



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΕ
ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ



ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΛΙΑΡΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΠΛΑΤΗ, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

.....

Αθανάσιος Λιαρμακόπουλος

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.
© 2020 – All rights reserved

Copyright ©-- All rights reserved Αθανάσιος Λιαρμακόπουλος, 2020.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην επιβλέπουσα αναπληρώτρια καθηγήτρια του Ε.Μ.Π. Χριστίνα Πλατή τόσο για την ανάθεση αυτής, όσο και για την πολύτιμη βοήθειά της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Brad Cliatt για την άψογη συνεργασία μας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη και την συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η ανακύκλωση των φθαρμένων ελαστικών για την επαναχρησιμοποίησή τους ως βιώσιμα υλικά στα οδοστρώματα έχει αποτελέσει διεθνώς αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και έρευνας. Στην υπόψη έρευνα εντάσσεται και η παρούσα διπλωματική εργασία, όπου επικεντρώνεται αφενός στην επίδραση της προσθήκης ελαστικού στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων και αφετέρου στην επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε σχέση με το ποσοστό του προστιθέμενου ελαστικού.

Ειδικότερα, διερευνάται η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus-ITSM) των ασφαλτομιγμάτων, τροποποιημένων με «αντιδράμενο και ενεργοποιημένο ελαστικό» (Reacted and Activated Rubber, RAR), το οποίο προέρχεται κατά κύριο λόγο από ανακυκλωμένα ελαστικά, σε συνάρτηση τόσο με την ποσότητα ελαστικού που προστίθεται, όσο και με την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κύριο σκέλος της υπόψη διερεύνησης είναι η εκπόνηση πειραματικής διαδικασίας στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα σχετικά αποτελέσματα ορίζουν το βέλτιστο ποσοστό προσθήκης του συγκεκριμένου ελαστικού προς αντικατάσταση της ασφάλτου σε ασφαλτομίγματα για την κατασκευή της αντιστοιχιστικής στρώσης κυκλοφορίας μίας οδού.

Λέξεις Κλειδιά: Ανακύκλωση, Ελαστικά, Βιώσιμα υλικά, Άσφαλτος, Μέτρο δυσκαμψίας, Ασφαλτόμιγμα, RAR, ITSM.

ABSTRACT

In recent years, the recycling of worn tires for their reuse as sustainable materials in pavements has been a subject of great interest and research worldwide. Taking into consideration the above, this diploma thesis focuses on the one hand, on the effect of the addition of rubber on stiffness modulus of bituminous mixtures and on the other hand, on the effect of the temperature on stiffness modulus of bituminous mixtures in relation to the percentage of the added rubber.

More specifically, this diploma thesis probes the change of Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) of bituminous mixtures, which are modified by the Reacted and Activated Rubber (RAR), RAR being mainly composed by recycled tires, in ratio with the percentage of the added rubber and with the ambient temperature as well. The main part of this research is the experimental procedure that took place in the Laboratory of Pavement Engineering of the Department of Transportation Planning and Engineering of NTUA. The findings determine the optimal percentage of the added RAR that replaces a part of bitumen in asphalt mixtures for the construction of non-slip road surfaces.

Keywords: Recycle, Tires, Sustainable materials, Bitumen, Stiffness modulus, Asphalt mixture, RAR, ITSM.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	1
1.2	Στόχος – Μεθοδολογία	2
1.3	Δομή της εργασίας	3
2.	Βιώσιμα οδοστρώματα	4
2.1	Γενικά.....	4
2.2	Κύκλος ζωής οδοστρωμάτων.....	6
2.3	Βιώσιμα υλικά.....	10
3.	Χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε ασφαλτομίγματα.....	18
3.1	Ασφαλτικά οδοστρώματα	18
3.2	Εξέλιξη της χρήσης ελαστικού	21
3.3	Ανακύκλωση ελαστικών τέλους κύκλου ζωής	27
3.4	Βιώσιμα ασφαλτομίγματα με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού.....	29
3.5	Μέθοδοι παραγωγής τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού	31
3.6	Τροποποίηση ασφάλτου με ελαστικό - υγρή μέθοδος.....	36
3.7	Τροποποίηση ασφαλτομίγματος με ελαστικό - ξηρή μέθοδος	45
3.8	Συνοπτική σύγκριση υγρής και ξηρής μεθόδου.....	52
4.	Αντίδραση ασφάλτου – ελαστικού	55
4.1	Μηχανισμός αντίδρασης.....	55
4.2	Φύση του μηχανισμού αντίδρασης	57
4.3	Επίδραση των μεταβλητών επεξεργασίας	58
4.4	Επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου	63
4.5	Επίδραση των χαρακτηριστικών του τρίμματος.....	64
5.	Παραγωγή τροποποιημένου ασφαλτομίγματος με προσθήκη αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού με την ξηρή μέθοδο	67
5.1	Δημιουργία.....	67
5.2	Σύσταση	69
5.3	Παραγωγή	74
5.4	Δομικό μοντέλο.....	75
5.5	Μηχανικές ιδιότητες	77
5.6	Ιδιότητες και συμπεριφορά των τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων.....	81
5.7	Πλεονεκτήματα	83
6.	Πειραματική διαδικασία	85

6.1 Συνοπτική περιγραφή.....	85
6.2 Ασφαλτόμιγμα αναφοράς	85
6.3 Παρασκευή δειγμάτων	90
6.3.1 Διαδικασία	90
6.3.2 Παρασκευή ασφαλτομίγματος αναφοράς.....	92
6.3.3 Παρασκευή τροποποιημένου ασφαλτομίγματος	96
6.4 Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού	99
6.5 Πραγματοποίηση δοκιμών	102
6.6 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση	105
7. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	113
8. Βιβλιογραφία	115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Στάδια κύκλου ζωής οδοστρώματος	4
Εικόνα 2.2 Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος (FHWA, 2016).....	8
Εικόνα 2.3 Ανακτημένο ασφαλτικό υλικό οδοστρώματος.....	11
Εικόνα 2.4 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος.....	11
Εικόνα 2.5 Μεταλλουργική σκωρία	12
Εικόνα 2.6 Άμμος χυτηρίου.....	12
Εικόνα 2.7 Άχρηστα υαλικά	13
Εικόνα 2.8 Άσφαλτος τροποποιημένη με πολυμερή	15
Εικόνα 2.9 Ιπτάμενη τέφρα.....	16
Εικόνα 3.1 Τυπική διατομή ασφαλτικού οδοστρώματος.....	18
Εικόνα 3.2 Μπαλώματα με μεγάλη ελαστικότητα (McDonald, 1966).....	23
Εικόνα 3.3 Εφαρμογή στα ασφαλτομίγματα τύπου Slurry (1970).....	23
Εικόνα 3.4 Μονάδα διάστρωσης Asphalt Rubber (1975)	24
Εικόνα 3.5 Μεμβράνη απορρόφησης τάσεων	25
Εικόνα 3.6 Στρώμα απορρόφησης τάσεων	25
Εικόνα 3.7 Μοντέλα διαχείρισης ελαστικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Scott, 2015) ..	28
Εικόνα 3.8 Υγρή μέθοδος (Wet process).....	30
Εικόνα 3.9 Ξηρή μέθοδος (Dry process)	30
Εικόνα 3.10 Προϊόντα ανακύκλωσης ελαστικών	32
Εικόνα 3.11 Μηχανική επεξεργασία ελαστικού.....	33
Εικόνα 3.12 Κρυογενική κονιορτοποίηση ελαστικού	34
Εικόνα 3.13 (α) Κόκκοι από μηχανική επεξεργασία (β) Κόκκοι από κρυογενική επεξεργασία	35
Εικόνα 3.14 Διαδικασία παραγωγής τροποποιημένης ασφάλτου με υψηλό ιξώδες με το σύστημα McDonald	40
Εικόνα 3.15 Υγρή μέθοδος με υψηλό ιξώδες (αριστερά) & υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση (δεξιά).....	41
Εικόνα 3.16 Διαγραμματική απεικόνιση σταδίων παραγωγής ασφαλτομίγματος με την ξηρή μέθοδο.....	47
Εικόνα 3.17 Επιρροή ποσοστού ελαστικού στην πυκνότητα του μίγματος (Cao, 2007)	49
Εικόνα 3.18 Μίγμα με λεπτόκοκκο ελαστικό (πάνω) & μίγμα με χονδρόκοκκο ελαστικό (κάτω)(Asphalt Academy, 2017)	50
Εικόνα 3.19 Επίδραση χρόνου αντίδρασης διαφόρων μιγμάτων στο μέγεθος της τροχοαυλάκωσης (Cao, 2007)	51
Εικόνα 3.20 (α) Κατανομή τάσεων εντός κανονικού ασφαλτομίγματος, (β) Κατανομή τάσεων εντός ασφαλτομίγματος που περιέχει κόκκους ελαστικού	52
Εικόνα 4.1 Αλληλεπίδραση ασφάλτου-ελαστικού σε αυξανόμενη θερμοκρασία (α) Μεταβολή ιξώδους σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία, (β) Μεταβολή στο μέγεθος του ελαστικού σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία, (γ) Αλλαγή στη δομή του συνδετικού υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία.....	56
Εικόνα 4.2 Επίδραση της αυξανόμενης θερμοκρασίας στο ιξώδες της ασφάλτου σε συνάρτηση με το χρόνο.....	59
Εικόνα 4.3 Εξέλιξη της αντίδρασης σε συνάρτηση με τον χρόνο	61
Εικόνα 4.4 Διανεμητική ανάμιξη (αριστερά) & ανάμιξη διασποράς (δεξιά)	62
Εικόνα 5.1 Κόκκοι του RAR	68
Εικόνα 5.2 Διαδικασία προσθήκης του RAR στον μύλο ανάδευσης	69

Εικόνα 5.3	Συστατικά του RAR: (α) Ασφαλτος, (β) Κομμάτια ανακυκλωμένου ελαστικού, (γ) Fillers (AMBS)	70
Εικόνα 5.4	Η επίδραση της παρουσίας (%) του RAR στο συνδετικό υλικό στον βαθμό απόδοσης της ασφάλτου (PG Grading / positive indicator)	71
Εικόνα 5.5	Η επίδραση της παρουσίας (%) του RAR στο συνδετικό υλικό στον βαθμό απόδοσης της ασφάλτου (PG Grading / negative indicator)	72
Εικόνα 5.6	Μέγεθος κόκκων του αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού	72
Εικόνα 5.7	Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης RAR.....	73
Εικόνα 5.8	Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του RAR.....	73
Εικόνα 5.9	Μονάδα παραγωγής στην πόλη Dimona του Ισραήλ.....	75
Εικόνα 5.10	Μοντέλο μηχανισμού	76
Εικόνα 5.11	Ιδιότητες ασφαλτομίγματος που εμπεριέχει ποσότητα RAR a) Ιξώδες (Viscosity) b)Σημείο μάλθωσης (Ring and Ball Softening Point) c) Δοκιμή διείσδυσης (Penetration) d)Ελαστική συμπεριφορά (Resilience)	78
Εικόνα 5.12	Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος με την συμβατική δοκιμή ελέγχου (Sousa and Silva, 2012).....	79
Εικόνα 5.13	Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος εκφρασμένη από τον δείκτη JNR (Sousa and Silva, 2012)	80
Εικόνα 5.14	Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος εκφρασμένη από τον δείκτη JNR κατά την μελέτη ασφάλτων στην Ρωσία (Sousa, 2012)	81
Εικόνα 5.15	Ευστάθεια πυκνού HMA κατά τις δοκιμές Marshall σε συνάρτηση με το ποσοστό ελαστικού (%) στο μίγμα (Sousa, 2012).....	82
Εικόνα 5.16	Αποτελέσματα δοκιμής τροχοσυλάκωσης όπου τα μίγματα 1-12 είναι με προσθήκη RAR, τα L5-L6 είναι μίγματα ασφαλικής σκυρομαστίχης με AMBS και τα L7-L8 είναι μίγματα ασφαλικής σκυρομαστίχης με ίνες (Sousa, 2012).....	83
Εικόνα 6.1	Τα αδρανή υλικά του ασφαλτομίγματος	86
Εικόνα 6.2	Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του ασφαλτομίγματος σχεδιασμού	89
Εικόνα 6.3	Σχηματική παρουσίαση παρασκευής μίγματος	91
Εικόνα 6.4	Μίγμα αδρανών πριν την ανάμιξή τους	92
Εικόνα 6.5	Μίγμα αδρανών μετά την ανάμιξή τους.....	92
Εικόνα 6.6	Φούρνος εργαστηρίου	93
Εικόνα 6.7	Ανάδευση ασφάλτου στο μίγμα αδρανών	93
Εικόνα 6.8	Το μίγμα πριν την εισαγωγή του στον φούρνο	94
Εικόνα 6.9	Μίγματα στον φούρνο του εργαστηρίου για θέρμανση 1 ώρας στους 170-180°C.....	94
Εικόνα 6.10	Μήτρες εισαγωγής ασφαλτομιγμάτων	95
Εικόνα 6.11	Εισαγωγή ασφαλτομίγματος στην μήτρα.....	95
Εικόνα 6.12	Η μηχανή συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων	96
Εικόνα 6.13	Δείγματα ασφαλτομιγμάτων.....	96
Εικόνα 6.14	Εισαγωγή τρίματος ελαστικού στο μίγμα	97
Εικόνα 6.15	Ανάδευση για 10-20sec του ελαστικού στα ξηρά αδρανή	97
Εικόνα 6.16	Εισαγωγή θερμής ασφάλτου στο μίγμα, αμέσως μετά την ανάδευση του ελαστικού σε αυτό	98
Εικόνα 6.17	Έτοιμα ασφαλτομίγματα μετά από συμπίκνωση.....	98
Εικόνα 6.18	Συσκευή Nottingham Asphalt Tester του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ.....	101
Εικόνα 6.19	Nottingham Asphalt Tester 1.Ενεργοποιητής φορτίου 2.Μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης 3.Δυναμοκυψέλη 4.Άνω στέλεχος επιβολής φορτίου 5.Δοκίμιο 6.Ρυθμιστής ηλεκτρομηκυσιομέτρων 7.Πλαίσιο συγκρότησης	

ηλεκτρομηκυνσιομέτρων 8.Κάτω στέλεχος επιβολής φορτίου 9. Συσκευή ευθυγράμμισης ηλεκτρομηκυνσιομέτρων	102
Εικόνα 6.20 Υπολογιστής συνδεδεμένος με την συσκευή NAT για την καταγραφή των μετρήσεων.....	104
Εικόνα 6.21 Θερμοθάλαμος για την προθέρμανση των δοκιμίων στους 15°C, 20°C, 25°C και 30°C	104
Εικόνα 6.22 Διαγραμματική απεικόνιση του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφέλκυσμού (ITSM) των ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου	111
Εικόνα 6.23 Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφέλκυσμού (ITSM) των ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου .	112

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Βελτιώσεις λόγω προσθετικών υλικών στην άσφαλτο & στο ασφαλτόμιγμα	38
Πίνακας 3.2 Συνοπτική σύγκριση των δύο τεχνολογιών	43
Πίνακας 3.3 Συνοπτική σύγκριση Υγρής και Ξηρής μεθόδου	53
Πίνακας 4.1 Απαιτήσεις διεισδυτικότητας αρχικής ασφάλτου	63
Πίνακας 5.1 Κατώτερα και ανώτερα όρια (%) διερχομένων κόκκων	74
Πίνακας 6.1 Βασικά χαρακτηριστικά ασφάλτου μίγματος.....	87
Πίνακας 6.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση τελικού ασφαλτομίγματος.....	88
Πίνακας 6.3 Ιδιότητες ασφαλτομίγματος αναφοράς	90
Πίνακας 6.4 Αναλογίες ασφάλτου-RAR στα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα.....	91
Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 15°C	105
Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 20°C	105
Πίνακας 6.7 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 25°C	106
Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 30°C	106
Πίνακας 6.9 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 15°C.....	107
Πίνακας 6.10 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 20°C.....	108
Πίνακας 6.11 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 25°C.....	109
Πίνακας 6.12 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 30°C.....	110
Πίνακας 6.13 Μέση τιμή μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) για κάθε σειρά ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου	111

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Το θέμα της βιωσιμότητας δεν αποτελεί πλέον καινούργιο ζήτημα. Ένας διαρκώς αυξανόμενος αριθμός οργανισμών, εταιρειών, ιδρυμάτων και διοικητικών οργάνων υιοθετεί τις αρχές της βιωσιμότητας στη διαχείριση των δραστηριοτήτων τους και στην άσκηση των επιχειρηματικών ενεργειών τους. Ειδικότερα, στον τομέα των μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής, τα τελευταία χρόνια, ξεκίνησαν να καταβάλλονται ιδιαίτερες προσπάθειες ώστε να μελετηθούν –μεταξύ άλλων- οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδοστρωμάτων στη βιωσιμότητα και να βρεθούν μέθοδοι και υλικά για τον περιορισμό τους.

Είναι γεγονός ότι σκέψεις και προβληματισμοί, σχετικά με τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων, έχουν οδηγήσει σε βελτίωση των εφαρμοζόμενων μεθόδων κατασκευής τους. Ερωτήματα όπως η αντοχή, η εργασιμότητα, η διάρκεια ζωής, η συμπεριφορά προς το περιβάλλον, η δυνατότητα διάθεσης και μεταφοράς υλικών, αλλά και η ανταπόκρισή τους στα απαιτούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά και γενικότερα, η στροφή των υλικών προς ένα βιώσιμο χαρακτήρα, συμμετέχουν στη λήψη σημαντικών αποφάσεων για την επιτυχία του κάθε εγχειρήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαχείριση των ανακυκλώσιμων υλικών και των παραπροϊόντων, έτσι ώστε αυτά, αφενός να αποτελέσουν άμεσους πόρους χωρίς να υποβαθμίζουν τη λειτουργικότητα και ποιότητα της κατασκευής του οδοστρώματος και αφετέρου, να επιφέρουν οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

Για να εκτιμηθεί ωστόσο η συνεισφορά κάθε νέας τεχνολογίας στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στην επίτευξη του στόχου της βιωσιμότητας είναι απαραίτητο να αξιολογούνται τα αποτελέσματα της στο περιβάλλον. Για να καταστεί αυτό εφικτό, στην συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε σταδίου της κατασκευής του οδοστρώματος. Οι επιπτώσεις που προκαλούνται εξαιτίας των υλικών, του εξοπλισμού, των κατασκευαστικών διαδικασιών, καθώς και των διαφόρων παραμέτρων της χρήσης,

συντήρησης/ αποκατάστασης, αλλά και των επιλογών στο τέλος ζωής του οδοστρώματος θα πρέπει να μελετώνται και να ποσοτικοποιούνται κατάλληλα.

1.2 Στόχος – Μεθοδολογία

Προς την κατεύθυνση της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων έχει ήδη ξεκινήσει να διερευνάται και να εφαρμόζεται η ανακύκλωση των φθαρμένων ελαστικών για την επαναχρησιμοποίησή τους ως βιώσιμα υλικά στα οδοστρώματα. Στην υπόψη διερεύνηση εντάσσεται και η παρούσα διπλωματική εργασία, όπου επικεντρώνεται:

- Στην επίδραση της προσθήκης ελαστικού στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων.
- Στην επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε σχέση με το ποσοστό του προστιθέμενου ελαστικού.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία εστιάζει στην επίδραση της προσθήκης τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού σε ασφαλτομίγματα ως προς την μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Ειδικότερα, διερευνάται η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφέλκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus-ITSM) των ασφαλτομιγμάτων, τροποποιημένων με «αντιδράμενο και ενεργοποιημένο ελαστικό» (Reacted and Activated Rubber, RAR), το οποίο προέρχεται κατά κύριο λόγο από ανακυκλωμένα ελαστικά, σε συνάρτηση τόσο με την ποσότητα ελαστικού που προστίθεται, όσο και με την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κύριος σκέλος της υπόψη διερεύνησης είναι η εκπόνηση πειραματικής διαδικασίας στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

Επιγραμματικά, η μεθοδολογία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής βήματα :

- Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.
- Παραγωγή.
- Εργαστηριακές δοκιμές.
- Επεξεργασία στοιχείων και ανάλυση δεδομένων.
- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Συνοπτικά:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα βιώσιμα οδοστρώματα και στις παραμέτρους που υπεισέρχονται στον κύκλο ζωής τους.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια ιστορική αναδρομή όσον αφορά στην χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού σε ασφαλτομίγματα και στην συνέχεια, μια ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις δύο βασικές μεθόδους (υγρή και ξηρή) παραγωγής τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων.

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσονται ο μηχανισμός και οι παράμετροι κατά την αντίδραση μεταξύ ασφάλτου και ελαστικού.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μια εκτενής παρουσίαση του αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Αναλύονται οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του μέσα από έρευνες που έχουν γίνει, όπως επίσης καταγράφονται και τα πλεονεκτήματα που προσδίδει στα θερμά ασφαλτομίγματα έναντι των συμβατικών μιγμάτων.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται όλη η πειραματική διαδικασία της εργασίας, καθώς και οι σχετικές αναλύσεις.

Στο κεφάλαιο 7 περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται βήματα μελλοντικής έρευνας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

Στο κεφάλαιο 8 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της έρευνας.

2. Βιώσιμα οδοστρώματα

2.1 Γενικά

Τα οδοστρώματα αποτελούν καίριο στοιχείο του συστήματος μεταφορών και της συγκοινωνιακής υποδομής παγκοσμίως. Η ραγδαία οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη, ωστόσο, έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται οι επιδράσεις της κατασκευής των οδοστρωμάτων στο περιβάλλον, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Εικ. 2.1) (Zietsman *et al.*, 2011).



Εικόνα 2.1 Στάδια κύκλου ζωής οδοστρώματος

Η κατασκευή ενός βιώσιμου οδοστρώματος αποτελεί προς το παρόν έναν αρκετά φιλόδοξο στόχο. Αυτό συμβαίνει καθώς, με την παρούσα τεχνογνωσία και τεχνολογία κατασκευής οδοστρωμάτων, είναι δύσκολο να καλυφθούν όλα ή και τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του όπως:

- Να ικανοποιεί τους στόχους της μηχανικής για τους οποίους κατασκευάστηκε.

- Να διατηρεί και (ιδανικά) να επαναφέρει στην αρχική κατάσταση το οικοσύστημα της περιοχής.
- Να χρησιμοποιεί με τον πλέον οικονομικό τρόπο τους οικονομικούς, ανθρώπινους και περιβαλλοντικούς πόρους.
- Να σέβεται βασικές ανθρώπινες ανάγκες (υγεία, ασφάλεια, άνεση κλπ.).

Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη των τομέων αυτών, με έμφαση σε κάθε ένα από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά, οδηγεί σε πιο βιώσιμη κατασκευή οδοστρωμάτων και τελικά, σε οδοστρώματα που πραγματικά μπορούν να ανταποκριθούν στα αρκετά απαιτητικά πρότυπα αειφορίας.

Η πρόοδος προς την κατεύθυνση της αειφορίας μπορεί αρχικά να σημαίνει μείωση των βλαβερών αποτελεσμάτων, όπως λιγότερη ρύπανση, μείωση εξόρυξης μη ανανεώσιμων πόρων, λιγότερα απόβλητα κλπ. Περαιτέρω εξέλιξη θα μπορούσε να αφορά στην κατασκευή οδοστρωμάτων τα οποία παραμένουν ουδέτερα προς το περιβάλλον, δηλαδή δεν το βλάπτουν. Είναι σημαντικό, ωστόσο, η πρόοδος να συνεχιστεί έως ότου το οδόστρωμα να μπορεί εν τέλει να επιφέρει θετικά αποτελέσματα, όπως λόγου χάρη, να παράγει περισσότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώνει, να αποκαθιστά μεγαλύτερο μέρος γης από εκείνο που χρησιμοποιεί κλπ.

Οι τρέχουσες προσπάθειες για τον περιορισμό των επιπτώσεων, τη μείωση του μεγέθους των βλαβερών αποτελεσμάτων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας θα πρέπει να θεωρηθούν ως θετικές στρατηγικές προς την επίτευξη του τελικού στόχου, που αφορά στην παραγωγή μόνο θετικών αποτελεσμάτων από την κατασκευή και χρήση του οδοστρώματος. Αυτή η ερμηνεία της βιωσιμότητας είναι ουσιαστικά διαφορετική και τελικά πιο θετική, από εκείνη που περιορίζεται στη μείωση των αρνητικών αποτελεσμάτων.

Αναγνωρίζοντας τον φιλόδοξο χαρακτήρα ενός απόλυτα «βιώσιμου οδοστρώματος» κρίνεται αναγκαίο να τονιστούν οι διαδικασίες, οι ενέργειες και τα χαρακτηριστικά που προωθούν στην πράξη τη βιωσιμότητα των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, οι βιώσιμες βέλτιστες πρακτικές είναι εκείνες που :

- εκτείνονται άνω και πέρα από τα απαιτούμενα ρυθμιστικά ελάχιστα και τις συνήθεις πρακτικές και

- παρουσιάζουν καινοτομία ως προς την τήρηση αυτών των ελαχίστων ορίων και προτύπων.

Επειδή ένα οδόστρωμα πρέπει να υπάρχει και να λειτουργεί σε μεγαλύτερα συστήματα, οι πρακτικές που υποστηρίζουν τη βιωσιμότητα θα πρέπει να συμβάλλουν σε πιο βιώσιμα συστήματα συνολικά, με αποτέλεσμα να εξαρτώνται από το περιβαλλοντικό πλαίσιο. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό πως είναι απαραίτητη η πλήρης καταγραφή των περιβαλλοντικών συστημάτων και η επιρροή του οδοστρώματος σε αυτά, προκειμένου να προσδιοριστούν οι καταλληλότερες πρακτικές αειφορίας, οι οποίες συνδέονται με ένα συγκεκριμένο σύστημα οδοστρώματος.

Ο ορισμός της βιωσιμότητας, αυτός κάθε αυτός, θεωρείται δευτερευούσης σημασίας για την κατανόηση των βασικών αρχών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας ορισμός εξετάζει τυπικά το τι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, αλλά δεν δίνει κατευθυντήριες οδηγίες για το πώς θα εφαρμοστεί στην πράξη. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η βιωσιμότητα απαιτεί συχνά την εξέταση των συμψηφισμών στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Συχνά, και οι δύο προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις θα έχουν βάσιμα επιχειρήματα βιωσιμότητας, αλλά η λύση που τελικά επιλέγεται αντανακλά τις προτεραιότητες και τους περιορισμούς του έργου της υπηρεσίας, του οργανισμού κλπ. Αυτές οι προτεραιότητες και οι περιορισμοί αποτελούν το κατάλληλο σημείο εστίασης στην προσέγγιση της βιωσιμότητας (*FHWA 2016*).

2.2 Κύκλος ζωής οδοστρωμάτων

Προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι επιπτώσεις των οδοστρωμάτων στην αειφορία, είναι χρήσιμο να διαιρεθεί ο κύκλος ζωής του οδοστρώματος σε αρκετές σημαντικές φάσεις. Τα λεγόμενα και στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος είναι (Εικ. 2.2):

- ✚ Παραγωγή των υλικών (Materials production)
- ✚ Σχεδιασμός του οδοστρώματος (Pavement Design)
- ✚ Κατασκευή (Construction)
- ✚ Χρήση (Use)
- ✚ Συντήρηση (Maintenance and Preservation)
- ✚ Τέλος διάρκειας ζωής (End of Life)

Παραγωγή των υλικών (Materials production)

Η παραγωγή των υλικών του οδοστρώματος αφορά όλες εκείνες τις διαδικασίες που εμπλέκονται, τόσο στην απόκτηση των υλικών (π.χ. εξόρυξη ορυκτών και αργού πετρελαίου), όσο και στην επεξεργασία τους (π.χ. δύλιση, παρασκευή, ανάμιξη).

Περιλαμβάνονται ακόμη, βιομηχανικές διεργασίες, όπως η παραγωγή ασφαλτομίγματος με ανάμιξη αδρανών, ασφαλικού σκυροδέματος και διαφόρων πρόσθετων ουσιών. Το στάδιο της παραγωγής των υλικών επηρεάζει αρκετούς παράγοντες βιωσιμότητας, όπως η ποιότητα του αέρα και του νερού, η ευημερία του οικοσυστήματος, η ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια, η εξάντληση των μη ανανεώσιμων πόρων και το κόστος του κύκλου ζωής.

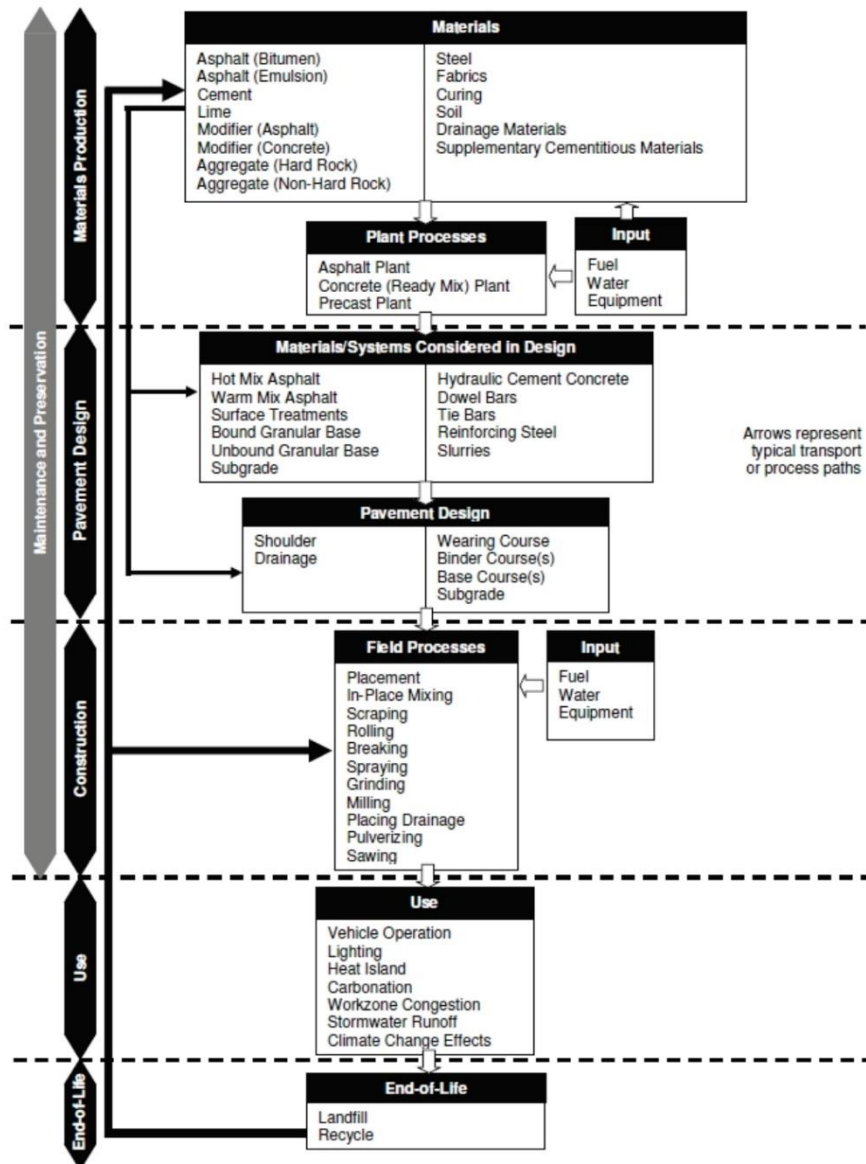
Σχεδιασμός του οδοστρώματος (Pavement Design)

Το στάδιο του σχεδιασμού αναφέρεται στη διαδικασία προσδιορισμού των δομικών και λειτουργικών απαιτήσεων του οδοστρώματος, για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (υπόβαθρο, κλίμα, υπάρχουσα δομή οδοστρώματος, κυκλοφορία, φορτίσεις) και ακολούθως στον προσδιορισμό της δομικής σύνθεσης του οδοστρώματος και των αντιστοίχων υλικών. Στο στάδιο αυτό περιλαμβάνονται τόσο οι διαδικασίες σχεδιασμού ενός νέου οδοστρώματος, όσο και εκείνες που σχετίζονται με την αποκατάστασή του (π.χ. δομικές επικαλύψεις, συγκολλημένα /μη συγκολλημένα επικαλύμματα σκυροδέματος, ρωγμές κλπ.). Ο σχεδιασμός επηρεάζει παράγοντες βιωσιμότητας όπως, η διάρκεια ζωής, η αντοχή, το κόστος του κύκλου ζωής, η χρήση υλικών και η κατασκευή (π.χ. κατασκευαστική ικανότητα, χρονοδιάγραμμα κλπ.).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες οδοστρωμάτων (Λοΐζος, Πλατή 2015):

- **Εύκαμπτα οδοστρώματα (“flexible” pavements).** Η δομή του εύκαμπτου οδοστρώματος, γενικότερα, αποτελείται από δύο χαρακτηριστικές ομάδες στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά. Την ομάδα των στρώσεων από ασύνδετα ή/και σταθεροποιημένα αδρανή, που εδράζεται πάνω στο υπέδαφος, και την ομάδα των στρώσεων από ασφαλτομίγματα, που εδράζεται πάνω στην προηγούμενη ομάδα.
- **Δύσκαμπτα ή άκαμπτα οδοστρώματα (“rigid” pavements).** Είναι τα οδοστρώματα με μεγάλη ακαμψία όπου η στρώση κυκλοφορίας των οχημάτων

είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα, εδραζόμενη σε στρώση από ασύνδετο υλικό ή κατεργασμένο συνήθως με υδραυλικές κονίες και σταθεροποιημένο υλικό.



Εικόνα 2.2 Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος (FHWA, 2016)

Κατασκευή (Construction)

Το στάδιο αυτό αναφέρεται στον εξοπλισμό και σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με την κατασκευή του οδοστρώματος. Γενικά, οι εργασίες κατασκευής συνδέονται με

το αρχικό οδόστρωμα καθώς και τις επακόλουθες ενέργειες συντήρησης και αποκατάστασης του. Η παραγωγή των μιγμάτων (ασφαλτόμιγμα, σκυρόδεμα) που εφαρμόζονται στην κατασκευή, αφορά το στάδιο της παραγωγής υλικών. Οι εργασίες αυτές επηρεάζουν παράγοντες βιωσιμότητας όπως, την ποιότητα του νερού, την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια, την ανθεκτικότητα, την καθυστέρηση της κυκλοφορίας στην ζώνη εργασίας, καθώς και το κόστος και χρόνο των εργασιών.

Χρήση (Use)

Το στάδιο της χρήσης αναφέρεται στις αλληλεπιδράσεις του οδοστρώματος με τη λειτουργία των οχημάτων και με το περιβάλλον. Ένας αριθμός από βασικούς παράγοντες του οδοστρώματος (π.χ. τραχύτητα) μπορεί να έχει μεγάλες επιπτώσεις στις περισσότερες μετρήσεις βιωσιμότητας, συμπεριλαμβανομένης της οικονομίας καυσίμου, του κόστους λειτουργίας του οχήματος, τις σχετικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και τη χρήση ενέργειας. Περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις όπως, η διάθεση των όμβριων υδάτων, η θερμική ικανότητα/αγωγιμότητα και η ανακλαστικότητα μπορούν επίσης να επηρεάσουν και άλλους παράγοντες αειφορίας, όπως η ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια, το φαινόμενο της αστικής νησίδας και η ακτινοβολία που επιβάλλεται σε παγκόσμια κλίμακα.

Συντήρηση (Maintenance and Preservation)

Το στάδιο της συντήρησης αναφέρεται στις ενέργειες εκείνες που συμβάλλουν στη μείωση του ρυθμού αλλοίωσης ενός οδοστρώματος, προσδιορίζοντας και αντιμετωπίζοντας συγκεκριμένες αδυναμίες του οδοστρώματος που συμβάλλουν στη συνολική φθορά. Υπάρχουν διάφορες εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης όπως σφράγιση, επένδυση, λεπτές επικαλύψεις, επιτόπου ανακύκλωση επιφανειών οδοστρώματος, αποκατάσταση ικανότητας παραλαβής φορτίων, επισκευές σκυροδέματος κλπ. Οι παράγοντες βιωσιμότητας που επηρεάζονται στο στάδιο αυτό είναι η διάρκεια ζωής, η ανθεκτικότητα, το κόστος κύκλου ζωής, η κατασκευή (π.χ. κατασκευαστική ικανότητα, πρόγραμμα κλπ.) και η χρήση υλικών.

Τέλος κύκλου ζωής (End of Life)

Το τέλος του κύκλου ζωής του οδοστρώματος αναφέρεται στην τελική διάθεση και στην επακόλουθη επαναχρησιμοποίηση, επεξεργασία ή ανακύκλωση οποιουδήποτε

τμήματος από το σύστημα του οδοστρώματος, το οποίο έχει φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής του. Οι εργασίες που αφορούν το στάδιο αυτό είναι η πλήρης ανάκτηση του οδοστρώματος και η ανακύκλωση των στοιχείων του, η υγειονομική ταφή και η αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Οι διεργασίες για το τέλος του κύκλου ζωής επηρεάζουν παράγοντες βιωσιμότητας όπως η παραγωγή και διάθεση αποβλήτων, η ποιότητα του αέρα και των υδάτων και η χρήση υλικών.

2.3 Βιώσιμα υλικά

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

Τα κυριότερα υλικά κατηγοριοποιούνται σε αδρανή (όλων των τύπων), ασφαλτικά υλικά (τροποποιημένα ή μη), σε υλικά με κύριο συστατικό το συμβατικό τσιμέντο, καθώς και σε διάφορα άλλα υλικά, σε μικρότερο όμως ποσοστό. Μεγάλη απήχηση έχουν πλέον και τα προϊόντα ανακύκλωσης, τα οποία με κατάλληλη μελέτη και έρευνα, μπορούν να αντικαταστήσουν επάξια τα συμβατικά υλικά (FHWA 2015).

Αδρανή υλικά

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

- Ανακτημένο ασφαλικό οδόστρωμα (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP): όπου ανώτερα ασφαλικά στρώματα, με κατάλληλη επεξεργασία όπως η ψυχρή άλεση-ανακύκλωση, ανακτώνται από το υφιστάμενο οδόστρωμα, προς απώτερη χρήση στη κατασκευή νέων, ως υλικό βάσης ή και υπόβασης (Εικ. 2.3).



Εικόνα 2.3 Ανακτημένο ασφαλτικό υλικό οδοστρώματος

- Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (Recycled Concrete Aggregate, RCA): προέρχονται από τη θραύση στρώσεων σκυροδέματος οδοστρωμάτων (Εικ. 2.4). Τα αδρανή αυτά είναι κυρίως γωνιώδη, και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή νέων οδοστρωμάτων, τις πλείστες περιπτώσεις ως βάση και ως υπόβαση. Παρά την ανακυκλώσιμη φύση τους, χαρακτηρίζονται από σημαντικά επίπεδα αντοχής, η οποία μπορεί να συγκριθεί ακόμη και με αυτή των συμβατικών.



Εικόνα 2.4 Ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος

- Μεταλλουργική σκωρία: ένα παραπροϊόν που προέρχεται έπειτα από διάφορες διαδικασίες παρασκευής και επεξεργασίας χάλυβα (Εικ. 2.5). Αν και παρουσιάζει μερικές ιδιορρυθμίες, μπορεί να χρησιμεύσει σε ασφαλτικά

μίγματα, ίσως και σε περιπτώσεις σκυροδέτησης, έπειτα όμως από λεπτομερή μελέτη. Προτείνεται επίσης για αντισιδηρές στρώσεις κυκλοφορίας.



Εικόνα 2.5 Μεταλλουργική σκωρία

- Άμμος χυτηρίου: παράγωγο επεξεργασίας μετάλλων (Εικ. 2.6). Οι δυνατότητες χρήσης της ποικίλουν, με τη μερική αντικατάσταση λεπτόκοκκων αδρανών και παιπάλης σε ασφαλτικά μίγματα, να είναι η δημοφιλέστερη. Επίσης, απαιτείται επαρκής μελέτη για την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς της, για την αποφυγή δυσλειτουργιών και πρόωρων αστοχιών.



Εικόνα 2.6 Άμμος χυτηρίου

- Θερμό ασφαλτικό μίγμα (Warm-Mix Asphalt, WMA): παρόμοιας σύστασης με του αντίστοιχου υψηλής θερμοκρασίας, με τη διαφορά όμως στην παρουσία χημικών πρόσθετων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της εργασιμότητας και της συμπυκνωσιμότητας του ασφαλτικού μίγματος, σε αρκετά χαμηλότερες θερμο

σκυροδέματος, λόγω του πλεονεκτήματος της φυσικής τους ύπαρξης, με συνέπεια την ελάχιστη απαίτηση επεξεργασίας.

1. να παρέχει καλή αντιολισθηρή επιφάνεια κύλισης είτε από μόνη της, είτε με την προσθήκη προαλειμμένων αδρανών ή αντιολισθηρού ψυχρού λεπτού τάπητα ή ασφαλικών επαλείψεων ή άλλης επιφανειακής επεξεργασίας,
2. να είναι ανθεκτική στην καταστροφική δράση της κυκλοφορίας και των καιρικών συνθηκών,
3. να μην παραμορφώνεται από την κυκλοφορία,
4. να αντιστέκεται στην ρηγμάτωση που επέρχεται από θερμοκρασιακές συστολοδιαστολές και αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις,
5. να παρέχει καλή επιπεδότητα για υψηλής ποιότητας και ασφάλειας οδήγηση,
6. να παρέχει κατά κανόνα, επιφάνεια κύλισης με χαμηλό επίπεδο παραγόμενου θορύβου.

3.2 Εξέλιξη της χρήσης ελαστικού

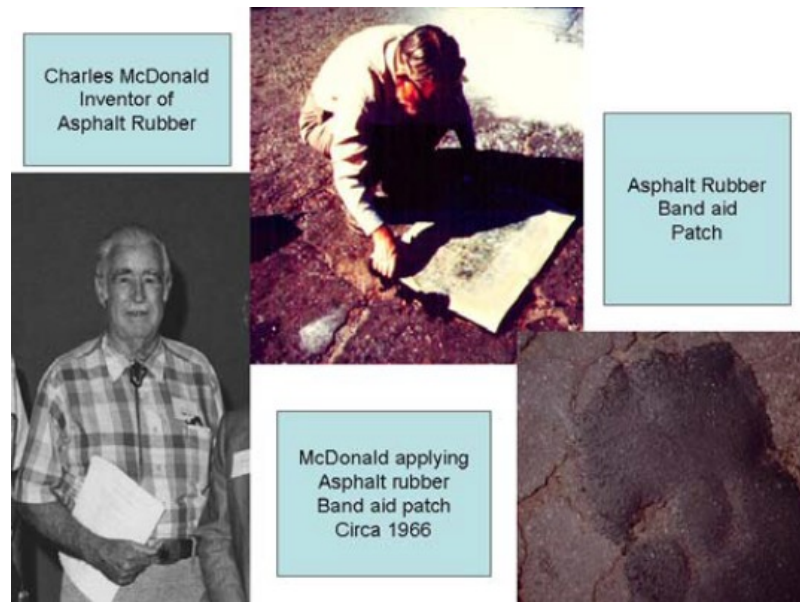
Η χρήση τρίμματος ελαστικού σε ασφαλικά μίγματα εντοπίζεται για πρώτη φορά στις ΗΠΑ στις αρχές της δεκαετίας 1840, όταν μηχανικοί και χημικοί προσπάθησαν να προσδώσουν στην άσφαλτο τις ελαστικές ιδιότητες του φυσικού ελαστικού (natural rubber). Από το 1843 και έπειτα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μίγματα φυσικού και συνθετικού ελαστικού με στόχο τη βελτίωση των ελαστικών ιδιοτήτων της ασφάλτου και τη δημιουργία ασφαλτομίγματος επιφανειακής στρώσης με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (Heitzman 1992, Nuha et al. 2012). Ωστόσο τα αρχικά μίγματα που δημιουργήθηκαν παρουσίαζαν καθόλου ή ελάχιστα βελτιωμένες ιδιότητες, πολύ μεγαλύτερο κόστος παραγωγής και μικρότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα συμβατικά μίγματα με αποτέλεσμα τη μη συνέχιση των πειραμάτων (Lo Presti, 2011). Το 1923 δημιουργήθηκαν οι πρώτες τροποποιημένες άσφαλτοι με φυσικό και συνθετικό ελαστικό οι οποίες είχαν βελτιωμένες ιδιότητες (Nuha et al., 2012).

Αργότερα, στα τέλη της δεκαετίας 1930 ξεκίνησε η ανάπτυξη υλικών πλήρωσης ρωγμών και αρμών, συντήρησης λάκκων και δημιουργίας μεμβρανών που περιείχαν τροποποιημένη άσφαλτο με ελαστικό. Η χρήση φθαρμένων ελαστικών ξεκινά στις αρχές του 1950. Οι Lewis και Welborn πραγματοποίησαν εκτεταμένη μελέτη για την

επίδραση του καουτσούκ στις ιδιότητες της πετρελαϊκής ασφάλτου. Χρησιμοποίησαν τρεις τύπους ασφάλτου και δεκατέσσερις τύπους τρίμματος βουλκανισμένου και μη από φθαρμένο ελαστικό, φυσικό καουτσούκ, πολυβουταδιένιο, SBR (Styrene–Butadiene Rubber, SBR) (Caltrans, 2003). Έκτοτε τα φθαρμένα ελαστικά χρησιμοποιήθηκαν ως δευτερέων υλικό στη κατασκευή και συντήρηση οδοστρωμάτων, χωρίς ωστόσο να έχει αναπτυχθεί συγκεκριμένη τεχνολογία για τη χρήση τους σε ασφαλτικά μίγματα.

Η πρώτη τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα αναπτύχθηκε στις αρχές του 1960 στο Φοίνιξ της Αριζόνα, από τον μηχανικό υλικών Charles McDonald ο οποίος εργαζόταν στην Sahuaro Petroleum. Στη προσπάθειά του να βρει μια μέθοδο συντήρησης οδοστρωμάτων που έχουν ρηγματωθεί πρόωρα, ανακάλυψε ότι όταν τρίμματα ελαστικού αναμιχθούν με ζεστή άσφαλτο και το μίγμα που προκύπτει αφεθεί να αντιδράσει για 45 λεπτά έως μία ώρα, αυτό αποκτά βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η τροποποιημένη άσφαλτος, η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα στην συνέχεια, ονομάστηκε Asphalt Rubber - AR (άσφαλτος με ελαστικό) και η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή με τον όρο “υγρή μέθοδος” και “τεχνολογία McDonald”. Σε αυτή τη διαπίστωση στηρίχθηκε ο Αμερικανικός Οργανισμός Ελέγχου και Υλικών (ASTM) το 1988 ορίζοντας την τροποποιημένη άσφαλτο με τρίμμα ελαστικού ως «ένα μίγμα ασφαλτικού σκυροδέματος, ανακτημένου ελαστικού οχήματος και συγκεκριμένων προσθέτων στα οποία το ποσοστό ελαστικού είναι τουλάχιστον 15% κατά βάρος του συνολικού μίγματος και το οποίο έχει αντιδράσει για ικανό χρόνο και εν θερμώ με ασφαλτικό σκυρόδεμα ώστε να προκαλέσει διαστολή των κόκκων ελαστικού» (ASTM International Annual Book of Standards, D8 Definition, 2005).

Στα πειράματά του ο McDonald χρησιμοποίησε για πρώτη φορά μεγάλα ποσοστά βουλκανισμένου ελαστικού. Οι πρώτες προσπάθειες οδήγησαν στη δημιουργία προκατασκευασμένων μπαλωμάτων με μεγάλη ελαστικότητα (Band – Aids) από τροποποιημένη άσφαλτο με τρίμμα ελαστικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Τα μπαλώματα αυτά είχαν διαστάσεις 24 in×24 in (0.6 m × 0.6m) και αποτελούνταν από τροποποιημένη άσφαλτο πάνω σε χαρτόνι καλυμμένο με παραφίνη και μονόκοκκα αδρανή μεγέθους 3/8 in (9.5 mm).



Εικόνα 3.2 Μπαλώματα με μεγάλη ελαστικότητα (McDonald, 1966)

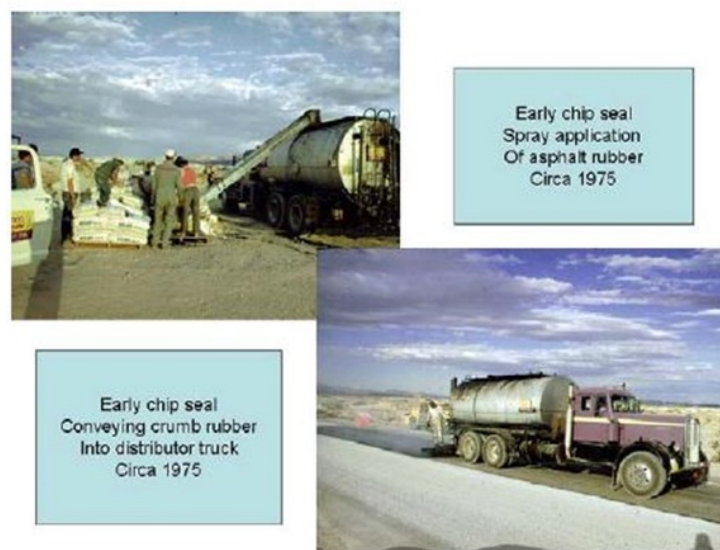
Ωστόσο, επειδή οι ρηγματώσεις λόγω κόπωσης εμφανίζονται σε μεγαλύτερες επιφάνειες, η διάστρωση του μίγματος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, έγινε με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τα μίγματα Slurry (Εικ. 3.3).



Εικόνα 3.3 Εφαρμογή στα ασφαλτομίγματα τύπου Slurry (1970)

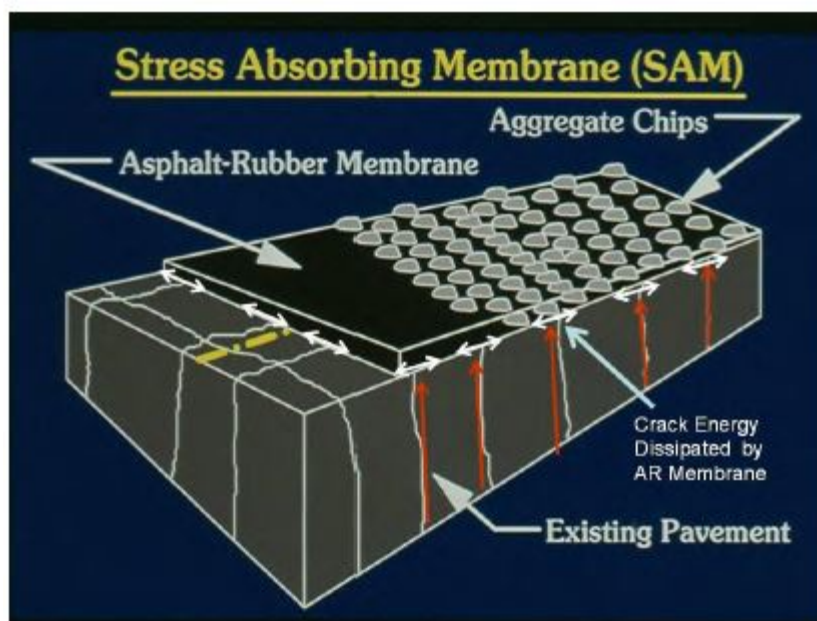
Η διαδικασία αυτή ήταν αναποτελεσματική, καθώς για να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός αντίδρασης ασφάλτου – ελαστικού έπρεπε να αυξηθεί πολύ η θερμοκρασία λόγω του περιορισμένου χρόνου αναμονής του μίγματος στον εξοπλισμό (232°C).

Επιπλέον το πάχος της μεμβράνης ήταν ανομοιόμορφο στα σημεία μεταξύ των τροχών (*Way et al., 2011*). Το 1971 δημιουργήθηκε εξοπλισμός για την εφαρμογή ομοιόμορφου πάχους συνδετικού υλικού με συμβατικούς διαστρωτήρες, χωρίς ωστόσο να αποφευχθούν προβλήματα διαχωρισμού των υλικών ή στη διανομή του συνδετικού υλικού. Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν στη δημιουργία εξοπλισμού με σύστημα άντλησης, ζύγισης και ανάδευσης για τη σωστή διαχείριση του συνδετικού υλικού με μεγάλο ιξώδες (Εικ. 3.4) (*Sousa, 2006*).



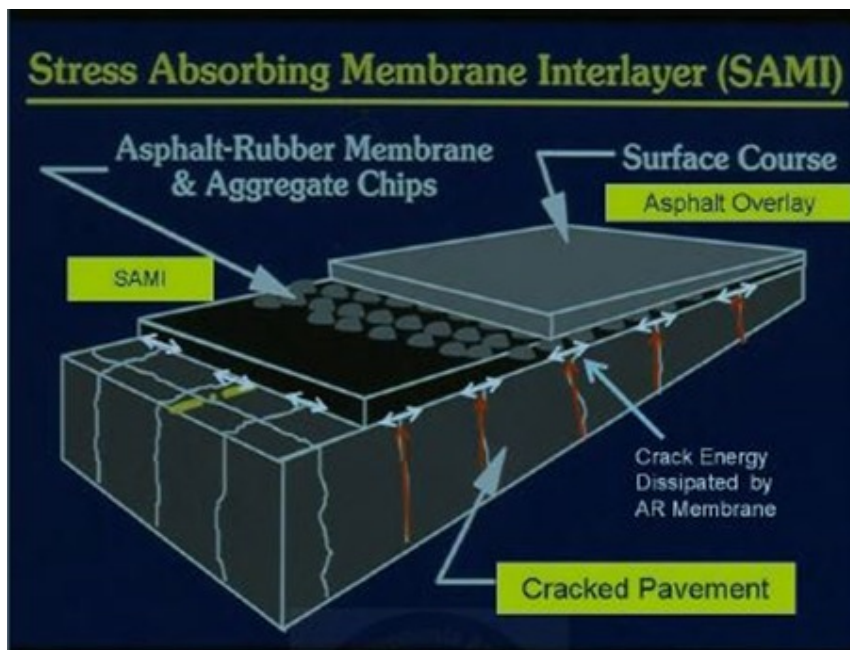
Εικόνα 3.4 Μονάδα διάστρωσης Asphalt Rubber (1975)

Παρά τα προβλήματα και τις αστοχίες που ανέκυψαν, τα πειράματα του McDonald έθεσαν τη βάση για περαιτέρω έρευνα. Το 1968 κατασκευάστηκε η πρώτη μεμβράνη απορρόφησης τάσεων (Stress Absorbing Membrane, SAM) και το 1972 το πρώτο στρώμα απορρόφησης τάσεων (Stress Absorbing Membrane Interlayer, SAMI) με τροποποιημένη με ελαστικό ασφαλτο στην Αριζόνα των ΗΠΑ (*Heitzman 1992, Way et al. 2011*). Η μεμβράνη απορρόφησης τάσεων αποτελεί μέθοδο συντήρησης ή αποκατάστασης ρηγματωμένης επιφάνειας. Η τεχνική στηρίζεται στη δημιουργία μιας μεμβράνης πάχους 3,50 mm με τροποποιημένη ασφαλτο με πολυμερή, ικανή να αποσβένει τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται. Όταν επί της μεμβράνης διαστρώνεται και ασφαλτική στρώση πάχους 40 mm, η τεχνική ονομάζεται SAMI. Στις Εικόνες 3.5 και 3.6 αντίστοιχα, παρουσιάζονται σχηματικά η μεμβράνη απορρόφησης τάσεων (SAM) και το στρώμα απορρόφησης τάσεων (SAMI).



Εικόνα 3.5 Μεμβράνη απορρόφησης τάσεων

Οι πρώτες εφαρμογές SAM και SAMI είχαν ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλη μείωση των ρηγματώσεων λόγω ανάκλασης. Από το 1974 έως το 1989 κατασκευάστηκαν περισσότερα από 1.100 km οδοστρωμάτων με SAM και SAMI με τροποποιημένη με ελαστικό άσφαλτο.



Εικόνα 3.6 Στρώμα απορρόφησης τάσεων

Παράλληλα διαπιστώθηκε μέσα από πληθώρα ερευνητικών έργων ότι αποτελούν και στεγανοποιητικές μεμβράνες, οι οποίες ελέγχουν τις παραμορφώσεις που προκαλούνται λόγω διόγκωσης του υπεδάφους και μειώνουν τις ρηγματώσεις από ανάκλαση τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα (*Way et al., 2011*).

Στις αρχές της δεκαετίας 1990 από το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, εισάγεται για πρώτη φορά η έννοια της “υγρής μεθόδου χωρίς ανάδευση”, μια παραλλαγή της κλασσικής μεθόδου McDonald και εκδίδεται οδηγία για τη χρήση τροποποιημένης ασφάλτου με ελαστικό. Παρόλα αυτά η έλλειψη σαφών προδιαγραφών και η ανεπαρκής κατάρτιση των εμπλεκόμενων στη διαδικασία, δημιούργησε προβλήματα που οδήγησαν στην ακύρωση της οδηγίας που προέβλεπε τη χρήση της συγκεκριμένης τροποποιημένης ασφάλτου (*Ghabchi, 2016*). Ωστόσο το 1991 με νόμο που επέτρεπε την ευρεία χρήση αυτών των μιγμάτων και σε συνδυασμό με τη λήξη των δικαιωμάτων ευρεσιτεχνίας, το 1992 η τεχνολογία McDonald επανήλθε στο προσκήνιο καθώς η αποτελεσματική διαχείριση των ελαστικών τέλους κύκλου ζωής ήταν πλέον μείζονος σημασίας (*Lo Presti, 2011*).

Στα τέλη της δεκαετίας 1960, αναπτύχθηκε από δύο Σουηδικές εταιρίες η “ξηρή μέθοδος” με στόχο τη βελτίωση της αντοχής της επιφανειακής στρώσης οδοστρώματος σε ελαστικά με καρφιά και αντλιοσθητικές αλυσίδες. Έτσι κατασκευάστηκε θερμό ασφαλτόμιγμα επιφανειακής στρώσης στο οποίο ένα μικρό ποσοστό των αδρανών είχε αντικατασταθεί με τρίμματα από άχρηστα ελαστικά. Το μίγμα αυτό έγινε γνωστό με την ονομασία Rubit και η συγκεκριμένη τεχνολογία κατοχυρώθηκε με την ονομασία PlusRide. Το 1976 υιοθετήθηκε από την Υπηρεσία Μεταφορών της Αλάσκα.

Για 50 και πλέον χρόνια πραγματοποιούνται διάφορες έρευνες για την υγρή και τη ξηρή μέθοδο σε ασφαλτομίγματα κλειστής και ανοιχτής διαβάθμισης. Η χρήση τροποποιημένης με ελαστικό ασφάλτου έχει υιοθετηθεί σε πολλές πολιτείες των ΗΠΑ όπως η Αριζόνα, η Καλιφόρνια, το Τέξας, η Φλόριντα, η Νεβάδα, η Νότια Καρολίνα, η Αλάσκα, το Κάνσας, το Οχάιο, το Όρεγκον κ.α., στις οποίες έχουν εκδοθεί τεχνικές οδηγίες για τη παραγωγή της. Παράλληλα στις ΗΠΑ προωθείται η κατασκευή επιφανειακών στρώσεων ανοιχτής διαβάθμισης, ειδικά στη περίπτωση νέων αυτοκινητοδρόμων και σε περιοχές με απαιτήσεις για μειωμένο κυκλοφοριακό θόρυβο. Από το 1970 στη Νότιο Αφρική χρησιμοποιούνται τόσο η υγρή όσο και η ξηρή μέθοδος, ενώ παράλληλα έχουν εκδοθεί τεχνικές οδηγίες από την Asphalt Academy.

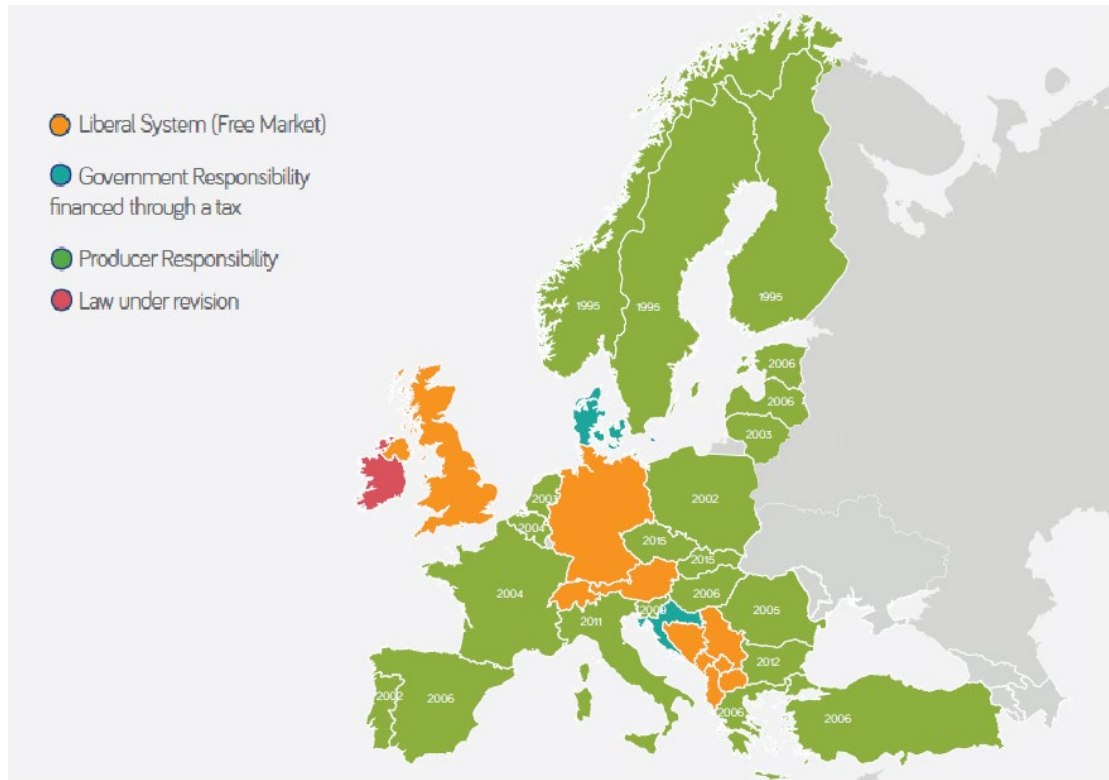
Επίσης στις αρχές του 1980 η υγρή μέθοδος άρχισε να χρησιμοποιείται στην Αυστραλία για περιορισμένες όμως εφαρμογές, κυρίως μεμβράνες απορρόφησης τάσεων και λεπτοτάπητες. Οι διαδικασίες καθορίζονται στις προδιαγραφές της Austroads. Στην Ευρώπη, από το 1981, άσφαλτος που δημιουργήθηκε με την υγρή μέθοδο χρησιμοποιήθηκε σε Βέλγιο, Ολλανδία, Σουηδία, Γαλλία, Γερμανία, Πορτογαλία, Ιταλία, Ισπανία και στην Ελλάδα (ATHENS PROJECT, ROADTIRE).

3.3 Ανακύκλωση ελαστικών τέλους κύκλου ζωής

Η ανακύκλωση ελαστικών τέλους κύκλου ζωής αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας παγκοσμίως. Υπάρχει αφθονία ιδεών και έργων που χρησιμοποιούν υλικά από ανακυκλωμένα ελαστικά. Η διαχείριση απορριφθέντων ελαστικών από αυτοκίνητα, δίκυκλα, φορτηγά κλπ. καθιστά ένα σοβαρό πρόβλημα στη σύγχρονη κοινωνία καθώς επηρεάζει εξίσου την οικονομία, όσο και το περιβάλλον. Ορισμένα ελαστικά είναι κατάλληλα για αναγόμευση, ενώ άλλα λόγω εκτεταμένων φθορών ή κακής ποιότητας του τελικού αναγομωμένου ελαστικού καταλήγουν σε διαφορετική μορφή επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, η ανακύκλωση των ελαστικών δημιουργεί μια μεγάλη ανάγκη για διαχείριση. Έχουν υπάρξει πολλές μέθοδοι διαχείρισης για τα ελαστικά απόβλητα. Ο καπνός και οι επιβλαβείς χημικές ουσίες που εκλύονται από την ανεξέλεγκτη καύση των ελαστικών ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα καθιστώντας, πλέον, αυτή μη αποδεκτή. Διάφορες μέθοδοι για την αποτέφρωση ελαστικών, αποφεύγοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση, έχουν δοκιμαστεί, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου πυρόλυσης υπό κενό σε υψηλή θερμοκρασία. Η απόθεση στους χώρους υγειονομικής ταφής πραγματοποιείται με δυσκολία καθώς πολλοί βρίσκονται σε επίπεδα κορεσμού, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει αδυναμία κατασκευής νέων εγκαταστάσεων. Επίσης, η πιθανότητα σκόπιμων ή τυχαίων πυρκαγιών σε περιοχές που αποθέτονται τα ελαστικά, δημιουργεί μεγάλο ρίσκο για απώλεια ανθρωπίνων ζωών, περιβαλλοντική μόλυνση αλλά και υλικές ζημιές, οδηγώντας σε αυξημένες πιέσεις για μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα διαχείρισης ελαστικών (*Rutherford, 1992*).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση γίνεται ετησίως διαχείριση περισσότερων των τριών (3) εκατομμυρίων τόνων μεταχειρισμένων ελαστικών οχημάτων, εκ των οποίων το 1/3 περίπου επαναχρησιμοποιείται ή αναγομώνεται, ενώ το υπόλοιπο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί πλέον ως ελαστικό οχήματος και χαρακτηρίζεται ως απόβλητο.

Σήμερα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης υπάρχουν τρία μοντέλα διαχείρισης των ελαστικών τέλους ζωής όπως παρουσιάζονται και στον χάρτη της Εικόνας 3.7 (Scott, 2015).



Εικόνα 3.7 Μοντέλα διαχείρισης ελαστικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Scott, 2015)

➤ Διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού (ΕΕΠ)

Στο πλαίσιο του συστήματος αυτού, ο αρχικός κατασκευαστής έχει την υποχρέωση να φροντίζει ώστε τα απόβλητα από τα προϊόντα που έχει δημιουργήσει να διατίθενται υπεύθυνα, λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ενεργειών του. Αυτό καθιστά τον παραγωγό υπεύθυνο για τα απόβλητα που παράγει ο καταναλωτής. Ο νόμος ορίζει το νομικό πλαίσιο και αναθέτει την ευθύνη στους παραγωγούς (κατασκευαστές ελαστικών και εισαγωγείς) να οργανώσουν τη διαχείριση των ελαστικών τέλους κύκλου ζωής. Η διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού εφαρμόζεται από διάφορους τρόπους, είτε από μια εταιρεία διαχείρισης ελαστικών που ασχολείται με τη συλλογή και επεξεργασία ελαστικών σε μια χώρα (όπως στην Πορτογαλία, την Ολλανδία ή τη Σουηδία), είτε μέσω πολλαπλών εταιρειών διαχείρισης ελαστικών (όπως

στην Ιταλία, Ισπανία ή την Ελλάδα) ή μέσω ατομικής ευθύνης του παραγωγού (στην Ουγγαρία).

➤ Φιλελεύθερο σύστημα (ελεύθερη αγορά)

Βάσει του συστήματος αυτού, η νομοθεσία ορίζει τους στόχους που πρέπει να εκπληρωθούν, αλλά δεν ορίζει τους υπεύθυνους. Με αυτόν τον τρόπο, όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς δρουν υπό συνθήκες ελεύθερης αγοράς και ενεργούν σύμφωνα με τη νομοθεσία. Τα συστήματα ελεύθερης αγοράς λειτουργούν αφετέρου στην Αυστρία, την Ελβετία, τη Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Το Ηνωμένο Βασίλειο εφαρμόζει σύστημα "διαχειριζόμενης ελεύθερης αγοράς", καθώς οι φορείς συλλογής και επεξεργασίας ελαστικών τέλους κύκλου ζωής πρέπει να υποβάλλουν εκθέσεις στις εθνικές αρχές.

➤ Φορολογικό σύστημα (Κυβερνητική ευθύνη, χρηματοδότηση μέσω φόρου)

Το τελευταίο μοντέλο διαχείρισης των ελαστικών τέλους κύκλου ζωής είναι το φορολογικό σύστημα που εφαρμόζεται στη Δανία και την Κροατία. Στο πλαίσιο του φορολογικού συστήματος, κάθε χώρα είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των ελαστικών τέλους κύκλου ζωής. Χρηματοδοτείται από φόρο που επιβάλλεται στους παραγωγούς ελαστικών και ακολούθως μεταφέρεται στον καταναλωτή. Σε οποιαδήποτε αγορά, οι εταιρείες ελαστικών πρέπει να διασφαλίσουν ότι τα λάστιχα που προκύπτουν από το πέρας του κύκλου ζωής τους θα αντιμετωπίζονται κατά τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον. Ο παραγωγός είναι υπεύθυνος για να εξασφαλίσει ότι τα προϊόντα του έχουν κατάλληλη διαδρομή ανακύκλωσης και ανάκτησης.

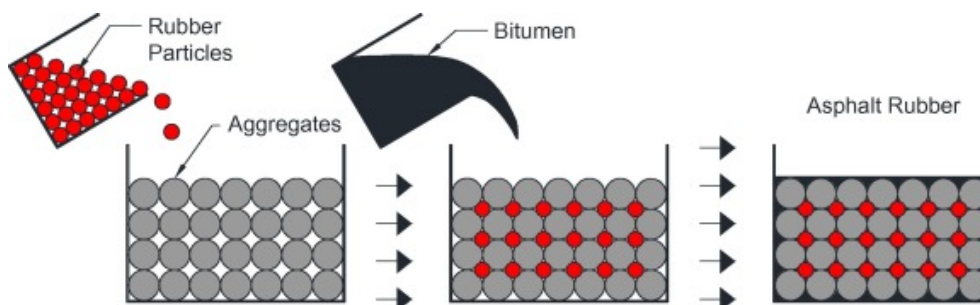
3.4 Βιώσιμα ασφαλτομίγματα με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού

Την κυριότερη εφαρμογή των ανακυκλωμένων ελαστικών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, παγκοσμίως, αποτελεί η προσθήκη τους σε ασφαλτομίγματα, ως τροποποιητές ασφάλτου (Shu, 2014). Το τροποποιημένο ή αλλιώς βιώσιμο ασφαλτόμιγμα, αποτελείται από πετρελαϊκή άσφαλτο, αδρανή και τρίμματα ανακυκλωμένου ελαστικού.

Η προσθήκη του τριμμάτων ελαστικού στα ασφαλτομίγματα μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Τρίμματα ελαστικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως τροποποιητές ιδιοτήτων της ασφάλτου, είτε ως αδρανή υλικά. Η πρώτη περίπτωση αφορά την υγρή μέθοδο (Εικ. 3.8) και η δεύτερη τη ξηρή μέθοδο (Εικ. 3.9), η οποία αξιοποιήθηκε και στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Βασικές διαφορές ανάμεσα στις δυο μεθόδους αποτελούν το μέγεθος των κόκκων του ελαστικού, το προστιθέμενο ποσοστό, η λειτουργία του ελαστικού και η ευκολία προσθήκης του στο μίγμα (Roberts, 1989).



Εικόνα 3.8 Υγρή μέθοδος (Wet process)



Εικόνα 3.9 Ξηρή μέθοδος (Dry process)

Στην περίπτωση της “υγρής μεθόδου”, τα τεμάχια του ανακυκλωμένου ελαστικού αναμιγνύονται με την άσφαλτο σε υψηλές θερμοκρασίες, προτού γίνει η ανάμιξή τους με τα θερμά αδρανή, ενώ στην περίπτωση της “ξηρής μεθόδου”, ανακυκλωμένο ελαστικό αντικαθιστά ένα μικρό μέρος των φυσικών αδρανών στο ασφαλτόμιγμα προτού προστεθεί η άσφαλτος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα οφέλη των βιώσιμων ασφαλτομιγμάτων με ανακυκλωμένα ελαστικά σε σύγκριση με τα συμβατικά είναι πολλά και σημαντικά. Κάποια από αυτά είναι τα εξής :

 Μικρότερα πάχη οδοστρώσας σε σχέση με τα συμβατικά

Η μείωση του πάχους οδοστρώσας τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων συμβάλλει στην διατήρηση των φυσικών πόρων (όπως άσφαλτο, αλλά και εξορυσσόμενα φυσικά αδρανή), προωθώντας παράλληλα την ιδέα της ανακύκλωσης.

 Μείωση κυκλοφοριακού θορύβου

Έχει αποδειχτεί από διεθνείς μελέτες ότι τα βιώσιμα οδοστρώματα μειώνουν ως και 85% το θόρυβο από την κυκλοφορία των οχημάτων.

 Μείωση του όγκου των φθαρμένων ελαστικών

Οι σωροί των φθαρμένων ελαστικών καταλαμβάνουν πολύ μεγάλο όγκο για να θαφτούν σε Χ.Υ.Τ.Α.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί εξετάζοντας βιώσιμα ασφαλτομίγματα που παρασκευάστηκαν με χρήση της υγρής μεθόδου, ενώ για την ξηρή η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

3.5 Μέθοδοι παραγωγής τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού

Όπως τονίστηκε παραπάνω η ανακύκλωση των ελαστικών τέλους κύκλου ζωής ορίζεται ως κατάλληλη λύση για την αποφυγή της περιβαλλοντικής ρύπανσης καθώς αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη απόθεση αυτών σε εδαφικές εκτάσεις. Το σύνολο των προϊόντων που παράγονται από αυτή την διαδικασία έχουν διάφορες χρήσεις και

μπορεί να είναι διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.10.

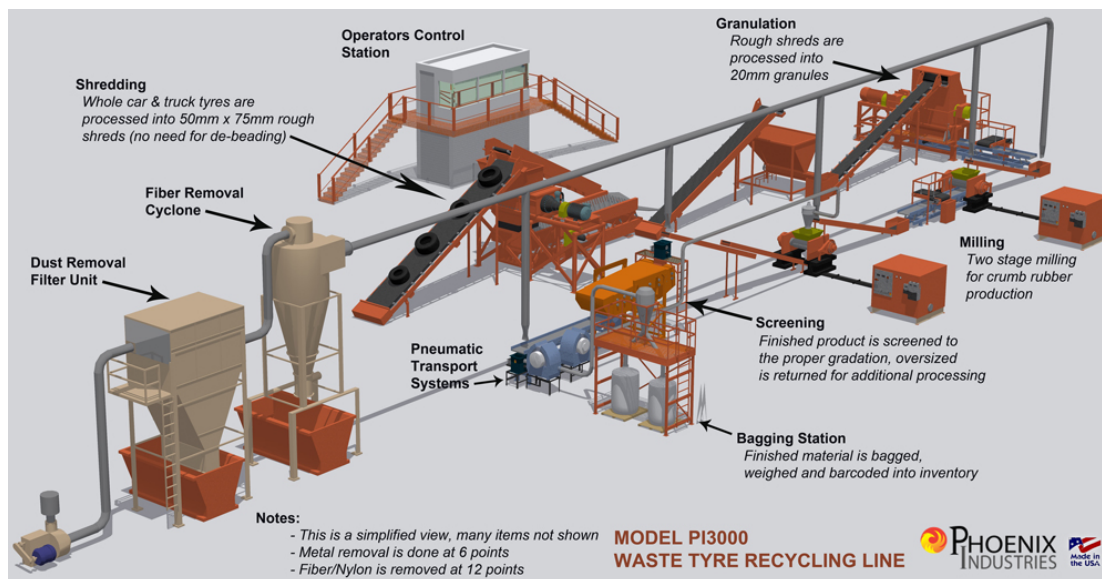


Εικόνα 3.10 Προϊόντα ανακύκλωσης ελαστικών

Ένα από αυτά τα προϊόντα αποτελεί και το τρίμμα βουλκανισμένου ελαστικού το οποίο κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας διατίθεται σε διάφορες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αφού αφαιρεθούν από το εσωτερικό του οι ίνες χάλυβα και τα λινά. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή του τρίμματος είναι πέντε, ως ακολούθως :

α) Μηχανική κονιορτοποίηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ambient grinding)

Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής τρίμματος ελαστικού πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και περιλαμβάνει μία σειρά μηχανημάτων όπως τεμαχιστή, μύλο, μηχανή κοκκοποίησης με μαχαίρια καθώς και μηχανή έλασης. Το σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11.

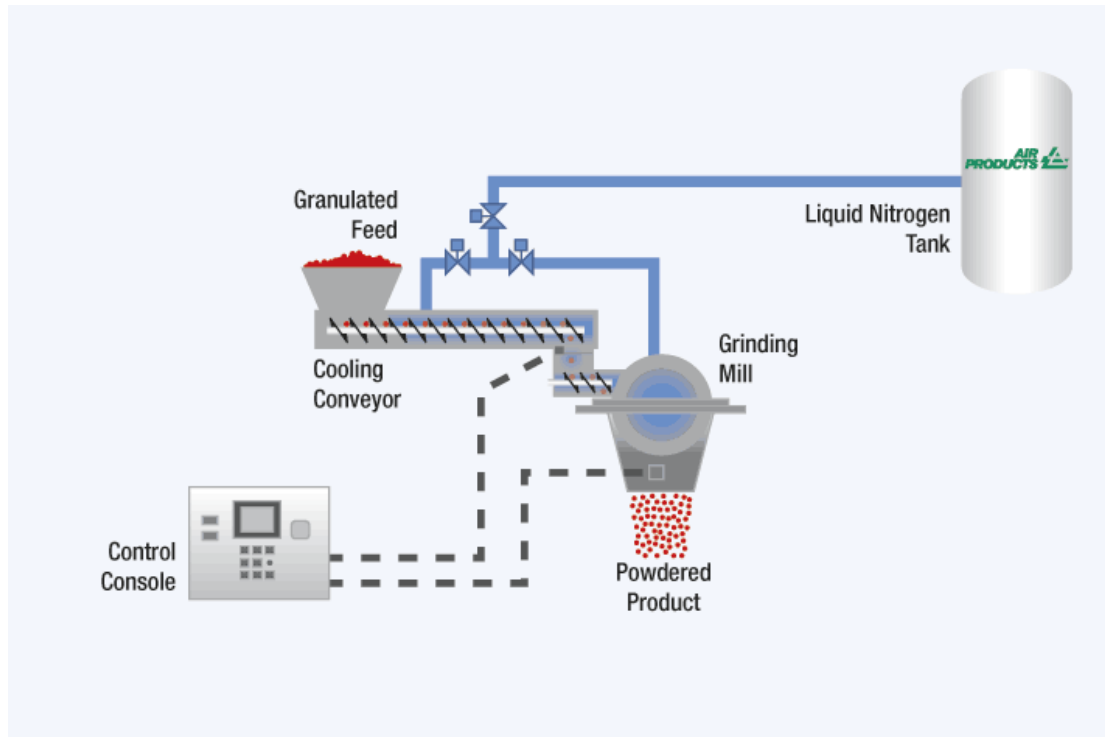


Εικόνα 3.11 Μηχανική επεξεργασία ελαστικού

Η γραμμή επεξεργασίας ακολουθεί τα στάδια του τεμαχισμού των ελαστικών αρχικά και της κοκκοποίησης αργότερα από την αντίστοιχη μηχανή ενώ παράλληλα αφαιρούνται οι ίνες χάλυβα και τα λινά με κατάλληλες διαδικασίες. Συγκεκριμένα, η αφαίρεση των ινών του χάλυβα πραγματοποιείται με την χρήση ηλεκτρομαγνήτη σε συγκεκριμένο μήκος της ταινίας μεταφοράς του υλικού. Η αφαίρεση των λινών επιτυγχάνεται με μηχανή διαχωρισμού των υλικών υπό συνθήκες πεπιεσμένου αέρα εντός της οποίας τα κομμάτια του ελαστικού κινούνται προς τα κάτω λόγω βαρύτητας, ενώ τα λινά κινούνται ανοδικά προς το στόμιο προσρόφησής τους. Η επεξεργασία του υλικού σταματά όταν αυτό κοκκοποιηθεί στο επιθυμητό μέγεθος, το οποίο επιτυγχάνεται κατόπιν διαδοχικών διελεύσεων αυτού από το σύνολο της γραμμής επεξεργασίας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στο σύνολο της γραμμής παραγωγής είναι καλό να υπάρχει σύστημα κατάλληλο για την πτώση θερμοκρασίας του τρίμματος, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν απότομη καύση αυτού λόγω οξείδωσης από τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν από την λειτουργία των μηχανημάτων. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιφάνεια του υλικού που παράγεται σύμφωνα με αυτή την διαδικασία χαρακτηρίζεται ως τραχιά, ενώ το ίδιο το υλικό χαρακτηρίζεται από μέτρια καθαρότητα (Sienkiewicz et al. 2012, Klingensmith 1996).

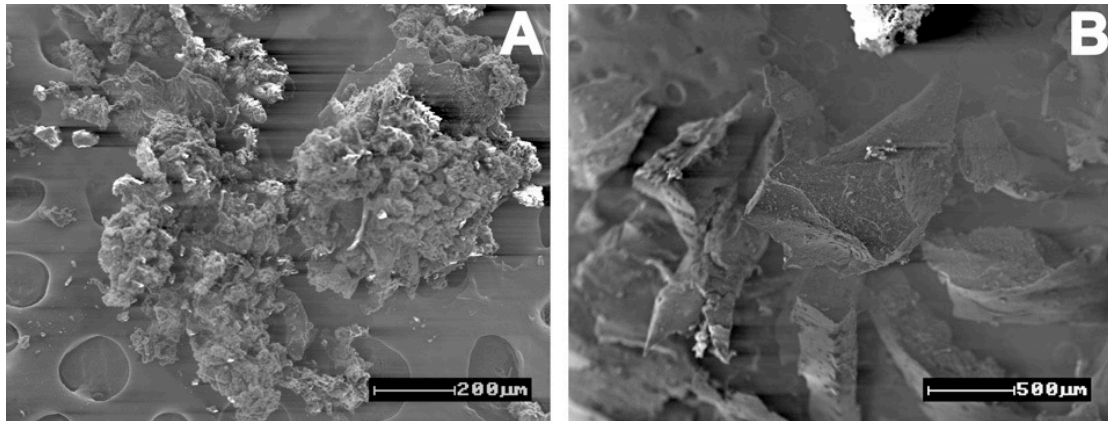
β) Κρυογενική κονιορτοποίηση ελαστικού (Cryogenic grinding)

Η κρυογενική κονιορτοποίηση του ελαστικού περιλαμβάνει όπως και η μηχανική επεξεργασία, τον αρχικό τεμαχισμό των ελαστικών με την διαφορά ότι μετά από αυτό το στάδιο το τρίμμα που παράγεται εμποτίζεται με υγρό άζωτο και έτσι η θερμοκρασία του υλικού φτάνει τους -80°C . Η πορεία της διαδικασίας (Εικ. 3.12) συνεχίζεται κατευθύνοντας το υλικό σε κατάλληλους σφυρόμυλους (hammer mills) για την περαιτέρω κοκκοποίηση του.



Εικόνα 3.12 Κρυογενική κονιορτοποίηση ελαστικού

Η αφαίρεση των λινών και των ινών μετάλλων επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων μηχανημάτων και ηλεκτρομαγνήτη αντίστοιχα για κάθε κατηγορία. Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει την δυνατότητα να παραχθούν κόκκοι διαφόρων διαβαθμίσεων με κύριο χαρακτηριστικό της πλειοψηφίας αυτών την λεία επιφάνεια με γωνίες όπως διαφαίνεται και στις Εικόνες 3.13(α) και 3.13(β).



Εικόνα 3.13 (α) Κόκκοι από μηχανική επεξεργασία (β) Κόκκοι από κρυογενική επεξεργασία

Το υλικό το οποίο παράγεται θεωρείται καθαρότερο, συγκρινόμενο με το παραγόμενο προϊόν της μηχανικής μεθόδου, αφού δεν περιέχει σε μεγάλο ποσοστό άλλες ουσίες. Ωστόσο διακρίνεται από υψηλό ποσοστό υγρασίας (12%-15%) και υψηλό κόστος παραγωγής (Sienkiewicz *et al.* 2012, Klingensmith 1996). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το τελικό μέγεθος κόκκου που προκύπτει από την επεξεργασία εξαρτάται από τον χρόνο εμπότισης εντός του υγρού αζώτου, όπως επίσης και το μέγεθος του κόσκινου που θα χρησιμοποιηθεί εντός του θαλάμου κοκκοποίησης (Adhikari, 2000).

γ) Υγρή κονιορτοποίηση (Wet grinding)

Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει την επεξεργασία ενός αιωρήματος αποτελούμενο από νερό και τεμαχισμένο καουτσούκ (rubber) με χρήση στατικής αλάς και κινητής ακονόπετρας (grindstone). Η περαιτέρω κοκκοποίηση του υλικού επιτυγχάνεται κατά την σύγκρουση μεταξύ της ακονόπετρας και του αιωρήματος όταν αυτό διέρχεται από τα αυλάκια που σχηματίζονται. Το νερό επιδρά θετικά σε αυτή την διαδικασία, καθώς διατηρεί το υλικό σε χαμηλή θερμοκρασία ενώ παράλληλα μειώνει την θερμοκρασία και στην επιφάνεια της ακονόπετρας, η οποία έχει αυξητικές τάσεις λόγω της τριβής. Η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει υλικό πολύ λεπτής κοκκομετρικής διαβάθμισης (πούδρα) με μεγάλη ειδική επιφάνεια. Το μέγεθος του κόκκου εξαρτάται από τον χρόνο επεξεργασίας του αιωρήματος, ενώ το τελικό προϊόν που παράγεται διαθέτει λεία επιφάνεια (Sienkiewicz *et al.* 2012, Adhikari 2000).

δ) Κονιορτοποίηση με χρήση μηχανής εκτόξευσης νερού (*Water-jet grinding*)

Κατά την συγκεκριμένη μέθοδο πραγματοποιείται ο τεμαχισμός μεγάλων ελαστικών με υψηλές αντοχές ασκώντας πίεση που φτάνει τα 2000 bar. Η διαδικασία περιλαμβάνει την αφαίρεση μονάχα του καουτσούκ από το σύνολο του ελαστικού με μεγάλη ακρίβεια η οποία εντοπίζεται ακόμη και στην αφαίρεση του υλικού που χρησιμοποιείται ως μεμβράνη περιμετρικά των ινών χάλυβα στο εσωτερικό του ελαστικού. Το παραγόμενο προϊόν διακρίνεται από υψηλή καθαρότητα, πολύ καλή διαβάθμιση και μεγάλη ειδική επιφάνεια. Όσον αφορά την συγκεκριμένη μέθοδο, αυτή χαρακτηρίζεται φιλική προς το περιβάλλον, ενεργειακά οικονομική και με χαμηλά επίπεδα ηχορύπανσης (*Sienkiewicz et al. 2012*).

ε) Μέθοδος *Berstorff* (*Berstorff's method*)

Η μέθοδος *Berstorff* χαρακτηρίζεται ως μία βελτιωμένη έκδοση της μηχανικής μεθόδου σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και διακρίνεται σε τρία επιμέρους στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον τεμαχισμό του ελαστικού και την αφαίρεση των ινών χάλυβα οι οποίες τεμαχίζονται σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Στο δεύτερο στάδιο ακολουθεί περαιτέρω θραύση του υλικού που έχει τεμαχιστεί στο στάδιο ένα, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται αφαίρεση των λινών όπως και των ινών χάλυβα που έχουν απομείνει. Η τελική φάση της διαδικασίας περιλαμβάνει την περαιτέρω κοκκοποίηση του υλικού έως ότου λάβει την επιθυμητή διαβάθμιση. Τα παραπάνω βήματα πραγματοποιούνται με την χρήση κατάλληλου εξοπλισμού που περιλαμβάνει μηχανή έλασης και εξωθητήρες διπλής διάταξης (*twin-screw extruders*). Το παραγόμενο προϊόν χαρακτηρίζεται ως πούδρα μεγάλης ειδικής επιφάνειας και χαμηλού ποσοστού υγρασίας (*Sienkiewicz et al. 2012*).

3.6 Τροποποίηση ασφάλτου με ελαστικό - υγρή μέθοδος

Σύμφωνα με την “υγρή μέθοδο-wet process”, ανακυκλωμένο ελαστικό (<0.6mm) σε ποσοστό 18-22% κ.β. της ασφάλτου αναμιγνύεται με το ασφαλτικό συνδετικό υλικό για διάστημα 45min σε υψηλή θερμοκρασία προτού έρθει σε επαφή με τα αδρανή (*Hicks, 2002*). Τα τελευταία 20 χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί και δημοσιευθεί αποτελέσματα μελετών παγκοσμίως με αντικείμενο την επίδραση της τροποποιημένης

ασφάλτου στις ιδιότητες και στη συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων (*RAC, Heitzman 1992, Goulias 1998, Khalid 2002, Vlahopoulos et al. 2008*).

Ο κύριος λόγος χρησιμοποίησης τροποποιημένης ασφάλτου στα θερμά ασφαλτομίγματα είναι το γεγονός ότι προσδίδει σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες στο μίγμα σε σύγκριση με την κοινή ασφαλτο. Άλλωστε, τα συνδετικά ασφάλτου από ελαστικό μπορούν να κατασκευασθούν ώστε να αποδίδουν σε κάθε κλίμα. Αυτό που γίνεται συνήθως για να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι ο σχεδιασμός αυτών των προϊόντων να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις κλιματικές συνθήκες όπως και όλα τα διαθέσιμα στοιχεία κίνησης της περιοχής που πρόκειται να γίνει το έργο (*Sousa et al., 2010*). Σε ενδιάμεσες και υψηλές θερμοκρασίες, οι φυσικές ιδιότητες συνδετικών ασφάλτου από ελαστικό παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από την κοινά κλάσματα ασφάλτου. Το ελαστικό προσδίδει ακαμψία στο μίγμα και ταυτόχρονα αυξάνει την ελαστικότητα σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών χρησιμοποίησης των οδοστρωμάτων, γεγονός το οποίο μειώνει την θερμοκρασιακή ευαισθησία των οδοστρωμάτων και βελτιώνει την αντίσταση σε παραμόρφωση και κόπωση (*Caltrans, 2003*).

Η τροποποιημένη ασφαλτος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε είδους ασφατική εργασία, από την παραγωγή ασφαλτομίγματος μέχρι την στεγάνωση και υγρομόνωση επιφανειών. Ο ρόλος της συνίσταται σε τέσσερις συνιστώσες:

- Την αύξηση της αντοχής του ασφαλτομίγματος σε παραμένονσα παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες,
- Τη βελτίωση της ελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος,
- Την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος και
- Την αύξηση της πρόσφυσης μεταξύ ασφάλτου και αδρανών, σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών κατασκευής και λειτουργίας του έργου, χωρίς να μεταβάλλει αρνητικά τις υπόλοιπες ιδιότητες (πχ την εργασιμότητα).

Η χημική βιομηχανία ανταποκρίθηκε στα παραπάνω αιτήματα παρουσιάζοντας μεγάλο αριθμό χημικών πρόσθετων (τροποποιητών) που το καθένα ικανοποιεί αντίστοιχα τις

παραπάνω απαιτήσεις. Ενδεικτικά οι βελτιώσεις που επιφέρουν τα προσθετικά ασφάλτου, ή τροποποιητές ή βελτιωτικά ασφάλτου φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Βελτιώσεις λόγω προσθετικών υλικών στην άσφαλτο & στο ασφαλτόμιγμα

Βελτιώσεις στην άσφαλτο	Βελτιώσεις στο ασφαλτόμιγμα
1. Βελτίωση της ελαστικότητας	8. Βελτίωση της δυσκαμψίας
2. Μικρότερη θερμοκρασιακή ευαισθησία	9. Καλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση
3. Βελτίωση συνδετικής ικανότητας	10. Βελτίωση της συνοχής του μίγματος
4. Επιβράδυνση γήρανσης	11. Καλύτερη αντίσταση στη ρηγμάτωση
5. Μείωση ιξώδους	12. Βελτίωση της εργασιμότητας
6. Σκλήρυνση ασφάλτου	
7. Αναζωογόνηση ασφάλτου	

Οι τροποποιημένες άσφαλτοι χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής και διάθεσης. Αυτό δε θα πρέπει να είναι αποτρεπτικός παράγοντας διότι δε θα πρέπει να συγκρίνεται αποσπασματικά το κόστος αυτών με την άσφαλτο, αλλά το συνολικό κόστος αυτών (κόστος κατασκευής και κόστος μελλοντικών συντηρήσεων) ανηγμένο σε ετήσιο κόστος κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

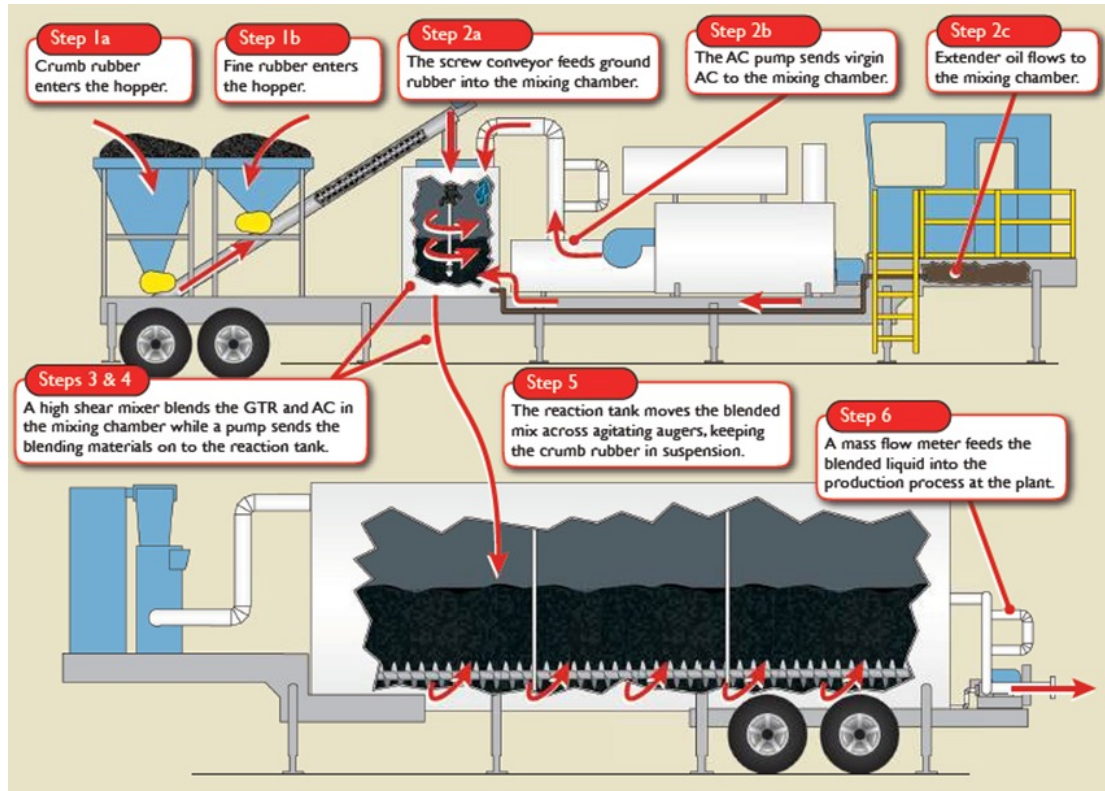
Έτσι η υγρή μέθοδος, χρησιμοποιείται για την παρασκευή ασφαλτομιγμάτων με ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των συμβατικών. Η τροποποίηση που επιφέρει το ανακυκλωμένο ελαστικό στην άσφαλτο αποδίδεται σε φυσικές αλλαγές και αλλαγές σύστασης μέσω μιας διεργασίας αλληλεπίδρασης όπου οι κόκκοι του ελαστικού διογκώνονται απορροφώντας ένα ποσοστό του λεπτόκοκκου κλάσματος αυτής, με σκοπό τη δημιουργία ενός ιξώδους gel, που οφείλεται στην αύξηση του ιξώδους του τροποποιημένου με ελαστικό συνδετικού υλικού (Heitzman, 1992).

Σημειώνεται ότι μπορεί να χρειαστεί πρόσθετος εξοπλισμός ανάμιξης ασφάλτου-κόκκων ελαστικού.

Ο όρος “υγρή μέθοδος” αναφέρεται σε μια οικογένεια τεχνολογιών οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τα συστήματα και τις συνθήκες επεξεργασίας καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται (*Lo Presti, 2012*).

Όταν το ελαστικό αναμιχθεί με τη ζεστή ασφάλτο, απορροφά τα χαμηλού μοριακού βάρους έλαια της ασφάλτου και διογκώνεται. Εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή ή ο χρόνος ανάμιξης και αντίδρασης πολύ μεγάλος, η διόγκωση αντικαθίσταται από το αποπολυμερισμό του ελαστικού και το ελαστικό απελευθερώνει τα έλαια στο μίγμα. Αναλυτική περιγραφή του μηχανισμού αλληλεπίδρασης ελαστικού – ασφάλτου θα γίνει σε επόμενη παράγραφο. Η υγρή μέθοδος είναι υλοποιήσιμη μέσω δύο παρόμοιων συστημάτων: το “σύστημα McDonald” και το “σύστημα συνεχούς ανάμιξης”.

Στο “σύστημα McDonald”, η ανάμιξη της ασφάλτου και του τρίμματος γίνεται σε δεξαμενή, σε μεγάλη ταχύτητα και στη συνέχεια το μίγμα οδηγείται σε ξεχωριστή δεξαμενή όπου γίνεται ανάδευση του μίγματος σε χαμηλή ταχύτητα για 45 έως 60 λεπτά. Η ανάδευση είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλιστεί καλή διασπορά του τρίμματος στο μίγμα και να διευκολυνθεί η αντίδραση της ασφάλτου με το ελαστικό. Το μίγμα στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ασφαλτομίγματος ή άλλων συνδετικών υλικών. Στην Εικόνα 3.14 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαδικασία παραγωγής τροποποιημένης ασφάλτου με το σύστημα McDonald.



Εικόνα 3.14 Διαδικασία παραγωγής τροποποιημένης ασφάλτου με υψηλό ιξώδες με το σύστημα McDonald

Το “σύστημα συνεχούς ανάμιξης” είναι παρόμοιο με το σύστημα McDonald όσον αφορά τη διαδικασία ανάμιξης, με τη διαφορά ότι το τρίμμα και η άσφαλτος αναδεύονται συνεχώς σε μία δεξαμενή και η αντίδραση πραγματοποιείται κατά την ανάμιξη (Nuha et al. 2012). Και στα δύο συστήματα γίνεται χρήση ειδικού εξοπλισμού.

Οι τροποποιημένες ασφαλτοι που παρασκευάζονται με την υγρή μέθοδο βρίσκουν εφαρμογή στην παραγωγή θερμών και ψυχρών ασφαλτομιγμάτων, υλικών σφράγισης αρμών και ρωγμών. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες απαιτείται χρήση τροποποιημένης με πολυμερή ασφάλτου, όπως η μεμβράνη απορρόφησης τάσεων (SAM), το ενδιάμεσο στρώμα απορρόφησης τάσεων (SAMI) και λεπτές επιφανειακές στρώσεις.

Η υγρή μέθοδος είναι υλοποιήσιμη μέσω δύο τεχνολογιών οι οποίες αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικούς τύπους τροποποίησης: “την υγρή μέθοδο με υψηλό ιξώδες (wet process - high viscosity)” και την “υγρή μέθοδο χωρίς ανάδευση (wet process – No agitation)”. Στην Εικόνα 3.15 φαίνεται η διαφορά των δύο τύπων ασφάλτου οπτικά.



Εικόνα 3.15 Υγρή μέθοδος με υψηλό ιξώδες (αριστερά) & υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση (δεξιά)

Στην πρώτη περίπτωση, η παραγόμενη άσφαλτος παρουσιάζει μεγάλο ιξώδες (>1500 cPs) και είναι ανομοιογενής. Αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση η άσφαλτος παρουσιάζει πολύ μικρότερο ιξώδες και το μίγμα είναι ομοιογενές δια γυμνού οφθαλμού και ανομοιογενές εάν παρατηρηθεί σε μικροσκόπιο (Han et al., 2016).

➤ **Υγρή μέθοδος με υψηλό ιξώδες (wet process – high viscosity ή McDonald process)**

Η υγρή μέθοδος με υψηλό ιξώδες αναφέρεται στη μέθοδο που εφευρέθηκε από τον Charles McDonald και στηρίζεται στη διόγκωση του ελαστικού όταν αυτό αναμιχθεί με την άσφαλτο. Οι τροποποιημένες άσφαλτοι που υπερβαίνουν το κατώτατο όριο ιξώδους των 1.500 cPs στους 177°C (ή 190°C) χαρακτηρίζονται ως “υψηλού ιξώδους”. Σύμφωνα με τον ορισμό του ASTM απαιτείται τουλάχιστον 15% τρίμμα ελαστικού για να επιτευχθεί το ιξώδες κατωφλίου. Ωστόσο το ποσοστό αυτό διαφοροποιείται στις διάφορες τεχνικές οδηγίες. Η άσφαλτος αναμιγνύεται με το ελαστικό σε υψηλή θερμοκρασία (>177°C) και ταχύτητα και στη συνέχεια το μίγμα αφήνεται να αντιδράσει για 45–60 λεπτά σε δεξαμενές με αναδευτήρα. Αυτού του είδους τα συνδετικά υλικά εμφανίζουν προβλήματα σταθερότητας σε αποθήκευση και για αυτό

δεν συνίσταται η παρατεταμένη αποθήκευσή τους. Επιπλέον πρόκειται για συνδυαστικά υλικά που απαιτούν συνεχή ανάδευση με ειδικό εξοπλισμό ώστε να σωματίδια του ελαστικού να παραμένουν ομοιόμορφα κατανεμημένα στο μίγμα και να αποτρέπεται η έμφραξη των σωληνώσεων και η φθορά του εξοπλισμού.

Μπορούν να παρασκευαστούν με το σύστημα McDonald ή το σύστημα συνεχούς ανάμιξης, σε σταθερές ή σε κινητές μονάδες παραγωγής και στη συνέχεια να μεταφερθούν σε σταθερές ή κινητές δεξαμενές αντίδρασης. Επίσης απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και εμπειρία από το εργατικό δυναμικό, ενώ η τροποποιημένη ασφάλτος δεν μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και στη περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί αμέσως μετά τη παρασκευή της θα πρέπει να παραμένει σε δεξαμενή με αναδευτήρες (για μικρό χρονικό διάστημα όπως ορίζεται από τις προδιαγραφές) (Lo Presti, 2012).

Η έκλυση τοξικών και καρκινογόνων ουσιών κατά τη παραγωγή και διάσπρωση ασφαλτομιγμάτων που περιέχουν ελαστικό αποτέλεσε επίσης αντικείμενο έρευνας. Ωστόσο δεν έχει αποδειχθεί αυξημένη επικινδυνότητα συγκριτικά με τις κοινές ασφάλτους ή τις τροποποιημένες με πολυμερή (Lo Presti 2012, Zanetti et al. 2013).

➤ **Υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση (wet process – No agitation)**

Η τεχνολογία χωρίς την απαίτηση συνεχούς ανάμιξης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στη Φλόριντα και στο Τέξας και αργότερα στη Καλιφόρνια, τη Λουϊζιάνα, την Αριζόνα και το Κολοράντο. Στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η δημιουργία μιας τροποποιημένης ασφάλτου στην οποία το τρίμμα θα είναι πλήρως διαλυμένο, χωρίς διακριτά σωματίδια, που δεν θα απαιτεί συνεχή ανάδευση και η οποία δεν θα παρουσιάζει προβλήματα συμβατότητας. Η υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση, σε αντίθεση με τη κλασσική μέθοδο McDonald, βασίζεται στον αποπολυμερισμό το ελαστικού και τη βελτιστοποιημένη διασπορά του στην ασφαλτο χρησιμοποιώντας πολύ υψηλή θερμοκρασία (200-260°C) και ταχύτητα ανάμιξης (έως 8000 RPM). Αυτού του είδους οι ασφάλτοι μπορεί να παρασκευαστούν είτε στο διυλιστήριο όπου και ονομάζονται “terminal blends”, είτε κατευθείαν στο εργοτάξιο και ονομάζονται “field blends”. Αυτά τα μίγματα σπάνια προσεγγίζουν το κατώτατο όριο των 1.500 cPs στους 177°C που επιτρέπει την αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου στο ασφαλτόμικμα χωρίς να προκύψουν προβλήματα αποστράγγισης ή ανάδυσης, αν

και ο βαθμός τροποποίησης που επιτυγχάνεται είναι μεγάλος (Shatnawi 2011, Hicks 2012).

Η διαδικασία παραγωγής μοιάζει με αυτή για τροποποιημένες με πολυμερή ασφάλτους καθώς δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στο συγκρότημα παραγωγής και ειδικός εξοπλισμός, ενώ οι απαιτήσεις για την θερμοκρασία, την πίεση και την ανάμιξη είναι παρόμοιες. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν σε όλους τους τύπους ασφαλτομίγματος, να ταξινομηθούν ανάλογα με την επίδοσή τους και έχουν καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η ασφαλτος βάσης θερμαίνεται στους 200°C και αναμιγνύεται με το τρίμμα σε ταχύτητα από 3000 έως 8000 rpm για 40 έως 60 λεπτά. Κατόπιν, το μίγμα που προκύπτει αποθηκεύεται στην δεξαμενή κατά την οποία δεν πραγματοποιείται ανάδευση αυτού. Η αντίδραση της ασφάλτου με το τρίμμα ελαστικού θεωρείται ότι επιτυγχάνεται κατά την διάρκεια ανάδευσης των δύο υλικών.

Η υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση στοχεύει στη παραγωγή σταθερής τροποποιημένης ασφάλτου, χωρίς όμως να εξασφαλίζει ότι δεν θα γίνει διαχωρισμός φάσεων. Εάν μετά τη παραγωγή υπάρχουν στο μίγμα διογκωμένα σωματίδια ελαστικού, θα δημιουργηθεί ίζημα στη δεξαμενή κατά την αποθήκευση. Επίσης όσα σωματίδια δεν έχουν διαλυθεί θα αναδυθούν στη κορυφή λόγω της μικρότερης πυκνότητας. Για το λόγο αυτό απαιτείται προσεκτική επιλογή των υλικών ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή διαλυτότητα. Μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη μικρού ποσοστού ελαίων όπως η φουρφουράλη, πολυφωσφορικού οξέος, ασφάλτου σε μορφή βράχου βελτιώνουν τις ιδιότητες καθίζησης. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές των δύο τεχνολογιών.

Πίνακας 3.2 Συνοπτική σύγκριση των δύο τεχνολογιών

Τεχνολογίες Υγρής μεθόδου	Υψηλό ιξώδες	Χωρίς ανάδευση
Ιξώδες στους 177°C	>1.500 cPs	<1.500 cPs
Θερμοκρασία παραγωγής	177°C – 200°C	200°C – 260°C

Παραγωγή ασφάλτου & ασφαλτομίγματος		
Παραγωγή στο έργο / συγκρότημα παραγωγής ασφαλτομίγματος	Ναι	Ναι
Παραγωγή στο διυλιστήριο	Όχι	Ναι
Απαίτηση για ειδικό εξοπλισμό & τροποποιήσεις στην μονάδα παραγωγής	Ναι	Όχι
Συνθήκες διάστρωσης	Μεγαλύτερες θερμοκρασίες λόγω μεγάλου ιξώδους & εξειδικευμένο προσωπικό	Παρόμοιες με τις συνθήκες της τροποποιημένης με πολυμερή ασφάλτου
Εφαρμογές		
Ασφαλτικά γαλακτώματα	Όχι	Ναι
Ψυχρά ασφαλτομίγματα	Όχι	Ναι
Θερμά ασφαλτομίγματα	Ναι (εκτός από τα κλειστού τύπου)	Ναι
Επιφανειακές στρώσεις	Ναι	Ναι
Εν ψυχρώ ανακύκλωση	Όχι	Ναι

Οι άσφαλοι που παράγονται με τη συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκουν εφαρμογή σε θερμά και ψυχρά ασφαλτομίγματα όλων των τύπων, ασφαλτικά γαλακτώματα, μίγματα τύπου slurry, μίγματα για επιφανειακές στρώσεις και στην εν ψυχρώ ανακύκλωση.

3.7 Τροποποίηση ασφαλτομίγματος με ελαστικό - ξηρή μέθοδος

Όσον αφορά στη “ξηρή μέθοδο”, με την οποία έγιναν τα ασφαλτομίγματα της παρούσας διπλωματικής, η υπάρχουσα βιβλιογραφία είναι περιορισμένη και καλύπτει την κατηγορία των θερμών ασφαλτομιγμάτων (*Khalid & Artamendi 2002, Fernandes Jr.J.L. et al., 2002*). Έτσι, εκτός του γεγονότος ότι η διαδικασία της υγρής μεθόδου είναι αρκετά πολύπλοκη, μεγάλου κόστους και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην τροποποίηση ασφαλτομίγματος με την ξηρή μέθοδο ώστε να διερευνήσει σε μεγαλύτερο βαθμό την επίδραση του ελαστικού στο ασφαλτόμιγμα και να δώσει νέα στοιχεία για περαιτέρω έρευνα.

Ο όρος “ξηρή μέθοδος” προσδιορίζει όλες τις μεθόδους στις οποίες το τρίμμα ελαστικού αναμιγνύεται πρώτα με θερμά αδρανή και στη συνέχεια προστίθεται η ζεστή άσφαλτος. Το παραγόμενο προϊόν που προκύπτει από την συγκεκριμένη μέθοδο χαρακτηρίζεται ως ασφαλτόμιγμα και είναι η διαδικασία που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο για τα δημιουργήσουμε τα μίγματά μας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη παραγωγή θερμού τροποποιημένου ασφαλτομίγματος και δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό.

Όταν ανακυκλωμένο ελαστικό, σε μορφή πούδρας, προστίθεται στα ασφαλτομίγματα, βελτιώνει την συμπακνωσιμότητα και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, λόγω της δράσης του ελαστικού ως φίλλερ, που συμπληρώνει τα υπάρχοντα κενά του σκελετού των αδρανών (*Kettab and Bali, 2004*).

Στην Ισπανία υπάρχουν ήδη από το 2007 προδιαγραφές και νομοθετική ρύθμιση σχετικά με την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων ελαστικών οχημάτων σε ασφαλτομίγματα. Στην Ελλάδα δυστυχώς, μέχρι στιγμής δεν υπάρχει σχετικό θεσμικό πλαίσιο ούτε ερευνητική προσπάθεια στον τομέα αυτό.

Το τρίμμα του ελαστικού που χρησιμοποιείται αντικαθιστά ένα ποσοστό των αδρανών, το οποίο συνήθως κυμαίνεται από 1% έως 3% κατά βάρος του συνολικού μίγματος και η κοκκομετρική του διαβάθμιση μπορεί να ποικίλει από χονδρόκοκκο τρίμμα έως υπέρλεπτη πούδρα. Μελέτες σε πυκνά διαβαθμισμένα ασφαλτομίγματα τροποποιημένα με ανακυκλωμένο ελαστικό, που περιέχουν 3%-5% ανακυκλωμένο ελαστικό κ.β. των αδρανών, έδειξαν ότι η δυσκαμψία των μιγμάτων αυτών μειώθηκε

κατά 30-75% ανάλογα με το ποσοστό του προστιθέμενου ελαστικού (*Rahman et al., 2004*). Ωστόσο, όταν λεπτόκοκκο ελαστικό (μέγιστου κόκκου <1mm) προστίθεται σε ασφαλτομίγματα, όπως συμβαίνει σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ- Φλόριντα, Κολοράντο και Κάνσας, παράγονται μίγματα με βελτιωμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά στη δυσκαμψία και στην αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση ενώ κόκκοι αυτού του μεγέθους είναι περισσότερο ενεργοί σε σύγκριση με χονδρόκοκκους, όσον αφορά στην αντίσταση σε τροχαυλάκωση. Παρόλα αυτά, η ιδιότητα της αντίστασης σε τροχαυλάκωση πρέπει να μελετηθεί για διάφορα μεγέθη κόκκου και ποσότητες ανακυκλωμένου ελαστικού.

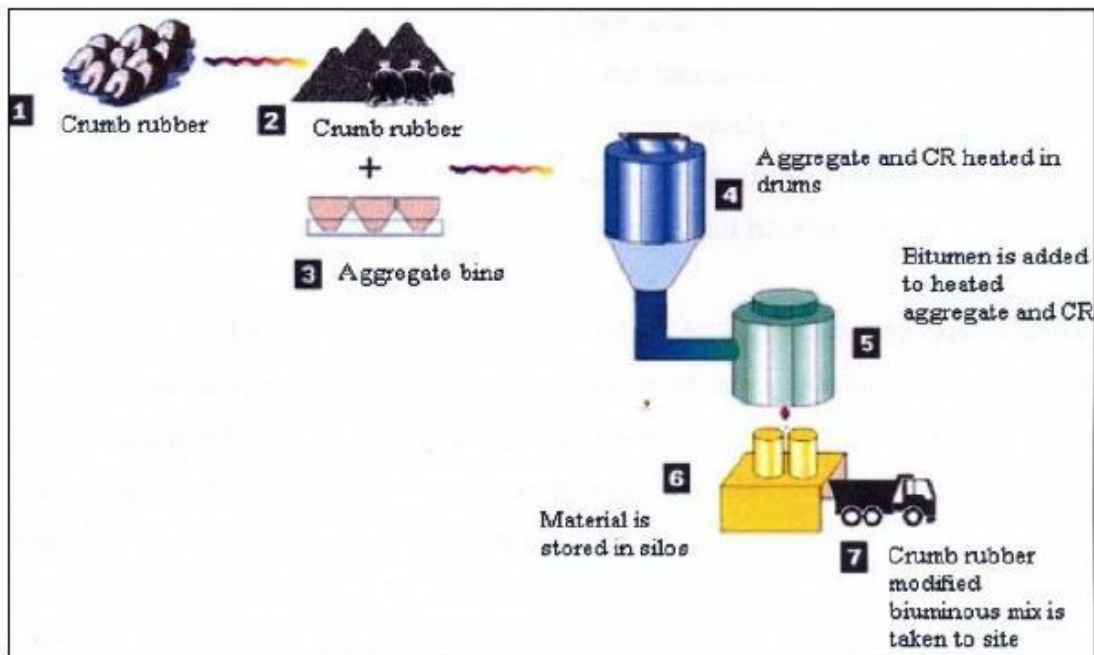
Η ξηρή μέθοδος συγκρινόμενη με την υγρή μέθοδο, δεν απαιτεί τη χρήση ειδικού εξοπλισμού ενώ αποτελεί λιγότερο διαδεδομένη μέθοδο δεδομένου του υψηλού κόστους ενσωμάτωσης του ανακυκλωμένου ελαστικού σε ειδικά διαβαθμισμένα φυσικά αδρανή (*Hunt, 2002*). Ωστόσο η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα να ενσωματώσει μεγαλύτερες ποσότητες ελαστικών, ιδιαίτερα σε ειδικές εφαρμογές, με περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα.

Η θερμοκρασία των αδρανών θα πρέπει να κυμαίνεται από 190 έως 210°C, της ασφάλτου από 145 έως 165°C, ενώ η θερμοκρασία του τελικού μίγματος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 210°C. Επιπλέον το παραγόμενο ασφαλτόμικμα θα πρέπει να αποθηκεύεται για τουλάχιστον μία ώρα μετά την παραγωγή του σε θερμαινόμενη δεξαμενή, ώστε να επιτευχθεί ένας επιθυμητός βαθμός αφομοίωσης του ελαστικού στην άσφαλτο. Η παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή του συγκεκριμένου τύπου ασφαλτομίγματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.16. Οι τεχνολογίες υλοποίησης της ξηρής μεθόδου είναι τρεις:

- I. Η τεχνολογία PlusRide έχει σχεδιαστεί για τη παραγωγή τροποποιημένων θερμών ασφαλτομιγμάτων με αδρανή μη συνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης. Ο σκελετός των αδρανών αποκτά τις ελαστικές ιδιότητες του ελαστικού και η άσφαλτος τροποποιείται σε ένα συγκεκριμένο βαθμό λόγω της μερικής αντίδρασης των δύο υλικών.
- II. Η τεχνολογία Generic Dry εισάγει το ελαστικό σε μίγματα με ομοιόμορφη ή μη συνεχή διαβάθμιση αδρανών. Στόχος είναι η διαβάθμιση του τρίμματος να προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει με αυτή των αδρανών. Οι κόκκοι ελαστικού

που χρησιμοποιούνται είναι μικρότερου μεγέθους, συγκριτικά με το μέγεθος που χρησιμοποιείται στην μέθοδο PlusRide, εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερη αντίδραση μεταξύ ασφάλτου και ελαστικού. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εξεταστεί υπό πειραματικές συνθήκες στην Νέα Υόρκη και την Φλόριντα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (ΗΠΑ).

- III. Η τεχνολογία Chunk Rubber Asphalt Concrete, η οποία βασίστηκε στην PlusRide, με στόχο την μελέτη αποκόλλησης των υλικών που περιέχονται στα ασφαλτομίγματα λόγω πάγου. Η διαβάθμιση των αδρανών μετατράπηκε από ανοικτού τύπου σε κλειστού διατηρώντας το τυπικό μέγιστο μέγεθος κόκκου. Το μέγεθος κόκκου του ελαστικού αυξήθηκε, ενώ παρατηρήθηκε ότι αύξηση στο ποσοστό ελαστικού εντός μίγματος είχε ως αποτέλεσμα και την μεταβολή του ποσοστού της ασφάλτου προς υψηλότερα επίπεδα. Επιπλέον, να τονισθεί ότι μετά από οποιαδήποτε μεταβολή στο ποσοστό τρίμματος η κοκκομετρική διαβάθμιση τροποποιούνταν κατάλληλα.



Εικόνα 3.16 Διαγραμματική απεικόνιση σταδίων παραγωγής ασφαλτομίγματος με την ξηρή μέθοδο

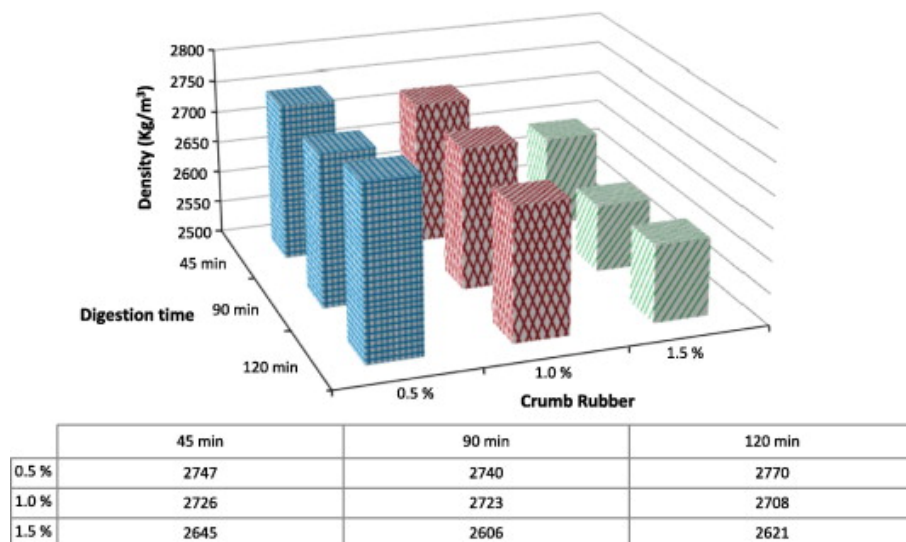
Η ξηρή μέθοδος είναι αρκετά απλή, δεν παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς αλλά βρίσκει εφαρμογή μόνο στη παραγωγή θερμών ασφαλτομιγμάτων. Το κυριότερο

πρόβλημα των μιγμάτων που παράγονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η έλλειψη συνοχής, που προκαλείται κυρίως λόγω του μικρού βαθμού αντίδρασης μεταξύ της ασφάλτου και του ελαστικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη αντίσταση στην υγρασία, αποκόλληση των αδρανών και μείωση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Η συμβατότητα του ελαστικού με την ασφαλτο έχει ιδιαίτερη σημασία για τα συγκεκριμένα ασφαλτομίγματα. Γι' αυτό και τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα όσον αφορά τη σχέση του ποσοστού, της προέλευσης, της σύστασης και του τρόπου παραγωγής του τρίμματος ελαστικού, των ιδιοτήτων της ασφάλτου και των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος.

Ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα της ξηρής μεθόδου (dry process), που παρουσιάζεται σε ένα ευρύ φάσμα ερευνών, είναι οι μεγάλες ποσότητες τρίμματος παραγόμενες από ανακύκλωση ελαστικού που καταναλώνονται για την παραγωγή τέτοιου είδους ασφαλτομιγμάτων. Αποτέλεσμα αυτής της υψηλής κατανάλωσης ποσοτήτων ελαστικού είναι διάφορα περιβαλλοντικά οφέλη συμπεριλαμβανομένου της εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και φυσικών πόρων (Cao 2007, Shen 2017, da Silva 2018).

Μία σημαντική παράμετρος, η οποία έχει μελετηθεί εκτεταμένα στο σύνολο των ερευνών είναι το μέγεθος κόκκου του τρίμματος σε συνδυασμό με το βέλτιστο ποσοστό ελαστικού που μπορεί να προστεθεί στο μίγμα που παράγεται με χρήση της ξηρής μεθόδου. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω στοιχείων επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό των κενών αέρος και την κατανομή του τρίμματος εντός του μίγματος.

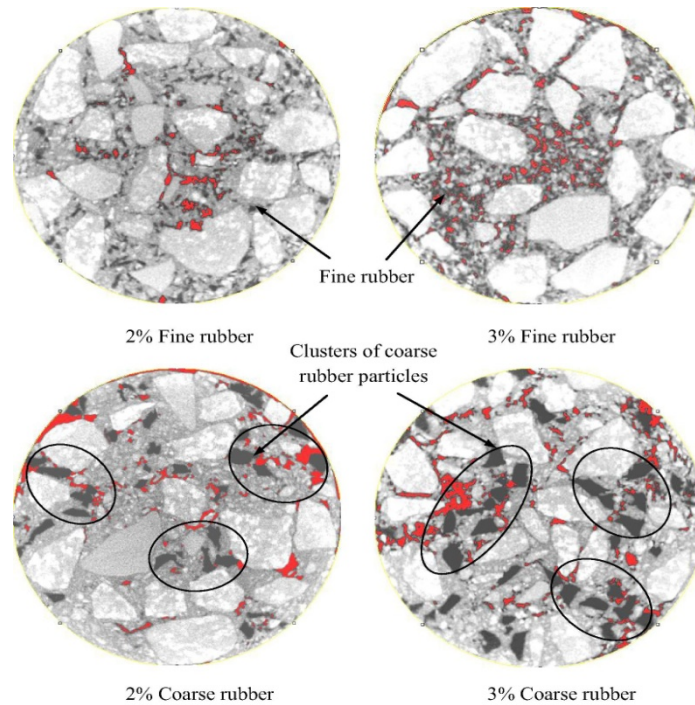
Ένα χαρακτηριστικό αποτέλεσμα της αύξησης του ποσοστού του ελαστικού στο μίγμα είναι η αύξηση του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου, ως άμεση συνέπεια της διόγκωσης των μορίων του τρίμματος λόγω προσρόφησης. Ακόμη, όμως, αυτή η αύξηση μπορεί να έχει αποτέλεσμα και στην πυκνότητα του μίγματος καθώς έρευνες έχουν αποδείξει ότι αύξηση στο ποσοστό ελαστικού εντός του ασφαλτομίγματος προκαλεί μείωση της πυκνότητάς του (Cao 2007, Hassan et al. 2015). Το παραπάνω συμπέρασμα, με βάση τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μελετών, συνοψίζονται στην Εικόνα 3.17.



Εικόνα 3.17 Επιρροή ποσοστού ελαστικού στην πυκνότητα του μίγματος (Cao, 2007)

Όσον αφορά στο μέγεθος του κόκκου παρατηρείται ότι τα λεπτόκοκκα στοιχεία έχουν καλύτερη κατανομή μέσα στο μίγμα με άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία μικρότερων κενών και κατά συνέπεια την καλύτερη συμπίκνωση του μίγματος.

Αντίθετα, το τρίμμα ελαστικού μεγαλύτερου κόκκου δημιουργεί συσσωματώματα τα οποία δεν μπορούν να διαχωριστούν εξαιτίας των αδρανών που βρίσκονται περιμετρικά τους, παρά την ανάμιξη και συμπίκνωση που έχει προηγηθεί (Asphalt Academy, 2017). Η Εικόνα 3.18 παρουσιάζει λήψεις από μικροσκόπιο όπου διακρίνεται η κατανομή του τρίμματος ελαστικού ανά τύπο και ποσοστό περιεκτικότητας για μίγματα με χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο τρίμμα.



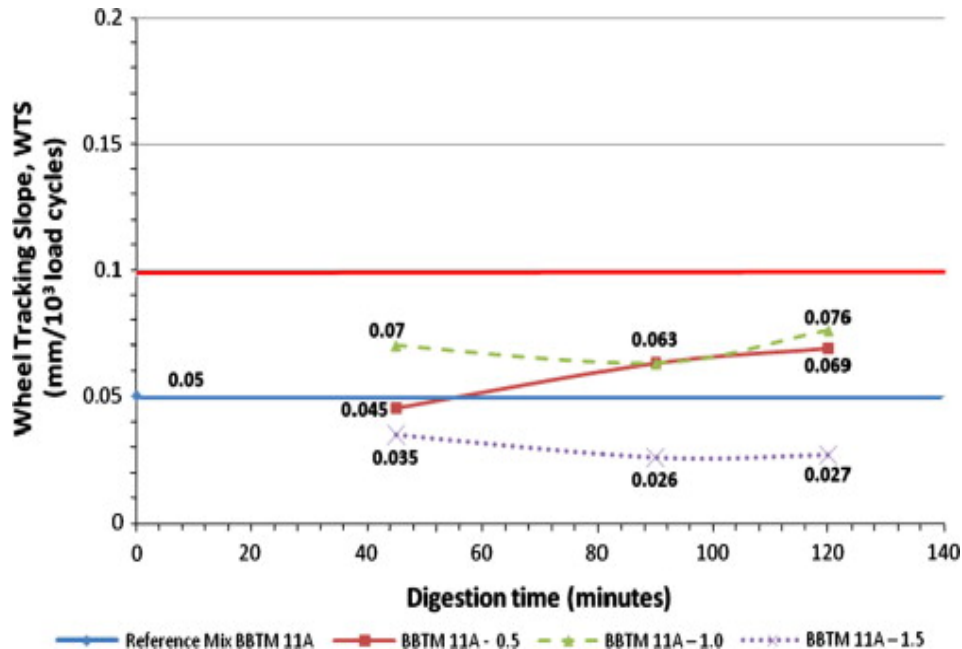
Εικόνα 3.18 Μίγμα με λεπτόκοκκο ελαστικό (πάνω) & μίγμα με χονδρόκοκκο ελαστικό (κάτω) (Asphalt Academy, 2017)

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό, που έχει μελετηθεί και αφορά στο παραγόμενο ασφαλτόμειγμα με χρήση της ξηρής μεθόδου, είναι ο χρόνος αντίδρασης μεταξύ της ασφάλτου και του μίγματος αδρανών-τρίμματος ελαστικού. Ως χρόνος αντίδρασης ορίζεται ο απαραίτητος χρόνος για αντιδράσει η άσφαλτος με το ελαστικό προκειμένου να αποκτήσει το μίγμα τις βέλτιστες ιδιότητες του (Cao, 2017). Διάφορες μελέτες που αφορούσαν την συγκεκριμένη παράμετρο κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο χρόνος αντίδρασης διαθέτει μικρό βαθμό επιρροής στις μηχανικές ιδιότητες του μίγματος.
- Το ποσοστό ασφάλτου και η συμπύκνωση του παραγόμενου υλικού δεν σχετίζονται με τον χρόνο αντίδρασης.
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά του μίγματος παραμένουν ανεπηρέαστα από τις μεταβολές στον χρόνο αντίδρασης.

Κατόπιν, των παραπάνω συμπερασμάτων των ερευνών προτείνεται ένας βέλτιστος χρόνος αντίδρασης από τους ίδιους τους μελετητές που αντιστοιχεί περίπου σε

ενενήντα (90) λεπτά της ώρας (Cao 2007, Hassan et al. 2015), όπως προκύπτει από την Εικόνα 3.19.

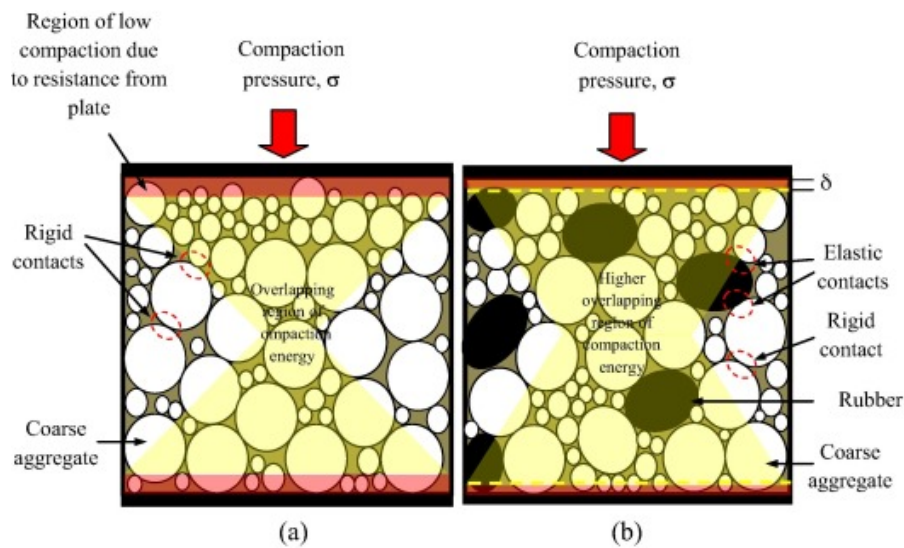


Εικόνα 3.19 Επίδραση χρόνου αντίδρασης διαφόρων μιγμάτων στο μέγεθος της τροχοαυλάκωσης (Cao, 2007)

Αντικείμενο μελέτης των τελευταίων ετών, πέραν των παραπάνω, είναι και η ύπαρξη κενών εντός του ασφαλτομίγματος ως άμεση απόρροια του μεγέθους και του ποσοστού των κόκκων του τρίμματος. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι η προϋπαρξη κενών θεωρείται απαραίτητη εντός του σκελετού των αδρανών για να υπάρχει επαρκής χώρος για την διόγκωση του ελαστικού λόγω της αντίδρασης με την άσφαλτο.

Επιπλέον, τα κενά αυτά πληρούνται σε ένα βαθμό από τους κόκκους του τρίμματος με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ασυνέχειες στην πυκνότητα του μίγματος. Το μέγεθος των κενών επιδρά στην ποιότητα της συμπίκνωσης που υποβάλλεται το μίγμα καθώς μικρότερα κενά εξασφαλίζουν μεγαλύτερο βαθμό συμπίκνωσης. Η σωστή κατανομή του ελαστικού εντός του ασφαλτομίγματος, η οποία επηρεάζεται άμεσα από την ύπαρξη κενών, επηρεάζει ακόμη και την κατανομή του φορτίου που ασκείται στο οδόστρωμα. Σχηματική απεικόνιση του παραπάνω συμπεράσματος φαίνεται στις Εικόνες 3.20 (α) και (β). Αξίζει να αναφερθεί ότι η ύπαρξη του τρίμματος κατανέμει

το φορτίο που ασκείται σε μεγαλύτερο εύρος έναντι ενός τυπικού ασφαλτομίγματος που παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων σε μία περιοχή.



Εικόνα 3.20 (α) Κατανομή τάσεων εντός κανονικού ασφαλτομίγματος, (β) Κατανομή τάσεων εντός ασφαλτομίγματος που περιέχει κόκκους ελαστικού

Όσον αφορά το μέγεθος των κενών, αυτό επηρεάζει άμεσα τις παραμορφώσεις που προκαλούνται στο οδόστρωμα, καθώς αποδεικνύεται ότι τα μικρά κενά προκαλούν μικρές παραμορφώσεις. Αντίθετα, τα μεγάλα κενά συγκεντρώνουν υψηλές τάσεις, ενώ ο συνδυασμός αυτών εντός του ασφαλτομίγματος μπορεί να δημιουργήσει εκτεταμένες ρωγμές με σοβαρές ζημιές (Asphalt Academy, 2017).

3.8 Συνοπτική σύγκριση υγρής και ξηρής μεθόδου

Στον Πίνακα 3.3 παρατίθενται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της υγρής και της ξηρής μεθόδου. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας, ο ειδικός εξοπλισμός αλλά και οι δυσκολίες στην παραγωγή και στην μεταφορά καταστρώνουν την υγρή μέθοδο πολύ μεγαλύτερου κόστους σε σύγκριση με την ξηρή, η οποία δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό ή στην διαδικασία παραγωγής των μιγμάτων.

Πίνακας 3.3 Συνοπτική σύγκριση Υγρής και Ξηρής μεθόδου

Μέθοδοι	Υγρή μέθοδος	Ξηρή μέθοδος
Πολυπλοκότητα	Μεγάλη	Μικρή
Απαίτηση για ειδικό εξοπλισμό	Ναι	Όχι
Παραγωγή & Μεταφορά	Δυσκολίες & περιορισμοί Μικρό χρονικό παράθυρο για την διάστρωση του τελικού μίγματος	Εύκολη, χωρίς περιορισμούς
Χρόνος αντίδρασης	Μέθοδος McDonald (Ηπια ανάμιξη / 45-60min) Υγρή μέθοδος χωρίς ανάδευση (45-60min)	Απαραίτητη η αντίδραση με συνιστώμενο χρόνο 90min
Ποσοστό τρίμματος	Τουλάχιστον 15% (κατά ASTM)	1%-3% κ.β. αδρανών
Ποσότητα τρίμματος	Μικρότερη από ξηρή	Μεγαλύτερη από υγρή
Κοκκομετρία τρίμματος	Προτιμάται τρίμμα λεπτής διαβάθμισης	Από χονδρόκοκκη έως υπέρλεπτη
Περιβαλλοντικό όφελος	Μικρότερο από την ξηρή	Μεγαλύτερο από την υγρή
Εφαρμογές		
Νέο οδόστρωμα	Ναι	Ναι
Συντήρηση - Ενίσχυση	Ναι	Όχι
Θερμά ασφαλτομίγματα	Ναι	Ναι
Ψυχρά ασφαλτομίγματα	Ναι	Όχι
Υλικά πλήρωσης αρμών & ρωγμών	Ναι	Όχι

Ωστόσο, το γεγονός ότι η ξηρή μέθοδος βρίσκει εφαρμογή μόνο σε θερμά ασφαλτομίγματα, καθιστά την υγρή μέθοδο πιο ευέλικτη αφού μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε θερμά αλλά και σε ψυχρά ασφαλτομίγματα αλλά και σε εργασίες συντήρησης ή ενίσχυσης οδοστρωμάτων.

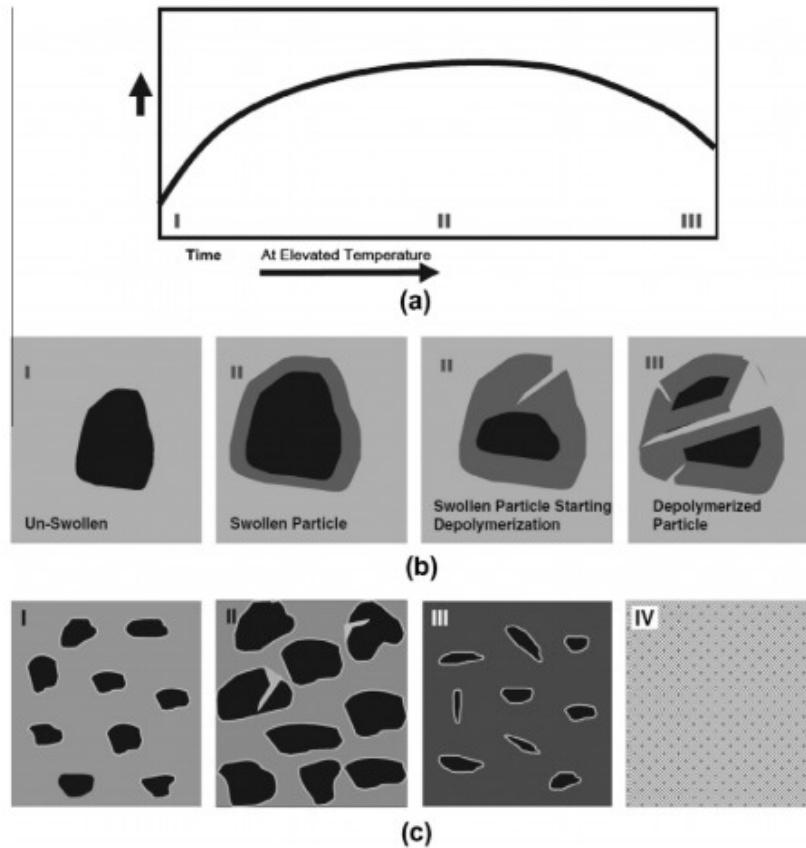
4. Αντίδραση ασφάλτου – ελαστικού

4.1 Μηχανισμός αντίδρασης

Η αντίδραση της ασφάλτου με το ελαστικό είναι μια περίπλοκη διεργασία. Οι δύο κύριοι μηχανισμοί αντίδρασης που επηρεάζουν τις ιδιότητες του τροποποιημένου συνδετικού υλικού είναι η διόγκωση του ελαστικού και η αποδόμησή του (αποβουλκανισμός και αποπολυμερισμός). Η διόγκωση και η αποδόμηση του ελαστικού αποτελούν δύο αντίθετες αντιδράσεις και προκαλούνται όταν το συνδετικό υλικό εκτίθεται σε διαφορετικούς συνδυασμούς χρόνου και θερμοκρασίας αντίδρασης (*Abdelrahman et al. 1999, Ghavibazoo 2013*). Ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η αντίδραση, μπορεί να συμβεί διόγκωση ή διάλυση του ελαστικού μέσα στην ασφαλτο ή ένας συνδυασμός των δύο, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητά της. Επίσης ανάλογα με τις συνθήκες της αντίδρασης, ο μηχανισμός της αποδόμησης του ελαστικού μπορεί να διαφέρει. Στα αρχικά στάδια της αντίδρασης πραγματοποιούνται ταυτόχρονα δύο αντίθετες διεργασίες: μερική αφομοίωση του ελαστικού στην ασφαλτο και επιφανειακή προσρόφηση των χαμηλού μοριακού βάρους αρωματικών ενώσεων της ασφάλτου στην επιφάνεια του ελαστικού (*Lo Presti 2013, Ghabchi et al. 2016*). Η απορρόφηση των αρωματικών ελαίων της ασφάλτου μέσα στις πολυμερικές αλυσίδες του ελαστικού προκαλεί τη διόγκωση και το μαλάκωμα του ελαστικού (*Lo Presti et al., 2012*). Ο όγκος των σωματιδίων του ελαστικού μπορεί να αυξηθεί από 2 έως 5 φορές (*Abdelrahman et al. 1999, Ghavibazoo 2013, Ying et al. 2010*).

Το ελαστικό αντιδρά με την ασφαλτο με τρόπο εξαρτώμενο από το χρόνο και τη θερμοκρασία όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή ή ο χρόνος είναι πολύ μεγάλος, η διόγκωση θα συνεχιστεί μέχρι το σημείο όπου αντικαθίσταται με αποπολυμερισμό (Εικ. 4.1 (β)II & 4.1 (β)III) ο οποίος προκαλεί διασπορά του ελαστικού στην ασφαλτο (Εικ. 4.1 (γ)III). Ο αποπολυμερισμός αρχίζει να απελευθερώνει καουτσούκ στην ασφαλτο (Εικ. 4.1 (β)II) προκαλώντας μείωση της δυσκαμψίας της (σύνθετο μέτρο διάτμησης G^*) ενώ οι ελαστικές ιδιότητές της (γωνία φάσης δ) συνεχίζουν να τροποποιούνται όταν ο αποπολυμερισμός βρίσκεται ακόμα σε αρχικά στάδια. Επίσης εάν η θερμοκρασία συνεχίσει να είναι υψηλή ή ο χρόνος είναι αρκετά μεγάλος, ο αποπολυμερισμός θα συνεχίσει να προκαλεί επιπλέον καταστροφή

των χημικών δεσμών (Εικ. 4.1 (γ)IV) και έτσι η τροποποίηση χάνεται (*Lo Presti et al. 2012, Abdelrahman et al. 1999, Ghavibazoo 2013*).



Εικόνα 4.1 Αλληλεπίδραση ασφάλτου-ελαστικού σε αυξανόμενη θερμοκρασία (α) Μεταβολή ιζώδους σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία, (β) Μεταβολή στο μέγεθος του ελαστικού σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία, (γ) Αλλαγή στη δομή του συνδετικού υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία

Όταν το ελαστικό αναμιχθεί με την ασφάλτο, λειτουργεί ως αδρανές ελαστικού και τροποποιεί τις ιδιότητες της ασφάλτου. Στη ξηρή μέθοδο ωστόσο, η αντίδραση της ασφάλτου με το ελαστικό θεωρείται αμελητέα. Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους ο βαθμός αλληλεπίδρασης είναι συνήθως μικρός είναι ότι το ποσοστό ελαστικού και το μέγεθος των κόκκων που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερα από εκείνα που χρησιμοποιούνται στην υγρή μέθοδο, ενώ δεν γίνεται χρήση πρόσθετων που διευκολύνουν την αλληλεπίδραση των δύο υλικών. Ο βαθμός τροποποίησης της ασφάλτου στην ξηρή μέθοδο εξαρτάται από το ποσοστό του λεπτόκοκκου ελαστικού που περιέχεται στο μίγμα των αδρανών (*Mashaan et al., 2011*). Σε πρόσφατη μελέτη

αναφέρεται επίσης ότι η αλληλεπίδραση των δύο υλικών ενισχύεται όσο αυξάνει ο χρόνος αποθήκευσης του ασφαλτομίγματος. Η ασφάλτος που ανακτήθηκε από μίγματα που παρασκευάστηκαν με τη ξηρή μέθοδο παρουσίασε διαφορές της κατανομής του μοριακού της βάρους, όταν ο χρόνος αποθήκευσης ήταν μεγαλύτερος, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη αλληλεπίδρασης των υλικών (*Shen et al., 2017*). Συγκριτικά με την υγρή μέθοδο, ο βαθμός τροποποίησης της ασφάλτου δεν διαφέρει σημαντικά, όταν ο χρόνος ωρίμανσης της ασφάλτου και του ασφαλτομίγματος είναι μικρός (*Xie et al., 2015*).

4.2 Φύση του μηχανισμού αντίδρασης

Η φύση του μηχανισμού αντίδρασης ασφάλτου - ελαστικού αποτελεί αντικείμενο έρευνας καθώς πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι είναι μια φυσική και όχι χημική διεργασία. Η διόγκωση του ελαστικού, ως αποτέλεσμα της απορρόφησης των ελαίων της ασφάλτου στη μήτρα του, είναι φυσική διεργασία (*Abdelrahman et al. 1999, Stroup-Gardiner et al. 2013, Hicks et al. 2012*). Η αύξηση του ιξώδους του συνδετικού υλικού προκύπτει λόγω της μείωσης της απόστασης των διογκωμένων πλέον σωματιδίων του ελαστικού και της παρουσίας του υλικού με μορφή ζελατίνης, χωρίς να υπάρχει χημική αλληλεπίδραση των υλικών. Ωστόσο η αύξηση του ιξώδους δεν μπορεί να οφείλεται μόνο στην αύξηση του όγκου του ελαστικού και το σχηματισμό υλικού με μορφή ζελατίνης (*Bahia, 1994*). Επιπλέον, μελέτες υποδεικνύουν ότι η κατανομή του μοριακού βάρους και η μοριακή δομή της ασφάλτου παρουσιάζουν από χημική άποψη σημαντικές αλλαγές και επομένως η αντίδραση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί φυσική (*Ghavibazoo et al. 2013, Ying et al. 2010*). Ακόμη ο αποπολυμερισμός και ο αποβουλκανισμός που εμφανίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες είναι χημικές αντιδράσεις που προκαλούν μείωση του μοριακού βάρους του ελαστικού και διάσπαση των χημικών δεσμών του. Κατά τον αποπολυμερισμό πραγματοποιείται διάσπαση των πολυμερικών αλυσίδων του ελαστικού και κατά τον αποβουλκανισμό διάσπαση των δεσμών που διαμορφώνονται μεταξύ των ατόμων θείου του ελαστικού για να μπορεί να παραμορφώνεται ελαστικά. Κατά συνέπεια, η διάλυση του ελαστικού στην ασφάλτο διαφοροποιεί τη χημική της σύσταση (*Shu et al. 2014*).

Η τροποποίηση της ασφάλτου πραγματοποιείται μέσω της ανταλλαγής υλικών μεταξύ του ελαστικού και της αρχικής ασφάλτου και εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες κάτω

από τις οποίες πραγματοποιείται η αντίδραση. Η ανταλλαγή αυτή κυρίως στα αρχικά στάδια της αντίδρασης είναι φυσική, αλλά πραγματοποιούνται και χημικές αντιδράσεις κυρίως όταν ο χρόνος αντίδρασης είναι μεγάλος ή/και η θερμοκρασία πολύ υψηλή. Κατά συνέπεια η φύση της αντίδρασης εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες και ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία της αντίδρασης. Αναλυτικότερα η αλληλεπίδραση / αντίδραση της ασφάλτου με το ελαστικό εξαρτάται από:

α) Τις συνθήκες επεξεργασίας: τη θερμοκρασία, το χρόνο ανάμιξης και αντίδρασης, τη ταχύτητα ανάμιξης (στροφές / δευτερόλεπτο) και τα χαρακτηριστικά της συσκευής ανάμιξης.

β) Τις ιδιότητες ασφάλτου: τη προέλευση της ασφάλτου και τη χρήση πρόσθετων όπως έλαια αραίωσης (extender oils) και παράγοντες που ενισχύουν το δίκτυο των διασταυρούμενων δεσμών του πολυμερούς (cross-linking agents).

γ) Τα χαρακτηριστικά του τριμματος: την προέλευση και την σύστασή του, την μέθοδο επεξεργασίας και το μέγεθος των κομματιών.

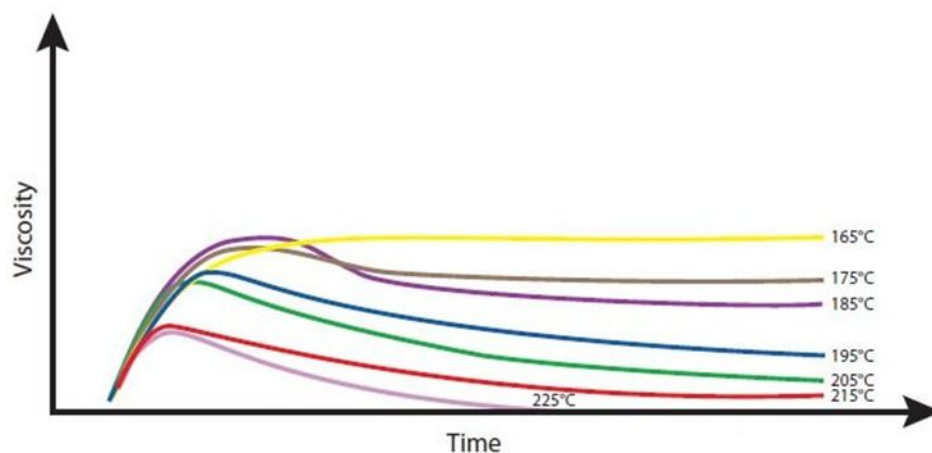
4.3 Επίδραση των μεταβλητών επεξεργασίας

Η θερμοκρασία επηρεάζει την διαδικασία κατά το στάδιο στο οποίο ξεκινάει ο αποπολυμερισμός του ελαστικού και ιδιαίτερα σε υψηλές τιμές. Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας G^* και η γωνία φάσης δ είναι σημαντικοί παράμετροι για τη παρακολούθηση της αντίδρασης και της κατάστασης του δικτύου διασταυρούμενων δεσμών του ελαστικού. Σε θερμοκρασίες από 90°C έως 120°C (Navarro et al. 2004) το ελαστικό δεν παρουσιάζει μεταβολές διότι οι συγκεκριμένες συνθήκες δεν είναι τόσο σοβαρές ώστε να προκαλέσουν το σπάσιμο των χημικών δεσμών. Έτσι, η παρατηρούμενη αύξηση του ιξώδους της ασφάλτου μπορεί να είναι μόνο αποτέλεσμα της παρουσίας των τριμμάτων ελαστικού, τα οποία έχουν διογκωθεί λόγω της απορρόφησης στοιχείων χαμηλού μοριακού βάρους από το κλάσμα των μαλτενίων.

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και για όσο διογκώνεται το ελαστικό, το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας G^* αυξάνεται. Αντίθετα η γωνία φάσης δ μειώνεται μέχρι και τα πρώτα στάδια όπου εμφανίζεται ο αποπολυμερισμός (Abdelrahman et al. 1999). Σε θερμοκρασίες από 160°C έως 180°C προκαλείται μερικός αποπολυμερισμός του

ελαστικού, αυξάνοντας το ποσοστό ελαστικού που είναι διαλυμένο στην άσφαλτο, προκαλώντας μείωση του ιξώδους του συνδετικού υλικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό του τρίμματος ελαστικού χωνεύεται πλήρως στην άσφαλτο. Μελέτες έχουν δείξει ότι όταν προστίθεται τρίμμα ανακυκλωμένου ελαστικού σε ποσοστό 15%, μόνο ένα μικρό ποσοστό 2% έως 4% βρίσκεται διαλυμένο σε αυτήν. Ταυτόχρονα μειώνεται η περιεκτικότητα της ασφάλτου σε στερεά καθώς και το μέγεθος των κομματιών του ελαστικού.

Σε μελέτη των Lalwani et al. (1982), η ελαστικότητα της ασφάλτου μειώθηκε δραστικά, έως και τρεις φορές όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 200°C στους 300°C. Ωστόσο, δεν υπήρξαν σημαντικές μεταβολές όταν η θερμοκρασία μεταβλήθηκε από τους 150°C στους 200°C. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται η μεταβολή του ιξώδους της τροποποιημένης ασφάλτου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και το χρόνο. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται και ο χρόνος αντίδρασης παραμένει μικρός, η έκταση της διόγκωσης αυξάνεται, όπως και το ιξώδες. Για μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται ο ρυθμός θραύσης των διασταυρούμενων δεσμών και επέρχεται ο αποπολυμερισμός του ελαστικού με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους του συνδετικού υλικού.

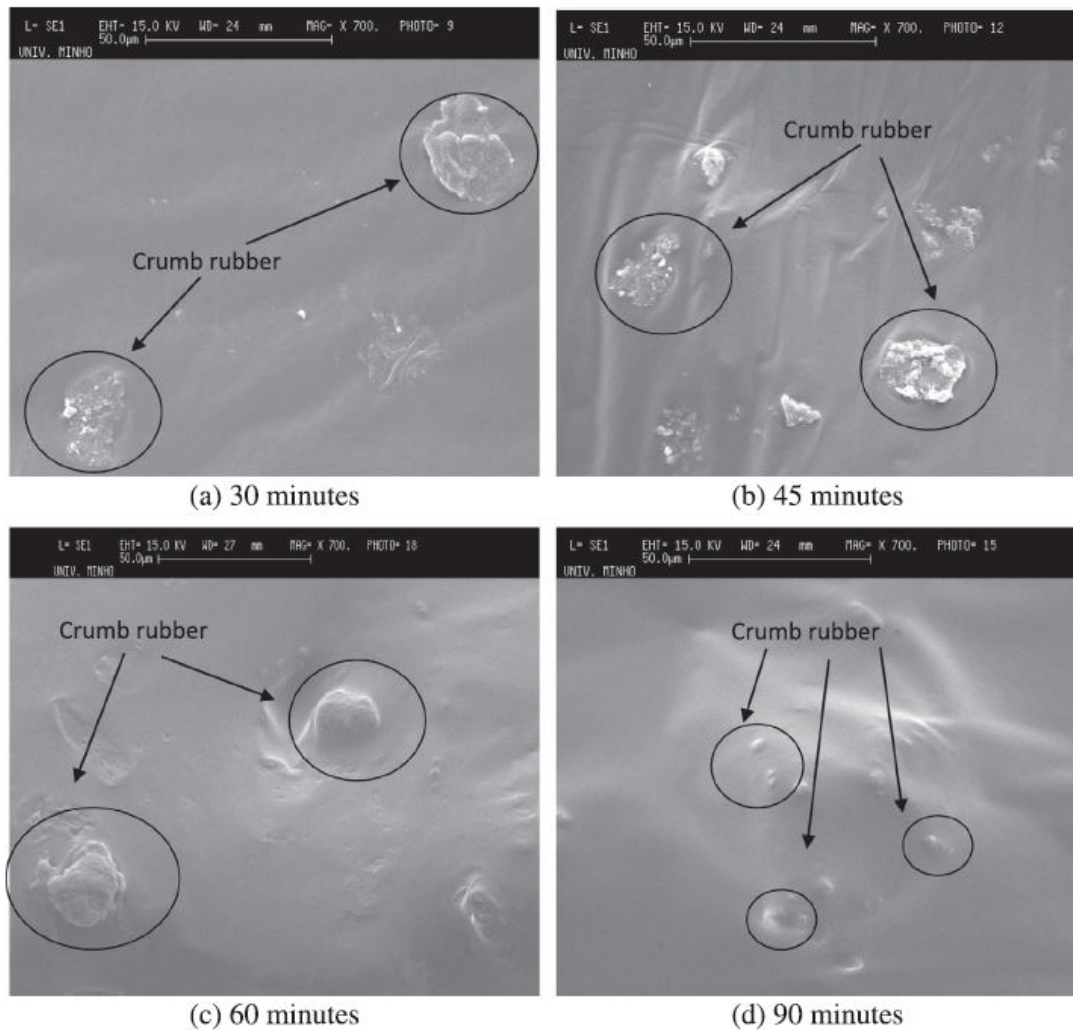


Εικόνα 4.2 Επίδραση της αυξανόμενης θερμοκρασίας στο ιξώδες της ασφάλτου σε συνάρτηση με το χρόνο

Η επίδραση του χρόνου αλληλεπίδρασης στην εξέλιξη των ιδιοτήτων του συνδετικού υλικού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας αλληλεπίδρασης. Η ανάπτυξη των ιδιοτήτων γίνεται σε δύο φάσεις: στην αρχική φάση ή φάση μικρής διάρκειας που συνήθως διαρκεί για 30 με 40 λεπτά και διαφέρει ανάλογα με τη θερμοκρασία και στη δεύτερη μεγάλης διάρκειας φάση που διαρκεί λίγες ώρες. Η τροποποίηση της ασφάλτου πραγματοποιείται στη πρώτη φάση και οι ιδιότητες σταθεροποιούνται στη δεύτερη.

Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αντίδρασης, τόσο αυξάνεται το ιξώδες της τροποποιημένης ασφάλτου εξαιτίας της απορρόφησης από το ελαστικό των αρωματικών ελαίων της ασφάλτου. Ο αυξημένος χρόνος αντίδρασης (έως 2 ώρες σε θερμοκρασία 160°C-200°C) βελτιώνει τις ιδιότητες της ασφάλτου. Ωστόσο, ο παρατεταμένος χρόνος ωρίμανσης μέχρι και 24 ώρες ή η ωρίμανση σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 210°C για μεγάλο χρονικό διάστημα, αναφέρεται από πολλές πηγές ότι προκαλεί μείωση του ιξώδους και της ελαστικής απόκρισης λόγω του αποπολυμερισμού του ελαστικού (*Lo Presti et al. 2012, Liseane et al. 2013*).

Η επίδραση του χρόνου αλληλεπίδρασης στην εξέλιξη της αντίδρασης μπορεί να διαπιστωθεί με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, όσο αυξάνεται ο χρόνος αντίδρασης, αυξάνεται και ο βαθμός αντίδρασης της ασφάλτου με το ελαστικό.

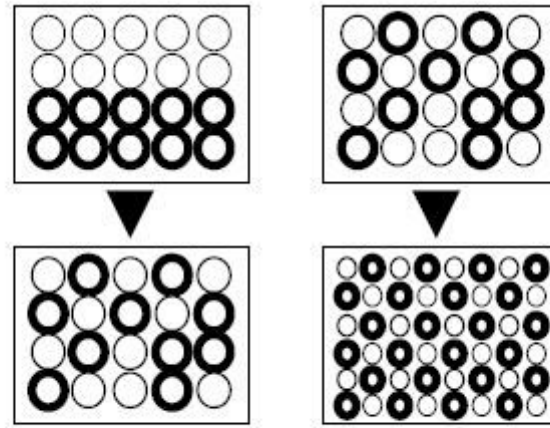


Εικόνα 4.3 Εξέλιξη της αντίδρασης σε συνάρτηση με τον χρόνο

Τα χαρακτηριστικά της συσκευής ανάμιξης και η γεωμετρία του αναδευτήρα επηρεάζουν αμελητέα την αντίδραση όταν αυτή πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μέχρι 180°C . Ανάλογα με τον εφαρμοζόμενο ρυθμό διάτμησης διακρίνονται δύο είδη ανάμιξης τα οποία σχηματικά φαίνονται στην Εικ. 4.4:

- Η διανεμητική ανάμιξη (distributive mixing), η οποία αναφέρεται σε ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στο χώρο και απαιτεί μικρό ρυθμό διάτμησης.
- Η ανάμιξη διασποράς (dispersive mixing), η οποία αναφέρεται στη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων του συστατικού που πρέπει να αναμιχθεί και συμβαίνει μόνο όταν η τάση στο μίγμα υπερβαίνει τη τάση συνοχής του.

Στη πραγματικότητα η διάκριση αυτή δεν είναι σαφής, καθώς το ένα είδος ανάμιξης εμπεριέχει το άλλο. Ωστόσο η ταχύτητα ανάμιξης (στροφές / δευτερόλεπτο ή rpm) είναι σημαντικός παράγοντας και διαφοροποιεί τις ιδιότητες του τελικού συνδετικού υλικού.



Εικόνα 4.4 Διανεμητική ανάμιξη (αριστερά) & ανάμιξη διασποράς (δεξιά)

Μεγάλος ρυθμός διάτμησης, υποδηλώνει ανάμιξη διασποράς, η οποία αφενός μειώνει το μέγεθος των σωματιδίων του ελαστικού, αφετέρου επιτρέπει την ταχύτερη εξέλιξη της αντίδρασης. Επιπλέον εξασφαλίζει τη βέλτιστη διασπορά του τρίμματος ελαστικού στην ασφαλτο, αποτρέποντας τη δημιουργία συσσωματωμάτων και παράγοντας ένα ομοιογενές συνδετικό με βελτιωμένη σταθερότητα σε αποθήκευση. Μικρότεροι ρυθμοί διάτμησης υποδηλώνουν διανεμητική ανάμιξη και επιτρέπουν την αύξηση του ιξώδους της ασφάλτου. Παρόλα αυτά, τα χαρακτηριστικά της συσκευής ανάμιξης και η γεωμετρία του αναδευτήρα επηρεάζουν την αντίδραση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Όταν η αντίδραση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μέχρι 180°C, η επίδραση είναι αμελητέα και επομένως τα χαρακτηριστικά της συσκευής ανάμιξης αποτελούν δευτερεύον παράγοντα επηρεασμού της αντίδρασης συγκριτικά με τη θερμοκρασία. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος και η θερμοκρασία κατά την ανάμιξη, το τροποποιημένο συνδετικό υλικό παρουσιάζει αυξημένη θερμοκρασία αστοχίας και μεγαλύτερο ιξώδες στους 135°C, συγκριτικά με την κοινή ασφαλτο (Jeong et al. 2010).

4.4 Επίδραση των ιδιοτήτων της ασφάλτου

Η σύσταση της αρχικής ασφάλτου είναι βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις τελικές ρεολογικές ιδιότητες των τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων με τρίμμα από ελαστικό. Η “άσφαλτος βάσης” θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά ώστε να είναι συμβατή με το ελαστικό και να επιτυγχάνεται επαρκής διόγκωση του ελαστικού και η τροποποιημένη άσφαλτος να έχει ικανοποιητικό ιξώδες. Η αντίδραση είναι συνάρτηση του μοριακού βάρους και του ιξώδους της αρχικής ασφάλτου. Όσο μικρότερο είναι το μοριακό βάρος ή το ιξώδες (συγκριτικά με μια άλλη άσφαλτο που παράγεται στο ίδιο διυλιστήριο), η έκταση της διόγκωσης είναι μεγαλύτερη. Επίσης άσφαλτοι με χαμηλή περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις ή υψηλή περιεκτικότητα σε ασφατένια παράγουν ασφάλτους με υψηλό ιξώδες. Το ποσοστό των αρωματικών ενώσεων της αρχικής ασφάλτου είναι καθοριστικής σημασίας διότι αφενός θα πρέπει να είναι επαρκής για τη διόγκωση του ελαστικού, αφετέρου δεν θα πρέπει να αυξάνεται υπερβολικά το ιξώδες. Ακόμη, τα αρωματικά έλαια της ασφάλτου βοηθούν στη καλύτερη διασπορά των ασφατενίων στο μίγμα (Mehdi et al. 2008).

Οι τεχνικές προδιαγραφές για τη παρασκευή τέτοιων τροποποιημένων ασφάλτων προτείνουν να χρησιμοποιούνται μαλακές άσφαλτοι ως βάση, οι οποίες είναι πλούσιες σε αρωματικές ενώσεις και ρητίνες μικρού μοριακού βάρους. Ενδεικτικά οι απαιτήσεις που αφορούν στην αρχική άσφαλτο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 (Asphalt Academy 2017, Austroads 2006, Caltrans 2003).

Πίνακας 4.1 Απαιτήσεις διεισδυτικότητας αρχικής ασφάλτου

	Caltrans 2006	AustRoads 2006	Asphalt Academy 2017	ASTM 2009		
				Type I	Type II	Type III
Διεισδυτικότητα (dmm)	120-150	85-100	80-100	85-100	120-150	200-300

Η απορρόφηση των αρωματικών ελαίων της ασφάλτου στις πολυμερικές αλυσίδες του ελαστικού οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας συνδετικού υλικού και προκαλεί προβλήματα εργασιμότητας και ανάδυσης της ασφάλτου. Σε πολλές περιπτώσεις συνιστάται η χρήση πρόσθετων που να ενισχύουν την διόγκωση του

ελαστικού και τη συμβατότητά τους με την άσφαλτο ενώ σε άλλες απαγορεύεται η χρήση τους. Τέτοια πρόσθετα είναι το φυσικό καουτσούκ, τα έλαια αραίωσης (extender oils) και οι παράγοντες ενίσχυσης του δικτύου διασταυρούμενων δεσμών (cross-linking agents).

Τα έλαια αραίωσης (extender oils) είναι πετρελαϊκοί διαλύτες με υψηλή συγκέντρωση σε αρωματικές ενώσεις. Χρησιμοποιούνται για να προμηθεύουν το μίγμα ασφάλτου – ελαστικού με αρωματικές ενώσεις διευκολύνοντας έτσι την αντίδραση και βελτιώνοντας τη συμβατότητα της ασφάλτου με το ελαστικό (Zhou *et al.* 2014, Lo Presti *et al.* 2012, Hicks 2012). Ωστόσο είναι ακριβά έλαια και αυξάνουν τη έκλυση αρωματικών και πτητικών ενώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες.

4.5 Επίδραση των χαρακτηριστικών του τρίμματος

Το ελαστικό τροποποιεί την αρχική άσφαλτο εξαιτίας της απορρόφησης των αρωματικών κλασμάτων της και λειτουργεί ως παιπάλη στο συνδετικό υλικό (Putman *et al.* 2006). Η προέλευση, η σύσταση και η μέθοδος επεξεργασίας του ελαστικού, όπως και το χρησιμοποιούμενο ποσοστό επηρεάζουν τις ιδιότητες της τροποποιημένης ασφάλτου. Τα ελαστικά επιβατικών αυτοκινήτων σε σύγκριση με τα ελαστικά φορτηγών και λεωφορείων διαφέρουν ως προς τη σύστασή τους. Επομένως η τροποποιημένη άσφαλτος θα παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο τρίμμα. Το συστατικό του ελαστικού που είναι γνωστό ότι επηρεάζει τη συμπεριφορά του μίγματος είναι το φυσικό καουτσούκ. Η περιεκτικότητα του τρίμματος σε φυσικό καουτσούκ είναι σημαντική για την αντίδραση διότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αντίδρασης του ελαστικού με την άσφαλτο. Τα ελαστικά φορτηγών και λεωφορείων περιέχουν περίπου 18% φυσικό καουτσούκ ενώ των αυτοκινήτων 9%. Κατά συνέπεια ο βαθμός αντίδρασης στη περίπτωση που χρησιμοποιείται ελαστικό από φορτηγά είναι μεγαλύτερος από όταν χρησιμοποιείται ελαστικό από επιβατικά αυτοκίνητα. Ακόμη οι τροποποιημένες με ελαστικό επιβατικών αυτοκινήτων παρουσιάζουν μεγαλύτερη αύξηση στο ιξώδες σε σχέση με αυτές με ελαστικό βιομηχανικών οχημάτων πιθανότατα γιατί τα βιομηχανικά ελαστικά διαλύονται στην άσφαλτο ενώ τα επιβατικά διογκώνονται (Lo Presti 2013, Stroup-Gardiner *et al.* 2013).

Παράλληλα η χρήση βουλκανισμένου καουτσούκ εξασφαλίζει καλύτερη απόκριση στις καιρικές συνθήκες και ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία σε σχέση με το μη-βουλκανισμένο. Το καουτσούκ στη φυσική του κατάσταση είναι κολλώδες και παραμορφώνεται εύκολα όταν θερμαίνεται και γίνεται εύθρυπτο όταν ψύχεται (ανελαστική παραμόρφωση). Γι' αυτό και δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή προϊόντων με μεγάλη ελαστικότητα. Για να παραμορφώνεται ελαστικά πρέπει να υποστεί ειδική επεξεργασία για τη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του, η οποία ονομάζεται βουλκανισμός. Με το βουλκανισμό διαμορφώνονται διασταυρούμενοι δεσμοί μεταξύ των πολυμερικών αλυσίδων του πολυμερούς, ώστε αυτές να μη μπορούν να μετακινηθούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός στρώματος ασφάλτου - ελαστικού λόγω της διόγκωσης του ελαστικού μετά την απορρόφηση των αρωματικών ουσιών της ασφάλτου. Αυτό φαίνεται να οδηγεί σε καλύτερη διασπορά και διάλυση του ελαστικού στην ασφαλτο και σε καλύτερες ιδιότητες ασφάλτου (συνάφεια και συνοχή) (*Lo Presti et al. 2012*).

Η μέθοδος που υιοθετείται για την επεξεργασία των ελαστικών επηρεάζει σημαντικά την αφομοίωση των θραυσμάτων και τις ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες της τροποποιημένης ασφάλτου και των παραγόμενων ασφαλτικών μιγμάτων. Η μέθοδος επεξεργασίας καθορίζει το μέγεθος και το σχήμα των τριμμάτων. Κατά συνέπεια επηρεάζει και την επιφάνειά τους, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει το βαθμό αντίδρασης και το ιξώδες του της τροποποιημένης ασφάλτου. Μελέτη του Ινστιτούτου Μεταφορών του Τέξας (2000) έδειξε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια ανά όγκο ή βάρος λεπτού τρίμματος, τόσο ενισχύεται η προσρόφηση ασφάλτου και οι δεσμοί στο συνδετικό υλικό. Συνήθως το τρίμμα που παράγεται με κονιορτοποίηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια σε σύγκριση με το τρίμμα που παράγεται με κρυογενική κονιορτοποίηση. Επομένως ο βαθμός διόγκωσης του ελαστικού είναι μεγαλύτερος στη πρώτη περίπτωση αλλά η αντίδραση εξελίσσεται ταχύτερα στη δεύτερη περίπτωση. Συνεπώς η τροποποιημένη ασφαλτος με τρίμμα που παράγεται με κονιορτοποίηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει μεγαλύτερο ιξώδες. Επιπλέον επειδή το τρίμμα που παράγεται με κρυογενική κονιορτοποίηση είναι πιο μαλακό και με λείες επιφάνειες, ενώ διαλύεται ευκολότερα στην ασφαλτο.

Μελέτη του Shen (2008) έδειξε ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη διόγκωση αυξάνει με το τετράγωνο της ακτίνας των σωματιδίων. Το λεπτοκομμένο ελαστικό διογκώνεται ταχύτερα και αποπολυμερίζεται επίσης ταχύτερα, επηρεάζοντας περισσότερο την υγρή φάση της ασφάλτου παρά τη μήτρα της ασφάλτου (the matrix of the binder). Αντίθετα το χοντροκομμένο ελαστικό τροποποιεί τη δομή του συνδετικού υλικού. Όσο αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων, το σύνθετο μέτρο διάτμησης G^* αυξάνεται και η γωνία φάσης μειώνεται για τις ίδιες συνθήκες αλληλεπίδρασης, με αποτέλεσμα τη καλύτερη συμπεριφορά έναντι τροχοαυλάκωσης για το ασφαλτόμιγμα και βελτιωμένες ελαστικές ιδιότητες ασφάλτου.

Επιπλέον, διάφοροι ερευνητές βρήκαν άμεση σχέση του δείκτη μορφής (μήκος/διάμετρος) των κόκκων ελαστικού με το ιξώδες της τροποποιημένης ασφάλτου, τέτοια ώστε οι υψηλότεροι δείκτες οδηγούν σε υψηλότερο ιξώδες (*Lo Presti et al. 2012, Shen et al. 2008*).

Όσον αφορά στο ποσοστό του χρησιμοποιούμενου τρίμματος, είναι και αυτός ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητες της ασφάλτου. Όσο αυξάνεται το ποσοστό του τρίμματος, αυξάνεται το ιξώδες της ασφάλτου, η θερμοκρασία αστοχίας του υλικού και το μέτρο δυσκαμψίας του (*Mashaan et al. 2011, Glover et al. 2000, Putman et al. 2006*).

5. Παραγωγή τροποποιημένου ασφαλτομίγματος με προσθήκη αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού με την ξηρή μέθοδο

5.1 Δημιουργία

Για περίπου 50 χρόνια η βιομηχανία σχεδιασμού οδοστρωμάτων προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τις ιδιότητες των ελαστομερών υλικών, της αιθάλης και του πυριτίου τα οποία συνυπάρχουν σε ανακυκλωμένα ελαστικά αυτοκινήτων. Ως γνωστόν αυτά τα ελαστομερή υλικά βελτιώνουν σε μεγάλο βαθμό την ελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου, ενώ η αιθάλη και το πυρίτιο βοηθούν στην συνολική αλληλοσύνδεση των αδρανών.

Τα τελευταία χρόνια, παρά τα τόσα αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα των θερμών ασφαλτομιγμάτων με τροποποιημένη άσφαλτο με ελαστικό (Asphalt Rubber, AR) χρησιμοποιώντας την υγρή μέθοδο, δεν έχει επέλθει κάποια σημαντική ανακάλυψη ή εξέλιξη στην συγκεκριμένη τεχνολογία (*Sousa et al. 2000-2009*).

Κάποιοι από τους λόγους αυτής της στασιμότητας παρουσιάζονται πιο κάτω :

- ❖ Κατά την υγρή μέθοδο, η ανάμιξη του ελαστικού με το ασφαλτικό συνδετικό υλικό πραγματοποιείται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, διαρκεί πολύ και έχει μεγάλο χρόνο αντίδρασης (45 λεπτά μέχρι μία ώρα).
- ❖ Το κόστος και η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης της μονάδας ανάμιξης του μίγματος είναι τεράστιο.
- ❖ Η αναγκαιότητα επαναθέρμανσης του ελαστικού ασφαλτικού συνδετικού υλικού.
- ❖ Το υψηλό κόστος κατασκευής μιγμάτων τροποποιημένης ασφάλτου σε σύγκριση με τα συμβατικά θερμά ασφαλτομίγματα (20-100% μεγαλύτερο κόστος) (*Sousa et al.2010*).

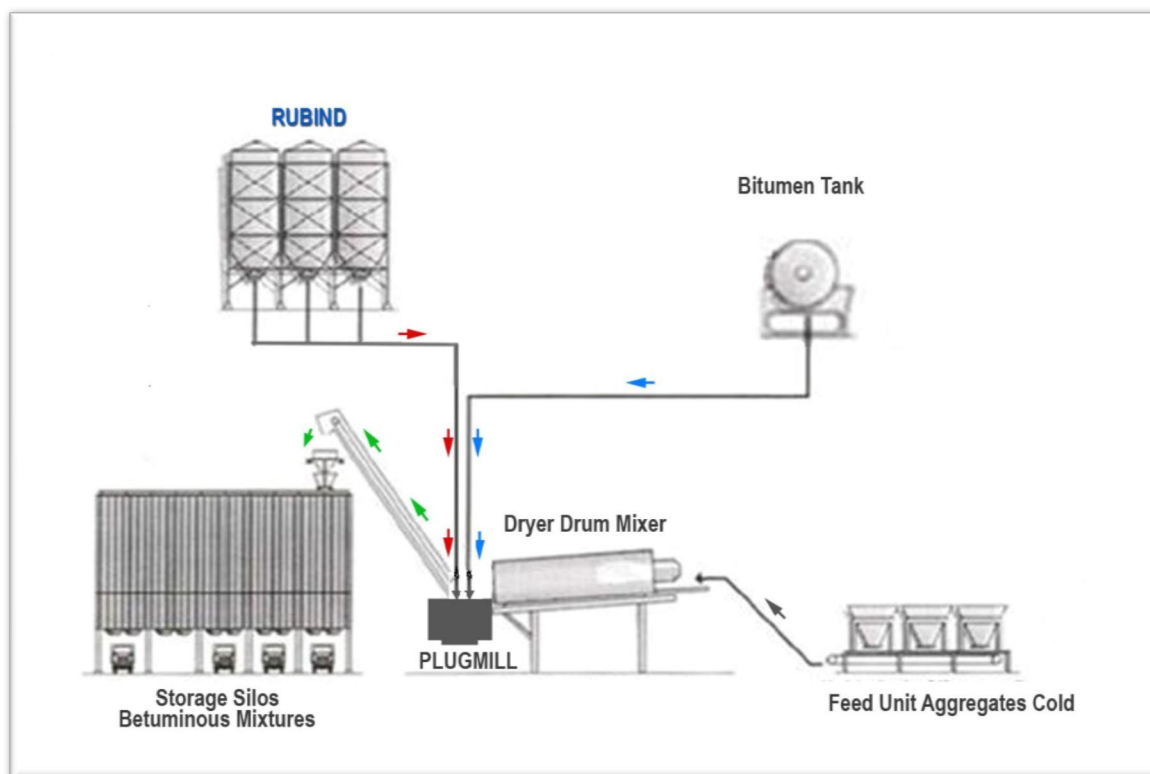
Έτσι, μη παραγνωρίζοντας τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της τροποποιημένης ασφάλτου, έγινε προσπάθεια να αντιμετωπισθούν τα ανωτέρω προβλήματα και να βρεθεί μια πιο καινοτόμα και βελτιωμένη λύση. Η λύση δόθηκε με την δημιουργία του

αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού (Reacted and Activated Rubber, RAR) (Εικ. 5.1).



Εικόνα 5.1 Κόκκοι του RAR

Το συγκεκριμένο υλικό, ως ένα συνδετικό ασφάλτου από ελαστικό (Asphalt Rubber Binder), αποτελείται από απλή μαλακή άσφαλτο, μικρά κομμάτια (τρίμματα) χρησιμοποιημένου ελαστικού και από ένα ενεργοποιημένο ορυκτό σταθεροποιητή συνδετικών υλικών (Activated Mineral Binder Stabilizer, AMBS) σε βέλτιστες αναλογίες. Παράγεται από την σύντομη ανάμιξη και ενεργοποίηση των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες, σε μια ειδικά σχεδιασμένη διαδικασία παραγωγής του ξηρού κοκκοποιημένου ελαστικού και μπορεί να προστεθεί σε κάθε τύπο θερμού ασφαλτομίγματος (πυκνής, ανοικτής και μέσης κοκκομετρικής διαβάθμισης), ασφαλτικής σκυρομαστίχης κτλ. αντικαθιστώντας μέρος της ασφάλτου σε διάφορα ποσοστά. Η προσθήκη του γίνεται κατευθείαν στον κάδο ανάμιξης, όπως φαίνεται και στην Εικ. 5.2, ακριβώς μετά τον ψεκασμό της ασφάλτου.



Εικόνα 5.2 Διαδικασία προσθήκης του RAR στον μύλο ανάδευσης

Εκτεταμένες έρευνες απέδειξαν ότι το θερμό ασφαλτόμιγμα που παράγεται με την προσθήκη του RAR, είναι ανώτερο από τα συμβατικά θερμά ασφαλτομίγματα ή ακόμα και από αυτά της κοινής τροποποιημένης ασφάλτου. Σε γενικές γραμμές το RAR είναι ένα υλικό που τροποποιεί την απλή άσφαλτο αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσής της (PG grading), την ανθεκτικότητά της και τις ιδιότητες ανάκτησης. Άλλωστε πολλά διαφορετικού τύπου θερμά ασφαλτομίγματα, που έγιναν με την χρήση του συγκεκριμένου υλικού, είχαν μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση και στην τροχοαυλάκωση (Ishai *et al.*, 2012).

5.2 Σύσταση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το RAR αποτελείται από απλή μαλακή άσφαλτο, τρίμματα ελαστικού και φίλλερς (AMBS) σε βέλτιστες αναλογίες (Εικ. 5.3).



Εικόνα 5.3 Συστατικά του RAR: (α) Άσφαλτος, (β) Κομμάτια ανακυκλωμένου ελαστικού, (γ) Fillers (AMBS)

Άσφαλτος: Μπορεί να είναι απλή μαλακή άσφαλτος. Ως προς την διεισδυτικότητα μπορεί να είναι διάφορων τύπων όπως Pen 100-200 μέχρι και Pen 35/50, AC 20 ή με βαθμό απόδοσης PG 52 μέχρι PG 70 (Performance Grade). Η χρησιμοποίηση μαλακής ασφάλτου δίνει την δυνατότητα να παραχθούν θερμά ασφαλτομίγματα με απλή ανάμιξη και θερμοκρασίες επίστρωσης χωρίς να επηρεάζεται η εργασιμότητά της από την προσθήκη των τριμμάτων του ελαστικού.

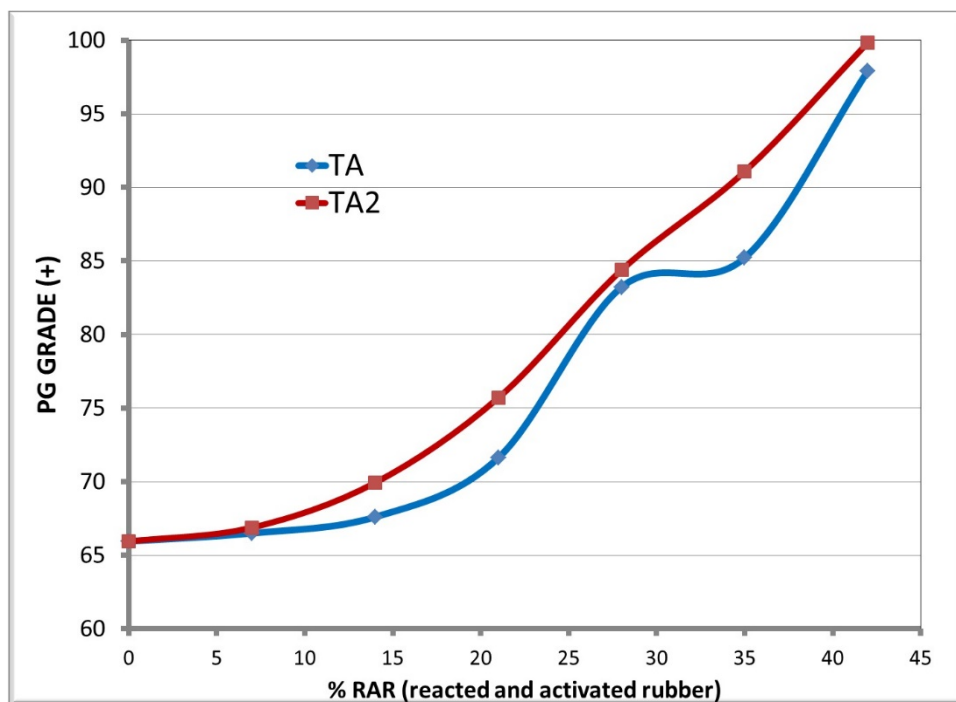
Τρίμματα ελαστικού: Συνήθως προέρχονται από χρησιμοποιημένα ελαστικά οχημάτων (απλών αυτοκινήτων ή φορτηγών) τα οποία με κατάλληλες διαδικασίες ανακυκλώνονται. Πριν την άλεση τους θα πρέπει να ελέγχεται η ύπαρξη μετάλλων, υφασμάτων ή άλλων ινών στην σύστασή τους. Για την παραγωγή του ελαστικού, τα τρίμματα θα πρέπει να είναι λεπτότερα από 1.0mm. Ως προς το μέγεθος προτιμάται να διέρχεται το 100% των κόκκων από κόσκινο No. 30.

AMBS (Activated Mineral Binder Stabilizer): Είναι ένα νέο σταθεροποιητικό συνδετικών υλικών που αναπτύχθηκε για να αποτρέψει την εκτεταμένη απορροή της ασφάλτου στα μίγματα ασφατικής σκυρομαστίχης κατά την μεταφορά τους, την αποθήκευσή τους και την επίστρωσή τους. Αυτός ο σταθεροποιητής (βιομηχανικά γνωστός σαν “iBind”) είναι στην ουσία ένα καθαρό ορυκτό πυριτίου (40μm ή και λεπτότερο), το οποίο το βρίσκουμε ως απόβλητο στις βιομηχανίες εξόρυξης φωσφορικών αλάτων (Ishai et al., 2012).

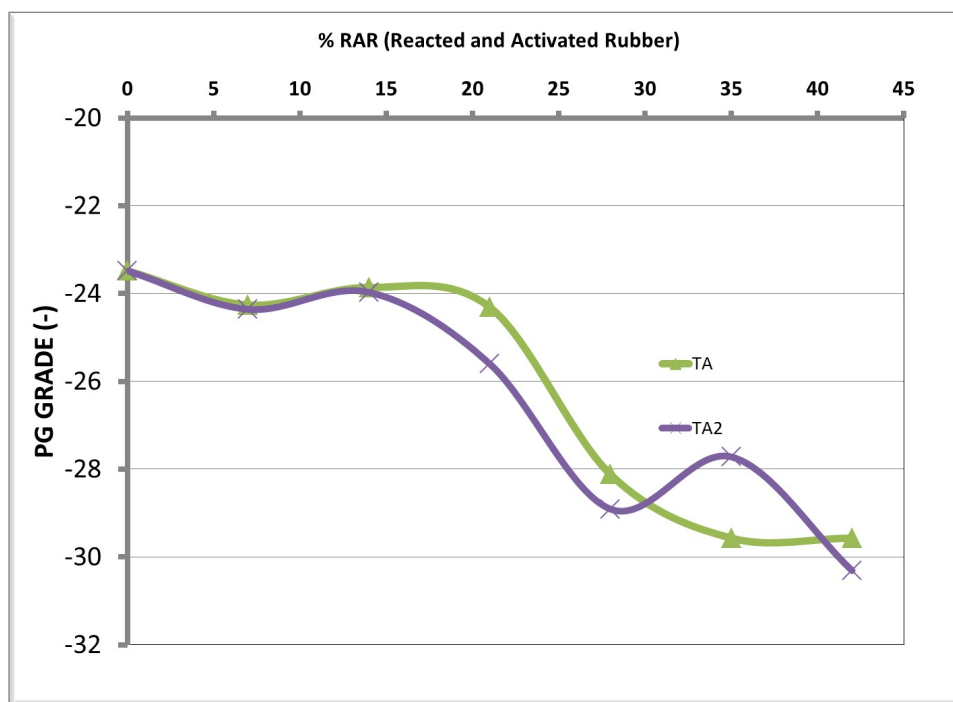
Η παρουσία του AMBS στο ελαστικό εξασφαλίζει και ενισχύει με μοναδικό τρόπο τον μηχανισμό της ένωσης της ασφάλτου με τα τρίμματα ελαστικού, δημιουργώντας ένα ελαστομερές συνδετικό υλικό το οποίο είναι πιο σταθερό και εύκαμπτο καθιστώντας τα ασφατικά μίγματα πιο ανθεκτικά. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερη σταθερότητα,

μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση αλλά και στην δημιουργία τροχοαυλακώσεων στο οδόστρωμα (Sousa et al. 2012,2013).

Ένα τυπικό παράδειγμα (Sousa et al., 2012) του τι γίνεται με την προσθήκη του RAR σε απλή μαλακή ασφαλτο δημιουργώντας ένα τροποποιημένο συνδετικό υλικό φαίνεται στις Εικόνες 5.4 και 5.5 για δύο δείγματα TA & TA2. Όπως φαίνεται, η προσθήκη του RAR σε μη τροποποιημένη ασφαλτο αναβαθμίζει σημαντικά την ρεολογική της συμπεριφορά. Αυτό αντικατοπτρίζεται από την αύξηση του θετικού δείκτη PG Grading καθώς αυξάνεται η ποσότητα του ελαστικού στο υλικό. Το αποτέλεσμα αυτό είναι παρόμοιο με αυτό που προκύπτει από την προσθήκη πολυμερών τροποποιητών σε απλή ασφαλτο με σκοπό να προκύψει τροποποιημένη. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι με την προσθήκη του ελαστικού στην απλή ασφαλτο, η παρουσία των τριμμάτων από λάστιχο και το όλο δίκτυο που ενισχύεται από την παρουσία του AMBS, δημιουργεί ένα ασφαλικό μίγμα με πολύ καλύτερες ελαστικές ιδιότητες σε σχέση με υπόλοιπα.



Εικόνα 5.4 Η επίδραση της παρουσίας (%) του RAR στο συνδετικό υλικό στον βαθμό απόδοσης της ασφάλτου (PG Grading / positive indicator)



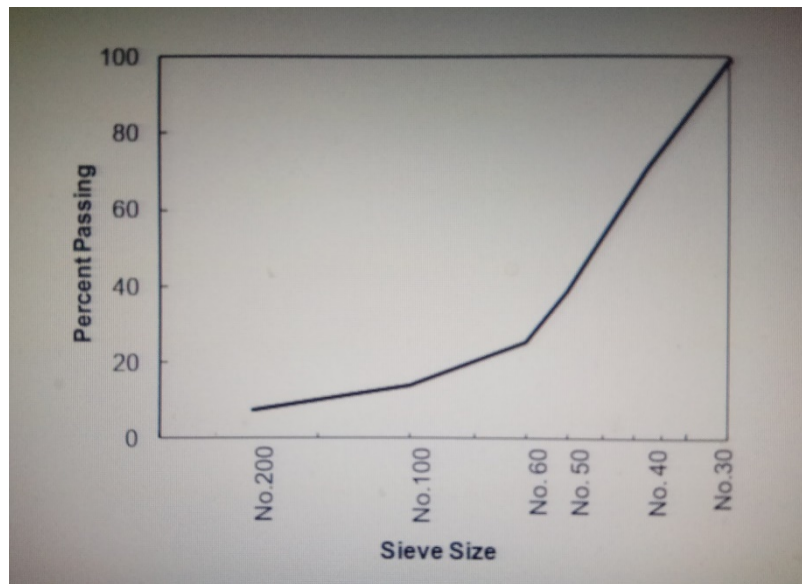
Εικόνα 5.5 Η επίδραση της παρουσίας (%) του RAR στο συνδετικό υλικό στον βαθμό απόδοσης της ασφάλτου (PG Grading / negative indicator)

Το RAR στην φυσική του κατάσταση είναι χρώματος μαύρο/γκρι, ειδικού βάρους 0.6 gr/cm^3 και με σημείο ανάφλεξης μεγαλύτερο από 300°C . Το μέγεθος του στην τελική του μορφή είναι μικρότερο από 600 microns, με την πλειονότητα των κόκκων να είναι μεταξύ 250-600 microns (Εικ. 5.6).



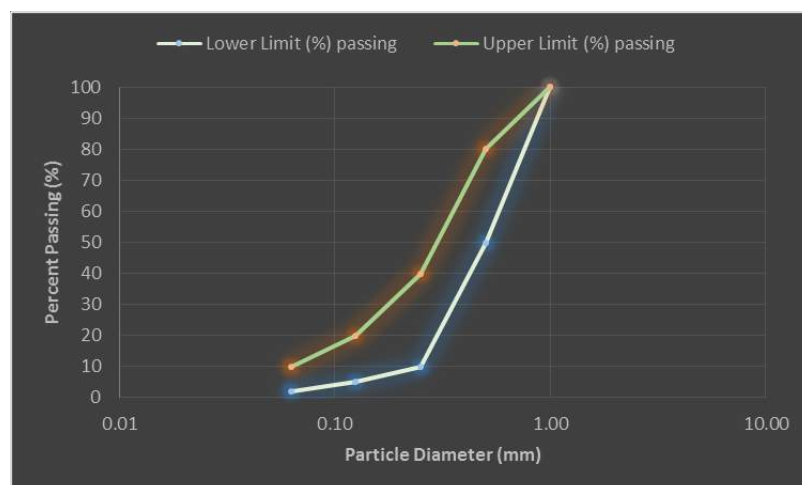
Εικόνα 5.6 Μέγεθος κόκκων του αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού

Στην Εικόνα 5.7 δίνεται το διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης ενός δείγματος RAR.



Εικόνα 5.7 Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης RAR

Ενώ στην Εικόνα 5.8 και στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα όρια των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του.



Εικόνα 5.8 Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του RAR

Πίνακας 5.1 Κατώτερα και ανώτερα όρια (%) διερχομένων κόκκων

Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου (mm)	Κατώτερο όριο (%) διερχομένων	Ανώτερο όριο (%) διερχομένων
1.000	100	100
0.500	50	80
0.250	10	40
0.125	5	20
0.063	2	10

5.3 Παραγωγή

Το RAR δημιουργήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις μιας τροποποιημένης ασφάλτου με ελαστικό σύμφωνα με το διεθνές στάνταρντ “ASTM D 6114 – Standard Specification for Asphalt – Rubber Binder” όσον αφορά το ιξώδες της, την ελαστικότητά της, το σημείο μάλθωσης κτλ., όταν αυτό προστεθεί σε μια μη τροποποιημένη ασφαλτο στις κατάλληλες ποσότητες.

Παράγεται σε ειδικά σχεδιασμένα εργοστάσια (Εικ. 5.9) σύμφωνα με μια μοναδική και πρωτοποριακή βιομηχανική διαδικασία. Μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα σε πιλοτικό στάδιο, πλέον μια μεγάλη βιομηχανική μονάδα έχει δημιουργηθεί και στις Ηνωμένες Πολιτείες.

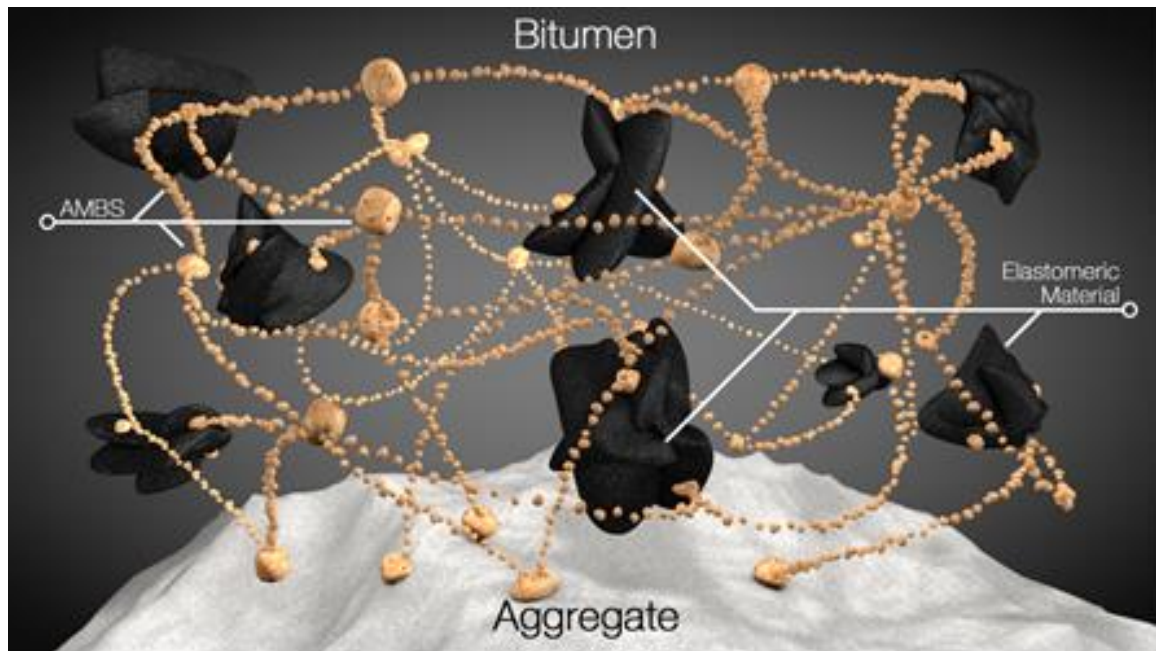


Εικόνα 5.9 Μονάδα παραγωγής στην πόλη Dimona του Ισραήλ

Όσον αφορά την σύνθεσή του, έχει παραχθεί και δοκιμαστεί κατά καιρούς σε διάφορα μίγματα. Το πιο συνηθισμένο μίγμα εμπεριέχει 62% τρίμματα ελαστικού, 22% μαλακή ασφάλτο και 16% AMBS. Για την τελική επικάλυψη του μίγματος μετά την ψύξη προστίθεται επιπλέον 10% AMBS στον αναδευτήρα (Ishai *et al.*, 2012).

5.4 Δομικό μοντέλο

Όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω το συγκεκριμένο ελαστικό είναι ένα πρωτοποριακό και βελτιωμένο ελαστομερές συνδετικό υλικό το οποίο αναπτύχθηκε για να βελτιώσει τις ιδιότητες της απλής ασφάλτου σε επίπεδα ανώτερα της τροποποιημένης με πολυμερές ασφάλτου, όπως επίσης και της κοινής τροποποιημένης με ελαστικό ασφάλτου. Μια ιδέα για το πως είναι το μοντέλο μηχανισμού του δίδεται στην Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 Μοντέλο μηχανισμού

Τα τρίμματα ελαστικού περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανόργανων υλικών τα οποία είναι στην επιφάνειά τους ηλεκτροστατικά φορτισμένα. Η ενεργοποιός ουσία (activator) του ορυκτού του πυριτίου από τα σωματίδια του AMBS αποτελείται από οργανικά μόρια τα οποία είναι μερικώς ηλεκτροστατικά φορτισμένα στην επιφάνειά τους και περιέχουν οργανικές υδροφοβικές αλυσίδες. Έτσι όταν τα σωματίδια της ενεργοποιούς ουσίας υπάρχουν σε μια υγρή ασφαλτο, αυτά έλκονται και συνδέονται με τα άλλα σωματίδια αντίθετου φορτίου.

Οι φορτισμένες οργανικές αλυσίδες της ενεργοποιούς ουσίας του AMBS μπορούν να δημιουργήσουν ένα συνδεδεμένο δίκτυο σωματιδίων. Έτσι όταν τα λεπτόκοκκα σωματίδια του ελαστικού (ελαστομερή υλικά) ανακατεύονται στην απλή υγρή ασφαλτο με τα ενεργοποιημένα σωματίδια πυριτίου, τότε φορτισμένα μόρια των σωματιδίων του AMBS συνδέονται με τα σωματίδια ελαστικού. Με αυτό τον τρόπο, όταν όλα τα πιο πάνω υλικά αναμιγνύονται μαζί με καυτή υγρή ασφαλτο, δημιουργείται ένα εσωτερικό δίκτυο μέσα στην ασφαλτο αποτελούμενο από τα σωματίδια του ελαστομερούς υλικού και του AMBS. Αυτό το δίκτυο, μαζί με τις εξαιρετικές ιδιότητες που προσφέρει το ελαστομερές υλικό εξαιτίας της αντίδρασής του και της ενεργοποίησής του σε υψηλές θερμοκρασίες, βελτιώνει όλες τις μηχανικές ιδιότητες της ασφάλτου, προσδίδει καλύτερη ελαστική συμπεριφορά και καλύτερη απόδοση σε βάθος χρόνου (Sousa et al., 2012). Το RAR επικαλύπτεται επίσης από μία

ειδική σύνθεση του AMBS, όπου όταν διασκορπιστεί στην ασφαλτο προσκολλάται πάνω στα αδρανή, βελτιώνοντας την αντίδραση του μίγματος στην υγρασία. Τέτοιου είδους μηχανισμός δεν μπορεί να σχηματιστεί όταν αναμιγνύουμε απλά ελαστικό και ασφαλτο (χωρίς την παρουσία AMBS), όπως σε κάθε συμβατικό μίγμα τροποποιημένης ασφάλτου.

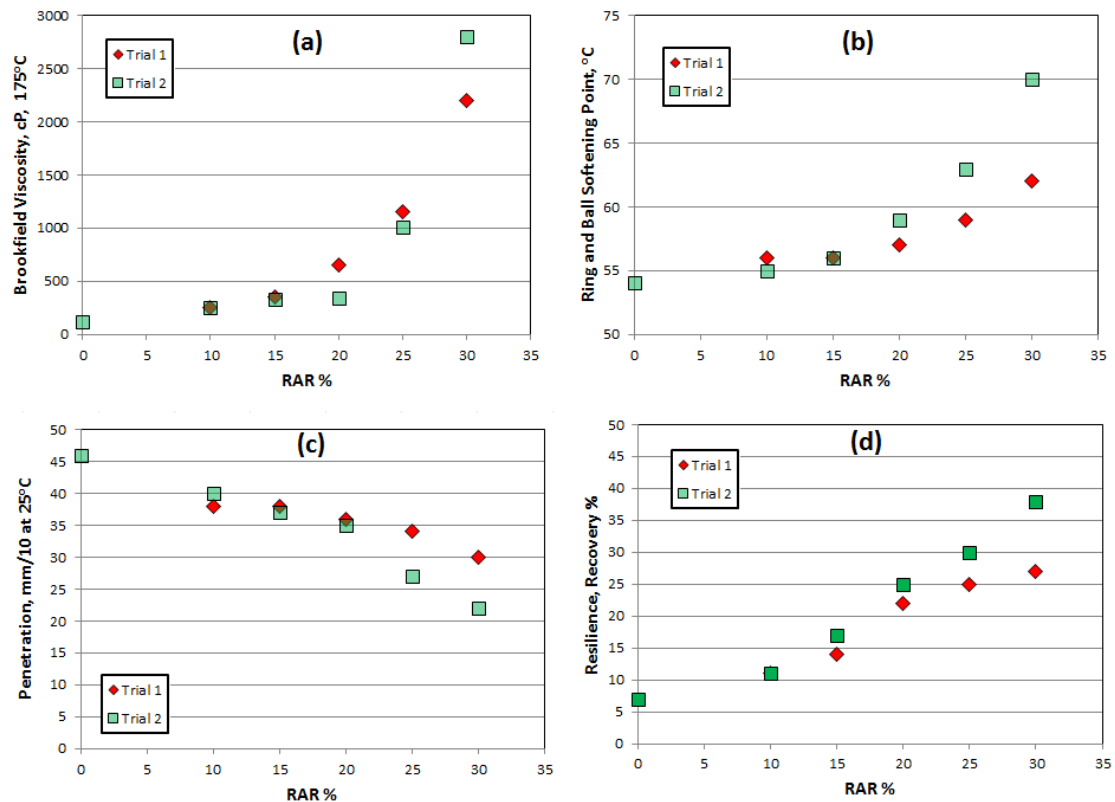
5.5 Μηχανικές ιδιότητες

Οι Sousa & Silva (2012) διερεύνησαν τις ιδιότητες και την συμπεριφορά που προσδίδει το νέο ελαστικό συνδετικό υλικό. Από την στιγμή που το συγκεκριμένο ελαστικό δημιουργήθηκε με σκοπό να αντικαθιστά μέρος της μη-τροποποιημένης ασφάλτου στα θερμά ασφαλτομίγματα, οι φυσικές και οι ρεολογικές ιδιότητες του τελικού μίγματος (RAR + ασφαλτος) μελετήθηκαν σε βάθος για διαφορετικές ποσότητες του ελαστικού σε σχέση με την αρχική ποσότητα της ασφάλτου, με βάση τον τύπο του θερμού ασφαλτομίγματος όπως: πυκνής, ανοικτής, μέσης κοκκομετρικής διαβάθμισης κλπ.

Ο Πίνακας 5.2 και η Εικόνα 5.11 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των βασικών δοκιμών των ασφαλικών συνδετικών υλικών που έγιναν σε δύο διαφορετικά δείγματα, το TA και το TA2.

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες τελικού μίγματος με διαφορετικές ποσότητες ελαστικού

	% RAR	Ιξώδες	Σημείο μάλθωσης	Διεισδυτικότητα	Ελαστική συμπεριφορά
TA	10	250	56	38	11
	15	350	56	38	14
	20	650	57	36	22
	25	1150	59	34	25
	30	2200	62	30	27
TA2	0	115	54	46	7
	10	250	55	40	11
	15	325	56	37	17
	20	450	59	35	25
	25	1012	63	27	30
	30	2800	70	22	38



Εικόνα 5.11 Ιδιότητες ασφαλτομίγματος που περιέχει ποσότητα RAR α) Ιξώδες (Viscosity) β) Σημείο μάλθωσης (Ring and Ball Softening Point) γ) Δοκιμή διείσδυσης (Penetration) δ) Ελαστική συμπεριφορά (Resilience)

Όπως είναι εμφανές, η παρουσία του RAR σε αυτά τα μίγματα έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητές τους προσδίδοντας αυξημένο ιξώδες, σημείο μάλθωσης, ελαστικότητα αλλά και μειωμένη διεισδυτικότητα.

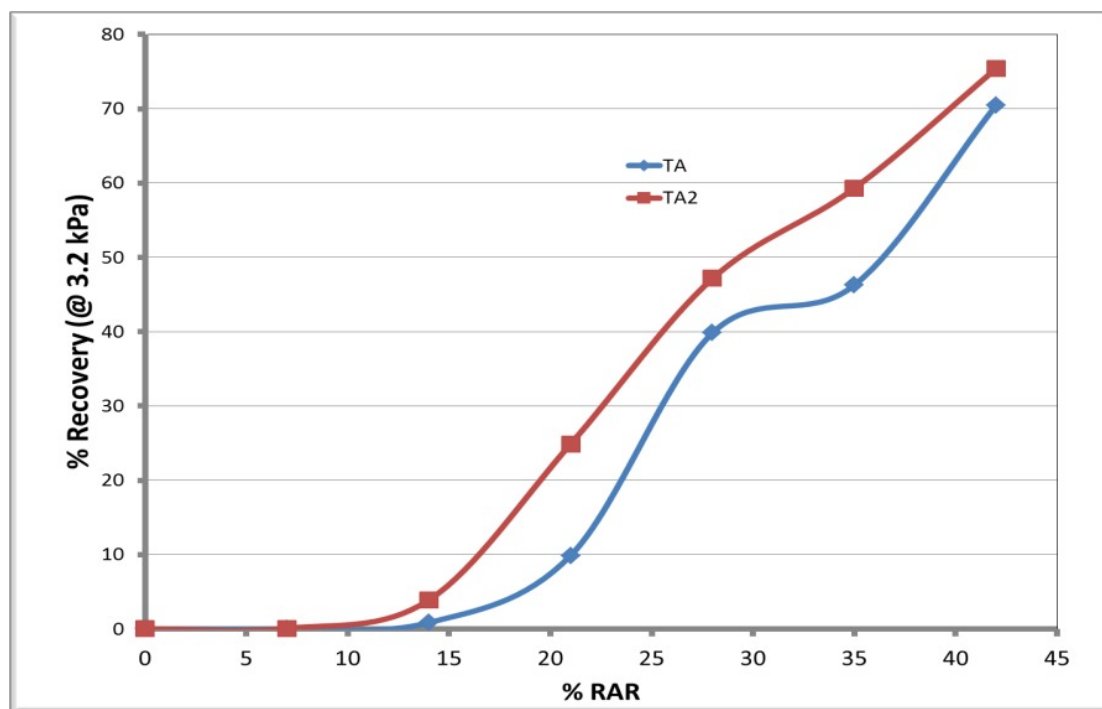
Η αντικατάσταση μέρους της ασφάλτου στα θερμά ασφαλτομίγματα με το RAR έχει μεγάλη επίδραση και στην ελαστική επαναφορά του οδοστρώματος. Η επίδραση αυτή μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με την δοκιμή ερπυσμού “Multi Stress Creep Recovery (MSCR) AASHTO TP 70”. Κατά την διάρκεια αυτής της δοκιμής μπορούν να προσδιοριστούν δύο παράμετροι :

- ο δείκτης JNR, ο οποίος δίνει ενδείξεις όσον αφορά την ποιότητα του συνδετικού υλικού ως προς την αντίστασή του στη μόνιμη παραμόρφωση και στο κατά πόσο μπορεί να αποκατασταθεί μετά από αυτή και
- το ποσοστό % της ελαστικής επαναφοράς (% Recovery)

κατά την διάρκεια κάθε κύκλου φόρτισης.

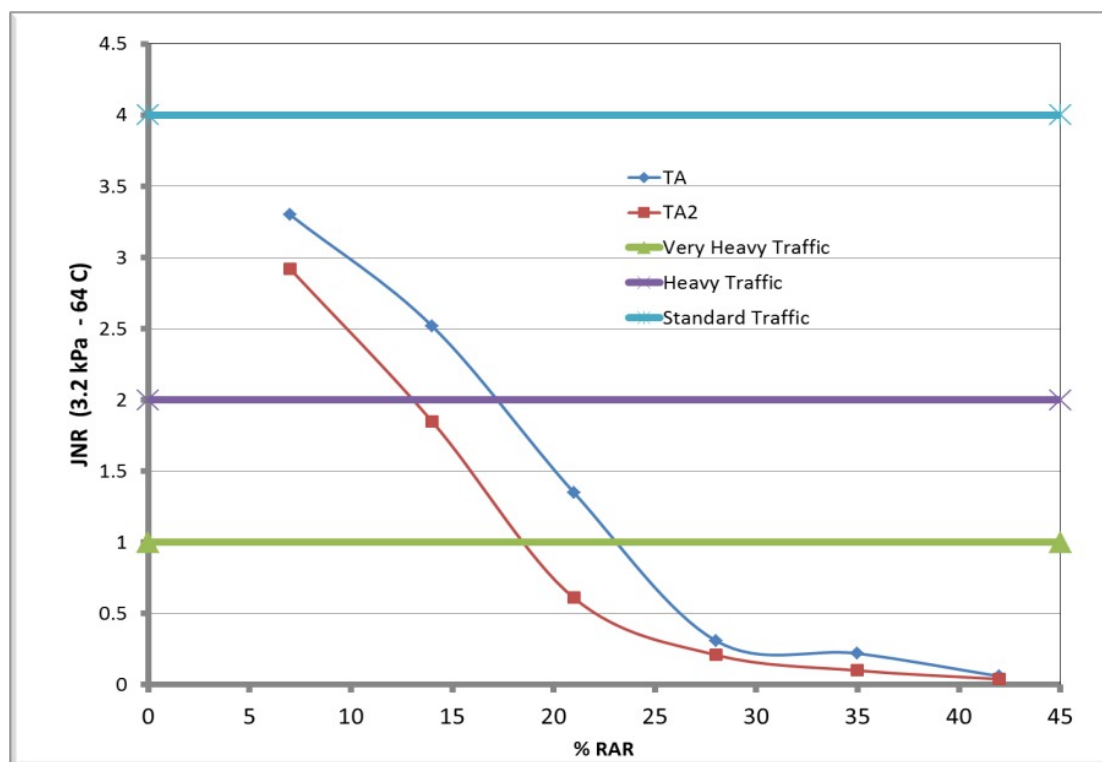
Η παράμετρος JNR πλέον, ύστερα από πολλές μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να συσχετισθεί καλύτερα με την τροχαυλάκωση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το συνδετικό υλικό. Έτσι η παραμένουσα τάση που υπολογίζεται συσχετίζεται κατευθείαν με την τροχαυλάκωση, δηλαδή η τιμή του JNR είναι η μη ανακτήσιμη τάση ή αλλιώς η εφαρμοζόμενη τάση.

Στις Εικόνες 5.12 και 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Sousa and Silva, 2012).



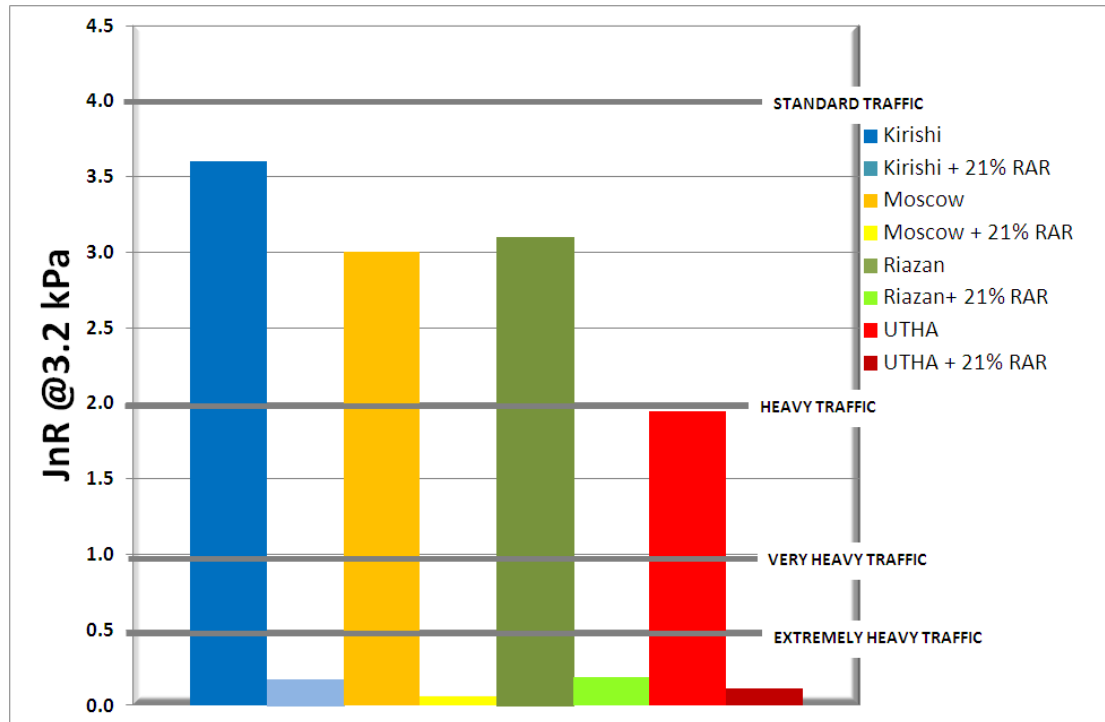
Εικόνα 5.12 Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος με την συμβατική δοκιμή ελέγχου (Sousa and Silva, 2012)

Όπως φαίνεται, η προσθήκη του RAR στη μη-τροποποιημένη άσφαλτο βελτιώνει σημαντικά την ελαστική επαναφορά της. Αυτό αντικατοπτρίζεται από την αύξηση του μεγέθους της ελαστικής επαναφοράς (Εικ. 5.12) ή αντίστοιχα από την μείωση των τιμών του δείκτη JNR (Εικ. 5.13), σαν αποτέλεσμα της αυξανόμενης ποσότητας του ελαστικού στο μίγμα.



Εικόνα 5.13 Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος εκφρασμένη από τον δείκτη JNR (Sousa and Silva, 2012)

Αξίζει να αναφερθεί πως παρόμοια αποτελέσματα για την επίδραση του συγκεκριμένου ελαστικού στην βελτίωση της ελαστικής επαναφοράς των ασφαλτομιγμάτων παρατηρήθηκαν σε μια εκτενή μελέτη σε ασφάλτους στην Ρωσία (Sousa, 2012). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.14, η προσθήκη ποσοστού 21% RAR σε καθαρή ασφαλτο βελτιώνει σημαντικά την ελαστική επαναφορά του μίγματος.



Εικόνα 5.14 Επίδραση του RAR (%) στην ελαστική επαναφορά του ασφαλτομίγματος εκφρασμένη από τον δείκτη JNR κατά την μελέτη ασφάλτων στην Ρωσία (Sousa, 2012)

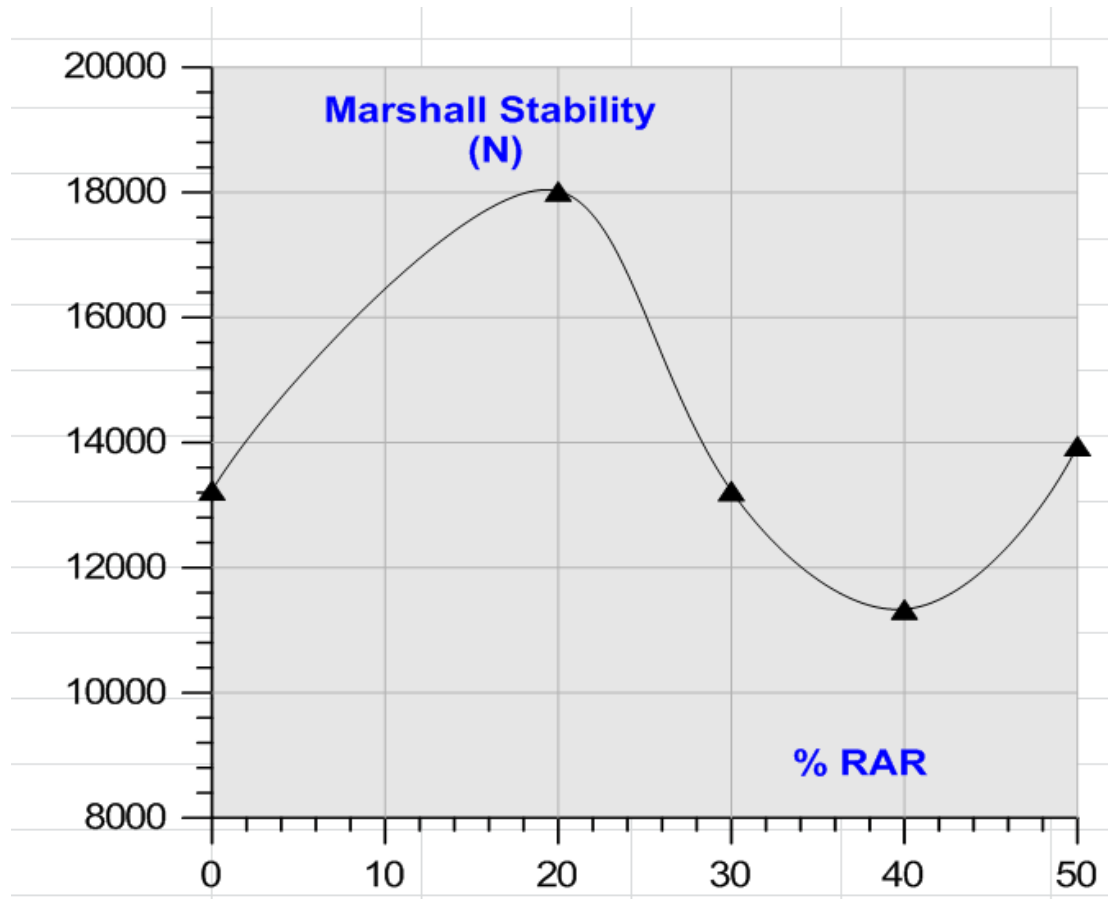
Αυτό εξηγείται από τις πολύ χαμηλές τιμές του δείκτη JNR που προκύπτουν από το μίγμα RAR-ασφάλτου και που στην ουσία επαναπροσδιορίζουν την ασφαλτο ικανή για μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο.

5.6 Ιδιότητες και συμπεριφορά των τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα τρίμματα RAR αντικαθιστούν μέρος της μη-τροποποιημένης ασφάλτου στα θερμά ασφαλτομίγματα. Κατά την διάρκεια των ερευνών για την ανάπτυξη του υλικού, μελετήθηκαν όλες οι φυσικές, μηχανικές και μακροχρόνιες ιδιότητες των θερμών ασφαλτομιγμάτων που δημιουργήθηκαν με προσθήκη ελαστικού. Αυτό φυσικά έγινε για διαφορετικές ποσότητες ελαστικού (επί % κ.β. της ασφάλτου), αναλόγως τον τύπο του ασφαλτομίγματος.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών Marshall παρατηρήθηκε πολύ υψηλότερη ευστάθεια στα τυπικής πυκνότητας θερμά ασφαλτομίγματα με προσθήκη RAR, από ότι στα συμβατικά ασφαλτομίγματα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.15, η βέλτιστη

ευστάθεια παρατηρήθηκε σε ποσοστό 20% του RAR στο μίγμα, όπου καταγράφηκε μια σχετικά πολύ υψηλή τιμή ευστάθειας (18,000 N ή 4,050 lb.) συνδυαζόμενη με κανονική ροή. Κάτι που σημαίνει πως η παρουσία του ελαστικού ενδυνάμωσε ουσιαστικά το μίγμα, χωρίς να το κάνει άκαμπτο.



Εικόνα 5.15 Ευστάθεια πυκνού HMA κατά τις δοκιμές Marshall σε συνάρτηση με το ποσοστό ελαστικού (%) στο μίγμα (Sousa, 2012)

Επίσης πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές τροχοαυλάκωσης σε διαφορετικά μίγματα ασφαλτικής σκυρομαστίχης, όπου έγινε σύγκριση μεταξύ συμβατικών ασφαλτομιγμάτων με ίνες ή/και AMBS (σαν σταθεροποιητής του συνδετικού υλικού) και μιγμάτων διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων που εμπεριείχαν το RAR (Εικ. 5.16).



Εικόνα 5.16 Αποτελέσματα δοκιμής τροχοαυλάκωσης όπου τα μίγματα 1-12 είναι με προσθήκη RAR, τα L5-L6 είναι μίγματα ασφαλτικής σκυρομαστίχης με AMBS και τα L7-L8 είναι μίγματα ασφαλτικής σκυρομαστίχης με ίνες (Sousa, 2012)

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί τα μίγματα με την προσθήκη RAR παρουσιάζουν μικρότερες τιμές τροχοαυλάκωσης από τα υπόλοιπα. Μία μέση τιμή μεγέθους της τροχοαυλάκωσης για τα πρώτα είναι 1.58mm έναντι 2.58mm. Ακόμα, εξαιρώντας την τιμή του μίγματος Νο3, οι τιμές είναι 1.38mm έναντι 2.58mm αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει πως τα συμβατικά μίγματα ασφαλτικής σκυρομαστίχης “υποφέρουν” κατά 87% περισσότερο (από το πρόβλημα της τροχοαυλάκωσης) από τα ασφαλτομίγματα με τρίμμα ελαστικού.

5.7 Πλεονεκτήματα

Οι Sousa & Silva (2012) έδειξαν πως τα θερμά ασφαλτομίγματα, τα οποία εμπεριέχουν τρίμματα του RAR, είναι ανώτερα από τα έως τώρα συμβατικά ασφαλτομίγματα. Σε γενικές γραμμές η παρουσία του ελαστικού αυξάνει τον βαθμό απόδοσης της ασφάλτου, την ελαστικότητα της και την ελαστική επαναφορά της. Επίσης, όπως φάνηκε, διαφορετικού τύπου θερμά ασφαλτομίγματα παραγόμενα με προσθήκη RAR παρουσιάζουν πολύ καλύτερη ευστάθεια αλλά και αντίσταση στην τροχοαυλάκωση και στην κόπωση με πολλά οικονομικά οφέλη.

Συνοπτικά τα κύρια πλεονεκτήματα είναι :

- ✓ Εύκολη και γρήγορη παραγωγή.
- ✓ Δεν απαιτούνται κύκλοι αναθέρμανσης του υλικού στο εργοστάσιο παραγωγής ή στο εργοτάξιο.
- ✓ Το RAR είναι ένα ξηρό κοκκοποιημένο υλικό – εύκολο στον χειρισμό, στην αποθήκευση και στην μεταφορά.
- ✓ Η προσθήκη του στον μύλο ανάδευσης οποιουδήποτε εργοστασίου παραγωγής ασφαλτομίγματος είναι άμεση και εύκολη.
- ✓ Όταν αναμιγνύεται με την καθαρή άσφαλτο δημιουργείται ένα μοναδικό ασφατικό συνδετικό υλικό από ελαστικό, το οποίο προσφέρει μεγαλύτερη ελαστικότητα και ελαστική επαναφορά, όπως και μεγαλύτερο ιξώδες και σημείο μάλθωσης.
- ✓ Αυξάνοντας την ποσότητα του στο συνδετικό υλικό (ελαστικό και άσφαλτο) μπορεί να επιτευχθεί ο οποιοσδήποτε βαθμός απόδοσης (PG Grade) για το οδόστρωμα.
- ✓ Με την κατάλληλη ποσότητα RAR μπορεί να επιτευχθεί κάθε τύπος θερμού ασφαλτομίγματος με ελαστικό (πυκνής, ανοικτής και μέσης κοκκομετρικής διαβάθμισης, ασφατικής σκυρομαστίχης κλπ.).
- ✓ Μπορούν να επιτευχθούν βελτιωμένα τροποποιημένα θερμά ασφαλτομίγματα (με ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό ελαστικού), τα οποία είναι περισσότερο ανθεκτικά, παρουσιάζουν καλύτερη ελαστική επαναφορά, αλλά και αντίσταση στη δημιουργία τροχοαυλακώσεων στο οδόστρωμα και στην κόπωση του.
- ✓ Το συγκεκριμένο ελαστικό μπορεί να αντικαταστήσει τις κυτταρικές ίνες στην ασφατική σκυρομαστίχη (Stone Mastix Asphalt, SMA) αποτρέποντας την αποστράγγιση χωρίς περαιτέρω κόστος.
- ✓ Μπορεί να δημιουργήσει θερμά ασφαλτομίγματα (Warm Asphalt Mixes, WAM) με την ενσωμάτωση κατάλληλων πρόσθετων.
- ✓ Από περιβαλλοντική σκοπιά, το RAR αποτελείται κατά 80% από ανακυκλωμένα υλικά, κατά κύριο λόγο από τρίμματα ελαστικού (από ανακυκλωμένα λάστιχα) και φίλλερς (AMBS) που προέρχονται από απόβλητα από τις βιομηχανίες φωσφορικών αλάτων.
- ✓ Μειωμένο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά ασφαλτομίγματα θερμής ανάμιξης αλλά και με τα κοινά τροποποιημένα ασφαλτομίγματα από απλό ελαστικό (Sousa et al., 2012).

6. Πειραματική διαδικασία

6.1 Συνοπτική περιγραφή

Η παρούσα πειραματική διαδικασία αφορά στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων που αποκτά το ασφαλτόμιγμα με προσθήκη αντιδράμενου και ενεργοποιημένου ελαστικού με την ξηρή μέθοδο.

Για το σκοπό αυτό παρήχθησαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ δείγματα ασφαλτομιγμάτων για χρήση στην αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας των οδοστρωμάτων, με προσθήκη τριών διαφορετικών ποσοστών ελαστικού : 10%, 20% και 40%. Επίσης, παράχθηκαν δείγματα συμβατικού ασφαλτομίγματος, το οποίο αποτελεί και το ασφαλτόμιγμα αναφοράς για τις συγκριτικές αναλύσεις. Σε κάθε περίπτωση ελήφθησαν υπόψη οι Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ).

Για τον έλεγχο των μηχανικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε δοκιμή για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε έμμεσο εφελκυσμό (Indirect Tensile Stiffness Modulus, ITSM) χρησιμοποιώντας κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό και συγκεκριμένα την συσκευή Nottingham Asphalt Tester-NAT.

6.2 Ασφαλτόμιγμα αναφοράς

Το ασφαλτόμιγμα αναφοράς είναι τύπου II για αντιολισθηρό τάπητα κυκλοφορίας σύμφωνα με την ΕΤΕΠ 05-03-12-01. Είναι ασφαλτόμιγμα που παράγεται και διαστρώνεται «εν θερμώ», από καθαρή ή τροποποιημένη με βελτιωτικά άσφαλτο και σκληρά αδρανή υλικά. Λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής του ασφαλτικού σκυροδέματος, με αυτή τη μέθοδο εξασφαλίζεται η επίτευξη ικανοποιητικών επιφανειακών χαρακτηριστικών ομαλότητας, ομοιομορφίας και αντίστασης σε ολίσθηση, καθώς και η ενίσχυση υφιστάμενου οδοστρώματος, όταν ανακατασκευάζεται η επιφανειακή στρώση με μεγαλύτερο πάχος. Συγκεκριμένα, το ασφαλτόμιγμα αντιολισθηρής στρώσης τύπου II είναι ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης και εφαρμόζεται για επίτευξη μακροϋφής που υποστηρίζει την αντιολισθηρότητα σε υψηλές ταχύτητες. Επιλέγεται κυρίως για την κατασκευή της

τελικής στρώσης κυκλοφορίας οδών πολλαπλών λωρίδων κυκλοφορίας και ταχύτητας >80 km/h.

Οι ιδιότητες των αδρανών υλικών και των αδρανών πλήρωσης (filler) που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από επεξεργασία φυσικών, τεχνητών ή ανακυκλωμένων υλικών και μιγμάτων αυτών των υλικών και συμμορφώνονται με το ΕΛΟΤ EN 13043.

Η πρότυπη σύνθεση περιείχε άσφαλτο σε ποσοστό 5,4% κ.β. των αδρανών. Το μίγμα των αδρανών είχε αρχικό βάρος 1000gr, με αναλογία αδρανών (Εικ. 6.1) :

- Άμμος (filler) 23%
- Γαρμπίλι (λεπτόκοκκο υλικό) 50%
- Χαλίκι (χονδρόκοκκο υλικό) 27%



Εικόνα 6.1 Τα αδρανή υλικά του ασφαλτομίγματος

Χονδρόκοκκο υλικό

Στις ασφαλικές στρώσεις το χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών είναι εκείνο που προσδίδει κυρίως τις χαρακτηριστικές αντισληθικές ιδιότητες (μικροϋφή και μακροϋφή) της επιφανείας του οδοστρώματος. Αποτελείται 100% από αδρανές υλικό

με εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, μεγάλη καθαρότητα και κατάλληλο σχήμα κόκκων. Οι κόκκοι είναι κατά το δυνατόν κυβοειδούς μορφής. Ο έλεγχος του σχήματός τους γίνεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 1097-8, με προσδιορισμό για το συγκρατούμενο στο κόσκινο 6.3mm υλικό του “δείκτη πλακοειδούς”.

Λεπτόκοκκο υλικό

Το λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο από το κόσκινο ανοίγματος 2mm και συγκρατούμενο στο κόσκινο ανοίγματος 0.063mm), αποτελείται από κόκκους γωνιώδεις, θραυστιγενείς και απαλλαγμένους από άργιλο ή άλλες επιβλαβείς προσμίξεις.

Παιπάλη (filler)

Η παιπάλη προστίθεται (σε περίπτωση έλλειψης), για να συμπληρώσει την κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των αδρανών. Μπορεί να είναι λιθοσύντριμμα ορυκτής ή άλλης προέλευσης (σκόνη από σκωρίες), υδράσβεστος, τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ή άλλη κατάλληλη ορυκτή ύλη, η οποία προστίθεται σε ξηρή κατάσταση, ώστε να ρέει ελεύθερα και να μη δημιουργεί συσσωματώματα. Η παιπάλη δεν επιτρέπεται να περιέχει άργιλο ή οργανικές προσμίξεις, ούτε να έχει πλαστικότητα, εκτός αν πρόκειται για τσιμέντο ή υδράσβεστο.

Όσον αφορά το ασφαλικό συνδετικό, η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε για το ασφαλτόμικτο αναφοράς, όπως και για όλα τα δείγματα ήταν κατηγορίας 55/70. Τα βασικά της χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα (Πίν. 6.1).

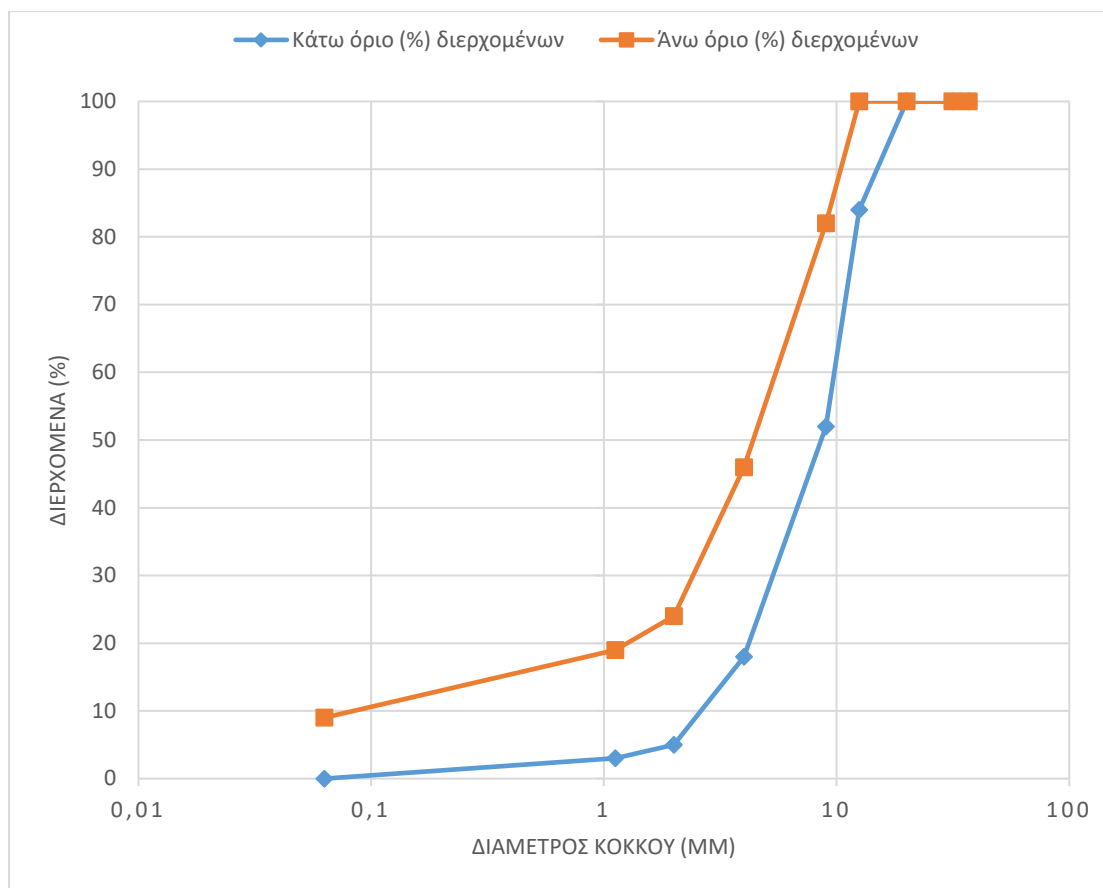
Πίνακας 6.1 Βασικά χαρακτηριστικά ασφάλτου μίγματος

Βασικά χαρακτηριστικά ασφάλτου μίγματος		
Τύπος	55/70	EN 13108
Διεισδυτικότητα (25°C)	44	EN 1426
Σημείο μάλθωσης (C)	75.8	EN 1427
Ελαστική επαναφορά	94.8	EN 13398-10
Πυκνότητα	1.03	EN 15326

Όσον αφορά την κοκκομετρική διαβάθμιση του συνολικού μίγματος των αδρανών υλικών του ασφαλτομίγματος αναφοράς, αυτή προκύπτει από την ΕΤΕΠ 05-03-12-01 και παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2. Αντίστοιχα στην Εικόνα 6.2 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης του ασφαλτομίγματος αναφοράς. Αφορά τύπο ΙΙ ασφαλτικού σκυροδέματος όπου το ονομαστικό μέγεθος του μέγιστου κόκκου δεν ξεπερνά τα 12.5mm.

Πίνακας 6.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση τελικού ασφαλτομίγματος

Οπή κόσκινου (mm)	Διερχόμενα (%)	Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης
37	100	100
31.5	100	100
20	100	100
12.5	92.6	84-100
9	61.9	52-82
4	25.3	18-46
2	19.5	5-24
1.12	13.9	3-19
0.063	1	0-9



Εικόνα 6.2 Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων του ασφαλτομίγματος σχεδιασμού

Τέλος, στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται όλες οι βασικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος αναφοράς (χωρίς προσθήκη RAR), οι οποίες είναι σύμφωνες με τις επιτρεπόμενες τιμές που αναγράφονται στην ΕΤΕΠ 05-03-12-01 και στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα. Η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας του μίγματος ήταν 2520 Kg/m³.

Πίνακας 6.3 Ιδιότητες ασφαλτομίγματος αναφοράς

Ιδιότητες ασφαλτομίγματος αναφοράς (χωρίς προσθήκη RAR)		
Ευστάθεια (KN)	11.3	EN 12697-34
Παραμόρφωση δοκιμίου (mm)	4.4	EN 12697-34
Κενά Αέρος (%)	10.9	EN 12697-8
Πυκνότητα (kg/m ³)	2245	EN 12697-6
Ευαισθησία στο νερό	0.82	EN 12697-12

6.3 Παρασκευή δειγμάτων

6.3.1 Διαδικασία

Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας παρασκευάστηκαν (4) σειρές ασφαλτομιγμάτων (M_0, M_10, M_20, M_40) για 3 συνδυασμούς ποσοστών ασφάλτου – RAR. Κάθε τελικό δοκίμιο ελέγχου είχε βάρος 836gr. Η πρότυπη σύνθεση (κωδικός σύνθεσης M_0), ή αλλιώς ασφαλτόμιγμα αναφοράς, δεν περιείχε πούδρα ανακυκλωμένου ελαστικού. Στις υπόλοιπες συνθέσεις το υλικό αντικατέστησε μέρος της ασφάλτου σε ποσοστά 10% κ.β. (κωδικός σύνθεσης M_10), 20% κ.β. (κωδικός σύνθεσης M_20) και 40% κ.β. (κωδικός σύνθεσης M_40).

Έτσι οι (4) σειρές ασφαλτομιγμάτων που παρασκευάστηκαν είχαν τις αναλογίες ασφάλτου – ελαστικού ως φαίνονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4 Αναλογίες ασφάλτου-RAR στα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα

Ασφαλτομίγματα	Ποσότητα ασφάλτου (gr)	Ποσότητα RAR (gr)
M_0	54	0
M_10	48.6	5.4
M_20	43.2	10.4
M_40	32.4	21.6

Σχηματικά η βασική διαδικασία παραγωγής των ασφαλτομιγμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.3. Το τρίμμα ελαστικού προστίθεται στα ήδη ξηρά θερμασμένα αδρανή, γίνεται η ανάμιξη και στο τέλος προστίθεται η άσφαλτος.



Εικόνα 6.3 Σχηματική παρουσίαση παρασκευής μίγματος

Η διαδικασία παραγωγής που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ακριβώς η ίδια και για τις 4 σειρές των ασφαλτομιγμάτων, όπως και για τα 4 δείγματα από κάθε σειρά που παρασκευάστηκαν (εκτός από την M_40 όπου έγινε μόνο ένα). Δηλαδή συνολικά παρασκευάστηκαν 13 δείγματα ασφαλτομιγμάτων. Για λόγους συντομίας θα παρουσιαστούν οι διαδικασίες παρασκευής του ασφαλτομίγματος αναφοράς χωρίς προσθήκη RAR (M_0) και ενός τροποποιημένου ασφαλτομίγματος με προσθήκη RAR (M_10, M_20, M_40), αφού στην ουσία είναι ακριβώς οι ίδιες με μόνη διαφορά τις διαφορετικές ποσότητες ασφάλτου - RAR που προστέθηκαν.

6.3.2 Παρασκευή ασφαλτομίγματος αναφοράς

Αρχικά δημιουργήθηκε το μίγμα των αδρανών (1000gr) με την ανάμιξη 230gr άμμο, 500gr γαρμπίλι και 270gr χαλίκι (Εικ. 6.4 και 6.5).



Εικόνα 6.4 Μίγμα αδρανών πριν την ανάμιξή τους



Εικόνα 6.5 Μίγμα αδρανών μετά την ανάμιξή τους

Στην συνέχεια το μίγμα των αδρανών προθερμάνθηκε στους 175-185°C για 2 ώρες στον φούρνο του εργαστηρίου (Εικ. 6.6), πριν την προσθήκη της ασφάλτου.



Εικόνα 6.6 Φούρνος εργαστηρίου

Μετά τις 2 ώρες παραμονής στο φούρνο, το μίγμα των αδρανών τοποθετήθηκε σε μίξερ υψηλών στροφών όπου εκεί έγινε η προσθήκη της, επίσης προθερμασμένης στους 180°C, ασφάλτου (54gr) τύπου 55/70 (Εικ. 6.7). Η ανάμιξη του μίγματος των αδρανών με την ασφαλτο είχε διάρκεια 30-45 δευτερόλεπτα ώστε να εξασφαλιστεί η ομογενοποίηση του.



Εικόνα 6.7 Ανάδευση ασφάλτου στο μίγμα αδρανών

Το μίγμα στην συνέχεια μεταφέρθηκε κατευθείαν πίσω στον φούρνο του εργαστηρίου όπου έμεινε εκεί για 1 ώρα σε θερμοκρασία 170-180°C (Εικόνες 6.8 και 6.9).



Εικόνα 6.8 Το μίγμα πριν την εισαγωγή του στον φούρνο



Εικόνα 6.9 Μίγματα στον φούρνο του εργαστηρίου για θέρμανση 1 ώρας στους 170-180°C

Στην συνέχεια, για όσο διάστημα τα μίγματα θερμαίνονταν στον φούρνο, ακολουθούσε η προετοιμασία των μητρών όπου θα έμπαινε ύστερα το κάθε μίγμα, ώστε μετά να ακολουθήσει η συμπύκνωσή τους (Εικ. 6.10).



Εικόνα 6.10 Μήτρες εισαγωγής ασφαλτομιγμάτων

Αφού τα μίγματα έβγαιναν από τον φούρνο ακολουθούσε η εισαγωγή τους στις μήτρες, έτσι ώστε στην συνέχεια να πάνε για την διαδικασία της συμύκνωσης (Εικ. 6.11 και 6.12). Το μίγμα που τοποθετείτο σε κάθε μήτρα ήταν βάρους 836gr.



Εικόνα 6.11 Εισαγωγή ασφαλτομίγματος στην μήτρα



Εικόνα 6.12 Η μηχανή συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων

Μετά την συμπίκνωση, το κάθε μίγμα αφαιρείτο από την μήτρα και παρέμενε για 2 εβδομάδες στο εργαστήριο (Εικ.6.13), πριν κοπεί από το καθένα ένα κυλινδρικό δοκίμιο για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας μέσω της δοκιμής του έμμεσου εφελκυσμού με την συσκευή NAT.



Εικόνα 6.13 Δείγματα ασφαλτομιγμάτων

6.3.3 Παρασκευή τροποποιημένου ασφαλτομίγματος

Κατά την παρασκευή τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων ακολουθήθηκε σχεδόν η ίδια διαδικασία όπως και πριν. Αρχικά έγινε ανάμιξη των αδρανών (1000gr) ανακατεύοντας 230gr άμμο, 500gr γαρμπίλι και 270gr χαλίκι. Στην συνέχεια το μίγμα των αδρανών προθερμάνθηκε στους 175-185°C για 2 ώρες στον φούρνο του εργαστηρίου, πριν την

προσθήκη της ασφάλτου και του ελαστικού τροποποιητή, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ότι η προσθήκη έγινε σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά την θέρμανση των αδρανών, έγινε η προσθήκη του RAR στο μίγμα και η ανάμιξή τους για 10 με 20 sec έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η διανομή του σε όλο το μίγμα (Εικ. 6.14 και 6.15).



Εικόνα 6.14 Εισαγωγή τρίμματος ελαστικού στο μίγμα



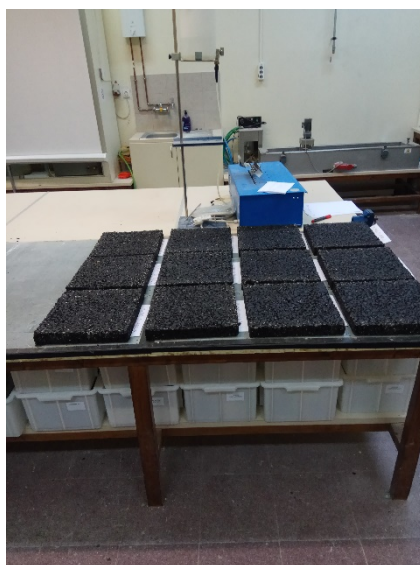
Εικόνα 6.15 Ανάδευση για 10-20sec του ελαστικού στα ξηρά αδρανή

Ύστερα ακολούθησε η προσθήκη της επίσης προθερμασμένης στους 180°C ασφάλτου τύπου 55/70. Η ανάμιξη του μίγματος των ξηρών αδρανών με την άσφαλτο είχε μία επιπλέον διάρκεια 30-45 δευτερολέπτων ώστε να εξασφαλιστεί η ομογενοποίηση του μίγματος (Εικ. 6.16).



Εικόνα 6.16 Εισαγωγή θερμής ασφάλτου στο μίγμα, αμέσως μετά την ανάδευση του ελαστικού σε αυτό

Το μίγμα στην συνέχεια μεταφέρθηκε κατευθείαν πίσω στον φούρνο του εργαστηρίου, όπου έμεινε εκεί για 1 ώρα σε θερμοκρασία 170-180°C. Κατά την διάρκεια της θέρμανσης του, το μίγμα ανακατεύτηκε αρκετές φορές ώστε να εξασφαλιστεί ότι το υλικό διασκορπίστηκε και ομογενοποιήθηκε πλήρως στο ασφαλτόμιγμα.



Εικόνα 6.17 Έτοιμα ασφαλτομίγματα μετά από συμπίκνωση

Με το πέρας της μιας ώρας τα μίγματα μπήκαν σε μήτρες για την συμπίκνωσή τους και στη συνέχεια παρέμειναν 2 εβδομάδες στο Εργαστήριο πριν την διαδικασία για την εύρεση του μέτρου δυσκαμψίας μέσω της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού (Εικ. 6.17).

6.4 Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού

Ορισμός

Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus – ITSM) συνδέεται με τη δοκιμή που περιγράφεται στα ευρωπαϊκά πρότυπα EN (EN 12697-26: Bituminous Mixtures – Test methods for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness – Annex C). Πρόκειται για μια έκφραση του μέτρου δυσκαμψίας ενός δοκιμίου ασφαλτομίγματος που προκύπτει από τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Το ITSM είναι πολύ διαδεδομένο κυρίως σε ευρωπαϊκές χώρες. Προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη προκαλούμενη παραμόρφωση υπό την επίδραση του φορτίου (Nunn, 1996). Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του ITSM περιγράφεται ακολούθως.

Εργαστηριακός προσδιορισμός ITSM

Κατά τη δοκιμή σε έμμεσο εφελκυσμό, σε ασφαλικό κυλινδρικό δοκίμιο επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο κατά μήκος δύο αντίθετων γενετειρών. Αυτό προκαλεί μια ομοιόμορφη εφελκυστική τάση κάθετη και κατά μήκος του διαμετρικού επιπέδου του εφαρμοζόμενου φορτίου (Yoder & Witczak 1975).

Συγκεκριμένος αριθμός κύκλων φόρτισης εφαρμόζεται κατά την κάθετη διάμετρο του δοκιμίου έτσι ώστε η μέγιστη παροδική οριζόντια παραμόρφωση που θα προκύψει να είναι ίση με 50μm. Η φόρτιση είναι ημιτονοειδούς μορφής με διαστήματα ηρεμίας. Ο χρόνος ανόδου (rise time), ο οποίος είναι ο χρόνος από την έναρξη επιβολής του φορτίου μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή, είναι συνήθως 124ms. Η καταγραφή των οριζόντιων παραμορφώσεων πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων LVDTs οι οποίοι προσαρτώνται σε κατάλληλο πλαίσιο που τοποθετείται στην οριζόντια διάμετρο του δοκιμίου.

Η δοκιμή περιλαμβάνει αρχικά 10 κύκλους δοκιμαστικής φόρτισης, έτσι ώστε να γίνουν οι κατάλληλες προσαρμογές στα χαρακτηριστικά της φόρτισης (rise time, οριζόντια παραμόρφωση). Ακολουθούν 5 κύκλοι φόρτισης από τους οποίους προσδιορίζεται τελικά η τιμή του ITSM. Στη συνέχεια το δοκίμιο περιστρέφεται κατά 90° και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Η τελική τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ITSM

προκύπτει από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων κατά μήκος των δύο αυτών διαμέτρων.

Στην περίπτωση της δοκιμής για τον προσδιορισμό του ITSM η παραμόρφωση είναι ελεγχόμενη υπό την έννοια ότι το μέγεθος του φορτίου προσαρμόζεται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη παραμόρφωση. Οι πρώτοι ερευνητές που συνέβαλαν στην ανάπτυξη των προδιαγραφών της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού με ελεγχόμενη παραμόρφωση είναι οι Brown & Cooper το 1993. Το δε μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από την υπόψη πειραματική διάταξη θεωρείται ότι είναι το ελαστικό μέτρο δυσκαμψίας (*Santagata & Bassani 1999*).

Η θεώρηση αυτή μπορεί να υποστηριχτεί δεδομένου ότι κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του ITSM δε λαμβάνεται υπόψη η ανακτώμενη παραμόρφωση αλλά η μέγιστη. Επομένως, δεν θα ήταν εννοιολογικά σωστό το μέτρο αυτό δυσκαμψίας να θεωρηθεί ως μέτρο επανάκτησης. Ωστόσο, το μέγεθος της ελεγχόμενης παραμόρφωσης είναι μικρό και ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου είναι μικρότερος από 150ms και επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί βάσιμη η υπόθεση ότι το μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι αμελητέο, ειδικά στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία ελέγχου είναι μικρότερη από 20°C. Επομένως, η μέγιστη παραμόρφωση εκφράζει την ανακτώμενη παραμόρφωση. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, το μέτρο δυσκαμψίας ITSM, όπως αυτό περιγράφεται στα ευρωπαϊκά πρότυπα, μπορεί κατά προσέγγιση να ερμηνευτεί σαν ένας τύπος μέτρου επανάκτησης υπό διαμετρική θλίψη, ενώ παράλληλα τονίζεται ότι η διαδικασία της ελεγχόμενης τάσης, είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρύτερα.

Συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester)

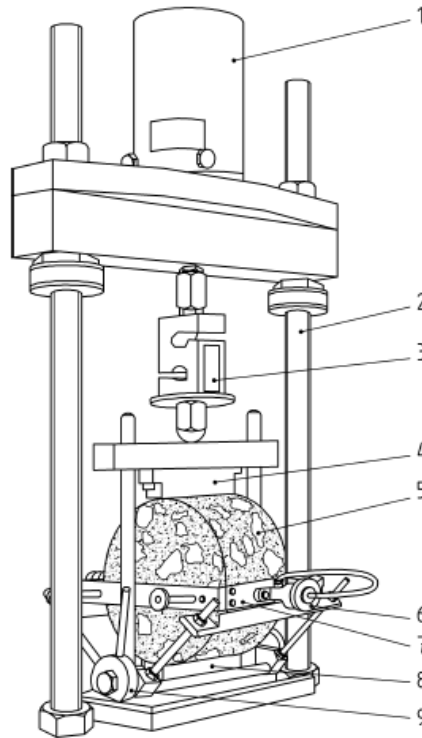
Η συσκευή της δοκιμής αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης με δύο ανοξείδωτες ράβδους. Τα στελέχη επιβολής φορτίου έχουν κοίλη επιφάνεια που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δοκιμίου και στρογγυλεμένες άκρες προκειμένου να μην κοπεί το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής (Εικ. 6.18).



Εικόνα 6.18 Συσκευή Nottingham Asphalt Tester του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ

Το κάτω στέλεχος επιβολής φορτίου κεντράρεται με τον άξονα του μεταλλικού πλαισίου φόρτισης, ενώ το άνω στέλεχος επιβολής φορτίου εφάπτεται με το σύστημα φόρτισης μέσω σφαιρικού στοιχείου (Εικ. 6.19).

Το σύστημα φόρτισης περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή φορτίου, με τη βοήθεια του οποίου το φορτίο επιβάλλεται κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου διαμέσω των δύο στελεχών, άνω και κάτω. Ο ενεργοποιητής εφαρμόζει επαναλαμβανόμενες φορτίσεις με περίοδο ανάπαυσης μεταξύ τους. Η κυματομορφή του φορτίου ακολουθεί την εξίσωση του Haversine [$\text{haversin}(\theta) = \sin^2(\theta/2)$], ενώ ο χρόνος φόρτισης ελέγχεται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.



Εικόνα 6.19 Nottingham Asphalt Tester 1.Ενεργοποιητής φορτίου 2.Μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης 3.Δυναμοκυψέλη 4.Άνω στέλεχος επιβολής φορτίου 5.Δοκίμιο 6.Ρυθμιστής ηλεκτρομηκυνσιομέτρων 7.Πλαίσιο συγκρότησης ηλεκτρομηκυνσιομέτρων 8.Κάτω στέλεχος επιβολής φορτίου 9. Συσκευή ευθυγράμμισης ηλεκτρομηκυνσιομέτρων

Η διάρκεια ανάδυσης, η οποία είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το φορτίο μέχρι να φτάσει από το μηδέν στην ανώτερη τιμή του, υπολογίζεται από τη χρονική στιγμή που ξεκινά ο πρώτος χτύπος φόρτισης και είναι της τάξεως των (124 ± 4) ms. Η μέγιστη τιμή του φορτίου θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα ούτως ώστε να επιτευχθεί μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση της τάξης του 0,005% της διαμέτρου του δείγματος. Επιπλέον, για τη μέτρηση του ασκούμενου φορτίου χρησιμοποιείται μια δυναμοκυψέλη ακρίβειας 2%. Το διάστημα μέχρι την επανάληψη του επόμενου χτύπου πρέπει να είναι $(3,0 \pm 0,1)$ sec.

6.5 Πραγματοποίηση δοκιμών

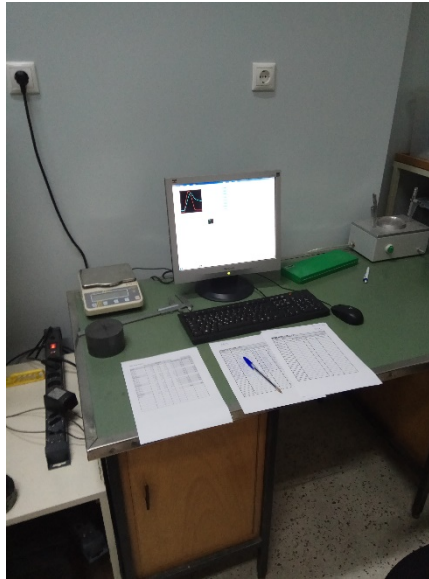
Μετά την παρασκευή τους, όλα τα ασφαλτομίγματα αποθηκεύτηκαν για δύο εβδομάδες πάνω σε οριζόντια επιφάνεια του Εργαστηρίου. Στην συνέχεια, μετά από διάτρηση αυτών των συμπυκνωμένων ασφαλτομιγμάτων προέκυψαν τα κυλινδρικά δοκίμια (με

πάχος πυρήνα 40mm και διάμετρο 10cm) που υποβλήθηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό στην συσκευή NAT.

Αρχικά, το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και βρισκόταν σε παρακολούθηση έως ότου φτάσει την θερμοκρασία δοκιμής (15°C, 20°C, 25°C και 30°C). Η θερμοκρασία του κάθε δοκιμίου προσδιοριζόταν από αισθητήρες οι οποίοι συνδέονται στην κυρτή επιφάνεια και στο κέντρο του. Η θερμοκρασία του υπόψη δοκιμίου παρακολουθείται μέχρις ότου οι μετρήσεις δείξουν ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σημείου στο εξωτερικό του και σημείου στο κέντρο του δεν υπερβαίνει τους 0,4°C. Ο μέσος όρος των δύο αυτών θερμοκρασιών καταγράφεται ως η πραγματική θερμοκρασία του δοκιμίου. Κατόπιν, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη διάταξη της συσκευής ελέγχου NAT. Η θερμοκρασία δοκιμής δεν διαφοροποιήθηκε περισσότερο από 0,5°C από την απαιτούμενη θερμοκρασία.

Στην συνέχεια, μόλις το κάθε δοκίμιο έφτανε τη ζητούμενη θερμοκρασία, ετοιμαζόταν προκειμένου να δοκιμαστεί κατά μήκος μίας από τις μαρκαρισμένες κάθετες διαμέτρους. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσαρμογή των ηλεκτρομ/ρων και του συστήματος μέτρησης και πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Το ανεκτό εύρος για το χρόνο ανόδου (rise time) καθορίστηκε στα 120-128ms. Αντίστοιχα, το ανεκτό εύρος της οριζόντιας παραμόρφωσης ήταν από 4.8 έως 5.2μm.

Κατάλληλος εξοπλισμός καταγραφής, που περιλαμβάνει μία ψηφιακή μονάδα συνδεδεμένη με υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκε ώστε να παρακολουθεί και να καταγράφει τα ηλεκτρικά σήματα από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα (Εικ. 6.20).



Εικόνα 6.20 Υπολογιστής συνδεδεμένος με την συσκευή NAT για την καταγραφή των μετρήσεων

Η δοκιμή, καθώς επίσης και η προθέρμανση των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε μέσα σε κατάλληλο θερμοθάλαμο (Εικ. 6.21).



Εικόνα 6.21 Θερμοθάλαμος για την προθέρμανση των δοκιμίων στους 15°C, 20°C, 25°C και 30°C

6.6 Πειραματικά δεδομένα και ανάλυση

Από τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού προέκυψαν τα εργαστηριακά αποτελέσματα, που περιλαμβάνουν οι Πίνακες 6.5 – 6.8.

Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 15°C

a/a	Core	Core thickness (mm)	Acceptable Range of rise time (ms)	Acceptable Range of horizontal deformation (μm)	15°C					Comments
					Rise time (ms)	Horizontal deformation (μm)	Modulus 1 (MPa)	Modulus 2 (MPa)	Average Modulus (Mpa)	
1	M_0_1	39.4	120-128	4.8-5.2	122.5	5.0	4908	5082	4995	
2	M_0_2	39.7	120-128	4.8-5.2	124.0	5.0	5234	5349	5292	
3	M_0_3	41.2	120-128	4.8-5.2	123.9	5.0	5048	5064	5056	
4	M_0_4	41.4	120-128	4.8-5.2	123.0	5.0	5174	5077	5126	
5	M_10_1	40.9	120-128	4.8-5.2	124.4	5.0	6068	6051	6060	
6	M_10_2	40.8	120-128	4.8-5.2	124.4	5.0	5713	5756	5735	
7	M_10_3	39.7	120-128	4.8-5.2	123.5	5.1	5995	5545	5770	
8	M_10_4	37.3	120-128	4.8-5.2	122.1	5.1	5428	5477	5453	
9	M_20_1	41.4	120-128	4.8-5.2	124.3	5.0	5453	5472	5463	
10	M_20_2	39.7	120-128	4.8-5.2	123.0	5.0	5258	5412	5335	
11	M_20_3	39.6	120-128	4.8-5.2	126.5	5.0	5357	5541	5449	
12	M_20_4	41.2	120-128	4.8-5.2	123.2	5.0	5341	5326	5334	
13	M_40_1	42.0	120-128	4.8-5.2	125.0	5.0	5267	5115	5191	

Πίνακας 6.6 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 20°C

a/a	Core	Core thickness (mm)	Acceptable Range of rise time (ms)	Acceptable Range of horizontal deformation (μm)	20°C					Comments
					Rise time (ms)	Horizontal deformation (μm)	Modulus 1 (MPa)	Modulus 2 (MPa)	Average Modulus (Mpa)	
1	M_0_1	39.4	120-128	4.8-5.2	126.1	5.1	4250	4116	4183	
2	M_0_2	39.7	120-128	4.8-5.2	125.5	5.1	4116	4115	4116	
3	M_0_3	41.2	120-128	4.8-5.2	124.3	5.2	4353	4348	4351	
4	M_0_4	41.4	120-128	4.8-5.2	126.0	5.1	4186	4228	4207	
5	M_10_1	40.9	120-128	4.8-5.2	123.1	5.0	5119	5096	5108	
6	M_10_2	40.8	120-128	4.8-5.2	127.7	5.2	4793	4942	4868	
7	M_10_3	39.7	120-128	4.8-5.2	124.4	5.1	4991	4840	4916	
8	M_10_4	37.3	120-128	4.8-5.2	122.4	5.0	4945	4705	4825	
9	M_20_1	41.4	120-128	4.8-5.2	123.8	5.1	5099	5060	5080	
10	M_20_2	39.7	120-128	4.8-5.2	122.9	5.1	4847	4588	4718	
11	M_20_3	39.6	120-128	4.8-5.2	123.6	5.0	4825	4468	4647	
12	M_20_4	41.2	120-128	4.8-5.2	120.8	5.1	4390	4603	4497	
13	M_40_1	42.0	120-128	4.8-5.2	124.0	5.0	4525	4473	4499	

Διερεύνηση της χρήσης ανακυκλωμένου ελαστικού σε ασφαλτομίγματα

Πίνακας 6.7 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 25°C

a/a	Core	Core thickness (mm)	Acceptable Range of rise time (ms)	Acceptable Range of horizontal deformation (μm)	25°C					Comments
					Rise time (ms)	Horizontal deformation (μm)	Modulus 1 (MPa)	Modulus 2 (MPa)	Average Modulus (Mpa)	
1	M_0_1	39.4	120-128	4.8-5.2	123.8	5.0	3543	3636	3590	
2	M_0_2	39.7	120-128	4.8-5.2	123.1	5.3	3593	3551	3572	
3	M_0_3	41.2	120-128	4.8-5.2	124.6	7.5	3572	3629	3601	
4	M_0_4	41.4	120-128	4.8-5.2	122.1	9.3	3513	3511	3512	
5	M_10_1	40.9	120-128	4.8-5.2	125.3	5.1	4184	4130	4157	
6	M_10_2	40.8	120-128	4.8-5.2	124.8	6.6	4182	4094	4138	
7	M_10_3	39.7	120-128	4.8-5.2	124.4	5.1	4106	4104	4105	
8	M_10_4	37.3	120-128	4.8-5.2	122.6	5.0	4135	4092	4114	
9	M_20_1	41.4	120-128	4.8-5.2	121.1	5.1	4137	4122	4130	
10	M_20_2	39.7	120-128	4.8-5.2	125.2	5.1	4165	4074	4120	
11	M_20_3	39.6	120-128	4.8-5.2	125.0	5.2	4098	3864	3981	
12	M_20_4	41.2	120-128	4.8-5.2	125.2	5.0	4024	4144	4084	
13	M_40_1	42.0	120-128	4.8-5.2	126.3	5.2	4174	4170	4172	

Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 30°C

a/a	Core	Core thickness (mm)	Acceptable Range of rise time (ms)	Acceptable Range of horizontal deformation (μm)	30°C					Comments
					Rise time (ms)	Horizontal deformation (μm)	Modulus 1 (MPa)	Modulus 2 (MPa)	Average Modulus (Mpa)	
1	M_0_1	39.4	120-128	4.8-5.2	126.4	5.7	3339	3306	3323	
2	M_0_2	39.7	120-128	4.8-5.2	134.2	5.3	3318	3313	3316	
3	M_0_3	41.2	120-128	4.8-5.2	120.8	7.0	3367	3420	3394	
4	M_0_4	41.4	120-128	4.8-5.2	122.1	8.0	3403	3480	3442	
5	M_10_1	40.9	120-128	4.8-5.2	127.5	5.2	3878	3788	3833	
6	M_10_2	40.8	120-128	4.8-5.2	123.8	5.0	3938	3875	3907	
7	M_10_3	39.7	120-128	4.8-5.2	127.7	5.1	3756	3730	3743	
8	M_10_4	37.3	120-128	4.8-5.2	120.8	5.1	3746	3733	3740	
9	M_20_1	41.4	120-128	4.8-5.2	124.6	5.2	4023	3984	4004	
10	M_20_2	39.7	120-128	4.8-5.2	125.3	5.0	3823	3895	3859	
11	M_20_3	39.6	120-128	4.8-5.2	122.4	5.2	3587	3821	3704	
12	M_20_4	41.2	120-128	4.8-5.2	127.0	5.1	3692	3715	3704	
13	M_40_1	42.0	120-128	4.8-5.2	120.5	5.2	3795	3752	3774	

Με δεδομένα τα μέτρα δυσκαμψίας καταγεγραμμένα σε διάφορες θερμοκρασίες (15°C, 20°C, 25°C και 30°C), η περαιτέρω ανάλυση επικεντρώθηκε σε δύο στόχους :

- Τη διερεύνηση της επίδρασης της προσθήκης ελαστικού στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων.
- Τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε σχέση με το ποσοστό του προστιθέμενου ελαστικού.

Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα στοιχεία των Πινάκων 6.9 – 6.12 για τις επιμέρους θερμοκρασίες ελέγχου. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν τέσσερις τιμές δυσκαμψίας από κάθε σειρά δειγμάτων (εκτός από την τελευταία σειρά M_40, όπου παράχθηκε μόνο ένα δείγμα) για κάθε θερμοκρασία ελέγχου και στην συνέχεια έγινε η στατιστική ανάλυσή τους. Συνοπτικά, στην 1^η και 2^η στήλη αναγράφεται η αρίθμηση του κάθε δείγματος, στη συνέχεια οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας, η μέση τιμή τους και τέλος η τιμή της τυπικής απόκλισης (Standard deviation, Stdev), αλλά και η τιμή του συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of Variation, CV) των τιμών.

Όσον αφορά στο συντελεστή διακύμανσης των τιμών των μέτρων δυσκαμψίας, τέθηκαν κάποια κριτήρια κατηγοριοποίησης του μίγματος με βάση τις τιμές που αυτός λαμβάνει. Εν γένει όταν η τιμή του είναι <0.15 τότε το δείγμα θεωρείται ομοιογενές και ο μέσος όρος των τιμών κρίνεται αντιπροσωπευτικός. Λαμβάνοντας υπόψη ότι σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή του συντελεστή διακύμανσης ήταν πολύ μικρότερη από του 0.15, διαπιστώνεται η ομοιογένεια των τιμών δυσκαμψίας στα επιμέρους δείγματα.

Πίνακας 6.9 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφέλκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 15°C

Θερμοκρασία ελέγχου 15°C					
α/α	Δείγματα	Μέτρο δυσκαμψίας (MPa)	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης (%)
1	M_0_1	4995	5117	128.20	2.50
2	M_0_2	5292			
3	M_0_3	5056			
4	M_0_4	5126			
5	M_10_1	6060	5755	248.22	4.31
6	M_10_2	5735			
7	M_10_3	5770			
8	M_10_4	5453			
9	M_20_1	5463	5395	70.38	1.30
10	M_20_2	5335			
11	M_20_3	5449			
12	M_20_4	5334			
13	M_40_1	5191	5191		

Στον Πίνακα 6.9, αυτό που παρατηρείται αμέσως είναι η μεγάλη αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας στα δείγματα των 10% σε σχέση με το μη-τροποποιημένο ασφαλτόμγμα,

που όμως με την περαιτέρω αύξηση της ποσότητας του ελαστικού οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας μειώνονται αισθητά, αλλά και πάλι είναι μεγαλύτερες του ασφαλτομίγματος αναφοράς. Ενδεικτικά, παρατηρείται ότι η μέση τιμή των δειγμάτων αναφοράς είναι 5117 MPa, με την μέση τιμή των δειγμάτων με 10% RAR να είναι 5754 MPa όπου παρουσιάζει αύξηση 12.4%, ενώ οι μέσες τιμές των δειγμάτων 20% και 40% είναι 5395 MPa και 5191 MPa παρουσιάζοντας μια αύξηση 5.4% και 1.4% αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 6.10 υπάρχει μία παρόμοια εικόνα στα αποτελέσματα όπως πριν, με την διαφορά ότι λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας (20°C) οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας όλων των δειγμάτων είναι μικρότερες σε σχέση με το σχεδιάγραμμα των 15°C. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή των δειγμάτων με 10% RAR παρουσιάζει μείωση 17.6%, των 20% μείωση 14.3% και των 40% μείωση 13.3% σε σχέση με τις τιμές του πίνακα 6.9 για θερμοκρασία 15°C.

Πίνακας 6.10 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 20°C

Θερμοκρασία ελέγχου 20°C					
α/α	Δείγματα	Μέτρο δυσκαμψίας (MPa)	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης (%)
1	M_0_1	4183	4214	98.96	2.34
2	M_0_2	4116			
3	M_0_3	4351			
4	M_0_4	4207			
5	M_10_1	5108	4929	124.82	2.53
6	M_10_2	4868			
7	M_10_3	4916			
8	M_10_4	4825			
9	M_20_1	5080	4736	247.45	5.22
10	M_20_2	4718			
11	M_20_3	4647			
12	M_20_4	4497			
13	M_40_1	4499	4499		

Έτσι, παρατηρείται και εδώ μια αύξηση της μέσης τιμής του μέτρου δυσκαμψίας με την προσθήκη RAR κατά 16.4% (4929 MPa) στο δείγμα των 10%, κατά 12.3% (4735 MPa) στο δείγμα των 20% και κατά 6.7% (4499 MPa) στο δείγμα των 40%, σε σύγκριση με το δείγμα του συμβατικού ασφαλτομίγματος που είναι 4214 MPa. Ο

συντελεστής διακύμανσης είναι χαμηλός (<0.15) και πάλι σε όλα τα δείγματα, κάτι που υποδεικνύει ότι έχουμε μικρή διασπορά των τιμών.

Στον Πίνακα 6.11, οι μέσες τιμές των δειγμάτων με ποσοστό RAR 10%,20% και 40% για θερμοκρασία 25°C δεν διαφέρουν σημαντικά.

Πίνακας 6.11 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφέλκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 25°C

Θερμοκρασία ελέγχου 25°C					
α/α	Δείγματα	Μέτρο δυσκαμψίας (MPa)	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης (%)
1	M_0_1	3590	3569	39.67	1.11
2	M_0_2	3572			
3	M_0_3	3601			
4	M_0_4	3512			
5	M_10_1	4157	4129	23.55	0.57
6	M_10_2	4138			
7	M_10_3	4105			
8	M_10_4	4114			
9	M_20_1	4130	4079	68.09	1.66
10	M_20_2	4120			
11	M_20_3	3981			
12	M_20_4	4084			
13	M_40_1	4172	4172		

Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει μία μείωση σε όλες τις μέσες τιμές των μέτρων δυσκαμψίας κατά περίπου 700MPa σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα των 20°C.

Συγκριτικά, η μέση τιμή του συμβατικού δείγματος είναι 3569 MPa, ενώ αντίστοιχα για το δείγμα με ποσοστό RAR 10% η τιμή έχει αυξηθεί κατά 15.6% (4128 MPa), για το δείγμα του 20% έχει αυξηθεί κατά 14.2% (4079 MPa) και για το δείγμα του 40% κατά 16.8% (4172 MPa).

Τέλος, στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων για θερμοκρασία 30°C. Είναι εμφανές ότι σε σχέση με το σχεδιάγραμμα των 15°C, οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας είναι μικρότερες κατά 1500-2000 Mpa, δηλαδή υπάρχει μια μείωση της τάξης του 30% με 40%.

Πίνακας 6.12 Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των πειραματικών ασφαλτομιγμάτων σε θερμοκρασία 30°C

Θερμοκρασία ελέγχου 30°C					
α/α	Δείγματα	Μέτρο δυσκαμψίας (MPa)	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής διακύμανσης (%)
1	M_0_1	3323	3369	60.21	1.78
2	M_0_2	3316			
3	M_0_3	3394			
4	M_0_4	3442			
5	M_10_1	3833	3806	80.11	2.10
6	M_10_2	3907			
7	M_10_3	3743			
8	M_10_4	3740			
9	M_20_1	4004	3818	144.07	3.77
10	M_20_2	3859			
11	M_20_3	3704			
12	M_20_4	3704			
13	M_40_1	3774	3774		

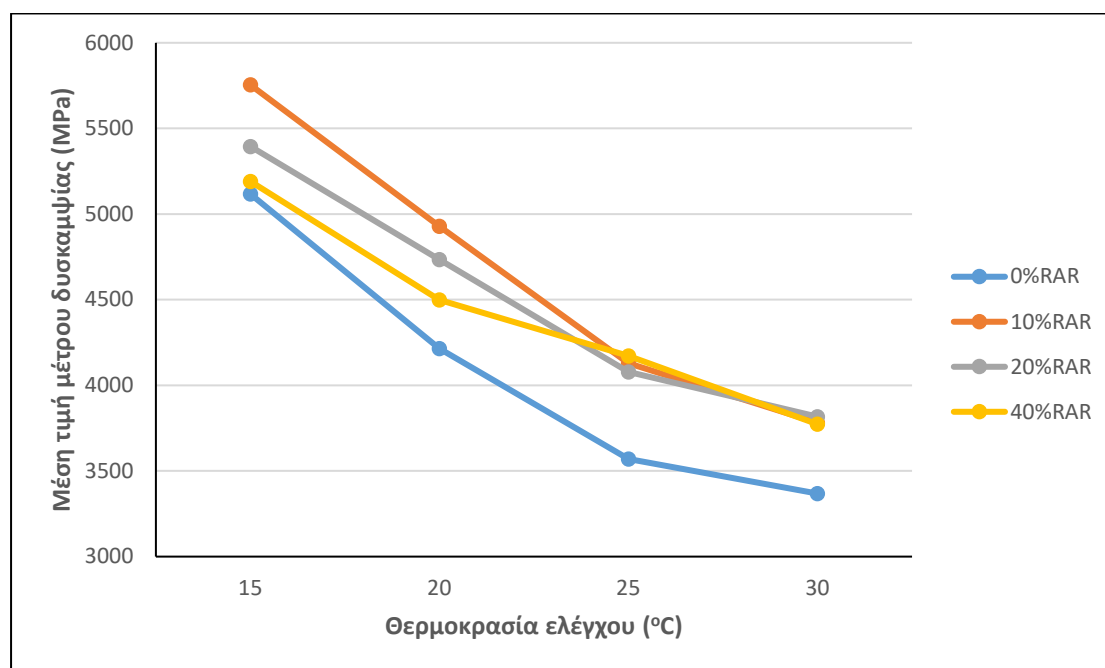
Ενδεικτικά, η μέση τιμή του ασφαλτομίγματος αναφοράς είναι 3369 Mpa, ενώ με την προσθήκη 10% RAR υπάρχει αύξηση της τιμής κατά 12.9%, με την προσθήκη 20% RAR υπάρχει ανάλογη αύξηση κατά 13.3%, ενώ με την προσθήκη 40% RAR μικρότερη αύξηση κατά 12%. Έτσι, όπως και στον προηγούμενο πίνακα, παρατηρείται μία παρόμοια αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας για κάθε ποσοστό προσθήκης ελαστικού. Δηλαδή, σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (25°C – 30°C) η προσθήκη RAR αυξάνει μεν το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, χωρίς όμως η ποσότητα του να παίζει σημαντικό ρόλο (είτε προστίθεται 10%, είτε 40% RAR π.χ.).

Στον επόμενο πίνακα (Πίν. 6.13) αναγράφονται όλες οι μέσες τιμές των δειγμάτων σε κάθε θερμοκρασία ελέγχου, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η ανάλυση που έγινε στους προηγούμενους Πίνακες.

Πίνακας 6.13 Μέση τιμή μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) για κάθε σειρά ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου

	15°C	20°C	25°C	30°C	% RAR
Μέση τιμή μέτρου δυσκαμψίας (MPa)	5117	4214	3569	3368.3	0%
	5754	4929	4128	3781.5	10%
	5395	4735	4079	3817.5	20%
	5191	4499	4172	3773.5	40%

Στην Εικόνα 6.22 φαίνονται συγκεντρωτικά όλες οι μέσες τιμές όλων των σειρών των ασφαλτομιγμάτων που παράχθηκαν, σε κάθε θερμοκρασία. Φαίνεται πολύ ενδεικτικά πόσο επηρεάζει η αύξηση της θερμοκρασίας (αντιστρόφως ανάλογη) το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού των ασφαλτομιγμάτων, ανεξαρτήτως του ποσοστού RAR.

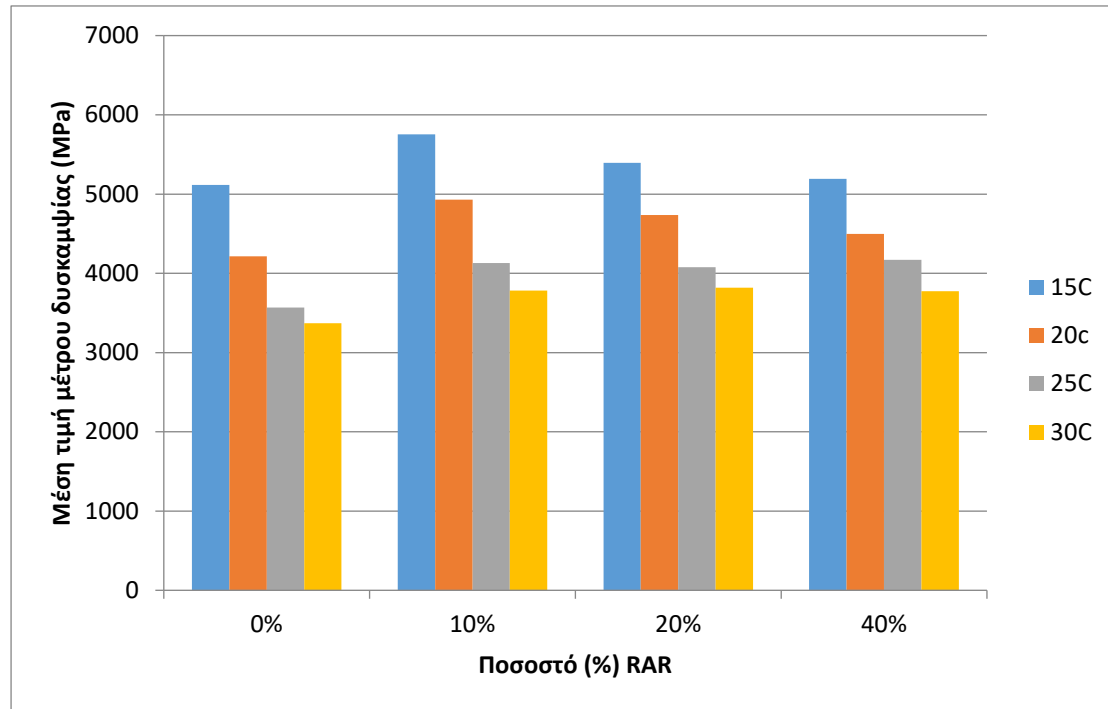


Εικόνα 6.22 Διαγραμματική απεικόνιση του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) των ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου

Επίσης διαπιστώνεται πως υπάρχει μεγάλη σύγκλιση ανάμεσα στις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας των τροποποιημένων δειγμάτων στις υψηλές θερμοκρασίες (25°C και 30°C), κάτι που επισημάνθηκε και προηγουμένως, αλλά στην συγκεκριμένη εικόνα

φαίνεται χαρακτηριστικά από το γεγονός πως οι γραμμές των τριών σειρών πρακτικά συμπίπτουν.

Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά οι μέσες τιμές της κάθε σειράς ασφαλτομιγμάτων σε κάθε θερμοκρασία ελέγχου (Εικ. 6.23).



Εικόνα 6.23 Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) των ασφαλτομιγμάτων στις θερμοκρασίες ελέγχου

Η Εικόνα 6.23 αποδεικνύει ότι η προσθήκη RAR, για κάθε θερμοκρασία, αυξάνει το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε σύγκριση με το ασφαλτόμιγμα αναφοράς. Χωρίς άλλη πληροφορία, σαν βέλτιστο ποσοστό προσθήκης ελαστικού φαίνεται να είναι η σειρά M_10, ειδικά για τις θερμοκρασίες των 15°C και 20°C. Αντίθετα, για τις θερμοκρασίες των 25°C και 30°C, φαίνεται πως η προσθήκη RAR επηρεάζει σίγουρα θετικά το μέτρο δυσκαμψίας, χωρίς όμως να παίζει σημαντικό ρόλο το ποσοστό προσθήκης του ελαστικού.

7. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης της παρουσίας τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Για το σκοπό αυτό αφενός πραγματοποιήθηκε μία ενδελεχής ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για το υπόψη θέμα και αφετέρου σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε πειραματική διαδικασία στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

Η πειραματική διαδικασία αφορούσε κατά κύριο λόγο στη πραγματοποίηση δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων με τη συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester) σε τέσσερις (4) θερμοκρασίες ελέγχου: 15°C, 20°C, 25°C και 30°C. Αρχικά, παρασκευάστηκαν 4 σειρές ασφαλτομιγμάτων (M_0, M_10, M_20, M_40) όπου η 1^η δεν περιείχε καθόλου RAR (ασφαλτόμιγμα αναφοράς), ενώ στη 2^η, στη 3^η και στη 4^η σειρά μέρος της ασφάλτου είχε αντικατασταθεί σε ποσοστό 10%, 20% και 40% κ.β. αντίστοιχα από RAR (τροποποιημένα ασφαλτομίγματα). Στην συνέχεια από τα ασφαλτομίγματα αυτά, ελήφθησαν κυλινδρικά δοκίμια, τα οποία ελέγχθηκαν στην συσκευή NAT ως προς το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού τους (ITSM) στις πιο πάνω θερμοκρασίες ελέγχου.

Από την ανάλυση και επεξεργασία των εργαστηριακών δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ✚ Τα συμβατικά θερμά ασφαλτομίγματα με άσφαλτο 55/70 έχουν μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού **μικρότερο** από τα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα με τρίμματα RAR για κάθε θερμοκρασία ελέγχου.
- ✚ Σε πολύ **υψηλές θερμοκρασίες (25°C - 30°C) η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας (αύξηση 12%) ήταν παρόμοια** για όλα τα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα, ανεξαρτήτου ποσοστού προσθήκης τρίμματος ελαστικού.
- ✚ Σε όλες τις σειρές ασφαλτομιγμάτων με προσθήκη ελαστικού παρατηρήθηκε ότι το **βέλτιστο ποσοστό RAR αντικατάστασης της ασφάλτου είναι το 10% κ.β.**, για κάθε θερμοκρασία ελέγχου.

✚ Προσθήκη RAR σε ποσοστό άνω του 40% στο ασφαλτόμιγμα δεν παρουσιάζει
κάποιο πλεονέκτημα ως προς τη βελτίωση (αύξηση) του μέτρου δυσκαμψίας.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης θα μπορούσαν να αποτελέσουν επιπρόσθετες ιδιότητες των τροποποιημένων ασφαλτομιγμάτων με προσθήκη τρίμματος ανακυκλωμένου ελαστικού ή με οποιουδήποτε άλλου ελαστικού τροποποιητή ασφάλτου, στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης. Επίσης η ανάπτυξη κατάλληλων προδιαγραφών στην Ελλάδα, οι οποίες μπορούν να βασισθούν σε ήδη υπάρχουσες άλλων χωρών (π.χ. Ισπανίας) για την χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού στην ασφαλτο, όχι μόνο ως τροποποιητή της ασφάλτου αλλά και ως αδρανές ή φίλλερ, αποτελεί ένα αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

8. Βιβλιογραφία

AASHO, 1962, “The ASSHO Road Test, Report 5, Pavement Research”, Highway Research Board, Special Report 61E.

Abdelrahman M.A., Carpenter S.H., 1999, “Mechanism of Interaction of Asphalt Cement with Crumb Rubber Modifier”, Transportation Research Record 1661, Paper No. 99-0295, pp. 106 – 113.

Adhikari B., Maiti S., 2000, “Reclamation and recycling of waste rubber”, Elsevier.

Amirkhanian S.N., 2001, “Utilization of crumb rubber in asphaltic concrete mixtures – South Carolina’s Experience”, pp. 163-174.

Anthonissen J., Van Den Berg W., & Braet J., 2016 “Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements”, Environmental Impact Assessment Review, pp. 139-147.

Asphalt Academy, 2017, “Technical Guideline: The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction”, TG 1, Second edition.

ASTM D7000, 2011, “Standard Test Method for Sweep Test of Bituminous Emulsion Surface Treatment Samples”, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Austroroads, 2006, “Specification framework for polymer modified binders and multigrade bitumens”, Austroroads Technical Report APT41/06, Australia.

Bahia H.U., 1994, “Effect of Crumb Rubber Modifiers (CRM) on Performance Related Properties of Asphalt Binders”, Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 414-449.

Caltrans – State of California Department of Transportation, Division of Engineering Services, Office of Flexible Pavement, 2003, “Asphalt Rubber Usage Guide”, MS#5.

Cao W., 2007, “Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process”, Construction and Building Materials 21, pp. 1011– 1015.

CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, 2010 “Study of European SMA 11 and South Carolina SMA 12.5 with PG-76 Bitumen – iBind vs. Fibers” Study Realized for DSI Israel, Report EST 10-02, Lisbon Portugal.

Da Silva L., Benta A., Picado-Santos L., 2018, “Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking”, Construction and Building Materials 160, pp. 539–550.

Darter M. I., 1992, “Report on the 1992 U.S. Tour of European Concrete Highways”, FHWA-SA-93-012, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Dov B., 2010, “iBind - Activated Mineral Stabilizer for SMA – Environmental Indicators Comparison”, Prepared for Dimona Silica Industries - DSI Ltd., ASSIF Strategies.

EAPA, 2010, “The Use of Warm Mix Asphalt”. European Asphalt Pavement Association, Rue de Commerce 77, Brussels–Belgium.

EAPA and NAPA, 2011, “The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective”, 2nd ed. European Asphalt Pavement Association, National Asphalt Pavement Association, Rue de Commerce 77, Brussels–Belgium.

Environmental Protection Agency (EPA) 2007, “Cleaner Diesels: Low Cost Ways to Reduce Emissions from Construction Equipment”, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Environmental Protection Agency (EPA) 2009, “Potential for Reducing Greenhouse Gas Emissions in the Constructor Sector”, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Environmental Protection Agency (EPA) 2014, “Climate Change: Basic Information”, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Federal Highway Administration (FHWA) 2016, “Pavement Life-Cycle Assessment Framework”, FHWA-HIF-16-014, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Ghavibazoo A., Abdelrahman M., Ragab M., 2013, “Mechanism of Crumb Rubber Modifier (CRM) dissolution into asphalt matrix and its effect on final physical properties of CRM binder”, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, Paper No. 13-4259.

Gheni A., ElGawady M.A., Myers J.J., 2017, “Mechanical characterization of concrete masonry units manufactured with crumb rubber aggregate”.

Gheni A.A., et al., 2017, “Texture and design of green chip seal using recycled crump rubber aggregate”, Journal of Cleaner Production 166, pp. 1084-1101.

Glover C., Davison R., Bullin J., Estakhri C., Williamson S., Billiter T., Chipps J., Chun J., Juristyarini P, Leicht S, and Wattanachai P., 2000, “A comprehensive laboratory and field study of high-cure crumb-rubber modified asphalt materials”, Report 1460-1, Texas Transportation Institute, USA.

Hanson D., Epps J., Hicks R., 1996, “Contraction Guidelines for Crumb Rubber Modified Hot Mix Asphalt.”, Federal Highway Administration Report DTFH, pp. 61-94.

Harvey J., Kendall A., Lee I.S., Santero N., Van Dam T., and Wang T., 2010, “Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines”, UCPRC-TM-2010-03, University of California, Davis, CA.

Harvey J., Meijer J. and Kendall A., 2014, “Tech Brief: Life Cycle Assessment of Pavements”, FHWA-HIF-15-001, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Hassan N.A., Airey G.D., Abdullah M.E., Aziz M.A., 2015, “Microstructural characterization of dry mixed rubberized asphalt mixtures”, Construction and Building Materials 82, pp. 173–183.

Heitzman M., 1992, “Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier”, Transportation Research Record No. 1339.

Hicks R.G., Tighe S., and Cheng D.X., 2012, “Rubber Modified Asphalt Technical Manual”, Prepared for the Ontario Tire Stewardship, Toronto, Canada.

Huang Y., 2007, “Life Cycle Assessment of Use of Recycled Materials in Asphalt Pavements”, Thesis submitted to the Newcastle University for the Degree of Doctor of Philosophy.

Hunt R. and Franklin W., 1996, “LCA – How it Came About, Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA”, International Journal of Life Cycle Assessment, Eco med Publishers, Landsberg, Germany.

International Organization for Standardization (ISO). 2006a. “Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework”, ISO Standard 14040, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

International Organization for Standardization (ISO). 2006b. “Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines”, ISO Standard 14044, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Ishai I. and Svehinsky G., 2011, “A Road Test Comparing SMA Mixes with iBind vs. Cellulose Fibers – Overlaying of Access Road to the Revaya Quarry, Bet She'an Valley, Israel”, Prepared for DSI – Dimona Silica Industries.

Ishai I., Sousa J.B. and Svehinsky G., 2011, “Activated Minerals as Binder Stabilizers in SMA Paving Mixtures”, Compendium, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board – TRB, Washington DC.

Ishai I., Svehinsky G. and Sousa J.B., 2011, “Introducing an Activated Mineral as Innovative Binder-Stabilizer for SMA Paving Mixtures”, Compendium, International Road Congress on Innovation in Road Infrastructures", International Road Federation – IRF, held in Moscow, Russia.

Ishai I., Svehinsky G. and Sousa J.B., 2012, “A Micro Ground Mineral Activated by NANO Molecules as Binder Stabilizer in SMA Paving Mixtures”, Compendium, the Second International Symposium on Asphalt Pavements & Environment. International Society of Asphalt Pavements (ISAP), in Fortaleza Brazil.

Jensen W., Abdelrahman M., 2006, “Use of Crumb Rubber in Performance Graded Binder”.

Jiménez C., Barra M., Josa A., and Valls S., 2015, “LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods”, Construction and Building Materials 84, pp. 245-252.

JSTRI – Jiangsu Transportation Research Institute, 2010, “The Test Report of Stone Mastic Asphalt Mixtures with iBind Additives”, Prepared for DSI Israel, Report No. 011908098, Nanjing China.

Kendall A., Santero N., 2010, “Introduction to Life Cycle Assessment”, Pavement Life Cycle Assessment Workshop, Technical Presentation, University of California Pavement Research Center, Davis and Berkeley, CA.

Khan M., Kabir S., Alhussain M.A., Almansoor F.F., 2016, “Asphalt Design using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction”, International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, King Faisal University (Kingdom of Saudi Arabia), Vol, 145, pp. 1557-1564.

LaForce R.F., 1982, “Squeegee Seal and Crumb Rubber Chip Seal”, Sapinero-east. Colorado Department of Transportation, CDH-Dtp.

Lalwani S., Abushihada A., Halasa A., 1982, “Reclaimed Rubber-Asphalt Blends Measurement of Rheological Properties to Assess Toughness, Resiliency, Consistency, and Temperature Sensitivity”, Journal of the AAPT, Vol. 51, pp. 562-579.

Lee S.J., Akisetty C.K., Amirkhanian S.N., 2008, “The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements”, Construction and Building Materials 22 (7), pp. 1368-1376.

Livneh M., Ishai I. and Uzan J., 1979, “Chapters in Pavement Design of Flexible Pavements”, Transportation Research Institute, Israel Institute of Technology, Haifa.

Lo Presti D., 2013, “Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review”, Construction and Building Materials, pp. 863-881.

Lo Presti D., 2013, “Recycled tire rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review”, Construction and Building Materials 49, pp. 863-881.

Lo Presti D., Airey G., Partal P., 2012, “Manufacturing terminal and field bitumen-tyre rubber blends: the importance of processing conditions”, SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures.

Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M., 2012, “An overview of crumb rubber modified asphalt”, International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(2), pp. 166 - 170.

Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M., 2011, “Effect of blending time and crumb rubber content on properties of crumb rubber modified asphalt binder”, International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(9), pp. 2189-2193.

Mishra B., Gupta M.K., 2017, “A Study on Use of Plastic Coated Aggregates in Bituminous Concrete Mixes of Flexible Pavement”, International Journal of Engineering Research and Application, Vol.7, issue 10 (Part -7), pp. 26-33.

Mohammad L.N., Cooper Jr. S.B., Elseifi M.A., 2011, “Characterization of HMA mixtures containing high reclaimed asphalt pavement content with crumb rubber additives”, Journal of Materials of Civil Engineering 23 (11), pp. 1560-1568.

Moreno F., Rubio M.C., Martinez-Echevarria M.J., 2011, “Analysis of digestion time and crumb rubber percentage in dry process crumb-rubber modified hot bituminous mixes”, Construction and Building Materials 25, pp. 2323-2334.

- Moreno F., Rubio M.C., Martinez-Echevarria M.J., 2012, “The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage”, *Construction and Building Materials* 26, pp. 466-474.
- Moustafa A., ElGawady M.A., 2015, “Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber”, *Construct. Build. Mater.* 93, pp. 249-256.
- Papagiannakis A., Loughed T., 1995, “A review of crumb rubber modified asphalt concrete technology research report”.
- Putman B., Amirkhanian S.N., 2006, “Crumb Rubber Modification of Binders: Interaction and Particle Effects”.
- Rangaraju P., Gadkar S., 2012, “Durability Evaluation of Crumb Rubber Addition Rate on Portland Cement Concrete”, Department of Civil Engineering. Clemson University, Clemson, pp. 1-126.
- Santagata E., Dalmazzo D., Lanotte M., Zanetti M.C., Ruffino B., 2012, “Relationship between Crumb Rubber Morphology and Asphalt Rubber Viscosity”, *Conference Paper*.
- Shatnawi S., 2011, “White paper on comparisons of rubberized asphalt binders: asphalt rubber and terminal blend”, Second update, Prepared for Rubber Pavements Association.
- Shen J., Amirkhanian S., Xiao F., Tang B., 2008, “Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders”, *Construction and Building Materials*.
- Shen J., Li B., Xie Z., 2017, “Interaction between crumb rubber modifier (CRM) and asphalt binder in dry process”, *Construction and Building Materials* 149, pp. 202-206.
- Shu X., Huang B., 2014, “Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: An overview”, *Construction and Building Materials* 67, pp. 217-224.
- Shuler S., 2011, “Use of Waste Tires, Crumb Rubber, on Colorado Highways”, Colorado Department of Transportation, DTD Applied Research and Innovation Branch.
- Smith M., 2011, “Laboratory Report on the Evaluation of iBind as an Additive to Asphalt Mixtures”, Akzo Nobel Surface Chemistry AB, Asphalt Applications, Stenungsund Sweden, Report No. 11007.
- Sousa J.B. and Silva F., 2012, “Development Studies Study of RuBind Stage 5 – PG Grade Evaluation TA and TA2 RuBind Formulations”, Realized for RuBind, CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda, Casais da Serra, Portugal.
- Sousa J.B., 2012, “Study of RuBind Stage 4 – Russian Bitumen”, Realized for RuBind, CONSULPAV – Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda, Casais da Serra, Portugal.

Sousa J.B., Ishai I., and Svehinsky G., 2012, “Flexural Fatigue Tests and Prediction Models – Tools for Investigating SMA Mixes with New Innovative Binder Stabilizer” to be presented at the Third International Workshop on Four Point Bending (4PB), to be held in the University of California at Davis CA.

Sousa J.B., Vorobiev A., Ishai I. and Svehinsky G., 2012, “Elastomeric Asphalt Extender – A New Frontier on Asphalt Rubber Mixes”, Proceedings, International Asphalt Rubber Conferences: AR2012, Munich Germany.

Sousa J.B., Vorobiev A., Rowe G.M. and Ishai I., 2013, “Reacted and Activated Rubber– An Elastomeric Asphalt Extender”, A paper presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington DC.

Stroup-Gardiner M., Newcomb D., Tanquist B., 1993, “Asphalt – Rubber Interactions”, Transportation Research Record 1417.

Svehinsky G., Ishai I. and Sousa J.B., 2011, “Developing Warm SMA Paving Mixes Using Activated Mineral Binder Stabilizers and Bitumen Flow Modifiers”, Proceedings, the Second International Conference on Warm Mix Asphalt, St. Louis Missouri.

Thives L.P., Pais J.C., Pereira P.A.A., Triches G., Amorim S.R., 2013, “Assessment of the digestion time of asphalt rubber binder based on microscopy analysis”, Construction and Building Materials 47, pp. 431–440.

Watson D.E. and Moore J.R., 2011, “Evaluation of SMA Mixture with iBind and Fibers” National Center for Asphalt Technology – NCAT at Auburn University, Alabama, Report No. 11-04.

Way G., Sousa J.B., 2006, “ASPHALT RUBBER - SUMMARY OF 50 YEARS OF EXPERIENCE”.

Way J.R.S.G.B., 2012, “Asphalt – rubber chip seal and polymer modified asphalt-rubber two-layer system, case studies. In: Asphalt Rubber Conference”, Rubberized Asphalt Foundation, Munich.

World Commission on Environment and Development (WCED) 1987. “Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development”, Oxford University Press, University of Oxford, United Kingdom.

Wu C., Sousa J.B., Li A. and Zhao Z., 2012, “Activated Minerals as Binder Stabilizers in Middle Course's Asphalt Concrete Paving Mixtures”, Compendium, 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board – TRB, Washington DC.

Xie Z., Shen J., 2015, “Multi-Scale Evaluation on the Interaction between Asphalt and Crumb Rubber”, Conference Paper.

Ying G., Cao R., 2010, “Interaction Theory of Asphalt and Rubber”, Journal of Wuhan University of Technology, pp. 853-855.

Zhou H., Holikatti S., Vacura P., 2014, “Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review”, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), pp. 39-48.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ., 2014, “Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ., 2015, “Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.

Λοΐζος Α. & Πλατή Χ., 2017, “Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.

Νικολαΐδης Αθ. Φ., 2011, “Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας”, 3η Έκδοση.

