



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στρατηγικές βιωσιμότητας στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων



ΦΟΙΤΗΤΕΣ:

Καπεντζώνης Ιωάννης

ΑΜ:19042

Τσαμουράς Γεώργιος

ΑΜ:19112

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

Γεωργούλη Κωνσταντίνα

Επικ. Καθηγήτρια Πα.Πελ.

ΠΑΤΡΑ, Ιανουάριος 2026

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT.....	1
1 Εισαγωγή	2
1.1 Αντικείμενο.....	2
1.2 Στόχος	2
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας	3
2 Στοιχεία Οδοστρωμάτων	4
2.1 Γενικά.....	4
2.2 Εύκαμπτα οδοστρώματα.....	4
2.3 Δύσκαμπτα οδοστρώματα.....	7
2.4 Ημι-άκαμπτα (ημι-εύκαμπτα) οδοστρώματα.....	9
2.5 Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων	9
3 Επιφανειακές Φθορές Οδοστρωμάτων.....	10
3.1 Γενικά.....	10
3.2 Ρηγματώσεις	10
3.2.1 Ρωγμές τύπου αλιγάτορα	10
3.2.2 Διαμήκεις ρηγματώσεις	11
3.2.3 Εγκάρσιες ρηγματώσεις.....	12
3.2.4 Ρωγμές συρρίκνωσης.....	13
3.2.5 Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος.....	14
3.2.6 Ρωγμές ανάκλασης.....	14
3.2.7 Ρωγμές ολίσθησης	15
3.2.8 Ελικοειδείς ρωγμές	16
3.3 Παραμορφώσεις της επιφάνειας	17
3.3.1 Κατά μήκος αυλακώσεις.....	17

3.3.2	Κατά πλάτος αυλακώσεις- κυματώσεις	17
3.3.3	Κοιλώματα και κυρτώματα του οδοστρώματος	18
3.3.4	Τοπικές επισκευές- Μπαλώματα	19
3.4	Αποσαθρώσεις	20
3.4.1	Γήρανση οδοστρώματος και αποκόλληση αδρανών	20
3.4.2	Λακκούβες	21
3.5	Λείανση επιφάνειας κύλισης	21
3.5.1	Εξίδρωση οδοστρώματος - ανάδυση ασφάλτου	21
3.5.2	Λείανση αδρανών	22
4	Βιωσιμότητα Οδοστρωμάτων.....	23
4.1	Η βιωσιμότητα στα διάφορα στάδια των έργων των οδοστρωμάτων	23
4.2	Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA).....	27
4.3	Ανάλυση Κύκλου Κόστους Ζωής (LCCA)	28
5	Συντήρηση Οδοστρωμάτων.....	33
6	Ερευνητική Διαδικασία	39
6.1	Μεθοδολογία.....	39
6.2	Ανάλυση.....	42
6.2.2	Εισαγωγή δεομένων.....	42
6.2.3	Κοστολόγηση εργασιών συντήρησης.....	46
6.2.4	Συγκριτική αξιολόγηση.....	50
7	Συμπεράσματα.....	54
8	Βιβλιογραφία.....	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Διατομές εύκαμπτων, δύσκαμπτων και ημι-άκαμπτων οδοστρωμάτων.....	4
Εικόνα 2-2: Μεταφορά φορτίων σε εύκαμπτα οδοστρώματα.	6
Εικόνα 2-3: Κατανομή φορτίου εύκαμπτου οδοστρώματος[1].	6
Εικόνα 3-1: Ρωγμές τύπου αλιγάτορα	11
Εικόνα 3-2: Επ'πιπεδα σοβαρότητας ρωγμών τύπου αλιγάτορα.....	11
Εικόνα 3-3: Παράδειγμα διαμήκους ρωγμής.	12
Εικόνα 3-4: Εγκάρσιες ρηγματώσεις.	12
Εικόνα 3-5: Χαρακτηριστικές ρωγμές συρρίκνωσης.	13
Εικόνα 3-6: Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος.	14
Εικόνα 3-7: Ρωγμές ανάκλασης.....	15
Εικόνα 3-8: Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων.	15
Εικόνα 3-9: Ελικοειδείς ρωγμές.	16
Εικόνα 3-10: Κατά μήκος αυλακώσεις.	17
Εικόνα 3-11: Κατά πλάτος αυλακώσεις- κυματώσεις.	18
Εικόνα 3-12: Κοιλώματα και κυρτώματα οδοστρώματος.	18
Εικόνα 3-13: Μπαλώματα.	19
Εικόνα 3-14: Αποκόλληση αδρανών.	20
Εικόνα 3-15: Λακκούβες.	21
Εικόνα 3-16: Εξίδρωση οδοστρώματος- ανάδυση ασφαλτικού υλικού.	21
Εικόνα 4-1: Ωφέλειες από την κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων (Λοΐζος & Γεωργούλη, 2022).....	23
Εικόνα 4-2: Στάδια κύκλου ζωής οδοστρωμάτων.	24
Εικόνα 4-3: Βήματα για την πραγματοποίηση μίας LCCA.....	31
Εικόνα 5-1: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος.....	34

Εικόνα 5-2: Εξέλιξη της κατάστασης του οδοστρώματος με τον χρόνο και επίδραση των μεθόδων συντήρησης	35
Εικόνα 5-3: Σύγκριση αντιδραστικής και προληπτικής διαχείρισης οδοστρωμάτων ως προς το κόστος	37
Εικόνα 5-4: Κατάσταση οδοστρώματος έπειτα από σειρά συντηρήσεων.....	37
Εικόνα 6-1: Διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος,	39
Εικόνα 6-2: Τυπική Διατομή Οδού.....	40
Εικόνα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση – Σενάριο 1	43
Εικόνα 6-4: Σχηματική αναπαράσταση – Σενάριο 2	44
Εικόνα 6-5: Συνολικό κόστος εργασιών συντήρησης – Σενάριο 1	50
Εικόνα 6-6: Συνολικό κόστος εργασιών συντήρησης – Σενάριο 2	51
Εικόνα 6-7: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος – Σενάριο 1	52
Εικόνα 6-8:: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος – Σενάριο 2.....	52 <u>53</u>

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1 Δείκτες βιωσιμότητας ομαδοποιημένοι στις τρεις διαστάσεις.....	26
Πίνακας 6-1: Τιμολόγιο εργασιών.....	47
Πίνακας 6-2: Κόστος ανά εργασία - Σενάριο 1	48
Πίνακας 6-3: Κόστος ανά εργασία - Σενάριο 2	49

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζει τις στρατηγικές βιωσιμότητας που μπορούν να εφαρμοστούν στη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων, με στόχο τη βελτίωση της ανθεκτικότητας, της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και της μακροχρόνιας οικονομικής βιωσιμότητας. Αρχικά αναλύονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού οδοστρωμάτων καθώς και οι κυριότερες μορφές αστοχιών και φθορών και οι μέθοδοι αποκατάστασης τους. Όσων αφορά στη συντήρηση των οδοστρωμάτων, στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αξιολογούνται εναλλακτικές στρατηγικές συντήρησης μέσω της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA), αξιοποιώντας κατάλληλο λογισμικό. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν δύο σενάρια επέμβασης τα οποία διαφέρουν ως προς τις εργασίες συντήρησης/αποκατάστασης και τον χρόνο εφαρμογής τους. Από τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η αξιοποίηση εργαλείων όπως το LCCA επιτρέπει την ολιστική προσέγγιση της συντήρησης υπό το πρίσμα των πλέον βιώσιμων στρατηγικών.

ABSTRACT

This Diploma Thesis investigates sustainable strategies for pavement maintenance management, aiming to enhance resilience, environmental performance, and long-term economic viability. It begins by analyzing the fundamental principles of pavement design, the main types of failures and deterioration, and corresponding repair methods. Concerning maintenance, this Thesis assesses alternative maintenance strategies using Life Cycle Cost Analysis (LCCA) with appropriate software. Two distinct intervention scenarios were developed, differing in the type and timing of maintenance and rehabilitation works. The comparative evaluation of the results demonstrates that employing tools like LCCA facilitates a holistic approach to maintenance, guided by the most sustainable strategies.

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο

Μετά το σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, η συντήρηση αποτελεί από τους πλέον καθοριστικούς παράγοντες για τη διατήρηση της λειτουργικότητας, της ασφάλειας και της μακροχρόνιας αποδοτικότητας τους. Οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από τα φορτία των βαρέων οχημάτων καθώς και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες προκαλούν σταδιακά φθορές και απώλεια των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων των στρώσεων του οδοστρώματος. Για το λόγο αυτό, η έγκαιρη και ορθολογική διαχείριση της συντήρησης είναι κρίσιμη, καθώς συμβάλει στην αποφυγή σοβαρών και εκτεταμένων φθορών, στη μείωση του κόστους αποκατάστασης και στην παράταση της ζωής του έργου.

Υπάρχουν διάφορες στρατηγικές συντήρησης, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τη φύση και την έκταση των φθορών, τη διαθεσιμότητα πόρων και τους στόχους του φορέα διαχείρισης. Οι προληπτικές στρατηγικές συντήρησης (preventive maintenance) στοχεύουν στη διατήρηση της καλής κατάστασης του οδοστρώματος μέσω τακτικών χαμηλού κόστους επεμβάσεων πριν εμφανιστούν σημαντικές δομικές φθορές. Αντίθετα, οι στρατηγικές αποκατάστασης (rehabilitation) εφαρμόζονται όταν το οδόστρωμα έχει ήδη υποστεί σημαντική υποβάθμιση και απαιτούν εκτεταμένες παρεμβάσεις, με υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στο πλαίσιο της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων η επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής συντήρησης αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς επηρεάζει όχι μόνο τη συμπεριφορά του οδοστρώματος αλλά και το συνολικό περιβαλλοντικό και οικονομικό αποτύπωμα του οδικού δικτύου.

1.2 Στόχος

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών συντήρησης, επιτρέποντας τον εντοπισμό της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ κόστους και συμπεριφοράς οδοστρώματος. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο και επιλέχθηκε μία διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος αυτοκινητόδρομου του Ελλαδικού Χώρου η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάλυση και αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν δύο σενάρια συντήρησης: Το πρώτο βασίστηκε σε συχνές, μικρής κλίμακας επεμβάσεις προληπτικού χαρακτήρα κυρίως, ενώ στο δεύτερο αραιότερες επεμβάσεις

αποκατάστασης. Για την εκτίμηση της αποδοτικότητας του κάθε σεναρίου πραγματοποιήθηκε Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA) μέσω κατάλληλου λογισμικού λαμβάνοντας υπόψη τα άμεσα κόστη, τα έμμεσα κόστη, τη διάρκεια ζωής των επεμβάσεων και την εξέλιξη της κατάστασης του οδοστρώματος.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Συγκεκριμένα,

Στο **1^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται το αντικείμενο, ο στόχος και η δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο **2^ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στους τύπους των οδοστρωμάτων και την λειτουργία τους. Επιπρόσθετα, γίνεται μια σύντομη σύγκρισή τους.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι κυριότερες φθορές εύκαμπτων οδοστρωμάτων και οι μέθοδοι συντήρησής τους.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** ορίζονται οι έννοιες ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα με σκοπό την ανάδειξη της σημαντικότητάς τους κατά το σχεδιασμό και τη συντήρησης των οδοστρωμάτων και κυρίως των εύκαμπτων. Επιπρόσθετα, διερευνώνται οι όροι «περιβαλλοντική εκτίμηση κύκλου ζωής» και «οικονομική αξιολόγηση» των οδοστρωμάτων.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στην αναγκαιότητα συντήρησης των οδοστρωμάτων με σκοπό την απρόσκοπτη λειτουργία τους.

Στο **6^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε έπειτα από την βιβλιογραφική έρευνα και από τις αναλύσεις που διενεργήθηκαν με το λογισμικό Pavexpress για τα δύο σενάρια που μελετήθηκαν. Έπειτα γίνεται παρουσίαση συνοπτικών συμπερασμάτων σχετικά με τις επεμβάσεις.

Στο **7^ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα

Τέλος, τα εδάφια της παρούσας ΔΕ πλαισιώνονται από την Βιβλιογραφία η οποία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8. .

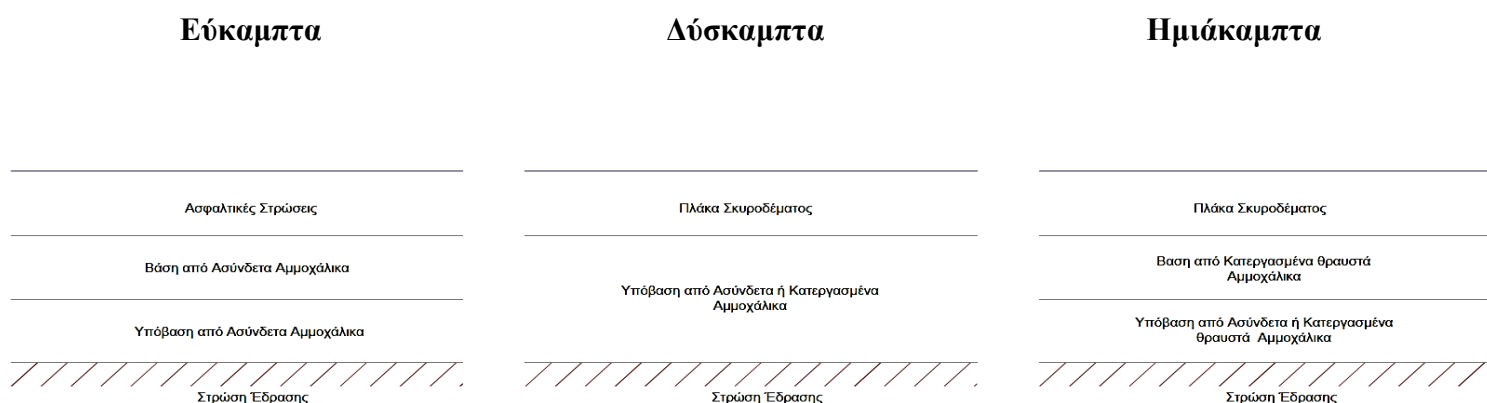
2 Στοιχεία Οδοστρωμάτων

2.1 Γενικά

Οδόστρωμα ονομάζεται το σύνολο των στρώσεων που εδράζονται στο έδαφος με σκοπό την προστασία του φυσικού εδάφους και την παραλαβή των επιβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων της κυκλοφορίας. Επιπρόσθετα, τα οδοστρώματα προσφέρουν κατάλληλη επιφάνεια για την ασφαλή και ομαλή κίνηση των οχημάτων. Τα οδοστρώματα αποτελούν επάλληλες στρώσεις από κατάλληλα υλικά και κατηγοριοποιούνται με βάση τα υλικά ως εξής (Εικόνα 2-1):

- Εύκαμπα
- Δύσκαμπα
- Ημι-άκαμπα (ημι-εύκαμπα)

Τα πιο συνήθη οδοστρώματα είναι τα εύκαμπα.



Εικόνα 2-1: Διατομές εύκαμπτων, δύσκαμπτων και ημι-άκαμπτων οδοστρωμάτων.

2.2 Εύκαμπα οδοστρώματα

Τα εύκαμπα οδοστρώματα αποτελούνται από:

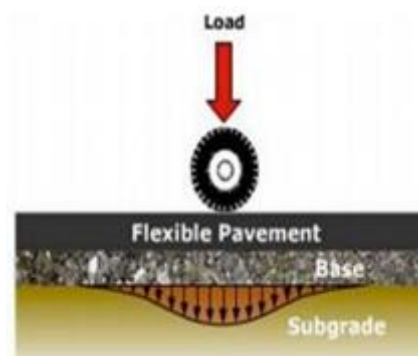
- Ασφαλτικές στρώσεις που κατασκευάζονται από ασφαλτόμιγμα και περιλαμβάνουν τη στρώση κυκλοφορίας, τη συνδετική και τη στρώση βάσης.

- Η επιφανειακή στρώση είναι η ανώτερη στρώση του οδοστρώματος, παρέχει αντιολισθηρότητα, ομαλή κύλιση και προστασία από τη φθορά και τα καιρικά φαινόμενα.
- Η ισοπεδωτική/συνδετική στρώση εξυπηρετεί τη διόρθωση των ανωμαλιών της κάτω επιφάνειας και λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα που εξασφαλίζει καλή πρόσφυση μεταξύ της επιφανειακής στρώσης και των υποκείμενων ασφαλικών στρώσεων.
- Η ασφαλική βάση αποτελεί την κατώτερη ασφαλική στρώση και έχει κυρίως δομικό ρόλο, καθώς παραλαμβάνει τα φορτία της κυκλοφορίας, μειώνει τις κατακόρυφες τάσεις και τις κατανέμει σε μεγαλύτερη επιφάνεια.
- Στρώση βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα η οποία συμβάλλει:
 - στην περαιτέρω μείωση των κατακόρυφων τάσεων,
 - στον περιορισμό των μόνιμων παραμορφώσεων (rutting),
 - στην ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων προς τις κατώτερες στρώσεις,
- Στρώση υπόβασης από ασύνδετα αμμοχάλικα η οποία
 - συμβάλλει στην βελτίωση της αποστραγγιστικής ικανότητας του οδοστρώματος
 - παρέχει την επιφάνεια κατασκευής της υπερκείμενης στρώσης βάσης.
- Στρώση έδρασης η οποία αποτελεί την στρώση στην οποία εδράζεται το οδόστρωμα.

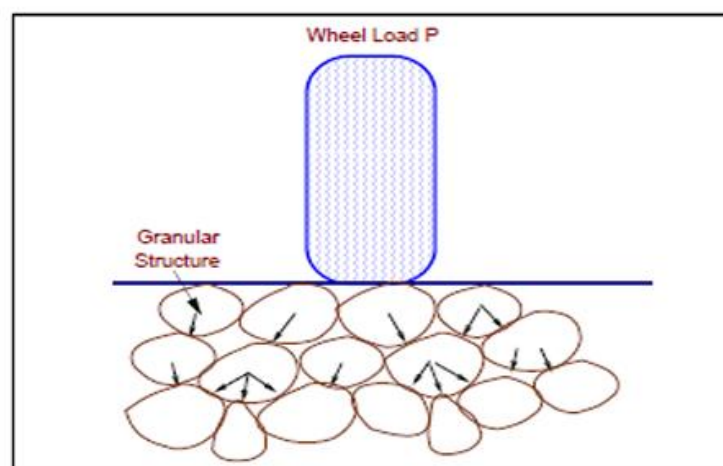
Τα εύκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε δρόμους χαμηλής έως μέτριας κυκλοφοριακής έντασης, αν και συναντώνται επίσης σε σημαντικό βαθμό σε αυτοκινητοδρόμους αλλά και σε διαδρόμους προσγείωσης/απογείωσης αεροδρομίων, οι οποίοι υπόκεινται σε μεγάλα φορτία τροχών/συστημάτων προσγείωσης.

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα μεταδίδουν τις τάσεις από τα φορτία των τροχών προς τα κατώτερα στρώματα μέσω μετάδοσης από κόκκο σε κόκκο, στα σημεία επαφής της κοκκώδους δομής (Εικόνες 2-2 και 2-3). Το φορτίο που ασκείται από τον τροχό κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με το βάθος, με αποτέλεσμα η τάση να μειώνεται με το βάθος. Εκμεταλλευόμενα αυτό το χαρακτηριστικό της κατανομής των τάσεων, τα εύκαμπτα

οδοστρώματα συνήθως αποτελούνται από πολλά στρώματα. Γι' αυτόν τον λόγο, ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην έννοια του πολυστρωματικού συστήματος.



Εικόνα 2-2: Μεταφορά φορτίων σε εύκαμπτα οδοστρώματα.



Εικόνα 2-3: Κατανομή φορτίου εύκαμπτου οδοστρώματος[1].

Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού που εξασφαλίζουν την καλή λειτουργία του οδοστρώματος τόσο κατά την κατασκευή όσο και καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του είναι τα εξής:

- Η στρώση έδρασης πρέπει να έχει την ικανότητα να αντέχει τις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις της κυκλοφορίας, χωρίς να προκαλούνται υπερβολικές παραμορφώσεις στην επιφάνειά της. Η επάρκεια αυτή ελέγχεται μέσω της ανάλυσης της θλιπτικής τάσης ή της αντίστοιχης παραμόρφωσης που αναπτύσσεται στην κορυφή της στρώσης έδρασης (δηλαδή στην κορυφή του υπεδάφους ή της εξυγιαντικής στρώσης).
- Το πάχος της βάσης, της υπόβασης (με ασύνδετα αδρανή) και της εξυγιαντικής στρώσης (όπου εφαρμόζεται) πρέπει να είναι αρκετό, ώστε κατά την περίοδο κατασκευής – και πριν ακόμα στρωθούν οι ασφαλτικές στρώσεις – να μην

καταπονείται υπερβολικά το υπέδαφος από την κυκλοφορία των εργοταξιακών οχημάτων.

- Οι ασφαλικές στρώσεις πρέπει να παραμένουν άθικτες και να μην παρουσιάζουν ρηγματώσεις λόγω των κυκλοφοριακών φορτίων. Το κριτήριο αυτό σχετίζεται με τη μέγιστη επιτρεπτή εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της ασφαλικής βάσης.

2.3 Δύσκαμπτα οδοστρώματα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από:

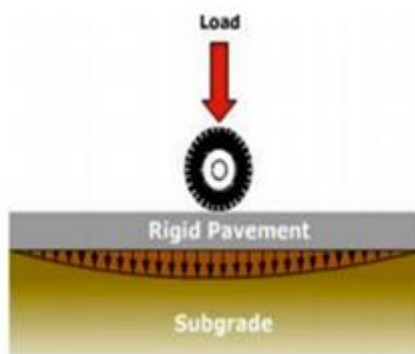
- Πλάκα σκυροδέματος. Αποτελεί το κύριο φέρον στοιχείο του δύσκαμπτου οδοστρώματος καθώς:
 - παραλαμβάνει τα κυκλοφοριακά φορτία κυρίως μέσω κάμψης,
 - κατανέμει τα φορτία σε μεγάλη επιφάνεια, μειώνοντας τις τάσεις που μεταφέρονται στις κατώτερες στρώσεις,
 - παρουσιάζει υψηλή ακαμψία και μικρές παραμορφώσεις σε σύγκριση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα.
- Στρώση υπόβασης από ασύνδετα ή κατεργασμένα αμμοχάλικα. Η στρώση αυτή:
 - παρέχει ομοιόμορφη και σταθερή στήριξη στην πλάκα,
 - μειώνει τις συγκεντρώσεις τάσεων στο υποκείμενο έδαφος,
 - βελτιώνει την αποστράγγιση και περιορίζει τη διείδυση υγρασίας,
- Στρώση έδρασης, η οποία αποτελεί την στρώση στην οποία εδράζεται το οδόστρωμα.

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα διαθέτουν ικανοποιητική αντοχή σε κάμψη, γεγονός που τους επιτρέπει να μεταφέρουν τις τάσεις από τα φορτία των τροχών σε ευρύτερη επιφάνεια κάτω από αυτά. Σε αντίθεση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία αποτελούνται από πολλές στρώσεις υλικών, τα άκαμπτα τοποθετούνται είτε απευθείας πάνω στο κατάλληλα προετοιμασμένο υπέδαφος είτε επάνω σε μία μόνο στρώση σταθεροποιημένου ή κοκκώδους υλικού. Η ενδιάμεση αυτή στρώση, λόγω της απλότητας της κατασκευής, μπορεί να χαρακτηριστεί ως βάση ή υποβάση.

Η πλάκα από σκυρόδεμα (Εικόνα 2-4) λειτουργεί ταυτόχρονα ως επιφανειακή στρώση κυκλοφορίας αλλά και ως φέρουσα βάση, γεγονός που εξηγεί γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις η κατασκευή του δύσκαμπτου οδοστρώματος περιλαμβάνει μόνο την πλάκα και, ενδεχομένως, μία επιπλέον στρώση βάσης ή υποβάσης. Τα οδοστρώματα αυτού του τύπου, που κατασκευάζονται κυρίως από τσιμεντοσκυρόδεμα τύπου Portland, ενδέχεται να

περιλαμβάνουν ή όχι ενδιάμεση στρώση μεταξύ πλάκας και υπεδάφους. Κατά γενικό κανόνα, όταν γίνεται αναφορά στο «οδοστρώμα», εννοείται η πλάκα σκυροδέματος, ανεξάρτητα από την ύπαρξη βάσης.

Λόγω της υψηλής δυσκαμψίας και του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος, η κατανομή του φορτίου γίνεται σε σχετικά εκτεταμένη περιοχή, με αποτέλεσμα η κύρια φέρουσα ικανότητα να αποδίδεται στο ίδιο το σκυρόδεμα.



Εικόνα 2-4: Μεταφορά φορτίων σε δύσκαμπτα οδοστρώματα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων και βαρέων οχημάτων όπως σε χώρους στάθμευσης, αεροδρόμια (Εικόνα 2-5) κλπ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να καταπονηθούν από έντονες φορτίσεις χωρίς να αναπτύξουν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις.



Εικόνα 2-5: Εφαρμογή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε αεροδρόμιο[3].

2.4 Ημι-άκαμπτα (ημι-εύκαμπτα) οδοστρώματα

Τα ημι-άκαμπτα οδοστρώματα αποτελούν παραλλαγή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και διαφοροποιούνται ως προς τα υλικά της στρώσης βάσης και υπόβασης. Στην περίπτωση των ημι-άκαμπτων οδοστρωμάτων η στρώση βάσης είναι από κατεργασμένα θραυστά αμμοχάλικα (ΚΘΑ). Η στρώση υπόβασης μπορεί να αποτελείται είτε από ασύνδετα αμμοχάλικα είτε από κατεργασμένα θραυστά αμμοχάλικα. Αυτός ο τύπος οδοστρώματος διαθέτει ταυτόχρονα έναν βαθμό ευκαμψίας, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ασφαλτικών στρώσεων, και έναν βαθμό ακαμψίας, ο οποίος εξαρτάται από τις ιδιότητες των κατεργασμένων στρώσεων.

Τα οδοστρώματα αυτά κατασκευάζονται σε περιπτώσεις υψηλών κυκλοφοριακών φορτίων όπου η κατασκευή εύκαμπτου οδοστρώματος θα απαιτούσε μεγάλη πάχη ασφαλτικών στρώσεων.

2.5 Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων

Ο σχεδιασμός (διαστασιολόγηση ή μελέτη) ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει τον καθορισμό του τύπου του οδοστρώματος, των υλικών και των παχών των επιμέρους στρώσεων για δεδομένη κυκλοφορία και κλιματολογικές συνθήκες, έτσι ώστε το οδοστρώμα να μπορεί να εξυπηρετήσει την προβλεπόμενη κυκλοφορία για την περίοδο σχεδιασμού. Για τον υπολογισμό λοιπόν των οδοστρωμάτων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις ιδιότητες των υλικών οδοστρωσίας και των εδαφικών υλικών πάνω στα οποία θα εδρασθεί το οδοστρώμα.

Για την ανάλυση και τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται αναλυτικές και ημι-αναλυτικές μέθοδοι:

- **Αναλυτικές μέθοδοι:** Υπολογίζονται με ακρίβεια οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος και συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τα ανώτατα επιτρεπτά όρια, ανάλογα με τα πάχη των στρώσεων που εξετάζονται.
- **Εμπειρικές μέθοδοι:** Βασίζονται σε γραφήματα και διαγράμματα, τα οποία προκύπτουν από οδικά πειράματα και παρατηρήσεις και επιτρέπουν την εκτίμηση των απαιτούμενων παχών στρώσεων.

3 Επιφανειακές Φθορές Οδοστρωμάτων

3.1 Γενικά

Οι φθορές οδοστρωμάτων αποτελούν εκδήλωση της σταδιακής υποβάθμισης της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος, η οποία οφείλεται στη συνδυασμένη δράση των κυκλοφοριακών φορτίων και των περιβαλλοντικών επιδράσεων. Η έγκαιρη αναγνώριση και κατηγοριοποίησή τους είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της κατάστασης του οδοστρώματος και τον προγραμματισμό κατάλληλων επεμβάσεων συντήρησης και αποκατάστασης.

Οι τύποι φθορών στα οδοστρώματα μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες [2]:

- Ρηγματώσεις
- Παραμορφώσεις της επιφάνειας
- Αποσαθρώσεις
- Λείανση της επιφάνειας κύλισης

3.2 Ρηγματώσεις

3.2.1 Ρωγμές τύπου αλιγάτορα

Στη ρηγμάτωση αυτού του τύπου οι ρωγμές που σχηματίζονται είναι διακλαδιζόμενες και αλληλοσυνδεδεμένες σε έναν σχηματισμό ο οποίος μοιάζει με τις φολίδες στην ράχη του αλιγάτορα (Εικόνα 3-1). Στα αρχικά στάδια κάνουν την εμφάνιση τους διαμήκεις ρωγμές οι οποίες στη συνέχεια διακλαδώνονται και ενώνονται, κάτι που οδηγεί στον τελικό τους σχηματισμό. Οι λόγοι που οδηγούν στις ρωγμές τύπου αλιγάτορα είναι οι εξής:

- Ανεπάρκεια του οδοστρώματος (μειωμένη φέρουσα ικανότητα υπεδάφους, υποδιαστασιολόγηση)
- Κόπωση εξαιτίας των κυκλοφοριακών φορτίων



Εικόνα 3-1: Ρωγμές τύπου αλιγάτορα .

Οι ρωγμές αυτού του τύπου διακρίνονται ανάλογα με την σοβαρότητα σε χαμηλής, μεσαίας και υψηλής (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Επ'πιπεδα σοβαρότητας ρωγμών τύπου αλιγάτορα.

Στην κατηγορία χαμηλής σοβαρότητας κάνουν την εμφάνισή τους διαμήκεις, μικρού μεγέθους και ασυνεχείς ρωγμές. Το πλάτος των ρωγμών φτάνει περίπου τα 2 mm. Σε αυτήν την κατηγορία δεν υπάρχει ακόμα αποφλοίωση της επιφάνειας του οδοστρώματος. Στη μεσαία κατηγορία σοβαρότητας οι ρωγμές σχηματίζουν ξεκάθαρο πλέγμα με το μοτίβο του δέρματος του αλιγάτορα. Στις άκρες της ρηγματωμένης ζώνης υπάρχουν σημεία στα οποία η επιφανειακή στρώση έχει αρχίσει να αποκολλάται. Το πλάτος των ρωγμών είναι περίπου 6 mm. Στην υψηλής σοβαρότητας κατηγορία το πλέγμα το ρωγμών έχει αναπτυχθεί πλήρως, υπάρχει αποφλοίωση των στρώσεων, ενώ μπορεί να έχουν σχηματιστεί ακόμα και λακούβες. Το πλάτος των ρωγμών κυμαίνεται από 6 mm έως 10 mm.

3.2.2 Διαμήκεις ρηγματώσεις

Οι διαμήκεις ρωγμές είναι μεγάλες ρωγμές που εκτείνονται παράλληλα προς τον άξονα του οδοστρώματος (Εικόνα 3-3).



Εικόνα 3-3: Παράδειγμα διαμήκους ρωγμής.

Μπορεί να προκληθούν από ανύψωση λόγω παγετού ή αστοχίες αρμών, από τα φορτία που δέχεται το οδόστρωμα ή από την υποδιαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Η σωστή κατανόηση της αιτίας είναι κρίσιμη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επισκευής. Από την αρχική ρωγμή μπορεί με τον καιρό να δημιουργηθούν πολλαπλές παράλληλες ρωγμές. Οι ρωγμές και σε αυτήν την κατηγορία διακρίνονται σε χαμηλής σοβαρότητας (το πλάτος των ρωγμών είναι μικρότερο ή ίσο από τα 6 mm), σε μέσης σοβαρότητας (το πλάτος της ρωγμής κυμαίνεται από 6 mm έως 19 mm) και μεγάλης σοβαρότητας όπου το πλάτος της ρωγμής είναι μεγαλύτερο από 19 mm και κατά το μήκος της εμφανίζονται αποκολλήσεις τμημάτων της ασφάλτου.

3.2.3 Εγκάρσιες ρηγματώσεις

Οι εγκάρσιες ρωγμές δημιουργούνται στο οδόστρωμα σχεδόν κάθετα με τον άξονα της οδού (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-4: Εγκάρσιες ρηγματώσεις.

Οι κυριότερες αιτίες για την εμφάνιση αυτών των ρηγματώσεων είναι η συρρίκνωση της επιφάνειας λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, η σκλήρυνση της ασφάλτου ή η εμφάνιση ρηγματώσεων των υποκείμενων στρώσεων. Ο βαθμός σοβαρότητας θεωρείται χαμηλός εάν το πλάτος της ρωγμής είναι μικρότερο από 6 mm και δεν υπάρχει καθόλου ή υπάρχει περιορισμένη αποφλοιώση των άκρων τους, μέσος βαθμός σοβαρότητας θεωρείται όταν το πλάτος της ρωγμής κυμαίνεται από 6 mm έως 19 mm, όπου μπορεί να υπάρχουν λίγα σημάδια θραύσης και μεγάλος βαθμός σοβαρότητας θεωρείται όταν οι ρωγμές έχουν πλάτος μεγαλύτερο από 19 mm και υπάρχουν αποκολλήσεις τμημάτων της ασφάλτου.

3.2.4 Ρωγμές συρρίκνωσης

Οι ρωγμές συρρίκνωσης είναι ένα σύνολο διασυνδεδεμένων ρωγμών που χωρίζουν το οδόστρωμα σε ακανόνιστα τμήματα (Εικόνα 3-5). Μερικές φορές προκαλούνται από τη διασταύρωση εγκάρσιων και διαμήκων ρωγμών.



Εικόνα 3-5: Χαρακτηριστικές ρωγμές συρρίκνωσης.

Αυτές οι ρωγμές είναι συνήθως αποτέλεσμα των καθημερινών μεταβολών της θερμοκρασίας. Η δημιουργία τους έχει σχέση με τη γήρανση του υλικού με την πάροδο του χρόνου και όχι με τον κυκλοφοριακό φόρτο. Επίσης, ενδεχομένως να είναι αποτέλεσμα της συρρίκνωσης του υπεδάφους. Στην κατηγορία χαμηλής σοβαρότητας, παρατηρούνται κυρίως λεπτές εγκάρσιες ρωγμές πλάτους έως 2 mm, χωρίς να υπάρχει παρουσία φθορών, ενώ παράλληλα οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι μεγάλες και κυμαίνονται από 3 m έως 6 m. Στη μέση κατηγορία, οι ρωγμές έχουν πλάτος περίπου 6 mm και σχηματίζουν μεγαλύτερα ορθογώνια τμήματα (τουλάχιστον 1 m²), με πιθανή εμφάνιση θραύσης, και οι παράλληλες ρωγμές απέχουν μεταξύ τους απόσταση που κυμαίνεται από 1,5 m έως 6 m. Τέλος, στην κατηγορία υψηλής

σοβαρότητας, οι ρωγμές έχουν πλάτος μεγαλύτερο από 13 mm, υπάρχει μεγάλος βαθμός θραύσης και διαμορφώνονται μικρότερα ορθογώνια ($0,2 \text{ m}^2\text{--}1 \text{ m}^2$), με πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ των παράλληλων ρωγμών (30 cm –60 cm).

3.2.5 Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος

Οι ρωγμές ακμής ξεκινούν συνήθως με σχήμα ημισελήνου στην άκρη του οδοστρώματος (Εικόνα 3-6). Με την πάροδο του χρόνου, επεκτείνονται προς το εσωτερικό και αρχίζουν να μοιάζουν με ρωγμές τύπου δέρματος αλιγάτορα.



Εικόνα 3-6: Ρωγμές στα άκρα του οδοστρώματος.

Αυτός ο τύπος ρωγμών προκαλείται κυρίως είτε λόγω υλικών χαμηλής αντοχής είτε λόγω περίσσειας υγρασίας. Όταν ο βαθμός σοβαρότητας είναι χαμηλός, οι ρωγμές μπορούν να επιδιορθωθούν με σφράγιση. Καθώς ο βαθμός σοβαρότητας αυξάνεται, ενδέχεται να απαιτούνται τοπικές επιδιορθώσεις ή αντικατάσταση των φθαρμένων περιοχών. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί η περίσσεια υγρασίας και να γίνει ανακατασκευή.

3.2.6 Ρωγμές ανάκλασης

Οι ρωγμές ανάκλασης εμφανίζονται στην επιφάνεια των ασφαλτικών στρώσεων, ακολουθώντας τη θέση των αρμών του υποκείμενου σκυροδέματος (Εικόνα 3-7). Σε εύκαμπτα οδοστρώματα, ενδέχεται να προκύψουν λόγω μετακινήσεων ή παραμορφώσεων του εδάφους, καθώς και από ανωμαλίες στο οδόστρωμα, όπως φρεάτια.



Εικόνα 3-7: Ρωγμές ανάκλασης.

Οι κατηγορίες σοβαρότητας των ρωγμών αυτών είναι ομοίως με προηγουμένως οι εξής:

- Χαμηλή κατηγορία: ρωγμές με πλάτος από 2 mm έως 6 mm, χωρίς σημαντική θραύση
- Μέση κατηγορία: το πλάτος κυμαίνεται μεταξύ 10 mm και 13 mm, με εμφανή φθορά
- Υψηλή κατηγορία: ρωγμές τουλάχιστον 13 mm, συνοδευόμενες από εκτεταμένο βαθμό θραύσης

3.2.7 Ρωγμές ολίσθησης

Αυτού του είδους οι ρωγμές σχηματίζονται όταν το ανώτερο στρώμα του οδοστρώματος μετατοπίζεται ως προς το υποκείμενο, εξαιτίας ανεπαρκούς συνοχής μεταξύ των στρώσεων (Εικόνα 3-8).



Εικόνα 3-8: Ρωγμές από ολίσθηση ταπήτων.

Κύριες αιτίες περιλαμβάνουν ελλιπή εφαρμογή συγκολλητικής επάλειψης ή ανεπαρκή καθαρισμό της επιφάνειας πριν την κατασκευή. Σπανιότερα, το πρόβλημα σχετίζεται με υπερβολική παρουσία λεπτόκοκκων υλικών στο μίγμα ή κακή συμπύκνωση της επιφανειακής στρώσης, γεγονός που εμποδίζει την αποτελεσματική σύνδεσή της με το υπόστρωμα. Στην περίπτωση χαμηλής σοβαρότητας, οι ρωγμές έχουν πλάτος έως 1 cm και δεν συνοδεύονται από σημαντικές βλάβες. Όταν το πλάτος κυμαίνεται μεταξύ 1cm και 2 cm, η σοβαρότητα θεωρείται μέτρια, ενώ ρωγμές που ξεπερνούν τα 2,5 cm χαρακτηρίζονται ως υψηλής σοβαρότητας και συχνά συνοδεύονται από αποκόλληση τμημάτων του οδοστρώματος.

3.2.8 Ελικοειδείς ρωγμές

Πρόκειται για μη διακλαδιζόμενες ρωγμές που αναπτύσσονται κατά μήκος του οδοστρώματος, χωρίς να εντοπίζονται σε συγκεκριμένα σημεία (Εικόνα 3-9).



Εικόνα 3-9: Ελικοειδείς ρωγμές.

Αποδίδονται κυρίως στη κόπωση του υλικού και στις επιδράσεις του παγετού. Τέτοιοι τύποι ρωγμών παρατηρούνται συχνότερα σε δύσκαμπτα οδοστρώματα, ιδιαίτερα στην περιοχή των αρμών. Η σοβαρότητα των ρωγμών αξιολογείται με βάση το άνοιγμά τους: όταν αυτό δεν υπερβαίνει το 1 cm, η φθορά θεωρείται ήπια. Στην περίπτωση που κυμαίνεται από 1 cm έως 2 cm, γίνεται λόγος για μέτριο επίπεδο φθοράς, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες ρωγμές και τέλος όταν το άνοιγμα ξεπερνά τα 2 cm και συνοδεύεται από αρχική αποκόλληση τμημάτων του υλικού, η φθορά χαρακτηρίζεται ως σοβαρή.

3.3 Παραμορφώσεις της επιφάνειας

3.3.1 Κατά μήκος αυλακώσεις

Πρόκειται για αυλακώσεις που σχηματίζονται κατά μήκος της τροχιάς των τροχών (Εικόνα 3-10).



Εικόνα 3-10: Κατά μήκος αυλακώσεις.

Σε προχωρημένο επίπεδο σοβαρότητας, παρατηρείται συσσώρευση νερού στις αυλακώσεις. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί συνήθως ένδειξη αστοχίας σε ένα ή περισσότερα στρώματα του οδοστρώματος. Το πλάτος της αυλάκωσης μπορεί να υποδείξει την στρώση από την οποία προέρχεται η φθορά. Μία αυλάκωση μικρού πλάτους είναι συνήθως ένδειξη επιφανειακής αστοχίας, ενώ μια αυλάκωση μεγαλύτερου πλάτους παραπέμπει σε πρόβλημα στη στρώση έδρασης. Μικρές επιφανειακές αυλακώσεις μπορούν να αποκατασταθούν με μικροεπιφανειακή στρώση ή άλλες παρόμοιες τεχνικές. Σε βαθύτερες αυλακώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί στρώση εξομάλυνσης και κατόπιν επικάλυψη με νέα στρώση. Αν το πρόβλημα οφείλεται σε αστάθεια της ασφάλτου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, η ανακύκλωση της επιφάνειας αποτελεί πιθανώς την πιο ενδεδειγμένη λύση. Όταν η αιτία εντοπίζεται στη στρώση έδρασης, τότε απαιτείται ανακατασκευή ή πλήρης αποκατάσταση του οδοστρώματος.

3.3.2 Κατά πλάτος αυλακώσεις- κυματώσεις

Πρόκειται για τοπικά εξογκώματα που εμφανίζονται κάθετα στον άξονα της οδού και παρατηρούνται σε σημεία όπου αναπτύσσονται έντονες διατμητικές τάσεις, όπως σε διασταυρώσεις, στάσεις λεωφορείων, σηματοδοτούμενες διαβάσεις, ανωφέρειες, κατωφέρειες και κυκλικούς κόμβους (Εικόνα 3-11).



Εικόνα 3-11: Κατά πλάτος αυλακώσεις- κυματώσεις.

Όταν αυτές οι παραμορφώσεις έχουν περιορισμένη έκταση, χαρακτηρίζονται ως ωθήσεις, ενώ όταν εκτείνονται σε όλο το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας, πρόκειται για κυματώσεις, οι οποίες αποδίδονται σε ανεπαρκή ευστάθεια του ασφαλτομίγματος. Παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτήν την αστάθεια περιλαμβάνουν τη χρήση μαλακής ασφάλτου, υπερβολική περιεκτικότητα σε άσφαλτο ή λεπτόκοκκα υλικά έναντι χονδρόκοκκων, καθώς και η παρουσία φυσικών αδρανών με αργιλώδεις προσμίξεις. Ο βαθμός σοβαρότητας αυτών των εξογκωμάτων αξιολογείται με βάση τη μέγιστη κατακόρυφη απόκλιση σε απόσταση τριών μέτρων. Όταν η απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 0,3 cm και 5 cm η επίδραση στον έλεγχο του οχήματος είναι ελάχιστη και η αίσθηση τινάγματος ήπια. Σε αποκλίσεις από 5 cm έως 10 cm, ο έλεγχος του οχήματος δυσχεραίνεται και το τινάγμα γίνεται πιο αισθητό, ενώ σε περιπτώσεις που η κατακόρυφη απόκλιση ξεπερνά τα 10 cm, παρατηρείται σοβαρή απώλεια ελέγχου και έντονη ενόχληση για τον οδηγό.

3.3.3 Κοιλώματα και κυρτώματα του οδοστρώματος

Εμφανίζονται ως βαθουλώματα ή εξογκώματα και συνδέονται με φαινόμενα καθίζησης ή μετακίνησης του εδάφους (Εικόνα 3-12).



Βαθούλωμα

Κύρτωμα

Εικόνα 3-12: Κοιλώματα και κυρτώματα οδοστρώματος.

Τέτοια φαινόμενα μπορεί να προκύψουν είτε από διόγκωση του υπεδάφους είτε από εξωτερικούς παράγοντες, όπως είναι για παράδειγμα η ανάπτυξη των ριζών των δέντρων. Η σοβαρότητα της παραμόρφωσης αξιολογείται με βάση τη μέγιστη κατακόρυφη απόκλιση σε απόσταση τριών μέτρων. Όταν η απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ 0,3 cm και 5 cm, το πρόβλημα θεωρείται χαμηλής σοβαρότητας, αποκλίσεις από 5 cm έως 10 cm κατατάσσονται ως μέτριας σοβαρότητας, ενώ μεγαλύτερες από 10 cm υποδηλώνουν σημαντική βλάβη. Παράλληλα, η αξιολόγηση της έκτασης της φθοράς γίνεται ως ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτει ανά λωρίδα κυκλοφορίας. Όταν η έκταση της φθοράς καλύπτει λιγότερο από το 9% της επιφάνειας, αυτή θεωρείται περιορισμένη, ενώ ποσοστά μεταξύ 10% και 24% υποδεικνύουν μέτριας έκτασης βλάβη. Σε περιπτώσεις όπου η φθορά επεκτείνεται πέραν του 25% της επιφάνειας της λωρίδας, χαρακτηρίζεται ως εκτεταμένη.

3.3.4 Τοπικές επισκευές- Μπαλώματα

Ένα μάλωμα ορίζεται ως τμήμα του οδοστρώματος που έχει αφαιρεθεί και αντικατασταθεί (Εικόνα 3-13).



Εικόνα 3-13: Μπαλώματα.

Τα μπαλώματα χρησιμοποιούνται συνήθως για την αποκατάσταση βλαβών ή για την κάλυψη τομών στο οδόστρωμα που πραγματοποιήθηκαν λόγω εργασιών. Η αστοχία ενός μπαλώματος μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη φθορά του οδοστρώματος. Πολλές φορές το μάλωμα δεν θεωρείται ως είδος φθοράς και αυτό ενδεχομένως ισχύει στην περίπτωση ποιοτικών, ημιμόνιμων επεμβάσεων. Αντίθετα, το πρόχειρο μάλωμα λειτουργεί απλώς ως κάλυψη και δεν αντιμετωπίζει την αιτία του προβλήματος και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως είδος φθοράς. Για τη σωστή αποκατάσταση, απαιτείται εφαρμογή ημιμόνιμου μπαλώματος. Όταν υπάρχουν εκτεταμένες λακκούβες, ενδέχεται να χρειάζεται ευρύτερη επισκευή της περιοχής ή

και πλήρης αποκατάσταση. Η ανακατασκευή του οδοστρώματος είναι απαραίτητη μόνο όταν η αιτία της φθοράς εντοπίζεται στη βάση του.

3.4 Αποσαθρώσεις

3.4.1 Γήρανση οδοστρώματος και αποκόλληση αδρανών

Με την πάροδο του χρόνου, το οδόστρωμα σταδιακά χάνει την αρχική λεία υφή του και αποκτά μια πιο τραχιά και πορώδη επιφάνεια, γεγονός που σχετίζεται κυρίως με την οξείδωση της ασφάλτου. Η διαδικασία αυτή καθιστά την ασφάλτο πιο σκληρή και ιξώδη, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τη γήρανση του υλικού και προκαλεί την αποκόλληση των αδρανών από την επιφάνεια (Εικόνα 3-14). Η φθορά αυτού του τύπου, γνωστή ως αποκόλληση αδρανών, χαρακτηρίζεται από την απομάκρυνση κόκκων του ασφαλτομίγματος, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τραχείας και ανώμαλης υφής στην επιφάνεια του οδοστρώματος.



Εικόνα 3-14: Αποκόλληση αδρανών.

Αν και η γήρανση είναι καθοριστικός παράγοντας, υπάρχουν και άλλες αιτίες που συμβάλλουν στην εκδήλωση της φθοράς, όπως η χαμηλή περιεκτικότητα σε ασφάλτο, η χρήση ακατάλληλων ή μη καθαρών αδρανών (όπως αυτά που περιέχουν άργιλο), οι χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη διάστρωση, η υπερθέρμανση του ασφαλτομίγματος που το καθιστά εύθραυστο, καθώς και η ανεπαρκής συμπίκνωση, ειδικά σε ψυχρά μίγματα. Η σοβαρότητα της φθοράς εκτιμάται βάσει της κατάστασης της επιφάνειας. Η φθορά θεωρείται χαμηλής σοβαρότητας όταν εμφανίζονται τα πρώτα σημάδια τραχύτητας, μέτριας όταν η επιφάνεια γίνεται πιο τραχιά και ανώμαλη, με πιθανή αποκόλληση τμημάτων και παρουσία λεπτόκοκκου υλικού και υψηλής όταν η φθορά είναι εκτεταμένη, με έντονα ανώμαλη υφή και απομάκρυνση ακόμη και μεγάλων κόκκων, σε βαθμό που δημιουργούνται μικρές λακούβες. Η έκταση της βλάβης εκτιμάται με βάση την περιοχή που επηρεάζεται. Όταν οι αποκολλήσεις

είναι περιορισμένες και εμφανίζονται σποραδικά στις τροχιές των οχημάτων, θεωρείται ήπια φθορά, ενώ όταν καλύπτουν μεγάλο μέρος των τροχοσυλακώσεων, η έκταση της βλάβης χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Στις περιπτώσεις που η φθορά εκτείνεται σε ολόκληρη τη λωρίδα κυκλοφορίας, θεωρείται σοβαρή.

3.4.2 Λακκούβες

Οι λακκούβες είναι οπές σε μορφής λεκάνης που σχηματίζονται στο οδόστρωμα (Εικόνα...). Οι βροχοπτώσεις και τα φορτία κυκλοφορίας αποτελούν δύο πολύ σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι οδηγούν στην περεταίρω ανάπτυξή τους.



Εικόνα 3-15: Λακκούβες.

Κάποιες πιθανές αιτίες οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία τους είναι οι εξής:

- ανεπαρκή περιεκτικότητα του ασφαλτικού μίγματος σε άσφαλτο
- ελλιπές πάχος της ασφαλτικής στρώσης
- τοπικές αστοχίες στη στρώση βάσης ή και υπόβασης του οδοστρώματος
- προβλήματα σε υπόγεια δίκτυα ύδρευσης
- ανεπαρκή απορροή ομβρίων υδάτων

3.5 Λείανση επιφάνειας κύλισης

3.5.1 Εξίδρωση οδοστρώματος - ανάδυση ασφάλτου

Πρόκειται για εμφάνιση ασφαλτικού υλικού στην επιφάνεια του οδοστρώματος λόγω υπερβολικής ποσότητας (Εικόνα 3-16).



Εικόνα 3-16: Εξίδρωση οδοστρώματος- ανάδυση ασφαλτικού υλικού.

Η επιφάνεια του οδοστρώματος αποκτά γυαλιστερή, σχεδόν καθρεπτιζόμενη όψη και σε υψηλές θερμοκρασίες γίνεται κολλώδης στην αφή. Ο βαθμός σοβαρότητας μπορεί να είναι χαμηλός, μέσος ή υψηλός ανάλογα με το πόσο μεγάλη σε έκταση είναι η επιφάνεια που καλύπτεται από πλεονάζουσες ποσότητες ασφάλτου.

3.5.2 Λείανση αδρανών

Πρόκειται για την εμφάνιση λείων και ολισθηρών επιφανειών στο οδόστρωμα, αποτέλεσμα της συνεχούς κυκλοφορίας οχημάτων. Το φαινόμενο αποδίδεται κυρίως:

- στη χρήση αδρανών υλικών χαμηλής σκληρότητας
- στη διείδυση των χονδρόκοκκων αδρανών στα βαθύτερα στρώματα της ασφάλτου

Ο βαθμός σοβαρότητας μπορεί να είναι χαμηλός, μέσος ή υψηλός ανάλογα με την έκταση της επιφάνειας που έχει λειανθεί.

4 Βιωσιμότητα Οδοστρωμάτων

4.1 Η βιωσιμότητα στα διάφορα στάδια των έργων των οδοστρωμάτων

Η έννοια της βιωσιμότητας συνδέεται με το τρίπτυχο των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών αναγκών και αφορά πολλούς οικονομικούς τομείς, ανάμεσα στους οποίους είναι και ο τομέας των μεταφορών. Το 2017, το 22% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ προήλθαν από τον τομέα των μεταφορών, ενώ ειδικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις μεταφορές ήταν αυξημένες κατά 2,2% σε σύγκριση με το 2016.

Οι μεταφορές απαιτούν συγκοινωνιακές υποδομές, σημαντικό μέρος των οποίων είναι τα οδοστρώματα, των οποίων η κατασκευή, η ανακατασκευή και η συντήρηση απαιτεί κατανάλωση ενέργειας και υλικών, καθώς και διάθεση μεγάλων οικονομικών κεφαλαίων. Δεδομένων τούτων, προωθείται η έννοια της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων, προκειμένου να αποτραπούν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και προωθούνται πιο συμφέρουσες οικονομικά λύσεις.

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές ωφέλειες που προκύπτουν από την κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων. Η έννοια της βιωσιμότητας είναι αρκετά ευρεία, και η προσέγγιση που ακολουθείται δεν μπορεί να είναι γενικευμένη αλλά προσαρμοσμένη σε κάθε οδόστρωμα.



Εικόνα 4-1: Ωφέλειες από την κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων (Λοΐζος & Γεωργιάλη, 2022)

Ο κύκλος ζωής του οδοστρώματος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την περιγραφή των σταδίων από τη φάση του αρχικού σχεδιασμού έως και το τέλος της ωφέλιμης ζωής του (Εικόνα 4-2).



Εικόνα 4-2: Στάδια κύκλου ζωής οδοστρωμάτων.

Οι βέλτιστες πρακτικές βιωσιμότητας μπορούν να εφαρμοστούν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος, όπως παρατίθενται παρακάτω:.

- **Παραγωγή Υλικών:** Περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες συλλογή των υλικών (π.χ. εξόρυξη ορυκτών και πετρελαίου), την μεταφορά και την επεξεργασία τους (π.χ. διύλιση, κατασκευή και ανάμειξη) καθώς και τις εγκαταστάσεις παραγωγής.
- **Σχεδιασμός:** Αναφέρεται στον προσδιορισμό των δομικών και λειτουργικών απαιτήσεων του οδοστρώματος για συγκεκριμένες συνθήκες (υπόστρωμα, κλίμα, κυκλοφορία, υφιστάμενη κατασκευή κ.λπ.) και στον καθορισμό της σύνθεσης του οδοστρώματος και των σχετικών υλικών.
- **Κατασκευή:** Περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες και τον εξοπλισμό που σχετίζονται με την αρχική κατασκευή του οδοστρώματος.
- **Φάση Χρήσης:** Αφορά τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος (δομικά και λειτουργικά) που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας, καθώς και τον περιβάλλοντα χώρο (εκπομπές ρύπων, θόρυβο, θερμική χωρητικότητα / αγωγιμότητα, ηλιακή απορρόφηση)..
- **Συντήρηση/Αποκατάσταση:** Αφορά μεθόδους που εφαρμόζονται σε διάφορες χρονικές στιγμές για τη διατήρηση / επαναφορά της λειτουργικότητας του οδοστρώματος σε αποδεκτά επίπεδα.

- **Τέλος Κύκλου Ζωής:** Η φάση τελικής διάθεσης και ενδεχόμενης επαναχρησιμοποίησης, επεξεργασίας ή ανακύκλωσης του οδοστρώματος.

Στο στάδιο της παραγωγής υλικών, η βιωσιμότητα ενισχύεται μέσω της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών και βιομηχανικών υποπροϊόντων, όπως σκωρίες και ανακυκλωμένο σκυρόδεμα ή ανακτώμενο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP), καθώς και με την εφαρμογή μεθόδων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού, λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η ανθεκτικότητα των δομικών στρώσεων, η επιλογή υλικών με μακρά διάρκεια ζωής και η δυνατότητα εύκολης και αποτελεσματικής συντήρησης, με στόχο τη μείωση της συχνότητας επεμβάσεων και της συνολικής κατανάλωσης φυσικών πόρων.

Κατά την κατασκευή, η βιωσιμότητα προωθείται μέσω τεχνικών χαμηλής ενεργειακής απαίτησης, του περιορισμού των αποβλήτων, της επαναχρησιμοποίησης υλικών επί τόπου και της ελαχιστοποίησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο στάδιο της λειτουργίας, το οδόστρωμα σχεδιάζεται ώστε να παρουσιάζει περιορισμένες παραμορφώσεις, να εξασφαλίζει ομαλή κυκλοφορία και χαμηλή αντίσταση κύλισης, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων και των εκπομπών ρύπων.

Η προστασία, συντήρηση και αποκατάσταση περιλαμβάνει περιοδικές και στοχευμένες επεμβάσεις, όπως επιφανειακές σφραγίσεις, τοπικές ανακατασκευές ή τη χρήση επαναχρησιμοποιούμενων ασφαλτικών υλικών, με σκοπό την παράταση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος με ελάχιστη κατανάλωση υλικών και ενέργειας. Τέλος, στο στάδιο του τέλους ζωής, η βιωσιμότητα διασφαλίζεται μέσω της ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών του οδοστρώματος σε νέες κατασκευές, μειώνοντας σημαντικά την παραγωγή αποβλήτων και την ανάγκη εξόρυξης νέων πρώτων υλών.

Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζονται ενδεικτικά δείκτες βιωσιμότητας οι οποίοι αξιοποιούνται σε έργα υποδομών.

Πίνακας 4-1 Δείκτες βιωσιμότητας ομαδοποιημένοι στις τρεις διαστάσεις

Διάσταση βιωσιμότητας	Ενδεικτικοί δείκτες	Πηγή
Οικονομική βιωσιμότητα	Οικονομική αποδοτικότητα · Αρχικό κόστος · Κόστος κύκλου ζωής · Κεφαλαιουχικό, λειτουργικό και κόστος συντήρησης · Προϋπολογισμός έργου · Οφέλη κύκλου ζωής · Οικονομικός κίνδυνος · Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης · Περίοδος απόσβεσης · Ελκυστικότητα για επιχειρήσεις · Ανάλυση προσφοράς και ζήτησης στην αγορά	[19]
Κοινωνική βιωσιμότητα	Δημόσια ασφάλεια · Επιπτώσεις στην τοπική ανάπτυξη · Κλίμακα εξυπηρεσιμότητας μεταφορών · Χιλιόμετρα επιβατών · Μήκος κύριων οδών · Έκθεση κατοίκων σε κυκλοφοριακό θόρυβο · Παράπονα τοπικών φορέων · Παροχή υποστηρικτικών υποδομών (π.χ. δημόσια υγιεινή) · Υγεία · Κοινότητα	[19]
Περιβαλλοντική βιωσιμότητα	Κατανάλωση ενέργειας και νερού · Κατά κεφαλήν χρήση ενέργειας μεταφορών · Εκπομπές CO ₂ · Ποιότητα αέρα · Ποιότητα και ποσότητα νερού · Ρύπανση και ποιότητα εδάφους · Διάβρωση · Χρήση δομικών υλικών · Απόβλητα · Οικοσύστημα · Απώλεια οικοτόπων · Εισβολή σε ευαίσθητες περιοχές · Μέτρα περιβαλλοντικής προστασίας · Εξοικονόμηση ενέργειας	[21]

Στο πλαίσιο των οδοστρωμάτων, οι δείκτες βιωσιμότητας του Πίνακα 4-1 οργανώνονται σύμφωνα με το μοντέλο του τριπλού πυλώνα βιωσιμότητας και προσαρμόζονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων. Η οικονομική βιωσιμότητα σχετίζεται κυρίως με το αρχικό κόστος κατασκευής, τη συχνότητα και το είδος των επεμβάσεων συντήρησης, καθώς και τη διάρκεια λειτουργικής και δομικής ζωής του οδοστρώματος. Η κοινωνική βιωσιμότητα αποτυπώνεται μέσω δεικτών που αφορούν την οδική ασφάλεια, την άνεση και ομαλότητα κύλισης, την προσβασιμότητα και την αξιοπιστία του δικτύου, καθώς και τις επιπτώσεις των εργασιών συντήρησης στους χρήστες και τις τοπικές κοινωνίες, όπως κυκλοφοριακές καθυστερήσεις, θόρυβος και κοινωνική αποδοχή. Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα συνδέεται με την κατανάλωση πρώτων υλών και ενέργειας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών (π.χ. RAP), καθώς και με λειτουργικούς δείκτες όπως η αντίσταση κύλισης και η μόνιμη

παραμόρφωση, οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές των οχημάτων. Η ταυτόχρονη αξιολόγηση των παραπάνω διαστάσεων επιτρέπει τον ολοκληρωμένο και βιώσιμο σχεδιασμό οδοστρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνικές απαιτήσεις απόδοσης όσο και τις μακροπρόθεσμες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων επικεντρώνεται στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost Analysis – LCCA), η οποία αποτελεί βασικό εργαλείο για την οικονομικά αποδοτική και τεχνικά τεκμηριωμένη επιλογή λύσεων σχεδιασμού. Η οικονομική διάσταση της βιωσιμότητας αποτιμάται μέσω του αρχικού κόστους κατασκευής, των δαπανών συντήρησης και αποκατάστασης, του κόστους διαχείρισης της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια των επεμβάσεων, καθώς και της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του οδοστρώματος. Η LCCA επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών δομικών λύσεων σε ενιαίο χρονικό ορίζοντα, λαμβάνοντας υπόψη τον χρονισμό και τη συχνότητα των επεμβάσεων συντήρησης

4.2 Ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) αποτελεί μία συστηματική μεθοδολογία για την ανάλυση και ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, συστήματος ή διαδικασίας. Η LCA παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την αξιολόγηση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, εξετάζοντας το σύνολο των εισροών και εκροών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής— από την εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών έως το τέλος ζωής και τη διαχείριση των αποβλήτων [10]. Μέσω αυτής της προσέγγισης είναι δυνατός ο εντοπισμός των σταδίων με τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς και η ανάδειξη δυνατοτήτων ουσιαστικής βελτίωσης, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη πιθανούς περιβαλλοντικούς συμβιβασμούς μεταξύ εναλλακτικών επιλογών.

Οι βασικές αρχές, διαδικασίες και απαιτήσεις για τη διεξαγωγή μιας LCA καθορίζονται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) μέσω της οικογένειας προτύπων ISO 14040 και ISO 14044 (ISO 2006). Ωστόσο, τα πρότυπα αυτά έχουν γενικό χαρακτήρα και για την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένα υλικά ή διεργασίες απαιτούνται εξειδικευμένες κατευθυντήριες γραμμές. Οι οδηγίες αυτές αναπτύσσονται συνήθως από βιομηχανικούς φορείς, ερευνητικά ιδρύματα και οργανισμούς τυποποίησης, ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.. Παρά το γεγονός ότι η LCA αποτελεί

έναν επιστημονικό κλάδο σε συνεχή εξέλιξη, έχει αποδείξει την πρακτική της αξία τις τελευταίες δεκαετίες, υποστηρίζοντας κατασκευαστές, επιχειρήσεις και δημόσιους φορείς στον εντοπισμό κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, ολοένα και περισσότερες βιομηχανίες αναπτύσσουν Δηλώσεις Περιβαλλοντικών Προϊόντων (Environmental Product Declarations – EPD), οι οποίες βασίζονται σε αποτελέσματα LCA και τεκμηριώνουν με τυποποιημένο τρόπο την περιβαλλοντική απόδοση των προϊόντων. Η αυξανόμενη χρήση των EPD καθιστά αναγκαία την εναρμόνιση των μεθοδολογικών πρακτικών, ιδίως στον τομέα των κατασκευών και των υποδομών.

Η πρώτη εφαρμογή της LCA σε έργα οδοστρωμάτων εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1990. Σήμερα, η μεθοδολογία χρησιμοποιείται ευρέως στον ευρωπαϊκό κατασκευαστικό τομέα, ενώ σε ορισμένες χώρες, όπως η Γαλλία και η Ολλανδία, έχει ενσωματωθεί στη νομοθεσία που διέπει την πράσινη κατασκευή οδικών έργων και λοιπών υποδομών. Αντίθετα, στη Βόρεια Αμερική η χρήση της LCA ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων άρχισε να αναπτύσσεται συστηματικά μόλις την τελευταία πενταετία..

4.3 Ανάλυση Κύκλου Κόστους Ζωής (LCCA)

Μία μεθοδολογία στενά συνδεδεμένη με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost Analysis –LCCA), η οποία αποσκοπεί στην εκτίμηση του συνολικού κόστους που σχετίζεται με την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση ενός προϊόντος ή έργου καθ' όλη τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του. Η LCCA χρησιμοποιείται ευρέως στον σχεδιασμό έργων υποδομής και, ειδικότερα, στα οδικά έργα, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων με βάση τη μακροπρόθεσμη οικονομική τους απόδοση.

Η διαδικασία της LCCA ξεκινά με τον καθορισμό διαφορετικών σεναρίων ή εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού που μπορούν να ικανοποιήσουν τις δομικές και λειτουργικές απαιτήσεις του έργου. Για κάθε εναλλακτική λύση προσδιορίζεται το χρονοδιάγραμμα των αρχικών και μελλοντικών δραστηριοτήτων, όπως η κατασκευή, η συντήρηση και η αποκατάσταση, και εκτιμώνται τα αντίστοιχα κόστη. Η ανάλυση δεν περιορίζεται μόνο στα άμεσα κόστη, όπως τα έξοδα κατασκευής και συντήρησης, αλλά περιλαμβάνει και λειτουργικά κόστη που επηρεάζουν τους χρήστες του έργου..

Αφού συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία, εφαρμόζονται οικονομικές τεχνικές, όπως η αναγωγή των μελλοντικών δαπανών σε παρούσα αξία, προκειμένου να καταστεί δυνατή η

άμεση σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων. Τα συνολικά ανηγμένα κόστη συγκρίνονται ώστε να προσδιοριστεί η οικονομικά αποδοτικότερη επιλογή.

Ωστόσο, η λύση με το χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής δεν αποτελεί πάντα την τελική επιλογή, καθώς στη διαδικασία λήψης αποφάσεων συνεκτιμώνται και άλλοι παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα πόρων, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, οι κοινωνικές επιπτώσεις και οι στρατηγικοί στόχοι του έργου. Παρά ταύτα, η LCCA αποτελεί ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο και χρήσιμο εργαλείο για την υποστήριξη τεκμηριωμένων, διαφανών και αποτελεσματικών αποφάσεων στον σχεδιασμό και τη διαχείριση οδικών υποδομών.

Στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής ενός οδικού έργου λαμβάνονται συνήθως υπόψη οι ακόλουθες κατηγορίες δαπανών:

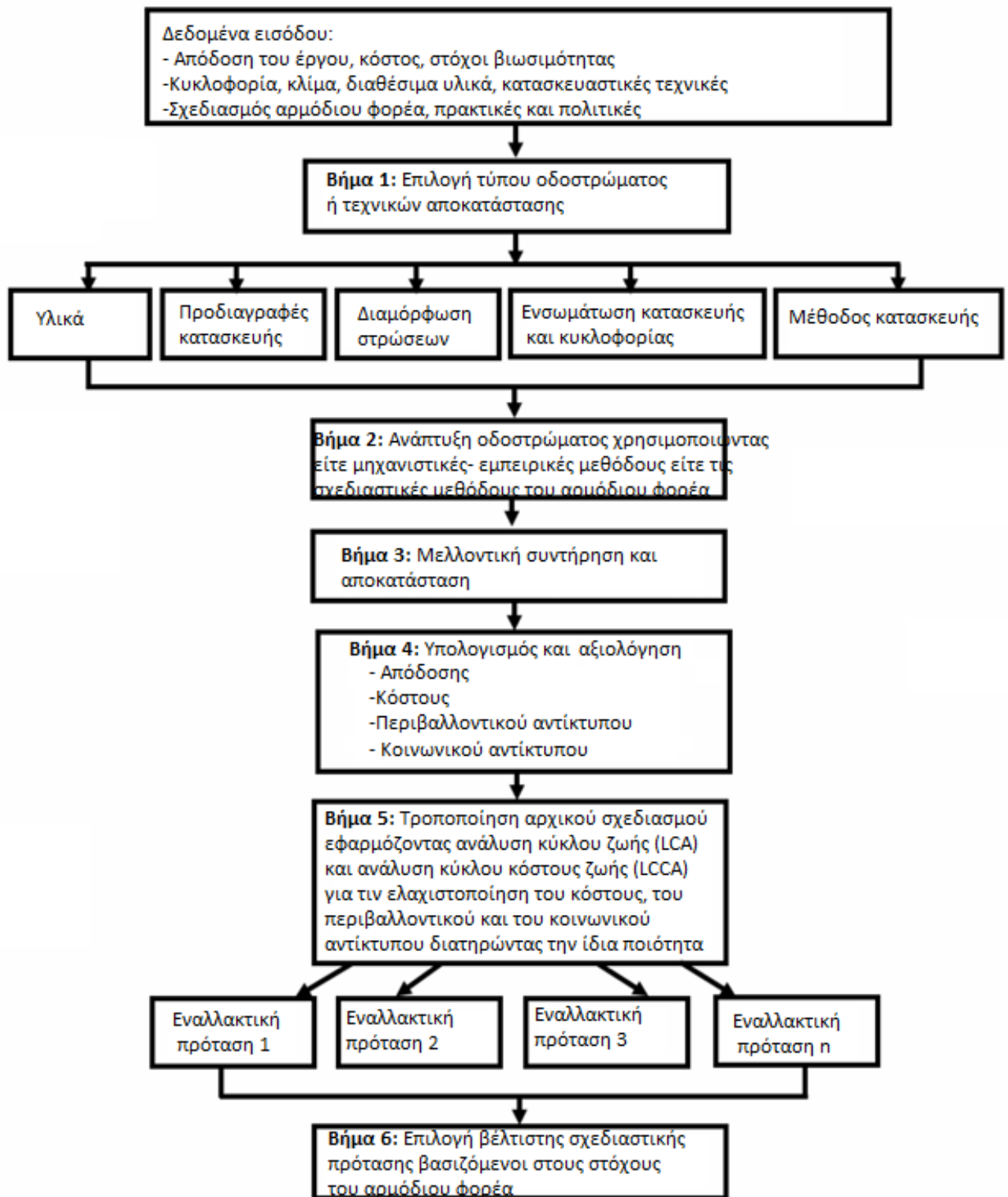
- Κόστη φορέα, τα οποία περιλαμβάνουν τις δαπάνες για το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση της οδού, είτε αυτή είναι προληπτική είτε αποκατάστασης.
- Κόστη χρήστη, όπως τα έξοδα λειτουργίας των οχημάτων (καύσιμα, φθορές, συντήρηση), οι καθυστερήσεις λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης ή εκτροπών της κυκλοφορίας, καθώς και οι επιπτώσεις που σχετίζονται με τροχαία ατυχήματα.
- Λοιπά κόστη, τα οποία αφορούν περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες, όπως οι εκπομπές ρύπων, ο θόρυβος, η απώλεια γης, η κατανάλωση φυσικών πόρων, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών, και η διατάραξη του φυσικού περιβάλλοντος
- Αρνητικά κόστη (οφέλη), τα οποία λειτουργούν ως οικονομικό όφελος και περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την υπολειμματική αξία της οδού στο τέλος της οικονομικής της ζωής ή την υπολειπόμενη περίοδο λειτουργικής εξυπηρέτησης.

Τα βασικά βήματα που απαιτούνται για την διεξαγωγή μίας ολοκληρωμένης LCCA σε έργα οδοστρωμάτων συνοψίζονται ως εξής:

- Καθορισμός των λειτουργικών και δομικών απαιτήσεων του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας ζωής σχεδιασμού, των επιπέδων εξυπηρέτησης και τυχόν τεχνικών ή κανονιστικών περιορισμών, λαμβάνοντας υπόψη και τους στόχους βιωσιμότητας του έργου.
- Συλλογή βασικών στοιχείων σχεδιασμού, όπως οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, τα προβλεπόμενα φορτία κυκλοφορίας και οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης..

- Επιλογή τύπου οδοστρώματος και συναφών υλικών, καθορισμός του πάχους των στρώσεων και των προδιαγραφών κατασκευής, με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής δομικής και λειτουργικής απόδοσης.
- Ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων σχεδιασμού, οι οποίες συγκρίνονται με βάση το κόστος κύκλου ζωής τους, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά, λειτουργικά και –κατά περίπτωση– περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση.

Τα παραπάνω βήματα φαίνονται πιο αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4-3: Βήματα για την πραγματοποίηση μίας LCCA.

Το Σχήμα απεικονίζει τη συνολική μεθοδολογία βιώσιμου σχεδιασμού οδοστρωμάτων, η οποία βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία αξιολόγησης τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων. Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή των δεδομένων εισόδου, τα οποία περιλαμβάνουν την απαιτούμενη απόδοση του έργου, το κόστος,

τους στόχους βιωσιμότητας, τα κυκλοφοριακά και κλιματικά δεδομένα, τη διαθεσιμότητα υλικών, καθώς και τις κατασκευαστικές πρακτικές και πολιτικές του αρμόδιου φορέα.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η επιλογή του τύπου οδοστρώματος ή των τεχνικών αποκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμες παραμέτρους όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά, τις προδιαγραφές κατασκευής, τη διαμόρφωση των στρώσεων, τη διαχείριση της κυκλοφορίας κατά την κατασκευή και τη μέθοδο κατασκευής. Ακολουθεί η ανάπτυξη του σχεδιασμού του οδοστρώματος με τη χρήση είτε μηχανιστικών–εμπειρικών μεθόδων είτε των τυποποιημένων σχεδιαστικών διαδικασιών του αρμόδιου φορέα.

Στη συνέχεια, ενσωματώνεται ο προγραμματισμός της μελλοντικής συντήρησης και αποκατάστασης, ο οποίος αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αξιόπιστη εκτίμηση της απόδοσης και του κόστους σε βάθος χρόνου. Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός και η αξιολόγηση της απόδοσης του οδοστρώματος, του κόστους κύκλου ζωής, καθώς και των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων.

Η διαδικασία συνεχίζεται με την τροποποίηση του αρχικού σχεδιασμού μέσω της εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) και της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA), με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους και του περιβαλλοντικού και κοινωνικού αντικτύπου, χωρίς υποβάθμιση της απαιτούμενης ποιότητας και λειτουργικής απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται εναλλακτικές σχεδιαστικές προτάσεις, οι οποίες συγκρίνονται μεταξύ τους.

Τέλος, στο τελευταίο στάδιο επιλέγεται η βέλτιστη σχεδιαστική λύση, με βάση τους στόχους και τις προτεραιότητες του αρμόδιου φορέα, εξασφαλίζοντας μια ισορροπημένη προσέγγιση μεταξύ τεχνικής απόδοσης, οικονομικής αποδοτικότητας και βιωσιμότητας.

5 Συντήρηση Οδοστρωμάτων

Η συντήρηση των οδοστρωμάτων αφορά όλες τις δραστηριότητες που στοχεύουν στη διατήρηση ή αποκατάσταση της λειτουργικότητας, της ασφάλειας και της διάρκειας ζωής ενός οδοστρώματος. Ο σωστός προγραμματισμός συντήρησης μπορεί να μειώσει σημαντικά τα κόστη και να βελτιώσει την οδική ασφάλεια. Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχημένη συντήρηση οδοστρωμάτων είναι η εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων συντήρησης τη σωστή χρονική στιγμή, καθώς και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανάλογα με τον τύπο και την έκταση των φθορών.

Η συντήρηση χωρίζεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

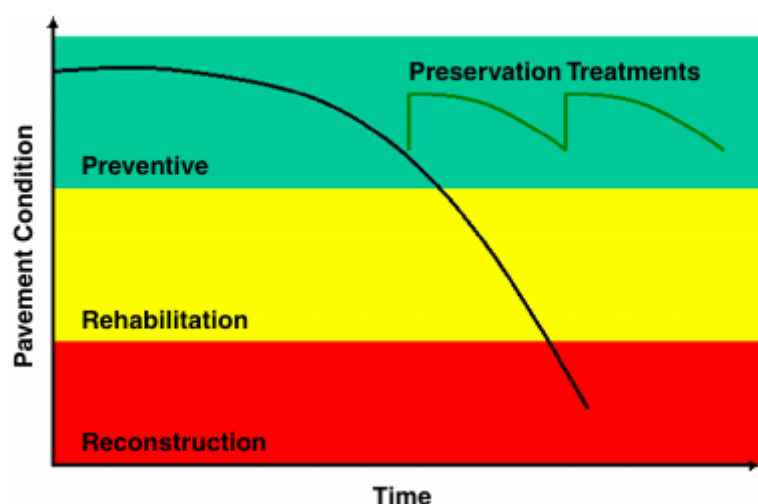
- Συντήρηση ρουτίνας (Routine maintenance). Περιλαμβάνει μικρής κλίμακας και επαναλαμβανόμενες εργασίες που εκτελούνται σε τακτική βάση, με στόχο τη διατήρηση της λειτουργικότητας, της ασφάλειας και της αποδεκτής κατάστασης του οδοστρώματος. Οι παρεμβάσεις αυτές δεν στοχεύουν στη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του δρόμου, αλλά στην αντιμετώπιση καθημερινών φθορών και τη διασφάλιση της ομαλής κυκλοφορίας. Τυπικές εργασίες συντήρησης ρουτίνας περιλαμβάνουν
 - την αποκατάσταση μικρών λακκουβών,
 - τον καθαρισμό και τη συντήρηση συστημάτων αποστράγγισης,
 - την απομάκρυνση φερτών υλικών,
 - τη συντήρηση της οριζόντιας και κατακόρυφης σήμανσης.

Παρότι οι παρεμβάσεις αυτές έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς συμβάλλουν στην πρόληψη της επιδείνωσης των φθορών και στη μείωση της ανάγκης για πιο εκτεταμένες και δαπανηρές εργασίες συντήρησης στο μέλλον.

- Προληπτική συντήρηση (Preventive Maintenance). Στοχεύει στην πρόληψη φθορών πριν αυτές εμφανιστούν ή γίνουν σοβαρές. Είναι σχετικά χαμηλού κόστους και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Παραδείγματα τεχνικών προληπτικής συντήρησης είναι τα ακόλουθα:
 - Σφράγιση ρωγμών (crack sealing)
 - Εφαρμογή λεπτού στρώματος σφράγισης ή επιφανειακής επικάλυψης (surface dressing)

- Καθαρισμός τάφρων και φρεατίων για σωστή αποστράγγιση
- Αποκατάσταση (Rehabilitation). Αφορά επισκευές οδοστρωμάτων που έχουν ήδη υποστεί φθορές, ώστε να αποκατασταθεί η λειτουργικότητα και να επανέλθει η φέρουσα ικανότητα. Η επέμβαση είναι μεγαλύτερη σε έκταση και κόστος σε σχέση με την προληπτική συντήρηση. Παραδείγματα τεχνικών αποκατάστασης είναι τα ακόλουθα:
 - Τοπικές επισκευές λακκουβών (patching)
 - Αντικατάσταση ασφαλτικών στρώσεων
 - Ενίσχυση στρώσεων οδοστρώματος
- Ανακατασκευή (Reconstruction). Αφορά πλήρη αποκατάσταση ή αντικατάσταση του οδοστρώματος, συνήθως όταν το οδόστρωμα έχει φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής του ή η φθορά είναι εκτεταμένη. Είναι η πιο κοστοβόρα λύση αλλά επαναφέρει το δρόμο σε σχεδόν αρχική κατάσταση. Παραδείγματα τεχνικών αποκατάστασης είναι τα ακόλουθα:
 - Αποξήλωση και επανακατασκευή στρώσεων
 - Κατασκευή νέου οδοστρώματος
 - Αναβάθμιση φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος

Στην Εικόνα 5-1 απεικονίζεται με σχηματικό τρόπο η μεταβολή της κατάστασης του οδοστρώματος (Pavement Condition) σε συνάρτηση με τον χρόνο, καθώς και το πότε είναι σκόπιμη η εφαρμογή κάθε κατηγορίας συντήρησης.



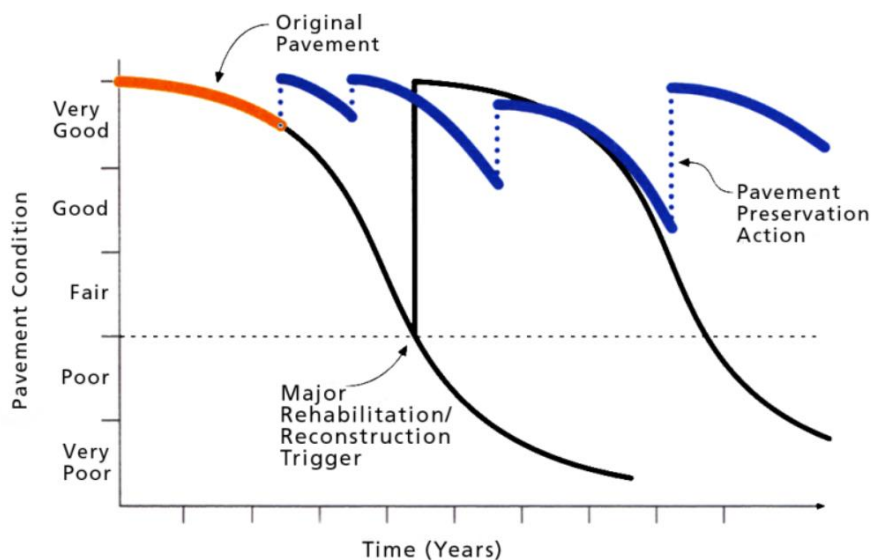
Εικόνα 5-1: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος.

Στο ανώτερο τμήμα του διαγράμματος (πράσινη ζώνη) βρίσκεται η προληπτική συντήρηση (Preventive / Preservation Treatments), η οποία εφαρμόζεται όταν το οδόστρωμα βρίσκεται ακόμη σε καλή κατάσταση. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι επαναλαμβανόμενες εφαρμογές προληπτικών μέτρων μπορούν να παρατείνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής του.

Όταν η κατάσταση του οδοστρώματος επιδεινωθεί και εισέλθει στη μεσαία ζώνη (κίτρινη περιοχή), απαιτείται αποκατάσταση (Rehabilitation). Σε αυτό το στάδιο, οι φθορές είναι πλέον εμφανείς και οι παρεμβάσεις είναι πιο εκτεταμένες και δαπανηρές, με στόχο την αποκατάσταση της λειτουργικότητας και της φέρουσας ικανότητας.

Τέλος, στη χαμηλότερη ζώνη του διαγράμματος (κόκκινη περιοχή), όπου η κατάσταση του οδοστρώματος είναι πλέον ιδιαίτερα υποβαθμισμένη, η μόνη βιώσιμη λύση είναι η ανακατασκευή (Reconstruction). Η επιλογή αυτή συνεπάγεται υψηλό κόστος και εκτεταμένες εργασίες, καθώς το οδόστρωμα έχει φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του.

Στην Εικόνα 5-2 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της κατάστασης του οδοστρώματος στην περίπτωση εφαρμογής εργασιών προληπτικής συντήρησης και εργασιών ανακατασκευής.



Εικόνα 5-2: Εξέλιξη της κατάστασης του οδοστρώματος με τον χρόνο και επίδραση των μεθόδων συντήρησης.

Η καμπύλη του αρχικού οδοστρώματος δείχνει ότι, χωρίς έγκαιρες επεμβάσεις, η κατάσταση υποβαθμίζεται προοδευτικά από πολύ καλή σε πολύ κακή, οδηγώντας τελικά στο σημείο ενεργοποίησης της ανακατασκευής (major rehabilitation/reconstruction trigger).

Οι επεμβάσεις συντήρησης, οι οποίες εφαρμόζονται όταν το οδόστρωμα βρίσκεται ακόμη σε καλή ή ικανοποιητική κατάσταση, επιφέρουν προσωρινή βελτίωση της επιφανειακής κατάστασης και επιβραδύνουν τον ρυθμό υποβάθμισης. Όπως φαίνεται από τις διαδοχικές

«αναπηδήσεις» της καμπύλης, η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή μέτρων προληπτικής συντήρησης μπορεί να παρατείνει σημαντικά τη λειτουργική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και να καθυστερήσει την ανάγκη για βαριές και κοστοβόρες επεμβάσεις.

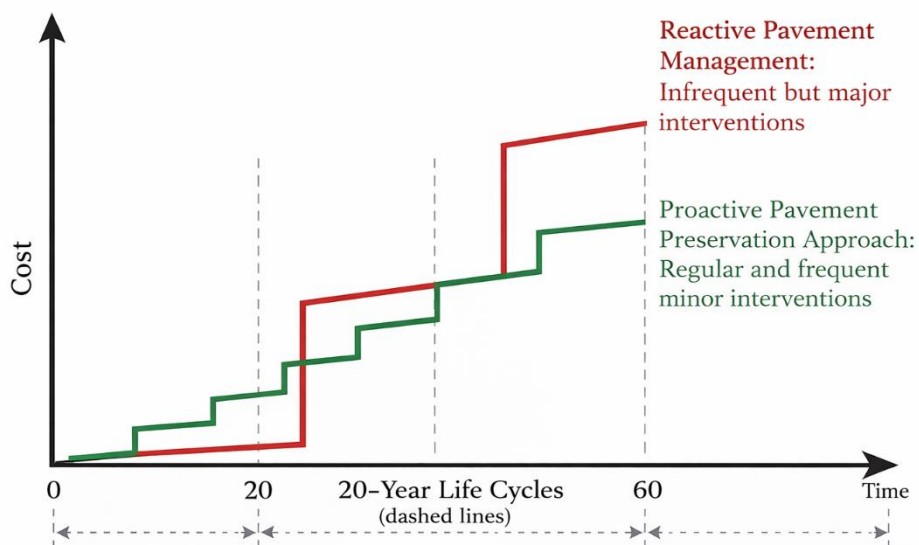
Αντίθετα, όταν οι επεμβάσεις καθυστερήσουν και η κατάσταση του οδοστρώματος πέσει κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο, τα μέτρα προληπτικής συντήρησης δεν είναι πλέον αποτελεσματικά και καθίσταται αναγκαία η ανακατασκευή. Το σχήμα αναδεικνύει έτσι τη σημασία του σωστού χρονισμού των επεμβάσεων, επιβεβαιώνοντας ότι η έγκαιρη συντήρηση αποτελεί βασικό παράγοντα βιώσιμης και οικονομικά αποδοτικής διαχείρισης οδοστρωμάτων.

Η Εικόνα 5-3 παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ αντιδραστικής και προληπτικής διαχείρισης οδοστρωμάτων ως προς την εξέλιξη του κόστους σε βάθος χρόνου. Το συνολικό κόστος συντήρησης αποτελείται τόσο από το σταθερό κόστος της επέμβασης όσο και από το ειδικό κόστος που σχετίζεται με το είδος και την έκταση της εφαρμοζόμενης μεθόδου συντήρησης. Στην περίπτωση της αντιδραστικής διαχείρισης (Reactive Pavement Management), όπου οι επεμβάσεις πραγματοποιούνται μόνο όταν η κατάσταση του οδοστρώματος έχει ήδη επιδεινωθεί σημαντικά, παρατηρούνται απότομες και μεγάλες αυξήσεις του κόστους, καθώς απαιτούνται εκτεταμένες παρεμβάσεις, όπως ανακατασκευή. Αν και το κόστος παραμένει χαμηλό για μεγάλο χρονικό διάστημα, όταν τελικά απαιτηθεί επέμβαση, αυτή είναι ιδιαίτερα δαπανηρή, αυξάνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος κύκλου ζωής.

Αντίθετα, στην προληπτική διαχείριση οδοστρωμάτων (Proactive Pavement Preservation) οι τακτικές και μικρής κλίμακας επεμβάσεις προκαλούν σταδιακές και μικρότερες αυξήσεις του κόστους, χωρίς απότομες αυξήσεις, ενώ συμβάλλουν στη διατήρηση της λειτουργικότητας και στην επιβράδυνση της υποβάθμισης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, παρότι η προληπτική προσέγγιση συνεπάγεται συχνότερες επεμβάσεις, το συνολικό κόστος σε βάθος χρόνου είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με την αντιδραστική διαχείριση. Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της έγκαιρης και συστηματικής συντήρησης, η οποία οδηγεί σε πιο βιώσιμη, οικονομικά αποδοτική και τεχνικά αποτελεσματική διαχείριση των οδοστρωμάτων.

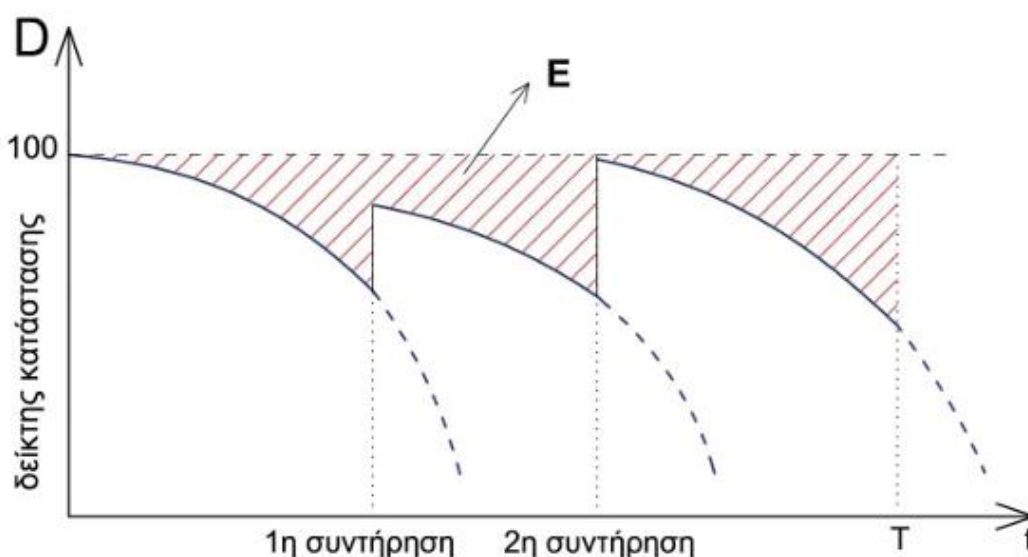
Με άλλα λόγια, το σχήμα καταδεικνύει ότι η «συντήρηση στην ώρα της» κοστίζει λιγότερο από την αποκατάσταση μετά την αστοχία, ενισχύοντας τον ρόλο της προληπτικής συντήρησης στον σύγχρονο σχεδιασμό και τη διαχείριση υποδομών.



Εικόνα 5-3: Σύγκριση αντιδραστικής και προληπτικής διαχείρισης οδοστρωμάτων ως προς το κόστος

Κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής των οδοστρωμάτων, είναι αναπόφευκτη η πραγματοποίηση επεμβάσεων συντήρησης, με στόχο την αποκατάστασή τους είτε στην αρχική τους κατάσταση είτε σε μια νέα αποδεκτή κατάσταση λειτουργικότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μετά την πρώτη επέμβαση συντήρησης, η υποβάθμιση της λειτουργικής και φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος εξελίσσεται συνήθως με ταχύτερο ρυθμό σε σύγκριση με την αρχική περίοδο λειτουργίας του (Εικόνα 5-4).



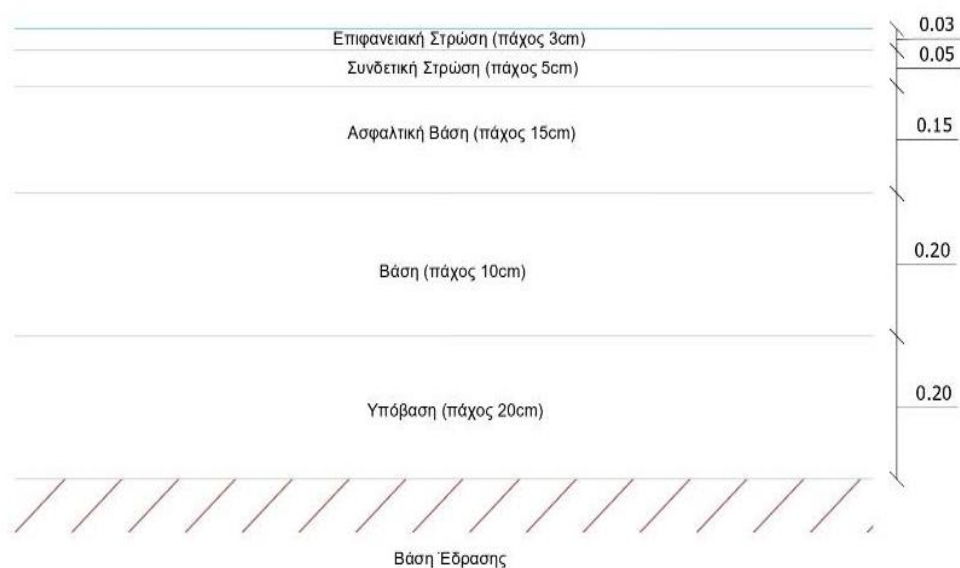
Εικόνα 5-4: Κατάσταση οδοστρώματος έπειτα από σειρά συντηρήσεων.

Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η ιεράρχηση των οδοστρωμάτων ως προς την ανάγκη επέμβασης, δίνοντας προτεραιότητα σε εκείνα που εμφανίζουν ταχύτερη απώλεια της φέρουσας ικανότητάς τους και υψηλότερο κίνδυνο λειτουργικής αστοχίας.

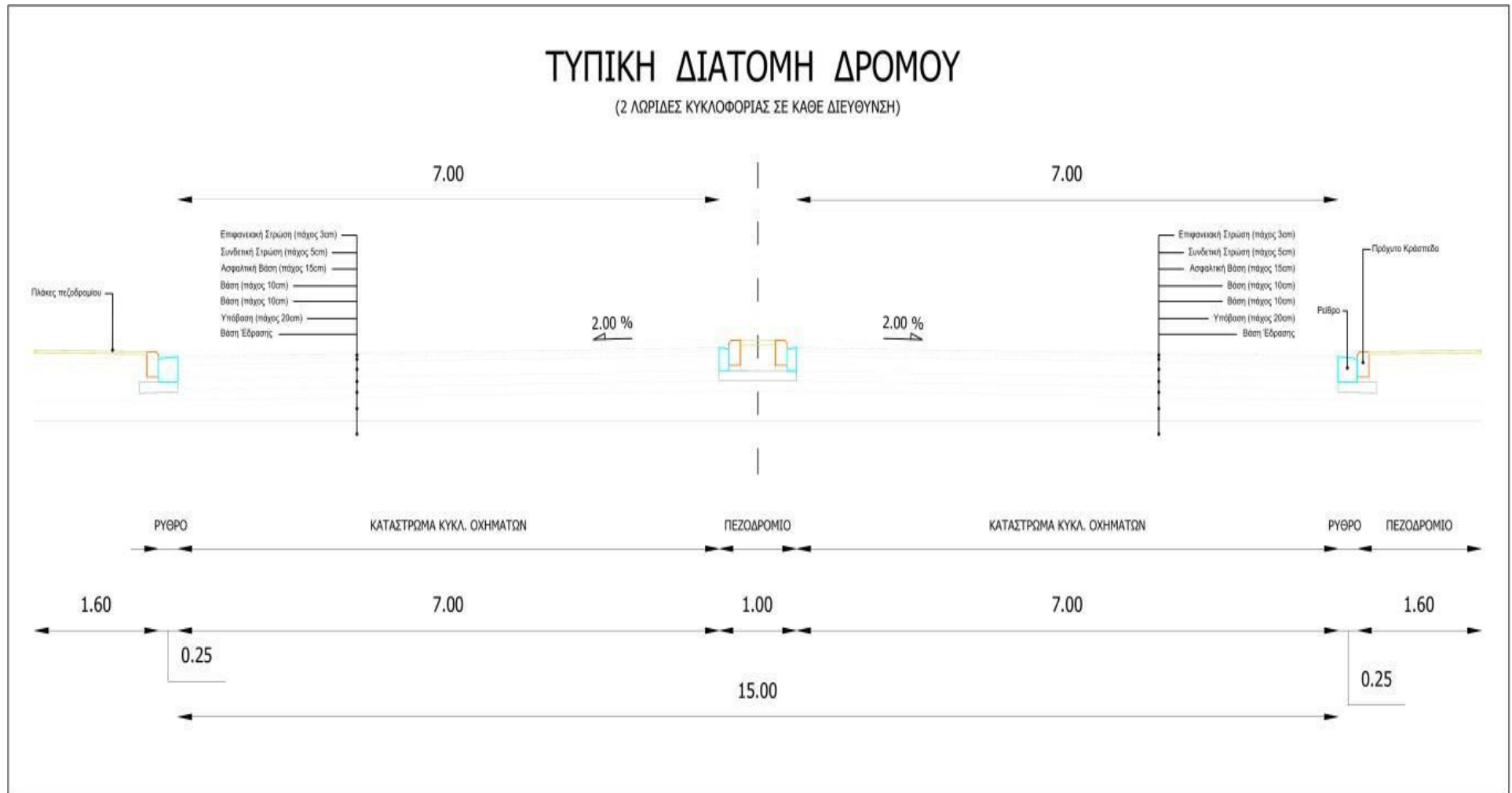
6 Ερευνητική Διαδικασία

6.1 Μεθοδολογία

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αναπτύχθηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση διαφορετικών στρατηγικών συντήρησης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μία διατομή εύκαμπτου εν λειτουργία οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-1. Η τυπική διατομή της οδού παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-2 και αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση πλάτους 3,50 μέτρα η κάθε μια (συνολικό πλάτος λωρίδων κυκλοφορίας 14,00 μέτρα) και μήκους 1 χιλιομέτρου.



Εικόνα 6-1: Διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος.



Εικόνα 6-2: Τυπική Διατομή Οδού.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν δύο σενάρια συντήρησης.

- Το Σενάριο 1 που βασίζεται στην αρχή της προστασίας του οδοστρώματος κυρίως μέσω εργασιών προληπτικής συντήρησης.
- Το Σενάριο 2 που περιλαμβάνει εργασίες αποκατάστασης του οδοστρώματος.

Η περίοδος ανάλυσης και στα δύο σενάρια θεωρήθηκε ίση με 35 έτη. Πιο συγκεκριμένα τα σενάρια περιλαμβάνουν τις ακόλουθες εργασίες συντήρησης:

- Το Σενάριο 1 περιλαμβάνει 3 είδη εργασιών:

α) Προληπτικής συντήρησης (preventive maintenance). Προγραμματίζονται εργασίες προληπτικής συντήρησης ανά 2 χρόνια, πριν την εμφάνιση σημαντικών φθορών. Οι εργασίες αυτές περιλαμβάνουν τη σφράγιση ρωγμών και τον καθαρισμό της επιφάνειας του οδοστρώματος.

β) Αντικατάστασης και επανεπίστρωσης (αντιολισθηρής) επιφανειακής στρώσης (overlay). Προγραμματίζεται να πραγματοποιηθεί κατά το 10^ο και 30^ο έτος και θα περιλαμβάνει την απόξεση της επιφανειακής στρώσης (αντιολισθηρής) πάχους 3 εκατοστών και την διάστρωση νέας ίδιου πάχους (3 cm). Κατά το 10^ο και 30^ο έτος δεν θα πραγματοποιηθούν εργασίες προληπτικής συντήρησης.

γ) Αποκατάστασης (Mill & Fill). Κατά το 20^ο έτος από την αρχή της περιόδου ανάλυσης, προγραμματίζεται η αντικατάσταση μέρους των ασφαλτικών στρώσεων. Συγκεκριμένα, θα γίνει απόξεση της επιφανειακής στρώσης (αντιολισθηρής) πάχους 3 εκατοστών και διάστρωση νέας ίδιου πάχους. Επίσης, θα γίνει απόξεση του συνόλου της συνδετικής ασφαλτικής στρώσης πάχους 5 εκατοστών και διάστρωση νέας ίδιου πάχους. Τέλος, θα γίνει απόξεση μέρους της ασφαλτικής βάσης πάχους 3 εκατοστών και θα διαστρωθεί νέα πάχους 6 εκατοστών. Κατά το 20^ο έτος δεν θα πραγματοποιηθούν εργασίες προληπτικής συντήρησης.

- Το Σενάριο 2 περιλαμβάνει 2 είδη εργασιών:

α) Αντικατάστασης και επανεπίστρωσης (αντιολισθηρής) επιφανειακής στρώσης – overlay. Προγραμματίζεται να πραγματοποιηθεί κατά το 10^ο και 30^ο έτος και θα περιλαμβάνει την απόξεση της επιφανειακής στρώσης (αντιολισθηρής) πάχους 3 εκατοστών και την διάστρωση νέας ίδιου πάχους (3 cm).

β) Αποκατάστασης – Major Rehab. Κατά το 20^ο έτος από την αρχή της περιόδου ανάλυσης, προγραμματίζεται η αντικατάσταση του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων. Συγκεκριμένα,

θα γίνει απόξεση της επιφανειακής στρώσης πάχους 3 εκατοστών, της συνδετικής στρώσης πάχους 5 εκατοστών και της ασφαλικής βάσης πάχους 15 εκατοστών. Οι παραπάνω ασφαλικές στρώσεις θα αντικατασταθούν με νέες ίδιου πάχους.

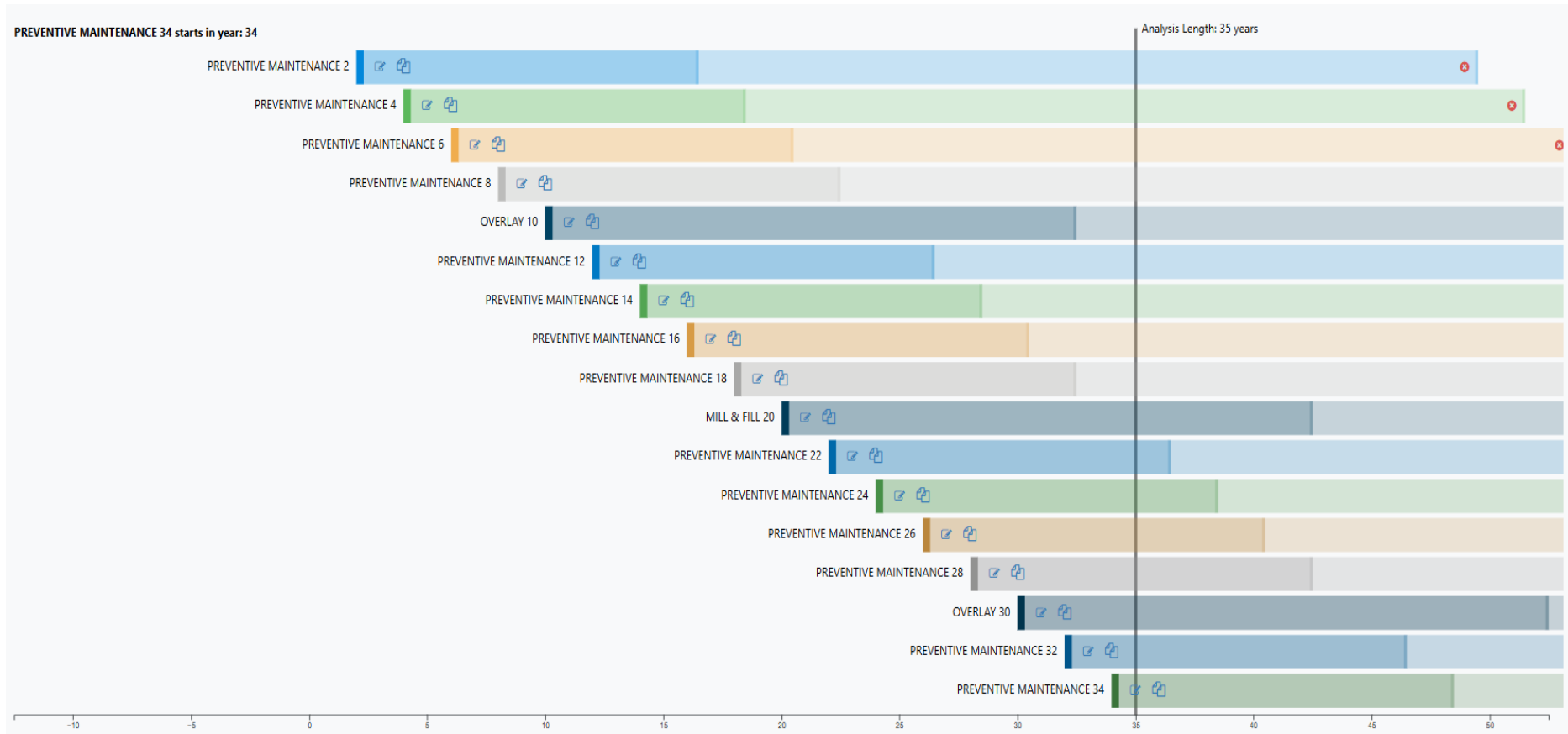
Στο Σενάριο αυτό απουσιάζουν οι εργασίες προληπτικής συντήρησης.

6.2 Ανάλυση

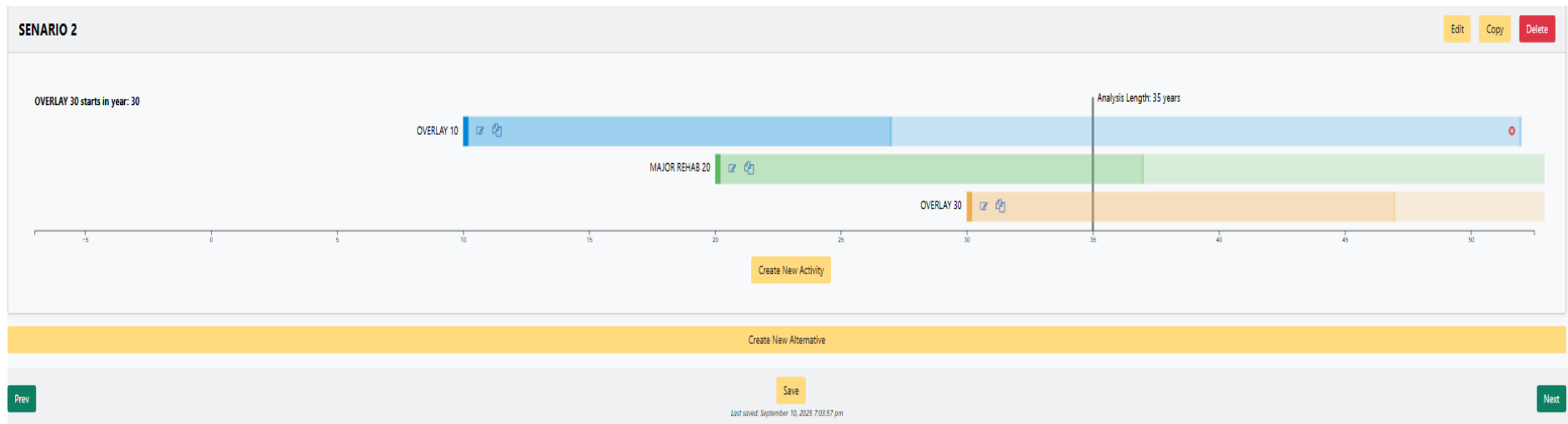
6.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων συντήρησης χρησιμοποιείται η πλατφόρμα PaveXpress. Αρχικά, εισάγονται δεδομένα που αφορούν στο μήκος του τμήματος, την περίοδο ανάλυσης καθώς και κάποια γενικά στοιχεία. Στη συνέχεια εισάγονται τα στοιχεία κυκλοφορίας (traffic data). Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν την ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία (Annual AADT), τα ποσοστά βαρέων οχημάτων και τον αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την εισαγωγή των εργασιών συντήρησης για τα δύο σενάρια (Εικόνες 6-3 και 6-4).



Εικόνα 6-3: Σχηματική αναπαράσταση – Σενάριο 1



Εικόνα 6-4: Σχηματική αναπαράσταση – Σενάριο 2

Οι εργασίες συντήρησης, συνυφασμένες με τον τρόπο κοστολόγησή τους, περιγράφονται αναλυτικά ακολούθως:

Σενάριο 1

1^η Επέμβαση - Αντικατάσταση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης (10 years):

- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης – 3cm
- Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη
- Διάστρωση Ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας – 3cm

2^η Επέμβαση – Αποκατάσταση (20 years):

- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης έως 4cm
- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης ασφαλτικού έως 8cm
- Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη
- Ασφαλτική στρώση βάσης έως 8-cm
- Ασφαλτική ισοπεδωτική (συνδετική) στρώση 5-cm
- Διάστρωση ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας 5cm

3^η Επέμβαση - Αντικατάσταση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης (30 years):

- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης – 3cm
- Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη
- Διάστρωση ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας – 3cm

Προληπτική συντήρηση (ανά 2 χρόνια, πριν την εμφάνιση φθορών)

- Σφράγιση ρωγμών
- Καθαρισμός επιφάνειας

Σενάριο 2

1^η Επέμβαση - Αντικατάσταση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης (10 years):

- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης – 3cm
- Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη
- Διάστρωση ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας – 3cm

2^η Επέμβαση – Αποκατάσταση (20 years):

- Απόξεση ασφαλτικού έως 8cm
- Απόξεση ασφαλτικού έως 8cm

- Απόξεση ασφαλτικού έως 8cm
- Ασφαλτική Προεπάλειψη
- Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη
- Ασφαλτική στρώση βάσης έως 5cm
- Ασφαλτική ισοπεδωτική (συνδετική) στρώση έως 5cm
- Διάστρωση ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας έως 5cm

3η Επέμβαση - Αντικατάσταση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης (30 years):

- Απόξεση επιφανειακής/αντιολισθηρής στρώσης – 3cm
- Ασφαλτική Προεπάλειψη
- Διάστρωση ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας – 3cm

6.2.3 Κοστολόγηση εργασιών συντήρησης

Η επιφάνεια του προς συντήρηση οδοστρώματος αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίες ανά κατεύθυνση πλάτους 3,5 m η κάθε λωρίδα. Επομένως, το συνολικό πλάτος του οδοστρώματος είναι 14 m και το μήκος του οδικού τμήματος 1000 m. Η συνολική επιφάνεια του οδοστρώματος είναι 14.000 τ.μ. Με βάση αυτή την επιφάνεια θα υπολογιστεί το κόστος των εργασιών συντήρησης αξιοποιώντας τα στοιχεία κόστους δημοσίων έργων από τον ιστότοπο "ΔΙΑΥΓΕΙΑ" (Πίνακας 6-1) .

Πίνακας 6-1: Τιμολόγιο εργασιών

α/α	α/α Τιμολογ.	Είδος εργασίας	Άρθρο Αναθεώρησης	Μο-νάδα	Εργα < 1,50 εκ.	Εργα 1,5 - 5,0 εκ.	Εργα 5,0 - 10,0 εκ.	Εργα > 10,0 εκ.
ΟΜΑΔΑ Δ: ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ (με την αξία της ασφάλτου)								
279	Δ-1	Τομή οδοστρώματος με ασφαλτοκόπτη	ΟΙΚ-2269Α	m	1,00	0,90	0,86	0,81
	Δ-2	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα)						
280	Δ-2.1	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 4 cm	ΟΔΟ-1132	m ²	1,15	1,05	1,00	0,95
281	Δ-2.2	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 6 cm	ΟΔΟ-1132	m ²	1,45	1,35	1,30	1,20
282	Δ-2.3	Απόξεση ασφαλτικού οδοστρώματος (φρεζάρισμα) σε βάθος έως 8 cm	ΟΔΟ-1132	m ²	1,85	1,70	1,60	1,55
283	Δ-2Α	Απόξεση ασφαλτικού τάπητα αστικής οδού με χρήση φρέζας	ΟΔΟ-1132	m ²	3,40	3,15	3,00	2,90
284	Δ-3	Ασφαλτική προεπάλειψη	ΟΔΟ-4110	m ²	1,20	1,10	1,05	1,00
285	Δ-4	Ασφαλτική συγκολλητική επάλειψη	ΟΔΟ-4120	m ²	0,45	0,42	0,40	0,38
	Δ-5	Ασφαλτικές στρώσεις βάσης						
286	Δ-5.1	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπτυκνωμένου πάχους 0,05 m	ΟΔΟ-4321B	m ²	7,10*	6,50*	6,20*	5,90*
287	Δ-5.2	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπτυκνωμένου πάχους 0,06 m	ΟΔΟ-4321B	m ²	8,30*	7,60*	7,20*	6,90*
288	Δ-5.3	Ασφαλτική στρώση βάσης συμπτυκνωμένου πάχους 0,07 m	ΟΔΟ-4321B	m ²	9,50*	8,70*	8,30*	7,90*
289	Δ-6	Ασφαλτικές στρώσεις μεταβλητού πάχους επιμετρούμενες κατά βάρος	ΟΔΟ-4421B	ton	78,80*	72,00*	68,50*	65,20*
290	Δ-7	Ασφαλτικές συνδετικές (ισοπεδωτικές) στρώσεις συμπτυκνωμένου πάχους 0,05 m	ΟΔΟ-4421B	m ²	7,10*	6,50*	6,20*	5,90*
	Δ-8	Ασφαλτικές στρώσεις κυκλοφορίας						
291	Δ-8.1	Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας συμπτυκνωμένου πάχους 0,05 m με χρήση κοινής ασφάλτου	ΟΔΟ-4521B	m ²	7,70*	7,00*	6,70*	6,30*
292	Δ-8.2	Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας συμπτυκνωμένου πάχους 0,05 m με χρήση τροποποιημένης ασφάλτου	ΟΔΟ-4521B	m ²	9,86*	9,00*	8,60*	8,10*
293	Δ-8Α	Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας αστικής οδού	ΟΔΟ-4521B	m ²	9,30*	8,50*	8,10*	7,70*
	Δ-9	Ανπολισθηρές ασφαλτικές στρώσεις κυκλοφορίας						
294	Δ-9.1	Ανπολισθηρή ασφαλτική στρώση συμπτυκνωμένου πάχους 0,04 m με χρήση κοινής ασφάλτου	ΟΔΟ-4521B	m ²	8,80*	8,00*	7,60*	7,20*
295	Δ-9.2	Ανπολισθηρή ασφαλτική στρώση συμπτυκνωμένου πάχους 0,04 m με χρήση τροποποιημένης ασφάλτου	ΟΔΟ-4521B	m ²	10,95*	10,00*	9,50*	9,00*
	Δ-10	Λεπτές ανπολισθηρές στρώσεις ασφαλτικής σκυρομαστίχης						
296	Δ-10.1	Ανπολισθηρή στρώση ασφαλτικής σκυρομαστίχης πάχους 30 mm με κοινή άσφαλο	ΟΔΟ-4521B	m ²	5,90	5,40	5,10	4,90
297	Δ-10.2	Ανπολισθηρή στρώση ασφαλτικής σκυρομαστίχης πάχους 30 mm με χρήση τροποποιημένης ασφάλτου	ΟΔΟ-4521B	m ²	7,40*	6,80*	6,50*	6,20*
298	Δ-11	Γαλβανισμένο χαλύβδινο πλέγμα οπλισμού ασφαλτικών στρώσεων, εφελκυστικής αντοχής 40 kN/m κατά τις δύο διευθύνσεις	ΟΔΟ 2311	m ²	7,70	7,00	6,70	6,30
299	Δ-12	Αδροποίηση επιφανείας υφισταμένων ασφαλτικών οδοστρωμάτων με τη μέθοδο της σφαιριδιοβολής	ΟΔΟ 1132	m ²	2,30	2,30	2,30	2,30

Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη που σχετίζονται με τις επιμέρους εργασίες συντήρησης του 1^{ου} σεναρίου, ενώ στον Πίνακα 6-3 τα αντίστοιχα κόστη για το σενάριο 2.

Συγκεκριμένα:

Για τον Πίνακα 6-2, το κόστος των 849.100 € αντιστοιχεί σε στρατηγική που περιλαμβάνει τακτικές προληπτικές επεμβάσεις. Η επιφανειακή συντήρηση ανά 2 έτη (196.000 € συνολικά) αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους αλλά εξασφαλίζει καλύτερη μακροπρόθεσμη διατήρηση της ποιότητας. Οι τρεις μεγάλες επεμβάσεις στα 10, 20 και 30 έτη είναι λιγότερο δαπανηρές λόγω της τακτικής συντήρησης

Αντιθέτως για τον Πίνακα 6-3, το υψηλότερο κόστος των 918.540 € προκύπτει από την απουσία τακτικής συντήρησης. Η επέμβαση Major Rehabilitation στο 20ο έτος είναι εξαιρετικά δαπανηρή (περισσότερα από 600.000 €) και απαιτεί εκτενέστερες εργασίες. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε λιγότερες αλλά πολύ πιο ακριβές επεμβάσεις όταν η κατάσταση του οδοστρώματος έχει ήδη επιδεινωθεί σημαντικά.

Πίνακας 6-2: Κόστος ανά εργασία - Σενάριο 1

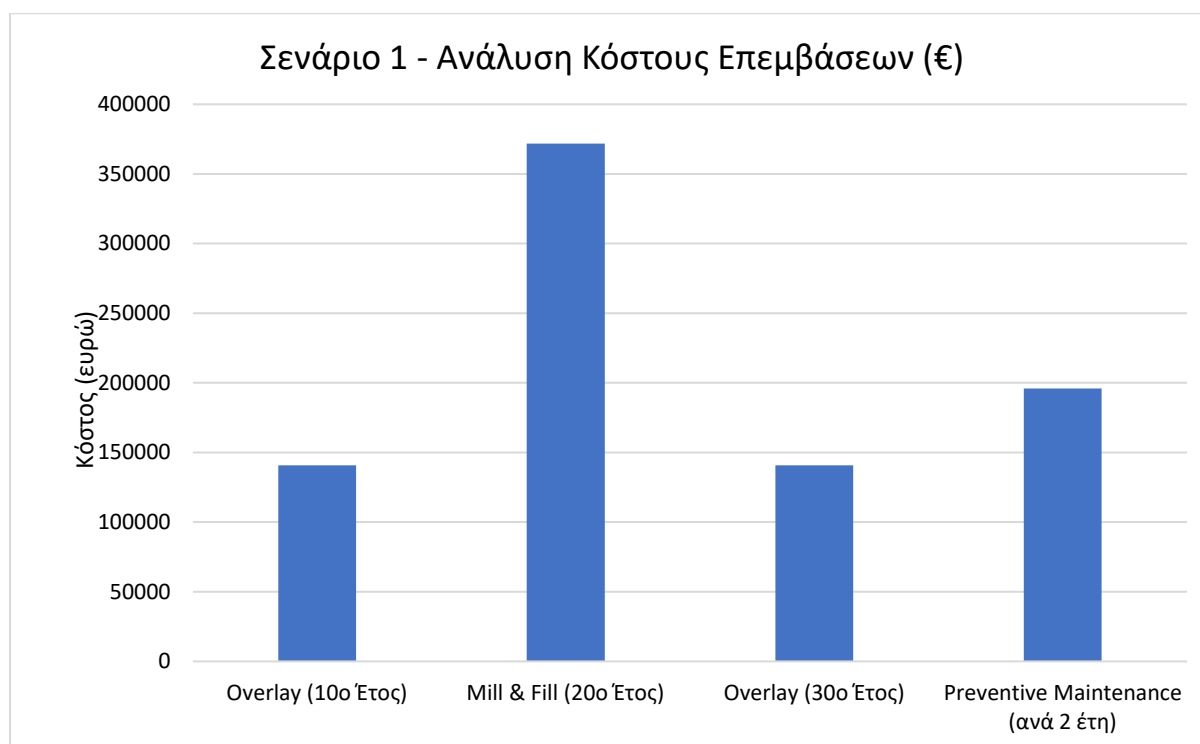
Σενάριο 1					
Επέμβαση (Overlay 10 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 280)	1,15	€/m2	14000	16100	
Ασφαλτική Προεπάλειψη (α/α 284)	1,2	€/m2	14000	16800	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 291)	7,7	€/m2	14000	107800	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				140700	
Επέμβαση (Mill & Fill 20 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 280) έως 4cm	1,15	€/m2	14000	16100	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 282) έως 8 cm	1,85	€/m2	14000	25900	
Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη (α/α 285)	0,45	€/m2	14000	6300	
Ασφαλτική Στρώση Βάσης Συμπυκνωμένου πάχους 6 cm (α/α 287)	8,3	€/m2	14000	116200	
Ασφαλτικές Συνδετικές Ισοπεδοτικές (α/α 290)	7,1	€/m2	14000	99400	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 291)	7,7	€/m2	14000	107800	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				371700	
Επέμβαση (Overlay 30 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 280)	1,15	€/m2	14000	16100	
Ασφαλτική Προεπάλειψη (α/α 284)	1,2	€/m2	14000	16800	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 291)	7,7	€/m2	14000	107800	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				140700	
Προληπτική συντήρηση (ανά 1 ή 2 χρόνια, πριν την εμφάνιση φθορών)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Επιφανειακές επεμβάσεις (Εφαρμογή 14 φορές σε βάθος 35 χρόνων)	1	€/m2	14000	196000	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				196000	
Συνολικό κόστος σεναρίου				849100	

Πίνακας 6-3: Κόστος ανά εργασία - Σενάριο 2

Σενάριο 2					
Επέμβαση (Overlay 10 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 280)	1,15	€/m2	14000	16100	
Ασφαλτική Προεπάλειψη (α/α 284)	1,2	€/m2	14000	16800	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 291)	7,7	€/m2	14000	107800	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				140700	
Επέμβαση (Major Rehab 20 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 282) έως 8 cm	1,85	€/m2	14000	25900	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 282) έως 8 cm	1,85	€/m2	14000	25900	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 282) έως 8 cm	1,85	€/m2	14000	25900	
Ασφαλτική Προεπάλειψη (α/α 284)	1,2	€/m2	14000	16800	
Ασφαλτική Συγκολλητική Επάλειψη (α/α 285)	0,5	€/m2	14000	7000	
Ασφαλτική Στρώση Βάσης Συμπυκνωμένου πάχους 5 cm (α/α 286)	7,1	€/m2	14000	99400	
Ασφαλτική Στρώση Βάσης Συμπυκνωμένου πάχους 5 cm (α/α 286)	7,1	€/m2	14000	99400	
Ασφαλτική Στρώση Βάσης Συμπυκνωμένου πάχους 5 cm (α/α 286)	7,1	€/m2	14000	99400	
Ασφαλτικές Συνδετικές Ισοπεδοτικές (α/α 290)	7,1	€/m2	14000	99400	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 292)	9,86	€/m2	14000	138040	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				637140	
Επέμβαση (Overlay 30 years)	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης	Επιφάνεια επέμβασης σε m2	Τιμή Επέμβασης σε ευρώ	
Απόξεση ασφαλτικού (α/α 280)	1,15	€/m2	14000	16100	
Ασφαλτική Προεπάλειψη (α/α 284)	1,2	€/m2	14000	16800	
Ασφαλτική στρώση Κυκλοφορίας (α/α 291)	7,7	€/m2	14000	107800	
Συνολικό κόστος επέμβασης (όλα τα κόστη επεμβάσεων είναι προ ΦΠΑ)				140700	
Συνολικό κόστος σεναρίου				918540	

6.2.4 Συγκριτική αξιολόγηση

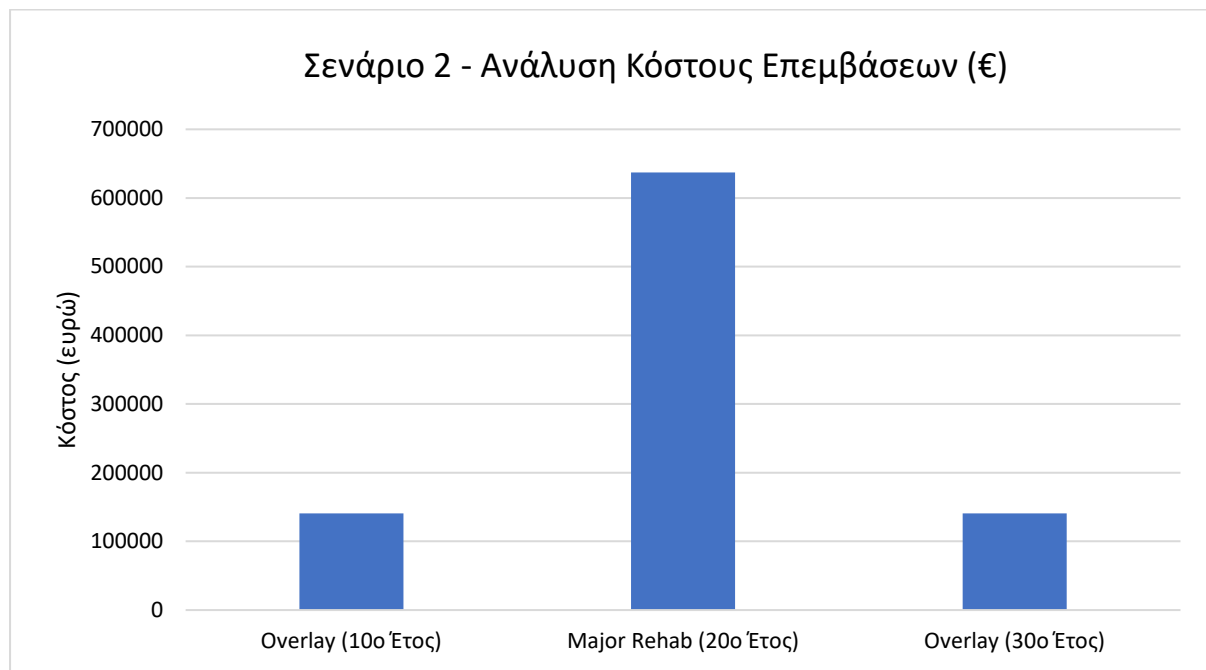
Η Εικόνα 6-5 παρουσιάζει το κόστος των επιμέρους επεμβάσεων συντήρησης που εφαρμόστηκαν στο Σενάριο 1. Το υψηλότερο κόστος εμφανίζεται στη λύση Mill & Fill, ενώ τα χαμηλότερα κόστη αφορούν τις επεμβάσεις Overlay στο 10ο και 30ό έτος. Η επέμβαση Mill & Fill είναι σαφώς η πιο δαπανηρή. Τα Overlay (στο 10ο και 30ό έτος) παρουσιάζουν παρόμοιο και σχετικά χαμηλό κόστος, δείχνοντας ότι οι έγκαιρες επεμβάσεις μπορούν να περιορίσουν τις συνολικές δαπάνες. Η προληπτική συντήρηση, παρότι δεν έχει το χαμηλότερο μεμονωμένο κόστος, παραμένει οικονομικά ανταγωνιστική, καθώς στοχεύει στη διατήρηση της καλής κατάστασης του οδοστρώματος και στη μείωση της ανάγκης για βαριές επεμβάσεις στο μέλλον.



Εικόνα 6-5: Συνολικό κόστος εργασιών συντήρησης – Σενάριο 1

Η Εικόνα 6-6 παρουσιάζει το κόστος των επιμέρους επεμβάσεων συντήρησης που εφαρμόστηκαν στο Σενάριο 2. Η επέμβαση Major Rehabilitation εμφανίζει εξαιρετικά υψηλό κόστος σε σύγκριση με τις άλλες δύο, οι οποίες έχουν ίσο και σαφώς χαμηλότερο κόστος. Η Major Rehabilitation αποτελεί μια εκτεταμένη και βαριά αποκατάσταση, που εφαρμόζεται όταν το οδόστρωμα έχει φτάσει σε προχωρημένο στάδιο φθοράς, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στο πολύ υψηλό κόστος. Τα Overlay στο 10ο και 30ό έτος λειτουργούν ως ενδιάμεσες επεμβάσεις, με στόχο την προσωρινή αποκατάσταση της λειτουργικότητας και της

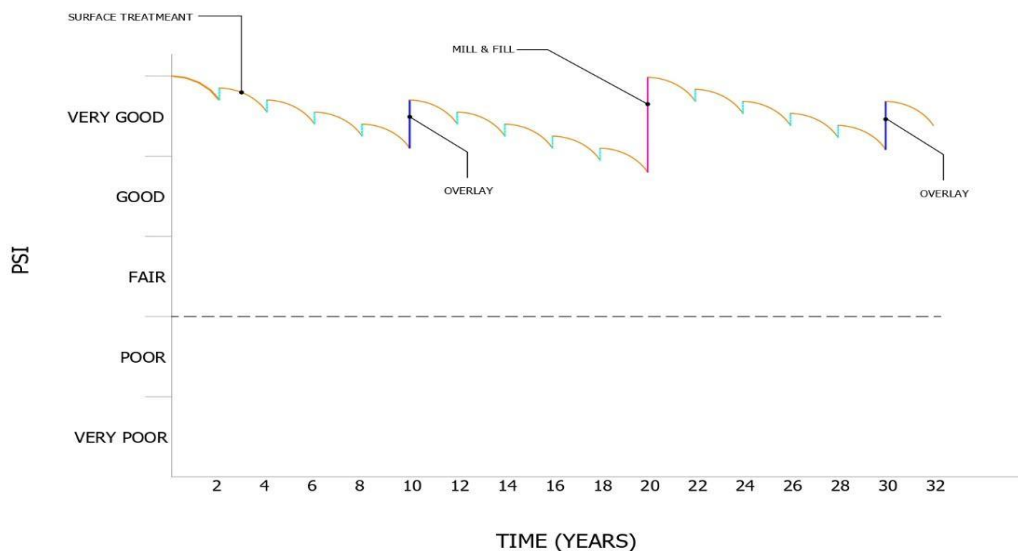
δομικής επάρκειας. Η μεγάλη διαφορά κόστους υποδηλώνει ότι η καθυστέρηση ή η απουσία συστηματικής συντήρησης οδηγεί αναπόφευκτα σε οικονομικά δυσμενείς λύσεις.



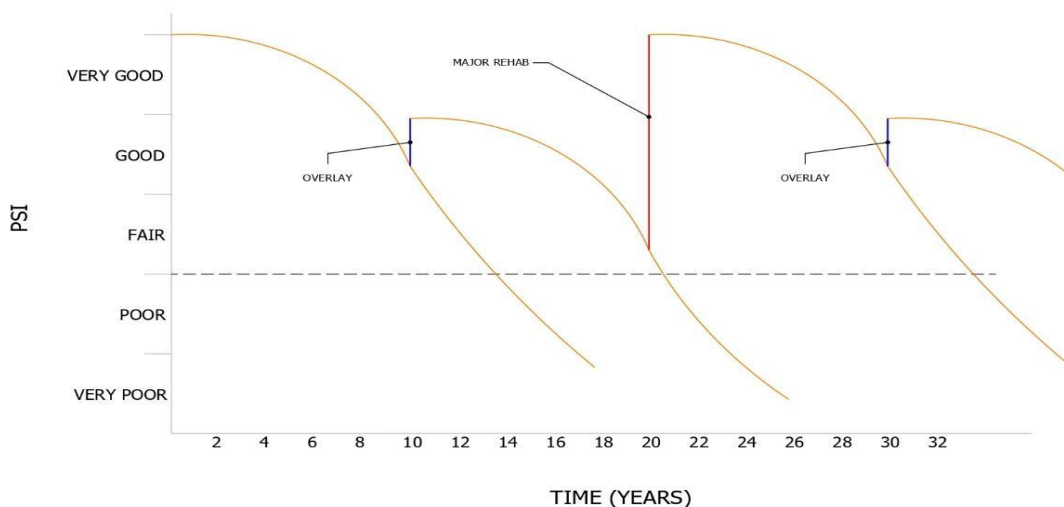
Εικόνα 6-6: Συνολικό κόστος εργασιών συντήρησης – Σενάριο 2

Σε σύγκριση με το Σενάριο 1, το Σενάριο 2 εμφανίζει σαφώς δυσμενέστερη οικονομική συμπεριφορά, κυρίως λόγω της ανάγκης εφαρμογής εκτεταμένης βαριάς αποκατάστασης (Major Rehabilitation) στο 20ό έτος. Ενώ στο Σενάριο 1 το κόστος κατανέμεται πιο ομοιόμορφα στον χρόνο μέσω συνδυασμού προληπτικής συντήρησης, επικαλύψεων (overlay) και μιας μέτριας επέμβασης τύπου mill & fill, στο Σενάριο 2 παρατηρείται έντονη συγκέντρωση δαπάνης σε ένα χρονικό σημείο, με το κόστος της major rehabilitation να υπερβαίνει σημαντικά το αντίστοιχο μέγιστο κόστος του Σενάριου 1. Η απουσία προληπτικής συντήρησης στο Σενάριο 2 οδηγεί σε επιταχυνόμενη υποβάθμιση του οδοστρώματος, καθιστώντας αναπόφευκτη μια ιδιαίτερα δαπανηρή επέμβαση, γεγονός που αυξάνει τόσο το συνολικό κόστος κύκλου ζωής όσο και το οικονομικό ρίσκο για τον φορέα διαχείρισης. Αντίθετα, το Σενάριο 1 αποδεικνύεται πιο βιώσιμη στρατηγική διαχείρισης, καθώς μέσω έγκαιρων και ηπιότερων επεμβάσεων περιορίζει την ανάγκη για βαριές αποκαταστάσεις και επιτυγχάνει καλύτερη σχέση κόστους–αποτελεσματικότητας σε βάθος χρόνου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα (Εικόνες 6-7 και 6-8) που απεικονίζουν την εξέλιξη της ποιότητας του οδοστρώματος σε συνάρτηση με τον χρόνο για το Σενάριο 1 και 2, αντίστοιχα.



Εικόνα 6-7: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος – Σενάριο 1



Εικόνα 6-8: Επίδραση της συντήρησης κατά την διάρκεια λειτουργίας και κατάστασης του οδοστρώματος – Σενάριο 2

Το Σενάριο 1 (Εικόνα 6-7) διατηρεί την κατάσταση του οδοστρώματος σε αποδεκτά επίπεδα, δηλαδή FAIR και άνω, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, μέσω τακτικών και έγκαιρων επεμβάσεων, οι οποίες οδηγούν σε περιοδικές βελτιώσεις της ποιότητας του οδοστρώματος. Αντίθετα, το Σενάριο 2 (Εικόνα 6-8) επιτρέπει την εκτεταμένη υποβάθμιση της κατάστασης του οδοστρώματος, η οποία φτάνει έως τα επίπεδα POOR και VERY POOR πριν από την εφαρμογή κάθε μεγάλης επέμβασης. Η πρακτική αυτή συνεπάγεται αρνητικές επιπτώσεις τόσο

στην οδική ασφάλεια όσο και στην άνεση των χρηστών, επιβεβαιώνοντας την υπεροχή των στρατηγικών προληπτικής συντήρησης έναντι των καθυστερημένων, διορθωτικών παρεμβάσεων.

7 Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία ανέδειξε τη σημασία της επιλογής κατάλληλων στρατηγικών συντήρησης για τη βιώσιμη διαχείριση των οδοστρωμάτων, αξιοποιώντας την Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA) και την εξέλιξη της κατάστασης του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου. Από τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων προέκυψαν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα:

- Το Σενάριο 1, το οποίο βασίζεται σε προληπτικές και έγκαιρες επεμβάσεις συντήρησης, διατηρεί την ποιότητα του οδοστρώματος σε αποδεκτά επίπεδα (FAIR και άνω) καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.
- Το Σενάριο 2 επιτρέπει την εκτεταμένη υποβάθμιση της κατάστασης του οδοστρώματος, με εμφάνιση επιπέδων POOR και VERY POOR πριν από την εφαρμογή μεγάλων επεμβάσεων αποκατάστασης.
- Η προληπτική προσέγγιση του Σεναρίου 1 οδηγεί σε ομαλότερη κατανομή του κόστους στον χρόνο, μειώνοντας την ανάγκη για ιδιαίτερα δαπανηρές βαριές αποκαταστάσεις.
- Αντίθετα, το Σενάριο 2 χαρακτηρίζεται από συγκέντρωση υψηλού κόστους σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία, λόγω της εφαρμογής εκτεταμένων επεμβάσεων τύπου Major Rehabilitation.
- Από λειτουργική και κοινωνική σκοπιά, το Σενάριο 1 προσφέρει υψηλότερο επίπεδο οδικής ασφάλειας και άνεσης κύλισης, περιορίζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις στους χρήστες.
- Συνολικά, το Σενάριο 1 εμφανίζει καλύτερη σχέση κόστους–αποτελεσματικότητας και συνιστά πιο βιώσιμη στρατηγική διαχείρισης οδοστρωμάτων σε σύγκριση με το Σενάριο 2.
- Η έγκαιρη συντήρηση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την παράταση της ωφέλιμης ζωής των οδοστρωμάτων και τον περιορισμό της δομικής τους υποβάθμισης.
- Η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA) αποδείχθηκε αποτελεσματικό εργαλείο για τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών στρατηγικών συντήρησης, υποστηρίζοντας τεκμηριωμένες αποφάσεις σχεδιασμού.
- Η επιλογή στρατηγικής συντήρησης επηρεάζει άμεσα τόσο το συνολικό οικονομικό κόστος όσο και την ποιότητα εξυπηρέτησης των χρηστών του οδικού δικτύου.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Συνδυασμός της LCCA με Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) για την ταυτόχρονη αποτίμηση οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Ενσωμάτωση κοινωνικών δεικτών (οδική ασφάλεια, καθυστερήσεις χρηστών, κοινωνική αποδοχή) σε πολυκριτηριακά μοντέλα αξιολόγησης.
- Διερεύνηση της επίδρασης εναλλακτικών και καινοτόμων υλικών, όπως ανακυκλωμένα ασφαλτικά μίγματα ή τροποποιημένες ασφάλτους, στο κόστος και τη συμπεριφορά του οδοστρώματος.
- Εφαρμογή αναλύσεων ευαισθησίας και αβεβαιότητας για κρίσιμες παραμέτρους, όπως κυκλοφοριακή φόρτιση, τιμές υλικών και κλιματικές συνθήκες.
- Επέκταση της μεθοδολογίας σε διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων και σε επίπεδο οδικού δικτύου μέσω συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων (PMS).

8 Βιβλιογραφία

- [1] «Mohod M., A comparative study on rigid and flexible pavement: A review, 2016».
- [2] Σημειώσεις Κατασκευής Οδών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Θεοδωρακόπουλος Δημήτριος, 2015.
- [3] «Αθητάκη Δ., Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στην γαλλική μέθοδο, 2018».
- [4] «Hassani A., A state of the art of semi flexible pavements: Introduction, design and performance, 2020».
- [5] «Saurabh L., Design of rigid and flexible pavements by various methods and their cost analysis of each method, 2013».
- [6] «Χασιακός Α., Φθορές οδοστρωμάτων, Παρουσίαση στα πλαίσια του μαθήματος Διαχείριση υποδομών συγκοινωνιακών έργων».
- [7] «Adlinge S.S, Gupta A.K., Pavement Deterioration and its Causes, Second International Conference on Emerging Trends in Engineering (SICETE)».
- [8] «Murphreepaving, <https://www.murphreepaving.com/8-common-asphalt-pavement-issues-and-how-to-fix-them/>».
- [9] «Pavement interactive , <https://pavementinteractive.org/>».
- [10] Pavement Life Cycle Assessment Framework, US Department of Transportation, 2016.
- [11] «Βελτιωτικές παραμβάσεις συντήρησης οδοστρωμάτων, 2010, Εργαστήριο Συγκοινωνιακών Έργων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών».
- [12] «Τσιαντού Ι., Νέες προσεγγίσεις στα συστήματα διαχείρισης οδοστρωμάτων, 2017».
- [13] «Εργοταξιακά θέματα, 2022, Βιώσιμα οδοστρώματα και βέλτιστες πρακτικές».

- [14] «Bin Y., Qing L., (2012), Life cycle assessment of pavement: Methodology and case study, Transportation Research Part D».
- [15] «Asres E., Ghebrab T., Ekwaro-Osire S., (2022), Framework for Design of Sustainable Flexible Pavement, Infrastructures».
- [16] «Nunn M.,Brown A.,Design of long-life flexible pavements for heavy traffic,1997».
- [17] «TRANSPORTATION RESEARCH, Perpetual Bituminous Pavements,2001».
- [18] « Timm D.,Perpetual pavement design for flexible pavements in the US,2007».
- [19] « Timmermans & Beroggi (2000) · Sahely et al. (2005) · Mihyeon Jeon & Amekudzi (2005) · Ugwu & Haupt (2007) · Shen et al. (2010) · Wang (2009)
- [20] « Λοΐζος Α., Γεωργούλη Κ. (2022). Βιώσιμα οδοστρώματα και βέλτιστες πρακτικές, Εργοταξιακά Θέματα.
- [21] «Sahely et al. (2005) · Mihyeon Jeon & Amekudzi (2005) · Ugwu & Haupt (2007) · Shen et al. (2010) · Wang (2009)