



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Διερεύνηση συστημάτων διαχείρισης οδικών υποδομών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθηνά Δ. Καστριώτη

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων

Γεώργιος Ματσόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Διερεύνηση συστημάτων διαχείρισης οδικών υποδομών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθηνά Δ. Καστριώτη

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων

Γεώργιος Ματσόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη τριμελούς Επιτροπής

Μέλος 1: Παπαβασιλείου Συμεών, Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλος 2: Παναγόπουλος Αθανάσιος, Καθηγητής ΕΜΠ

Ημερομηνία Εξέτασης: 26/02/2024

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Αθηνά Δ. Καστριώτη

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

© Αθηνά Δ. Καστριώτη, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες ακολουθείται αρκετά συχνά διεθνώς η πρακτική εκμετάλλευσης των οδικών υποδομών που περιλαμβάνει συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα στην χρηματοδότηση κατασκευής και συντήρησης οδικών έργων και ειδικότερα αυτοκινητοδρόμων υψηλής ταχύτητας. Τούτο συνάδει με την ανάγκη κατασκευής και κυρίως διατήρησης σε βάθος χρόνου οδικών υποδομών ικανών να επιτρέπουν την άνετη και ασφαλή μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, συμβάλλοντας στην τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη τόσο σε οικονομικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο. Η εργασία εστιάζει στο πλαίσιο λειτουργίας των οδικών υποδομών, όπου η έμφαση της διαχείρισης της συντήρησης δίνεται στην κατάσταση των οδοστρωμάτων υπό την έννοια ενός υφιστάμενου περιουσιακού στοιχείου. Αναλύονται τα συστατικά στοιχεία ενός συστήματος διαχείρισης, η στρατηγική παρακολούθησης της συμπεριφοράς οδών, το είδος και η συχνότητα των απαιτούμενων ελέγχων, ώστε να μπορεί το σύστημα να τροφοδοτηθεί με επάρκεια πληροφόρησης και να προκύψει ως αποτέλεσμα ένας ορθολογικός προγραμματισμός απαιτούμενων ενεργειών. Περιγράφονται επίσης θέματα που αφορούν τον τρόπο ανάλυσης και ερμηνείας των διαθέσιμων στοιχείων και δεδομένων συμπεριφοράς οδών, λόγω της άμεσης διασύνδεσης της τεχνικής και οικονομικής συνιστώσας της διαχείρισης. Η εργασία ολοκληρώνεται με την διαμόρφωση των συμπερασμάτων και τη διατύπωση προτάσεων περαιτέρω έρευνας.

Λέξεις – κλειδιά: διαχείριση συντήρησης υποδομής, συμπεριφορά οδών, συστήματα μετρήσεων, έλεγχοι πεδίου, λήψη αποφάσεων

Abstract

In recent decades, there is an international tendency in the practice of owning and managing road infrastructure by considering the participation of the private sector in the financing of the construction and maintenance of road projects, especially high-speed motorways. This is consistent with the need to build and, above all, to maintain over time road infrastructures capable of allowing the comfortable and safe movement of people and goods, contributing to local and regional development both economically and socially. The present thesis focuses on the operation phase of road infrastructures, where the emphasis of maintenance management is given to the condition of road surfaces and pavements that constitute existing assets. The components of a management system, the strategy for monitoring road behavior, the type and frequency of required testing are analyzed, so that a management system can be supplied with sufficient information and a rational planning of required actions can result. Issues concerning the way to analyze and interpret the available data and road behavior data are also described, due to the strong liaison between the technical and economic components of management. The thesis is completed by structuring the conclusions and proposals for further research.

Keywords: maintenance management, road performance, measurement systems, field inspections, decision-making

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεώργιο Ματσόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ για την καθοδήγηση και τη συνολική επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου, για τη στήριξη που μου πρόσφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | Εισαγωγή | 10 |
| 1.1. | Διατύπωση του προβλήματος..... | 10 |
| 1.2. | Αντικείμενο της εργασίας..... | 11 |
| 1.3. | Δομή της εργασίας | 12 |
| 2. | Η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων διαχείρισης..... | 13 |
| 2.1. | Γενικά Στοιχεία | 13 |
| 2.2. | Συστήματα παρακολούθησης συμπεριφοράς οδών..... | 15 |
| 2.3. | Συστατικά στοιχεία συστημάτων διαχείρισης | 21 |
| 2.4. | Επίπεδα διαχείρισης οδικών υποδομών (έργου και δικτύου)..... | 22 |
| 2.5. | Στρατηγική, ιεράρχηση και λήψη αποφάσεων | 24 |
| 3. | Δόμηση συστήματος διαχείρισης | 28 |
| 3.1. | Συντήρηση οδικού δικτύου | 28 |
| 3.2. | Κατηγορίες απαιτούμενων στοιχείων | 31 |
| 3.2.1. | Δεδομένα απογραφής..... | 32 |
| 3.2.1.1. | Ονοματολογία και προσδιορισμός θέσης οδικών δικτύων | 33 |
| 3.2.1.2. | Στοιχεία που αφορούν τα οδοστρώματα..... | 36 |
| 3.2.1.3. | Ομαδοποίηση οδικών τμημάτων και ταξινόμηση..... | 37 |
| 3.2.2. | Δεδομένα κατάστασης της οδού..... | 38 |
| 3.2.2.1. | Λειτουργική κατάσταση της οδού | 39 |
| 3.2.2.2. | Δομική κατάσταση της οδού | 40 |
| 3.2.2.3. | Παρατηρήσεις | 40 |
| 3.2.3. | Οδός και περιβάλλον | 41 |
| 3.2.4. | Στοιχεία χρήσης της οδού | 41 |
| 3.2.5. | Στοιχεία κυκλοφορίας της οδού..... | 42 |
| 3.2.6. | Κατασκευή και συντήρηση..... | 43 |
| 3.2.7. | Δεδομένα κινδύνου | 44 |
| 3.2.8. | Επίπεδο εξυπηρέτησης | 45 |
| 3.3. | Παρακολούθηση της κατάστασης του οδικού δικτύου | 45 |
| 3.3.1. | Οπτική επιθεώρηση | 45 |
| 3.3.2. | Επιθεώρηση μέσω εξελιγμένων συστημάτων | 46 |
| 3.4. | Αξιολόγηση δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών | 48 |
| 4. | Ανάλυση και λήψη αποφάσεων..... | 50 |
| 4.1. | Ποιότητα στοιχείων..... | 50 |
| 4.1.1. | Βαθμονόμηση τεχνικού εξοπλισμού..... | 52 |
| 4.1.2. | Επαναληψιμότητα..... | 53 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2. | Επεξεργασία στοιχείων | 54 |
| 4.3. | Εξαγωγή αποτελεσμάτων..... | 56 |
| 4.4. | Ερμηνεία αποτελεσμάτων ανάλυσης..... | 58 |
| 4.5. | Σχεδιασμός δράσεων για ένα οδικό υποτμήμα | 60 |
| 4.5.1. | Δράσεις σε επίπεδο έργου | 62 |
| 4.5.2. | Δράσεις σε επίπεδο δικτύου | 63 |
| 4.6. | Επιμέρους ζητήματα κατά τη λήψη αποφάσεων..... | 66 |
| 4.6.1. | Επίπεδα αποφάσεων..... | 66 |
| 4.6.2. | Αποτελεσματικότητα και σφάλματα δράσεων | 67 |
| 5. | Σύνοψη | 69 |
| 5.1. | Κύρια συμπεράσματα | 69 |
| 5.2. | Προτάσεις μελλοντικής έρευνας..... | 70 |
| | Βιβλιογραφία..... | 72 |

1. Εισαγωγή

1.1. Διατύπωση του προβλήματος

Διαχρονικά, οι οδοί αποτελούν τον πυρήνα των υποδομών μεταφοράς που εξυπηρετούν τις ανάγκες ασφαλούς και γρήγορης μετακίνησης ανθρώπων και αγαθών. Η εξέλιξη στην τεχνολογία και την μηχανική των υλικών, η αύξηση της μεταφορικής ζήτησης και των φορτίων της κυκλοφορίας που καταπονούν τη δομή των οδών έχουν οδηγήσει στην μελέτη και την κατασκευή σύνθετων δομών οδοστρώματος για την διαμόρφωση οδών με δομική επάρκεια και λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως η ομαλή και ταυτόχρονα αδρή επιφάνεια κύλισης.

Παρατηρώντας τον οδικό χάρτη της Ελλάδας, διαπιστώνει κανείς την σημαντική αύξηση του δικτύου των αυτοκινητοδρόμων που έχουν κατασκευαστεί τις τελευταίες δεκαετίες, οι οποίοι ουσιαστικά έχουν αυξήσει το επίπεδο της οδικής ασφάλειας και άνεσης των μετακινήσεων σε σύντομο χρόνο και με μικρότερο κόστος. Ειδικότερα, το μήκος των αυτοκινητοδρόμων ξεπερνά τα 2 χιλιάδες χιλιόμετρα σε σύνολο περίπου 117 χιλιάδες χιλιόμετρα του συνολικού οδικού δικτύου της Ελλάδας λαμβάνοντας υπόψη σχετική μελέτη με στατιστικά στοιχεία του 2017. Οι αυτοκινητόδρομοι έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί μέσω κοινοπραξιών, όπου φορείς του δημοσίου και του ιδιωτικού τομέα συμπράττουν με ίδια κεφάλαια προκειμένου να ολοκληρωθεί η κατασκευή. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως Συμπράξεις Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα (ΣΔΙΤ), που φέρουν την αγγλική ορολογία Public – Private – Partnerships (PPP) (Han et al., 2023; Ahmad et al., 2022; Szczepański et al., 2020). Λόγω της νέας αυτής κουλτούρας, ιδιαίτερη σημασία έχει και το στάδιο της «λειτουργίας» μιας οδικής υποδομής, πέρα από την κατασκευή που απασχολούσε παραδοσιακά τους μηχανικούς και τους αρμόδιους φορείς.

Πιο συγκεκριμένα, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός οδικού έργου, θα πρέπει η κατάσταση της υποδομής, και ειδικότερα των οδοστρωμάτων της οδού, να διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα αντοχής και ασφάλειας, πράγμα το οποίο μπορεί να εξασφαλιστεί έπειτα από συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς της υποδομής, έτσι ώστε να μπορεί να προγραμματιστεί έγκαιρα τυχόν απαιτούμενη ενέργεια προληπτικής συντήρησης. Άλλωστε, αυτό είναι το τεχνο-οικονομικό πνεύμα που υπηρετούν οι σύγχρονοι αυτοκινητόδρομοι στρατηγικής σημασίας που εντάσσονται σε συστήματα έργων παραχώρησης. Επομένως, πέρα από την κατασκευή, και η συντήρηση των οδικών υποδομών απαιτεί βέλτιστη κατανομή οικονομικών πόρων λαμβάνοντας υπόψη τυχόν περιορισμούς διάθεσης και διαχείρισης (Kozel et al., 2021; Cui et al., 2022; Benedetto et al., 2017).

Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία, έχουν αναφερθεί ανέδειξαν τρεις βασικές πτυχές που επηρεάζουν την τεχνοοικονομική στρατηγική των αρμόδιων φορέων για τις οδικές υποδομές, οι οποίες αφορούν: α) στην έλλειψη οικονομικών πόρων που δεν επιτρέπει πλάνο κατασκευής νέων οδών, αλλά επιτάσσει την βελτίωση της κατάστασης υφιστάμενων οδών, β) στην ανάγκη ανάπτυξης ενός πλαισίου διαχείρισης των υφιστάμενων οδικών υποδομών, και (γ) στην ανάγκη αποτελεσματικής αντιμετώπισης της αναπόφευκτης και προοδευτικής γήρανσης των υφιστάμενων οδικών υποδομών (Benedetto et al., 2017). Ουσιαστικά, η επένδυση στην ανάπτυξη και λειτουργία ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης της συντήρησης των οδικών υποδομών προϋποθέτει την συστηματική παρακολούθηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου.

Υπό το πρίσμα αυτό, τις τελευταίες δεκαετίες έχει ακολουθηθεί και στην ελληνική επικράτεια η διεθνής πρακτική εκμετάλλευσης των οδικών υποδομών που περιλαμβάνει συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα στην χρηματοδότηση κατασκευής και συντήρησης οδικών έργων και ειδικότερα αυτοκινητοδρόμων υψηλής ταχύτητας. Τούτο συνάδει με την ανάγκη κατασκευής και κυρίως διατήρησης σε βάθος χρόνου οδικών υποδομών ικανών να επιτελούν απρόσκοπτα τη λειτουργία τους, δηλαδή να επιτρέπουν την άνετη και ασφαλή μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, συμβάλλοντας στην τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη τόσο σε οικονομικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο.

1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο πλαίσιο λειτουργίας των οδικών υποδομών, όπου η έμφαση της διαχείρισης της συντήρησης δίνεται στην κατάσταση των οδοστρωμάτων υπό την έννοια ενός υφιστάμενου περιουσιακού στοιχείου.

Αναλύονται τα συστατικά στοιχεία ενός συστήματος διαχείρισης, η στρατηγική παρακολούθησης της συμπεριφοράς οδών, το είδος και η συχνότητα των απαιτούμενων ελέγχων, ώστε να μπορεί το σύστημα να τροφοδοτηθεί με επάρκεια πληροφόρησης και να προκύψει ως αποτέλεσμα ένας ορθολογικός προγραμματισμός απαιτούμενων ενεργειών (Arezoumand et al., 2023). Επιπλέον, γίνεται ανασκόπηση σε θέματα που αφορούν στον τρόπο ανάλυσης και ερμηνείας των διαθέσιμων στοιχείων και των δεδομένων συμπεριφοράς οδών, λόγω της άμεσης διασύνδεσης της τεχνικής και οικονομικής συνιστώσας της διαχείρισης.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία απαρτίζεται, μαζί με το τρέχον εισαγωγικό κεφάλαιο, από πέντε κεφάλαια συνολικά. Ειδικότερα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων διαχείρισης οδικών υποδομών και διατυπώνονται έννοιες που αφορούν στη διαχείριση, τα συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, τα επίπεδα διαχείρισης, τη στρατηγική παρακολούθησης, κ.α.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται ο πυρήνας και τα συστατικά μέρη ενός συστήματος διαχείρισης οδικών υποδομών. Ειδικότερα, αναλύονται τα απαιτούμενα στοιχεία που χρειάζεται το σύστημα, ένα τυπικό πρόγραμμα παρακολούθησης οδών (συστήματα, είδος και συχνότητα ελέγχων, κλπ.), καθώς και οι δείκτες συμπεριφοράς οδών που καταγράφονται σύμφωνα με την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η σύνθεση των στοιχείων συλλογής προκειμένου το σύστημα διαχείρισης να μπορεί να συμβάλει στη βέλτιστη πρόταση ενεργειών συντήρησης. Ειδικότερα, σχολιάζεται η αξιολόγηση και ο έλεγχος επάρκειας των διαθέσιμων στοιχείων, οι άξονες επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων και η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Με το πέρας της εργασίας, γίνεται παράθεση των βιβλιογραφικών αναφορών που αξιοποιήθηκαν για την διαμόρφωση της παρούσας εργασίας.

2. Η ανάγκη δημιουργίας συστημάτων διαχείρισης

2.1. Γενικά Στοιχεία

Παγκοσμίως, οι υποδομές μεταφορών αποτελούν ένα κρίσιμο συστατικό για την οικονομική ανάπτυξη σε όλα τα επίπεδα εισοδήματος σύμφωνα με τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD, 2013). Έμμεσα, η συμβολή των συγκοινωνιακών υποδομών στην οικονομική ανάπτυξη προκύπτει μέσω πληθώρας καναλιών, που επιτρέπουν παραγωγικές ιδιωτικές επενδύσεις και την δημιουργία νέων δραστηριοτήτων (εφοδιαστικές αλυσίδες). Με αυτόν τον τρόπο, οι σύγχρονες οδικές υποδομές αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο του συνολικού δικτύου μεταφορών, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο. Αποτελούν θεμελιώδεις βασικές επενδύσεις και ανεκτίμητα περιουσιακά στοιχεία, συμβάλλοντας στην διασφάλιση της οικονομικής και κοινωνικής ευημερίας.

Αφού εμπεδωθεί ο ρόλος των οδικών υποδομών ως περιουσιακά στοιχεία, οι διαχειριστές των οδών θα πρέπει να μεριμνήσουν τόσο για την διατήρηση της κατάστασής τους στο παρόν, όσο και να προβλέψουν ποια θα είναι η κατάστασή τους στο μέλλον. Δεδομένης της πολυπλοκότητας των οδικών δικτύων, η διαχείρισή τους θα πρέπει να ανατεθεί σε ένα εξειδικευμένο προσωπικό με τεχνικές και οικονομικές γνώσεις, το οποίο θα είναι υπεύθυνο από την μία για την διαχείριση των οδικών υποδομών ως περιουσιακό στοιχείο (διενέργεια ελέγχων, χρήση συστημάτων, συλλογή και ερμηνεία στοιχείων), αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνει συντονισμός των δραστηριοτήτων και λήψη αποφάσεων που απαιτούνται για την συντήρηση και την αναβάθμιση των οδικών υποδομών.

Οι κύριοι ιδιοκτήτες μίας οδικής υποδομής (ενδεικτικά κρατικοί ή ιδιωτικοί φορείς) σε συνεργασία με τους διαχειριστές (ανάδοχοι, κοινοπραξίες, εργολάβοι) πρέπει να συντονίσουν ένα σύνολο δραστηριοτήτων όπως ο σχεδιασμός του μεταφορικού συστήματος, η διαχείριση της κυκλοφορίας και της μεταφορικής ζήτησης, η διαχείριση της λειτουργίας και της συντήρησής τους, με σκοπό την μεγιστοποίηση των οικονομικών ωφελειών καθώς και του επιπέδου των υπηρεσιών που παρέχονται από τα συστήματα μεταφοράς (δηλαδή τις οδικές υποδομές εν προκειμένω) στους τελικούς χρήστες των οδών.

Γενικά, οι διαχειριστές υποδομής υποχρεούνται να λειτουργούν βάσει ειδικής νομοθεσίας, αυστηρών κατευθυντήριων γραμμών, οικονομικών περιορισμών ή άλλων κανονισμών που σε συνδυασμό με πολλές τεχνολογικές εξελίξεις και την πρόοδο της έρευνας υπογραμμίζουν την ανάγκη για ελεγχόμενη εξέλιξη του τρόπου διαχείρισης των περιουσιακών στοιχείων (Austroads, 2018a). Ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες ενός συγκεκριμένου οδικού δικτύου, υπάρχει μία

συνάφεια ως προς τα επίπεδα δέσμευσης των φορέων διαχείρισης και των ευθυνών που αυτοί έχουν κατά τη διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων του οδικού δικτύου. Ενδεικτικά αναφέρεται:

- η διαμόρφωση του πυρήνα διοίκησης των οδών που επικεντρώνεται στην βελτίωση της συμπεριφοράς της οδικής υποδομής, στην μεγιστοποίηση της κοινωνικής συνεισφοράς των οδών (εξυπηρέτηση αναγκών μετακίνησης ανθρώπων και αγαθών) και στην ανάπτυξη στρατηγικής κουλτούρας για την συνεχή επίτευξη αυτών των προσδοκιών.
- η συνεχή δέσμευση για την συστηματική ανάπτυξη και βελτίωση πρακτικών διαχείρισης, και τεχνοοικονομικού προγραμματισμού.

Πέρα από την τεχνική συνιστώσα που απαιτείται για να μπορεί να γίνει αντικειμενική αξιολόγηση της κατάστασης και της συμπεριφοράς των οδών, η διαδικασία της διαχείρισης περιλαμβάνει και το σκέλος της λήψης αποφάσεων σχετικά με το είδος των απαιτούμενων ενεργειών. Πρόκειται ουσιαστικά για τον βέλτιστο τεχνοοικονομικό προγραμματισμό ενεργειών (που, πότε, ποια η αλληλουχία των ενεργειών) που απαιτούνται για να διατηρηθεί ή να βελτιωθεί η ποιότητα/κατάσταση των οδικών περιουσιακών στοιχείων. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμης σημασίας η εφαρμογή μιας ισχυρής και διαφανούς διαδικασίας με την οποία, αφενός θα ελέγχεται η κατάσταση της οδού, αφετέρου θα υλοποιείται ένα χρηματοοικονομικό μοντέλο δράσης υπό τον περιορισμό των διατιθέμενων κεφαλαίων και του γενικότερου προϋπολογισμού του φορέα διαχείρισης (Elwahsh et al., 2023; Moins et al., 2020). Συνεπώς, καθίσταται σαφές ότι οι εν λειτουργία αυτοκινητόδρομοι πρέπει να παρακολουθούνται και, εξίσου σημαντικά, να διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα μέσω μιας ολιστικής, αλλά στιβαρής προσέγγισης, έτσι ώστε τα περιουσιακά τους στοιχεία (δηλαδή τα οδοστρώματα κυρίως, αλλά και τυχόν άλλος οδικός εξοπλισμός, πχ στηθαία ασφαλείας, πινακίδες σήμανσης, κ.α.) να μεγιστοποιούν τα οφέλη καθώς και το επίπεδο των υπηρεσιών που παρέχουν προς τους χρήστες της οδού.

Η διαχείριση των οδικών υποδομών πρέπει να καθοριστεί αφενός από την προσδοκώμενη λειτουργία τους, αφετέρου από τους οικονομικούς περιορισμούς, τις ανάγκες και τις προσδοκίες του φορέα διαχειριστή. Ορισμένες κοινώς αναγνωρισμένες προκλήσεις στη διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων των αυτοκινητοδρόμων (και πιο συγκεκριμένα των οδοστρωμάτων) περιλαμβάνουν την ανάγκη:

- ελέγχου της πολυπλοκότητας των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος (πχ διαφορετικοί τύποι οδοστρώματος ή τμήματα με διαφορετικό όγκο κυκλοφορίας και στρατηγική σημασία, τμήματα με γέφυρες ή διασταυρώσεις επιρρεπή σε συμβάντα και ατυχήματα, κλπ.),

- ανάπτυξης σχεδίων για τη θέσπιση πρακτικών παρακολούθησης και χάραξης στρατηγικών συντήρησης,
- κατανομής πόρων για την υποστήριξη τόσο των δραστηριοτήτων παρακολούθησης όσο και των δράσεων συντήρησης,
- οργάνωσης και διαχείρισης του προσωπικού και κατανομής ρόλων και ευθυνών, και
- επανεξέταση και επαναξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των συνολικών διαδικασιών διαχείρισης (διαδικασία ανατροφοδότησης).

Ως εκ τούτου, απαιτείται ένα σύστημα διαχείρισης για τον αποτελεσματικό συντονισμό όλων των σχετικών δραστηριοτήτων. Η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία που απαιτεί γνώσεις, δεξιότητες και τεχνοοικονομική ικανότητα.

2.2. Συστήματα παρακολούθησης συμπεριφοράς οδών

Η υλοποίηση ενός έργου κατασκευής οδοστρώματος περιλαμβάνει διάφορες επιμέρους φάσεις, οι βασικές εκ των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 2.1. Η έννοια της διαχείρισης υφίσταται αμέσως μετά την παραλαβή ενός οδοστρώματος και την παράδοσή του στην κυκλοφορία, όπου η οδός περνάει από την φάση ολοκλήρωσης της κατασκευής στη φάση της λειτουργίας. Για την αποτελεσματική διαχείριση της οδού στο πλαίσιο της λειτουργίας της, είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος μέσω ενός Συστήματος Παρακολούθησης Οδοστρωμάτων (Pavement Monitoring System).



Εικόνα 2.1: Βασικά στάδια υλοποίησης ενός οδικού έργου

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν στην εισαγωγή, η κατασκευή μεγάλου μέρους του οδικού δικτύου έχει ολοκληρωθεί στη χώρα μας (Εικόνα 2.2), αλλά και διεθνώς. Με βάση το υπάρχον οδικό δίκτυο, η εξέλιξη των κοινωνικών αναγκών όσον αφορά στην απρόσκοπτη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών προϋποθέτει την συντήρηση και διαχείριση των οδοστρωμάτων που έχουν ήδη κατασκευαστεί. Κατά συνέπεια, το κόστος που σχετίζεται με τα έργα οδοποιίας έχει μετατοπιστεί σταδιακά τις τελευταίες δεκαετίες προς την διαχείριση της συντήρησης παρά στην κατασκευή νέων υποδομών.



Εικόνα 2.2: Επισκόπηση οδικού δίκτυο Ελλάδας.

Επιπλέον, η κατάσταση μιας οδού συνδέεται άμεσα και με το κόστος που επιβαρύνει τους χρήστες. Συγκεκριμένα, η βελτίωση της κατάστασης ενός οδοστρώματος ισοδυναμεί με μείωση του κόστους του χρήστη, το οποίο σχετίζεται με το λειτουργικό κόστος του οχήματος, την ταχύτητα των οχημάτων, τους χρόνους μετακίνησης, την ποιότητα κύλισης και την ασφάλεια της κυκλοφορίας. Επιπλέον, είναι εύλογο ότι τα ολοένα αυξανόμενα φορτία λόγω αύξησης της κυκλοφορίας και της μεταφορικής ζήτησης σε συνδυασμό με την έλλειψη επαρκών διατιθέμενων πόρων, μπορούν να επιταχύνουν τον ρυθμό αύξησης των φθορών μίας οδού (Εικόνα 2.3), γεγονός το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο πλαίσιο της βέλτιστης διαχείρισης της συντήρησής τους.

Μία οδός με εκτεταμένες φθορές επιβαρύνει το κόστος λειτουργίας του οχήματος, αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου και ως εκ τούτου οδηγεί σε αύξηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Υπάρχουν διεθνείς αναφορές που συνδέουν το επίπεδο ομαλότητας της επιφάνειας μίας οδού με το κόστος καυσίμου και το επίπεδο των παραγόμενων ρύπων (Gao et al., 2023). Όταν η κατάσταση ενός οδοστρώματος παραμένει σε βέλτιστα επίπεδα, τότε το κόστος των χρηστών της οδού παραμένει σε ανεκτά επίπεδα.

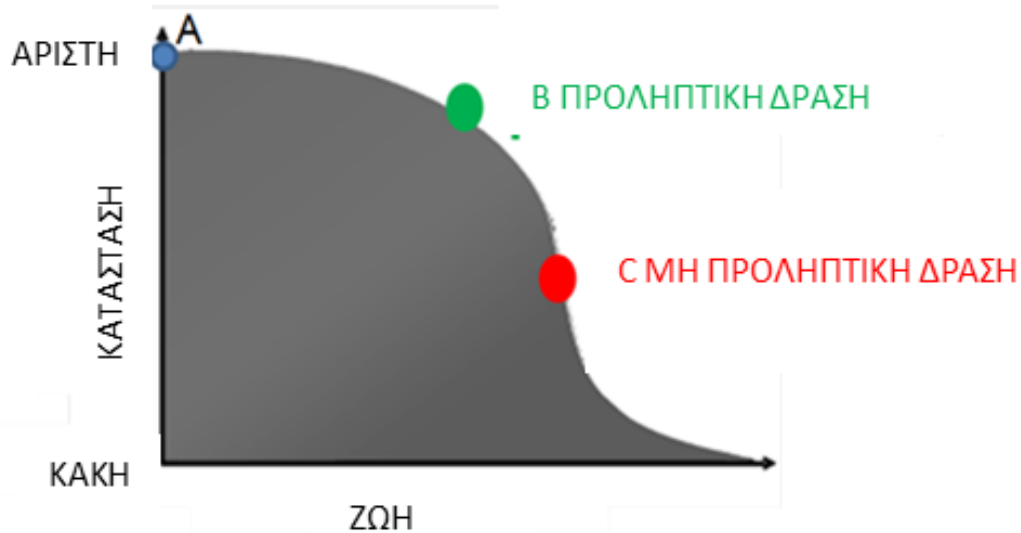


Εικόνα 2.3: Κυκλοφορία, πόροι και φθορά οδοστρώματος.

Με βάση τον φορέα διαχείρισης οδών στην Αυστραλία, «Austroads», ως «διαχείριση περιουσιακών στοιχείων» ορίζεται μια συστηματική διαδικασία αποτελεσματικής συντήρησης, αναβάθμισης και λειτουργίας περιουσιακών στοιχείων, συνδυάζοντας τις αρχές μηχανικής με την ορθή επιχειρηματική πρακτική και οικονομική λογική (Austroads, 2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2018e). Για τους ίδιους λόγους, ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρώματος (Pavement Management Systems, PMS) εμφανίζεται ως απαραίτητο εργαλείο ενός φορέα έργων οδοποιίας που παρέχει μια συστηματική μέθοδο συλλογής δεδομένων για την κατάσταση της οδού, την ανάλυση και την μοντελοποίηση για τη λήψη αποφάσεων που σχετίζεται με τη βελτιστοποίηση πόρων σε ένα δίκτυο οδών και οδοστρωμάτων. Ο όρος PMS άρχισε να χρησιμοποιείται στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 για να περιγράψει όλα τα εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων για όλο το φάσμα των δραστηριοτήτων που εμπλέκονται στη διαχείριση της συντήρησης οδών (FHWA, 2005).

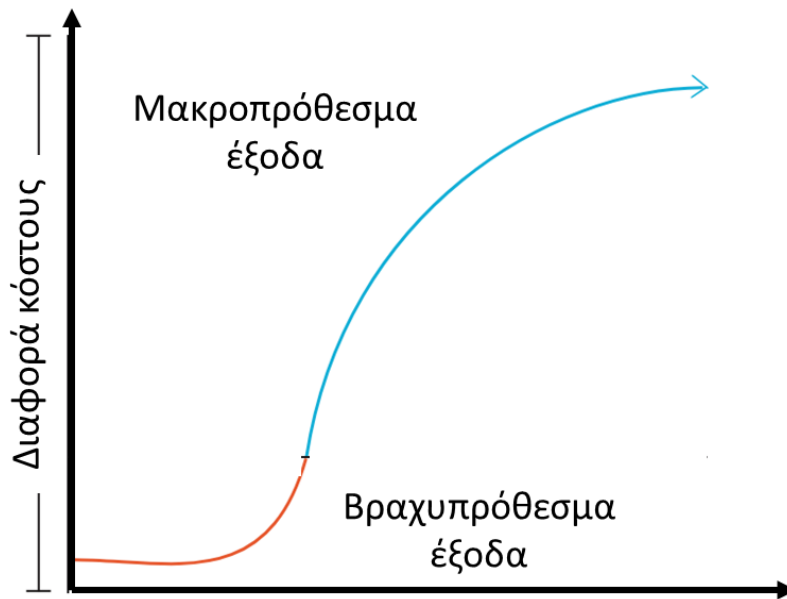
Με την επίδραση της κυκλοφορίας και της κλιματικής αλλαγής, οι υποδομές και τα οδοστρώματα αναμένεται να παρουσιάσουν φθορές με την πάροδο του χρόνου και να χάσουν την ικανότητα εξυπηρέτησης σύμφωνα με την τυπική καμπύλη συμπεριφοράς υποδομών, που φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Συνεπώς, η φιλοσοφία της διαχείρισης έγκειται στο εξής εύλογο σκεπτικό: αντί να αφήσει ο φορέας διαχείριση την κατάσταση της οδού να επιδεινωθεί μέχρι την ανάγκη της πλήρους ανακατασκευής, απαιτείται περιοδική επέμβαση για τοπική αποκατάσταση και συντήρηση των επισκευών της οδού, πρακτική η οποία εξοικονομεί κόστη μακροπρόθεσμα και αυξάνει εν δυνάμει την συνολική διάρκεια ζωής των οδικών υποδομών. Στην Εικόνα 2.5, η

επίδραση του κόστους παρουσιάζεται ποιοτικά για την περίπτωση της αντιδραστικής προσέγγισης. Ενώ αρχικά, φαίνεται να υπάρχει εξοικονόμηση χρημάτων, σε βάθος χρόνου, οι καθυστερημένες ενέργειες συντήρησης και αποκατάστασης έχουν πολύ μεγάλη επίπτωση στον χρηματοοικονομικό προγραμματισμό του οδικού φορέα διαχείρισης.

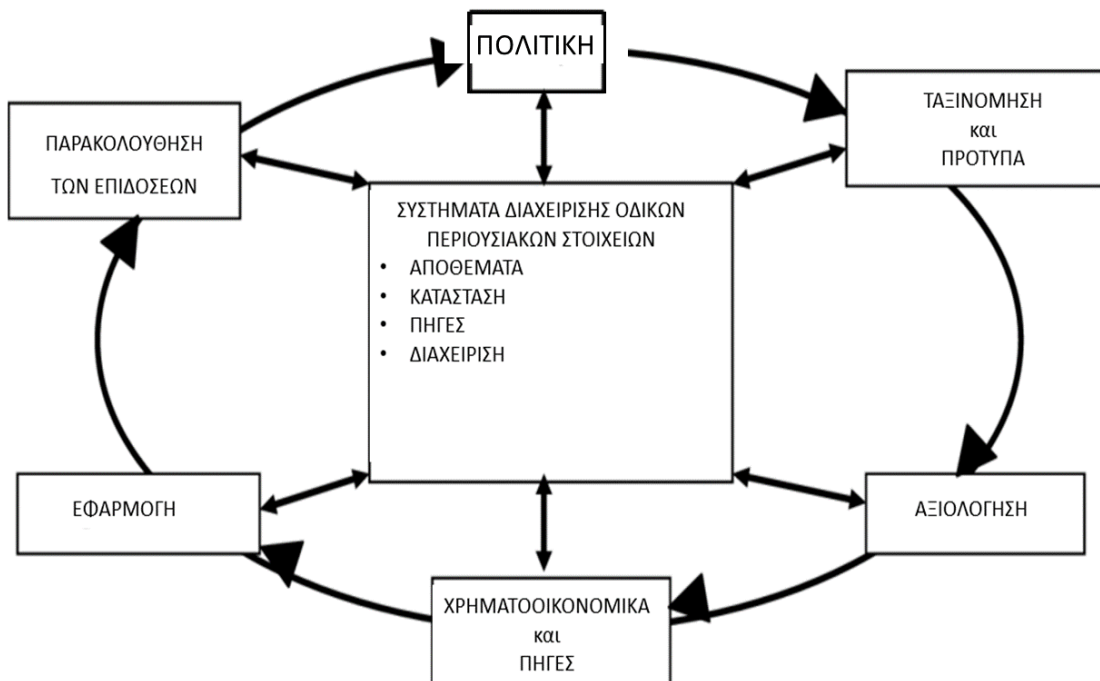


Εικόνα 2.4: Τυπική καμπύλη απόδοσης οδοστρωμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ένα PMS προσπαθεί να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτή μια βέλτιστη συμπεριφορά της οδού και, προκειμένου να διατηρηθεί αυτή με την πάροδο του χρόνου, απαιτείται η πιο αποτελεσματική κατανομή των πόρων δεδομένου του υφιστάμενου προϋπολογισμού. Ένα PMS αναλύει επίσης τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και τους σχετικούς πόρους και συμβάλλει στην ανάπτυξη και την διαχείριση της βάσης δεδομένων. Το τελευταίο είναι απαραίτητο για την ορθολογική προγραμματισμό παρεμβάσεων, την αποκατάσταση της κατάστασης των οδών και τη βελτίωση των παρεχόμενων επιπέδων υπηρεσίας. Τα τυπικά χαρακτηριστικά και οι διεργασίες ενός PMS φαίνονται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.5: Εξέλιξη κόστους (ποιοτικά) για την περίπτωση καθυστερημένης παρέμβασης σε οδό με φθορές.



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση ενός PMS και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κύριων χαρακτηριστικών του.

Συνολικά, η ύπαρξη ενός PMS μπορεί να βοηθήσει ουσιαστικά στην ανάπτυξη μιας κουλτούρας συνεχούς παρακολούθησης της κατάστασης των οδικών υποδομών. Ουσιαστικά, ένα PMS

αναμένεται να παρέχει στους φορείς των έργων οδοποιίας ένα πλαίσιο που μπορεί να καθοδηγήσει τις ενέργειές τους και να εφαρμόσει μια προσέγγιση, η οποία παρέχει στους χρήστες κατάλληλα αποτελέσματα με στόχο την ασφαλή μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών.

2.3. Συστατικά στοιχεία συστημάτων διαχείρισης

Υπάρχουν τρία κύρια στοιχεία ενός επιτυχημένου PMS: (α) η συλλογή δεδομένων, (β) η ανάλυσή τους και (γ) η διαδικασία ενημέρωσης – ανατροφοδότησης.

Αρχικά, πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα που σχετίζονται με την καταγραφή της οδού (δηλαδή φυσικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος όπως αριθμός λωρίδων, μήκος τμήματος, κ.λπ.), το ιστορικό της οδού (δηλαδή ημερομηνίες και τύποι έργων κατασκευής, ανακατασκευής και συντήρησης), έρευνες κατάστασης (π.χ. ποιότητα διαδρομής) και όγκος εξυπηρετούμενης κυκλοφορίας (π.χ. τύπος οχήματος, δεδομένα φορτίων, υπέρβαρων οχημάτων κ.λπ.). Μια συνεπής συλλογή και αποθήκευση όλων αυτών των δεδομένων αντιστοιχεί σε μια ανάπτυξη βάσης δεδομένων που περιέχει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την σχετική ανάλυση της κατάστασης του οδοστρώματος (Ahmed et al., 2017; Austroads, 2018c; Xu et al., 2021).

Η ανάλυση περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

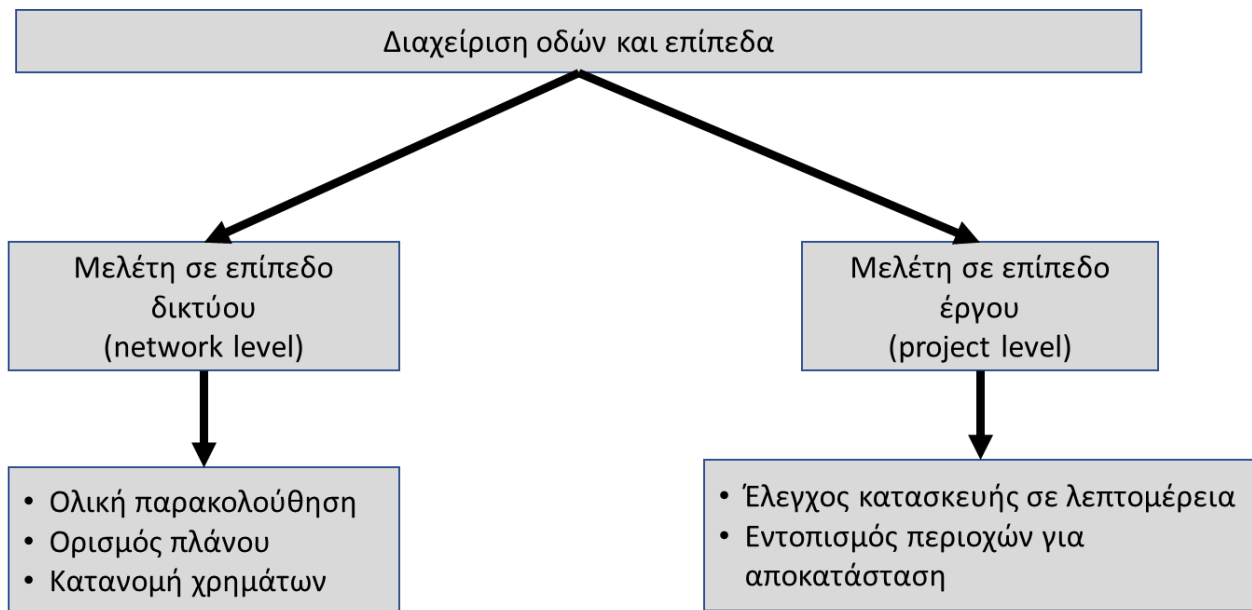
- την αξιολόγηση της κατάστασης και συγκεκριμένα της επιφάνεια κύλισης, αντολισθητικής ικανότητας, και της δομικής επάρκειας, κα.,
- την εκτίμηση της επίδρασης της κατάστασης της οδού στην εναπομένουσα διάρκεια ζωής (remaining life),
- την διαμόρφωση επενδυτικής στρατηγικής για παρακολούθηση των οδών σε επίπεδο δικτύου και έργου (network and project level analysis) και την ανάλυση του κύκλου ζωής, και
- την ανατροφοδότηση και την βελτίωση του PMS με βάση την σύγκριση πραγματικής και προβλεπόμενης συμπεριφοράς οδών και οδοστρωμάτων (Xu et al., 2021).

Σημειώνεται ότι ένα PMS πρέπει να είναι αξιόπιστο. Έτσι, η διαδικασία της ανατροφοδότησης που προαναφέρθηκε είναι κάτι παραπάνω από κρίσιμη και σημαντική για την επαλήθευση και την βελτίωση της αξιοπιστίας της. Το τελευταίο προσεγγίζεται μέσω σύγκρισης μεταξύ των προβλεπόμενων και των εκτελεσμένων ενεργειών, τόσο από οικονομική όσο και από την τεχνική άποψη. Με άλλα λόγια, το πραγματικό κόστος συντήρησης, αποκατάστασης και ανασυγκρότησης των οδικών υποδομών συγκρίνεται με εκείνα που προβλέπονται από την ανάλυση με το εργαλείο PMS. Οι παρατηρήσεις πεδίου αναφορικά με την κατάσταση της οδού και της πραγματικής

κυκλοφορίας συγκρίνονται με εκείνες που προβλέπονται από τα μοντέλα PMS, προκειμένου να μπορούν να επαληθεύουν διαχρονικά την απόδοση του συστήματος αυτού.

2.4. Επίπεδα διαχείρισης οδικών υποδομών (έργου και δικτύου)

Ένα PMS καθορίζει εκείνες τις δραστηριότητες που διατηρούν το οδικό δίκτυο σε επίπεδα που πληρούν την σύγκριση με προκαθορισμένα ελάχιστα πρότυπα ή απαιτήσεις. Κατά συνέπεια, ο τύπος οποιασδήποτε επέμβασης συντήρησης ή μεγαλύτερης παρέμβασης για αποκατάσταση δεν μπορεί να επιλέγεται αυθαίρετα από τους υπεύθυνους μηχανικούς χωρίς επιστημονική βάση και τεκμηρίωση. Εφόσον έχει ήδη καταστεί σαφές ότι οι αποτελεσματικές πολιτικές συντήρησης των οδών μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι εξίσου σημαντικές με τις καλές κατασκευαστικές πρακτικές, αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον υπάρχει διεθνώς σχετικά με τις δύο συνιστώσες ανάλυσης της έννοιας της διαχείρισης κατά την ανάπτυξη ενός PMS. Αυτές είναι: (α) η ανάλυση σε επίπεδο δικτύου (network level analysis), και (β) η ανάλυση σε επίπεδο έργου (project level analysis) (Szczerpański et al., 2020; Lee et al., 2021). Η σύγκρισή τους φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Επίπεδα διαχείρισης των οδών.

Η διαχείριση σε επίπεδο δικτύου (network level) έχει σαν κύριο σκοπό τον καθορισμό προτεραιοτήτων για την απορρόφηση πόρων και τον προγραμματισμό των εργασιών προστασίας, συντήρησης, ενίσχυσης, αποκατάστασης ή ακόμα και κατασκευής νέων οδικών τμημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του διατιθέμενου προϋπολογισμού. Κατά συνέπεια, η κατάσταση των οδικών υποδομών και η αξιολόγηση των αναγκών συντήρησης ελέγχεται μακροσκοπικά. Όταν η απαίτηση σε ανάλυση και αξιολόγηση γίνεται λεπτομερέστερη (για

παράδειγμα όταν απαιτείται ακριβής εκτίμηση στο μήκος ή στο βάθος ανακατασκευής), τότε απαιτείται ανάλυση σε επίπεδο έργου (project level). Η διαχείριση σε επίπεδο έργου πραγματοποιείται την κατάλληλη στιγμή κατόπιν προγραμματισμού και αντιπροσωπεύει την εφαρμογή των αποφάσεων που έχουν ήδη παρθεί σε επίπεδο δικτύου (Mohamed et al., 2022). Με άλλα λόγια, η μακροσκοπική ανάλυση σε επίπεδο δικτύου καθορίζει σε ποια επιμέρους τμήματα πρέπει να διενεργηθεί ανάλυση σε επίπεδο έργου.

Η διαχείριση σε επίπεδο δικτύου ενδεικτικά περιλαμβάνει τα ακόλουθα (Wang et al., 2020):

- αρχικός διαχωρισμός ενός οδικού δικτύου σε επιμέρους τμήματα,
- συλλογή και επεξεργασία στοιχείων,
- καθορισμός κριτηρίων για ένα ελάχιστο επίπεδο εξυπηρευτικότητας, μέγιστο επίπεδο επιφανειακών φθορών κ.α.,
- καθορισμός βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων αναγκών,
- απαιτήσεις προϋπολογισμού,
- ανάπτυξη εναλλακτικών σεναρίων,
- χρονοδιάγραμμα εργασιών και καθορισμός προτεραιοτήτων για συντήρηση/αποκατάσταση.

Η διαχείριση σε επίπεδο έργου ενδεικτικά περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- επιπλέον διαχωρισμός σε υποτιμήματα εντός ενός συγκεκριμένου οδικού τμήματος προκειμένου να γίνει λεπτομερέστερη ανάλυση,
- συλλογή λεπτομερών στοιχείων (επιτόπου ή και για χρήση σε εργαστήριο) και επεξεργασία,
- πρόβλεψη της συμπεριφοράς της οδού κατόπιν ανάλυσης των στοιχείων,
- ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου οδικού τμήματος,
- επιλογή του βέλτιστου σεναρίου με αναλυτικό υπολογισμό κόστους και συγκεκριμένες ποσότητες (προμέτρηση),
- υλοποίηση και εφαρμογή (κατασκευή, περιοδική συντήρηση, κ.α.).

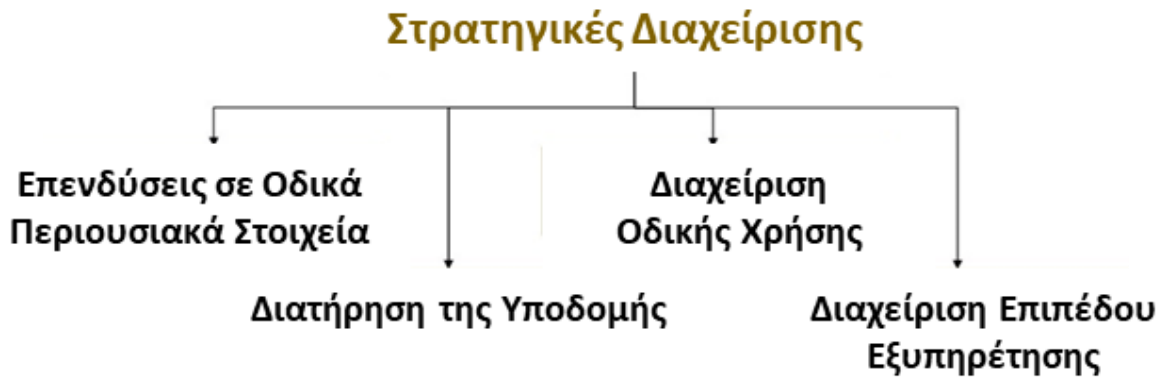
Αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια του δικτύου μπορεί να αναφέρεται σε ένα σύνολο οδικών τμημάτων που μπορεί ενδεχομένως να ανήκουν στον ίδιο οδικό άξονα αλλά να διαθέτουν διαφορετικά επιμέρους χαρακτηριστικά (Ruiz et al., 2020).

2.5. Στρατηγική, ιεράρχηση και λήψη αποφάσεων

Η διαχείριση των οδικών δικτύων και των περιουσιακών τους στοιχείων (πχ οδοστρώματα, κα.) θα πρέπει να γίνεται με ολοκληρωμένο και ολιστικό τρόπο. Για το σκοπό αυτό, η απόφαση για την καταλληλότερη στρατηγική προσέγγιση αποτελεί βασικό σημείο εκκίνησης για κάθε οδικό φορέα που επιθυμεί να αναπτύξει και να υιοθετήσει ένα συστήματα διαχείρισης. Πολλά ζητήματα πρέπει να εξεταστούν κατά την έναρξη ενός τέτοιου συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των αναγκών ή των ωφελειών της κοινωνίας (πχ οικονομική ανάπτυξη, κοινωνική κινητικότητα, κλπ.), των ωφελειών των χρηστών (πχ αποδοτικές μετακινήσεις και μεταφορές, κλπ.), των απαιτήσεων οδικής ασφάλειας (πχ περιορισμένα συμβάντα, κλπ.) και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του οδικού δικτύου και της χρήσης γης (σκοπός της κινητικότητας, κ.λπ.).

Η βέλτιστη απόδοση ενός οδικού συστήματος μπορεί να επιτευχθεί στρατηγικά μέσω της ολοκληρωμένης διαχείρισης της κατάστασης και της χρήσης των περιουσιακών στοιχείων της οδικής υποδομής (Aliyeva et al., 2023). Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζονται από ένα συνδυασμό ενεργειών (πχ κατασκευαστικά έργα, δραστηριότητες συντήρησης κλπ.) για τη διαχείριση και τη συντήρηση των περιουσιακών στοιχείων της οδού, μαζί με πρόσθετα μέτρα λειτουργικής φύσης που αποσκοπούν στην διαχείριση του τρόπου χρήσης του οδικού συστήματος και του τρόπου με τον οποίο οι χρήστες της οδού και η κοινωνία έχουν πρόσβαση στο οδικό δίκτυο και επωφελούνται από αυτό.

Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζονται οι σημαντικότεροι πυλώνες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης. Μια τέτοια προσέγγιση παρέχει μια σταθερή βάση για την ανάπτυξη επιπέδων εξυπηρέτησης των χρηστών της οδού. Σημειώνεται ότι οι στρατηγικές διαχείρισης μπορούν να αναφέρονται τόσο στην ίδια την υποδομή του οδοστρώματος, όσο και στο συνολικό περιβάλλον της οδού, το οποίο, αν και περιλαμβάνει θέματα εκτός της μηχανικής οδών, επηρεάζει τη συμπεριφορά χρήσης της οδού και την ικανοποίηση των οδηγών από το συνολικό οδικό δίκτυο (πχ διαμορφώσεις κεντρικής και πλευρικής νησίδας, αντικατάσταση στηθαίων ασφαλείας λόγω παλαιότητας, κα.).



Εικόνα 2.8: Πυλώνες των στρατηγικών διαχείρισης οδών.

Στη συνέχεια περιγράφονται τέσσερις επιμέρους συνιστώσες διαχείρισης.

- **Διαχείριση του οδικού συστήματος και επενδυτική στρατηγική:** πρόκειται για μια συνολική και ολιστική προσέγγιση για τη διαχείριση όλων των πτυχών που σχετίζονται με το οδικό δίκτυο. Αρχικά, αξιολογούνται οι ανάγκες και οι προσδοκίες της κοινότητας για τις επιδόσεις του οδικού συστήματος, ώστε να καθοριστούν τα επίπεδα των προτύπων εξυπηρέτησης. Υπενθυμίζεται ότι η κατάσταση και η χρήση των περιουσιακών στοιχείων του οδικού συστήματος συμβάλλουν από κοινού στην επίτευξη των προσδοκώμενων επιδόσεων. Μια τέτοια στρατηγική είναι υπεύθυνη για μια ιεραρχία που αντανακλά την στρατηγική λειτουργία και το επίπεδο χρήσης των διαφόρων τμημάτων ενός εκτεταμένου δικτύου (Arezoumand et al., 2023). Οι προτεραιότητες και η αποτελεσματικότητα των κεφαλαιακών επενδύσεων στην ικανότητα και τη συνολική κατάσταση του οδικού συστήματος διατυπώνονται σε αυτό το χαρακτηριστικό της στρατηγικής, παρέχοντας έτσι ένα πλαίσιο για τη σταδιακή ανάπτυξη και αξιολόγηση των βελτιώσεων του οδικού συστήματος. Στόχος είναι η συνεχής επίτευξη των στόχων απόδοσης και των προδιαγραφών-στόχων με δεδομένη τη διαθεσιμότητα της χρηματοδότησης.
- **Στρατηγική διατήρησης της υποδομής:** αφού καθοριστούν τα πρότυπα επιδόσεων, απαιτείται σχέδιο δράσης για τη διατήρηση αποδεκτών επιπέδων κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων. Έτσι, το επίκεντρο αυτού του χαρακτηριστικού της στρατηγικής είναι η διατήρηση των υφιστάμενων περιουσιακών στοιχείων με βελτιστοποιημένο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των οδών. Στην πραγματικότητα, οι στόχοι επιδόσεων (όπως καθοδηγούνται από τις ανάγκες και τις προσδοκίες της κοινωνίας) μεταφράζονται σε προτεραιότητες προκειμένου να γίνει σωστή και αποτελεσματική διαχείριση της κατάστασης των στοιχείων του οδικού δικτύου. Προσδιορίζονται συγκεκριμένες δράσεις συντήρησης ή/και αναβάθμισης που

απαιτούνται για την επίτευξη και διατήρηση των προτύπων κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων. Αυτό το χαρακτηριστικό της στρατηγικής αξιολογεί τόσο τα μετρούμενα όσο και τα προβλεπόμενα πρότυπα φθοράς, τις επιπτώσεις των διαφόρων και εναλλακτικών στρατηγικών συντήρησης στο κόστος του κύκλου ζωής των περιουσιακών στοιχείων του οδοστρώματος και την επίδραση της κατάστασής τους στο κόστος των χρηστών της οδού, την ποιότητα της διαδρομής και την παρεχόμενη ασφάλεια (Austroads, 2018d). Ως εκ τούτου, μπορεί να λειτουργήσει ως πρωταρχικός, αλλά και βιώσιμος οδηγός για τους διαχειριστές περιουσιακών στοιχείων και το προσωπικό διαχείρισης συντήρησης, σκοπός των οποίων είναι να διασφαλίσουν την επίτευξη των στόχων για την κατάσταση των οδών.

- **Στρατηγική διαχείρισης με βάση την οδική χρήση:** αφορά κυρίως θέματα που δεν συσχετίζονται με το οδόστρωμα ή την κατάσταση των οδών. Συνολικά, αυτό το χαρακτηριστικό της στρατηγικής βασίζεται στο γεγονός ότι το οδικό σύστημα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς. Ως εκ τούτου, αποτελεί ένα συμπληρωματικό πλαίσιο για τη λειτουργική διαχείριση της κυκλοφορίας και των συνθηκών χρήσης του οδικού δικτύου (πχ όρια ταχύτητας κλπ.). Για παράδειγμα, η επιλογή του χρόνου για επεμβάσεις συντήρησης πρέπει να ακολουθείται από μια στρατηγική διαχείριση τόσο για τις συμβατικές ροές κυκλοφορίας όσο και για τις ροές κυκλοφορίας στο εργοτάξιο (πχ αποφυγή κλεισίματος λωρίδων κυκλοφορίας σε ώρες αιχμής, θέματα οδικής ασφάλειας κλπ.).
- **Διαχείριση Επιπέδου Εξυπηρέτησης:** η στρατηγική αυτή αντιμετωπίζει το οδόστρωμα ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα που περιλαμβάνει περιουσιακά στοιχεία που σχετίζονται με το οδόστρωμα και περιουσιακά στοιχεία και ανέσεις που δεν σχετίζονται με το οδόστρωμα εντός ενός καθορισμένου διαδρόμου που γειτνιάζει με το οδόστρωμα (πχ πλευρικές ή κεντρικές διαχωριστικές νησίδες). Τα περιουσιακά στοιχεία που σχετίζονται με το οδόστρωμα αναφέρονται στην ίδια την υποδομή του οδοστρώματος που πρέπει να παραμείνει ανθεκτική (πχ περιορισμένες επιπτώσεις του οδικού θορύβου, αντοχή σε φυσικούς κινδύνους και κινδύνους πυρκαγιάς, ακεραιότητα του συνολικού τοπίου στην άκρη του δρόμου κλπ.). Τα περιουσιακά στοιχεία και οι ανέσεις εκτός οδοστρώματος μπορεί να περιλαμβάνουν πεζοδρόμια, πινακίδες, σήμανση κυκλοφορίας, καλωδιώσεις κλπ., περιουσιακά στοιχεία που σχετίζονται με την ασφάλεια (π.χ. μπάρες, στηθαία ασφαλείας, κλπ.), συστήματα αποστράγγισης, οχετοί, άλλες οδικές ανέσεις, όπως εγκαταστάσεις τουαλέτες και παροχής πόσιμου νερού, υπάρχουσα βλάστηση, κα. Όλα αυτά τα περιουσιακά στοιχεία απαιτούν διαχείριση συντήρησης προκειμένου να

πληρούνται τα επίπεδα εξυπηρέτησης που σχετίζονται με το ίδιο το οδόστρωμα, καθώς και τα αποδεκτά επίπεδα ασφάλειας και ανέσεων για το συνολικό οδικό σύστημα.

Σημειώνεται ότι οι συνιστώσες για τα περιουσιακά στοιχεία που περιγράφονται στα προηγούμενα εδάφια δεν μπορούν να αναπτυχθούν ή να εφαρμοστούν μεμονωμένα. Το συνολικό πλαίσιο είναι ένα ολοκληρωμένο σύνολο στρατηγικών που αναπτύσσονται για την επίτευξη των χαρακτηριστικών επιδόσεων του οδικού συστήματος και του οδοστρώματος, τα οποία θα επιτύχουν συλλογικά τα οφέλη που επιδιώκουν οι εμπλεκόμενοι φορείς για τους χρήστες της οδού.

Με βάση τον δεύτερο πυλώνα στρατηγικής (δηλαδή αυτόν της στρατηγικής διατήρησης της υποδομής), πρέπει να σημειωθεί ότι ένα κρίσιμο μέρος κάθε συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων είναι τα κριτήρια με βάση τα οποία λαμβάνονται οι αποφάσεις. Στα προγενέστερα συστήματα, υπήρχε η λογική της προσέγγισης «πρώτα το χειρότερο», καθώς τα πιο φθαρμένα οδοστρώματα είχαν την υψηλότερη προτεραιότητα για επισκευή. Ωστόσο, αυτό συνήθως οδηγεί σε μια μηδενική στρατηγική συντήρησης, η οποία προφανώς δεν είναι βιώσιμη σε βάθος χρόνου. Ως αποτέλεσμα, οι οδικοί φορείς έχουν υιοθετήσει σταδιακά μια προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη το κόστος του κύκλου ζωής και την ιεράρχηση των αναγκών συντήρησης (Salcedo et al., 2022). Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι το δίκτυο διατηρείται σε ικανοποιητική κατάσταση με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατά τη διάρκεια της ζωής του. Στα εξελιγμένα σύγχρονα κριτήρια μπορεί επίσης να ποσοτικοποιηθεί και να εξεταστεί το περιβαλλοντικό κόστος των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων επέμβασης και αποκατάστασης.

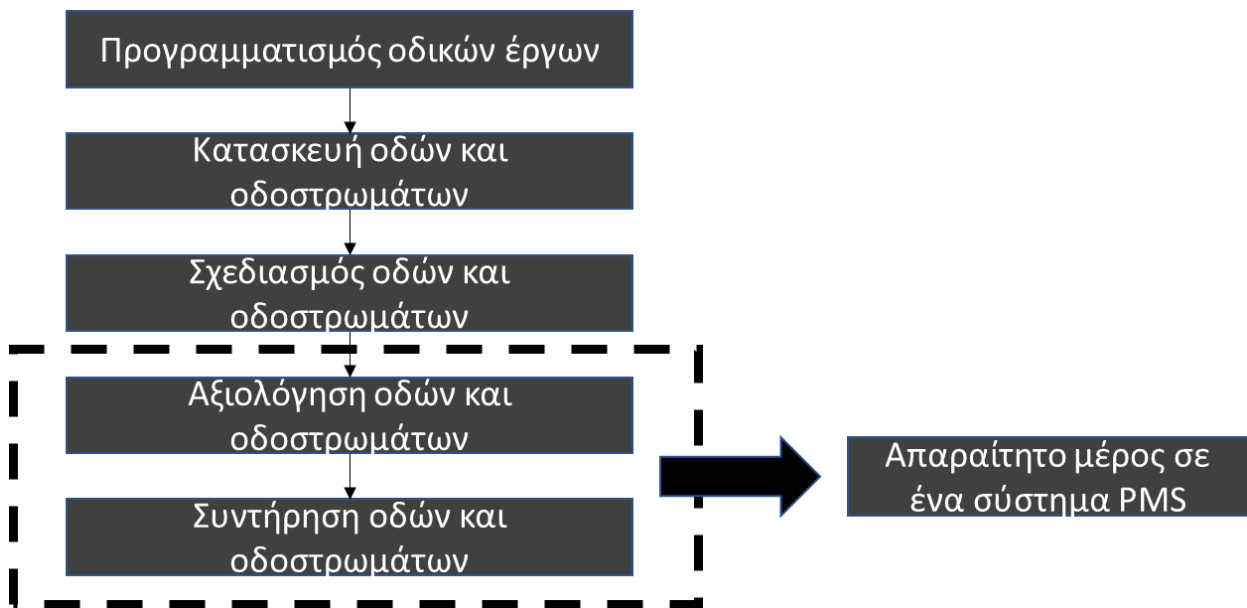
Συνοψίζοντας, διακρίνονται τέσσερις κύριες στρατηγικές συντήρησης για την διαχείριση των οδικών υποδομών:

1. η στρατηγική με καμία ενέργεια συντήρησης (δηλαδή η προσέγγιση "Do nothing"),
2. η βασική συντήρηση ρουτίνας (πχ σφράγιση ρωγμών, ανακατασκευή δομικά υγιών οδοστρωμάτων για την ικανοποίηση κριτηρίων λειτουργικότητας ή/και ασφάλειας),
3. η δομική ενίσχυση οδοστρωμάτων με ήπιες ανάγκες επέμβασης (πχ της τάξης των 4-5cm), και
4. η εις βάθος ανακατασκευή, δηλαδή σε βάθη μεγαλύτερα των 4-5cm καθώς υπάρχουν αυξημένες δομικές απαιτήσεις.

3. Δόμηση συστήματος διαχείρισης

3.1. Συντήρηση οδικού δικτύου

Λόγω της σημασίας της, η συντήρηση μίας οδού και των οδοστρωμάτων της καθοδηγείται και υλοποιείται μέσα από ένα ξεχωριστό σύστημα, που ονομάζεται Σύστημα Διαχείρισης Συντήρησης Οδοστρώματος (Pavement Maintenance Management Systems, PMMS). Το PMMS είναι ένα πρόγραμμα για τη διαχείριση και διατήρηση του οδικού δικτύου σε αποδεκτό επίπεδο ασφάλειας, ποιότητας και απόδοσης, το οποίο συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής της οδού. Αποτελεί κύριο συστατικό ενός ολοκληρωμένου PMS (Εικόνα 3.1). Ο βασικός σκοπός ενός PMMS είναι να επιτύχει την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των διαθέσιμων δημοσίων πόρων. Με άλλα λόγια, ένα εργαλείο PMMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαχειριστές οδικών υποδομών τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση στρατηγικών συντήρησης με συντονισμένο τρόπο, με στόχο την λειτουργία της οδού με ελάχιστο κόστος και μέγιστη απόδοση (Austroads, 2018a, 2018c, 2018e).



Εικόνα 3.1: Σύστημα Διαχείρισης Συντήρησης οδοστρωμάτων (PMMS) στο πλαίσιο ενός PMS.

Σε ένα δεδομένο τμήμα μίας υφιστάμενης οδού, ένα PMMS περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: (α) αξιολόγηση της παρούσας κατάστασης του οδοστρώματος, (β) πρόβλεψη μελλοντικών συνθηκών, (γ) διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων αποκατάστασης και (δ) επιλογή της καταλληλότερης επέμβασης για συντήρησης ή δράση αποκατάστασης. Το PMMS τυπικά χρησιμοποιεί ένα σύστημα αξιολόγησης της οδού που βασίζεται στον δείκτη κατάστασης

οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI), ο οποίος αξιολογεί την τρέχουσα και την μελλοντική κατάσταση της οδού.

Τα βασικά και κύρια στοιχεία ενός PMMS συμμορφώνονται με τα δεδομένα, την ανάλυση και την ανατροφοδότηση (βλ. κεφάλαιο 2). Ωστόσο, δεδομένου ότι το PMMS έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη αποφάσεων και την εφαρμογή, ο συνυπολογισμός του κόστους είναι ένα επιπλέον συστατικό για ένα επιτυχημένο PMMS. Τα βασικά στοιχεία ενός τυπικού PMMS περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Έρευνα κατάστασης οδοστρώματος: είναι το πιο βασικό στοιχείο ενός PMMS με στόχο την περιοδική αξιολόγηση της κατάστασης της οδού. Η συνεχής προσπάθεια και έρευνα τις προηγούμενες δεκαετίες αφιερώθηκε σε μεγάλο βαθμό σε μεθόδους για την προώθηση ή τη βελτίωση των συστημάτων μέτρησης και των τεχνικών συλλογής δεδομένων.
- Δημιουργία βάσεων δεδομένων: ο τεράστιος όγκος των συλλεγόμενων δεδομένων πρέπει να αποθηκευτεί κάπου για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί μελλοντική ανάλυση και να παραχθούν σημαντικές πληροφορίες. Οι βάσεις δεδομένων έχουν εξελιχθεί με τα χρόνια από απλά υπολογιστικά φύλλα ή βάσεις δεδομένων υπολογιστών σε πιο ισχυρές βάσεις και άλλες εφαρμογές που βασίζονται σε GIS. Το τελευταίο επιτρέπει την αντιστοίχιση πληροφοριών που συλλέγονται με συγκεκριμένες τοποθεσίες και θέσεις της οδού στο χώρο. Μια βάση δεδομένων πρέπει να είναι αρκετά εύχρηστη, και να παρέχει ουσιαστική και εύκολη πρόσβαση στα στοιχεία της με στόχο, είτε την απλή προβολή, είτε την επεξεργασία.
- Ανάπτυξη μοντέλων απόδοσης: πρόκειται για μοντέλα ανάλυσης που περιλαμβάνουν αλγόριθμους και εργαλεία αξιολόγησης της απόδοσης που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία δεδομένων συλλογής (Ruiz et al., 2020). Παράλληλα με το σκέλος της ανάλυσης, υπάρχουν και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

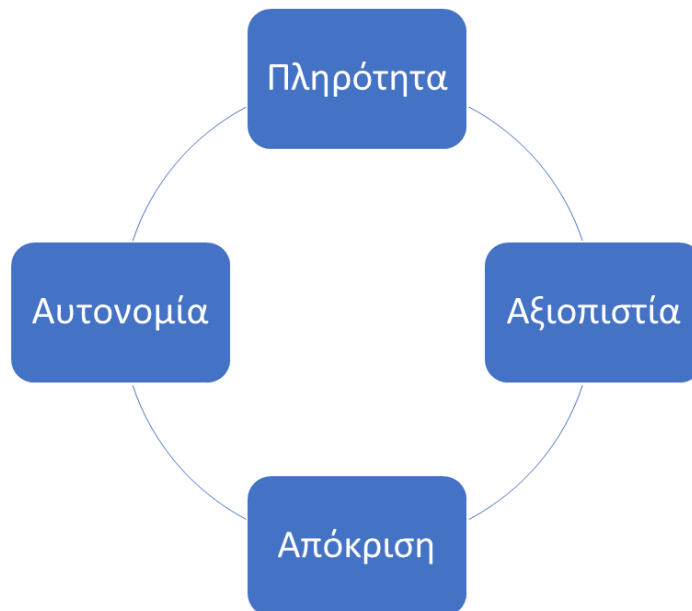
Κάθε οδικός φορέας που υιοθετεί ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων αναμένει γενικά να ικανοποιήσει ορισμένες βασικές προσδοκίες. Πρώτον, ένα PMS πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει την απόδοση του περιουσιακού στοιχείου και να εκτιμά το κόστος για διάφορες στρατηγικές συντήρησης και εναλλακτικές λύσεις επεξεργασίας. Στη συνέχεια, ένα PMS πρέπει να είναι προσαρμοστικό (δυναμικό), ώστε να ανταποκρίνεται κατάλληλα στις πιθανές αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης απόδοσης.

Ως αποτέλεσμα αυτού, σε ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων θα πρέπει να εισαχθούν οι εσωτερικές αλλαγές και πραγματοποιείται διαρκής επικαιροποίησή του. Λαμβάνοντας υπόψη

αυτά τα χαρακτηριστικά, ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων αποτελεί καλή επιχειρηματική πρακτική εάν:

1. ακολουθούνται αντικειμενικά μέτρα και πρωτόκολλα για την παρακολούθηση της κατάστασης του οδοστρώματος,
2. υιοθετούνται διαφανείς διαδικασίες μοντελοποίησης και ανάλυσης, και
3. το επαγγελματικό επίπεδο και η διοικητική υποστήριξη είναι συνεχώς στοχευμένες.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατανόηση και ποσοτικοποίηση των ειδικών αναγκών διαχείρισης του οδοστρώματος κάθε οργανισμού, κάτι που αναγκάζει ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων να ενσωματώσει βασικά ζητήματα λειτουργικότητας (Εικόνα 3.2) στις τεχνικές μοντελοποίησης της απόδοσης του οδοστρώματος.



Εικόνα 3.2: Ζητήματα ορθούς λειτουργίας ενός PMS (Austroads, 2018b).

Για τα ζητήματα αυτά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Πληρότητα: ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων περιλαμβάνει όλες τις σχετικές παραμέτρους και δείκτες που είναι αναγκαίοι για την εξήγηση των επιδόσεων του οδοστρώματος και του οδικού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που ένα μοντέλο είναι αρκετά περίπλοκο και η υπηρεσία δεν διαθέτει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για την ενεργοποίησή του, τότε το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να οδηγήσει σε αξιόπιστες εκτιμήσεις. Ωστόσο, για να διασφαλιστεί η μελλοντική βιωσιμότητα, παρόλο που ένα τέτοιο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ένα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, η πληρότητα συνεπάγεται ότι οι ανάγκες του μοντέλου μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπιστούν εκ νέου στο μέλλον.

- **Αυτονομία:** η αυτόνομη χρήση μοντέλων επιδόσεων οδοστρώματος στο πλαίσιο ενός συστήματος διαχείρισης οδοστρωμάτων μπορεί να μην οδηγεί απαραίτητα σε πρακτικά και ουσιαστικά αποτελέσματα. Τα επιμέρους μοντέλα πρέπει να συνδέονται με σχετικούς τρόπους και να είναι εσωτερικά συνεπή στις μεταξύ τους σχέσεις, ώστε να διασφαλίζεται ότι μπορεί να επιτευχθεί επαρκής και αξιόπιστη πρόβλεψη των μελλοντικών επιδόσεων τόσο για τις τεχνικές όσο και για τις οικονομικές ροές. Η ενοποίηση συστημάτων και μοντέλων είναι μια συνήθης προσέγγιση για την αντιμετώπιση πολυπαραμετρικών ζητημάτων, όπως είναι η περίπτωση της διαχείρισης οδοστρωμάτων και της σχετικής λήψης αποφάσεων.
- **Αξιοπιστία:** τα μοντέλα του συστήματος θα πρέπει να είναι ικανά να παρέχουν αξιόπιστες προβλέψεις σε πρώτη φάση. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρωμάτων θα αντιμετωπίζει οπωσδήποτε τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη σύγκριση της πραγματικής απόδοσης με την προβλεπόμενη. Επομένως, ανεξάρτητα από την κατάσταση της βαθμονόμησης/αναβαθμονόμησης των μοντέλων, οι αξιόπιστες εκτιμήσεις είναι πάντα απαραίτητες για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων τόσο στην εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος όσο και στον οικονομικό προγραμματισμό του οργανισμού ή του φορέα διαχείρισης.
- **Απόκριση:** τα μοντέλα του συστήματος θα πρέπει να είναι προσαρμοστικά και να ανταποκρίνονται στις σχετικές παραμέτρους, όπως το κλίμα, η κυκλοφοριακή φόρτιση και η αντοχή των στρώσεων της οδού. Ιδανικά, τα μοντέλα θα πρέπει να δημιουργούν συνθήκες σύζευξης της πολιτικής του φορέα διαχείρισης και των πραγματικών τεχνικών αναγκών που έχουν τα δομικά στοιχεία της οδού.

3.2. Κατηγορίες απαιτούμενων στοιχείων

Τα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων βασίζονται σε δεδομένα από διάφορες πηγές (πχ απογραφή οδών, κυκλοφορία, υλικά, κατασκευή κ.λπ.). Τα δεδομένα αυτά πρέπει να είναι διαθέσιμα και να διαχειρίζονται έτσι ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμα από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε όλα τα επίπεδα (και από όλα τα τμήματα) μιας υπηρεσίας ή ενός οργανισμού που είναι υπεύθυνος για ένα οδικό δίκτυο. Η πιο κοινή και πρακτική ταξινόμηση των δεδομένων που απαιτούνται στο πλαίσιο ενός PMS περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- δεδομένα απογραφής περιουσιακών στοιχείων
- δεδομένα καταγραφής της κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων
- περιβαλλοντικά δεδομένα

- δεδομένα οδικής χρήσης των επιμέρους τμημάτων
- δεδομένα κατασκευής, συντήρησης και δαπανών από προγενέστερες ενέργειες (μητρώο έργου)
- δεδομένα κινδύνου
- δεδομένα επιπέδου εξυπηρέτησης που παρέχεται στους χρήστες της οδού.

3.2.1. Δεδομένα απογραφής

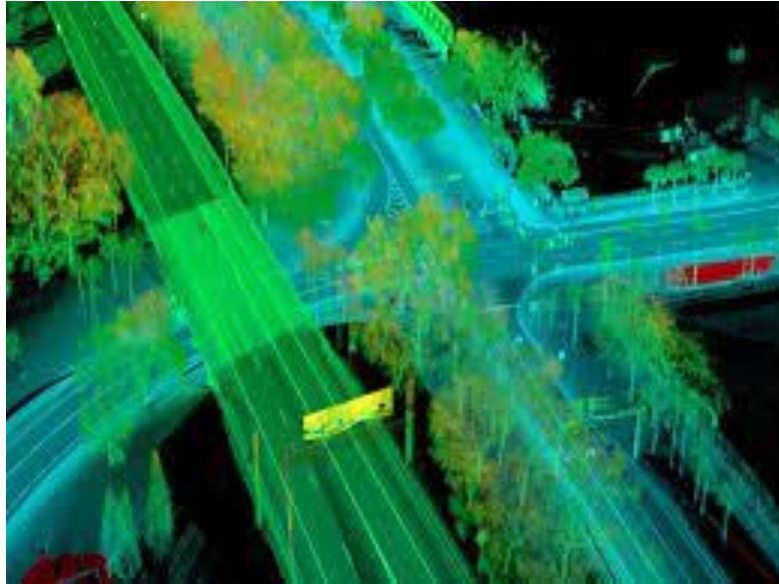
Τα δεδομένα απογραφής είναι μια ολοκληρωμένη καταγραφή των πληροφοριακών πόρων που τηρούνται από έναν οργανισμό ή υπηρεσία, η οποία είναι υπεύθυνη για ένα οδικό δίκτυο. Μπορεί επίσης να αναφέρεται ως χάρτης δεδομένων, ο οποίος απλά, αλλά σημαντικά, παρέχει μια μοναδική πηγή πληροφοριών με άμεση εικόνα όλων των οδικών τμημάτων που διαχειρίζεται ένας οργανισμός. Αυτό σημαίνει ότι είναι εφικτός ο χειρισμός του οδικού δικτύου, με πληροφορίες που συλλέγονται και αποθηκεύονται σε διαθέσιμες πηγές δεδομένων, ενώ αξιοποιούνται πληροφορίες για το πώς τα διαθέσιμα στοιχεία βοηθούν στη διαχείριση των οδικών υποδομών.

Με άλλα λόγια, τα δεδομένα απογραφής περιλαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την πλήρη περιγραφή των φυσικών περιουσιακών στοιχείων ενός οδικού δικτύου, των συστατικών και των ζωτικών μερών του και κάθε άλλου τύπου σχετικών δεδομένων που συμβάλλουν στον πληρέστερο προσδιορισμό του οδικού δικτύου (π.χ. ηλικία, κατηγορία οδού, διαθέσιμες σημάνσεις αλυσίδας) ή την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας ενός δικτύου (π.χ. ενέργειες συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί). Κατά κανόνα, τα δεδομένα απογραφής δεν αναμένεται να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου (δηλαδή πρόκειται για στατικές πληροφορίες), αν και δεν είναι ασυνήθιστο για έναν οργανισμό να επεκτείνει το δίκτυό του ή να αλλάξει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού ενός υπάρχοντος τμήματος, καθιστώντας έτσι αναγκαία την επικαιροποίηση των δεδομένων απογραφής (Austroads, 2018b; FHWA, 2005).

Εξάλλου, θα πρέπει να αναμένεται ότι τα δεδομένα απογραφής υπάρχουν ήδη στο αρχείο ενός οδικού οργανισμού. Ωστόσο, υπάρχουν συχνές περιπτώσεις όπου τέτοιες θεμελιώδεις πληροφορίες δεν περιλαμβάνονται στο μητρώο περιουσιακών στοιχείων του οργανισμού ή η προέλευση και η πηγή της βάσης δεδομένων είναι αμφισβητήσιμη ή αβέβαιη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι υπάρχουσες πληροφορίες μπορεί να χρειαστεί να περάσουν από διαδικασίες επικύρωσης και επιβεβαίωσης που συνήθως λαμβάνουν χώρα μέσω λεπτομερών οπτικών επιθεωρήσεων ή αυτοματοποιημένων ερευνών δικτύου.

Πρόσφατα, η καινοτομία στην τρισδιάστατη απεικόνιση επιτρέπει τη χρήση της τεχνολογίας Light Detection and Ranging (LiDAR) για τη δημιουργία ενός συνόλου γεωχωρικών δεδομένων

της κατάστασης του οδικού δικτύου, εντοπίζοντας έτσι νέα ή ενημερώνοντας τα υπάρχοντα στοιχεία του υφιστάμενου δικτύου. Οι αισθητήρες LiDAR μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες κινούμενες πλατφόρμες, όπως οχήματα, αεροσκάφη και δορυφόροι (Austroads, 2018e). Τυπικό αποτέλεσμα από ανάλυση με LiDAR φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Τυπική αποτύπωση αστικού οδικού τμήματος με χρήση της τεχνολογίας LiDAR.

Οι σημερινοί περιορισμοί, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης τυποποίησης και συνοχής στα αποτελέσματα των κινητών ερευνών LiDAR όσον αφορά την ποιότητα και την ακρίβεια, ενδέχεται να αποτρέψουν τις σχετικές υπηρεσίες από τη συστηματική χρήση του LiDAR. Μόλις η τεχνολογία αυτή γίνει πιο ακριβής, θα μπορούσε να υιοθετηθεί από τις οδικές υπηρεσίες προκειμένου να επαληθεύεται η παρουσία όλων των περιουσιακών στοιχείων σε ένα οδικό δίκτυο και να παρέχονται περιοδικές ενημερώσεις στα αρχεία δεδομένων απογραφής.

3.2.1.1. Ονοματολογία και προσδιορισμός θέσης οδικών δικτύων

Για κάθε τμήμα οδού ή τμήμα ενός ευρύτερου δικτύου πρέπει να δοθεί ένα μοναδικό όνομα ή κωδικοποιημένη τιμή. Τα ονόματα θα πρέπει να είναι ισχυρά και κατατοπιστικά, αλλά και αρκετά απλά ώστε να μην προκαλούν πολυπλοκότητα στη διαδικασία διαχείρισης ενός ολόκληρου δικτύου (π.χ. άξονας Α1 ή οδός αριθ. 20 κ.λπ.). Λόγω της πολυπλοκότητας των οδικών δικτύων και των επιμέρους τμημάτων τους, συχνά είναι σημαντικό να συνοδεύεται ένα τμήμα οδού με το μήκος του, διατηρώντας στα αρχεία καταγραφής ένα σαφώς καθορισμένο σύστημα αναφοράς θέσης. Έτσι, κάθε οδικό τμήμα, ως περιουσιακό στοιχείο, αποτελεί μοναδική αναφορά με συγκεκριμένη θέση σε σχέση με ένα ευρύτερο δίκτυο.

Παράλληλα με την ονομασία, η υιοθέτηση και η εφαρμογή μιας αποτελεσματικής σύμβασης ονοματοδοσίας για τα ονόματα/αριθμούς οδών και τα σχετικά αναγνωριστικά στοιχεία αποτελεί προϋπόθεση για μια συνεπή, ευέλικτη και συνεπώς αποτελεσματική διαχείριση των επιμέρους τμημάτων. Άλλωστε, τα οδικά δίκτυα συνήθως επεκτείνονται και εξελίσσονται μετά από τοπικές και περιφερειακές πρωτοβουλίες και τοπική ανάπτυξη δημιουργώντας νέες οδικές διασυνδέσεις. Τέτοιου είδους νέα δεδομένα πρέπει επίσης να αποθηκεύονται σε μητρώα περιουσιακών στοιχείων με δομικό και ιεραρχικό τρόπο, έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να ανακτηθούν ή να συνδεθούν με ένα συγκεκριμένο όνομα οδού. Επομένως, η κωδικοποίηση που ακολουθείται επιβάλλεται να είναι δυναμική.

Μία σημαντική κατηγορία πληροφοριών κατά την απογραφή είναι τα στοιχεία της γεωμετρίας της οδού. Δεν αποτελεί καλή πρακτική το να βασιστεί κανείς αποκλειστικά σε ιστορικά δεδομένα ή αρχεία σχεδιασμού, δεδομένου ότι ορισμένες από τις απαιτήσεις σχεδιασμού ενδέχεται να μην έχουν τηρηθεί κατά την κατασκευή της οδού (Han et al., 2023). Επιπλέον, εάν ένα τμήμα οδού ενδέχεται να αλλάξει φορέα διαχείρισης σε μια χρονική στιγμή t της διάρκειας ζωής του, επομένως και πάλι είναι αναγκαία η αποτύπωση της υφιστάμενης γεωμετρίας. Συνήθη γεωμετρικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη περιλαμβάνουν τις χωματουργικές εργασίες, τυχόν έργα αποστράγγισης, την διαμήκη και εγκάρσια κλίση της οδού, τον αριθμό και το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας και το μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος, και/ή τη λειτουργική ταξινόμηση (π.χ. κύρια αρτηρία ή αυτοκινητόδρομος). Τα δεδομένα γεωμετρίας μπορούν να ληφθούν από αυτοματοποιημένες έρευνες οχημάτων ή επιτόπιες επιθεωρήσεις.

Λόγω της πιθανής διασύνδεσης διαδρομών που είναι αρκετά συχνή, η αναφορά στη θέση του περιουσιακού στοιχείου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς αποτελεί το μοναδικό και σημαντικότερο χαρακτηριστικό που συνδέει όλα τα δεδομένα που σχετίζονται με την οδικό τμήμα μεταξύ τους. Οι τοποθεσίες μπορούν να αναφερθούν με πολλούς τρόπους και στον Πίνακα 3.1 δίνονται οι βασικές απαιτήσεις ενός οποιουδήποτε συστήματος αναφοράς θέσης.

Πίνακας 3.1: Σύστημα αναφοράς θέσης: γενικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις (Austroads, 2018b)

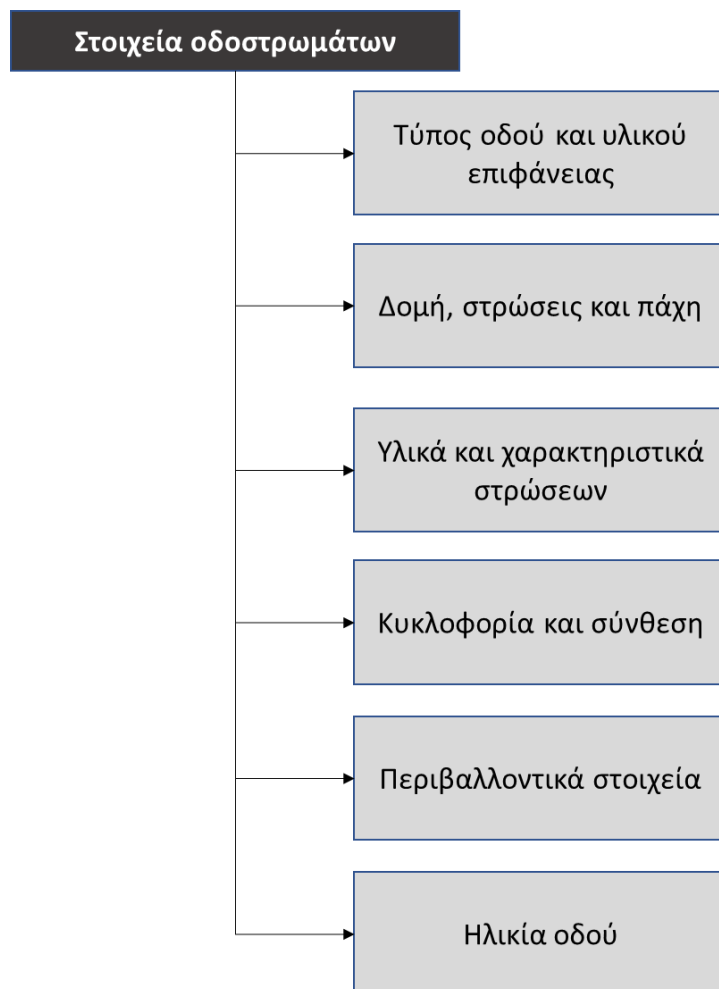
| A/A | Βασικές απαιτήσεις στο σύστημα αναφοράς θέσης |
|-----|---|
| 1 | Δυνατότητα εντοπισμού και τοποθέτησης για αντικείμενα και γεγονότα σε τρεις διαστάσεις και στο χρόνο σε σχέση με το οδικό δίκτυο |
| 2 | Χρονική σύνδεση της βάσης δεδομένων με τον περιβάλλον του οδικού υπό μελέτη τμήματος και παροχή δυνατότητας μετασχηματισμού των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών μεθόδων χρονικής αναφοράς |

| A/A | Βασικές απαιτήσεις στο σύστημα αναφοράς θέσης |
|-----|---|
| 3 | Δυνατότητα μετασχηματισμού των δεδομένων μεταξύ γραμμικών, μη γραμμικών και μεθόδων χρονικής αναφοράς χωρίς απώλεια της ακρίβειας, της ακρίβειας και της ανάλυσης |
| 4 | Υποστήριξη δυνατοτήτων χαρτογράφησης |
| 5 | Υποστήριξη της απεικόνισης και ανάλυσης αντικειμένων και γεγονότων σε πολλαπλές τρισδιάστατες και χρονικές αναλύσεις |
| 6 | Υποστήριξη της πλοήγησης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο κατά μήκος του δικτύου μεταφορών |
| 7 | Υποστήριξη της εξέλιξης της κατάστασης του δικτύου με την πάροδο του χρόνου και διατήρηση του ιστορικού των συμβάντων του δικτύου |
| 8 | Έλεγχος σφάλματος και μειωμένης ακρίβειας για τυχόν δεδομένα χώρου και χρόνου |
| 9 | Αποθήκευση μεταδεδομένων σε επίπεδο αντικειμένου για την καθοδήγηση της γενικής χρήσης των δεδομένων |
| 10 | Δυνατότητα ελέγχου των χρονικών καθυστερήσεων μεταξύ προβλεπόμενων και προγραμματισμένων συμβάντων |

Το απλούστερο σύστημα αναφοράς θέσης είναι το γραμμικό. Οι βασικές αρχές του γραμμικού συστήματος είναι να έχει οριστεί (α) ένα γνωστό σημείο εκκίνησης και τερματισμού, (β) η κατεύθυνση της διαδρομής (αυξανόμενη ή μειούμενη σε απόσταση), η οποία συνήθως θεωρείται από το σημείο εκκίνησης και (γ) η μέτρηση της απόστασης από ένα σημείο αναφοράς. Σε αντίθεση με τη γραμμική αναφορά που χρειάζεται φυσικούς στόχους ή σημεία για τον καθορισμό των θέσεων, η χωρική αναφορά ορίζει μια θέση χρησιμοποιώντας ένα σύνολο συντεταγμένων. Τα χωρικά δεδομένα συλλέγονται συνήθως με τη χρήση ενός GPS που έχει πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο δορυφορικό δίκτυο για τον προσδιορισμό της θέσης ενός οχήματος έρευνας, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη συλλογή ή την ενημέρωση των δεδομένων απογραφής. Η αναφορά χωρικής θέσης κερδίζει σταθερά την αποδοχή της με τη συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ. Υπάρχει επίσης και η γεωμετρική αναφορά θέσης που βασίζεται σε ψηφιακά μοντέλα και υιοθετεί ένα τοπικό μοντέλο συντεταγμένων. Συνήθως, τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν τον ψηφιακό σχεδιασμό της υποδομής, είτε πρόκειται για 2D είτε για 3D. Τέλος, ορισμένοι οργανισμοί προχωρούν σε πολυεπίπεδα συστήματα αναφοράς θέσης που ενσωματώνουν κυρίως πληροφορίες από πολλαπλά γραμμικά συστήματα (Austroads, 2018b). Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των υφιστάμενων συστημάτων σε ένα πολυεπίπεδο παρέχει ένα καλύτερο μέσο για την οπτικοποίηση και τη διαχείριση των χαρακτηριστικών και των δεδομένων.

3.2.1.2. Στοιχεία που αφορούν τα οδοστρώματα

Η απογραφή απαιτεί έναν ελάχιστο αριθμό στοιχείων δεδομένων από το σώμα της οδού προκειμένου να είναι αποτελεσματική (Εικόνα 3.4). Ειδικότερα, αν και είναι μάλλον σύνηθες για ορισμένες υπηρεσίες να γνωρίζουν μόνο τον τύπο της επιφάνειας μιας δομής οδοστρώματος (π.χ. άσφαλτος ή σκυρόδεμα), αυτό είναι ανεπαρκές στο πλαίσιο ενός PMS. Ενδεχομένως να απαιτούνται λεπτομέρειες σχετικά με τα υλικά του οδοστρώματος και τη στρωματογραφία των στρώσεων κατόπιν κατασκευής ή ανακατασκευής. Δεδομένα συντήρησης του οδοστρώματος όταν μπορούν να επηρεάσουν την μελλοντική συμπεριφορά της οδού (πχ εργασίες σφράγισης ρωγμών). Η ημερομηνία και η έκταση της τελευταίας μεγάλης συντήρησης ή αποκατάστασης εμπίπτουν σε αυτό το είδος στοιχείων απογραφής. Συμπληρωματικά, καταγράφονται τα κόστη κατασκευής και αποκατάστασης, που θα πρέπει να είναι συγκεντρωμένα σε αρχεία έπειτα από εκτιμήσεις ή έρευνες για πρόσφατα ολοκληρωμένα έργα. Τα στοιχεία κόστους χρήζουν επικαιροποίησης σε τακτική βάση.



Εικόνα 3.4: Τεχνικό σκέλος ενός PMS: απαιτούμενα στοιχεία οδοστρωμάτων.

Επιπλέον, είναι αναγκαία να υπάρχει καταγεγραμμένη η πρόοδος των εργασιών που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τις προτεινόμενες εργασίες και τις εργασίες σε εξέλιξη με στόχο να βοηθήσει στην ανάπτυξη ή/και επικαιροποίηση ενός σχεδίου συντήρησης ή αποκατάστασης. Συμπληρωματικές πληροφορίες από το οδόστρωμα περιλαμβάνουν άλλες γενικές πληροφορίες όπως οι διαγραμμίσεις οδοστρωμάτων, τυχόν πλευρικά πρανή, κατασκευές κοινής ωφέλειας, οχετούς, πινακίδες σήμανσης κ.λπ.

Συνολικά, γίνεται αντιληπτό ότι οι πληροφορίες σχετικά με την υποδομή των οδοστρωμάτων είναι απαραίτητες. Σε γενικές γραμμές, τα ακόλουθα στοιχεία πρέπει να καθορίζονται στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός σχεδίου απογραφής, ιδίως για μεγάλους και στρατηγικούς αυτοκινητοδρόμους: α) τύπος οδοστρώματος (π.χ. εύκαμπτο, άκαμπτο, ημιάκαμπτο, σύνθετο, κ.λπ.), τύπος επιφάνειας (π.χ. ασφαλτος ή σκυρόδεμα), τύπος βάσης/υποβάσης (π.χ. κοκκώδης, επεξεργασμένη με τσιμέντο), συνθήκες έδρασης (π.χ. πυκνότητα), πάχη κάθε στρώσης στοιχεία θεμελίωσης (π.χ. ορύγματα ή επιχώματα) (Szczerpański et al., 2020; Wang et al., 2020).

Τέλος, και η ηλικία της οδού είναι σημαντικό στοιχείο, δεδομένου ότι η συμπεριφορά των υλικών μεταβάλλεται με το πέρασ του χρόνου, πχ τα ασφαλτικά συνδετικά υλικά σκληραίνουν και γίνονται εύθραυστα και συνεπώς πιο επιρρεπή στην ανάπτυξη ρωγμών. Ως εκ τούτου, η ηλικία του οδοστρώματος είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να είναι γνωστή και να περιλαμβάνεται σε ένα σχέδιο απογραφής. Επίσης, η ηλικία των περιουσιακών στοιχείων του οδικού δικτύου και του οδοστρώματος σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα πληροφοριών κατασκευής ή/και συντήρησης.

3.2.1.3. Ομαδοποίηση οδικών τμημάτων και ταξινόμηση

Η σημασία της οδού και οι προτεραιότητες συντήρησης μπορούν να αναδειχθούν με τη διαίρεση ενός δικτύου σε επιμέρους δίκτυα. Μια σημαντική πτυχή προς την κατεύθυνση της διαίρεσης των οδών είναι η εξέταση της ομοιογένειας προκειμένου να προσδιοριστούν και να κωδικοποιηθούν τα επιμέρους τμήματα. Ορισμένοι από τους πιο συνηθισμένους παράγοντες ενεργοποίησης που βοηθούν στην διαίρεση τμημάτων περιλαμβάνουν αλλαγές στον τύπο ή τη δομή του οδοστρώματος (π.χ. πάχος, υλικό κ.λπ.), αλλαγές στην κυκλοφορία (π.χ. λωρίδες, πρότυπα, όγκος), και όρια μεταξύ προηγούμενων κατασκευαστικών έργων (π.χ. διαφορετικά έργα αντικατοπτρίζουν διαφορές στον σχεδιασμό, τα υλικά, την ηλικία και άλλους παράγοντες). Άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν επίσης να προκαθορίσουν τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να διαιρεθεί ένα οδικό δίκτυο, όπως για παράδειγμα οι κλιματικές συνθήκες.

Η λειτουργία της οδού είναι ένας άλλος παράγοντας που δεν αφορά το οδόστρωμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση των οδών. Στην Αυστραλία, η ταξινόμηση βασίζεται στη λειτουργία της οδού, δεδομένου ότι οι δρόμοι κατασκευάζονται κυρίως για να καλύψουν τις ανάγκες των ανθρώπων και των εμπορευματικών μεταφορών. Όταν πρέπει να ληφθούν υπόψη τοπικές προτεραιότητες, όπως δρομολόγια λεωφορείων, πρόσβαση σε νοσοκομεία κ.λπ., μπορεί να εφαρμοστεί μια δευτερεύουσα, τοπική ιεράρχηση (Austroads, 2018c). Είναι κρίσιμο, ωστόσο, η ιεράρχηση να είναι σαφώς καθορισμένη και κατανοητή από όλους όσους εμπλέκονται σε έναν οδικό φορέα ή οργανισμό. Η τοπική ιεράρχηση θα πρέπει να συνδέεται άμεσα με το αναμενόμενο επίπεδο υπηρεσιών που κατά κάποιο τρόπο προκαθορίζουν την αναμενόμενη απόδοση ενός συγκεκριμένου τμήματος δικτύου. Συνολικά, η ταξινόμηση εξαρτάται από τις ανάγκες και τις προσδοκίες ενός οργανισμού και από το δίκτυο υποδομών οδοστρώματος.

3.2.2. Δεδομένα κατάστασης της οδού

Η αξιολόγηση της κατάστασης των στοιχείων της οδού επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας ενός ή περισσότερων δομικών της στοιχείων. Παρ' όλα αυτά, προτού ένα περιουσιακό στοιχείο φτάσει στο ενδεχόμενο αστοχίας του, το οποίο είναι μια ανεπιθύμητη κατάσταση, οι φορείς διαχείρισης οδών πρέπει να γνωρίζουν πότε πρέπει να επέμβουν με συντήρηση ή αποκατάσταση προκειμένου να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του περιουσιακού στοιχείου και να διατηρήσουν την απαιτούμενη λειτουργικότητα και ευρωστία της υποδομής οδοστρώματος. Τα δεδομένα παρακολούθησης της κατάστασης της οδού περιγράφουν τις φυσικές ιδιότητες των περιουσιακών στοιχείων του οδοστρώματος. Εννοιολογικά, η αξιολόγηση της κατάστασης της οδού αναφέρεται στην τρέχουσα κατάσταση, αλλά η διαδικασία συλλογής δεδομένων είναι πιθανότερο να έχει προηγηθεί της αναφοράς δεδομένων. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα κατάστασης θα πρέπει πάντα να συνοδεύονται από την ημερομηνία καταγραφής των μετρήσεων. Εξάλλου, η συλλογή και η αναφορά δεδομένων κατάστασης είναι μια δυναμική διαδικασία, δεδομένου ότι η κατάσταση του οδοστρώματος υπόκειται σε επικαιροποίηση σε τακτά χρονικά διαστήματα (Cui et al., 2022; Ruiz et al., 2020). Η συχνότητα συλλογής δεδομένων μπορεί να ποικίλλει, αντανakλώντας τη σημασία του οδοστρώματος, την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του και τους οικονομικούς περιορισμούς του ιδιοκτήτη του περιουσιακού στοιχείου και του φορέα διαχείρισης.

Συνολικά, τα δεδομένα κατάστασης περιλαμβάνουν τρία ζωτικά στοιχεία: (α) το όνομα/τύπο διάφορων τύπων φθορών, όπως ομαλότητα, τροχοαυλάκωση, ρωγμές, (β) τη σοβαρότητα ή το μέγεθος της φθοράς και (γ) την έκταση της φθοράς κατά μήκος και κατά πλάτος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η έκταση και η σοβαρότητα πολλών φθορών μπορούν να συνδυαστούν σε μια ενιαία

αριθμητική παράμετρο ή δείκτη για να χαρακτηριστεί η συνολική κατάσταση ως αποτέλεσμα στάθμισης της συμβολής λόγων των φθορών. Σημειώνεται ότι όταν η συλλογή δεδομένων κατάστασης εξυπηρετεί την ανάγκη ανάπτυξης χρονοσειράς, είναι επίσης σημαντικό να προσδιορίζονται οι ρυθμοί επιδείνωσης των παραμέτρων αξιολόγησης της κατάστασης, που συλλέγονται σε αυστηρά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Η συχνότητα των ερευνών του δικτύου εξαρτάται από τον τύπο, την απόδοση, τη λειτουργία και τη χρήση της οδού. Τα όρια του προϋπολογισμού ή άλλες τοπικές πολιτικές μπορεί να υπαγορεύουν μια συγκεκριμένη συχνότητα ερευνών. Κατά το αρχικό στάδιο λειτουργίας μίας οδού, όπου ο στόχος είναι να διαπιστωθούν πιθανές τάσεις φθοράς, απαιτούνται συχνότερες έρευνες για την εκτίμηση της κατάστασης με εξειδικευμένο εξοπλισμό και έμπειρο προσωπικό. Μόλις διαμορφωθούν τα μοτίβα εξέλιξης της συμπεριφοράς της οδού, καθίσταται σταδιακά εφικτή η μείωση της συχνότητας των ελέγχων και τυχόν δοκιμών. Ένα παράδειγμα συχνότητας εκτέλεσης δοκιμών δίνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Συχνότητα ερευνών (σε έτη) για υφιστάμενα οδοστρώματα (Austroads, 2018b).

| Τύπος οδού | Ομαλότητα | Δομική Αντοχή | Ρωγμές | Αντοχή σε ολίσθηση |
|--|-----------|---------------|--------|--------------------|
| Αρτηρίες με μεγάλη κυκλοφορία | 1 | 3-5 | 1 | 1-3 |
| Δρόμοι με υψηλά ποσοστά φθοράς | 1 | 1-3 | 1 | 1 |
| Αρτηριακές οδοί με μέση φθορά | 2-3 | 5-15 | 2-3 | 1-5 |
| Τοπικοί δρόμοι με χαμηλή κυκλοφορία και χαμηλή φθορά | 5 | 5-15 | 3-5 | 5 |

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση και η ερμηνεία της κατάστασης της οδού είναι πολύτιμη, ειδικά για την περίπτωση που ένα μέγεθος δεν είναι άμεσα μετρήσιμο ή δεν μετριέται με σταθερή περιοδικότητα. Παρ' όλα αυτά, η συλλογή δεδομένων και η ερμηνεία των δεδομένων πρέπει να συνδέονται στενά και κατά προτίμηση να ενσωματώνονται σε ένα ενιαίο πλαίσιο ανάλυσης.

3.2.2.1. Λειτουργική κατάσταση της οδού

Γενικά, η κατάσταση του οδοστρώματος ταξινομείται σε λειτουργική και δομική. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ασφαλή και λειτουργική διέλευση ενός οχήματος. Η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ομαλότητας και της τροχοαυλάκωσης που επηρεάζουν την κατάσταση του

προφίλ του οδοστρώματος, καθώς και την υφή και την αντίσταση σε ολίσθηση που σχετίζονται με την ασφάλεια των χρηστών της οδού από την άποψη της υποδομής του οδοστρώματος. Με άλλα λόγια, ο λειτουργικός χαρακτηρισμός των οδοστρωμάτων περιλαμβάνει εκείνες τις πτυχές που μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτές από τους χρήστες της οδού.

3.2.2.2. Δομική κατάσταση της οδού

Τα δομικά χαρακτηριστικά αφορούν τη φέρουσα ικανότητα των στρώσεων της οδού υπό δεδομένα φορτία κυκλοφορίας και περιβαλλοντικές συνθήκες. Μεταξύ άλλων, η πιο κρίσιμη παράμετρος είναι η αντοχή σε κόπωση του οδοστρώματος, αν και άλλα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη δομική συμπεριφορά, όπως η τροχοαυλάκωση των ασφαλτικών στρώσεων και η ρηγμάτωση στην επιφάνεια.

3.2.2.3. Παρατηρήσεις

Σημειώνεται ότι παρά τη δυνατότητα ταξινόμησης της κατάστασης των οδών με βάση τα λειτουργικά ή τα δομικά της χαρακτηριστικά, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ορατές επιφανειακές φθορές στις οδούς μπορεί να είναι τόσο λειτουργικές όσο και δομικές (π.χ. αυλακώσεις). Για παράδειγμα, η έναρξη μιας λακκούβας μπορεί να ξεκινήσει σε πολύ αρχικό στάδιο ως ζήτημα του προφίλ του οδοστρώματος που επηρεάζει την ποιότητα κύλισης, αλλά σε ένα πιο σοβαρό επίπεδο, μια λακκούβα μπορεί να προκαλέσει ζητήματα δομικής ακεραιότητας. Αυτό πολλές φορές δημιουργεί την ανάγκη βελτιστοποίησης προγραμματισμού μετρήσεων και ελέγχων. Άλλωστε, σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν είναι εφικτή, επιθυμητή ή πρακτική η συλλογή μετρημένων δεδομένων.

Αντί για μετρήσεις, η κατάσταση του οδοστρώματος μπορεί να εκτιμηθεί με βάση ένα σύστημα αξιολόγησης. Το σύστημα ή η προσέγγιση στην οποία βασίζεται η αξιολόγηση δεν πρέπει να μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που σημαίνει ότι μια μεταβλητή τάση αξιολόγησης μέσω της αξιολόγησης πρέπει να παρατηρείται μόνο όταν εντοπίζονται αξιοσημείωτες αλλαγές στην κατάσταση του οδοστρώματος.

Όμως, τα δεδομένα που συλλέγονται με τη μέθοδο της αξιολόγησης είναι συνήθως λιγότερο ακριβή. Επιπλέον, τα δεδομένα που αφορούν στην κατάσταση της οδού αντικατοπτρίζουν μόνο το εύρος της παρατηρούμενης ιδιότητας του οδικού στοιχείου που εξετάζεται και αξιολογείται. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ελέγχεται εάν τα συλλεγόμενα στοιχεία είναι επιρρεπή σε υποκειμενική αξιολόγηση.

3.2.3. Οδός και περιβάλλον

Μία οδός εκτίθεται στο περιβάλλον και τις κλιματολογικές συνθήκες κατά τη φάση λειτουργίας της. Έτσι, η συμπεριφορά της μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Kozel et al., 2021). Οι περιβαλλοντικές συνθήκες περιλαμβάνουν γεωγραφικά, κλιματικά και κατασκευαστικά δεδομένα κ.λπ. Τα γεωγραφικά δεδομένα αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση και την ανάλυση του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί μια οδός και για την εξήγηση της συμπεριφοράς ή των προσδοκιών των χρηστών από το οδικό σύστημα. Είναι πιθανότερο να χρησιμοποιηθούν βελτιωμένα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) για τον αξιόπιστο εντοπισμό των περιοχών ενδιαφέροντος όσον αφορά την οδική λειτουργία. Άλλο στοιχεία είναι η τοπογραφία της οδού, η οποία σχετίζεται με το τοπίο που περιβάλλει την οδό, τη μορφολογία του εδάφους και τον τρόπο αλληλεπίδρασης οδού-περιβάλλοντος. Ακόμη και η διαθεσιμότητα, η επιλογή και η καταλληλότητα των υλικών που διατίθενται για μία κατασκευή ή ανακατασκευή μπορεί επίσης να εξαρτάται από την τοπογραφία της οδού.

Όσον αφορά στα κλιματικά στοιχεία, ένα ευρύ φάσμα κλιματικών συνθηκών επηρεάζει την συμπεριφορά μίας οδού και των υλικών της. Το ημερήσιο εύρος θερμοκρασίας είναι σημαντικό για να κατανοήσουμε πώς το ασφαλικό συνδετικό υλικό και συνεπώς ολόκληρο το οδόστρωμα θα μπορούσε να αντιδράσει έναντι της θερμοκρασίας (Kozel et al., 2021). Οι υψηλές θερμοκρασίες κάνουν τις ασφαλικές στρώσεις να συμπεριφέρονται με πιο ιξωδοελαστικό τρόπο, οπότε η οδός γίνεται πιο επιρρεπής σε μόνιμες παραμορφώσεις και αυλακώσεις. Οι χαμηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τη δυνατότητα ρηγμάτωσης, επειδή αναγκάζουν την άσφαλτο να γίνει πιο εύθραυστη. Από την άλλη πλευρά, η θεμελίωση του οδοστρώματος είναι πιο ευαίσθητη στην παρουσία νερού και στις μεταβολές της περιεκτικότητας σε υγρασία. Το νερό μπορεί να ανιχνευθεί στο εσωτερικό ενός οδοστρώματος λόγω των βροχοπτώσεων σε ρηγματωμένα οδοστρώματα που επιτρέπουν την είσοδο νερού στο σώμα της οδού μέσω των διαδρομών των ρωγμών.

3.2.4. Στοιχεία χρήσης της οδού

Η φθορά της οδού και η μακροχρόνια συμπεριφορά της είναι συνάρτηση της χρήσης της οδού από βαρέα οχήματα. Με άλλα λόγια, ο όγκος και η σύνθεση της κυκλοφορίας καθώς και η φόρτιση σε επιλεγμένες θέσεις της οδού είναι καθοριστικής σημασίας. Οι βασικές παράμετροι δεδομένων που σχετίζονται με τη χρήση της οδού περιγράφονται στα ακόλουθα.

Εάν πρόκειται για αστική οδό, οι δρόμοι αυτοί αντιμετωπίζουν αυξημένο αριθμό περιστατικών και συμβάντων με αποτέλεσμα να προσελκύουν σταθερά το ενδιαφέρον των μηχανικών για την

αξιολόγηση της κατάστασής τους, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι παραμένουν λειτουργικοί. Ωστόσο, η συντήρηση των αστικών οδών αποτελεί πρόκληση λόγω των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων (π.χ. διακοπές της κυκλοφορίας, καθυστερήσεις, αύξηση του κόστους των οχημάτων κ.λπ.). Επιπλέον, ο όγκος της βαριάς κυκλοφορίας είναι συνήθως μειωμένος σε μία αστική οδό, πλην της περίπτωσης πλησίον βιομηχανικής ζώνης. Σε μία αγροτική οδό αναμένονται χαμηλοί κυκλοφοριακοί φόρτοι που βρίσκονται σε δασικές εκτάσεις και εξυπηρετούν χρήσεις κατοικίας, αναψυχής και διαχείρισης πόρων. Μπορεί να έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με σχετικά χαμηλά πρότυπα με περιορισμένο προϋπολογισμό. Ως εκ τούτου, οι απαιτήσεις σε συντήρηση ενδέχεται να είναι λιγότερο αυστηρές. Τέλος, οι αυτοκινητόδρομοι υπόκεινται συχνά σε μεγάλους κυκλοφοριακούς φόρτους και λόγω της στρατηγικής τους σημασίας, οι απαιτήσεις σε διαχείριση των αναγκών συντήρησης είναι σαφώς μεγαλύτερες.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που συνδέεται με τη χρήση των οδών είναι η λειτουργία τους που χρησιμοποιείται συχνά για την ταξινόμηση των οδών (Austroads, 2018a). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εξέταση των οδικών αξόνων περιλαμβάνει τέσσερις κύριες ταξινομήσεις οδικής λειτουργίας: υπεραστικές οδούς, άλλες αρτηρίες, συλλεκτήριες οδούς και τοπικές οδούς. Το μέγεθος της κινητικότητας και της πρόσβασης προσφέρουν αυτοί οι τύποι οδών διαφέρει σημαντικά. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα κυκλοφορίας είναι σημαντικό να είναι γνωστά κατά την εκτίμηση της κατάστασης των οδοστρωμάτων που ανήκουν σε αυτούς τους τύπους οδών.

3.2.5. Στοιχεία κυκλοφορίας της οδού

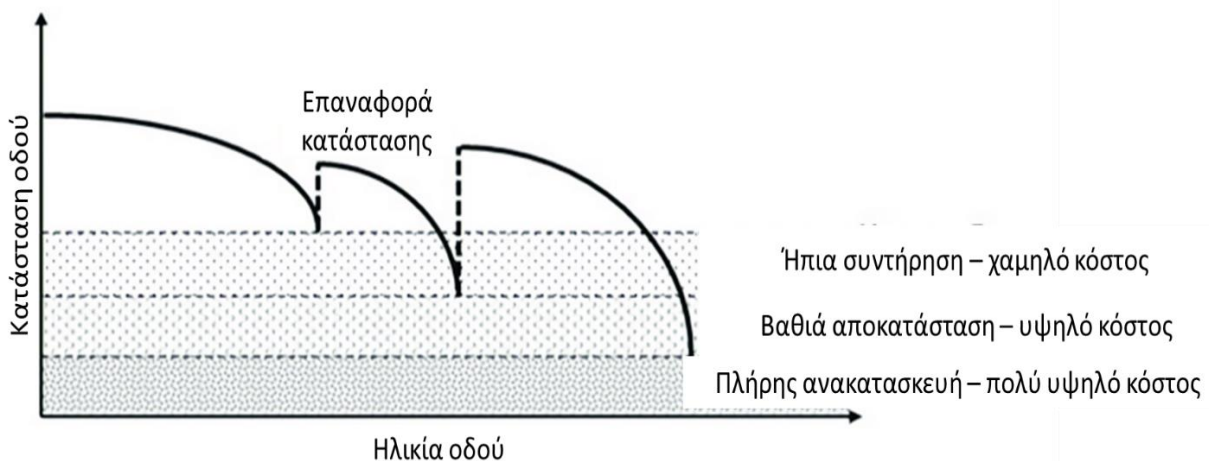
Ο κυκλοφοριακός όγκος αναφέρεται ως Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ), η οποία είναι μια συγκεντρωτική παράμετρος που βασίζεται σε λεπτομερείς καταγραφές κυκλοφορίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, τα κυκλοφοριακά δεδομένα δεν επηρεάζουν ομοίως την συμπεριφορά του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, η ΕΜΗΚ μπορεί να είναι ένας καλός δείκτης για την αξιολόγηση της τάσης επιδείνωσης της αντοχής σε ολίσθηση (περισσότερα οχήματα μειώνουν την ποιότητα των αδρανών και την αντοχή σε ολίσθηση), ενώ όσον αφορά τη δομική αντοχή, τα βαρέα οχήματα υποτίθεται ότι συμβάλλουν περισσότερο στην επιδείνωση του οδοστρώματος συγκριτικά με τα συμβατικά ΙΧ. Ως εκ τούτου, μαζί με τον συνολικό όγκο κυκλοφορίας, απαιτείται να είναι γνωστή η σύνθεση της κυκλοφορίας μέσω των ποσοστών των διαφόρων κατηγοριών οχημάτων, προκειμένου να υπάρχει επισκόπηση της σύνθεσης της κυκλοφορίας.

Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία λωρίδες κυκλοφορίας σε ένα τμήμα οδού, τότε η κατανομή της κυκλοφορίας κατά πλάτος είναι επίσης σημαντική. Για παράδειγμα, η λωρίδα βαρέων οχημάτων αναμένεται να εξυπηρετεί την πλειονότητα των βαρέων οχημάτων. Έτσι, η γνώση της ακριβούς κατανομής στις διαθέσιμες λωρίδες κυκλοφορίας επιτρέπει τον καλύτερο και πιο αξιόπιστο σχεδιασμό του οδοστρώματος και την πρόβλεψη των επιδόσεών του.

Τέλος, ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται η κυκλοφορία με την πάροδο του χρόνου είναι απαραίτητος τόσο για τον σχεδιασμό της οδού όσο και για την αξιόπιστη εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής μιας υφιστάμενης οδού. Η αύξηση της κυκλοφορίας προκύπτει από δεδομένα του παρελθόντος και άλλες οικονομικές/δημογραφικές προβλέψεις.

3.2.6. Κατασκευή και συντήρηση

Για τη διαχείριση όλων των περιουσιακών στοιχείων των οδικών υποδομών, οι οργανισμοί απαιτούν την αποθήκευση πληροφοριών σχετικά με όλες τις δραστηριότητες που σχετίζονται με την κατασκευή, τη συντήρηση, και τη λειτουργία των περιουσιακών στοιχείων σε δομημένα και ιεραρχικά μητρώα περιουσιακών στοιχείων. Η σύνθεση των οδών (π.χ. τύπος, υλικά, πάχη κ.λπ.) περιλαμβάνεται στην απογραφή του μητρώου περιουσιακών στοιχείων. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνολο στατικών παραμέτρων. Αυτό δεν είναι αληθές, διότι μόλις το οδόστρωμα εκτεθεί στην κυκλοφορία και στις περιβαλλοντικές φορτίσεις, ενδέχεται να χρειαστεί αποκατάσταση ή ανακατασκευή σε κάποια χρονική στιγμή καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Συνεπώς, η σύνθεση του οδοστρώματος είναι μια δυναμική κατάσταση που μπορεί να αλλάξει ως αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων συντήρησης, αποκατάστασης ή πλήρους ανακατασκευής. Σύμφωνα με την Εικόνα 3.5 που αντιπροσωπεύει μία τυπική καμπύλη συμπεριφοράς οδοστρώματος οδού, ανάλογα με το είδος των ενεργειών επέμβασης, επηρεάζεται σημαντικά το κόστος για τον οδικό φορέα.



Εικόνα 3.5: Καμπύλη συμπεριφοράς οδού – ενέργειες επέμβασης και κόστη (ποιοτικά)
(Austroads, 2018b).

Ως εκ τούτου, τα μητρώα δεδομένων και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες υπόκεινται σε συνεχή ενημέρωση με βάση την τελευταία (δηλαδή την τρέχουσα) σύνθεση του οδοστρώματος και την ηλικία του. Τα μητρώα δεδομένων κατασκευής ή ανακατασκευής (π.χ. σύνθεση των επιφανειακών στρώσεων ή άλλων δομικών στρώσεων του οδοστρώματος) παρέχουν ζωτικής σημασίας πληροφορίες σχετικά με την προηγούμενη και την μελλοντική συμπεριφορά μίας οδού. Το ιστορικό συντήρησης αφορά τη σύνοψη των δαπανών και της φύσης των εργασιών που έχουν εκτελεστεί σε ένα τμήμα οδού κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Τα μητρώα δεδομένων των δραστηριοτήτων συντήρησης είναι αναμφισβήτητα ο καλύτερος δείκτης της επάρκειας του υιοθετημένου καθεστώτος συντήρησης για τις δεδομένες κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Αποτελεί αρκετά συχνή πρακτική ότι μόνο λίγες υπηρεσίες/οργανισμοί διατηρούν ικανοποιητικά αρχεία δραστηριοτήτων συντήρησης κατάλληλα για χρήση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα του ιστορικού συντήρησης αποθηκεύονται σε μια οικονομική βάση δεδομένων που σπάνια έχει αναφορά στην τοποθεσία. Για να αντληθούν οφέλη από τα δεδομένα συντήρησης και να παραχθούν ουσιαστικά αποτελέσματα για τη διαχείριση ενός οδικού δικτύου, υπάρχει ανάγκη να αποθηκεύονται τα δεδομένα συντήρησης με αναφορά στη θέση μαζί με άλλα δεδομένα συμπεριφοράς.

Διευκρινίζεται ότι το ιστορικό της συντήρησης κατηγοριοποιείται μερικές φορές ως ιστορικά δεδομένα. Ωστόσο, αυτό απαιτεί τα δεδομένα να συσχετίζονται ταυτόχρονα με το χώρο και το χρόνο προκειμένου να σχηματίσουν μια χρονοσειρά. Οι εγγραφές που περιέχουν την ημερομηνία της τελευταίας επεξεργασίας δεν αποτελούν χρονοσειρές και δεν είναι πραγματικά ιστορικά δεδομένα.

3.2.7. Δεδομένα κινδύνου

Η διαχείριση ρίσκων είναι εξίσου σημαντική υπόθεση ενός μητρώου παρακολούθησης και διαχείρισης οδών. Το μητρώο δεδομένων κινδύνου καλύπτει τους αναγνωρισμένους κινδύνους μιας υποδομής που ανήκει σε έναν οργανισμό. Ο κίνδυνος μπορεί να σχετίζεται τόσο με δομική αστοχία, αλλά συνηθέστερα με ξαφνική απώλεια της λειτουργικότητας της οδού, στοιχείο που μπορεί να αυξήσει το ενδεχόμενο οδικών συμβάντων ή ατυχημάτων. Τα δεδομένα κινδύνου πρέπει να επικαιροποιούνται τακτικά σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα παρακολούθησης της κατάστασης και της διαχείρισης κινδύνου. Η συχνή αναθεώρηση αυτού του μητρώου δεδομένων

είναι απαραίτητη λόγω της δυναμικής φύσης της εξέλιξης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος και της κρισιμότητας των σχετικών κινδύνων.

Η σοβαρότητα ενός κινδύνου εξαρτάται από την ταξινόμηση της οδού, τον όγκο της εξυπηρετούμενης κυκλοφορίας και τη σημασία της (π.χ. καθημερινές μετακινήσεις, εμπορευματικές μεταφορές, τουριστικές ροές) και τις συνέπειες μιας πιθανής απώλειας της λειτουργικότητας για την κοινωνία και την οικονομία (Salcedo et al., 2022; Xu et al., 2021).

Ο προσδιορισμός των κινδύνων θα πρέπει να εξετάζει στα αίτια τους και στις συνέπειες τους. Οι οδικοί φορείς πρέπει να χρησιμοποιούν τα κατάλληλα εργαλεία και τεχνικές που ταιριάζουν στους στόχους και τις δυνατότητές τους για την εκτίμηση κινδύνων. Άλλωστε, τα οδοστρώματα, ως μέρος ενός διευρυμένου οδικού δικτύου, μπορούν να θεωρηθούν ως κρίσιμες υποδομές που πρέπει να εκπληρώνουν συνεχώς τον σκοπό τους. Σε αυτό το πλαίσιο, ως κρίσιμα περιουσιακά στοιχεία ορίζονται εκείνα που έχουν υψηλό κόστος ως συνέπεια αστοχίας και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στους πελάτες (χρήστες της οδού), ανεξάρτητα από την πιθανότητα πραγματικής αστοχίας.

3.2.8. Επίπεδο εξυπηρέτησης

Η λειτουργία των οδών περιλαμβάνει τη σχέση μεταξύ των τελικών χρηστών των οδών και των τεχνικών μέτρων ή της αξιολόγησης της συμπεριφοράς των επιπέδων εξυπηρέτησης που παρέχονται απ' όλα τα περιουσιακά στοιχεία του δικτύου (π.χ. οδοστρώματα, γέφυρες κ.λπ.) που συνθέτουν την οδική υποδομή. Οι οδικοί άξονες πρέπει να παραμένουν λειτουργικοί, οπότε τα τεχνικά μέτρα των επιπέδων εξυπηρέτησης συγκρίνονται με την τρέχουσα κατάσταση των περιουσιακών οδικών στοιχείων και τα δεδομένα συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Επιπλέον, τα δεδομένα του επιπέδου εξυπηρέτησης μπορούν επίσης να σχετίζονται με τη χωρητικότητα και τις συνθήκες λειτουργίας μιας οδού, που κυμαίνονται, για παράδειγμα, από την καλύτερη κατάσταση λειτουργίας (π.χ. ελεύθερη ροή οχημάτων) έως τη χειρότερη (π.χ. αναγκαστική ροή με καθυστερήσεις ή καθυστερημένη ροή λόγω βλάβης).

3.3. **Παρακολούθηση της κατάστασης του οδικού δικτύου**

3.3.1. Οπτική επιθεώρηση

Η οπτική επιθεώρηση είναι το πρώτο και στοιχειώδες βήμα για την παρακολούθηση της οδού και την εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος. Κάθε είδος οδού (π.χ. δευτερεύουσα/χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου ή οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων υψηλού φόρτου) πρέπει να ελέγχεται

για πιθανές επιφανειακές φθορές, προκειμένου να αποφασιστούν δράσεις τακτικής και ήπιας συντήρησης ή/και πιο προχωρημένη ανάλυση για την χάραξη της στρατηγικής αποκατάστασης. Επειδή ο εντοπισμός των φθορών και η εκτίμηση της έκτασης και της σοβαρότητάς τους μπορεί να είναι ευάλωτος σε υποκειμενικότητα, η διαδικασία οπτικής επιθεώρησης πρέπει να τυποποιηθεί ώστε να είναι επαναλήψιμη ανεξάρτητα από το υπεύθυνο προσωπικό εργασίας (FHWA, 2005).

Υπάρχουν διάφορα εγχειρίδια που περιγράφουν τα είδη των επιφανειακών φθορών και τα κριτήρια κατάταξης της σοβαρότητας τους. Οι επιφανειακές φθορές καταγράφονται και παρακολουθούνται για κάθε τύπο δομής οδοστρώματος, δηλαδή για τα ασφαλικά οδοστρώματα ή τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα. Ο ρόλος της τυποποίησης στη διαδικασία της οπτικής επιθεώρησης είναι ένας ενιαίος βαθμός αντίληψης και κατανόησης της αιτίας ανάπτυξης και του ρυθμού εξέλιξης των φθορών.

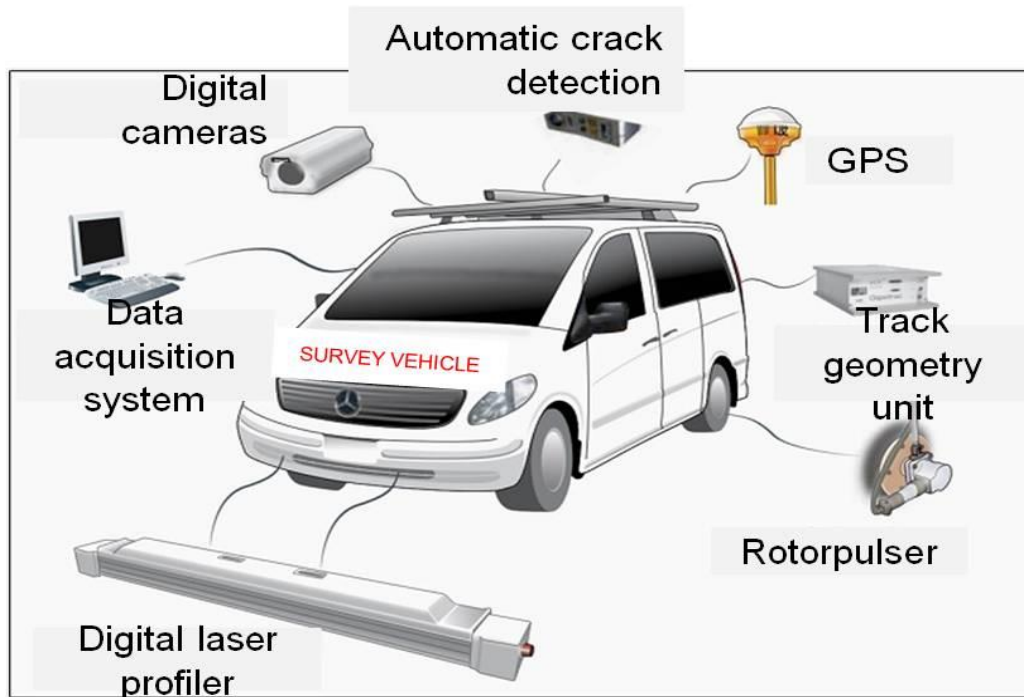
Όταν επαναλαμβάνεται περιοδικά (π.χ. ανά ένα ή δύο έτη), η οπτική επιθεώρηση αποσκοπεί στην εκτέλεση μιας ακριβούς, συνεπούς και επαναλαμβανόμενης έρευνας αξιολόγησης των φθορών και στην παραγωγή συνεκτικών αξιολογήσεων της κατάστασης του οδοστρώματος. Με βάση τα κατάλληλα εγχειρίδια, η επιθεώρηση του οδοστρώματος καταλήγει σε έναν χάρτη φθορών (mapping), ο οποίος μπορεί να βοηθήσει περαιτέρω τις οδικές αρχές και φορείς διαχείρισης να αποφασίσουν σχετικά με τις επιπλέον ενέργειες τακτικής συντήρησης ή/και αποκατάστασης.

3.3.2. Επιθεώρηση μέσω εξελιγμένων συστημάτων

Οι παραδοσιακές οπτικές επιθεωρήσεις με φορητό εξοπλισμό μέτρησης ή με απλούς περιπατητικούς μετρητές τείνουν να είναι χρονοβόρες και λιγότερο παραγωγικές όταν κάποιος επιθυμεί να αξιολογήσει την κατάσταση τεράστιων οδικών δικτύων. Εκτός από την ανάγκη εκτίμησης της φθοράς, το προφίλ του οδοστρώματος αποτελεί επίσης σημαντικό δείκτη σχεδόν σε κάθε οδό, καθώς σχετίζεται με την αίσθηση οδηγικής άνεσης. Όμως, η ξεχωριστή εκτέλεση οπτικών επιθεωρήσεων και η λειτουργία των συστημάτων τύπου λείζερ για την σάρωση του προφίλ της οδού υποδεικνύει μία διαδικασία χρονοβόρα που αποτρέπει τους οδικούς φορείς από μια ολιστική αξιολόγηση της κατάστασης των οδών.

Αυτό είναι το κύριο κίνητρο για την ανάπτυξη επιθεωρήσεων με βάση τεχνολογίες ανάλυσης εικόνας, όπου τα δεδομένα για τις φθορές μπορούν να συλλεχθούν με τη μορφή εικόνας και βίντεο και να αναλυθούν περαιτέρω για την αναπαραγωγή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με την έκταση και/ή τη σοβαρότητα των φθορών (Austroads, 2018b). Αυτό το είδος επιθεώρησης μπορεί να εξυπηρετηθεί μέσω ενός οχήματος που κινείται κατά μήκος του μήκους της υπό έρευνα οδού,

ενώ είναι επίσης εφικτή η ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων για το προφίλ οδοστρώματος. Η φιλοσοφία της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Παράδειγμα οχήματος έρευνας με τα εξαρτήματά του.

Με άλλα λόγια, τα οχήματα μίας τέτοιας «ολοκληρωμένης» έρευνας στοχεύουν σε μια πολυεπίπεδη αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος μέσω μιας μοναδικής μονάδας παρακολούθησης, που δεν προκαλεί καμία όχληση στην κυκλοφορία, δεν απαιτεί ρυθμιστικά μέτρα και ως εκ τούτου, μια τέτοια αξιολόγηση είναι ιδιαίτερα παραγωγική. Οι αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στο όχημα έρευνας ανιχνεύουν ταυτόχρονα τις επιφανειακές φθορές και αξιολογούν τις παραμέτρους του προφίλ του οδοστρώματος. Οι κάμερες και τα προηγμένα οπτικά συστήματα συλλέγουν δεδομένα σχετικά με τη γεωμετρία της οδού (π.χ. πλάτος, κλίση, εγκάρσια κλίση, υπερύψωση, οριζόντιες και κατακόρυφες καμπυλότητες κ.λπ.), τα αντικείμενα στην άκρη της οδού, τη σήμανση της λωρίδας κυκλοφορίας και την ανακλαστική ικανότητα των πινακίδων. Συνολικά, τα εξαγόμενα αποτελέσματα υποστηρίζουν μια ισχυρή διαδικασία λήψης αποφάσεων για την εφαρμογή ενός στρατηγικού και επιχειρηματικού σχεδιασμού και ανάλυσης που στοχεύει στην βέλτιστη διαχείριση του οδικού δικτύου (δηλαδή την επαλήθευση και/ή την ενημέρωση μιας βάσης δεδομένων απογραφής) και στην ιεράρχηση των προτεραιοτήτων συντήρησης του οδοστρώματος με χαμηλό κόστος.

3.4. Αξιολόγηση δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών

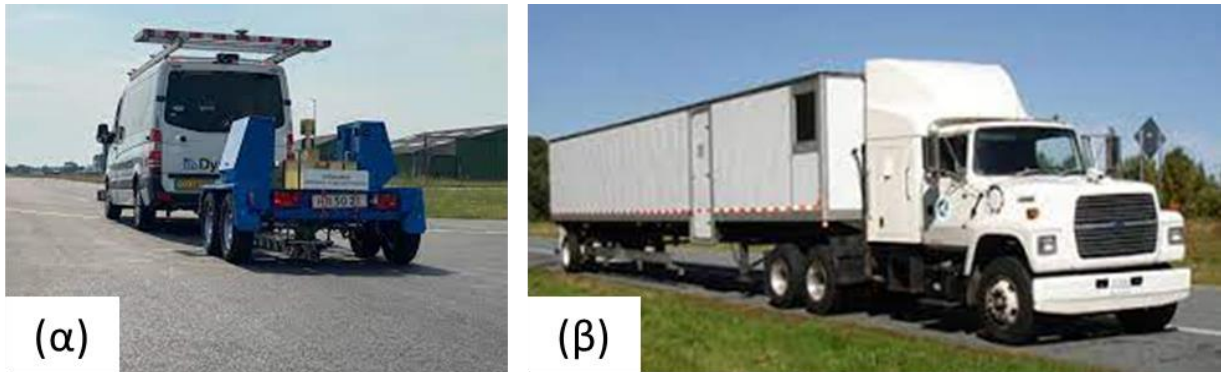
Πέρα από τη διαδικασία της οπτικής επιθεώρησης, απαραίτητο συμπλήρωμα της διαδικασίας αξιολόγησης των οδών αποτελεί ο προσδιορισμός της λειτουργικής και της δομικής κατάστασής τους.

Όσον αφορά τη λειτουργική αξιολόγηση, δίνεται έμφαση στη διατήρηση της αυξημένης λειτουργικότητας του οδοστρώματος, η οποία σχετίζεται με το επίπεδο εξυπηρέτησης που παρέχεται στους χρήστες. Η ικανοποίηση των χρηστών σχετίζεται με την άνεση του οδοστρώματος και την οδική ασφάλεια επηρεάζουν τόσο την ποιότητα οδήγησης όσο και την ασφάλεια των χρηστών αντίστοιχα (FHWA, 2005; Austroads, 2018b, 2018d). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων παρακολουθούνται συχνότερα ως προς την κατάσταση της επιφανειακή στρώσης, δεδομένου ότι η κύρια αιτία που προκαλεί τη συντήρηση είναι η ύπαρξη επιφανειακών προβλημάτων, ζητημάτων ομαλότητας ή/και απώλειας υφής. Ο τυπικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση αυτών των χαρακτηριστικών περιλαμβάνει απλές και σταθερές συσκευές (π.χ. ευθύγραμμος πήχης για την τροχοαυλάκωση κ.λπ.), ενώ συνεχείς μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιούνται μέσω συστημάτων τεχνολογίας λείζερ ή συστήματα που αξιολογούν την αντίσταση σε ολίσθηση σε ταχύτητες κυκλοφορίας. Τέτοια συστήματα είναι προφανές ότι είναι ιδανικά για την επισκόπηση του οδοστρώματος ολιστικά και σε επίπεδο δικτύου. Πιο πρόσφατα, οι αναδυόμενες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών smartphone ή αισθητήρων, τεχνικών τηλεσκοπικής και ανέπαφης αξιολόγησης του επιπέδου τριβής, προσπαθούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστες και οικονομικά αποδοτικές προσεγγίσεις μετρήσεων των επιμέρους χαρακτηριστικών για την καλύτερη υποστήριξη του PMS.

Όσον αφορά την δομική αξιολόγηση, ο στόχος είναι να προσδιοριστεί η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος ή αλλιώς να εκτιμηθεί πώς η απόκριση και η συμπεριφορά του οδοστρώματος εξελίσσεται κατά τη διάρκεια ζωής του. Αυτό θα πρέπει να γίνεται περιοδικά από τις οδικές αρχές, δεδομένου ότι η συμπεριφορά των οδών μεταβάλλεται λόγω των αυξημένων κυκλοφοριακών αναγκών που καλούνται να εξυπηρετήσουν καθώς και του αυξημένου φόρτου βαρέων οχημάτων. Επίσης, η συμπεριφορά της οδού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος των στρώσεων καθώς και από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά του κάθε υλικού.

Ως εκ τούτου, η δομική παρακολούθηση στοχεύει στην εκτίμηση (α) της αντοχής του οδοστρώματος ως προς τις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τα φορτία και (β) τη στρωματογραφία του οδοστρώματος ως προς το πάχος των στρώσεων. Η παραδοσιακή πρακτική περιλάμβανε άνοιγμα οπών στο οδόστρωμα για εξαγωγή πυρήνα που ελέγχονταν στη συνέχεια

σε εργαστηριακό περιβάλλον. Η φιλοσοφία όμως ενός PMS δεν είναι συμβατή με μία καταστρεπτική μέθοδο, η οποία παρέχει σημειακή πληροφόρηση. Για τον λόγο αυτό, νεότερες αντιλήψεις για την ανάλυση οδών άρχισαν να βασίζονται σταδιακά στη μη καταστροφική συλλογή δεδομένων στο πεδίο με κατάλληλες δοκιμές και προηγμένα συστήματα. Ενδεικτικά παραδείγματα για την εκτίμηση της δομικής αντοχής φαίνονται στην Εικόνα 3.7. Πρόκειται για το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD) και το συνεχούς μέτρησης ταχέως παραμορφωσίμετρο (Rolling Wheel Deflectometer, RWD).



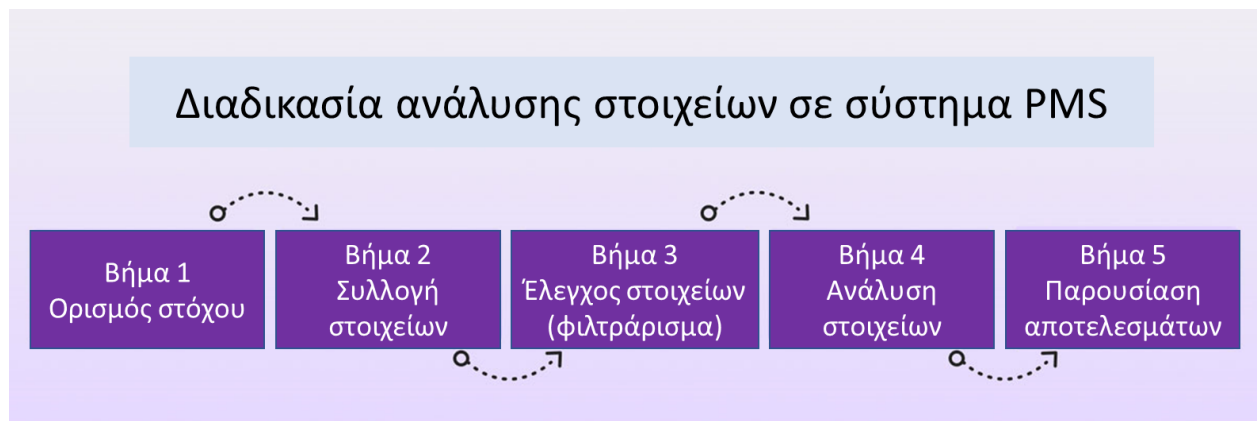
Εικόνα 3.7: Συστήματα μέτρησης δοκιμής αντοχής (α) FWD, και (β) RWD.

Αμφότερα εκτιμούν το βαθμό υποχώρησης του οδοστρώματος ως αποτέλεσμα επιβολής ενός φορτίου προσομοίωσης. Η λογική τους είναι απλή: μία ασθενής δομή θα αναπτύξει μεγαλύτερες υποχωρήσεις, ενώ μία ισχυρότερη δομή θα έχει μικρότερες υποχωρήσεις (FHWA, 2005). Ως προς τις διαφορές, το μεν FWD είναι ένα σύστημα διακριτών μετρήσεων, που λειτουργεί κατόπιν ακινητοποίησης του συστήματος σε συγκεκριμένη θέση της οδού. Το δε RWD συλλέγει στοιχεία εν κινήσει χωρίς όχληση της κυκλοφορίας. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το FWD είναι περισσότερο κατάλληλο για ανάλυση σε επίπεδο έργου, ενώ το RWD είναι καταλληλότερο για ανάλυση σε επίπεδο δικτύου. Όμως, λόγω τεχνοοικονομικών δυσκολιών αφομοίωσης του RWD, το FWD μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε επίπεδο δικτύου. Τέλος, όσον αφορά τη στρωματογραφία του οδοστρώματος, το δημοφιλέστερο μη καταστρεπτικό σύστημα ελέγχων είναι το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar, GPR), το οποίο στηρίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία για το χρόνο μετάδοσης των κυμάτων στις επιμέρους στρώσεις της οδού. Συλλέγει τα απαιτούμενα στοιχεία εν κινήσει, επομένως θεωρείται ιδανικό για την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου.

4. Ανάλυση και λήψη αποφάσεων

4.1. Ποιότητα στοιχείων

Τα επιμέρους βήματα που λαμβάνουν χώρα στο πλαίσιο της ανάλυσης στοιχείων σε ένα PMS δίνονται στην Εικόνα 4.1. Από αυτά, ο ορισμός στόχου και η συλλογή στοιχείων περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Όσον αφορά στον έλεγχο των στοιχείων συλλογής, ουσιαστικά πρόκειται για ένα φιλτράρισμα, καθώς ενδέχεται μέρος των στοιχείων να είναι ακατάλληλα για περαιτέρω χρήση.



Εικόνα 4.1: Εποπτεία διαδικασίας ανάλυσης.

Η διαδικασία συλλογής δεδομένων με σκοπό αυτά να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι τυχόν περιττά δεδομένα θα εκλείπουν, δεδομένου ότι η συλλογή τους είναι δαπανηρή τόσο σε χρηματικές όσο και σε χρονικές μονάδες (Aliyeva et al., 2023). Θα πρέπει να συμπεριληφθούν αρκετοί παράγοντες όταν αποφασίζεται ποια δεδομένα θα συλλεχθούν, όπως:

- ποιες αποφάσεις πρόκειται να ληφθούν,
- ποια δεδομένα είναι απαραίτητα για τη λήψη αυτών των αποφάσεων,
- ποιο είναι το μέγεθος του εξεταζόμενου οδικού δικτύου,
- ποιος είναι ο τύπος και τα χαρακτηριστικά του αρμόδιου οργανισμού,
- ποιο είναι το είδος και το κόστος απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων,
- ποια είναι η απαιτούμενη ακρίβεια των δεδομένων και η κατάλληλη συχνότητα για τη συλλογή δεδομένων, και
- ποιες είναι οι δυνατότητες της βάσης δεδομένων.

Το τελευταίο σχετίζεται με το γεγονός ότι ένα αποτελεσματικό PMS πρέπει να στηρίζεται από αξιόπιστες, ακριβείς και πλήρεις πληροφορίες. Επιπλέον, η ύπαρξη ποιοτικών δεδομένων διαχείρισης οδοστρώματος συνδέεται άμεσα με την ικανότητα ενός PMS να συμβάλλει στην ανάπτυξη εύλογων και αξιόπιστων συστάσεων και αποφάσεων σχετικά με το δίκτυο οδοστρώματων ενός φορέα. Άλλωστε, τα δεδομένα κατάστασης οδοστρώματος είναι ένα από τα βασικά στοιχεία ενός PMS (βλ. ενότητα 3.2.2). Τα δεδομένα κατάστασης οδοστρώματος χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της οδού, για την ενεργοποίηση διαφόρων ενεργειών που κυμαίνονται από τη συντήρηση έως την αποκατάσταση ή την ανακατασκευή, για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του προγράμματος εφαρμογής και για την ικανοποίηση πολλών άλλων σκοπών (Elwahsh et al., 2023; Han et al., 2023). Ενώ υπάρχουν πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος, που κυμαίνονται από χειροκίνητες έρευνες πεδίου έως πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες, η ανάγκη για δεδομένα υψηλής ποιότητας παραμένει η ίδια.

Οι φορείς διαχείρισης οδικών υποδομών λαμβάνουν ενίοτε ορισμένα βήματα για να εξασφαλίσουν και να επαληθεύσουν την ποιότητα των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της βαθμονόμησης του εξοπλισμού συλλογής δεδομένων ή των ομάδων επιθεώρησης και των μεθοδολογιών που εφαρμόζουν. Έτσι, ενσωματώνονται ειδικά τμήματα ποιοτικού ελέγχου που στοχεύουν στην αξιολόγηση της επαναληψιμότητας και στην επαλήθευση της πληρότητας της έρευνας κατάστασης της οδού.

Η ικανότητα αξιολόγησης και προσδιορισμού της ποιότητας των δεδομένων κατάστασης του οδοστρώματος είναι απαραίτητη για τον καθορισμό της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αναλύσεων που γίνονται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα κατάστασης οδοστρώματος. Ένα τυπικό παράδειγμα ελέγχου ποιότητας δεδομένων δίνεται από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration, FHWA) που υποστήριξε την ανάπτυξη ενός πρακτικού οδηγού σχετικά με τις διαδικασίες διαχείρισης ποιότητας για δεδομένα κατάστασης οδοστρώματος σε επίπεδο δικτύου.

Ως κοινή πεποίθηση και με βάση την διεθνή εμπειρία, η δημιουργία ενός σχεδίου διαχείρισης ποιότητας για τη συλλογή δεδομένων κατάστασης οδοστρώματος θα βοηθήσει στην επίτευξη αξιόπιστων, ακριβών και πλήρων δεδομένων κατάστασης και θα αντιμετωπίσει τα βήματα που πρέπει να ληφθούν κατά την αντιμετώπιση ζητημάτων χαμηλής ποιότητας δεδομένων. Χωρίς ένα τεκμηριωμένο σχέδιο, οι οδικοί φορείς είναι λιγότερο πιθανό να εφαρμόζουν δραστηριότητες διαχείρισης ποιότητας με συνέπεια, επομένως δεν είναι εφικτό για τους φορείς αυτούς να αξιολογούν με ορθό τρόπο την αποτελεσματικότητα των τεχνικών που χρησιμοποιούν (Salcedo

et al., 2022). Η δημιουργία και η διατήρηση ενός αποτελεσματικού προγράμματος διαχείρισης ποιότητας για δεδομένα κατάστασης οδοστρώματος περιλαμβάνει τον καθορισμό των πρωτοκόλλων αξιολόγησης συλλογής δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν, τη θέσπιση προτύπων ποιότητας και κριτηρίων αποδοχής, τον προσδιορισμό ευθυνών, την εκτέλεση δραστηριοτήτων ποιοτικού ελέγχου, τη λήψη έγκαιρων και κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών, και την διαμόρφωση γραπτών αναφορών για τη διαχείριση ποιότητας.

4.1.1. Βαθμονόμηση τεχνικού εξοπλισμού

Η πολυπλοκότητα των τρεχουσών αυτοματοποιημένων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων σε επίπεδο δικτύου καθιστά επιτακτική ανάγκη κάθε τεχνικός εξοπλισμός να ρυθμίζεται και να βαθμονομείται σωστά πριν από την έναρξη των ερευνών. Ένας προηγμένος τεχνικός εξοπλισμός είναι ικανός να συλλέγει μεγάλους όγκους δεδομένων πολύ γρήγορα, αλλά εάν ο εξοπλισμός είναι εκτός βαθμονόμησης ή δεν έχει ρυθμιστεί σωστά για τη συλλογή δεδομένων, τα δεδομένα ενδέχεται να είναι άχρηστα για τον επιδιωκόμενο σκοπό.

Πρέπει να δοθεί προσοχή στη διαμόρφωση και τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού και στην επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας μετά τη συλλογή δεδομένων, εάν υπάρχει εμπιστοσύνη στην ποιότητα των δεδομένων. Η βαθμονόμηση και η επικύρωση εξοπλισμού περιλαμβάνει εννοιολογικά τη λήψη ξεχωριστών συνόλων μετρήσεων από δοκιμαστικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια λειτουργική συσκευή και μια συσκευή αναφοράς για τη στατιστική σύγκριση των δύο συνόλων δεδομένων. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι η λειτουργική συσκευή θα δώσει έγκυρα αποτελέσματα έρευνας, ώστε στη συνέχεια ο εξοπλισμός να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια.

Οι απαιτήσεις διαμόρφωσης του εξοπλισμού πιθανότατα θα είναι συγκεκριμένες για το κομμάτι του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Εάν τα δεδομένα συλλέγονται από έναν οργανισμό χρησιμοποιώντας ένα σύνολο εξοπλισμού, οι διαδικασίες και οι απαιτήσεις μπορεί να προσδιοριστούν ευκολότερα. Ωστόσο, εάν συλλεχθεί από έναν άλλον πάροχο υπηρεσιών, τότε ο φορέας διαχείρισης της οδού ενδέχεται να χρειαστεί να συνεργαστεί στενά με τον πάροχο για να καθορίσει τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη διαμόρφωση, τη βαθμονόμηση, τους περιοδικούς ελέγχους και την τεκμηρίωση.

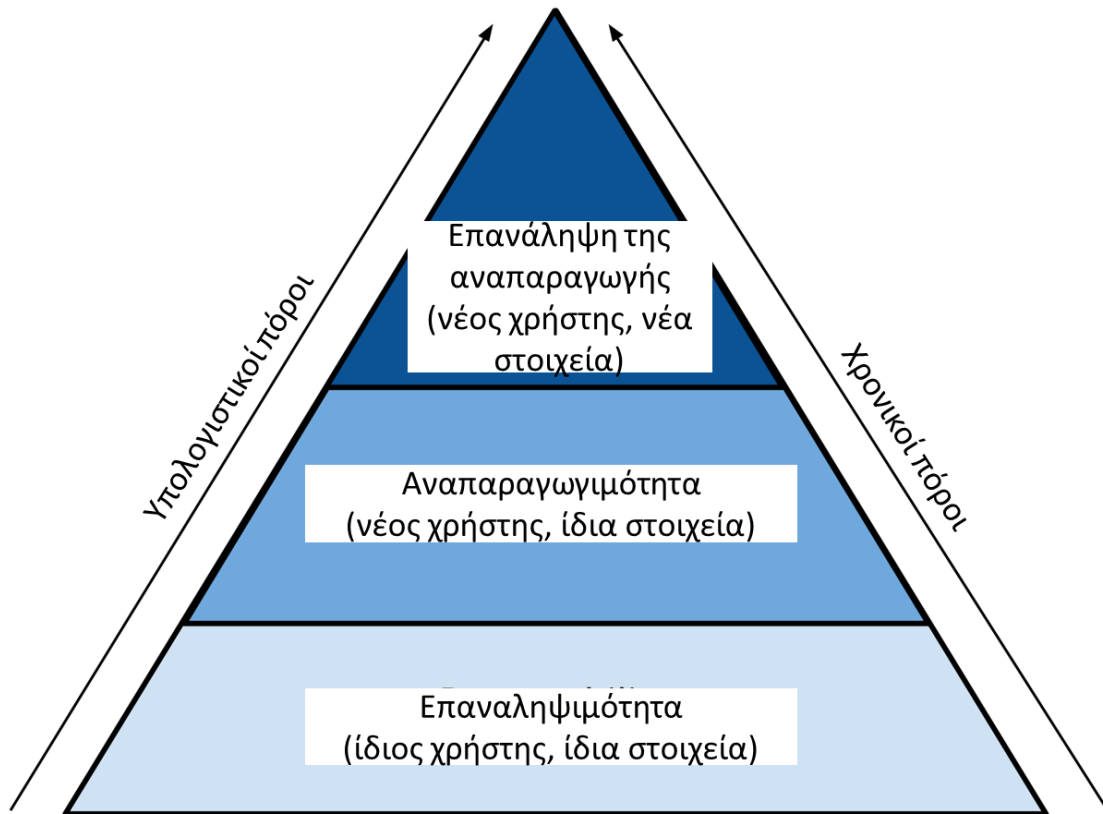
Οποιοσδήποτε εξοπλισμός για τη συλλογή δεδομένων κατάστασης οδοστρώματος καθώς και τα υποσυστήματα του θα πρέπει να βαθμονομούνται και να ελέγχονται πριν από την έναρξη της έρευνας κατάστασης του οδοστρώματος. Μπορούν να οριστούν ορισμένες θέσεις ελέγχου με γνωστές τιμές αναφοράς ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση του

εξοπλισμού συλλογής δεδομένων κατάστασης οδοστρώματος. Ορισμένα υποσυστήματα, όπως τα όργανα μέτρησης απόστασης, μπορούν να βαθμονομηθούν επιτόπου, εάν χρειάζεται, ενώ άλλα (π.χ. τυπικοί αισθητήρες λείζερ) θα απαιτήσουν πρόσθετη εργαστηριακή και εξειδικευμένη βαθμονόμηση.

4.1.2. Επαναληψιμότητα

Τα συνεπή και επαναλαμβανόμενα δεδομένα καταγραφής κατάστασης είναι απαραίτητη προϋπόθεση πριν από την ανάλυση και την αξιολόγηση δεδομένων. Η μέτρηση της επαναληψιμότητας δεδομένων είναι μια ένδειξη της διακύμανσης σε μια σειρά μετρήσεων σχετικά με τον μέσο όρο αυτών των μετρήσεων. Ένας τυπικός δείκτης σφάλματος υποδεικνύει εάν μια συσκευή ή τεχνικός εξοπλισμός μετρά συστηματικά υψηλές ή χαμηλές τιμές σε σύγκριση με ένα σύνολο μετρήσεων αναφοράς.

Τα δεδομένα που συλλέγονται σχετίζονται άμεσα με την αποτελεσματικότητα των μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς της οδού. Έτσι, η επίδραση των λαθών και της μειωμένης επαναληψιμότητας δεν είναι αμελητέα. Με άλλα λόγια, η αύξηση του ποσοστού σφάλματος έχει σημαντική συσχέτιση με το κόστος των δραστηριοτήτων συντήρησης. Μπορεί να εισαχθούν διαφορετικές πηγές σφαλμάτων στα δεδομένα συμπεριφοράς του οδοστρώματος και κατά συνέπεια να μειώσουν την προβλεψιμότητα των μοντέλων ανάλυσης στα οποία βασίζεται ο φορέας διαχείρισης (Olaya Reyes et al., 2023; Wang et al., 2020). Το σφάλμα οργάνων ή/και η ανάλυση του συστήματος ενδέχεται να αυξηθεί λόγω της χρήσης διαφορετικών τύπων οργάνων για τη μέτρηση των δεικτών κατάστασης του οδοστρώματος. Από την άλλη πλευρά, μια άλλη πηγή λάθους μπορεί να εισαχθεί λόγω της υποκειμενικότητας στον προσδιορισμό της σοβαρότητας και του είδους των φθορών που παρουσιάζει μία οδός. Επίσης, μπορεί να εισαχθεί άλλη πηγή σφάλματος λόγω των συνθηκών μετρήσεων στο πεδίο (π.χ. καιρικές συνθήκες) και στην εμπειρία του αναλυτή/χειριστή. Είναι προφανές ότι η ποιότητα των δεδομένων του οδοστρώματος εξαρτάται από το εάν η μεταβλητότητα για ένα στοιχείο ή μία παράμετρο συμπεριφοράς είναι μικρότερη από την ετήσια διακύμανση που έχει το ίδιο στοιχείο ή παράμετρος. Είναι πολύ σημαντικό, εκτός από την επαναληψιμότητα να εξασφαλίζεται και η αναπαραγωγιμότητα αλλά και η δυνατότητα επανάληψης της αναπαραγωγής δεδομένων υψηλής ποιότητας, δεδομένου ότι ενίοτε αλλάζουν τα στοιχεία και οι τιμές αυτών που καλείται να συλλέξει και να ερμηνεύσει ο χρήστης αλλά και το προσωπικό του φορέα διαχείρισης που είναι υπεύθυνο για τη διαδικασία αυτή. Το τρίπτυχο της επαναληψιμότητας φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Έννοιες συμβατές με την επαναληψιμότητα.

Σημειώνεται ότι μόλις καθοριστούν οι απαιτήσεις ακρίβειας και επαναληψιμότητας, θα πρέπει να επαναξιολογούνται περιοδικά για να διασφαλίζεται ότι αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις δυνατότητες της τρέχουσας τεχνολογίας και να διασφαλίζουν διαρκή αξιοπιστία κατά τη συλλογή των δεδομένων. Ενδεικτικά, οι απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων σε σχέση με ζητήματα επαναληψιμότητας θα πρέπει να αξιολογούνται κάθε 4-5 χρόνια.

4.2. Επεξεργασία στοιχείων

Κάθε ένα από τα δεδομένα που συλλέγονται έχει πολλά μοναδικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Κάποια από αυτά μπορεί να παραμείνουν αμετάβλητα για μεγαλύτερες περιόδους, όπως η περιγραφή του περιουσιακού στοιχείου (π.χ. στοιχεία απογραφής), ενώ ορισμένα μπορεί να αλλάζουν από έτος σε έτος, όπως τα δεδομένα σχετικά με την κατάσταση της οδού και της χρήσης (π.χ. φθορές, μεταβολή στη σύνθεση της κυκλοφορίας) που απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία προκειμένου να παραχθούν σημαντικές πληροφορίες.

Για την πρώτη κατηγορία των στοιχείων που δεν μεταβάλλονται έντονα, ένα σημαντικό ποσοστό των δεδομένων της οδού μπορούν να ληφθούν από το ιστορικό του έργου, δηλαδή φακέλους

μελέτης, υπάρχοντα έγγραφα σχεδιασμού του έργου και συναφή σχέδια, χωρίς να απαιτούνται δαπανηρές εργασίες πεδίου ή άλλοι επιτόπου έλεγχοι με προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας.

Στην δεύτερη κατηγορία, απαιτείται συνδυασμός μέτρησης στο πεδίο και επιπλέον ανάλυση προκειμένου να εξαχθούν πολύτιμοι δείκτες συμπεριφοράς. Για παράδειγμα, η μέτρηση της ομαλότητας σε ένα δεδομένο μήκος ενός οδικού τμήματος, για να είναι ερμηνεύσιμη, πρέπει να γίνουν κάποιες επιμέρους αναλύσεις στοιχείων, που περιλαμβάνουν είτε υπολογισμό απλών στατιστικών μεγεθών (π.χ. μέση τιμή, διάμεσος) είτε πιθανοτική ανάλυση με επικρατέστερες τιμές. Λόγω της στάθμισης που υπονοείται στο στάδιο αυτό, η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας εξαρτάται από την ακρίβεια των πρωτογενών στοιχείων συλλογής.

Ένα εξίσου σημαντικό βήμα επεξεργασίας δεδομένων είναι η θέσπιση προτύπων ποιότητας δεδομένων και σχετικών κριτηρίων αποδοχής (Ruiz et al., 2020). Ο όρος «αποδοχή» καθορίζει τα όρια μεταβλητότητας δεδομένων, τις περισσότερες φορές επιτρέποντας ένα ανεκτό ποσοστό ή τυπική απόκλιση πάνω ή κάτω από την τιμή αναφοράς. Τα κριτήρια αποδοχής μπορεί επίσης να προσδιορίζουν το ποσοστό των δεδομένων που ελέγχονται, τα οποία πρέπει να είναι εντός των αποδεκτών ορίων.

Οι συνήθεις έλεγχοι αποδοχής των δεδομένων μπορούν να γίνουν με στοιχεία από επιτόπου έρευνες με σύγκρισή τους με τιμές αναφοράς. Μπορούν να εφαρμοστούν ι κατάλληλες απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες όταν τα υπό επεξεργασία δεδομένα δεν πληρούν τα κριτήρια αποδοχής. Τέτοιες ενέργειες περιλαμβάνουν ενδεικτικά:

- την απόρριψη ορισμένων ή όλων των δεδομένων,
- την εκ νέου συλλογή,
- την εκ νέου αξιολόγηση, και
- την επανεπεξεργασία.

Φυσικά, η παράμετρος του κόστους είναι αρκετά καθοριστική σε όλες αυτές τις διεργασίες.

Μόλις τα δεδομένα περάσουν τη φάση αποδοχής, η κοινή μετα-επεξεργασία περιλαμβάνει απλά περιγραφικά στατιστικά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποκτηθεί μια πρώτη και γρήγορη εποπτική εικόνα. Τα βασικά στατιστικά δεδομένα, όπως το ελάχιστο, η διάμεσος, το μέγιστο, το εύρος μεταξύ τεταρτημορίων, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, μπορούν άμεσα να υπολογιστούν τόσο σε επίπεδο έργου ή δικτύου για ένα δεδομένο οδικό τμήμα, ώστε να γίνει άμεση σύγκριση με τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία προηγούμενων ετών στο ίδιο δικό τμήμα.

Γραφικές απεικονίσεις στοιχείων όπως με χρήση ιστογραμμάτων και αθροιστικών καμπυλών κατανομής (ανάλυση πιθανοτήτων) είναι επίσης αποτελεσματικές για την επεξεργασία των

στοιχείων και τη σύνοψη της κατανομής των τιμών απ' όσες παραμέτρους ελέγχονται. Συχνά, οι τάσεις συσσώρευσης των τιμών με τη μέθοδο αυτή πρέπει να ελέγχεται εάν συνάδουν με την κρίση και την συναντίληψη των μηχανικών για τη γνώση του συγκεκριμένου οδικού δικτύου. Η «κρίση μηχανικού» σχετίζεται με μια πιο ολιστική κατανόηση των δεδομένων που συλλέγονται και αναλύονται. Για παράδειγμα, θα ήταν αναμενόμενο ότι η κατάσταση ενός οδικού τμήματος που δεν είχε υποβληθεί σε πρόσφατη συντήρηση να παρουσίαζε σταθερή ή σταδιακή αύξηση της υποβάθμισης της κατάστασής του. Όμως, η κρίση μηχανικού και η συναντίληψη ενεργοποιούνται όταν η ανάλυση για την υποβάθμιση της κατάστασης της οδού για ένα δεδομένο τμήμα εμπεριέχει και ένα ακριβές σύστημα αναφοράς και ιστορικά στοιχεία, ώστε για να διασφαλιστεί ότι το ίδιο μήκος δρόμου είναι συγκρίσιμο με προγενέστερες χρονικές περιόδους.

Ως εκ τούτου, η επεξεργασία δεδομένων πρέπει να είναι συνεπής με τη συνολική αντίληψη του αναλυτή για το υπό έρευνα οδικό δίκτυο. Επιπλέον, όταν υπάρχει υποψία για την ποιότητα των δεδομένων, είναι σημαντικό να διερευνηθεί εάν υπάρχουν άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την αξιολόγηση της κατάστασης της οδού. Είναι σύνηθες οι έρευνες αξιολόγησης της κατάστασης να συλλέγουν ταυτόχρονα πολλαπλές παραμέτρους κατάστασης οδοστρώματος (π.χ. ομαλότητα, φθορές, υφή) σε συνδυασμό με ψηφιακή συλλογή εικόνων. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι αναγκαίο να γίνεται ο διασταυρούμενος έλεγχος σε σχέση με τις εναλλακτικές και διαφορετικές πηγές προέλευσης των δεδομένων συλλογής.

Τις τελευταίες δεκαετίες, πιο προηγμένες τεχνικές έχουν αποκαλυφθεί λαμβάνοντας υπόψη τα προηγμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή τεράστιου όγκου δεδομένων (big data analysis). Με τη δυνατότητα συλλογής σημαντικού όγκου ποικίλων δεδομένων (συμπεριλαμβανομένων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο), καθίσταται επωφελής η χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI), όπως η μηχανική Μάθηση (Machine Learning, ML), για την εξαγωγή γνώσης από αυτές τις πληροφορίες, επιτρέποντας την ανίχνευση ζητημάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος (Devagiri et al., 2021; Gandomi et al., 2022). Η επεξεργασία εικόνας (image analysis) υιοθετείται επίσης όλο και περισσότερο για την ανίχνευση διαφόρων τύπων επιφανειακών φθορών, επομένως μπορεί και σε αυτές τις εφαρμογές να χρειαστούν οι τεχνικές ανάλυσης AI για να συνοδεύσουν την ανάλυση και την επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων.

4.3. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Ο σκοπός της ανάλυσης δεδομένων σε κάθε PMS είναι η δημιουργία ενός σχεδίου δράσης συντήρησης και αποκατάστασης (Maintenance and Rehabilitation, M&R) για εκείνα τα οδικά

τμήματα απ' όπου συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν δεδομένα. Με άλλα λόγια, η παραγωγή δεδομένων θα πρέπει να είναι ικανή να προτείνει βιώσιμες εναλλακτικές επιλογές για στρατηγικές συντήρησης και προγραμματισμό εργασιών.

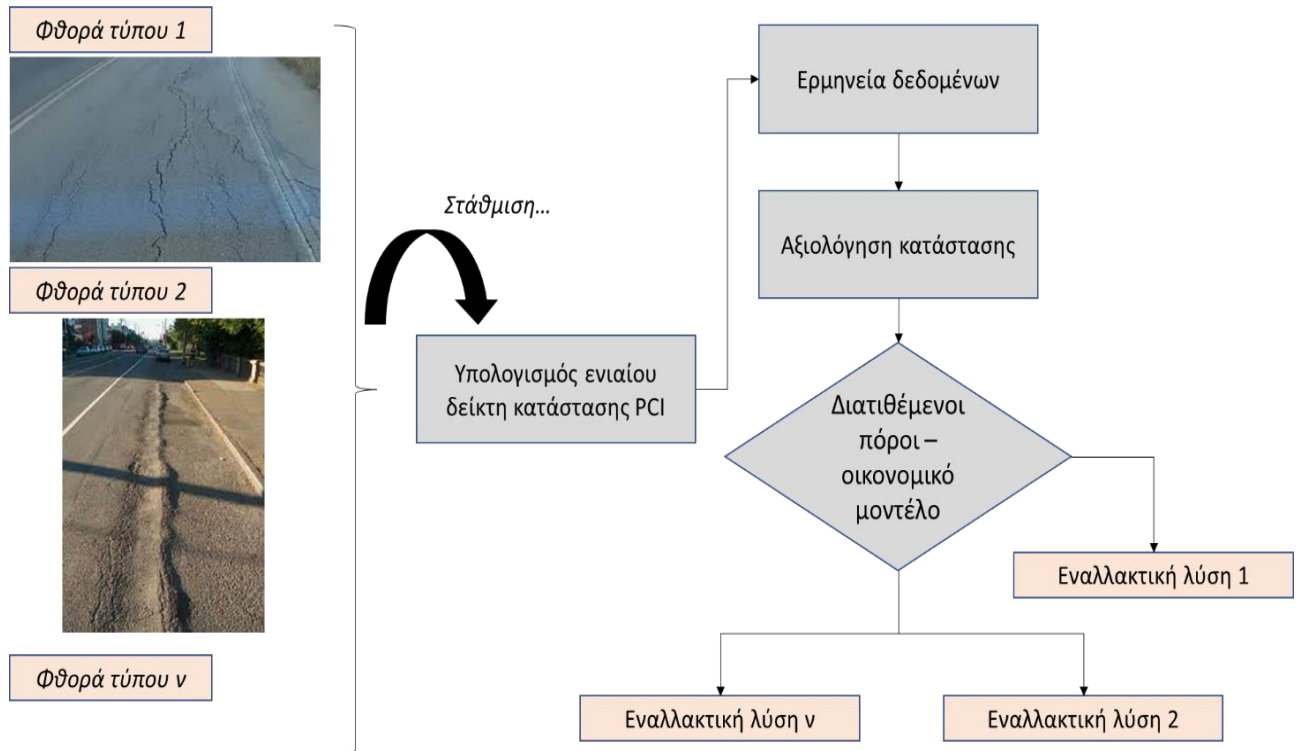
Μετά την επεξεργασία των συλλεγόμενων δεδομένων, ακολουθεί ο υπολογισμός των δεικτών κατάστασης. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη μετατροπή παραμέτρων διαφορετικής κλίμακας σε μια ενιαία παράμετρο συμπεριφοράς. Η μετατροπή δεν είναι απαραίτητη όταν όλα τα δεδομένα που συλλέγονται φαίνεται να είναι στην ίδια κλίμακα. Όμως, όσο περισσότερο στοιχεία από την συμπεριφορά της οδού προσπαθεί να συνυπολογίσει κανείς στην ανάλυσή του, τόσο περισσότερο επιτακτική είναι η θεώρηση ενός νέου διακριτού δείκτη (Lee et al., 2021; Mohamed et al., 2022). Τέτοιος είναι ο δείκτης κατάστασης οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI), ο οποίος προκύπτει από ξεχωριστές μετρήσεις επιφανειακών δεικτών σε διαφορετικές κλίμακες (π.χ. ομαλότητα οδού σε μονάδες m/km, τροχοαυλάκωση σε mm, έκταση λακκούβας σε mm²). Σε τέτοιες περιπτώσεις, απαιτείται να γίνει μια μετατροπή των επιμέρους τιμών στην ίδια κλίμακα πριν από τον υπολογισμό του νέου δείκτη. Η διαδικασία μετατροπής ονομάζεται κλιμάκωση, καθώς η κλίμακα της μετρούμενης παραμέτρου προσαρμόζεται στη σταθερή κλίμακα του δείκτη. Η κλιμάκωση προϋποθέτει χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων.

Ο αντίκτυπος της μαθηματικής μοντελοποίησης είναι κρίσιμος για τη δημιουργία ουσιαστικών και ερμηνεύσιμων αποτελεσμάτων. Ο PCI δείκτης μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από διάφορες παραμέτρους ή με τη συγκέντρωση πολλών δεικτών κατάστασης αθροιστικά. Αυτό επιτρέπει τις εξής δύο πολύ σημαντικές διεργασίες:

- τη σύγκριση της συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου, π.χ. από έτος σε έτος, και
- τη σύγκριση της συμπεριφοράς δύο διαφορετικών οδοστρωμάτων την ίδια χρονική στιγμή.

Και στις δύο περιπτώσεις, πολλές τιμές παραμέτρων συνδυάζονται σε μια μόνο παράμετρο. Τα δεδομένα που συνδυάζονται μπορούν να αναφέρονται σε διαφορετικές πτυχές της ίδιας ιδιότητας (π.χ. έκταση και σοβαρότητα της ρωγμής) ή σε διαφορετικές ιδιότητες. Κατά τον ορισμό του μοντέλου προσδιορισμού του PCI είναι απαραίτητο να είναι ορισμένες οι παράμετροι που εξετάζονται. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλυσης μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές εκφράσεις της έννοιας PCI, όσον αφορά τους επιμέρους δείκτες συμπεριφοράς που χρησιμοποιούνται καθώς και τα χρησιμοποιούμενα βάρη (δηλαδή τους συντελεστές στάθμισης) που υιοθετούνται για να εκτιμηθεί η επιρροή τους στο PCI. Ουσιαστικά, η στάθμιση εκφράζει τη σημασία των συστατικών ενός δείκτη, η οποία είναι μια απλή διαδικασία,

αλλά είναι αρκετά ευαίσθητη στη θεώρηση τιμών που βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή ή στα άκρα των τιμών ενός συνόλου (Salcedo et al., 2022). Ο ρόλος του δείκτη PCI στο πλαίσιο υπόστασης ενός PMS φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Ο ρόλος του δείκτη PCI στο πλαίσιο ενός PMS.

Συνολικά, η ερμηνεία δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές παραμέτρους με έναν ενιαίο δείκτη είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την εκτίμηση και αξιολόγηση της συνολικής κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων του οδοστρώματος, το οποίο είναι ένα επιτακτικό βήμα που προηγείται της λήψης αποφάσεων (Εικόνα 4.3). Ωστόσο, οι δείκτες κατάστασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι ξεκάθαρα κατανοητοί και βαθμονομημένοι στις δεδομένες συνθήκες ελέγχου.

4.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων ανάλυσης

Η αναφορά των αποτελεσμάτων και της παραγωγή δεδομένων για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων τμημάτων ενός φορέα διαχείρισης της οδού, καθώς συχνά το προσωπικό ανήκει σε διαφορετικά τμήματα που απαιτούν συνέργεια (πχ αμιγώς τεχνικό τμήμα και οικονομικό τμήμα). Ανάλογα με τη φύση των αποτελεσμάτων και τον κοινό στόχο που θέτουν τα τμήματα, οι αναφορές μπορούν να προετοιμαστούν σε διαφορετικές μορφές, π.χ. σε συνοπτικό, επίπεδο ή σε λεπτομερές επίπεδο

(δηλ. συγκεκριμένες προτάσεις ενεργειών επέμβασης εξατομικευμένες για συγκεκριμένα τμήματα του οδικού δικτύου). Η ερμηνεία των αναφορών αυτών γίνεται σύμφωνα με την πολιτική συντήρησης και τα πρότυπα της αρμόδιας υπηρεσίας μαζί με τυχόν άλλους περιορισμούς (δηλαδή οικονομικούς, πολιτικούς, κοινωνικούς κ.λπ.).

Τα πρότυπα συντήρησης που διαθέτει ο κάθε φορέας περιγράφουν το επιθυμητό αποτέλεσμα της επένδυσης στη συντήρηση ή την αποκατάσταση της οδού με συγκεκριμένους και ποσοτικούς όρους. Τα πρότυπα χρησιμοποιούνται επίσης για να αντικατοπτρίζουν τις διαφορετικές προσδοκίες που σχετίζονται με διαφορετικές κατηγορίες οδών. Για παράδειγμα, πριν αποφασιστεί πιθανή παρέμβαση, η ταξινόμηση ή η συγκριτική αξιολόγηση των επιμέρους οδικών τμημάτων είναι μια συνήθης προσέγγιση κατόπιν αξιολόγησης της κατάστασής τους. Η ανασκόπηση του ποσοστού του οδικού δικτύου όπου εντοπίζεται σοβαρότητα κατάστασης μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή διερεύνησης (κρίσιμες περιοχές) και η σύγκρισή του ποσοστού αυτού με τις αντίστοιχες τιμές για τα προηγούμενα χρόνια μπορεί να οδηγήσει σε απόφαση για προγραμματισμό ενεργειών (Wang et al., 2020). Δύο σημαντικές πρόσθετες πτυχές για μια αποτελεσματική ερμηνεία δεδομένων, είναι η διαμόρφωση και αξιολόγηση εναλλακτικών επιλογών επέμβασης για συντήρηση και η θεώρηση διαφορετικής περιόδου ανάλυσης. Αυτές εξηγούνται συνοπτικά στη συνέχεια:

- Οι εναλλακτικές επιλογές ενεργειών συντήρησης (σενάρια) αξιολογούνται με βάση την ανάλυση δεδομένων κατάστασης και την πρόβλεψη μελλοντικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος, αντιστοιχίζοντας τις οριακές συνθήκες των παραμέτρων ελέγχου με τις τιμές που προκύπτουν από την ενεργοποίηση των αντίστοιχων μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς. Η ενεργοποίηση αναφέρεται σε ένα σύνολο κριτηρίων που πρέπει να πληρούνται όταν πρόκειται να εφαρμοστεί ένα σενάριο επέμβασης, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων σε χαρακτηριστικά υλικών, και των τοπικών περιβαλλοντικών και κλιματολογικών συνθηκών. Για παράδειγμα, σε ένα πλαίσιο ανάλυσης, η επανάληψη σφράγισης μιας ρωγμής θα μπορούσε να εφαρμοστεί μόνο σε ασφαλικές επιφάνειες όταν η τροχοαυλάκωση είναι μικρότερη από 10 mm. Διαφορετικά, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι μειωμένη χωρίς ουσιαστικά να συμβάλλει στην ενίσχυση της συμπεριφοράς της οδού. Σε τέτοια περίπτωση απαιτείται διερεύνηση για εφαρμογή άλλου σεναρίου.
- Η περίοδος ανάλυσης διαδραματίζει επίσης βασικό ρόλο στις διαδικασίες ερμηνείας δεδομένων. Μπορεί να ποικίλλει σε λιγότερο από ένα έτος (δηλαδή βραχυπρόθεσμη ανάλυση) έως πολλά έτη (δηλαδή μακροπρόθεσμη ανάλυση) ανάλογα με τις πρότυπες αρχές και προσδοκίες του φορέα διαχείρισης. Επομένως, η περίοδος ανάλυσης μπορεί να

αναφέρεται στην αντιπροσώπευση της πλήρους διάρκειας ζωής του περιουσιακού στοιχείου ή μιας συγκεκριμένης διάρκειας με βάση την τυπική πρακτική, και μπορεί να μην απαιτεί εξαντλητική και λεπτομερή πρόβλεψη απόδοσης. Είναι εύλογο, ότι η θεώρηση μίας μεγαλύτερης περιόδου ανάλυσης οδηγεί σε δυσμενέστερες απαιτήσεις προϋπολογισμού, ενώ αντίθετα μία μικρότερη περίοδο ανάλυσης, ενδέχεται να απαιτεί αρχικά μικρό προϋπολογισμό αλλά να απαιτεί διαρκείς επικαιροποιήσεις κόστους τα επόμενα έτη.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες ενεργοποίησης των μοντέλων πρόβλεψης για τα εναλλακτικά σενάρια επεμβάσεων ενδέχεται να αλληλοεπιδρούν με την περίοδο ανάλυσης. Οι συνθήκες ενεργοποίησης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και τη λειτουργία της οδού, τους πόρους και τον προϋπολογισμό της φορέα διαχείρισης. Ένας επαρκής προϋπολογισμός ενδέχεται να επιτρέψει τη θεώρηση μίας μεγαλύτερης περιόδου ανάλυσης με προοδευτικές συνθήκες ενεργοποίησης (δηλαδή κλιμακωτά ή αλλιώς βήμα προς βήμα με την πάροδο του χρόνου), όσον αφορά την ανάπτυξη ενός δέντρου αποφάσεων με διάφορες υποψήφιες εναλλακτικές λύσεις επέμβασης (Salcedo et al., 2022). Με αυτά τα δεδομένα, η μελλοντική συμπεριφορά του οδοστρώματος ερμηνεύεται από την αποτελεσματικότητα κάθε δράσης εναλλακτικής επέμβασης, η οποία σχετίζεται με μια κατάσταση ενεργοποίησης, κόστος και όφελος για τον φορέα διαχείρισης.

4.5. Σχεδιασμός δράσεων για ένα οδικό υποτμήμα

Μεταξύ των στόχων ενός PMS είναι η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας λήψης αποφάσεων με βάση την αξιόπιστη αξιολόγηση της κατάστασης της οδού. Επιπλέον, είναι σημαντικό να παρέχεται ανατροφοδότηση σχετικά με τις συνέπειες των αποφάσεων και τις επιλεγμένες στρατηγικές παρέμβασης, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέπεια και η αποτελεσματικότητα πολλών αποφάσεων που λαμβάνονται σε διαφορετικά επίπεδα/τμήματα εντός της οδικής περιοχής που διαχειρίζεται ένας οργανισμός. Η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος σε ένα μεμονωμένο τμήμα περιλαμβάνει όλες εκείνες τις ενέργειες και μέτρα που είναι σημαντικά για την υποστήριξη της αξιολόγησης του οδοστρώματος σε αυτό το τμήμα και για τα δύο επίπεδα διαχείρισης, δηλαδή τη λήψη αποφάσεων σε επίπεδο δικτύου ή σε επίπεδο έργου.

Για να αξιολογηθεί ένα τμήμα οδοστρώματος σε επίπεδο δικτύου, θα πρέπει να αναμένεται ότι η αξιολόγηση του προφίλ του οδοστρώματος (π.χ. ομαλότητα, τροχοαυλάκωση) και οι μετρήσεις αντίστασης σε ολίσθηση γίνονται μέσω συστημάτων συνεχούς μέτρησης που λειτουργούν υπό

κανονικές ταχύτητες κυκλοφορίας. Ανάλογα με τον διαθέσιμο προϋπολογισμό και τον εξοπλισμό μιας υπηρεσίας, μπορεί επίσης να είναι εφικτή η ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων οπτικής επιθεώρησης μαζί με το προφίλ του οδοστρώματος μέσω οχημάτων υποστήριξης ολοκληρωμένων ερευνών. Τέλος, μπορεί να είναι δυνατή η συλλογή δεδομένων δομικής αντοχής σε επίπεδο δικτύου εάν υπάρχει διαθέσιμος ειδικός εξοπλισμός (βλ. κεφάλαιο 3.4). Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ένα PMS απαιτεί μόνο τα πλήρως απαραίτητα δεδομένα. Δηλαδή, πριν από οποιαδήποτε διαδικασία συλλογής δεδομένων από ένα μεμονωμένο οδικό τμήμα, είναι σημαντικό να καθοριστεί ποια δεδομένα πρέπει να συλλεχθούν, πώς θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα, πώς και πότε θα γίνει η συλλογή δεδομένων (Wang et al., 2020; Mohamed et al., 2022). Αυτό μπορεί να διασφαλίσει ότι τα είδη των δεδομένων που συλλέγονται θα χρησιμοποιηθούν πράγματι στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Για να αξιολογηθεί ένα τμήμα οδοστρώματος σε επίπεδο έργου, απαιτείται διαφορετική προσέγγιση για την παρακολούθηση της κατάστασης της οδού. Τα απαιτούμενα δεδομένα περιλαμβάνουν φυσικά την αξιολόγηση του προφίλ του οδοστρώματος και τις μετρήσεις αντίστασης σε ολίσθηση που σχετίζονται και τα δύο με το επίπεδο λειτουργικότητας του οδοστρώματος. Επιπλέον, τα δεδομένα οπτικής επιθεώρησης και τα δεδομένα δομικής αντοχής είναι εξίσου σημαντικά για την κατανόηση των παρατηρούμενων επιφανειακών φθορών (δηλ. τύπος, έκταση, σοβαρότητα) και μάλιστα η συμβολή τους στην ανάλυση σε επίπεδο έργου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την ανάλυση σε επίπεδο δικτύου, δεδομένου ότι στη φάση αυτή πρέπει να σχεδιαστούν με μέγιστη λεπτομέρεια οι ενέργειες επέμβασης (π.χ. μήκος επέμβασης, βάθος αποκατάστασης) που ενέχουν και στοιχεία οικονομικής διάστασης.

Για την εκτίμηση της αντοχής του οδοστρώματος, τα δεδομένα των υποχωρήσεων συνδυάζονται συχνότερα με δεδομένα στρωματογραφίας οδοστρώματος που εκτιμώνται μέσω γεωφυσικών ερευνών, προκειμένου να μπορεί να προβλεφθεί ακριβέστερα η μελλοντική συμπεριφορά της οδού και το ενδεχόμενο πιθανής αστοχίας του οδοστρώματος. Λόγω της συχνής αλληλεπίδρασης των στοιχείων συμπεριφοράς του οδοστρώματος, συχνά η θεώρηση ενός είδους μόνο δοκιμών ενέχει ρίσκο κατά τον σχεδιασμό επεμβάσεων. Για παράδειγμα, ένα πρόβλημα ομαλότητας μπορεί να συνδυαστεί και με δομικό πρόβλημα (πχ καθιζήσεις υπεδάφους που αντανακλώνται στην επιφάνεια). Συνεπώς, αν παραληφθεί η διενέργεια δοκιμών δοκιμής φύσης, μπορεί να επιλεγεί μία επιφανειακή αποκατάσταση, η οποία στην πράξη δεν θα επιλύσει το γενεσιουργό πρόβλημα της οδού.

Με άλλα λόγια, η αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος σε ένα μεμονωμένο τμήμα μιας οδού απαιτεί συνήθως την ενσωμάτωση πολλαπλού εξοπλισμού που θα μπορούσε να

οδηγήσει σε μια πιο ολιστική αξιολόγηση των στοιχείων του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια ζωής της οδού. Η συχνότητα των μετρήσεων και τα διαστήματα των απαιτούμενων μέτρων που ελέγχονται εξαρτώνται από το σκοπό και το επίπεδο διαχείρισης της συλλογής δεδομένων. Για παράδειγμα, απαιτούνται μετρήσεις σε μικρά διαστήματα μήκους (δηλαδή πιο πυκνές μετρήσεις) σε επίπεδο έργου, όπου ο στόχος μπορεί να είναι ο καθορισμός κρίσιμων τιμών παρέμβασης (δηλ. κριτήρια προειδοποίησης ή οριακές τιμές δείκτες συμπεριφοράς), ενώ μπορεί να απαιτούνται πιο αραιές μετρήσεις σε επίπεδο δικτύου, όπου ο στόχος είναι η ευρεία και εποπτική αξιολόγηση της κατάστασης της οδού και ο σχεδιασμός ενός μακροπρόθεσμου πλάνου.

4.5.1. Δράσεις σε επίπεδο έργου

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, η αξιολόγηση της κατάστασης της οδού στοχεύει στην υποστήριξη της σχετικής λήψης αποφάσεων. Σε επίπεδο έργου, στόχος είναι η αξιολόγηση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και η κατάρτιση σχεδίων συντήρησης και αποκατάστασης (Mohamed et al., 2022). Και για τις δύο περιπτώσεις, τα βασικά ζητήματα της λήψης αποφάσεων σε επίπεδο έργου PMS φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Λήψη αποφάσεων σε επίπεδο έργου (Austroads, 2018b, 2018d).

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|---|
| 1 | Εξέταση των πτυχών συμπεριφοράς της οδού |
| 2 | Χρήση δεικτών συμπεριφοράς (π.χ. ομαλότητα, τροχοαυλάκωση, φέρουσα ικανότητα, ενιαίος δείκτης PCI κ.λπ.) |
| 3 | Ανάλυση και αξιολόγηση συμπεριφοράς / μοντέλα (δηλαδή, εμπειρικά, μηχανιστικά-εμπειρικά, ντετερμινιστικά, πιθανολογικά) |
| 4 | Καθορισμός περιορισμών στα κριτήρια ελέγχου (οριακές τιμές) |
| 5 | Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας εναλλακτικών σεναρίων επέμβασης |
| 6 | Εξέταση των οικονομικών προοπτικών (κόστος φορέα και κόστος εξυπηρέτησης χρηστών της οδού) |
| 7 | Εκτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών για όλα τα στάδια ζωής της οδού (κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση → κύκλος ζωής) |

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|---|
| 8 | Εξέταση των αβεβαιοτήτων στις μεταβλητές της ανάλυσης (δηλαδή εκτίμηση κινδύνου και ανατροφοδότηση από ειδικές μελέτες πεδίου). |

Μόλις ελεγχθεί ότι η διαδικασία ακολούθησε τα βήματα του Πίνακα 4.1, τότε συνήθως απαντώνται δύο προσεγγίσεις διαχείρισης που μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους: ο πρώτος λαμβάνει υπόψη τιμές ενεργοποίησης των σεναρίων επέμβασης (triggering values) και τιμές κατωφλίου (threshold values). Οι τιμές ενεργοποίησης υποδεικνύουν υπό μορφή σύστασης την εφαρμογή τυχόν εναλλακτικών δράσεων συντήρησης ή/και αποκατάστασης (M&R), ενώ οι οριακές τιμές κατωφλίου δίνουν έναν ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος κατά την περίοδο ανάλυσης.

Και οι δύο τύποι επικεντρώθηκαν γύρω από τρεις κοινούς στόχους διαχείρισης, που αφορούν στο κόστος, στην απόδοση και στο περιβάλλον. Επιπλέον, ενίοτε πρέπει να απασχολεί τους φορείς διαχείρισης των οδών και το κοινωνικό αντίκτυπο που προκύπτει από μία πτώση συμπεριφοράς της οδού. Τέτοιο παράδειγμα είναι η απώλεια της αντίστασης σε ολίσθηση, η οποία σχετίζεται με τα τροχαία ατυχήματα και την οδική ασφάλεια που είναι μια κοινωνική απαίτηση. Συνολικά, μπορεί να υποστηριχθεί ότι το επίπεδο διαχείρισης έργου χαρακτηρίζεται από κυρίως τεχνικά θέματα διαχείρισης που επικεντρώνονται σε μεμονωμένα έργα ή οδικά τμήματα.

4.5.2. Δράσεις σε επίπεδο δικτύου

Το επίπεδο διαχείρισης δικτύου περιλαμβάνει πρωτίστως αποφάσεις προγραμματισμού και προϋπολογισμού για ομάδες έργων και μεμονωμένα οδικά τμήματα ή ένα ολόκληρο δίκτυο. Είναι πρακτικά μια στρατηγική και συστηματική διαδικασία λειτουργίας, συντήρησης, αναβάθμισης και αποτελεσματικής επέκτασης των φυσικών οδικών περιουσιακών στοιχείων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Κάθε επίπεδο διαχείρισης δικτύου περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις τα ακόλουθα τρία υποσυστήματα: (α) υποσύστημα πληροφοριών, (β) υποσύστημα ανάλυσης, και (γ) υποσύστημα εφαρμογής.

Το πρώτο υποσύστημα περιλαμβάνει τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της οδικής κατάστασης του δικτύου συνολικά. Οι βασικές δραστηριότητες που απαιτούνται για

την υποστήριξη αυτού του υποσυστήματος φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Αφού συλλεχθεί το σύνολο των στοιχείων για την κατάσταση της οδού, ακολουθεί ανάλυση. Μια βασική αρχή του υποσυστήματος ανάλυσης είναι να ληφθούν υπόψη οι ανάγκες βελτίωσης του οδοστρώματος προκειμένου να καθορισθεί ένα στρατηγικό σχέδιο για συντήρηση, αποκατάσταση ή πλήρη ανακατασκευή. Στο υποσύστημα αυτό, εντάσσονται οι δράσεις του Πίνακα 4.3. Μετά την ανάλυση των διαθέσιμων πληροφοριών και τη σύνταξη των προβλεπόμενων σχεδίων δράσης, το υποσύστημα υλοποίησης διαδραματίζει τον βασικό ρόλο στην ολοκλήρωση του επιλεγμένου σχεδίου δράσης (σκέλος υλοποίησης). Οι κύριες δραστηριότητες σε αυτό το σημαντικό υποσύστημα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.2: Υποσύστημα πληροφοριών (Austroads, 2018b, 2018d).

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|--|
| 1 | Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος που πρόκειται να μετρηθούν, όπως η δομική ικανότητα, η ποιότητα κύλισης, η κατάσταση της επιφάνειας και η αντίσταση στην ολίσθηση. Ταυτόχρονα, αυτό το βήμα περιλαμβάνει τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας μετρήσεων και συχνότητας συλλογής δεδομένων με βάση την ταξινόμηση και την ιεράρχηση των οδών. |
| 2 | Αναγνώριση ομοιογενών τμημάτων (δηλαδή με βάση τους όγκους κυκλοφορίας, τη στρωματογραφία του οδοστρώματος κ.λπ.) ή άλλους συνδέσμους στο δίκτυο που αναμένεται να διευκολύνουν τη διαχείριση του δικτύου. |
| 3 | Συλλογή πληροφοριών εκτός των στοιχείων του οδοστρώματος, όπως γεωμετρία, κυκλοφορία και ατυχήματα. |
| 4 | Εκτέλεση προγραμμάτων/εκστρατειών επιτόπου δοκιμών και ελέγχων. |
| 5 | Δημιουργία ιστορικών δεδομένων συντήρησης και αρχείων κατασκευής που βοηθούν στην αξιολόγηση της τρέχουσας κατάστασης συμπεριφοράς και στην πρόβλεψη της μελλοντικής. |
| 6 | Εκτίμηση του μοναδιαίου κόστους για υλικά και εργασίες. |

Πίνακας 4.3: Υποσύστημα ανάλυσης (Austroads, 2018b, 2018d).

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|---|
| 1 | Προσδιορισμός των αναγκών οδοστρώματος και «υποψήφιων» οδικών τμημάτων προς βελτίωση. |
| 2 | Δημιουργία εναλλακτικών ενεργειών και σεναρίων διαχείρισης για κάθε οδικό έργο (δηλαδή, τύποι, πάχη και αναμενόμενοι χρόνοι για νέα κατασκευή, αποκατάσταση ή συντήρηση). |
| 3 | Επιλογή μεταβλητών και δεικτών συμπεριφοράς που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τεχνική και οικονομική ανάλυση (δηλαδή περίοδοι ανάλυσης, ποσοστά φθοράς, ελάχιστα επίπεδα ποιότητας κύλισης, κ.λπ.). |
| 4 | Ορισμός του στόχου διαχείρισης, δηλαδή απόφαση για το εάν οι τελικές ενέργειες θα βασίζονται αποκλειστικά σε οικονομικές πτυχές (π.χ. μεγιστοποίηση των οφελών ή ελαχιστοποίηση του κόστους) ή σε μερικώς οικονομικές και κοινωνικές ή πολιτικές πτυχές με μη ποσοτικές νομισματικές μονάδες. |
| 5 | Αξιολόγηση απόδοσης των εναλλακτικών σεναρίων. |
| 6 | Οικονομική ανάλυση για κάθε εναλλακτικό σενάριο. |
| 7 | Ανάπτυξη σχεδίων για ενέργειες κατασκευής και συντήρησης που υπόκεινται σε βελτιστοποίηση σύμφωνα με ένα επιλεγμένο μέτρο οφέλους ή άλλη κατάταξη προτεραιότητας. |

Πίνακας 4.4: Υποσύστημα εφαρμογής (Austroads, 2018b, 2018d).

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|--|
| 1 | Προσδιορισμός των προτεινόμενων προγραμμάτων εργασίας. |
| 2 | Εξασφάλιση διοικητικής έγκρισης και άλλων νομοθετικών θεμάτων για τις προγραμματισμένες δράσεις. |
| 3 | Κατάρτιση προϋπολογισμού, προγραμματισμός σχεδίων εργασίας και εκτέλεση εργασιών. |

| A/A | Βασικά χαρακτηριστικά στη λήψη αποφάσεων |
|-----|--|
| 4 | Ενημέρωση των αρχείων δεδομένων και των μοντέλων πρόβλεψης περιοδικά με βάση την ανατροφοδότηση κέρδους. |
| 5 | Πραγματοποίηση των απαραίτητων αναθεωρήσεων μέσω της ανατροφοδότησης. |

Είναι προφανές ότι η συνεργασία και διαρκής ανατροφοδότηση μεταξύ των τριών υποσυστημάτων που προαναφέρθηκαν είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για μια επιτυχή λήψη αποφάσεων σε επίπεδο δικτύου.

4.6. Επιμέρους ζητήματα κατά τη λήψη αποφάσεων

4.6.1. Επίπεδα αποφάσεων

Οι δραστηριότητες λήψης αποφάσεων χαρακτηρίζονται από το εύρος τους. Δύο είδη απαντώνται: (α) αποφάσεις ευρείας κλίμακας ή αλλιώς καθολικές που επηρεάζουν ολόκληρο το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων (επίπεδο διαχείρισης δικτύου) και (β) συγκεκριμένες αποφάσεις για μεμονωμένα έργα (επίπεδο διαχείρισης έργου) (Ruiz et al., 2020). Αν και η διάκριση είναι απαραίτητη για την καλύτερη διατύπωση της μεθοδολογίας αποφάσεων ενός οργανισμού διαχείρισης οδών, συνήθως υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των δύο ειδών αποφάσεων. Ειδικότερα, το αποτέλεσμα μιας απόφασης σε επίπεδο δικτύου αποτελεί μέρος των ενεργειών που καθορίζουν την διαδικασία απόφασης σε επίπεδο έργου (Mohamed et al., 2022; Wang et al., 2020).

Για παράδειγμα, εάν σε επίπεδο δικτύου εντοπιστούν περιοχές που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, τότε ενδέχεται να αποφασιστεί ειδικότερη και λεπτομερέστερη ανάλυση και διερεύνηση του τμήματος αυτού σε επίπεδο έργου. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά μια μεμονωμένη απόφαση σε επίπεδο δικτύου συχνά ενεργοποιεί πολλαπλές αποφάσεις για μεγάλο αριθμό μεμονωμένων τμημάτων σε επίπεδο έργου. Επομένως, απαιτείται πολύπλευρη υποστήριξη αποφάσεων σε διάφορα στάδια ανάλογα με την ιεραρχία διαχείρισης του οδικού δικτύου. Στο πλαίσιο αυτής της διαδικασίας, υπάρχει ένας αριθμός γενικών επιπέδων αποφάσεων που διαχωρίζονται το ένα από το άλλο, καθώς συνήθως αναφέρονται ως: (α) στρατηγικό επίπεδο (κεντρική άποψη): πολιτική, πρότυπα και προϋπολογισμοί, (β) επίπεδο προγράμματος (τομεακή άποψη): ανάπτυξη προγραμμάτων εργασιών και (γ) επίπεδο έργου (συγκεκριμένο οδικό τμήμα): επιλογή εναλλακτικής ενέργειας επέμβασης.

Όπως έχει ειπωθεί ξανά, το PMS είναι κατά κύριο λόγο ένα εργαλείο για χρήση από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων σε έναν οδικό φορέα. Ένα ολιστικό PMS πρέπει να διασφαλίζει τη λειτουργικότητά του σε όλα τα επίπεδα διαχείρισης, αλλά κάθε επίπεδο απαιτεί διαφορετικούς τύπους και ποσότητες δεδομένων, χρησιμοποιεί διαφορετικά κριτήρια απόφασης και λειτουργεί υπό διαφορετικούς περιορισμούς. Κατά συνέπεια, η λεπτομερής δομή του συνολικού συστήματος μπορεί να διαφέρει σημαντικά από επίπεδο σε επίπεδο. Ωστόσο, η βασική ακολουθία των ενεργειών εντός των επιπέδων είναι η ίδια.

Συνολικά, μια ισχυρή μεθοδολογία απόφασης περιλαμβάνει αρχικά μια συλλογή σχετικών πληροφοριών, δεύτερον μια ανάλυση των συνεπειών των διαθέσιμων επιλογών και στη συνέχεια λαμβάνεται μια απόφαση που απαιτεί εφαρμογή (σκέλος υλοποίησης). Ο ρόλος της μεθοδολογίας απόφασης είναι να λάβει υπόψη τις κατάλληλες τιμές για τις μεταβλητές απόφασης που συμμορφώνονται βέλτιστα με τους στόχους του οργανισμού διαχείρισης. Ως εκ τούτου, λεπτομέρειες που αφορούν στην κατασκευή, την συντήρηση και την αποκατάσταση πρέπει να καταγράφονται στη βάση δεδομένων (μητρώο παρακολούθησης του έργου) και μεταβιβάζονται σε άλλα επίπεδα διαχείρισης.

4.6.2. Αποτελεσματικότητα και σφάλματα δράσεων

Παρακάτω αναφέρονται δύο βασικά ζητήματα, τα οποία και τα δύο σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας απόφασης, δηλαδή (α) την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της εναλλακτικής λύσης επέμβασης και (β) την εξέταση των σφαλμάτων στη διαδικασία αξιολόγησης της κατάστασης.

Υπάρχουν διάφοροι διαθέσιμοι ορισμοί για την αποτελεσματικότητα της εναλλακτικής λύσης επέμβασης, όπως:

- η δυνατότητα παράτασης της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος (δηλαδή βελτίωση της καμπύλης συμπεριφοράς του οδοστρώματος) και
- η διάρκεια ζωής της ίδιας της λύσης επέμβασης (παράδειγμα τα έτη που αντέχει με ανεκτή επανεμφάνιση φθοράς μία νέα ασφαλική επίστρωση).

Ωστόσο, είναι πιο βέλτιστο να εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της λύσης επέμβασης σύμφωνα με την ικανότητά της να λειτουργεί καλά κατά την προσδοκώμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, έτσι ώστε να εξαλειφθεί η ανάγκη για πρόσθετη ενέργεια. Σε αυτό το πλαίσιο, μια επέμβαση θεωρείται αποτελεσματική, εφόσον δεν βελτιώνει μόνο την κατάσταση του οδοστρώματος, αλλά μειώνει τον ρυθμό τυχόν πρόσθετης φθοράς στο τμήμα του οδοστρώματος όπου εφαρμόζεται.

Όσον αφορά τα πιθανά σφάλματα που προκαλούνται κατά τη λήψη αποφάσεων PMS, διαφορετικές πηγές σφαλμάτων (π.χ. σφάλματα οργάνων συστήματος, υποκειμενικός προσδιορισμός της σοβαρότητας/έκτασης κινδύνου, οι συνθήκες πεδίου και λειτουργίας, κ.λπ.) ενδέχεται να εισαχθούν στα δεδομένα των μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, οι οδικοί φορείς πρέπει να βελτιώσουν την ακρίβεια πρόβλεψης των χρησιμοποιούμενων μοντέλων PMS προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν πρόσθετες δαπάνες. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα, τόσο λιγότερο ακριβής είναι η ανάλυση της πρόβλεψης απόδοσης. Τέλος, ένα θετικό σφάλμα στα δεδομένα πρόβλεψης της κατάστασης (δηλαδή, υπερεκτίμηση του δείκτη κατάστασης και υποεκτίμηση της φθοράς) είναι λιγότερο αποτελεσματικό από το αρνητικό σφάλμα (δηλαδή, υποεκτίμηση του δείκτη κατάστασης και υπερεκτίμηση της φθοράς). Το τελευταίο αποτελεί ένδειξη συντηρητικής, άρα ασφαλέστερης, προσέγγισης.

Συνεκτιμώντας τις εναλλακτικές λύσεις επέμβασης σε μία οδό καθώς και τα πιθανά σφάλματα μετρήσεων, διαμορφώνεται ένα «δέντρο αποφάσεων», το οποίο αποτελεί τον οδηγό ανάθεσης και εκτέλεσης των προτεινόμενων ενεργειών επέμβασης. Εάν η κατάσταση της οδού είναι αποδεκτή, τότε μάλλον δεν χρειάζεται καμία ενέργεια. Διαφορετικά, η επιλεγμένη ενέργεια έρχεται ως αποτέλεσμα του δέντρου απόφασης. Τα κριτήρια απόφασης βασίζονται στη μεγιστοποίηση (βελτιστοποίηση) του συνολικού οφέλους που αποκτάται από τις διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις που εφαρμόζονται στα οδικά τμήματα στα οποία διατίθεται περιορισμένος προϋπολογισμός (Olaya Reyes et al., 2023; Salcedo et al., 2022).

5. Σύνοψη

5.1. Κόρια συμπεράσματα

Η νέα κουλτούρα που επικρατεί στον τομέα των οδικών έργων δίνει ιδιαίτερο βάρος, πέρα από την κατασκευή, και στην λειτουργία μίας οδού. Υπό την πάροδο των ετών και την συνεχή έκθεση σε κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες, μία οδός φθίνει αναφορικά με την παρατηρούμενη συμπεριφορά του. Κατά συνέπεια, απαιτούνται κατά διαστήματα ενέργειες επέμβασης για συντήρηση ή αποκατάσταση. Λόγω της οικονομικής συνιστώσας που ενέχει ο σχεδιασμός και η επιλογή τέτοιων δράσεων επέμβασης, πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση στη διαμόρφωση και την υποστήριξη λειτουργίας ενός στρατηγικού συστήματος διαχείρισης.

Με βάση την ανασκόπηση που έγινε, προκύπτει ότι ένα σύστημα διαχείρισης οδών και οδοστρωμάτων λειτουργεί ως σύστημα υποστήριξης αποφάσεων που βοηθά τους οργανισμούς υποδομής στον σχεδιασμό των ενεργειών επέμβασης για συντήρηση και αποκατάσταση, γεγονός που απαιτεί τεχνοοικονομική μέριμνα. Ο στόχος των συστημάτων αυτών είναι η διατήρηση ενός λειτουργικού και ασφαλούς οδικού δικτύου για τους χρήστες της οδού.

Ουσιαστικά, το πιο σημαντικό αποτέλεσμα ενός τέτοιου συστήματος είναι η δημιουργία ενός συντονισμένου σχεδίου δράσης, το οποίο επιτυγχάνεται με την εφαρμογή εργαλείων και μοντέλων που συνήθως λαμβάνουν υπόψη την ελαχιστοποίηση του κόστους των συναφών ενεργειών που απαιτούνται για τη διατήρηση αποδεκτής κατάστασης για ένα δίκτυο.

Για να επιτελέσει το ρόλο του, το σύστημα χρειάζεται τροφοδότηση από μία σειρά στοιχείων (βλ. κεφάλαιο 2), τα οποία συνοπτικά περιλαμβάνουν – μεταξύ άλλων:

- στοιχεία απογραφής,
- στοιχεία κατάστασης της οδού,
- στοιχεία κυκλοφορίας,
- στοιχεία από το ιστορικό κατασκευής ή προγενέστερης ανακατασκευής, και
- στοιχεία από το περιβάλλον της οδού.

Πέραν αυτών, απαιτείται οπωσδήποτε περιοδική ανατροφοδότηση από την τρέχουσα κατάσταση της οδού, η οποία προκύπτει κατόπιν ερευνών πεδίου. Αυτές περιλαμβάνουν εργασίες οπτικής επιθεώρησης, δοκιμές προσδιορισμού των δομικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών της οδού. Επομένως, το τεχνικό σκέλος ενός συστήματος διαχείρισης προϋποθέτει ότι ο φορέας διαχείρισης έχει στην κατοχή του ειδικό εξοπλισμό και συστήματα, τα οποία είναι βαθμονομημένα ώστε να

εξασφαλίζεται η ακρίβεια στα στοιχεία συλλογής και να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα μέτρησης.

Θεωρώντας ως εισροή την τρέχουσα κατάσταση της οδού (τεχνικό σκέλος) και τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους του φορέα διαχείρισης (οικονομικό σκέλος) διαμορφώνεται ένα «δένδρο αποφάσεων». Υπενθυμίζεται ότι η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα των αποφάσεων που λαμβάνονται από το διαμορφωμένο σύστημα του κάθε φορέα, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισαγωγής και τροφοδότησης των μοντέλων, βάσει των οποίων λαμβάνονται οι αποφάσεις. Με τη σειρά της, η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται από την μέθοδο συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, πράγμα που σημαίνει ότι, για παράδειγμα, μια μέθοδος συλλογής δεδομένων που βασίζεται σε υποκειμενικά κριτήρια μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη λήψη αποφάσεων.

Επομένως, ο τύπος των μεθόδων συλλογής (π.χ. επιλογή συστημάτων και ειδικού εξοπλισμού) και ανάλυσης δεδομένων όχι μόνο επηρεάζει την ποιότητα των δεδομένων, αλλά μπορεί επίσης να βελτιώσει το χρόνο και το κόστος της διαδικασίας συλλογής, επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων. Κατά κανόνα, συνίσταται να επιδιώκεται οι πολιτικές λήψης αποφάσεων να υποστηρίζονται με δεδομένα που είναι σχετικά, αξιόπιστα, οικονομικά αποδοτικά στη συλλογή (π.χ., κατάλληλα συστήματα μέτρησης, ορισμός συχνότητας για την περιοδικότητα των ελέγχων, κ.α.) και οικονομικά αποδοτικά για την επεξεργασία και την ανάλυσή τους (π.χ. κατάλληλα λογισμικά, βαθμονομημένα μοντέλα πρόβλεψης, διαρκής ανατροφοδότηση, κ.α.).

5.2. Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Με βάση την ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, εντοπίστηκε μία διασπορά και διακύμανση του τρόπου με τον οποίο συντίθεται ένα σύστημα διαχείρισης οδών. Κατά συνέπεια, ως πρόταση για περαιτέρω έρευνα, διατυπώνεται η ανάγκη ομοιογένειας μεταξύ διαφορετικών φορέων διαχείρισης οδών με συγκεκριμένα πρωτόκολλα, διαδικασίες και κριτήρια ελέγχου.

Βεβαίως, εντοπίζεται ως δυσκολία προς την κατεύθυνση αυτή, το επιστημονικό προφίλ του προσωπικού του κάθε φορέα και η τεχνογνωσία του, καθώς και η διαθεσιμότητα στα ίδια μηχανήματα ελέγχου. Οικονομικοί περιορισμοί ενδέχεται να επιδρούν αρνητικά στην προμήθεια του ίδιου εξοπλισμού οριζόντια. Πάντως, στην περίπτωση που ο εξοπλισμός αυτός ήταν ενιαία ίδιος ως ελάχιστη απαιτούμενη προϋπόθεση ώστε ένας φορέας να θεωρηθεί ικανός να εκτελεί ενέργειες ενός συστήματος διαχείρισης, τότε η διαμόρφωση οριζόντιων οδηγιών και συστάσεων θα ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική. Μάλιστα, θα διευκόλυνε οι οδηγίες αυτές να είχαν μία στοιχειώδη διάκριση ανάλογα με τον τύπο της οδού, με στόχο πάντα την βελτιστοποίηση από

πλευράς απαιτούμενου χρόνου, υλικού εξοπλισμού, αλλά και απαιτούμενων χρηματικών μονάδων.

Βιβλιογραφία

- Ahmad Z, Mubin S, Masood R, Ullah F, Khalfan M. Developing a Performance Evaluation Framework for Public Private Partnership Projects. *Buildings* 2022, 12, 1563.
- Ahmed S, Vedagiri P, Rao KVK. Prioritization of pavement maintenance sections using objective based Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2017, 10, 158-170.
- Aliyeva R, Ilchenko V. Research Evaluation of the Effectiveness of Capital Investments in the Construction and Reconstruction of Highways. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299. Springer, Cham, 2023.
- Arezoumand S, Sassani A, Smadi O. Data-Driven Approach to Decision-Making for Pavement Preservation. *Engineering Proceedings* 2023, 36, 61.
- Austrroads. *Guide to asset management: part 2: community and stakeholder requirements*, Sydney, NSW, 2018a.
- Austrroads. *Guide to Pavement Technology Part 5: Pavement Evaluation and Treatment Design*, Sydney, NSW, 2018b.
- Austrroads. *Guide to Asset Management - Processes Part 6: Defining and Understanding Asset Requirements*, Sydney, NSW, 2018c.
- Austrroads. *Guide to Asset Management – Technical Information Part 12: Pavements*, Sydney, NSW, 2018d.
- Austrroads. *Guide to Asset Management - Technical Information Part 15: Technical Supplements*, Sydney, NSW, 2018e.
- Benedetto A, Tosti F, Bianchini Ciampoli L, D’Amico F. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal processing* 2017, 132, 201-209.
- Cui Y, Zhang F, Shao Y, Twaha S, Tong H. Techno-Economic Comprehensive Review of State-of-the-Art Geothermal and Solar Roadway Energy Systems. *Sustainability* 2022, 14, 10974.
- Devagiri VM, Boeva V, Abghari S, Basiri F, Lavesson N. Multi-View Data Analysis Techniques for Monitoring Smart Building Systems. *Sensors* 2021, 21, 6775.
- Elwahsh H, Allakany A, Alsabaan M, Ibrahim MI, El-Shafeiy E. A Deep Learning Technique to Improve Road Maintenance Systems Based on Climate Change. *Applied Sciences* 2023, 13, 8899.

- Federal Highway Administration (FHWA). Distress Identification Guide from the Long-Term Pavement Performance Program, U.S. Department of Transportation, 2005.
- Gandomi AH, Chen F, Abualigah L. Machine Learning Technologies for Big Data Analytics. *Electronics* 2022, 11, 421.
- Gao Q, Fan L, Wei S, Li Y, Du Y, Liu C. Differences Evaluation of Pavement Roughness Distribution Based on Light Detection and Ranging Data. *Applied Sciences* 2023, 13, 8080.
- Han C, Huang J, Yang X, Chen L, Chen T. Long-Term Maintenance Planning Method of Rural Roads under Limited Budget: A Case Study of Road Network. *Applied Sciences* 2023, 13, 12661.
- Kozel M, Remek L, Ďurínová M, Šedivý Š, Šrámek J, Danišovič P, Hostačná V. Economic Impact Analysis of the Application of Different Pavement Performance Models on First-Class Roads with Selected Repair Technology. *Applied Sciences* 2021, 11, 10409.
- Lee KW, Kim KH. Analyzing Cost and Schedule Growths of Road Construction Projects, Considering Project Characteristics. *Sustainability* 2021, 13, 13694.
- Mohamed AS, Xiao F, Hettiarachchi C. Project Level Management Decisions in Construction and Rehabilitation of Flexible Pavements, *Automation in Construction* 2022, 133, 104035.
- Moins B, France C, Van den bergh W, Audenaert A. Implementing life cycle cost analysis in road engineering: A critical review on methodological framework choices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 133, 110284.
- OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. Understanding the value of transport infrastructure: Guidelines for macro-level measurement of spending and assets, The International Transport Forum, Task Force Report, 2013.
- Olaya Reyes MR, Soto Abanto SE, García Zare EJ, Zavaleta Pesantes HW. Post-Investment Cost in Roads and Economic Development in a Peruvian Region. *Sustainability* 2023, 15, 16588.
- Ruiz A, Guevara J. Sustainable Decision-Making in Road Development: Analysis of Road Preservation Policies. *Sustainability* 2020, 12, 872.
- Salcedo E, Jaber M, Requena Carrión J. A Novel Road Maintenance Prioritisation System Based on Computer Vision and Crowdsourced Reporting. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2022, 11, 15.
- Szczepański M, Grzyl B. Technical and Economic Analysis of the Implementation of Selected Variants of Road Investment. *Buildings* 2020, 10, 97.

Wang H, Xu Z, Yue L. Comparing of Data Collection for Network Level Pavement Management of Urban Roads and Highways, *Journal of Advanced Transportation* 2020, 9237963.

Xu H, Kim MY, Sabillon C, Gao L, Prozzi JA. Development of Pavement Performance Models for Pavement Management Incorporating Treatment Type, Report No. FHWA/TX-21/0-6988-2 of the Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation, 2021.