική ιεράρχηση των ατυχημάτων.



**Γράφημα 1. Συνολικός αριθμός ατυχημάτων ανά έτος (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ).**

Πέραν της απλής συχνότητας, κρίσιμο στοιχείο αποτελεί η σοβαρότητα των συνεπειών των ατυχημάτων. Το Γράφημα 2 παρουσιάζει την κατανομή των περιστατικών ως προς τη βαρύτητα των συνεπειών τους, διαχωρίζοντας τα σε νεκρούς, βαριά και ελαφρά τραυματίες για το σύνολο της περιόδου μελέτης.

Η παρουσία σημαντικού αριθμού νεκρών και βαριά τραυματιών υποδηλώνει ότι ο ΒΟΑΚ δεν χαρακτηρίζεται μόνο από συχνότητα ατυχημάτων, αλλά και από αυξημένη ένταση συνεπειών.



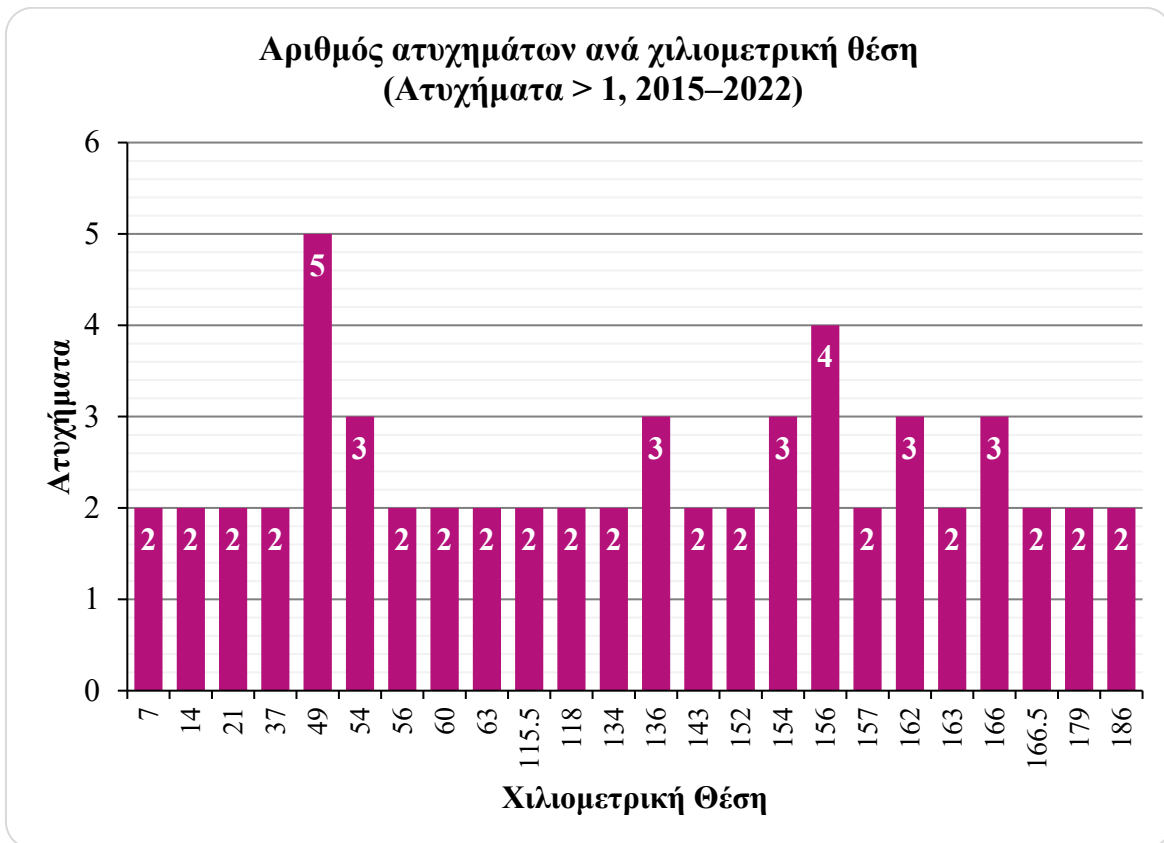
**Γράφημα 2. Κατανομή σοβαρότητας ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

Τα δύο γραφήματα αποτυπώνουν συμπληρωματικές διαστάσεις του προβλήματος, καθώς το πρώτο αφορά τη συχνότητα των ατυχημάτων και το δεύτερο τη σοβαρότητα των συνεπειών τους. Επομένως, η αξιολόγηση της επικινδυνότητας του ΒΟΑΚ δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στον αριθμό των συμβάντων, αλλά απαιτεί συνδυαστική εξέταση.

Διευκρινίζεται ότι οι αριθμοί νεκρών, βαριά και ελαφρά τραυματιών που εμφανίζονται στο Γράφημα 2 (74, 35, 102) διαφέρουν ελαφρά από τα συνολικά στοιχεία της περιόδου (76, 36, 110). Η διαφορά οφείλεται στην εξαίρεση 8 ατυχημάτων με καταγεγραμμένες χιλιομετρικές θέσεις 999 και 999.9, δηλαδή συμβάντων για τα οποία δεν ήταν δυνατός ο χωρικός εντοπισμός και ο συνολικός αριθμός νεκρών, βαριά και ελαφρά τραυματιών είναι 2, 1 και 8 αντίστοιχα.

## 5.2. Χωρική κατανομή ατυχημάτων κατά μήκος του ΒΟΑΚ

Η συνολική αποτύπωση της περιόδου 2015-2022 αποκτά ουσιαστικό νόημα μόνο όταν εξεταστεί η χωρική κατανομή των ατυχημάτων κατά μήκος του άξονα. Η απλή ετήσια καταγραφή δεν επιτρέπει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο κίνδυνος κατανέμεται γεωγραφικά. Τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν ανά χιλιομετρική θέση και αποτυπώθηκαν στο Γράφημα 3, το οποίο παρουσιάζει τον αριθμό ατυχημάτων κατά μήκος του ΒΟΑΚ, και σε αύξουσα χιλιομέτρηση, για ολόκληρη την εξεταζόμενη περίοδο.



**Γράφημα 3. Αριθμός ατυχημάτων ανά χιλιομετρική θέση (2015–2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

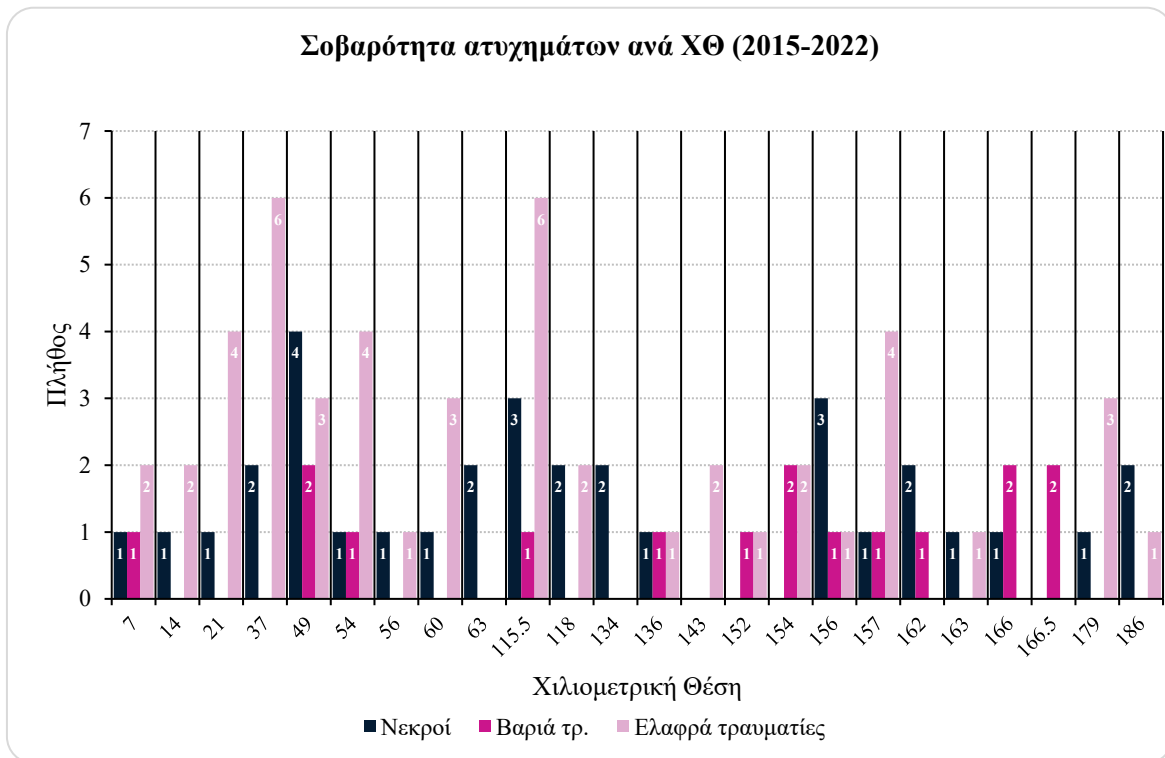
Η κατανομή δεν εμφανίζεται ομοιόμορφη. Αντίθετα, παρατηρούνται σαφείς συγκεντρώσεις περιστατικών σε συγκεκριμένες χιλιομετρικές ζώνες, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη τοπικών παραγόντων αυξημένου κινδύνου. Οι συγκεντρώσεις αυτές δεν είναι τυχαίες, καθώς επαναλαμβάνονται διαχρονικά εντός της ίδιας περιόδου, ενισχύοντας την υπόθεση ότι πρόκειται για τμήματα με σταθερά χαρακτηριστικά επικινδυνότητας.

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι οι συγκεντρώσεις δεν περιορίζονται σε ένα μόνο τμήμα του άξονα, αλλά εντοπίζονται σε διαφορετικά γεωγραφικά σημεία, γεγονός που αποτυπώνει τη σύνθετη φύση του προβλήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται αυξημένη συχνότητα χωρίς αντίστοιχα υψηλή σοβαρότητα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις μικρότερος αριθμός ατυχημάτων συνοδεύεται από ιδιαίτερα σοβαρές συνέπειες. Η παρατήρηση αυτή καθιστά σαφές ότι η χωρική ανάλυση δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στη συχνότητα.

Η χωρική αποτύπωση αναδεικνύει επίσης την ύπαρξη συνεχόμενων ή γειτονικών χιλιομετρικών θέσεων με αυξημένη συγκέντρωση περιστατικών. Η παρουσία τέτοιων «ζωνών» υποδηλώνει ότι το πρόβλημα δεν είναι πάντοτε σημειακό, αλλά ενδέχεται να σχετίζεται με γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οδικού τμήματος, αλλαγές κατεύθυνσης,

μεταβολές πλάτους, ορατότητας ή συνδυασμό παραγόντων που δεν αποτυπώνονται πλήρως στην απλή καταγραφή.

Στο Γράφημα 4 παρουσιάζεται επιπλέον η σοβαρότητα των ατυχημάτων στις χιλιομετρικές θέσεις με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Η σύγκριση των δύο γραφημάτων δείχνει ότι δεν είναι πάντα τα ίδια σημεία που έχουν μεγάλο πλήθος ατυχημάτων και αυτά που έχουν τα πιο σοβαρά. Ορισμένα τμήματα εμφανίζουν υψηλή συχνότητα με σχετικά περιορισμένες συνέπειες, ενώ άλλα εμφανίζουν μικρότερη συχνότητα αλλά δυσανάλογα υψηλή βαρύτητα. Η διάκριση αυτή είναι καθοριστική για την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας ιεράρχησης που εφαρμόζεται στην ενότητα 5.4.



**Γράφημα 4. Σοβαρότητα ατυχημάτων ανά ΧΘ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

Η χωρική ανάλυση, επομένως, λειτουργεί ως ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της γενικής στατιστικής αποτύπωσης και της σύνθετης αξιολόγησης επικινδυνότητας. Αναδεικνύει τα σημεία όπου συγκεντρώνεται το πρόβλημα, χωρίς ακόμη να αποφαινεται για το ποια από αυτά απαιτούν προτεραιότητα παρέμβασης. Η ανάγκη για συγκριτική αξιολόγηση οδηγεί στην εφαρμογή του σταθμισμένου δείκτη επικινδυνότητας που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και εφαρμόζεται συστηματικά στην ενότητα που ακολουθεί.

### **5.3. Συνθήκες κάτω από τις οποίες συμβαίνουν τα ατυχήματα**

Η χωρική κατανομή δείχνει σε ποια τμήματα του άξονα εμφανίζονται περισσότερα ατυχήματα. Όμως για να υποστηριχθούν επιλογές τεχνολογιών Smart Roads χρειάζεται να εξεταστεί και το πλαίσιο μέσα στο οποίο συμβαίνουν τα συμβάντα. Οι συνθήκες φωτισμού, η ώρα, ο καιρός και η κατάσταση του οδοστρώματος επηρεάζουν άμεσα την ορατότητα, την πρόσφυση και τον χρόνο αντίδρασης, άρα μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδείξεις για το ποια μέτρα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να είναι αποτελεσματικά.

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται τέσσερις βασικές ομάδες συνθηκών: (α) φωτισμός και χρονική ζώνη, (β) ατμοσφαιρικές συνθήκες και (γ) κατάσταση οδοστρώματος. Στόχος της ενότητας είναι να εντοπιστούν πρότυπα στα δεδομένα των ατυχημάτων και να εξεταστεί η σύνδεσή τους με κατάλληλες Smart Roads παρεμβάσεις.

#### Φωτισμός και χρονική ζώνη

Αρχικά εξετάζεται η κατάσταση του τεχνητού φωτισμού κατά τη στιγμή του ατυχήματος ώστε να κατανοήσουμε τις λειτουργικές συνθήκες υπό τις οποίες εκδηλώνονται τα περιστατικά.

Το Γράφημα 5 παρουσιάζει την κατανομή των ατυχημάτων ανά κατηγορία φωτισμού. Σημειώνεται ότι η κατηγορία φωτισμού καταγράφεται μόνο για τα ατυχήματα που συνέβησαν υπό συνθήκες νυχτερινής οδήγησης. Τα 91 ημερήσια περιστατικά δεν εντάσσονται σε αυτή την κατηγοριοποίηση διότι δεν συνδέονται με ζητήματα τεχνητού φωτισμού. Το Γράφημα 5 αφορά επομένως τα 35 περιστατικά που καταγράφηκαν σε νυχτερινές συνθήκες.

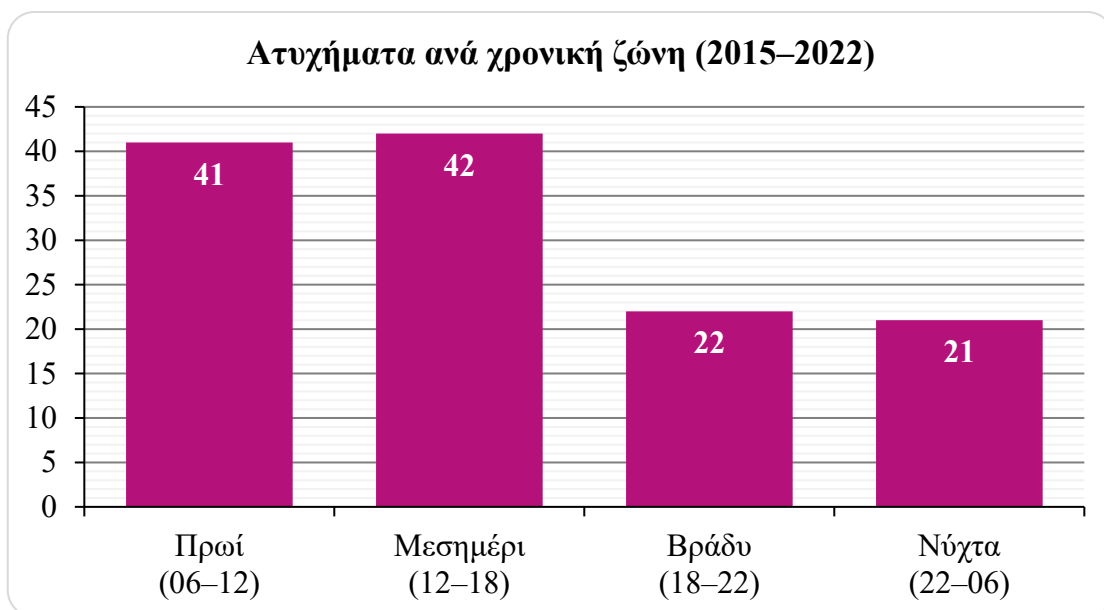
Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των ατυχημάτων καταγράφεται σε συνθήκες επαρκούς φωτισμού (17 περιστατικά), γεγονός που υποδηλώνει ότι η εμφάνιση ατυχημάτων δεν περιορίζεται σε περιβάλλοντα μειωμένης ορατότητας. Ωστόσο, σημαντικός αριθμός ατυχημάτων καταγράφεται και σε τμήματα χωρίς εγκατάσταση φωτισμού (12 περιστατικά), στοιχείο που αναδεικνύει την ύπαρξη τμημάτων του άξονα με ελλιπή υποδομή.



Γράφημα 5. Ατυχήματα ανά κατάσταση τεχνητού φωτισμού (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

Η ανάλυση της χρονικής κατανομής παρουσιάζεται στο Γράφημα 6.

Παρατηρείται ότι τα περισσότερα ατυχήματα καταγράφονται κατά τη διάρκεια της ημέρας, με υψηλότερες τιμές στη ζώνη 12-18 (42 περιστατικά) και ακολουθεί η ζώνη 06-12 (41 περιστατικά). Αντίθετα οι νυχτερινές ώρες (22-06) εμφανίζουν χαμηλότερη συχνότητα (21 περιστατικά) όπως και οι βραδυνές (18-22) εμφανίζουν χαμηλή συχνότητα (22 περιστατικά), γεγονός που υποδηλώνει ότι η επικινδυνότητα δεν συνδέεται αποκλειστικά με τις συνθήκες χαμηλής ορατότητας.



Γράφημα 6. Ατυχήματα ανά χρονική ζώνη (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

Η σύγκριση των δύο γραφημάτων αναδεικνύει ότι η πλειονότητα των ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ καταγράφεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τις βραδινές ώρες παρατηρείται σημαντικός αριθμός περιστατικών τόσο σε συνθήκες επαρκούς φωτισμού όσο και σε συνθήκες ανεπαρκούς ή ανύπαρκτου φωτισμού. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι τα ατυχήματα δεν συγκεντρώνονται αποκλειστικά σε συνθήκες μειωμένης ορατότητας, αλλά εμφανίζονται και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Η παρουσία ατυχημάτων σε διαφορετικά επίπεδα φωτισμού υποδηλώνει ότι η επικινδυνότητα δεν συνδέεται μόνο με την ορατότητα, αλλά και με ευρύτερα χαρακτηριστικά της υποδομής και της κυκλοφορίας.

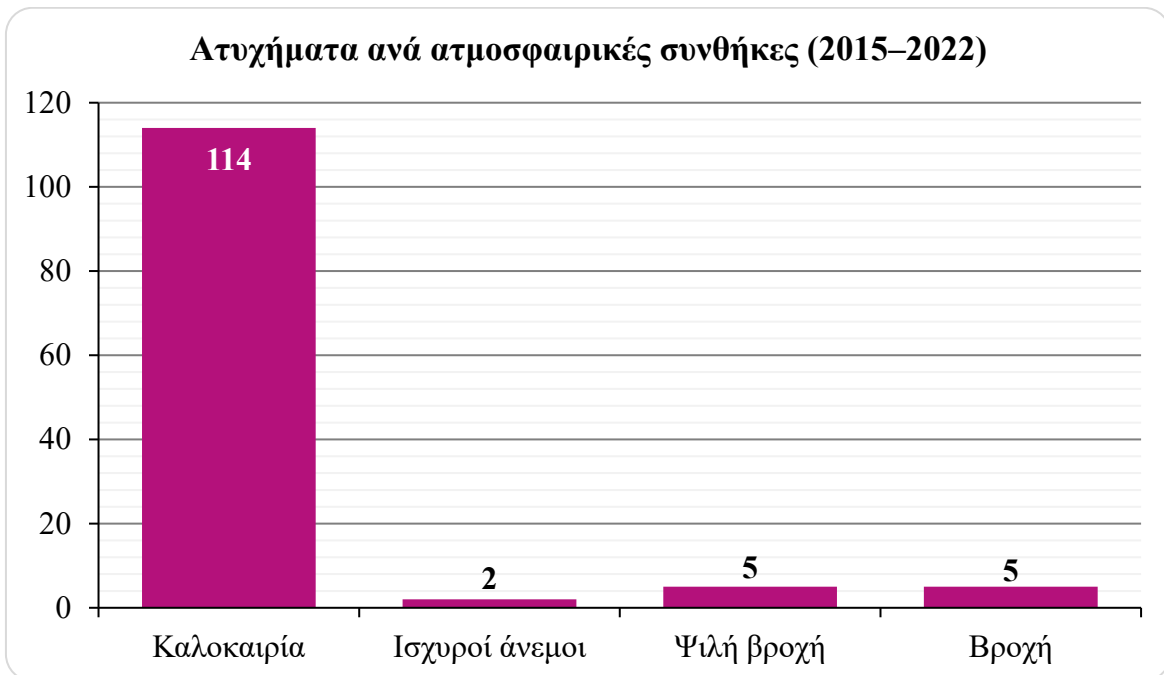
Το εύρημα αυτό δείχνει ότι οι παρεμβάσεις δεν είναι σκόπιμο να περιοριστούν αποκλειστικά σε λύσεις φωτισμού, αλλά χρειάζεται να συνδυάζουν διαφορετικές κατηγορίες Smart Roads τεχνολογιών, ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Σε τμήματα όπου το βασικό ζήτημα δεν φαίνεται να είναι η έλλειψη φωτισμού, μεγαλύτερη σημασία μπορούν να έχουν παρεμβάσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την έγκαιρη προειδοποίηση των οδηγών, ενώ σε τμήματα χωρίς φωτιστική υποδομή αποκτούν ιδιαίτερη σημασία οι Non-ICT-based τεχνολογίες που ενισχύουν την παθητική νυχτερινή ορατότητα και την αντιληπτική καθοδήγηση.

Ειδικότερα, σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να αξιοποιηθούν έξυπνοι ανακλαστήρες και παθητικά οπτικά συστήματα καθοδήγησης, καινοτόμες διαγραμμίσεις υψηλής ανακλαστικότητας ή φωσφορίζοντα υλικά, καθώς και παθητικά συστήματα προειδοποίησης και μείωσης ταχύτητας. Οι παρεμβάσεις αυτές μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε ως μέρος υβριδικών σχημάτων, όπου η ενίσχυση της ορατότητας και της αναγνωσιμότητας του δρόμου συνδυάζεται με ICT-based συστήματα πληροφόρησης και προειδοποίησης.

#### Ατμοσφαιρικές συνθήκες

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα στην εκδήλωση οδικών ατυχημάτων, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ορατότητα, την πρόσφυση και τη συμπεριφορά των οδηγών. Η διερεύνηση της μεταβλητής που καταγράφει τις καιρικές συνθήκες κατά τη στιγμή του συμβάντος επιτρέπει να διαπιστωθεί αν συγκεκριμένοι τύποι καιρού συνδέονται με αυξημένη συχνότητα ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ.

Το Γράφημα 7 παρουσιάζει την κατανομή των ατυχημάτων ανά κατηγορία ατμοσφαιρικών συνθηκών.



**Γράφημα 7. Ατυχήματα ανά ατμοσφαιρικές συνθήκες (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

Η κατανομή δείχνει με σαφήνεια ότι η συντριπτική πλειονότητα των ατυχημάτων καταγράφεται σε συνθήκες καλοκαιρίας (114 περιστατικά), ενώ τα ατυχήματα σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες εμφανίζονται σε πολύ περιορισμένο βαθμό, με 5 περιστατικά σε βροχή, 5 σε ψιλή βροχή και μόλις 2 σε ισχυρούς ανέμους. Το συμπέρασμα είναι ότι τα ατυχήματα στον ΒΟΑΚ δεν συνδέονται άμεσα με δυσμενείς καιρικές συνθήκες, αλλά εκδηλώνονται κατά βάση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου.

Δεν αγνοείται φυσικά το γεγονός ότι η περιορισμένη αλλά υπαρκτή παρουσία ατυχημάτων σε συνθήκες βροχόπτωσης αναδεικνύει συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου η πρόσφυση και η ορατότητα ενδέχεται να επηρεάζουν τη λειτουργική ασφάλεια. Στις περιπτώσεις αυτές, παρεμβάσεις που σχετίζονται με τη βελτίωση της επιφάνειας κύλισης και της οπτικής καθοδήγησης μπορούν να λειτουργήσουν υποστηρικτικά.

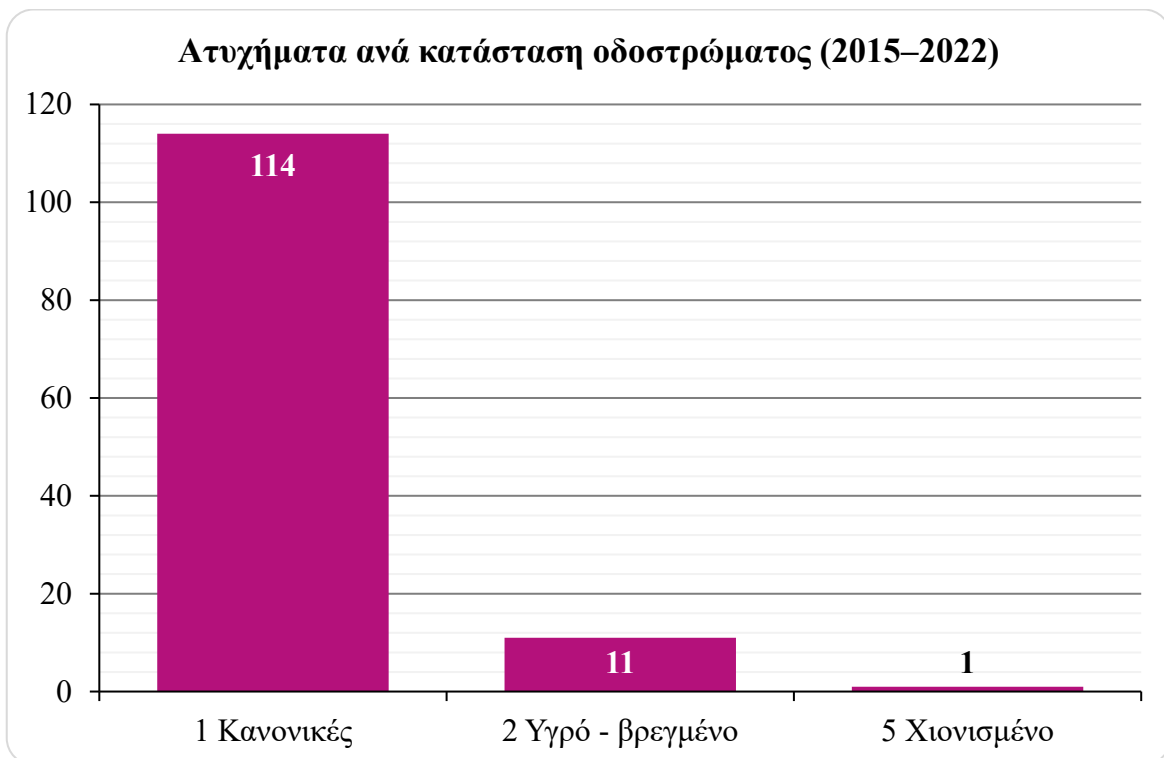
Για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες, μπορούν να αξιοποιηθούν Non-ICT-based τεχνολογίες όπως υλικά οδοστρώματος με αυξημένη αντολισθηρή συμπεριφορά και ενισχυμένη διαγράμμιση υψηλής ανακλαστικότητας, καθώς και ICT-based λύσεις που υποστηρίζουν την έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Τα δεδομένα δείχνουν ότι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα εκδήλωσης ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ, αλλά λειτουργούν συμπληρωματικά σε επιμέρους περιπτώσεις.

### Κατάσταση οδοστρώματος

Η κατάσταση του οδοστρώματος κατά τη στιγμή του ατυχήματος αποτελεί βασικό παράγοντα κινδύνου, καθώς επηρεάζει άμεσα την πρόσφυση των ελαστικών, τη σταθερότητα του οχήματος και την ικανότητα ελέγχου σε κρίσιμες συνθήκες. Η εξέταση της σχετικής μεταβλητής επιτρέπει να διαπιστωθεί αν τα ατυχήματα στον ΒΟΑΚ συνδέονται κυρίως με κανονικές συνθήκες κύλισης ή αν εμφανίζεται αυξημένη συχνότητα σε υγρό ή ολισθηρό οδόστρωμα.

Το Γράφημα 8 παρουσιάζει την κατανομή των ατυχημάτων ανά κατάσταση οδοστρώματος.



**Γράφημα 8. Ατυχήματα ανά κατάσταση οδοστρώματος (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

Η κατανομή δείχνει ότι η συντριπτική πλειονότητα των ατυχημάτων καταγράφεται σε κανονικές συνθήκες οδοστρώματος (114 περιστατικά), ενώ τα ατυχήματα σε υγρό οδόστρωμα είναι περιορισμένα (11 περιστατικά) και σε χιονισμένο σχεδόν ανύπαρκτα (1 περιστατικό). Εδώ γίνεται σαφές ότι η μειωμένη πρόσφυση δεν αποτελεί τον κύριο παράγοντα εκδήλωσης ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ, καθώς τα περισσότερα συμβάντα συμβαίνουν υπό κανονικές συνθήκες κύλισης.

Ωστόσο, η παρουσία ατυχημάτων σε υγρό οδόστρωμα αναδεικνύει επίσης συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου η πρόσφυση επηρεάζει τη λειτουργική ασφάλεια, ιδιαίτερα σε τμήματα με προβλήματα αποστράγγισης ή αυξημένη υγρασία. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορούν να

εφαρμοστούν Non-ICT-based παρεμβάσεις όπως υλικά αυξημένης αντιστοιχιστικότητας, βελτιωμένη αποστράγγιση και ενίσχυση της υφής της επιφάνειας, καθώς και στοχευμένη προειδοποιητική σήμανση

#### 5.4. Ιεράρχηση χιλιομετρικών θέσεων και σύνδεση με τεχνολογικές παρεμβάσεις

Η ανάλυση που προηγήθηκε έδειξε ότι τα ατυχήματα στον ΒΟΑΚ δεν κατανέμονται ομοιόμορφα. Ορισμένες χιλιομετρικές θέσεις εμφανίζουν επαναλαμβανόμενα συμβάντα, ενώ σε λίγες περιπτώσεις παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένη σοβαρότητα.

Για την ιεράρχηση των χιλιομετρικών θέσεων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση με βάση τον δείκτη Δ, όπως αυτός ορίστηκε και περιγράφηκε στην ενότητα 4.3. Η χρήση του δείκτη Δ αποτυπώνει πιο αξιόπιστα την πραγματική επικινδυνότητα κάθε θέσης και αποφεύγει την απλή καταμέτρηση των συμβάντων. Η αξιολόγηση αυτή δεν βασίζεται αποκλειστικά στη συχνότητα των ατυχημάτων, αλλά στον προσαρμοσμένο δείκτη επικινδυνότητας Δ, ο οποίος ενσωματώνει τη σοβαρότητα των παθόντων μέσω στάθμισης των νεκρών και των τραυματιών. Γίνεται δηλαδή διάκριση μεταξύ θέσεων όπου εμφανίζονται πολλά αλλά σχετικά ήπια ατυχήματα και θέσεων όπου ακόμη και μικρός αριθμός συμβάντων οδηγεί σε ιδιαίτερα σοβαρές συνέπειες.

Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει την ιεράρχηση των χιλιομετρικών θέσεων με περισσότερα από ένα ατυχήματα.

Πίνακας 15. Ιεράρχηση χιλιομετρικών θέσεων με βάση τον δείκτη Δ (2015-2022) (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

ΧΘ	Ατυχήματα	Νεκροί	Βαριά	Ελαφρά	Δ
49	5	4	2	3	26.6
115.5	2	3	1	6	22.1
156	4	3	1	1	15.6
37	2	2	0	6	14.4
54	3	1	1	4	9.9
157	2	1	1	4	9.9

<b>118</b>	2	2	0	2	<b>9.6</b>
<b>162</b>	3	2	1	0	<b>9.6</b>
<b>186</b>	2	2	0	1	<b>8.4</b>
<b>7</b>	2	1	1	2	<b>7.7</b>
<b>21</b>	2	1	0	4	<b>7.7</b>
<b>166</b>	3	1	2	0	<b>7.7</b>
<b>63</b>	2	2	0	0	<b>7.2</b>
<b>134</b>	2	2	0	0	<b>7.2</b>
<b>60</b>	2	1	0	3	<b>6.6</b>
<b>136</b>	3	1	1	1	<b>6.6</b>
<b>179</b>	2	1	0	3	<b>6.6</b>
<b>154</b>	3	0	2	2	<b>6.0</b>
<b>14</b>	2	1	0	2	<b>5.5</b>
<b>56</b>	2	1	0	1	<b>4.4</b>
<b>163</b>	2	1	0	1	<b>4.4</b>
<b>166.5</b>	2	0	2	0	<b>4.0</b>
<b>152</b>	2	0	1	1	<b>3.0</b>
<b>143</b>	2	0	0	2	<b>2.0</b>

Η ΧΘ 49 εμφανίζει τον υψηλότερο δείκτη επικινδυνότητας, καθώς συνδυάζει μεγάλο αριθμό συμβάντων και υψηλή σοβαρότητα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ΧΘ 115.5, όπου παρά τον μικρό αριθμό ατυχημάτων καταγράφεται σημαντικός αριθμός

νεκρών, γεγονός που αυξάνει έντονα τον δείκτη Δ. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της στάθμισης της σοβαρότητας στην αξιολόγηση των επικίνδυνων σημείων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η περιοχή μεταξύ ΧΘ 156 και ΧΘ 167, όπου δεν εντοπίζεται μόνο μία μεμονωμένη θέση υψηλής επικινδυνότητας, αλλά μια συστάδα γειτονικών χιλιομετρικών θέσεων με αυξημένες τιμές του προσαρμοσμένου δείκτη. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι σε ορισμένα σημεία του ΒΟΑΚ η επικινδυνότητα δεν είναι αυστηρά σημειακή, αλλά εκτείνεται σε ευρύτερα τμήματα του άξονα, γεγονός που ενισχύει την ανάγκη για παρεμβάσεις σε επίπεδο τμήματος και όχι μόνο μεμονωμένης θέσης.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν περιορίζεται στη μαθηματική κατάταξη. Εξετάστηκε επίσης κατά πόσο μια θέση εμφανίζει αυξημένη συχνότητα χωρίς σοβαρές συνέπειες. Θέσεις με επαναλαμβανόμενα αλλά ελαφρά ατυχήματα μπορούν να θεωρηθούν σημεία λειτουργικής αστοχίας και να απαιτούν διαφορετικού τύπου παρέμβαση σε σχέση με θέσεις όπου καταγράφονται σοβαρά ή θανατηφόρα συμβάντα.

Σε αρκετές περιπτώσεις, θέσεις με σχετικά μικρό αριθμό συμβάντων μπορεί να απαιτούν άμεση παρέμβαση λόγω της υψηλής σοβαρότητας των συνεπειών. Η συνδυαστική αξιολόγηση συχνότητας και σοβαρότητας επιτρέπει έτσι μια πιο ρεαλιστική αποτύπωση του επιπέδου κινδύνου κατά μήκος του άξονα.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, οι σημαντικότερες χιλιομετρικές θέσεις του άξονα εξετάστηκαν ως προς τα βασικά χαρακτηριστικά των ατυχημάτων και τις πιθανές τεχνολογικές παρεμβάσεις που μπορούν να συμβάλουν στη μείωση του κινδύνου. Οι παρεμβάσεις αυτές διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

α) παρεμβάσεις που βασίζονται σε ψηφιακές τεχνολογίες και συστήματα συλλογής δεδομένων (ICT-based),

β) παρεμβάσεις φυσικής υποδομής και οδικής σήμανσης (Non-ICT), και

γ) υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν στοιχεία των δύο προηγούμενων κατηγοριών.

Τα αποτελέσματα της ιεράρχησης αποτελούν τη βάση για τη διαμόρφωση των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Η αντιστοίχιση των χιλιομετρικών θέσεων υψηλότερου κινδύνου με ενδεικτικές κατευθύνσεις τεχνολογικών παρεμβάσεων παρουσιάζεται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16. Χιλιομετρικές θέσεις με >1 ατύχημα και προτεινόμενη κατεύθυνση παρέμβασης (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)

ΧΘ	Ατυχήματα	Δείκτης Δ	Τύπος Παρέμβασης	Ενδεικτικές Συνθήκες	Προτεινόμενη Κατεύθυνση
49	5	26.6	Υβριδική	Νύχτα / χωρίς φωτισμό, ασθενής οπτική καθοδήγηση	Έξυπνος φωτισμός, ανακλαστική διαγράμμιση, δυναμική προειδοποίηση
115.5	2	22.1	Υβριδική	Καμπύλη / μη ευθυγραμμία, χωρίς κεντρικό στηθαίο	Ενισχυμένη οπτική καθοδήγηση καμπύλης, ανακλαστήρες, επιλεκτική έξυπνη προειδοποίηση
156	4	15.6	Υβριδική	Ευθυγραμμία, τμήμα συστάδας υψηλής επικινδυνότητας	Παρακολούθηση συμβάντων, βελτίωση ορατότητας, στοχευμένη υβριδική παρέμβαση
37	2	14.4	Υβριδική	Σημαντική νυχτερινή παρουσία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Έξυπνος φωτισμός, αναβάθμιση διαγράμμισης, παθητική προειδοποίηση
54	3	9.9	Non-ICT / Υβριδική	Ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση, καμπύλη / μη ευθυγραμμία	Ανακλαστική διαγράμμιση, παθητικά οπτικά βοηθήματα, επιλεκτική δυναμική σήμανση

<b>157</b>	2	9.9	Non-ICT / Υβριδική	Νυχτερινή παρουσία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Βελτίωση διαγράμμισης, ανακλαστήρες, επιλεκτικός φωτισμός
<b>162</b>	3	9.6	Non-ICT / Υβριδική	Ευθυγραμμία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Ενίσχυση διαγράμμισης, παρακολούθηση τμήματος, στοχευμένη προειδοποίηση
<b>118</b>	2	9.6	Υβριδική	Ευθυγραμμία, χωρίς κεντρικό στηθαίο	Βελτίωση παθητικής ασφάλειας, ανακλαστική καθοδήγηση, επιλεκτική ψηφιακή υποστήριξη
<b>186</b>	2	8.4	Υβριδική	Ευθυγραμμία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Αναβάθμιση διαγράμμισης, οπτική καθοδήγηση, δυναμική προειδοποίηση
<b>166</b>	3	7.7	Non-ICT / Υβριδική	Ευθυγραμμία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Βελτίωση διαγράμμισης, ανακλαστήρες, τοπική υβριδική ενίσχυση
<b>7</b>	2	7.7	Non-ICT	Ευθυγραμμία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Παθητική οπτική καθοδήγηση, ανακλαστικά στοιχεία, βελτίωση σήμανσης
<b>21</b>	2	7.7	Non-ICT	Ευθυγραμμία, χωρίς κεντρικό στηθαίο	Ενίσχυση παθητικής ασφάλειας, διαγράμμιση, προειδοποιητική σήμανση

63	2	7.2	Υβριδική	Νυχτερινή παρουσία, ευθυγραμμία	Στοχευμένος φωτισμός, ανακλαστική καθοδήγηση
134	2	7.2	Υβριδική	Νυχτερινή παρουσία, ευθυγραμμία	Βελτίωση φωτισμού, παθητική και ενεργή καθοδήγηση
136	3	6.6	Non-ICT / Υβριδική	Ευθυγραμμία, χωρίς κεντρικό στηθαίο	Αναβάθμιση διαγράμμισης και πλευρικής προστασίας
60	2	6.6	Non-ICT	Νυχτερινή παρουσία, ασαφής/ανύπαρκτη διαγράμμιση	Βελτίωση διαγράμμισης, ανακλαστήρες, τοπικός φωτισμός
179	2	6.6	Non-ICT / Υβριδική	Νύχτα / ανεπαρκής φωτισμός, ασαφής διαγράμμιση	Στοχευμένος φωτισμός, ανακλαστική διαγράμμιση
154	3	6.0	Non-ICT	Νύχτα / ανεπαρκής φωτισμός, ασαφής διαγράμμιση	Βελτίωση ορατότητας, παθητικά οπτικά συστήματα
14	2	5.5	Non-ICT	Ευθυγραμμία, χωρίς κεντρικό στηθαίο	Ενίσχυση παθητικής ασφάλειας και καθοδήγησης
56	2	4.4	Non-ICT	Ευθυγραμμία	Βελτίωση βασικής σήμανσης και διαγράμμισης
163	2	4.4	Non-ICT	Ευθυγραμμία	Παθητική οπτική καθοδήγηση
166.5	2	4.0	Non-ICT	Ευθυγραμμία	Ενίσχυση διαγράμμισης και ανακλαστήρων
152	2	3.0	Non-ICT	Κανονικές συνθήκες, χαμηλότερη σοβαρότητα	Βασικές παρεμβάσεις ορατότητας και σήμανσης

143	2	2.0	Non-ICT	Κανονικές συνθήκες, χαμηλότερη σοβαρότητα	Βασική ενίσχυση παθητικής καθοδήγησης
-----	---	-----	---------	---	---------------------------------------

Η επισκόπηση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι ορισμένες χιλιομετρικές θέσεις εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερο επίπεδο κινδύνου σε σχέση με το υπόλοιπο τμήμα του άξονα. Ενδεικτικά, η ΧΘ 49 παρουσιάζει τον μεγαλύτερο αριθμό ατυχημάτων, ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται και σημαντική σοβαρότητα παθόντων. Αντίστοιχα, η ΧΘ 115,5 εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλό δείκτη επικινδυνότητας παρά τον σχετικά μικρό αριθμό συμβάντων, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία θανατηφόρων ατυχημάτων. Το παράδειγμα αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της στάθμισης της σοβαρότητας στη διαδικασία αξιολόγησης των επικίνδυνων σημείων.

Σε αρκετές θέσεις του άξονα παρατηρείται συγκέντρωση περισσότερων από ενός ατυχημάτων χωρίς ιδιαίτερα υψηλή σοβαρότητα. Στις περιπτώσεις αυτές, η ανάλυση υποδεικνύει την ανάγκη κυρίως για παρεμβάσεις βελτίωσης της υποδομής, όπως αναβάθμιση της διαγράμμισης, ενίσχυση της σήμανσης ή χρήση υλικών αυξημένης πρόσφυσης. Αντίθετα, σε θέσεις όπου καταγράφονται σοβαρά ή θανατηφόρα ατυχήματα, η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση του κινδύνου. Σε θέσεις με υψηλό δείκτη Δ προτείνονται συνεπώς κυρίως υβριδικές ή ICT-based παρεμβάσεις, ώστε να υπάρχει δυνατότητα δυναμικής επιτήρησης και έγκαιρης ειδοποίησης, ενώ σε θέσεις με επαναλαμβανόμενα αλλά χαμηλής σοβαρότητας συμβάντα προτείνονται κατά κύριο λόγο non-ICT παρεμβάσεις, όπως ενίσχυση της διαγράμμισης ή βελτίωση της πρόσφυσης.

Ο στόχος δεν είναι μόνο η μείωση των θανάτων, αλλά και η συνολική μείωση των ατυχημάτων, γι' αυτό διατηρήθηκαν στην ανάλυση και οι θέσεις με περισσότερα από ένα συμβάντα, ακόμη και όταν δεν καταγράφηκαν νεκροί. Η ανάλυση δημιουργεί έτσι μια σαφή σύνδεση μεταξύ στατιστικών δεδομένων και επιλογής τεχνολογίας. Οι παρεμβάσεις δεν προκύπτουν θεωρητικά, αλλά τεκμηριώνονται από πραγματικά στοιχεία της περιόδου 2015-2022.

Η σύνδεση των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης με συγκεκριμένες κατευθύνσεις τεχνολογικών παρεμβάσεων αποτελεί βασικό στόχο της παρούσας εργασίας. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση των δεδομένων δεν περιορίζεται στην περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά οδηγεί στη διατύπωση προτάσεων που μπορούν να αξιοποιηθούν στον

σχεδιασμό μελλοντικών εφαρμογών Smart Roads στον ΒΟΑΚ. Τα συμπεράσματα αυτά αποτελούν τη βάση για τη συνθετική αξιολόγηση που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι προτεινόμενες τεχνολογικές κατευθύνσεις και η δυνατότητα εφαρμογής τους στο πλαίσιο της ευρύτερης στρατηγικής ανάπτυξης έξυπνων οδικών υποδομών.

### **5.5. Σύνθεση ευρημάτων και κατευθύνσεις**

Η ανάλυση που προηγήθηκε δεν περιορίζεται σε αριθμητική αποτύπωση των ατυχημάτων. Η ιεράρχηση των χιλιομετρικών θέσεων βάσει του προσαρμοσμένου δείκτη και η καταγραφή των χαρακτηριστικών του τόπου ατυχήματος επιτρέπουν τη μετάβαση από τα δεδομένα στη λήψη τεχνολογικών αποφάσεων.

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι χιλιομετρικές θέσεις δεν αποτελούν ομοιογενή σύνολα. Παρατηρούνται διαφορετικά πρότυπα επικινδυνότητας, τα οποία απαιτούν διαφορετικού τύπου αντιμετώπιση. Σε ορισμένες θέσεις καταγράφεται αυξημένος αριθμός ατυχημάτων με σημαντική σοβαρότητα συνεπειών. Εκεί ο προσαρμοσμένος δείκτης παρουσιάζει υψηλές τιμές, γεγονός που σημαίνει ότι οι συγκρούσεις δεν είναι μόνο συχνές αλλά και βαριές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η παρέμβαση δεν μπορεί να περιοριστεί σε απλή ενίσχυση σήμανσης. Απαιτείται συνδυασμός μέτρων, όπως αναβάθμιση φωτισμού, ενίσχυση πρόσφυσης οδοστρώματος, εγκατάσταση αισθητήρων ανίχνευσης συμβάντων ή εφαρμογή υβριδικών συστημάτων προειδοποίησης. Η προτεραιότητα σε αυτά τα σημεία είναι υψηλή, διότι το κοινωνικό κόστος είναι αυξημένο.

Σε άλλες χιλιομετρικές θέσεις η συχνότητα είναι σχετικά υψηλή, αλλά οι συνέπειες είναι κυρίως ελαφρές. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει προβλήματα αντιληπτικής σαφήνειας ή μικρές γεωμετρικές ατέλειες. Σε τέτοιες περιπτώσεις η εφαρμογή non-ICT παρεμβάσεων μπορεί να είναι επαρκής και αποτελεσματική. Η βελτίωση της διαγράμμισης, η χρήση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας και η ενίσχυση παθητικής σήμανσης μπορούν να μειώσουν τις συγκρούσεις χωρίς την ανάγκη σύνθετων ψηφιακών υποδομών. Η επιλογή αυτή είναι αναλογική προς τη φύση του προβλήματος και δεν οδηγεί σε υπερτεχνολογικές λύσεις.

Υπάρχουν επίσης σημεία όπου η συχνότητα είναι περιορισμένη, αλλά εμφανίζονται περιστατικά μεγάλης σοβαρότητας. Αυτές οι περιπτώσεις απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, διότι η χαμηλή συχνότητα μπορεί να αποκρύπτει υψηλό κίνδυνο όταν συμβεί ατύχημα. Σε τέτοιες θέσεις προκρίνεται η στοχευμένη ενίσχυση ελέγχου ταχύτητας, η εγκατάσταση

συστημάτων έγκαιρης ειδοποίησης και, όπου δικαιολογείται, η εφαρμογή υβριδικών τεχνολογιών με δυνατότητα δυναμικής πληροφόρησης.

Η ανάλυση των συνθηκών φωτισμού και των χρονικών ζωνών συμβάλλει περαιτέρω στη διαμόρφωση προτάσεων. Σε τμήματα όπου καταγράφεται σημαντικός αριθμός ατυχημάτων σε νυχτερινές ώρες και με ανεπαρκή φωτισμό, η αναβάθμιση του φωτιστικού εξοπλισμού ή η εγκατάσταση έξυπνου φωτισμού αποτελεί άμεση και τεκμηριωμένη επιλογή. Αντίστοιχα, η συσχέτιση ατυχημάτων με δυσμενείς καιρικές συνθήκες ενισχύει την ανάγκη για αισθητήρες οδοστρώματος και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ολισθηρότητας.

Η συνολική εικόνα που προκύπτει από την ανάλυση οδηγεί σε μία βασική διαπίστωση. Ο ΒΟΑΚ δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με μία ενιαία τεχνολογική λύση. Η κατανομή της επικινδυνότητας διαφοροποιείται χωρικά και ποιοτικά.

Προτείνεται έτσι κλιμακωτή στρατηγική εφαρμογής όπου τα σημεία υψηλής σοβαρότητας αντιμετωπίζονται με συνδυασμό υβριδικών ή ICT-based λύσεων, τα σημεία υψηλής συχνότητας αλλά χαμηλότερης βαρύτητας αντιμετωπίζονται κυρίως με ενίσχυση non-ICT μέτρων, τα μεμονωμένα αλλά σοβαρά περιστατικά αξιολογούνται στοχευμένα με έμφαση στον έλεγχο ταχύτητας και στη βελτίωση ορατότητας. Ο στόχος δεν είναι η μεγιστοποίηση της τεχνολογίας, αλλά η βέλτιστη αναλογία παρέμβασης σε σχέση με το είδος του προβλήματος.

Η σύνθεση των ευρημάτων επιτρέπει να απαντηθεί το ΕΕ4. Τα επικίνδυνα τμήματα δεν ορίζονται μόνο από τον αριθμό των ατυχημάτων, αλλά από τον συνδυασμό συχνότητας, σοβαρότητας και συνθηκών εκδήλωσης. Η επιλογή τεχνολογιών Smart Roads πρέπει επομένως να είναι διαφοροποιημένη. Σε τμήματα με κυρίως λειτουργικά προβλήματα (ορατότητα, υγρασία) επαρκούν παρεμβάσεις χαμηλής ή μέσης πολυπλοκότητας. Σε σημεία όπου συνδυάζονται πολλοί παράγοντες κινδύνου, απαιτείται συνδυασμός παθητικών και ICT-based τεχνολογιών. Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνει την απάντηση στο ΕΕ3 και θέτει τη βάση για τη συστηματική αντιστοίχιση των ευρημάτων με τα σενάρια εφαρμογής του Κεφαλαίου 6. Η διαφοροποίηση μεταξύ τμημάτων υψηλής συχνότητας, τμημάτων αυξημένης σοβαρότητας και τμημάτων επιβαρυσμένων από συγκεκριμένες συνθήκες επιτρέπει τη μετάβαση από τη γενική συζήτηση σε στοχευμένη στρατηγική. Στο επόμενο στάδιο, η σύνδεση αυτή θα μετατραπεί σε σαφείς προτάσεις εφαρμογής, με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης που έχουν ήδη τεθεί. Ο Πίνακας 17 αποτυπώνει τη λογική αντιστοίχισης μεταξύ τύπων κινδύνου και σεναρίων εφαρμογής.

Πίνακας 17. Αντιστοίχιση τύπων κινδύνου με κατηγορίες παρέμβασης

Κατηγορία Ευρήματος	Τύπος Κινδύνου	Κατάλληλη Τεχνολογία	Ενδεικτικές Λύσεις	Κατηγορία
<i>Υψηλή συχνότητα σε συγκεκριμένα km</i>	Τοπική συγκέντρωση συμβάντων	Non-ICT ή Hybrid	Ενεργά road studs, ενισχυμένη διαγράμμιση, έξυπνος φωτισμός	I ή II
<i>Αυξημένη σοβαρότητα ατυχημάτων</i>	Υψηλή ένταση σύγκρουσης	ICT-based	V2I προειδοποιήσεις, δυναμικά όρια ταχύτητας	II ή III
<i>Ατυχήματα σε χαμηλό φωτισμό</i>	Μειωμένη ορατότητα	ICT-based	Smart lighting με αισθητήρες	II
<i>Ατυχήματα σε κακές καιρικές συνθήκες</i>	Περιβαλλοντικός κίνδυνος	Hybrid	Μετεωρολογικοί αισθητήρες + VMS	II
<i>Κατάσταση οδοστρώματος</i>	Συντήρηση υποδομής	Non-ICT	Βελτιωμένα υλικά, αντιολισθητικοί τάπητες	I
<i>Διάσπαρτα συμβάντα μεγάλης έκτασης</i>	Δικτυακό πρόβλημα	ICT-based	RSUs	III

Υποσημείωση

Κατηγορία I: παρεμβάσεις χαμηλής τεχνολογικής πολυπλοκότητας (Non-ICT)

Κατηγορία II: υβριδικές παρεμβάσεις

Κατηγορία III: εκτεταμένες ICT-based παρεμβάσεις, (βλ. Κεφ. 6.1)

## 6. Προτεινόμενες παρεμβάσεις Smart Roads στον ΒΟΑΚ

Η ανάλυση των τροχαίων ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ για την περίοδο 2015-2022 (Κεφάλαιο 5) ανέδειξε χωρική ανομοιομορφία στη συγκέντρωση περιστατικών, διαφοροποίηση ως προς τη σοβαρότητα των συνεπειών και διακριτά πρότυπα αιτιών ανά θέση. Τα ευρήματα αυτά δεν επιτρέπουν οριζόντια εφαρμογή ενιαίας τεχνολογικής λύσης σε όλο το μήκος του άξονα. Αντίθετα, υπαγορεύουν στοχευμένες παρεμβάσεις που αντιστοιχούν στο είδος και στο μέγεθος του προβλήματος κάθε τμήματος.

Το παρόν κεφάλαιο οργανώνει τις προτεινόμενες παρεμβάσεις σε τρία επίπεδα: αρχικά παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των σεναρίων εφαρμογής κατά βαθμό τεχνολογικής πολυπλοκότητας, στη συνέχεια γίνεται η αντιστοίχιση των αναγκών του ΒΟΑΚ με τις κατάλληλες τεχνολογίες, και τέλος προτείνεται ένα σταδιακό μοντέλο μετάβασης με συγκεκριμένες παρεμβάσεις στις τέσσερις κρισιμότερες χιλιομετρικές θέσεις.

### 6.1. Κατηγοριοποίηση σεναρίων εφαρμογής

Με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2 και τα χαρακτηριστικά του ΒΟΑΚ, οι παρεμβάσεις Smart Roads οργανώνονται στις ακόλουθες κατηγορίες.

Οι Smart Roads περιλαμβάνουν διαφορετικές τεχνολογικές παρεμβάσεις, που διαφέρουν ως προς τον βαθμό ψηφιακής ενσωμάτωσης, την πολυπλοκότητα της υποδομής και τον τρόπο διαχείρισης δεδομένων. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η μετάβαση σε ευφυείς οδικές υποδομές δεν γίνεται με έναν ενιαίο τρόπο, αλλά μέσα από διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης, τα οποία μπορούν να συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο (Janušoná & Čičmanconá, 2016; Picone κ.ά., 2015). Για έναν υφιστάμενο άξονα όπως ο ΒΟΑΚ, οι πιθανές παρεμβάσεις μπορούν να οργανωθούν σε επιμέρους κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση αυτή χρησιμοποιείται ως εργαλείο ανάλυσης και όχι ως άμεση πρόταση εφαρμογής.

#### I. Παρεμβάσεις χαμηλής τεχνολογικής πολυπλοκότητας

Η πρώτη κατηγορία αφορά παρεμβάσεις στη βασική υποδομή και την οπτική καθοδήγηση. Περιλαμβάνει τη βελτίωση της σήμανσης και της διαγράμμισης, την ενίσχυση της ανακλαστικότητας, τον καλύτερο φωτισμό και παρεμβάσεις στο οδόστρωμα που αυξάνουν

την πρόσφυση και την ορατότητα. Τέτοιες λύσεις αποτελούν βασικά στάδια αναβάθμισης της οδικής ασφάλειας πριν από πιο εκτεταμένη ψηφιακή ενσωμάτωση (Guo, 2021).

Οι παρεμβάσεις αυτές δεν απαιτούν εκτεταμένη ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και λειτουργούν κυρίως μέσω της βελτίωσης των φυσικών χαρακτηριστικών της οδού. Η τεχνολογική τους πολυπλοκότητα είναι περιορισμένη, ωστόσο αποτελούν βασικό τμήμα της μετάβασης προς ευφύστερες υποδομές.

### II. Υβριδικές παρεμβάσεις (συνδυασμός Non-ICT και επιλεγμένων ICT-based τεχνολογιών)

Η δεύτερη κατηγορία αφορά συνδυαστικές, υβριδικές, λύσεις όπου οι βελτιώσεις στη φυσική υποδομή ενισχύονται με επιλεκτική χρήση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών. Περιλαμβάνει, για παράδειγμα, δυναμικές πινακίδες μηνυμάτων, τοπικά συστήματα ανίχνευσης συνθηκών οδοστρώματος, αισθητήρες φωτεινότητας και περιορισμένης κλίμακας συστήματα συλλογής και μετάδοσης δεδομένων (Basso κ.ά., 2021; Wiegand, 2019). Οι υβριδικές παρεμβάσεις επιτρέπουν σταδιακή μετάβαση από στατικές σε δυναμικές μορφές διαχείρισης, χωρίς την απαίτηση πλήρους ανάπτυξης συνεργατικών δικτύων μεγάλης κλίμακας. Η λειτουργία τους βασίζεται στη στοχευμένη χρήση δεδομένων για την υποστήριξη συγκεκριμένων λειτουργιών της οδού, όπως η έγκαιρη ενημέρωση χρηστών ή η προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

### III. Εκτεταμένες ICT-based παρεμβάσεις και πιλοτική εφαρμογή

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει παρεμβάσεις υψηλής τεχνολογικής πολυπλοκότητας, οι οποίες βασίζονται σε εκτεταμένη ψηφιακή υποδομή και σε διασυνδεδεμένα συστήματα επικοινωνίας. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται αρχιτεκτονικές συνεργατικών ευφών συστημάτων μεταφορών (C-ITS), τεχνολογίες V2X και εφαρμογές που αξιοποιούν μεγάλα δεδομένα και τεχνητή νοημοσύνη (Marquez-Barja κ.ά., 2019; Cai κ.ά., 2020). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η οδική υποδομή λειτουργεί ως ενεργός κόμβος σε ένα ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα, στο οποίο ανταλλάσσονται δεδομένα μεταξύ οχημάτων, υποδομής και κεντρικών συστημάτων διαχείρισης. Η αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων εξαρτάται από τη διαλειτουργικότητα, την ποιότητα των δεδομένων και το θεσμικό πλαίσιο λειτουργίας.

Η παρακάτω κατηγοριοποίηση δεν αποτελεί ιεράρχηση ούτε τελική επιλογή για τον ΒΟΑΚ, αλλά ένα πλαίσιο σύγκρισης διαφορετικών επιπέδων παρέμβασης που βοηθά στην κατανόηση των διαθέσιμων επιλογών.

Η καταλληλότητα κάθε κατηγορίας κρίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων και τον τρόπο λειτουργίας του άξονα, όπως αυτά αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

**Πίνακας 18. Κατηγορίες σεναρίων εφαρμογής Smart Roads στον ΒΟΑΚ**

<b>Κατηγορία</b>	<b>Τεχνολογική πολυπλοκότητα</b>	<b>Τεχνολογίες</b>	<b>Εφαρμογή στον ΒΟΑΚ</b>
<b><i>I. Non-ICT</i></b>	Χαμηλή	Βελτιωμένη διαγράμμιση, ανακλαστήρες, υλικά πρόσφυσης, παθητική σήμανση	Άμεση εφαρμογή σε όλο το μήκος - ιδιαίτερα σε ΧΘ χωρίς φωτισμό
<b><i>II. Υβριδική</i></b>	Μέση	Έξυπνος φωτισμός, VMS, αισθητήρες οδοστρώματος, επιλεκτικό V2I	Στοχευμένη εφαρμογή στις ΧΘ υψηλής επικινδυνότητας (49, 115.5, 156, 37)
<b><i>III. ICT-based</i></b>	Υψηλή	C-ITS, RSUs δικτύωση, AI ανάλυση, Digital Twin	Μακροπρόθεσμος ορίζοντας - απαιτεί θεσμική και τεχνολογική υποδομή

## 6.2. Σταδιακή μετάβαση του ΒΟΑΚ σε Smart Roads

Με βάση τα σενάρια της προηγούμενης ενότητας και τα ευρήματα της ανάλυσης, η μετάβαση του ΒΟΑΚ σε Smart Roads μπορεί να οργανωθεί στις ακόλουθες τρεις διακριτές χρονικές φάσεις:

- Βραχυπρόθεσμη φάση (0-3 έτη): υλοποίηση παρεμβάσεων χαμηλής πολυπλοκότητας, κυρίως non-ICT τεχνολογιών (βελτιωμένη διαγράμμιση, παθητικά οπτικά συστήματα καθοδήγησης, στοχευμένος φωτισμός και υλικά αυξημένης πρόσφυσης).
- Μεσοπρόθεσμη φάση (3-7 έτη): ανάπτυξη υβριδικών λύσεων με την ενσωμάτωση αισθητήρων, έξυπνης σήμανσης και τοπικών εφαρμογών V2I σε τμήματα με αυξημένη επικινδυνότητα.
- Μακροπρόθεσμη φάση (7+ έτη): πιο πλήρης ενσωμάτωση ICT-based υποδομών, πλατφορμών ανάλυσης δεδομένων, εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) του άξονα.

Σε πρώτο στάδιο, προτεραιότητα έχουν παρεμβάσεις χαμηλής πολυπλοκότητας. Βελτιωμένες διαγραμμίσεις, παθητικά οπτικά συστήματα καθοδήγησης, έξυπνος φωτισμός σε επικίνδυνες καμπύλες και χρήση υλικών αυξημένης πρόσφυσης αποτελούν λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σχετικά άμεσα και με περιορισμένο τεχνολογικό ρίσκο.

Σε δεύτερο στάδιο, μπορεί να προχωρήσει η ενσωμάτωση επιλεγμένων ICT στοιχείων σε συγκεκριμένα τμήματα υψηλής επικινδυνότητας. Συστήματα V2I σε κομβικά σημεία, αισθητήρες για την παρακολούθηση των συνθηκών ή πιλοτικές πλατφόρμες διαχείρισης μπορούν να εφαρμοστούν δοκιμαστικά, ώστε να αξιολογηθεί η λειτουργία τους πριν από μια πιθανή ευρύτερη εφαρμογή (Henke κ.ά., 2021).

Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, και εφόσον δημιουργηθούν οι κατάλληλες τεχνολογικές και θεσμικές προϋποθέσεις, μπορεί να εξεταστεί η ανάπτυξη πιο σύνθετων ψηφιακών υποδομών, όπως συστήματα ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο ή ένα ψηφιακό μοντέλο αναπαράστασης του άξονα. Μια τέτοια εξέλιξη προϋποθέτει σαφή σχεδιασμό, επαρκή χρηματοδότηση και οργανωτική υποστήριξη.

Η επιλογή των τεχνολογιών Smart Roads θα πρέπει να συνοδεύεται από ανάλυση κόστους-οφέλους, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το αρχικό κόστος εγκατάστασης αλλά και το κόστος λειτουργίας, συντήρησης και αναβάθμισης. Ειδικά για υφιστάμενα οδικά δίκτυα όπως ο ΒΟΑΚ, η σταδιακή εφαρμογή παρεμβάσεων χαμηλότερου κόστους και υψηλής αποτελεσματικότητας (όπως non-ICT και υβριδικές λύσεις) μπορεί να αποτελέσει μια πιο ρεαλιστική και ασφαλή στρατηγική, πριν την υλοποίηση πιο σύνθετων ICT-based συστημάτων.

Επισημαίνεται ότι για την αποτελεσματική αξιολόγηση των προτεινόμενων παρεμβάσεων Smart Roads, προτείνεται η χρήση συγκεκριμένων δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της οδικής ασφάλειας.

Ενδεικτικά μπορούν να εξεταστούν:

- ποσοστιαία μεταβολή του αριθμού ατυχημάτων σε στοχευμένα τμήματα, η οποία επιτρέπει την άμεση εκτίμηση του κατά πόσο μια παρέμβαση συμβάλλει στη μείωση των συμβάντων και αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης επεμβάσεων σε μελέτες τύπου πριν - μετά (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2010),

- μεταβολή του δείκτη σοβαρότητας (π.χ. EPDO) ώστε να αποτυπώνεται όχι μόνο η συχνότητα αλλά και η βαρύτητα των ατυχημάτων, μέσω στάθμισης των συνεπειών τους, όπως εφαρμόζεται στο Highway Safety Manual (AASHTO, 2010),
- χρόνος αντίδρασης οδηγών σε κρίσιμες συνθήκες, ο οποίος συνδέεται με την αποτελεσματικότητα παρεμβάσεων όπως η δυναμική σήμανση και η έγκαιρη ενημέρωση μέσω ITS (Dingus κ.ά., 2016),
- επίπεδο συμμόρφωσης οδηγών σε δυναμικά μηνύματα και σήμανση, το οποίο δείχνει κατά πόσο οι χρήστες ανταποκρίνονται σε συστήματα όπως τα Variable Message Signs (VMS) όπου εξετάζεται, μεταξύ άλλων, η συμμόρφωση με πληροφορίες διαδρομής ή κυκλοφοριακές οδηγίες (Erke κ.ά., 2007; Chatterjee κ.ά., 2002).

Πίνακας 19. Συγκεντρωτική Παρουσίαση Προτεινόμενων Λύσεων για τον ΒΟΑΚ

Τεχνολογία	Χρονικός Ορίζοντας	Προτεινόμενες Παρεμβάσεις	Επίδραση
<i>ICT</i>	Άμεση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αισθητήρες κυκλοφορίας σε hotspots</li> <li>• Αυτόματη ανίχνευση συμβάντων</li> <li>• Συλλογή και βασική επεξεργασία δεδομένων</li> </ul>	Μέση
	Μεσοπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πλατφόρμα παρακολούθησης κυκλοφορίας</li> <li>• Διασύνδεση με κέντρο ελέγχου</li> <li>• Ανάλυση πρόβλεψης κινδύνου</li> </ul>	Μέση-Υψηλή
	Μακροπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digital Twin του ΒΟΑΚ</li> <li>• Ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με AI</li> <li>• Υποστήριξη λήψης αποφάσεων</li> </ul>	Μακροπρόθεσμα Υψηλή
<i>Non-ICT</i>	Άμεση εφαρμογή	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υψηλής ανακλαστικότητας διαγράμμιση</li> <li>• Παθητικοί ανακλαστήρες καμπυλών</li> <li>• Υλικά αυξημένης πρόσφυσης</li> <li>• Φωσφορίζουσα/βελτιωμένη σήμανση</li> </ul>	Υψηλή
	Μεσοπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αντικατάσταση φθαρμένου οδοστρώματος</li> <li>• Μικρής κλίμακας γεωμετρικές βελτιώσεις</li> <li>• Αναβάθμιση στηθαίων ασφαλείας</li> </ul>	Μέση-Υψηλή

	Μακροπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εκτεταμένη ανακατασκευή επιλεγμένων τμημάτων</li> <li>• Ενσωμάτωση καινοτόμων υλικών</li> </ul>	Μέση
<b>Υβριδικές λύσεις</b>	Άμεση εφαρμογή	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έξυπνος φωτισμός με αισθητήρες</li> <li>• Προειδοποιητικές πινακίδες με ανίχνευση ταχύτητας</li> <li>• Τοπικά συστήματα ειδοποίησης ολισθηρότητας</li> </ul>	Υψηλή
	Μεσοπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συστήματα V2I σε hotspots</li> <li>• Αισθητήρες οδοστρώματος και καιρού</li> <li>• Μεταβλητά όρια ταχύτητας</li> </ul>	Υψηλή
	Μακροπρόθεσμη	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δικτύωση πολλαπλών σημείων παρέμβασης</li> <li>• Κεντρική παρακολούθηση υβριδικών συστημάτων</li> </ul>	Μέση-Υψηλή

### 6.3. Αντιστοίχιση αναγκών του BOAK με τεχνολογίες Smart Roads

Η ανάλυση των ατυχημάτων στον BOAK (Κεφάλαιο 5) ανέδειξε συγκεκριμένα προβλήματα που σχετίζονται με τη μειωμένη ορατότητα, τις επικίνδυνες καμπύλες, τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, την κατάσταση του οδοστρώματος και τη γενικότερη έλλειψη έγκαιρης ενημέρωσης των οδηγών. Τα προβλήματα αυτά δεν εμφανίζονται ομοιόμορφα, αλλά συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένα τμήματα του άξονα, τα οποία έχουν ήδη εντοπιστεί ως ζώνες αυξημένης επικινδυνότητας.

Η παρούσα ενότητα επιχειρεί τη σύνδεση των αναγκών που προκύπτουν από τα δεδομένα με τις κατάλληλες τεχνολογικές λύσεις Smart Roads. Η αντιστοίχιση αυτή αποτελεί το ενδιάμεσο βήμα μεταξύ της εμπειρικής ανάλυσης και της διαμόρφωσης προτάσεων, καθώς μεταφράζει τα ευρήματα σε συγκεκριμένες κατηγορίες παρεμβάσεων.

Με βάση τις κατηγορίες προβλημάτων που εντοπίστηκαν και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνολογιών Smart Roads, διαμορφώνεται ο ακόλουθος Πίνακας 20 αντιστοίχισης, ο οποίος συνδέει κάθε ανάγκη με ενδεικτικές τεχνολογικές λύσεις και πιθανές εφαρμογές στο οδικό περιβάλλον του BOAK.

Πίνακας 20. Αντιστοίχιση προβλημάτων του ΒΟΑΚ με τεχνολογίες Smart Roads

<b>Πρόβλημα στον ΒΟΑΚ</b>	<b>Αιτιολόγηση από τα εμπειρικά δεδομένα</b>	<b>Κατάλληλες Τεχνολογίες Smart Roads</b>	<b>Κατηγορία</b>	<b>Προτεινόμενη εφαρμογή</b>
<b>Σημεία υψηλής συχνότητας &amp; σοβαρότητας ατυχημάτων</b>	Εμφάνιση επαναλαμβανόμενων ατυχημάτων σε συγκεκριμένες ΧΘ με νεκρούς/βαριά τραυματίες	RSUs, V2I alerts, δυναμικά VMS	ICT-based	Εγκατάσταση RSUs και VMS σε επικίνδυνα σημεία για έγκαιρη προειδοποίηση οδηγών
<b>Μειωμένη ορατότητα - νυχτερινά ατυχήματα</b>	Τμήματα χωρίς φωτισμό ή με ανεπαρκή φωτεινότητα, όπου καταγράφονται ατυχήματα	Έξυπνος LED φωτισμός IoT, αισθητήρες φωτεινότητας, φωτεινή διαγράμμιση	ICT-based / Hybrid	Στοχευμένη εγκατάσταση έξυπνου φωτισμού σε καμπύλες και μη φωτισμένα τμήματα
<b>Επικίνδυνες καμπύλες &amp; απώλεια πορείας</b>	Ατυχήματα εκτροπής και πλαγιομετωπικές συγκρούσεις σε τμήματα με απότομες καμπύλες	Ενεργά road studs, φωτιζόμενες γραμμές, LED διαγράμμιση	Non-ICT / Hybrid	Ενίσχυση οπτικής καθοδήγησης σε καμπύλες και εισόδους οικισμών
<b>Δυσμενείς καιρικές συνθήκες</b>	Καταγραφές ατυχημάτων υπό ολισθηρό οδόστρωμα,	Περιβαλλοντικοί αισθητήρες (ορατότητα/υγρασία	ICT-based	Προειδοποίηση κινδύνου πριν από ζώνες ομίχλης

<i>(ομίχλη, βροχή)</i>	χαμηλή ορατότητα και αυξημένη υγρασία	), δυναμικά όρια ταχύτητας, VMS		ή υγρού οδοστρώματος
<i>Κακή κατάσταση οδοστρώματος &amp; πρόσφυσης</i>	Ατυχήματα σε υγρά/ολισθηρά τμήματα και περιοχές με φθορές οδοστρώματος	Smart pavements, αντολισθηρά υλικά, παθητικά συστήματα προειδοποίησης	Non-ICT	Εφαρμογή σε περιοχές με χρόνια προβλήματα απορροής και επιφανειακές φθορές
<i>Ανεπαρκής ενημέρωση οδηγών σε κρίσιμα συμβάντα</i>	Έλλειψη δυναμικής σήμανσης και real-time πληροφόρησης για ατυχήματα, έργα ή κίνηση	VMS, DMS, connected signage	ICT-based	Τοποθέτηση σε εισόδους υπεραστικών τμημάτων και σημεία αλλαγών κυκλοφορίας

#### **6.4. Στοχευμένες παρεμβάσεις Smart Roads στις κρίσιμότερες χιλιομετρικές θέσεις του ΒΟΑΚ**

Η συνολική αντιστοίχιση των χιλιομετρικών θέσεων του ΒΟΑΚ με τις ενδεικτικές κατευθύνσεις τεχνολογικών παρεμβάσεων παρουσιάστηκε στον Πίνακα 17. Ωστόσο, ορισμένα τμήματα του άξονα εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλή επικινδυνότητα, όπως αποτυπώνεται στον δείκτη  $\Delta$  του Πίνακα 16. Οι θέσεις αυτές συγκεντρώνουν είτε αυξημένο αριθμό ατυχημάτων είτε ιδιαίτερα σοβαρές συνέπειες.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα εξετάζονται αναλυτικά τέσσερις από τις πιο κρίσιμες χιλιομετρικές θέσεις του άξονα, οι ΧΘ 49, 115.5, 156 και 37. Οι θέσεις αυτές εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές του δείκτη επικινδυνότητας  $\Delta$  και παρουσιάζουν επαναληψιμότητα συμβάντων.

Η ανάλυση βασίζεται στα καταγεγραμμένα στοιχεία των τροχαίων ατυχημάτων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής για την περίοδο 2015-2022. Για κάθε θέση παρουσιάζονται

συνοπτικά οι βασικές συνθήκες των ατυχημάτων, όπως ο τύπος σύγκρουσης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η κατάσταση του οδοστρώματος και τα χαρακτηριστικά της οδού.

**Πίνακας 21. Στοιχευμένες παρεμβάσεις Smart Roads στις κρισιμότερες ΧΘ του ΒΟΑΚ**

<b>ΧΘ</b>	<b>Δείκτης Δ</b>	<b>Κυρίαρχο πρότυπο ατυχήματος</b>	<b>Μηχανισμός κινδύνου</b>	<b>Προτεινόμενες παρεμβάσεις</b>
49	26,6	Συνδυασμός πλαγιομετωπικών, μετωπικών και εκτροπών	Μειωμένη αναγνωσιμότητα πορείας σε καμπύλη & πλευρικές προσβάσεις	Έξυπνος φωτισμός, ενισχυμένη ανακλαστική διαγράμμιση, VMS προειδοποίησης (Υβριδική)
115.5	22,1	Συγκρούσεις λόγω εισόδου στο αντίθετο ρεύμα	Απώλεια ελέγχου σε δεξιά καμπύλη χωρίς διαχωριστικό στηθαίο	Ενίσχυση οπτικής καθοδήγησης καμπύλης, αισθητήρες οδοστρώματος, προειδοποίηση ταχύτητας (Υβριδική)
156	15,6	Εκτροπές οχημάτων προς αμφοτέρους κατευθύνσεις	Υψηλή ταχύτητα σε ευθύ τμήμα & περιορισμένα περιθώρια λόγω στηθαίου	Ενισχυμένη διαγράμμιση, ανακλαστικά στοιχεία, τοπική προειδοποίηση ταχύτητας (Non-ICT ή/ & στοιχεία Υβριδικής)
37	14,4	Συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων σε επικίνδυνους ελιγμούς	Κυκλοφοριακή πολυπλοκότητα & αλληλεπίδραση αστικού ιστού	Έξυπνος φωτισμός, VMS, τοπικό σύστημα παρακολούθησης κυκλοφορίας (Υβριδική)

### **ΧΘ 49+000**

Για την ανάλυση των ατυχημάτων στη ΧΘ 49+000, ακολουθεί ο Πίνακας 22 με τα βασικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες εκδήλωσής τους.

**Πίνακας 22. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 49+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

<b>ΧΘ</b>	<b>Μήνας / Έτος / Ώρα</b>	<b>Τύπος ατυχήματος</b>	<b>Καιρ. συνθήκες</b>	<b>Οδόστρωμα</b>	<b>Φωτισμός</b>	<b>Γεωμετρία οδού</b>	<b>Πιθανή αιτία</b>	<b>Παθόντες</b>
<b>49.0</b>	08/ 2015 / 15:00	Σύγκρουση κινούμενων οχημάτων Πλαγιομετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμία	Εξοδος από το ρεύμα κυκλοφορίας	1 νεκ.
<b>49.3</b>	05 / 2017 / 02:00	Εκτροπή προς τα δεξιά	Καλοκαιρία	Κανονικό	Χωρίς εγκατάσταση φωτισμού	Μη ευθυγραμμία	Κανονική πορεία	1 νεκ.
<b>49.2</b>	03 / 2019 / 14:00	Πρόσκρουση οχήματος σε Σταθμευμένο όχημα	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμία	Εξοδος από το ρεύμα κυκλοφορίας	1 ελ. τρ.
<b>49.0</b>	06 / 2022 / 17:00	Μετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Ευθυγραμμία	Είσοδος στο αντίθετο ρεύμα	1 νεκ, 2 βαρ. τρ., 2 ελ.
<b>49.0</b>	08 / 2022 / 15:00	Σύγκρουση κινούμενων οχημάτων Πλαγιομετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Ευθυγραμμία	Είσοδος στο ρεύμα κυκλοφορίας	1 νεκ.

Η ΧΘ 49+000 αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο του άξονα, καθώς συγκεντρώνει τον μεγαλύτερο αριθμό περιστατικών (4 δυστυχήματα και 1 ατύχημα), και υψηλή σοβαρότητα συνεπειών (4 νεκροί, 2 βαριά και 3 ελαφρά τραυματίες), όπως καταγράφηκε και με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη επικινδυνότητας Δ στον άξονα (26.6). Από τα καταγεγραμμένα περιστατικά προκύπτει ότι στο σημείο εμφανίζονται διαφορετικοί τύποι ατυχημάτων, όπως πλαγιομετωπικές και μετωπικές συγκρούσεις, αλλά και εκτροπές από την πορεία.



Εικόνα 19. Γεωμετρία ΒΟΑΚ στη ΧΘ49+000



Εικόνα 20. Κοντινή απεικόνιση των ΧΘ49+000, 49+200 και 49+300

Κοινό στοιχείο στα περισσότερα περιστατικά είναι η μη ευθυγραμμία του οδικού τμήματος, καθώς και η εμφάνιση ενεργειών όπως η είσοδος στο αντίθετο ρεύμα ή η έξοδος από το ρεύμα κυκλοφορίας. Η γεωμετρία του τμήματος, όπως αποτυπώνεται στις εικόνες, δείχνει ήπια αλλά συνεχόμενη καμπυλότητα σε συνδυασμό με τμήματα που επιτρέπουν την ανάπτυξη ταχύτητας, ενώ η μετάβαση από ευθυγραμμία σε καμπύλη ίσως να μην γίνεται εύκολα αντιληπτή από τους οδηγούς. Επιβαρυντικό στοιχείο αποτελεί και η παρουσία πλευρικών προσβάσεων, η οποία αυξάνει την επικινδυνότητα και δημιουργεί πρόσθετα σημεία σύγκρουσης.

Τα ατυχήματα καταγράφονται κυρίως σε συνθήκες καλοκαιρίας και φυσικού φωτισμού, εκτός ενός ατυχήματος που συνέβη νυκτερινές ώρες και χωρίς φωτισμό, γεγονός που δείχνει ότι ο κίνδυνος δεν σχετίζεται με εξωτερικούς παράγοντες αλλά με τη λειτουργία του ίδιου του δρόμου. Η συνύπαρξη διαφορετικών τύπων συγκρούσεων και εκτροπών επιβεβαιώνει ότι το πρόβλημα στο σημείο είναι σύνθετο και σχετίζεται κυρίως με τη μειωμένη αναγνωσιμότητα της πορείας και τη συμπεριφορά ή την αντιληπτική ικανότητα των οδηγών σε συνθήκες αυξημένης ταχύτητας.

Με βάση τα παραπάνω, το συγκεκριμένο σημείο απαιτεί συνδυασμό παρεμβάσεων που καλύπτουν τόσο την ορατότητα όσο και την έγκαιρη ενημέρωση των οδηγών.

**Προτεινόμενη παρέμβαση (Υβριδική):** Η εγκατάσταση έξυπνου φωτισμού και ενισχυμένης ανακλαστικής διαγράμμισης μπορεί να βελτιώσει την αντίληψη της πορείας, ενώ συστήματα δυναμικής προειδοποίησης (VMS) ή τοπικές υποδομές V2I μπορούν να συμβάλουν στην έγκαιρη ειδοποίηση για επικίνδυνες συνθήκες. Η περίπτωση αυτή βασίζεται σε συνδυασμό φυσικών και ψηφιακών παρεμβάσεων.

### **XΘ 115+500**

Για την ανάλυση των ατυχημάτων στη XΘ 115+500, ακολουθεί ο Πίνακας 23 με τα βασικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες εκδήλωσής τους.

**Πίνακας 23. Συνθήκες ατυχημάτων στη XΘ 115+500 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

<b>XΘ</b>	<b>Μήνας / Έτος / Ώρα</b>	<b>Τύπος ατυχήματος</b>	<b>Καιρ. συνθήκες</b>	<b>Οδόστρωμα</b>	<b>Φωτισμός</b>	<b>Γεωμετρία οδού</b>	<b>Πιθανή αιτία</b>	<b>Παθόντες</b>
<b>115.5</b>	01 / 2018 / 15:00	Σύγκρουση κινούμενων οχημάτων Πλαγιομετωπική	Βροχή	Υγρό - βρεγμένο	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμία	Είσοδος στο αντίθετο ρεύμα	3 νεκροί, 1 βαριά τραυματίας, 3 ελαφρά τραυματίες
<b>115.5</b>	08 / 2021 / 17:00	Μετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμία	Είσοδος στο αντίθετο ρεύμα	3 ελαφρά τραυματίες

Στη XΘ 115+500 παρά τον μικρό αριθμό περιστατικών (1 δυστύχημα και 1 ατύχημα), παρουσιάζεται υψηλή σοβαρότητα συνεπειών (3 νεκροί, 1 βαριά και 6 ελαφρά τραυματίες), η οποία αποτυπώνεται στην τιμή του δείκτη Δ (22.1). Τα δύο περιστατικά εμφανίζουν σχετικά ομοιογενές πρότυπο. Και στα δύο καταγεγραμμένα περιστατικά παρατηρείται είσοδος στο αντίθετο ρεύμα κυκλοφορίας, η οποία οδηγεί σε συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων. Και τα δύο ατυχήματα σημειώθηκαν στο ρεύμα από Ρέθυμνο προς Ηράκλειο (δυτικά προς ανατολικά), σε τμήμα όπου προηγείται δεξιά καμπύλη χωρίς παρουσία

διαχωριστικού στηθαίου, στοιχείο που αυξάνει την πιθανότητα απώλειας ελέγχου των οχημάτων, λόγω υπερβολικής ταχύτητας.



Εικόνα 21. Γεωμετρία ΒΟΑΚ στη ΧΘ 115+500

Το πρώτο ατύχημα καταγράφηκε σε συνθήκες βροχής και υγρού οδοστρώματος, γεγονός που ενισχύει περαιτέρω την πιθανότητα ολίσθησης και απώλειας πρόσφυσης. Ωστόσο, και στο δεύτερο περιστατικό, το οποίο συνέβη σε κανονικές συνθήκες, εμφανίζεται το ίδιο βασικό αίτιο. Η επανάληψη του ίδιου μηχανισμού υποδηλώνει ότι ο καθοριστικός παράγοντας δεν περιορίζεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά σχετίζεται κυρίως με τη γεωμετρία του τμήματος. Η συστηματική εμφάνιση συγκρούσεων λόγω εισόδου στο αντίθετο ρεύμα αναδεικνύει την ανάγκη ενίσχυσης του διαχωρισμού των ρευμάτων κυκλοφορίας και της καθοδήγησης της πορείας των οχημάτων.

**Προτεινόμενη παρέμβαση (Υβριδική):** Σε επίπεδο υποδομής, η χρήση ανακλαστικών στοιχείων και ενισχυμένης διαγράμμισης στην καμπύλη μπορεί να βελτιώσει την οπτική καθοδήγηση. Επιπρόσθετα, επιλεκτικές ψηφιακές εφαρμογές, όπως προειδοποιητικά συστήματα μεταβλητών μηνυμάτων (VMS) ή αισθητήρες κατάστασης οδοστρώματος, μπορούν να υποστηρίξουν την έγκαιρη προσαρμογή της ταχύτητας από τους οδηγούς. Το συγκεκριμένο σημείο εντάσσεται, συνεπώς, σε υβριδική κατηγορία παρεμβάσεων.

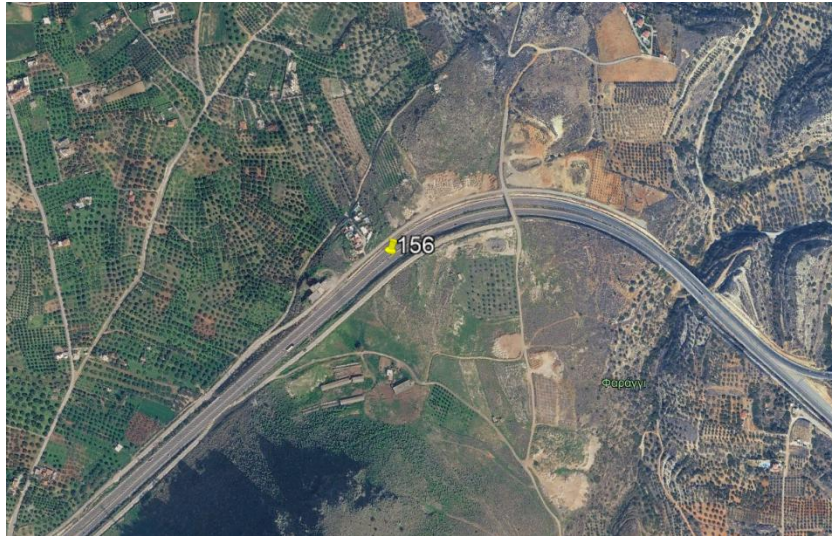
### **ΧΘ 156+000**

Για την ανάλυση των ατυχημάτων στη ΧΘ 156+000, ακολουθεί ο Πίνακας 24 με τα βασικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες εκδήλωσής τους.

**Πίνακας 24. Συνθήκες ατυχημάτων στη ΧΘ 156+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

<b>ΧΘ</b>	<b>Μήνας / Έτος / Ώρα</b>	<b>Τύπος ατυχήματος</b>	<b>Καιρ. συνθήκες</b>	<b>Οδόστρωμα</b>	<b>Φωτισμός</b>	<b>Γεωμετρία οδού</b>	<b>Πιθανή αιτία</b>	<b>Παθόντες</b>
<b>156.0</b>	07 / 2019 / 11:00	Εκτροπή προς τα αριστερά	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμί	Υπερβολική ταχύτητα	1 νεκ., 1 ελ. τρ.
<b>156.0</b>	07 / 2019 / 08:00	Εκτροπή προς τα αριστερά	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Μη ευθυγραμμία	Υπερβολική ταχύτητα	1 νεκ.
<b>156.0</b>	06 / 2022 / 20:00	Ανατροπή στην οδό	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Ευθυγραμμία	Μη καθορισμένο	1 νεκ.
<b>156.0</b>	07 / 2022 / 14:00	Εκτροπή προς τα δεξιά	Καλοκαιρία	Κανονικό	Φυσικός ημέρας	Ευθυγραμμία	Έξοδος από το ρεύμα κυκλοφορίας	1 βαρ. τρ.

Στη ΧΘ 156+000 καταγράφονται 4 περιστατικά (3 δυστυχήματα και 1 ατύχημα) με υψηλή σοβαρότητα συνεπειών (3 νεκροί, 1 βαριά και 1 ελαφρά τραυματίες) και τιμή του δείκτη Δ (15.6). Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι πρόκειται για περιστατικά εκτροπής, τα οποία εμφανίζονται τόσο προς τα αριστερά όσο και προς τα δεξιά. Ως πιθανή αιτία καταγράφεται η υπερβολική ταχύτητα ή η έξοδος από το ρεύμα κυκλοφορίας.



**Εικόνα 22. Απεικόνιση της εκτιμώμενης λόγω απουσίας σήμανσης ΧΘ 156+000**

Τα ατυχήματα συμβαίνουν σε συνθήκες κανονικού καιρού και κυρίως σε ευθύ ή ελαφρώς καμπύλο τμήμα της οδού. Η γεωμετρία του σημείου, όπως αποτυπώνεται στις εικόνες, χαρακτηρίζεται από σχετικά ευθύγραμμη χάραξη που ευνοεί την ανάπτυξη ταχύτητας, σε συνδυασμό με περιορισμένα οπτικά ερεθίσματα για τον οδηγό. Σημειώνεται ότι η ύπαρξη διαχωριστικού στηθαίου στο μέσο της οδού αποτρέπει την είσοδο στο αντίθετο ρεύμα, ωστόσο περιορίζει τα περιθώρια διόρθωσης της πορείας σε περίπτωση απόκλισης, με αποτέλεσμα η απώλεια ελέγχου να οδηγεί άμεσα σε εκτροπή ή ανατροπή.



**Εικόνα 23. Παρουσία διαχωριστικού στηθαίου στην ΧΘ 156+000**

Το γεγονός ότι τα ατυχήματα εμφανίζονται και στις δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας, όπως προκύπτει από τα δεδομένα, ενισχύει την εκτίμηση ότι το πρόβλημα δεν σχετίζεται με συγκεκριμένη κατεύθυνση ή εξωτερικούς παράγοντες, αλλά με τη συνολική δυναμική της κίνησης και τη δυσκολία διατήρησης σταθερής πορείας σε συνθήκες αυξημένης ταχύτητας.

Η κυριαρχία εκτροπών λόγω απώλειας ελέγχου δείχνει ότι το βασικό πρόβλημα σχετίζεται με τη διατήρηση της πορείας των οχημάτων.

**Προτεινόμενη παρέμβαση (Non-ICT ή/και Υβριδική):** Στην περίπτωση αυτή, προτεραιότητα έχουν παρεμβάσεις μη ψηφιακού χαρακτήρα, όπως η βελτίωση της διαγράμμισης, εγκατάσταση rumble strips πριν από το σημείο και η ενίσχυση της οπτικής καθοδήγησης. Συμπληρωματικά, μπορούν να εφαρμοστούν απλές υβριδικές λύσεις, όπως τοπικά συστήματα προειδοποίησης ταχύτητας ή ανακλαστικά στοιχεία αυξημένης έντασης σε μια Non-ICT στρατηγική με περιορισμένη ενσωμάτωση έξυπνων στοιχείων.

### **XΘ 37+000**

Για την ανάλυση των ατυχημάτων στη XΘ 37+000, ακολουθεί ο Πίνακας 25 με τα βασικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες εκδήλωσής τους.

**Πίνακας 25. Συνθήκες ατυχημάτων στη XΘ 37+000 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ)**

<b>XΘ</b>	<b>Μήνας / Έτος / Ωρα</b>	<b>Τύπος ατυχήματος</b>	<b>Καιρ. συνθήκες</b>	<b>Οδόστρωμα</b>	<b>Φωτισμός</b>	<b>Γεωμετρία οδού</b>	<b>Πιθανή αιτία</b>	<b>Παθόντες</b>
<b>37.0</b>	04 / 2018 / 20:00	Σύγκρουση κινούμενων οχημάτων Μετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Τεχνητός φωτισμός επαρκής	Μη ευθυγραμμία	Είσοδος στο αντίθετο ρεύμα	1 ελ. τρ.
<b>37.3</b>	09 / 2021 / 20:00	Σύγκρουση κινούμενων οχημάτων Νοτομετωπική	Καλοκαιρία	Κανονικό	Χωρίς εγκατάσταση φωτισμού	Ευθυγραμμία	Προσπέραση από δεξιά	2 νεκ., 5 ελ. τρ.

Στη XΘ 37+000 καταγράφονται 2 περιστατικά (1 δυστύχημα και 1 ατύχημα) με υψηλή σοβαρότητα συνεπειών (2 νεκροί και 6 ελαφρά τραυματίες) και τιμή του δείκτη Δ (14.4). Και στα δύο περιστατικά παρατηρείται επικίνδυνη συμπεριφορά που σχετίζεται με την κυκλοφορία, όπως η είσοδος στο αντίθετο ρεύμα ή η προσπέραση από δεξιά. Είναι αξιοσημείωτο ότι και τα δύο περιστατικά καταγράφονται στο ίδιο ρεύμα κυκλοφορίας (προς

Χανιά), γεγονός που υποδηλώνει ότι το πρόβλημα δεν είναι τυχαίο αλλά συνδέεται με τα τοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο τμήμα.



Εικόνα 24. Απεικόνιση της ΧΘ 37+000

Η γεωμετρία της περιοχής, όπως αποτυπώνεται στην εικόνα, χαρακτηρίζεται από την γειτνίαση με αστικό ιστό, με τοπικό οδικό δίκτυο και την παρουσία πλευρικών προσβάσεων. Η αυξημένη πυκνότητα εισόδων-εξόδων, η αλληλεπίδραση με την τοπική κυκλοφορία και η έντονη βλάστηση στα όρια της οδού, δημιουργούν συνθήκες αυξημένης επικινδυνότητας, όπου οι οδηγοί ενδέχεται να πραγματοποιούν επικίνδυνους ελιγμούς, όπως προσπεράσεις ή αλλαγές λωρίδας. Επιπρόσθετα η απουσία φωτισμού σε ένα από τα περιστατικά ενδέχεται να έχει επιβαρύνει την αντίληψη της κυκλοφορίας, ιδιαίτερα σε ένα περιβάλλον με αυξημένα οπτικά ερεθίσματα.

Η συνδυασμένη παρουσία επικίνδυνων ελιγμών και έντονης κυκλοφοριακής πολυπλοκότητας δείχνει ότι το βασικό πρόβλημα στο σημείο σχετίζεται με τη διαχείριση της κυκλοφορίας και τη συμπεριφορά των οδηγών. Απαιτούνται έτσι παρεμβάσεις που ενισχύουν τόσο την καθοδήγηση όσο και την ενημέρωση των χρηστών της οδού.

**Προτεινόμενη παρέμβαση (Υβριδική):** Η εγκατάσταση έξυπνου φωτισμού, σε συνδυασμό με προειδοποιητικές πινακίδες μεταβλητών μηνυμάτων (VMS), μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κινδύνου. Επιπλέον, η χρήση τοπικών συστημάτων παρακολούθησης ή ειδοποίησης μπορεί να ενισχύσει τη διαχείριση της κυκλοφορίας στο συγκεκριμένο σημείο. Η πρόταση είναι υβριδική, με έμφαση στις λύσεις ορατότητας και ενημέρωσης.

### **Βασικά πρότυπα ατυχημάτων**

Η ανάλυση των τεσσάρων χιλιομετρικών θέσεων δείχνει ότι δεν υπάρχει ενιαίο πρότυπο επικινδυνότητας κατά μήκος του άξονα. Κάθε σημείο παρουσιάζει διαφορετικό συνδυασμό συνθηκών και αιτιών.

Στη ΧΘ 49 εμφανίζεται σύνθετο πρότυπο με συνδυασμό συγκρούσεων και εκτροπών. Στη ΧΘ 115.5 κυριαρχούν συγκρούσεις που σχετίζονται με είσοδο στο αντίθετο ρεύμα. Στη ΧΘ 156 παρατηρούνται κυρίως εκτροπές λόγω απώλειας ελέγχου, ενώ στη ΧΘ 37 τα ατυχήματα συνδέονται με επικίνδυνους ελιγμούς και συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων.

Η διαφοροποίηση αυτή επιβεβαιώνει ότι οι παρεμβάσεις δεν μπορούν να είναι ενιαίες για όλο το μήκος του άξονα, αλλά πρέπει να προσαρμόζονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος.

**Πίνακας 26. Σύνοψη προτύπων ατυχημάτων και ενδεικτικών παρεμβάσεων**

<b>ΧΘ</b>	<b>Αριθμός ατυχημάτων</b>	<b>Κυρίαρχο πρότυπο ατυχήματος</b>	<b>Ενδεικτικές συνθήκες</b>	<b>Μηχανισμός κινδύνου</b>	<b>Ενδεικτικές παρεμβάσεις</b>
<b>49</b>	5	Συνδυασμός συγκρούσεων και εκτροπών	Μη ευθυγραμμία, πλευρικές προσβάσεις	Μειωμένη αναγνωσιμότητα πορείας, πολυπλοκότητα κυκλοφορίας	Έξυπνος φωτισμός, ενισχυμένη διαγράμμιση, VMS
<b>115.5</b>	2	Συγκρούσεις λόγω εισόδου στο αντίθετο ρεύμα	Καμπύλη, υγρό οδόστρωμα	Απώλεια ελέγχου σε καμπύλη, έλλειψη διαχωρισμού ρευμάτων	Ενίσχυση διαχωρισμού, οπτική καθοδήγηση, προειδοποίηση ταχύτητας
<b>156</b>	4	Εκτροπές οχημάτων	Υπερβολική ταχύτητα, ευθύ τμήμα	Υψηλή ταχύτητα, περιορισμένα περιθώρια διόρθωσης (στηθαίο)	Ενισχυμένη διαγράμμιση, οπτική καθοδήγηση, τοπική προειδοποίηση ταχύτητας
<b>37</b>	2	Συγκρούσεις μεταξύ οχημάτων	Επικίνδυνοι ελιγμοί,	Κυκλοφοριακή πολυπλοκότητα,	Έξυπνος φωτισμός, VMS,

		αστικός ιστός	αλληλεπίδραση τοπικού δικτύου	διαχείριση κυκλοφορίας
--	--	------------------	----------------------------------	---------------------------

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι τα κρίσιμα σημεία του BOAK δεν παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά, αλλά διαφορετικά πρότυπα ατυχημάτων που συνδέονται με τη γεωμετρία, την ταχύτητα και τη λειτουργία της κυκλοφορίας. Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι καθοριστική για την επιλογή κατάλληλων παρεμβάσεων, ώστε κάθε λύση να ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες του κάθε τμήματος. Με βάση τα ευρήματα αυτά, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και προτείνονται κατευθύνσεις για την εφαρμογή των Smart Roads τεχνολογιών στον BOAK.

### 6.5. Συνθετική επισκόπηση

Η ανάλυση των τεσσάρων κρίσιμων χιλιομετρικών θέσεων επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει ενιαίος μηχανισμός κινδύνου στον BOAK. Κάθε θέση απαιτεί διαφορετικό συνδυασμό παρεμβάσεων, που αντικατοπτρίζει τις τοπικές γεωμετρικές, περιβαλλοντικές και κυκλοφοριακές ιδιαιτερότητες. Η κοινή αρχή που διέπει όλες τις προτάσεις είναι η αναλογικότητα δηλαδή η παρέμβαση να επιλέγεται με βάση τη φύση του προβλήματος, όχι τη διαθεσιμότητα ή την πολυπλοκότητα της τεχνολογίας.

Στο σύνολό τους, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις ακολουθούν μια κλιμακωτή λογική με προτεραιότητα στις Non-ICT λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα και αξιόπιστα, στη συνέχεια οι υβριδικές που προσθέτουν δυναμικότητα στις κρίσιμες θέσεις, και σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα η ψηφιακή ολοκλήρωση που επιτρέπει συστημική διαχείριση. Η σταδιακή αυτή λογική είναι συμβατή με τους πρακτικούς και θεσμικούς περιορισμούς ενός υφιστάμενου οδικού άξονα όπως ο BOAK.

Το σύνολο των προτεινόμενων παρεμβάσεων και το πλαίσιο σταδιακής μετάβασης αποδίδουν απάντηση στο EE5.

## 7. Προκλήσεις και περιορισμοί των Smart Roads

Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την αναβάθμιση της ασφάλειας μιας υφιστάμενης υποδομής φαντάζει ως η βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτών των τεχνολογιών έρχεται συχνά αντιμέτωπη με σημαντικές προκλήσεις και περιορισμούς, που επηρεάζουν την τελική τους απόδοση κι ενδεχομένως να έχουν κι αντίθετα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τις ΤΠΕ (ICT-Related) καλούνται να διαχειριστούν σύνθετα ζητήματα κυβερνοασφάλειας, ιδιωτικότητας και διαλειτουργικότητας των συστημάτων. Από την άλλη πλευρά, οι παρεμβάσεις που δεν σχετίζονται με τις ΤΠΕ (Non-ICT-Related) περιορίζονται συχνά από τη φυσική κατάσταση του δρόμου και τις ανάγκες συντήρησης.

### 7.1. ICT-Related Προκλήσεις στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS)

#### Προκλήσεις κυβερνοασφάλειας

Η χρήση τεχνολογιών ICT φέρνει εξαρχής στο προσκήνιο ζητήματα ασφάλειας, λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν αυτά τα συστήματα. Η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οχημάτων, υποδομών και κέντρων ελέγχου απαιτεί υψηλή συνδεσιμότητα και δημιουργεί νέα σημεία ευπάθειας. Με την υιοθέτηση αρχιτεκτονικών αρχιτεκτονικές V2X και IoT, οι κίνδυνοι επεκτείνονται σε όλα τα επίπεδα επικοινωνίας (όχημα-όχημα, όχημα-υποδομή, υποδομή-υποδομή). Έτσι, η κυβερνοασφάλεια γίνεται κρίσιμος παράγοντας για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο και όχι απλώς τεχνική λεπτομέρεια (Mecheva & Kakanakov, 2020).

Στη βιβλιογραφία καταγράφεται ένα ευρύ φάσμα απειλών, από επιθέσεις πλαστοπροσωπίας (Spoofing), παραχάραξης της παραγματικής κυκλοφορίας (Sybil attack), παρεμβολές τύπου man-in-the-middle και άλλες. Οι Hahn κ.ά. (2021) αναφέρουν ότι ένα κακόβουλο όχημα μπορεί να εκτελέσει επίθεση man-in-the middle υποκλέπτοντας τα μηνύματα ασφαλείας μεταξύ δύο οχημάτων τροποποιώντας το περιεχόμενο πριν προωθήσει τα μηνύματα σε άλλα οχήματα. Τέτοιες επιθέσεις μπορούν να αλλοιώσουν ή να καθυστερήσουν κρίσιμα μηνύματα V2X, επηρεάζοντας άμεσα τα επίπεδα της οδικής ασφάλειας. Σε περιβάλλοντα όπου τα οχήματα και οι υποδομές συνεργάζονται και οι αποφάσεις απαιτείται να λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην αξιοπιστία της πληροφορίας ενδέχεται να οδηγήσουν σε επικίνδυνες καταστάσεις.

Στο επίπεδο οχήματος, οι κίνδυνοι σχετίζονται με τα εσωτερικά δίκτυα. Στα σύγχρονα οχήματα, η επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων πραγματοποιείται μέσω εσωτερικών δικτύων δεδομένων. Το CAN (Controller Area Network) είναι το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ μονάδων ελέγχου του οχήματος, αλλά δεν υποστηρίζει εμπιστευτικότητα, αυθεντικοποίηση και ακεραιότητα μηνυμάτων (Koscher, 2010 όπως αναφ. στο Kelarestaghi κ.ά., 2021). Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που ένας κακόβουλος εισβολέας αποκτήσει πρόσβαση στο ενδοοχηματικό δίκτυο, μπορεί να παρακάμψει τα συστήματα ελέγχου του οχήματος.

Στο επίπεδο της οδικής υποδομής, ιδιαίτερη ευπάθεια παρουσιάζουν οι μονάδες οδικής πλευράς (RSUs), είτε άμεσα είτε έμμεσα. Οι Harvey & Kumar (2020) περιγράφουν περιγράφουν μια επίθεση όπου ένα όχημα διοχετεύει ψευδή δεδομένα θέσης, οδηγώντας σε λάθος πληροφορίες που διαδίδονται σε άλλα οχήματα ή άλλες RSU.

Η παραβίαση μιας τέτοιας μονάδας μπορεί να προκαλέσει μαζική διάδοση παραποιημένων μηνυμάτων και να επηρεαστούν πολλά οχήματα ταυτόχρονα. Το πρόβλημα εντείνεται από το γεγονός ότι οι RSUs βρίσκονται σε δημόσιους, συχνά απροστάτευτους χώρους, άρα είναι πιο εκτεθειμένες σε φυσικές παρεμβάσεις. Έτσι, η προστασία τους συχνά υστερεί σε σχέση με των οχημάτων, δημιουργώντας ανισορροπία στο συνολικό επίπεδο ασφάλειας.

Η πολυπλοκότητα των ITS αυξάνει τα ζητήματα ασφάλειας καθώς ο συνδυασμός διαφορετικών αισθητήρων, πρωτοκόλλων και λειτουργικών συστημάτων δημιουργεί περισσότερα πιθανά σημεία εισόδου για επιθέσεις και δυσκολεύει τη διαχείριση. Επίσης η ανάγκη για συχνές ενημερώσεις λογισμικού και συνεχή παρακολούθηση αυξάνει τόσο την τεχνική δυσκολία όσο και το λειτουργικό κόστος.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις μεταξύ των οποίων είναι και η αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής. Οι Lv κ.ά. (2021) αναφέρουν στην έρευνά τους ότι οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης (deep learning) μπορούν να μειώσουν σημαντικά την καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων του συστήματος και να βελτιώσουν την ακρίβεια πρόβλεψης γεγονότων.

Ειδικότερα τον BOAK, όπου δεν υπάρχει υφιστάμενη ψηφιακή υποδομή, αυτό σημαίνει ότι κάθε νέο ICT σύστημα θα πρέπει να σχεδιάζεται εξ αρχής με ενσωματωμένη κυβερνοασφάλεια. Η απουσία κεντρικού ελέγχου αφήνει εκτεθειμένες τις εγκαταστάσεις (π.χ. RSUs, αισθητήρες), ενώ η φυσική προστασία τους σε απομακρυσμένα σημεία είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

### Προκλήσεις ιδιωτικότητας και προστασίας δεδομένων

Η ιδιωτικότητα αποτελεί μία από τις πιο σύνθετες προκλήσεις στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών, καθώς η λειτουργία τους προϋποθέτει συνεχή συλλογή και επεξεργασία δεδομένων που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τη συμπεριφορά των χρηστών του δρόμου. Πληροφορίες όπως θέση, χρονική ακολουθία μετακινήσεων και συνήθειες κυκλοφορίας είναι κρίσιμες για εφαρμογές ασφάλειας, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τον κίνδυνο αποκάλυψης προσωπικών δεδομένων (Ghane κ.ά., 2021; Lederman κ.ά., 2016).

Σύμφωνα με την έρευνα των Sui κ.ά. (2017) η προστασία της ιδιωτικότητας στα ITS δεν επιτυγχάνεται μόνο με αφαίρεση αναγνωριστικών στοιχείων. Τα δεδομένα μετακίνησης (θέση, χρόνος) μπορούν από μόνα τους να αποκαλύψουν συνήθειες διότι μέσω επαναλαμβανόμενων μοτίβων, όπως διαδρομές και σημεία στάθμευσης, είναι δυνατή η επαναταυτοποίηση ακόμη και σε ανώνυμα δεδομένα. Γι' αυτό προτείνονται πιο σύνθετες μέθοδοι που περιορίζουν τη συσχέτιση των πληροφοριών, ώστε να μειώνεται η δυνατότητα σύνδεσης τους με συγκεκριμένους χρήστες. Η προστασία της ιδιωτικότητας απαιτεί επιπλέον επεξεργασία και μπορεί να αυξήσει τις καθυστερήσεις. Σε εφαρμογές όπου οι αποφάσεις πρέπει να λαμβάνονται άμεσα, όπως στην οδική ασφάλεια, αυτές οι καθυστερήσεις επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Η προστασία της ιδιωτικότητας αποτελεί βασικό ζήτημα στην έρευνα και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις. Οι Ying κ.ά. (2022) προτείνουν και σχεδιάζουν μια εφαρμογή που ενσωματώνει μηχανισμούς προστασίας ήδη στη λήψη αποφάσεων, δείχνοντας ότι η ιδιωτικότητα πρέπει να αποτελεί βασική παράμετρο στον σχεδιασμό των συστημάτων.

Εστιάζοντας σε έναν άξονα με έντονη τοπική χρήση όπως ο ΒΟΑΚ, η εμπιστοσύνη των χρηστών στα συστήματα είναι εξίσου κρίσιμη με την τεχνική τους λειτουργία. Η συλλογή δεδομένων κίνησης σε έναν σχετικά μικρό πληθυσμό χρηστών, όπως οι μόνιμοι κάτοικοι και οι επαγγελματίες οδηγοί που χρησιμοποιούν τον ΒΟΑΚ καθημερινά, αυξάνει τον κίνδυνο επαναταυτοποίησης, ακόμη και με ανωνυμοποιημένα δεδομένα.

Η ιδιωτικότητα στα ITS δεν προστατεύεται με μεμονωμένες λύσεις αλλά απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, καθώς η απώλεια εμπιστοσύνης των χρηστών μπορεί να λειτουργήσει ανασταλτικά για την αποδοχή των τεχνολογιών Smart Roads.

### Προκλήσεις διαλειτουργικότητας και ετερογένειας συστημάτων

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών, καθώς τα ITS δεν είναι ενιαία συστήματα, αλλά σύνολα ετερογενών τεχνολογιών που περιλαμβάνουν οχήματα, υποδομές, αισθητήρες, δίκτυα επικοινωνίας και πλατφόρμες επεξεργασίας δεδομένων. Όλο αυτό το ψηφιδωτό που συνθέτει το οικοσύστημα των ITS δημιουργεί προβλήματα συμβατότητας και συνέπειας των δεδομένων.

Η επικοινωνία βασίζεται σε διαφορετικά πρότυπα (π.χ. IEEE 802.11p, κυψελωτά δίκτυα, GPS), που δεν είναι πάντα πλήρως συμβατά. Κάθε τεχνολογία έχει διαφορετική καθυστέρηση και αξιοπιστία, γεγονός που δυσκολεύει την άμεση ανταλλαγή αξιόπιστων πληροφοριών στοιχείο κρίσιμο για εφαρμογές ασφάλειας (Maimaris & Papageorgiou, 2016; Picone κ.ά., 2015).

Το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο σε υφιστάμενα δίκτυα όπως ο ΒΟΑΚ, που δεν σχεδιάστηκαν για τέτοιες τεχνολογίες και η εγκατάσταση νέων συστημάτων γίνεται συχνά αποσπασματικά και με περιορισμούς στη λειτουργία τους. Έτσι, τα ζητήματα διαλειτουργικότητας δεν αφορούν μόνο τα συστήματα, αλλά και την ίδια την υποδομή.

Στην πράξη, κάθε νέο σύστημα στον ΒΟΑΚ πρέπει να εντάσσεται σε ενιαίο σχεδιασμό με δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης διαφορετικά θα δημιουργούνται «νησίδες τεχνολογίας» που θα λειτουργούν απομονωμένα και δεν θα ανταλλάσσουν αποτελεσματικά δεδομένα.

### Προκλήσεις μεγάλων δεδομένων, ποιότητας πληροφορίας και λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο

Με τον όρο Big Data εννοούμε τεράστιους όγκους δεδομένων που ρέουν μεταξύ των μερών ενός ψηφιακού οικοσυστήματος. Η ενσωμάτωσή τους στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) έχει μεταβάλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, αποθηκεύονται και αναλύονται τα δεδομένα. Ο όγκος και η ταχύτητα παραγωγής τους είναι σήμερα πολύ μεγαλύτερα σε σχέση με το παρελθόν, γεγονός που δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για τα συστήματα διαχείρισης μεταφορών. Οι Torre-Bastida κ.ά. (2018) επισημαίνουν χαρακτηριστικά ότι λόγω του όγκου, της ποικιλίας (πηγή, τύπος και μορφή) και της μεταβλητότητας των δεδομένων που συγκεντρώνονται, εργασίες που απαιτούν μεγάλη χρήση δεδομένων, όπως η ενοποίηση, η οπτικοποίηση, η αναζήτηση και η ανάλυση για

συστήματα μεγάλης κλίμακας σε πραγματικό χρόνο, αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στο σχεδιασμό και την υλοποίηση των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών (ITS). Τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρες, GPS, κινητές συσκευές, IoT και ανοικτές βάσεις και διαφέρουν σε μορφή και ακρίβεια. Η ετερογένεια αυτή απαιτεί διαδικασίες συνδυασμού και ενοποίησης, ώστε τα δεδομένα να μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Εφαρμογές όπως π.χ. ο έλεγχος κυκλοφορίας, η διαχείριση διοδίων και η πρόβλεψη συμφόρησης απαιτούν άμεση ανάλυση ροών δεδομένων. Η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο εγείρει επίσης ζήτηματα ορθού προσδιορισμού και αξιοποίησης των Big Data. Οι Lian κ.ά. (2020) επισημαίνουν ότι είναι απαραίτητος ο ποσοτικός και ποιοτικός προσδιορισμός των Big Data και πόσα από τα εισερχόμενα δεδομένα είναι επαρκή για αξιόπιστη ανάλυση. Η ανεπαρκής ποσότητα δεδομένων δύναται να οδηγήσει σε ανακριβείς πληροφορίες, ενώ η υπερβολική χρήση τους ενδέχεται να επιβαρύνει άσκοπα τους διαθέσιμους πόρους.

Στον ΒΟΑΚ, όπου τα δεδομένα ατυχημάτων είναι ήδη περιορισμένα σε όγκο, η ποιότητα και η αξιοπιστία τους αποκτά μεγαλύτερη σημασία από την ποσότητα. Αυτό ενισχύει την ανάγκη για στοχευμένη και όχι μαζική συλλογή δεδομένων, με έμφαση στις χιλιομετρικές θέσεις που έχουν ήδη αναδειχθεί ως υψηλής επικινδυνότητας.

#### Προκλήσεις αξιοπιστίας δικτύων, καθυστέρησης και κλιμάκωσης

Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) αποτελούν ένα μεγάλο δίκτυο ανταλλαγής δεδομένων και πληροφοριών. Μια μικρότερης κλίμακας αναπαράστασή τους θα μπορούσε να είναι ένα οικιακό δίκτυο ή ένα δίκτυο μιας εταιρείας. Η ανταλλαγή αξιόπιστων πληροφοριών μεταξύ συσκευών είναι βασική για τη σωστή λειτουργία τους. Ειδικότερα στις μεταφορές, τα δίκτυα αυτά μεταδίδουν κρίσιμες πληροφορίες ασφάλειας, όπως προειδοποιήσεις κινδύνου μεταξύ οχημάτων και υποδομών. Η αξιόπιστη και αποδοτική επικοινωνία αποτελεί προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία των ITS.

Μαζί με την αξιοπιστία, η καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ασφαλείας. Οι Qureshi κ.ά. (2022) επισημαίνουν ότι οι τεχνικές κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης, αν και απαραίτητες για την προστασία των επικοινωνιών, εισάγουν πρόσθετο υπολογιστικό και χρονικό κόστος. Σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, η επιβάρυνση αυτή μπορεί να επηρεάσει την έγκαιρη παράδοση μηνυμάτων ασφαλείας κι ως εκ τούτου να μειώσει τα επίπεδα ασφαλείας των μεταφορών.

Εξίσου σημαντική πρόκληση αποτελεί η κλιμάκωση του δικτύου, δηλαδή η προσθήκη κόμβων σε ένα υφιστάμενο δίκτυο. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι πολλά συστήματα ITS αποδίδουν ικανοποιητικά σε τοπική κλίμακα, ωστόσο παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα όταν ο αριθμός των συνδεδεμένων οχημάτων και υποδομών αυξάνεται σημαντικά.

Στον ΒΟΑΚ, που εκτείνεται σε 312 km και παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στον κυκλοφοριακό φόρτο μεταξύ τουριστικής και χειμερινής περιόδου, η κλιμάκωση είναι κρίσιμο ζήτημα. Ένα σύστημα που λειτουργεί ικανοποιητικά σε πιλοτικό τμήμα μπορεί να εμφανίσει προβλήματα αξιοπιστίας και καθυστερήσεις όταν επεκταθεί σε όλο τον άξονα, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένη κάλυψη κινητής τηλεφωνίας.

#### Θεσμικές, ρυθμιστικές και διοικητικές προκλήσεις που σχετίζονται με τις ΤΠΕ

Η ανάπτυξη των Ευφώνων Συστημάτων Μεταφορών (ITS) δεν εξαρτάται μόνο από τεχνολογικούς παράγοντες, αλλά και από το θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργούν. Οι Lederman κ.ά. (2016) αναδεικνύουν ότι τα συστήματα ITS βασίζονται σε εκτεταμένη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων και διαπιστώνουν ότι η έλλειψη υφιστάμενων προτύπων, κανόνων και νόμων που διέπουν τη χρήση τέτοιων πληροφοριών μπορεί να εγείρει τόσο τα ζητήματα ιδιωτικότητας όσο και να εμποδίσει ενδεχομένως την εφαρμογή χρήσιμων τεχνολογιών ITS.

Επίσης οι Bakhtina κ.ά. (2024) υπογραμμίζουν ότι η σημασία οργανωμένων πολιτικών διαχείρισης ασφάλειας και οι διαδικασίες που πρέπει να έχουν οριστεί και να εφαρμόζονται συμβάλλουν στην αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων. Η απουσία σαφών και εναρμονισμένων προτύπων μπορεί να οδηγήσει στη συνολική αποτυχία του συστήματος.

Επιπλέον οι Harvey & Kumar (2020) τονίζουν την σημασία της συνεργασίας μεταξύ χωρών κι επισημαίνουν ότι τα γειτονικά κράτη χρειάζεται να συντονίζουν τα πλαίσια ITS, ώστε να αποφεύγονται ασυμβατότητες. Η ανταλλαγή γνώσης και πληροφοριών ενισχύει την αντιμετώπιση κυβερνοαπειλών και την ενημέρωση των χρηστών. Η υλοποίηση των ITS προϋποθέτει συντονισμό μεταξύ πολλών εμπλεκόμενων φορέων, ώστε να καθοριστεί ένα σαφές θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο που θα διασφαλίζει την αποτελεσματική και επιτυχή εφαρμογή τους.

Στην περίπτωση του ΒΟΑΚ, οι παραπάνω θεσμικές, ρυθμιστικές και διοικητικές προκλήσεις που σχετίζονται με τις ΤΠΕ εμφανίζονται πιο έντονα. Ο άξονας δεν διαθέτει

ενιαία ψηφιακή υποδομή και παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις στον κυκλοφοριακό φόρτο. Η εφαρμογή ICT λύσεων απαιτεί επομένως σταδιακή ανάπτυξη και προσεκτική επιλογή σημείων παρέμβασης, όπως προκύπτει και από την ανάλυση στο Κεφάλαιο 5.

## **7.2. Non-ICT προκλήσεις στην εφαρμογή Smart Roads**

Από τα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτει ότι τα Smart Roads δεν βασίζονται μόνο στις ΤΠΕ, αλλά και σε συμβατικές παρεμβάσεις. Και αυτές όμως αντιμετωπίζουν περιορισμούς που σχετίζονται με τη φυσική υποδομή, τη συντήρηση και την οργανωτική ικανότητα, επηρεάζοντας την αποτελεσματικότητα των ITS, ιδιαίτερα σε υφιστάμενα δίκτυα.

Οι Non-ICT τεχνολογίες εξαρτώνται από το περιβάλλον και τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά, με τις κλιματικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία και βροχόπτωση, να επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των υλικών και τη λειτουργία του οδοστρώματος. Αντίστοιχα, η γεωμορφολογία (ορεινά τμήματα, καμπύλες, κλίσεις) απαιτεί προσαρμοσμένες παρεμβάσεις, όπως ενισχυμένη σήμανση και αντιολισθητικά υλικά. Στον ΒΟΑΚ, οι έντονες γεωγραφικές συνθήκες και τα καιρικά φαινόμενα καθιστούν κρίσιμη την επιλογή κατάλληλων λύσεων. Επιπλέον, μελέτες δείχνουν ότι η ανακλαστικότητα των διαγραμμίσεων μπορεί να μειωθεί σημαντικά μέσα σε λίγα χρόνια σε οδούς υψηλής κυκλοφορίας, ιδίως όταν συνδυάζεται με έντονη ηλιακή έκθεση και εποχιακές αιχμές κυκλοφορίας όπως αυτές που χαρακτηρίζουν τον ΒΟΑΚ κατά την τουριστική περίοδο.

Η κατάσταση της υποδομής είναι εξίσου σημαντική, καθώς η ποιότητα του οδοστρώματος, η γεωμετρία και η ορατότητα επηρεάζουν άμεσα την απόδοση των Smart Roads εφαρμογών. Σε φθαρμένα ή προβληματικά τμήματα, οι δυνατότητες των συστημάτων περιορίζονται από την ίδια την υποδομή.

Σε συνέχεια των προηγούμενων, η συντήρηση αποτελεί βασικό παράγοντα. Στοιχεία υποδομής που δεν συντηρούνται συστηματικά, όπως ανακλαστήρες που έχουν υποστεί ζημία ή διαγραμμίσεις που έχουν ξεθωριάσει, δεν οδηγούν απλώς σε μειωμένη απόδοση αλλά ενδέχεται να δημιουργεί παραπλανητικά οπτικά ερεθίσματα που επιδεινώνουν την ασφάλεια αντί να την ενισχύουν. Η ανάγκη για συνεχή λειτουργία και τεχνική υποστήριξη αυξάνεται, ιδιαίτερα λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων, με το πρόβλημα να εντείνεται σε παλαιά δίκτυα όπως ο ΒΟΑΚ, που δεν έχουν σχεδιαστεί για τέτοιες τεχνολογίες.

Σημαντικό ρόλο παίζουν η οργανωτική επάρκεια των φορέων και το ανθρώπινο δυναμικό καθώς μπορούν να επηρεάσουν την ασφάλεια και τη βιωσιμότητα. Η έλλειψη εξειδίκευσης ή η κακή διαχείριση μπορεί να δημιουργήσει κινδύνους, ακόμη και από εσωτερικούς παράγοντες.

Η επιτυχία των Smart Roads εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα και ειδικότερα τους χρήστες του συστήματος. Η στάση των οδηγών απέναντι στα συστήματα, ο βαθμός κατανόησης της λειτουργίας τους και το επίπεδο εμπιστοσύνης προς τις παρεχόμενες πληροφορίες επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητά τους. Ιδιαίτερα σε οδηγούς που διανύουν καθημερινά την ίδια διαδρομή, όπως οι μόνιμοι κάτοικοι και οι επαγγελματίες που χρησιμοποιούν τον ΒΟΑΚ, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο της «εξοικείωσης», κατά το οποίο μόνιμα στοιχεία της υποδομής παύουν να προκαλούν την αναμενόμενη αντίδραση. Αν οι πληροφορίες αγνοούνται ή δεν θεωρούνται αξιόπιστες, η αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών περιορίζεται σημαντικά και επομένως τα Smart Roads θα αποδίδουν καλύτερα όταν οι παρεμβάσεις ενσωματώνονται ομαλά στο οδικό περιβάλλον.

Τέλος, μια πρόκληση που συχνά υποτιμάται αφορά τη δυσκολία αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των Non-ICT παρεμβάσεων. Σε αντίθεση με τα ICT συστήματα που παράγουν δεδομένα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, οι παθητικές παρεμβάσεις δεν διαθέτουν ενσωματωμένο μηχανισμό μέτρησης της απόδοσής τους. Η αξιολόγησή τους βασίζεται αποκλειστικά σε συγκρίσεις δεδομένων ατυχημάτων πριν και μετά την εφαρμογή, κάτι που απαιτεί εκτεταμένες χρονικές περιόδους παρατήρησης και ελλοχεύει κίνδυνο σύγχυσης με άλλες παράλληλες αλλαγές στο οδικό περιβάλλον. Για τον ΒΟΑΚ, αυτό σημαίνει ότι η αποτίμηση των παρεμβάσεων που προτείνονται στην παρούσα εργασία προϋποθέτει συστηματική παρακολούθηση των δεικτών ατυχημάτων σε βάθος χρόνου, με έμφαση στις χιλιομετρικές θέσεις που αναδείχθηκαν ως κρίσιμες.

## 8. Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

Οι προτάσεις προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων και την ιεράρχηση των χιλιομετρικών θέσεων, που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 15, καθώς και από τα χαρακτηριστικά των συμβάντων που αποτυπώθηκαν στον Πίνακα 16.

Η ανάλυση έδειξε ότι η επικινδυνότητα κατά μήκος του ΒΟΑΚ δεν κατανέμεται ομοιόμορφα. Ορισμένα τμήματα του άξονα παρουσιάζουν συγκέντρωση τροχαίων συμβάντων, ενώ άλλα χαρακτηρίζονται από μεμονωμένα αλλά ιδιαίτερα σοβαρά περιστατικά. Η διαφοροποίηση αυτή καθιστά μη ρεαλιστική την εφαρμογή μιας ενιαίας τεχνολογικής λύσης σε όλο το μήκος της οδού αναδεικνύοντας την ανάγκη για μια στοχευμένη εφαρμογή παρεμβάσεων, η οποία να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε τμήματος του άξονα.

Η επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 επέτρεψε τον εντοπισμό των χιλιομετρικών θέσεων του ΒΟΑΚ όπου συγκεντρώνεται αυξημένος αριθμός ατυχημάτων ή καταγράφονται ιδιαίτερα σοβαρές συνέπειες. Η αξιολόγηση αυτή βασίστηκε στον προσαρμοσμένο δείκτη επικινδυνότητας  $\Delta$ , ο οποίος συνδυάζει τη συχνότητα των ατυχημάτων με τη σοβαρότητα των παθόντων. Προέκυψε έτσι μια ιεραρχημένη αποτύπωση των επικίνδυνων σημείων του άξονα, καθώς και μια πρώτη σύνδεση με ενδεικτικές τεχνολογικές παρεμβάσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, το παρόν κεφάλαιο προχωρά σε μια συνθετική παρουσίαση των τεχνολογικών κατευθύνσεων που μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας στον ΒΟΑΚ.

Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις οργανώνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- τεχνολογίες που βασίζονται σε ψηφιακές υποδομές και συστήματα δεδομένων (ICT-based),
- παρεμβάσεις φυσικής υποδομής και υλικών (Non-ICT) και
- υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν στοιχεία των δύο προηγούμενων κατηγοριών.

Η διάκριση αυτή επιτρέπει μια πιο συστηματική παρουσίαση των διαθέσιμων επιλογών και διευκολύνει τη σύνδεσή τους με τα διαφορετικά προβλήματα που εντοπίστηκαν κατά μήκος του άξονα. Έτσι οι τεχνολογικές λύσεις δεν εξετάζονται ως μεμονωμένες εφαρμογές αλλά ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής παρέμβασης. Η στρατηγική που προτείνεται

βασίζεται σε τρία επίπεδα παρέμβασης, τα οποία συνδέονται με τη φύση του προβλήματος που καταγράφηκε σε κάθε κατηγορία χιλιομετρικών θέσεων.

Σε θέσεις όπου καταγράφεται υψηλή σταθμισμένη σοβαρότητα, όπως αυτή αποτυπώθηκε μέσω του προσαρμοσμένου δείκτη επικινδυνότητας, προτεραιότητα έχουν οι παρεμβάσεις που μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τη δυναμική της σύγκρουσης. Στις περιπτώσεις αυτές προκρίνεται ο συνδυασμός βελτίωσης της υποδομής με επιλεγμένες ψηφιακές εφαρμογές. Η αναβάθμιση του φωτισμού, η βελτίωση της πρόσφυσης του οδοστρώματος και η εγκατάσταση συστημάτων έγκαιρης ειδοποίησης αποτελούν ενδεικτικά μέτρα που μπορούν να συμβάλουν στη μείωση τόσο της συχνότητας όσο και της σοβαρότητας των ατυχημάτων. Σε τμήματα όπου η συχνότητα των συμβάντων είναι αυξημένη αλλά οι συνέπειες παραμένουν σχετικά περιορισμένες, η ανάλυση υποδεικνύει κυρίως προβλήματα καθοδήγησης των οδηγών. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτεραιότητα έχουν παρεμβάσεις μη ψηφιακού χαρακτήρα. Η βελτίωση της οριζόντιας διαγράμμισης, η ενίσχυση της παθητικής σήμανσης και η αναβάθμιση των ανακλαστικών στοιχείων αποτελούν τεχνολογικά απλές αλλά λειτουργικά σημαντικές λύσεις.

Σε μεμονωμένες θέσεις όπου παρατηρείται χαμηλή συχνότητα αλλά ιδιαίτερα υψηλή σοβαρότητα, απαιτούνται πιο στοχευμένες παρεμβάσεις. Η εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου ταχύτητας ή υβριδικών προειδοποιητικών μηχανισμών μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά χωρίς να απαιτείται εκτεταμένη ανακατασκευή της υποδομής.

Η στρατηγική αυτή δεν βασίζεται στη λογική της μέγιστης τεχνολογικής ενσωμάτωσης, αλλά στην αρχή της αναλογικότητας. Κάθε παρέμβαση συνδέεται με τον συγκεκριμένο τύπο προβλήματος που εντοπίστηκε μέσα από την εμπειρική ανάλυση των δεδομένων.

Υπενθυμίζεται ότι η παρούσα ανάλυση βασίζεται αποκλειστικά στα διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα τροχαίων ατυχημάτων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής για την περίοδο 2015-2022. Ως εκ τούτου, η ακρίβεια της χωρικής αποτύπωσης των ατυχημάτων εξαρτάται από την ποιότητα και την πληρότητα των καταγεγραμμένων στοιχείων. Επιπλέον, η ανάλυση δεν περιλαμβάνει μεταβλητές όπως η κυκλοφοριακή ροή, οι πραγματικές ταχύτητες των οχημάτων ή λεπτομερή γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, οι οποίες θα μπορούσαν να συμβάλουν σε πληρέστερη κατανόηση των αιτίων των ατυχημάτων. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, τα αποτελέσματα της μελέτης αποτυπώνουν με σαφήνεια τη χωρική κατανομή των συμβάντων και μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό στοχευμένων παρεμβάσεων οδικής ασφάλειας στον ΒΟΑΚ.

## **8.1. Σύνδεση με ερευνητικά ερωτήματα**

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα EE1 αφορούσε την κατηγοριοποίηση και τα χαρακτηριστικά των Smart Roads τεχνολογιών. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει σαφή διάκριση μεταξύ ICT-based, Non-ICT-based και υβριδικών λύσεων. Οι υβριδικές τεχνολογίες συγκεντρώνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς επιτρέπουν σταδιακή ενσωμάτωση ψηφιακών στοιχείων χωρίς να απαιτούν άμεση και πλήρη αναδιάρθρωση της υποδομής.

Το δεύτερο ερώτημα EE2 αναζήτησε τις τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν ρεαλιστικά στον ΒΟΑΚ, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του. Η εφαρμογή κριτηρίων αξιολόγησης όπως η οδική ασφάλεια, η τεχνολογική ωριμότητα, το κόστος κύκλου ζωής και ο ανθρώπινος παράγοντας, στα δεδομένα του άξονα έδειξε ότι ρεαλιστικά εφαρμόσιμες είναι πρωτίστως οι Non-ICT παρεμβάσεις και οι υβριδικές λύσεις, ενώ οι εκτεταμένες ICT υποδομές αντιστοιχούν σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Το τρίτο ερώτημα EE3 αναγνώρισε τα χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ την περίοδο 2015-2022 ως προς τη σοβαρότητα, τις συνθήκες εκδήλωσης και τη χωρική τους κατανομή. Η ανάλυση έδειξε ότι η κατανομή δεν είναι ομοιόμορφη, με σαφείς συγκεντρώσεις σε συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις, ενώ σημαντικός αριθμός ατυχημάτων καταγράφεται υπό κανονικές συνθήκες, σε τμήματα χωρίς επαρκή φωτισμό ή οπτική καθοδήγηση.

Το τέταρτο ερώτημα EE4 αφορούσε τον εντοπισμό των χιλιομετρικών θέσεων του ΒΟΑΚ με αυξημένη επικινδυνότητα και τις κατάλληλες παρεμβάσεις για το καθένα. Μέσω του δείκτη Δ αναδείχθηκαν οι ΧΘ 49, 115.5, 156 και 37 ως οι πλέον κρίσιμες θέσεις, με διαφορετικό πρότυπο κινδύνου σε κάθε περίπτωση. Η ανάλυση οδήγησε σε διαφοροποιημένες προτάσεις παρέμβασης, υβριδικές ή ICT λύσεις για θέσεις υψηλής σοβαρότητας και Non-ICT παρεμβάσεις για θέσεις υψηλής συχνότητας.

Το πέμπτο ερώτημα EE5 επικεντρώθηκε στη διαμόρφωση ενός ρεαλιστικού πλαισίου μετάβασης. Η έρευνα καταλήγει ότι ο ΒΟΑΚ μπορεί να κινηθεί προς ένα μοντέλο Smart Roads μέσα από διαδοχικά και προσαρμοσμένα στάδια, και όχι μέσω άμεσης πλήρους ψηφιακής μετατροπής.

Ο ακόλουθος Πίνακας 27 συνοψίζει τη σύνδεση των ερευνητικών ερωτημάτων με τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης.

Πίνακας 27. Συγκεντρωτική παρουσίαση Ερευνητικών Ερωτημάτων και βασικών συμπερασμάτων

Ερευνητικό Ερώτημα	Κεφάλαιο απάντησης	Κύρια Συμπεράσματα
<p><b>EE1</b></p> <p><i>Ποιες τεχνολογίες Smart Roads έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για την οδική ασφάλεια σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία;</i></p>	<p>Κεφ. 2</p>	<p>Αποτελεσματικές τεχνολογίες</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• έξυπνος οδικός φωτισμός,</li> <li>• ανακλαστήρες υψηλής απόδοσης,</li> <li>• VMS/δυναμική σήμανση</li> <li>• rumble strips</li> <li>• υλικά αντιολισθηρότητας</li> </ul>
<p><b>EE2</b></p> <p><i>Ποιες από τις τεχνολογίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν ρεαλιστικά στον ΒΟΑΚ, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του;</i></p>	<p>Κεφ. 3.2, 3.3, 7.1, 7.2</p>	<p>Κατά προτεραιότητα</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non-ICT παρεμβάσεις (βελτιωμένη διαγράμμιση, ανακλαστήρες, αντιολισθηρά υλικά)</li> <li>• Υβριδικές λύσεις (έξυπνος φωτισμός, VMS).</li> <li>• ICT υποδομές (V2I, Digital Twin) αντιστοιχούν σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, λόγω απουσίας υφιστάμενης ψηφιακής υποδομής και οργανωτικών περιορισμών (βλ. Πίνακες 19, 20)</li> </ul>
<p><b>EE3</b></p> <p><i>Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των τροχαίων ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ την περίοδο 2015-2022 ως προς τη σοβαρότητα, τις συνθήκες</i></p>	<p>Κεφ. 5.1-5.3</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η κατανομή δεν είναι ομοιόμορφη, εμφανίζονται σαφείς συγκεντρώσεις σε συγκεκριμένα τμήματα</li> </ul>

<p><i>εκδήλωσης και τη χωρική τους κατανομή;</i></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η πλειονότητα των ατυχημάτων συμβαίνει υπό κανονικές συνθήκες καιρού και οδοστρώματος</li> <li>• Σημαντικός αριθμός περιστατικών καταγράφεται σε τμήματα χωρίς φωτισμό ή με ανεπαρκή οπτική καθοδήγηση</li> </ul>
<p><b>ΕΕ4</b></p> <p><i>Ποιες χιλιομετρικές θέσεις του ΒΟΑΚ παρουσιάζουν αυξημένη επικινδυνότητα βάσει των δεδομένων, και ποιες παρεμβάσεις ενδείκνυνται για το καθένα;</i></p>	<p>Κεφ. 5.4-5.5</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οι ΧΘ 49, 115.5, 156 και 37 εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές του δείκτη Δ</li> <li>• Κάθε θέση παρουσιάζει διαφορετικό πρότυπο επικινδυνότητας που απαιτεί διαφορετική παρέμβαση</li> <li>• Σε θέσεις υψηλής σοβαρότητας προτείνονται υβριδικές ή ICT λύσεις ενώ σε θέσεις υψηλής συχνότητας, Non-ICT</li> </ul>
<p><b>ΕΕ5</b></p> <p><i>Πώς μπορούν οι παρεμβάσεις Smart Roads να εφαρμοστούν σταδιακά στον ΒΟΑΚ, λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα της έρευνας και τους πρακτικούς περιορισμούς του άξονα;</i></p>	<p>Κεφ. 6.2-6.4</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σταδιακή εφαρμογή τριών φάσεων: άμεση, μεσοπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη</li> <li>• Προτεραιότητα σε Non-ICT παρεμβάσεις χαμηλής πολυπλοκότητας ως πρώτο βήμα</li> <li>• Στοχευμένη ενσωμάτωση ICT στοιχείων στα hotspots</li> <li>• Μακροπρόθεσμα, δυνατότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένης ψηφιακής υποδομής</li> </ul>

## 8.2. Συνεισφορά της μελέτης & προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### Συνεισφορά της μελέτης

Η παρούσα εργασία επιχείρησε να συνδέσει τη θεωρία των τεχνολογιών Smart Roads με την ανάλυση πραγματικών δεδομένων τροχαίων ατυχημάτων στον ΒΟΑΚ. Η σύνδεση αυτή επέτρεψε τη διατύπωση προτάσεων που βασίζονται σε συγκεκριμένα προβλήματα του άξονα και όχι σε γενικές τεχνολογικές επιλογές.

Η χρήση ενός συνδυαστικού δείκτη επικινδυνότητας και η ανάλυση των χαρακτηριστικών των ατυχημάτων οδήγησαν στον εντοπισμό συγκεκριμένων χιλιομετρικών θέσεων όπου απαιτείται προτεραιοποίηση παρεμβάσεων. Αυτό προσφέρει ένα πρακτικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλους οδικούς άξονες με αντίστοιχα χαρακτηριστικά, συμβάλλοντας στη σύνδεση της ανάλυσης δεδομένων με τον σχεδιασμό μέτρων οδικής ασφάλειας.

Η μελέτη βασίστηκε αποκλειστικά στα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων, γεγονός που εισάγει ορισμένους περιορισμούς. Δεν εξετάστηκαν μεταβλητές όπως οι κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι πραγματικές ταχύτητες ή τα αναλυτικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, τα οποία θα μπορούσαν να προσφέρουν πιο πλήρη εικόνα των συνθηκών επικινδυνότητας.

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ένα επόμενο βήμα θα μπορούσε να είναι η πιλοτική εφαρμογή επιλεγμένων παρεμβάσεων σε συγκεκριμένα τμήματα του ΒΟΑΚ και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους μέσα από σύγκριση των δεικτών ατυχημάτων πριν και μετά την εφαρμογή, ώστε να καταστεί δυνατή η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη.

Επιπλέον, η εκπόνηση μελέτης κόστους-οφέλους θα μπορούσε να συμβάλει στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας των διαφορετικών τεχνολογικών επιλογών. Η διερεύνηση της αποδοχής των παρεμβάσεων από τους χρήστες του δρόμου αποτελεί σημαντικό παράγοντα, καθώς η συμπεριφορά των οδηγών επηρεάζει καθοριστικά την αποτελεσματικότητα κάθε μέτρου.

Σε επόμενο στάδιο, η ενσωμάτωση επιπλέον δεδομένων, όπως κυκλοφοριακοί φόρτοι, γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και δεδομένα πραγματικού χρόνου από συστήματα ITS, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πιο ακριβή μοντέλα ανάλυσης και πρόβλεψης

επικίνδυνων σημείων. Η συνδυασμένη αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων θα μπορούσε να υποστηρίξει την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων προσεγγίσεων Smart Roads.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της ετοιμότητας της υφιστάμενης υποδομής του ΒΟΑΚ για την υποστήριξη πιο προηγμένων εφαρμογών, όπως τα συνδεδεμένα και αυτόνομα οχήματα, καθώς και η σταδιακή μετάβαση σε ένα πιο ψηφιακά υποστηριζόμενο οδικό περιβάλλον.

Η μελέτη δείχνει ότι η βελτίωση της οδικής ασφάλειας δεν εξαρτάται μόνο από την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, αλλά κυρίως από την ικανότητα προσαρμογής τους στις πραγματικές συνθήκες του δρόμου, όπως αυτές αποτυπώνονται μέσα από τα ίδια τα δεδομένα. Η αναβάθμιση του ΒΟΑΚ και η ανάπτυξη του νέου αυτοκινητόδρομου, που βρίσκεται προ των πυλών, δημιουργούν μια σημαντική ευκαιρία για την ενσωμάτωση τεχνολογιών Smart Roads από τη φάση του σχεδιασμού. Η αξιοποίηση της εμπειρίας από το υφιστάμενο δίκτυο μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία ενός ασφαλέστερου και πιο ανθεκτικού οδικού περιβάλλοντος.

## Αναφορές

- Μάκαρη, Μ. (2023). *Χωροχρονική ανάλυση τροχαίων ατυχημάτων: η περίπτωση του Βόρειου Οδικού Άξονα Κρήτης (BOAK) την περίοδο 2000–2020* [Μεταπτυχιακή εργασία]. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- Achar, T. E., Rekha, C., & Shreyas, J. (2024). Smart automated highway lighting system using IoT: A survey. *Energy Informatics*, 7(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00375-7>
- Ahmed, M. S., Sundaravadivel, P., & Tamil, L. (2023). Smart Road Reflector: Enhancing Road Health and Safety Through Interactive Roads. *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT58464.2023.10539407>
- Ai, Q., Zhang, J., & Ye, Y. (2024). Strategies to enhance the level of service and safety of rural roads: A case study. *PLOS ONE*, 19(3), e0300525. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300525>
- Al-Bayati, A. J., Ali, M., Alhomaidat, F., Bandara, N., & Chen, Y. (2024). The Effects of Temporary Portable Rumble Strips on Vehicle Speeds in Road Work Zones. *Safety*, 10(4), 105. <https://doi.org/10.3390/safety10040105>
- Aldegheishem, A., Yasmeen, H., Maryam, H., Shah, M. A., Mehmood, A., Alrajeh, N., & Song, H. (2018). Smart Road Traffic Accidents Reduction Strategy Based on Intelligent Transportation Systems (TARS). *Sensors*, 18(7), 1983. <https://doi.org/10.3390/s18071983>
- Al-Haji, G. (2014). The Impact of New Street Lighting Technologies on Traffic Safety. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 2(3). <https://doi.org/10.12720/jtle.2.3.202-205>
- Almallah, M., Hussain, Q., Alhajyaseen, W. K. M., Pirdavani, A., Brijs, K., Dias, C., & Brijs, T. (2021). Improved traffic safety at work zones through animation-based variable message signs. *Accident Analysis & Prevention*, 159, 106284. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106284>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Highway Safety Manual* (1η έκδ.). AASHTO.
- Angioi, F., Portera, A., Bassani, M., de Oña, J., & Stasi, L. L. D. (2023). Smart on-Road Technologies and Road Safety: A short overview. *Transportation Research Procedia, XV Conference on Transport Engineering, CIT2023*, 71, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.100>
- Ariyoshi, R. (2022). Past and Future of ICT Utilization in Mobility-Related Fields. *Information Engineering and Applied Computing*, 1(1), 1–15.
- Auer, A., Feese, S., & Lockwood, S. (2016, Μάιος 1). *History of Intelligent Transportation Systems*. <https://rosap.nhtl.bts.gov>
- Avcı, İ., & Koca, M. (2024). Intelligent Transportation System Technologies, Challenges and Security. *Applied Sciences*, 14(11), 4646. <https://doi.org/10.3390/app14114646>

- Babić, D., Fiolić, M., Babić, D., & Gates, T. (2020). Road Markings and Their Impact on Driver Behaviour and Road Safety: A Systematic Review of Current Findings. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 7843743. <https://doi.org/10.1155/2020/7843743>
- Bakhtina, M., Matulevičius, R., & Malina, L. (2024). Information Security and Privacy Management in Intelligent Transportation Systems. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, (38), 100–131. <https://doi.org/10.7250/csimq.2024-38.04>
- Bao, L., Wang, Q., & Jiang, Y. (2021). Review of Digital twin for intelligent transportation system. *2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*, 309–315. <https://doi.org/10.1109/ICEERT53919.2021.00064>
- Barazzetti, L., Previtali, M., & Scaioni, M. (2020). Roads Detection and Parametrization in Integrated BIM-GIS Using LiDAR. *Infrastructures*, 5(7), 55. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5070055>
- Basso, F., Cifuentes, A., Pezoa, R., & Varas, M. (2021). A vehicle-by-vehicle approach to assess the impact of variable message signs on driving behavior. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 103015. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103015>
- Bermoy, L., & Sanchez, J. (2026). Development and Evaluation of a Photoluminescent-Reflective Cat's Eye Road Stud for Tropical Urban Road Safety. *International Journal of Science and Research Archive*, 18, 560–567. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2026.18.1.0097>
- Bhujbal, S. A., Bhosure, A. G., Sonawane, G. S., Patel, P. R., Jadhav, V. R., & Dhivare, J. (2022). Study Smart Road with Glowing Lines. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(4), 3238–3241. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41965>
- Cai, L., Meng, C., Wang, X., Lyu, C., & Sun, X. (2020). Cooperative Vehicle-Infrastructure System Use Case Design for Smart Highway. *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 415–421. <https://doi.org/10.1109/ICISCE50968.2020.00093>
- Calvi, A., D'Amico, F., Bianchini Ciampoli, L., & Ferrante, C. (2019). Evaluating the effectiveness of perceptual treatments on sharp curves: A driving simulator study. *Traffic Injury Prevention*, 20(sup2), S13–S19. <https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1669789>
- Charpentier, V., Slamnik-Krijestorac, N., & Marquez-Barja, J. (2022). Latency-aware C-ITS application for improving the road safety with CAM messages on the Smart Highway testbed. *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798350>
- Chatterjee, K., Hounsell, N. B., Firmin, P. E., & Bonsall, P. W. (2002). Driver response to variable message sign information in London. *Transportation Research Part C:*

- Emerging Technologies*, 10(2), 149–169. [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(01\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(01)00008-0)
- Consilvio, A., Hernández, J. S., Chen, W., Brilakis, I., Bartoccini, L., Gennaro, F. D., & van Welie, M. (2023). Towards a digital twin-based intelligent decision support for road maintenance. *Transportation Research Procedia, AIIT 3rd International Conference on Transport Infrastructure and Systems (TIS ROMA 2022), 15th-16th September 2022, Rome, Italy*, 69, 791–798. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.237>
- Costa, A., Rossetti, R. J. F., & Kokkinogenis, Z. (2020). Improving Route Choice: Communication Issues in Moving Variable Message Signs. *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISC251055.2020.9239075>
- Dingus, T. A., Guo, F., Lee, S., Antin, J. F., Perez, M., Buchanan-King, M., & Hankey, J. (2016). Driver crash risk factors and prevalence evaluation using naturalistic driving data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(10), 2636–2641. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513271113>
- Erke, A., Sagberg, F., & Hagman, R. (2007). Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(6), 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.03.003>
- Federal Highway Administration. (2022). *Applying Transportation Asset Management to Intelligent Transportation Systems Assets: A Primer* (FHWA-HOP-20-047). U.S. Department of Transportation. <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop20047/index.htm>
- Finogeev, A., Finogeev, A., Fionova, L., Lyapin, A., & Lychagin, K. A. (2019). Intelligent monitoring system for smart road environment. *Journal of Industrial Information Integration*, 15, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.003>
- Gagliardi, G., Lupia, M., Cario, G., Tedesco, F., Cicchello Gaccio, F., Lo Scudo, F., & Casavola, A. (2020). Advanced Adaptive Street Lighting Systems for Smart Cities. *Smart Cities*, 3(4), 1495–1512. <https://doi.org/10.3390/smartsities3040071>
- Ganin, A. A., Mersky, A. C., Jin, A. S., Kitsak, M., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2019). Resilience in Intelligent Transportation Systems (ITS). *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 318–329. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.014>
- Ghane, S., Jolfaei, A., Kulik, L., Ramamohanarao, K., & Puthal, D. (2021). Preserving Privacy in the Internet of Connected Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(8), 5018–5027. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2964410>
- Gogas, M. A. (2020). *Use Cases of novel C-ITS solution for the increase of road safety*.
- Guerreiro, G., Figueiras, P., Silva, R., Costa, R., & Jardim-Goncalves, R. (2016). An architecture for big data processing on intelligent transportation systems. An application scenario on highway traffic flows. *2016 IEEE 8th International*

- Conference on Intelligent Systems (IS)*, 65–72.  
<https://doi.org/10.1109/IS.2016.7737393>
- Guerrero-Ibáñez, J., Zeadally, S., & Contreras-Castillo, J. (2018). Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. *Sensors*, 18(4), 1212.  
<https://doi.org/10.3390/s18041212>
- Guo, R. (Επιμ.). (2021). *Smart Road Infrastructure: Innovative technologies*. Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/PBTR033E>
- Hahn, D., Munir, A., & Behzadan, V. (2021). Security and Privacy Issues in Intelligent Transportation Systems: Classification and Challenges. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13(1), 181–196.  
<https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2898973>
- Hallmark, S., Hawkins, N., & Knickerbocker, S. (2021). Evaluation of Transverse Markings as a Speed Transition Zone Countermeasures in Small, Rural Communities. *Journal of Transportation Technologies*, 11, 61–77.  
<https://doi.org/10.4236/jtts.2021.111004>
- Hammoudeh, M., Epiphaniou, G., Belguith, S., Unal, D., Adebisi, B., Baker, T., Kayes, A. S. M., & Watters, P. (2021). A Service-Oriented Approach for Sensing in the Internet of Things: Intelligent Transportation Systems and Privacy Use Cases. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15753–15761.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2981558>
- Harvey, J., & Kumar, S. (2020). A Survey of Intelligent Transportation Systems Security: Challenges and Solutions. *2020 IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS)*, 263–268. <https://doi.org/10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS49724.2020.00055>
- Hassan, M. A., Javed, R., Farhatullah, Granelli, F., Gen, X., Rizwan, M., Ali, S. H., Junaid, H., & Ullah, S. (2023). Intelligent Transportation Systems in Smart City: A Systematic Survey. *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICRAI57502.2023.10089543>
- Henke, I., Bifulco, G. N., Carteni, A., Di Francesco, L., & Di Stasio, A. (2021). *A Smart Road Application: The A2 Mediterranean Highway Project in Italy* (L. Barolli, I. Woungang, & T. Enokido, Επιμ.; τ. 227, σελ. 690–700). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75078-7\\_68](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75078-7_68)
- Hoang, M., Denis, B., Härri, J., & Slock, D. (2016). Breaking the Gridlock of Spatial Correlations in GPS-Aided IEEE 802.11p-Based Cooperative Positioning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65, 9554–9569.  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2599490>
- Hu, Y., Han, T., Wang, P., Wang, L., Zhang, L., Mou, Z., Hu, Y., Han, T., Wang, P., Wang, L., Zhang, L., & Mou, Z. (2024). Research on the deployment model of intelligent highway sensor network under a bilevel programming framework. *Digital Transportation and Safety*, 4(1), 31–41. <https://doi.org/10.48130/dts-0024-0028>

- Huang, K., Zhang, H., Jiang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Sun, L., & Zhang, Y. (2022). The optimal design of a piezoelectric energy harvester for smart pavements. *International Journal of Mechanical Sciences*, 232, 107609. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107609>
- Husnain, G., Anwar, S., & Shahzad, F. (2023). An Enhanced AI-Enabled Routing Optimization Algorithm for Internet of Vehicles (IoV). *Wireless Personal Communications*, 130(4), 2623–2643. <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10394-4>
- Imjai, T., Sukswan, N., Sridhar, R., Aosai, P., Wicaksono, A., Garcia, R., & Abdullah, M. M. A. B. (2025). Cost-effective road reflectors integrating glow-in-the-dark and recycled glass for improved traffic safety: A case study in Thailand's rural roads. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es1759>
- Isreal, O. (2022). *IoT in bridge and highway structural health monitoring*.
- Janušová, L., & Čičmancová, S. (2016). Improving Safety of Transportation by Using Intelligent Transport Systems. *Procedia Engineering, TRANSBALTICA 2015: PROCEEDINGS OF THE 9th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE. May 7–8, 2015. Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania.*, 134, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.031>
- JiGui Liang, Heng Liu, YiHua Wang, & JianFei Wang. (2024). Enhancing highway safety with vehicle-to-infrastructure (V2I) risk warning systems. *Eurasia Journal of Science and Technology*, 6(5). <https://doi.org/10.61784/ejst3061>
- John, U. O., Omo-Okhirelen, O., & Uchenna, E. C. (2022). A review of Information Communication Technology (ICT) methods for road infrastructure monitoring. *West African Journal of Industrial and Academic Research*, 23(2), 62–75.
- Karbalaei Mohammad Hossein, A., Golroo, A., & Akhoundzadeh, M. (2024). Smart embedded technologies and materials for enhanced pavement management. *Automation in Construction*, 168, 105865. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105865>
- Kassens-Noor, E., Savolainen, P. T., Gates, T. J., Cai, M., & Deaminada, T. (2021). Communicating safety with drivers via dynamic message signs. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 81, 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.06.010>
- Kelarestaghi, K. B., Foruhandeh, M., Heaslip, K., & Gerdes, R. (2021). Intelligent Transportation System Security: Impact-Oriented Risk Assessment of in-Vehicle Networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13(2), 91–104. <https://doi.org/10.1109/MITS.2018.2889714>
- Khanmohamadi, M., & Guerrieri, M. (2024). Advanced Sensor Technologies in CAVs for Traditional and Smart Road Condition Monitoring: A Review. *Sustainability*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/su16198336>
- Kumar, V. A., V, N., K, S. K., Gp, S., M, P., & J, S. (2023). Signs With Smart Connectivity for Better Road Safety. *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 1, 841–845. <https://doi.org/10.1109/ICACCS57279.2023.10113120>

- Lederman, J., Taylor, B. D., & Garrett, M. (2016). A private matter: The implications of privacy regulations for intelligent transportation systems. *Transportation Planning and Technology*, 39(2), 115–135. <https://doi.org/10.1080/03081060.2015.1127537>
- Li, G., Li, N., Zhang, Y., Han, J., Yao, T., & Feng, X. (2025). Preparation of long afterglow luminescent road marking coatings and its applicability simulation. *PLOS One*, 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330387>
- Lian, Y., Zhang, G., Lee, J., & Huang, H. (2020). Review on big data applications in safety research of intelligent transportation systems and connected/automated vehicles. *Accident Analysis & Prevention*, 146, 105711. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105711>
- Lin, H., Chen, F., & Zhang, H. (2023). Active luminous road markings: A comprehensive review of technologies, materials, and challenges. *Construction and Building Materials*, 363, 129811. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129811>
- Lindov, O., & Omerhodžić, A. (2023). Implementation of Smart Road Technologies in the Function of Road Traffic Safety Management. Στο I. Karabegovic, A. Kovačević, & S. Mandzuka (Επιμ.), *New Technologies, Development and Application VI* (σελ. 621–627). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31066-9_71)
- Liu, J., Cai, L., Wang, X., Lyu, C., & Zhang, L. (2020). Roadside Unit Deployment of Cooperative Vehicle-Infrastructure System Based on Digital Measurable Image Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1626(1), 012112. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012112>
- Liu, Z., Gu, X., Chen, Y., & Chen, Y. (2021). System Architecture and Key Technologies for the Whole Life Cycle of Smart Road. *Journal of Physics: Conference Series*, 1972(1), 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1972/1/012105>
- Llewellyn, R., Cowie, J., & Maher, M. (2020). Active Road Studs as an Alternative to Lighting on Rural Roads: Driver Safety Perception. *Sustainability*, 12(22), 9648. <https://doi.org/10.3390/su12229648>
- Lu, D., Jiang, X., Leng, Z., Huo, Y., Wang, D., & Zhong, J. (2023). Electrically conductive asphalt concrete for smart and sustainable pavement construction: A review. *Construction and Building Materials*, 406, 133433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133433>
- Lv, Z., Zhang, S., & Xiu, W. (2021). Solving the Security Problem of Intelligent Transportation System With Deep Learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4281–4290. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2980864>
- Ma, Y., Easa, S., Cheng, J., & Yu, B. (2021). Automatic Framework for Detecting Obstacles Restricting 3D Highway Sight Distance Using Mobile Laser Scanning Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(4), 04021008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000973)
- Mahmud, A. K. M. R., Hriti, R. I., Hasan, M. M., Uddin, M. N., & Roy, A. R. (2025). AI-Augmented Digital Twin Architecture for Predictive Maintenance in Smart Urban

- Infrastructure: A Cross-Domain Engineering Framework. *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 3(5), 45–58. [https://doi.org/10.59324/ejaset.2025.3\(5\).04](https://doi.org/10.59324/ejaset.2025.3(5).04)
- Maimaris, A., & Papageorgiou, G. (2016). A review of Intelligent Transportation Systems from a communications technology perspective. *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 54–59. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795531>
- Mao, G., Hui, Y., Ren, X., Li, C., & Shao, Y. (2022). The Internet of Things for Smart Roads: A Road Map From Present to Future Road Infrastructure. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 14(6), 66–76. <https://doi.org/10.1109/MITS.2021.3115126>
- Marquez-Barja, J., Lannoo, B., Braem, B., Donato, C., Maglogiannis, V., Mercelis, S., Berkvens, R., Hellinckx, P., Weyn, M., Moerman, I., & Latré, S. (2019). *Smart Highway: ITS-G5 and C-V2X based testbed for vehicular communications in real environments enhanced by edge/cloud technologies*.
- Martínez, A. H., López-Montero, T., Miró, R., & Puig, R. (2023). Photoluminescent Applications for Urban Pavements. *Sustainability*, 15(20), 15078. <https://doi.org/10.3390/su152015078>
- Mathaba, T. N. D. (2023). Techno-economic Assessment of Traffic-Adaptive Smart Lighting Projects. Στο J. L. Afonso, V. Monteiro, & J. G. Pinto (Επιμ.), *Sustainable Energy for Smart Cities* (σελ. 56–66). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-33979-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-33979-0_6)
- Mecheva, T., & Kakanakov, N. (2020). Cybersecurity in Intelligent Transportation Systems. *Computers*, 9(4), 83. <https://doi.org/10.3390/computers9040083>
- Michael, I. (2022). *Smart road infrastructure for real-time accident reporting*.
- Mishra, P., & Singh, G. (2025). Internet of Vehicles for Sustainable Smart Cities: Opportunities, Issues, and Challenges. *Smart Cities*, 8(3), 93. <https://doi.org/10.3390/smartcities8030093>
- Mittal, U., Chaturvedi, A. K., Roy, A. K., Pawar, A., Varshney, G., & MP, K. (2022). Smart Highway Powered by Green Energy Using IoT and Cloud Computing. *2022 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKES)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICKES56523.2022.10060843>
- Mohapatra, H., Rath, A. K., & Panda, N. (2022). IoT infrastructure for the accident avoidance: An approach of smart transportation. *International Journal of Information Technology*, 14(2), 761–768. <https://doi.org/10.1007/s41870-022-00872-6>
- Musa, A. A., Malami, S. I., Alanazi, F., Ounaies, W., Alshammari, M., & Haruna, S. I. (2023). Sustainable Traffic Management for Smart Cities Using Internet-of-Things-Oriented Intelligent Transportation Systems (ITS): Challenges and Recommendations. *Sustainability*, 15(13), 9859. <https://doi.org/10.3390/su15139859>

- Mustafa, A. M., Abubakr, O. M., Derbala, A. H., Ahmed, E., & Mokhtar, B. (2017). Towards a Smart Highway Lighting System Based on Road Occupancy: Model Design and Simulation. Στο E. Sucar, O. Mayora, & E. Munoz de Cote (Επιμ.), *Applications for Future Internet* (σελ. 22–31). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49622-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49622-1_4)
- Ndem, U., & Akpan, E. S. (2025). *SMART DESIGN AND CONSTRUCTION: LEVERAGING AI FOR PREDICTIVE GUIDANCE IN DESIGN OF HIGHWAYS*.
- Ndume, V., & Mlavi, E. (2021). *Road Condition Quality Management for Smart Transportation: The Power of GIS*. 2(1), 122.
- Nestovito, G., & Occhiuzzi, A. (2016). Implementation of smart-passive dampers combined with double concave friction pendulum devices to retrofit an existing highway viaduct exploiting the seismic early warning information. *Engineering Structures*, 120, 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.026>
- Nowacki, G. (2012). *Development and Standardization of Intelligent Transport Systems*.
- Paliotto, A., Meocci, M., Terrosi, A., & La Torre, F. (2024). Systematic review, evaluation and comparison of different approaches for the implementation of road network safety analysis. *Heliyon*, 10(7), e28391. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28391>
- Panchal, S., Sharma, R., & Deshpande, K. (2024). Optimizing Roadway Safety Through Refined Rumble Strip Designs: An Analysis of Noise Performance, Traffic Conditions, and Residential Proximity in Highway Engineering. *Annual Compendium of Multidisciplinary Scientific Insights and Technological Frontiers*, 14(12), 1–16.
- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2004). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91, 2043–2067. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.819610>
- Picone, M., Busanelli, S., Amoretti, M., Zanichelli, F., & Ferrari, G. (2015). *Advanced Technologies for Intelligent Transportation Systems* (τ. 139). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10668-7>
- Pietrangeli, I., Mazzuto, G., Ciarapica, F. E., & Bevilacqua, M. (2023). Smart Retrofit: An Innovative and Sustainable Solution. *Machines*, 11(5), 523. <https://doi.org/10.3390/machines11050523>
- Pompigna, A., & Mauro, R. (2022). Smart roads: A state of the art of highways innovations in the Smart Age. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 25, 100986. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.005>
- Qureshi, K. N., Alhudhaif, A., Haidar, S. W., Majeed, S., & Jeon, G. (2022). Secure data communication for wireless mobile nodes in intelligent transportation systems. *Microprocessors and Microsystems*, 90, 104501. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104501>
- Rani, P., & Sharma, R. (2023). IMFOCA-IOV: Intelligent Moth Flame Optimization based Clustering Algorithm for Internet of Vehicle. *2023 14th International Conference*

- on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT56998.2023.10307646>
- Roy, A. K., Pawar, A., Mittal, U., Padhee, S., Solanki, R., & Pandey, V. K. (2024). Sustainable Energy and IoT Based Highway Lighting Management System. *2024 2nd International Conference on Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing (AKGEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AKGEC62572.2024.10868827>
- Saleem, M., & Hosoda, A. (2021). DEVELOPMENT AND TESTING OF GLOW-IN-THE-DARK CONCRETE BASED RAISED PAVEMENT MARKER FOR IMPROVED TRAFFIC SAFETY. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 27, 278–287. <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.14902>
- Sanchez-Londono, D., Barbieri, G., & Fumagalli, L. (2023). Smart retrofitting in maintenance: A systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-02002-2>
- Sazali, H., & Firdaus, I. M. (2019). Highway infrastructure: Visions & challenges in the next decades. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/512/1/012047>
- Shaaban, K., Elamin, M., & Alsoub, M. (2021). Intelligent Transportation Systems in a Developing Country: Benefits and Challenges of Implementation. *Transportation Research Procedia, 14th International scientific conference on sustainable, modern and safe transport*, 55, 1373–1380. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.122>
- Shahar, A., & Bremond, R. (2014). Toward smart active road studs for lane delineation. *TRA2014 - Transport Research Arena: Transport Solutions: from Research to Deployment - Innovate Mobility, Mobilise Innovation !*, 10p. <https://hal.science/hal-01217817>
- Shestov, A. V., Anastasov, M. S., & Suchilin, N. V. (2021). Smart Road. *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TIRVED53476.2021.9639122>
- Shulajkovska, M., Smerkol, M., Noveski, G., Bohanec, M., & Gams, M. (2024). Artificial Intelligence-Based Decision Support System for Sustainable Urban Mobility. *Electronics*, 13(18), 3655. <https://doi.org/10.3390/electronics13183655>
- Singh, R., Sharma, R., Vaseem Akram, S., Gehlot, A., Buddhi, D., Malik, P. K., & Arya, R. (2021). Highway 4.0: Digitalization of highways for vulnerable road safety development with intelligent IoT sensors and machine learning. *Safety Science*, 143, 105407. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105407>
- Song, R., Festag, A., Jagtap, A. D., Bialdyga, M., Yan, Z., Otte, M., Sadashivaiah, S. T., & Knoll, A. (2024). First Mile: An Open Innovation Lab for Infrastructure-Assisted Cooperative Intelligent Transportation Systems. *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 1635–1642. <https://doi.org/10.1109/IV55156.2024.10588500>
- Sophiya Susan, S., Praveen Raj, A., Mishra, A., & Thambi, V. (2022). Vehicle Movement based Innovative Smart Highway Lighting System. *2022 International Conference*

- on *Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 483–488. <https://doi.org/10.1109/ICICT54344.2022.9850478>
- Sui, P., Li, X., & Bai, Y. (2017). A Study of Enhancing Privacy for Intelligent Transportation Systems: K -Correlation Privacy Model Against Moving Preference Attacks for Location Trajectory Data. *IEEE Access*, 5, 24555–24567. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767641>
- Tang, Z., He, J., Flanagan, S. K., Procter, P., & Cheng, L. (2021). Cooperative Connected Smart Road Infrastructure and Autonomous Vehicles for Safe Driving. *2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICNP52444.2021.9651941>
- Tao, Z., Quan, W., & Wang, H. (2022). Innovative Smart Road Stud Sensor Network Development for Real-Time Traffic Monitoring. *Journal of Advanced Transportation*, 2022(1), 8830276. <https://doi.org/10.1155/2022/8830276>
- Torre-Bastida, A. I., Del Ser, J., Laña, I., Iardia, M., Bilbao, M. N., & Campos-Cordobés, S. (2018). Big Data for transportation and mobility: Recent advances, trends and challenges. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(8), 742–755. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5188>
- Tripathy, A. K., Mishra, A. K., & Das, T. K. (2017). Smart lighting: Intelligent and weather adaptive lighting in street lights using IOT. *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, 1236–1239. <https://doi.org/10.1109/ICICT1.2017.8342746>
- Trubia, S., Severino, A., Curto, S., Arena, F., & Pau, G. (2020). Smart Roads: An Overview of What Future Mobility Will Look Like. *Infrastructures*, 5(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5120107>
- Vaitkus, A., Strumskys, M., Jasiūnienė, V., Jateikienė, L., Andriejauskas, T., & Skrodenis, D. (2016). Effect of Intelligent Transport Systems on Traffic Safety. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 11(2), 136–143. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.16>
- van Kampen, M. (2015). *Enlighting the roads of tomorrow exploring road users' preferences of road lighting along highways in the Netherlands*. Eindhoven University of Technology.
- Viswanathan, S., Momand, S., Fruten, M., & Alcantar, A. (2021). A model for the assessment of energy-efficient smart street lighting—A case study. *Energy Efficiency*, 14(6), 52. <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09957-w>
- Wei, S., Yang, H., Li, Y., Xie, M., & Wang, Y. (2024). Investigating the impact of temporal instability in smart roadway retrofitting on terrain-related crash injury severity. *Accident Analysis & Prevention*, 207, 107757. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107757>
- Wiegand, G. (2019). *Benefits and Challenges of Smart Highways for the User*. IUI Workshops. <https://www.semanticscholar.org/paper/Benefits-and-Challenges-of-Smart-Highways-for-the-Wiegand/d1a848132c17138c7a5921d05f12f009c299903b>

- Yao, X., Sun, H., Li, M., & Li, H. (2024). Research on Application Scenario of Intelligent Road Studs for Smart Highway. Στο T. Kang (Επιμ.), *Proceedings of 5th International Conference on Civil Engineering and Architecture* (σελ. 961–969). Springer Nature. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4049-3\\_73](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4049-3_73)
- Ying, Z., Cao, S., Liu, X., Ma, Z., Ma, J., & Deng, R. H. (2022). PrivacySignal: Privacy-Preserving Traffic Signal Control for Intelligent Transportation System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 16290–16303. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3149600>
- Yun, J., Kim, S., Kim, D., & Lee, J. (2025). Evaluation of Equivalent Property Damage Only (EPDO) weight sets for hotspot identification: A case study on Korean expressways. *Case Studies on Transport Policy*, 21, 101531. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101531>
- Zhang, H., Chen, Z., Zhu, C., & Wei, C. (2020). An innovative and smart road construction material: Thermochromic asphalt binder. Στο *New Materials in Civil Engineering* (σελ. 691–716). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00022-3>
- Zhu, X. (2024). *Smart Road Infrastructure: Ideas, Innovations and Emerging Technologies*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-3831-1>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.