



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**

ΓΚΙΚΑΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη των βιώσιμων εναλλακτικών επιλογών, όσον αφορά στα οδοστρώματα. Αρχικά, γίνεται εκτενής ανάλυση του όρου βιωσιμότητα, αλλά και των πολυάριθμων απαιτούμενων συμβιβασμών, προς επίτευξη της προσαρμογής της μέχρι σήμερα τεχνογνωσίας των οδοστρωμάτων, στις βιώσιμες προδιαγραφές. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι αναδυόμενες πτυχές της βιωσιμότητας, σε ό,τι αφορά τα οδοστρώματα, και συγκεκριμένα στο σύστημα περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία. Αναλυτικότερα, γίνεται ανάδειξη των διάφορων διαθέσιμων βιώσιμων εναλλακτικών επιλογών, σχετικά με τα υλικά, τις τεχνολογίες, το σχεδιασμό, την κατασκευή και τις τεχνικές συντήρησης/αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Παρουσιάζονται τα κυρίως θετικά, αλλά και τυχόν αρνητικά στοιχεία, που προκύπτουν από τις διάφορες προτεινόμενες λύσεις, με έμφαση στις επιπτώσεις στο τρίπτυχο περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία. Τέλος, ως επιστέγασμα των ανωτέρω, γίνεται η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός βιώσιμου οδοστρώματος, η οποία δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την εφαρμογή βιώσιμων λύσεων συντήρησης/αποκατάστασης στα οδοστρώματα. Ανακεφαλαιώνοντας, δίνονται γενικές συστάσεις όσον αφορά στην επιδίωξη της βιωσιμότητας κατά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των οδοστρωμάτων.

ABSTRACT

Aim of present diploma thesis is the emergence of sustainable alternative options with regard to pavements. Initially, an extensive analysis of “sustainability” term but also of numerous required trade-offs towards achievement of the adaption of to date know-how of pavements to sustainable specifications, takes place. Next, the emerging aspects of sustainability with regard to pavements namely to system environment-economy-society, are described. Specifically, the emergence of several available sustainable alternative options with regard to materials, technologies, design, construction, and maintenance/rehabilitation techniques of pavements, takes place. Mainly positive but also possibly negative data arising from several proposed solutions with an emphasis on impacts on environment-economy-society triptych, are presented. Finally, as a capstone of the above the structural evaluation of the condition of a sustainable pavement takes place, which provides encouraging results for the implementation of sustainable maintenance/rehabilitation techniques to pavements. Summarizing, general recommendations with regard to pursuit of sustainability about design, construction, and function of pavements, are given.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 | Αντικείμενο..... | 1 |
| 1.2 | Στόχος – Μεθοδολογία..... | 3 |
| 1.3 | Δομή | 4 |
| 2 | ΒΙΩΣΙΜΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ..... | 7 |
| 2.1 | Η έννοια της βιωσιμότητας..... | 7 |
| 2.2 | Βιώσιμα υλικά | 11 |
| 2.2.1 | Γενικά..... | 11 |
| 2.2.2 | Αδρανή υλικά | 11 |
| 2.2.3 | Ασφαλτικά υλικά | 17 |
| 2.2.4 | Υλικά σκυροδέματος | 21 |
| 2.3 | Βιώσιμες τεχνολογίες..... | 24 |
| 3 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ | 31 |
| 3.1 | Σχεδιασμός | 31 |
| 3.1.1 | Γενικά..... | 31 |
| 3.1.2 | Αρχές βιώσιμου σχεδιασμού | 32 |
| 3.1.3 | Σχεδιαστικές λεπτομέρειες | 34 |
| 3.1.4 | Εναλλακτικές προτάσεις..... | 41 |
| 3.2 | Κατασκευή..... | 45 |
| 3.2.1 | Γενικά..... | 45 |
| 3.2.2 | Βιώσιμες κατασκευαστικές μέθοδοι..... | 46 |
| 4 | ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ & ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ | 55 |
| 4.1 | Γενικά..... | 55 |
| 4.2 | Βιώσιμες τεχνικές συντήρησης | 57 |
| 4.2.1 | Ασφαλτικά οδοστρώματα | 57 |
| 4.2.2 | Οδοστρώματα από σκυρόδεμα..... | 63 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.3 | Βιώσιμες μέθοδοι αποκατάστασης | 67 |
| 5 | ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ | 73 |
| 5.1 | Γενικά..... | 73 |
| 5.2 | Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους | 74 |
| 5.3 | Δείκτες και παράμετροι δομικής κατάστασης οδοστρώματος..... | 76 |
| 5.4 | Αξιολόγηση ενός τμήματος βιώσιμου οδοστρώματος | 80 |
| 5.4.1 | Περιγραφή πεδίου | 80 |
| 5.4.2 | Συλλογή και επεξεργασία στοιχείων..... | 84 |
| 5.4.3 | Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα | 87 |
| 6 | ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 101 |
| 7 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 105 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 109 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1 Μηνιαία θερμοκρασιακή ανωμαλία-ανομοιομορφία ανά εικοσαετία (NASA GISS 2016)..... | 2 |
| Εικόνα 1.2 Ποσοστιαία κατανομή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα στις Η.Π.Α. (EPA 2013) | 3 |
| Εικόνα 2.1 Τρίπτυχο βιωσιμότητας..... | 7 |
| Εικόνα 2.2 Φυσικά αδρανή αριστερά και τεχνητά θρυμματισμένα δεξιά | 12 |
| Εικόνα 2.3 Ποσοστά καταλαμβανόμενου όγκου αδρανών σε ασφαλτικά μείγματα αριστερά και σε συμβατικό σκυρόδεμα δεξιά (Tagabji et. al. 2010)..... | 13 |
| Εικόνα 2.4 Ανακτημένο ασφαλτικό υλικό οδοστρώματος, RAP | 14 |
| Εικόνα 2.5 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, RCA..... | 14 |
| Εικόνα 2.6 Ανακυκλωμένες ασφαλτικές στέγες πριν και μετά, RAS..... | 15 |
| Εικόνα 2.7 Μεταλλουργική σκωρία | 15 |
| Εικόνα 2.8 Άμμος χυτηρίου | 16 |
| Εικόνα 2.9 Άχρηστα υαλικά..... | 16 |
| Εικόνα 2.10 Ασφαλτοϋδαρές επισφραγιστικό μείγμα (fog seal)..... | 19 |
| Εικόνα 2.11 Ψίχα από καουτσούκ, (Crumb Rubber)..... | 20 |
| Εικόνα 2.12 Άσφαλτος τροποποιημένη με πολυμερή, PMA | 20 |
| Εικόνα 2.13 Ιπτάμενη τέφρα δεξιά σε σύγκριση με συμβατικό τσιμέντο | 22 |
| Εικόνα 2.14 Σκωριοτσιμέντο | 23 |
| Εικόνα 2.15 Πυριτική παυτάλη αριστερά και φυσική ποζολάνη δεξιά | 23 |
| Εικόνα 3.1 Διατομές διάφορων τύπων οδοστρωμάτων (FHWA 2015) | 35 |
| Εικόνα 3.2 Διατομές οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα | 37 |
| Εικόνα 3.3 Διατομή οδοστρώματος δύο στρώσεων αριστερά και κυβόλιθων σκυροδέματος δεξιά | 38 |
| Εικόνα 3.4 Παράδειγμα διατομής οδοστρώματος μεγάλης διάρκειας ζωής (FHWA 2015)... | 40 |
| Εικόνα 3.5 Διακύμανση της ηλιακής ανακλαστικότητας σε συμβατικά οδοστρώματα από σκυρόδεμα και ασφαλτικά με την πάροδο του χρόνου (EPA 2008)..... | 42 |
| Εικόνα 3.6 Παράδειγμα έκθεσης των εκ σχεδιασμού ανοιχτόχρωμων αδρανών στην επιφάνεια συμβατικού οδοστρώματος από σκυρόδεμα | 43 |
| Εικόνα 3.7 Κατασκευαστική διαδικασία ασφαλτικών οδοστρωμάτων..... | 49 |
| Εικόνα 3.8 Διαδικασία κατασκευής οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα | 50 |
| Εικόνα 3.9 Κατασκευαστική μέθοδος δύο επιπέδων | 51 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 3.10 Μέθοδος κυλινδρούμενου σκυροδέματος, RCC..... | 52 |
| Εικόνα 3.11 Εγκάρσια αριστερά και διαμήκης γράμμωση δεξιά | 53 |
| Εικόνα 3.12 Βούρτσισμα αριστερά και τριβή με χρήση διαμαντιών δεξιά | 53 |
| Εικόνα 4.1 Επιρροή της συντήρησης στην κατάσταση του οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου | 56 |
| Εικόνα 4.2 Διαδικασία πλήρωσης-επισφράγισης επιφανειακών ρωγμών ασφατικών οδοστρωμάτων..... | 58 |
| Εικόνα 4.3 Καλής ποιότητας τοπική επιδιόρθωση-μπάλωμα ασφατικού οδοστρώματος .. | 59 |
| Εικόνα 4.4 Τεχνική συντήρησης με τη μορφή γαλακτώματος αριστερά (fog seal) & με την εμφανή παρουσία λεπτόκοκκων αδρανών δεξιά (slurry seal) | 60 |
| Εικόνα 4.5 Κατασκευή λεπτής ασφατικής επίστρωσης σε υφιστάμενο οδόστρωμα..... | 61 |
| Εικόνα 4.6 Κατασκευή συνδεδεμένης επίστρωσης σκυροδέματος σε υπάρχον ασφατικό οδόστρωμα..... | 62 |
| Εικόνα 4.7 Πλήρωση-σφράγιση αρμών διαστολής οδοστρώματος από σκυρόδεμα | 64 |
| Εικόνα 4.8 Μηχανισμός βλήτρου αριστερά & τεχνική αντικατάστασης βλήτρων αρμών σε οδόστρωμα από σκυρόδεμα δεξιά | 64 |
| Εικόνα 4.9 Τοπική επιδιόρθωση οδοστρώματος από σκυρόδεμα..... | 65 |
| Εικόνα 4.10 Μόρφωση διαμήκους γράμμωσης/αυλάκωσης σε οδόστρωμα από σκυρόδεμα | 67 |
| Εικόνα 4.11 Θερμή επί τόπου ανακύκλωση ασφατικού οδοστρώματος | 68 |
| Εικόνα 4.12 Ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση ασφατικού οδοστρώματος | 69 |
| Εικόνα 4.13 Επί τόπου ανακύκλωση οδοστρώματος από σκυρόδεμα..... | 70 |
| Εικόνα 4.14 Μηχάνημα πλήρους βάθους ανάκτησης οδοστρώματος αριστερά & αντίστοιχη κεφαλή δεξιά..... | 71 |
| Εικόνα 5.1 Σχηματική περιγραφή του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους | 75 |
| Εικόνα 5.2 Περιοχή υποχωρήσεων και αντίστοιχες μετατοπίσεις ανά απόσταση από το σημείο φόρτισης..... | 76 |
| Εικόνα 5.3 Διατομές πριν και μετά την αποκατάσταση και σχηματική περιγραφή της διαδικασίας ανά στάδιο | 82 |
| Εικόνα 5.4 Διαδικασία παρασκευής αφρώδους ασφάλτου | 83 |
| Εικόνα 5.5 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους προσαρμοσμένο σε συσκευή ρυμούλκησης για ταχεία μέτρηση | 84 |
| Εικόνα 5.6 Συσκευή συστήματος γεωραντάρ (GPR) προσαρμοσμένη σε ειδικό όχημα για ταχεία μέτρηση | 85 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 5.7 Σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη δομικής κατάστασης (D_0) | 88 |
| Εικόνα 5.8 Σχεδιάγραμμα τύπου (box-plot) του δείκτη δομικής κατάστασης D_0 | 90 |
| Εικόνα 5.9 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{300} | 94 |
| Εικόνα 5.10 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη BDI | 95 |
| Εικόνα 5.11 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη BCI..... | 97 |
| Εικόνα 5.12 Σχεδιάγραμμα μεταβολής της υποχώρησης D_{1800} | 98 |
| Εικόνα 5.13 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του D_{1800} | 98 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

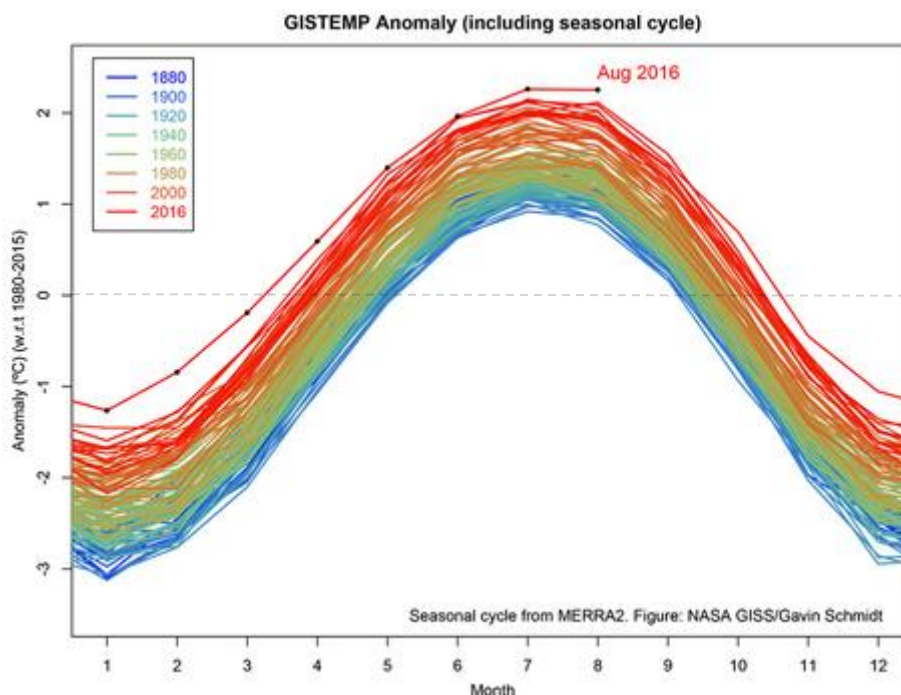
| | |
|--|----|
| Πίνακας 5.1 Παράμετροι δομικής κατάστασης οδοστρώματος | 77 |
| Πίνακας 5.2 Σταθερές συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας για τους αντίστοιχους δείκτες (Molenaar 2006)..... | 79 |
| Πίνακας 5.3 Ποιοτική κατηγοριοποίηση του οδοστρώματος βάση μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 40 kN (Hakim & Brown 2006) | 92 |
| Πίνακας 5.4 Προσεγγιστικές τιμές ποιοτικής κατηγοριοποίησης του οδοστρώματος για φορτίο 50 kN με βάση τους Hakim & Brown (2006)..... | 92 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

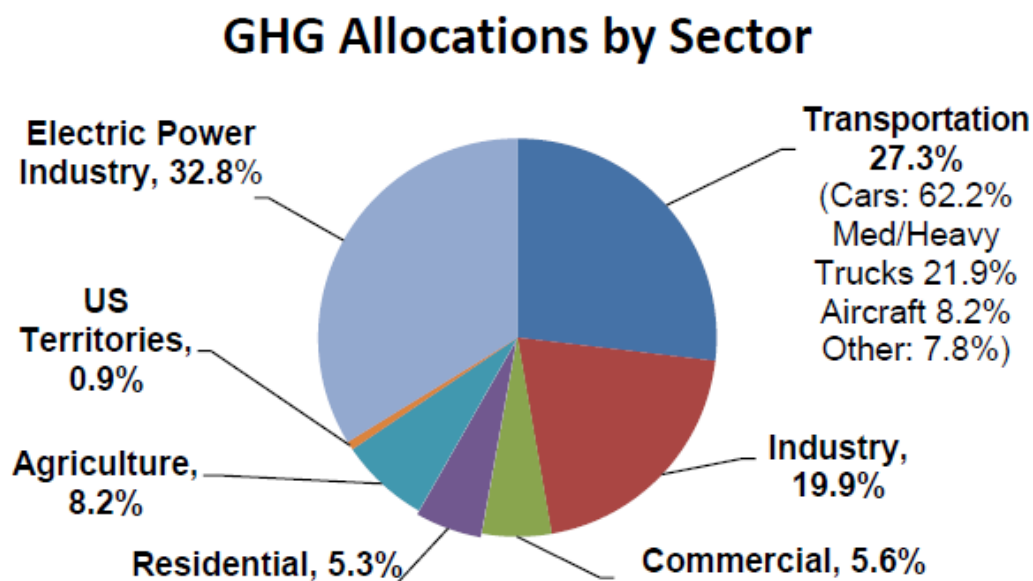
Οι κλιματικές δυσχερείς συνθήκες, η συνεχώς αυξανόμενη, παγκόσμια πλέον, οικονομική κρίση με σημάδια ύφεσης που προβληματίζει την κοινή γνώμη, η κοινωνική αναταραχή που επικρατεί, καθώς και η διαφαινόμενη εξάντληση μη ανανεώσιμων πηγών και πόρων λόγω υπερβολικής χρήσης, είναι γενικότερα στοιχεία, ικανά να αποτελέσουν αφορμή για μία ριζική αλλαγή σε πολλά επίπεδα, ώστε να διαφυλαχθεί η ακεραιότητα και να επανέλθει ισορροπία, στο σύστημα περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία. Τα πραγματικά αυτά γεγονότα, καθιστούν επιτακτική την υιοθέτηση βιώσιμων-αισιφόρων αναπτυξιακών συστημάτων, σε τομείς που πλήττουν και ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για την επικρατούσα κατάσταση, όπως ο τομέας των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής. Ήδη, αρκετές επιχειρήσεις και διεθνείς οργανισμοί έχουν επενδύσει σε τέτοιες καινοτόμες και εναλλακτικές στρατηγικές, με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και τη βελτίωση της οικονομικής και κοινωνικής διαχειριστικής πολιτικής.

Τα στοιχεία που φέρνει στο φως η Αμερικανική Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration), γνωστή και ως NASA, είναι διόλου ενθαρρυντικά. Οι μήνες Ιούλιος και Αύγουστος του τρέχοντος έτους, χαρακτηρίστηκαν ως οι θερμότεροι από την περίοδο που μετρήσεις της θερμοκρασίας ξεκίνησαν να συλλέγονται από διάφορες στατιστικές υπηρεσίες, από το 1880 δηλαδή (βλέπε εικόνα 1.1). Αλλά και γενικότερα μετά από 136 χρόνια μετρήσεων, το έτος 2016 παρουσίασε ακραίες μεταβολές και ορατή αντικανονικότητα σε σχέση με τις μέσες φυσιολογικές θερμοκρασίες, όντας μέχρι στιγμής, το θερμότερο που έχει ποτέ καταγραφεί (McCarthy & Cabbage 2016). Να τονιστεί, πως μία φυσιολογική διακύμανση θα ήταν μία νοητή οριζόντια γραμμή περί τον άξονα με την ένδειξη (0) στο σχετικό γράφημα ή τουλάχιστον μία προσέγγιση σε αυτήν. Αυτό φυσικά, είναι απόρροια της υπερ-υψηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, που ενισχύει το κοινώς γνωστό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα περιθώρια για να καταπολεμηθεί η κλιματική αυτή ύφεση είναι στενά για τις βιομηχανίες, τους παγκόσμιους οργανισμούς και τις διεθνείς κυβερνητικές πολιτικές, με άμεσες και αποτελεσματικές αλλαγές να καθίστανται αναγκαίο να λάβουν χώρα, μία προσπάθεια που δυσχεραίνει η δυσοίωνα οικονομική κατάσταση.



Εικόνα 1.1 Μηνιαία θερμοκρασιακή ανωμαλία-ανομοιομορφία ανά εικοσαετία (NASA GISS 2016)

Όσον αφορά τον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής, μεγάλο μερίδιο στην επιδείνωση του κλίματος κατέχει η βιομηχανία κατασκευής οδοστρωμάτων, και ειδικότερα οι επιπτώσεις από τη χρήση αυτών, όπως θα φανεί αργότερα. Σύμφωνα με την Αμερικανική Προστασία του Περιβάλλοντος (U.S. Environmental Protection Agency), ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του ποσοστού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) που αναλογεί στις μεταφορές στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, μία χώρα με προηγμένη τεχνολογία στον τομέα των μεταφορών που εμπνέει κατά καιρούς τη διεθνή κοινότητα, αγγίζει το 27,3% καταλαμβάνοντας τη δεύτερη θέση μετά από τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με αντίστοιχο ποσοστό 32,8% (βλέπε εικόνα 1.2). Φυσικά, το ποσοστό αυτό ενδέχεται να διαφέρει ανά χώρα. Με τη θεώρηση όμως, πως τα ποσοστά του σχετικού γραφήματος κρίνονται διεθνώς αντιπροσωπευτικά, αναδεικνύεται η σημαντική συμβολή των οδοστρωμάτων ως μέρος της συγκοινωνιακής υποδομής, στη ρύπανση του περιβάλλοντος, σε κλίμακα ανεπτυγμένων κρατών, στα οποία μάλιστα αναλογεί και η μεγαλύτερη ευθύνη.



Εικόνα 1.2 Ποσοστιαία κατανομή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα στις Η.Π.Α. (EPA 2013)

Σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας 1.2, σχεδόν το ένα τρίτο των εκπομπών καυσαερίου προέρχονται από τις μεταφορές. Φυσικά αυτό το εντυπωσιακά υψηλό ποσοστό σχετίζεται άμεσα με τον τομέα της συγκοινωνιακής υποδομής, καθώς το μεγαλύτερο δίκτυο μεταφορών (οδικοί άξονες, γέφυρες, αεροδρόμια, λιμάνια) καλύπτεται με την κατασκευή οδοστρωμάτων διάφορων τύπων. Θετικές αλλαγές στον τομέα αυτόν, μπορούν να συνεισφέρουν αισθητά στην εξάλειψη των συνολικών εκπομπών αερίων, εξυγιάνοντας την επικρατούσα κατάσταση. Με αφορμή την αρχή μίας σειράς βελτιωτικών αλλαγών στο σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, εισάγεται η έννοια της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων, με ό,τι αυτό συνεπάγεται, που είναι και το αντικείμενο της εργασίας αυτής.

1.2 Στόχος – Μεθοδολογία

Όπως προαναφέρθηκε, ο τομέας των μεταφορών και ειδικότερα της συγκοινωνιακής υποδομής, είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες με σημαντική επίδραση σε περιβάλλον, οικονομία και κοινωνία. Με το σύστημα των μεταφορών να περιλαμβάνει την κατασκευή αλλά και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων, το βάρος πέφτει στην ενσωμάτωση βιώσιμων στρατηγικών και λύσεων, με σκοπό την εξαγωγή θετικών και αποτελεσματικών στοιχείων. Οι επιδιώξεις των βιώσιμων οδοστρωμάτων, ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος, δεν είναι άλλες από την οικολογική και περιβαλλοντική συνείδηση και συμμόρφωση, σε βιομηχανικό ή και κατασκευαστικό επίπεδο. Ταυτόχρονα, στις επιδιώξεις αυτές ενσωματώνεται και η στροφή του ενδιαφέροντος σε πηγές και πόρους που μέχρι σήμερα παρέμεναν

αναξιοποίητοι, αλλά και σαφώς η χρήση νέων καινοτόμων τεχνικών, τόσο για την αξιοποίηση των διαφόρων υλικών, όσο και για την κατασκευή και αργότερα τη συντήρηση των οδοστρωμάτων, με πρόσθετο κίνητρο την ικανοποίηση των χρηστών σε ένα αρκετά θεμιτό επίπεδο.

Δεδομένων και των ανωτέρω, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη των βιώσιμων εναλλακτικών επιλογών, σε όλους του τομείς που συνδέονται με τα οδοστρώματα. Η διερεύνηση αφορά τα βιώσιμα υλικά και τις διαθέσιμες πρωτοποριακές τεχνολογίες, εν συνεχεία το σχεδιασμό και την κατασκευή, αλλά και αργότερα τη φάση λειτουργίας, με την τελευταία να ενσωματώνει βιώσιμες τεχνικές συντήρησης/αποκατάστασης, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων.

Μεθοδολογικά, ακολουθείται η ανασκόπηση και η ανάλυση των στοιχείων και των παραμέτρων της βιωσιμότητας που προκύπτουν από τη μέχρι σήμερα τεχνογνωσία, και αναπτύσσεται ο τρόπος με τον οποίο υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων. Επίσης γίνεται αναφορά στις βιώσιμες εναλλακτικές επιλογές και στρατηγικές, σε όλα τα στάδια που απαρτίζουν τη συνολική διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής, με ιδιαίτερη έμφαση στις θετικές επιδράσεις σε περιβάλλον, οικονομία και κοινωνία. Ως επιστέγασμα, διερευνάται και αξιολογείται η δομική κατάσταση ενός τμήματος βιώσιμου οδοστρώματος.

1.3 Δομή

Η εργασία αυτή αποτελείται από επτά κύρια κεφάλαια, στο σύνολο. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η έννοια της βιωσιμότητας ως γενικός αλλά και επί των οδοστρωμάτων όρος, καθώς και γίνεται λόγος για τα βιώσιμα υλικά και τις διαθέσιμες βιώσιμες τεχνολογίες.

Εν συνεχεία το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σχεδιασμό και στην κατασκευή βιώσιμων οδοστρωμάτων, θίγοντας τα αναζητούμενα χαρακτηριστικά και τους επιδιωκόμενους στόχους, αλλά και τους συμβιβασμούς για την επίτευξη ενός σχεδιασμού, εναρμονισμένου στις προδιαγραφές της βιωσιμότητας. Επίσης, επισημαίνονται και τα σημεία που πρέπει να προσεχθούν κατά τη μετάβαση από το σχεδιασμό στην κατασκευαστική διαδικασία, με κύριο γνώμονα την αποτελεσματικότητα και την αποφυγή ανεπιθύμητων αποκλίσεων.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Αντικείμενο του τετάρτου κεφαλαίου, είναι οι βιώσιμες τεχνικές συντήρησης και αποκατάστασης των οδοστρωμάτων. Γίνεται επίσης εκτενής αναφορά στη φάση λειτουργίας, αλλά και των σημαντικών επιπτώσεων αυτής, στο βαθμό της βιωσιμότητας.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά τη διερεύνηση της δομικής κατάστασης ενός βιώσιμου ασφαλτικού οδοστρώματος, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το βαθμό αποδοτικότητας του οδοστρώματος, αλλά και την αξιολόγηση του συγκεκριμένου βιώσιμου μοντέλου που υιοθετήθηκε.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά στα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από την ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας.

Το έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία-οδηγό για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

Στο τέλος παρατίθενται ως παράρτημα οι αριθμητικοί πίνακες που περιέχουν τα δεδομένα του οδοστρώματος, τα οποία αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

2 ΒΙΩΣΙΜΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.1 Η έννοια της βιωσιμότητας

Ο όρος «βιωσιμότητα» είναι κάπως σύνθετος. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Επιτροπή Περιβάλλοντος και Ανάπτυξης (World Commission on Environment and Development, WCED), βιώσιμη ανάπτυξη, είναι η ανάπτυξη που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του παρόντος χωρίς να αποτρέπει τη δυνατότητα οι επόμενες γενιές να ανταποκριθούν στις δικές τους ανάγκες (WCED 1987). Αυτός είναι ένας γενικός ορισμός για τον όρο βιωσιμότητα, και αφορά όλα τα συστήματα ανεξαιρέτως. Εστιάζοντας στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής και ειδικότερα στα οδοστρώματα, ο όρος βιώσιμα (sustainable) αναφέρεται στη συσχέτιση των οδοστρωμάτων με τις επιπτώσεις σε περιβάλλον, οικονομία και κοινωνία, σε όλα τα στάδια από το σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή και αργότερα τη φάση λειτουργίας. Είναι το λεγόμενο τρίπτυχο, το οποίο αποσκοπεί να υπηρετήσει ο όρος αυτός, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος κανόνας (βλέπε εικόνα 2.1). Ακόμα και αν υπάρχει τρόπος να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα οι τρεις βιώσιμοι συντελεστές-αρχές (περιβάλλον, οικονομία, κοινωνία) που συνθέτουν τον όρο βιωσιμότητα, ή πιο μαθηματικά να βρεθεί μία χρυσή τομή μεταξύ των μεταβλητών αυτών, ουσιαστικός σκοπός είναι τα πρότυπα που θα εφαρμοστούν, να συμμορφώνονται στις θεσμοθετημένες προδιαγραφές σε έναν ικανοποιητικό βαθμό, χωρίς να υποβαθμίζεται αισθητά κάποια από τις τρεις βασικές παραμέτρους (WCED 1987, FHWA 2015, NCRTC 2012, EUPAVE 2010).



Εικόνα 2.1 Τρίπτυχο βιωσιμότητας

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα, κάνοντας χρήση τροποποιημένου μείγματος ασφαλτικού σκυροδέματος σημειώνεται σημαντική αύξηση αντοχής, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο οικονομικό όφελος λόγω αυξημένης διάρκειας ζωής και μειωμένων απαιτήσεων για συντήρηση. Οι επιπτώσεις όμως στο περιβάλλον, λόγω χρήσης χημικών πρόσθετων και τεχνικών προτύπων που δεν συμμορφώνονται με τις περιβαλλοντικές προδιαγραφές, μπορεί να είναι αρνητικές, κάτι που σημαίνει πως στην προκειμένη περίπτωση, δεν υφίσταται βιώσιμη λύση (FHWA 2015).

Αναλύοντας περισσότερο τις τρεις αρχές της βιωσιμότητας περί οδοστρωμάτων, προκύπτει η πολυπλοκότητα μεταξύ των συμβιβασμών, που πρέπει να τηρηθούν για μία επιτυχημένη πρακτική εφαρμογή. Ειδικότερα:

- **Περιβάλλον:** κατανάλωση ενέργειας, εκπομπές ρυπογόνων αερίων, ηχορύπανση, ποιότητα ατμοσφαιρικού αέρα, διαχείριση όμβριων υδάτων.
- **Κοινωνία:** ασφάλεια, ομαλότητα, έξοδα λειτουργίας οχημάτων, εκπομπές καυσαερίων, προσβασιμότητα, κινητικότητα, αισθητική.
- **Οικονομία:** κόστος κατασκευής, έξοδα συντήρησης και αναμόρφωσης, λειτουργικά έξοδα οχημάτων, κόστος πιθανών ατυχημάτων.

Όλες αυτές οι μεταβλητές θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν, καθιστώντας πιο δυσχερή την έννοια της βιωσιμότητας, από ότι ίσως αρχικά φαινόταν. Μείζον ζήτημα, αποτελούν οι πολυάριθμοι συμβιβασμοί που πρέπει να τηρηθούν και οι κρίσιμες αποφάσεις που καλούνται να παρθούν σε διάφορα σημεία, ώστε καμία από τις τρεις αρχές να μην υπονομευτεί (περιβάλλον, οικονομία, κοινωνία). Η βέλτιστη λύση φαντάζει ουτοπική, καθώς η βιωσιμότητα είναι μη μετρήσιμη, και επίσης δεν υπάρχουν πιστοποιημένα πρότυπα και λογισμικά που να παρακάμπτουν με απόλυτη επιτυχία, το εμπόδιο αυτό. Η διαθέσιμη εμπειρία και τεχνογνωσία, μπορεί να αποβεί καταλυτική στα διάφορα στάδια του σχεδιαστικού, σε ορισμένες περιπτώσεις (FHWA 2015).

Αναλυτικότερα, τα οδοστρώματα ως επιμέρους κομμάτι ενός ευρύτερου συστήματος μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής, κατέχουν, πέρα από τη σημαντική συμβολή τους σε ρυπογόνες ουσίες και γενικότερα σε αέρια του θερμοκηπίου, αξιοσημείωτες επιπτώσεις (θετικές ή και αρνητικές) σε διάφορους άλλους τομείς. Μερικοί από αυτούς είναι (NCPTC 2012, FHWA 2015):

- **Κατανάλωση ενέργειας:** Για την κατασκευή, συντήρηση, πιθανή αναμόρφωση, αλλά και ανακύκλωση των οδοστρωμάτων, απαιτείται σημαντική ποσότητα ενέργειας. Ακόμα μεγαλύτερης σημασίας είναι η κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων κατά τη φάση λειτουργίας, με αυτή να εξαρτάται από τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε οδοστρώματος.
- **Αλλοίωση βιότοπων:** Οι αλλαγές στη μορφολογία του εδάφους αλλά και της ευρύτερης περιοχής, μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στους ζωντανούς οργανισμούς.
- **Ποιότητα των υδάτων:** Αλλαγές στη φυσική σύσταση του εδάφους καθώς και κακή διαχείριση των όμβριων, μπορεί να επιφέρει πολλά προβλήματα, όπως η κακή ποιότητα του νερού, πιθανές διαβρώσεις, υδατική μόλυνση και οικολογική αναταραχή.
- **Ατμοσφαιρικός αέρας:** Οι διαδικασίες κατασκευής του οδοστρώματος, αλλά και η εκπομπή καυσαερίων κατά τη χρήση των οχημάτων, υποβαθμίζει την ποιότητα του αέρα στην ευρύτερη περιοχή.
- **Η εξάντληση μη ανανεώσιμων πόρων:** Απαίτηση για μεγάλες ποσότητες αδρανών και πετρελαϊκών υλικών, συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς τους, επιβαρύνει την οικονομική και περιβαλλοντική κατάσταση, χωρίς σωστή διαχείριση.
- **Οικονομική ανάπτυξη:** Στα θετικά, είναι οι ευκαιρίες σχετικά με τις θέσεις εργασίας που δημιουργούνται, τόσο για τη συντήρηση των οδοστρωμάτων, όσο και την ενίσχυση τοπικών επιχειρήσεων λόγω αυξημένης προσβασιμότητας.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της Αμερικανικής Προστασίας του Περιβάλλοντος, *EPA (2009)* αλλά και έρευνας του *Muench (2010)*, περίπου 90% με 95% των συνολικών εκπομπών καυσαερίου και ρυπογόνων αερίων ουσιών στον τομέα των μεταφορών, προέρχεται από την κατανάλωση καυσίμων των οχημάτων κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος. Προσεγγιστικά, το υπόλοιπο 5% με 10 % οφείλεται στην κατασκευαστική φάση και στις μελλοντικές εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης των οδοστρωμάτων, στη διάρκεια του κύκλου ζωής. Ανάλογα με τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, που κοινώς ανέρχεται σε 40

με 50 έτη, τα ποσοστά αυτά μπορεί να αυξηθούν ή και να μειωθούν αντίστοιχα (*FHWA 2015, EPA 2009, Muench 2010*).

Από την ανωτέρω έρευνα, προκύπτει emphaticά πως η κατασκευή του οδοστρώματος, συμπεριλαμβάνοντας όλες τις απαραίτητες διαδικασίες μέχρι την περάτωση των εργασιών, δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλο αντίκτυπο στην παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου, ειδικότερα σε σχέση με τις προερχόμενες των οχημάτων εκπομπές, κατά τη φάση λειτουργίας. Όμως, παρά την αισθητή αυτή διαφορά-, και εδώ φαίνεται ο ρόλος των οδοστρωμάτων και της σημασίας της βιωσιμότητας σε αυτά-η επιρροή τους στη φάση λειτουργίας είναι καθοριστική. Τα κατασκευαστικά και επιφανειακά χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα των οχημάτων, ρυθμίζοντας τα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου και ακολούθως των εκπομπών καυσαερίων.

Οι επιδιώξεις των βιώσιμων οδοστρωμάτων, είναι γενικότερα η λήψη αποφάσεων φιλικών προς το περιβάλλον, ώστε να μην το υποβαθμίζουν σε μία τόσο κρίσιμη περίοδο. Η επένδυση σε νέες τεχνικές και πρωτοποριακά υλικά, προερχόμενα ακόμη και από την επεξεργασία της ανακύκλωσης, με σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής δυναμικής και συγχρόνως την αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος, αλλά και η διατήρηση της ποιότητας κατασκευής σε υψηλό επίπεδο, αποσκοπώντας στην ταυτόχρονη εκπλήρωση των κοινωνικών απαιτήσεων και αναγκών, είναι μερικές βασικές επιδιώξεις. Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό, όσον αναφορά τους συμβιβασμούς που πρέπει να τηρηθούν, αποφάσεις που εναρμονίζονται και με τις τρεις αρχές της βιωσιμότητας και δεν εξυπηρετούν μονόπλευρα κάποια ή κάποιες από αυτές, συντελούν σε μία επιτυχή προσπάθεια.

Η αβεβαιότητα σε αρκετά κρίσιμα σημεία, η έλλειψη πιστοποιημένων προτύπων, καθώς και η υιοθέτηση μεθόδων, βασιζόμενων κυρίως στην εμπειρία, εμπλέκουν ένα ποσοστό ενδεχόμενης διακύβευσης. Πολλές φορές, επιλογές που βασίζονται περισσότερο στις πιθανότητες, μπορούν να οδηγήσουν σε αποτυχημένες προσπάθειες. Με κατάλληλη όμως μελέτη από πολλές οπτικές γωνίες, και με τις πιθανότητες να τείνουν προς τα θετικά, ελεγχόμενης διακύβευσης εγχειρήματα αξίζει να επιχειρηθούν, και τις περισσότερες φορές μάλιστα αποδίδουν. Άλλωστε, καμία πρόοδος δεν επιτεύχθηκε χωρίς καμία διακύβευση.

2.2 Βιώσιμα υλικά

2.2.1 Γενικά

Ένα σημαντικό, ίσως και το σπουδαιότερο σημείο αναφοράς για τη συμπεριφορά και την απόδοση του οδοστρώματος, είναι τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Η μεγαλύτερη προσοχή δίνεται σε αυτά, καθώς ο ρόλος τους στα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, αλλά και συγχρόνως η συμβολή τους στο βαθμό της βιωσιμότητας, είναι τεράστιας σημασίας. Από τη διάθεση, μέχρι την τελική επεξεργασία και μεταφορά τους, μεσολαβούν διαδικασίες και διεργασίες, η προσεκτική και σχολαστική διαχείριση των οποίων, μπορεί να συμβάλλει θετικά στο τρίπτυχο περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία.

Τα κυριότερα υλικά κατηγοριοποιούνται σε αδρανή (όλων των τύπων), ασφαλτικά υλικά (τροποποιημένα ή μη), σε υλικά με κύριο συστατικό το συμβατικό τσιμέντο, καθώς και σε διάφορα άλλα υλικά, σε μικρότερο όμως ποσοστό. Μεγάλη απήχηση έχουν πλέον και τα προϊόντα ανακύκλωσης, τα οποία με κατάλληλη μελέτη και έρευνα, μπορούν να αντικαταστήσουν επάξια τα συμβατικά υλικά, εφόσον φυσικά το επιτρέπει η μετά το τέλος ζωής τους εμπορευματική αξία (*USGS 2013a, FHWA 2015*).

Σκέψεις και προβληματισμοί που αποτελούν πρόκληση, σχετικά με τη συμπεριφορά και απόδοση της κατασκευής, έχουν οδηγήσει σε βελτίωση των εφαρμοζόμενων μεθόδων. Ερωτήματα όπως η αντοχή, η εργασιμότητα, η διάρκεια ζωής, η συμπεριφορά προς το περιβάλλον, η δυνατότητα διάθεσης και μεταφοράς υλικών, η ανταπόκρισή τους στα απαιτούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά και γενικότερα η συνδρομή των υλικών προς ένα βιώσιμο χαρακτήρα, συμμετέχουν στη λήψη σημαντικών αποφάσεων για την επιτυχία του κάθε εγχειρήματος. Η εστίαση γίνεται στη διαχείριση των ανακυκλώσιμων υλικών και των παραπροϊόντων, έτσι ώστε αυτά, αφενός να αποτελέσουν άμεσους πόρους χωρίς να υποβαθμίζουν τη λειτουργικότητα και ποιότητα της κατασκευής, αφετέρου να επιφέρουν οικονομικά, περιβαλλοντικά και κατά δεύτερο λόγο, κοινωνικά οφέλη.

2.2.2 Αδρανή υλικά

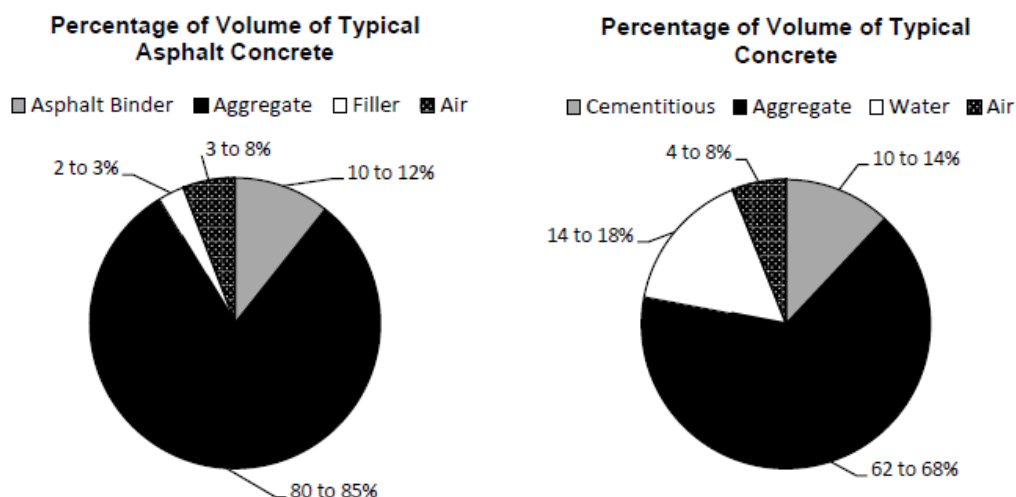
Ως γνωστόν, τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο όγκο στην κατασκευή συμβατικών οδοστρωμάτων, ως κύριο συστατικό σε ασφαλτικά μείγματα και μείγματα σκυροδέματος. Επίσης, χρησιμοποιούνται ευρέως ως βασικό υλικό πλήρωσης για κατώτερες στρώσεις, όπως για παράδειγμα η βάση και η υπόβαση του οδοστρώματος. Το κόστος αγοράς τους είναι γενικά χαμηλό, η μεταφορά και η διάθεση τους όμως κατά μήκος του

έργου, μπορεί να είναι αντιοικονομικές, αλλά και συγχρόνως επιβαρυντικές προς το περιβάλλον. Τα πιο δημοφιλή αδρανή για την κατασκευή οδοστρωμάτων, διακρίνονται σε αδρανή προερχόμενα από το θρυμματισμό πετρωμάτων, σε τεχνητή άμμο και σε αμμοχάλικο. Προέρχονται κυρίως έπειτα από τεχνητή επεξεργασία, όπως ο θρυμματισμός, και αργότερα διαβαθμίζονται σε ειδικά κόσκινα ανάλογα με τη διάμετρό τους. Ακόμη, συναντώνται και αυτούσια, σε φυσική μορφή και συγκεκριμένα σε αλλουβιακές αποθέσεις (βλέπε εικόνα 2.2) (USGS 2013a, NCPTC 2012, FHWA 2015).



Εικόνα 2.2 Φυσικά αδρανή αριστερά και τεχνητά θρυμματισμένα δεξιά

Σύμφωνα με τους *Tayabji et. al. (2010)*, τα αδρανή καταλαμβάνουν το 80% με 85% του όγκου ενός τυπικού ασφαλτικού μείγματος σκυροδέματος, και γύρω στο 62% με 68% του όγκου ενός συμβατικού μείγματος σκυροδέματος, ποσοστά που αποδεικνύουν το σημαντικό τους ρόλο (βλέπε εικόνα 2.3). Αδρανή υλικά προϊόντα θρυμματισμού, είναι κυρίως γωνιώδη, ενώ αυτά που συλλέγονται από αλλουβιακές αποθέσεις, εμφανίζουν χαρακτηριστικά λείες επιφάνειες, χωρίς πολλές γωνίες. Τα πρώτα, χρησιμοποιούνται στα επιφανειακά στρώματα του οδοστρώματος, παρέχοντας μεγαλύτερη σταθερότητα και αντοχή, ενώ τα δεύτερα, λόγω μειωμένης χαρακτηριστικής αντοχής αλλά καλών επιπέδων εργασιμότητας, τοποθετούνται σε κατώτερες στρώσεις μικρότερων εντατικών απαιτήσεων (USGS 2013a, *Tayabji et.al. 2010*, FHWA 2015).



Εικόνα 2.3 Ποσοστά καταλαμβανόμενου όγκου αδρανών σε ασφαλτικά μείγματα αριστερά και σε συμβατικό σκυρόδεμα δεξιά (Tayabji et. al. 2010)

Απόρροια της απαίτησης για εκτενή επεξεργασία, όπως η ανατίναξη, η γεώτρηση και ακολούθως η θραύση των τεχνητών αδρανών, είναι σαφώς η κατανάλωση μεγαλύτερης ποσότητας σε ενέργεια και η εκπομπή περισσότερων επιβλαβών ρυπογόνων αερίων, σε αντίθεση με τα φυσικά αδρανή, τα οποία χρησιμοποιούνται χωρίς να προηγηθεί ιδιαίτερη επεξεργασία, επηρεάζοντας όμως αρνητικά την ισορροπία πολλών υδροβιότοπων.

Τα κυριότερα αδρανή υλικά, προϊόντα ανακύκλωσης, έχουν σημαντικές προοπτικές βιωσιμότητας στον τομέα των οδοστρωμάτων, και προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την ανακύκλωση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, όταν αυτά πλησιάζουν το τέλος του κύκλου ζωής τους. Αναφορικά, αυτά είναι (FHWA 2015, NCPTC 2012):

- **Ανακτημένο Ασφαλτικό Οδόστρωμα** (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP), όπου ανώτερα ασφαλτικά στρώματα, με κατάλληλη επεξεργασία όπως η ψυχρή άλεση-ανακύκλωση, ανακτώνται από το υφιστάμενο οδόστρωμα, προς απώτερη χρήση στη κατασκευή νέων, ως υλικό βάσης ή και υπόβασης (βλέπε εικόνα 2.4). Επίσης, συνήθης είναι και η χρησιμοποίησή του σε νέα ασφαλτικά μείγματα, συναντώνται όμως σε σχετικά χαμηλά ποσοστά.



Εικόνα 2.4 Ανακτημένο ασφαλτικό υλικό οδοστρώματος, RAP

- **Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (Recycled Concrete Aggregate, RCA)**, τα οποία προέρχονται από τη θραύση σκυροδεματικών στρώσεων οδοστρωμάτων (βλέπε εικόνα 2.5). Τα αδρανή αυτά είναι κυρίως γωνιώδη, και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, τις πλείστες περιπτώσεις ως βάση και ως υπόβαση. Παρά την ανακυκλώσιμη φύση τους, χαρακτηρίζονται από σημαντικά επίπεδα αντοχής, ικανή να συγκριθεί ακόμη και με αυτή των συμβατικών.



Εικόνα 2.5 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, RCA

- **Ανακυκλωμένες Ασφαλτικές Πλάκες** κτιριακών στεγών (Recycled Asphalt Shingles, RAS), αποτέλεσμα ανακύκλωσης ασφαλτικών πλακών, που χρησιμοποιούνται ως στέγαση σε κατοικίες κυρίως του εξωτερικού (βλέπε εικόνα 2.6). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αργότερα, σε ποσοστά της τάξεως του 50% ως ένας συνδυασμός ασφαλτικού συνδετικού υλικού, μαζί, συνήθως με λεπτόκοκκα αδρανή, σε νέα μείγματα ασφαλτικών στρώσεων.



Εικόνα 2.6 Ανακυκλωμένες ασφαλτικές στέγες πριν και μετά, RAS

- **Μεταλλουργική Σκωρία** (Steel Furnace Slag, SFS), η οποία είναι ένα παραπροϊόν που προέρχεται έπειτα από διάφορες διαδικασίες παρασκευής και επεξεργασίας χάλυβα (βλέπε εικόνα 2.7). Αν και παρουσιάζει μερικές ιδιορρυθμίες, μπορεί να χρησιμεύσει σε ασφαλτικά μείγματα, ίσως και σε περιπτώσεις σκυροδέτησης, έπειτα όμως από λεπτομερή μελέτη. Προτείνεται επίσης για αντιολισθηρές στρώσεις κυκλοφορίας.



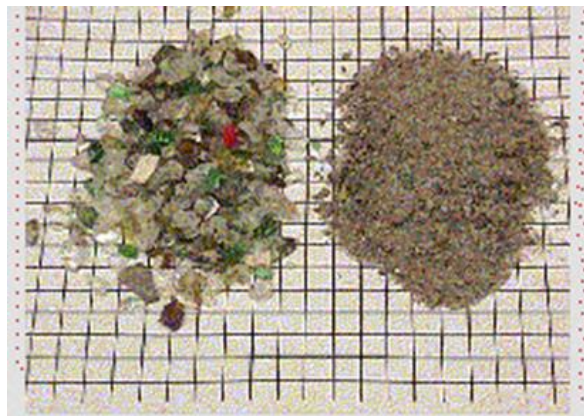
Εικόνα 2.7 Μεταλλουργική σκωρία

- **Άμμος Χυτηρίου** (Foundry Sand), παράγωγο επεξεργασίας μετάλλων (βλέπε εικόνα 2.8). Οι δυνατότητες χρήσης της ποικίλουν, με τη μερική αντικατάσταση λεπτόκοκκων αδρανών και παιπάλης σε ασφαλτικά μείγματα, να είναι η δημοφιλέστερη. Επίσης, απαιτείται επαρκής μελέτη για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς της, για την αποφυγή δυσλειτουργιών και πρόωρων αστοχιών.



Εικόνα 2.8 Άμμος χυτηρίου

- **Άχρηστα Υαλικά** (Waste Glass, WG), προτεινόμενα ως εναλλακτική πηγή αδρανών υλικών στην κατασκευή ασφαλτικών και σκυροδεματικών οδοστρωμάτων (βλέπε εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9 Άχρηστα υαλικά

Η αυξανόμενη αντοχή του υλικού αυτού με την πάροδο του χρόνου, αλλά και η ομαλή επιφάνειά τους έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, επιτρέπει την παρουσία τους σε διάφορα ποσοστά, ανάλογα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις, σε μείγματα ασφαλικών επιφανειακών στρώσεων (*Jamshidi et. al. 2016*). Λόγω έλλειψης ικανοποιητικής έρευνας στον τομέα αυτό, σημαντική είναι η αξιοποίηση υφιστάμενων μελετών και πειραματικών αποτελεσμάτων, για την ορθή χρησιμοποίησή τους, χωρίς να αμφισβητείται η ακεραιότητα του έργου.

2.2.3 Ασφαλτικά υλικά

Σημαντική θέση στην κατασκευή των οδοστρωμάτων, κατέχουν τα ασφαλτικά υλικά και μείγματα. Τα περισσότερα συμβατικά οδοστρώματα είναι ασφαλικής φύσεως, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει, πως οδοστρώματα από σκυρόδεμα δεν συναντώνται. Τα κυριότερα από αυτά, είναι παράγωγα της διύλισης του πετρελαίου και της κλασματικής απόσταξης του. Το πιο δημοφιλές είναι η λεγόμενη πίσσα ή άσφαλτος, βασικό συστατικό ασφαλικού σκυροδέματος. Τα ασφαλτικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως και ως συνδετικά υλικά, σε διάφορα ασφαλτικά μείγματα, ή/και για τη σύνδεση ασφαλικών στρώσεων.

Αν και την προηγούμενη δεκαετία η αξία τους ήταν αρκετά χαμηλότερη, παράγοντες όπως η οικονομική κρίση και η εξάντληση αρκετών πηγών και πόρων, έχει εκτοξεύσει την τιμή του πετρελαίου, κατά συνέπεια και την εμπορική αξία των διάφορων ασφαλικών υλικών. Πλεονεκτήματα σχετικά με τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, όπως η ομαλότητα, η μακροϋφή και η μείωση θορύβου, δύσκολα μπορούν να βρεθούν σε άλλον τύπο οδοστρώματος. Αυτός είναι και ένας από τους βασικούς λόγους, στους οποίους συνολικά οφείλεται και η ευρεία χρήση τους. Στα αρνητικά, σημειώνεται η μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω των διαδικασιών παραγωγής τους, η συμβολή στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πόρων όπως το ορυκτό πετρέλαιο, αλλά και η εκπομπή άλλων επιβαρυντικών και επικίνδυνων για την υγεία ουσιών, ειδικά με τη χρήση τροποποιητών και χημικών πρόσθετων.

Η τεχνολογία στον τομέα των υλικών, σε συνεργασία με την ανακύκλωση, έχουν συμβάλλει στο λανσάρισμα νέων ασφαλικών υλικών και νέων πρωτοποριακών συστάσεων σε ασφαλτικά μείγματα, ικανά να αποτελέσουν ένα σημαντικό βήμα προς τη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων. Αναφορικά, τα κυριότερα βιώσιμου χαρακτήρα ασφαλτικά υλικά και μείγματα είναι (*FHWA 2015*):

- **Πίσσα ή αλλιώς άσφαλτος**, που είναι και το συνηθέστερο υλικό όπως προαναφέρθηκε. Χρησιμοποιείται σε ασφαλτικά μείγματα ως συνδετικό υλικό, συνεργαζόμενο με αδρανή και άλλα πρόσμικτα.
- **Ασφαλτικό γαλάκτωμα**, (Asphalt Emulsion) που είναι ένα υδατικό διάλυμα ασφάλτου σε αναλογία περίπου 50:50, με την παρουσία μικρών ποσοτήτων σε χημικά πρόσθετα. Η χρήση του συναντάται σε αρκετές περιπτώσεις όπως για τη σύνδεση και συγκόλληση δύο ασφαλτικών στρώσεων, σε ασφαλτοϋδαρή μείγματα, σε μείγματα ασφαλτοπολτού και γενικότερα σε διάφορα ασφαλτικά μείγματα, χαμηλής σχετικά αντοχής. Χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως, σε βιώσιμες τεχνικές συντήρησης.
- **Ασφαλτικό Μείγμα Υψηλής Θερμοκρασίας** (Hot-Mix Asphalt, HMA), που προέρχεται από την ανάμειξη υψηλής διαβάθμισης αδρανών υλικών μαζί με ασφαλτικό τσιμέντο, σε θερμοκρασία 135 με 165 °C. Χρησιμοποιείται ως κύρια ισοπεδωτική κατασκευαστική στρώση, σε όλους τους τύπους οδοστρωμάτων.
- **Θερμό Ασφαλτικό Μείγμα** (Warm-Mix Asphalt, WMA), παρόμοιας σύστασης με του αντίστοιχου υψηλής θερμοκρασίας, με τη διαφορά όμως στην παρουσία χημικών πρόσθετων, τα οποία ευθύνονται για την εργασιμότητα και τη δυνατότητα επαρκούς συμπίκνωσης του ασφαλτικού μείγματος, σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, της τάξεως των 15 με 25 °C. Αποτελεί μία νέα, πρωτοποριακή τεχνική, με αρκετές βιώσιμες προοπτικές, χάρη στη μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στη διευκόλυνση σε θέματα μεταφοράς, αφού δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη εργοστασίου για τη θέρμανση και παραγωγή του ασφαλτικού μείγματος. Προσοχή απαιτείται στις επιπτώσεις των χημικών πρόσθετων στο περιβάλλον, καθώς η παρασκευή αυτών, έχει σημαντική επίδραση στο βαθμό της βιωσιμότητας.
- **Ασφαλτικό μείγμα ανοικτής διαβάθμισης**, με την ύπαρξη κυρίως χονδρόκοκκων αδρανών. Είναι γενικώς υδατοπερατό μείγμα και έχει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μείωση του θορύβου, η βελτίωση της επιφανειακής κύλισης και η μείωση του κινδύνου υδρολίθωσης. Δεν συνιστάται μέχρι στιγμής σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων υψηλής κυκλοφορίας.

- **Ασφαλτοϋδαρή μείγματα** (chip seals, fog seals, slurry seals), αποτελούμενα από ασφαλτικό γαλάκτωμα, με προαιρετική την παρουσία λεπτόκοκκων αδρανών και παιπάλης (βλέπε εικόνα 2.10). Γνωρίζουν ευρεία χρήση σε εργασίες συντήρησης και αναμόρφωσης των οδοστρωμάτων, με σκοπό τη βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών.



Εικόνα 2.10 Ασφαλτοϋδαρές επισφραγιστικό μείγμα (fog seal)

- **Ψίχα από Καουτσούκ** (Crumb Rubber) προερχόμενη κυρίως από φθαρμένα ελαστικά, αφού πρώτα αφαιρεθούν με κατάλληλη επεξεργασία τα λινά, η χαλύβδινη δηλαδή ενίσχυση (βλέπε εικόνα 2.11). Προορίζεται για χρήση σε ασφαλτικά μείγματα, κατάλληλα για επιφανειακές επιστρώσεις, λόγω σημαντικής μείωσης των επιπέδων του θορύβου, αλλά και της αντιολισθηρής συμπεριφοράς. Αποτελεί μία αξιόλογη βιώσιμη πρόταση, καθώς αξιοποιεί υλικά που θεωρούνταν άχρηστα, μειώνοντας ταυτόχρονα τη ζήτηση για νέα ασφαλτικά υλικά.



Εικόνα 2.11 Ψίχα από καουτσούκ, (Crumb Rubber)

- **Τροποποιημένο-ρητινούχο Ασφαλτικό Μείγμα** (Polymer-Modified Asphalt, PMA), ασφαλτικό μείγμα με την παρουσία διάφορων τροποποιητών, με σκοπό την αύξηση της αντοχής και της απόδοσης, σε ακραίες μάλιστα θερμοκρασιακές συνθήκες (βλέπε εικόνα 2.12). Συναντάται σε επιφανειακές επιστρώσεις, αλλά και σε μείγματα ασφαλτοπολτού, κυρίως για εφαρμογές συντήρησης/αναμόρφωσης.



Εικόνα 2.12 Ασφαλτος τροποποιημένη με πολυμερή, PMA

Ασφαλτικό υλικό μπορεί να θεωρηθεί και το ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα, για το οποίο έγινε λόγος στην κατηγορία των βιώσιμων εναλλακτικών αδρανών υλικών προϊόντων ανακύκλωσης, λόγω της συνύπαρξης αδρανών και συνδεδετικού ασφαλτικού υλικού. Διάφορα στοιχεία σχετικά με τη χρήση του σε ασφαλτικά μείγματα, αφορούν την απαιτούμενη

αναλογία, αλλά και την τοποθέτηση στην κατάλληλη στρώση. Για στρώσεις όπως η βάση ή η υπόβαση ενός τυπικού οδοστρώματος, διάφοροι οργανισμοί προτείνουν το ποσοστό αντικατάστασης των νέων αδρανών να ανέρχεται σε 50% το μέγιστο, λόγω σχετικά χαμηλών εντατικών απαιτήσεων. Για επιφανειακές επιστρώσεις το ποσοστό αυτό μειώνεται σε 15% με 30%, εξαιτίας των υψηλότερων απαιτήσεων σε αντοχή και λόγω των αντίστοιχα κρίσιμων λειτουργικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, η θερμοκρασία για τη θέρμανση του ήδη υπάρχοντος ανακτημένου συνδετικού κατά την επαναχρησιμοποίησή του, είναι αισθητά χαμηλότερη από αυτήν που απαιτείται σε ένα νέο ασφαλτικό μείγμα, κάτι που φυσικά αποτελεί θετικό στοιχείο (*Tatari et. al. 2011, FHWA 2015*).

2.2.4 Υλικά σκυροδέματος

Μία άλλη βασική κατηγορία υλικών σχετικά με την κατασκευή οδοστρωμάτων, είναι τα υλικά που απαιτούνται για τη σύνθεση μειγμάτων σκυροδέματος. Το συμβατικό σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή διάφορης διαβάθμισης, τσιμέντο και νερό. Παρουσιάζει σημαντική αντοχή, και λόγω της ικανότητας ανάληψης ισχυρού φορτίου, συχνή είναι η χρήση του στην κατασκευή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, τα οποία συναντώνται κυρίως σε αεροδρόμια, λιμάνια και σταθμούς διοδίων. Η ποιότητα των υλικών, η σωστή αναλογία/σύνθεση και οι καλές συνθήκες σκυροδέτησης, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα και στη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα (*NCPTC 2012*).

Η διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ειδικότερα, όσον αφορά το Τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland Cement) που είναι και το συνηθέστερο στην αγορά, η περιεκτικότητά του σε χημικά συστατικά διάφορα του κλίνκερ και του γύψου, το καθιστούν μη φιλικό προς το περιβάλλον. Η απαιτούμενη διαδικασία θέρμανσης σε ειδικό κλίβανο, καθώς και πολλαπλές διεργασίες διαχωρισμού και ανάμειξης στα αντίστοιχα εργοστάσια, καταναλώνουν αρκετή ποσότητα ενέργειας, είτε αυτή είναι ηλεκτρική, είτε προέρχεται από ορυκτά καύσιμα που καταναλώνουν κάποια εργοστασιακά μηχανήματα. Λαμβάνοντας υπόψιν και τις εκπομπές αερίων, ίσως θα πρέπει να γίνουν κάποιες σκέψεις για μία πιο βιώσιμη παραγωγική διαδικασία (*FHWA 2015*).

Η έρευνα πάνω σε νέα υλικά βιώσιμου χαρακτήρα, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά, είναι μία καλή στρατηγική με προοπτικές θετικών αλλαγών σε περιβάλλον, οικονομία και γενικότερα κοινωνία. Η σημερινή τεχνολογία στο κομμάτι αυτό, συνιστά τη χρήση Συμπληρωματικών Υλικών Σκυροδέματος (Supplementary Cementitious Materials, SCMs), όπως αποκαλούνται. Τα κυριότερα από αυτά είναι (*NCPTC 2012, FHWA 2015*):

- **Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash)**, η οποία συλλέγεται από καπνοδόχους μονάδων παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν με την καύση άνθρακα (βλέπε εικόνα 2.13). Οι ιδιότητες της διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του άνθρακα. Μπορούν να αντικαταστήσουν το συμβατικό τσιμέντο, σε ποσοστό μέχρι και 40%. Η αξιοποίηση της, καθώς αποτελεί παραπροϊόν, συμβάλλει θετικά στη μείωση της ζήτησης σε συμβατικό τσιμέντο. Σημαντικό στοιχείο, είναι και η μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού στο μείγμα. Με κατάλληλη μελέτη και εργαστηριακές δοκιμές για την κατανόηση των ποικίλων ιδιοτήτων της, αποφεύγονται προβλήματα αποδοτικότητας, ποιότητας αλλά και αξιοπιστίας.



Εικόνα 2.13 Ιπτάμενη τέφρα δεξιά σε σύγκριση με συμβατικό τσιμέντο

- **Σκωριοτσιμέντο (Slag Cement)**, βιομηχανικό παραπροϊόν, παραγόμενο από την επεξεργασία μετάλλων όπως ο σίδηρος και κραμάτων όπως ο χάλυβας, παρόμοιας σύστασης με τη μεταλλουργική σκωρία (βλέπε εικόνα 2.14). Κύρια διαφορά, είναι πως στην προκειμένη περίπτωση συλλέγονται τα λεπτόκοκκα κλάσματα, κοινής διαβάθμισης με αυτήν του συμβατικού τσιμέντου. Παρουσιάζει εξίσου πολλαπλές ιδιαιτερότητες, όπως και η ιπτάμενη τέφρα. Το προτεινόμενο ποσοστό της σε μείγματα σκυροδέματος, φτάνει μέχρι και το 35%. Επίσης, το ανοιχτό χρώμα που προσδίδει στο σκυρόδεμα, δρα ευεργετικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω αυξημένης ανακλαστικότητας. Άλλα πλεονεκτήματα, όπως οι μειωμένες απαιτήσεις ποσότητας νερού στο μείγμα, η υψηλή εργασιμότητα και η αντίσταση στη δημιουργία ρωγμών, αυξάνουν τη δυναμική του, ως εναλλακτικό βιώσιμο υλικό.



Εικόνα 2.14 Σκωρισσιμέντο

- Άλλα είδη, όπως η **Πυριτική Παιπάλη** (Silica Fume) και διάφορες **Φυσικές Ποζολάνες** (Natural Pozzolans), με σπανιότερη χρήση σε μείγματα σκυροδέματος για την κατασκευή οδοστρωμάτων (βλέπε εικόνα 2.15).



Εικόνα 2.15 Πυριτική παιπάλη αριστερά και φυσική ποζολάνη δεξιά

Ειδικότερα για τις ποζολάνες που προέρχονται από φυσικές πηγές και βιομάζες, αυτές αποτελούν μία καλή εναλλακτική λύση για την αντικατάσταση σημαντικού ποσοστού συμβατικού τσιμέντου σε μείγματα σκυροδέματος, λόγω του πλεονεκτήματος της φυσικής τους ύπαρξης, με συνέπεια την ελάχιστη απαίτηση επεξεργασίας.

2.3 Βιώσιμες τεχνολογίες

Με την ανακύκλωση να γνωρίζει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, προσπάθειες και μελέτες έχουν συνταχθεί, με σκοπό τη χρήση και ενσωμάτωση στο σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, πρωτοποριακών τεχνικών προς αντικατάσταση των συμβατικών υλικών, με τα ανακυκλώσιμα. Πραγματοποιώντας ένα τέτοιο εγχείρημα, μπορεί να σημειωθεί μεγάλη εξοικονόμηση των αποθεμάτων σε αδρανή, αλλά και άλλα υλικά, μη ανανεώσιμης φύσης, συμβάλλοντας θετικά και στο οικονομικό ζήτημα, που προβληματίζει συνεχώς τις ανάδοχες εταιρίες και τους αρμόδιους φορείς. Ταυτόχρονα, με τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, μειώνεται σημαντικά η ανάγκη για υγειονομική ταφή και για χώρους εναπόθεσης, συμβάλλοντας έτσι, σε μία πιο βιώσιμη ανάπτυξη.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των υλικών, και ειδικότερα η έννοια της ανακύκλωσης, έχει εισβάλλει δυναμικά στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Προβλήματα όπως η εξαντλήσιμη ποσότητα αδρανών, το υψηλό κόστος μεταφοράς και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος με την υγειονομική ταφή και την εναπόθεση αχρησιμοποίητων υλικών μετά το πέρας ζωής ενός έργου, έχουν οδηγήσει σε νέες τακτικές και σκέψεις αποσκοπώντας στην αξιοποίηση των μεθόδων ανακύκλωσης. Κατώτερα στρώματα του οδοστρώματος, χωρίς υπερβολικές κατασκευαστικές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα μία στρώση υπόβασης η ακόμη και βάσης, δεχόμενες χαμηλότερη εντατική καταπόνηση των αντίστοιχων επιφανειακών, μπορεί να προσφερθούν για ανακυκλώσιμα υλικά, δεδομένου ότι η ποιότητα και η αντοχή των συγκεκριμένων, είναι σαφώς μειωμένη από αυτή των αντίστοιχων συμβατικών.

Οι ανεπτυγμένες δυνατότητες ανακύκλωσης και η εισήγηση νέων τεχνολογικών προτύπων που αφορούν ανακυκλώσιμα υλικά, αποδεικνύουν πως ουσιαστικά η ζωή του οδοστρώματος παρατείνεται, με την προοπτική να αποτελέσει ενδεχομένως και αργότερα ανακυκλώσιμη πηγή, που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή άλλων οδοστρωμάτων ή ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις, να χρησιμεύσει ως η θεμελίωση για την έδραση μίας νέας επί τόπου (in situ) κατασκευής. Εάν ο οικονομικός παράγοντας επιτρέψει την πραγματοποίηση τέτοιων εγχειρημάτων, τότε όλα οδεύουν προς μία βιώσιμη λύση. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας και μεταφοράς των διάφορων ανακυκλώσιμων υλικών, αυτά δεν αξιοποιούνται εν τέλει, αλλά οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής και σε αποθεσιοθαλάμους. Σε αυτό, οφείλεται εν μέρει ο βαθμός ανάπτυξης στον τομέα της ανακύκλωσης υλικών, και ειδικότερα στον τομέα κατασκευής των οδοστρωμάτων.

Σχετικά με το κατασκευαστικό σκέλος, ένα σημαντικό ερώτημα τίθεται για τους τρόπους με τους οποίους θα ενσωματωθούν στο οδόστρωμα τα ανακυκλώσιμα υλικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, σε τι βαθμό και ποσοστό θα συμβεί αυτό, και ποιες θα πρέπει να είναι οι προδιαγραφές τους, σε ένα βιώσιμο κατασκευαστικό περιβάλλον. Κάθε υλικό που αντικαθιστούν, έχει έναν καθορισμένο ρόλο στο οδόστρωμα, και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Στόχος είναι η βέλτιστη αξιοποίηση των υλικών αυτών, χωρίς να θυσιάζονται θεμελιώδη κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, κάτι που θα είχε αρνητικές επιπτώσεις σε οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, όντας αυτομάτως μη βιώσιμη λύση (FHWA 2015).

Από την άλλη πλευρά, η αλόγιστη χρήση των υλικών αυτών έχει ως επακόλουθα τη μειωμένη αντοχή, την πιθανότητα πρόωρης αστοχίας και την ελλιπή απόδοση και συμπεριφορά, παράγοντες που πλήττουν άμεσα της αρχές ενός βιώσιμου συστήματος. Για τη σωστή αναλογία και σύσταση των ασφαλτικών μειγμάτων, θα πρέπει να ακολουθηθούν κάποιες ενέργειες που θα εξασφαλίσουν την αποφυγή ανεπιθύμητων κατασκευαστικών και λειτουργικών ατελειών, καθώς και πιθανών δυσλειτουργιών. Η κατανόηση της λειτουργίας και των κατασκευαστικών απαιτήσεων κάθε στρώσης, η επιλογή του κατάλληλου ασφαλτικού υλικού και μείγματος, συμπεριλαμβανομένων και των αδρανών, η χρήση του κατάλληλου ασφαλτικού συνδετικού, αλλά και η βέλτιστη αναλογία ανακυκλώσιμου υλικού χωρίς υποβάθμιση της αντοχής και της ποιότητας, είναι απαραίτητα στοιχεία για ένα επιτυχημένο έργο (FHWA 2015). Ενδεχομένως διακυβεύεται η ποιότητα της κατασκευής, σχετικά με την πιθανή απρόβλεπτη συμπεριφορά κάποιων υλικών. Η περιοδική παρακολούθηση και αξιολόγηση του οδοστρώματος, μπορεί να αποτρέψει τέτοιου είδους φαινόμενα.

Μεγάλη απήχηση φαίνεται να έχει στην κατασκευή οδοστρωμάτων, η Τεχνολογία Χαμηλής Θερμοκρασίας σε ασφαλτικά μείγματα (Warm Mix Technology). Είναι μία καινοτόμα τεχνική, που παρέχει τη δυνατότητα υψηλής εργασιμότητας και επαρκούς συμπίκνωσης σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές των συμβατικών μεθόδων. Παρά την ύπαρξη χημικών πρόσθετων και διάφορων τροποποιητών-η διαδικασία παρασκευής των οποίων δεν είναι και τόσο φιλική προς το περιβάλλον-, η εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπή λιγότερων ρυπογόνων αερίων λόγω της παράλειψης θέρμανσης των αδρανών και του ασφαλτικού τσιμέντου στα αντίστοιχα εργοστάσια, αντισταθμίζει στο έπακρο τα συνολικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί η ανάμειξη των υλικών για το ασφαλτικό μείγμα να υποστηριχτεί από κινητές εργοστασιακές μονάδες,

μειώνοντας σημαντικά τις αποστάσεις μεταφοράς κατά μήκος του έργου. Επίσης, η τεχνολογία αυτή έχει καλά αποτελέσματα σε περιοχές με γενικά χαμηλή θερμοκρασία, και κατά τη διάρκεια εργασιών σε χειμερινούς μήνες (*FHWA 2015*).

Σχετικά με τα οδοστρώματα που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, αυτά έχουν γενικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό οφείλεται πρωτίστως, στη βασική ιδιότητα του σκυροδέματος να αυξάνει την αντοχή και τη σκληρότητά του με την πάροδο του χρόνου, λόγω ωρίμανσης (*curing*). Η μελετημένη επιλογή και αναλογία των υλικών του μείγματος σκυροδέματος, αλλά και η κατανόηση των κλιματικών αλλαγών και του μελλοντικού φόρτου που θα αναλάβει το οδόστρωμα, καθορίζουν το επίπεδο της αποδοτικότητας, της λειτουργικότητας και ακολούθως της βιωσιμότητας, στη διάρκεια του κύκλου ζωής, η οποία μπορεί να είναι της τάξεως των 40 με 50 ετών (*NCPTC 2012, FHWA 2012*). Η σωστή λήψη αποφάσεων και η μελλοντική διαχείριση, συντελούν στην επιτυχία του βιώσιμου αρχικού σχεδιασμού.

Μία νέα βιώσιμη τεχνολογία, βασιζόμενη στη σύσταση του σκυροδέματος, είναι ο συνδυασμός των συμπληρωματικών υλικών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και έχει ως συνέπεια τη δημιουργία του λεγόμενου Ανάμεικτου Τσιμέντου (*Blended Cement*). Αυτό μπορεί να περιέχει τσιμέντο πόρτλαντ, ιπτάμενη τέφρα, φυσικές ποζολάνες, μεταλλουργική σκωρία, ποσότητα ασβεστόλιθου η ακόμα και συνδυασμούς αυτών, σε διάφορες αναλογίες. Πιστοποιημένα πρότυπα όπως το *AASHTO M240 (Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, SSBHC)*, αλλά και σχετικές έρευνες, *Van Dam & Smith (2011)*, *Taylor et al. (2006)* παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με θέματα αναλογίας και σύστασης. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά η χρήση του συμβατικού τσιμέντου, αξιοποιώντας ταυτόχρονα τα παραπάνω παραπροϊόντα (*NCPTC 2012, FHWA 2015*).

Πέρα από τα βιώσιμα υλικά που μπορούν να έχουν θετικές επιπτώσεις σε οικονομικά και περιβαλλοντικά θέματα, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες με εξίσου μεγάλη σημασία. Για παράδειγμα, η αντοχή του σκυροδέματος, η εργασιμότητά του, το ποσοστό των κενών που πληρούνται με αέρα αλλά και η ποσότητα του νερού που χρειάζεται το μείγμα, είναι ζητήματα καθοριστικά σε θέματα βιωσιμότητας. Η καλή διαβάθμιση των αδρανών κατέχει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του σκυροδέματος, με το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα να είναι ακολούθως καθοριστικός παράγοντας στην αντοχή του σκυροδέματος. Η χρήση λιγότερης ποσότητας νερού, εκτός του ότι συμβάλλει περιβαλλοντικά, μειώνει την υδατοπερατότητα και αυξάνει τη σκληρότητα, επομένως και την αντοχή του σκυροδέματος (*NCPTC 2012, EUPAVE 2010*).

Η παρουσία υλικών, όπως τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA) που παρουσιάστηκαν παραπάνω, το ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP) και η μεταλλουργική σκωρία (Steel Slag) σε μείγματα σκυροδέματος, κυρίως για περιβαλλοντικούς και οικονομικούς λόγους, μπορεί να αποτελέσουν μία βιώσιμη λύση. Τα κυρίως χονδρόκοκκα κλάσματα από τα ανακυκλώσιμα αυτά υλικά, συνιστώνται λόγω χαμηλής υδατικής απορροφητικότητας (FHWA 2015). Η σωστή αναλογία τους στο μείγμα, έχει ως συνέπεια τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά, υπερβολική και αλόγιστη χρήση τους, έχει αρνητικές επιπτώσεις, υπονομεύοντας την ποιότητα και την αντοχή του οδοστρώματος.

Ειδική μέριμνα για τη χρήση του νερού στα μείγματα σκυροδέματος, το οποίο είναι εξαιρετικά πολύτιμο, μπορεί να συμβάλλει στην εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων αυτού. Πέραν της απαραίτητης ύπαρξης του στα μείγματα, λαμβάνοντας υπόψιν και την πιθανή ύγρανση των αδρανών, νερό χρησιμοποιείται και για τον καθαρισμό μηχανικού και κινητού εξοπλισμού. Σύμφωνα με τους *Van Dam et al. (2012)*, κριτήρια όπως η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται, η επιρροή του στην ισορροπία του περιβάλλοντος αλλά και ο οικονομικός παράγοντας, πρέπει να εξετάζονται. Σκέψεις για τη χρήση του λεγόμενου «Γκριζου Νερού» (Grey Water), προερχόμενο από τον καθαρισμό μηχανικού εξοπλισμού, γίνονται ολοένα και πιο αποδεκτές. Έτσι, εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες νερού, χωρίς την υποβάθμιση της ποιότητας του σκυροδέματος (NCPTC 2012, FHWA 2015).

Επιπρόσθετη τεχνολογική πρόταση, σχετικά με τη μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού, είναι και η χρήση χημικών πρόσθετων στο μείγμα του σκυροδέματος. Με μικρότερη ποσότητα νερού, και χάρη στα χημικά αυτά πρόσμικτα, παρατηρείται βελτίωση της εργασιμότητας και της αντοχής του σκυροδέματος. Σημαντική έρευνα στο θέμα αυτό, έχουν πραγματοποιήσει οι *Kosmatka & Wilson (2011)* και *Taylor et al. (2006)*. Καθώς η παρασκευή και η διανομή από το εργοστάσιο τέτοιων χημικών πρόσμικτων, είναι επιβαρυντική προς το περιβάλλον, εστίαση και μελέτη στις επιπτώσεις, με σκοπό την επιλογή του φιλικότερου προς αυτό πρόσμικτου, θα συνιστούσαν καθαρά βιώσιμη στρατηγική (FHWA 2015, NCPTC 2012).

Ως γενικές βιώσιμες προτάσεις, θεωρούνται επίσης η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων νέων αδρανών και ασφαλτικών υλικών και ταυτόχρονα περισσότερων εναλλακτικών υλικών, η συμμόρφωση των εργοστασίων στα περιβαλλοντικά πρότυπα που ορίζουν οι διεθνείς οργανισμοί, οι φιλικότερες προς το περιβάλλον μεθοδεύσεις, η σωστή διαχείριση προς μείωση των αναγκών για μεταφορά υλικών, καθώς και η επένδυση στην ανάπτυξη μη πετρελαϊκών εναλλακτικών υλικών (FHWA 2015, NCPTC 2012, EUPAVE 2010). Οι πολλαπλοί

συμβιβασμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, και αφορούν στο οικονομικό κομμάτι, είναι η διακύμανση του αρχικού κόστους δαπάνης, η ανταπόδοση με το πέρασ του χρόνου, αλλά και η πιθανή υποβάθμιση της ποιότητας κατασκευής, που μπορεί να προκαλέσει οικονομική ζημία. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την επίτευξη μεγάλης διάρκειας ζωής των υλικών μέσω πειραμάτων και επαρκούς μελέτης, έχουν θετικό αντίκτυπο σε όρους βιωσιμότητας, όσον αφορά τα οδοστρώματα.

Μελλοντικές σκέψεις και στρατηγικές, για την ανάπτυξη και άλλων βιώσιμων λύσεων, βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο. Μερικές από αυτές, σχετικά με τον τομέα των υλικών, είναι τα βιοσυνθετικά ασφαλτικά υλικά, όπου θα αντικαταστήσουν τα μέχρι σήμερα πετρελαϊκά παράγωγα (FHWA 2015). Άχρηστες οργανικές πρώτες ύλες, η καλλιέργεια καλαμποκιού, και διάφορα άλλα φυτικά έλαια, κατόπιν ειδικής επεξεργασίας, μπορεί να συμβάλλουν στην παραγωγή τέτοιων υλικών. Το φωτοκαταλυτικό τσιμέντο, αλλά και η χρήση ενισχυτικών ινών και γεωυφασμάτων, αποτελούν δύο ακόμη από τις πολυάριθμες φουτουριστικές προτάσεις (NCPTC 2012). Με την πραγματοποίηση μελετών και πειραμάτων, η εισχώρηση και ενσωμάτωση στην αγορά, είναι απλώς θέμα χρόνου.

Σε κλίμακα βιώσιμων τεχνολογιών, με ιδιαίτερη έμφαση στο περιβάλλον και συγκεκριμένα στις ενέργειες που πρέπει να ληφθούν, όπως η θραύση, ο διαχωρισμός και άλλες τεχνικές επεξεργασίας, παρατηρείται σημαντική απαίτηση ποσοτήτων ενέργειας, σε μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, ορυκτών καυσίμων, υδροδυναμικής, ακόμα και πυρηνικής ενέργειας, με ταυτόχρονη επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την εκπομπή ρυπογόνων ουσιών. Σπουδαία θέση στην παρατηρούμενη αυτή επιβάρυνση, έχει και η μεταφορά των υλικών από τα εργοστάσια παραγωγής, στο χώρο του έργου. Βιώσιμες προτάσεις για την εξομάλυνση τέτοιων συνεπειών, είναι η χρήση λιγότερων φορτηγών οχημάτων και αντί αυτών, η εισήγηση ραγών ρυμούλκησης, καθώς είναι αισθητά πιο οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική λύση. Ακόμη, η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων με την εισήγηση βιοκαυσίμων ως αντικατάστατο, αλλά και η προσπάθεια μείωσης άσκοπων ποσοτήτων ενέργειας, βελτιώνοντας τις παραγωγικές διαδικασίες, είναι αξιοσημείωτες σκέψεις. Διόλου ασήμαντα είναι και άλλα αρνητικά στοιχεία κοινωνικής φύσεως, με την ηχορύπανση λόγω των εργασιών, τη βιομηχανική σκόνη και κάποια θέματα ασφάλειας, τόσο για το εργοταξιακό προσωπικό, όσο για του κατοίκους γειτονικών περιοχών, να είναι μερικά από αυτά (NCPTC 2012, FHWA 2015).

Σε γενικές γραμμές, αυτές είναι και οι παράπλευρες αρνητικές πτυχές των νέων βιώσιμων τεχνολογιών. Έχει τονιστεί επανειλημμένως, πως η βιωσιμότητα δεν επιτυγχάνεται εστιάζοντας μόνο στα θετικά που μπορεί να έχει μία ιδέα ή σκέψη, σε ένα μόνο επίπεδο. Θα μπορούσε να πει κανείς, πως κάπου κερδίζεις και κάπου χάνεις. Μπορεί οι επιπτώσεις των έμμεσων διαδικασιών κατά την κατασκευή των οδοστρωμάτων να θεωρηθούν, εκ παραδρομής, ασήμαντες. Αγνοώντας τις όμως, και χωρίς ειδική μέριμνα στους τομείς που πλήττονται περισσότερο, τότε αυτόματα η επιτυχία ενός βιώσιμου σχεδιασμού τίθεται υπό αμφισβήτηση και ακολούθως ενδέχεται να υπονομευτεί.

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1 Σχεδιασμός

3.1.1 Γενικά

Αναμφισβήτητα, όλες οι θεωρητικές προσεγγίσεις και μελέτες που διεξάγονται πριν την έναρξη της κατασκευής ενός έργου, καθορίζουν το ίδιο το έργο στο μέγιστο βαθμό, και αποτελούν το σχεδιαστικό στάδιο. Ο τομέας της κατασκευής των οδοστρωμάτων, δεν αποτελεί εξαίρεση. Σκέψεις, προτάσεις, βλέψεις, αλλά και πραγματικά στοιχεία, επεξεργάζονται με στόχο την εύρεση της καλύτερης δυνατής, και στην προκειμένη περίπτωση, βιώσιμης λύσης. Εξετάζοντας από κάθε οπτική γωνία τις εναλλακτικές επιλογές, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες επιπτώσεις σε οικονομία, περιβάλλον και κοινωνία, οι προοπτικές για ένα επιτυχές τελικό αποτέλεσμα, είναι ενθαρρυντικές.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων, δεν είναι μία απλή τυπική διαδικασία, όπως μπορεί να φαίνεται. Με την εισαγωγή του όρου βιωσιμότητα, τα πράγματα περιπλέκονται ακόμη περισσότερο. Η εντύπωση που δίνεται σε πολλούς, λόγω του γεγονότος πως τα οδοστρώματα δεν έχουν κάτι ξεχωριστό όσον αφορά την κατασκευή τους, είναι εσφαλμένη. Οπτικά, μπορεί όντως να μην είναι αντιληπτή κάποια σημαντική διαφορά. Και αυτό, διότι τα οδοστρώματα ανήκουν σε μία κατηγορία κατασκευών, όπου η πρακτική τους σημασία είναι αρκετά σημαντικότερη της αισθητικής. Εξάλλου, δεν είναι πολλές οι αισθητικές επεμβάσεις που μπορούν να επιφέρουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Κύρια επιδίωξη των οδοστρωμάτων, είναι να εξυπηρετήσουν την ανάγκη μεταφοράς σε ένα ικανοποιητικό βαθμό, χωρίς να υποβαθμίζονται άλλες, ζωτικής σημασίας μεταβλητές, για την επίτευξη αυτή.

Το κομμάτι του σχεδιασμού, αναλύει τις κατασκευαστικές και τις λειτουργικές προδιαγραφές που καλούνται να πληρούν τα οδοστρώματα. Θέματα, όπως ο τύπος του οδοστρώματος, η διαστασιολόγηση των στρώσεων, η διαχείριση των όμβριων και η επιλογή των υλικών με κριτήριο τις δυνατότητες προσβασιμότητας και μεταφοράς, είναι μέρη του σχεδιαστικού προγράμματος. Ξεκινώντας από τα πιο σημαντικά βήματα για το σχεδιασμό, και συγκεκριμένα από τις απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτει το οδόστρωμα, σχετικά με το φορτίο που θα αναλάβει, τη φύση του εδάφους και του υπεδάφους στο οποίο θα εδραστεί ως μέρος γεωτεχνικής έρευνας, τις κλιματικές συνθήκες και πως αυτές μπορούν να επηρεάσουν την ακεραιότητα του έργου, αλλά και την επιθυμητή απόδοση στη φάση λειτουργίας, προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα. Με τον όρο βιώσιμος σχεδιασμός,

προστίθενται περεταίρω μεταβλητές, όπως το κόστος του κύκλου ζωής, οι κοινωνικές απαιτήσεις αλλά και το αποτύπωμα στο περιβάλλον, στα ήδη υπάρχοντα σχεδιαστικά ζητήματα (*NCPTC 2012, FHWA 2015*).

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μία εκτενής σχεδιαστική λίστα με κάποιους στόχους που τίθενται, οι οποίοι δεν αφορούν μόνο τις συμβατικές προδιαγραφές μίας τυπικής κατασκευής οδοστρώματος, αλλά και τις κατευθυντήριες προς τη βιωσιμότητα κινήσεις. Μείζον ζήτημα που απασχολεί τους περισσότερους οργανισμούς αυτοκινητοδρόμων και κατασκευαστικών εταιριών, είναι το κόστος κατασκευής. Πολλοί, στοχεύουν σε λύσεις με χαμηλό αρχικό κόστος ή γενικά σε επιλογές με χαμηλές οικονομικές απαιτήσεις, στον κύκλο ζωής του έργου. Ένας πλήρης σχεδιαστικός προγραμματισμός που περιλαμβάνει πολλαπλές συγκρίσεις και αναλυτική επεξεργασία κατασκευαστικών δεδομένων και στοιχείων με τη μορφή προμελέτης, μπορεί να αναδείξει οικονομικά συμφέρουσες και ταυτόχρονα βιώσιμες σχεδιαστικές προσανατολίσεις.

3.1.2 Αρχές βιώσιμου σχεδιασμού

Μιλώντας για τα βιώσιμα οδοστρώματα, η λίστα σχεδιασμού που προαναφέρθηκε σχετικά με τις προδιαγραφές, που άτυπα μέχρι στιγμής ορίζει ο σχεδιασμός βιώσιμων οδοστρωμάτων, είναι μία σειρά από σημαντικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να εξετάζονται και να συναντώνται στα εν λόγω οδοστρώματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι (*NCPTC 2012, EUPAVE 2010, FHWA 2015*):

- **Η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής**, το διάστημα δηλαδή για το οποίο το οδόστρωμα σχεδιάζεται, ώστε να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Γενικός στόχος, είναι η μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής. Αποτελεί ένα δύσκολο μέρος του σχεδιασμού, σχετικά με υπολογιστικό σκέλος, καθώς πολλοί παράγοντες την επηρεάζουν. Επίσης, η αβεβαιότητα σε ορισμένες περιπτώσεις, μειώνει την αξιοπιστία των εξαγόμενων συμπερασμάτων. Πλέον, στο κομμάτι αυτό του σχεδιασμού ως ένδειξη βιώσιμης στρατηγικής, θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι αντίστοιχες ενέργειες σχετικά με το τέλος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.
- **Ο τύπος του οδοστρώματος**. Ανάλογα με τον αναμενόμενο κυκλοφοριακό φόρτο, το οικονομικό κόστος είτε αρχικό ή συνολικό, την τοποθεσία, τις κλιματικές συνθήκες, αλλά και τη διαθεσιμότητα των υλικών, επιλέγεται ο συμφερότερος τύπος

οδοστρώματος. Αυτό γίνεται φυσικά, με κριτήρια άμεσα σχετιζόμενα με την προοπτική της βιωσιμότητας.

- **Η επιφανειακή κύλιση**, η οποία ουσιαστικά είναι καθοριστική για την αλληλεπίδραση μεταξύ του οδοστρώματος και των οχημάτων. Χαρακτηριστικά της επιφάνειας όπως η ομαλότητα, η τραχύτητα, η μακροϋφή και η αντίσταση ολίσθησης (rolling resistance), επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια, τα επίπεδα κατανάλωσης καυσίμου, το κόστος λειτουργίας των οχημάτων συνεπώς και την ποσότητα των εκπομπών καυσαερίου, ειδικά σε οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας. Η διατήρησή της σε ικανοποιητικά επίπεδα, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη μελλοντική λήψη μέτρων προστασίας και συντήρησης.
- **Τα κατασκευαστικά υλικά.** Ο σχεδιασμός και αργότερα η κατασκευή του οδοστρώματος, είναι άμεσα συνδεδεμένες με την επιλογή των διαθέσιμων υλικών. Η έρευνα για τις εναλλακτικές λύσεις, αλλά και για τις αντίστοιχες επιπτώσεις στο περιβάλλον και στο οικονομικό σκέλος, υπάγεται στο πλάνο σχεδιασμού.
- **Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις.** Η επιλογή της τελικής επίστρωσης, οι απαιτούμενες επικλίσεις, η διαχείριση των όμβριων και άλλα θέματα σχετικά με την επιθυμητή ποιότητα κατασκευής, αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού.
- **Στρατηγικές ανακύκλωσης**, τόσο για τη διαχείριση πιθανού υφιστάμενου οδοστρώματος, όσο για τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών προσιτά σε θέματα μεταφοράς, καθώς και για την προοπτική ανακύκλωσης μετά το πέρας του κύκλου ζωής.

Ένα σημαντικό σχεδιαστικό ζήτημα, αφορά τη διάρκεια ανταπόδοσης ενός κατασκευαστικού έργου και συγκεκριμένα εδώ, ενός βιώσιμου οδοστρώματος (*NCPTC 2012, FHWA 2015*). Το ύψος του αρχικού κόστους συγκριτικά με το συνολικό κόστος ζωής, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και η μεταβολή τους στο χρόνο, καθώς και η διακύμανση των κοινωνικών επιρροών, αποτελούν αντικείμενο προγραμματισμού κατά τη φάση σχεδιασμού. Ένας ολοκληρωμένος και πλήρης σχεδιαστικός προσανατολισμός, βασίζεται όχι μόνο στις αρχικές συνθήκες υλοποίησης του έργου, αλλά σε όλο τον κύκλο ζωής, υπολογίζοντας προσεγγιστικά το χρονικό διάστημα έπειτα από το οποίο η κατασκευή θα θεωρείται ανταποδοτική. Όταν δηλαδή το ισοζύγιο των παραμέτρων της βιωσιμότητας τείνει προς τα θετικά, σύμφωνα και

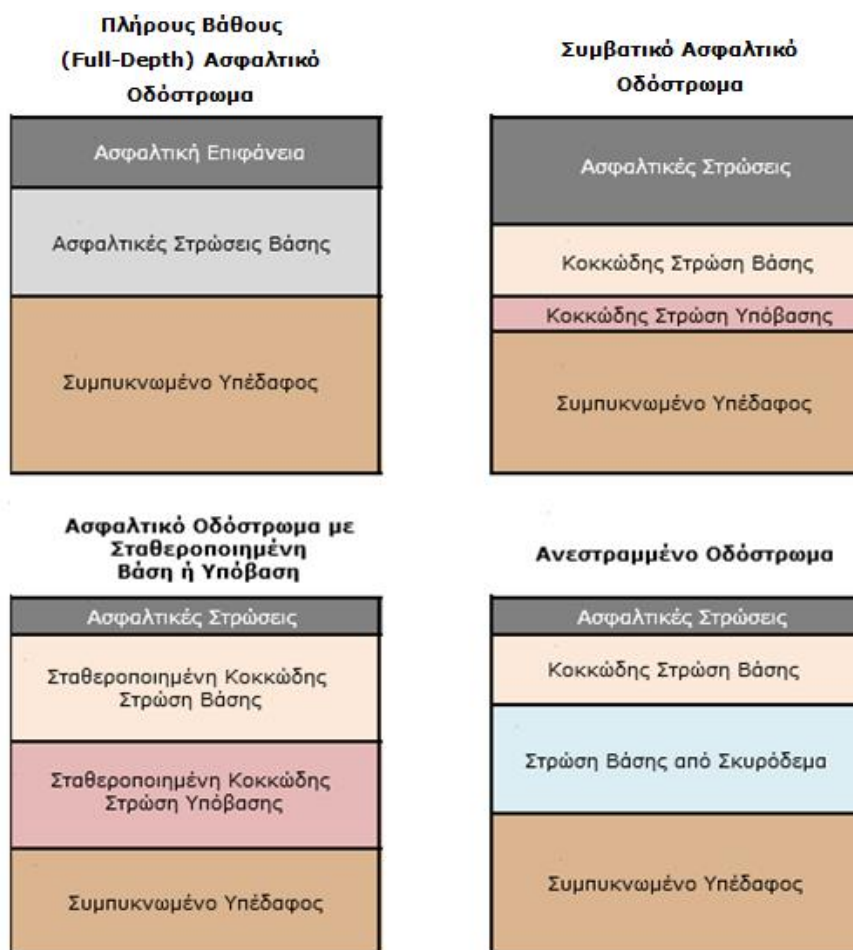
με τις προσεγγίσεις και τις θεωρήσεις του αρχικού σχεδιασμού. Ο χρονικός προγραμματισμός για την προστασία και τη συντήρηση του οδοστρώματος, η μεταβολή της ομαλότητας με το χρόνο και η διακύμανση της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα, είναι μερικά από τα θέματα που περιλαμβάνει ένας τέτοιου είδους βιώσιμος σχεδιασμός. Σε ορισμένες περιπτώσεις, καθίσταται αναγκαίο κατά το στάδιο του σχεδιασμού, και συγκεκριμένα σε υπολογιστικά θέματα, να χρησιμοποιηθούν ακόμη και εμπειρικές μέθοδοι, όταν τα γνωστικά εργαλεία αδυνατούν να στηρίξουν τις καινοτόμες εναλλακτικές προτάσεις.

Η πορεία σχεδιασμού ενός νέου βιώσιμου οδοστρώματος, είναι μία αλληλουχία από κάποια βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν. Θα μπορούσε να παρομοιαστεί με μία γενική πρότυπη διαδικασία. Ξεκινώντας με την επίδοση, το ανερχόμενο κόστος, την εκτιμώμενη κυκλοφορία, τη διαθέσιμη τεχνογνωσία υλικών και τον προσδοκώμενο βαθμό εξυπηρέτησης των χρηστών, με κύριο γνώμονα τη βιωσιμότητα, θέτονται οι βάσεις του σχεδιασμού. Στη συνέχεια, εξετάζοντας και συγκρίνοντας τις εναλλακτικές προτάσεις, επιλέγονται ο τύπος του οδοστρώματος, τα κατάλληλα υλικά κατασκευής, οι κατασκευαστικές μέθοδοι και άλλα παρεμφερή ζητήματα. Αφού εξεταστούν τα κριτήρια για την επιλογή των πρότυπων μεθόδων σχεδιασμού, τα οποία παρέχουν διάφοροι οργανισμοί και υπηρεσίες της πολιτείας, ακολουθούν οι θεωρητικές προσεγγίσεις για τη μελλοντική συντήρηση και αναμόρφωση του οδοστρώματος. Χάρη στα εργαλεία υπολογισμού του κόστους και θεώρησης των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους και το βιώσιμο χαρακτήρα της κατασκευής, εξάγεται η τελική συμφερότερη μεθοδολογία σχεδιασμού.

3.1.3 Σχεδιαστικές λεπτομέρειες

Εισχωρώντας στα βήματα της διαδικασίας σχεδιασμού, αφού θεωρηθεί δεδομένο πως οι βασικοί στόχοι έχουν οριστεί, προκύπτει η εύρεση του κατάλληλου τύπου οδοστρώματος. Οι συνηθέστεροι τύποι ασφαλτικών οδοστρωμάτων, με ενδεικτική απεικόνιση των στρώσεων ανά διατομή, διακρίνονται παρακάτω (βλέπε εικόνα 3.1). Η παρουσία κατώτερων στρώσεων βάσεως και υποβάσεως, πληρούμενες κυρίως με κοκκώδη υλικά, χαρακτηρίζεται συχνή. Ο συμβατικός τύπος ασφαλτικού οδοστρώματος, αποτελείται από συμπυκνωμένο υπέδαφος ως βάση θεμελίωσης, μία στρώση υπόβασης και μία στρώση βάσης με αδρανή υλικά και διάφορες στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος, ανάλογα με την περίπτωση. Πρωτοποριακή διατομή ασφαλτικών οδοστρωμάτων, είναι η διατομή σταθεροποιημένης βάσης ή/και υπόβασης. Η χρήση σταθεροποιητικών υλικών όπως η αφρώδης άσφαλτος (foam asphalt), αλλά και το συμβατικό τσιμέντο, έχουν ως επακόλουθο τη βελτίωση των μηχανικών

χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, με την πάροδο του χρόνου, Ιδιαίτερη επίσης περίπτωση, αποτελεί η ανεστραμμένη μορφή (inverted pavement) που περιλαμβάνει μία στρώση σκυροδέματος περίπου στο μέσον της διατομής, παρέχοντας έτσι σημαντική φορτική υποστήριξη, αλλά και αντίσταση στη δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών (bottom-up cracking).



Εικόνα 3.1 Διατομές διάφορων τύπων οδοστρωμάτων (FHWA 2015)

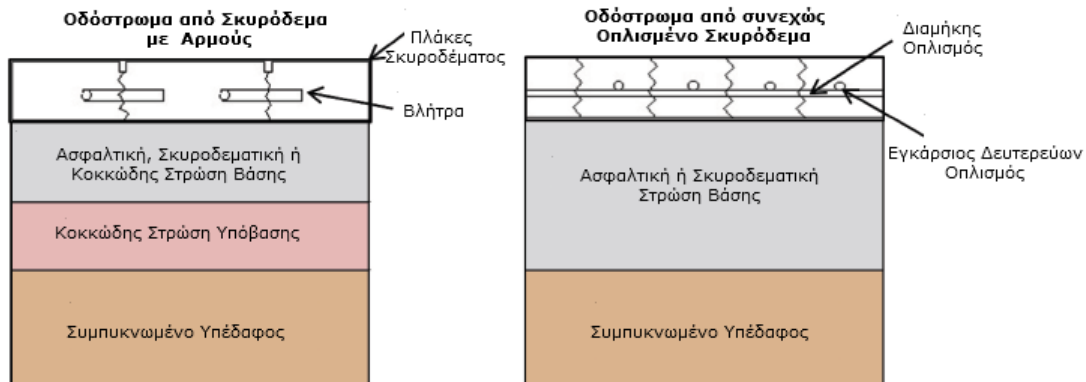
Δυνατότητα χρήσης ανακυκλώσιμων και εναλλακτικών υλικών υφίσταται για όλες τις στρώσεις των ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Πιο Συγκεκριμένα, συνιστάται η χρήση ανακυκλώσιμων αδρανών σε στρώσεις βάσης και υπόβασης, ενώ για τις επιφανειακές επιστρώσεις προτείνεται η χρήση τροποποιημένου ασφαλτικού μείγματος με καουτσούκ, σε συνδυασμό με ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα. Ανάλογα με την προβλεπόμενη κυκλοφορία, με τις καιρικές συνθήκες αλλά και με την πιθανή ύπαρξη αστικών κατοικιών,

επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος της επιφανειακής επίστρωσης, ρυθμίζοντας τα όμβρια ύδατα, τα επίπεδα του θορύβου, αλλά και την επιφανειακή κύλιση. Διαπερατές στρώσεις ανοικτού τύπου υπό των επιφανειακών ασφατικών στρώσεων, αποτελούν λύση για την προσωρινή αποχέτευση και διαχείριση των όμβριων. Σημαντική λεπτομέρεια όσον αφορά τις στρώσεις, είναι η ικανοποιητική συμπύκνωση τους, για την αποφυγή ανεπιθύμητων καθιζήσεων που με τη σειρά τους, μπορεί να προκαλέσουν σοβαρές φθορές στο οδόστρωμα (FHWA 2015).

Αναφορικά για το σχεδιασμό σχετικά με τη φάση λειτουργίας, μία δημοφιλής κατηγορία αναμόρφωσης των ασφατικών και όχι μόνο οδοστρωμάτων, είναι η κατασκευή μίας γενικά λεπτής, συνήθως κλειστού τύπου ασφατικής επίστρωσης, στο υφιστάμενο οδόστρωμα (FHWA 2015). Η προσθήκη αυτή, δεν προσδίδει τη δυνατότητα μεγαλύτερης ανάληψης φορτίου, αλλά σκοπός της είναι να καλύψει διάφορες ατέλειες και φθορές, στο υφιστάμενο οδόστρωμα. Μπορεί επίσης οι επιστρώσεις αυτές, να συνδεθούν μονολιθικά με το οδόστρωμα, με κατάλληλη επεξεργασία. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην πιθανή ύπαρξη σημαντικών φθορών και συγκεκριμένα ρωγμών. Στην προκειμένη περίπτωση, η τοποθέτηση της νέας επίστρωσης δεν θα εξαλείψει το πιθανό πρόβλημα, με κίνδυνο την επέκταση των ρωγμών μέχρι και τη νέα επιφάνεια. Ενδεχομένως άλλες μορφές αποκατάστασης να κριθούν κατάλληλες, σε τέτοιες περιπτώσεις.

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, είναι ένας άλλος τύπος οδοστρώματος που γνωρίζει ευρεία αποδοχή (FHWA 2015, NCPTC 2012, EUPAVE 2010). Εκτός από τη μέχρι σήμερα διαδεδομένη χρήση τους σε χώρους αεροδρομίων, σε λιμένες, σε γέφυρες, αλλά και σε περιπτώσεις όπου το υψηλό φορτίο είναι κύριος παράγοντας, τείνουν να αποτελέσουν μία ισχυρή, ανταγωνιστική και εναλλακτική επιλογή, στην κατασκευή οδοστρωμάτων συμβατικής χρήσης. Διακρίνονται δύο βασικοί τύποι, όπου στην πρώτη περίπτωση γίνεται χρήση βλήτρων και αρμών διαστολής, ενώ αντίστοιχα στη δεύτερη παρατηρείται η ύπαρξη διαμήκους και δευτερευόντως εγκάρσιου οπλισμού (βλέπε εικόνα 3.2). Και σε αυτή την κατηγορία οδοστρωμάτων, δίνεται η δυνατότητα χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών, κυρίως στα κατώτερα στρώματα. Επίσης, η μεγάλη διάρκεια ζωής σχεδιασμού και οι καλές προοπτικές ανακύκλωσης είναι θέματα που δύσκολα μπορεί να παραβλέψει ένας βιώσιμος σχεδιασμός.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

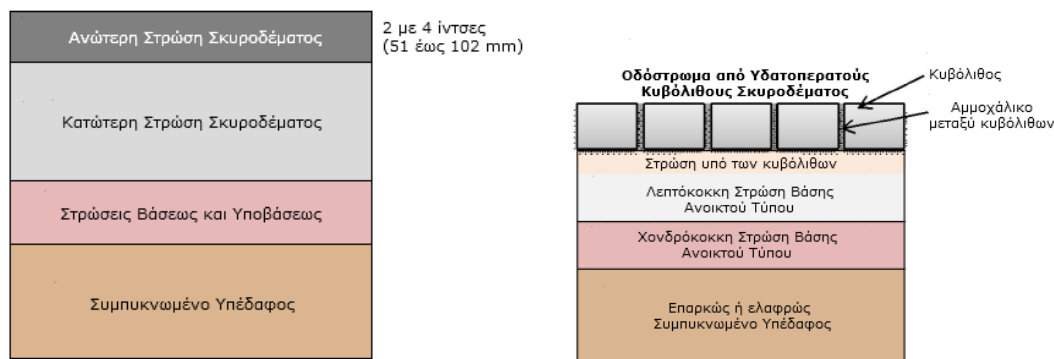


Εικόνα 3.2 Διατομές οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

Ερωτηματικό φαίνεται να παραμένει, η συμπεριφορά της επιφάνειας των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα, μειονεκτώντας έναντι των ασφαλτικών, σε θέματα ομαλότητας, τραχύτητας, υφής, επαρκούς τριβής, αλλά και σε επακόλουθα αυτών όπως τα επίπεδα θορύβου, η ασφάλεια και η κατανάλωση καυσίμου. Η στροφή όμως του κλάδου κατασκευής οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων για τη βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών, έχει οδηγήσει σε αξιόλογα αποτελέσματα. Η αυλάκωση και η τριβή με τη χρήση αδαμαντοφόρου μηχανικού εξοπλισμού, είναι δύο βασικές μορφές αναμόρφωσης/βελτίωσης της επιφάνειας, τα αποτελέσματα των οποίων είναι εντυπωσιακά. Επίσης, τα οδοστρώματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα αναμόρφωσης με την προσθήκη νέας στρώσης, όχι μόνο από σκυρόδεμα, αλλά και ασφαλτικής φύσεως, φυσικά εάν η κατάσταση του υφιστάμενου οδοστρώματος το επιτρέπει (EUPAVE 2010, NCPTC 2012).

Συνδυάζοντας τα δύο παραπάνω είδη οδοστρώματος, προκύπτουν διάφοροι σύνθετοι τύποι, υποσχόμενοι να αποτελέσουν μία μορφή προσαρμογής στις βιώσιμες προδιαγραφές. Η περίπτωση οδοστρώματος από σκυρόδεμα με ασφαλτική επίστρωση, είναι ένας συνδυασμός που συναντάται συχνά και δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα (NCPTC 2012, EUPAVE 2010). Μία νέα και πολλά υποσχόμενη πρωτοποριακή ιδέα των Darter (1992), Hall et al (2007), Van Dam et al. (2012) είναι η δημιουργία σύνθετου οδοστρώματος δύο βασικών στρώσεων (Two-Lift Composite Concrete Pavement), μία κατώτερη και μία επιφανειακή, και οι δύο από σκυρόδεμα. Με αυτόν τον τρόπο, η κατώτερη στρώση, ομολογουμένως χαμηλότερων εντατικών απαιτήσεων της επιφανειακής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά για την πλήρωσή της με ανακυκλώσιμα αδρανή υλικά κατώτερης ποιότητας. Αδιαμφισβήτητα, μία διόλου ευκαταφρόνητη, αντιθέτως υπολογίσιμη βιώσιμη προοπτική. Σε αυτή την κατηγορία,

ανήκουν και τα αλληλοσυνδεόμενα από κυβόλιθους σκυροδέματος οδοστρώματα (βλέπε εικόνα 3.3). Συναντώνται σε αστικές περιοχές με χαμηλό όριο ταχύτητας, παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι σχεδιασμένα για την αποχέτευση των όμβριων, καθώς διευκολύνουν την πραγματοποίηση επισκευαστικών έργων δημόσιων υπηρεσιών, αλλά επίσης προσδίδουν και έντονα την έννοια της αισθητικής.



Εικόνα 3.3 Διατομή οδοστρώματος δύο στρώσεων αριστερά και κυβόλιθων σκυροδέματος δεξιά

Έχοντας αναφέρει και αναλύσει τους κυριότερους τύπους οδοστρωμάτων ανά κατηγορία, ο βιώσιμος σχεδιασμός συνεχίζεται με τη διαστασιολόγηση του πάχους της κάθε στρώσης και την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτές. Γενική επιδίωξη της βιωσιμότητας, είναι η δημιουργία διατομών μικρότερου δυνατού πάχους. Αυτό μπορεί να συμβεί, με τη χρήση υλικών υψηλής ποιότητας. Βέβαια το θέμα της μεταφοράς αλλά και η ύπαρξη τοπικών διαθέσιμων υλικών, μπορεί να τροποποιήσει την τακτική διαχείρισης, έτσι ώστε μόνο στις κρίσιμες από εντατική κυρίως άποψη στρώσεις να χρησιμοποιηθούν ποιοτικά υλικά. Με τον τρόπο αυτό, αξιοποιούνται και οι δύο εναλλακτικές μορφές υλικών, ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταφοράς, έχοντας ταυτοχρόνως οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος (FHWA 2015).

Ειδική θέση στο σχεδιασμό κατέχουν οι συμβιβασμοί που καλούνται να εκτιμηθούν, σχετικά με τα υλικά και τις προδιαγραφές που αυτά πρέπει να πληρούν, ώστε να προσαρμοστούν στις κατασκευαστικές και λειτουργικές απαιτήσεις, σε ένα ευρύτερα βιώσιμο πλαίσιο. Η απόσταση μεταφοράς και η ποιότητα των διαθέσιμων υλικών, είναι δύο σημαντικοί παράγοντες για τον καθορισμό των στρώσεων από πλευράς διάστασης και είδος υλικού, σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις που επιβάλλει ο σχεδιασμός. Αφού ολοκληρωθεί και αυτή

η διαδικασία, οι επόμενες κινήσεις στρέφονται στις απαραίτητες επεμβάσεις για την εξασφάλιση της ποιότητας και της αντοχής της κατασκευής, που θα συντελέσουν στην αύξηση της διάρκειας ζωής.

Η επαρκής συμπύκνωση των επιμέρους στρώσεων, βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος, παρέχοντας αντίσταση έναντι φθορών όπως η διαφορική καθίζηση, η τροχοαυλάκωση και η ρωγμάτωση. Επίσης, η επίτευξη καλών συνθηκών ομαλότητας, έχει αργότερα θετικές επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου, στην ασφάλεια και στη μείωση των εκπομπών αερίων. Σχεδιαστικός στόχος, είναι η εξασφάλιση υψηλού επιπέδου ομαλότητας εξ αρχής, διότι με αυτόν τον τρόπο και με τη σωστή διαχείριση και προγραμματισμό προστασίας και συντήρησης του οδοστρώματος, αυτή διατηρείται σε καλά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Έμμεση αλλά σημαντική στο βιώσιμο σχεδιασμό, είναι και η μέριμνα για τη ρύθμιση της κυκλοφοριακής ροής κατά τη διάρκεια των κατασκευαστικών έργων, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ενδεχόμενες καθυστερήσεις, οι οποίες μπορεί να αποδειχθούν αρκετά επιβαρυντικές στο περιβάλλον, στην οικονομία αλλά και ιδιαίτερα ενοχλητικές στους χρήστες (FHWA 2015, NCPTC 2012).

Όταν γίνεται λόγος για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, εκτιμάται κατά προσέγγιση η διάρκεια ζωής. Μία βασική παράμετρος που προσθέτει ο όρος βιωσιμότητα στον κλασικό σχεδιασμό που ακολουθείται μέχρι και σήμερα, είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας αυτής, με βάση τρία βασικά κριτήρια, την προστασία του περιβάλλοντος, την οικονομική αποταμίευση, αλλά και την εκπλήρωση των κοινωνικών αναγκών. Η φιλοσοφία που ακολουθείται, βασίζεται στην προσπάθεια εύρεσης της εναλλακτικής λύσης που να πετυχαίνει τα μέγιστα δυνατά, και στα τρία αυτά κριτήρια της βιωσιμότητας συγχρόνως. Δεδομένου ότι βέλτιστη λύση δεν υφίσταται, εξετάζονται αναλυτικά τα βήματα σχεδιασμού που προαναφέρθηκαν, στοχεύοντας στη μεγάλη διάρκεια ζωής με μικρό κόστος, χωρίς περιβαλλοντικές ανισορροπίες και με κοινωνική αποδοχή. Τα οδοστρώματα αυτά, όπως φαίνεται και ενδεικτικά παρακάτω, αποτέλεσμα ενός παρόμοιου σχεδιασμού, αναφέρονται με τον όρο (perpetual pavements) (βλέπε εικόνα 3.4). Σημαντική λεπτομέρεια για τα οδοστρώματα αυτά, παρά τις τακτικές επέκτασης της διάρκειας ζωής τους, είναι να παραμένουν λειτουργικά, διατηρώντας σε ικανοποιητικό επίπεδο τα χαρακτηριστικά για τα οποία σχεδιάστηκαν (Λοΐζος & Πλατή 2014, Santero et. al 2010).

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

| | |
|--|---|
| Προαιρετική Επίστρωση | 25 με 51 mm |
| Ασφαλτική Στρώση ανθεκτική σε τροχουαλάκωση και ρωγμάτωση | 38 με 102 mm |
| Ασφαλτική Στρώση μεγάλου πάχους | Πάχος ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις |
| Ασφαλτική Στρώση ανθεκτική σε κόπωση και καμπτική καταπόνηση | 51 με 76 mm |
| Προαιρετική Κοκκώδης Στρώση Βάσης | |
| Επαρκώς ή ελαφρώς Συμπυκνωμένο Υπέδαφος | |

Εικόνα 3.4 Παράδειγμα διατομής οδοστρώματος μεγάλης διάρκειας ζωής (FHWA 2015)

Βασικά προβλήματα που μπορεί να φθείρουν σημαντικά το οδόστρωμα, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής και καθιστώντας την επισκευή τους αντισυμβατική, είναι η κόπωση, η δημιουργία εφελκυστικών ρωγμών (bottom-up cracking), αλλά και η εμφάνιση μεγάλων επιφανειακών ρωγμών (top-down cracks). Για να αντιμετωπιστούν τα θέματα αυτά, η στρώση που δέχεται τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις, θα πρέπει να πληροί την αντίστοιχη απαιτούμενη αντοχή. Το πάχος της κύριας στρώσης θα πρέπει να είναι επαρκές για την ανάληψη του προβλεπόμενου κυκλοφοριακού φορτίου, εκτιμώντας και τις πιθανές απομειώσεις των αντοχών λόγω κόπωσης και επαναλαμβανόμενης φόρτισης, και η επίστρωση θα πρέπει να σχεδιαστεί, ώστε να φέρει αντίσταση στα διάφορα είδη επιφανειακής παραμόρφωσης.

Οι προβλέψεις αυτές, αποτελούν μέρος του σχεδιασμού και αφορούν τα συμβατικά ασφαλτικά οδοστρώματα. Ουσιαστικά παρόμοιες είναι και οι ενέργειες πρόληψης και στα οδοστρώματα από σκυροδέμα, με κύρια διαφορά την έμφαση που πρέπει να δοθεί, στην προστασία και συντήρηση της επιφάνειας, η οποία ενδέχεται να χρειαστεί να αναμορφωθεί κάμποσες φορές στον κύκλο ζωής, Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους αρμούς μεταξύ των πλακών σκυροδέματος, αλλά και στον οπλισμό που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα (NCPTC 2012).

3.1.4 Εναλλακτικές προτάσεις

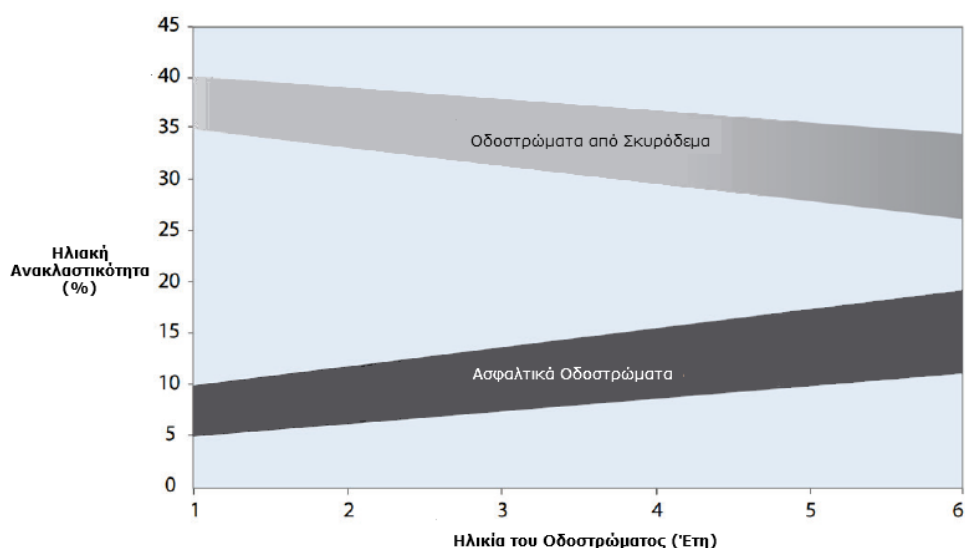
Μελλοντικές εκτιμήσεις για τη φάση χρήσης του οδοστρώματος, κατέχουν σημαντική θέση στο κομμάτι του σχεδιασμού. Άλλωστε, όπως έχει αποδειχθεί και σε σχετικές στατιστικές έρευνες, *Muench (2010)*, *EPA (2009)*, το μεγαλύτερο ποσοστό των επιπτώσεων παρατηρείται στη φάση λειτουργίας, κρίνοντας το βαθμό της βιωσιμότητας με βάση τα εξαγόμενα στοιχεία, προϊόντα μετρήσεων και συλλογής χρήσιμων στοιχείων (*FHWA 2015*, *EUPAVE 2010*). Προβλέψεις για την πιθανή καθυστέρηση του έργου στην κατασκευαστική φάση, σχετικά και τους τρόπους αντιμετώπισης, και ιδιαίτερα για τις ενδεχόμενες εργασίες συντήρησης, με τη διαχείριση των τελευταίων να χρειάζεται ειδική προσοχή, αποτελούν προτάσεις/λύσεις βιώσιμου χαρακτήρα. Η πιθανή υποβάθμιση της ποιότητας του οδοστρώματος λόγω λανθασμένων ενεργειών και χειρισμών, και η γένεση κυκλοφοριακών συμφορήσεων, με συνέπειες τη δυσκολία διεξαγωγής των απαιτούμενων εργασιών και τις υπερβολικές καθυστερήσεις των οχημάτων, είναι επίσης σημαντικά ζητήματα που προκύπτουν στο σχεδιασμό.

Στα ανωτέρω αρνητικά αυτά στοιχεία, σχετικά με τις πιθανές καθυστερήσεις, προστίθεται και η επιβάρυνση στο περιβάλλον, λόγω σημαντικής αύξησης των παραγόμενων καυσαερίων, η αύξηση του κόστους του έργου, η οικονομική επιβάρυνση των χρηστών, καθώς και η κοινωνική αναταραχή, προφανείς συντελεστές βιωσιμότητας. Σε κάθε περίπτωση, η αξιοποίηση παλαιότερων μελετών σχεδιασμού και αντίστοιχα υφιστάμενων στατιστικών δεδομένων από διάφορες μετρήσεις, που πιθανώς να έχουν συλλεχθεί κατά τη διάρκεια της φάσης λειτουργίας, μπορεί να αποδειχθεί πολύ βοηθητική.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η επιρροή των οδοστρωμάτων, ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος, με κοινό σκοπό τη βιωσιμότητα. Αυτή δεν είναι άλλη, από την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ειδικότερα στην παγκόσμια θερμοκρασιακή αύξηση, που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες. Εκτεταμένη ερευνητική προσπάθεια που καταβάλλεται στο κομμάτι αυτό τα τελευταία χρόνια, έχει καταλήξει, χωρίς όμως να αποκλείει το ενδεχόμενο αντίστροφης συμπεριφοράς στις εντόνως αστικές περιοχές, πως η χρήση ανοιχτόχρωμων υλικών στις επιφανειακές επιστρώσεις των οδοστρωμάτων, έχει θετικά αποτελέσματα μειώνοντας μάλιστα 2 με 3 βαθμούς Κελσίου, τη θερμοκρασία στην επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει, λόγω μεγάλης ανακλαστικότητας, αλλιώς λευκαύγειας (albedo) των υλικών αυτών, που αντανακλά το μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (*NCPTC/NCAT 2013*, *EPA 2008*, *FHWA 2015*, *EUPAVE 2010*, *Santamouris 2013*).

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, πλεονεκτούν στο θέμα αυτό έναντι των ασφαλτικών, λόγω πιο ανοιχτόχρωμης επιφάνειας. Βέβαια, με το πέρας του χρόνου παρατηρείται μία αντιστροφή, με την ανακλαστικότητα των ασφαλτικών να αυξάνει και αντίστοιχα αυτή των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα, να μειώνεται (βλέπε εικόνα 3.5). Σε ένα σχεδιασμό οδοστρωμάτων, με κύριο γνώμονα και κριτήριο τη βιωσιμότητα, επιβάλλεται η μελέτη του είδους και του χρωματικού τόνου της επιφάνειας, με στόχο τη συμβολή στην καταπολέμηση της θερμοκρασιακής ανόδου, συνεπώς και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Καινοτόμα υλικά, προϊόντα εργαστηριακής μελέτης και τεχνολογικής εξέλιξης, σε συνδυασμό με κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας της επιφάνειας, όπως για παράδειγμα η έκθεση στην επιφάνεια των ανοιχτόχρωμων αδρανών (βλέπε εικόνα 3.6), μπορεί να επιτύχουν αξιοσημείωτα αποτελέσματα (NCRTC/NCAT 2013, EURAVE 2010, EPA 2008).



Εικόνα 3.5 Διακύμανση της ηλιακής ανακλαστικότητας σε συμβατικά οδοστρώματα από σκυρόδεμα και ασφαλτικά με την πάροδο του χρόνου (EPA 2008)



Εικόνα 3.6 Παράδειγμα έκθεσης των εκ σχεδιασμού ανοιχτόχρωμων αδρανών στην επιφάνεια συμβατικού οδοστρώματος από σκυρόδεμα

Κλείνοντας το κεφάλαιο σχεδιασμός, ένα αξιοσημείωτο βήμα για την παράθεση και επεξεργασία των διαθέσιμων ιδεών και γνωστικών εργαλείων, αποσκοπώντας στην επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων με κύρια έμφαση στις βιώσιμες αρχές, μία συνόψιση των διαθέσιμων, αλλά και μία αναφορά των υποσχόμενων μελλοντικών στρατηγικών, θα ήταν χρήσιμες.

Ξεκινώντας με τις βασικές, άμεσα εφαρμόσιμες στρατηγικές, για την ενσωμάτωση του υπό σχεδιασμού οδοστρώματος σε ένα γενικότερο βιώσιμο σύστημα, η κοινή γνώμη εστιάζεται σε κάποιες ενέργειες. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Η επέκταση του κύκλου ζωής χρονικά, με πρόσθετες βλέψεις στη διαχείριση μετά το τέλος της φάσης λειτουργίας.
- Πρακτικές προστασίας και συντήρησης του οδοστρώματος, με σκοπό τη διατήρηση της λειτουργικότητας σε υψηλά επίπεδα, θέτοντας όμως οικονομικά πλαφόν και περιβαλλοντικούς περιορισμούς.
- Η βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση των εναλλακτικών υλικών που διατίθενται, προσαρμόζοντας όπου απαιτείται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, με πρόσθετο κριτήριο την εξασφάλιση της ποιότητας και της επίδοσης του οδοστρώματος.
- Προβλέψεις για την αποκατάσταση του οδοστρώματος από πιθανές επεμβάσεις δημόσιων υπηρεσιών.

- Διαχειριστικές μέθοδοι με προοπτικές επιτάχυνσης της κατασκευής του οδοστρώματος, προς ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στα διάφορα συνδεδεμένα συστήματα.
- Επιλογή του κατάλληλου τύπου οδοστρώματος και των αντίστοιχων χαρακτηριστικών, με σκοπό την αποτροπή αρνητικών επιρροών από τα όμβρια.
- Ενδεχόμενες αλλαγές και μετατροπές, που θα οδηγήσουν στη μείωση των φαινομένων που σχετίζονται με την υπερθέρμανση.
- Κατάλληλη μέριμνα για τη συλλογή στοιχείων επί του οδοστρώματος κατά τη φάση λειτουργίας, τα οποία θα συντελέσουν στην αξιολόγηση των ενεργειών που εφαρμόστηκαν.

Οδηγίες για μελλοντική εξέλιξη των υπαρχόντων στρατηγικών, είναι η συνεχής προσπάθεια και έρευνα για την αύξηση του βαθμού αξιοπιστίας, με απτές αποδείξεις και κατάλληλα επιχειρήματα, που να κατατάσσουν τις αντίστοιχες μεθόδους σε πρότυπα πιστοποίησης. Όσον αφορά τις μελλοντικές κινήσεις για την εύρεση νέων στρατηγικών σχεδιασμού, θα πρέπει οι διεθνείς οργανισμοί μεταφοράς και συγκοινωνιακής υποδομής να επικεντρωθούν στην παροχή προς τους αναδόχους και τις κατασκευαστικές εταιρίες, αλλά και γενικότερα, αξιόπιστων μεθόδων, ακόμη και εμπειρικών. Σκοπός, είναι η άμεση χρησιμοποίηση των μεθόδων αυτών στη διερεύνηση των επιδράσεων των ανακυκλώσιμων υλικών και παραπροϊόντων, στη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Με τη βοήθεια ειδικών εργαστηριακών αναλύσεων, επιδιώκεται η εισήγηση των πρωτοποριακών αυτών υλικών, στη κατασκευαστική διαδικασία. Η ανάπτυξη βοηθητικών εργαλείων και λογισμικού για την ανάλυση των επιπτώσεων στο περιβάλλον, όπου μέχρι στιγμής παρατηρείται υστέρηση, καθώς και η βελτίωση των τεχνικών συντήρησης με μικρότερο κόστος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, είναι δύο ακόμη μελλοντικοί στόχοι που θέτονται.

Η φάση σχεδιασμού, είναι εν τέλει μία πολύπλοκη διαδικασία με πολλές αναδυόμενες πτυχές, απόρροια των αυστηρών προδιαγραφών και περιορισμών που ορίζει η υιοθέτηση της βιωσιμότητας σε αυτήν. Η επιτυχία και ο βαθμός εκπλήρωσης των διάφορων στόχων που θέτονται, σε ένα φιλόδοξο εγχείρημα όπως αυτό των βιώσιμων οδοστρωμάτων, οφείλονται πρωτίστως σε έναν καλά προγραμματισμένο σχεδιασμό. Κατανοώντας πλήρως την έννοια και την ερμηνεία των στόχων της βιωσιμότητας, μεταφράζοντας τη σε όρους που σχετίζονται

με τα πρότυπα των οδοστρωμάτων, ξεκαθαρίζονται οι διαρθρωτικές αλλαγές που πρέπει να γίνουν, και το μόνο που μένει είναι η συγκέντρωση και η αφοσίωση σε αυτές. Το αποτέλεσμα, είναι θέμα σωστής μετατροπής της θεωρίας σε πράξη.

3.2 Κατασκευή

3.2.1 Γενικά

Τη φάση σχεδιασμού, διαδέχεται ιεραρχικά η κατασκευή, όλες οι απαιτούμενες δηλαδή διαδικασίες που συνδέονται με την ολοκλήρωση των έργων και την παράδοση του οδοστρώματος. Είναι δεδομένο, πως η συσχέτιση μεταξύ του σχεδιασμού και της κατασκευαστικής φάσης είναι μεγάλη, καθώς η δεύτερη είναι η εφαρμογή της θεωρίας σε πρακτικό επίπεδο. Κομμάτι της κατασκευής, αποτελούν οι δραστηριότητες που σχετίζονται, τόσο με την αρχική παράδοση του έργου, όσο μεταγενέστερα με τις πιθανές επεμβάσεις για την προστασία και τη συντήρηση αυτού. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική εξέλιξη στον κλάδο αυτόν, με νέες τεχνολογίες και πρωτοποριακές τεχνικές, με οδηγό τους κανόνες που θέτει η βιωσιμότητα, να συμβάλλουν στην επίτευξη μέγιστης απόδοσης και ποιότητας, μειώνοντας συγχρόνως σημαντικά το κόστος και τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Κάνοντας λόγο για τη βιωσιμότητα, ως βασική παράμετρος στη διαμόρφωση της κατασκευαστικής διαδικασίας, προκύπτουν διάφοροι συμβιβασμοί σχετικά με τις επιπτώσεις των σκελών που την απαρτίζουν (*FHWA 2015*). Προβλεπόμενες επιρροές που αφορούν τη βιωσιμότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής φάσης, έχουν να κάνουν με το επίπεδο κατανάλωσης καυσίμων για τη μεταφορά των υλικών και τη λειτουργία του μηχανικού εξοπλισμού, με το συνολικό όγκο των εκπεμπόμενων ρύπων, με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και των υδάτων, με την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια κυρίως του εργαζομένου προσωπικού, με τη διάρκεια περάτωσης του έργου και τη διαχείριση των πιθανών κυκλοφοριακών συμφορήσεων, καθώς και με τα κύρια επιφανειακά χαρακτηριστικά και τη μεταβολή της επίδοσης αυτών στη συνολική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί η ύπαρξη παράπλευρων πτυχών, που υπονομεύουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα, εάν δεν δοθεί απαραίτητη προσοχή σε αυτές. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, με έμμεσο αλλά αισθητό αντίκτυπο, είναι η απροσδόκητη υπερβολική καθυστέρηση της ολοκλήρωσης της κατασκευής, που έχει συνήθως ιδιαίτερα

αρνητικές συνέπειες, τόσο από οικονομικής πλευράς, όσο και σε θέματα επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και γένεσης κοινωνικών προβλημάτων. Άλλα τέτοια ζητήματα, είναι τα υψηλά επίπεδα θορύβου, αλλά και η σκόνη που παρατηρείται στις περιοχές κατά μήκος του οδοστρώματος, που μπορεί να αποδειχθούν πολύ ενοχλητικά. Σε βιώσιμο πλαίσιο, επιβάλλεται η πρόληψη και μέριμνα κατάλληλων ενεργειών για την καταπολέμηση τέτοιων, αλλά και άλλων παρόμοιων φαινομένων.

Περίπλοκος παραμένει ο χειρισμός του κόστους, σε συνδυασμό με τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας κατασκευής. Με την ύπαρξη στενών περιθωρίων στο οικονομικό σκέλος, λόγω των περιορισμών της βιωσιμότητας, είναι προφανές πως δεν μπορεί να δοθεί μονοσήμαντα βάρος στην επιδίωξη μέγιστης ποιότητας και αποδοτικότητας, αδιαφορώντας για το κόστος επίτευξης, πόσο μάλλον για το αποτύπωμα στο περιβάλλον. Βέβαια, υπάρχουν τρόποι να προκύψουν επιθυμητά αποτελέσματα σε πλαίσια ανεκτού οικονομικού προϋπολογισμού. Πιο συγκεκριμένα, τεχνικές, ή καλύτερα μιλώντας με κατασκευαστικούς όρους, πρακτικές για την εξασφάλιση ποιότητας όπως η σταθεροποίηση του εδάφους, στο οποίο θα εδραστεί το οδόστρωμα με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων υλικών όπου κριθεί απαραίτητο, αλλά και η συμπύκνωση των στρώσεων στη συνέχεια, μπορούν να επιφέρουν πλεονεκτήματα. Τέτοια πλεονεκτήματα είναι η αύξηση της αντοχής και συγχρόνως της διάρκειας ζωής, μειώνοντας τις πιθανότητες για εμφάνιση φθορών και αστοχιών άρα ταυτόχρονα και το κόστος για ενδεχόμενη επέμβαση συντήρησης. Επίσης, έμφαση πρέπει να δοθεί στα επιφανειακά χαρακτηριστικά και πιο αναλυτικά στα κατασκευαστικά πρότυπα που πρέπει να ακολουθηθούν για τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθότι όπως έχει αναφερθεί, επηρεάζουν καθοριστικά κατά τη φάση λειτουργίας, τους κρίσιμους συντελεστές της βιωσιμότητας (NCRTC 2012, FHWA 2015).

3.2.2 Βιώσιμες κατασκευαστικές μέθοδοι

Ξεκινώντας με το περιβαλλοντικό σκέλος της κατασκευαστικής διαδικασίας, μείζον θέμα και αντικείμενο προσοχής αποτελεί η ατμοσφαιρική ρύπανση, λόγω των εκπεμπόμενων ρύπων. Η πλειοψηφία των αέριων ρύπων αυτών που συμβάλλουν στην ύφεση του φαινομένου του θερμοκηπίου, προέρχονται από τη χρήση βαρέων μηχανημάτων και εξοπλισμού, κατά τη διάρκεια των απαιτούμενων εργασιών, αλλά και από τη μεταφορά των υλικών από τα εργοστάσια στο χώρο κατασκευής. Ενδιαφέρουσες εκτιμήσεις της Αμερικανικής Προστασίας του Περιβάλλοντος (US EPA), αναφέρουν πως σχεδόν το 75% των παραγόμενων ρύπων στις διάφορες κατασκευαστικές δραστηριότητες, οφείλονται στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. Επίσης, εκτενής έρευνα στο κομμάτι αυτό ως συνέχεια της παραπάνω

διαπίστωσης, δείχνει πως η ελάττωση κατά 10% της χρήσης ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, η βενζίνη και κατά δεύτερον το φυσικό αέριο, αποφέρει σημαντικές μειώσεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά κύριο λόγο, αλλά και άλλων αερίων ρύπων (*EPA 2007, EPA 2009, FHWA 2015*).

Προτάσεις για την αντικατάσταση των ορυκτών αυτών καυσίμων, είναι η χρήση εναλλακτικών, όπως το Πετρέλαιο Εξαιρετικά Χαμηλής περιεκτικότητας σε Θείο (Ultra-Low Sulfur Diesel, ULSD), τα βιοκαύσιμα, το Βιοντίζελ (Biodiesel) που χρησιμοποιείται σαν ποσοστό σε ανάμειξη με συμβατικό πετρέλαιο και είναι ανανεώσιμης προέλευσης, αλλά και το Πεπιεσμένο Φυσικό Αέριο (Compressed Natural Gas, CNG). Πέρα από το περιβαλλοντικό όφελος, μία ματιά στο κόστος των εναλλακτικών αυτών καυσίμων που συστήνονται από φορείς σχετιζόμενους με τη βιωσιμότητα, όπως η Αμερικανική Προστασία του Περιβάλλοντος (US EPA), δείχνει πως με εξαίρεση το συμπιεσμένο φυσικό αέριο, το οποίο όμως απαιτεί την εγκατάσταση συσκευής τροποποίησης (retrofit), η τιμή των υπολοίπων είναι λίγο υψηλότερη από εκείνη των συμβατικών. Επίσης, αρνητικό στοιχείο αποτελεί και η πιθανή υποβάθμιση του κινητήρα των μηχανημάτων, η ανάγκη για συχνότερη συντήρηση καθώς και η χαμηλότερη αποδοτικότητα σε ενεργειακούς όρους (*EPA 2007*).

Άλλες στρατηγικές, βασιζόμενες στη διαμόρφωση των εργασιακών δραστηριοτήτων με σκοπό τη μείωση των εκπομπών, είναι ο χειρισμός των μηχανημάτων και του παρεμφερούς κατασκευαστικού εξοπλισμού ώστε να μειωθεί η άεργη λειτουργία τους, η τακτική συντήρηση των κινητήριων μονάδων, η διατήρηση των δρόμων για τη μετακίνηση των μηχανημάτων σε καλή κατάσταση, η σωστή επιλογή του μεγέθους του απαιτούμενου εξοπλισμού, καθώς και η βέλτιστη επιλογή της θέσης των προσωρινών αποθεσιοθαλάμων υλικών, με στόχο τη μείωση των αποστάσεων. Φυσικά, οι ανωτέρω ρυθμιστικές αλλαγές εξαρτώνται άμεσα από το επίπεδο της τεχνικής κατάρτισης των χειριστών και του εργοταξιακού προσωπικού. Έτσι, με αυτούς τους τρόπους η κατασκευαστική διαδικασία βελτιώνεται αισθητά, συμβάλλοντας στην παράταση της διάρκειας ζωής των μηχανημάτων με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και εξοικονόμηση άσκοπου χρόνου και καυσίμων. Κατά συνέπεια, ελαττώνονται οι εκπομπές ρύπων και το συνολικό κόστος κατασκευής (*FHWA 2015, NCPTC 2012*).

Εμπόδιο στην ομαλή διεξαγωγή των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, στέκονται οι παράπλευρες επιπτώσεις που λαμβάνουν χώρα, όπως η ηχορύπανση, η αερομεταφερόμενη σκόνη, αλλά και σαφώς η παρεμπόδιση της κυκλοφορίας, με αναγκαία κλεισίματα λωρίδων. Τα στοιχεία αυτά, αποτελούν παράγοντες που δημιουργούν σοβαρά κοινωνικά προβλήματα,

ειδικά σε αστικές περιοχές. Τρόποι αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών, είναι ο συχνός ψεκάσμος με νερό και η εφαρμογή συλλεκτών σκόνης και άλλων παρόμοιων σωματιδίων, όσον αφορά το θέμα της σκόνης. Για την καταπολέμηση του υψηλού θορύβου, προτείνεται η αποθήκευση των υλικών σε μη πολυσύχναστες περιοχές, η μείωση των επιπέδων θορύβου των βαρέων μηχανημάτων με κατάλληλες επεμβάσεις στις απολήξεις των εξατμίσεων, καθώς και γενικότερα η εισήγηση εξοπλισμού χαμηλού θορύβου, αλλά και η συμμόρφωση με τις σχετικές απαγορεύσεις εργασίας, τις ώρες αιχμής και κοινής ησυχίας. Το θέμα της κυκλοφοριακής ρύθμισης είναι πιο πολύπλοκο. Η παροχή εξελιγμένων συστημάτων και λογισμικού διαχείρισης κυκλοφορίας, σε συνεργασία με διάφορες κρατικές υπηρεσίες, αρμόδιες για μετρήσεις και υπολογισμού του όγκου των οχημάτων, παρέχουν τη δυνατότητα θετικών αποτελεσμάτων, συνεισφέροντας σε ένα βιώσιμο περιβάλλον (FHWA 2015).

Ένα επιπρόσθετο βασικό ζήτημα που έχει προαναφερθεί και προηγουμένως, είναι η διαχείριση των άχρηστων υλικών. Μερικές από τις επιπτώσεις λόγω λανθασμένων ενεργειών και χειρισμών, είναι η πιθανή μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, η υποβάθμιση του βιότοπου και φυσικά η μείωση της ποιότητας του αέρα. Διαχειριστικές τακτικές που προβλέπουν τη μεταφορά των αποβλήτων στους κοντινότερους χώρους υγειονομικής ταφής ή/και σε εργοστάσια ανακύκλωσης, όπου αυτό καθίσταται δυνατόν, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός βιώσιμου κατασκευαστικού προγραμματισμού.

Στο καθαρά κατασκευαστικό κομμάτι και τα πρότυπα που υποχρεώνει η ενσωμάτωση της βιωσιμότητας να ακολουθηθούν, παρατίθενται αρκετές βελτιωτικές προτάσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ξεκινώντας με τα συμβατικά ασφαλικά οδοστρώματα, η κατασκευή τους αρχίζει με τη σταθεροποίηση και συμπύκνωση του εδάφους θεμελίωσης μετά την ολοκλήρωση των απαραίτητων εκσκαφών. Αφού τοποθετηθούν τα αδρανή υλικά και επεξεργαστεί η επιφάνεια με κατάλληλη συμπύκνωση, ακολουθεί η διάστρωση του ασφαλικού μείγματος με την ταυτόχρονη προσθήκη και των απαραίτητων συνδετικών ασφαλικής φύσεως, του οποίου η σωστή θερμοκρασία τη στιγμή της τοποθέτησης, παίζει καθοριστικό ρόλο στο οδόστρωμα. Με τη σωστή θερμοκρασίας διάστρωσης, επιτυγχάνονται καλές συνθήκες εργασιμότητας και συμπύκνωσης, επιταχύνοντας τη διαδικασία και μειώνοντας την πιθανότητα απρόβλεπτης διαφορικής καθίζησης (βλέπε εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7 Κατασκευαστική διαδικασία ασφαλτικών οδοστρωμάτων

Η υιοθέτηση τεχνολογίας χαμηλής θερμοκρασίας μειώνει την αυστηρότητα των θερμοκρασιακών απαιτήσεων και ταυτόχρονα του κινδύνου κατασκευαστικών ατελειών, αποτελώντας μία χρήσιμη λύση σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς και χαμηλών θερμοκρασιακών συνθηκών. Με την τεχνολογία χαμηλής θερμοκρασίας, αξιοσημείωτη είναι και η ελάττωση της επιβάρυνσης των εργατών λόγω αναθυμιάσεων, προερχόμενων κυρίως από τις υψηλές θερμοκρασίες των συμβατικών ασφαλτικών μειγμάτων (FHWA 2015).

Πολύς λόγος έχει γίνει και για την εξασφάλιση αρχικής ομαλότητας ως επιφανειακό λειτουργικό χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα κρίσιμο με βάση τις βιώσιμες προδιαγραφές σχετικά με τις μεταγενέστερες επιπτώσεις στη φάση λειτουργίας, ρυθμίζοντας σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση καυσίμου, το ύψος του κόστους λειτουργίας των οχημάτων, τα επίπεδα των εκπεμπόμενων ρύπων, αλλά και θέματα ασφάλειας και ικανοποίησης των χρηστών. Μέθοδοι που εξασφαλίζουν εξ αρχής υψηλά επίπεδα ομαλότητας, είναι η μείωση των στάσεων των μηχανημάτων διάστρωσης, με προσπάθεια αδιάκοπης συνεχούς εργασίας κατά μήκος του άξονα, η εξομάλυνση των πιθανών ανωμαλιών σε κατώτερα στρώματα που μπορεί να επηρεάσουν την επιπεδότητα της επιφάνειας και όσον αφορά το μηχανικό εξοπλισμό, η πρόληψη επαρκούς ποσότητας ασφαλτικού υλικού στη σκάφη του μηχανήματος τελειοποίησης (finisher) για την αποφυγή αποτελεσμάτων υψηλής τραχύτητας (EUPAVE 2010, FHWA 2015).

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα αντιμετωπίζονται διαφορετικά. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ιεραρχικά (NCPTC 2012), η προετοιμασία του υπεδάφους με ενέργειες όπως η εκσκαφή ή αναλόγως επιχωμάτωση, η ισοπέδωση και η συμπύκνωση, η τοποθέτηση και επίσης συμπύκνωση της στρώσεως υποβάσεως και βάσεως, η διαμόρφωση του μείγματος σκυροδέματος στην κατάλληλη συστατική αναλογία και αργότερα η τοποθέτηση του με τελειοποιητικές δραστηριότητες, όπως η διαμόρφωση της επιφάνειας. Η έμφαση που πρέπει να δοθεί στην υφή και την ομαλότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος, είναι ενέργειες που ολοκληρώνουν την εν λόγω κατασκευαστική διαδικασία (βλέπε εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 Διαδικασία κατασκευής οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

Ιδιαίτερη εστίαση σημειώνεται στην ποιότητα κατασκευής και στη μακρά διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Υπάρχουν πολυάριθμες δυνατότητες βελτίωσης των διάφορων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τις δραστηριότητες στη φάση κατασκευής, και που αποτελούν συντελεστές στην αξιολόγηση με βασικό κριτήριο τη βιωσιμότητα. Όπως και στα ασφαλτικά οδοστρώματα, έτσι και εδώ, η καλή προετοιμασία του εδάφους με επαρκή επίπεδη διαμόρφωση και ικανοποιητική συμπύκνωση, είναι πρωταρχικές συνθήκες εξασφάλισης της καλής ποιότητας κατασκευής και της αποφυγής αρνητικών επιπτώσεων στις επιφανειακές στρώσεις και στα λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτών. Μία πρόσθετη ενέργεια που απαιτείται, είναι η τοποθέτηση του οπλισμού και των προβλεπόμενων, βάση του σχεδιασμού, βλήτρων, αλλά και η κατασκευή των αρμών διαστολής. Η διαδικασία αυτή χρήζει ιδιαίτερη προσοχή, με τις σωστές αποστάσεις του οπλισμού και το κατάλληλο πλάτος των αρμών να είναι κρίσιμοι παράγοντες για την επιθυμητή συμπεριφορά του

οδοστρώματος. Η ενδεχόμενη απροσεξία και η παράβλεψη σημαντικών σχετικών κανόνων τοποθέτησης, μπορεί να υποβαθμίσει την αποδοτικότητα και τη λειτουργικότητα του οδοστρώματος, προκαλώντας φθορές και τοπικές αστοχίες με ταυτόχρονη οικονομική επιβάρυνση της κατασκευής (NCPTC 2012, EUPAVE 2010).

Πρωτοποριακή μέθοδος με υποσχόμενα αποτελέσματα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο του σχεδιασμού, είναι η κατασκευή οδοστρώματος δύο επιπέδων (Two-Lift Concrete Paving). Μπορεί να απαιτεί ελαφρώς περισσότερο χρόνο και εργασιακό κόστος, από ότι τα οδοστρώματα ενιαίας στρώσης σκυροδέματος, δίνεται όμως με αυτόν τον τρόπο η ευκαιρία να αξιοποιηθούν ανακυκλώσιμα υλικά, αλλά και συμπληρωματικά υλικά σκυροδέματος (SCMs), και συγκεκριμένα τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA) και η ιπτάμενη τέφρα, στο κατώτερο επίπεδο μειωμένων εντατικών απαιτήσεων, σε σχέση με την επιφανειακή στρώση (βλέπε εικόνα 3.9). Φυσικά, η πραγματοποίηση της μεθόδου αυτής, εκτός από τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, μπορεί να επιφέρει και οικονομικά οφέλη λόγω της χαμηλότερης αξίας των ανακυκλώσιμων υλικών, των οποίων γίνεται χρήση στην κατώτερη στρώση (NCPTC 2012).



Εικόνα 3.9 Κατασκευαστική μέθοδος δύο επιπέδων

Παρεμφερής εναλλακτική μέθοδος είναι η χρήση Κυλινδρούμενου Συμπυκνωμένου Σκυροδέματος (Roller Compacted Concrete). Αποτελείται από τα ίδια συστατικά όπως το συμβατικό σκυρόδεμα και έχει παρόμοια αντοχή, με βασικές διαφορές όμως στην αναλογία

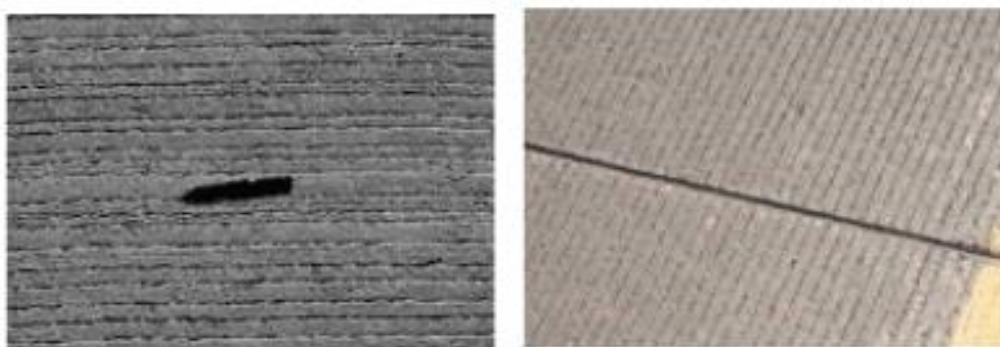
του μείγματος (βλέπε εικόνα 3.10). Μερικές από αυτές, είναι η έντονη παρουσία λεπτόκοκκων αδρανών, καθώς και η σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας τσιμέντου και του νερού, στο μείγμα. Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι η σχετικά άμεση χρήση του τμήματος του οδοστρώματος που μόλις κατασκευάστηκε, από ελαφρά οχήματα βέβαια, γεγονός που οφείλεται στις αρχικές συνθήκες συμπίκνωσης. Έτσι, σημαντικές μειώσεις στο χρόνο κατασκευής, στο κόστος κατασκευής λόγω οικονομικότερου εξοπλισμού για τη διάσπρωση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, αλλά και στις πιθανές κυκλοφοριακές συμφορήσεις, μπορεί να σημειωθούν. Επίσης, χάρη στη σύσταση του μείγματος, με χαμηλότερη χρήση ποσότητας συμβατικού τσιμέντου και νερού, η μέθοδος αυτή συμβάλλει συγχρόνως στην προστασία του περιβάλλοντος (NCPTC 2012, EUPAVE 2010, FHWA 2015).



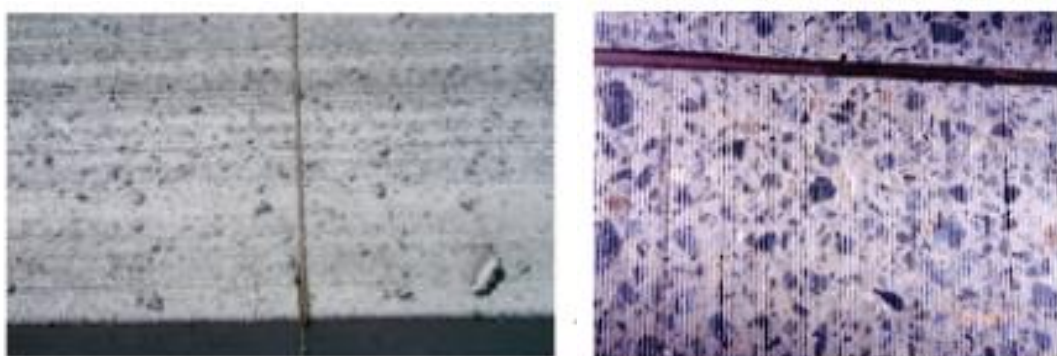
Εικόνα 3.10 Μέθοδος κυλινδρούμενου σκυροδέματος, RCC

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα έναντι των ασφαλτικών, είναι η κατώτερη ποιότητα της επιφάνειας. Πιο αναλυτικά, μετά την ολοκλήρωση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, τα επίπεδα ομαλότητας και υφής δεν είναι εξίσου επιθυμητά. Στοιχεία όπως η επαρκής τριβή και η αντίσταση ολίσθησης, είναι απαραίτητα σε θέματα ασφάλειας, όπως για παράδειγμα η μείωση των ατυχημάτων λόγω υδρολίσθησης, αλλά και σε θέματα οδηγικής άνεσης, με το ζήτημα του θορύβου να είναι ένα από αυτά. Έχει πολλάκις τονιστεί ο καθοριστικότερος ρόλος των επιφανειακών χαρακτηριστικών στις

επιπτώσεις σε περιβάλλον, οικονομία αλλά και κοινωνία. Πρόσθετες ενέργειες με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών αυτών, πρέπει να πραγματοποιηθούν, ώστε η κατασκευή να συμβαδίζει με τα κανονιστικά πρότυπα της βιωσιμότητας. Διάφορες κατηγορίες επεξεργασίας της επιφάνειας, συνιστώνται ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Οι πιο ενδεδειγμένες, είναι η μόρφωση εγκάρσιας ή διαμήκουσ γράμμωσης (βλέπε εικόνα 3.11), με εξαιρετικά αποτελέσματα σε θέματα επιφανειακής κύλισης και μείωσης θορύβου, το βούρτσισμα της επιφάνειας με σύρσιμο ειδικής λινάτσας, αλλά και η τριβή με τη χρήση αδαμαντοφόρου εξοπλισμού (βλέπε εικόνα 3.12), με εξίσου καλά αποτελέσματα και εντυπωσιακό μάλιστα αισθητικό και πρακτικό φινίρισμα (EUPAVE 2010).



Εικόνα 3.11 Εγκάρσια αριστερά και διαμήκουσ γράμμωση δεξιά



Εικόνα 3.12 Βούρτσισμα αριστερά και τριβή με χρήση διαμαντιών δεξιά

Συνοψίζοντας το κεφάλαιο αυτό, επιπρόσθετες μέθοδοι και στρατηγικές που ίσως και να έχουν αναφερθεί προηγουμένως σε θεωρητικό επίπεδο, με δευτερεύουσα αλλά αξιοπρόσεκτη επιρροή, είναι η χρήση του ανακυκλωμένου (γκρίζου) νερού, η επί τόπου (in-situ) ανακύκλωση πιθανώς υφιστάμενου παλαιού οδοστρώματος, η μέτρηση σε πραγματικό χρόνο του επιφανειακού προφίλ, αλλά και ο έλεγχος για την ευθυγράμμιση των βλήτρων. Όσον αφορά τις τελευταίες ελεγκτικές προτάσεις, οι οποίες ενδεχομένως να αυξάνουν το ύψος του συνολικού κόστους κατασκευής, από την άλλη πλευρά όμως παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης και διόρθωσης των κατασκευαστικών ατελειών, ιδιαίτερα κρίσιμων για την ακεραιότητα της κατασκευής (NCPTC 2012, FHWA 2015).

4 ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ & ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1 Γενικά

Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης και την παράδοση του έργου στην κυκλοφορία, δεν σταματούν όλες οι διαδικασίες που σχετίζονται το οδόστρωμα. Αντιθέτως, οι αντίστοιχες δραστηριότητες, με διαφορετικό πλέον ρόλο, παρατείνονται και αφορούν την παρατήρηση του οδοστρώματος σχετικά με θέματα όπως η συμπεριφορά, η αποδοτικότητα και η διακύμανση των επιπέδων των λειτουργικών και μηχανικών χαρακτηριστικών. Η συλλογή χρήσιμων πληροφοριών, αλλά και η αξιολόγηση που ακολουθεί, γίνεται με τη βοήθεια ειδικών μετρήσεων. Μεταβολές που μπορεί να σημειωθούν στις καιρικές συνθήκες, στον πραγματικό κυκλοφοριακό φόρτο, αλλά και σε απρόβλεπτες μεταβλητές εκτός της εμβέλειας σχεδιασμού, ενδέχεται να επηρεάσουν ανεπιθύμητα τη συμπεριφορά της κατασκευής. Για το λόγο αυτό, με την τακτική παρακολούθηση παρέχεται η δυνατότητα πρόληψης και αντιμετώπισης επικίνδυνων για την κατασκευή φαινομένων, με άμεσες, κατάλληλου είδους επεμβάσεις.

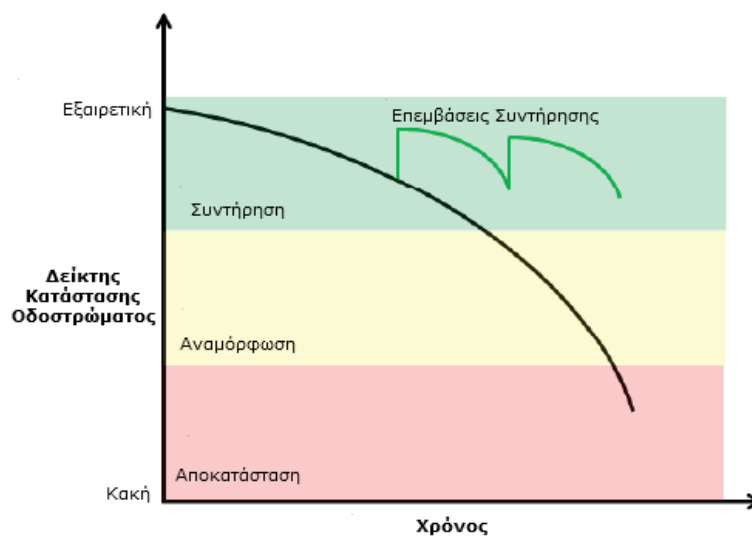
Στον κύκλο ζωής του οδοστρώματος, το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνει η μετά την κατασκευή περίοδος. Κατά τη φάση λειτουργίας και χρήσης του οδοστρώματος που είναι και το πιο σημαντικό σημείο για μία επιτυχημένη βιώσιμη συνολική συμπεριφορά, χαρακτηριστικά που καθορίζουν την αλληλεπίδραση των οχημάτων με το οδόστρωμα, όπως η αντίσταση κύλισης, η μακροϋφή, η ομαλότητα, η υδατοπερατότητα, αλλά και η ανακλαστικότητα και θερμοχωρητικότητα, αποτελούν παράγοντες-κλειδί για τις μετρήσεις που αφορούν στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας. Τέτοιου είδους μετρήσεις, είναι φυσικά ο δείκτης δομικής κατάστασης, η κατανάλωση καυσίμου και ενέργειας, το κόστος λειτουργίας των οχημάτων, τα επίπεδα θορύβου, η ασφάλεια, η επιφανειακή θερμοκρασία, αλλά και οι εκπομπές ρύπων. Η διατήρηση των χαρακτηριστικών αυτών σε ικανοποιητικά επίπεδα, καθιστά το οδόστρωμα βιώσιμο. Εδώ γεννάται και η ανάγκη για την προστασία, συντήρηση και όπου ενδείκνυται αποκατάσταση του οδοστρώματος, που με τη σειρά τους, παρά το αυξημένο κόστος το οποίο στη συνέχεια αντισταθμίζεται με την καλή αποδοτικότητα, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ενός βιώσιμου συστήματος (*FHWA 2015, NCPTC 2012, EUPAVE 2010*).

Η συντήρηση του οδοστρώματος δεν είναι μία απλή διαδικασία, αντιθέτως χαρακτηρίζεται περίπλοκη, εξαρτώμενη από διάφορους παράγοντες όπως ο χρόνος, το κόστος αλλά και το

επίπεδο της διαθέσιμης τεχνολογίας και χρήζει ειδικών διαχειριστικών τεχνικών για να σημειώσει θετικά αποτελέσματα.

Κάνοντας μία αναδρομή στο κεφάλαιο των βιώσιμων υλικών και του σχεδιασμού, παρατηρείται πως η διάρκεια ζωής των περισσότερων ανακυκλώσιμων υλικών που προτείνονται, είναι ενδεχομένως λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης που έχει προηγηθεί, αλλά και της σχετικής κόπωσης, εμφανώς μικρότερη. Επίσης, πολλαπλές ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν μερικά εναλλακτικά υλικά σχετικά με τις λειτουργικές και μηχανικές τους προδιαγραφές, μπορεί να επιφέρουν προβλήματα, τα οποία ίσως εμφανιστούν στο οδόστρωμα στη φάση λειτουργίας.

Σε περιπτώσεις που η διακύβευση είναι αυξημένη λόγω ερευνητικής αβεβαιότητας, ιδιαίτερο ρόλο αναλαμβάνει η συστηματική παρακολούθηση του οδοστρώματος. Καθοριστικής σημασίας είναι και η επιρροή του συγχρονισμού των εφαρμοζόμενων ενεργειών της συντήρησης επί του οδοστρώματος, σε περιπτώσεις που αυτή κρίνεται απαραίτητη, με σκοπό την πρόληψη σοβαρών φθορών σε πρώιμο στάδιο, πριν δηλαδή αυτές επεκταθούν κρίνοντας την ακεραιότητα της κατασκευής σε μεγάλο βαθμό (βλέπε εικόνα 4.1). Με αυτόν τον τρόπο, προλαμβάνονται ανεπιθύμητες καταστάσεις, που με τη σειρά τους ενδέχεται να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις σε περιβάλλον, κοινωνία αλλά και στον οικονομικό τομέα.



Εικόνα 4.1 Επιρροή της συντήρησης στην κατάσταση του οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου

Ειδικά σε οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας, τα χαρακτηριστικά που συντελούν τους βασικούς παράγοντες στην ποιότητα και την επίδοση της επιφάνειας, μπορεί να έχουν σημαντικά μεγάλη επιρροή στην κατανάλωση καυσίμου και στους εκπεμπόμενους ρύπους. Πέρα από τις φθορές ή/και μικροφθορές που είναι ορατές διά γυμνού οφθαλμού, υπάρχουν και μικρολεπτομέρειες που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές, αποτέλεσμα της φυσιολογικής φθοράς του οδοστρώματος λόγω συνεχούς χρήσης. Εκτός των μετρήσεων των μηχανικών χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα του δείκτη δομικής κατάστασης του οδοστρώματος που αναφέρεται κυρίως σε όρους αντοχής, υπάρχει αντίστοιχα η δυνατότητα μέτρησης, μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, της επιφανειακής κατάστασης με χρήση ακόμη και υπέρυθρης τεχνολογίας, αλλά γενικότερα με τη βοήθεια του Διεθνούς Δείκτη Τραχύτητας (International Roughness Index, IRI). Έτσι, με βάση τα αντίστοιχα επιτρεπτά όρια που έχουν τεθεί, και σε περιπτώσεις όπου οι μετρήσεις επί του οδοστρώματος τα υπερβαίνουν, χαμηλού κόστους και χρόνου βιώσιμες επεμβάσεις συντήρησης μπορούν να επαναφέρουν το οδόστρωμα σε επίπεδα καλής επιφανειακής κατάστασης (FHWA 2015).

4.2 Βιώσιμες τεχνικές συντήρησης

4.2.1 Ασφαλτικά οδοστρώματα

Ανάλογα με στοιχεία επί του οδοστρώματος και ειδικότερα το είδος, το μέγεθος της φθοράς, οι καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της συντήρησης, ο διαθέσιμος προϋπολογισμός, τα χρονικά περιθώρια για την παρακώληση της κυκλοφορίας, η διαθέσιμη τεχνολογία αλλά και τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα με βάση και το σχεδιασμό του υφιστάμενου οδοστρώματος, επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος συντήρησης (Hicks et. al. 2000, FHWA 2015).

Κάνοντας μία επισκόπηση στις τεχνικές συντήρησης και αποκατάστασης, οι πιο δημοφιλείς από αυτές αναφορικά για τα ασφαλτικά οδοστρώματα, είναι η πλήρωση και σφράγιση των ρωγμών, η τοπική επιδιόρθωση (μπάλωμα) του οδοστρώματος, διάφορα είδη ασφαλτοϋδαρών επισφραγιστικών μειγμάτων, η λείανση της επιφάνειας, η κατασκευή λεπτών ασφαλτικών επιστρώσεων, η θερμή ή ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση αλλά και η κατασκευή συνδεδεμένων επιστρώσεων από σκυρόδεμα (FHWA 2015). Από την άλλη πλευρά, με διαφορετική αντιμετώπιση όσον αφορά τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, διακρίνονται τεχνικές όπως η πλήρωση-σφράγιση των ρωγμών και των αρμών, η σταθεροποίηση των σκυροδεματικών πλακών, η λείανση της επιφάνειας με διάφορες μεθόδους, η τοπική επισκευή με διακυμάνσεις ως προς το βάθος ανάλογα με το μέγεθος της φθοράς, καθώς και η κατασκευή συνδεδεμένης ασφαλτικής επίστρωσης (NCPTC 2012,

EUPAVE 2010). Κάποιες από τις τεχνικές που προαναφέρθηκαν ενέχουν την έννοια της βιωσιμότητας εξ αρχής, όπως οι αντίστοιχες ανακυκλώσιμες μορφές. Σημαντική προτεραιότητα, είναι η τροποποίηση των υπολοίπων τεχνικών, με σκοπό τη συμμόρφωση τους με προδιαγραφές που συμβαδίζουν με την έννοια της βιωσιμότητας.

Ως γνωστόν, τα ασφαλτικά οδοστρώματα αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα εμφάνισης ρωγμών. Αυτές, μπορεί να δημιουργηθούν σε κάποιο βάθος του οδοστρώματος και έπειτα να επεκταθούν προς την επιφάνεια (*bottom-up cracking*), είτε να είναι καθαρά επιφανειακές, με την τάση όμως να επεκταθούν και να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στο οδόστρωμα εάν δεν προσεχθούν έγκαιρα (*top-down cracking*). Πιθανά αίτια είναι η ανεπαρκής συμπύκνωση, οι κακές συνθήκες διάστρωσης κυρίως από θερμοκρασιακής άποψης, αλλά και η εξελισσόμενη με την πάροδο του χρόνου φθορά. Ανάλογα με το είδος και το μέγεθος των ρωγμών, επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνική, με σκοπό την άμεση αποτελεσματικότητα.

Οι βιώσιμες τεχνικές που προτείνονται για σχετικά μικρές ρωγμές, αφορούν στο σφράγισμα αυτών, με κατάλληλο υλικό πλήρωσης, ώστε αυτό να μην επιτρέπει τη δίοδο του νερού και να έχει σαφώς ικανοποιητική αντοχή και ελαστικότητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές (*βλέπε εικόνα 4.2*). Η σωστή επεξεργασία της περιοχής των ρωγμών πριν την πλήρωση, και αργότερα το σφράγισμα αυτών, είναι προϋπόθεση θετικού αποτελέσματος. Στα πλεονεκτήματα, βρίσκονται το χαμηλό κόστος και η ταχεία ολοκλήρωση της διαδικασίας. Στα αρνητικά, συγκαταλέγονται η μικρή διάρκεια ζωής και η υποβάθμιση της επιφάνειας από πρακτική, αλλά και αισθητική άποψη (*FHWA 2015*). Μία καλής ποιότητας τέτοιου είδους συντήρηση, αποτελεί καθαρά βιώσιμη επιλογή μεγάλης ευελιξίας.



Εικόνα 4.2 Διαδικασία πλήρωσης-επισφράγισης επιφανειακών ρωγμών ασφαλτικών οδοστρωμάτων

Ιδιαίτερα συνηθισμένη τεχνική συντήρησης, είναι η τοπική επιδιόρθωση του οδοστρώματος με τη μορφή μπαλώματος (βλέπε εικόνα 4.3). Η συγκέντρωση πολλών τοπικών ρωγμών ή εμφάνιση τοπικής καθίζησης με τη μορφή λακκούβας, δεν μπορούν να επιδιορθωθούν με την απλή πλήρωση τους. Σε αυτήν την περίπτωση, ενδείκνυται η μέθοδος αυτή. Είναι μία γενικά οικονομική τεχνική και πραγματοποιείται σε μικρό χρόνο, αρκεί να περιορίζεται σε τοπικά σημεία. Η αφαίρεση του φθαρμένου ασφαλτικού υλικού μέχρι το κατάλληλο βάθος και εύρος που έχει επεκταθεί η βλάβη, καθώς και η καλή προετοιμασία της υπό επισκευή περιοχής, με καθαρισμό και επανασυμπύκνωση, αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την επιτυχία της επέμβασης στο πλαίσιο της βιωσιμότητας. Επίσης, η καλή ποιότητα του υλικού αντικατάστασης και οι σωστές συνθήκες τοποθέτησης, παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής της τεχνικής συντήρησης. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, ειδικά στους ελληνικούς δρόμους, όπου κακής ποιότητας επεμβάσεις οδηγούνται σε σύντομη αστοχία, αυξάνοντας το κόστος και υποβαθμίζοντας το οδόστρωμα, δημιουργώντας παράλληλα προβλήματα στους χρήστες σε θέματα κυκλοφοριακής συμφόρησης, οδηγικής συμπεριφοράς, αισθητικής, αλλά και ασφάλειας (FHWA 2015).



Εικόνα 4.3 Καλής ποιότητας τοπική επιδιόρθωση-μπάλωμα ασφαλτικού οδοστρώματος

Σε περιπτώσεις όπου το οδόστρωμα δεν φέρει σημαντικές φθορές υπό τη μορφή αντιληπτών αστοχιών, έχει όμως χάσει στοιχεία όπως η επαρκής επιφανειακή τριβή, η μακροϋφή, και η συνιστώμενη ομαλότητα, λόγω οξείδωσης, αλλά και εμφάνισης φαινομένων υπερβολικής έκθεσης των αδρανών της επιφανειακής επίστρωσης, προτείνεται η μέθοδος ανανέωσης της

επιφάνειας με προστατευτική επισφραγιστική στρώση ασφαλτοϋδαρής μορφής (FHWA 2015). Τα χρησιμοποιούμενα μείγματα διακρίνονται σε μορφή ασφαλτικού συνδετικού γαλακτώματος (fog seals, chip seals), και με παρόμοια μορφή (slurry seals), παρουσία όμως λεπτόκοκκων καλά διαβαθμισμένων αδρανών όπως η λεπτόκοκκη άμμος και η μεταλλουργική παιπάλη (βλέπε εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4 Τεχνική συντήρησης με τη μορφή γαλακτώματος αριστερά (fog seal) & με την εμφανή παρουσία λεπτόκοκκων αδρανών δεξιά (slurry seal)

Το χαμηλό κόστος, η ταχύτατη ολοκλήρωση της επέμβασης με ελάχιστη παρεμπόδιση της κυκλοφορίας και η βελτίωση της αισθητικής, προσδίδοντας την αίσθηση, ακόμη και ψευδώς, ενός καινούριου οδοστρώματος, συγκαταλέγονται στα θετικά. Για να καταστεί η τεχνική αυτή βιώσιμη, θα πρέπει να εφαρμοστεί στη βέλτιστη χρονικά στιγμή από άποψης καταστάσεως του οδοστρώματος, πριν δηλαδή εκδηλωθούν πιο εκτεταμένες φθορές. Πιθανώς καθυστερημένη επέμβαση να κριθεί αναποτελεσματική, υποβαθμίζοντας τον οικονομικό παράγοντα, το περιβάλλον αλλά και το βαθμό εξυπηρέτησης των χρηστών. Επίσης η καλή ποιότητα των υλικών έχει καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα της συντήρησης, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος με την καθυστέρηση της εκδήλωσης πιθανών μελλοντικών φθορών. Η μείωση της ανακλαστικότητας λόγω σκούρου χρώματος του μείγματος είναι ένα αρνητικό στοιχείο. Προσπάθεια όμως για την ενσωμάτωση στην τεχνική αυτή πιο ανοιχτόχρωμων αδρανών και ασφαλτικού συνδετικού υλικού, μπορεί να συνδράμει στο να αποφευχθεί τυχόν μείωση, ακόμη και να σημειωθεί έστω και μικρή, αλλά μεγάλης σημασίας αύξηση (FHWA 2015).

Μία άλλη εξαιρετικά συνήθης τεχνική συντήρησης, ιδίως στον ελλαδικό χώρο, είναι η κατασκευή μίας λεπτής ασφαλτικής επίστρωσης, συχνά αντιολισθηρής, στο υφιστάμενο οδόστρωμα (βλέπε εικόνα 4.5). Το πάχος αυτής κυμαίνεται περί τα 2 με 4 εκατοστά. Δεν προσδίδει περαιτέρω κατασκευαστική αντοχή με την έννοια της αύξησης της φορτικής ανάληψης, παρά περιορίζεται στη βελτίωση της επιφάνειας, καλύπτοντας διάφορου είδους ατέλειες. Κατά πλειοψηφία, οι επιστρώσεις αυτές είναι κλειστού τύπου, κατάλληλες για οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας, χωρίς να αποκλείεται η χρήση ανοικτού τύπου σε περιπτώσεις υδατοπερατών οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας. Συγκριτικά με τις τεχνικές που προαναφέρθηκαν, η τεχνική αυτή ενέχει αισθητά μεγαλύτερο κόστος και διάρκεια για να εφαρμοστεί. Η κατασκευή ανά λωρίδα, μειώνει τις κυκλοφοριακές καθυστερήσεις, χωρίς όμως να αγγίζει τα επίπεδα των προηγούμενων τεχνικών. Στα μείον είναι και η μείωση της λευκαύγειας, παρά την καλή προσφερόμενη αίσθηση στο χρήστη, αντιμετώπισιμο όμως ζήτημα όπως έχει προαναφερθεί (FHWA 2015).



Εικόνα 4.5 Κατασκευή λεπτής ασφαλτικής επίστρωσης σε υφιστάμενο οδόστρωμα

Προϋποθέσεις που κατατάσσουν ως βιώσιμη την εν λόγω τεχνική, είναι η σχολαστική επεξεργασία και προετοιμασία του υπάρχοντος οδοστρώματος, με ενέργειες όπως το φρεζάρισμα-άλεσμα της επιφάνειας για καλές συνθήκες συγκόλλησης, η σωστή θερμοκρασία διάστρωσης, αλλά και η εξασφάλιση της μη ύπαρξης φθορών που με επεκτατικές τάσεις να εμφανιστούν αργότερα στη νέα επιφάνεια, καθιστώντας άμεσα την

τεχνική αποτυχημένη. Σωστή μελέτη και αξιολόγηση του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με την καλή ποιότητα του ασφαλτικού μείγματος, ακόμη και με ποσοστό ανακυκλώσιμων υλικών στη σύστασή του, αλλά και της κατασκευαστικής διαδικασίας, είναι κινήσεις που διαβεβαιώνουν την επιτυχία του εγχειρήματος. Με τη βελτίωση των επιφανειακών χαρακτηριστικών ενισχύεται ταυτόχρονα και η συνολική ασφάλεια. Ο σωστός συγχρονισμός επίσης, μπορεί να θέσει τις βάσεις προς σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής και μείωση του συνολικού κόστους.

Στην τελευταία κατηγορία ανήκει αντίστοιχα η τεχνική κατασκευής συνδεδεμένης επίστρωσης από σκυρόδεμα, στο υφιστάμενο ασφαλτικό οδόστρωμα, χωρίς όμως να γνωρίζει παρόμοιου εύρους εφαρμογή, σε σχέση με τις ασφαλτικές επιστρώσεις (βλέπε *εικόνα 4.6*). Συνήθεις λόγοι χρήσης της τεχνικής αυτής, είναι κυρίως η εξάλειψη φθορών όπως η τροχοαυλάκωση, καθώς και η δυνατότητα ανάληψης μεγαλύτερου κυκλοφοριακού φόρτου, με την προσθήκη της παραπάνω στρώσης. Το πάχος της υπολογίζεται περί τα 50 με 150 χιλιοστά, με την προσθήκη ενισχυτικών ινών να είναι προαιρετική. Είναι υψηλού κόστους, αν και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής εκ σχεδιασμού, και απαιτεί αρκετό χρόνο για την ολοκλήρωση της δυσχεραίνοντας την ομαλή κυκλοφορία. Αντιθέτως, παρατηρείται σημαντική επιτάχυνση της αντίστοιχης διαδικασίας κατασκευής, με την τοποθέτηση προκατασκευασμένων πλακών σκυροδέματος.



Εικόνα 4.6 Κατασκευή συνδεδεμένης επίστρωσης σκυροδέματος σε υπάρχον ασφαλτικό οδόστρωμα

Σημαντικά πλεονεκτήματα της ανωτέρω τεχνικής, είναι η μεγάλη ευελιξία σε θέματα όπως η μόρφωση της υφής της επιφάνειας με κατάλληλη ειδική κατεργασία, αλλά ο χρωματικός τόνος, αυξάνοντας τα επίπεδα ανακλαστικότητας (*Harrington & Fick 2014, NCPTC 2012, FHWA 2015*). Σε περιπτώσεις όπου το υφιστάμενο οδόστρωμα είναι σε εξαιρετικά κακή κατάσταση επιφανειακά, τότε αυτό μπορεί να θεωρηθεί έδραση της νέας επίστρωσης σκυροδέματος, αφού πρώτα αφαιρεθεί/ανακυκλωθεί η φθαρμένη επίστρωση. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία που αναλύθηκαν, ενδεχομένως να αποτελέσει, σε ορισμένες μεν περιστάσεις, βιώσιμη τεχνική συντήρησης.

4.2.2 Οδοστρώματα από σκυρόδεμα

Διαφορετικά αντιμετωπίζονται τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, όσον αφορά τις τεχνικές συντήρησης. Τα δύσκαμπτης μορφής αυτά οδοστρώματα, είναι κατάλληλα για περιπτώσεις όπως οι σταθμοί διοδίων, τα αεροδρόμια, οι προβλήτες λιμένων, αλλά και γενικότερα η συμβατική χρήση με υψηλές απαιτήσεις ανερχόμενης κυκλοφορίας. Όπως τα ασφαλτικά, έτσι και αυτά με τη σειρά τους, παρά τη μεγάλη αντοχή και διάρκεια ζωής που τα χαρακτηρίζει, χρειάζονται συντήρηση για να παραμείνουν αποδοτικά. Καθώς η αντοχή των οδοστρωμάτων και συγκεκριμένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών, μεταβάλλονται ελάχιστα με την πάροδο του χρόνου, συχνότερη είναι η απαίτηση για συντήρηση της επιφάνειας, με ειδικές τεχνικές αναμόρφωσης αυτής.

Κύρια διαφοροποίηση συγκριτικά με τα ασφαλτικά οδοστρώματα, είναι η ύπαρξη αρμών διαστολής ανά συγκεκριμένες προκαθορισμένες αποστάσεις, με βάση το σχεδιασμό. Η παρουσία αυτών είναι μέγιστης σημασίας, καθώς αποτελούν ρυθμιστές στην ομαλή συστολή και διαστολή λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, κατά τη διάρκεια του χρόνου, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης ανεπιθύμητων ρωγμών. Πάνω σε αυτό, γεννάται η ανάγκη συντήρησης των αρμών, με τεχνικές όπως η πλήρωση και η σφράγιση αυτών συμπεριλαμβανομένων και πιθανών μικρορωγμών (*βλέπε εικόνα 4.7*). Για να θεωρηθεί βιώσιμη η τεχνική αυτή, θα πρέπει να εξασφαλιστούν κάποιες προϋποθέσεις και συμβιβασμοί. Η σωστή προετοιμασία του αρμού και ειδικότερα των τοιχωμάτων, με αφαίρεση του εναπομείναντος υλικού, αλλά και η επιλογή του κατάλληλου υλικού πλήρωσης με στόχο την αποφυγή της διείσδυσης του νερού, αποτελούν βασικές ενέργειες. Το χαμηλό κόστος και η μικρή διάρκεια της τεχνικής με ελάχιστες καθυστερήσεις στην κυκλοφορία, με εξαίρεση τη μικρή διάρκεια ζωής και την πιθανή υποβάθμιση της επιφάνειας σε θέματα οδηγικής συμπεριφοράς και αισθητικής, είναι επίσης στοιχεία βιωσιμότητας (*NCPTC 2012*).



Εικόνα 4.7 Πλήρωση-σφράγιση αρμών διαστολής οδοστρώματος από σκυρόδεμα

Ο σπλισμός που φέρουν τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, αποτελεί αλληλένδετο αντικείμενο που χρήζει συντήρησης, καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά αυτών. Σε γενικές γραμμές, ο διαμήκης σπλισμός είναι αρκετά προστατευμένος. Η δημιουργία όμως μικρορωγμών που εάν αγνοηθούν λόγω εσφαλμένων εκτιμήσεων, ενδέχεται να επιτρέψουν την εισροή νερού και υγρασίας, διαβρώνοντας τον σπλισμό. Ειδική περίπτωση, βασιζόμενη στην ανωτέρω διαπίστωση, είναι και η παρουσία των βλήτρων εγκάρσια των αρμών. Η προφανής έκθεση αυτών σε εξωτερικές συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα τη φθορά, συνεπώς και τη μείωση της αντοχής τους με την πάροδο του χρόνου. Το κόστος της τεχνικής αυτής είναι σχετικά χαμηλό, όπως μικρής διάρκειας είναι και η ολοκλήρωση αυτής. Εκτενής παρακολούθηση και ακολούθως βέλτιστα χρονικά αντικατάσταση των μηχανισμών τύπου βλήτρου, όπου απαιτηθεί και πριν μειωθεί σημαντικά η λειτουργικότητά τους, είναι στοιχεία βιώσιμης τακτικής συντήρησης (βλέπε εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8 Μηχανισμός βλήτρου αριστερά & τεχνική αντικατάστασης βλήτρων αρμών σε οδόστρωμα από σκυρόδεμα δεξιά

Όπως στα ασφαλτικά οδοστρώματα, έτσι και εδώ, η παρουσία τοπικά περιορισμένων φθορών με την εμφάνιση μεγάλων ρωγμών ή απώλειας υλικού λόγω πιθανής τοπικής αστοχίας ή καθίζησης, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την τεχνική επιδιόρθωσης-μπαλώματος (βλέπε εικόνα 4.9). Λόγω σχετικά μεγάλου πάχους εκ σχεδιασμού, των σκυροδεματικών στρώσεων του οδοστρώματος, το βάθος της επισκευής θα είναι αντίστοιχα μεγαλύτερο από ότι στα ασφαλτικά οδοστρώματα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και στη διαχείριση του οπλισμού, χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα. Είναι μία τεχνική μέτριου κόστους, αλλά όχι μικρής διάρκειας πραγμάτωσης. Σε περιπτώσεις όπου το οδόστρωμα έχει σχεδιαστεί με τη χρήση προκατασκευασμένων πλακών, η διαδικασία επιταχύνεται σημαντικά. Η αδιατάρακτη κοπή μπορεί να έχει εξίσου θετικά αποτελέσματα σε θέματα μείωσης χρόνου. Η δημιουργία πρόσθετων αρμών εξαιτίας της τεχνικής αυτής, ενδεχομένως να μειώσει την ποιότητα κύλισης, με τη γράμμωση της επιφάνειας στην περιοχή επιδιόρθωσης να κρίνεται επιτακτική (Smith *et. al.* 2014). Αποτελεί βιώσιμη λύση με περιορισμένη όμως χρήση, καθώς εκτεταμένη εφαρμογή της επί του οδοστρώματος μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αντικοινωνική και επιβαρυντική για το περιβάλλον. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προτείνεται η κατασκευή επίστρωσης σκυροδέματος στο υφιστάμενο οδόστρωμα (NCPTC 2012).



Εικόνα 4.9 Τοπική επιδιόρθωση οδοστρώματος από σκυρόδεμα

Σε οδοστρώματα προκατασκευασμένων πλακών σκυροδέματος, σημάδια αποκλίσεως (ανισοσταθμία) μεταξύ των πλακών, είναι πιθανό να εμφανιστούν. Αυτά μπορεί να οφείλονται σε διαφορικές καθιζήσεις, σε θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του

οδοστρώματος, αλλά και λόγω διαφοροποιήσεων της μεθόδου συμπυκνώσεως. Επιπτώσεις των υψομετρικών μικροαποκλίσεων της ερυθράς, είναι η κακή οδηγική συμπεριφορά, η αυξημένη κατανάλωση λόγω βισκοελαστικών απωλειών ενέργειας, αλλά και η μείωση της παρεχόμενης ασφάλειας. Παρόλα αυτά, με βάση και τη διαθέσιμη τεχνολογία για την υψηλής ακρίβειας μέτρηση του απόλυτου υψομέτρου, αποκλίσεις τέτοιου είδους μπορεί εύκολα να εντοπιστούν. Η τεχνική συντήρησης στην προκειμένη περίπτωση είναι απλή, με μικρό κόστος και μικρή απαιτούμενη διάρκεια. Το σημαντικό στοιχείο που μάλιστα αποτελεί κριτήριο βιωσιμότητας, είναι η έγκαιρη διάγνωση.

Πέρα από τις βασικές φθορές που μπορεί να εμφανιστούν, καταλυτική είναι η κατάσταση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Μπορεί κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής να χρειαστούν κάμποσες επεμβάσεις συντήρησης της επιφάνειας. Έχει επανειλημμένως επισημανθεί ο ρόλος των επιφανειακών χαρακτηριστικών σε θέματα βιωσιμότητας. Βασικός λόγος συντήρησης, είναι η φυσιολογική φθορά με τη χρήση, ιδίως σε περιπτώσεις υψηλής κυκλοφορίας. Απώλεια τριβής, υπερβολική επιφανειακή έκθεση των αδρανών, μη ανεκτά επίπεδα ομαλότητας, αλλά και ενδείξεις υψηλού θορύβου, είναι στοιχεία που καθιστούν αναγκαίες τις σκέψεις για συντήρηση. Κατάλληλες βιώσιμες τεχνικές είναι η αυλάκωση με τη βοήθεια μόρφωσης εγκάρσιας ή διαμήκουσ γράμμωσης, καθώς και η τριβή της επιφάνειας με τη βοήθεια αδαμαντοφόρου εξοπλισμού (βλέπε εικόνα 4.10). Είναι μία ταχεία τεχνική με εξίσου μικρό κόστος, χωρίς όμως μεγάλη διάρκεια ζωής, και για το λόγο αυτό, υφίσταται η μεγάλη πιθανότητα επανεφαρμογής της. Μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών, είναι η χρήση αρκετής ποσότητας νερού, ο προκαλούμενος υψηλός θόρυβος, αλλά και η τσιμεντολάσπη που παραμένει στο οδόστρωμα μετά το πέρας της συγκεκριμένης διαδικασίας, η οποία για να απομακρυνθεί, απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού (FWHA 2015, EUPAVE 2010).



Εικόνα 4.10 Μόρφωση διαμήκους γράμμωσης/αυλάκωσης σε οδόστρωμα από σκυρόδεμα

Προς σύνοψη των βιώσιμων τεχνικών συντήρησης, ένα σημαντικό ζήτημα που απασχολεί τον τομέα συντήρησης των οδοστρωμάτων, είναι οι επεμβάσεις διάφορων δημόσιων υπηρεσιών με σκοπό την κατασκευή ή επισκευή έργων κοινής ωφέλειας. Απρόσεχτες ενέργειες και προχειρότητες υποβαθμίζουν αισθητά το οδόστρωμα, προξενώντας προβλήματα στους χρήστες και ταυτόχρονα επιβαρύνοντας οικονομικά τις ανάδοχες εταιρίες, αλλά και το περιβάλλον λόγω επαναλαμβανόμενων άσκοπων εργασιών. Πολυάριθμα είναι δυστυχώς, τα φαινόμενα αυτά στην Ελλάδα. Πολλές συμβάσεις θέτουν χρονικά περιθώρια και οικονομικές αποζημιώσεις σε τυχόν παραβάσεις. Παρόλα αυτά συνιστάται η παρακολούθηση και η καθοδήγηση των υπεργολάβων από την ανάδοχο εταιρία για αποτελεσματικές λύσεις.

4.3 Βιώσιμες μέθοδοι αποκατάστασης

Όταν η κατάσταση του οδοστρώματος έχει υπερβεί τα επιτρεπτά όρια φθορών, τότε η συντήρηση αυτού κρίνεται μη αποδοτική. Τεχνικές συντήρησης που προηγουμένως αναλύθηκαν, κρίνονται ιδιαίτερα χρονοβόρες και αντιοικονομικές. Στην προκειμένη περίπτωση, το οδόστρωμα χρειάζεται αποκατάσταση, δηλαδή μεγαλύτερης εμβέλειας επέμβαση συντήρησης ή καλύτερα διατήρησης αυτού σε λειτουργία. Σημαντικές φθορές τοπικά περιορισμένες, αλλά και εκτεταμένες κατά μήκος του οδοστρώματος, καθώς και η κακή ποιότητα της επιφάνειας, αποτελούν αφορμές για την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η καλή κατάσταση των κατώτερων στρωμάτων, καθώς τυχόν φθορές στις στρώσεις έδρασης καθιστούν το οδόστρωμα μη επισκευάσιμο.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης που αφορούν τα ασφαλτικά οδοστρώματα είναι η Θερμή Επί Τόπου Ανακύκλωση (Hot In-Place Recycling, HIR) και αντίστοιχα η Ψυχρή Επί Τόπου Ανακύκλωση (Cold In-Place Recycling, CIR). Και οι δύο μέθοδοι ενέχουν την ανακύκλωση ως κύρια διαδικασία αποκατάστασης, και θεωρούνται γενικά βιώσιμες. Ξεκινώντας με τη θερμή ανακύκλωση, αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου οι εκτεταμένες επιφανειακά φθορές δεν ξεπερνούν τα 5 εκατοστά σε βάθος. Με κατάλληλη θέρμανση και ακολούθως χαλάρωση της επιφάνειας, αφαιρείται το ασφαλτικό υλικό, το οποίο άμεσα και επί τόπου (in situ) αναμειγνύεται με διάφορα πρόσθετα, με συμβατικό ασφαλτικό συνδετικό και με αδρανή υλικά, όπου απαιτηθεί. Στη συνέχεια ακολουθεί η επαναδιάστρωση και επανασυμπύκνωση αυτού (βλέπε εικόνα 4.11). Ουσιαστικά ανακτάται το ασφαλτικό υλικό (RAP), το οποίο και άμεσα αξιοποιείται με την ανακύκλωση. Η διαδικασία αποτελείται από τρεις φάσεις, την ανακύκλωση της επιφάνειας, την επανάμειξη και τελικώς την επαναδιάστρωση (Peshkin et. al. 2011, FHWA 2015).



Εικόνα 4.11 Θερμή επί τόπου ανακύκλωση ασφαλτικού οδοστρώματος

Είναι μία τεχνική υψηλού σχετικά κόστους, καθώς στη συνέχεια ενδεχομένως να χρειαστεί και η τεχνική επισφράγισης με ασφαλτοϋδαρή μείγματα (fog seals), υπόσχεται όμως μεγάλη διάρκεια ζωής. Επίσης, πραγματοποιείται με ταχείς ρυθμούς, συμβάλλοντας στην ομαλή διεξαγωγή της κυκλοφορίας. Εάν η μέθοδος αυτή τροποποιηθεί με σκοπό την αποφυγή της μείωσης των επιπέδων ανακλαστικότητας, αλλά και της περιβαλλοντική επιβάρυνσης λόγω της ρυπογόνους διαδικασίας, τότε η μέθοδος αυτή μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη.

Παρόμοια μέθοδος είναι και η ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση, με διαφορές όπως η χαμηλή θερμοκρασία ανακύκλωσης, η επαναφορά της επιθυμητής επίκλισης, αλλά και η χρήση σε εκτεταμένα επιφανειακές φθορές, μικρού όμως μεγέθους, να ξεχωρίζουν (βλέπε εικόνα 4.12). Οι φάσεις της μεθόδου αυτής είναι οι ίδιες, με κύρια διαφορά τη θερμοκρασία ανάμειξης και επαναδιάστρωσης. Συνήθως συνιστάται η σφράγιση της νέας επιφάνειας με χρήση ασφαλτικού μείγματος υδαρής μορφής (chip seal) για καλύτερα αποτελέσματα. Λόγω της χαμηλής απαιτούμενης θερμοκρασίας, είναι μία μέθοδος φιλικότερη προς το περιβάλλον. Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής, εξαρτώμενη όμως και από την ποιότητα των υλικών της επιστρώσης του υφιστάμενου οδοστρώματος (FHWA 2015). Η μη παρουσία της φάσης θέρμανσης όπως στη θερμή επί τόπου ανακύκλωση, μειώνει τον απαιτούμενο χρόνο εφαρμογής. Αλλαγές με σκοπό τη μείωση της λευκαύγειας, είναι θετικές. Με κατάλληλη προσοχή, αποτελεί μίας βιώσιμης μορφής μέθοδος αποκατάστασης.



Εικόνα 4.12 Ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση ασφαλτικού οδοστρώματος

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα σπανίως αποκαθίστανται, λόγω μεγάλης μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος. Παρόλα αυτά, εάν το οδόστρωμα φέρει φθορές της μορφής μεγάλων ρωγματώσεων ή και ρηγματώσεων μέχρι ένα ορισμένο βάθος, τότε δεν συνιστάται η συντήρηση, παρά μόνον η αποκατάσταση του. Η πιο συνηθισμένη τεχνική που ακολουθείται, είναι η επί τόπου ανακύκλωση, εάν υπάρχει ο κατάλληλος μηχανικός εξοπλισμός για να πραγματοποιηθεί (βλέπε εικόνα 4.13). Σε περίπτωση που αυτός δεν διατίθεται, τότε η διαδικασία της ανακύκλωσης πρέπει να λάβει χώρα στο κοντινότερο αρμόδιο εργοστάσιο, η μεταφορική όμως δραστηριότητα για να συμβεί αυτό αυξάνει

δραματικά το κόστος, το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης, αλλά και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από τους εκπεμπόμενους ρύπους, όντας μη βιώσιμη. Εναλλακτική επιλογή με βιώσιμες προοπτικές, είναι η κατασκευή κινητών εργοστασιακών μονάδων χαμηλού γενικά κόστους και χρόνου στησίματος, μειώνοντας έτσι τις αποστάσεις για μεταφορά, άρα και παράγοντες όπως ο χρόνος και το κόστος. Δεν αποτελεί ιδιαίτερα αξιόπιστη μέθοδος, σε περιπτώσεις όμως που όλες οι άλλες τεχνικές συντήρησης καθίστανται ανωφελείς, μπορεί να θεωρηθεί υπό συνθήκες βιώσιμη (NCPTC 2012, FHWA 2015).



Εικόνα 4.13 Επί τόπου ανακύκλωση οδοστρώματος από σκυρόδεμα

Αντικείμενο ενδιαφέροντος αποτελεί η διαχειριστική τακτική των οδοστρωμάτων, όταν η συντήρηση ή μερική αναμόρφωση αυτών κρίνεται μη συμφέρουσα λύση, λόγω σημαντικότερων πλέον φθορών, κάτι που παρατηρείται όταν αυτά πλησιάζουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Οικονομικής φύσεως περιορισμοί μπορεί να μην επιτρέψουν την κατασκευή νέου οδοστρώματος. Αντ' αυτού, προτείνεται η ανακυκλώσιμης φύσεως τεχνική της Ανάκτησης εις Βάθος του οδοστρώματος (Full-Depth Reclamation, FDR) (βλέπε εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14 Μηχάνημα πλήρους βάθους ανάκτησης οδοστρώματος αριστερά & αντίστοιχη κεφαλή δεξιά

Με την τεχνική αυτή, το οδόστρωμα ανακτάται ολοκληρωτικά, μέχρι και τα 30 εκατοστά σε βάθος, όπου στη συνέχεια κονιορτοποιείται και ομοιογενοποιείται για απώτερη χρήση. Το ανακτημένο αυτό υλικό αναμειγνύεται με συνδετικό υλικό και ειδικά πρόσμικτα, και στη συνέχεια διαστρώνεται στο νέο επί τόπου οδόστρωμα (FHWA 2015). Με την κατάλληλη προσφερόμενη τεχνογνωσία και τον κατάλληλο διαθέσιμο εξοπλισμό, μπορεί να αποδειχθεί μία βιώσιμη μέθοδος που να αποτελέσει ισχυρή οικονομική και περιβαλλοντική λύση, σε οδοστρώματα που φέρουν σημαντικές φθορές.

5 ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΟΣ ΒΙΩΣΙΜΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

5.1 Γενικά

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, παρά τις οικονομικές και κοινωνικές δυσκολίες που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια, με πρόσθετο κίνητρο τη βελτίωση της περιβαλλοντικής κατάστασης, προσφέρει πολυάριθμες λύσεις για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της πορείας των κατασκευών, στην προκειμένη περίπτωση των οδοστρωμάτων. Η σημασία της δυνατότητας αυτής, είναι ακόμη μεγαλύτερη στα βιώσιμα οδοστρώματα, καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί καινοτόμα υλικά και πρωτοποριακές μέθοδοι. Με την επισκόπηση της μεταβολής των κύριων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου, υπάρχει η δυνατότητα να εντοπιστούν κάποια σημεία που μπορεί να έχουν αρνητική επιρροή, ειδικότερα κατά τη φάση λειτουργίας. Η εστίαση στα σημεία αυτά, σε σωστό χρόνο και με κατάλληλη αντιμετώπιση, μπορεί να θεωρηθεί βιώσιμη τακτική, συμβάλλοντας στη βελτίωση των στοιχείων που συντέλεσαν στην κατασκευή των βιώσιμων οδοστρωμάτων.

Όσον αφορά τα οδοστρώματα, πέρα από τη φάση κατασκευής, η οποία πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερος, η συντήρηση και αποκατάσταση τους λόγω της μεγάλης διάρκειας της φάσης λειτουργίας, αλλά και της καθοριστικής επιρροής αυτής στο βαθμό της βιωσιμότητας, επιβάλλεται να αντιμετωπιστεί ενδελεχώς. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, επισημάνθηκαν οι κυριότερες βιώσιμες τεχνικές συντήρησης και αποκατάστασης, ανάλογα με την περίπτωση των φερόμενων φθορών, αλλά και του είδους του οδοστρώματος. Το ζήτημα που προκύπτει, αφορά την κατάλληλη χρονικά στιγμή που πρέπει να εφαρμοστεί η ανάλογη τεχνική συντήρησης/αποκατάστασης, για τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα.

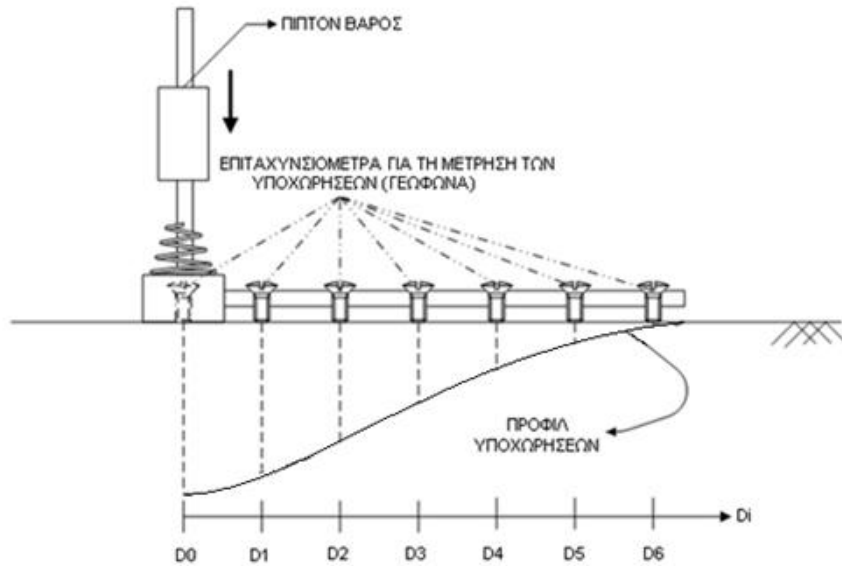
Απάντηση σε αυτό το σημαντικό κομμάτι που απασχολεί τους αρμόδιους φορείς, αποτελεί η οπτική επισκόπηση του οδοστρώματος, σε συνδυασμό με την πραγματοποίηση ειδικών μετρήσεων επί αυτού. Πολύ συχνά, παρατηρείται η εφαρμογή προγραμματισμένων από τη φάση σχεδιασμού, επεμβάσεων συντήρησης, αποκαλούμενες αλλιώς ως συντηρήσεις τύπου ρουτίνας, χωρίς να προηγηθεί η εξέταση της κατάστασης του οδοστρώματος. Σημαντικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι η ενδεχομένως κακή κατάσταση του υφιστάμενου οδοστρώματος πριν την εφαρμογή, που θα καταστήσει άμεσα αναποτελεσματική την επέμβαση συντήρησης, αλλά και από την άλλη πλευρά, η πιθανώς καλή κατάσταση, που θα κρίνει ουσιαστικά άσκοπη την όποια απόπειρα συντήρησης (*Molenaar 2006*). Φυσικά, οι αρνητικές επιπτώσεις στο οικονομικό σκέλος, αλλά και συγχρόνως στο περιβάλλον και τους χρήστες, είναι αναπόφευκτες. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η οπτική παρακολούθηση του

οδοστρώματος, και μαζί με τη βοήθεια κατάλληλων μετρήσεων, η αξιολόγηση της κατάστασης αυτού, με σκοπό την επιλογή της αναγκαίας τεχνικής συντήρησης. Αξίζει να τονιστεί, πως η σωστή επιλογή του χρόνου εφαρμογής, συμβάλλει θετικά στην αποτελεσματικότητα της εκάστοτε επέμβασης.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης και μέτρησης της κατάστασης του οδοστρώματος. Διαφοροποιήσεις συναντώνται στην αποτελεσματικότητα αυτών, αλλά και στο αντίστοιχο κόστος εφαρμογής. Έχει επανειλημμένως τονιστεί, πως το κόστος με βάση τα κριτήρια της βιωσιμότητας, αναφέρεται σε όλο τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Για παράδειγμα, επιλογές με χαμηλό αρχικό κόστος, μπορεί να έχουν αρνητική εξέλιξη στην κατάσταση του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα την αναμενόμενη απότομη αύξηση του κόστους λόγω αναγκαιών μελλοντικών επιδιορθώσεων. Αντιθέτως, ένας αρχικά υψηλότερος προϋπολογισμός, μπορεί να αποφέρει αποτέλεσμα με σημαντικά στοιχεία ανταπόδοσης, μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής. Αυτό συνεπάγεται, πως η επιλογή μίας συγκριτικά υψηλού κόστους μεθόδου παρακολούθησης και μετρήσεων, μπορεί να εξασφαλίσει χρήσιμα και συγχρόνως λεπτομερή στοιχεία, που άλλες μέθοδοι ενδεχομένως να μη δύναται να αναδείξουν. Αξιοποιώντας τα στοιχεία αυτά, μπορεί να σημειωθεί θετική πρόοδος και φυσικά η επιλογή να αποδειχθεί ανταποδοτική.

5.2 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους

Μία περίπτωση καταγραφής χρήσιμων στοιχείων επί του οδοστρώματος, σχετικά με την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του, είναι το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD). Είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα που εφαρμόζεται στην επιφάνεια κυρίως ασφαλτικών οδοστρωμάτων, καθώς η χρήση του σε δύσκαμπτα οδοστρώματα δεν συνιστάται. Η λειτουργία του βασίζεται στην κάθετη πτώση μίας μάζας από κάποιο χαρακτηριστικό ύψος, η οποία μεταδίδει μέσω του δίσκου φόρτισης το δημιουργούμενο παλμό, ως καταπόνηση στην επιφάνεια του οδοστρώματος (βλέπε *εικόνα 5.1*). Με κατάλληλους αισθητήρες που τοποθετούνται επί του οδοστρώματος σε καθορισμένες αποστάσεις από την πλάκα φόρτισης, τα λεγόμενα γεώφωνα, καταγράφεται η ταχύτητα σε καθένα από αυτά, κατά τη διάρκεια της παλμικής φόρτισης. Στη συνέχεια, με μαθηματική ολοκλήρωση των ταχυτήτων, προκύπτουν οι αντίστοιχες υποχωρήσεις (ελαστικές μετατοπίσεις) ανά θέση, η επεξεργασία και η ανάλυση των οποίων θα δώσει αργότερα πολύτιμες πληροφορίες (Λοΐζος & Πλατή 2015, Molenaar 2006).



Εικόνα 5.1 Σχηματική περιγραφή του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους

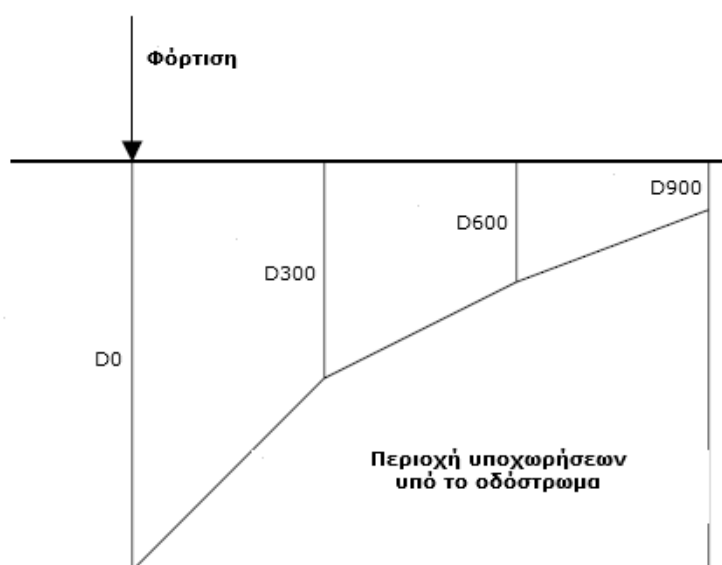
Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους είναι μία αρκετά δημοφιλής μέθοδος αξιολόγησης της κατάστασης του οδοστρώματος, και γνωρίζει ευρεία αποδοχή, με τη χρήση του να έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Αυτό κυρίως οφείλεται στα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα που προσφέρει, όπως ο ικανοποιητικός βαθμός προσομοίωσης των πραγματικών συνθηκών φόρτισης του οδοστρώματος, από τα διερχόμενα οχήματα. Ο δυναμικός χαρακτήρας του επιβαλλόμενου παλμού, προσεγγίζει τη ρεαλιστική φόρτιση που σημειώνεται κατά τη διέλευση του τροχού, ενός τυχαίου οχήματος. Παρόμοια είναι και η διάρκεια της παλμικής φόρτισης του παραμορφωσίμετρου, η οποία κυμαίνεται περί τα 25 έως και 60 msec, ανάλογα με τα ονομαστικά χαρακτηριστικά (μάζα πίπτοντος υλικού, ύψος, διάμετρος δίσκου, υλικό) της συσκευής. Να σημειωθεί, πως η διάρκεια φόρτισης ενός οχήματος κινούμενου με ταχύτητα περίπου 50 χιλιομέτρων ανά ώρα, ανέρχεται σε 20 msec, αρκετά παρεμφερής τιμή της διάρκειας φόρτισης του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Λοΐζος & Πλατή 2015).

Ειδικότερα, η συγκεκριμένη μέθοδος υπερτερεί emphaticά έναντι άλλων μεθόδων, ευρείας μάλιστα χρήσης, όπως η δοκός Benkelman (Benkelman Beam, BB), αλλά και ο καταγραφέας υποχωρήσεων Lacroix (Lacroix Deflectograph, LD), λόγω του δυναμικού χαρακτήρα της φόρτισης, που προσομοιάζει επαρκώς την πραγματικότητα. Το σημαντικό αυτό χαρακτηριστικό, δεν συναντάται στις δύο τελευταίες μεθόδους, οι οποίες παραπέμπουν περισσότερο σε στατικές συνθήκες φόρτισης μεγαλύτερης διάρκειας. Με την εξαιρετικά

μικρή διάρκεια της φόρτισης, η διαδικασία δεν επηρεάζεται από την κυκλοφορία τη στιγμή της μέτρησης, καθώς επίσης αμελούνται τυχών βισκοελαστικές παραμορφώσεις, που υπό άλλες συνθήκες, θα είχαν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Αυτό φυσικά δεν συμβαίνει κατά την εφαρμογή των άλλων δύο μεθόδων που αναφέρθηκαν. Παρά το υψηλό συγκριτικά κόστος, ο βαθμός αξιοπιστίας είναι αρκετά μεγάλος, επιτυγχάνεται με λίγες επαναλήψεις, καθώς τα αποτελέσματα εμπεριέχουν σημαντικές λεπτομέρειες για όλες τις επιμέρους στρώσεις, καθιστώντας τη συγκεκριμένη μέθοδο άκρως ανταποδοτική (Λοΐζος & Πλατή 2015, Molenaar 2006).

5.3 Δείκτες και παράμετροι δομικής κατάστασης οδοστρώματος

Με βάση τις διάφορες ελαστικές υποχωρήσεις ανά απόσταση, οι οποίες καταγράφονται με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, προκύπτουν οι αντίστοιχοι δείκτες και παράμετροι που περιγράφουν τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, αυτοί είναι ο δείκτης δομικής κατάστασης (D_0), η πιο απομακρυσμένη από το δίσκο φόρτισης μετρημένη υποχώρηση, στην προκειμένη περίπτωση η υποχώρηση D_{1800} , καθώς και διάφοροι Παράμετροι της Περιοχής των Υποχωρήσεων (Deflection Basin Parameters, DBPs) (βλέπε εικόνα 5.2). Οι παράμετροι αυτοί είναι αναλυτικότερα, ο Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας (Surface Curvature Index, SCI), ο Δείκτης Φθοράς της Βάσης (Base Damage Index, BDI) και ο Δείκτης Καμπυλότητας της Βάσης (Base Curvature Index, BCI) (Λοΐζος & Πλατή 2015, Talvik & Aavik 2008, Kim & Park 2002).



Εικόνα 5.2 Περιοχή υποχωρήσεων και αντίστοιχες μετατοπίσεις ανά απόσταση από το σημείο φόρτισης

Ο δείκτης δομικής κατάστασης (D_0) είναι ουσιαστικά η ελαστική υποχώρηση που καταγράφεται ακριβώς κάτω από το δίσκο φόρτισης, η οποία είναι και η μέγιστη που προκύπτει. Από την άλλη πλευρά, η υποχώρηση D_{1800} είναι η μικρότερη που καταγράφεται, όντας η πιο απομακρυσμένη από το δίσκο φόρτισης. Όσον αφορά τους αντίστοιχους δείκτες που προκύπτουν από την περιοχή των υποχωρήσεων, αυτοί εκφράζουν διαφορές των ελαστικών μετατοπίσεων και δίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (βλέπε πίνακα 5.1).

Πίνακας 5.1 Παράμετροι δομικής κατάστασης οδοστρώματος

| | |
|--|----------------------------------|
| Δείκτης Επιφανειακής Καμπυλότητας (ανάλογα με την απόσταση) | $SCI_{225} = D_0 - D_{225}$ (μm) |
| | $SCI_{300} = D_0 - D_{300}$ (μm) |
| | $SCI_{450} = D_0 - D_{450}$ (μm) |
| | $SCI_{600} = D_0 - D_{600}$ (μm) |
| Δείκτης Φθοράς της Βάσης | $BDI = D_{300} - D_{600}$ (μm) |
| Δείκτης Καμπυλότητας της Βάσης | $BCI = D_{600} - D_{900}$ (μm) |

Σχετικά με τους δείκτες και τις παραμέτρους δομικής κατάστασης, πρέπει να προηγηθεί η επεξεργασία των αντίστοιχων υποχωρήσεων, οι οποίες υπεισέρχονται στους αντίστοιχους δείκτες. Όσον αφορά τη διαδικασία της μέτρησης, υπάρχουν κάποιες λεπτομέρειες που πρέπει να συνυπολογιστούν στην εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, έπειτα από επεξεργασία και ανάλυση των αρχικών μετρήσεων. Παράγοντες όπως το επιβαλλόμενο φορτίο σε όρους δυνάμεων, αλλά και η θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων τη στιγμή της μέτρησης, καθορίζουν τα αριθμητικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις μετατρέπονται σε κοινές συνθήκες μέτρησης με κατάλληλους τύπους, και συγκεκριμένα σε φορτίο αναφοράς και θερμοκρασία αναφοράς, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμες. Εάν απαιτείται μετατροπή και για τις δύο περιπτώσεις (φορτίο, θερμοκρασία), τότε η αναγωγή σε φορτίο αναφοράς προηγείται της αναγωγής σε θερμοκρασία (Λοΐζος & Πλατή 2015, Molenaar 2006).

Η αναγωγή των υποχωρήσεων σε φορτίο αναφοράς, γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης (5.1). Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ανάλυσης, η τιμή του φορτίου αναφοράς καθορίστηκε στα 50 kN. Όλες ανεξαιρέτως οι υποχωρήσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία των μετρήσεων, ανάγονται σε φορτίο αναφοράς. Το ίδιο ισχύει και για τους δείκτες και τις παραμέτρους δομικής κατάστασης, όπου οι επιμέρους υποχωρήσεις των αντίστοιχων σχέσεων, λαμβάνονται έπειτα από αναγωγή σε φορτίο αναφοράς.

$$D_x (50 \text{ kN}) = [D_x (P) * 50] / P \quad (5.1)$$

Όπου:

- P: Φορτίο κατά τη μέτρηση (kN)
- $D_x (P)$: Υποχώρηση υπό φορτίο P (kN)
- $D_x (50\text{kN})$: Υποχώρηση σε φορτίο αναφοράς 50 kN
- (x): Η απόσταση σε (mm) από το δίσκο φόρτισης

Σχετικά με την αναγωγή των μετρήσεων σε θερμοκρασία αναφοράς, υφίστανται κάποιες διαφοροποιήσεις. Λόγω της μη επιρροής της θερμοκρασίας, πέραν της απόστασης των κατά προσέγγιση 200 χιλιοστών από το σημείο φόρτισης, κάποιοι δείκτες δεν μετατρέπονται σε θερμοκρασία αναφοράς. Πιο αναλυτικά, η ενεργή ακτίνα επιρροής (effective radial distance, D_{eff}) της θερμοκρασίας από το δίσκο φόρτισης, δίνεται από την εξής σχέση: ($D_{\text{eff}} = 5.5 * H_{\text{AC}} - 22.2$, mm), όπου H_{AC} , το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων (Kim & Park 2002). Στην προκειμένη περίπτωση, με το μέσο πάχος να είναι 10.9 εκατοστά, η τιμή που προκύπτει είναι 375 χιλιοστά, αρκετά κοντά στην απόσταση της υποχώρησης D_{300} . Επομένως, θεωρείται εκ παραδοχής αποδεκτό, πως πέραν της απόστασης των 300 χιλιοστών από το δίσκο φόρτισης, δεν γίνεται αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς.

Με βάση τα ανωτέρω, οι δείκτες που ανάγονται σε θερμοκρασία αναφοράς, είναι ο δείκτης δομικής κατάστασης (D_0), καθώς και ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας (SCI), στις τέσσερις, με βάση την απόσταση, εκδοχές του. Η τιμή της θερμοκρασίας αναφοράς που λήφθηκε για τη συγκεκριμένη ανάλυση, είναι 20 °C. Η θερμοκρασία αυτή είναι μάλιστα η θερμοκρασία αναφοράς που έχει καθοριστεί για παρόμοιες μετρήσεις στη χώρα μας. Για την αναγωγή, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο Συντελεστής Διόρθωσης της Θερμοκρασίας (Temperature Normalization Factor, TNF). Ο υπολογισμός αυτός, γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης (5.2). Οι σταθερές του συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας για τους αντίστοιχους δείκτες, δίνονται στον πίνακα (5.2) (Λοϊζος & Πλατή 2015, Molenaar 2006).

$$\text{TNF} = 1 + (\alpha_1 + \alpha_2/h_1) * (T_A - 20) + (\alpha_3 + \alpha_4/h_1) * (T_A - 20)^2 \quad (5.2)$$

Όπου:

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

- TNF: Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας
- T_A : Θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων ($^{\circ}\text{C}$)
- h_1 : Πάχος ασφαλτικών στρώσεων (mm)
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$: Σταθερές του πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2 Σταθερές συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας για τους αντίστοιχους δείκτες (Molenaar 2006)

| Μεταβλητή | α_1 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) | α_2 (mm/ $^{\circ}\text{C}$) | α_3 (0.001 $^{\circ}\text{C}^{-1}$) | α_4 (mm/ $^{\circ}\text{C}$) |
|-------------|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| D_0 | 0.01661 | -0.67095 | 0.28612 | -0.01408 |
| SCI_{225} | 0.05955 | -2.73223 | 1.48011 | -0.08171 |
| SCI_{300} | 0.05398 | -2.61130 | 1.28439 | -0.07493 |
| SCI_{450} | 0.04720 | -2.39175 | 1.05022 | -0.06371 |
| SCI_{600} | 0.04190 | -2.15168 | 0.87228 | -0.05301 |

Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, τότε η αναγωγή των αντίστοιχων μεταβλητών σε θερμοκρασία αναφοράς 20 $^{\circ}\text{C}$ -δεδομένου ότι έχει προηγηθεί αναγωγή σε φορτίο αναφοράς 50 kN των επιμέρους μετατοπίσεων-γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης (5.3).

$$D_{0,20\text{C}} = D_0(T)/TNF, SCI_{20\text{C}} = SCI(T)/TNF \quad (5.3)$$

Όπου:

- T: Θερμοκρασία κατά τη μέτρηση
- $D_0(T), SCI(T)$: Αντίστοιχος δείκτης μετρημένος σε θερμοκρασία T
- $D_{0,20\text{C}}, SCI_{20\text{C}}$: Αντίστοιχος δείκτης σε θερμοκρασία αναφοράς 20 $^{\circ}\text{C}$
- TNF: Συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας

Επομένως, η τελικώς διορθωμένη σε φορτίο και θερμοκρασία αναφοράς υποχώρηση D_0 , αποτελεί το δείκτη δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει ο δείκτης αυτός, που μεταφράζεται σε μικρή υποχώρηση, άρα μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και συνεπώς μεγάλη μηχανική αντοχή, τόσο καλύτερη είναι η κατάσταση του οδοστρώματος. Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Κύριες όμως διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στα χαρακτηριστικά των διάφορων ασφαλτικών

οδοστρωμάτων, με διακυμάνσεις στο πάχος των ασφαλικών στρώσεων, στη σύσταση του ασφαλικού μείγματος, αλλά και στο υλικό της βάσης, είναι στοιχεία που ενδεχομένως να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Επομένως, η αξιολόγηση κυρίως με βάση την τάξη μεγέθους του δείκτη δομικής κατάστασης, δεν είναι απόλυτα αξιόπιστη. Η ερμηνεία του δείκτη αυτού έχει περισσότερο την έννοια της σύγκρισης, μεταξύ των μετρημένων υποχωρήσεων κατά μήκος του οδοστρώματος, και ιδίως με βάση το χρόνο από την κατασκευή. Εκτιμάται δηλαδή η μεταβολή του δείκτη δομικής κατάστασης ανά χιλιομετρική θέση, καθώς και η διακύμανση αυτού με την πάροδο του χρόνου, αξιολογώντας την πορεία της κατάστασης του εκάστοτε οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή 2015, Molenaar 2006).

Σχετικά με τις παραμέτρους της περιοχής των υποχωρήσεων, οι αντίστοιχοι δείκτες που προκύπτουν, μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την κατάσταση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Ως συνέχεια της γενικής εικόνας του οδοστρώματος με τη βοήθεια του δείκτη D_0 , η διερεύνηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος γίνεται λεπτομερέστερη. Με βάση τη διακύμανση των μετρήσεων κατά μήκος του άξονα του οδοστρώματος, αλλά και σχετικά με τη χρονική μεταβολή αυτής, υπάρχει η δυνατότητα να αντληθούν στοιχεία για την κατάσταση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, σε τοπική κλίμακα μάλιστα. Επίσης, με κατάλληλους τύπους μπορούν να υπολογιστούν και οι τάσεις που καταπονούν τα διάφορα στρώματα, θλιπτικές ή εφελκυστικές, και να συγκριθούν με τις χαρακτηριστικές αντοχές των υλικών των αντίστοιχων στρώσεων, προβλέποντας τη φέρουσα φορτική ικανότητα που απομένει στο οδόστρωμα (Talvik & Aavik 2008, Kim & Park 2002, Molenaar 2006).

5.4 Αξιολόγηση ενός τμήματος βιώσιμου οδοστρώματος

5.4.1 Περιγραφή πεδίου

Στην ενότητα αυτή ακολουθεί η δομική αξιολόγηση της κατάστασης ενός τμήματος βιώσιμου ασφαλικού οδοστρώματος του εθνικού οδικού δικτύου, με βάση και τα ανωτέρω του κεφαλαίου αυτού. Το συγκεκριμένο τμήμα κατασκευάστηκε με βιώσιμες τεχνικές αποκατάστασης που εφαρμόστηκαν στο υφιστάμενο συμβατικό εύκαμπτου τύπου ασφαλικό οδόστρωμα, το οποίο έφερε σημαντικές φθορές υπό τη μορφή μεγάλων ρωγμών. Η εφαρμογή τοπικών επιδιορθώσεων που προηγήθηκε, κρίθηκε αναποτελεσματική, καθώς οι ρωγμές επανεμφανίστηκαν στην επιφάνεια. Έτσι, η αποκατάσταση του οδοστρώματος ήταν μονόδρομος. Δεδομένου ότι η κατάσταση του οδοστρώματος ήταν καλή κάτω από ένα ορισμένο βάθος, επιλέχθηκε η αποκατάσταση για καλύτερη αξιοποίηση του υφιστάμενου

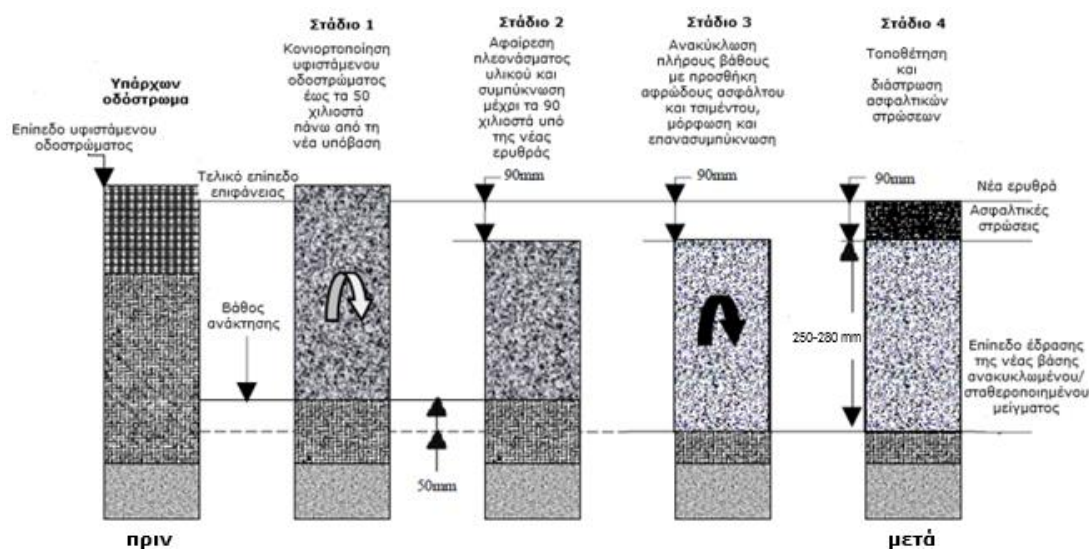
οδοστρώματος, κάνοντας χρήση της επί τόπου εις βάθος ψυχρής ανακύκλωσης (*Wirtgen GmbH 2004, Plati & Papavasiliou 2010*).

Για την παρακολούθηση και την επισκόπηση της πορείας της δομικής κατάστασης του εν λόγω οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας, πραγματοποιήθηκαν διάφορες μετρήσεις επί αυτού, αφότου αυτό αποκαταστάθηκε. Σκοπός των συγκεκριμένων μετρήσεων, είναι η ανάλυση των μηχανικών χαρακτηριστικών κατά μήκος του βιώσιμου αυτού οδοστρώματος, αλλά και ταυτόχρονα με την πάροδο του χρόνου, αξιολογώντας τη βιώσιμη τεχνική αποκατάσταση που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και εκτιμώντας την αποδοτικότητα της διαστασιολόγησης των στρώσεων και της επιλογής των αντίστοιχων υλικών. Επιπρόσθετα, μέσω της αξιολόγησης αυτής, τα τελικώς εξαγόμενα αποτελέσματα μπορεί να αποτελέσουν χρήσιμα στοιχεία, προς σύγκριση του βιώσιμου αυτού οδοστρώματος με τα συμβατικά. Εάν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν είναι ενθαρρυντικά, τότε ένα μικρό, αλλά σημαντικό βήμα για την ανάδειξη της αξιοπιστίας των βιώσιμων οδοστρωμάτων, θα έχει αυτόματα επιτευχθεί.

Όσον αφορά τη διατομή αξιολόγησης, το τμήμα αυτό του εύκαμπτου συμβατικού ασφαλικού οδοστρώματος πριν την εφαρμογή της αποκατάστασης, αποτελούνταν από ασφαλικές στρώσεις με πάχος από 14 έως και 22 εκατοστά, καθώς και από αμμοχάλικο ως βάση, με αντίστοιχο πάχος 27 έως 53 εκατοστά. Η βάση εδραζόταν πάνω σε συμπακνωμένο υπέδαφος. Λόγω των εκτεταμένων φθορών και της κακής επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος, αποφασίστηκε η αποκατάσταση αυτού, ως η συμφερότερη λύση. Η βιώσιμη τεχνική της οποίας έγινε χρήση, είναι η ψυχρή επί τόπου εις βάθος ανακύκλωση, με την προσθήκη αφρώδους ασφάλτου και τσιμέντου (*Loizos et. al. 2007*).

Γενικά, η τεχνική της ψυχρής ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλτο, με την τεχνική της ανάκτησης πλήρους βάθους να προηγείται, είναι μία πρωτοποριακή τεχνική βιώσιμων προδιαγραφών. Η εν λόγω διαδικασία αποτελείται από την ψυχρή ανακύκλωση του υλικού που κονιορτοποιείται και ανακτάται από το υφιστάμενο οδόστρωμα, και τη σύγχρονη ανάμειξη αυτού με σταθεροποιητικό συνδετικό, όπως η αφρώδης άσφαλτος (*foam asphalt*). Το βάθος της ανάκτησης κυμαίνεται μεταξύ 30 και 45 εκατοστών, ανάλογα με το διαθέσιμο εξοπλισμό συμπύκνωσης. Το μείγμα ενδέχεται να εμπεριέχει επιπροσθέτως τσιμέντο, νερό, ασφαλικό γαλάκτωμα, καθώς ακόμη και άλλα συμπληρωματικά υλικά σκυροδέματος. Αφού ολοκληρωθεί η ανάμειξη των αντίστοιχων υλικών, το μείγμα που προκύπτει έπειτα από ψυχρή ανακύκλωση, συμπακνώνεται και διαστρώνεται στο οδόστρωμα (*FHWA 2015*).

Για την εφαρμογή της αποκατάστασης του οδοστρώματος που μελετάται, ακολουθήθηκε η βιώσιμη τεχνική που προαναφέρθηκε. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία της αποκατάστασης πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια (βλέπε εικόνα 5.3).

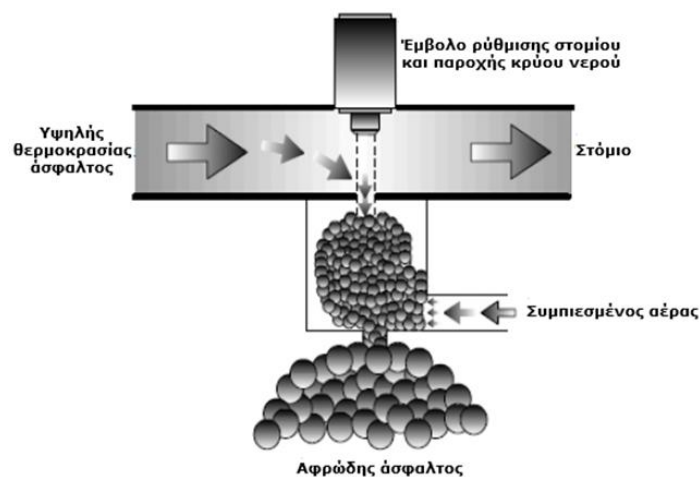


Εικόνα 5.3 Διατομές πριν και μετά την αποκατάσταση και σχηματική περιγραφή της διαδικασίας ανά στάδιο

Αρχικά, το υφιστάμενο οδόστρωμα κονιορτοποιήθηκε με την τεχνική της ανάκτησης πλήρους βάθους (FDR), σε βάθος το οποίο έφτασε σε επίπεδο μέχρι τα 50 χιλιοστά πάνω από τη στέψη της νέας υπόβασης πάχους σχεδιασμού 20 εκατοστών, πληρούμενη από αμμοχάλικο, το οποίο δεν ανακτήθηκε κατά τη σχετική διαδικασία. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκε σύμφωνα με το νέο σχεδιασμό ένα πλεονάζων ποσοστό υλικού, ενώ το υπόλοιπο συμπυκνώθηκε κατά 90 χιλιοστά, υπό το νέο επίπεδο της επιφάνειας. Στο επόμενο στάδιο, ακολούθησε η ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση του εναπομείναντος υλικού, και συγκεκριμένα σε βάθος σχεδιασμού 250 με 280 χιλιοστών, όπου συνεχίστηκε με την επαναπλήρωση της αντίστοιχης στρώσης, με την ταυτόχρονη προσθήκη αφρώδους ασφάλτου (foam asphalt) σε ποσοστό 2,25% και συμβατικού τσιμέντου αντίστοιχα σε ποσοστό 1%, για τη σταθεροποίηση του ανακυκλωμένου μείγματος της βάσης. Αφού ολοκληρώθηκε η μόρφωση και συμπύκνωση της νέας βάσης, η διαδικασία προχώρησε με την τοποθέτηση και διάστρωση δύο ασφαλτικών στρώσεων συνολικού πάχους 9 εκατοστών. Πιο αναλυτικά, τοποθετήθηκε μία ισοπεδωτική ασφαλτική στρώση πυκνής διαβάθμισης και μία 4 εκατοστών λεπτή, τροποποιημένη με πολυμερή, ασφαλτική επίστρωση κυκλοφορίας, ημιανοικτού τύπου. Να

σημειωθεί, πως το επίπεδο της ερυθράς του νέου οδοστρώματος ήταν ελάχιστα χαμηλότερο του υφιστάμενου (Loizos *et. al.* 2007, Plati & Paravasiliou 2010, Wirtgen GmbH 2004).

Σχετικά με τη διαδικασία παρασκευής της αφρώδους ασφάλτου, κρύο νερό σε συνδυασμό με συμπιεσμένο αέρα εγχέονται σε υψηλής θερμοκρασίας ασφαλτο, μέσω ειδικά διαμορφωμένου θαλάμου (βλέπε εικόνα 5.4). Η τεχνική αυτή έχει σημαντικά οφέλη που συμβαδίζουν με τις βιώσιμες προδιαγραφές, όπως το μειωμένο κόστος λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής, αλλά και η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την ανακυκλώσιμη φύση της μεθόδου και την ταχεία κατασκευαστική διαδικασία (FHWA 2015).



Εικόνα 5.4 Διαδικασία παρασκευής αφρώδους ασφάλτου

Αναφορικά με τη διαδικασία που εφαρμόστηκε, η οποία πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου επί τόπου, αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος εφαρμογής με βάση και τα έξοδα για τις μεταφορικές διαδικασίες, ήταν σχετικά χαμηλό. Το γεγονός πως δεν προηγήθηκε η επεξεργασία τύπου άλεσης της κονιορτοποίησης στο υφιστάμενο οδόστρωμα, με σκοπό την ανακύκλωση του μέγιστου δυνατού όγκου υλικού, συνέβαλε στη σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων καυσαερίων, ειδικά κάνοντας σύγκριση και με άλλες συμβατικές μεθόδους (Plati & Paravasiliou 2010). Επομένως, τα στοιχεία αυτά έρχονται προς επιβεβαίωση της βιωσιμότητας της τεχνικής που επιλέχθηκε, για την αποκατάσταση του συγκεκριμένου τμήματος οδοστρώματος.

5.4.2 Συλλογή και επεξεργασία στοιχείων

Για την αξιολόγηση του οδοστρώματος, και συγκεκριμένα για την ανάλυση της δομικής κατάστασης και των αντίστοιχων μηχανικών χαρακτηριστικών, καθώς και για την καταγραφή της πορείας αυτών με την πάροδο του χρόνου, πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με τη βοήθεια του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD), από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου της Αθήνας (βλέπε εικόνα 5.5). Στο πλαίσιο των αντίστοιχων μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε και η λήψη περιορισμένου αριθμού πυρήνων από το τμήμα του οδοστρώματος, με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλικών στρώσεων.



Εικόνα 5.5 Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους προσαρμοσμένο σε συσκευή ρυμούλκησης για ταχεία μέτρηση

Για τον υπολογισμό του πάχους των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar, GPR), το οποίο είναι υψηλής τεχνολογίας και βασίζεται σε γεωφυσική μέθοδο (βλέπε εικόνα 5.6). Η μέθοδος αυτή είναι πρωτοποριακή, καθώς πραγματοποιεί μη καταστρεπτικούς ελέγχους (Non-Destructive test, NDT) επί της επιφάνειας του οδοστρώματος, καταγράφοντας τη στρωματογραφία αυτού. Μάλιστα, το σύστημα αυτό δίνει εκτιμήσεις μεγάλης ακρίβειας. Πλεονεκτεί σημαντικά έναντι άλλων δημοφιλών μεθόδων, όπως για παράδειγμα η λήψη πυρήνων, στο γεγονός ότι πραγματοποιείται σε μικρό χρόνο και καθώς δεν επηρεάζεται από τη διέλευση

των οχημάτων τη στιγμή της μέτρησης, δεν παρεμποδίζει την κυκλοφορία με τη λήψη ειδικών μέτρων για τον περιορισμό αυτής. Μία άλλη αξιοσημείωτη δυνατότητα του συστήματος αυτού, είναι η ανίχνευση τυχών ασυνεχειών, χάρη στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπει μέχρι ένα ορισμένο βάθος, οι οποίες εάν αγνοηθούν, ενδεχομένως να προκαλέσουν σημαντικές φθορές στο οδόστρωμα (Λοΐζος & Πλατή 2015).



Εικόνα 5.6 Συσκευή συστήματος γεωραντάρ (GPR) προσαρμοσμένη σε ειδικό όχημα για ταχεία μέτρηση

Η διαδικασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Αναλυτικότερα, μετρήσεις έγιναν αμέσως μετά την κατασκευή-αποκατάσταση του οδοστρώματος, καθώς επίσης και πέντε χρόνια αργότερα. Το τμήμα του βιώσιμου οδοστρώματος στο οποίο έλαβαν χώρα οι μετρήσεις, είχε συνολικό μήκος περί τα 2,5 χιλιόμετρα. Κατά προσέγγιση, η απόσταση των διαδοχικών μετρήσεων ήταν 50 μέτρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στους πίνακες Π1 και Π2 του παραρτήματος, ανάλογα με τη χρονική στιγμή της καταγραφής. Στους πίνακες αυτούς αναγράφονται επίσης και διάφορα στοιχεία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως η χιλιομετρική θέση (chainage) της κάθε μέτρησης, η τιμή του αντίστοιχου φορτίου P (kN), οι αποστάσεις των γεωφώνων (mm) από το δίσκο φόρτισης, τα οποία κατέγραψαν τις αντίστοιχες υποχωρήσεις (μm), η θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{C}$) στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος, καθώς και τα αντίστοιχα πάχη των επιμέρους στρώσεων, όπου (H_1) το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων, (H_2) το πάχος της βάσης και (H_3) το πάχος της υπόβασης, όλα σε (mm). Μία μικρή παραδοχή, έγινε στον υπολογισμό του δείκτη SCI_{225} , με την τιμή της υποχώρησης D_{225} να αντικαθίστανται από την τιμή D_{200} , λόγω του ότι το γεώφωνο της συσκευής του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους που

χρησιμοποιήθηκε από το εργαστήριο οδοποιίας βρισκόταν σε απόσταση 200, και όχι 225 χιλιοστών, από το δίσκο φόρτισης. Εκτιμάται πως δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στο αποτέλεσμα.

Οι αρχικές μετρήσεις, όπως καταγράφηκαν με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, σύμφωνα και με όσα έχουν προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 5.3, πρέπει να επεξεργαστούν και να αναχθούν σε κοινές πρότυπες συνθήκες, ώστε να καταστούν άμεσα συγκρίσιμες. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση τη διαφορά των τιμών των μετρημένων υποχωρήσεων ανά χιλιομετρική θέση, στην ίδια φάση μέτρησης, αλλά και ομοίως με βάση το χρονικό διάστημα από τη στιγμή της αποκατάστασης, συγκρίνοντας τις μεταβολές των τιμών στα ίδια σημεία του οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή 2015, Kim & Park 2002, Molenaar 2006). Οι πρότυπες αυτές συνθήκες για τη συγκεκριμένη ανάλυση, είναι το φορτίο αναφοράς των 50 kN, και η θερμοκρασία επίσης αναφοράς των 20 °C. Τα τελικά αποτελέσματα της αναγωγής των μετρήσεων, αφού έχει προηγηθεί αναγωγή σε φορτίο αναφοράς, βρίσκονται στους πίνακες Π3 και Π4 του παραρτήματος. Η αναγωγή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των σχέσεων (5.1), (5.2) και (5.3).

Στους τελικώς διορθωμένους πίνακες υπάρχει ο δείκτης δομικής κατάστασης (D_0), η υποχώρηση D_{1800} , καθώς και οι δείκτες SCI, BDI και BCI. Ειδικότερα, ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας (SCI) υπολογίστηκε και δίνεται σε τέσσερις εκδοχές, ανάλογα με τη διαφορά της απόστασης από το δίσκο φόρτισης. Για παράδειγμα, η παράμετρος $SCI_{300,20C}$ ισούται με το λόγο $(D_0 - D_{300})/TNF$, όπου D_0 , D_{300} υποχωρήσεις ανηγμένες σε φορτίο αναφοράς. Με παρόμοια διαδικασία προκύπτουν και οι δείκτες επιφανειακής καμπυλότητας, για τις υπόλοιπες τιμές της απόστασης. Για τη διόρθωση σε θερμοκρασία αναφοράς του δείκτη δομικής κατάστασης και επιφανειακής καμπυλότητας, χρησιμοποιήθηκαν η σχέσεις (5.2) και (5.3), με τις αντίστοιχες σταθερές α_1 έως α_4 για το συντελεστή διόρθωσης της θερμοκρασίας, να λαμβάνονται από το σχετικό πίνακα 5.2.

Για τη στατιστική επεξεργασία των τελικών μετρήσεων, συντάχτηκαν επίσης και οι πίνακες Π5 και Π6 του παραρτήματος. Οι πίνακες αυτοί, περιέχουν χρήσιμα στατιστικά δεδομένα για κάθε μία από τις δύο χρονικές φάσεις της συνολικής διαδικασίας των μετρήσεων, όπως την ελάχιστη (min), τη μέγιστη (max) και τη μέση τιμή (mean) των μετρήσεων, την τιμή του 1^{ου} Τεταρτημόριου (1st Quartile) ή αλλιώς 25^{ου} εκατοστημορίου του δείγματος, την τιμή της διαμέσου του δείγματος (median), την τιμή του 3^{ου} Τεταρτημόριου (3rd Quartile) αλλιώς ως 75^{ου} εκατοστημορίου του δείγματος, την τιμή της τυπικής απόκλισης (standard deviation, st/dev), αλλά και την τιμή του συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of Variation, CV).

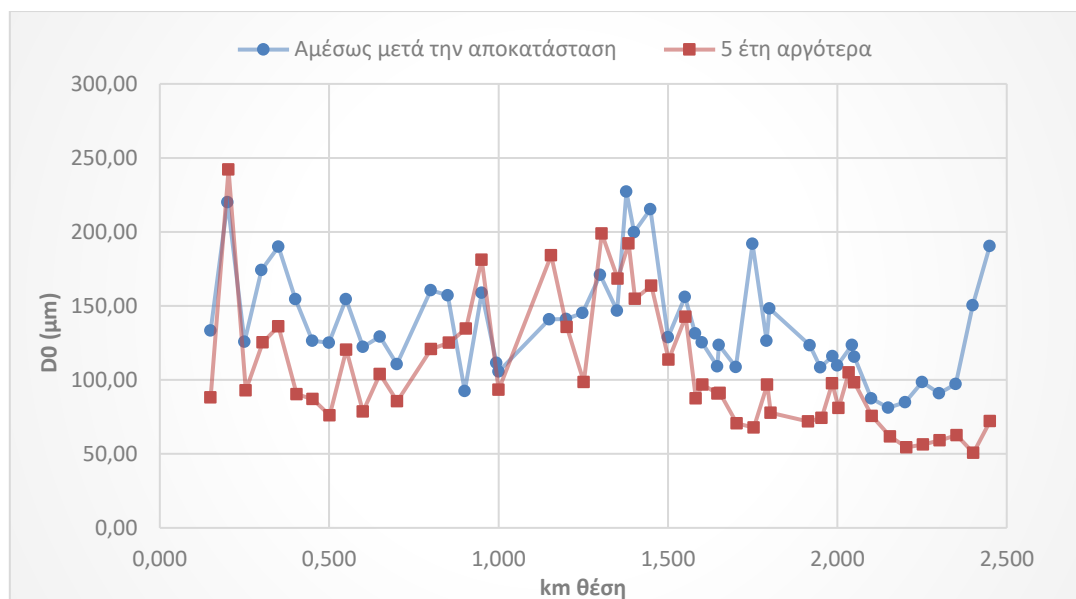
5.4.3 Ανάλυση δεδομένων και αποτελέσματα

Ως γνωστόν, σε πολλά έργα παρατηρούνται αρκετά συχνά κάποιες αποκλίσεις κατά την κατασκευή, σε σχέση με αυτά που ορίζει ο σχεδιασμός. Οι αποκλίσεις αυτές αφορούν κυρίως τη διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών τμημάτων, του πάχους των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος στην προκειμένη περίπτωση. Οι διαφοροποιήσεις αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, μάλιστα σημαντικά σε ορισμένες περιπτώσεις, και συνιστούν προσοχή.

Με βάση και τα ανωτέρω, αναλύοντας τα στοιχεία από τα επιμέρους πάχη του οδοστρώματος, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στους αντίστοιχους πίνακες, παρατηρούνται διαφορές στις τιμές του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων, αλλά και της βάσης, ανά χιλιομετρική θέση. Το πάχος της υπόβασης εκτιμήθηκε σταθερό και ίσο με 20 εκατοστά, κατά μήκος του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, το μέσο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων ανήλθε σε 10.9 εκατοστά, σχεδόν 2 εκατοστά μεγαλύτερο από τα 9 εκατοστά που όριζε ο σχεδιασμός, αν και ο συντελεστής διακύμανσης (Coefficient of Variation, CV) υπολογίστηκε σε 0,08, δηλαδή αρκετά χαμηλός. Το γεγονός αυτό, μεταφράζεται πως η πραγματική τιμή του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων διέφερε ελάχιστα, κατά μήκος του οδοστρώματος. Σχετικά με το πάχος της βάσης, η μέση μετρημένη τιμή ήταν 258 χιλιοστά, πολύ κοντά στο κάτω όριο των 250 με 280 χιλιοστών, σύμφωνα και με το σχεδιασμό. Ο αντίστοιχος συντελεστής διακύμανσης κυμάνθηκε στην τιμή 0,10, σημαίνοντας τη μικρή διαφοροποίηση του πάχους της βάσης κατά μήκος του άξονα. Τα αποτελέσματα δείχνουν θετικά στο σύνολο. Επομένως, η αποτίμηση που προκύπτει, είναι πως η κατασκευή είχε μικρής τάξεως απόκλιση από το σχεδιασμό, κατά μήκος του οδοστρώματος.

Ξεκινώντας την αξιολόγηση του οδοστρώματος με την ανάλυση του δείκτη δομικής κατάστασης (D_0) ανά χιλιομετρική θέση, και στις δύο χρονικές φάσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, προκύπτει το παρακάτω σχεδιάγραμμα (βλέπε εικόνα 5.7). Το σχεδιάγραμμα αυτό, είναι ένα γράφημα των τιμών του δείκτη δομικής κατάστασης κατά μήκος του οδοστρώματος, και είναι κοινό και για τις δύο φάσεις των μετρήσεων, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της εξέλιξης των τιμών και με την πάροδο του χρόνου.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



Εικόνα 5.7 Σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη δομικής κατάστασης (D_0)

Με μία πρώτη ματιά, είναι εμφανές το γεγονός πως πέντε έτη μετά την εφαρμογή της αποκατάστασης, ο δείκτης δομικής κατάστασης μειώνεται εμφανώς, στο μεγαλύτερο μάλιστα μέρος του οδοστρώματος. Η εξέλιξη αυτή, αποτελεί σαφώς ένα ιδιαίτερα θετικό στοιχείο, με βάση και τα όσα έχουν αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 5.3. Τα σημεία όπου οι τιμές του δείκτη δομικής κατάστασης εμφανίζονται μεγαλύτερες των αρχικών, παρατηρούνται κυρίως περί το μέσο του τμήματος του οδοστρώματος. Τα σημεία αυτά, είναι λίγα στον αριθμό, μεμονωμένα, και η διαφορά που παρουσιάζουν είναι πολύ μικρής τάξεως, γεγονός που σημαίνει άλλη μία θετική εξέλιξη στην πορεία της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Εάν συνυπολογιστεί και η ,διόλου ασήμαντη, πάροδος των πέντε χρόνων, αλλά και το γεγονός πως το εν λόγω οδόστρωμα εξυπηρετεί υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο, τα στοιχεία δείχνουν ακόμη θετικότερα.

Η ανωτέρω διαπίστωση σχετικά με τη θετική γενική εικόνα του οδοστρώματος, η οποία μεν κρίνεται ιδιαίτερα ενθαρρυντική, είναι απλώς μία πρόχειρη σύγκριση της πορείας του δείκτη D_0 σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες, και για το λόγο αυτό, δεν αποτελεί εμπειριστατωμένη άποψη της εικόνας του οδοστρώματος. Η δε μείωση του δείκτη D_0 πέντε έτη αργότερα, η οποία δεικνύει αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, ενδεχομένως σχετίζεται με την ωρίμανση (curing) του υλικού της ανακυκλωμένης στρώσης (Plati & Papavasiliou 2010).

Για την καλύτερη και πιο εμπειριστατωμένη αξιολόγηση, θα αξιοποιηθούν και τα δεδομένα που δίνονται στους πίνακες Π5 και Π6 του παραρτήματος, προς στατιστική επεξεργασία.

Σκοπός, είναι η λεπτομερέστερη ανάλυση του δείκτη δομικής κατάστασης, σχετικά και με τη διακύμανση των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης αυτός κατά μήκος του οδοστρώματος, αλλά και με βάση την πάροδο του χρόνου από την αποκατάσταση.

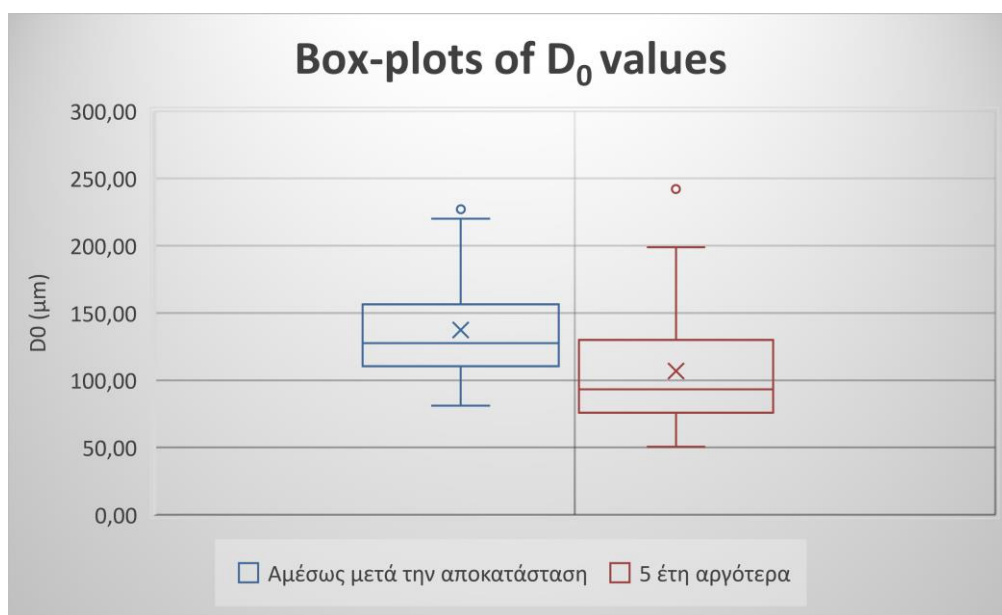
Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of Variation, CV) των δεικτών και των παραμέτρων δομικής κατάστασης, υπάρχουν κάποια κριτήρια κατηγοριοποίησης της κατάστασης του οδοστρώματος, με βάση τις τιμές που αυτός λαμβάνει (Molenaar 2006). Για παράδειγμα, μία τυπική τιμή για ένα οδόστρωμα καλής κατάστασης είναι 0,15, που συνεπάγεται χαμηλή διακύμανση υποχωρήσεων. Η τιμή μέτριας διακύμανσης 0,30 κρίνεται χαρακτηριστική για ένα οδόστρωμα με μερική παρουσία φθορών, ενώ η υψηλής διακύμανσης τιμή 0,45 είναι ανησυχητική, με το ενδεχόμενο σημαντικών φθορών να είναι σοβαρό. Παρόλα αυτά, ο συντελεστής διακύμανσης δεν θα πρέπει να εξετάζεται μονοσήμαντα, καθώς ενέχει ορισμένες πτυχές, σχετικά με την ερμηνεία του. Συγκεκριμένα εδώ, η διακύμανση λειτουργεί αντιστρόφως ανάλογα σχετικά με την έννοια των δεικτών. Για παράδειγμα, μείωση των τιμών του δείκτη δομικής κατάστασης, συνεπάγεται ενδεχόμενη αύξηση της διακύμανσης. Η εξέλιξη αυτή όμως είναι θετική, και μπορεί να παρερμηνευτεί από τον όρο αύξηση, που παραπέμπει σε αρνητικές επιπτώσεις με βάση τα ανωτέρω.

Ο συντελεστής διακύμανσης του δείκτη D_0 αμέσως μετά την αποκατάσταση, έχει τιμή 0.26, που σημαίνει πως αυτόματα κατατάσσεται ανάμεσα στις τιμές 0.15 και 0.30. Αυτό μεταφράζεται πως αρχικά η κατάσταση του οδοστρώματος είναι αρκετά καλή. Μπορεί βέβαια να μην πλησιάζει την περισσότερο επιθυμητή, με βάση και τα ανωτέρω, τιμή 0,15. Αυτό φυσικά δεν μεταφράζεται ως ενδεχόμενο σενάριο ύπαρξης ατελειών ή φθορών στο οδόστρωμα. Οι μετρήσεις αυτές, πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Τα υλικά με τα οποία κατασκευάστηκε το οδόστρωμα, όπως για παράδειγμα η άσφαλτος, αλλά και ειδικότερα τα σταθεροποιητικής φύσεως υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως η αφρώδης άσφαλτος και συμβατικό τσιμέντο, πιθανώς ευθύνονται σημαντικά.

Η φύση των υλικών αυτών, έχει ως επακόλουθο το πέρας κάπου χρονικού διαστήματος, για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους αντοχές. Η ωρίμανση τους δηλαδή, απαιτεί κάποιο χρόνο, ο οποίος δεν είχε παρέλθει πλήρως τη στιγμή των αρχικών μετρήσεων, καθώς αυτές πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά την κατασκευή. Ειδικότερα όμως, διαφοροποιήσεις στην κατασκευή, κατά μήκος του οδοστρώματος, είναι πολύ πιθανό να υφίστανται. Πιο συγκεκριμένα, το οδόστρωμα ενδέχεται να διαφέρει χρονικά, ως προς την κατασκευή των

διαδοχικών τμημάτων αυτού. Επομένως, με βάση και τα ανωτέρω, διαφορές στα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών, είναι δυνατό να παρατηρηθούν. Επίσης το μεγάλο απαιτούμενο βάθος συμύκνωσης εκ κατασκευής, ίσως συντέλεσε στο βαθμό ανομοιογένειας του οδοστρώματος. Η διακύμανση του πάχους των επιμέρους στρώσεων κατά μήκος του οδοστρώματος, δεν πρέπει να παραληφθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς οι διαφορές αυτές επηρεάζουν τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας, άρα και τις αντίστοιχες τιμές των υποχωρήσεων. Δεδομένων των παραγόντων αυτών, αυτοί είναι και οι επικρατέστεροι λόγοι για την ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή της αρχικής διακύμανσης.

Την ανωτέρω διαπίστωση, σχετικά με τα πιθανά αίτια της αρχικής τιμής του συντελεστή διακύμανσης αναφορικά με την τάξη μεγέθους, επιβεβαιώνει και η σχετικά γενική μείωση των μετρημένων υποχωρήσεων, πέντε χρόνια μετά την αποκατάσταση του οδοστρώματος. Μπορεί η τιμή της διακύμανσης να αυξήθηκε, λαμβάνοντας την τιμή 0,40, κάτι όπως που είναι εν μέρει αναμενόμενο λόγω της υψηλής κυκλοφορίας που δέχεται το οδόστρωμα, αλλά και της μεγάλης χρονικής παρόδου. Μάλιστα, η αύξηση αυτή προήλθε από τη μείωση του μεγαλύτερου μέρους των τιμών του δείκτη, και όχι από την αύξηση. Επομένως, το συμπέρασμα που προκύπτει και αποτελεί θετική ένδειξη, είναι η γενική μείωση των υποχωρήσεων, σημαίνοντας καλή δομική κατάσταση. Αυτό φαίνεται καλύτερα και από το παρακάτω σχετικό στατιστικό σχεδιάγραμμα (βλέπε εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8 Σχεδιάγραμμα τύπου (box-plot) του δείκτη δομικής κατάστασης D₀

Το εν λόγω διάγραμμα μετατοπίζεται εξ ολοκλήρου προς τα κάτω, επιβεβαιώνοντας τις αρχικές εκτιμήσεις, περί μείωσης του δείκτη D_0 . Η αύξηση της διακύμανσης είναι οπτικά ασήμαντη, σε σχέση με την αριθμητική διαφορά, η οποία μπορεί να φαντάζει μεγαλύτερη, και πραγματοποιείται με τη μορφή μίας μικρής τάξεως αύξησης του διατεταρτημοριακού εύρους (interquartile range, IRQ), καθώς και επίσης μίας μικρής απόκλισης της μέσης τιμής προς τα άνω, από τη διάμεσο. Παρόλα αυτά, η διάμεσος του δείγματος των μετρήσεων, αλλά και η μέση τιμή αυτών, σημειώνουν εμφανή μείωση, δείχνοντας την καλή δομική κατάσταση του οδοστρώματος, και από στατιστικής πλευράς.

Μείζον κριτήριο για την αξιολόγηση του οδοστρώματος ως συνέχεια των προηγούμενων, είναι και η οριοθέτηση των τιμών του δείκτη δομικής κατάστασης. Μέχρι στιγμής, έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως συγκρίσεις μεταξύ των τιμών του δείκτη, σχετικά με τη μεταβολή αυτού επί του οδοστρώματος, αλλά και σχετικά με το χρόνο, στις δύο φάσεις των μετρήσεων. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι και η τάξη μεγέθους των υποχωρήσεων και των τιμών των δεικτών πέρα από τη σύγκριση αυτών, για να διασφαλιστεί πως δεν υπερβαίνονται κάποια επιτρεπτά όρια.

Μάλιστα, υπάρχουν κάποια αριθμητικά όρια, με βάση τα οποία γίνεται ποιοτική κατηγοριοποίηση της κατάστασης του οδοστρώματος, σύμφωνα με τους *Hakim & Brown (2006)*. Αυτά αφορούν την κεντρική υποχώρηση (D_0), το δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας (SCI_{300}), και την πιο απομακρυσμένη από το δίσκο φόρτισης, υποχώρηση που μετρήθηκε (D_{1800}). Τα όρια αυτά φαίνονται παρακάτω (βλέπε πίνακα 5.3). Οι τιμές αυτές, αφορούν μετρήσεις υπό φορτίο 40 kN και όχι 50 kN, όπως στην προκειμένη περίπτωση. Οι αντίστοιχες τιμές για φορτίο 50 kN, λαμβάνονται προσεγγιστικά, με γραμμική παρεμβολή αναλογίας φορτίου. Κατά συνέπεια αυξάνονται κατά 25%, με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή στην τιμή του φορτίου αναφοράς των 50 kN, με βάση το οποίο έγινε η αναγωγή των υποχωρήσεων.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πίνακας 5.3 Ποιοτική κατηγοριοποίηση του οδοστρώματος βάση μετρήσεων του FWD υπό φορτίο 40 kN (Hakim & Brown 2006)

| Γενική Κατάσταση του Οδοστρώματος - (D_0) | Κατάσταση άνω στρώσεων - (SCI_{300}) | Κατάσταση του Υπεδάφους - (D_{1800}) |
|---|--|--|
| < 100 μm - εξαιρετική | < 30 μm - εξαιρετική | < 5 μm - εξαιρετική |
| 100 έως 150 μm - πολύ καλή | 30 έως 45 μm - πολύ καλή | 5 έως 15 μm - πολύ καλή |
| 150 έως 200 μm - καλή | 45 έως 80 μm - μέτρια | 15 έως 20 μm - καλή |
| 200 έως 250 μm - μέτρια | > 80 μm - κακή | 20 έως 30 μm - μέτρια |
| 250 έως 300 μm - κακή | | 30 έως 40 μm - κακή |
| > 300 μm - πολύ κακή | | 40 έως 50 μm - πολύ κακή |
| | | > 50 μm - κάκιση |

Έτσι, οι τιμές μετατρέπονται στις αντίστοιχες υπό φορτίο 50 kN, επομένως προκύπτει προσεγγιστικά ο παρακάτω μετασχηματισμός (βλέπε πίνακα 5.4).

Πίνακας 5.4 Προσεγγιστικές τιμές ποιοτικής κατηγοριοποίησης του οδοστρώματος για φορτίο 50 kN με βάση τους Hakim & Brown (2006)

| Γενική Κατάσταση του Οδοστρώματος - (D_0) | Κατάσταση άνω στρώσεων - (SCI_{300}) | Κατάσταση του Υπεδάφους - (D_{1800}) |
|---|--|--|
| < 125 μm - εξαιρετική | < 37 μm - εξαιρετική | < 6 μm - εξαιρετική |
| 125 έως 185 μm - πολύ καλή | 37 έως 55 μm - πολύ καλή | 6 έως 20 μm - πολύ καλή |
| 185 έως 250 μm - καλή | 55 έως 100 μm - μέτρια | 20 έως 25 μm - καλή |
| 250 έως 315 μm - μέτρια | > 100 μm - κακή | 25 έως 37 μm - μέτρια |
| 315 έως 375 μm - κακή | | 37 έως 50 μm - κακή |
| > 375 μm - πολύ κακή | | 50 έως 60 μm - πολύ κακή |
| | | > 60 μm - κάκιση |

Αμέσως μετά την αποκατάσταση, ο δείκτης δομικής κατάστασης, όπως φαίνεται και στον πίνακα Π5 του παραρτήματος, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 81,15 και 227,11. Ακριβέστερα, με βάση και το σχεδιάγραμμα της εικόνας 5.8, το 75% του πλήθους των τιμών που λαμβάνει ο δείκτης D_0 , δεν ξεπερνά την τιμή 155,75. Το υπόλοιπο 25%, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών

155,75 και 227,11. Εκτιμάται πως τα σημεία αυτά, όπου εμφανίζουν και τις υψηλότερες τιμές, είναι λίγα στον αριθμό, λαμβάνοντας υπόψιν και το σχεδιάγραμμα της εικόνας 5.7. Με τα στοιχεία αυτά, η γενική κατάσταση του οδοστρώματος αμέσως μετά την αποκατάσταση χαρακτηρίζεται ως καλή-πολύ καλή.

Η εικόνα του οδοστρώματος πέντε χρόνια αργότερα, φαίνεται βελτιωμένη. Σύμφωνα με τον πίνακα Π6 του παραρτήματος, αλλά και με τη βοήθεια του σχεδιαγράμματος της εικόνας 5.8, το 75% του πλήθους των τιμών του δείκτη D_0 , δεν ξεπερνά την τιμή 125,28. Το υπόλοιπο 25%, με εξαίρεση μία μεμονωμένη τιμή η οποία είναι και η μέγιστη, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 125 και 200. Επομένως η κατάσταση του οδοστρώματος στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, με βάση και τον πίνακα 5.4, χαρακτηρίζεται ως πολύ καλή-εξαιρετική.

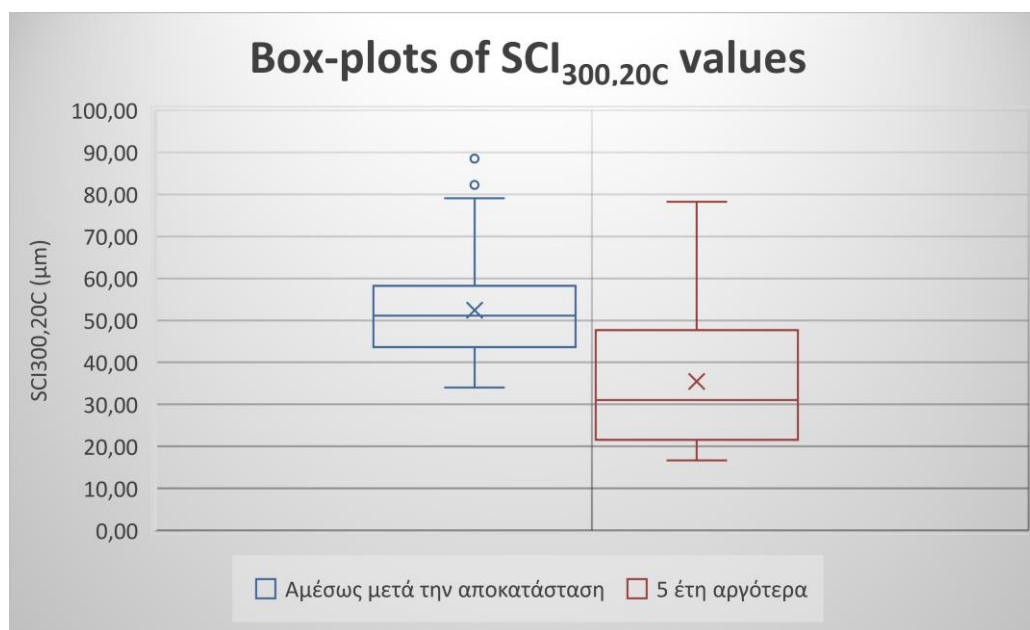
Σημαντικές πληροφορίες μπορούν να δώσουν και οι παράμετροι των υποχωρήσεων για την κατάσταση του οδοστρώματος, και ειδικότερα των επιμέρους στρώσεων. Διάφορες έρευνες έχουν δείξει, πως ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας (SCI) εμφανίζει μεγάλη συσχέτιση με την κατάσταση των ανώτερων στρώσεων. Πιο αναλυτικά, μετρήσεις του δείκτη SCI σε οδοστρώματα με παρουσία ρωγμών λόγω κόπωσης και φαινομένων τροχοαυλάκωσης, έδειξαν μεγάλη διασπορά και διακύμανση τιμών. Μεγάλη επίσης συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ του δείκτη BDI και της εντατικής κατάστασης της βάσης, αλλά και μεταξύ του δείκτη BDI και της κατάστασης του υπεδάφους (*Talvik & Aavik 2008, Kim & Park 2002*).

Σχετικά με το δείκτη SCI, σε περιπτώσεις λεπτών ασφαλτικών στρώσεων, όπως και στο συγκεκριμένο οδόστρωμα, τα αποτελέσματα ενδέχεται να επηρεαστούν και από τη στρώση βάσης. Η παρουσία μάλιστα της αφρώδους ασφάλτου στη στρώση βάσης του συγκεκριμένου οδοστρώματος, μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στο δείκτη επιφανειακής καμπυλότητας, με την επίδραση και της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά, μελέτες έχουν δείξει πως η εν λόγω επιρροή, είναι σχετικά μικρή.

Μία άλλη σχετική έρευνα, έδειξε πως σχετικά μεγάλες τιμές των δεικτών-παραμέτρων της περιοχής των υποχωρήσεων (DBPs), αλλά και του δείκτη δομικής κατάστασης (D_0), αντικατοπτρίζουν ατέλειες επί του οδοστρώματος, ενίοτε τοπικές, ανάλογα και τη στρώση που αντιπροσωπεύουν. Αυτή είναι μία σημαντική παρατήρηση, δεν αποτελεί όμως πάγια διαπίστωση. Γενικότερα, όπως έχει προαναφερθεί και για το δείκτη δομικής κατάστασης και την ερμηνεία αυτού, είναι επιθυμητό, οι τιμές των δεικτών να λαμβάνουν όσο το δυνατόν χαμηλές τιμές. Πάνω σε αυτό το θέμα, υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις τιμές των δεικτών. Αυτές είναι κυρίως, η μη γραμμική συμπεριφορά του

υπεδάφους και η πιθανή παρουσία υψηλού υδροφόρου ορίζοντα. Ιδιαίτερη προσοχή επίσης, πρέπει να δοθεί στη θερμοκρασία, και ειδικότερα στη διακύμανση αυτής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, καθώς αυτή επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά των ασφαλικών υλικών. Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί πως κατά τους φθινοπωρινούς και εαρινούς μήνες, τα αποτελέσματα των μετρήσεων επηρεάζονται σημαντικά. Ως λύση, προτείνεται η λήψη πυρήνων από το οδόστρωμα, ώστε με εργαστηριακή μελέτη να περιοριστούν τέτοιου είδους αστάθμητοι παράγοντες (Talvik & Aavik 2008, Kim & Park 2002, Hakim & Brown).

Δεδομένων και των ανωτέρω, πέρα από το δείκτη δομικής κατάστασης, που είναι και η βασική παράμετρος της συνολικής εικόνας του οδοστρώματος, ιδιαίτερη αξία έχει και η διερεύνηση των δεικτών των επιμέρους στρώσεων. Ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας (SCI_{300}) αναλύεται στις δύο φάσεις των μετρήσεων, στο παρακάτω σχετικό σχεδιάγραμμα (βλέπε εικόνα 5.9).



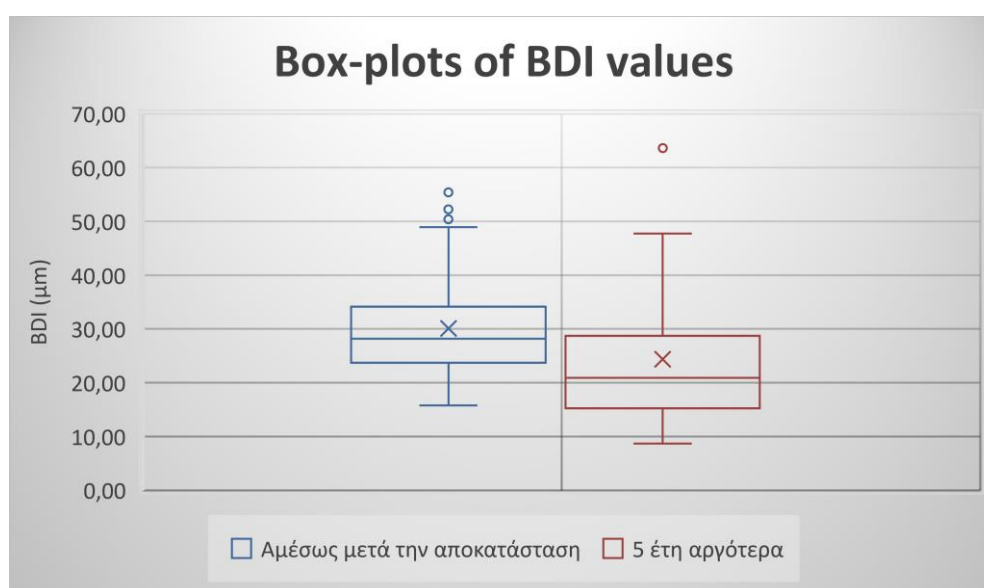
Εικόνα 5.9 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη SCI_{300}

Αρχικά, ο δείκτης επιφανειακής καμπυλότητας παρουσιάζει πολύ καλή στατιστική συμπεριφορά, με ιδιαίτερα μικρή τιμή διακύμανσης 0,24. Η μέση τιμή σχεδόν συμπίπτει με τη διάμεσο, και το διατεταρτημοριακό εύρος είναι αρκετά μικρό. Οι τιμές κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα, με το 75% του δείγματος των τιμών του εν λόγω δείκτη να μην υπερβαίνει την τιμή 58, και το υπόλοιπο 25% να φτάνει μέχρι το άνω όριο της τιμής 80, με

εξαίρεση δύο μεμονωμένες τιμές. Με βάση τον πίνακα 5.4, η αρχική κατάσταση των ανώτερων στρώσεων χαρακτηρίζεται μέτρια-πολύ καλή.

Πέντε χρόνια αργότερα, η γενική εικόνα δείχνει βελτιωμένη. Μπορεί αντιθέτως, να παρατηρείται αισθητή αύξηση της διακύμανσης του δείκτη με αντίστοιχη τιμή 0,49, αλλά όπως φαίνεται καθαρά και στην εικόνα 5.9, η αύξηση αυτή οφείλεται στη γενική μείωση των τιμών, καθώς το διάγραμμα μετατοπίζεται προς τα κάτω. Εξάλλου, αναμένονται διακυμάνσεις, καθώς οι ανώτερες στρώσεις, εκτός του ότι καταπονούνται εντατικά περισσότερο από όλες τις στρώσεις, έρχονται σε άμεση επαφή με τα οχήματα, δεχόμενες και τις επιδράσεις των εξωτερικών συνθηκών. Ειδικότερα, οι τιμές κινούνται σε καλύτερα επίπεδα. Πιο αναλυτικά, το 75% του πλήθους των τιμών λαμβάνουν μέχρι και την τιμή 47. Μάλιστα, οι μισές τιμές που λαμβάνει ο δείκτης, δεν ξεπερνούν την τιμή 31. Βέβαια, υπάρχουν και υψηλότερες τιμές, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ήδη θετική εικόνα. Με γνώμονα και τον πίνακα 5.4, η κατάσταση των άνω στρώσεων στη χρονική αυτή φάση, είναι πολύ καλή-εξαιρετική, επιβεβαιώνοντας τις αρχικές εκτιμήσεις περί βελτίωσης.

Προς περαιτέρω διερεύνηση, θα αναλυθούν και οι υπόλοιποι δείκτες, με τη βοήθεια και των αντίστοιχων σχεδιαγραμμάτων. Με βάση και τα ανωτέρω, ο δείκτης BDI συσχετίζεται ικανοποιητικά με την κατάσταση της βάσης οδοστρωμάτων, των οποίων αυτή αποτελείται από αδρανή υλικά, όπως και εδώ (Kim & Park 2002). Οι τιμές του δείκτη αυτού για τη συγκεκριμένη ανάλυση, παρουσιάζονται στο σχετικό γράφημα (βλέπε εικόνα 5.10).

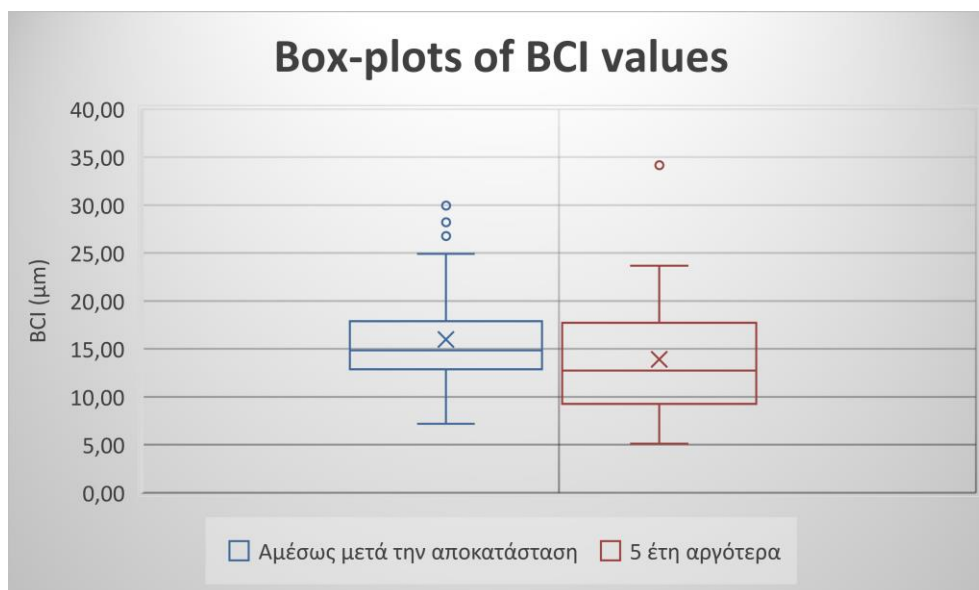


Εικόνα 5.10 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη BDI

Με μία πρώτη ματιά, η εικόνα φαίνεται πολύ ικανοποιητική. Αρχικά, τα στοιχεία δείχνουν εξαιρετική στατιστική συμπεριφορά. Η απόσταση της μέσης τιμής από τη διάμεσο είναι ελάχιστη και το διατεταρτημοριακό εύρος είναι σχετικά μικρό. Διακρίνονται και κάποια μεμονωμένα σημεία προς τα άνω, στο σχετικό διάγραμμα, αλλά αυτά δεν αλλοιώνουν την καλή εικόνα. Μιλώντας και με αριθμητικά δεδομένα, η τιμή της αρχικής διακύμανσης ανέρχεται σε 0,32, ιδιαίτερα χαμηλή τιμή. Ο πίνακας 5.4 δεν παρέχει στοιχεία του δείκτη BDI προς ποιοτική κατηγοριοποίηση του οδοστρώματος, με βάση τα αριθμητικά όρια των αντίστοιχων τιμών.

Με την πάροδο πέντε χρόνων από την εφαρμογή της αποκατάστασης, η εξέλιξη του δείκτη BDI είναι εξίσου θετική, μάλιστα καλύτερη. Με μοναδική εξαίρεση της έκτοπης του διαγράμματος μέγιστης τιμής, το διάγραμμα στη χρονική αυτή φάση μετατοπίζεται ελαφρώς προς τα κάτω. Μεγαλύτερη είναι η μείωση της μέσης τιμής, αλλά και της διαμέσου, όντας θετικά στοιχεία. Σε αυτού του είδους τις μειώσεις οφείλεται και η αύξηση της διακύμανσης, η οποία λαμβάνει τιμή 0,49. Η κατάσταση της στρώσης βάσης, μετά από ανάλυση των κατάλληλων στοιχείων, αποδεικνύεται αρκετά καλή, συνεχίζοντας στο ίδιο θετικό μοτίβο των αποτελεσμάτων που προηγήθηκαν.

Μένει λοιπόν να καθοριστεί και η επίδραση του υπεδάφους, για την πληρέστερη εικόνα του οδοστρώματος. Για την αξιολόγηση του υπεδάφους διατίθενται δύο δείκτες. Αυτοί είναι ο δείκτης BCI, αλλά και η πιο απομακρυσμένη μετρημένη υποχώρηση D_{1800} , με βάση την οποία μάλιστα, υπάρχουν κριτήρια ποιοτικής κατηγοριοποίησης. Ξεκινώντας με το δείκτη BCI, η μεταβολή των τιμών του παρουσιάζονται παρακάτω (βλέπε εικόνα 5.11).



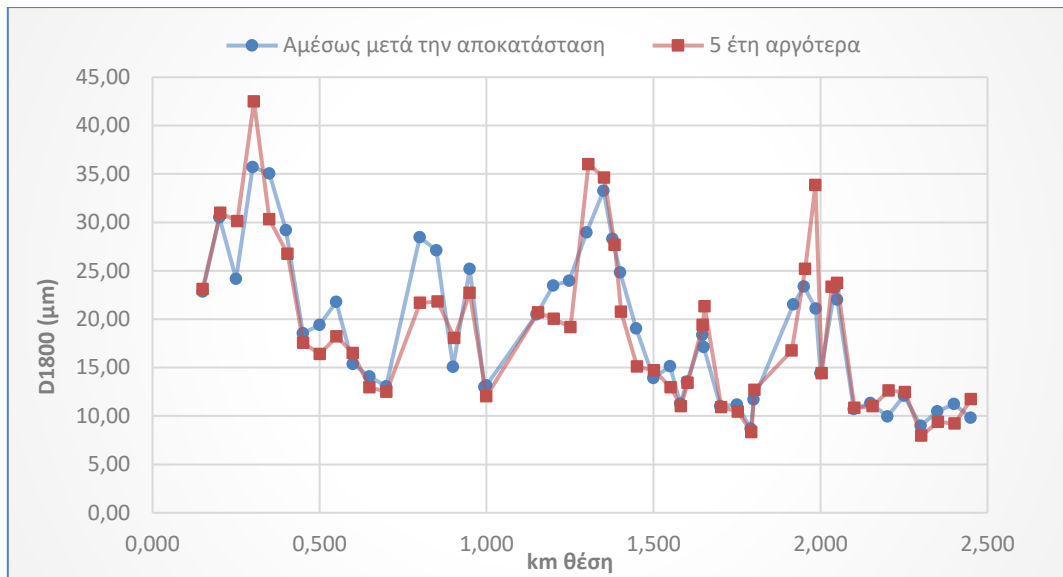
Εικόνα 5.11 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του δείκτη BCI

Πολύ καλή συμπεριφορά παρουσιάζει ο δείκτης BCI, αμέσως μετά την αποκατάσταση. Το μικρό εύρος των ακροτάτων, η μικρή τιμή της διακύμανσης (0,32), το ιδιαίτερα μικρό διατεταρτημοριακό εύρος, αλλά και η κατά προσέγγιση ταύτιση της μέσης τιμής με τη διάμεσο, είναι αξιοσημείωτα θετικά στοιχεία. Τα έκτοπα σημεία του αντίστοιχου διαγράμματος, καθώς δεν λαμβάνουν ιδιαίτερα υψηλότερες τιμές, εκτιμάται ότι δεν υποβαθμίζουν τη συνολική κατάσταση.

Πρακτικώς αμετάβλητος είναι ο εν λόγω δείκτης, έπειτα από πέντε χρόνια. Οι τρεις μεμονωμένες τιμές αντικαθίστανται από μία υψηλότερη, την αντίστοιχη μέγιστη στη χρονική αυτή φάση, καθώς η μέση τιμή και η διάμεσος εμφανίζουν μία μικρής τάξεως μείωση. Μάλιστα η τιμή του 3^{ου} τεταρτημόριου παραμένει η ίδια. Όσον αφορά τη διακύμανση, παρατηρείται μία μικρή αύξηση από 0,32 σε 0,42. Η αύξηση αυτή δικαιολογείται από τις μειώσεις των δεικτών που προαναφέρθηκαν. Προς το παρόν, τα δεδομένα δείχνουν καλή εικόνα, σχετικά με την κατάσταση του υπεδάφους. Μένει και η ανάλυση του δείκτη D_{1800} .

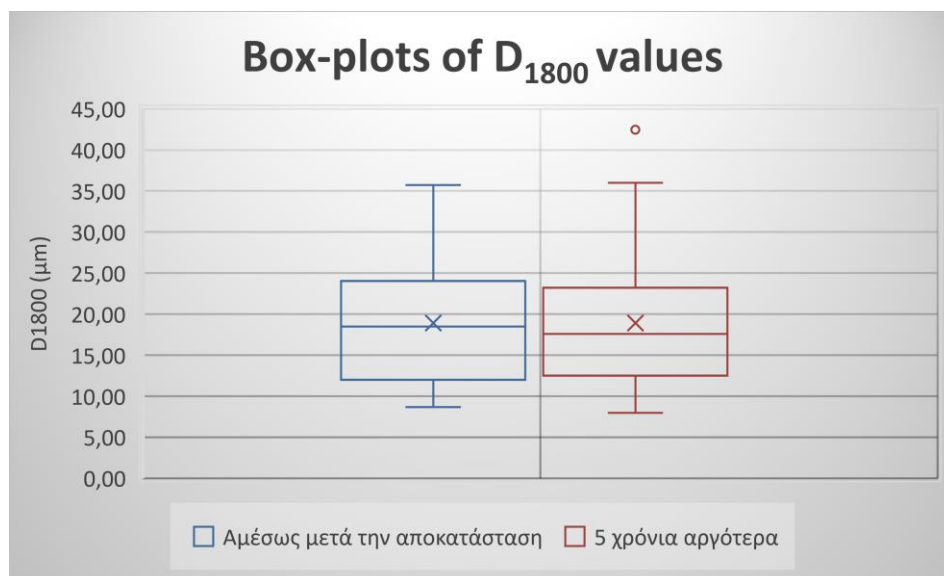
Τη διαπίστωση αυτή, πως η κατάσταση του υπεδάφους σύμφωνα με το δείκτη BCI παραμένει πρακτικώς χρονικά αμετάβλητη, επιβεβαιώνει και η μεταβολή της υποχώρησης D_{1800} , πρωτίστως με τη βοήθεια του σχεδιαγράμματος μεταβολής (βλέπε εικόνα 5.12).

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



Εικόνα 5.12 Σχεδιάγραμμα μεταβολής της υποχώρησης D_{1800}

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.12, ο δείκτης D_{1800} εμφανίζεται ανεξάρτητος της χρονικής παρόδου. Οι δύο γραμμές δείχνουν μάλιστα να ταυτίζονται, στις δύο χρονικές φάσεις των μετρήσεων. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύεται και στατιστικώς, με το συντελεστή διακύμανσης να μεταβάλλεται ανεπαίσθητα μετά από πέντε χρόνια, αυξάνοντας ελάχιστα από την αρχική τιμή 0,39, στην τιμή 0,43. Πάνω σε αυτό, χρήσιμα στατιστικά στοιχεία παρέχει και το παρακάτω σχετικό γράφημα (βλέπε εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13 Στατιστικό σχεδιάγραμμα μεταβολής του D_{1800}

Λαμβάνοντας υπόψιν την εικόνα 5.13, παρατηρείται η μεγάλη ομοιότητα των δύο διαγραμμάτων, τα οποία αναφέρονται στις δύο χρονικές φάσεις των μετρήσεων. Αναλυτικότερα, είναι εμφανής μία μικρή μείωση του διατεταρτημοριακού εύρους, αλλά και η μικρής τάξεως απομάκρυνση της μέσης τιμής από τη διάμεσο. Σε γενικές πάντως γραμμές, οι διαφορές είναι ασήμαντες. Ρίχνοντας μία ματιά στους πίνακες Π5 και Π6 του παραρτήματος, σε κλίμακα ποσοστών του πλήθους των αντίστοιχων τιμών, το 75% αυτών δεν υπερβαίνει αρχικά την τιμή 23,85. Οι μισές τιμές του δείγματος μάλιστα, κυμαίνονται κάτω από το όριο της τιμής 20. Με βάση αυτά, αλλά και με βάση το γεγονός πως μόλις το ένα τέταρτο του πλήθους των τιμών κινούνται στο διάστημα 23,85 έως 35,72, σύμφωνα και με τον πίνακα 5.4, η κατάσταση του υπεδάφους χαρακτηρίζεται ως καλή-πολύ καλή. Το ίδιο περίπου ισχύει και μετά από πέντε έτη από την αποκατάσταση, όπου η κατάσταση του υπεδάφους παραμένει καλή-πολύ καλή. Άρα, αναλύοντας τους αντίστοιχους δείκτες παράλληλα, οι εκτιμήσεις που έκαναν λόγω για την καλή και ταυτόχρονα σταθερή κατάσταση του υπεδάφους, επιβεβαιώθηκαν πλήρως.

Συνοψίζοντας, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της λεπτομερούς αυτής ανάλυσης είναι ιδιαίτερα θετικά. Από τη γενική εικόνα της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος και του δείκτη D_0 , τα πρώτα αποτελέσματα έδειξαν ενθαρρυντικά στοιχεία. Η επεξεργασία των δεδομένων όμως συνεχίστηκε και σε λεπτομερέστερο στάδιο, με την αξιολόγηση και ποιοτική κατηγοριοποίηση των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν, ήταν εξίσου θετικά, σε όλα τα επιμέρους στρώματα, από τις επιφανειακές ασφαλτικές στρώσεις μέχρι και το υπεδάφος. Μάλιστα, τα αριθμητικά δεδομένα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, έδειξαν αισθητή βελτίωση με την πάροδο του χρόνου, μία ακόμη σημαντική εξέλιξη της πορείας της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.

Τέλος, αν συνυπολογίσει κανείς πως η πρωτοποριακή βιώσιμη τεχνική αποκατάστασης που πραγματοποιήθηκε στο συγκεκριμένο οδόστρωμα, είναι σε πιλοτικό στάδιο στη χώρα μας, καθώς και η διαθέσιμη τεχνογνωσία και εμπειρία για την τεχνική αυτή, δεν βρίσκονται στο επιθυμητό επίπεδο, η επιτυχία του εγχειρήματος σε συνδυασμό και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν λαμβάνει ακόμη μεγαλύτερη διάσταση. Εάν το τμήμα αυτό προσεχθεί και μελλοντικά με τη διεξαγωγή παρόμοιων μετρήσεων, αλλά και με τη βοήθεια οπτικής επισκόπησης, τότε με τη χρήση της κατάλληλη τεχνικής συντήρησης, όπου απαιτηθεί, μπορεί να παραταθεί η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, αποτελώντας θετικό παράδειγμα στη συμβολή των βιώσιμων οδοστρωμάτων.

6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα όσα έχουν ειπωθεί μέχρι στιγμής, τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν μεγάλο, αλλά και πολύπλευρο ενδιαφέρον. Από διάφορες σχετικές έρευνες, αποδεικνύεται η μεγάλη συνεισφορά του τομέα μεταφορών, αλλά και ειδικότερα της συγκοινωνιακής υποδομής, στις κλιματικές αλλαγές και συγκεκριμένα στην επιδείνωση του περιβάλλοντος. Φυσικά, με τα οδοστρώματα να συνδέονται άμεσα ως μέρος της συγκοινωνιακής υποδομής, κατά κύριο λόγο μάλιστα, αναδεικνύεται η ανάγκη υιοθέτησης και ενσωμάτωσης βιώσιμων-αιεφόρων στρατηγικών, σε αυτά. Λαμβάνοντας υπόψιν και τους οικονομικής φύσεως περιορισμούς, αλλά και τη μειωμένη κοινωνική ανοχή που γενικότερα παρατηρείται, η ανάγκη αυτή εμφανίζεται ακόμη πιο επιτακτική. Τα αρνητικά αυτά στοιχεία, δεν αφήνουν πολλά περιθώρια, με άμεσες αλλαγές να κρίνονται απαραίτητες.

Ειδικότερα, αναλύοντας τον όρο βιωσιμότητα, ο οποίος ενέχει ως έννοια κάποιο βαθμό αοριστίας καθώς αυτός αναφέρεται γενικά στα διάφορα συστήματα, γίνεται προσπάθεια να γίνει κατανοητή η ερμηνεία αυτού, σε ότι αφορά τα οδοστρώματα. Μέσα από την προσπάθεια αυτή, προκύπτει, πως το βασικό κίνητρο των βιώσιμων οδοστρωμάτων, είναι η προσαρμογή των διάφορων σταδίων που απαρτίζουν όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με τα οδοστρώματα, αποσκοπώντας στη βελτίωση του συστήματος περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία. Αυτό, είναι και το λεγόμενο τρίπτυχο της βιωσιμότητας, βασιζόμενο στα οδοστρώματα. Σκοπός, είναι η μέγιστη δυνατή βελτίωση στους τρεις κύριους συντελεστές αυτούς της βιωσιμότητας συγχρόνως, χωρίς κάποιος από αυτούς να αμεληθεί. Η βελτιστοποίηση φαντάζει αδύνατη, καθώς η βιωσιμότητα, λόγω των επιμέρους βασικών διαφορών των συντελεστών της, καθίσταται μη μετρήσιμη. Το γεγονός αυτό, αυξάνει και το βαθμό δυσκολίας του συγκεκριμένου, βιώσιμου χαρακτήρα, εγχειρήματος, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως η επιτυχία δεν είναι δυνατή.

Στο κυρίως μέρος του θέματος, ξεκινώντας από τα υλικά που συνθέτουν τα οδοστρώματα, υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων βιώσιμων υλικών, διάφορων ειδών. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν ασφαλικά εναλλακτικά υλικά, συμπληρωματικά υλικά σκυροδέματος, ανακυκλώσιμα αδρανή υλικά, αλλά και διάφορα άλλα καινοτόμα υλικά. Πολλά από αυτά μάλιστα, παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά, και συστήνονται προς επάξια αντικατάσταση των αντίστοιχων συμβατικών. Μερικά βέβαια από τα βιώσιμα υλικά που διατίθενται, δεν πληρούν τις αντίστοιχες προδιαγραφές των συμβατικών. Παρόλα αυτά,

υπάρχει και για αυτά προβλεπόμενη λύση. Κατώτερες στρώσεις μικρότερων εντατικών απαιτήσεων, προσφέρονται για τα υλικά αυτά. Έτσι, τίποτα δεν μένει αναξιοποίητο. Με τη βοήθεια συγχρόνως και των διαθέσιμων βιώσιμων πρωτοποριακών τεχνολογιών, οι οποίες βασίζονται σημαντικά στη μέθοδο της ανακύκλωσης και στην τεχνολογία χαμηλής θερμοκρασίας, εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό, αφενός η επιτυχία και η αποτελεσματικότητα, αφετέρου η πρόοδος στο σύστημα περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία. Αυτός είναι άλλωστε και ένας από τους επιδιωκόμενους στόχους.

Όσον αφορά το σκέλος του σχεδιασμού, οι κυριότερες επιδιώξεις των οδοστρωμάτων είναι αναφορικά, η μεγάλη διάρκεια ζωής, το χαμηλό κόστος κατασκευής, τα καλά επιφανειακά χαρακτηριστικά, αλλά και φυσικά οι χαμηλές εκπομπές ρυπογόνων αερίων, σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Για την επίτευξη των επιμέρους αυτών στόχων, υπάρχουν κάποιες προδιαγραφές που καλείται να πληροί ο σχεδιασμός, ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος. Έμφαση πρέπει να δοθεί, στο σχεδιασμό μικρών γενικά διατομών, στην ομαλότητα της επιφάνειας των οδοστρωμάτων, καθώς αυτή καθορίζει σημαντικά τα επίπεδα των εκπεμπόμενων ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμου, αλλά και στη διαχείριση των όμβριων υδάτων. Εναλλακτικές προτάσεις σχεδιασμού, υπόσχονται περαιτέρω θετικές αλλαγές στα οδοστρώματα, ως μέρος ενός ευρύτερου συστήματος.

Πολύ σημαντική, είναι και η μετάβαση από το σχεδιασμό στην κατασκευή. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα για τα τελικά αποτελέσματα. Βασικές επιδιώξεις, είναι η βελτίωση της κατασκευαστικής διαδικασίας προς περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος. Ειδικότερα, στοχεύεται η μείωση των αέριων ρύπων, η καλύτερη διαχειριστική τακτική της διαδικασίας, αλλά και η εξασφάλιση καλής ποιότητας κατασκευής, με την επιμέρους συμπύκνωση των διάφορων στρώσεων να έχει σημαντικό ρόλο. Αξιοπρόσεκτες είναι και οι έμμεσες επιπτώσεις στον κοινωνικό τομέα, οι οποίες δεν θα πρέπει να αγνοηθούν. Αρκετές είναι και οι πρωτοποριακές διαθέσιμες κατασκευαστικές μέθοδοι, προς συμβολή στην επίτευξη των ανωτέρω.

Με τη φάση λειτουργίας να έχει μεγάλο αντίκτυπο στο βαθμό της βιωσιμότητας, καθορίζοντας και τους τρεις συντελεστές αυτής, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα της συντήρησης των οδοστρωμάτων. Τα επιφανειακά χαρακτηριστικά έχουν σημαντική επιρροή στο περιβάλλον, ρυθμίζοντας τα επίπεδα των αέριων ρύπων, αλλά επιδρούν και σε κοινωνικά θέματα, και συγκεκριμένα σε θέματα ασφάλειας και οδηγικής συμπεριφοράς. Σχετικά με το οικονομικό σκέλος, η σωστή και έγκαιρη συντήρηση, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, μειώνοντας σημαντικά το συνολικό κόστος. Με βάση

αυτά, φαίνεται καλύτερα και η σημασία της συντήρησης. Λόγοι όπως η συνεχής χρήση, η φυσιολογική φθορά με την πάροδο του χρόνου, αλλά και η εμφάνιση φθορών λόγω άλλων παραγόντων, καθιστούν απαραίτητη τη συντήρηση, αλλά και την αποκατάσταση του οδοστρώματος, όπου χρειαστεί. Πλήθος βιώσιμων τεχνικών συντήρησης και αποκατάστασης των οδοστρωμάτων είναι διαθέσιμο, με κύρια κριτήρια το χαμηλό κόστος, το μικρό απαιτούμενο χρόνο, την αποτελεσματικότητα, αλλά και τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής της επέμβασης. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στον παράγοντα χρόνο, καθώς η έγκαιρη επέμβαση αποτελεί βιώσιμη τακτική. Πάνω σε αυτό, προτείνεται η οπτική επισκόπηση του οδοστρώματος με την πρόσθετη διεξαγωγή ειδικών μετρήσεων, προς διερεύνηση και αξιολόγηση της κατάστασης αυτού.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση ενός βιώσιμου οδοστρώματος. Το οδόστρωμα αυτό, προήλθε έπειτα από την αποκατάσταση ενός υφιστάμενου ασφαλτικού συμβατικού οδοστρώματος, το οποίο έφερε σημαντικές φθορές. Για την αποκατάσταση αυτού, έγινε χρήση βιώσιμης τεχνικής και συγκεκριμένα ψυχρή επί τόπου εις βάθους ανακύκλωση. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των μετρήσεων στις δύο φάσεις, αμέσως μετά την αποκατάσταση και πέντε έτη μετά, είναι αρκετά θετικά, όσον αφορά τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Δεδομένου ότι η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι βιώσιμη, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πως σε πρακτικό επίπεδο, μία τέτοιας μορφής τεχνική αποκατάστασης έδειξε πολύ θετικά στοιχεία, επιβεβαιώνοντας την επιτυχία ενός βιώσιμου εγχειρήματος. Μπορεί μάλιστα, το γεγονός αυτό να αποτελεί ένα μεμονωμένο παράδειγμα, είναι δε, ένα σημαντικό βήμα στην προσπάθεια ανάδειξης της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων.

Τέλος αξίζει να τονιστεί ότι, τα οδοστρώματα, ως θεμελιώδες και αναπόσπαστο σκέλος της συγκοινωνιακής υποδομής, αποτελούν καθοριστικής σημασίας παράγοντα και κρίσιμη συνιστώσα, γενικά, των μεταφορών. Ως εκ τούτου, συμβάλλουν στην ουσιώδη διατήρηση των ζωτικής σημασίας κοινωνικών λειτουργιών, όπως η υγεία, η ασφάλεια, η αίσθηση σιγουριάς και η κοινωνικοοικονομική ευημερία. Οι λειτουργίες αυτές είναι καθοριστικές για το κοινωνικό σύνολο και για τον άνθρωπο μεμονωμένα. Η ενδεχόμενη υπονόμηση αυτών, θα είχε ως αποτέλεσμα τον αρνητικό κοινωνικό αντίκτυπο. Με τη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων να στοχεύει στη διαφύλαξη και τη βελτίωση των λειτουργιών αυτών, δεδομένης και της πολύπλευρης πίεσης που ασκείται στο σύστημα περιβάλλον-οικονομία-κοινωνία τη σύγχρονη εποχή, η σημασία της λαμβάνει ακόμη μεγαλύτερη διάσταση.

Με γνώμονα τα ανωτέρω και δεδομένης της μείζονος σημασίας της βιωσιμότητας στα οδοστρώματα, τα κίνητρα για να τεθούν άμεσα σε εφαρμογή οι βιώσιμες προτάσεις, είναι πλέον ισχυρά. Στοιχεία όπως τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση του βιώσιμου οδοστρώματος, σημαίνουν πως η βιωσιμότητα μπορεί να δώσει έμπρακτα, επιτυχημένες λύσεις. Όσον αφορά το εγγύς μέλλον, μεγαλύτερο βάρος θα πρέπει να δοθεί στη βιωσιμότητα των νέων έργων οδοποιίας, και συγκεκριμένα στην άμεση εφαρμογή των διαθέσιμων βιώσιμων λύσεων, σχετικά με τα υλικά, το σχεδιασμό και την κατασκευή. Σημαντική μελλοντική κίνηση, είναι επίσης η προσπάθεια διεξαγωγής συστηματικής έρευνας με σκοπό τη διεξοδικότερη σύγκριση των συμβατικών και των βιώσιμων υλικών, σχετικά με τη χρήση τους στα οδοστρώματα. Τέτοιου είδους στοχευμένες κινήσεις, με στροφή στις πολυάριθμες βιώσιμες επιλογές που διατίθενται, σε συνεργασία και με την υπάρχουσα τεχνογνωσία στον τομέα αυτό, δείχνουν πως το εγχείρημα περί βιώσιμων οδοστρωμάτων μπορεί να έχει επιτυχή πορεία.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anthonissen J., Van Den Berg W., & J. Braet 2016. “*Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements*”, Environmental Impact Assessment Review, 60, 139-147
- Arnold J.W., Behnia B., McGovern M.E., Hill B., Buttlar W.G. & H. Reis 2014. “*Quantitative evaluation of low-temperature performance of sustainable asphalt pavements containing recycled asphalt shingles (RAS)*”, Construction and Building Materials, 58, 1-8
- Colbert B., Hasan M.R.M. & Z You 2016. “*A hybrid strategy in selecting diverse combinations of innovative sustainable materials for asphalt pavements*”, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 3 (2), 89-103
- Darter, M. I. 1992. “*Report on the 1992 U.S. Tour of European Concrete Highways*”, FHWA-SA-93-012, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Environmental Protection Agency (EPA) 2007. “*Cleaner Diesels: Low Cost Ways to Reduce Emissions from Construction Equipment*”, Environmental Protection Agency, Washington, DC
- Environmental Protection Agency (EPA) 2008. “*Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies-Cool Pavements*”, Environmental Protection Agency, Washington, DC
- Environmental Protection Agency (EPA) 2009. “*Potential for Reducing Greenhouse Gas Emissions in the Constructor Sector*”, Environmental Protection Agency, Washington, DC
- Environmental Protection Agency (EPA) 2013. “*Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks*”, 1990-2011, Environmental Protection Agency, Washington, DC
- European Concrete Paving Association (EUPAVE) 2010. “*Δρόμοι από Σκυρόδεμα: Η Έξυπνη και Βιώσιμη Επιλογή*”, Hellenic Cement Industry Association
- Federal Highway Administration (FHWA) 2015. “*Towards Sustainable Pavement Systems: A Reference Document*”, FHWA-HIF-15-002, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC

- Hakim B. & S.F. Brown. 2006 “*Pavement Analysis Using the FWD: Practical Difficulties and Proposed Simplifications*”, Transportation Association of Canada, Ottawa, Canada
- Hamdar Y., Kassem H., Srouf I. & G. Chehab 2015. “*Performance-Based Specifications for Sustainable Pavements: A Lean Engineering Analysis*”, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15, Energy Procedia, 74, 453-461
- Harrington D. & G. Fick 2014. “*Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*”, National Concrete Pavement Technology Center, Ames, IA
- Hicks R.G., S.B. Seeds, & D.G. Peshkin 2000. “*Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements*”, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Jamshidi A., Kurumisawa K., Nawa T. & T. Igarashi 2016. “*Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 64, 211-236
- Kim Y. R. & H. Park 2002. “*Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation*”, FHWA/NC/2002-006, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC
- Kosmatka, S. & M. Wilson 2011. “*Design and Control of Concrete Mixtures: The Guide to Applications, Methods, and Materials*”, 15th Edition EB001.15. Portland Cement Association, Skokie, IL
- Loizos A., Papavasiliou P. & C. Plati 2007. “*Early Life Performance of Cold-In Place Pavement Recycling Using the Foamed Asphalt Technique*”, National Technical University of Athens (NTUA), Laboratory of Highway Engineering, Athens, Greece
- McCarthy L. & M. Cabbage (2016). “*Visualizing the Warmest August in 136 Years*”, NASA, Goddard Institute for Space Studies (GISS)
- Molenaar A.A.A. 2006. “*Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys*”, Part VI, CT 4860, Structural Design of Pavements
- Muench, S.T. 2010. “*Roadway Construction Sustainability Impacts: Review of Life Cycle Assessments*”, Transportation Research Board, Washington, DC

- National Concrete Pavement Technology Center (NCPTC) 2012. “*Sustainable Concrete Pavements: A Manual of Practice*”, Iowa State University, Institute for Transportation, Ames, IA
- National Concrete Pavement Technology Center (NCPTC) and National Center for Asphalt Technology (NCAT) 2013. “*Quantifying Pavement Albedo - Phase I Final Report: Literature Review and Detailed Work Plan*”, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Noshadravan A., Wildnauer M., Gregory G. & R. Kirchain 2013. “*Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty*”, Transportation Research, Part D, 25, 131-138
- Peshkin D., Smith K.L., Wolters A., Krstulovich J., Moulthrop J. & C. Alvarado 2011. “*Guidelines for the Preservation of High-Traffic-Volume Roadways*”, Transportation Research Board, Washington, DC
- Plati C. & V. Papavasiliou 2010. “*Consideration of Strain at Strength in Evaluation of Sustainable Pavement Material*”, National Technical University of Athens (NTUA) Department of Transportation Planning and Engineering, Athens, Greece
- Santamouris M. 2013. “*Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: A review of the actual developments*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 224-240
- Santero N.J., Harvey J. & A. Horvath 2010. “*Environmental policy for long-life pavements*”, Transportation Research, Part D, 16, 129-136
- Smith K.D., Harrington D., Pierce L., Ram P. & K.L. Smith 2014. “*Concrete Pavement Preservation Guide*”, FHWA-HIF-14-014, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Talvik O. & A. Aavik 2008. “*Use of FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment*”, Dept of Transportation, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia
- Tatari O., Nazzal M., & M. Kucukvar 2011. “*Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis*”, Resources, Conservation and Recycling, 58, 18-24

- Tayabji S., Smith K.D. & T. Van Dam 2010. “*Advanced High-Performance Materials for Highway Applications: A Report on the State of the Technology*”, FHWA-HIF-10-002, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Taylor P.C., Kosmatka S.H., Voigt G.F., Ayers M.E., Davis A., Fick G.J., Grove J., Harrington D., Kerkhoff B., Ozyildirim H.C., Shilstone J.M., Smith K., Tarr S., Tennis P.D., Van Dam T.J. & S. Waalkes 2006. “*Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavements: A State-of-the-Practice Manual*”, FHWA-HIF-07-004, Federal Highway Administration, Washington, DC
- U.S. Geological Survey (USGS) 2013a. “*Mineral Commodity Summaries 2013*”, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, VA
- Van Dam T. & K. Smith 2011. “*Tech Brief: Blended and Performance Cements*”, FHWA-HIF-10-025, Federal Highway Administration, Washington, DC
- Van Dam T., Taylor P., Fick D., Gress D., VanGeem M. & E. Lorenz 2012. “*Sustainable Concrete Pavements: A Manual of Practice*”, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA
- Wirtgen GmbH 2014. “*Wirtgen Cold Recycling Manual*”, 2nd edition ISBN3-936215-05-7, Windhagen, Germany
- World Commission on Environment and Development (WCED) 1987. “*Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development*”, Oxford University Press, University of Oxford, United Kingdom
- Λοΐζος Α. & Χ. Πλατή 2014. ‘*Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας
- Λοΐζος Α. & Χ. Πλατή 2015. ‘*Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων*’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας
- Λοΐζος Α. & Χ. Πλατή 2015. ‘*Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα*’, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1 Δεδομένα μέτρησης αμέσως μετά την αποκατάσταση

| Chainage (Χ.Θ.) | Force (kN) | D ₀ (μm) | D ₂₀₀ (μm) | D ₃₀₀ (μm) | D ₄₅₀ (μm) | D ₆₀₀ (μm) | D ₉₀₀ (μm) | D ₁₂₀₀ (μm) | D ₁₅₀₀ (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) | SCI ₂₂₅ (μm) | SCI ₃₀₀ (μm) | SCI ₄₅₀ (μm) | SCI ₆₀₀ (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | T (°C) | H ₁ (mm) | H ₂ (mm) | H ₃ (mm) |
|--------------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,150 | 49,44 | 125,80 | 95,30 | 79,90 | 64,70 | 54,40 | 40,80 | 31,40 | 26,00 | 22,60 | 30,50 | 45,90 | 61,10 | 71,40 | 25,50 | 13,60 | 15,0 | 97 | 222 | 200 |
| 0,200 | 49,48 | 208,20 | 165,60 | 139,40 | 111,30 | 91,00 | 64,50 | 46,50 | 37,10 | 30,20 | 42,60 | 68,80 | 96,90 | 117,20 | 48,40 | 26,50 | 15,1 | 97 | 222 | 200 |
| 0,250 | 49,43 | 117,60 | 96,90 | 85,50 | 72,30 | 61,90 | 45,90 | 34,90 | 27,10 | 23,90 | 20,70 | 32,10 | 45,30 | 55,70 | 23,60 | 16,00 | 15,2 | 150 | 260 | 200 |
| 0,300 | 49,41 | 164,70 | 131,40 | 118,30 | 96,70 | 82,00 | 63,60 | 47,40 | 42,30 | 35,30 | 33,30 | 46,40 | 68,00 | 82,70 | 36,30 | 18,40 | 15,3 | 100 | 277 | 200 |
| 0,350 | 49,37 | 179,90 | 154,10 | 135,60 | 115,40 | 99,00 | 75,30 | 57,20 | 44,00 | 34,60 | 25,80 | 44,30 | 64,50 | 80,90 | 36,60 | 23,70 | 15,4 | 97 | 276 | 200 |
| 0,400 | 49,68 | 146,80 | 119,80 | 102,00 | 86,30 | 72,90 | 55,80 | 42,70 | 34,60 | 29,00 | 27,00 | 44,80 | 60,50 | 73,90 | 29,10 | 17,10 | 15,6 | 117 | 258 | 200 |
| 0,450 | 49,36 | 119,70 | 95,80 | 82,30 | 66,60 | 55,40 | 39,70 | 29,20 | 22,60 | 18,30 | 23,90 | 37,40 | 53,10 | 64,30 | 26,90 | 15,70 | 15,9 | 109 | 223 | 200 |
| 0,500 | 49,69 | 119,50 | 94,90 | 80,50 | 66,30 | 56,10 | 41,10 | 30,40 | 23,20 | 19,30 | 24,60 | 39,00 | 53,20 | 63,40 | 24,40 | 15,00 | 16,0 | 109 | 223 | 200 |
| 0,550 | 49,34 | 146,60 | 114,20 | 94,90 | 75,80 | 61,70 | 44,50 | 32,80 | 25,90 | 21,50 | 32,40 | 51,70 | 70,80 | 84,90 | 33,20 | 17,20 | 16,1 | 109 | 223 | 200 |
| 0,600 | 49,73 | 117,30 | 90,40 | 73,00 | 58,20 | 47,50 | 31,90 | 22,60 | 16,30 | 15,30 | 26,90 | 44,30 | 59,10 | 69,80 | 25,50 | 15,60 | 16,3 | 109 | 223 | 200 |
| 0,650 | 49,66 | 123,80 | 93,90 | 77,50 | 61,80 | 50,00 | 34,90 | 22,50 | 16,50 | 14,00 | 29,90 | 46,30 | 62,00 | 73,80 | 27,50 | 15,10 | 16,4 | 109 | 223 | 200 |
| 0,700 | 49,43 | 105,80 | 79,80 | 65,80 | 52,60 | 43,00 | 30,50 | 21,00 | 15,20 | 12,90 | 26,00 | 40,00 | 53,20 | 62,80 | 22,80 | 12,50 | 16,6 | 109 | 223 | 200 |
| 0,800 | 49,69 | 154,40 | 123,80 | 105,80 | 88,60 | 74,70 | 53,70 | 40,00 | 31,70 | 28,30 | 30,60 | 48,60 | 65,80 | 79,70 | 31,10 | 21,00 | 16,7 | 109 | 223 | 200 |
| 0,850 | 49,27 | 150,00 | 117,70 | 97,30 | 79,80 | 65,30 | 47,90 | 36,20 | 28,70 | 26,70 | 32,30 | 52,70 | 70,20 | 84,70 | 32,00 | 17,40 | 16,9 | 109 | 223 | 200 |
| 0,900 | 49,43 | 88,70 | 68,90 | 57,90 | 47,20 | 39,30 | 28,90 | 21,60 | 18,20 | 14,90 | 19,80 | 30,80 | 41,50 | 49,40 | 18,60 | 10,40 | 16,9 | 106 | 194 | 200 |
| 0,950 | 49,44 | 152,50 | 119,90 | 99,90 | 80,20 | 66,70 | 48,30 | 36,30 | 28,90 | 24,90 | 32,60 | 52,60 | 72,30 | 85,80 | 33,20 | 18,40 | 17,1 | 106 | 210 | 200 |
| 0,994 | 49,61 | 107,50 | 84,00 | 70,10 | 55,50 | 45,00 | 31,00 | 20,50 | 15,60 | 12,90 | 23,50 | 37,40 | 52,00 | 62,50 | 25,10 | 14,00 | 17,1 | 105 | 225 | 200 |
| 1,000 | 49,37 | 101,50 | 81,00 | 68,40 | 55,30 | 46,10 | 32,00 | 22,60 | 16,50 | 13,00 | 20,50 | 33,10 | 46,20 | 55,40 | 22,30 | 14,10 | 17,3 | 103 | 224 | 200 |
| 1,150 | 49,54 | 136,00 | 109,00 | 92,30 | 74,40 | 61,30 | 43,80 | 32,30 | 24,80 | 20,30 | 27,00 | 43,70 | 61,60 | 74,70 | 31,00 | 17,50 | 17,4 | 105 | 225 | 200 |
| 1,200 | 49,85 | 136,90 | 101,90 | 81,90 | 61,70 | 49,60 | 36,80 | 29,70 | 24,90 | 23,40 | 35,00 | 55,00 | 75,20 | 87,30 | 32,30 | 12,80 | 17,4 | 115 | 251 | 200 |
| 1,248 | 49,62 | 140,40 | 105,60 | 87,10 | 66,80 | 54,20 | 39,70 | 31,40 | 27,00 | 23,80 | 34,80 | 53,30 | 73,60 | 86,20 | 32,90 | 14,50 | 17,5 | 115 | 251 | 200 |
| 1,300 | 49,36 | 164,40 | 128,30 | 107,90 | 86,40 | 69,70 | 52,90 | 42,20 | 35,90 | 28,60 | 36,10 | 56,50 | 78,00 | 94,70 | 38,20 | 16,80 | 17,6 | 125 | 276 | 200 |
| 1,350 | 49,18 | 140,90 | 109,60 | 92,80 | 76,10 | 65,10 | 52,40 | 44,00 | 36,80 | 32,70 | 31,30 | 48,10 | 64,80 | 75,80 | 27,70 | 12,70 | 17,7 | 113 | 277 | 200 |
| 1,377 | 49,82 | 221,40 | 176,60 | 148,30 | 115,80 | 93,10 | 65,00 | 47,90 | 32,60 | 28,20 | 44,80 | 73,10 | 105,60 | 128,30 | 55,20 | 28,10 | 17,7 | 100 | 277 | 200 |
| 1,400 | 49,57 | 193,80 | 149,00 | 122,40 | 93,10 | 74,50 | 53,00 | 39,70 | 31,50 | 24,60 | 44,80 | 71,40 | 100,70 | 119,30 | 47,90 | 21,50 | 18,0 | 114 | 277 | 200 |

Πίνακας Π1 (συνέχεια)

| Chainage (χ.Θ.) | Force (kN) | D ₀ (μm) | D ₂₀₀ (μm) | D ₃₀₀ (μm) | D ₄₅₀ (μm) | D ₆₀₀ (μm) | D ₉₀₀ (μm) | D ₁₂₀₀ (μm) | D ₁₅₀₀ (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) | SCI ₂₂₅ (μm) | SCI ₃₀₀ (μm) | SCI ₄₅₀ (μm) | SCI ₆₀₀ (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | Τ (°C) | H ₁ (mm) | H ₂ (mm) | H ₃ (mm) |
|--------------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1,448 | 49,40 | 208,30 | 156,40 | 126,10 | 94,80 | 74,50 | 49,90 | 34,90 | 25,40 | 18,80 | 51,90 | 82,20 | 113,50 | 133,80 | 51,60 | 24,60 | 18,0 | 114 | 277 | 200 |
| 1,500 | 49,59 | 125,30 | 94,10 | 75,10 | 56,20 | 44,10 | 29,60 | 21,70 | 16,80 | 13,80 | 31,20 | 50,20 | 69,10 | 81,20 | 31,00 | 14,50 | 18,1 | 114 | 277 | 200 |
| 1,550 | 49,25 | 150,90 | 110,70 | 89,40 | 67,20 | 52,60 | 35,30 | 24,90 | 18,90 | 14,90 | 40,20 | 61,50 | 83,70 | 98,30 | 36,80 | 17,30 | 18,2 | 114 | 277 | 200 |
| 1,580 | 49,75 | 128,40 | 94,90 | 75,50 | 58,70 | 46,00 | 29,90 | 19,70 | 13,80 | 11,20 | 33,50 | 52,90 | 69,70 | 82,40 | 29,50 | 16,10 | 18,2 | 114 | 277 | 200 |
| 1,600 | 49,43 | 121,70 | 88,40 | 71,30 | 54,40 | 42,60 | 28,60 | 19,50 | 13,40 | 13,40 | 33,30 | 50,40 | 67,30 | 79,10 | 28,70 | 14,00 | 18,3 | 114 | 277 | 200 |
| 1,646 | 49,48 | 106,20 | 78,60 | 64,80 | 50,50 | 41,40 | 30,60 | 24,10 | 20,80 | 18,20 | 27,60 | 41,40 | 55,70 | 64,80 | 23,40 | 10,80 | 18,4 | 114 | 277 | 200 |
| 1,650 | 49,32 | 120,00 | 89,20 | 73,20 | 56,30 | 45,40 | 32,50 | 24,80 | 19,80 | 16,90 | 30,80 | 46,80 | 63,70 | 74,60 | 27,80 | 12,90 | 18,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,700 | 49,55 | 106,00 | 79,80 | 66,60 | 52,70 | 42,70 | 28,40 | 19,60 | 13,60 | 10,90 | 26,20 | 39,40 | 53,30 | 63,30 | 23,90 | 14,30 | 18,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,750 | 49,62 | 187,60 | 137,70 | 109,50 | 79,80 | 59,50 | 35,30 | 21,90 | 14,50 | 11,10 | 49,90 | 78,10 | 107,80 | 128,10 | 50,00 | 24,20 | 18,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,791 | 49,54 | 123,50 | 87,10 | 68,70 | 50,60 | 39,00 | 23,70 | 14,30 | 9,20 | 8,60 | 36,40 | 54,80 | 72,90 | 84,50 | 29,70 | 15,30 | 18,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,800 | 49,18 | 143,90 | 108,70 | 87,50 | 66,60 | 51,50 | 32,00 | 21,00 | 13,90 | 11,50 | 35,20 | 56,40 | 77,30 | 92,40 | 36,00 | 19,50 | 18,7 | 114 | 277 | 200 |
| 1,919 | 49,73 | 121,40 | 90,00 | 75,20 | 61,30 | 51,30 | 37,10 | 29,30 | 25,60 | 21,40 | 31,40 | 46,20 | 60,10 | 70,10 | 23,90 | 14,20 | 18,9 | 114 | 277 | 200 |
| 1,950 | 49,41 | 106,10 | 83,90 | 72,00 | 59,80 | 51,00 | 39,10 | 31,30 | 27,00 | 23,10 | 22,20 | 34,10 | 46,30 | 55,10 | 21,00 | 11,90 | 19,1 | 114 | 277 | 200 |
| 1,986 | 49,32 | 113,30 | 88,70 | 76,10 | 63,00 | 52,70 | 39,20 | 30,10 | 24,40 | 20,80 | 24,60 | 37,20 | 50,30 | 60,60 | 23,40 | 13,50 | 19,1 | 127 | 276 | 200 |
| 2,000 | 49,23 | 107,20 | 80,60 | 67,70 | 53,00 | 42,30 | 28,10 | 20,00 | 16,90 | 14,20 | 26,60 | 39,50 | 54,20 | 64,90 | 25,40 | 14,20 | 19,2 | 115 | 277 | 200 |
| 2,043 | 49,27 | 120,90 | 92,90 | 78,70 | 63,60 | 53,50 | 40,80 | 32,20 | 27,10 | 22,90 | 28,00 | 42,20 | 57,30 | 67,40 | 25,20 | 12,70 | 19,3 | 102 | 277 | 200 |
| 2,050 | 49,47 | 113,70 | 84,10 | 68,90 | 55,70 | 47,00 | 36,00 | 29,50 | 25,00 | 21,80 | 29,60 | 44,80 | 58,00 | 66,70 | 21,90 | 11,00 | 19,4 | 102 | 277 | 200 |
| 2,100 | 49,44 | 86,10 | 56,70 | 42,50 | 32,10 | 26,00 | 18,90 | 14,20 | 10,90 | 10,60 | 29,40 | 43,60 | 54,00 | 60,10 | 16,50 | 7,10 | 19,6 | 102 | 277 | 200 |
| 2,150 | 49,37 | 79,90 | 55,10 | 44,50 | 35,50 | 28,90 | 20,90 | 15,00 | 12,30 | 11,20 | 24,80 | 35,40 | 44,40 | 51,00 | 15,60 | 8,00 | 19,7 | 102 | 277 | 200 |
| 2,200 | 49,27 | 83,60 | 56,20 | 44,00 | 33,30 | 26,70 | 18,90 | 13,80 | 10,80 | 9,80 | 27,40 | 39,60 | 50,30 | 56,90 | 17,30 | 7,80 | 19,9 | 102 | 277 | 200 |
| 2,250 | 49,15 | 96,80 | 67,20 | 51,60 | 39,00 | 31,20 | 21,80 | 17,20 | 11,40 | 11,90 | 29,60 | 45,20 | 57,80 | 65,60 | 20,40 | 9,40 | 19,9 | 102 | 277 | 200 |
| 2,300 | 49,44 | 90,00 | 60,80 | 47,30 | 35,90 | 28,20 | 17,80 | 12,60 | 9,80 | 8,90 | 29,20 | 42,70 | 54,10 | 61,80 | 19,10 | 10,40 | 20,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,350 | 49,16 | 95,70 | 63,80 | 49,90 | 36,90 | 29,70 | 20,30 | 14,30 | 11,20 | 10,30 | 31,90 | 45,80 | 58,80 | 66,00 | 20,20 | 9,40 | 20,1 | 102 | 277 | 200 |
| 2,400 | 49,36 | 148,60 | 113,90 | 95,30 | 75,30 | 60,10 | 37,90 | 23,50 | 15,20 | 11,10 | 34,70 | 53,30 | 73,30 | 88,50 | 35,20 | 22,20 | 20,1 | 102 | 277 | 200 |
| 2,450 | 49,43 | 188,40 | 140,10 | 119,50 | 91,50 | 72,20 | 42,60 | 22,70 | 15,50 | 9,70 | 48,30 | 68,90 | 96,90 | 116,20 | 47,30 | 29,60 | 20,1 | 102 | 277 | 200 |

Πίνακας Π2 Δεδομένα μέτρησης πέντε έτη μετά την αποκατάσταση

| Chainage (Χ.Θ.) | Force (kN) | D ₀ (μm) | D ₂₀₀ (μm) | D ₃₀₀ (μm) | D ₄₅₀ (μm) | D ₆₀₀ (μm) | D ₉₀₀ (μm) | D ₁₂₀₀ (μm) | D ₁₅₀₀ (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) | SCI ₂₂₅ (μm) | SCI ₃₀₀ (μm) | SCI ₄₅₀ (μm) | SCI ₆₀₀ (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | Τ (°C) | H ₁ (mm) | H ₂ (mm) | H ₃ (mm) |
|--------------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 0,150 | 50,21 | 94,30 | 73,00 | 66,40 | 55,10 | 47,90 | 38,50 | 29,00 | 24,20 | 23,20 | 21,30 | 27,90 | 39,20 | 46,40 | 18,50 | 9,40 | 26,1 | 97 | 222 | 200 |
| 0,203 | 50,19 | 258,40 | 194,60 | 165,60 | 127,60 | 101,70 | 67,40 | 47,00 | 36,90 | 31,10 | 63,80 | 92,80 | 130,80 | 156,70 | 63,90 | 34,30 | 26,0 | 97 | 222 | 200 |
| 0,254 | 50,29 | 100,80 | 74,80 | 78,00 | 52,80 | 57,40 | 40,00 | 26,20 | 21,20 | 30,30 | 26,00 | 22,80 | 48,00 | 43,40 | 20,60 | 17,40 | 25,9 | 150 | 260 | 200 |
| 0,304 | 50,26 | 133,70 | 114,40 | 109,80 | 94,90 | 86,60 | 66,50 | 54,80 | 44,30 | 42,70 | 19,30 | 23,90 | 38,80 | 47,10 | 23,20 | 20,10 | 25,7 | 100 | 277 | 200 |
| 0,350 | 50,63 | 145,90 | 123,40 | 113,90 | 98,80 | 86,80 | 66,00 | 50,20 | 38,90 | 30,70 | 22,50 | 32,00 | 47,10 | 59,10 | 27,10 | 20,80 | 25,6 | 97 | 276 | 200 |
| 0,404 | 49,93 | 96,10 | 79,00 | 74,50 | 64,50 | 59,80 | 44,10 | 35,60 | 30,10 | 26,70 | 17,10 | 21,60 | 31,60 | 36,30 | 14,70 | 15,70 | 25,5 | 117 | 258 | 200 |
| 0,451 | 50,10 | 92,70 | 71,20 | 63,30 | 50,90 | 42,50 | 33,30 | 25,00 | 19,60 | 17,60 | 21,50 | 29,40 | 41,80 | 50,20 | 20,80 | 9,20 | 25,5 | 110 | 238 | 200 |
| 0,501 | 50,28 | 81,10 | 66,90 | 60,50 | 45,90 | 42,00 | 30,10 | 23,80 | 19,40 | 16,50 | 14,20 | 20,60 | 35,20 | 39,10 | 18,50 | 11,90 | 25,4 | 110 | 238 | 200 |
| 0,551 | 50,24 | 128,40 | 88,70 | 72,70 | 55,30 | 46,00 | 33,10 | 26,30 | 20,40 | 18,30 | 39,70 | 55,70 | 73,10 | 82,40 | 26,70 | 12,90 | 25,4 | 110 | 238 | 200 |
| 0,600 | 50,33 | 84,00 | 58,40 | 49,50 | 34,30 | 29,80 | 18,30 | 14,60 | 8,30 | 16,60 | 25,60 | 34,50 | 49,70 | 54,20 | 19,70 | 11,50 | 25,4 | 110 | 238 | 200 |
| 0,650 | 50,22 | 110,70 | 76,60 | 63,40 | 48,20 | 38,40 | 25,50 | 19,10 | 13,10 | 13,00 | 34,10 | 47,30 | 62,50 | 72,30 | 25,00 | 12,90 | 25,3 | 110 | 238 | 200 |
| 0,701 | 50,38 | 91,30 | 62,70 | 54,40 | 39,10 | 37,00 | 22,10 | 16,70 | 13,10 | 12,60 | 28,60 | 36,90 | 52,20 | 54,30 | 17,40 | 14,90 | 25,3 | 110 | 238 | 200 |
| 0,801 | 50,24 | 128,40 | 99,70 | 87,20 | 71,40 | 59,60 | 42,80 | 32,00 | 26,30 | 21,80 | 28,70 | 41,20 | 57,00 | 68,80 | 27,60 | 16,80 | 25,2 | 105 | 206 | 200 |
| 0,854 | 49,93 | 132,10 | 103,00 | 88,80 | 71,30 | 58,90 | 41,40 | 31,10 | 25,90 | 21,80 | 29,10 | 43,30 | 60,80 | 73,20 | 29,90 | 17,50 | 25,2 | 105 | 206 | 200 |
| 0,904 | 50,42 | 143,50 | 98,30 | 80,60 | 57,10 | 47,00 | 31,30 | 21,80 | 19,70 | 18,20 | 45,20 | 62,90 | 86,40 | 96,50 | 33,60 | 15,70 | 25,1 | 106 | 194 | 200 |
| 0,950 | 50,40 | 192,90 | 139,10 | 112,50 | 82,30 | 64,40 | 44,00 | 33,30 | 27,20 | 22,90 | 53,80 | 80,40 | 110,60 | 128,50 | 48,10 | 20,40 | 25,1 | 106 | 210 | 200 |
| 1,000 | 50,33 | 99,10 | 71,30 | 61,40 | 48,60 | 39,80 | 26,40 | 19,20 | 13,90 | 12,10 | 27,80 | 37,70 | 50,50 | 59,30 | 21,60 | 13,40 | 25,0 | 105 | 225 | 200 |
| 1,155 | 50,24 | 194,60 | 143,50 | 118,20 | 89,50 | 71,00 | 47,50 | 34,00 | 26,30 | 20,80 | 51,10 | 76,40 | 105,10 | 123,60 | 47,20 | 23,50 | 24,8 | 105 | 225 | 200 |
| 1,202 | 50,14 | 143,50 | 96,10 | 72,70 | 51,80 | 40,60 | 30,20 | 24,60 | 22,10 | 20,10 | 47,40 | 70,80 | 91,70 | 102,90 | 32,10 | 10,40 | 24,7 | 115 | 251 | 200 |
| 1,252 | 50,29 | 104,50 | 70,20 | 56,20 | 41,90 | 35,20 | 27,70 | 23,60 | 21,50 | 19,30 | 34,30 | 48,30 | 62,60 | 69,30 | 21,00 | 7,50 | 24,7 | 115 | 251 | 200 |
| 1,305 | 50,43 | 211,80 | 158,80 | 133,60 | 106,60 | 87,80 | 64,20 | 51,00 | 41,70 | 36,30 | 53,00 | 78,20 | 105,20 | 124,00 | 45,80 | 23,60 | 24,7 | 125 | 276 | 200 |
| 1,352 | 50,28 | 178,40 | 133,50 | 113,10 | 90,90 | 78,30 | 56,10 | 44,80 | 43,80 | 34,80 | 44,90 | 65,30 | 87,50 | 100,10 | 34,80 | 22,20 | 24,7 | 113 | 277 | 200 |
| 1,384 | 50,03 | 201,80 | 155,20 | 129,50 | 101,90 | 82,70 | 59,00 | 42,70 | 33,20 | 27,70 | 46,60 | 72,30 | 99,90 | 119,10 | 46,80 | 23,70 | 24,7 | 100 | 277 | 200 |
| 1,403 | 50,10 | 163,20 | 120,50 | 98,90 | 75,40 | 61,00 | 42,60 | 31,40 | 24,80 | 20,80 | 42,70 | 64,30 | 87,80 | 102,20 | 37,90 | 18,40 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,451 | 50,28 | 173,20 | 125,50 | 102,70 | 76,60 | 60,30 | 39,40 | 27,40 | 19,00 | 15,20 | 47,70 | 70,50 | 96,60 | 112,90 | 42,40 | 20,90 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |

Πίνακας Π2 (συνέχεια)

| Chainage (Χ.Θ.) | Force (kN) | D ₀ (μm) | D ₂₀₀ (μm) | D ₃₀₀ (μm) | D ₄₅₀ (μm) | D ₆₀₀ (μm) | D ₉₀₀ (μm) | D ₁₂₀₀ (μm) | D ₁₅₀₀ (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) | SCI ₂₂₅ (μm) | SCI ₃₀₀ (μm) | SCI ₄₅₀ (μm) | SCI ₆₀₀ (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | T (°C) | H ₁ (mm) | H ₂ (mm) | H ₃ (mm) |
|--------------------|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1,502 | 49,96 | 119,50 | 79,50 | 63,60 | 47,10 | 37,00 | 25,60 | 19,80 | 16,70 | 14,70 | 40,00 | 55,90 | 72,40 | 82,50 | 26,60 | 11,40 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,552 | 49,83 | 149,60 | 108,30 | 90,40 | 68,70 | 52,80 | 34,40 | 22,80 | 15,80 | 12,90 | 41,30 | 59,20 | 80,90 | 96,80 | 37,60 | 18,40 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,582 | 50,42 | 92,90 | 65,00 | 56,70 | 44,80 | 37,60 | 25,10 | 17,70 | 12,80 | 11,10 | 27,90 | 36,20 | 48,10 | 55,30 | 19,10 | 12,50 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,602 | 49,87 | 101,60 | 68,90 | 57,40 | 39,80 | 37,60 | 19,70 | 14,60 | 8,80 | 13,40 | 32,70 | 44,20 | 61,80 | 64,00 | 19,80 | 17,90 | 24,6 | 114 | 277 | 200 |
| 1,647 | 50,01 | 95,50 | 60,80 | 47,90 | 36,70 | 33,20 | 23,80 | 19,90 | 17,10 | 19,40 | 34,70 | 47,60 | 58,80 | 62,30 | 14,70 | 9,40 | 24,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,653 | 49,93 | 95,80 | 61,50 | 52,80 | 33,60 | 29,10 | 16,80 | 17,30 | 13,60 | 21,30 | 34,30 | 43,00 | 62,20 | 66,70 | 23,70 | 12,30 | 24,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,703 | 50,05 | 74,40 | 53,20 | 46,70 | 38,30 | 31,70 | 22,80 | 16,80 | 12,90 | 10,90 | 21,20 | 27,70 | 36,10 | 42,70 | 15,00 | 8,90 | 24,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,753 | 50,33 | 71,70 | 48,90 | 42,00 | 34,20 | 28,60 | 20,90 | 15,30 | 12,40 | 10,50 | 22,80 | 29,70 | 37,50 | 43,10 | 13,40 | 7,70 | 24,5 | 114 | 277 | 200 |
| 1,793 | 50,54 | 102,80 | 66,70 | 52,80 | 37,90 | 29,50 | 18,50 | 13,40 | 9,40 | 8,40 | 36,10 | 50,00 | 64,90 | 73,30 | 23,30 | 11,00 | 24,4 | 114 | 277 | 200 |
| 1,803 | 50,07 | 81,80 | 63,40 | 57,60 | 46,30 | 40,00 | 26,20 | 18,80 | 15,30 | 12,70 | 18,40 | 24,20 | 35,50 | 41,80 | 17,60 | 13,80 | 24,4 | 114 | 277 | 200 |
| 1,914 | 50,40 | 76,10 | 56,00 | 49,90 | 41,90 | 36,50 | 27,90 | 22,20 | 19,50 | 16,90 | 20,10 | 26,20 | 34,20 | 39,60 | 13,40 | 8,60 | 24,3 | 114 | 277 | 200 |
| 1,954 | 50,19 | 78,10 | 63,70 | 59,00 | 52,10 | 46,80 | 39,00 | 32,80 | 28,30 | 25,30 | 14,40 | 19,10 | 26,00 | 31,30 | 12,20 | 7,80 | 24,2 | 114 | 277 | 200 |
| 1,985 | 50,19 | 102,60 | 77,70 | 81,50 | 51,50 | 54,30 | 37,80 | 32,30 | 33,00 | 34,00 | 24,90 | 21,10 | 51,10 | 48,30 | 27,20 | 16,50 | 24,2 | 114 | 277 | 200 |
| 2,004 | 50,29 | 85,30 | 71,30 | 61,20 | 47,20 | 38,40 | 25,60 | 19,20 | 16,50 | 14,50 | 14,00 | 24,10 | 38,10 | 46,90 | 22,80 | 12,80 | 24,1 | 115 | 277 | 200 |
| 2,034 | 50,53 | 111,10 | 86,40 | 75,40 | 60,40 | 50,00 | 39,20 | 32,10 | 27,40 | 23,60 | 24,70 | 35,70 | 50,70 | 61,10 | 25,40 | 10,80 | 24,1 | 115 | 277 | 200 |
| 2,050 | 50,33 | 103,30 | 86,60 | 78,00 | 65,90 | 58,80 | 44,80 | 36,00 | 29,80 | 23,90 | 16,70 | 25,30 | 37,40 | 44,50 | 19,20 | 14,00 | 24,1 | 102 | 277 | 200 |
| 2,102 | 49,87 | 78,60 | 56,90 | 51,90 | 38,50 | 31,80 | 20,30 | 15,00 | 11,50 | 10,80 | 21,70 | 26,70 | 40,10 | 46,80 | 20,10 | 11,50 | 24,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,156 | 50,40 | 65,00 | 46,90 | 41,90 | 35,30 | 31,10 | 22,80 | 16,50 | 13,90 | 11,10 | 18,10 | 23,10 | 29,70 | 33,90 | 10,80 | 8,30 | 24,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,204 | 50,29 | 57,10 | 39,70 | 33,50 | 24,30 | 24,60 | 14,20 | 11,90 | 9,40 | 12,70 | 17,40 | 23,60 | 32,80 | 32,50 | 8,90 | 10,40 | 24,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,253 | 49,73 | 58,30 | 38,60 | 35,10 | 26,90 | 22,60 | 17,50 | 11,70 | 10,90 | 12,40 | 19,70 | 23,20 | 31,40 | 35,70 | 12,50 | 5,10 | 24,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,302 | 50,26 | 62,00 | 42,20 | 36,60 | 29,40 | 25,00 | 16,60 | 12,00 | 9,80 | 8,00 | 19,80 | 25,40 | 32,60 | 37,00 | 11,60 | 8,40 | 24,0 | 102 | 277 | 200 |
| 2,352 | 50,08 | 65,40 | 49,20 | 40,70 | 31,00 | 25,20 | 18,10 | 13,40 | 11,40 | 9,40 | 16,20 | 24,70 | 34,40 | 40,20 | 15,50 | 7,10 | 23,9 | 102 | 277 | 200 |
| 2,402 | 49,97 | 52,70 | 37,50 | 33,20 | 27,70 | 24,50 | 18,00 | 13,50 | 11,30 | 9,20 | 15,20 | 19,50 | 25,00 | 28,20 | 8,70 | 6,50 | 23,9 | 102 | 277 | 200 |
| 2,451 | 50,22 | 75,40 | 54,10 | 47,20 | 39,40 | 33,50 | 24,70 | 18,30 | 13,60 | 11,80 | 21,30 | 28,20 | 36,00 | 41,90 | 13,70 | 8,80 | 23,9 | 102 | 277 | 200 |

Πίνακας Π3 Δείκτες και παράμετροι δομικής κατάστασης διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C αμέσως μετά την αποκατάσταση

| Chainage (Χ.Θ.) | D ₀ (μm) | SCI _{225, 20C} (μm) | SCI _{300, 20C} (μm) | SCI _{450, 20C} (μm) | SCI _{600, 20C} (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) |
|--------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|----------|------------------------|
| 0,150 | 133,24 | 35,94 | 52,94 | 68,92 | 79,43 | 25,79 | 13,75 | 22,86 |
| 0,200 | 220,12 | 49,99 | 79,06 | 108,95 | 130,01 | 48,91 | 26,78 | 30,52 |
| 0,250 | 125,76 | 25,47 | 38,58 | 53,06 | 64,09 | 23,87 | 16,18 | 24,18 |
| 0,300 | 174,19 | 39,02 | 53,29 | 76,46 | 91,76 | 36,73 | 18,62 | 35,72 |
| 0,350 | 190,06 | 30,04 | 50,58 | 72,17 | 89,38 | 37,07 | 24,00 | 35,04 |
| 0,400 | 154,61 | 31,72 | 51,59 | 68,21 | 82,16 | 29,29 | 17,21 | 29,19 |
| 0,450 | 126,38 | 27,83 | 42,75 | 59,53 | 71,18 | 27,25 | 15,90 | 18,54 |
| 0,500 | 125,19 | 28,35 | 44,14 | 59,08 | 69,55 | 24,55 | 15,09 | 19,42 |
| 0,550 | 154,50 | 37,46 | 58,74 | 78,97 | 93,58 | 33,64 | 17,43 | 21,79 |
| 0,600 | 122,38 | 30,63 | 49,62 | 65,05 | 75,97 | 25,64 | 15,68 | 15,38 |
| 0,650 | 129,21 | 33,96 | 51,76 | 68,15 | 80,25 | 27,69 | 15,20 | 14,10 |
| 0,700 | 110,72 | 29,47 | 44,67 | 58,47 | 68,32 | 23,06 | 12,64 | 13,05 |
| 0,800 | 160,55 | 34,38 | 53,81 | 71,74 | 86,04 | 31,29 | 21,13 | 28,48 |
| 0,850 | 157,13 | 36,46 | 58,66 | 76,98 | 92,00 | 32,47 | 17,66 | 27,10 |
| 0,900 | 92,50 | 22,17 | 34,02 | 45,19 | 53,30 | 18,81 | 10,52 | 15,07 |
| 0,950 | 158,81 | 36,35 | 57,89 | 78,48 | 92,32 | 33,58 | 18,61 | 25,18 |
| 0,994 | 111,46 | 26,03 | 40,91 | 56,12 | 66,88 | 25,30 | 14,11 | 13,00 |
| 1,000 | 105,60 | 22,70 | 36,21 | 49,91 | 59,37 | 22,58 | 14,28 | 13,17 |
| 1,150 | 140,90 | 29,73 | 47,56 | 66,22 | 79,67 | 31,29 | 17,66 | 20,49 |
| 1,200 | 141,11 | 38,49 | 59,77 | 80,69 | 92,91 | 32,40 | 12,84 | 23,47 |
| 1,248 | 145,30 | 38,37 | 58,09 | 79,23 | 92,04 | 33,15 | 14,61 | 23,98 |
| 1,300 | 170,97 | 40,00 | 61,90 | 84,44 | 101,69 | 38,70 | 17,02 | 28,97 |
| 1,350 | 146,74 | 34,50 | 52,46 | 69,90 | 81,17 | 28,16 | 12,91 | 33,25 |
| 1,377 | 227,11 | 48,31 | 78,06 | 111,61 | 134,73 | 55,40 | 28,20 | 28,30 |
| 1,400 | 199,68 | 48,53 | 76,64 | 107,03 | 125,99 | 48,32 | 21,69 | 24,81 |
| 1,448 | 215,30 | 56,36 | 88,46 | 120,96 | 141,70 | 52,23 | 24,90 | 19,03 |
| 1,500 | 128,82 | 33,58 | 53,58 | 73,09 | 85,39 | 31,26 | 14,62 | 13,91 |
| 1,550 | 156,12 | 43,48 | 65,98 | 89,02 | 103,95 | 37,36 | 17,56 | 15,13 |
| 1,580 | 131,47 | 35,83 | 56,14 | 73,33 | 86,21 | 29,65 | 16,18 | 11,26 |
| 1,600 | 125,27 | 35,71 | 53,64 | 71,06 | 83,08 | 29,03 | 14,16 | 13,55 |
| 1,646 | 109,14 | 29,51 | 43,94 | 58,66 | 67,90 | 23,65 | 10,91 | 18,39 |
| 1,650 | 123,61 | 32,94 | 49,71 | 67,16 | 78,28 | 28,18 | 13,08 | 17,13 |
| 1,700 | 108,62 | 27,83 | 41,58 | 55,85 | 66,03 | 24,12 | 14,43 | 11,00 |
| 1,750 | 191,91 | 52,88 | 82,23 | 112,72 | 133,34 | 50,38 | 24,39 | 11,19 |
| 1,791 | 126,50 | 38,60 | 57,74 | 76,29 | 88,04 | 29,98 | 15,44 | 8,68 |
| 1,800 | 148,30 | 37,45 | 59,65 | 81,25 | 96,73 | 36,60 | 19,83 | 11,69 |
| 1,919 | 123,43 | 32,77 | 47,99 | 62,11 | 72,20 | 24,03 | 14,28 | 21,52 |
| 1,950 | 108,41 | 23,20 | 35,49 | 47,98 | 56,93 | 21,25 | 12,04 | 23,38 |
| 1,986 | 116,01 | 25,79 | 38,84 | 52,28 | 62,80 | 23,72 | 13,69 | 21,09 |
| 2,000 | 109,78 | 27,77 | 41,09 | 56,17 | 67,09 | 25,80 | 14,42 | 14,42 |
| 2,043 | 123,60 | 29,11 | 43,73 | 59,18 | 69,46 | 25,57 | 12,89 | 23,24 |
| 2,050 | 115,58 | 30,48 | 46,02 | 59,42 | 68,22 | 22,13 | 11,12 | 22,03 |
| 2,100 | 87,42 | 30,12 | 44,60 | 55,13 | 61,29 | 16,69 | 7,18 | 10,72 |
| 2,150 | 81,15 | 25,35 | 36,14 | 45,27 | 51,96 | 15,80 | 8,10 | 11,34 |
| 2,200 | 84,94 | 27,91 | 40,32 | 51,18 | 57,88 | 17,56 | 7,92 | 9,95 |
| 2,250 | 98,53 | 30,17 | 46,06 | 58,88 | 66,81 | 20,75 | 9,56 | 12,11 |
| 2,300 | 91,02 | 29,53 | 43,18 | 54,71 | 62,50 | 19,32 | 10,52 | 9,00 |
| 2,350 | 97,28 | 32,38 | 46,51 | 59,72 | 67,05 | 20,55 | 9,56 | 10,48 |
| 2,400 | 150,40 | 35,05 | 53,86 | 74,10 | 89,49 | 35,66 | 22,49 | 11,24 |
| 2,450 | 190,35 | 48,67 | 69,47 | 97,75 | 117,26 | 47,85 | 29,94 | 9,81 |

Πίνακας Π4 Δείκτες και παράμετροι δομικής κατάστασης διορθωμένοι σε φορτίο αναφοράς 50 kN και θερμοκρασία αναφοράς 20°C πέντε έτη μετά την αποκατάσταση

| Chainage (χ.Θ.) | D ₀ (μm) | SCI _{225, 20C} (μm) | SCI _{300, 20C} (μm) | SCI _{450, 20C} (μm) | SCI _{600, 20C} (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) |
|--------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|----------|------------------------|
| 0,150 | 88,22 | 17,45 | 23,46 | 33,87 | 40,79 | 18,42 | 9,36 | 23,10 |
| 0,203 | 242,04 | 52,42 | 78,23 | 113,29 | 138,06 | 63,66 | 34,17 | 30,98 |
| 0,254 | 92,98 | 20,28 | 18,26 | 39,61 | 36,58 | 20,48 | 17,30 | 30,13 |
| 0,304 | 125,28 | 15,91 | 20,19 | 33,64 | 41,53 | 23,08 | 20,00 | 42,48 |
| 0,350 | 136,13 | 18,59 | 27,08 | 40,87 | 52,10 | 26,76 | 20,54 | 30,32 |
| 0,404 | 90,36 | 14,00 | 18,11 | 27,21 | 31,82 | 14,72 | 15,72 | 26,74 |
| 0,451 | 87,09 | 17,70 | 24,79 | 36,16 | 44,18 | 20,76 | 9,18 | 17,56 |
| 0,501 | 75,95 | 11,67 | 17,33 | 30,38 | 34,32 | 18,40 | 11,83 | 16,41 |
| 0,551 | 120,38 | 32,66 | 46,92 | 63,17 | 72,42 | 26,57 | 12,84 | 18,21 |
| 0,600 | 78,65 | 21,06 | 29,05 | 42,92 | 47,59 | 19,57 | 11,42 | 16,49 |
| 0,650 | 103,95 | 28,17 | 39,99 | 54,18 | 63,72 | 24,89 | 12,84 | 12,94 |
| 0,701 | 85,48 | 23,57 | 31,12 | 45,13 | 47,73 | 17,27 | 14,79 | 12,50 |
| 0,801 | 120,87 | 23,94 | 35,15 | 49,82 | 61,08 | 27,47 | 16,72 | 21,70 |
| 0,854 | 125,21 | 24,48 | 37,24 | 53,55 | 65,48 | 29,94 | 17,52 | 21,83 |
| 0,904 | 134,66 | 37,61 | 53,51 | 75,28 | 85,40 | 33,32 | 15,57 | 18,05 |
| 0,950 | 181,20 | 44,87 | 68,55 | 96,55 | 113,92 | 47,72 | 20,24 | 22,72 |
| 1,000 | 93,30 | 23,28 | 32,27 | 44,24 | 52,74 | 21,46 | 13,31 | 12,02 |
| 1,155 | 184,08 | 43,26 | 66,03 | 92,87 | 110,79 | 46,97 | 23,39 | 20,70 |
| 1,202 | 135,70 | 39,85 | 60,77 | 80,52 | 91,73 | 32,01 | 10,37 | 20,04 |
| 1,252 | 98,55 | 28,77 | 41,36 | 54,83 | 61,62 | 20,88 | 7,46 | 19,19 |
| 1,305 | 198,78 | 43,99 | 66,28 | 91,24 | 109,25 | 45,41 | 23,40 | 35,99 |
| 1,352 | 168,44 | 37,80 | 56,12 | 76,89 | 89,27 | 34,61 | 22,08 | 34,61 |
| 1,384 | 192,20 | 39,99 | 63,30 | 89,34 | 107,97 | 46,77 | 23,69 | 27,68 |
| 1,403 | 154,66 | 36,08 | 55,46 | 77,42 | 91,46 | 37,82 | 18,36 | 20,76 |
| 1,451 | 163,57 | 40,18 | 60,61 | 84,90 | 100,70 | 42,16 | 20,78 | 15,12 |
| 1,502 | 113,60 | 33,93 | 48,39 | 64,07 | 74,09 | 26,62 | 11,41 | 14,71 |
| 1,552 | 142,62 | 35,15 | 51,42 | 71,82 | 87,20 | 37,73 | 18,46 | 12,94 |
| 1,582 | 87,54 | 23,48 | 31,08 | 42,21 | 49,25 | 18,94 | 12,40 | 11,01 |
| 1,602 | 96,80 | 27,83 | 38,38 | 54,85 | 57,64 | 19,85 | 17,95 | 13,43 |
| 1,647 | 90,78 | 29,49 | 41,27 | 52,10 | 56,00 | 14,70 | 9,40 | 19,40 |
| 1,653 | 91,24 | 29,23 | 37,38 | 55,24 | 60,10 | 23,73 | 12,32 | 21,33 |
| 1,703 | 70,71 | 18,04 | 24,04 | 32,01 | 38,41 | 14,99 | 8,89 | 10,89 |
| 1,753 | 67,78 | 19,30 | 25,64 | 33,08 | 38,56 | 13,31 | 7,65 | 10,43 |
| 1,793 | 96,81 | 30,47 | 43,03 | 57,06 | 65,35 | 23,05 | 10,88 | 8,31 |
| 1,803 | 77,77 | 15,69 | 21,04 | 31,52 | 37,64 | 17,58 | 13,78 | 12,68 |
| 1,914 | 71,99 | 17,10 | 22,72 | 30,27 | 35,53 | 13,29 | 8,53 | 16,77 |
| 1,954 | 74,26 | 12,35 | 16,68 | 23,17 | 28,26 | 12,15 | 7,77 | 25,20 |
| 1,985 | 97,61 | 21,38 | 18,45 | 45,58 | 43,66 | 27,10 | 16,44 | 33,87 |
| 2,004 | 81,00 | 12,00 | 21,03 | 33,92 | 42,31 | 22,67 | 12,73 | 14,42 |
| 2,034 | 105,04 | 21,10 | 31,05 | 44,97 | 54,91 | 25,13 | 10,69 | 23,35 |
| 2,050 | 98,38 | 14,50 | 22,36 | 33,67 | 40,55 | 19,07 | 13,91 | 23,74 |
| 2,102 | 75,56 | 19,03 | 23,82 | 36,45 | 43,06 | 20,15 | 11,53 | 10,83 |
| 2,156 | 61,84 | 15,71 | 20,40 | 26,72 | 30,87 | 10,71 | 8,23 | 11,01 |
| 2,204 | 54,46 | 15,15 | 20,91 | 29,60 | 29,68 | 8,85 | 10,34 | 12,63 |
| 2,253 | 56,24 | 17,36 | 20,80 | 28,67 | 32,98 | 12,57 | 5,13 | 12,47 |
| 2,302 | 59,19 | 17,27 | 22,54 | 29,46 | 33,83 | 11,54 | 8,36 | 7,96 |
| 2,352 | 62,67 | 14,19 | 22,01 | 31,22 | 36,91 | 15,48 | 7,09 | 9,38 |
| 2,402 | 50,62 | 13,35 | 17,42 | 22,74 | 25,95 | 8,71 | 6,50 | 9,21 |
| 2,451 | 72,07 | 18,62 | 25,08 | 32,59 | 38,38 | 13,64 | 8,76 | 11,75 |

Πίνακας Π5 Στατιστικά δεδομένα δεικτών και παραμέτρων δομικής κατάστασης αμέσως μετά την αποκατάσταση

| | D ₀ (μm) | SCI _{225, 20C} (μm) | SCI _{300, 20C} (μm) | SCI _{450, 20C} (μm) | SCI _{600, 20C} (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) |
|--------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|----------|------------------------|
| min | 81,15 | 22,17 | 34,02 | 45,19 | 51,96 | 15,80 | 7,18 | 8,68 |
| max | 227,11 | 56,36 | 88,46 | 120,96 | 141,70 | 55,40 | 29,94 | 35,72 |
| mean | 137,34 | 34,17 | 52,39 | 70,56 | 83,11 | 30,08 | 15,98 | 18,93 |
| 1 st Quartile (25%) | 110,90 | 29,20 | 43,79 | 58,52 | 67,06 | 23,76 | 12,89 | 12,33 |
| median | 127,66 | 32,85 | 51,09 | 68,18 | 79,96 | 28,17 | 14,86 | 18,46 |
| 3 rd Quartile (75%) | 155,74 | 37,46 | 58,04 | 78,11 | 92,03 | 33,63 | 17,66 | 23,85 |
| st/dev | 35,74 | 7,86 | 12,58 | 18,18 | 21,95 | 9,52 | 5,17 | 7,44 |
| CV | 0,26 | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,32 | 0,32 | 0,39 |

Πίνακας Π6 Στατιστικά δεδομένα δεικτών και παραμέτρων δομικής κατάστασης πέντε έτη μετά την αποκατάσταση

| | D ₀ (μm) | SCI _{225, 20C} (μm) | SCI _{300, 20C} (μm) | SCI _{450, 20C} (μm) | SCI _{600, 20C} (μm) | BDI (μm) | BCI (μm) | D ₁₈₀₀ (μm) |
|--------------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|----------|------------------------|
| min | 50,62 | 11,67 | 16,68 | 22,74 | 25,95 | 8,71 | 5,13 | 7,96 |
| max | 242,04 | 52,42 | 78,23 | 113,29 | 138,06 | 63,66 | 34,17 | 42,48 |
| mean | 106,82 | 25,09 | 35,47 | 50,43 | 58,64 | 24,34 | 13,92 | 18,90 |
| 1 st Quartile (25%) | 75,95 | 17,27 | 22,01 | 32,59 | 38,38 | 15,48 | 9,36 | 12,50 |
| median | 93,30 | 21,38 | 31,05 | 44,24 | 49,25 | 20,88 | 12,73 | 17,56 |
| 3 rd Quartile (75%) | 125,28 | 32,66 | 46,92 | 63,17 | 72,42 | 27,47 | 17,52 | 23,10 |
| st/dev | 42,84 | 10,42 | 16,78 | 22,62 | 27,27 | 11,82 | 5,78 | 8,14 |
| CV | 0,40 | 0,42 | 0,47 | 0,45 | 0,47 | 0,49 | 0,42 | 0,43 |