



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΜΕ RAP

Καλλιωράκη Μαρία (7609)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Γεωργούλη Κωνσταντίνα (Επίκουρη Καθηγήτρια)

Περίληψη

Το ανακυκλωμένο ασφαλτικό σκυρόδεμα, γνωστό και ως ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP), έχει κερδίσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια ως βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον δομικό υλικό. Αυτή η εργασία στοχεύει να παρέχει μια εις βάθος ανάλυση των πολυάριθμων πτυχών του ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσής του, των μεθόδων παραγωγής, των μηχανικών ιδιοτήτων, των οικονομικών οφελών, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, των προκλήσεων και των πιθανών μελλοντικών εξελίξεων. Αξιολογώντας κριτικά την υπάρχουσα βιβλιογραφία και τις πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα, αυτή η ανασκόπηση τονίζει τη σημασία του ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος στην ανάπτυξη σύγχρονων υποδομών και υπογραμμίζει τις δυνατότητές του να φέρει επανάσταση στον κατασκευαστικό κλάδο προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Abstract

Recycled asphalt concrete, also known as recycled asphalt pavement (RAP), has gained significant attention in recent years as a sustainable and environmentally friendly construction material. This review aims to provide an in-depth analysis of the numerous aspects of recycled asphalt concrete, including its composition, production methods, mechanical properties, economic benefits, environmental impacts, challenges and potential future developments.

Critically evaluating the existing literature and recent developments in the field, this review highlights the importance of recycled asphalt concrete in the development of modern infrastructure and highlights its potential to revolutionize the construction industry towards a more sustainable future.

Περιεχόμενα

<u>Περίληψη</u>	2
<u>Abstract</u>	3
<u>Περιεχόμενα</u>	4
<u>Κατάλογος Εικόνων και σχημάτων</u>	7
<u>Κατάλογος Πινάκων</u>	9
<u>Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή</u>	10
<u>Κεφάλαιο 2^ο: Οδοστρώματα</u>	12
<u>2.1 Τύποι οδοστρωμάτων</u>	12
<u>2.1.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα</u>	13
<u>2.1.2 Δύσκαμπτα οδοστρώματα</u>	14
<u>2.1.3 Ημί-εύκαμπτα (ή ημί-δύσκαμπτα) οδοστρώματα</u>	19
<u>Κεφάλαιο 3^ο: Υλικά οδοστρώματος</u>	21
<u>3.1 Εδαφικά υλικά και αδρανή</u>	21
<u>3.1.1 Βασικές εργαστηριακές δοκιμές</u>	21
<u>3.1.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση</u>	21
<u>3.1.1.2 Όρια Atterberg: Όριο υδαρότητας και όριο πλαστικότητας</u>	23
<u>3.1.1.3 Δοκιμή Proctor: Βέλτιστη περιεκτικότητα και μέγιστη ξηρή πυκνότητα</u>	24
<u>3.1.1.4 Επίπεδα και επιμήκη σωματίδια</u>	25
<u>3.1.1.5 Γωνιότητα λεπτόκοκκων αδρανών</u>	26
<u>3.1.1.6 Γωνιότητα χονδρόκοκκου αδρανούς</u>	27

<u>3.1.1.7</u>	<u>Περιεκτικότητα σε άργιλο και ισοδύναμο άμμου</u>	27
<u>3.1.1.8</u>	<u>Δοκιμή τριβής και κρούσης κατά Λος Άντζελες (LA)</u>	27
<u>3.1.1.9</u>	<u>Έλεγχος υγείας</u>	28
<u>3.1.1.10</u>	<u>Επιβλαβή υλικά</u>	28
<u>3.1.2</u>	<u>Μηχανικές ιδιότητες</u>	29
<u>3.1.2.1</u>	<u>Μέτρο ελαστικότητας</u>	29
<u>3.1.2.2</u>	<u>Καλιφορνιακός δείκτης αντοχής (CBR) (εργαστηριακός)</u>	30
<u>3.1.2.3</u>	<u>Τιμή αντίστασης</u>	30
<u>3.1.3</u>	<u>Άλλες ιδιότητες</u>	30
<u>3.2</u>	<u>Ασφαλτικά υλικά</u>	31
<u>3.2.1</u>	<u>Ιδιότητες και εργαστηριακοί έλεγχοι</u>	32
<u>3.2.1.1</u>	<u>Δοκιμές διεισδυτικότητας</u>	33
<u>3.2.1.2</u>	<u>Δοκιμή μάλθωσης</u>	34
<u>3.2.1.3</u>	<u>Δείκτης διεισδυτικότητας</u>	36
<u>3.2.1.4</u>	<u>Δοκιμή ολκιμότητας</u>	37
<u>3.2.1.5</u>	<u>Ιξώδες</u>	37
<u>3.2.1.6</u>	<u>Γήρανση της ασφάλτου</u>	39
<u>3.3</u>	<u>Ασφαλτικά μίγματα</u>	40
<u>3.3.1</u>	<u>Ιστορική αναδρομή στον σχεδιασμό ασφαλτικού μίγματος</u>	40
<u>3.3.2</u>	<u>Θερμό ασφαλτικό μίγμα (HMA)</u>	45
<u>3.3.2.1</u>	<u>Μείγμα πυκνής διαβάθμισης</u>	45
<u>3.3.2.2</u>	<u>Open-Graded Friction Course (OGFC)</u>	46
<u>3.3.2.3</u>	<u>Σκληρομαστίχη (SMA)</u>	47
<u>3.3.3</u>	<u>Ζεστό ασφαλτικό μίγμα (WMA)</u>	47
<u>3.3.4</u>	<u>Ψυχρό ασφαλτικό μίγμα (CMA)</u>	48
<u>Κεφάλαιο 4°: Ανακύκλωση οδοστρώματος</u>		49
<u>4.1</u>	<u>Υλικά ανακύκλωσης οδοστρώματος</u>	50
<u>4.1.1</u>	<u>Ανακυκλωμένο/ανακτώμενο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP)</u>	50
<u>4.1.2</u>	<u>Ανακυκλωμένο/ανακτώμενο ασφαλτόστρωμα (RAP) σε Βάση και Υποβάση</u>	52

4.1.3 Ανακτημένες ζώνες ασφάλτου (RAS).....	52
4.1.4 Καουτσούκ ασφαλτικού σκυροδέματος (RAC).....	53
4.2 Μέθοδοι ανακύκλωσης	53
4.2.1 Θερμή ανακύκλωση	54
4.2.2 Ανακύκλωση εν θερμώ.....	55
4.2.3 Ψυχρό πλάνισμα.....	58
4.2.4 Ανάκτηση πλήρους βάθους.....	59
4.2.5 Ψυχρή ανακύκλωση	61
Κεφάλαιο 5 ^ο : Χρήση ανακυκλωμένου ασφαλτικού οδοστρώματος	64
5.1 Γενικά	64
5.2 Ζητήματα που σχετίζονται με υψηλό περιεχόμενο RAP.....	65
5.2.1 Πρόωρες βλάβες του οδοστρώματος.....	65
5.1.2 Φαινόμενο συσσώρευσης.....	66
5.1.3 Έκπλυση.....	70
5.2 Διαφορετικά ποσοστά RAP σε μείγματα HMA.....	71
5.3. Πρόσθετα που χρησιμοποιούνται με RAP.....	72
5.3.1 Χρήση αναζωογονητικών παραγόντων.....	72
5.3.2 Χρήση πολυμερών με/χωρίς αναζωογονητικά μέσα στο RAP.....	83
5.3.3 Χρήση ινών με αναζωογονητικούς παράγοντες	87
5.4. Μέθοδοι αναζωογόνησης.....	88
5.5 Οικονομική ανάλυση και περιβαλλοντικά οφέλη.....	89
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα	92
Βιβλιογραφία	97

Κατάλογος Εικόνων και σχημάτων

<u>Εικόνα 1 Εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα</u>	13
<u>Εικόνα 2 Συμπεριφορά βάση της παραμόρφωσης σε εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα</u>	13
<u>Εικόνα 3 Στρώσεις εύκαμπτου οδοστρώματος</u>	14
<u>Εικόνα 4 Στρώσεις σε δύσκαμπτο οδόστρωμα</u>	15
<u>Εικόνα 5 Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (JPCP)</u>	16
<u>Εικόνα 6 Ανισοσταθμία (αριστερά) και άντλησης (δεξιά)</u>	16
<u>Εικόνα 7 Κατασκευή οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα με συνεχόμενο οπλισμό (CRCP)</u>	18
<u>Εικόνα 8 Πάνελ προεντεταμένου σκυροδέματος που τοποθετείται πάνω από βάση</u> .	19
<u>Εικόνα 9 Στρώσεις ημί-εύκαμπτου οδοστρώματος</u>	20
<u>Εικόνα 10 Τυπικές στρώσεις σε οδόστρωμα</u>	21
<u>Εικόνα 11 Διαδικασία ανάλυσης κοσκίνου</u>	22
<u>Εικόνα 12 Διαφορετικά στάδια δοκιμής ορίου υγρού</u>	23
<u>Εικόνα 13 Η δοκιμή διεισδυτικότητας</u>	33
<u>Εικόνα 14 Κατηγορίες ταξινόμησης ασφάλτου με βάση το δείκτη pen</u>	34
<u>Εικόνα 15 Πειραματική διάταξη δοκιμής μάλθωσης</u>	35
<u>Εικόνα 16 Διαδικασία δοκιμής μάλθωσης</u>	36
<u>Εικόνα 17 Δοκιμή ολκιμότητας</u>	37
<u>Εικόνα 18 Μεταβολή στο ιξώδες με την θερμοκρασία</u>	38
<u>Εικόνα 19 Μέτρηση ιξώδους με την χρήση ολισθαίνουσας πλάκας</u>	38
<u>Εικόνα 20 Μέτρηση ιξώδους με την χρήση περιστρεφόμενου κυλίνδρου</u>	39
<u>Εικόνα 21 Γήρανση ασφάλτου</u>	40
<u>Εικόνα 22 Δοκιμή $rat-paper$: (α) ελαφριά κηλίδα, (β) μέτρια κηλίδα, (γ) ισχυρή κηλίδα, (δ) βαριά κηλίδα (Richardson, 1905)</u>	41
<u>Εικόνα 23 Σύγκριση ανοιχτού (αριστερά) και κλειστού (δεξιά) AC</u>	46
<u>Εικόνα 24 Συλλογή RAP από οδόστρωμα</u>	51
<u>Εικόνα 25 Φαινόμενο συσσώρευσης (Zhang et al. 2019)</u>	67
<u>Εικόνα 26 Παράδειγμα όψης του RAP μετά την ανάμιξη, όπου το λειαντικό αποτέλεσμα των παρθένων αδρανών, προκαλεί την απελευθέρωση των παγιδευμένων ενεργών αδρανών συνδετικού υλικού (Bressi et al. 2015)</u>	68
<u>Εικόνα 27 Το φαινόμενο της έκπλυσης (Senadheera et al. 2007)</u>	70

<u>Εικόνα 28 Η ανταπόκριση της δομής του συνδετικού υλικού στη γήρανση και την αναζωογόνηση (Behrood 2019)</u>	73
<u>Εικόνα 29 Περιπτώσεις ανάμειξης για παρθένων και RAPσυνδετικών (Bowers 2013)</u>	75
<u>Σχήμα 1 Αποτέλεσμα ανάλυσης κοσκίνου</u>	22
<u>Σχήμα 2 Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης</u>	24
<u>Σχήμα 3 Χαρακτηρισμός σωματιδίων</u>	26
<u>Σχήμα 4 Κατάταξη ασφάλτου</u>	32

Κατάλογος Πινάκων

<u>Πίνακας 1 Μερικά κοινά κόσκινα και τα ανοίγματα τους</u>	22
<u>Πίνακας 2 Αποδεκτές διαφορές μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών p_{90}</u>	34

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Τα οδοστρώματα αποτελούν κρίσιμο στοιχείο της υποδομής μιας χώρας και έχουν καθοριστική σημασία για την οικονομία, την κοινωνία και το περιβάλλον. Αποτελούν το δίκτυο που συνδέει περιοχές και επιτρέπει τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών. Η καλή κατάσταση των οδοστρωμάτων είναι ουσιώδης για την ασφάλη και αποτελεσματική κυκλοφορία. Εκτός από την προώθηση της οικονομικής δραστηριότητας, τα καλά οδοστρώματα συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, μειώνοντας τους χρόνους μετακίνησης και το κόστος των μεταφορών. Επίσης, ενθαρρύνουν την ανάπτυξη επιχειρήσεων και την πρόσβαση σε υπηρεσίες και πόρους.

Τα οδοστρώματα επηρεάζουν επίσης το περιβάλλον. Η κατάλληλη σχεδίαση και συντήρησή τους μπορεί να μειώσει τον αντίκτυπο στο φυσικό περιβάλλον, όπως την αποφυγή απορριμμάτων και τη διατήρηση της φυσικής ροής των υδάτων. Επιπλέον, τα οδοστρώματα αποτελούν σημαντικό τμήμα της υποδομής ανάγκης σε περιόδους κρίσης ή εκτάκτων αναγκών, όπως σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ή έκτακτων αναγκών μεταφοράς προσωπικού ή εφοδιασμού. Συνεπώς, η συνεχής παρακολούθηση και αναβάθμιση των οδοστρωμάτων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την ασφάλεια και την ευημερία μιας κοινωνίας.

Η ανακύκλωση οδοστρωμάτων αντιπροσωπεύει μια σημαντική προσέγγιση στη βιώσιμη ανάπτυξη και στη διατήρηση του περιβάλλοντος. Με την αύξηση του κυκλοφοριακού όγκου και των αναγκών στον τομέα των οδικών υποδομών, η ανάγκη για αποδοτικές και βιώσιμες λύσεις για την ανακατασκευή και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων είναι πιο επιτακτική από ποτέ.

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την εξέταση και ανάλυση της ανακύκλωσης οδοστρωμάτων, εστιάζοντας στη σημασία της, τις τεχνικές πρακτικές και τα οικονομικά οφέλη που προσφέρει. Επίσης, θα εξεταστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι προκλήσεις που συνδέονται με την ανακύκλωση οδοστρωμάτων, καθώς και οι πιθανές καινοτόμες προσεγγίσεις για τη βελτίωση της διαδικασίας αυτής. Η εργασία βασίζεται στην διενέργεια μιας εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης στο αντικείμενο της εργασίας με στόχο την παρουσίαση τόσο του θεωρητικού υποβάθρου όσο και της εξέτασης των επιμέρους στοιχείων που αφορούν στην ανακύκλωση οδοστρωμάτων. Η μεθοδολογία που αξιοποιήθηκε για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος της ανακύκλωσης οδοστρωμάτων βασίστηκε συνεπώς σε μια συστηματική προσέγγιση που συνδυάζει αναζήτηση, αξιολόγηση και σύνθεση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας. Αρχικά, έλαβε χώρα μια εκτενής αναζήτηση σε διάφορες βάσεις δεδομένων, επιστημονικά περιοδικά, συνέδρια και επιστημονικά άρθρα, χρησιμοποιώντας ευρετηριοποιημένους όρους σχετικούς με την ανακύκλωση οδοστρωμάτων.

Στη συνέχεια, έλαβε χώρα μια αξιολόγηση των επιλεγμένων ερευνητικών εργασιών για την ποιότητα και τη σημαντικότητά τους στο πλαίσιο της εργασίας. Λήφθηκε υπόψη η επιστημονική αξιοπιστία των πηγών, η πληρότητα των πληροφοριών και η συνεισφορά των εργασιών στην κατανόηση της ανακύκλωσης οδοστρωμάτων.

Μετά την ανάλυση και την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας, ακολούθησε η σύνθεση των ευρημάτων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την ανασκόπηση. Έγινε προσπάθεια να αναδειχθούν οι κυριότερες τάσεις, προκλήσεις και προοπτικές στον τομέα της ανακύκλωσης οδοστρωμάτων, καθώς και να παρουσιαστούν πιθανές καινοτόμες προσεγγίσεις και λύσεις.

Κεφάλαιο 2^ο: Οδοστρώματα

Ένα οδόστρωμα είναι μια κατασκευή που αποτελείται από στρώματα φυσικών και επεξεργασμένων υλικών πάνω από το φυσικό έδαφος (συνθά ονομάζεται στρώση έδρασης). Η κύρια λειτουργία ενός οδοστρώματος είναι να κατανέμει τα φορτία των οχημάτων που κυκλοφορούν σε αυτό από την επιφάνεια του οδοστρώματος σε μια μεγαλύτερη περιοχή του υποστρώματος χωρίς να προκαλείται ζημιά στη στρώση έδρασης. Η δομή του οδοστρώματος θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή ποιότητα κύλισης, ικανοποιητική αντίσταση ολίσθησης, ευνοϊκά χαρακτηριστικά ανάκλασης φωτός και χαμηλό θόρυβο. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί ότι τα μεταδιδόμενα φορτία των τροχών μειώνονται επαρκώς, ώστε να μην υπερβαίνουν τη αντοχή όλων των στρώσεων του οδοστρώματος, συμπεριλαμβανομένης της στρώσης έδρασης. Αυτό το κεφάλαιο δίνει μια επισκόπηση των τύπων οδοστρωμάτων, των στρώσεων και των λειτουργιών τους και των μεθόδων σχεδιασμού οδοστρώματος.

Ένα οδόστρωμα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Δομικά επαρκές για την αποφυγή ρηγματώσεων και παραμενουσών παραμορφώσεων
- Δομικά ανθεκτικό για να αντέχει όλους τους τύπους καταπονήσεων για τις οποίες έχει σχεδιαστεί
- Επαρκής συντελεστής τριβής για την αποφυγή ολίσθησης των οχημάτων
- Ομαλή επιφάνεια κύλισης για άνεση στους χρήστες του δρόμου
- Παραγωγή λιγότερου θορύβου από κινούμενα οχήματα

2.1 Τύποι οδοστρωμάτων

Δύο τύποι οδοστρωμάτων αναγνωρίζονται γενικά: το εύκαμπτο οδόστρωμα και το δύσκαμπτο οδόστρωμα, όπως φαίνεται στην Εικ. 1. Ένας συνδυασμός αυτών των δύο οδοστρωμάτων είναι

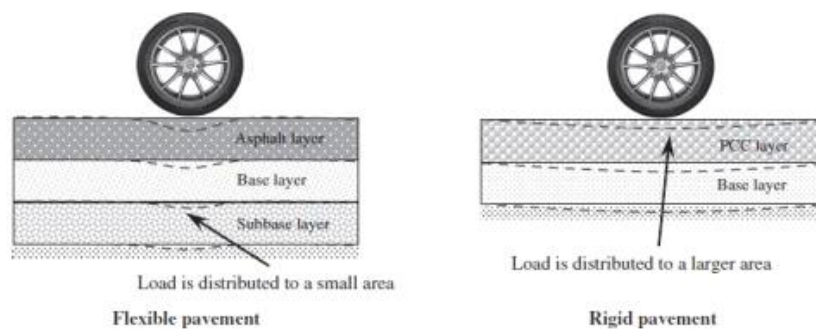
επίσης δυνατός και ονομάζεται σύνθετο οδόστρωμα. Αυτή η διαμόρφωση απλοϊκά αφορά σε ένα στρώμα ασφάλτου που μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από ένα στρώμα σκυροδέματος για να δημιουργήσει ένα σύνθετο οδόστρωμα



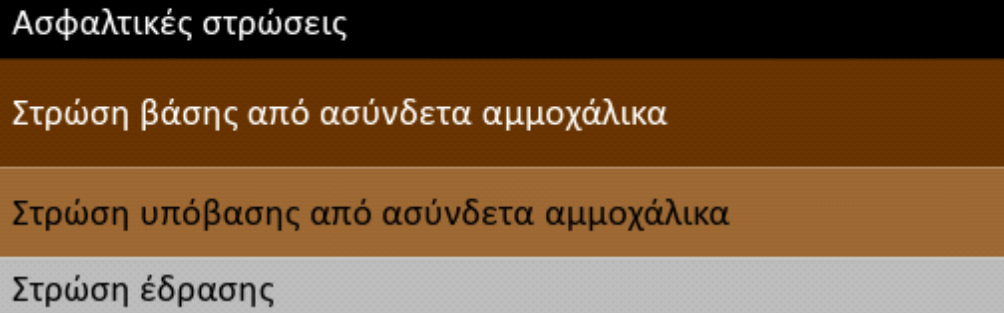
Εικόνα 1 Εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα

2.1.1 Εύκαμπτα οδοστρώματα

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα συνήθως έχουν ανώτερες στρώσεις που είναι ασφαλτικές. Αυτά τα οδοστρώματα ονομάζονται εύκαμπτα επειδή οι κατασκευές του οδοστρώματος μπορούν να κάμπτονται υπό την επίδραση του φορτίου της κυκλοφορίας. Μια εύκαμπτη κατασκευή αποτελείται από πολλές στρώσεις επειδή από μόνες τους δεν είναι αρκετά δύσκαμπτες για να καταναείμουν το φορτίο του τροχού σε μια μεγάλη περιοχή (Εικ. 2). Κάτω από τις ασφαλτικές στρώσεις, υπάρχει η στρώση βάσης θρυμματισμένου αδρανούς. Κάτω από τη στρώση βάσης, χρησιμοποιείται επίσης μια στρώση υποβάσεως από ασύνδετα αμμοχάλικα. Το φυσικό έδαφος μπορεί να βελτιωθεί με συμπίκνωση ή ανάμειξη κάποιου βελτιωμένου εδάφους, φρεζαρίσματα ασφάλτου, αδρανών χαμηλής ποιότητας με βάση τη διαθεσιμότητα αυτών των υλικών (Εικ. 3).



Εικόνα 2 Συμπεριφορά βάση της παραμόρφωσης σε εύκαμπτο (αριστερά) και δύσκαμπτο (δεξιά) οδόστρωμα



Εικόνα 3 Στρώσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

2.1.2 Δύσκαμπτα οδοστρώματα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από οπλισμένο ή μη οπλισμένο σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland (PCC). Τέτοια οδοστρώματα είναι πιο άκαμπτα από τα εύκαμπτα οδοστρώματα λόγω του υψηλού συντελεστή ελαστικότητας [συνήθως 3.000–4.000 ksi (21–28 GPa) για PCC και 500–1.000 ksi (3,4–6,9 GPa) για το στρώμα ασφάλτου] του υλικού PCC. Αυτά τα οδοστρώματα μπορούν να έχουν ενισχυτικό χάλυβα για τη μείωση των θερμικών ρωγμών ή την εξάλειψη των αρμών. Καθένας από αυτούς τους τύπους οδοστρώματος κατανέμει το φορτίο στο στρώμα έδρασης με διαφορετικό τρόπο. Το δύσκαμπτο οδοστρώμα, λόγω του υψηλού συντελεστή ελαστικότητας του PCC, τείνει να κατανέμει το φορτίο σε μια σχετικά ευρεία περιοχή μιας υποκείμενης στρώσης (βλ. Εικ. 2). Η ίδια η πλάκα σκυροδέματος παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της δομικής ικανότητας ενός άκαμπτου οδοστρώματος. Από την άλλη πλευρά, ένα εύκαμπτο οδοστρώμα κατανέμει τα φορτία σε μια μικρότερη περιοχή.



Πλάκα σκυροδέματος

Στρώση υπόβασης από ασύνδετα ή κατεργασμένα αμμοχάλικα

Στρώση έδρασης

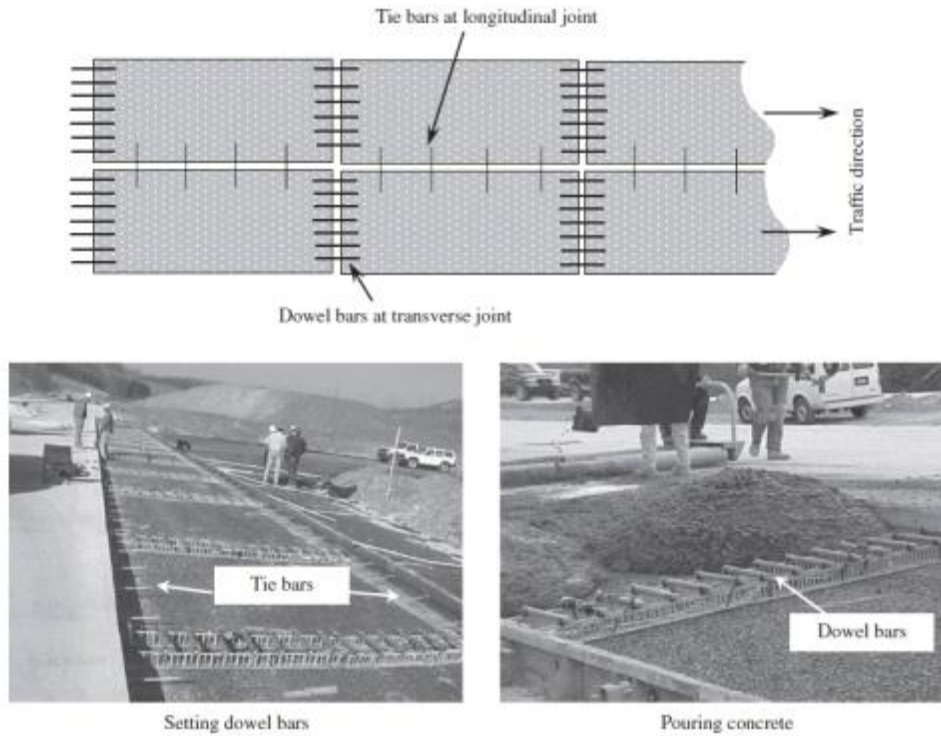
Εικόνα 4 Στρώσεις σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

Σε σύγκριση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα τοποθετούνται είτε απευθείας στο προετοιμασμένο στρώμα έδρασης είτε σε ένα μόνο στρώμα κοκκώδους ή σταθεροποιημένου υλικού που ονομάζεται υπόβαση (Εικ. 4). Σε ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα, ένα φορτίο κατανέμεται από τη δράση της πλάκας, στην οποία το οδόστρωμα συμπεριφέρεται σαν μια ελαστική πλάκα που στηρίζεται σε ένα ελαστικό μέσο. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα θα πρέπει να αναλύονται με τη θεωρία πλακών αντί για τη θεωρία επάλληλων στρώσεων, υποθέτοντας ότι μια ελαστική πλάκα στηρίζεται σε ελαστική βάση. Η θεωρία πλακών θεωρεί ότι η πλάκα σκυροδέματος είναι μια πλάκα μεσαίου πάχους που είναι επίπεδη πριν από τη φόρτιση και παραμένει επίπεδη μετά τη φόρτιση. Η κάμψη της πλάκας λόγω του φορτίου του τροχού και της μεταβολής της θερμοκρασίας προκαλεί εφελκυσμό και κάμψη στις στρώσεις του οδοστρώματος. Τα άκαμπτα οδοστρώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις τύπους:

- **Οδόστρωμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (JPCP).**

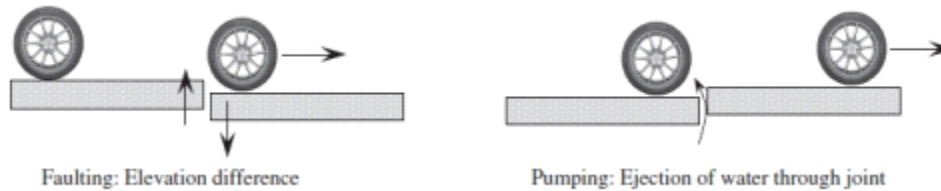
Αυτός ο τύπος (Εικ. 5) χρησιμοποιεί απλές πλάκες σκυροδέματος χωρίς οπλισμό και έχει εγκάρσιους και διαμήκεις αρμούς μεταξύ των πλακών. Τα βλήτρα πείρου χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκάρσιους αρμούς για να βοηθήσουν στη μεταφορά φορτίου (FHWA-HRT-06-106) (FHWA, 2009).

Τα βλήτρα τοποθετούνται σε μια διαμόρφωση σύνδεσης αρσενικού-θηλυκού έτσι ώστε να μην αναπτύσσεται τάση εφελκυσμού όταν μια πλάκα συστέλλεται. Εν γένει αξιοποιούνται συνήθως σε διαμήκεις αρμούς ή μεταξύ μιας ακραίας άρθρωσης και ενός κράσπεδου. Δεν αποτελούν συσκευές μεταφοράς φορτίου, αλλά μεταφέρουν ορισμένα φορτία.



Εικόνα 5 Οδοστρώμα από άοπλο σκυρόδεμα με αρμούς (JPCP)

Σε οδοστρώματα JPCP, εάν δεν παρέχονται βλήτρα ή εάν παρέχεται ανεπαρκής ποσότητα αυτών, τότε η μεταφορά φορτίου κατά μήκος των συνδέσμων προκαλεί σημαντικά υψηλότερες τάσεις και παραμορφώσεις λόγω φόρτισης αρμού από εκείνες που οφείλονται στην εσωτερική φόρτιση (Εικ. 6). Η ανισοσταθμία είναι μια υψομετρική διαφορά κατά μήκος του αρμού δύο πλακών, ενώ η άντληση ορίζεται ως η αποβολή του υλικού υποβάθρου μέσω των αρμών και κατά μήκος των άκρων του οδοστρώματος.



Εικόνα 6 Ανισοσταθμία (αριστερά) και άντλησης (δεξιά)

- **Οδοστρώμα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς (JRCP)**

Το οδόστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα με αρμούς είναι παρόμοιο με το JPCP, με την εξαίρεση ότι σε κάποιο βαθμό οπλισμένο οδόστρωμα χρησιμοποιείται στις πλάκες σκυροδέματος για τον έλεγχο της δημιουργίας ρωγμών με αρμούς συστολής. Χρησιμοποιώντας ενισχυμένες πλάκες, η εγκάρσια απόσταση αρμών μπορεί να είναι πλέον μεγαλύτερη από αυτή για το JPCP και κυμαίνεται από περίπου 7,5 μέως 15 m. Οι θερμικές καταπονήσεις θερμοκρασίας και καταπονήσεις λόγω υγρασίας μπορεί ωστόσο να προκαλέσουν ρωγμές μεταξύ των αρμών. Χάλυβας οπλισμού ή ένα χαλύβδινο πλέγμα χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν αυτές οι ρωγμές ή να συγκρατηθούν αυτές οι ρωγμές μεταξύ τους. Τα βλήτρα χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκάρσιες αρθρώσεις για να βοηθήσουν στη μεταφορά φορτίου.

- **Οδόστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα με συνεχόμενο οπλισμό (CRCP)**

Το οδόστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα με συνεχόμενο οπλισμό εξαλείφει πλήρως τους εγκάρσιους αρμούς, εκτός εάν απαιτείται στο τέλος της κατασκευής και σε προσεγγίσεις γεφυρών ή/και μεταβάσεων σε άλλες κατασκευές οδοστρώματος, παρέχοντας συνεχή ενίσχυση όπως φαίνεται στην εικ. 7. Στο νεοκατασκευασμένο CRCP, η ογκομετρική αλλαγή συμβαίνει λόγω της ενυδάτωσης του τσιμέντου, της επίδρασης της θερμότητας και της εξωτερικής ξήρανσης. Αυτή η ογκομετρική αλλαγή περιορίζεται από το στρώμα υπόβάσης δημιουργώντας τάσεις εφελκυσμού στο CRCP. Λόγω αυτών των τάσεων, σχηματίζονται εγκάρσιες ρωγμές πλήρους βάθους και χωρίζουν το οδόστρωμα σε κοντές, μεμονωμένες πλάκες. Ωστόσο, το CRCP παρέχει μακροπρόθεσμη και υψηλή μεταφορά φορτίου στις εγκάρσιες ρωγμές, με αποτέλεσμα την ομαλή κύλιση.



Placing reinforcement



Reinforcement ready for concrete



Pouring concrete



Compaction

Εικόνα 7 Κατασκευή οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα με συνεχόμενο οπλισμό (CRCP).

- **Οδόστρωμα από προεντεταμένο σκυρόδεμα (PCP)**

Το οδόστρωμα από προεντεταμένο σκυρόδεμα κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες πλάκες οδοστρώματος από σκυρόδεμα που κατασκευάζονται στο εργοστάσιο των κατασκευαστών και μεταφέρονται και εγκαθίστανται στο χώρο του έργου. Το PCP είναι πολύ εφαρμόσιμο σε πολυσύχναστες περιοχές όπου ο μεγάλος κυκλοφοριακός όγκος απαιτεί ισχυρότερο οδόστρωμα και ο χρόνος κατασκευής είναι πολύ περιορισμένος λαμβάνοντας υπόψη τους ελέγχους κυκλοφορίας. Τα πάνελ (Εικ. 8) κατασκευάζονται σε μεγέθη που ταιριάζουν με το πλάτος μιας, δύο ή τριών λωρίδων του οδοστρώματος, επιτρέποντας σε μία ή περισσότερες λωρίδες ενός υπάρχοντος οδοστρώματος να ανακατασκευαστούν ταυτόχρονα. Τα πάνελ τεντώνονται προς τη μεγαλύτερη κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της κατασκευής και τεντώνονται μεταξύ τους σε ομάδες κατά μήκος (στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας). Έτσι, οι τοποθετημένες πλάκες λειτουργούν ως συνεχής πλάκα.



Εικόνα 8 Πάνελ προεντεταμένου σκυροδέματος που τοποθετείται πάνω από βάση

2.1.3 Ημί-εύκαμπτα (ή ημί-δύσκαμπτα) οδοστρώματα

Τα ημι-εύκαμπτα, ή ημι-δύσκαμπτα, οδοστρώματα αποτελούν έναν είδος οδοστρωμάτων με ενδιάμεση ελαστικότητα μεταξύ των δύσκαμπτων και των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αυτό σημαίνει ότι έχουν μια σχετικά μικρή δυνατότητα ελαστικής αντίδρασης σε σχέση με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα σε σχέση με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Τα ημι-εύκαμπτα οδοστρώματα συνήθως αποτελούνται από έναν συνδυασμό διαφορετικών υλικών, όπως ασφαλτικές στρώσεις και στρώσεις βάσης και υποβάσης από θραυστό αμμοχάλικο και ασύνδετο αμμοχάλικο πάνω από την στρώση έδρασης (Εικ. 9). Αυτή η σύνθεση υλικών παρέχει την απαιτούμενη αντοχή και ελαστικότητα που απαιτείται για να αντιμετωπιστούν οι καταπονήσεις που προκύπτουν από την κυκλοφορία οχημάτων.



Ασφαλτικές στρώσεις

Στρώση βάσης από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ)

Στρώση υπόβασης από ασύνδετο ή κατεργασμένο (ΚΘΑ)
θραυστό αμμοχάλικο

Στρώση έδρασης

Εικόνα 9 Στρώσεις ημι-εύκαμπτου οδοστρώματος

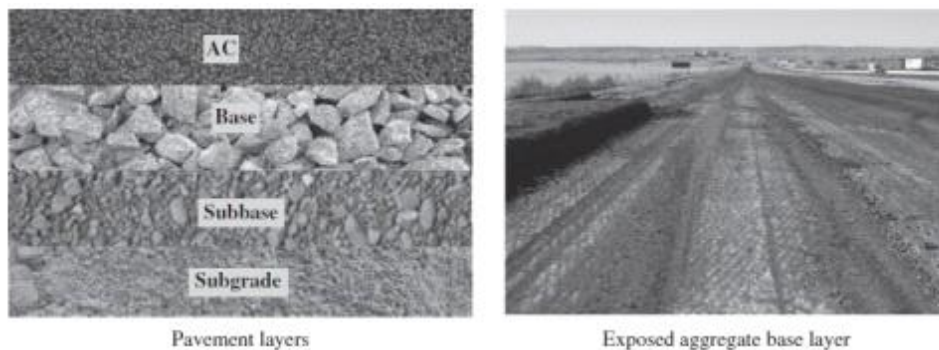
Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των ημι-εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η ικανότητά τους να προσαρμόζονται στα φορτία της κίνησης των οχημάτων, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν σταθερότητα και αντοχή. Επιπλέον, είναι κατάλληλα για χρήση σε περιοχές όπου απαιτείται η διέλευση βαρέων φορτηγών ή όπου οι συνθήκες εδάφους είναι πιο απαιτητικές. Ωστόσο, η εγκατάσταση και η συντήρησή τους απαιτούν πιο προηγμένες τεχνικές και πρακτικές σε σύγκριση με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Κεφάλαιο 3^ο: Υλικά οδοστρώματος

3.1 Εδαφικά υλικά και αδρανή

Τα εδάφη και τα αδρανή είναι απαραίτητα συστατικά των οδοστρωμάτων των αυτοκινητοδρόμων. Τα στρώματα εδάφους και αδρανών ενός τυπικού οδοστρώματος φαίνονται στην εικ. 10. Δείχνει ότι το οδόστρωμα είναι κατασκευασμένο πάνω από το φυσικό έδαφος (στρώση έδρασης). Στο άνω μέρος αυτής της στρώσης, υπάρχουν στρώματα υποβάσεως και βάσης αδρανών, τα οποία αποτελούνται από χονδρόκοκκα αδρανή θρυμματισμένης πέτρας και λεπτόκοκκα αδρανή που συμπυκνώνονται σε μεγάλο βαθμό στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Το επιφανειακό στρώμα, ασφαλτικό σκυρόδεμα (AC) ή σκυρόδεμα τσιμέντου Portland

(PCC) εφαρμόζεται πάνω από το στρώμα βάσης. Τα στρώματα επιφάνειας, βάσης και υποβάσεως μαζί παρέχουν τη δομική ακεραιότητα και αντοχή στο οδόστρωμα. Τα στρώματα βάσης και υποβάσεως αποστραγγίζουν επίσης την υγρασία εάν αυτή υγρασία διεισδύσει μέσω του επιφανειακού στρώματος ή οφείλεται σε τήξη πάγου ή τριχοειδική δράση.

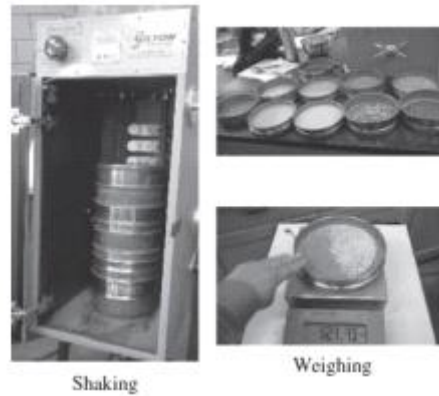


Εικόνα 10 Τυπικές στρώσεις σε οδόστρωμα

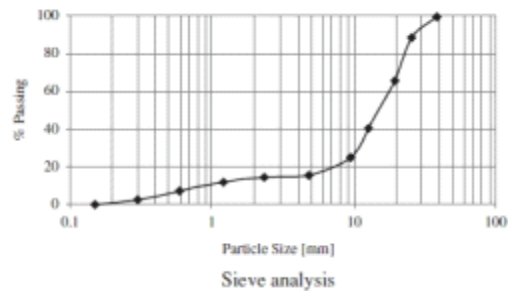
- Βασικές εργαστηριακές δοκιμές

3.1.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση περιλαμβάνει το διαχωρισμό των εδαφικών υλικών ή των αδρανών με μια ένθετη στήλη κόσκινων με συρμάτινο πλέγμα (σήτα), όπως φαίνεται στην εικ 11, το σχήμα 1 και στον Πίνακα 1. Ένα αντιπροσωπευτικό ζυγισμένο δείγμα χύνεται στο πάνω κόσκινο που έχει τα μεγαλύτερα ανοίγματα. Η στήλη τοποθετείται συνήθως σε μηχανικό δονητή. Ο δονητής κουνάει τη στήλη για ορισμένο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια, το υλικό που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται. Το βάρος του δείγματος κάθε κόσκινου στη συνέχεια διαιρείται με το συνολικό βάρος για να υπολογιστεί το ποσοστό που διατηρείται σε κάθε κόσκινο



Εικόνα Διαδικασία ανάλυσης κοσκίνου



Σχήμα 1 Αποτέλεσμα ανάλυσης κοσκίνου

Πίνακας 1 Μερικά κοινά κόσκινα και τα ανοίγματα τους

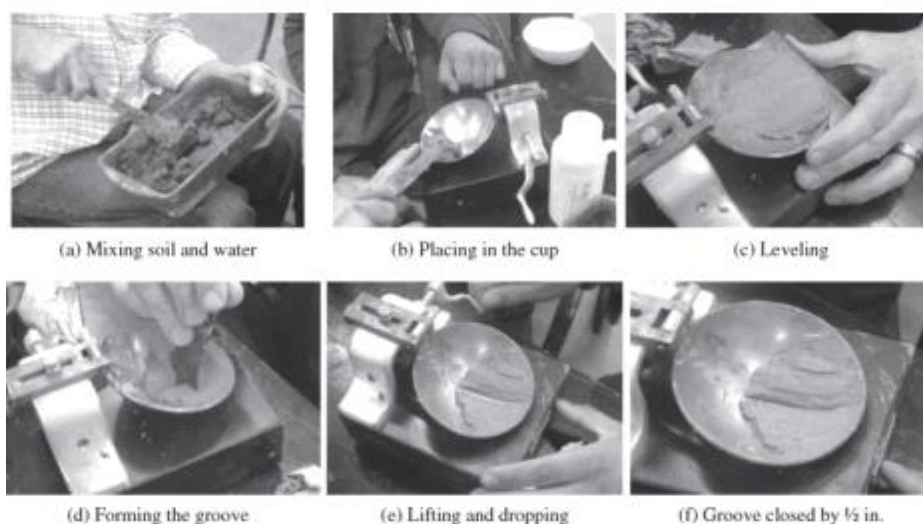
Αριθμός κόσκινου	Μέγεθος σωματιδίου (mm)
1.5 in.	37.5
1.0 in.	25.0
3/4 in.	19.0
1/2 in.	12.5
No. 4	4.75
No. 10	2.00
No. 20	0.85
No. 40	0.425
No. 100	0.15
No. 200	0.075

Στη συνέχεια, το αθροιστικό ποσοστό που διατηρείται υπολογίζεται αθροίζοντας το "% Διατηρημένο" στο αντίστοιχο κόσκινο συν αυτό στα μεγαλύτερα κόσκινα. Το "% λεπτότερο" ή η "% διέλευση" για συγκεκριμένο κόσκινο υπολογίζεται ως 100 μείον το "Σωρευτικό % Διατηρημένο" για αυτό το κόσκινο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης κοσκίνου παρουσιάζονται σε γραφική μορφή για να προσδιοριστεί ο τύπος διαβάθμισης του αδρανούς. Μια κοινή

πρακτική είναι να σχεδιάζεται το "ποσοστό διέλευσης έναντι του μεγέθους του κόσκινου"(Σχήμα 1).

3.1.1.2 *Όρια Atterberg: Όριο υδαρότητας και όριο πλαστικότητας*

Για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά, το όριο υδαρότητας (LL) και το όριο πλαστικότητας (PL) ενδιαφέρουν για την ταξινόμηση του εδάφους. Αυτά τα δύο όρια ονομάζονται και όρια Atterberg. Το LL είναι η περιεκτικότητα σε νερό όπου το έδαφος περνάει από την υγρή στην πλαστική φάση. Προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη συσκευή Casagrande που φαίνεται στην εικ. 12.



Εικόνα 12 Διαφορετικά στάδια δοκιμής ορίου υγρού

Το PL είναι η περιεκτικότητα σε νερό όπου το έδαφος περνάει από την πλαστική στην ημιστερεή φάση. Προσδιορίζεται με κύλιση ενός δείγματος εδάφους σε ένα νήμα διαμέτρου 3,2 mm. Τα βασικά βήματα είναι τα εξής:

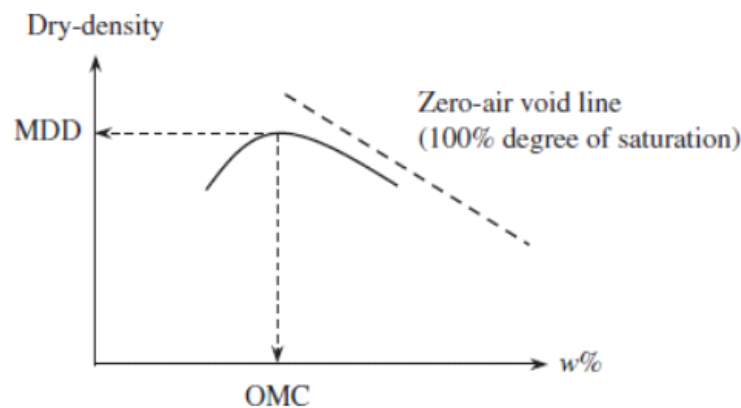
Ο δείκτης πλαστικότητας (PI) είναι η διαφορά μεταξύ του LL και του PL, δηλαδή, $PI = LL - PL$.

3.1.1.3 *Δοκιμή Proctor: Βέλτιστη περιεκτικότητα και μέγιστη ξηρή πυκνότητα*

Πραγματοποιείται δοκιμή Proctor για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (OMC) και της μέγιστης ξηρής πυκνότητας (MDD) των εδαφών. Η ξηρή πυκνότητα ενός εδάφους αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία. Μετά τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, η ξηρή πυκνότητα μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε

υγρασία. Η συμπύκνωση ποσοτικοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την ξηρή πυκνότητα του εδάφους

Τουλάχιστον τρία δείγματα εδάφους συμπιέζονται σε διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό και σχεδιάζεται μια καμπύλη με άξονες ξηρής πυκνότητας και περιεκτικότητας σε νερό. Η γραφική παράσταση που προκύπτει έχει συνήθως μια ευδιάκριτη κορυφή, όπως φαίνεται στο Σχ. 2. Τέτοιες ανεστραμμένες καμπύλες "V" λαμβάνονται για συνεκτικά εδάφη (ή εδάφη με λεπτά) και είναι γνωστές ως καμπύλες συμπίεσης.



Σχήμα 2 Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσης

Η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε υγρασία και του ξηρού μοναδιαίου βάρους για ένα κορεσμένο έδαφος είναι η γραμμή μηδενικών κενών αέρα. Δεν είναι εφικτό να αποβληθεί όλος ο αέρας εντελώς με συμπίεση, ανεξάρτητα από το πόση συμπιεστική προσπάθεια καταβάλλεται και με οποιονδήποτε τρόπο. Καθώς προστίθεται νερό σε ένα έδαφος με χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, γίνεται ευκολότερο για τα σωματίδια να περνούν το ένα δίπλα στο άλλο κατά την εφαρμογή της δύναμης συμπίεσης. Τα σωματίδια έρχονται πιο κοντά, τα κενά μειώνονται και αυτό προκαλεί την αύξηση της ξηρής πυκνότητας. Καθώς η περιεκτικότητα σε νερό αυξάνεται, τα σωματίδια του εδάφους αναπτύσσουν μεγαλύτερες μεμβράνες νερού γύρω τους. Αυτή η αύξηση της ξηρής πυκνότητας συνεχίζεται μέχρι να φτάσει σε ένα στάδιο όπου το νερό αρχίζει να καταλαμβάνει το χώρο που θα μπορούσε να είχε καταλάβει οι κόκκοι του εδάφους. Έτσι, το νερό σε αυτό το στάδιο εμποδίζει την πιο στενή «συσκευασία» των κόκκων και μειώνει το ξηρό βάρος της μονάδας. Το MDD εμφανίζεται σε ένα OMC και οι τιμές τους μπορούν να ληφθούν από την γραφική παράσταση. Η εργαστηριακή δοκιμή συμπίεσης διεξάγεται στο εργαστήριο

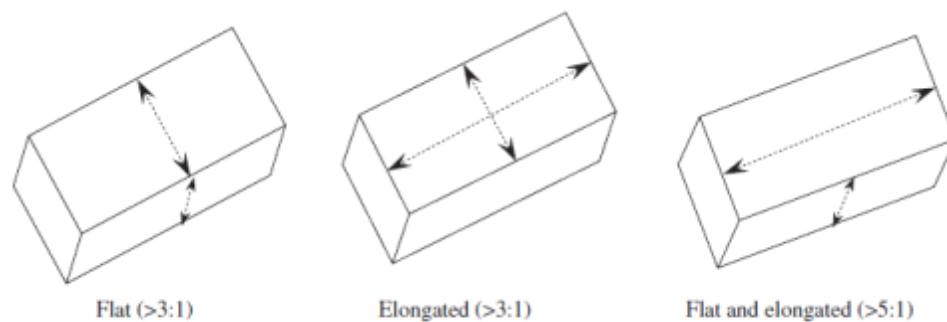
χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δοκιμής ASTM D 698, γνωστό ως τυπική δοκιμή Proctor. Το χώμα συνήθως συμπιέζεται μέσα σε ένα τυπικό καλούπι σε τρία ίσα στρώματα, το καθένα από τα οποία δέχεται έναν αριθμό χτυπημάτων από ένα τυπικό ζυγισμένο σφυρί σε ένα καθορισμένο ύψος. Στη συνέχεια, αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορα περιεχόμενα υγρασίας και η ξηρή πυκνότητα προσδιορίζεται για κάθε δείγμα. Στη συνέχεια σχεδιάζεται η γραφική σχέση της ξηρής πυκνότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για να καθοριστεί η καμπύλη συμπίεσης. Η κορυφή της καμπύλης δίνει το OMC και το MDD.

3.1.1.4 Επίπεδα και επιμήκη σωματίδια

Το ASTM D 4791 χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των επίπεδων και επιμήκων σωματιδίων και ορίζεται ως εξής (Σχ. 3):

- Ως επίπεδο σωματίδιο ορίζεται αυτό όπου η αναλογία της μεσαίας διάστασης προς τη μικρότερη διάσταση του σωματιδίου υπερβαίνει το 3:1.
- Ως επιμήκες ορίζεται ένα σωματίδιο όπου η αναλογία της μεγαλύτερης διάστασης προς τη μεσαία διάσταση του σωματιδίου υπερβαίνει το 3:1.
- Τα σωματίδια ταξινομούνται ως επίπεδα και επιμήκη εάν η αναλογία της μεγαλύτερης διάστασης προς τη μικρότερη διάσταση υπερβαίνει το 5:1.

Τα επιμήκη σωματίδια είναι ανεπιθύμητα επειδή έχουν την τάση να σπάνε κατά την κατασκευή και υπό κυκλοφορία. Το μέγιστο ποσοστό επίπεδων και επιμήκων σωματιδίων χρησιμοποιείται συνήθως ως 10% κατά βάρος για συνολικό ισοδύναμο μεμονωμένο άξονα φορτίου 0,3 εκατομμυρίων ή περισσότερο.



Σχήμα 3 Χαρακτηρισμός σωματιδίων

3.1.1.5 Γωνιότητα λεπτόκοκκων αδρανών

Η γωνιότητα λεπτών αδρανών (FAA) είναι επίσης μια συναινετική απαίτηση ιδιοτήτων αδρανών στη διαδικασία σχεδιασμού ασφαλτομίγματος Superpave και ορίζεται ως το ποσοστό κενών αέρα που υπάρχουν σε χαλαρά συμπιεσμένα αδρανή μικρότερα από κόσκινο No. 8 (2,38 mm). Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει αρκετή εσωτερική τριβή και αντίσταση στην αυλάκωση των λεπτών αδρανών. Στη δοκιμή από το AASHTOT 304, ένα δείγμα λεπτού αδρανούς χύνεται σε έναν μικρό βαθμονομημένο κύλινδρο ρέοντας μέσα από μια τυπική χοάνη. Με τον προσδιορισμό του βάρους του λεπτού αδρανούς στον γεμάτο κύλινδρο γνωστού όγκου, η περιεκτικότητα σε κενά μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά μεταξύ του όγκου του κυλίνδρου και του όγκου του λεπτού αδρανούς που συλλέγεται στον κύλινδρο. Αυτή η τιμή είναι επίσης γνωστή ως FAA. Όσο υψηλότερο είναι το FAA, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνιότητα και η τραχιά επιφάνεια. Το ειδικό βάρος χύδην λεπτού αδρανούς χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του όγκου των λεπτών αδρανών. Η απαιτούμενη ελάχιστη τιμή για τη γωνιότητα των λεπτών αδρανών είναι συνάρτηση του επιπέδου κυκλοφορίας και του βάθους εντός του οδοστρώματος. Αυτές οι απαιτήσεις ισχύουν για το τελικό μείγμα αδρανών, αν και μπορούν να γίνουν εκτιμήσεις για τα επιμέρους αποθέματα αδρανών. Υψηλότερα περιεχόμενα κενών σημαίνουν περισσότερα σπασμένα πρόσωπα. Το ελάχιστο ποσοστό κενών αέρα σε χαλαρά συμπιεσμένα λεπτά αδρανή χρησιμοποιείται συνήθως ως 40% έως 45% κατά βάρος για συνολικό ισοδύναμο μεμονωμένο άξονα φορτίου 0,3 εκατομμυρίων ή περισσότερο.

3.1.1.6 Γωνιότητα χονδροειδών αδρανούς

Η γωνιότητα χονδροειδών αδρανών (CAA) εξασφαλίζει υψηλό βαθμό εσωτερικής τριβής των αδρανών και αντίσταση στην αυλάκωση του μίγματος. Ορίζεται ως το ποσοστό κατά βάρος αδρανών μεγαλύτερων από το κόσκινο No. 4 (4,75 mm) με μία ή περισσότερες σπασμένες επιφάνειες. Η διαδικασία ASTM D 5821 περιλαμβάνει χειροκίνητη μέτρηση σωματιδίων για τον προσδιορισμό των σπασμένων όψεων. Ως θραυσμένη όψη ορίζεται κάθε σπασμένη επιφάνεια που καταλαμβάνει περισσότερο από το 25% της περιοχής του περιγράμματος του σωματιδίου του συσσωματώματος που είναι ορατό σε αυτόν τον προσανατολισμό. Οι απαιτούμενες ελάχιστες τιμές για τη γωνιότητα των χονδροειδών αδρανών είναι συνάρτηση του επιπέδου κυκλοφορίας και της θέσης εντός του οδοστρώματος και κυμαίνονται μεταξύ 50% και 100%.

3.1.1.7 Περιεκτικότητα σε άργιλο και ισοδύναμο άμμου

Η περιεκτικότητα σε άργιλο είναι το ποσοστό αργίλου που περιέχεται στο κλάσμα του αδρανούς που είναι λεπτότερο από το κόσκινο No. 4 (4,75 mm). Μετράται σύμφωνα με το πρωτόκολλο δοκιμής AASHTOT 176. Σε αυτή τη δοκιμή, ένα δείγμα λεπτού αδρανούς τοποθετείται σε έναν βαθμονομημένο κύλινδρο, με ένα διάλυμα κροκιδώσεως και αναδεύεται για να χαλαρώσει τα αργιλώδη λεπτά που υπάρχουν μέσα και να επικαλύψει το αδρανή. Το κροκιδωτικό διάλυμα αναγκάζει το αργιλώδες υλικό να εναιωρηθεί πάνω από το κοκκώδες αδρανή. Μετά από μια περίοδο που επιτρέπει την καθίζηση, μετράται το ύψος του κυλίνδρου της αιωρούμενης αργίλου και της ιζηματοποιημένης άμμου. Η τιμή ισοδύναμου άμμου υπολογίζεται ως ο λόγος των ενδείξεων ύψους άμμου προς άργιλο εκφραζόμενη ως ποσοστό. Οι απαιτούμενες τιμές περιεκτικότητας σε άργιλο (40–50%) για τα λεπτά αδρανή εκφράζονται ως ελάχιστο ισοδύναμο άμμου και είναι συνάρτηση του επιπέδου κυκλοφορίας. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η αναλογία του ύψους της άμμου προς το ύψος της αργίλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισοδύναμη τιμή της άμμου, τόσο πιο καθαρό (λιγότερη λεπτή σκόνη ή υλικά που μοιάζουν με πηλό) είναι τα αδρανή.

3.1.1.8 Δοκιμή τριβής και κρούσης κατά Λος Άντζελες (LA)

Η δοκιμή τριβής και κρούσης κατά Λος Άντζελες (LA) είναι μια δοκιμή σκληρότητας. Αυτή η δοκιμή προσομοιώνει την αντίσταση του χονδροειδούς αδρανούς στην τριβή και τη μηχανική υποβάθμιση κατά το χειρισμό, την κατασκευή και τη λειτουργία. Μετράται η εκατοστιαία απώλεια υλικών από ένα μείγμα αδρανών κατά τη δοκιμή τριβής LA (AASHTO T 96). Η δοκιμή εκτελείται με την υποβολή του χονδροειδούς αδρανούς και ορισμένων χαλύβδινων σφαιρών μέσα σε ένα μεγάλο τύμπανο. Μετά την περιστροφή του τυμπάνου, το βάρος του αδρανούς υλικού που συγκρατείται σε κόσκινο No. 12 (1,70 mm) αφαιρείται από το αρχικό βάρος για να ληφθεί ένα ποσοστό του συνολικού βάρους αδρανούς που έχει διασπαστεί και περάσει από το No. 12 (1,70 mm) κόσκινο. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι το ποσοστό απώλειας, το οποίο είναι το ποσοστό βάρους του χονδροειδούς υλικού που χάνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής ως αποτέλεσμα της μηχανικής υποβάθμισης. Οι μέγιστες τιμές απώλειας κυμαίνονται συνήθως από περίπου 35% έως 45%

3.1.1.9 Έλεγχος υγείας

Η δοκιμή ελέγχου υγείας υπολογίζει την αντοχή των αδρανών στις καιρικές συνθήκες κατά τη χρήση. Μπορεί να εκτελεστεί τόσο σε χονδροειδή όσο και σε λεπτά αδρανή. Αυτή η δοκιμή

μετρά την εκατοστιαία απώλεια υλικών από ένα μείγμα αδρανών κατά τη διάρκεια της δοκιμής σταθερότητας θειικού νατρίου ή μαγνησίου σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T 104. Η δοκιμή εκτελείται εκθέτοντας εναλλάξ ένα δείγμα συσσωματώματος σε επαναλαμβανόμενες εμβάπτισεις σε κορεσμένα διαλύματα θειικού νατρίου ή μαγνησίου το καθένα ακολουθούμενο από ξήρανση σε φούρνο. Μία βύθιση και ξήρανση θεωρείται ένας κύκλος ακραιότητας. Κατά τη φάση ξήρανσης, τα άλατα καθιζάνουν στο διαπερατό κενό χώρο του αδρανούς. Κατά την εκ νέου εμβάπτιση, τα άλατα επανυδατώνονται και ασκεί εσωτερικές δυνάμεις διαστολής που προσομοιώνουν τις δυνάμεις διαστολής του παγωμένου νερού. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι συνολική απώλεια ποσοστού σε διάφορα διαστήματα κόσκινου για έναν απαιτούμενο αριθμό κύκλων. Οι μέγιστες τιμές απώλειας κυμαίνονται από περίπου 10% έως 20% για πέντε κύκλους

3.1.1.10 Επιβλαβή υλικά

Τα επιβλαβή υλικά ορίζονται ως το ποσοστό κατά βάρος των προσμείξεων, των σβώλων αργίλου και των εύθρυπτων σωματιδίων όπως το σχιστολιθικό ξύλο και ο άνθρακας στο αναμειγμένο αδρανές. Η δοκιμή πραγματοποιείται με υγρό κοσκίνισμα κλασμάτων μεγέθους αδρανών πάνω από προκαθορισμένα κόσκινα σύμφωνα με το πρότυπο AASHTOT 112. Το ποσοστό βάρους του υλικού που χάνεται ως αποτέλεσμα του υγρού κοσκίνισματος αναφέρεται ως το ποσοστό των σβώλων αργίλου και των εύθρυπτων σωματιδίων. Είναι εμφανές ένα ευρύ φάσμα μέγιστου επιτρεπόμενου ποσοστού σβώλων αργίλου και εύθρυπτων σωματιδίων. Οι τιμές κυμαίνονται από 0,2% έως 10%, ανάλογα με την ακριβή σύνθεση του ρύπου. Μερικές από τις αρνητικές επιπτώσεις πολλών επιβλαβών ουσιών παρατίθενται παρακάτω:

- Οι οργανικές ακαθαρσίες καθυστερούν την πήξη και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και μειώνουν την αύξηση της αντοχής.
- Ο άνθρακας, ο λιγνίτης, οι σβώλοι αργίλου και τα εύθρυπτα σωματίδια αυξάνουν τις πιθανότητες δημιουργίας κενών και μειώνουν την ανθεκτικότητα.
- Λεπτόκοκκα που περνούν από το κόσκινο Νο. 200 (μικρότερο από 0,075 mm) εξασθενούν τον δεσμό μεταξύ ασφάλτου και αδρανών.

3.1.2 Μηχανικές ιδιότητες

Στο αναλυτικό σχεδιασμό του οδοστρώματος, η απόκριση της κάθε στρώσεως υπολογίζεται με μηχανιστικό τρόπο. Συγκεκριμένα, η τάση-παραμόρφωση σε κάθε στρώση οδοστρώματος

προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μηχανιστική ανάλυση. Ως εκ τούτου, τα μέτρα ελαστικότητας των στρωμάτων εδάφους και αδρανών είναι βασικές παράμετροι εισόδου του σχεδιασμού. Γενικά, όσο πιο ανθεκτικό στην παραμόρφωση είναι μια στρώση, τόσο περισσότερο φορτίο μπορεί να υποστηρίξει πριν φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που εμπλέκονται κατά την αξιολόγηση των υλικών υποβάθμισης (όπως συρρίκνωση/διόγκωση στην περίπτωση ορισμένων αργίλων και τέφρας) που είναι δευτερεύοντες.

3.1.2.1 *Μέτρο ελαστικότητας*

Το μέτρο ελαστικότητας (M_R) είναι η πιο σημαντική παράμετρος εισόδου στο λογισμικό σχεδίασης στις μηχανιστικές-εμπειρικές μεθόδους. Αυτή η δοκιμή διεξάγεται σύμφωνα με την ακολουθία δοκιμών AASHTO T 307 για υλικά βάσης/υποβάσεως/στρώσης έδρασης. Μια επαναλαμβανόμενη αξονική κυκλική τάση σταθερού μεγέθους εφαρμόζεται σε ένα εργαστηριακά προετοιμασμένο κυλινδρικό δείγμα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το δείγμα υπόκειται σε μια δυναμική κυκλική τάση και μια στατική πίεση περιορισμού μέσω ενός θαλάμου πίεσης. Η συνολική ανακτήσιμη αξονική παραμόρφωση του δείγματος μετράται και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του M_R .

3.1.2.2 *Καλιφορνιακός δείκτης αντοχής (CBR) (εργαστηριακός)*

Ο δείκτης CBR συγκρίνει τη φέρουσα ικανότητα ενός υλικού με αυτή μιας καλά διαβαθμισμένης θρυμματισμένης πέτρας. Έτσι, ένα υψηλής ποιότητας υλικό θρυμματισμένης πέτρας θα πρέπει να έχει CBR στο 100%. Προορίζεται κυρίως για, αλλά δεν περιορίζεται σε, αξιολόγηση της αντοχής συνεκτικών υλικών με μέγιστο μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 19 mm. Αναπτύχθηκε από το τμήμα αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια περίπου το έτος 1930 και στη συνέχεια υιοθετήθηκε από πολυάριθμους οργανισμούς. Αυτή η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί επί τόπου σε βάση/υποβάση/έδαφος (ASTMD 4429) ή συμπιεσμένη σε εργαστήριο βάση/υποβάση/έδαφος (ASTMD1883 ή AASHTOT 193). Στο εργαστήριο, η βασική δοκιμή CBR περιλαμβάνει την εφαρμογή φορτίου σε ένα μικρό έμβολο διείσδυσης με ρυθμό 1,3 mm ανά λεπτό και καταγραφή του συνολικού φορτίου σε διεισδύσεις που κυμαίνονται από 0,64 mm έως 7,62 mm.

3.1.2.3 Τιμή αντίστασης

Η δοκιμή τιμής αντίστασης (*R-value*) είναι μια δοκιμή ακαμψίας υλικού που διεξάγεται σύμφωνα με το AASHTOT 190 ή το πρότυπο ASTM D 2844. Στα υλικά που δοκιμάστηκαν αποδίδεται μια τιμή R. Το τεστ R-value αναπτύχθηκε από το Τμήμα Αυτοκινητοδρόμων της Καλιφόρνια και αναφέρθηκε για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1940. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η αυλάκωση (ή το σπρώξιμο) στα ίχνη των τροχών ήταν πρωταρχικό μέλημα και η δοκιμή R-value αναπτύχθηκε ως βελτίωση της δοκιμής CBR.

3.1.3 Άλλες ιδιότητες

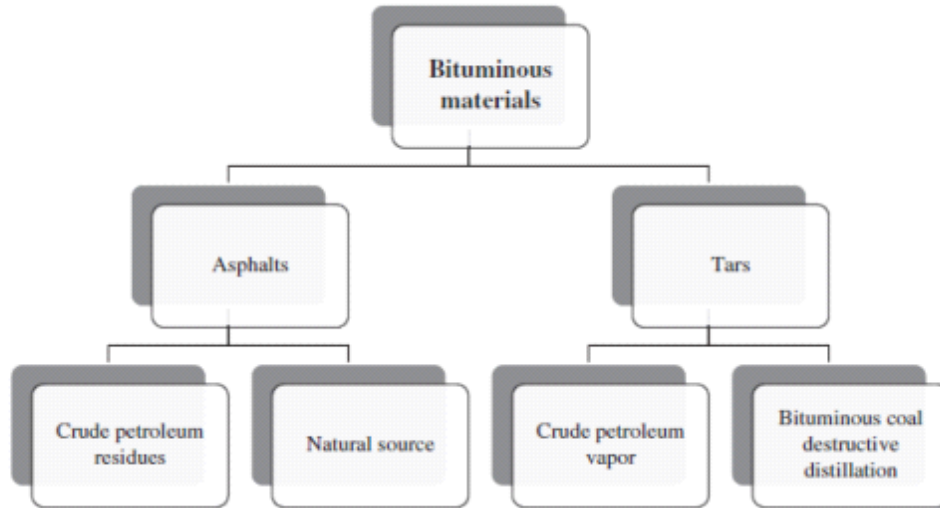
Κάποιες άλλες ιδιότητες απαιτούνται κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό του οδοστρώματος.

- Λογος Poisson. Είναι ο λόγος της πλευρικής τάσης προς την αξονική τάση και απαιτείται για τον υπολογισμό της πλευρικής τάσης-παραμόρφωσης κατά την εφαρμογή κατακόρυφης πίεσης. Για τα στρώματα εδάφους και αδρανών, η επίδρασή του στην απόκριση του οδοστρώματος δεν είναι πολύ σημαντική. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει διαθέσιμο εθνικό πρότυπο δοκιμών και χρησιμοποιούνται κυρίως οι προεπιλεγμένες τιμές που περιλαμβάνονται στο λογισμικό σχεδιασμού AASHTOWare pavement ME. Ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, η τιμή αυτή κυμαίνεται από 0,15 έως 0,45.
- Μέγιστη ξηρή πυκνότητα. Η μέγιστη ξηρή πυκνότητα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη δοκιμή Proctor σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμής AASHTOT 180.
- Βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη δοκιμή Proctor σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμής AASHTOT 180.
- Ειδικό βάρος. Το ειδικό βάρος είναι μια απαιτούμενη παράμετρος για την ανάλυση της σχέσης φάσης και τον υπολογισμό της πίεσης υπερφόρτωσης. Αυτή η παράμετρος μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας το πρότυπο δοκιμής AASHTOT 100.
- Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας το πρότυπο δοκιμής AASHTOT 215.

3.2 Ασφαλτικά υλικά

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα (AC) είναι η γενική ονομασία του σκληρυμένου ασφαλτικού υλικού που αναμιγνύεται με χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή. Ο όρος "ασφαλτικό σκυρόδεμα (AC)" χρησιμοποιείται εναλλακτικά ως "θερμό μίγμα ασφάλτου (HMA)" στη βιομηχανία οδοστρωμάτων. Ωστόσο, το AC δεν είναι μόνο HMA, αλλά περιλαμβάνει επίσης ορισμένες άλλες μορφές (που αναφέρονται αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο). Η άσφαλτος συνήθως αντιπροσωπεύει μεταξύ 4% και 8% του μίγματος AC κατά βάρος και περίπου 30% του κόστους της κατασκευής οδοστρώματος AC ανάλογα με τον τύπο και την ποσότητα.

Η άσφαλτος είναι σκούρου καφέ έως μαύρου χρώματος, υδρογονάνθρακας με υψηλό ιξώδες που παράγεται από υπολείμματα απόσταξης πετρελαίου. Αυτή η απόσταξη μπορεί να γίνει φυσικά, με αποτέλεσμα λίμνες ασφάλτου, ή σε διωλιστήριο πετρελαίου που χρησιμοποιεί αργό πετρέλαιο όπως φαίνεται στο Σχ. 4. Η άσφαλτος και η πίσσα είναι και τα δύο μαύρα και έχουν εξαιρετικές στεγανωτικές και συγκολλητικές ιδιότητες. Το συνδετικό υλικό ασφάλτου λαμβάνεται από υπολείμματα ακατέργαστου πετρελαίου ή φυσικές λίμνες ασφάλτου. Από την άλλη πλευρά, η πίσσα λαμβάνεται από ατμούς πετρελαίου και την καταστροφική απόσταξη ασφαλτούχου άνθρακα. Το ασφαλτικό υλικό χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή ασφαλτοστρωμάτων, ενώ η πίσσα χρησιμοποιείται κυρίως για στεγανοποίηση μεμβρανών σε στέγες και επεξεργασία οδοστρωμάτων, ειδικά σε χώρους στάθμευσης όπου η διαρροή καυσίμου μπορεί να διαλύσει την άσφαλτο. Η πίσσα δεν χρησιμοποιείται πλέον για την κατασκευή δρόμων λόγω κινδύνων για την υγεία (π.χ. ερεθισμός των ματιών και του δέρματος) και της ευαισθησίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο άνθρακας και το υδρογόνο είναι τα κύρια στοιχεία που υπάρχουν στο συνδετικό υλικό ασφάλτου (Peterson, 1984). Μερικά άλλα δευτερεύοντα στοιχεία που υπάρχουν είναι το θείο, το άζωτο και το οξυγόνο και περιστασιακά ανευρίσκονται βανάδιο και νικέλιο (Halstead, 1985).



Σχήμα 4 Κατάταξη ασφάλτου

3.2.1 Ιδιότητες και εργαστηριακοί έλεγχοι

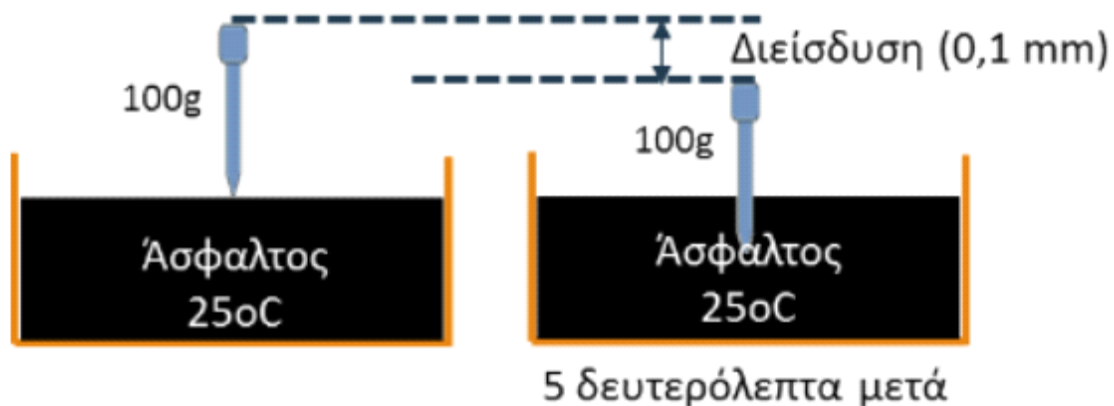
Όπως και τα εδαφικά υλικά και τα αδρανή, ομοίως και η ασφαλτος υπόκειται σε εργαστηριακές δοκιμές με στόχο τον καθορισμό της καταλληλότητας της. Οι σημαντικότερες εξ αυτών, παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

3.2.1.1 Δοκιμές διεισδυτικότητας

Μέσω της δοκιμής διεισδυτικότητας (βλέπε Εικόνα 13), γίνεται έμμεση μέτρηση της συνοχής και, συνεπώς, της σκληρότητας του ασφαλτού. Μια τυπική βελόνη τοποθετείται επάνω στην επιφάνεια ενός δοκιμίου ασφαλτού (το οποίο είναι ένα κυλινδρικό δοχείο με ασφάλτο μέσα). Κατόπιν, υπό την επίδραση του βάρους της, η βελόνη εισχωρεί στο δοκίμιο ασφαλτού για 5 δευτερόλεπτα (δείτε Εικόνα 13). Η θερμοκρασία του ασφαλτού κατά τη δοκιμή παραμένει στους 25°C. Το βάθος της διείσδυσης μετριέται σε μονάδες pen. Εδώ, 1 pen αντιστοιχεί σε 0,1mm



Εικόνα 13 Δοκίμια και συσκευή διεισδυτικότητας



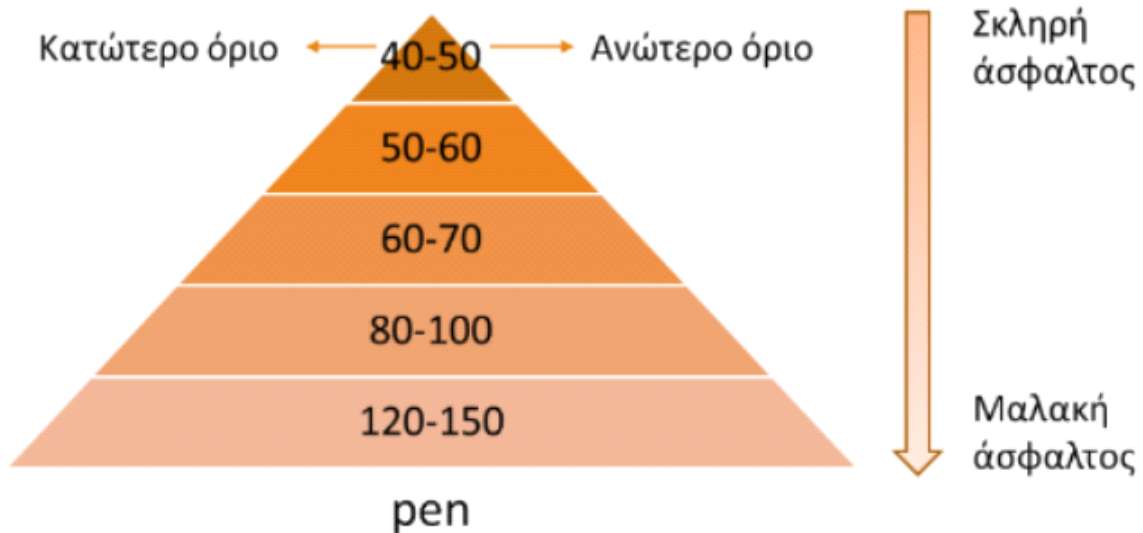
Εικόνα 13 Η δοκιμή διεισδυτικότητας

Γίνονται τουλάχιστον τρεις μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας του δοκιμίου. Έπειτα, υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών των μετρήσεων, ο οποίος αντιστοιχεί στην τελική τιμή διεισδυτικότητας της ασφάλτου. Αυτό συμβαίνει υπό την προϋπόθεση ότι η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής pen είναι σύμφωνη με τον Πίνακα 2.

Πίνακας 2 Αποδεκτές διαφορές μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών pen

Pen	0-49	50-149	150-249
Max-min	2	4	12

Αξιοποιώντας τον δείκτη pen μπορεί πλέον να ταξινομηθεί η ασφάλτος στις υφιστάμενες κατηγορίες (π.χ. pen 40-50, pen 50-60, pen 60-70 κλπ. (βλ. εικόνα 14)).



Εικόνα 14 Κατηγορίες ταξινόμησης ασφάλτου με βάση το δείκτη pen

Η κάθε κατηγορία χαρακτηρίζει την ασφάλτο ως εκείνη στην οποία κατά την δοκιμή το αντίστοιχο μετρούμενο βάθος βρίσκεται μεταξύ των ορίων της κατηγορίας.

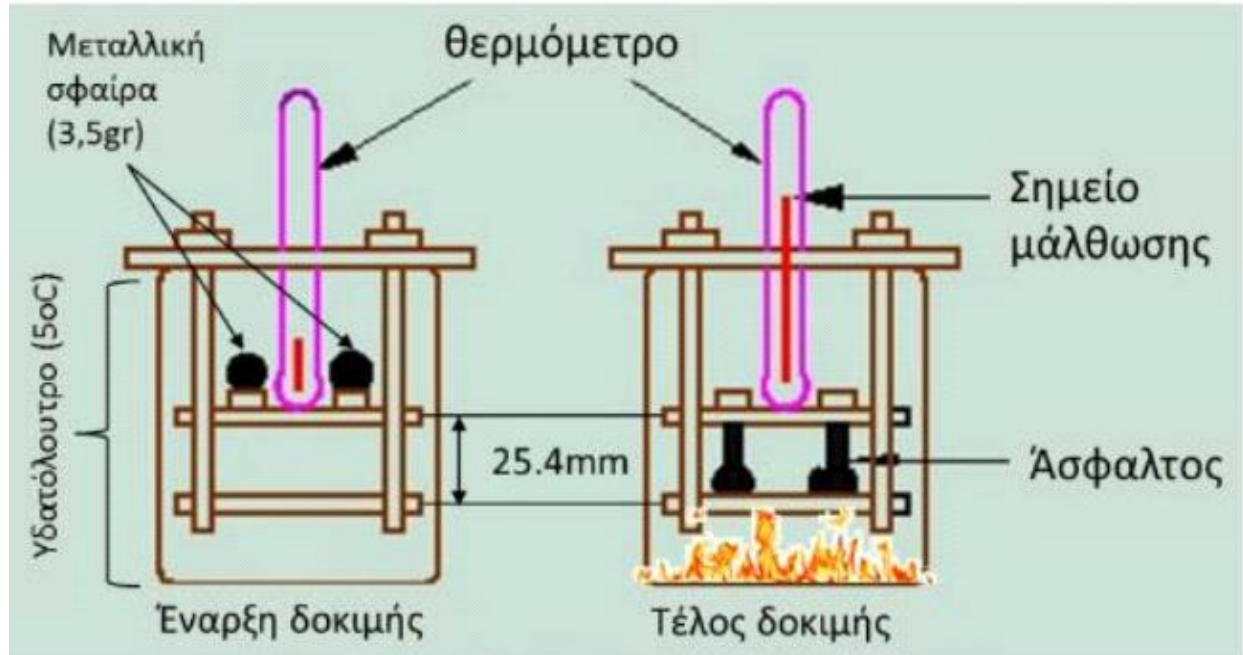
3.2.1.2 Δοκιμή μάλθωσης

Πρόκειται για μια δοκιμή με στόχο τον εμπειρικό προσδιορισμό της συνοχής της ασφάλτου. Το σημείο μάλθωσης που προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής είναι η θερμοκρασία όπου μια συγκεκριμένη ποσότητα τη εξεταζόμενης ασφάλτου διανύει απόσταση ίση με 25.4mm κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης. Η συσκευή που αξιοποιείται στην δοκιμή παρουσιάζεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15 Πειραματική διάταξη δοκιμής μάλθωσης

Κατά την δοκιμή, δύο δακτύλιοι που περικλείουν την ποσότητα ασφάλτου τοποθετούνται σε υδατόλουτρο με θερμοκρασία 5°C. Έπειτα, τοποθετείται μια μεταλλική σφαίρα στο κέντρο του κάθε δακτυλίου. Καθώς η θερμοκρασία του υδατόλουτρου αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, η ασφάλτος μαλακώνει και αρχίζει να ρέει. Η στιγμή που η ασφάλτος, υπό το βάρος της μεταλλικής σφαίρας, διανύει την απαιτούμενη απόσταση καταγράφεται η θερμοκρασία (βλ. Εικόνα 16). Η θερμοκρασία μάλθωσης ορίζεται ως ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων.



Εικόνα 16 Διαδικασία δοκιμής μάλθωσης

3.2.1.3 Δείκτης διεισδυτικότητας

Οι δοκιμές διεισδυτικότητας και μάλθωσης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη σκληρότητα και τη συνοχή της ασφάλτου. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλες για να περιγράψουν τη θερμοκρασιακή ευαισθησία της ασφάλτου. Η θερμοκρασιακή ευαισθησία αναφέρεται στο πώς η ασφάλτος αντιδρά στις αλλαγές θερμοκρασίας, δηλαδή πόσο εύκολα μαλακώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας ή πόσο δύσκολα σκληραίνει με τη μείωσή της. Οι δοκιμές διεισδυτικότητας και μάλθωσης πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και επομένως δεν δίνουν πληροφορίες για την αντίδραση της ασφάλτου σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για να περιγραφεί η θερμοκρασιακή ευαισθησία της ασφάλτου χρησιμοποιείται ο δείκτης διεισδυτικότητας (PI). Υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του PI, της θερμοκρασίας και του αντίστοιχου δείκτη pen. Από έρευνες που έχουν γίνει, προέκυψε ότι σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία μάλθωσης το βάθος διεισδυτικότητας είναι ίσο με 800pen, για την πλειοψηφία των ασφάλτων. Με βάση αυτή τη παρατήρηση σε αντίστοιχες μετρήσεις προκύπτει ότι ο δείκτης PI δίνεται ως:

Εν γένει ο δείκτης λαμβάνει τιμές στο εύρος (-3,7). Μικρότερες τιμές δείχνουν αυξημένη ευαισθησία της ασφάλτου σε θερμοκρασιακές μεταβολές.

3.2.1.4 Δοκιμή ολκιμότητας

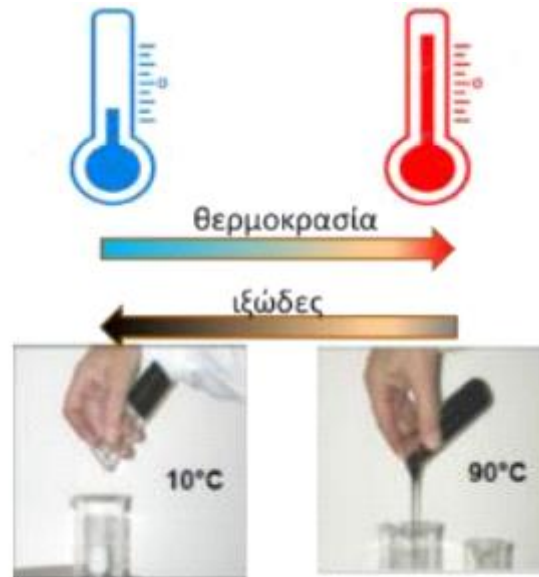
Η δοκιμή έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό με έμμεσο τρόπο της αντοχής σε εφελκυσμό της ασφάλτου. Κατά τη δοκιμή του δοκιμίου ασφάλτου, το δοκίμιο επιμηκύνεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες μέχρι να σπάσει. Η ολκιμότητα ορίζεται ως το μήκος της επιμήκυνσης κατά τη στιγμή της θραύσης (σε εκατοστά) (εικ 17). Η δοκιμή διενεργείται σε τρία διαφορετικά δοκίμια και η αντιπροσωπευτική τιμή ολκιμότητας λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των τριών μετρήσεων.



Εικόνα 17 Δοκιμή ολκιμότητας

3.2.1.5 Ιξώδες

Ως ιξώδες ορίζεται η αντίσταση που παρουσιάζει ένα ρευστό στην ικανότητά του να ρέει. Όταν σε ένα ρευστό επιβάλλεται μια δύναμη, όσο μικρότερη είναι η μετακίνηση τόσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες. Αποτελεί έκφραση της συνοχής του ρευστού που στην περίπτωση της ασφάλτου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται με την πτώση της θερμοκρασίας (Εικόνα 18).

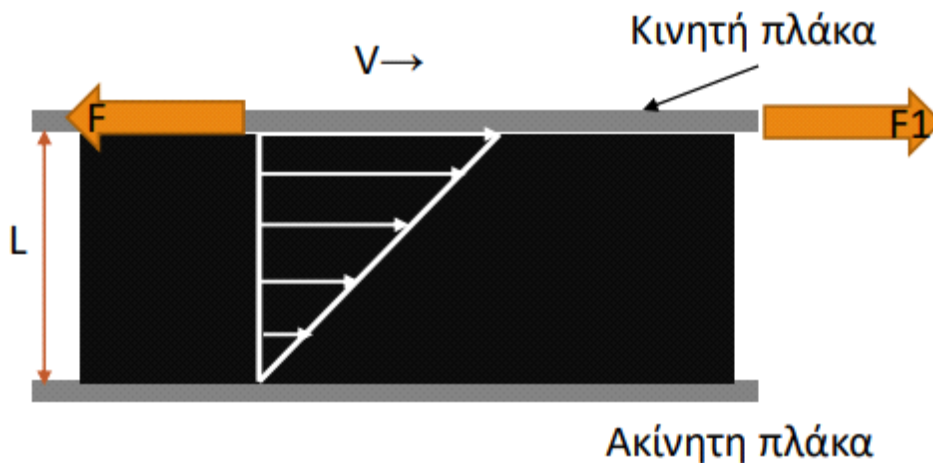


Εικόνα 18 Μεταβολή στο ιξώδες με την θερμοκρασία

Η δοκιμή λαμβάνει χώρα με δύο μεθόδους:

- Σχετική κίνηση ολισθαίνουσας πλάκας.

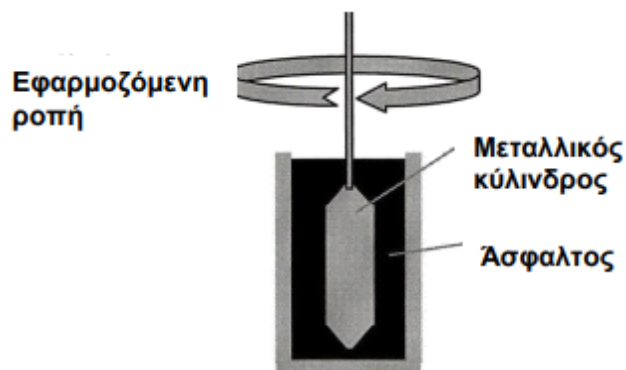
Στην δοκιμή αυτή (εικ. 19) το δοκίμιο της ασφάλτου τοποθετείται μεταξύ δύο πλακών, μιας σταθερής και μιας που μπορεί να ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια της ασφάλτου. Στην ολισθαίνουσα πλάκα ασκείται δύναμη και μετράται η ταχύτητα που αυτή επιτυγχάνει. Η μετρήσεις της δύναμης και της ταχύτητας της πλάκας παράλληλα με τα γεωμετρικά μεγέθη της διάταξης αποδίδουν το ιξώδες της ασφάλτου. Δ



Εικόνα 19 Μέτρηση ιξώδους με την χρήση ολισθαίνουσας πλάκας

- Περιστροφική σχετική κίνηση

Κατά την δοκιμή αυτή, ένας πρότυπος μεταλλικός κύλινδρος τοποθετείται σε ένα δοχείο που περιέχει την εξεταζόμενη ασφάλτο και εφαρμόζεται σε αυτόν μια ροπή. Αξιοποιούνται η προσδιοριζόμενη διατμητική τάση και η γωνιακή ταχύτητα του κυλίνδρου για τον υπολογισμό του ιξώδους της ασφάλτου (εικ. 20).

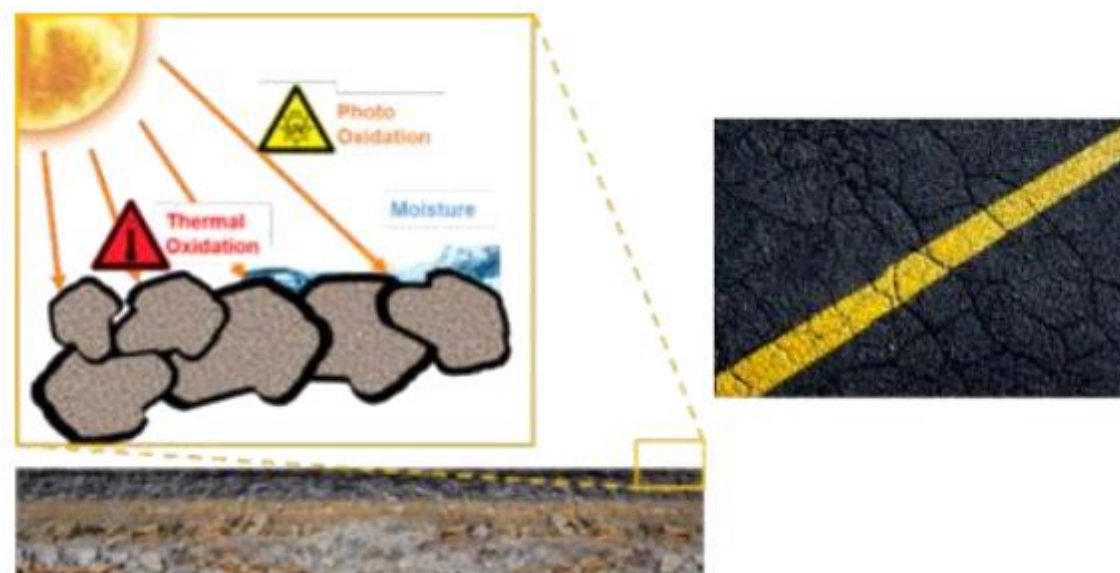


Εικόνα 20 Μέτρηση ιξώδους με την χρήση περιστρεφόμενου κυλίνδρου

3.2.1.6 Γήρανση της ασφάλτου

Κατά την επίδραση της θερμοκρασίας, οι ιδιότητες της ασφάλτου υφίστανται αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της ελαστικότητάς της και η ασφάλτος αποκτά μια πιο ρηγή συμπεριφορά (Εικόνα 21). Η επίδραση της θερμοκρασίας και του αέρα στην ασφάλτο εκτιμάται μέσω δοκιμών όπου η ασφάλτος υποβάλλεται σε μακροχρόνια θέρμανση και στη συνέχεια εκτιμάται η απώλεια βάρους λόγω εξάτμισης των πτητικών συστατικών, ενώ επανεξετάζονται και οι χαρακτηριστικές ιδιότητές της (όπως η διεισδυτικότητα, η μάλθωση, το

ιξώδες). Κατά τη δοκιμή RTFO (Rolling Thin Film Oven), προσομοιώνεται η διαδικασία σκλήρυνσης της ασφάλτου κατά την παρασκευή του ασφαλτομίγματος στη μονάδα παραγωγής. Κατά τη δοκιμή PAV (Pressure Aging Vessel), προσομοιώνεται η διαδικασία γήρανσης της ασφάλτου μετά από μακροχρόνια έκθεση (10 χρόνια μετά την εγκατάσταση).



Εικόνα 21 Γήρανση ασφάλτου

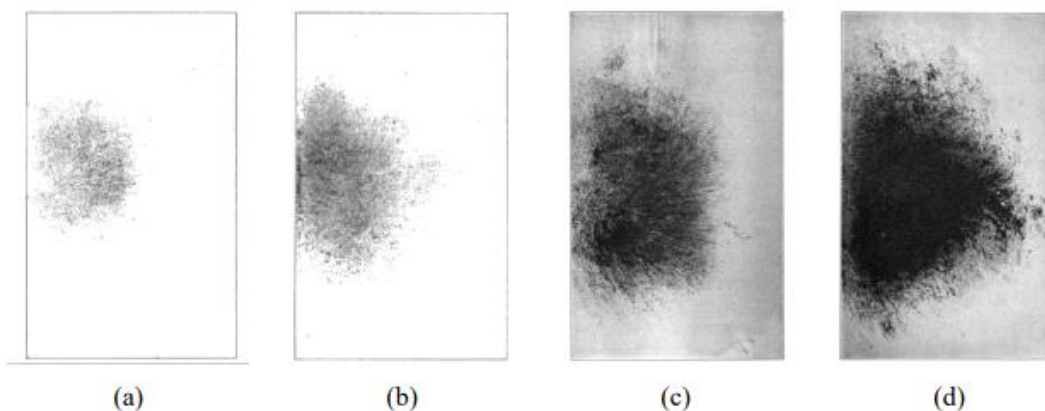
3.3 Ασφαλτικά μίγματα

3.3.1 Ιστορική αναδρομή στον σχεδιασμό ασφαλτικού μίγματος

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα οδηγιών σχετικά με τον τρόπο παρασκευής ασφαλτικών μιγμάτων για την κατασκευή δρόμων χρονολογείται από το 1890. Κατά τη διάρκεια αυτής της χρονιάς, ο E. G. Love δημοσίευσε αρκετά άρθρα σχετικά με την κατασκευή δρόμων και την οδόστρωση. Σε ένα από τα άρθρα, ο συνταγματάρχης F. V. Greene της Barber Asphalt Paving Company επεξηγήθηκε πώς να παραχθεί ένα μείγμα οδοστρώματος από άσφαλο, άμμο και κονιοποιημένο καρβονίτη ασβέστη (Huber, 2013a).

Στις αρχές του εικοστού αιώνα, ο Richardson (1905) απεικόνισε πώς εξελίχθηκε η κατασκευή ασφαλτικών οδοστρωμάτων με τα χρόνια. Παρείχε μια ενδελεχή έρευνα για τις ιδιότητες, τις συμπεριφορές και τις διαδικασίες φθοράς. Μία από τις κύριες ιδέες ήταν η διαφοροποίηση μεταξύ επιφανειακών μιγμάτων και ασφαλτικού σκυροδέματος. Τα επιφανειακά μείγματα ορίστηκαν ως ένας συνδυασμός συνδετικού ασφάλτου, άμμου και αλεσμένου ασβεστόλιθου. Η

αναφερόμενη μέση περιεκτικότητα σε πίσσα για τέτοια μείγματα ήταν περίπου 10 τοις εκατό και η διαβάθμιση των αδρανών ήταν 100 τοις εκατό περνώντας το κόσκινο Νο. 10, το οποίο είχε μέγεθος ανοίγματος 2 mm. Η σωστή ποσότητα συνδετικού υλικού προσδιορίστηκε με τη δοκιμή «rat-paper» στην οποία η περιοχή και η ένταση του λεκέ από πίσσα καθόρισε τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε άσφαλτο, όπως φαίνεται στην Εικ. 22.



Εικόνα Δοκιμή rat-paper: (α) ελαφριά κηλίδα, (β) μέτρια κηλίδα, (γ) ισχυρή κηλίδα, (δ) βαριά κηλίδα (Richardson, 1905)

Αντίθετα, το ασφαλτικό σκυρόδεμα σχηματίστηκε από άσφαλτο (μεταξύ 6 και 9 τοις εκατό), άμμο, πληρωτικό και συνδυασμό αδρανών που περνούν μεγέθη κόσκινου 6,35 mm, 12,5 mm και 25 mm. Για τον σχεδιασμό μιγμάτων ασφαλτικού σκυροδέματος, η ποσότητα των κενών στην άμμο και τα ορυκτά αδρανή υπολογίστηκε σε συμπιεσμένα δείγματα. Αυτό το είδος μείγματος προοριζόταν ως στρώμα βάσης, ιδανικό για τη στήριξη του επιφανειακού μίγματος.

Μια μεγάλη καινοτομία ήρθε στα μέσα της δεκαετίας του 1920, όταν οι P. Hubbard και F. C. Field του Ινστιτούτου Ασφάλτου καθόρισαν μια νέα μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε συνδετικά μείγματα λεπτής διαβάθμισης ασφάλτου. Εκείνη την εποχή τα οχήματα είχαν ελαστικά από συμπαγές καουτσούκ τα οποία, λειτουργώντας ως συγκεντρωμένα φορτία, εφάρμοζαν ένα αποτέλεσμα διάτρησης στους δρόμους (Kandhal, 2016). Η δοκιμή ευστάθειας Hubbard-Field ήταν ένας τύπος δοκιμής διάτρησης που αναπτύχθηκε ειδικά για τη δοκιμή λεπτών ασφαλτικών μιγμάτων (Goetz, 1952). Η συσκευή δοκιμής, η οποία ήταν αρκετά βαριά και ογκώδης. Η δοκιμή μέτρησε το μέγιστο φορτίο που αναπτύχθηκε κατά την εξώθηση ενός δείγματος μίγματος διαμέτρου 50,8 mm και ύψους 25,4 mm μέσω ενός μικρότερου στόμιου διαμέτρου 44,4 mm. Τα εργαστηριακά δείγματα συμπιέστηκαν με σφυρί χειρός. Μια τροποποιημένη έκδοση της δοκιμής Hubbard-Field

αναπτύχθηκε για το ασφαλτικό σκυρόδεμα. Περιείχε δείγματα δοκιμής διαμέτρου 152,4 mm τα οποία, μετά τη συμπίεση, ωθήθηκαν μέσα από έναν δακτύλιο μικρότερης διαμέτρου. Όπως και η αρχική μέθοδος δοκιμής, στην τροποποιημένη έκδοση ήταν δυνατή η καταγραφή του μέγιστου φορτίου που υφίσταται το δείγμα πριν το μείγμα περάσει από το στόμιο. αυτό το φορτίο ονομάστηκε σταθερότητα πεδίου Hubbard. Προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη περιεκτικότητα σε άσφαλο, και εκτός από την τιμή σταθερότητας, τα μείγματα αναλύθηκαν ως προς τις ογκομετρικές ιδιότητες, εμπλουτίζοντας τη μέθοδο που περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Richardson. Τα συμπιεσμένα δείγματα αξιολογήθηκαν ως προς το χύμα ειδικό βάρος και το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος, προκειμένου να υπολογιστεί η περιεκτικότητα σε κενά αέρα. Σημειώνεται ότι δεν ελήφθη υπόψη η διαδικασία απορρόφησης ασφάλτου. Επιπλέον, τα κενά στον σκελετό του αδρανούς υπολογίστηκαν και λήφθηκαν υπόψη στον σχεδιασμό του μείγματος (Huber, 2013a).

Ένα περαιτέρω βήμα στην εξέλιξη του σχεδιασμού του μείγματος έγινε από τον Francis Hveem, ο οποίος βρήκε μια σχέση μεταξύ της διαβάθμισης και της ιδανικής ποσότητας συνδετικού υλικού. Η κύρια αντιπροσωπευτική ιδιότητα της διαβάθμισης ήταν η επιφάνεια των σωματιδίων. Ως εκ τούτου, ο Hveem μελέτησε και εφάρμοσε έως το 1932 μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλο με βάση την επιφάνεια των αδρανών. Επιπλέον, δεδομένου ότι ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε άσφαλο ήταν ανεπαρκής για να εγγυηθεί αρκετή αντοχή διάτμησης και σταθερότητα για να αντισταθεί στην παραμόρφωση, ο Hveem ανέπτυξε μια νέα δοκιμή σταθερότητας (Roberts et al., 2002).

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, εφαρμόστηκε ένα κατακόρυφο φορτίο σε ένα περιορισμένο δείγμα και καταγράφηκε η προκύπτουσα οριζόντια πίεση. Η ένταση των οριζόντιων τάσεων έδειξε τον βαθμό πλαστικότητας του μίγματος που δοκιμάζεται: ένα απόλυτα άκαμπτο στερεό θα μεταδώσει μηδενική πίεση, ενώ ένα τέλειο υγρό θα μεταδώσει μια οριζόντια πίεση ίση με την κατακόρυφη πίεση. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο ήταν δυνατός ο εντοπισμός σταθερών και ασταθών υλικών οδοστρώματος. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τα κενά αέρα δεν αποτελούσαν μέρος του συστήματος σχεδιασμού μίγματος Hveem. Ωστόσο, ενώ η δοκιμή αναπτύχθηκε, έγιναν συγκρίσεις μεταξύ πυρήνων πεδίου και δειγμάτων εργαστηρίου με ιδιαίτερη αναφορά στην πυκνότητα. Ήταν δυνατό να ανιχνευθεί ότι οι πυκνότητες πεδίου ήταν μεγαλύτερες και επομένως ήταν απαραίτητο να αναπαραχθεί μια δράση ζύμωσης στο

εργαστήριο παρόμοια με αυτή των κυλίνδρων πεδίου. Ο συμπιεστής ζύμωσης Καλιφόρνιας παρουσιάστηκε το 1938.

Το Superpave, το οποίο αντιπροσώπευε το Superior Performing Asphalt Pavements, ήταν ένα σύστημα σχεδιασμού ασφαλτικών μιγμάτων που αναπτύχθηκε ως μέρος του Στρατηγικού Ερευνητικού Προγράμματος Αυτοκινητοδρόμων (SHRP) από το 1987 έως το 1992. Το SHRP ήταν ένα ερευνητικό πρόγραμμα διάρκειας 5 ετών, αξίας 150 εκατομμυρίων δολαρίων, με στόχο τη βελτίωση το σύστημα αυτοκινητοδρόμων των Ηνωμένων Πολιτειών και τη βελτίωση της ασφάλειας των χρηστών και των εργαζομένων. Επικεντρώθηκε σε τέσσερα κύρια θέματα:

- Ασφαλτος
- Σκυρόδεμα και κατασκευές
- Λειτουργίες αυτοκινητοδρόμων (συντήρηση και ασφάλεια ζώνης εργασίας)
- Απόδοση οδοστρώματος (μακροπρόθεσμη μελέτη απόδοσης οδοστρώματος)

Στο θέμα της ασφάλτου, οι τρεις κύριοι στόχοι ήταν η ανάπτυξη προδιαγραφών για το συνδετικό υλικό ασφάλτου με βάση την απόδοση, ένα σύστημα σχεδιασμού ασφαλτικού μίγματος και μια σειρά δοκιμών για την πρόβλεψη απόδοσης (Huber, 2013b).

Όσον αφορά στον πρώτο στόχο, η προδιαγραφή συνδετικού ασφάλτου με διαβάθμιση απόδοσης (PG) ήταν ένα σημαντικό αποτέλεσμα της έρευνας. Όσον αφορά στους άλλους δύο στόχους, το σύστημα Superpave περιελάμβανε τρία επίπεδα αυξανόμενης πολυπλοκότητας που αναφέρονται ως σχεδιασμός μίξης επιπέδου 1, επιπέδου 2 και επιπέδου 3. Οι δύο τελευταίες περιελάμβαναν τις δοκιμές που βασίζονται στην απόδοση, οι οποίες τελικά, λόγω κόστους και πολυπλοκότητας, δεν εφαρμόστηκαν. Αντίθετα, η μέθοδος σχεδιασμού μείγματος επιπέδου 1 έγινε πολύ επιτυχημένη.

Ο σχεδιασμός του μείγματος επιπέδου 1 βασίστηκε σε εμπειρικές ιδιότητες αδρανών που σχετίζονται με την απόδοση, όπως όψεις και διαβάθμιση θρυμματισμένων αδρανών και ιδιότητες μείγματος, όπως κενά αέρα και κενά στα ορυκτά αδρανή. Αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιήθηκαν ως ιδιότητες υποκατάστατου μείγματος για να εξασφαλιστεί η επαρκής απόδοση (Cominsky et al., 1994). Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός επιπέδου 1 ορίστηκε ως

ογκομετρικός σχεδιασμός. Οι κύριες ογκομετρικές ιδιότητες που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο ήταν:

- Κενά αέρα
- Κενά σε ορυκτά αδρανή (VMA)
- Απορροφημένος όγκος ασφάλτου (V_{ba})
- Περιεκτικότητα σε άσφαλτο (P_b)
- Αποτελεσματικός όγκος ασφάλτου (V_{be})
- Κενά γεμάτα με άσφαλτο (VFA)

Η μέθοδος ογκομετρικού σχεδιασμού διαμορφώθηκε από τρεις κύριες φάσεις:

A. Επιλογή υλικών

B. Επιλογή δομής αδρανών σχεδιασμού (εκφρασμένη ως διαβάθμιση αδρανών)

Γ. Επιλογή περιεκτικότητας ασφάλτου σχεδιασμού

Κατά την επιλογή των αδρανών, η μέθοδος σχεδιασμού μίγματος Superpave απαιτούσε τήρηση τεσσάρων ιδιοτήτων αδρανών: γωνιότητα χονδροειδούς αδρανούς, γωνιότητα λεπτού αδρανούς, προσδιορισμός επίπεδων και επιμήκων σωματιδίων και περιεκτικότητα σε άργιλο. Μόλις τα διάφορα αδρανή αναμίχθηκαν μεταξύ τους, οποιαδήποτε διαβάθμιση του δοκιμαστικού μίγματος έπρεπε να περάσει μεταξύ προκαθορισμένων σημείων ελέγχου τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με το Ονομαστικό Μέγιστο Μέγεθος Συσσωματωμάτων (NMMAS) του μείγματος.

Το NMMAS ορίστηκε ως η διάσταση ενός κόσκινου μεγαλύτερη από το πρώτο κόσκινο που διατηρεί περισσότερο από το 10 τοις εκατό του αδρανούς. Το μέγιστο μέγεθος κόσκινου ορίστηκε ως ένα κόσκινο μεγαλύτερο από το NMMAS. Τα σημεία ελέγχου διαβάθμισης χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του ελάχιστου και του μέγιστου ποσοστού που διέρχεται από τα 75 μm (σκόνη), τα 2,36 ή 4,75 mm (άμμος), το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόσκινου και το μέγιστο μέγεθος κόσκινου. Για παράδειγμα, το σχήμα 6 δείχνει τα σημεία ελέγχου διαβάθμισης και τη λεγόμενη περιορισμένη ζώνη για μια διαβάθμιση NMMAS 12,5 mm. Η απαγορευμένη ζώνη

είχε δύο σκοπούς: τον περιορισμό των ποσοτήτων φυσικής άμμου που θα μπορούσαν να παράγουν αποκλίσεις στην καμπύλη διαβάθμισης στο εύρος των 600 μm και την αποφυγή αυτών των διαβαθμίσεων κοντά στη γραμμή μέγιστης πυκνότητας, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπαρκή κενά στα ορυκτά αδρανή (Kennedy et al., 1994).

Εν γένει το ασφαλτικό μείγμα μπορεί να είναι τριών τύπων:

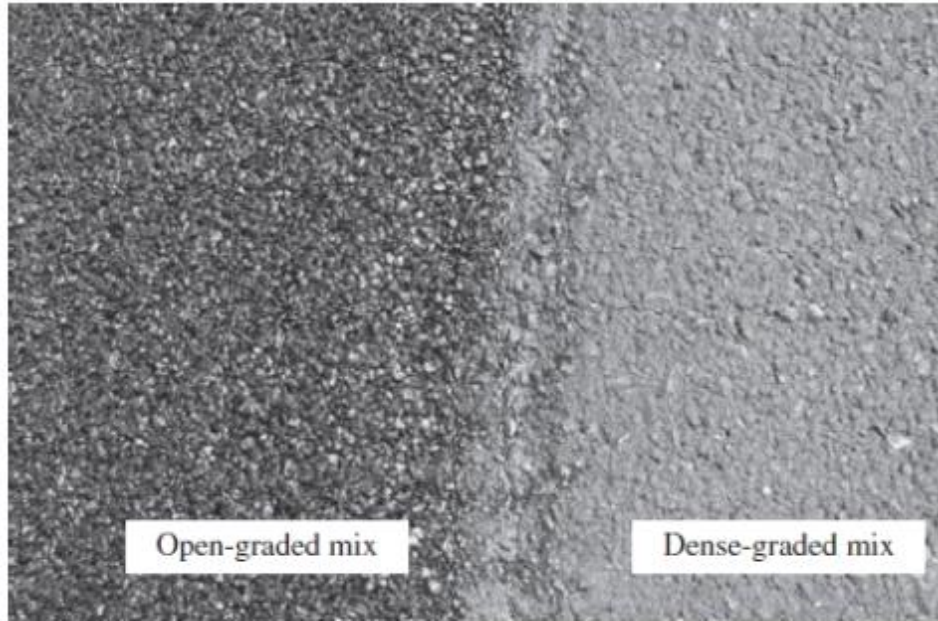
1. Θερμό ασφαλτικό μίγμα (HMA)
2. Ζεστό ασφαλτικό μίγμα (WMA)
3. Ψυχρό ασφαλτικό μίγμα (CMA)

3.3.2 Θερμό ασφαλτικό μίγμα (HMA)

Το ασφαλτικό μείγμα είναι κοινώς γνωστό ως άσφαλτος θερμής ανάμειξης (HMA), αν και είναι ένα είδος μείγματος AC. Το HMA είναι ένα μείγμα ασφαλτικού σκυροδέματος που παράγεται με θέρμανση του μείγματος σε ένα ορισμένο επίπεδο θερμοκρασίας, συνήθως 140–160°C. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μείγμα AC μπορεί επίσης να παραχθεί με θέρμανση ή ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα χωρίς θέρμανση

3.3.2.1 Μείγμα πυκνής διαβάθμισης

Ένα πυκνό μείγμα είναι ένα καλά διαβαθμισμένο HMA που προορίζεται για τυπική χρήση. Όταν σχεδιάζεται και κατασκευάζεται σωστά, ένα πυκνό μείγμα είναι σχετικά αδιαπέραστο. Τα πυκνά διαβαθμισμένα μείγματα αναφέρονται γενικά από το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος των αδρανών τους και μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν είτε ως λεπτής διαβάθμισης είτε ως χονδρόκοκκα. Τα μείγματα λεπτής διαβάθμισης έχουν περισσότερα λεπτά και σωματίδια μεγέθους άμμου από τα μείγματα χονδροειδούς διαβάθμισης. Είναι κατάλληλο για όλα τα στρώματα οδοστρώματος και για όλες τις κυκλοφοριακές συνθήκες και λειτουργεί καλά για δομικές ανάγκες, τριβές, ισοπέδωση και επιδιορθώσεις. Η εικόνα 23 δείχνει ένα οδόστρωμα με μείγματα πυκνής και ανοιχτής διαβάθμισης.



Εικόνα 23 Σύγκριση ανοιχτού (αριστερά) και κλειστού (δεξιά) AC

3.3.2.2 Open-Graded Friction Course (OGFC)

Το μείγμα ανοιχτής διαβάθμισης χρησιμοποιεί μόνο θρυμματισμένη πέτρα (ή χαλίκι) και ένα μικρό ποσοστό βιομηχανοποιημένης άμμου με περίπου 15% κενά αέρα. Χρησιμοποιείται μόνο για επιφανειακές στρώσεις για την παροχή καλής τριβής και πλευρικά διεισδυμένου νερού. Έτσι, μειώνει το πιτσίλισμα/ψεκασμό από τα ελαστικά σε υγρό καιρό και συνήθως έχει ως αποτέλεσμα πιο λείες επιφάνειες από το HMA πυκνής ποιότητας. Έχει επίσης ως αποτέλεσμα πιο λείες επιφάνειες από το HMA πυκνής διαβάθμισης και μειώνει τη θερμική ρηγμάτωση στο ασφαλτοστρωμένο οδόστρωμα (Islam et al., 2018b).

3.3.2.3 Σκληρομαστίχη (SMA)

Η σκληρομαστίχη, είναι ένα HMA που αναπτύχθηκε αρχικά στην Ευρώπη για να μεγιστοποιήσει την αντίσταση στην αυλάκωση και την ανθεκτικότητα. Ο στόχος του σχεδιασμού του μείγματος είναι να δημιουργηθεί επαφή πέτρα με πέτρα μέσα στο μείγμα. Δεδομένου ότι τα αδρανή δεν παραμορφώνονται τόσο πολύ όσο το συνδετικό υλικό ασφάλτου υπό το φορτίο, αυτή η επαφή πέτρα με πέτρα μειώνει σημαντικά τις αυλακώσεις. Το SMA είναι γενικά πιο ακριβό από ένα τυπικό HMA πυκνής διαβάθμισης επειδή απαιτεί πιο ανθεκτικά αδρανή, υψηλότερη περιεκτικότητα σε άσφαλτο και τροποποιημένο συνδετικό και ίνες

ασφάλτου. Χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της αντοχής και της αντοχής στην αυλάκωση. Το SMA χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για επιφανειακές διαδρομές σε διακρατικά πεζοδρόμια και δρόμους μεγάλου όγκου. Για την παραγωγή αυτού χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανή με διαβάθμιση διάκενου, τροποποιημένο συνδετικό ασφάλτου, πληρωτικό ινών κ.λπ.

3.3.3 Ζεστό ασφαλτικό μίγμα (WMA)

Η τεχνολογία ασφάλτου θερμού μίγματος επιτρέπει στους παραγωγούς υλικού ασφαλτικών οδοστρωμάτων να μειώσουν τις θερμοκρασίες στις οποίες το υλικό αναμειγνύεται και τοποθετείται στο δρόμο. Έχουν τεκμηριωθεί μειώσεις από 17–67°C. Τέτοιες δραστικές μειώσεις έχουν τα προφανή πλεονεκτήματα της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και της μείωσης της παραγωγής αερίων θερμοκηπίου. Η κατανάλωση καυσίμου κατά την κατασκευή του WMA συνήθως μειώνεται κατά 20%. Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα της μηχανικής περιλαμβάνουν την καλύτερη συμπίεση στο δρόμο, τη δυνατότητα ανασυρσης μίγματος λιθόστρωτων για μεγαλύτερες αποστάσεις και την επέκταση της περιόδου οδοστρώματος με τη δυνατότητα οδοστρώματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Οι τεχνολογίες WMA μειώνουν το ιξώδες (πάχος) του συνδετικού ασφάλτου, έτσι ώστε τα αδρανή ασφάλτου να μπορούν να επικαλυφθούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το κλειδί είναι η προσθήκη προσθέτων (με βάση το νερό, οργανικά, χημικά ή υβριδικά) στο ασφαλτικό μείγμα (Bonaquist, 2011). Τα πρόσθετα επιτρέπουν στα συνδετικά ασφάλτου και τα αδρανή ασφάλτου να αναμειγνύονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η μείωση του ιξώδους κάνει επίσης το μείγμα ευκολότερο στον χειρισμό και τη συμπίεση σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

3.3.4 Ψυχρό ασφαλτικό μίγμα (CMA)

Το ασφαλτικό σκυρόδεμα ψυχρής ανάμιξης σχηματίζεται με γαλακτωματοποίηση της ασφάλτου με (ουσιαστικά) σαπούνι σε νερό πριν από την ανάμιξη με το αδρανή. Ενώ στην γαλακτωματοποιημένη κατάσταση η ασφαλτος είναι λιγότερο παχύρρευστη και το μείγμα είναι εύκολο στην επεξεργασία και συμπαγές. Το γαλάκτωμα θα σπάσει αφού εξατμιστεί αρκετό νερό και το κρύο μείγμα θα λάβει, ιδανικά, τις ιδιότητες του HMA. Το κρύο μείγμα χρησιμοποιείται συνήθως ως υλικό επικάλυψης και σε δρόμους εξυπηρέτησης με μικρότερη κυκλοφορία. Συνήθως, βασίζεται σε δύο τύπους τοποθεσίας επεξεργασίας: επεξεργασία κεντρικού εργοστασίου και ανακύκλωση εν ψυχρώ. Στην επεξεργασία των κεντρικών εγκαταστάσεων, οι αλεσμένες άσφαλτοι μεταφέρονται σε μια μονάδα, κοσκινίζονται και

αναμειγνύονται οι γαλακτωματοποιητές. Το παραγόμενο μείγμα μεταφέρεται πίσω στην τοποθεσία, τοποθετείται και συμπιέζεται. Η ανακύκλωση εν ψυχρώ παράγεται επιτόπου. Οι αλεσμένες άσφαλτες κοσκινίζονται σε ένα μεγάλο φορτηγό επί τόπου, αναμειγνύονται, τοποθετούνται και συμπιέζονται με γαλακτωματοποιητές. Τα συμπιεσμένα κρύα μείγματα μοιάζουν με τα συμβατικά μείγματα.. Οι σωστές χρήσεις της ασφάλτου ψυχρής ανάμειξης είναι πολύ ανταγωνιστικές με τα συμβατικά μείγματα όταν χρησιμοποιούνται για δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας (Islam et al., 2018a).

Κεφάλαιο 4^ο: Ανακύκλωση οδοστρώματος

Με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η ζήτηση έχει αυξηθεί δραματικά στο οδικό δίκτυο. Ωστόσο, η ανάγκη για υψηλών απαιτήσεων οδοστρώματα αποτελεί πρόκληση λόγω της μείωσης των διαθέσιμων κονδυλίων. Το κόστος κατασκευής θεωρείται ότι είναι μέγιστο κατά τη στιγμή της κατασκευής ή/και επέκτασης του οδοστρώματος. Ωστόσο, δίνεται λιγότερη προσοχή στο μελλοντικό κόστος συντήρησης. Μετά από μερικά χρόνια λειτουργίας, προκύπτουν δύο ταυτόχρονα προβλήματα στο οδόστρωμα:

- Το οδόστρωμα απαιτεί κάποια συντήρηση λόγω φθοράς
- Αυξάνεται ο όγκος της κυκλοφορίας

Η παρουσία αυτών των δύο προβλημάτων ελλείπει συντήρησης θα έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία φθορά του οδοστρώματος. Εάν τα διαθέσιμα κεφάλαια δεν επαρκούν για να καλύψουν την αυξημένη ζήτηση και τις αυξημένες ανάγκες για συντήρηση, θα υπάρξει σημαντική μείωση της ποιότητας και του επιπέδου εξυπηρέτησης του οδικού δικτύου. Τελικά, αυτό οδηγεί σε υψηλότερη συνολική προληπτική συντήρηση και υψηλότερο κόστος αποκατάστασης ή ανακατασκευής. Έρευνα της Παγκόσμιας Τράπεζας δείχνει ότι κάθε \$1,00 που δαπανάται στην πρώτη μείωση κατά 40% στην ποιότητα του οδοστρώματος έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση \$3,00 έως \$4,00 σε σχέση με την επένδυση που αναμένεται στη μείωση της ποιότητας κατά 80% (ARRA, 2015).

Η αποκατάσταση ή η ανακύκλωση μπορεί να περιγραφεί ως μέτρο για τη βελτίωση ή την ενίσχυση υφιστάμενων οδοστρωμάτων, έτσι ώστε μόνο η τακτική συντήρηση να αρκεί για την διατήρησή τους σε λειτουργία (ITS, 2000). Η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων επιφέρει τα ακόλουθα οφέλη:

- Εξοικονόμηση φυσικών πόρων
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Διατήρηση και προστασία περιβάλλοντος
- Εξοικονόμηση κεφαλαίων

Το οδόστρωμα αποτελείται από αδρανή υλικά, συνδετικό υλικό ασφάλτου και μερικά πρόσθετα. Συνολική επαναχρησιμοποίηση σημαίνει αποθήκευση μιας συνολικής πηγής (για παράδειγμα ενός βουνού). Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν συνδετικό υλικό ασφάλτου. Τα νέα αδρανή απαιτούν περίπου 4% έως 6% συνδετικού ασφάλτου για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού του μείγματος. Ωστόσο, ένας σωρός ανακυκλωμένων αδρανών απαιτεί συνδετικό ασφάλτου μεταξύ 1% και 3% κατά βάρος του μείγματος (Nikolaides, 2015). Ο Schwartz (2016) ανέφερε ότι η τεχνολογία ανακύκλωσης εν ψυχρώ και στο πεδίο (CIR) του ασφαλτοστρώματος εξοικονομεί 60% ασφαλικό συνδετικό υλικό σε σύγκριση με το συμβατικό νέο ασφαλικό μείγμα.

Η κατανάλωση ενέργειας στην κατασκευή οδοστρωμάτων σχετίζεται με την παραγωγή αδρανών και ασφάλτου, τη μεταφορά, την επεξεργασία, τη θέρμανση, την ανάμειξη, την τοποθέτηση και τη συμύκνωση.

Λιγότερα νέα υλικά σημαίνει λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα παράγονται από τη χρήση ενέργειας για την παραγωγή αδρανών και ασφάλτου, τη μεταφορά, την επεξεργασία, τη θέρμανση, την ανάμειξη, την τοποθέτηση και τη συμπίεση. Η ανακύκλωση των υλικών του οδοστρώματος εξοικονομεί την εκπομπή αυτού του ρύπου. Για παράδειγμα, η χρήση ασφαλικού οδοστρώματος CIR είναι φιλική προς το περιβάλλον καθώς μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως και 9% σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μείγματα HMA. μόνο στη διαδικασία της ανακύκλωσης, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι 54% χαμηλότερες (Giani et al., 2015). Ο Schwartz (2016) δήλωσε ότι οι

τεχνολογίες CIR και ψυχρής ανακύκλωσης κεντρικών εγκαταστάσεων (CCPR) μείωσαν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 80% και 42%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τις συμβατικές εφαρμογές HMA.

4.1 Υλικά ανακύκλωσης οδοστρώματος

4.1.1 Ανακυκλωμένο/ανακτώμενο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP)

Το ανακτώμενο ή ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα είναι η απόξεση ασφαλτικής στρώσης από υφιστάμενο οδόστρωμα που περιέχει αδρανή και συνδετικό ασφαλτικό υλικό. Με φρεζάρισμα του παλαιού οδοστρώματος, λαμβάνεται το RAP όπως φαίνεται στην εικ. 24, κοσκινίζεται και αναμιγνύεται με τα νέα αδρανή. Σήμερα, έως και 40% κατά βάρος ολόκληρου του μείγματος χρησιμοποιείται στις Ηνωμένες Πολιτείες (Hasan et al., 2018; Islam et al., 2014). Καθώς το RAP έχει κάποια ποσότητα παλαιωμένου-άκαμπτου συνδετικού, το τελικό μίγμα προκύπτει να έχει μεγαλύτερη σκληρότητα. Επομένως, επιδιώκεται ένας αναθεωρημένος σχεδιασμός μίγματος εάν το μίγμα έχει σημαντική ποσότητα RAP.



Εικόνα 24 Συλλογή RAP από οδόστρωμα

Η ποσότητα του RAP που χρησιμοποιήθηκε σε ασφαλτικά μείγματα ήταν 66,7 εκατομμύρια τόνοι το 2011, αύξηση 19% σε σχέση με το 2009 (56 εκατομμύρια τόνοι) και αύξηση περίπου 7% σε σχέση με το 2010 (62,1 εκατομμύρια τόνοι). Υποθέτοντας 5% άσφαλο στο RAP, αυτό αντιπροσωπεύει περίπου 3,6 εκατομμύρια τόνους παρθένου συνδετικού ασφάλτου που έχουν διατηρηθεί ή περίπου το 12% του συνολικού συνδετικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε το 2011. Εξετάζοντας τα δεδομένα των ΗΠΑ του 2011, περίπου 87 εκατομμύρια τόνοι RAP

ανακτήθηκαν από υπάρχοντα οδοστρώματα και αξιοποιήθηκαν στην προετοιμασία περίπου 74 εκατομμύρια τόνων RAP (92%). Για τα έτη 2009 έως 2011, το RAP που δεν ανακυκλώθηκε σε AC χρησιμοποιήθηκε για βάση αδρανών (λιγότερο από 10% ετησίως) και ψυχρό μείγμα (λιγότερο από 3% ετησίως) και λιγότερο από 0,1% οδηγήθηκε σε υγειονομική ταφή (Hansen, Copeland, 2013) .

Το RAP έχει χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση παρθένων υλικών σε ασφαλτικό μίγμα κλειστού τύπου σε ποσοστό έως και 50%. Ωστόσο, όπου η συμπεριφορά του μείγματος είναι πιο κρίσιμη, όπως σε επιφανειακές στρώσεις ασφάλτου, το επίπεδο αντικατάστασης είναι συχνά χαμηλότερο. Με βάση την αξιολόγηση κινδύνου, πολλοί φορείς θέτουν όρια στο πόσο RAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικές εφαρμογές. Γενικά, η αντικατάσταση έως και 15% θεωρείται ότι έχει ελάχιστες επιπτώσεις στις ιδιότητες. Οι περισσότεροι κρατικοί φορείς αυτοκινητοδρόμων επιτρέπουν έως και 15% ή 30% αντικατάσταση για δομικά στρώματα και μερικοί επιτρέπουν επίσης αυτά τα ποσά για επιφανειακά στρώματα. Η μέση περιεκτικότητα σε RAP σε μείγματα AC στις Ηνωμένες Πολιτείες την περίοδο 2009–2010 ήταν περίπου 13% για τα μείγματα του Υπουργείου Μεταφορών των ΗΠΑ (DOT), 15% για μείγματα άλλων πρακτορείων και 18% για μείγματα οδοστρώματος εμπορικών και οικιακών (Hansen και Newcomb, 2011).

4.1.2 Ανακυκλωμένο/ανακτώμενο ασφαλτόστρωμα (RAP) σε Βάση και Υποβάση

Εκτός από το μείγμα ασφάλτου, οι χρήσεις του RAP σε βάση ή υποβάση αδρανών γίνονται επίσης δημοφιλείς στις μέρες μας (Hasan et al., 2018; Islam et al., 2014; Tarefder, Islam, 2015). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους το RAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επίπεδα βάσης και υποβάσης. Μια προσέγγιση είναι η επεξεργασία των εγκαταστάσεων όπου το ανακτημένο υλικό μεταφέρεται, συνθλίβεται και κοσκινίζεται σε μια κεντρική μονάδα. Το καλύτερης ποιότητας RAP χρησιμοποιείται με τη νέα παραγωγή ασφαλτομείγματος όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το κατώτερης ποιότητας RAP προστίθεται στη συνέχεια με τα παρθένα υλικά βάσης ή υποβάσης. Βελτιώνει την αντοχή της βάσης και της υποβάσης. Περίπου το 50% του RAP αναμιγνύεται με παρθένα αδρανή για να παραχθεί αυτό το τελικό μείγμα.

4.1.3 Ανακτημένες ζώνες ασφάλτου (RAS)

Οι ανακυκλωμένες ζώνες ασφάλτου συλλέγονται από μέρη στέγης και επαναχρησιμοποιούνται στο οδόστρωμα και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να βελτιώσουν την ποιότητα. Μια ζώνη

μπορεί να περιέχει από 20% έως 36% άσφαλτο. Αυτή η άσφαλτος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση αδρανών όπως η συμβατική άσφαλτος. Τα απόβλητα από βότσαλα είτε από τον κατασκευαστή είτε από την αποκοπή στέγης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξοικονόμηση παρθένας ασφάλτου και την αποφυγή χωματερών από αδρανή. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι το RAS έχει αυξημένη αντοχή στην αυλάκωση, μειωμένη ρωγμή και απαιτεί λιγότερη προσπάθεια συμπίεσης (Roque et al. 2018).

4.1.4 Καουτσούκ ασφαλτικού σκυροδέματος (RAC)

Το ελαστικό ασφαλτομπετόν, γνωστό και ως ασφαλτικό καουτσούκ ή απλώς καουτσούκ άσφαλτού, είναι υλικό οδοστρώματος που μειώνει τον θόρυβο που αποτελείται από κανονικό AC αναμεμειγμένο με κομμάτια από ανακυκλωμένα ελαστικά. Περίπου 2,4 εκατομμύρια ελαστικά ανακυκλώνονται κάθε χρόνο ως καουτσούκ ασφάλτου και αναμένεται να αναπτυχθούν (Dower et al., 1985). Το RAC κατασκευάζεται με την ανάμειξη ανακυκλωμένων ελαστικών με άσφαλτο για την παραγωγή ενός συνδετικού υλικού που στη συνέχεια αναμιγνύεται με συμβατικά αδρανή υλικά. Αυτό το μείγμα στη συνέχεια τοποθετείται και συμπακνώνεται σε ένα οδόστρωμα. Το RAC είναι μια οικονομικά αποδοτική, βιώσιμη, ασφαλής και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά υλικά οδοστρώματος. Οι επιδόσεις του RAC είναι πολύ παρόμοιες με τα συμβατικά υλικά ασφάλτου αλλά χρειάζεται μηχανήματα παραγωγής.

4.2 Μέθοδοι ανακύκλωσης

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, η ανακύκλωση του ασφαλτοστρώματος έχει αυξηθεί σε δημοτικότητα, κυρίως λόγω των υψηλότερων τιμών του πετρελαίου. Η ανακύκλωση των παλαιών οδοστρωμάτων ήταν παλαιότερα πιο δαπανηρή από την τοποθέτηση νέας ασφάλτου θερμού μίγματος (HMA) (Roberts et al., 1996). Η εφεύρεση των μηχανών φρεζαρίσματος έχει βελτιώσει τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της ανακύκλωσης του ασφαλτικού οδοστρώματος σε σύγκριση με την κατασκευή νέου (Cross, Jakatimath, 2007). Δεδομένου αυτού, οι κατασκευαστές εξοπλισμού και οι κατασκευαστικές βιομηχανίες ενδιαφέρθηκαν να αναπτύξουν τις μεθόδους και τις τεχνικές ανακύκλωσης ασφάλτου και έκτοτε η διαδικασία ανακύκλωσης παρουσιάζει εκθετική αύξηση (ARRA, 2015).

Ο ARRA (2015) κατηγοριοποίησε τις διάφορες μεθόδους ανακύκλωσης ασφάλτου σε πέντε ευρείες κατηγορίες:

- Θερμή ανακύκλωση (Hot Recycling - HR)
- Επιτόπου Ανακύκλωση εν θερμώ (Hot In-Place Recycling - HIR)
- Ανάκτηση πλήρους βάθους (Full-Depth Reclamation - FDR)
- Ψυχρή ανακύκλωση (Cold Recycling - CR)

Οι προσεγγίσεις ανακύκλωσης ασφάλτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα έργα αποκατάστασης δρόμων σε συνδυασμό μεταξύ τους. Για παράδειγμα, το ανώτερο τμήμα ενός υπάρχοντος οδοστρώματος θα μπορούσε να αφαιρεθεί μέσω πλάνισματος και το προκύπτον ανακτημένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP) θα μπορούσε να αποθηκευτεί στο εργοστάσιο ασφάλτου. Όταν προετοιμαστεί, η κρύα επιφάνεια μετά το πλάνισμα θα μπορούσε να επικαλυφθεί με HMA που περιέχει το RAP. Αντίθετα, η εκτεθειμένη επιφάνεια μετά το πλάνισμα θα μπορούσε να ήταν HIR ή FDR πριν τοποθετηθεί το ανακυκλωμένο μείγμα για να μειώσει ή να αφαιρέσει τις επιπτώσεις της ρώγμωσης.

4.2.1 Θερμή ανακύκλωση

Η θερμή ανακύκλωση (HR) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανακύκλωσης ασφάλτου στον κόσμο. Οι Ηνωμένες Πολιτείες παράγουν περισσότερους από 100 εκατομμύρια τόνους RAP. Περίπου το 15% έως 30% αυτής της παραγωγής χρησιμοποιείται στη θερμή ανακύκλωση (ARRA, 2015). Η εν θερμώ ανακύκλωση είναι η μέθοδος ανάμειξης της αλεσμένης RAP με φρέσκα αδρανή και ένα ανακυκλωμένο μείγμα ασφαλτικού συνδετικού υλικού υπό θέρμανση σε μια μονάδα. '

Το συνδετικό υλικό ασφάλτου στο RAP λιώνει πρώτα μετά τη θέρμανση του RAP. Στη συνέχεια προστίθενται τα νέα αδρανή και το συνδετικό υλικό και αναμειγνύονται επιμελώς. Μεταφέρεται, τοποθετείται και συμπιέζεται μόλις αναμειχθεί με συμβατικό εξοπλισμό HMA. Σήμερα, αυτή η μέθοδος είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη πρακτική.

Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα του HR περιλαμβάνουν τα εξής:

- Παρόμοια απόδοση με τα οδοστρώματα που κατασκευάζονται με όλα τα νέα υλικά, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους οδοστρωμάτων
- Επαναχρησιμοποίηση αδρανών και συνδετικού υλικού, που εξοικονομεί φυσικά αδρανή, συνδετικό υλικό και ενέργεια για την παραγωγή του
- Δεν χρειάζεται για την απόρριψη της αλεσμένης RAP

Μερικά από τα κύρια μειονεκτήματα του HR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Προβλήματα με την υπάρχουσα διαβάθμιση αδρανών ή/και συνδετικού ασφάλτου ενδέχεται να αντικατοπτρίζονται στη νέα στρώση.
- Η υπερβολική ποσότητα RAP παράγει ένα πιο άκαμπτο μείγμα και έτσι οδηγεί σε θερμική πυρόλυση.
- Το κόστος μεταφοράς περιλαμβάνεται κατά τη μεταφορά από και προς το εργοστάσιο

4.2.2 Ανακύκλωση εν θερμώ

Η ανακύκλωση εν θερμώ (HIR) διεξάγεται για οδόστρωμα με λιγότερες φθορές σε σύγκριση με το οδόστρωμα που απαιτεί HR. Στο HIR, όλη η ανακύκλωση του ασφαλτοστρώματος ολοκληρώνεται επιτόπου. Το φθαρμένο επιφανειακό στρώμα σε βάθος 19 έως 75 mm θερμαίνεται και μαλακώνει, αλέθεται, αναμιγνύεται καλά μέσα στο φορτηγό ανάμιξης και συμπιέζεται με συμβατικό εξοπλισμό επίστρωσης HMA.

Εάν απαιτείται, είναι δυνατό να προστεθούν παρθένα αδρανή, νέα συνδετικά ασφάλτου, παράγοντες ανακύκλωσης ή/και νέα HMA. Γενικά, τα παρθένα αδρανή ή η πρόσθετη προσθήκη HMA περιορίζονται σε λιγότερο από 30% κατά μάζα μίγματος HIR λόγω περιορισμών στον εξοπλισμό. Μια ανάλυση των τρεχουσών ιδιοτήτων του ασφαλτοστρώματος και οι επακόλουθοι σχεδιασμοί εργαστηριακού μίγματος θα αξιολογήσουν τα πρόσθετα επίπεδα των διαφόρων προσθέτων για να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τις κατάλληλες απαιτήσεις ανάμιξης.

Με βάση τη διαδικασία που χρησιμοποιείται, είναι δυνατές τρεις υποκατηγορίες HIR:

- Επιφανειακή ανακύκλωση
- Επανάμιξη

- Επανάστρωση

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στη διαδικασία HIR κατά την οποία η φθαρμένη επιφάνεια του οδοστρώματος θερμαίνεται, μαλακώνει και λειαίνεται και αναμειγνύεται ο παράγοντας ανακύκλωσης (εάν απαιτείται) και το χαλαρό ανακυκλωμένο μείγμα αναμειγνύεται επιμελώς με την τυπική επίστρωση επίστρωσης. Δεν προστίθενται αδρανή ή συνδετικό εκτός από τον παράγοντα ανακύκλωσης. Το βάθος ανακύκλωσης τυπικά κυμαίνεται από 20 έως 40 mm. Σε μια επακόλουθη λειτουργία, συνήθως τοποθετείται μια επιφανειακή επίστρωση, όπως μια στεγανοποίηση τσιπ ή επικάλυψη HMA.

Η δεύτερη περίπτωση είναι παρόμοια με την πρώτη, αλλά νέα υλικά (αδρανή και συνδετικό υλικό) προστίθενται επιπλέον του παράγοντα ανακύκλωσης. Πιο συγκεκριμένα, η ανάμειξη HIR είναι η διαδικασία κατά την οποία το υπάρχον φθαρμένο ασφαλτικό οδόστρωμα θερμαίνεται, μαλακώνει και παρθένα αδρανή, νέο συνδετικό υλικό ασφάλτου, παράγοντας ανακύκλωσης ή/και νέο HMA προστίθενται (όπως απαιτείται) και το προκύπτον μίγμα αναμειγνύεται καλά και στη συνέχεια στρώνεται. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως όταν οι υπάρχουσες ιδιότητες του οδοστρώματος απαιτούν σημαντικές τροποποιήσεις σε σύγκριση με την ανακύκλωση επιφανειών. Τα βάρη επεξεργασίας κυμαίνονται γενικά από 25 έως 50 mm για επαναμίξη ενός σταδίου. Μια επιφανειακή επίστρωση, όπως μια σφράγιση ή η επικάλυψη HMA τοποθετείται συνήθως σε μια μεταγενέστερη λειτουργία παρόμοια με την ανακύκλωση επιφανειών.

Η επανάμιξη ταξινομείται περαιτέρω σε δύο τύπους:

- Ενός σταδίου
- Πολλαπλών σταδίων.

Στη μέθοδο ενός σταδίου, η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω εκτελείται μία φορά. Η διαδικασία θέρμανσης, αποσκλήρυνσης και αποσκλήρυνσης του υπάρχοντος ασφαλτικού οδοστρώματος επαναλαμβάνεται αρκετές φορές με τη μέθοδο επαναμίξης πολλαπλών σταδίων μέχρι να επιτευχθεί το πλήρες βάθος επεξεργασίας. Το ανακτώμενο επιφανειακό υλικό από κάθε στάδιο τοποθετείται σε ένα σωρό για να επιτρέψει στο υποκείμενο στρώμα να θερμανθεί. Επιπλέον, εκτός από τον παράγοντα ανακύκλωσης, μπορεί να εφαρμοστεί νέο αδρανές και

συνδετικό υλικό. Στη συνέχεια, ολόκληρο το ανακυκλωμένο μείγμα αναμειγνύεται επιμελώς και τοποθετείται επί τόπου.

Η επίστρωση είναι η μέθοδος ανακύκλωσης ή αναμίξεως της επιφάνειας με την τοποθέτηση της νέας επίστρωσης HMA. Το πάχος του οδοστρώματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Η επίστρωση ταξινομείται περαιτέρω σε δύο τύπους:

- Μονοβάθμια
- Πολυβάθμια

Ένα μηχάνημα εξοπλισμένο με δύο επιστρωτές χρησιμοποιείται για επικάλυψη μονής διέλευσης. Το πρώτο επίστρωμα τοποθετεί το ανακυκλωμένο μείγμα πάνω από το ανακυκλωμένο μείγμα ενώ το δεύτερο επίστρωμα τοποθετεί το νέο στρώμα HMA. Στη συνέχεια οι δύο στρώσεις συμπιέζονται. Στη μέθοδο πολλαπλών σταδίων, το επιφανειακό ανακυκλωμένο μίγμα τοποθετείται με τη μονάδα τοποθέτησης και διάστρωσης στο σωστό διαμήκη προφίλ και εγκάρσια κλίση. Στη συνέχεια, το νέο υλικό επικάλυψης HMA τοποθετείται αμέσως αξιοποιώντας τις παραδοσιακές τεχνικές. Στη συνέχεια, τα δύο στρώματα συμπιέζονται ταυτόχρονα. Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα του HIR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Επαναχρησιμοποίηση αδρανών και συνδετικού υλικού, που εξοικονομεί φυσικά αδρανή, συνδετικό υλικό και ενέργεια για την παραγωγή του.
- Δεν χρειάζεται η απόρριψη του RAP.
- Δεν χρειάζεται η μεταφορά του RAP. Επομένως, δεν υπάρχουν προβλήματα απόρριψης.
- Αποκαθιστά την τριβή και αφαιρεί μικρές τάλαιπωρίες όπως αυλάκια, λακκούβες, ραγάδες, ανωμαλίες επιφάνειας και οξειδωμένο συνδετικό ασφάλτου.
- Η δομική αντοχή και ακεραιότητα παραμένουν ανέπαφα ή αυξάνονται.
- Η επιτόπια κατασκευή μειώνει τις διακοπές κυκλοφορίας σε σύγκριση με το HR.
- Εξοικονόμηση κόστους και λιγότερο επικίνδυνο.

Μερικά από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του HIR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Απαιτείται μεγάλος, ειδικά εξοπλισμένος και δαπανηρός εξοπλισμός.
- Δεν υπάρχουν τόσες πολλές επιλογές για νέα υλικά.
- Ο ποιοτικός έλεγχος δεν είναι τόσο καλός όσο για το HR.
- Κατάλληλο μόνο για επεξεργασία λεπτής στρώσης.

4.2.3 Ψυχρό πλάνισμα

Το ψυχρό πλάνισμα (Cold Planning - CP), είναι η αφαίρεση του απαιτούμενου βάθους του υπάρχοντος οδοστρώματος για τη διόρθωση της αυλάκωσης, τη μείωση της διαροής της ασφάλτου, την αφαίρεση αστοχιών, τη σωστή κλίση (διαμήκη προφίλ και εγκάρσια κλίση). κ.λπ.

Αυτή η δραστηριότητα πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένου εξοπλισμού που ονομάζεται ψυχρή πλάνη. Αμέσως μετά την επεξεργασία, το οδόστρωμα μπορεί να ανοίξει αμέσως για κανονική κυκλοφορία. Το οδόστρωμα μπορεί επίσης να υποστεί επεξεργασία ή να επικαλυφθεί με μία από τις άλλες μορφές ανακύκλωσης ασφάλτου. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ γρήγορη και οδηγεί σε μικρότερη όχληση του κοινού λόγω του μικρού χρόνου που ο δρόμος δεν λειτουργεί. Το RAP που δημιουργείται κατά τη λειτουργία του CP αφαιρείται στο πεδίο και, όπως και άλλα RAP, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους. Στη συνέχεια, το RAP ανακυκλώνεται περαιτέρω ή θα μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί ως αδρανή βάση για την κατασκευή και διαπλάτυνση δρόμων, επενδύσεις τάφρων, επισκευές πεζοδρομίων ή επιφάνειες οδοστρώματος χωρίς σκόνη, κ.λπ.

Μερικά από τα κύρια οφέλη της CP περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Αφαίρεση φθαρμένων επιφανειών
- Αφαίρεση οξειδωμένης ασφάλτου
- Διόρθωση διαμήκους προφίλ και εγκάρσιας κλίσης
- Απομάκρυνση κάποιων φθορών όπως αυλακώσεις, ρυτιδώσεις, αυλάκωση και αιμορραγία Αποκατάσταση αποστράγγισης
- Αποκατάσταση τριβής

Μερικά από τα κύρια μειονεκτήματα του CP περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Η επιφάνεια του οδοστρώματος που προκύπτει παράγει θόρυβο κατά την χρήση.
- Καθώς το πάχος του επιφανειακού στρώματος μειώνεται, η χωρητικότητα της δομής του οδοστρώματος μπορεί να μειωθεί.
- Η λειτουργία μπορεί να δημιουργήσει σκόνη, η οποία είναι ενοχλητική για τη γύρω περιοχή.
- Το CP είναι δύσκολο να λειτουργήσει για πιο άκαμπτη άσφαλτο.

4.2.4 Ανάκτηση πλήρους βάθους

Η ανάκτηση πλήρους βάθους (FDR) σημαίνει ότι το πλήρες βάθος της ασφατικής στρώσης και σε ορισμένες περιπτώσεις, μέρη της υποκείμενης στρώσης βάσης/υποβάσεως/στρώσης έδρασης ανακτώνται, αναμειγνύονται και συμπιέζονται στη θέση τους ως νέο στρώμα βάσης. Το αναμειγμένο υλικό δεν θερμαίνεται. Μάλλον, μπορεί να σταθεροποιηθεί με ένα ευρύ φάσμα ξηρών ή υγρών σταθεροποιητικών παραγόντων ή μπορεί ακόμη και να είναι μη επεξεργασμένο βασικό στρώμα.

Μερικά από τα κοινώς χρησιμοποιούμενα πρόσθετα είναι το τσιμέντο, το ασφατικό γαλάκτωμα, η ιπτάμενη τέφρα, η αφρώδης άσφαλτος, ο ασβέστης, το χλωριούχο ασβέστιο, το χλωριούχο μαγνήσιο κ.λπ. ή ένας συνδυασμός αυτών. Τα βάθη επεξεργασίας ποικίλλουν μεταξύ 100 και 300 mm από κοινού.

Το FDR αξιολογείται σε οδοστρώματα με σοβαρές ζημιές στο υποκείμενο στρώμα βάσης/υποβάσεως/στρώσης έδρασης. Η σταθεροποίηση του ανακτημένου οδοστρώματος μπορεί να γίνει με μηχανικά, χημικά ή ασφατικά μέσα. Οι μέθοδοι μηχανικής σταθεροποίησης περιλαμβάνουν την προσθήκη των ακόλουθων:

- Παρθένα αδρανή
- Ανακυκλωμένο ασφατικό οδόστρωμα (RAP)
- Θρυμματισμένο σκυρόδεμα τσιμέντου Πόρτλαντ (PCC)

Η χημική σταθεροποίηση επιτυγχάνεται με την προσθήκη των εξής:

- Ασβέστης
- τσιμέντο Portland
- Τέφρα
- Σκόνη από κλίβανο τσιμέντου
- Ασβέστιο/χλωριούχο μαγνήσιο
- Άλλα αποκλειστικά χημικά προϊόντα

Η ασφαλική σταθεροποίηση μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των παρακάτω:

- Υγρή άσφαλτος
- Ασφαλικό γαλάκτωμα
- Αφρώδης άσφαλτος

Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν συνδυασμοί και των τριών. Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα του FDR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Επαναχρησιμοποίηση αδρανών και συνδετικού υλικού, που εξοικονομεί φυσικά αδρανή, συνδετικό υλικό και ενέργεια για την παραγωγή του.
- Δεν χρειάζεται η απόρριψη του ανακτώμενου RAP.
- Δεν χρειάζεται η μεταφορά του ανακτώμενου RAP, επομένως, δεν υπάρχουν προβλήματα απόρριψης.
- Εξάλειψη χτυπημάτων και βυθίσεων, αυλακώσεων, λακκούβων, μπαλωμάτων και ρωγμών.
- Η μειωμένη αντοχή των στρώσεων βάσης/υποβάσεως/υποβάθρου μπορεί να διορθωθεί με σταθεροποίηση.
- Σημαντική δομική βελτίωση με την προσθήκη σταθεροποιητικού(ων) πρόσθετου(ων).
- Παράγει παχιά, δεμένα στρώματα που είναι ομοιογενή.

- Επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή(ες) τύπου και πάχους επιφάνειας φθοράς.
- Παρέχει σημαντική δομική βελτίωση.
- Βελτιώνει την ομαλότητα και την ποιότητα οδήγησης.

Μερικά από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του FDR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Προβλήματα με την υπάρχουσα διαβάθμιση αδρανών ή/και συνδετικό ασφάλτου μπορεί να παρουσιαστούν και στη νέα στρώση.
- Ακριβό καθώς ανακτάται όλο το βάθος.
- Δεν είναι κατάλληλο για χώρους με προβλήματα αποχέτευσης.
- Το έδαφος με υψηλή πλαστικότητα μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση.
- Δεν συνιστάται για δρόμους με καθημερινή κίνηση άνω των 20.000 οχημάτων.

4.2.5 Ψυχρή ανακύκλωση

Η ψυχρή ανακύκλωση (CR) είναι η επεξεργασία των υφιστάμενων οδοστρωμάτων HMA για την ανάκτηση στρώσεων χωρίς θέρμανση των ασφαλτικών υλικών. Μια μηχανή φρεζαρίσματος εξάγει την επιφανειακή στρώση σε βάθος 50 έως 100 mm HMA, και επεξεργάζεται το αλεσμένο υλικό για να επιτύχει την απαιτούμενη διαβάθμιση.

Το αλεσμένο υλικό συνδυάζεται με συνδετικά πρόσθετα όπως γαλάκτωμα, τσιμέντο, ασβέστης ή τέφρα. Στη συνέχεια, το μείγμα τοποθετείται ξανά στο οδόστρωμα και στρώνεται στο τελικό πάχος. Εάν ο όγκος της κυκλοφορίας είναι σχετικά υψηλός, μπορεί να προστεθεί στεγανοποίηση ομίχλης ή λεπτή επικάλυψη μετά τη συμπίκνωση του μείγματος. Δύο υποκατηγορίες εντός του CR χρησιμοποιούνται για τον περαιτέρω ορισμό του CR βάσει της χρησιμοποιούμενης διαδικασίας:

- Ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση (CIR)
- Ψυχρή ανακύκλωση κεντρικής μονάδας (CCPR)

Στο CIR, όλες οι λειτουργίες όπως η άλεση, η διαλογή και η ανάμειξη προσθέτων εκτελούνται επί τόπου μέσα σε μεγάλο φορτηγό. Αφού αναμειχθεί καλά, το μείγμα τοποθετείται και

συμπυκνώνεται. Στο CCPR, το φρεζάρισμα μεταφέρεται σε κεντρική μονάδα. Όλες οι επεξεργασίες αυτής της άλεσης, όπως τα πρόσθετα κοσκινίσματος, διαβάθμισης και ανάμειξης πραγματοποιούνται στο εργοστάσιο. Στη συνέχεια, το μείγμα μεταφέρεται στην τοποθεσία, και τοποθετείται παρόμοια με το συμβατικό οδόστρωμα. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι ο δυναμικός συντελεστής CIR είναι περίπου το μισό του συμβατικού μείγματος σε χαμηλή θερμοκρασία και είναι περίπου ίσος με το συμβατικό μείγμα σε υψηλή θερμοκρασία. Η απόδοση πεδίου δείχνει ότι το CR και τα συμβατικά μείγματα παράγουν παρόμοια απόδοση για δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας (Cross, Jakatimath, 2007; Islam et al., 2018; Kim et al., 2010; Schwartz, 2016). Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα του CR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Επαναχρησιμοποίηση αδρανών και συνδετικού υλικού, που εξοικονομεί φυσικά αδρανή, συνδετικό υλικό και ενέργεια για την παραγωγή του.
- Δεν χρειάζεται η απόρριψη τουRAP.
- Εξάλειψη βυθίσεων, αυλακώσεων, λακκούβων, μπαλωμάτων και ρωγμών.
- Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- Τα υλικά βάσης και υποβάθρου δεν διαταράσσονται.
- Η εγκάρσια κλίση και το προφίλ του οδοστρώματος μπορούν να βελτιωθούν.
- Η επιτόπια κατασκευή μειώνει τις διακοπές κυκλοφορίας σε σύγκριση με το CCPR.

Μερικά από τα κύρια μειονεκτήματα του CR περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Προβλήματα με την υπάρχουσα διαβάθμιση αδρανών ή/και συνδετικό ασφάλτου μπορεί να αντικατοπτρίζονται στη νέα στρώση.
- Κατάλληλο για οδοστρώματα με μικρές ζημιές.
- Εφαρμόζεται σε δρόμους χαμηλού όγκου

Σε σύγκριση με το CIR, το CCPR απαιτεί τη μεταφορά της φρεζαρισμένης επιφάνειας από και προς το εργοστάσιο, αλλά παρέχει καλύτερη ευκαιρία ποιοτικού ελέγχου.

Κεφάλαιο 5^ο: Χρήση ανακυκλωμένου ασφαλτικού οδοστρώματος

5.1 Γενικά

Η διαδικασία ανακύκλωσης ασφαλτικών οδοστρωμάτων περιλαμβάνει τη χρήση συμβατικών υλικών για τη δημιουργία ενός ασφαλτικού μίγματος. Στη συνέχεια, προστίθεται ένα προϊόν φρεζαρίσματος, συνήθως ένα παλιό και φθαρμένο οδόστρωμα, δηλαδή ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα (Nosetti et al. 2018). Εάν είναι επιτυχής, η ανακύκλωση των ασφαλτικών οδοστρωμάτων θα έχει ως αποτέλεσμα ένα υλικό με συγκρίσιμες ιδιότητες με αυτές ενός τυπικού ασφαλτούχου μείγματος, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα (Nosetti et al. 2018). Δεδομένου ότι η διαδικασία μπορεί να προωθήσει την ενεργειακή απόδοση και να μειώσει το κόστος (DosSantos et al. 2015) και επειδή έχει σημαντικές επιπτώσεις στη διαχείριση των απορριμμάτων (Liu et al. 2017), η ανακύκλωση της ασφάλτου γίνεται πλέον πιο διαδεδομένη σε όλο τον κόσμο. Επιπλέον, εκτεταμένη έρευνα κατευθύνεται τώρα προς τη χρήση RAP για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων (Singh et al. 2018).

Ωστόσο, η χρήση RAP εισάγει αρκετές ανεπιθύμητες ιδιότητες στο ασφαλτομίγμα, οι περισσότερες από τις οποίες προκύπτουν από την ψαθυρότητα που προκύπτει από τη γήρανση του αρχικού οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, η παλαιωμένη άσφαλτος που περιέχεται στο RAP χαρακτηρίζεται από υψηλό σημείο μάλθωσης και μειωμένα επίπεδα ολκιμότητας και διείσδυσης, τα οποία συμβάλλουν σε χαμηλότερες ιδιότητες συνοχής και πρόσφυσης σε σύγκριση με μια νέα άσφαλτο. Επιπλέον, η γήρανση που σχετίζεται με τις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας των συνδεδετικών ασφάλτου που περιέχουν RAP καθιστά αναποτελεσματικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνδεδετικών (Bonicelli et al. 2017, Kemp, Predoehl 1981), οδηγώντας στην ανάπτυξη αρκετών τεχνολογιών και τεχνικών για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Ένα από τα οποία είναι η χρήση αναζωογονητικών παραγόντων για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του RAP, καθώς και η χρήση μαλακών νέων συνδεδετικών ασφάλτου και τεχνολογίας ασφάλτου θερμού μίγματος (Yu et al. 2014).

Είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν κατάλληλες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της ψαθυρότητας της ασφάλτου στο RAP που συμβαίνει όταν η περιεκτικότητα σε RAP κυμαίνεται από 25%–100% (Bonicelli et al. 2017, Silva et al. 2012). Ένας καλός σχεδιασμός προάγει μια επαρκή ισορροπία μεταξύ της ακαμψίας και της ευκαμψίας της ασφάλτου κατά τη μεταφορά της κυκλοφορίας. Εάν το ανακυκλωμένο HMA είναι κακώς σχεδιασμένο, τότε, η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος θα μειωθεί σημαντικά, επηρεάζοντας έτσι τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική βιωσιμότητά του.

5.2 Ζητήματα που σχετίζονται με υψηλό περιεχόμενο RAP

5.2.1 Πρόωρες βλάβες του οδοστρώματος

Μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε RAP αυξάνει την αντίσταση στην αυλάκωση, καθώς το RAP περιέχει μια κατά βάση άκαμπτη άσφαλο. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα οδοστρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP τείνουν να παρουσιάζουν πρόωρες βλάβες (όπως ρωγμές λόγω χαμηλής θερμοκρασίας και κόπωσης) (Behroozikhah et al. 2017, He, Wong 2008, Li et al. 2008, Loria et al. 2011, Xiao et al. 2009). Για να προσδιοριστεί η διάρκεια ζωής του ασφαλτοστρώματος, μια θεμελιώδης μηχανική ιδιότητα που πρέπει να διερευνηθεί είναι η διάρκεια ζωής σε κόπωση (Izadi et al. 2018).

Πράγματι, η εισαγωγή του RAP σε νέα ασφαλτικά μείγματα είχε ως αποτέλεσμα πολλές αλλαγές στη φυσική και μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος (West et al. 2013). Η αυξημένη ακαμψία της ασφάλτου RAP μπορεί να προκαλέσει αύξηση του συντελεστή ακαμψίας του HMA και με τον ίδιο τρόπο να επηρεάσει τη συμπεριφορά κόπωσης του μείγματος και να οδηγήσει σε ταχεία και πρόωρη ρηγμάτωση σε χαμηλές θερμοκρασίες (West et al. 2013, Antunes et al. 2019). Πολλές μελέτες έχουν βρει ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε RAP θα μπορούσε να αυξήσει την ακαμψία του μείγματος του οδοστρώματος κατά 25%-60% σε σύγκριση με μείγματα χωρίς RAP (West et al. 2013, Bonicelli et al. 2017). Οι Mogawer et al. (2011), έδειξαν ότι τα μείγματα που περιέχουν 40% RAP θα είναι έως και 49% πιο άκαμπτα σε σύγκριση με εκείνα χωρίς RAP. Περαιτέρω έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Zhaoxing et al. (2019) αποκάλυψε ότι η εφαρμογή RAP σε περιεκτικότητα 50% έχει ως αποτέλεσμα τα ασφαλτικά μείγματα να γίνονται πιο εύθραυστα και με τη σειρά τους επιρρεπή σε πρόωρη αστοχία (δηλαδή ρωγμές).

Οι Valdés et al. (2011) ερευνήσαν τις μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων που αποτελούνται από 40% και 60% RAP. Τα ευρήματα υποδεικνύουν αύξηση του συντελεστή ακαμψίας και της έμμεσης αντοχής σε εφελκυσμό (ITS) καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε RAP.

Επιπλέον, η παλαιωμένη ασφάλτος μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στη συμπτωσιμότητα του μίγματος, οδηγώντας έτσι σε πρόωρη αστοχία (Mogawer et al. 2012). Ως εκ τούτου, έχουν εκδοθεί πολυάριθμες κατευθυντήριες γραμμές για τον περιορισμό του επιπέδου της περιεκτικότητας σε RAP στις ασφατικές στρώσεις. Η γήρανση της ασφάλτου οφείλεται τόσο σε μακροπρόθεσμες όσο και σε βραχυπρόθεσμες διεργασίες. Η διαδικασία βραχυπρόθεσμης γήρανσης λαμβάνει χώρα κατά τη φάση κατασκευής, ενώ η μακροπρόθεσμη διαδικασία λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ζωής της ασφάλτου. Επιπλέον, η βραχυπρόθεσμη διαδικασία επηρεάζεται κυρίως από την οξείδωση της ασφάλτου, την εξάτμιση και τη μείωση των συστατικών του ελαίου, ενώ η μακροπρόθεσμη διαδικασία λαμβάνει χώρα ως απόκριση στον πολυμερισμό, την οξείδωση και τη φωτοοξείδωση των επιφανειακών στρωμάτων (Zaumanis, Mallick 2015, Roberts et al., 1991, Alvarez 1994). Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία γήρανσης της ασφάλτου μπορεί να αλλάξει ή να υποβαθμίσει τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου (Zhu et al. 2017, Kim, Lee 2003, Raad et al. 2001). Παρόμοια με τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσε να επηρεαστεί η συμπεριφορά του ασφατικού μείγματος λόγω της χρήσης παλαιωμένης ασφάλτου, η κόπωση θα μπορούσε επίσης να προκληθεί λόγω παραγόντων όπως ο τύπος της ασφάλτου, το μείγμα και το αδρανές υλικό, καθώς και το ποσοστό κενών αέρα (Moreno, Rubio 2013).

5.1.2 Φαινόμενο συσσώρευσης

Η συσσώρευση είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο τα σωματίδια RAP συσσωρεύονται για να σχηματίσουν ένα σύμπλεγμα (Εικ. 25).



Εικόνα 25 Φαινόμενο συσσώρευσης (Zhang et al. 2019)

Τα περισσότερα σωματίδια RAP είναι είτε χονδροειδή και λεπτά αδρανή επικαλυμμένα με παλαιωμένη άσφαλτο, είτε θα αποτελούνται από μεμονωμένα χονδροειδή αδρανή στερεωμένα μεταξύ τους μέσω λεπτών αδρανών, ενώ ορισμένα σωματίδια RAP μπορεί να είναι μεμονωμένα συσσωματώματα που περιβάλλονται από παλαιωμένη άσφαλτο (Zhu et al. 2020). Η βιβλιογραφία δείχνει ότι υπάρχουν δύο τύποι συσσωματωμάτων: «παλιές συσσωματώσεις», στις οποίες το σύμπλεγμα σωματιδίων RAP σχηματίζεται πριν από τη νέα φάση ανάμειξης, και «νέες συσσωματώσεις», όπου κάθε συστάδα σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της φάσης μίξης (Bressi et al. 2016).

Υπό αυτές τις συνθήκες, η παλαιωμένη άσφαλτος γύρω από τα αδρανή RAP μαλακώνει και λειτουργεί σαν κόλλα (Bressi et al. 2016). Το φαινόμενο της συσσωμάτωσης βασίζεται σε μια σειρά παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας RAP που διατηρείται στο κλάσμα, της διάστασης του κόκκου, καθώς και της ποσότητας RAP (Bressi et al. 2015). Προηγούμενες εργασίες αναφέρουν ότι τα επίπεδα συστάδων διαφόρων πηγών υλικού RAP ποικίλλουν πολύ. Αυτό επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η σύνθεση του υλικού, η έκταση της γήρανσης του οδοστρώματος, τα χαρακτηριστικά διαβάθμισης, ο εξοπλισμός φρεζαρίσματος και η θερμοκρασία, καθώς και η υγρασία του οδοστρώματος και το υλικό στρώσης (Xu et al. 2019).

Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι τα σωματίδια RAP μπορεί να είναι ισχυρά, αδύναμα ή συσσωματώματα. Οι αδύναμες δομές RAP διαθέτουν συνήθως πολύ υψηλότερα

επίπεδα συσσωμάτωσης, ενώ τα παλαιότερα συσσωματώματα έχουν πολύ χαμηλά επίπεδα συσσωμάτωσης (Zhu et al. 2020, Xu et al. 2019). Επιπλέον, όταν αυξάνεται η ποσότητα του RAP, η ποσότητα των παρθένων αδρανών στο μείγμα μειώνεται, επομένως η επίδραση της τριβής και της κρουστικής δράσης τέτοιων αδρανών θα μειωθεί. Όπως σημειώθηκε από τους Bressi et al. (2015), μια μείωση στην ποσότητα των παρθένων αδρανών θα μπορούσε να οδηγήσει σε φτωχότερη συσσωμάτωση, καθώς υπάρχουν λιγότερα πιθανά σημεία επαφής στην πιο μαλακή ενεργοποιημένη ασφαλτο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 26, η επιφάνεια εμφανίζει μια ματ ασφαλτο, ενώ στις παλιές συστάδες ή κάτω από τις ζώνες σωματιδίων RAP που εκτίθενται στο περιβάλλον, η ασφαλτος είναι γυαλιστερή και μαλακότερη. Οι ομάδες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά του μείγματος RAP, για παράδειγμα, διακόπτοντας την ομοιογένειά του. Αυτό είναι σύμφωνο με τα ευρήματα των Bressi et al. (2015) που έδειξαν πώς η ομαδοποίηση μπορεί να αποτρέψει τη συνεχή εξάπλωση της παρθένας ασφάλτου ή την αύξηση της ετερογένειας του μείγματος. Ως αποτέλεσμα της συσσωμάτωσης των σωματιδίων RAP, οι μικρού μεγέθους κόκκοι που υπάρχουν στο μείγμα μπορούν να μειωθούν και έτσι μεταβάλλουν την καμπύλη βαθμολόγησης σχεδιασμού (Bressi et al. 2015).



Εικόνα 26 Παράδειγμα όψης του RAP μετά την ανάμιξη, όπου το λειαντικό αποτέλεσμα των παρθένων αδρανών, προκαλεί την απελευθέρωση των παγιδευμένων ενεργών αδρανών συνδετικού υλικού (Bressi et al. 2015)

Έχοντας υπόψη την παραπάνω συζήτηση, για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του RAP, οι βασικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ο βαθμός στον οποίο αναμειγνύονται τα παρθένα και παλαιωμένα συνδετικά ασφάλτου, η αποτελεσματικότητα ανάμειξης και η συμπεριφορά του RAP κατά τη νέα διαδικασία ανάμειξης (Bressi et al. 2015). Δεδομένου ότι

έχει εντοπιστεί μια σχέση μεταξύ των μηχανικών και μικροδομικών χαρακτηριστικών, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια βαθιά κατανόηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα όταν δημιουργούνται νέα μείγματα (Nahar et al. 2013, Booshehrian et al. 2012). Επίσης, ο βαθμός ανάμειξης θα πρέπει να καθοριστεί για τη βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων της ασφάλτου (Nahar et al. 2013, Booshehrian et al. 2012). Είναι ζωτικής σημασίας να προσδιοριστεί ο βαθμός κάμψης της παλαιωμένης ασφάλτου (RAP binder) με μια παρθένα άσφαλτο, καθώς αυτό οδηγεί σε ακριβή εκτίμηση του κατάλληλου ποσοστού του συνδετικού RAP (Gottumukkala et al. 2018).

Οι Shirodkar et al. (2011) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του βαθμού ανάμειξης. Αυτή η μεθοδολογία βασίζεται σε μια αρχή ότι όταν μια παρθένα άσφαλτος χρησιμοποιείται για ανάμειξη με τα λεπτά αδρανή RAP και τα χονδροειδή αδρανή, παρόμοια έκταση ανάμειξης μπορεί να εμφανιστεί και στις δύο ιδιότητες, στην άσφαλτο που περιβάλλει τα αδρανή RAP και στην επικάλυψη χονδροειδών παρθένων αδρανών αν ο βαθμός ανάμειξης κοντά στο 100% (Shirodkar et al. 2011). Επομένως, οποιαδήποτε αύξηση της διακύμανσης μεταξύ των ιδιοτήτων της ασφάλτου θα οδηγούσε σε μείωση του βαθμού ανάμειξης (Shirodkar et al. 2013),

Επί του παρόντος, θεωρείται ότι στη βιομηχανία ασφάλτου που χρησιμοποιεί μια παρθένα άσφαλτο με την παλαιωμένη άσφαλτο (RAP asphalt), μπορούν να παρατηρηθούν γραμμικές αλλοιώσεις στις ιδιότητες του μείγματος με αύξηση του ποσοστού RAP (Shirodkar et al. 2013). Ωστόσο, όταν δεν πραγματοποιείται πλήρης ανάμειξη, είναι σημαντικό να αναπτυχθεί ένα διάγραμμα ανάμειξης για την έκταση μερικής ανάμειξης, αυτό το διάγραμμα βασίζεται στη σχέση μεταξύ του ποσοστού RAP που περιλαμβάνεται στο μείγμα και της σχετικής θερμοκρασίας της αναμειγμένης ασφάλτου (Shirodkar et al. 2013).

5.1.3 Ανάδυση Ασφάλτου

Η ανάδυση (κοινώς αποκαλούμενη «αιμορραγία») συμβαίνει όταν η περιεκτικότητα της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα είναι μεγάλη (Εικ. 27) (Senadheera et al. 2007).



Εικόνα 27 Το φαινόμενο της έκπλυσης (Senadheera et al. 2007)

Αυτή η κατάσταση μπορεί επίσης να συμβεί λόγω της υπερβολικής περιεκτικότητας σε αναζωογονητικό παράγοντα, της χρήσης ακατάλληλων αναζωογονητικών παραγόντων ή επειδή το έλαιο στην άσφαλτο έχει μετακινηθεί προς την επιφάνεια του ασφαλτικού στρώματος, οδηγώντας έτσι σε μειωμένη τριβή λόγω φθοράς και συνεπώς επηρεάζοντας αρνητικά την συμπεριφορά του οδοστρώματος (Zaumanis et al. 2014a).

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αναφέρεται ως αιμορραγία ή έκπλυση λόγω ασταθούς αναζωογόνησης. Τα οδοστρώματα που το εμφανίζουν, από την άλλη πλευρά, μπορεί τελικά να ραγίσουν και να σχηματίσουν φυσαλίδες. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αιμορραγία, κατά την οποία η περίσσεια άσφαλτος σπρώχνεται στα ίχνη των τροχών (Lawson και Senadheera 2009). Οι περιοχές που έχουν εκπλυθεί μπορεί να γίνουν πολύ ολισθηρές, ιδιαίτερα όταν ο καιρός είναι υγρός, και αυτό είναι αναμφίβολα μια ανησυχία για την ασφάλεια. Ένα σημαντικό πρόβλημα παρουσιάζεται όταν η έκπλυση λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την αυλάκωση και το νερό συγκλίνει στις διαδρομές των τροχών (Lawson και Senadheera 2009). Οι Zaumanis et al. (2013b) πραγματοποίησαν ένα πείραμα με έξι αναζωογονητικούς παράγοντες που προστέθηκαν στην ανακτώμενη άσφαλτο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν οι δόσεις του αναζωογονητικού είναι υψηλότερες, η έκπλυση θα αυξηθεί.

5.2 Διαφορετικά ποσοστά RAP σε μείγματα HMA.

Το πιο κατάλληλο ποσοστό RAP για εφαρμογή σε ασφαλτικά μείγματα είναι μια συζήτηση μεταξύ ειδικών που λαμβάνει χώρα αρκετά χρόνια. Οι οδηγίες αναφέρουν διάφορες αναλογίες

κάθε φορά που προστίθενται στο υλικό κατά την παραγωγή ασφαλτικών μειγμάτων. Το RAP αποτελείται από πολλά υλικά και η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι ομοιογένειες αυτών των υλικών καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το RAP (Lopes et al. 2015). Επιπλέον, η τεχνολογία παραγωγής καθορίζει τη μέγιστη αναλογία της ανακτημένης ασφάλτου (Mogawer et al. 2012).

Για την ανακύκλωση εν θερμώ στο εργοστάσιο, η πλειονότητα των παραδοσιακών εργοστασίων τυμπάνων μπορεί να χρησιμοποιήσει το 50% του RAP, ενώ στις μονάδες παρτίδας, κυμαίνεται από 10 έως 30% (Noferini et al. 2017). Ωστόσο, οι νέες τεχνολογίες έχουν αντιμετωπίσει σε μεγάλο βαθμό αυτούς τους περιορισμούς, επιτρέποντας στο RAP να εμφανίζει ποσοστά σχεδόν 100% ανακυκλωμένο HMA (Zaumanis et al. 2014a).

Πράγματι, η 100% ανακύκλωση HMA δεν ήταν ασυνήθιστη κατά τη δεκαετία του 1970 (Zaumanis et al. 2016). Ωστόσο, τα ποσοστά RAP σε ανακυκλωμένα υλικά έχουν διατηρηθεί σε χαμηλότερα από 25% (Wang et al. 2017, Mogawer et al. 2012) λόγω ανησυχιών σχετικά με την ανθεκτικότητα. Συνήθως, το ιξώδες και η ρεολογία του μείγματος δεν επηρεάζονται από την ύπαρξη 10% (ή λιγότερο) RAP στο μείγμα (Zaumanis et al. 2014a). Ωστόσο, το ιξώδες μπορεί να αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό όταν η περιεκτικότητα σε RAP υπερβαίνει το 20% (Roberts et al. 1991).

Αυτό δείχνει ότι το σύνθετο μείγμα θα σκληρύνει όταν χρησιμοποιείται υψηλή περιεκτικότητα σε πιο παχύρρευστη και παλαιωμένη άσφαλτο, αυξάνοντας έτσι το ιξώδες του μείγματος (Zaumanis et al. 2014a). Συνοπτικά, οι ακόλουθοι περιορισμοί σχετίζονται με σχέδια μείγματος υψηλής περιεκτικότητας RAP (Zaumanis, Mallick 2015): οι ιδιότητες της παλαιωμένης ασφάλτου, τα χαρακτηριστικά της παρθένας ασφάλτου και ο βαθμός ανάμειξης μεταξύ της παρθένας και RAP ασφάλτου και του αδρανούς RAP. Συνιστάται η εφαρμογή μαλακότερου παρθένου με χαμηλό ποσοστό RAP, ενώ αναζωογονητικά μέσα θα πρέπει να εφαρμόζονται όταν η περιεκτικότητα σε RAP είναι υψηλή (πάνω από 25%), καθώς μπορεί να προκύψουν ορισμένα πρακτικά κατά τη χρήση μιας μαλακής ασφάλτου σε τέτοιες περιπτώσεις (Copeland 2011).

5.3. Πρόσθετα που χρησιμοποιούνται με RAP

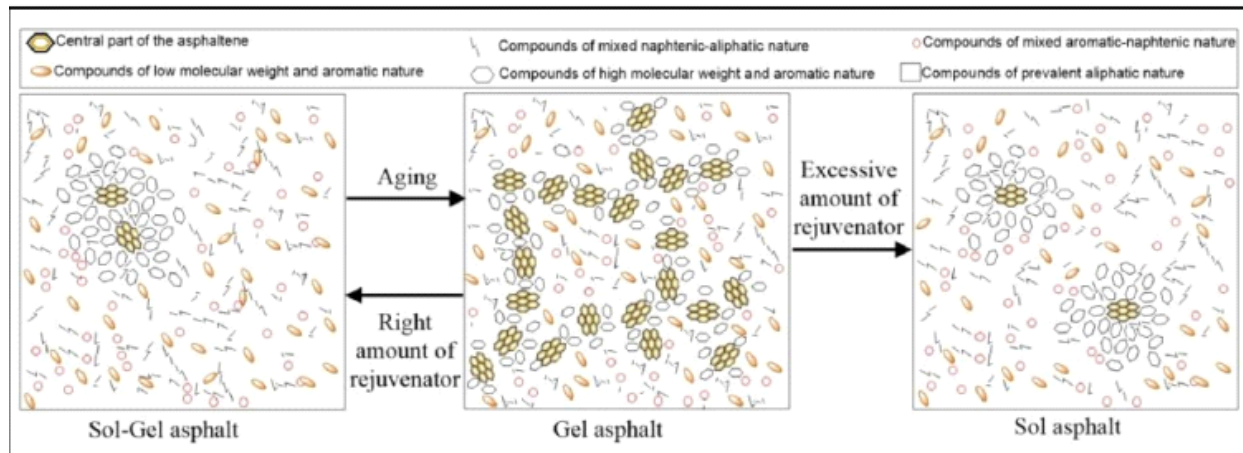
5.3.1 Χρήση αναζωογονητικών παραγόντων

Οι παράγοντες αναζωογόνησης είναι ανακυκλωμένα υλικά που μπορούν να προστεθούν σε μείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP ή σε μείγματα υψηλής οξειδωσης (Shen et al. 2007). Στη διαδικασία ανακύκλωσης ασφαλτικών οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται συχνά ως νέα ασφαλτικά συνδετικά για να βελτιώσουν την ελαστικότητα της παλαιωμένης ασφάλτου. Επιπλέον, τα νέα συνδετικά μπορούν να αντιστρέψουν τις αρνητικές επιπτώσεις της γήρανσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το συνδετικό υλικό είναι μαλακή ασφάλτος, ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας παράγοντας αναζωογόνησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πιο μαλακό παρθένο με χαμηλή περιεκτικότητα σε RAP, αλλά αναζωογονητικά μέσα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP (Zaumanis et al. 2014b).

Οι ιδιότητες μιας παλαιωμένης ασφάλτου μπορούν να αποκατασταθούν με τη χρήση αναζωογονητικών παραγόντων, καθώς αυτοί οι παράγοντες μπορούν να αυξήσουν τα συστατικά μαλτενίου, να μειώσουν το μέγεθος των συστάδων ασφάλτου, να βελτιώσουν τη δύναμη διασποράς της συνεχούς φάσης μαλτενίου και να αυξήσουν την κινητικότητα των μορίων (Kaseeret. al. 2019), διαδικασίες που όλες οδηγούν σε αυξημένη ολκιμότητα, καθώς και σε μειωμένο ιξώδες και ακαμψία της παλαιωμένης ασφάλτου (Ali et al. 2016).

Το κολλοειδές σύστημα προσδιορίζει ασφαλτους τύπου «sol-type» και «gel-type», που υποδηλώνουν συνδετικά ασφάλτου με χαμηλή (5%–10%) και υψηλή (20%–35%) περιεκτικότητα σε ασφαλτένιο, αντίστοιχα (Behnood, Gharehveran 2018). Σε σύγκριση με τις ασφαλτους τύπου sol, οι ασφαλτοι τύπου gel είναι λιγότερο πιθανό να παραμορφωθούν σε υψηλή θερμοκρασία, αλλά είναι πιο πιθανό να ραγίσουν σε χαμηλές θερμοκρασίες (Behnood 2019). Εν τω μεταξύ, οι ασφαλτοισολκαι gel είναι ελαστικές μόνο στις πρώτες φάσεις παραμόρφωσης και διαθέτουν κολλοειδή δομή που περιέχει υπερμικκύλια και γιγάντια υπερμικκύλια (Behnood, Gharehveran 2018), που είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή οδοστρωμάτων (Frantzis 1998). Η περιεκτικότητα σε ασφαλτο αυξάνεται με τη γήρανση, με αποτέλεσμα η ασφάλτος να υποστεί εσωτερικές δομικές αλλαγές. Κατά συνέπεια, η παλαιωμένη ασφάλτος θα λάβει τη συμπεριφορά της ασφάλτου τύπου gel (Behnood 2019, Behnood et al. 2016).

Δομικές αλλαγές, όπως η ομαλοποίηση της αναλογίας μεταξύ ασφαλτενίων και μαλτενίων, μπορούν να προκληθούν όταν προστεθεί ένα κατάλληλο αναζωογονητικό, καθώς αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια άσφαλτο τύπου sol-gel επιβάλλοντας υψηλότερη περιεκτικότητα σε ρητίνη και αρωματικά στη φάση μαλτενίου μαζί με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ασφαλτένια (Zhu et al. 2017). Η εικόνα 28 απεικονίζει την κολλοειδή δομή της ασφάλτου και πώς αυτή η δομή επηρεάζεται από τη γήρανση και την εισαγωγή ενός αναζωογονητικού.



Εικόνα 28 Η ανταπόκριση της δομής του συνδετικού υλικού στη γήρανση και την αναζωογόνηση (Behrood 2019)

Ένας αναζωογονητικός παράγοντας θα πρέπει να επιλέγεται με βάση την ικανότητά του να ενισχύει τις ιδιότητες ενός συνδετικού ασφάλτου και να αντιστρέφει τη διαδικασία γήρανσης της ασφάλτου RAP. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε από τους Zaumanis et al. (2014a), ένας αναζωογονητικός παράγοντας θα πρέπει να μπορεί να διαχέεται γρήγορα στην άσφαλτο RAP και να προωθεί την κινητοποίηση της ασφάλτου, αλλιώς γνωστή ως «βραχυπρόθεσμα κριτήρια». Θα πρέπει επίσης να πληροί «μακροπρόθεσμα κριτήρια», όπως η μείωση της κόπωσης και της ανάπτυξης ρωγμών σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ αποτρέπει προβλήματα αυλάκωσης αλλάζοντας τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου (Zaumanis et al. 2014a, Moghaddam, Baaj 2016).

Σύμφωνα με τους Tran et al. (2012) και Kaseer et al. (2019), τρεις κύριοι παράγοντες στηρίζουν τον μηχανισμό της αναζωογόνησης:

- (i) η διασπορά του αναζωογονητικού παράγοντα, της παρθένας ασφάλτου και των παλαιωμένων συνδετικών ασφάλτου στο μείγμα,

(ii) η διάχυση του αναζωογονητικού παράγοντα στην ανακυκλωμένη άσφαλτο και

(iii) η συμβατότητα του αναζωογονητικού παράγοντα με την παρθένα άσφαλτο και την ανακυκλωμένη άσφαλτο.

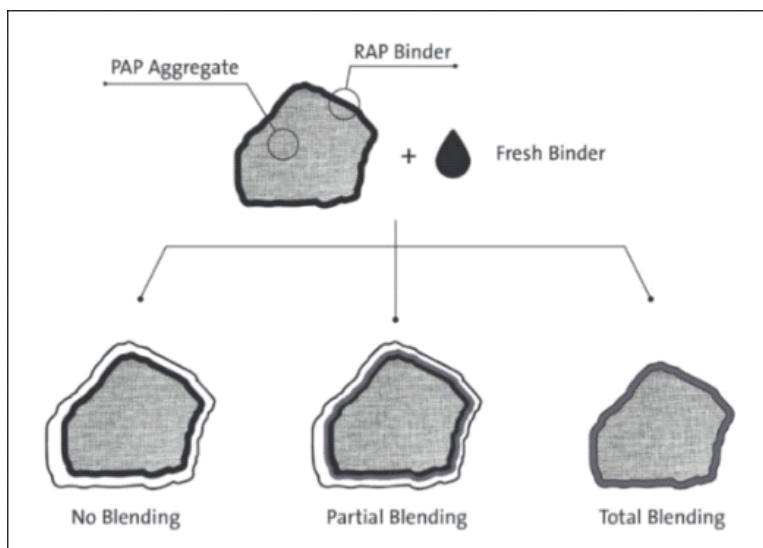
Εάν η παλαιωμένη άσφαλτος που εξάγεται από το RAP έπρεπε να υποβληθεί σε αναζωογόνηση, μεγαλύτερα ποσοστά του υλικού RAP θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων ασφαλτικών μιγμάτων χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοση της ασφάλτου (Ali et al. 2016). Ωστόσο, πρέπει να πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική χρήση των αναζωογονητικών παραγόντων στο ασφαλτικό μείγμα.

Πράγματι, ο τύπος του αναζωογονητικού παράγοντα που χρησιμοποιείται είναι ένας κρίσιμος παράγοντας. Επιπλέον, η δόση και ο τύπος του αναζωογονητικού παράγοντα πρέπει να είναι κατάλληλα, ώστε να παραχθεί ένα αναζωογονημένο μείγμα με επαρκή απόδοση (Kaseer et al. 2019). Μαζί, αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την πιθανότητα έκπλυσης και διασφαλίζουν ότι τα χαρακτηριστικά χαμηλής θερμοκρασίας του μείγματος θα μπορούσαν να βελτιωθούν χωρίς να υπονομεύονται τα χαρακτηριστικά υψηλής θερμοκρασίας του (Moghaddam, Baaj 2016). Έτσι, εάν ο τύπος και η δόση του αναζωογονητικού παράγοντα δεν είναι κατάλληλα ή επαρκή, η απόδοση του αναζωογονημένου μείγματος θα μπορούσε να επηρεαστεί αρνητικά (Kaseer et al. 2019).

Επιπλέον, η χημική συμβατότητα και ομοιογένεια του αναζωογονητικού και της ασφάλτου είναι σημαντικοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες και την απόδοση της αναζωογονημένης ασφάλτου, καθώς αυτοί οι παράγοντες διασφαλίζουν ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας θα δημιουργήσει ένα στρώμα χαμηλού ιξώδους που περιβάλλει τα σωματίδια του αδρανούς. Με τη σειρά του, αυτό το στρώμα επικαλύπτεται με την άσφαλτο RAP, η οποία έχει υποστεί οξείδωση, και στη συνέχεια διαχέεται για να διευκολύνει το μαλάκωμα της ασφάλτου RAP (Bonicelli et al. 2017). Αυτό το βήμα γενικά εξαρτάται από μεταβλητές κατασκευής όπως ο χρόνος και η θερμοκρασία ανάμειξης.

Άλλες μεταβλητές παραγωγής που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αυτό το βήμα είναι ο εξοπλισμός παραγωγής, ο τύπος της παρθένας ασφάλτου και ο βαθμός διείδυσης της, οι ιδιότητες και η πηγή του RAP και η μέθοδος ανάμειξης του RAP με τον αναζωογονητικό (Karlsson, Isacson 2006). Επιπλέον, θα πρέπει επίσης να καθοριστεί το επίπεδο

αλληλεπίδρασης μεταξύ του RAP και των παρθένων ασφαλτικών συνδετικών. Στη βιβλιογραφία, οι προοπτικές διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνει η ανάμειξη RAP με παρθένα άσφαλτο (βλ. Εικ. 29).



Εικόνα 29 Περιπτώσεις ανάμειξης για παρθένων και RAP συνδετικών (Bowers 2013)

Μια προοπτική είναι η «χωρίς ανάμειξη», μια άλλη είναι η «πλήρης ανάμειξη» και η τελική προοπτική είναι η «μερική ανάμειξη». Το πρώτο από αυτά υποδηλώνει ότι το RAP συμπεριφέρεται σαν ένας «μαύρος βράχος» στο ανακυκλωμένο HMA, επομένως το παλαιωμένο RAP δεν έχει συνδετικό αποτέλεσμα. Η δεύτερη προοπτική, η «πλήρης ανάμειξη», περιλαμβάνει το συνδυασμό του 100% της ασφάλτου RAP με μια παρθένα άσφαλτο, όπου η ανάμειξη δρα ως σύνθετο συνδετικό σε ανακυκλωμένο HMA. Στην τελική προοπτική, εάν υποθεθεί ότι υπό τη σχεδίαση μίξης του ανακυκλωμένου HMA ότι η άσφαλτος RAP αναμειγνύεται πλήρως με την παρθένα άσφαλτο (δηλαδή, όταν το RAP συμπεριφέρεται σαν μαύρος βράχος), τότε, η ποσότητα η περιεκτικότητα σε άσφαλτο που χρησιμοποιείται δεν θα είναι αρκετή (Xu et al. 2018). Αντίθετα, όταν δεν αναμένεται ανάμειξη μεταξύ των συνδετικών ασφάλτου παρθένου και RAP και αντίθετα αντιδρά, θα δημιουργηθεί περιεκτικότητα σε άσφαλτο με μεγαλύτερο από τον αναμενόμενο πλούτο (Xu et al. 2018). Οι ερευνητές έχουν επίσης προτείνει ότι ένα μέρος της ασφάλτου εργασίας του RAP θα αντιδράσει με την παρθένα άσφαλτο (Xu et al. 2018, Moghaddam, Baaj 2016).

Μια άλλη σημαντική μεταβλητή είναι το επίπεδο των εκπομπών που συνδέονται με τον αναζωογονητικό παράγοντα, επειδή τα αναζωογονητικά μέσα έχουν διαφορετικά επίπεδα

αρωματικών ελαίων, τα οποία τους αναγκάζουν να εκπέμπουν πτητικά υλικά (Karlsson, Isacsson 2006, Bonicelli et al. 2017).

Τα τελευταία χρόνια, πολλές μελέτες έχουν εντοπίσει ένα ευρύ φάσμα μαλακτικών και αναζωογονητικών παραγόντων που μπορούν να συνδυαστούν με RAP, για παράδειγμα, απόβλητα έλαια, έλαια με προέλευση το διυλιστήριο, φυτικά έλαια και εμπορικούς παράγοντες. Για να προσδιορίσει την κατάλληλη δόση για κάθε παράγοντα αναζωογόνησης, ο σχεδιαστής πρέπει να γνωρίζει τον τύπο του συνδετικού ασφάλτου, τον τύπο του αναζωογονητικού παράγοντα και το χρονικό διάστημα για το οποίο η ασφαλτος έχει παλαιώσει.

Μια μελέτη εξέτασε την επίδραση ενός αναζωογονητικού παράγοντα που προέρχεται από σόγια στην πλήρη αποκατάσταση των ασφαλικών ιδιοτήτων RAP σε μείγματα RAP (Elkashef, Williams 2017). Με βάση τα αποτελέσματα, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο παράγοντας επηρέασε ουσιαστικά όχι μόνο τα χαρακτηριστικά χαμηλής θερμοκρασίας της ασφάλτου που εξάγεται από το RAP αλλά και τα χαρακτηριστικά υψηλής θερμοκρασίας του μείγματος. Στην περίπτωση του μίγματος ελέγχου, χρησιμοποιώντας καθαρό PG58-28, η ασφαλτος RAP μετατράπηκε μόνο σε PG100-10. Με βάση αυτό το εύρημα, η καθαρή ασφαλτος που λειτουργούσε μεμονωμένα δεν άσκησε σημαντική επίδραση στις βασικές θερμοκρασίες της ασφάλτου RAP, υποδεικνύοντας επομένως ότι ο παράγοντας αναζωογόνησης ήταν ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την αλλαγή της θερμοκρασίας. Με την προσθήκη του αναζωογονητικού παράγοντα σε μέτριες θερμοκρασίες, τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν σημαντική βελτίωση στην απόδοση κόπωσης της παλαιωμένης ασφάλτου δοχείων γήρανσης υπό πίεση. Επιπλέον, οι κύριες καμπύλες ασφάλτου έδειξαν μια επίμονη μείωση της ακαμψίας και μια αύξηση στη γωνία φάσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η αύξηση συνεχίστηκε σημαντικά αφού τα συνδετικά ασφάλτου υποβλήθηκαν σε γήρανση PAV. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας που προέρχεται από σόγια αύξησε την ανθεκτικότητα του παλαιωμένου οδοστρώματος.

Οι Wang et al. (2018) χρησιμοποίησαν χρησιμοποιημένο λάδι κινητήρα (WEO) ως αναζωογονητικό παράγοντα για την αποκατάσταση των παλαιωμένων ιδιοτήτων της ασφάλτου. Αυτός ο παράγοντας ευνοεί την απόδοση της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες και αντίστροφα. Το WEO επηρέασε αρνητικά την πρόσφυση μεταξύ αδρανών και ασφάλτου, επομένως αυτό το ζήτημα αντιμετωπίστηκε με τη χρήση υλικών κατά της απογύμνωσης.

Μια άλλη μελέτη εξέτασε την επίδραση του χρησιμοποιημένου λαδιού μηχανής στα μηχανικά χαρακτηριστικά των WMA και HMA. Οι Farooq et al. (2018) διαπίστωσαν ότι το 60% του περιεχομένου RAP θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή μιγμάτων με βάση το πηλίκιο Marshall (MQ), το λόγο αντοχής σε εφελκυσμό (TSR), τη διατηρούμενη σταθερότητα, το κριτήριο συμβατότητας και την επίστρωση αδρανών. Η μελέτη πρότεινε ιδανικές δόσεις για τον αναζωογονητικό παράγοντα, οι οποίες ήταν 10% για 20% υλικό RAP, 10%–12,5% για 30% υλικό RAP, 12,5%–17,5% για 40% RAP, 15%–17,5% για 50% RAP, και 17,5%-20% για 60% περιεχόμενα RAP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη του ελαίου ως αναζωογονητικού παράγοντα ενίσχυσε την εργασιμότητα του RAP. Ωστόσο, η σταθερότητα Marshall, η ροή και το MQ μειώθηκαν όταν η συγκέντρωση του αναζωογονητικού παράγοντα αυξήθηκε. Αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να αποδοθεί στο μαλακτικό αποτέλεσμα που είχε το UMEO στην παρθένα άσφαλτο και στην άσφαλτο RAP. Επιπλέον, το ειδικό βάρος αυξήθηκε με την αύξηση της ποσότητας ελαίου, αποτέλεσμα που ήταν συνεπές σε όλα τα ποσοστά του περιεχομένου RAP. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να συνδεθεί με τη μαλάκυνση της ασφάλτου RAP, η οποία μείωσε τα κενά αέρα, προώθησε τη συμπύκνωση και αύξησε την πυκνότητα του μείγματος. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η αύξηση της δόσης του αναζωογονητικού παράγοντα προκάλεσε τη μείωση του ITS τόσο για τις μη εξαρτημένες όσο και για τις εξαρτημένες περιπτώσεις και την αύξηση του TSR, κάτι που, σύμφωνα με τους Farooq et al. (2018) οφείλονται στη μειωμένη αντοχή στην κόπωση και στο χαμηλό επίπεδο πρόσφυσης του RAP.

Οι Zhang et al. (2018) εξέτασαν τις επιδράσεις του βιοελαίου, που λαμβάνεται από άχρηστο ξύλο, ως παράγοντα αναζωογόνησης για παλαιωμένη άσφαλτο RAP. Στη μελέτη, το βιοέλαιο εφαρμόστηκε σε άσφαλτο παλαιωμένο με PAV σε τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις (10%, 15% και 20%), ενώ το PG 58-28 επιλέχθηκε ως άσφαλτος ελέγχου για να διευκολυνθεί η παρασκευή του βιο-αναζωογονημένου ασφάλτους. Τα αποτελέσματα της δοκιμής Φασματογράφου Μάζας με Αέριο Χρωματογράφο έδειξαν ότι το βιοέλαιο αποτελούνταν από διάφορες χημικές ενώσεις, οι οποίες ήταν ως επί το πλείστον ελαφριές, όπως φαινόλη, φθαλικός διαιθυλεστέρας και ναφθαλίνη. Η παλαιωμένη άσφαλτος θα μπορούσε να αποκατασταθεί με αυξημένες ελαφριές ή αρωματικές ενώσεις (Yu et al. 2014, Yang, You et al. 2014, Yang et al. 2017), έτσι ώστε το βιοέλαιο θα μπορούσε να εξισορροπήσει αποτελεσματικά το χημικό περιεχόμενο της ασφάλτου λειτουργώντας ως αναζωογονητικός παράγοντας. Με βάση πειραματικά στοιχεία, βρέθηκε ότι η προσθήκη βιοελαίου προκάλεσε μείωση του ιξώδους του

μείγματος. Αυτό το αποτέλεσμα αποδίδεται στην επικράτηση των ελαφρών ενώσεων μέσα στο βιοέλαιο. Επιπλέον, το βιοέλαιο ενίσχυσε τη ρευστότητα του μείγματος, με τη σειρά του, συμβάλλοντας στην αυξημένη αντοχή σε ρωγμές σε χαμηλή θερμοκρασία. Ταυτόχρονα, ο αναζωογονητικός παράγοντας βελτίωσε σημαντικά τη διάρκεια κόπωσης και την αντοχή σε αυλακώσεις της ασφάλτου RAP. Μετά την εφαρμογή 15% και 20% περιεκτικότητας σε βιοέλαιο, η αντοχή της παλαιωμένης ασφάλτου στη ρηγμάτωση σε χαμηλή θερμοκρασία βελτιώθηκε στο ίδιο επίπεδο της PG 58-28. Και πάλι, αυτό το αποτέλεσμα συνδέεται με την επικράτηση ελαφρών ενώσεων στο βιοέλαιο, που ενίσχυσαν την αντοχή στην κόπωση της παλαιωμένης ασφάλτου.

Μέχρι στιγμής, οι μελέτες έχουν αξιολογήσει πέντε τύπους αναζωογονητικών παραγόντων (ελαϊκό οξύ, αρωματικά εκχυλίσματα, ταλλέλαιο, παραφινικό έλαιο και ναφθενικό έλαιο) και την ικανότητά τους να ανακτούν τους βαθμούς απόδοσης σε χαμηλή θερμοκρασία και υψηλή θερμοκρασία των συνδετικών ασφάλτου που εξάγονται από το RAP. Αυτές οι μελέτες πραγματοποίησαν δοκιμές Δυναμικού ρεομέτρου διάτμησης (DSR) και ροόμετρου κάμψης (BBR) για τον προσδιορισμό των πραγματικών βαθμών θερμοκρασίας των ασφαλικών μειγμάτων, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι τα ανανεωμένα συνδετικά ασφάλτου είχαν χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης από τα συνδετικά ασφάλτου ελέγχου που δεν είχαν ανανεωθεί. Η απόδοση της θερμοκρασίας επηρεάστηκε σημαντικά από το παραφινικό έλαιο, τα αρωματικά εκχυλίσματα, το ταλλέλαιο, το ναφθενικό έλαιο και το ελαϊκό οξύ. Τα αρωματικά εκχυλίσματα είχαν τη λιγότερο σημαντική επίδραση στον βαθμό απόδοσης χαμηλής θερμοκρασίας ακολουθούμενα από το ταλλέλαιο, το ναφθενικό έλαιο, το ελαϊκό οξύ και το παραφινικό έλαιο. Κάθε αναζωογονητικός παράγοντας ενίσχυε την αντοχή του μείγματος στην κόπωση, ακόμη και αν δεν ασκούσε σημαντικές επιδράσεις στην απόδοση αυλάκωσης, καθώς ο συνολικός βαθμός απόδοσης της παλαιωμένης ασφάλτου ήταν μεγαλύτερος από αυτόν του παρθένου συνδετικού (PG 76-22) (Ali et al. 2016).

Οι Zaumanis et al. (2013a), διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα των αναζωογονητικών παραγόντων στην παραγωγή ασφαλικών μιγμάτων με περιεκτικότητα 40%-100% σε RAP. Χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί μαλακτικοί παράγοντες, συγκεκριμένα έλαια που προέρχονται από απόβλητα, φυτικά έλαια, έλαια από το διωλιστήριο και έλαια μηχανικής. Εν τω μεταξύ, οι παράγοντες αναζωογόνησης ήταν απόβλητα λάδια κινητήρα, αποσταγμένο ταλλέλαιο, λάδι

ναφθενικής ροής, οργανικά μείγματα, αρωματικά εκχυλίσματα, εξευγενισμένο στέαρ και λάδι με βάση την παραφινική ουσία. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι κάθε αναζωογονητικός παράγοντας είχε αντίθετα αποτελέσματα στην παλαιωμένη ασφάλτο. Το πιο αποτελεσματικό στη μείωση του ιξώδους της παλαιωμένης ασφάλτου ήταν το εξευγενισμένο στέαρ. Ωστόσο, τα έλαια κινητήρα είχαν ως αποτέλεσμα υψηλότερο επίπεδο ιξώδους. Στη μελέτη, οι ερευνητές κατέγραψαν επίσης τις μετρήσεις απόδοσης σε χαμηλές θερμοκρασίες, με την ιδέα να αξιολογήσουν την έμμεση συμμόρφωση ερπυσμού σε εφελκυσμό και την έμμεση αντοχή εφελκυσμού. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, τα αναζωογονητικά μέσα ενίσχυαν τα χαρακτηριστικά χαμηλής θερμοκρασίας των μειγμάτων.

Μια άλλη μελέτη εξέτασε την επίδραση ενός αναζωογονητικού παράγοντα στα συνδεδετικά ασφάλτου που είχαν παλαιώσει μακροπρόθεσμα (Zhu et al. 2017). Η μελέτη χρησιμοποίησε ένα αναζωογονητικό με βάση βιο-συνδεδετικό/πλαστικοποιητή. Συγκεκριμένα, ο πλαστικοποιητής ήταν ο φθαλικός διβουτυλεστέρας, ενώ ο βιοσυνδεδετικός ήταν υποπροϊόν του βαμβακέλαιου. Με βάση τα ευρήματα, ο αναζωογονητικός παράγοντας σε δόση 10% βελτίωσε πλήρως την αντοχή σε αυλάκωση και την εργασιμότητα των συνδεδετικών ασφάλτου. Ο αναζωογονητικός παράγοντας βελτίωσε τα δείγματα ασφάλτου που έχουν παλαιωθεί με PAV και τα τροποποιημένα με SBS, αλλά δεν βελτίωσε τα πρότυπα της παρθένας ασφάλτου. Με βάση τα αποτελέσματα της φασματοσκοπίας υπερύθρων, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας μείωσε τους δείκτες καρβονυλίου και σουλφοξειδίου της ασφάλτου παλαιωμένου με PAV, με τη σειρά του, ενισχύοντας τις ιδιότητες της ασφάλτου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας είχε επίσης μειώσει την περιεκτικότητα σε ασφαλένιο στις ασφαλτες παλαιώσης με PAV. Επιπλέον, ο κολλοειδής δείκτης της εξαγόμενης ασφάλτου μετά την αναζωογόνηση ήταν χαμηλότερος από αυτόν της παρθένας ασφάλτου. Συγκεκριμένα, το πρώτο αποτέλεσμα αποδίδεται στον μηχανισμό της αναζωογόνησης, ενώ το δεύτερο αποτέλεσμα αποδίδεται στις διαφορές μεταξύ της παρθένας και της ανανεωμένης ασφάλτου. Σύμφωνα με τη δοκιμή χρωματογραφίας διείσδυσης γέλης, η προσθήκη του αναζωογονητικού παράγοντα αύξησε μετρίως το μοριακό βάρος, αλλά δεν επηρέασε το μοριακό περιεχόμενο υψηλού βάρους.

Οι Cavalli et al. (2018), ερεύνησαν τον αντίκτυπο των αναζωογονητικών παραγόντων (συγκεκριμένα, φυσικού σπορέλαιου, έλαιο ανακαρδιοειδών, ταλλέλαιο και έλαιο κελύφους)

στα παλαιωμένα συνδετικά ασφάλτου. Η μελέτη χρησιμοποίησε μια δόση αναζωογονητικού παράγοντα 5% της μάζας της ανακτημένης ασφάλτου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γήρανση επηρέασε βαθιά τα ρεολογικά και χημικά χαρακτηριστικά των αποκατασταμένων συνδετικών ασφάλτου. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι κάθε αναζωογονητικός παράγοντας βελτίωσε τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αχρησιμοποίητων συνδετικών ασφάλτου. Εξάλλου, 5% φυσικό σπορέλαιο και 5% ταλλέλαιο ήταν τα μόνα αναζωογονητικά μέσα που αποκατέστησαν μηχανικά την ανακτημένη ασφάλτο σε συγκρίσιμο επίπεδο με αυτό της παλαιωμένης παρθένας ασφάλτου. Ωστόσο, το 5% έλαιο κάσιους απέτυχε να επιτύχει ικανοποιητικό μέτρο και γωνίες φάσης, ειδικά σε σύγκριση με 5% φυσικό σπορέλαιο και 5% ταλλέλαιο. Τέλος, η μελέτη ανέφερε ότι οι αυξημένες μηχανικές αλλαγές λόγω της αναζωογόνησης δεν οφείλονταν στο επίπεδο των χημικών δεσμών ή των λειτουργικών ομάδων, αλλά αντίθετα συνδέονταν με υψηλότερη μοριακή κλίμακα (π.χ. μη πολικά και πολικά συστατικά).

Αλλού οι Cao et al. (2018) χρησιμοποίησαν απόβλητα φυτικά έλαια ως αναζωογονητικό παράγοντα και εξέτασαν την επίδρασή του στα χημικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά της παλαιωμένης ασφάλτου. Ο παράγοντας βρέθηκε να μειώνει το ιξώδες, ενισχύοντας έτσι την εργασιμότητα και τη διάρκεια ζωής της κόπωσης. Επιπλέον, η δόση επηρέασε γραμμικά τις τιμές λογαριθμικού ιξώδους της παλαιωμένης ασφάλτου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας δεν περιείχε καρκινογόνες ενώσεις βενζολίου. Από την ανάλυσή τους των λειτουργικών ομάδων τριών τύπων ασφάλτου (παρθένα, ανανεωμένη και γερασμένη), οι ερευνητές δεν παρατήρησαν καμία χημική αντίδραση μεταξύ της παλαιωμένης ασφάλτου και του παράγοντα. Ο δείκτης σουλφοξειδίου (IS=O) μειώθηκε με υψηλότερη περιεκτικότητα σε παράγοντα που αποδίδεται στη φυσική αραίωση. Επίσης, ο δείκτης καρβονυλίου (IC=O) αυξήθηκε, αφού το βασικό στοιχείο του παράγοντα είναι ένα λιπαρό οξύ. Καθώς η περιεκτικότητα σε WVO αυξανόταν, τα μεγάλα μεγέθη μορίων μειώθηκαν λόγω φυσικής αραίωσης. Το ίδιο παρατηρήθηκε και για τον δείκτη σουλφοξειδίου (IS=O). Τέλος, η μεγάλη συγκέντρωση μορίου και ο δείκτης σουλφοξειδίου βρέθηκαν να συνδέονται στενά με την εργασιμότητα και την αντοχή στην κόπωση της ανανεωμένης ασφάλτου.

Οι Zargar et al. (2012) διερεύνησαν τη δυνατότητα του χρησιμοποιημένου μαγειρικού λαδιού (WCO) ως αναζωογονητικό. Διαπίστωσαν ότι με τη χορήγηση αποβλήτων φυτικών ελαίων σε δόση 3%-4%, τα φυσικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά των παλαιωμένων συνδετικών

ασφάλτου αποκαταστάθηκαν σε αυτά της αρχικής ασφάλτου. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μετά την αναζωογόνηση, το συνδετικό υλικό ασφάλτου έγινε λιγότερο ευαίσθητο στη βραχυπρόθεσμη γήρανση σε σύγκριση με την παρθένα ασφαλτο.

Μια πρόσφατη μελέτη, που διεξήχθη από τους Zhang et al. (2019), χρησιμοποίησε βιοέλαιο προερχόμενο από πριονίδι για την αναζωογόνηση παλαιωμένης ασφάλτου. Για τα συνδετικά βάσης χρησιμοποιήθηκαν PG 58-28 και PG 64-22, ενώ οι συγκεντρώσεις βιοελαίου ορίστηκαν στο 10%, 15% και 20% του συνολικού βάρους του συνδετικού. Πραγματοποιήθηκαν ορισμένες αξιολογήσεις για να αποκτήσουν πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες και την έκταση αναζωογόνησης των παλαιωμένων συνδετικών ασφάλτου. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το ιξώδες και η ενέργεια ενεργοποίησης μειώθηκαν μετά την προσθήκη του βιοελαίου, ενώ η ευαισθησία στη θερμοκρασία και η περιεκτικότητα σε ιξώδες συστατικό αυξήθηκαν. Επιπλέον, βρέθηκε ότι ο αναζωογονητικός παράγοντας μαλακώνει την παλαιωμένη ασφαλτο. Από την άλλη πλευρά, ο δείκτης αυλάκωσης μειώθηκε κατά 75,5% και 77,2% για το PAV PG 58-28 και το PAV PG 64-22, αντίστοιχα, στους (52–76) °C. Επιπλέον, το βιοέλαιο βελτίωσε την αντοχή σε ρωγμές σε χαμηλή θερμοκρασία του ανακυκλωμένου PAV PG 58-28 και PAV PG 64-22, επιτυγχάνοντας ένα πρότυπο μεγαλύτερο ή ίσο με αυτό της παρθένας ασφάλτου. Στη συνέχεια, ο δείκτης σουλφοξειδίου και ο αρωματικός δείκτης (S=O και C=C) χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του επιπέδου αποκατάστασης μετά την προσθήκη του αναζωογονητικού παράγοντα. Ωστόσο, το καρβονύλιο (C=O) δεν ήταν δυνατό να αξιολογηθεί. Ως εκ τούτου, ο παράγοντας αναζωογόνησης ήταν αποτελεσματικός για το PAV PG 58-28 και το PAV PG 64-22 σε δόση 15% και 20%, αντίστοιχα.

Οι Kaseer et al. (2018) παρατήρησαν ότι, σε σύγκριση με τα προϊόντα με βάση το πετρέλαιο, τα φυτικά έλαια εν γένει παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες. Οι He et al. (2018), χρησιμοποίησαν μια μαλακότερη ασφαλτο (στυλ. 110) για την αναζωογόνηση επαναλαμβανόμενων ανακυκλωμένων ασφαλτικών οδοστρωμάτων (R2AP). Η μελέτη ανέφερε ότι μια μαλακότερη ασφαλτος σε περιεκτικότητα 40% θα μπορούσε να αποκαταστήσει το R2AP. Ωστόσο, οι West et al. (2013) ανέφεραν ότι μια μαλακότερη ασφαλτος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει την επίδραση της γήρανσης των οδοστρωμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε RAP. Επιπλέον, οι ερευνητές υποστήριξαν ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε RAP θα μπορούσε να μειώσει την επίδραση της χαμηλότερης ποιότητας συνδετικού υλικού ασφάλτου. Ως εκ τούτου,

ορισμένοι έχουν προτείνει ότι τα αναζωογονητικά θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιούνται, κυρίως επειδή επιτρέπουν έως και 100% χρήση RAP. Εν ολίγοις, κατά την προσθήκη αναζωογονητικών παραγόντων σε ένα ανακυκλωμένο μείγμα, οι παράγοντες πρέπει να πληρούν τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα κριτήρια, επειδή οι διάφοροι τύποι μαλακτικών και αναζωογονητικών παραγόντων θα προκαλέσουν ποικίλες φυσικές και ρεολογικές αλλαγές (Kaseer et al. 2018). Ορισμένοι παράγοντες μπορούν επίσης να επηρεάσουν το PG ή το ιξώδες της ανακυκλωμένης ασφάλτου πανομοιότυπο με αυτό άλλων παραγόντων αλλά σε σημαντικά χαμηλότερη δόση.

5.3.2 Χρήση πολυμερών με/χωρίς αναζωογονητικά μέσα στο RAP

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η απόδοση συμπεριφοράς των μιγμάτων HMA ενισχύθηκε μετά την προσθήκη πολυμερών σε μια άσφαλτο (Kim et al. 2014). Ωστόσο, τα στοιχεία δείχνουν ότι ο τύπος του πολυμερούς που χρησιμοποιείται με το RAP θα μπορούσε να αλλάξει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του μείγματος (Leng et al. 2018). Η μείωση της απόδοσης πυρόλυσης σε χαμηλή θερμοκρασία είναι το βασικό μειονέκτημα του RAP στο HMA, αποτέλεσμα που αποδίδεται στην ακαμψία του συνδυασμένου μείγματος. Ωστόσο, με την τροποποίηση του πολυμερούς, τόσο η αντοχή στην κόπωση όσο και η αντίσταση σε ρωγμές χαμηλής θερμοκρασίας των μιγμάτων HMA θα μπορούσαν να βελτιωθούν επειδή τα πολυμερή θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη σύνδεση μεταξύ των υλικών και έτσι να δημιουργήσουν νέα οδοστρώματα με μακροχρόνια αντοχή (Leng et al. 2018).

Η υγρή, η ξηρή και η μέθοδος τήξης μητρικού υγρού (MLM) είναι οι κύριες στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τον συνδυασμό πολυμερούς με HMA. Η υγρή μέθοδος περιλαμβάνει την ανάμειξη ενός στερεού πολυμερούς με μια άσφαλτο κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, μετά την οποία η τροποποιημένη άσφαλτος προστίθεται στο αδρανή. Στην ξηρή μέθοδο, οι κόκκοι πολυμερούς (που αναφέρονται επίσης ως τσιπς) συνδυάζονται με αδρανή και μετά προστίθεται η άσφαλτος. Το πιο σημαντικό είναι ότι χωρίς αναζωογονητικά, τόσο οι υγρές όσο και οι ξηρές μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το αναγεννημένο HMA, αλλά όχι και για τη μέθοδο MLM, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ανακυκλωμένο HMA χωρίς αναζωογονητικούς παράγοντες. Ως εκ τούτου, η μέθοδος MLM θεωρείται ως η βέλτιστη προσέγγιση για την ανάμειξη πολυμερών με RAP.

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος MLM περιλαμβάνει τη διάλυση ενός πολυμερούς σε έναν οργανικό διαλύτη, ο οποίος δημιουργεί ένα διάλυμα πολυμερούς που αναφέρεται ως «μητρικό υγρό». Μετά από αυτό, το διάλυμα πολυμερούς συνδυάζεται με άσφαλτο μέσω ανάμιξης, μετά την οποία θα λάβει χώρα θέρμανση, απόσταξη και ανάκτηση διαλύτη (Behnood, Gharehveran 2018). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει μέχρι στιγμής εκτελεστεί στο εργαστήριο (ένας κλειστός χώρος), αλλά θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μια πραγματική κατάσταση, αρκεί η μέθοδος να μην είναι πολύ περίπλοκη. Μια σειρά πολυμερών μπορεί να προστεθεί σε ασφατικά μείγματα που περιέχουν RAP, συνήθως με συγκέντρωση που ανέρχεται στο 3%-6% του συνολικού βάρους του συνδετικού ασφάλτου. Αυτά τα πολυμερή περιλαμβάνουν Πολύ-μεθακρυλικό μεθυλεστέρα χαμηλής πυκνότητας (PMMA), οξικό αιθυλένιο-βινυλεστέρα (EVA), πολυπροπυλένιο (PP), στυρένιο βουταδιένιο στυρόλιο (SBS), καουτσούκ στυρολιού-βουταδιενίου (SBR), λατέξ στυρενίου-βουταδιενίου (πολυμερές). γαλάκτωμα), πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (PE) και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET).

Οι Leng et al. (2018) εφάρμοσαν τη μέθοδο MLM για να διερευνήσουν την επίδραση της χρήσης προσθέτων (συγκεκριμένα πρόσθετων που προέρχονται από απόβλητα PET) σε ασφατικά μείγματα με RAP. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι τα μείγματα με πρόσθετα που προέρχονται από RAP και PET αποδίδουν πιο αποτελεσματικά από τα τυπικά μείγματα. Ειδικότερα, η αντίσταση στην αυλάκωση αυξήθηκε περισσότερο από 15%, και η αντίσταση στη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης αυξήθηκε κατά περίπου 60%. Επιπλέον, τα συνδετικά ασφάλτου με πρόσθετα που προέρχονται από RAP και PET παρουσίασαν ευνοϊκή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα χημικά χαρακτηριστικά των αμιδίων PET θα μπορούσαν να αλλάξουν μεταβάλλοντας τον αριθμό των ομάδων αμίνης (δηλαδή τον αριθμό και τη θέση εντός του μορίου). Επιπλέον, η ισορροπία μεταξύ του μήκους της αλυσίδας υδρογονάνθρακα, καθώς και του αριθμού των ομάδων αμίνης, βρέθηκε επίσης να επηρεάζει την αντοχή πρόσφυσης και τη διαλυτότητα εντός της άσφαλτου. Στην ίδια μελέτη, οι ομάδες αμίνης προκάλεσαν μερικές φορές το σχηματισμό εξελιγμένων μοριακών δομών. Το αυξημένο μήκος αλυσίδας υδρογονάνθρακα θα μπορούσε να αυξήσει την ελαστική απόκριση και την αντοχή σε εφελκυσμό, η οποία, με τη σειρά της, βελτιώνει την αντοχή στην κόπωση.

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών κατά της απογύμνωσης, η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα πρόσθετα που προέρχονται από PET τείνουν να μειώνουν την αντίσταση απογύμνωσης της

ασφάλτου RAP. Επομένως, πρόσθετα που προέρχονται από PET θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε μείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP για να επιτευχθούν ευνοϊκά αποτελέσματα. Επιπλέον, οι δοκιμές φασματοσκοπίας FTIR έδειξαν ότι ο αριθμός των οξειδωτικών προϊόντων ήταν χαμηλότερος στην ασφαλτο με πρόσθετα RAP και PET. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι είτε το συνδυασμένο μείγμα έχει συγκρίσιμα χαρακτηριστικά με τη μη παλαιωμένη ασφαλτο είτε ότι τα πρόσθετα που προέρχονται από PET θα μπορούσαν να έχουν αναζωογονητικές ικανότητες.

Οι Eskandarsefat et al. (2018) αξιολόγησαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του λεπτού καουτσούκ (CR), χρησιμοποιώντας την ξηρή μέθοδο, σε μείγματα με περιεκτικότητα 30% RAP. Στη μελέτη, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο με όσο και χωρίς αναζωογονητικό (συγκεκριμένα, απόβλητα φυτικά έλαια) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν. Με βάση τα δεδομένα του μέτρου ακαμψίας έμμεσης εφελκυσμού, η θερμική ευαισθησία των ασφατικών μιγμάτων βρέθηκε να αυξάνεται μετά την προσθήκη CR, ειδικά επειδή το RAP προκάλεσε την αύξηση της ακαμψίας του μείγματος. Επιπλέον, οι δοκιμές ευαισθησίας στην υγρασία έδειξαν ότι κάθε μείγμα που εμπλέκεται στο πείραμα ικανοποιούσε το απαραίτητο όριο που προσφέρεται σε διάφορα πρότυπα. Όσον αφορά τα δεδομένα ITS, τα δείγματα ξηρής προετοιμασίας που είχαν ενσωματώσει έμμεσα CR πέτυχαν υψηλότερη Έμμεση Αντοχή σε Εφελκυσμό (ITS) σε σύγκριση με τα μείγματα χωρίς καουτσούκ. Ταυτόχρονα, οι τιμές ITS των δειγμάτων με υγρή και ξηρή προετοιμασία ήταν συγκρίσιμες. Με βάση το Repeated Load Axial Test, το οποίο έδειξε την τελική συσσωρευμένη καταπόνηση και ρυθμό παραμόρφωσης του μείγματος, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι και τα δύο μείγματα είχαν παρόμοιες ιδιότητες ερπυσμού. Επιπλέον, το CR βρέθηκε ότι ενισχύει τη μακρο-υφή και τη μικρο-υφή κάθε μείγματος.

Με βάση τα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν από τους Xiao και Amirhanian (2010), το crumb rubber με RAP αντιπροσωπεύει έναν οικονομικά αποδοτικό, φιλικό προς το περιβάλλον και αποτελεσματικό τρόπο βελτίωσης των χαρακτηριστικών των ασφατικών μιγμάτων. Οι ερευνητές εξέτασαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνδετικών με καουτσούκ ασφάλτου, καθώς και τα μείγματα που κατασκευάζονται με χρήση PG 64-22 και πιο μαλακής ασφάλτου (PG 52-28), όλα σε εργαστηριακό περιβάλλον. Και στις δύο περιπτώσεις, η περιεκτικότητα σε RAP ήταν 30%, και δοκιμάστηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα καουτσούκ (0%, 5%, 10% και

15%). Μετά από πειράματα, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η αντίσταση στη γήρανση της ανακυκλωμένης ασφάλτου είχε αυξηθεί, ενώ το ITS και το μέτρο ελαστικότητάς της είχαν μειωθεί. Επιπλέον, το ιξώδες και η περιεκτικότητα σε καουτσούκ βρέθηκαν αναλογικά σχετιζόμενα. Ωστόσο, οι ερευνητές ανέφεραν επίσης ότι μια μαλακότερη ασφαλτος βοήθησε στη μείωση της επίδρασης του παλαιωμένου συνδετικού ασφάλτου, ενώ μείωσε επίσης το μέτρο ελαστικότητας και τα επίπεδα ιξώδους των μιγμάτων. Τα στοιχεία τείνουν να υποδηλώνουν ότι η προσθήκη πολυμερούς στην ασφαλτο που εξάγεται από το RAP δεν αποφέρει πάντα θετικά αποτελέσματα.

Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, για παράδειγμα, σύμφωνα με τη μελέτη των Singh, Girimath (2016), η φύση του μείγματος που προκύπτει από το συνδυασμό πολυμερών και RAP εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου ανάμειξης, του τύπου του πολυμερούς, καθώς και ως περιεκτικότητα σε RAP και πολυμερές. Η παραπάνω μελέτη εξέτασε την επίδραση της διακριτής ασφάλτου RAP στα ρεολογικά χαρακτηριστικά και τον βαθμό απόδοσης Superpave (PG) της τροποποιημένης με συμπολυμερές ασφάλτου στυρενίου-βουταδιενίου-στυρενίου (SBS) (PMB). Οι ερευνητές πραγματοποίησαν μια σειρά δοκιμών απόδοσης και φυσικών δοκιμών που αφορούσαν το PMB, το οποίο είχε αναμειχθεί με την ασφαλτο RAP, και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ασφαλτος RAP επηρέασε τη συνοχή των τιμών PMB και Superpave PG. Ως εκ τούτου, είναι σαφές ότι πρέπει να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα κατά την επιλογή μιας βασικής ποιότητας ασφάλτου.

Το πολυμερές, λατέξ στυρενίου-βουταδιενίου, διερευνήθηκε από τους Li et al. (2017) η οποία περιελάμβανε συγκριτική ανάλυση δύο διακριτών προσθέτων, ενός αναζωογονητικού και του λατέξ στυρενίου-βουταδιενίου (SBR), σε θερμή επιτόπια ανακύκλωση (HIR) τροποποιημένου ασφαλτικού μείγματος. Οι ιδιότητες της ανακυκλωμένης ασφάλτου και των ανακυκλωμένων μιγμάτων αξιολογήθηκαν μέσω εκτεταμένων εργαστηριακών και επιτόπιων δοκιμών, με τα αποτελέσματα να αποκαλύπτουν ότι η ολκιμότητα και οι ιδιότητες της παλαιωμένης τροποποιημένης ασφάλτου σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες αποκαταστάθηκαν αποτελεσματικότερα με την προσθήκη λατέξ SBR. Αυτό το πρόσθετο έκανε επίσης την ασφαλτο πιο παχύρρευστη. Από την άλλη πλευρά, η διάχυση, το ιξώδες και η απόδοση της παλαιωμένης τροποποιημένης ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες ενισχύθηκαν με την προσθήκη του αναζωογονητικού, αλλά η απόδοση της ασφάλτου σε υψηλή θερμοκρασία επηρεάστηκε

αρνητικά. Επιπλέον, σε σύγκριση με το αναζωογονητικό, το λατέξ SBR ήταν επίσης πιο αποτελεσματικό στη μείωση της ευαισθησίας του RAP στην υγρασία και στο ράγισμα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, αν και παρατηρήθηκε υψηλή δυνατότητα συντήρησης, καθώς οι δοκιμές HIR τόσο με τον αναζωογονητικό όσο και με το λατέξ SBR εξέθεσαν το ασφαλτικό μείγμα σε κυκλοφορία, ο αναζωογονητής προκάλεσε το οδόστρωμα να είναι λιγότερο επιρρεπές σε αυλακώσεις σε σύγκριση με το λατέξ SBR. Οι συνθήκες υπό τις οποίες τα πρόσθετα ενσωματώθηκαν στο εργοτάξιο και στο οδόστρωμα HIR κατά τη χρήση υποδεικνύονται στο Σχ. 10. Από την παραπάνω συζήτηση, πολλά οφέλη μπορούν να ληφθούν με τη χρήση πολυμερών με παράγοντες για την αποκατάσταση των ιδιοτήτων της ανακυκλωμένης ασφάλτου θερμού μίγματος (HMA). Ωστόσο, οι ελλείψεις στη χρήση αυτών των υλικών δεν πρέπει να παραβλεφθούν.

5.3.3 Χρήση ινών με αναζωογονητικούς παράγοντες

Αν και η περισσότερη βιβλιογραφία έχει βρει ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε RAP βελτιώνει την αντοχή σε μόνιμη παραμόρφωση και μειώνει την ευαισθησία στην υγρασία, η χρήση αναζωογονητών θα μπορούσε επίσης να αυξήσει την ευαισθησία στην υγρασία και -σε ένα βαθμό- να μειώσει την αντίσταση στην μόνιμη παραμόρφωση. Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα είναι η χρήση ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Μια σειρά τύπων ινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ασφαλτικά μείγματα που περιέχουν RAP. Αυτές οι ίνες περιλαμβάνουν ίνες γυαλιού, ίνες λιγνίνης, ίνες νάιλον, ίνες πολυεστέρα και πολλές άλλες.

Σύμφωνα με τους Fakhri, Hosseini (2017). και Peltonen (1991), οι ίνες μπορούν να αυξήσουν την αντοχή σε εφελκυσμό του οδοστρώματος, την αντίσταση στην τριβή και την αντοχή κόπωσης. Οι Wu, Ye, και Li (2008) ανέφεραν ότι η ευαισθησία ενός ασφαλτικού μίγματος στην υγρασία θα μπορούσε να μειωθεί με την προσθήκη ινών. Επιπλέον, οι ίνες προκάλεσαν την αύξηση της αντίστασης της ασφάλτου στη ρευστότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η αντίσταση αυξήθηκε επίσης λόγω της εμφάνισης τρισδιάστατων δικτύων εντός του ασφαλτικού μίγματος, ενώ βελτιώθηκαν επίσης η δύναμη διάτμησης και η αντίσταση στη ρευστότητα (Fakhri, Hosseini 2017, Chen, Xu 2010).

Μια άλλη μελέτη, που πραγματοποιήθηκε από τους Xu et al. (2014), διερεύνησε την επίδραση της ενσωμάτωσης ινών λιγνίνης στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των θερμών

ανακυκλωμένων ασφαλικών μιγμάτων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι ίνες λιγνίνης ενίσχυσαν την αντοχή σε αυλάκωση και κόπωση της ασφάλτου σε υψηλές θερμοκρασίες και βελτίωσαν την ευκαμψία της ασφάλτου σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα πλεονεκτήματα αυτού του βήματος περιλαμβάνουν αυξημένη αντοχή στη θερμική καταπόνηση, χαμηλότερη συχνότητα ρωγμών συρρίκνωσης της θερμοκρασίας και αντοχή σε ρωγμές σε υψηλή θερμοκρασία.

5.4. Μέθοδοι αναζωογόνησης

Υπάρχουν δύο τρόποι για την αποκατάσταση των ιδιοτήτων της παλαιωμένης ασφάλτου: με τη δημιουργία μειγμάτων αναζωογονητικού-RAP και με ψεκασμό του αναζωογονητικού στην επιφάνεια του ασφαλτοστρώματος. Αυτές οι προσεγγίσεις συζητούνται λεπτομερέστερα παρακάτω:

- Μέθοδος ανάμειξης

Η πιο δημοφιλής μέθοδος αναζωογόνησης είναι η μέθοδος ανάμειξης, η οποία εκτελείται σε υψηλές θερμοκρασίες (140 °C έως 160 °C). Μέσα σε ένα εργοστάσιο ασφάλτου, η προσθήκη αναζωογονητών σε άλλα υλικά θα πρέπει να γίνεται σε κατάλληλη τοποθεσία για να μεγιστοποιηθούν τα θετικά αποτελέσματά του (Behnood 2019). Υπάρχουν τρία στάδια στη διάχυση ενός παράγοντα ανακύκλωσης σε μια παλαιωμένη άσφαλτο (Carpenter και Wolosick 1980):

- Εφαρμογή του αναζωογονητικού - ο παράγοντας ανακύκλωσης σχηματίζει ένα ελάχιστο παχύρρευστο στρώμα γύρω από την παλαιωμένη άσφαλτο και επικαλύπτει τα σωματίδια του ανακυκλωμένου υλικού.
- Έναρξη διάχυσης - ο παράγοντας ανακύκλωσης διεισδύει στο εξωτερικό στρώμα της παλαιωμένης ασφάλτου, με αποτέλεσμα η τελευταία να αρχίσει να μαλακώνει. Καθώς η διάχυση προχωρά, ο παράγοντας ανακύκλωσης γύρω από τα σωματίδια του ανακυκλωμένου υλικού θα μειωθεί.
- Τελική διάχυση - Ο παράγοντας ανακύκλωσης διαχέεται στην παλαιωμένη άσφαλτο με την πάροδο του χρόνου, μειώνοντας το ιξώδες του εσωτερικού

στρώματος των σωματιδίων του ανακυκλωμένου υλικού και αυξάνοντας το ιξώδες του εξωτερικού στρώματος

- Μέθοδος ψεκασμού

Για προληπτική συντήρηση, η μέθοδος ψεκασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα πρώτα 3-4 χρόνια της κατασκευής νέου οδοστρώματος (Lin et al. 2014) είτε για να καθυστερήσει την έναρξη της επιφανειακής ρωγμής είτε να την εξασθενήσει. Επιπλέον, διεισδύοντας στους κενούς χώρους του οδοστρώματος, οι αναζωογονητικές στεγανοποιήσεις μπορούν να βελτιώσουν την οξείδωση του συνδετικού υλικού. Το αναζωογονητικό πρέπει να διαπερνά και να διαχέεται σε κατάλληλο βάθος στην ασφαλτο για να διασφαλίσει ότι η αναζωογονητική σφράγιση λειτουργεί καλά (Moghaddam, Baaj 2016).

5.5 Οικονομική ανάλυση και περιβαλλοντικά οφέλη

Η διατήρηση των φυσικών πόρων αποτελεί βασικό μέλημα για τις μελλοντικές γενιές και η επίτευξη μιας σταθερής και βιώσιμης ισορροπίας μεταξύ του κόστους των βιομηχανικών δραστηριοτήτων και της διατήρησης του περιβάλλοντος είναι επομένως υψίστης σημασίας (Jullien et al. 2006). Η βιβλιογραφία δείχνει ξεκάθαρα ότι η περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα όσον αφορά την κατασκευή οδοστρωμάτων μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας υψηλό περιεχόμενο RAP (Debbarma et al. 2020). Επιπλέον, η ανακύκλωση ασφαλτικών οδοστρωμάτων είναι κοινή σε όλο τον κόσμο και αποτελεί βασικό στοιχείο για την κατασκευή νέων οδοστρωμάτων (Debbarma et al. 2020).

Μειωμένες εκπομπές μπορεί να προκύψουν μέσω της επαναχρησιμοποίησης ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων και απαιτείται λιγότερα καύσιμα για την εξόρυξη, την επεξεργασία και τη μεταφορά των πρώτων υλών (Zaumanis et al. 2014a, Aurangzeb et al. 2014, Antunes et al. 2019). Από την άλλη πλευρά, η χρήση μη ανανεώσιμων πόρων θα μειώσει, οδηγώντας σε λιγότερα απόβλητα RAP που φτάνουν στον χώρο υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, θα δημιουργηθούν λιγότερα απόβλητα υλικά οδοποιίας (Moghaddam, Baaj 2016). Αυτές οι πτυχές θα μειώσουν τελικά το κόστος που επιβαρύνουν τις εταιρείες και θα παρέχουν οικονομικό πλεονέκτημα σε ολόκληρο το σύστημα παραγωγής (Yang et al. 2017).

Οι Zaumanis et al. (2014a) ανέφεραν σημαντική εξοικονόμηση κόστους κατά τη χρήση παρθένων μιγμάτων που αποτελούνται από RAP με αναζωογονητικούς παράγοντες. Τα

αποτελέσματα βρήκαν μειώσεις περίπου \$10, \$20 και \$30 ανά τόνο στο κόστος κατασκευής όταν χρησιμοποιήθηκε περιεχόμενο RAP 25%, 50% και 75% αντίστοιχα σε νέα ασφαλτικά μείγματα. Επιπλέον, σε σύγκριση με το παρθένο μείγμα, η τιμή ανά τόνο μίγματος 100% RAP μειώθηκε στα 32 \$ και 48 \$. Μεγάλα τμήματα του συνολικού κόστους αποδόθηκαν στο συνδετικό υλικό, το αδρανή, την αγορά RAP, την επεξεργασία RAP, καύσιμο καυστήρα, διαχείριση ρύπανσης και παράγοντας ανακύκλωσης.

Ο Veeraragavan (2016) ερεύνησε τη χρήση υψηλού περιεχομένου RAP με παράγοντες ανακύκλωσης. Εξοικονόμηση 40% του συνολικού κόστους παρατηρήθηκε όταν η περιεκτικότητα σε RAP αυξήθηκε στο 50% με την εφαρμογή υπολειμμάτων φυτικών ελαίων ως παράγοντα ανακύκλωσης. Επιπλέον, αναφέρθηκε εξοικονόμηση περίπου 34% όταν η περιεκτικότητα σε RAP αυξήθηκε στο 50% με την εφαρμογή ενός παράγοντα ανακύκλωσης ταλλελαίου.

Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων/σκόνης και την εξοικονόμηση ενέργειας, οι Zaumanis et al. (2014a) προσπάθησαν να υπολογίσουν τις εκπομπές και την εξοικονόμηση ενέργειας όταν χρησιμοποιείται ένα παρθένο μείγμα (χωρίς RAP), ένα μείγμα με 100% RAP και ένα με 12% αναζωογονητικό παράγοντα. Τα ευρήματα έδειξαν μείωση 35% στις εκπομπές CO₂ και 20% εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη χρήση του μίγματος 100% RAP (με τον παράγοντα ανακύκλωσης) αντί του παρθένου ασφαλτικού μίγματος χωρίς ανακυκλωμένο υλικό.

Ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση ανακυκλωμένων μειγμάτων που ενσωματώνουν αναζωογονητικά, ορισμένες προκλήσεις μένουν να αντιμετωπιστούν. Αυτά περιλαμβάνουν ανεπαρκή γνώση σχετικά με τη μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα των αναζωογονητικών παραγόντων και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητάς τους (Kaseer et al. 2019). Πράγματι, οι περισσότερες μελέτες για το θέμα επικεντρώθηκαν στις ικανότητες των υλικών να αναζωογονούν την παλαιωμένη ασφαλτο και να βελτιώνουν τις ιδιότητες των μειγμάτων RAP. Ωστόσο, μόνο λίγες μελέτες έχουν διερευνήσει τα οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης διαφορετικών αναζωογονητών. Επομένως, απαιτείται περισσότερη έρευνα σχετικά με τη χρήση του RAP σε διαφορετικά αναζωογονητικά.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Το ανακυκλωμένο ασφαλτικό σκυρόδεμα, γνωστό και ως ανακυκλωμένο ασφαλτικό οδόστρωμα (RAP), παίζει σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων και προσφέρει πολλά σημαντικά οφέλη, τα οποία συνοψίζονται ακολούθως:

- **Περιβαλλοντικά Οφέλη:** Η ανακύκλωση του ασφαλτικού σκυροδέματος μειώνει τη ζήτηση για νέες πρώτες ύλες, όπως αδρανή και άσφαλτο, που είναι μη ανανεώσιμοι πόροι. Με την επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων υλικών, καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια και παράγονται λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία παραγωγής. Επιπλέον, η ανακύκλωση ασφάλτου μειώνει την ποσότητα των απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, προωθώντας μια κυκλική οικονομία και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- **Εξοικονόμηση Ενέργειας:** Η παραγωγή νέου ασφαλτικού σκυροδέματος από παρθένα υλικά απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Η ενσωμάτωση ανακυκλωμένης ασφάλτου μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη, επεξεργασία και μεταφορά νέων υλικών με ένταση ενέργειας, οδηγώντας σε συνολική εξοικονόμηση ενέργειας και μειωμένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.
- **Μείωση κόστους:** Η χρήση ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους για κατασκευαστικά έργα. Η διαδικασία ανακύκλωσης απαιτεί γενικά λιγότερη ενέργεια και πόρους σε σύγκριση με την παραγωγή νέων υλικών, με αποτέλεσμα μειωμένο κόστος παραγωγής. Επιπλέον, η ανακύκλωση της ασφάλτου μπορεί να μειώσει την ανάγκη για τέλη διάθεσης χωματερών, τα οποία μπορεί να είναι ακριβά.
- **Διατήρηση φυσικών πόρων:** Χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένη άσφαλτο, μπορούμε να διατηρήσουμε τους φυσικούς πόρους όπως τα αδρανή πέτρας και η άσφαλτος, που χρησιμοποιούνται συνήθως στη συμβατική παραγωγή ασφάλτου. Αυτή η διατήρηση

βοηθά στην προστασία των ευαίσθητων οικοσυστημάτων και μειώνει τις επιπτώσεις της εξόρυξης και της εξόρυξης στο περιβάλλον.

- Βελτιωμένη συμπεριφορά οδοστρώματος: Το ανακυκλωμένο ασφαλτικό σκυρόδεμα έχει βρεθεί ότι έχει εξίσου καλή συμπεριφορά ή ακόμα και καλύτερη από τη συμβατική ασφάλτο σε πολλές περιπτώσεις. Το παλαιωμένο συνδετικό ασφάλτου στο ανακυκλωμένο υλικό μπορεί να συμβάλει στη βελτιωμένη αντοχή και αντοχή στις ρηγματώσεις. Επιπλέον, η συμπερίληψη παλαιωμένου συνδετικού μπορεί να μειώσει την αυλάκωση.
- Ταχύτερη κατασκευή: Η ενσωμάτωση ανακυκλωμένης ασφάλτου μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο χρόνο κατασκευής, καθώς εξαλείφει την ανάγκη μεταφοράς υλικών από τα λατομεία στα εργοτάξια. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα επωφελές σε αστικές περιοχές, όπου η μεταφορά υλικών μπορεί να είναι χρονοβόρα και ενοχλητική.
- Μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα: Η χρήση ανακυκλωμένων υλικών στις κατασκευές, συμπεριλαμβανομένου του ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος, μπορεί να μειώσει σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα που σχετίζεται με ένα έργο. Μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την κατανάλωση ενέργειας, η κατασκευαστική βιομηχανία μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.
- Συμμόρφωση με τα Πρότυπα Πράσινης Δόμησης: Σε πολλές περιοχές, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών ενθαρρύνεται ή απαιτείται για την τήρηση των προτύπων πράσινων κτιρίων και των πιστοποιητικών βιωσιμότητας. Το ανακυκλωμένο ασφαλτικό σκυρόδεμα μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη αυτών των περιβαλλοντικών σημείων αναφοράς.

Συνολικά, η σημασία του ανακυκλωμένου ασφαλτικού σκυροδέματος έγκειται στην ικανότητά του να προάγει τη βιωσιμότητα, να εξοικονομεί πόρους, να μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να παρέχει οικονομικά αποδοτικές και υψηλής απόδοσης λύσεις για έργα υποδομής. Καθώς ο κατασκευαστικός κλάδος επικεντρώνεται περισσότερο σε βιώσιμες πρακτικές, η χρήση ανακυκλωμένου ασφαλτοσκυροδέματος θα συνεχίσει να αυξάνεται σε σημασία.

Η χρήση RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) παρουσιάζει επίσης περιορισμούς και προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Ο πρώτος βασικός περιορισμός σχετίζεται με την ποιότητα του υλικού RAP που χρησιμοποιείται. Το ανακυκλωμένο άσφαλτο μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, και η ποιότητα του ποικίλλει ανάλογα με το αρχικό μείγμα, την ηλικία του και τις συνθήκες φθοράς του οδοστρώματος. Αν το υλικό RAP είναι χαμηλής ποιότητας, με μεγάλη φθορά ή περιέχει υπερβολικές ποσότητες πρόσμεικτων υλικών όπως χώμα, λάσπη ή σκουριά, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αντοχή και τη διάρκεια ζωής του νέου μείγματος ασφάλτου. Επίσης, η αναλογία ασφάλτου στο RAP μπορεί να ποικίλλει και να μην επαρκεί για τη δημιουργία ενός σταθερού και ανθεκτικού νέου οδοστρώματος, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προσθήκη νέων ασφαλικών υλικών για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ετερογένεια της σύστασης του RAP μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες κατά την κατασκευή και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι νομοθετικές και τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές ορίζουν μέγιστα όρια για το ποσοστό του RAP που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέα μίγματα ασφάλτου. Για παράδειγμα, σε κάποιες χώρες επιτρέπεται η χρήση του RAP έως ένα ποσοστό 10%-30%, ανάλογα με την κατηγορία του οδοστρώματος και το είδος της κυκλοφορίας που θα εξυπηρετεί. Σε άλλα έργα μπορεί να επιτρέπεται η χρήση μεγαλύτερων ποσοστών, αλλά απαιτείται η προσθήκη ειδικών πρόσθετων ή τεχνολογιών για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του μείγματος. Η περιορισμένη χρήση του RAP καθορίζεται από τις τεχνικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούν τα νέα μίγματα ασφάλτου. Σε οδούς που υπόκεινται σε έντονη κυκλοφορία βαρέων οχημάτων, η χρήση μεγάλης ποσότητας RAP μπορεί να προκαλέσει πρόωρη φθορά και μείωση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

Ένας σημαντικός περιορισμός αφορά τη δυνατότητα ανακύκλωσης του RAP χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η διαδικασία ανακύκλωσης της ασφάλτου απαιτεί τη θέρμανση του RAP σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που αυξάνει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και μπορεί να αναιρεί ένα μέρος των περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την ανακύκλωση. Επίσης, το RAP μπορεί να περιέχει υπολείμματα βαρέων μετάλλων ή άλλων τοξικών ουσιών από το αρχικό οδόστρωμα, τα οποία ενδέχεται να απελευθερωθούν στο περιβάλλον κατά την επεξεργασία του. Η σωστή διαχείριση αυτών των παραγόντων είναι

κρίσιμη για να διασφαλιστεί ότι η χρήση του RAP συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και όχι στην επιδείνωσή του. Απαιτούνται ειδικές τεχνολογίες και μέτρα για να διασφαλιστεί ότι η ανακύκλωση της ασφάλτου δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του αέρα και του εδάφους στις περιοχές όπου πραγματοποιείται η διαδικασία.

Η χρήση του RAP στα οδοστρώματα απαιτεί εξειδικευμένες τεχνολογίες και εξοπλισμό, που δεν είναι πάντα διαθέσιμα σε όλες τις περιοχές. Οι παραδοσιακές ασφατικές μονάδες παραγωγής δεν είναι πάντα σχεδιασμένες να διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες RAP, και απαιτείται η αναβάθμισή τους ή η επένδυση σε νέες μονάδες. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος και να δημιουργήσει τεχνολογικούς περιορισμούς στην υιοθέτηση της ανακύκλωσης ασφάλτου σε ευρεία κλίμακα. Επιπλέον, η ανάμιξη του RAP με νέο ασφατικό υλικό πρέπει να γίνεται με ακρίβεια, ώστε να διασφαλιστεί ότι το τελικό μείγμα πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Εάν η ανάμιξη δεν είναι ομοιογενής ή οι συνθήκες επεξεργασίας δεν είναι ιδανικές, το νέο οδόστρωμα μπορεί να παρουσιάσει προβλήματα, όπως ρηγματώσεις ή χαμηλή αντοχή στη φθορά.

Αν και η ανακύκλωση της ασφάλτου έχει τη δυνατότητα να μειώσει το κόστος των έργων οδοποιίας, υπάρχουν και οικονομικοί περιορισμοί που συνδέονται με την εφαρμογή αυτής της πρακτικής. Η επένδυση σε νέες τεχνολογίες και εξοπλισμό για τη διαχείριση του RAP μπορεί να είναι υψηλή, ενώ η διαδικασία ανακύκλωσης απαιτεί επιπλέον κόστος ενέργειας και εργατικού δυναμικού. Σε πολλές περιπτώσεις, η οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης RAP εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του υλικού στην εκάστοτε περιοχή. Εάν το RAP δεν είναι εύκολα προσβάσιμο ή απαιτείται μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις, το κόστος της διαδικασίας μπορεί να υπερβεί τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του.

Η χρήση του RAP σε οδοστρώματα διέπεται από συγκεκριμένους κανονισμούς και πρότυπα, που ποικίλλουν από χώρα σε χώρα ή ακόμη και από περιοχή σε περιοχή. Αυτοί οι κανονισμοί καθορίζουν τις επιτρεπόμενες αναλογίες χρήσης, τις προδιαγραφές ποιότητας, καθώς και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διαχείριση και την επεξεργασία του RAP. Σε πολλές περιπτώσεις, οι θεσμικές απαιτήσεις είναι αυστηρές, ιδίως όσον αφορά τη χρήση του RAP σε έργα υποδομής που χρηματοδοτούνται από το δημόσιο. Η συμμόρφωση με αυτές τις κανονιστικές απαιτήσεις μπορεί να περιορίσει τη χρήση του RAP σε συγκεκριμένα έργα και να απαιτήσει πρόσθετες διαδικασίες ελέγχου και πιστοποίησης.

Η χρήση του RAP μπορεί να επηρεάσει την ανθεκτικότητα και τη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων. Ενώ υπάρχουν παραδείγματα έργων όπου η χρήση ανακυκλωμένης ασφάλτου έχει οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε άλλες περιπτώσεις έχουν αναφερθεί προβλήματα πρόωρης φθοράς και ρηγματώσεων. Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν η αναλογία RAP είναι υψηλή ή όταν το υλικό δεν έχει επεξεργαστεί σωστά. Η πρόκληση έγκειται στη διασφάλιση ότι το νέο οδόστρωμα, που περιέχει RAP, θα είναι ανθεκτικό και θα διατηρήσει την απόδοσή του για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτό απαιτεί προσεκτική μελέτη των συνθηκών κυκλοφορίας, των καιρικών συνθηκών και των απαιτήσεων του έργου, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη σύνθεση του μείγματος.

Για να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της ανακυκλωμένης ασφάλτου, απαιτείται συνεχής έρευνα και καινοτομία στις τεχνολογίες ανακύκλωσης, καθώς και η δημιουργία ενός πλαισίου πολιτικής και των απαραίτητων προδιαγραφών που θα προωθούν τη χρήση του RAP, χωρίς να διακυβεύεται η ποιότητα και η ανθεκτικότητα των οδικών υποδομών.

Βιβλιογραφία

AASHTO. (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2009). Transportation and Sustainability Best Practices Background. SustainabilityPeer Exchange. Washington, DC: Center for Environmental Excellence, American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2012). Pavement Management Guide, 2nd ed. Washington, DC: American Association of State highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2015). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO. (2018). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7th ed. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Ali, A.W., Mehta, Y.A., Nolan, A., Purdy, C., Bennert, T., (2016). Investigation of the impacts of aging, RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. *Construction, Building Materials*, 110, pp.211-217.

Alvarez, C., Thompson, M.R., (1994). Aging Phenomenon in Asphalt Concrete Pavements: A Literature Review (University of Illinois, Department of Civil Engineering). Report No. Project IA-A1, FY 92, SR.

Antunes, V., Freire, A.C., Neves, J., (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties, the viability of multi-recycling. *Construction, Building Materials*, 211, pp.453-469

ARRA. (2015). Basic Asphalt Recycling Manual. Glen Ellyn, IL: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), U.S. Department of Transportation

Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Yang, R., (2014). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, conservation, recycling*, 83, pp.77-86

Behnood, A., Gharehveran, M.M., (2018). Morphology, rheology, physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*.

Behnood, A., (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological, mechanical properties of asphalt binders, mixtures: A review. *Journal of cleaner production*.

Behnood, A., Shah, A., McDaniel, R.S., Beeson, M., Olek, J., (2016). High-temperature properties of asphalt binders: Comparison of multiple stress creep recovery, performance grading systems. *Transportation Research Record*, 2574(1), pp.131-143.

Behroozikhah, A., Morafa, S.H., Aflaki, S., (2017). Investigation of fatigue cracks on RAP mixtures containing Sasobit, crumb rubber based on fracture energy. *Construction, Building Materials*, 141, pp.526-532.

Bonicelli, A., Calvi, P., Martinez-Arguelles, G., Fuentes, L. , Giustozzi, F., (2017). Experimental study on the use of rejuvenators, plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures. *Construction, Building Materials*, 155, pp.37-44.

Booshehrian, A., Mogawer, W.S. , Bonaquist, R., (2012). How to construct an asphalt binder master curve, assess the degree of blending between RAP, virgin binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), pp.1813-1821.

Bowers, B.F., (2013). Investigation of asphalt pavement mixture blending utilizing analytical chemistry techniques.

Bressi, S., Cavalli, M.C., Partl, M.N., Tebaldi, G., Dumont, A.G. , Poulikakos, L.D., (2015). Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements. *Construction, Building Materials*, 100, pp.207-217.

Bressi, S., Dumont, A.G. , Pittet, M., (2015). Cluster phenomenon, partial differential aging in RAP mixtures. *Construction, Building Materials*, 99, pp.288-297.

Bressi, S., Pittet, M., Dumont, A.G. , Partl, M.N., (2016). A framework for characterizing RAP clustering in asphalt concrete mixtures. *Construction, Building Materials*, 106, pp.564-574.

Bylikin, S., Horner, G., Murphy, B. , Tarcy, D., (2014). *Chemistry: Course Companion*. Oxford University Press.

Cao, X., Wang, H., Cao, X., Sun, W., Zhu, H. . Tang, B., (2018). Investigation of rheological, chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil. *Construction, Building Materials*, 180, pp.455-463. Carpenter, S.H., Wolosick, J.R., (1980). Modifier influence in the characterization of hotmix recycled material. *Transportation research record*

Cavalli, M.C., Zaumanis, M., Mazza, E., Partl, M.N., Poulikakos, L.D., (2018). Effect of ageing on the mechanical, chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators. *Composites Part B: Engineering*, 141, pp.174-181.

Chen, H., Xu, Q., (2010). Experimental study of fibers in stabilizing, reinforcing asphalt binder. *Fuel*, 89(7), pp.1616-1622.

Copeland, A., (2011). Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice (No. FHWA-HRT-11-021). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development,, Technology.

Cross, S. A., Jakatimath, Y. (2007).Evaluation of Cold In-Place Recycling for Rehabilitation of Transverse Cracking on US 412. Report No. FHWA/OK 07 (04)., Oklahoma City, OK: Oklahoma Department of Transportation, Planning & Research Division

Debbarma, S., Ransinchung, G.D., Singh, S., Sahdeo, S.K., (2020). Utilization of industrial, agricultural wastes for productions of sustainable roller compacted concrete pavement mixes containing reclaimed asphalt pavement aggregates. Resources, Conservation, Recycling, 152,

Dos Santos, S., Partl, M.N., Poulikakos, L.D., (2015). From virgin to recycled bitumen: A microstructural view. Composites Part B: Engineering, 80, pp.177-185.

Elkashef, M., Williams, R.C., (2017). Improving fatigue, low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. Construction, Building Materials, 151, pp.345-352.

Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Dondi, G., Lamperti, R., (2018). Recycling asphalt pavement, tire rubber: A full laboratory, field scale study. Construction, Building Materials, 176, pp.283-294.

Fakhri, M., Hosseini, S.A., (2017). Laboratory evaluation of rutting, moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporating high RAP proportion. Construction, Building Materials, 134, pp.626-640.

Farooq, M.A., Mir, M.S., Sharma, A., (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. Construction, Building Materials, 168, pp.61-72.

FHWA. (1999). Pavement Subsurface Drainage Design. NHI Course No. 131026. Washington, DC: Federal Highway Administration.

FHWA. (2002). Formal Policy on the Use of Recycled Materials. Washington, DC: Federal Highway Administration.

FHWA. (2004). Recycled Concrete Aggregate—Federal Highway Administration National Review. Washington, DC: Federal Highway Administration.

FHWA. (2007). Use of Recycled Concrete Pavement as Aggregate in Hydraulic-Cement Concrete Pavement. Technical Advisory T 5040.37. Washington, DC: Federal Highway Administration. FHWA. (2009).

FHWA. (2010). Local Calibration of the AASHTOWARE Using Pavement Management Systems. Report No. HIF-11-026. Washington, DC: Federal Highway Administration Office of Asset Management.

FHWA. (2013). Traffic Monitoring Guide. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

FHWA-HRT-06-106. Design and Evaluation of Jointed Plain Concrete Pavement with Fiber Reinforced Polymer Dowels. McLean, VA: Office of Research and Technology Services, Federal Highway Administration.

Frantzis, (1998). Environmental Attack on Adhesive Joints Part III: Mechanisms of Failure. JSME International Journal Series A Solid Mechanics, Material Engineering, 41(3), pp.405-415.

Fursule, R.A., (2008). Biochemistry Basics, Applied. Pragati Books Pvt. Ltd.

Giani, M., Dotelli, G., Brandini, N., Zampori, L. (2015). Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, Resources, Conservation and Recycling, 104, pp. 224– 238

Gottumukkala, B., Kusam, S.R., Tandon, V., Muppireddy, A.R., (2018). Estimation of Blending of Rap Binder in a Recycled Asphalt Pavement Mix. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(8),

He, G.P., Wong, W.G., (2008). Effects of moisture on strength, permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials. Construction, Building Materials, 22(1), pp.30-40.

He, H., Zhang, E., Fatokoun, S., Shan, L., (2018). Effect of the softer binder on the performance of repeated RAP binder. *Construction, Building Materials*, 178, pp.280-287.

Islam, M. R., & Tarefder, R. A. (2020). *Pavement Design. Pavement Design: Materials, Analysis, and Highways*. McGraw-Hill Education.

Islam, M. R., Kalevela, S. A., Rivera, J. (2018). *Dynamic Modulus of Cold-in-Place Recycling Asphalt Materials. Final Report, 2018-10*. Denver, CO: Colorado Department of Transportation (CDOT): pp. 1–158

ITS. (2000). *University of California Institute of Transportation Studies, South Africa/United States Pavement Technology Workshop, Module 3: Pavement Structural Design*. Videotape series of seminar, March 20–23, 2000. Richmond, CA: University of California Field Station

Izadi, A., Motamedi, M., Alimi, R., Nafar, M., (2018). Effect of aging conditions on the fatigue behavior of hot, warm mix asphalt. *Construction, Building Materials*, 188, pp.119-129.

Jullien, A., Monéron, P., Quaranta, G., Gaillard, D., (2006). Air emissions from pavement layers composed of varying rates of reclaimed asphalt. *Resources, conservation, recycling*, 47(4), pp.356-374

Karlsson, R., Isacson, U., (2006). Material-related aspects of asphalt recycling—state-of-the-art. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), pp.81-92.

Kaseer, F., Cucalon, L.G., Arámbula-Mercado, E., Martin, A.E., Epps, J., (2018). Practical tools for optimizing recycled materials content, recycling agent dosage for improved short-and long-term performance of rejuvenated binder blends, mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 87, pp.513- 550.

Kaseer, F., Martin, A.E., Arámbula-Mercado, E., (2019). Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction, Building Materials*, 211, pp.974-987.

Kemp, G.R., Predoehl, N.H., (1981). A comparison of field, laboratory environments on asphalt durability. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings (Vol. 50)*.

Kim, J., Lee, H., Jahren, C. T., Heitzman, M., Chen, D. (2010). Long-term field performance of cold in-place recycled roads in Iowa. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(3), pp. 265–274

Kim, S., Park, J., Lee, S., Kim, K.W., (2014). Performance of modified WMA Mixtures prepared using the same class pg binders of HMA mixtures. *Journal of Testing, Evaluation*, 42(2), pp.347-356.

Kim, Y.R., Lee, H.J., (2003). Evaluation of the effect of aging on mechanical, fatigue properties of sand asphalt mixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(4), pp.389- 398.

Kumar, V. , Ram. (2016). An investigation of the performance of hot mix asphalt (HMA) binder course materials with high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP), rejuvenators.

Lawson, William D., Sanjaya S. (2009). Chip seal maintenance: solutions for bleeding, flushed pavement surfaces, *Transportation Research Record*, 2108: pp. 61-68.

Leng, Z., Sreeram, A., Padhan, R.K., Tan, Z., (2018). Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of cleaner production*, 196, pp.615-62.

Li, J., Ni, F., Jin, J., Zhou, Z., (2017). A comparison of rejuvenator, styrene–butadiene rubber latex used in hot in-place recycling. *Road Materials, Pavement Design*, 18(1), pp.101-115.

Li, X., Marasteanu, M.O., Williams, R.C., Clyne, T.R., (2008). Effect of reclaimed asphalt pavement (proportion, type), binder grade on asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2051(1), pp.90-97.

Lin, J., Hong, J., Huang, C., Liu, J., Wu, S., (2014). Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement. *Construction, Building Materials*, 55, pp.63-68.

Liu, S., Shukla, A., Nandra, T., (2017). Technological, environmental, economic aspects of asphalt recycling for road construction. *Renewable, Sustainable Energy Reviews*, 75, pp.879-893.

Lopes, M., Gabet, T., Bernucci, L., Mouillet, V., (2015). Durability of hot, warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale. *Materials, Structures*, 48(12), pp.3937-3948

Loria, L., Hajj, E.Y., Sebaaly, P.E., Barton, M., Kass, S., Liske, T., (2011). Performance evaluation of asphalt mixtures with high recycled asphalt pavement content. *Transportation Research Record*, 2208(1), pp.72-81.

Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J.S., Bonaquist, R., Austerman, A., Booshehrian, A., (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials, Pavement Design*, 13(sup1), pp.183-208.

Moghaddam, T.B., Baaj, H., (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction, Building Materials*, 114, pp.805-816.

Moreno, F., Rubio, M.C., (2013). Effect of aggregate nature on the fatigue-cracking behavior of asphalt mixes. *Materials & Design*, 47, pp.61-67.

Nahar, S.N., Mohajeri, M., Schmets, A.J.M., Scarpas, A., Van de Ven, M.F.C., Schitter, G., (2013). First observation of blending-zone morphology at interface of reclaimed asphalt binder, virgin bitumen. *Transportation Research Record*, 2370(1), pp.1-9.

Nikolaides, A. (2015). *Highway Engineering—Pavements, Materials and Control of Quality*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., Mazzotta, F., (2017). Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin, RAP bitumen. *International Journal of Pavement Research, Technology*, 10(4), pp.322-332.

Nosetti, A., Pérez-Madrugal, D., Pérez-Jiménez, F., Martínez, A.H., (2018). Effect of the recycling process, binder type on bituminous mixtures with 100% reclaimed asphalt pavement. *Construction, Building Materials*, 167, pp.440-448.

Peltonen, P., (1991). Wear, deformation characteristics of fibre reinforced asphalt pavements. *Construction, building materials*, 5(1), pp.18-22.

Raad, L., Saboundjian, S., Minassian, G., (2001). Field aging effects on fatigue of asphalt concrete, asphalt-rubber concrete. *Transportation Research Record*, 1767(1), pp.126-134.

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D-Y., Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. Greenbelt, MD: NAPA Research and Education Foundation

Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W., (1991). *Hot mix asphalt materials, mixture design, construction*.

Schwartz, C. W. (2016). *Structural Characteristics and Environmental Benefits of Cold-Recycled Asphalt Paving Materials*. National Pavement Preservation Conference, October 12–14, 2016, Nashville, TN

Senadheera, S., Leaverton, M., Lawson, W.D., (2007). Maintenance solutions for bleeding, flushed pavements surfaced with a seal coat or surface treatment. Texas Department of Transportation.

Shen, J., Amirhanian, S., Tang, B., (2007). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder, mixtures. *Construction, Building Materials*, 21(5), pp.958-964.

Shirodkar, P., Mehta, Y., Nolan, A., Dubois, E., Reger, D., McCarthy, L., (2013). Development of blending chart for different degrees of blending of RAP binder, virgin binder. *Resources, conservation, recycling*, 73, pp.156-161.

Shirodkar, P., Mehta, Y., Nolan, A., Sonpal, K., Norton, A., Tomlinson, C., Dubois, E., Sullivan, P., Sauber, R., (2011). A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. *Construction, Building Materials*, 25(1), pp.150-155.

Silva, H.M., Oliveira, J.R., Jesus, C.M., (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?. *Resources, Conservation, Recycling*, 60, pp.38-48.

Singh, D., Ashish, P.K., Chitragar, S.F., (2018). Laboratory performance of Recycled Asphalt Mixes containing wax, chemical based Warm Mix Additives using Semi Circular Bending, Tensile Strength Ratio tests. *Construction, Building Materials*, 158, pp.1003-1014.

Singh, D., Girimath, S., (2016). Investigation of rheological properties, Superpave PG of PMB mixed with reclaimed asphalt pavement binders. *Construction, Building Materials*, 126, pp.834-842.

Tran, N.H., Taylor, A., Willis, R., (2012). Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP, RAS contents. NCAT Report, pp.12-05.

Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction, Building Materials*, 25(3), pp.1289-1297

Wang F, Fang Y, Chen Z, Wei H. (2018) Effect of waste engine oil on asphalt reclaimed properties. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1973, No. 1, p. 020012). AIP Publishing.

Wang, W., Chen, J., Sun, Y., Xu, B., Li, J., Liu, J., (2017). Laboratory performance analysis of high percentage artificial RAP binder with WMA additives. *Construction, Building Materials*, 147, pp.58-65

West, R.C., Willis, J.R., Marasteanu, M.O., (2013). Improved mix design, evaluation,, materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content (Vol. 752). Transportation Research Board.

Wu, S., Ye, Q., Li, N., (2008). Investigation of rheological, fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers. *Construction, Building Materials*, 22(10), pp.2111-2115.

Xiao, F., Amirhanian, S.N., (2010). Laboratory investigation of utilizing high percentage of RAP in rubberized asphalt mixture. *Materials, structures*, 43(1-2), p.223.

Xiao, F., Amirhanian, S.N., Shen, J., Putman, B., (2009). Influences of crumb rubber size, type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures. *Construction, Building Materials*, 23(2), pp.1028-1034.

Xie, Z., Rizvi, H., Purdy, C., Ali, A., Mehta, Y., (2019). Effect of rejuvenator types, mixing procedures on volumetric properties of asphalt mixtures with 50% RAP. *Construction, Building Materials*, 218, pp.457-464.

Xu, G., Ma, T., Fang, Z., Huang, X., Zhang, W., (2019). The evaluation method of particle clustering phenomena in RAP. *Applied Sciences*, 9(3), p.424.

Xu, J., Hao, P., Zhang, D., Yuan, G., (2018). Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency based on micro-mechanical properties of layered asphalt binders. *Construction, Building Materials*, 163, pp.390-401.

Xu, S., Wu, Z., Xu, Y., Chen, S., (2014). Performance Evaluation of High RAP Asphalt Mixture with Fiber, Warm Mixing Agent. In *Challenges, Advances in Sustainable Transportation Systems* (pp. 343-351).

Yang, X., Mills-Beale, J., You, Z., (2017). Chemical characterization, oxidative aging of bio-asphalt, its compatibility with petroleum asphalt. *Journal of cleaner production*, 142, pp.1837-1847.

Yang, X., You, Z., Mills-Beale, J., (2014). Asphalt binders blended with a high percentage of biobinders: Aging mechanism using FTIR, rheology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4), p.04014157.

Yu, X., Zaumanis, M., Dos Santos, S., Poulikakos, L.D., (2014). Rheological, microscopic,, chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, pp.162-171.

Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R., (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of hazardous materials*, 233, pp.254-258.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), pp.39-55.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2013). Evaluation of rejuvenator's effectiveness with conventional mix testing for 100% reclaimed Asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record*, 2370(1), pp.17-25.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review, analysis. *Resources, Conservation, Recycling*, 92, pp.230-245.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review, analysis. *Resources, Conservation, Recycling*, 92, pp.230-245.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction, Building Materials*, 69, pp.159-166.

Zaumanis, M., Mallick, R.B., Frank, R., (2016). 100% hot mix asphalt recycling: challenges, benefits. *Transportation research procedia*, 14, pp.3493-3502.

Zhang, K., Huchet, F., Hobbs, A., (2019). A review of thermal processes in the production, their influences on performance of asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction, Building Materials*, 206, pp.609-619.

Zhang, R., You, Z., Wang, H., Chen, X., Si, C., Peng, C., (2018). Using bio-based rejuvenator derived from waste wood to recycle old asphalt. *Construction, Building Materials*, 189, pp.568-575.

Zhang, R., You, Z., Wang, H., Ye, M., Yap, Y.K., Si, C., (2019). The impact of bio-oil as rejuvenator for aged asphalt binder. *Construction, Building Materials*, 196, pp.134-143.

Zhu, H., Xu, G., Gong, M., Yang, J., (2017). Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator. *Construction, Building Materials*, 147, pp.117-129.

Zhu, J., Tao, M., Zhanyong F., (2020). Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling. *Construction, Building Materials*, 240

Γεωργούλη Κ., (2023), *Σημειώσεις για το μάθημα ΟΔΟΠΟΙΑ II*, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

