

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΠΟΠΤΗΣ: Α. ΛΟΪΖΟΣ



ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ SMA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΛΛΩΝ ΠΡΑΠΙΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2000

Απόσπασμα

Τα ασφαλτομίγματα SMA αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα στην Γερμανία, κυρίως, και σε άλλες χώρες της βορείου Ευρώπης, για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της πρόωρης τροχαυλάκωσης. Η τεχνολογία ασφαλτομιγμάτων SMA είναι σήμερα αναγνωρισμένη και εφαρμόζεται σε αντιστοιχισμένες στρώσεις κυκλοφορίας από πολλές ευρωπαϊκές χώρες και από τις ΗΠΑ. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια επισκόπηση της τεχνολογίας ασφαλτομιγμάτων SMA και εξετάζεται η δυνατότητα αξιολόγησης τους εργαστηριακά. Για τον σκοπό αυτό διεξήχθησαν οι συνήθεις δοκιμές εργαστηριακής ανάλυσης, ενώ με την χρήση περισσότερο εξελιγμένων μηχανικών δοκιμών εκτιμήθηκε το μέτρο δυσκαμψίας τους και η αντίστασή τους σε μόνιμη παραμόρφωση. Τέλος τα εξαγόμενα αποτελέσματα αναλύονται και σχολιάζονται.

Λέξεις – κλειδιά

SMA – Stone Mastic Asphalt – Stone Matrix Asphalt – Μέτρο δυσκαμψίας – Παραμένουσα παραμόρφωση

Abstract

SMA mixtures were developed during the late sixties in Germany and other north European countries, to cope with the problem of premature rutting. Today, SMA technology is recognized and is used for skid resistance surface courses by many European countries and the United States. In this diploma thesis a review of SMA technology is being attempted as well as the potentiality of a laboratory evaluation of SMA mixtures. For this cause a series of laboratory tests were run, using laboratory component analysis as well as more advanced mechanical testing and analytical approach for the estimation of their stiffness modulus and their resistance to permanent deformation. Finally the data collected were analyzed and discussed.

Key- words:

SMA- Stone Mastic Asphalt – Stone Matrix Asphalt -- Stiffness Modulus – Permanent Deformation.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ SMA

2.1 Γενικά

2.2 Ιστορική διαδρομή

2.3 Κοκκομετρική Διαβάθμιση

2.4 Χρησιμοποιούμενα Αδρανή

2.5 Χρησιμοποιούμενη Ασφαλτος

2.6 Προσδιορισμός Σύνθεσης Μίγματος

2.7 Τα ασφαλτομίγματα SMA Σήμερα

3.Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ SMA

3.1 Απαιτήσεις Επιφανειακής Στρώσης

3.2 Αντιολισθηρότητα

3.3 Επίπεδα Θορύβου

3.4 Ορατότητα

3.5 Ομαλότητα

3.6 Ανθεκτικότητα

3.7 Σύνοψη Συμπεριφοράς των SMA

4.ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΤΑ SMA

4.1 Γενικά

4.2 Υλικά Παραγωγής

4.3 Διαδικασία Σχεδιασμού Του Μίγματος Στο Εργαστήριο

4.4 Διαδικασία Παραγωγής

4.5 Διάστρωση και Συμπύκνωση

4.6 Συμπέρασμα

5.ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

5.1 Γενικά

5.2 Χρήση Και Ρόλος Της τροποποιημένης Ασφάλτου

5.3 Κυριότεροι Τροποποιητές – Κυριότερα Πρόσθετα

5.3.1 Πολυμερή

5.3.1.1 Ελαστομερή

5.3.1.2 Θερμοπλαστικά

5.3.1.3 Θερμοσκληρυνόμενα

5.3.2 Ίνες

5.3.3 Υδρογονάνθρακες

5.4 Τροποποιητικά Και Τροποποιημένη άσφαλτος Σε Μίγματα SMA

6.ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ SMA ΜΕΣΩ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

6.1 Γενικά

6.2 Παρασκευή Και Συμπύκνωση

6.2.1 Αδρανή

6.2.2 προσδιορισμός Βέλτιστου Ποσοστού Ασφάλτου

6.2.3 Πρόσθετα Στο Ασφαλτικό Συνδετικό

6.2.4 Έλεγχος Αποστράγγισης Της Ασφάλτου

6.2.5 Αποτελέσματα Παρασκευής Δοκιμίων

6.3 Ευστάθεια Και Παραμόρφωση Marshall

6.4 Σχόλια – Συμπεράσματα

6.4.1 Σχόλια Στην Διαδικασία Ανάμιξης Και Συμπύκνωσης Των Δοκιμίων

6.4.2 Σχόλια Στα Αποτελέσματα Ευστάθειας Και Παραμόρφωσης

7.ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

7.1 Γενικά

7.2 Περί Δυσκαμψίας Ασφαλτομιγμάτων

7.2.1 Χρόνος Φόρτισης Οδοστρωμάτων

7.2.2Επιρροή Της Θερμοκρασίας Φόρτισης Στην Δυσκαμψία Ασφαλτομιγμάτων

7.3 Περί Μέτρησης Δυσκαμψίας Στο Εργαστήριο

7.3.1 Δοκιμή Έμμεσης Διάτμησης Με Επαναλαμβανόμενο Φορτίο

7.3.2 Μονοαξονική Δοκιμή Με Επαναλαμβανόμενο Φορτίο

7.4 Εργαστηριακός Προσδιορισμός Δυσκαμψίας Μιγμάτων SMA

7.4.1 Προσδιορισμός Μέτρου Δυσκαμψίας Με Την Συσκευή NAT

7.5 Σχόλια Επί Των Αποτελεσμάτων Μέτρησης Της Δυσκαμψίας Με Την Συσκευή NAT

7.5.1 Σύγκριση Δυσκαμψιών Μεταξύ Μιγμάτων SMA Και Ασφαλτικού Σκυροδέματος

7.5.2 Σύγκριση Δυσκαμψιών Μεταξύ Δοκιμίων SMA Με Κοινή

Ασφαλτο Και Δοκιμίων SMA με Τροποποιημένη Ασφαλτο

7. 5. 3 Σύγκριση Δυσκαμψιών Μεταξύ Μιγμάτων SMA Παρασκευασμένων Με Διαφορετικούς Τύπους Τροποποιημένης Ασφάλτου

7.5.4 Γενικά Σχόλια

8.ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

8.1 Γενικά

8.2 Αλγόριθμοι Υπολογισμού Μέτρου Δυσκαμψίας

8.2.1 Ο Αλγόριθμος της Shell

8.2.2 Ο Αλγόριθμος Bonnaure, Uge Gest, Gravois

8.3 Ενεργοποίηση Των Αλγορίθμων Για Τα Εργαστηριακά Δοκίμια

8.4 Σχολιασμός Των Αποτελεσμάτων Δυσκαμψίας Με Την Χρήση Αλγορίθμων

8.4.1 Αλγόριθμος Heukelom – Klomp

8.4.2 Αλγόριθμος Bonnaure et all.

8.4.3 Αλγόριθμος Asphalt Institute

8.4.4 Γενικά Σχόλια

9.ΠΕΡΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

9.1 Γενικά

9.2 Χαρακτηριστικά Παραμόρφωσης Ασφαλτομιγμάτων

9.3 Εκτίμηση Της Παραμένουσας Παραμόρφωσης Στο Εργαστήριο

9.3.1 Δοκιμή Με Στατικό Φορτίο

9.3.2 Δοκιμή Με Επαναλαμβανόμενο Φορτίο

9.4 Προσδιορισμός Παραμένουσας Παραμόρφωσης Στο Εργαστήριο

9.5 Σχόλια στα Αποτελέσματα Της Δοκιμής Επαναλαμβανόμενης Φόρτισης.

9.5.1 Κριτήριο Της Τελικής Τιμής Της Παραμόρφωσης

9.5.2. Κριτήριο Της Διαφοράς Της Τελικής Από Την Αρχική Τιμή Παραμόρφωσης

9.5.3 Κριτήριο Της Κλίσης Του Τελευταίου Τρίτου Της Καμπύλης Παραμόρφωσης – Χρόνου.

9.5.4 Γενικά Σχόλια

10.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

10.1 Συμπεράσματα Επάνω Στην Δυνατότητα Συμβατικών Εργαστηριακών Δοκιμών Να Αξιολογήσουν Τα Μίγματα SMA.

- 10.2 Συμπεράσματα Επί Της Δυσκαμψίας Των Ασφατομιγμάτων SMA
- 10.3 Συμπεράσματα Επί Των Αποτελεσμάτων Της Δοκιμής
Επαναλαμβανόμενης Φόρτισης.
- 10.3 Συμπεράσματα Για Την Χρήση Των Αλγορίθμων Υπολογισμού Μέτρου
Δυσκαμψίας Σε Μίγματα SMA.
- 10.4 Γενικά Συμπεράσματα
- 10.5 Προτάσεις

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι κοινή παραδοχή ότι σήμερα καθώς αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος, αυξάνονται τα αξονικά φορτία ενώ ταυτόχρονα μικραίνουν οι επιφάνειες επαφής οδοστρώματος ελαστικού, οι παραδοσιακές επιφανειακές στρώσεις των ασφαλτικών οδοστρωμάτων δεν δύνανται να αντεπεξέλθουν πλέον και παρουσιάζουν πρόωρες αστοχίες (κυρίως με την μορφή της παραμένουσας παραμόρφωσης). Πέρα από το επιπλέον κόστος των ανακατασκευών οι συνεχείς εργασίες επί του οδικού δικτύου προκαλούν και αναστάτωση στο κοινωνικό σύνολο.

Ήδη λοιπόν από τα μέσα της δεκαετίας του ογδόντα οι αρμόδιες αρχές αρκετών ανεπτυγμένων χωρών αναζήτησαν εναλλακτικές λύσεις για ασφαλτομίγματα επιφανειακών στρώσεων, πέρα από το γνωστό ασφαλτικό σκυρόδεμα (asphalt concrete). Στόχος ήταν μια απλή σχετικά κατασκευή, η οποία να παρέχει μια ομαλή και αντιολισθηρή επιφάνεια, αντοχή έναντι ρηγμάτωσης και κυρίως μεγάλη αντίσταση σε υπερβολική παραμένουσα παραμόρφωση άρα και αυξημένη διάρκεια ζωής.

Μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί διάφορες καινούργιες τεχνολογίες, κατά κοινή όμως ομολογία η περισσότερα υποσχόμενη είναι η τεχνολογία ασφαλτικών μιγμάτων τύπου SMA (Stone Mastic Asphalt) (ΕΑΡΑ, 1998). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 50% των επιφανειακών στρώσεων ευκάμπτων οδοστρωμάτων στην Γερμανία είναι τύπου SMA ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής από το 1991 έως το 1997 έχουν διαστρωθεί 1,8 εκατομμύρια τόννοι SMA.

Στην χώρα μας, παραδοσιακά οι επιφανειακές στρώσεις κατασκευάζονται από ασφαλτικό σκυρόδεμα, και τα μίγματα τύπου SMA είναι άγνωστα. Με την παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια ανασκόπηση και

παρουσίαση των μιγμάτων αυτών. Επίσης διερευνάται αν η παρούσα υποδομή της Ελλάδας επαρκεί για την μεταφορά της τεχνολογίας των μιγμάτων SMA.

Το κύριο τμήμα όμως της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι εργαστηριακό. Στόχος είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα αξιολόγησης της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων τύπου SMA με τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούνται για μίγματα ασφαλικού σκυροδέματος. Για τον σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο δοκίμια SMA στα οποία προσδιορίσθηκε η ευστάθεια και η παραμόρφωση (με την συνήθη δοκιμή Marshall). Στην συνέχεια με χρήση της συσκευής NAT (Nottingham Asphalt Tester), προσδιορίσθηκε το μέτρο δυσκαμψίας τους και η αντίσταση τους σε παραμένουσα παραμόρφωση. Επίσης με βάση τα δεδομένα από την παρασκευή των δοκιμών προσδιορίσθηκε το μέτρο δυσκαμψίας τους βάσει αλγορίθμων αναλυτικού υπολογισμού. Ως μέτρο αναφοράς για τα εργαστηριακά αποτελέσματα των μιγμάτων SMA χρησιμοποιήθηκε το τυπικό μίγμα ασφαλικού σκυροδέματος το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα στην Ελλάδα. Οι παραπάνω δοκιμές έγιναν και σε δοκίμια του συνήθους ασφαλικού σκυροδέματος το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα στην χώρα μας για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

2

ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ SMA.

2.1 Γενικά

Τα ασφαλτομίγματα SMA αναπτύχθηκαν κυρίως στην Γερμανία στα τέλη της δεκαετίας του εξήντα (ΕΑΡΑ, 1998). SMA είναι σύντμηση της γερμανικής λέξης Splittmastixasphalt το οποίο σημαίνει ασφαλική μαστίχη από θραυστά σκύρα. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή ορολογία το SMA αποδίδεται ως Stone mastic asphalt. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής όμως αποδίδεται ως Stone matrix Asphalt προς αποφυγή σύγχυσης γιατί με τον όρο mastic αποδίδεται το ασφαλικό μίγμα το οποίο χρησιμοποιείται για μονώσεις. Έχει προταθεί από την CEN (1998) (Ευρωπαϊκή επιτροπή τυποποίησης) ο εξής ορισμός :

«*Stone Mastic Asphalt* : Μη συνεχούς διαβάθμισης (gap-graded) μίγματα, με άσφαλτο ως συνδετικό, τα οποία συνίστανται από σκελετό θραυστών χονδρόκοκκων αδρανών συνδεδεμένο με κονίαμα ασφάλτου άμμου και παιπάλης (prEN 13108-5)». Η κύρια χρήση τους είναι για επιφανειακές στρώσεις.

2.2 Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη των μιγμάτων SMA ξεκίνησε στην Γερμανία στα μέσα της δεκαετίας του εξήντα για να αντιμετωπιστεί η καταστροφική δράση των ελαστικών με καρφιά (studded tires) (ΕΑΡΑ, 1998). Η κυκλοφορία ελαστικών με καρφιά δημιουργούσε το φαινόμενο της τροχαυλακώσεως (οφειλομένης σε μηχανικά αίτια) κατά την τροχιά τους στο οδόστρωμα. Η αρχική λύση συνίστατο στην επάλειψη με ασφαλική μαστίχη της παθούσας επιφάνειας και έπειτα την διάστρωση και κυλίνδρωση προθερμασμένης ψηφίδας 5/8 mm . Η ασφαλική μαστίχη είχε την εξής σύσταση : 40% - 50% κ.β. άμμο 0/2 mm - 30% - 35% παιπάλη και 25% άσφαλτος. Η διάστρωσή της γινόταν σε πολύ

υψηλή θερμοκρασία (220°C – 250°C) και απαιτούσε ειδικό εξοπλισμό, η δε αναλογία των δυο συστατικών ήταν μαστίχη 30% - ψηφίδα 70%. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά αλλά το κόστος ιδιαίτερα υψηλό. Αποφασίστηκε τότε να κατασκευαστεί ένα κανονικό ασφαλτόμιγμα με συμβατικές μεθόδους παραγωγής και διάστρωσης σύμφωνα με τις παραπάνω αναλογίες. Το μίγμα αυτό είχε την εξής σύνθεση :

- 75% ψηφίδα 5/8 mm
- 15% άμμο 0/2 mm
- 10% παιπάλη
- 7% άσφαλτος

Η θερμοκρασία διάστρωσης ήταν 180°C ενώ η διάστρωση έγινε από συμβατικό μηχάνημα οδοστρώσις. Παρατηρήθηκε όμως το φαινόμενο της αποστράγγισης της ασφάλτου από το μίγμα. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την προσθήκη ινών αμιάντου στο μίγμα, ώστε να αυξηθεί η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Το παραπάνω μίγμα είχε ιδιαίτερη αντοχή στην καταστροφική φθορά των ελαστικών με καρφιά (αλλά και γενικά στην παραμένουσα παραμόρφωση), μεγάλη διάρκεια ζωής, δεν απαιτούσε ειδικό εξοπλισμό και το κόστος του ήταν λογικό. Το μίγμα αυτό πήρε την ονομασία «Mastimac».

Αργότερα η χρήση των ελαστικών με καρφιά απαγορεύτηκε στην Γερμανία ενώ την ίδια στιγμή απαγορεύτηκε και η χρήση ινών αμιάντου, έτσι το μίγμα αυτό έπαψε να χρησιμοποιείται. Στα μέσα όμως της δεκαετίας του ογδόντα όταν το πρόβλημα της τροχαυλάκωσης έγινε πολύ έντονο το μίγμα αυτό επανήρθε, με ίνες κυτταρίνης αντί για ίνες αμιάντου, και τυποποιήθηκε με την ονομασία : *Splittmastixasphalt* (ZTV Asphalt –StB, 1984). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη του ήταν παράλληλη και σε άλλες χώρες όπως η Σουηδία και η Νορβηγία, ενώ σήμερα έχει καθιερωθεί σε πολλές χώρες του κόσμου.

2.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση η οποία χρησιμοποιείται στις διάφορες χώρες δεν απέχει πολύ από αυτήν της Γερμανίας και υπάρχουν μόνο μικρές διαφορές οι οποίες οφείλονται στις ανάγκες και την τεχνολογία κάθε χώρας.

Για παράδειγμα στην Σουηδία χρησιμοποιούν καμπύλες με ελαφρά μεγαλύτερο μέγιστο κόκκο αφού στην χώρα αυτή επιτρέπεται η χρήση των ελαστικών με καρφιά.

Οι Γερμανικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι τρεις και παίρνουν το όνομά τους από την διάμετρο του μεγίστου κόκκου : 0/11 , 0/8 , 0/5. Οι εν λόγω διαβαθμίσεις φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1

	0/11	0/8	0/5
	Διερχόμενα (%)	Διερχόμενα (%)	Διερχόμενα (%)
Κόσκινο (mm)			
0,09	9-13	8-13	8-13
2	20-25	20-30	30-40
5	30-40	30-55	90-100
8	50-60	90-100	-
11,2	90-100	-	-

Διαβάθμιση SMA στην Γερμανία (ZTV Asphalt 94/98)

Όπως γίνεται φανερό από τις διαβαθμίσεις το χαρακτηριστικό των SMA είναι το πολύ μικρό ποσοστό διερχομένου υλικού από το κόσκινο Νο 4 (30%-45% για το SMA, 50%-65% για ένα τυπικό ασφαλτικό σκυρόδεμα). Αυτό φανερώνει την έλλειψη υλικού μέσης διαβάθμισης, γι' αυτό το μίγμα ονομάζεται και μη συνεχούς διαβάθμισης (gap-graded). Μια ακόμα διαφορά της διαβάθμισης του SMA σε σχέση με αυτή του ασφαλτικού σκυροδέματος είναι το μεγαλύτερο ποσοστό παιπάλης ώστε να είναι δυνατή η συγκράτηση μεγαλύτερης ποσότητας ασφάλτου στο μίγμα, πράγμα απαραίτητο για την δημιουργία της ασφαλτικής μαστίχης.

Τα όρια της διαβάθμισης είναι σχετικά στενά καθώς μια μεγαλύτερη ποσότητα ενδιάμεσης άμμου στο μίγμα θα γέμιζε τα κενά, τα οποία υποτίθεται

ότι πρέπει να γεμίζει η ασφαλτική μαστίχη, και θα είχαμε ανάδυση της ασφάλτου στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

2.4 Χρησιμοποιούμενα αδρανή

Είναι κοινή πρακτική σε όλους τους υπάρχοντες κανονισμούς SMA να χρησιμοποιούνται αδρανή υψηλής ποιότητας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να έχουν ικανοποιητικές τιμές δείκτη αντίστασης τόσο σε τριβή και κρούση όσο και σε στίλβωσης. Συνήθως οι τιμές αυτές είναι :

- Δοκιμή σε απότριψη L.A. < 20%
- Δοκιμή σε στίλβωση PSV > 55

Οι παραπάνω τιμές είναι ενδεικτικές και ισχύουν στην Γερμανία. Σε άλλες χώρες τα όρια αυτά έχουν μικρές διαφορές αναλόγως της επάρκειας πηγών σκληρών αδρανών.

Επίσης τα αδρανή πρέπει να είναι θραυστά και μορφής όσο γίνεται κυβικής.

2.5 Χρησιμοποιούμενη ασφάλτος

Η ασφάλτος η οποία χρησιμοποιείται στις Ευρωπαϊκές χώρες είναι η κοινή ασφάλτος οδοστρώσας 50/70. Αναλόγως με τις κατά τόπους επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες επιτρέπεται και η χρησιμοποίηση τροποποιημένης ασφάλτου. Το ποσοστό ασφάλτου στο μίγμα κυμαίνεται μεταξύ 6.5% και 7% κατά βάρος μίγματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο μίγμα προστίθενται και ίνες για να αποτρέψουν την αποστράγγιση της ασφάλτου αυξάνοντας την ειδική επιφάνεια. Προστίθενται σε ποσοστό από 0,3% έως 1,5% αναλόγως του τύπου τους (ίνες κυτταρίνης, ίνες γυαλιού, ίνες ορυκτών κλπ). Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες είναι οι ίνες κυτταρίνης και προστίθενται σε ποσοστό 0,3% κατά βάρος μίγματος.

2.6 Προσδιορισμός σύνθεσης μίγματος

Η σύνθεση των μιγμάτων SMA γίνεται στο εργαστήριο με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο γίνεται η σύνθεση των ασφαλτομιγμάτων. Παρασκευάζονται δοκίμια Marshall με διάφορα ποσοστά ασφάλτου στο μίγμα

και ως βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου εκλέγεται το ποσοστό ασφάλτου εκείνο το οποίο δίδει τα επιθυμητά κενά στο μίγμα, δηλαδή συνήθως 3,5% - 4,5%. Η θερμοκρασία ανάμιξης είναι $140 \pm 5^\circ\text{C}$. Η συμπύκνωση των δοκιμίων γίνεται με 50 χτύπους της σφύρας Marshall ανά πλευρά δοκιμίου και όχι με 75 όπως συνήθως στο ασφαλτικό σκυρόδεμα. Τα μίγματα SMA αποτελούνται από ισχυρό λίθινο σκελετό και υπάρχουν δυνάμεις τριβής μεταξύ των κόκκων ώστε να απαιτείται μικρότερη ενέργεια συμπύκνωσης. Περαιτέρω συμπύκνωση με περισσότερους χτύπους επιφέρει θραύση των αδρανών. Επίσης για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα πραγματοποιηθεί αποστράγγιση της ασφάλτου, γίνονται ειδικές δοκιμές στο ποσοστό ασφάλτου που κρίθηκε βέλτιστο (Schellenberg, 1986).

2.7 Τα ασφαλτομίγματα SMA σήμερα

Τα ασφαλτομίγματα SMA χρησιμοποιούνται σήμερα από πολλές ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης αλλά και εκτός αυτής. Η κύρια χρήση τους είναι ως επιφανειακές στρώσεις σε δρόμους μεγάλης κυκλοφορίας, όπου διαστρώνονται σε ένα πάχος 3,0 έως 4,0 εκατοστών. Σε πολλές χώρες έχουν σχεδόν αντικαταστήσει τα ασφαλτικά σκυροδέματα σε στρώσεις κυκλοφορίας. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής:

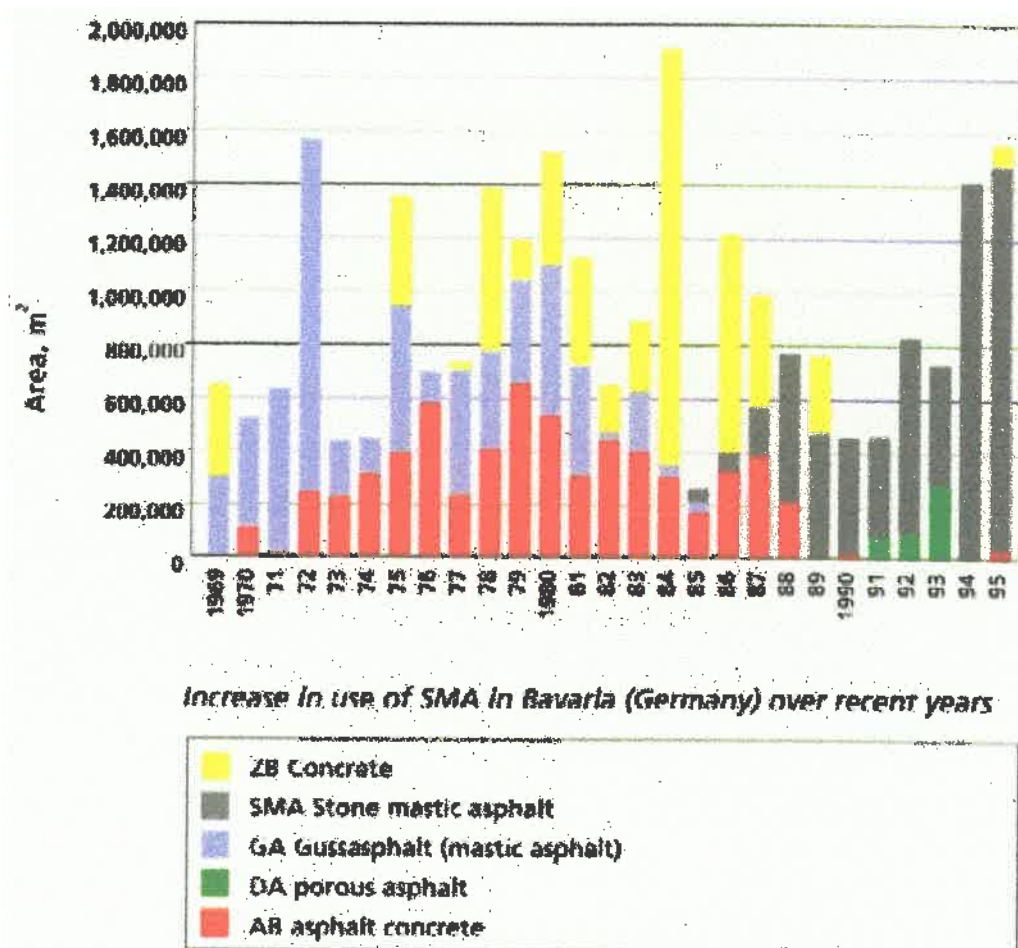
- Στην Γερμανία το 50% των στρώσεων κυκλοφορίας είναι SMA, ενώ έως το 1997 είχαν παραχθεί 7.5 χιλιάδες τόνοι οι οποίοι αντιστοιχούν σε 100 χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα επιφανείας (Rode, Erdlen, 1988). Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η εξέλιξη της χρήσης SMA στην Βαυαρία (Woltereck, 1997).
- Στην Ολλανδία χρησιμοποιείται από το 1987. Η ετήσια παραγωγή SMA είναι το 8% της παραγωγής όλων των ασφαλτομιγμάτων, ενώ το 20% των επιφανειακών στρώσεων αυτής της χώρας είναι SMA (με 25% πορώδους ασφαλτομίγματος και 40% ασφαλτικού σκυροδέματος (στοιχεία: ΕΑΡΑ, 1988).
- Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής εφαρμόζονται από το 1991. Το 1990 είχε προηγηθεί επίσκεψη εμπειρογνομώνων στην Ευρώπη από την οποία το σημαντικότερο συμπέρασμα το οποίο προέκυψε ήταν ότι επιβάλλεται η μεταφορά της τεχνολογίας SMA στις ΗΠΑ. (Report on the 1990

European study tour, 1991). Τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα είναι ενδεικτικά :

Πίνακας 2.2

Έτος	Πολιτείες που συμμετείχαν σε κατασκευή SMA	Παραγωγή SMA (ton)
1991	4	<50,000
1992	12	100,000
1993	15	200,000
1994	23	500,000
1995	28	500,000
1996/1997	30	500,000

Παραγωγή SMA στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Bukowski, 1997).



Σχήμα 2.1 Παραγωγή SMA στην Βαυαρία (Woltereck, 1997)

- Άλλες χώρες στις οποίες χρησιμοποιείται ευρέως το SMA είναι η Σουηδία (από το 1988), η Νορβηγία (από το 1985), η Ουγγαρία η Τσεχία, η Αυστραλία, η Ιαπωνία, η Φινλανδία, η Κίνα, ενώ δοκιμαστικά τμήματα κατασκευάζονται σε πολλές ακόμα χώρες.

3

Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΥΠΟΥ SMA

3.1 Απαιτήσεις επιφανειακής στρώσης

Ένα οδόστρωμα πρέπει να πληροί τις εξής απαιτήσεις :

- να έχει κατάλληλη φέρουσα ικανότητα ώστε να αντέχει στα φορτία της κυκλοφορίας που αναμένονται καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας, και
- να έχει επιφανειακές ιδιότητες που εξασφαλίζουν την ασφαλή και άνετη κίνηση των οχημάτων υπό τις διάφορες κλιματολογικές συνθήκες και μέγεθος κυκλοφοριακού φόρτου που αναμένονται.

Παραδοσιακά, η επιφανειακή στρώση έπρεπε να συνεισφέρει και στις δύο προαναφερόμενες απαιτήσεις, με τις επιφανειακές ιδιότητες να θεωρούνται λιγότερο σημαντικές από τη συνεισφορά στη φέρουσα ικανότητα. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια με τους αυξανόμενους κυκλοφοριακούς φόρτους, οι επιφανειακές ιδιότητες έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη βαρύτητα και οι λειτουργίες της επιφανειακής στρώσης και της δομικής στρώσης του οδοστρώματος εξετάζονται συχνά χωριστά. Εάν δεν απαιτείται πλέον συνεισφορά της επιφανειακής στρώσης στη δομική αντοχή του οδοστρώματος, τότε το πάχος της μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσα στα όρια που επιβάλλονται από τη διασφάλιση των απαιτούμενων ιδιοτήτων στη διεπιφάνεια οδού/τροχού για την ασφαλή κίνηση των οχημάτων.

Οι λειτουργικές ιδιότητες τις οποίες πρέπει να κατέχει μια επιφανειακή στρώση είναι οι εξής :

- Αντίσταση στην ολίσθηση
- Ομαλότητα
- Χαμηλό επίπεδο θορύβου
- Ανθεκτικότητα
- Καλή ορατότητα σε περίπτωση βροχής (αποφυγή γένεσης σταγονιδίων)

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί το πώς τα ασφαλτομίγματα SMA ανταποκρίνονται σε αυτές τις απαιτήσεις.

3.2 Αντιολισθηρότητα

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλουν στην ασφαλή κίνηση ενός αυτοκινήτου, ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες, είναι η επαρκής πρόσφυση του ελαστικού του τροχού στο οδόστρωμα. Η χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ελαστικού, η οποία παρέχει τη δυνατότητα στον οδηγό να αλλάζει διεύθυνση ή ταχύτητα ή να σταματά απότομα σε μια επικίνδυνη κατάσταση για να αποφύγει ένα ατύχημα λέγεται *αντίσταση στην ολίσθηση*. Η αντίσταση αυτή σε στεγνή επιφάνεια θεωρείται επαρκής ενώ μειώνεται σημαντικά όταν η επιφάνεια είναι βρεγμένη. Αν και οι τροχοί των οχημάτων παίζουν σπουδαίο ρόλο, η επιφάνεια αυτή καθ' αυτή συνεισφέρει κατά μεγάλο μέρος στην αντιολισθηρότητα της οδού. Τα στοιχεία της επιφανειακής στρώσης που συνεισφέρουν στην αντιολισθηρότητα είναι :

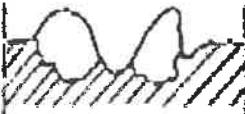
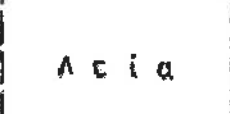
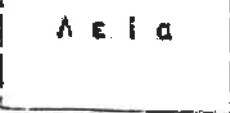
- *Μικρο-υφή (ή μικροδομή)* – οι λεπτότατοι κόκκοι της επιφάνειας των αδρανών που εισβάλουν στον υμένα του νερού και προκαλούν την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής. Το αδρανές πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά γιατί η μικρο-υφή μπορεί να λειανθεί από την κυκλοφορία.
- *Μακρο-υφή (ή μακροδομή)* – τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών ή αυλακώσεις στην επιφάνεια. Η μακρο-υφή συνεισφέρει στην αποστράγγιση του νερού από την διεπιφάνεια ελαστικού/οδοστρώματος ώστε να μπορεί ο τροχός να προσφύεται στην μικρο-υφή.

Στο σχήμα 3.1 εξηγούνται σχηματικά οι δυο έννοιες.

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση της μικρο-υφής και της μακρο-υφής, όπως η δοκιμή αντίστασης σε στίλβωση (Polished Stone Value (PSV)) και η δοκιμή κηλίδας άμμου (Sand Patch) αντίστοιχα.

Στα μίγματα SMA όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας αδρανή (με τιμές PSV > 55). Έτσι εξασφαλίζεται επαρκής μικρο-υφή και πάντως τουλάχιστο ισάξια με αυτή μιγμάτων αποτελούμενων από

εξίσου καλά αδρανή. Η μακρο-υφή όμως των SMA είναι εντονότερη αφού έχουν μετρηθεί βάθη από 1,5mm έως 2,0mm.

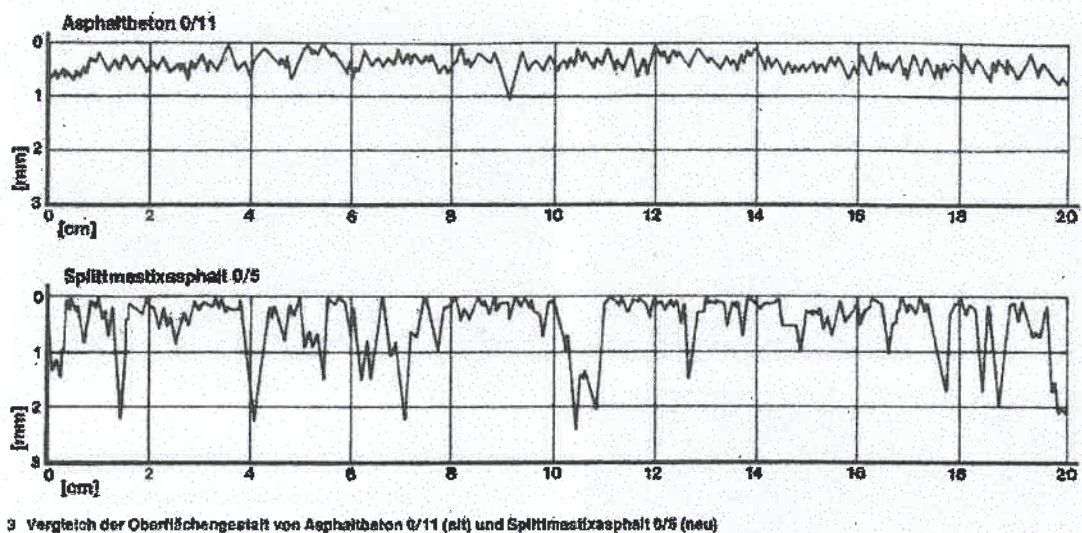
ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΦΗ (τραχύτητα)	
	Μακροδομής	Μικροδομής
Α		
Β		
Γ		
Δ		

Σχήμα 3.1 Επεξήγηση μικρο-υφής και μακρο-υφής (Κόλιας, Λοΐζος, 1992)

Ενδεικτικό είναι ότι για το ασφαλτικό σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται στην Ελλάδα ως επιφανειακή στρώση το μέγιστο βάθος επιφανειακής υφής το οποίο επιτυγχάνεται είναι 0,8mm (Νικολαΐδης, 1996).

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η διαφορά μεταξύ της μακρο-υφής ενός μίγματος SMA και ενός ασφαλτικού σκυροδέματος. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η επιφάνεια ενός μίγματος SMA όπου είναι εμφανής η μακρο-υφή.

Στην Γερμανία είναι συνήθης πρακτική να κυλινδρώνεται άβαφη ψηφίδα 0-2/5mm μετά την διάστρωση. Αυτό διότι τα αδρανή στα SMA περιβάλλονται από παχύ υμένα ασφάλτου και δίνουν χαμηλό αρχικό συντελεστή ολίσθησης. Έρευνες όμως στην Μεγάλη Βρετανία (ΕΑΡΑ, 1998) αλλά και στις ΗΠΑ (Brown et al., 1997) δεν επιβεβαιώνουν αυτή την ανάγκη.



Σχήμα 3.2 Μακρο-υφή ασφαλτικού σκυροδέματος (πάνω) και SMA (κάτω)(Bitumen,1998)



Σχήμα 3.3 Επιφάνεια SMA (λεπτομέρεια) (Brown et all, 1997)

3.3 Επίπεδα θορύβου

Όπως είναι γνωστό το επίπεδο του θορύβου ο οποίος δημιουργείται μεταξύ του τροχού και της επιφάνειας της οδού, εξαρτάται από την μακρο-υφή της επιφανειακής στρώσης. Μια επιφανειακή στρώση με επιφανειακά κενά, γνωστή και ως αρνητική υφή, έχει πολύ καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά τον θόρυβο, ιδιαίτερα σε υγρές συνθήκες.

Στον πίνακα 3.1 φαίνεται το επίπεδο θορύβου των μιγμάτων SMA ανά χώρα, σε σχέση με την συνήθη στρώση την οποία η κάθε χώρα χρησιμοποιεί (ΕΑΡΑ, 1998).

Πίνακας 3.1

Χώρα	Τύπος SMA	Μείωση dB(A)	Αναφορά
Γερμανία V = 50 km/h	0/5 , 0/8	+2,0	Ασφαλτικό σκυρόδεμα 0/11
Ιταλία V =100 km/h	0/15	+5,0 με +7,0	Ασφαλτικό σκυρόδεμα 0/15
Ολλανδία V =60-110 km/h	0/6	+1,4 με +1,6	Ασφαλτικό σκυρόδεμα 0/16
	0/8	+0,2 με +0,6	
	0/11	+0,8 με -0,5	
Μ. Βρετανία V = 70-90 km/h	0/6	+5,3 με +5,2	HRA (Θερμή Κυλινδρούμενη άσφαλτος)
	0/10	+3,5 με +3,2	
	0/14	+2,7	

Μείωση θορύβου από την χρήση SMA (ΕΑΡΑ, 1998)

Η προκύπτουσα μείωση θεωρείται πλεονέκτημα των μιγμάτων SMA έναντι του ασφαλτικού σκυροδέματος, όμως πρέπει να σημειωθεί ότι η προκύπτουσα μείωση του θορύβου είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν η οποία προκύπτει από πορώδεις επιφανειακές στρώσεις.

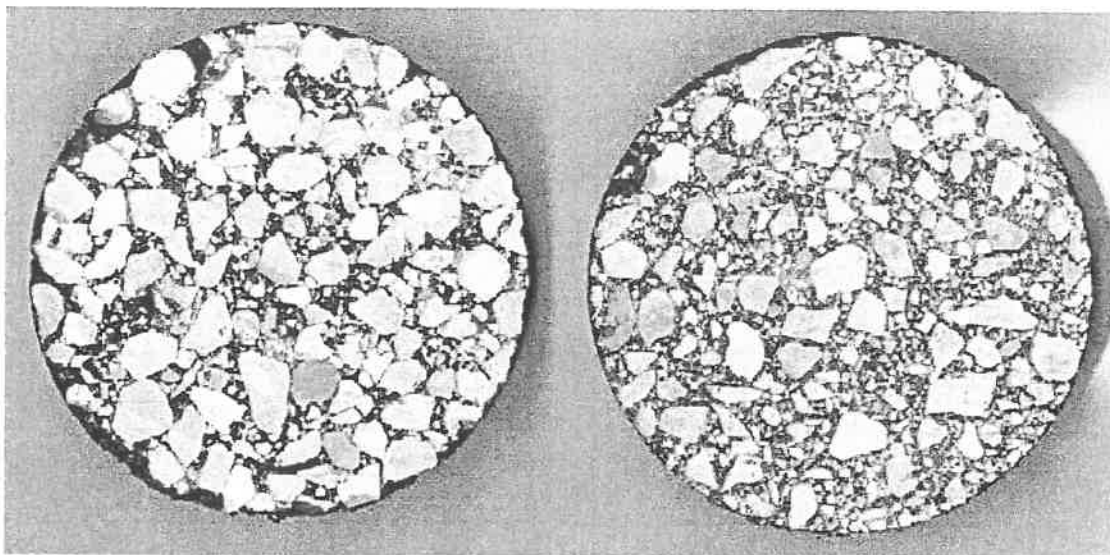
3.4 Ορατότητα

Οι τροχοί των οχημάτων σε επαφή με το νερό στην επιφάνεια του οδοστρώματος προκαλούν γένεση σταγονιδίων νερού (water spray) που μπορούν να μειώσουν σε αξιόλογο σημείο την ορατότητα του οδηγού. Στην Μεγάλη Βρετανία εκτιμήθηκε ότι από τα ατυχήματα που γίνονται εκεί σε βρεγμένο δρόμο, το 10% οφείλεται σε αυτό το φαινόμενο (Maycock, 1966). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιοριστεί με την χρήση επιφανειακής στρώσης με μεγάλο βάθος υφής. Έτσι περισσότερο νερό συγκρατείται μέσα στην επιφάνεια παρά επάνω σε αυτή. Όπως έχει λεχθεί τα ασφαλτομίγματα SMA εξασφαλίζουν αυτή την κατάλληλη υφή και περιορίζουν αισθητά το πρόβλημα.

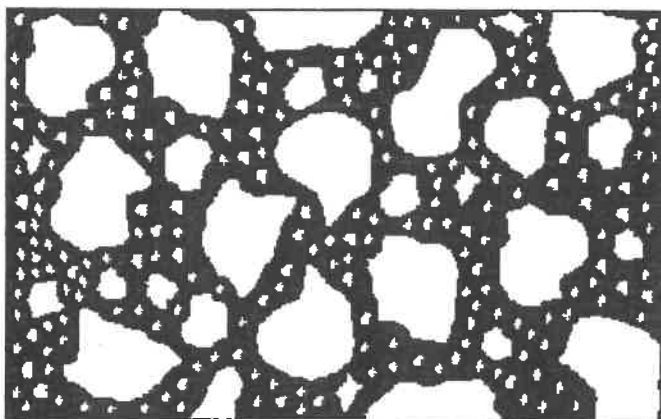
3.5 Ομαλότητα

Η ομαλότητα της επιφανειακής στρώσης αποτελεί βασικό στοιχείο για την άνεση αλλά και για την ασφάλεια των οχημάτων. Ενώ η ομαλότητα κατά τον διαμήκη άξονα οφείλεται περισσότερο στις ιδιότητες των υποκειμένων στρώσεων του οδοστρώματος (ασφαλτικές βάσεις), η ομαλότητα της επιφάνειας κατά τον εγκάρσιο άξονα οφείλεται στις ιδιότητες της επιφανειακής στρώσης. Οι παραμόρφωση κατά τον εγκάρσιο άξονα της οδού είναι γνωστή και ως τροχαυλάκωση (rutting), αφού σχηματίζεται ένα αυλάκι κατά μήκος της τροχιάς των τροχών. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί εκδήλωση της μονίμου παραμόρφωσης των ασφαλτομιγμάτων λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς το ασφαλτικού συνδετικού το οποίο περιέχουν.

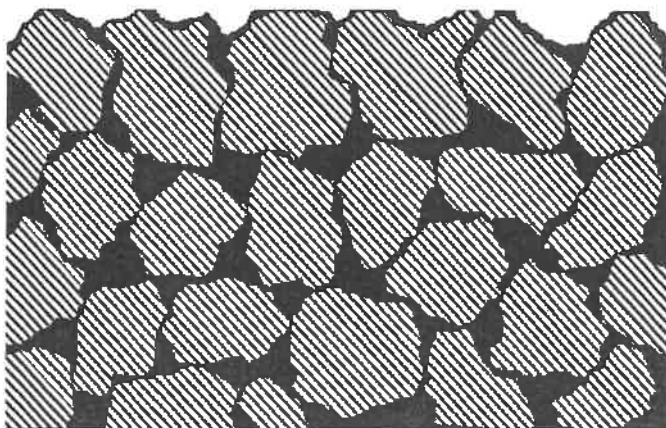
Τα μίγματα SMA είναι κατ' ουσία διαφορετικά από τα συνήθη ασφαλτικά σκυροδέματα. Αποτελούνται από έναν σταθερό σκελετό χονδρόκοκκων αδρανών, τα οποία είναι σε επαφή μεταξύ τους και έτσι δεν μετακινούνται. Τα κενά του λίθινου σκελετού πληρούνται με ασφαλτική μαστίχη, μίγμα δηλαδή ασφάλτου και λεπτών αδρανών. Οι τάσεις φέρονται λοιπόν από τον λίθινο σκελετό και διανέμονται μέσω των σημείων επαφής των αδρανών. Αντιθέτως στο ασφαλτικό σκυρόδεμα, είναι το μίγμα ασφάλτου και λεπτοκόκκων αδρανών το οποίο φέρει τα φορτία (Scherocman, 1992). Αυτό διαπιστώνεται και μέσω οπτικής παρατήρησης των δυο μιγμάτων.



Σχήμα 3.4 Σύγκριση SMA (αριστερά) και ασφαλτικού σκυροδέματος (δεξιά)



Σχήμα 3.5 Ασφαλτικό σκυρόδεμα (σχηματική αναπαράσταση)

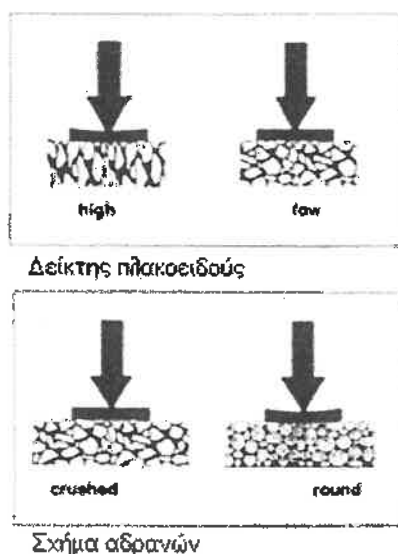


Σχήμα 3.6 SMA (σχηματική αναπαράσταση)

Όπως προκύπτει από τα σχήματα 3.4 έως 3.6 τα χονδρόκοκκα αδρανή στο ασφαλτικό σκυρόδεμα δεν είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, σε αντίθεση με το μίγμα SMA.

Η αλληλεμπλοκή και η τριβή λοιπόν των αδρανών είναι αυτή η οποία συμβάλει στην εξαιρετική αντίσταση των μιγμάτων SMA σε παραμένουσες παραμορφώσεις. Γίνονται μάλιστα προσπάθειες ώστε αυτή η αλληλεμπλοκή και τριβή των κόκκων να ποσοτικοποιηθεί και να εξασφαλίζεται από εργαστηριακή δοκιμή (Brown, Haddock, 1997).

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στα μίγματα SMA, λόγω της δομής τους (περιορισμένα σημεία επαφής) η πίεση στα σημεία επαφής είναι μεγαλύτερη από αυτή η οποία αναπτύσσεται σε ένα ασφαλτικό σκυρόδεμα για την ίδια φόρτιση. Η πιθανότητα λοιπόν λείανσης και θραύσης των αδρανών είναι μεγαλύτερη σε ένα μίγμα SMA. Από το γεγονός αυτό προκύπτει η ανάγκη για χρήση αδρανών υψηλής ποιότητας. Αυτό σημαίνει χαμηλό δείκτη απώλειας σε τριβή και κρούση ($LA < 20\%$), υψηλό δείκτη αντίστασης σε στίλβωση ($PSV > 55$), θραυστές επιφάνειες αδρανών και όσο το δυνατό μικρότερη αναλογία πλακοειδών και επιμηκών κόκκων στο μίγμα. Η επιρροή των δυο τελευταίων παραγόντων φαίνεται σχηματικά και στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Επιρροή της μορφής των αδρανών (ΕΡΑΡ, 1998)

3.6 Ανθεκτικότητα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ποσοστό της ασφάλτου το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως στα μίγματα SMA είναι της τάξης του 6,5% έως 7.0%. Τα κενά κυμαίνονται μεταξύ του 3.5% και 4,5 %. Λόγω λοιπόν της μικρής αερικής διαπερατότητας και του υψηλού ποσοστού ασφάλτου, ο ρυθμός γήρανσης (οξειδωσης) της ασφάλτου στο μίγμα είναι χαμηλός. Ελαχιστοποιείται λοιπόν η πιθανότητα αποκόλλησης αδρανών από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Αν αυτό συνδυαστεί και με την εξαιρετική συμπεριφορά του μίγματος έναντι τροχαυλακώσεως, η διάρκεια ζωής των μιγμάτων SMA εκτιμάται μεταξύ 9 και 12 ετών.

3.7 Σύνοψη της συμπεριφοράς των SMA

Όπως γίνεται φανερό από τις παραπάνω παραγράφους τα μίγματα SMA αποτελούν μια αξιόλογη εναλλακτική πρόταση για επιφανειακή στρώση, αφού προσφέρουν ασφάλεια (αντιολισθηρή επιφάνεια, καλή ορατότητα) και άνεση στην οδήγηση (ομαλότητα, χαμηλό επίπεδο θορύβου), συνδυασμένα με μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτά προκύπτουν από την αξιολόγηση ήδη κατασκευασμένων οδοστρωμάτων σε πολλές χώρες του κόσμου. Μοναδικό ίσως μειονέκτημα το αυξημένο κόστος παραγωγής, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και από το γεγονός ότι διαστρώνεται σε λεπτές στρώσεις.

4

ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΣΤΑ SMA

4.1 Γενικά

Τα κυριότερα ερωτήματα τα οποία απασχόλησαν τις χώρες οι οποίες θέλησαν να εισάγουν την τεχνολογία των μίγμάτων SMA ήταν αν :

- Η τεχνολογία αυτή είναι αποδεδειγμένη
- Αν απαιτεί ειδικά ή πρόσθετα μέσα παραγωγής ή υλικά.

Στο πρώτο ερώτημα η απάντηση είναι καταφατική (Kennepohl, 1992), (Bukowski, 1997). Στις επόμενες παραγράφους επιχειρείται μια προσέγγιση του δευτέρου ερωτήματος.

4.2 Υλικά παραγωγής

Ως γνωστόν, από άποψη υλικών, το μόνο καινούργιο το οποίο προστίθεται (σε σχέση με τα συνήθη ασφαλτικά σκυροδέματα), είναι ο παράγοντας αποτροπής της αποστράγγισης της ασφάλτου. Οι περισσότερες χώρες χρησιμοποιούν για τον σκοπό αυτό ίνες. Οι ίνες αυτές μπορεί να είναι κυτταρινικής φύσης (συνηθέστατη περίπτωση), ή ορυκτές ίνες μίγματος διαβάση και δολομίτη ή ακόμα και ίνες ύαλου. Άλλες πάλι φορές χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό τροποποιημένη άσφαλτος. Η διαθεσιμότητα πάντως τον εν λόγω υλικών στην αγορά είναι μεγάλη.

4.3 Διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος στο εργαστήριο

Όπως έχει αναφερθεί η διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος γίνεται στο εργαστήριο με την τυποποιημένη μεθοδολογία Marshall η οποία εφαρμόζεται και στα συνήθη ασφαλτομίγματα. Η επιλογή του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου καθορίζεται από το επιθυμητό ποσοστό κενών (δεν λαμβάνονται υπόψη η ευστάθεια και η παραμόρφωση) . Σε περίπτωση που

αυτά δεν μπορούν να επιτευχθούν ακολουθούνται οι εξής κανόνες (NCHRP, 1999) :

- *Για αύξηση των κενών* μειώνουμε το υλικό 4 –8 mm και αυξάνουμε το χονδρόκοκκο μέρος του υλικού κατά την ίδια ποσότητα. Δεν αλλάζουμε το λεπτόκοκκο υλικό.
- *Για μείωση των κενών* αυξάνουμε το υλικό 4 – 8 mm και μειώνουμε το χονδρόκοκκο μέρος. Δεν αλλάζουμε το λεπτόκοκκο υλικό.

4.4 Διαδικασία παραγωγής

Η διαδικασία παραγωγής του μίγματος δεν απαιτεί ειδικό εξοπλισμό. Το μίγμα SMA μπορεί να παραχθεί σε εργοστάσιο παραγωγής ανά παρτίδες (Batch plant) ή σε συγκρότημα συνεχούς ροής (Drum mixer). Οι ίνες εισάγονται μαζί με την παιπάλη, ενώ ο χρόνος ανάμιξης είναι λίγο μεγαλύτερος για να επιτευχθεί επαρκής διασπορά των ινών στο μίγμα. Αυτό όμως δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της παραγωγής.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται ώστε το παραγόμενο μίγμα να βρίσκεται εντός των ορίων της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Αλλιώς υπάρχει ο κίνδυνος υπερπλήρωσης των κενών με άσφαλτο, το οποίο θα οδηγήσει σε ανάδυση της ασφάλτου στην επιφάνεια και την δημιουργία κηλίδων (fat spots). Ταυτοχρόνως τα αδρανή θα απομακρυνθούν μεταξύ τους και θα έχουμε μια αποδυνάμωση του μίγματος.

4.5 Διάστρωση και συμπύκνωση

Η διάστρωση και η συμπύκνωση των μιγμάτων SMA δεν διαφέρει από αυτήν των κοινών ασφαλτομιγμάτων και γίνεται με συμβατικό διαστρωτή (finisher). Το πάχος της στρώσης είναι συνήθως 35 mm έως 40 mm ενώ η θερμοκρασία διάστρωσης 140°C. Σε ότι αφορά την συμπύκνωση γίνεται με στατικό οδοστρωτήρα, ο οποίος όμως πρέπει να κινείται συνεχώς και πολύ κοντά στο finisher ώστε η συμπύκνωση να γίνει σε θερμοκρασία κοντά στην θερμοκρασία διάστρωσης (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Διάστρωση και συμπίκνωση SMA

4.6 Συμπέρασμα

Όπως προκύπτει η παραγωγή και διάστρωση ασφαλτομιγμάτων τύπου SMA είναι εφικτή σε χώρες οι οποίες έχουν την υποδομή για παραγωγή κοινού ασφαλτικού σκυροδέματος. Αυτό το οποίο χρίζει ιδιαίτερας προσοχής είναι η στενή παρακολούθηση και ο ποιοτικός έλεγχος της παραγωγής του ασφαλτομίγματος, για την αποφυγή αστοχιών.

5

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

5.1 Γενικά

Ήδη από την δεκαετία του εβδομήντα, λόγω των πολλών πηγών προέλευσης και παραγωγής αργού πετρελαίου, διαπιστώθηκε μια μεταβλητότητα στις ιδιότητες της ασφάλτου, με αποτέλεσμα πρόωρες κακώσεις των ασφαλτομιγμάτων των οδών. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη βελτίωσης της ποιότητας της ασφάλτου ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα της κατασκευής. Μετά από συστηματική έρευνα εισήχθησαν στην τεχνολογία των ασφαλτομιγμάτων η τροποποιημένη άσφαλτος και η άσφαλτος με πρόσθετα.

Σύμφωνα με την PIARC έχουν δοθεί οι εξής ορισμοί (Routes/Roads, 1999) :

- *Τροποποιημένη άσφαλτος (Modified binder)* είναι η άσφαλτος της οποίας οι ιδιότητες έχουν τροποποιηθεί με την προσθήκη κάποιας χημικής ουσίας. Αυτή η χημική ουσία μεταβάλλει τις χημικές ή/και χημικές και μηχανικές ιδιότητες της ασφάλτου. Η παρασκευή της τροποποιημένης ασφάλτου γίνεται σε ξεχωριστό εργοστάσιο ή στο εργοστάσιο παραγωγής ασφαλτομίγματος ή επί τόπου στο έργο. Οι τροποποιημένες άσφαλτοι μπορούν να χαρακτηριστούν χωρίς να είναι μέρος κάποιου ασφαλτομίγματος.
- *Άσφαλτος με πρόσθετα (Bituminous binders with additives)* είναι η άσφαλτος στην οποία διάφορες ουσίες προστίθενται σ' αυτή κατά την παρασκευή ενός ασφαλτομίγματος. Η επίδραση των διαφόρων προσθέτων εκτιμάται από τις ιδιότητες του παραγομένου μίγματος.

5.2 Χρήση και ρόλος της τροποποιημένης ασφάλτου

Ο ρόλος της τροποποιημένης ασφάλτου στην οδοποιία σήμερα είναι τετραπλός. Πρώτον να αυξήσει την αντοχή του ασφαλτομίγματος σε

παραμένουσα παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες δεύτερον να βελτιώσει την ελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, τρίτον να αυξήσει το μέτρο δυσκαμψίας του και τέταρτο να αυξήσει την πρόσφυση μεταξύ ασφάλτου και αδρανών, σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών κατασκευής και λειτουργίας του έργου χωρίς να επηρεάσει αλλά αντιθέτως να βελτιώσει, εάν είναι δυνατό, και τις άλλες ιδιότητες αυτού όπως εργασιμότητα, μείωση της οξειδωσης κλπ. Σε ότι αφορά τις επιφανειακές στρώσεις βασικότερη θεωρείται η βελτίωση της ελαστικότητας του μίγματος η οποία έχει ως συνέπεια την καλύτερη συμπεριφορά σε παραμένουσα παραμόρφωση και την δυνατότητα ανάληψης μεγαλύτερων εφελκυστικών τάσεων (αποφυγή ρηγμάτωσης).

5.3 Κυριότεροι τροποποιητές – κυριότερα πρόσθετα

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα προϊόντων στην χημική βιομηχανία τα οποία προσφέρονται για τροποποιητές ή πρόσθετα της ασφάλτου. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα πολυμερή, οι φυσικές ή τεχνητές ίνες και διάφοροι υδρογονάνθρακες.

5.3.1 Πολυμερή

Σύμφωνα με τον ορισμό της IUPAC πολυμερές είναι μια ουσία τα μόρια της οποίας αποτελούνται από την επανάληψη ενός ή περισσότερων ειδών ατόμων ή ομάδων ατόμων που καλούνται δομικές μονάδες και είναι μεταξύ τους συνδεδεμένες με ομοιοπολικό δεσμό, σε ένα επαρκή αριθμό για να παρουσιάζει αυτή ένα σύνολο ιδιοτήτων, το οποίο παραμένει πρακτικώς αμετάβλητο με την προσθήκη ή αφαίρεση μιας ή περισσότερων μονάδων.

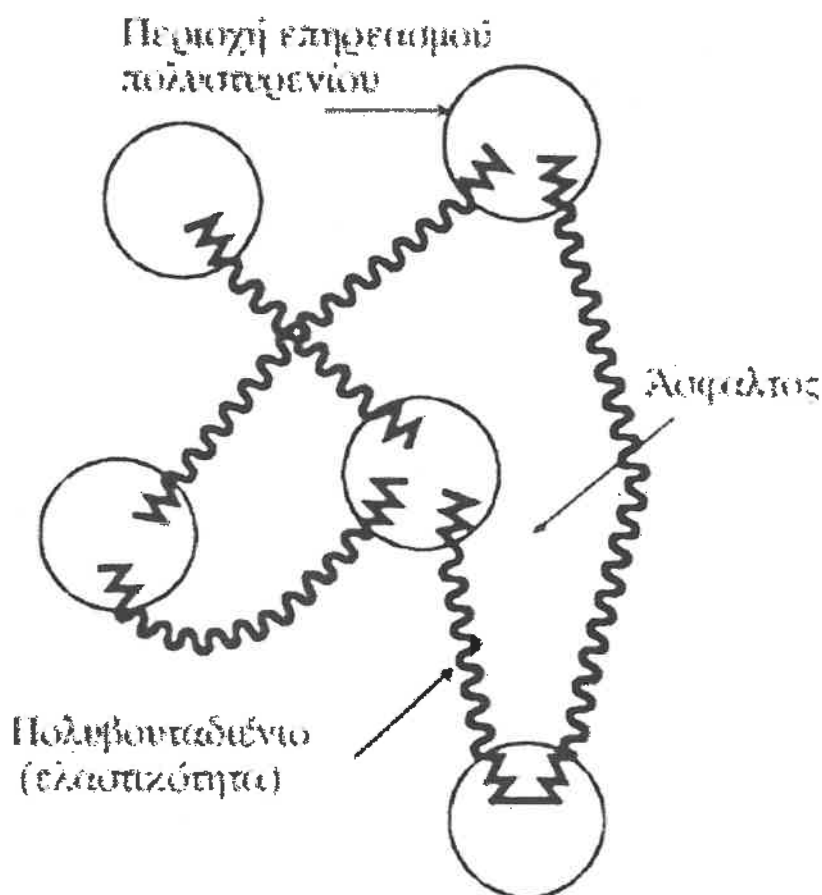
Τα πολυμερή, σε ότι αφορά θέματα τροποποίησης της ασφάλτου χωρίζονται σε τρεις ομάδες : τα ελαστομερή, τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα.

5.3.1.1 Ελαστομερή

Τα ελαστομερή είναι ελαστικά πολυμερή τα οποία μπορούν να εκταθούν με την επίδραση εφελκυστικής δύναμης και κατόπιν, μετά την απομάκρυνση της εφελκυστικής δύναμης, να επανέλθουν γρήγορα στο αρχικό

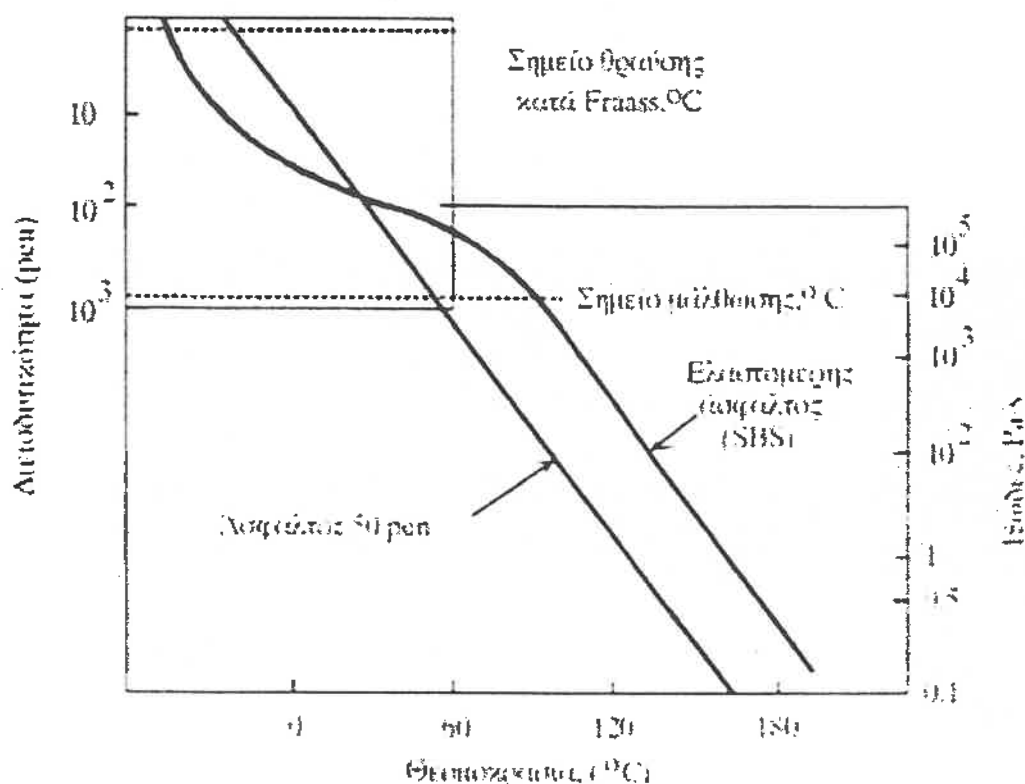
τους μήκος. Η κατηγορία των ελαστομερών περιλαμβάνει ευρύ φάσμα προϊόντων τα κυριότερα από τα οποία είναι : το φυσικό ελαστικό (NR), το συμπολυμερές στυρενίου – βουταδιενίου – στυρενίου (SBS) και το ελαστικό στυρενίου – βουταδιενίου (SBR). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι εμμέσως στην κατηγορία των φυσικών ελαστικών κατατάσσονται και τα τριμμένα παλαιά ελαστικά.

Κατά των βουλκανισμό τους τα ελαστομερή παράγουν γραμμικούς ή διακλαδισμένους δεσμούς ακτινικής μορφής ή μορφής T. Κατά την διασπορά και ενσωμάτωση του ελαστομερούς στην θερμή άσφαλτο, η άσφαλτος αρχίζει να εισχωρεί μέσα στο πολυμερές, οι δεσμοί διατηρούνται αλλά η περιοχή επηρεασμού του στυρενίου διογκώνεται. Τα ελαστομερή αντλούν την σκληρότητα και την ελαστικότητα τους από την φυσική διασταύρωση των μορίων τους στο χώρο. Η σκληρότητα προσδίδεται από το πολυστυρένιο, ενώ η ελαστικότητα από το πολυβουταδιένιο. Τυπικό παράδειγμα δομής συμπολυμερούς SBS σε άσφαλτο στον χώρο δίνεται από το σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Δομή συμπολυμερούς SBS με άσφαλτο (Vonk et al., 1993)

Η προσθήκη ελαστομερούς στην ασφάλτο μειώνει την διεισδυτικότητα και αυξάνει το σημείο μάλθωσης. Αυτό σημαίνει ότι η ασφάλτος γίνεται σκληρότερη και λιγότερο ευπαθής στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Αυτό φαίνεται και από το σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ελαστομερούς ασφάλτου σε σχέση με αυτήν της κοινής ασφάλτου (Roads/Routes, 1999).

Η επίδραση της τροποποιημένης με ελαστομερές ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα είναι η αυξημένη ελαστικότητα δηλαδή μεγαλύτερη αντίσταση τόσο σε ρηγμάτωση όσο και σε παραμένουσα παραμόρφωση.

5.3.1.2 Θερμοπλαστικά

Θερμοπλαστικά είναι τα πολυμερή τα οποία θερμαινόμενα πάνω από μια θερμοκρασία (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης) καθίστανται μαλακά και μορφοποιήσιμα ενώ με την απομάκρυνση της θερμοκρασίας σκληραίνουν και διατηρούν το σχήμα τους. Τα κυριότερα θερμοπλαστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση της ασφάλτου είναι το πολυαιθυλένιο,

το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυπροπυλένιο, το πολυστυρόλιο και τα συμπολυμερή αιθυλενίου οξικού βινυλεστέρα (EVA).

Η προσθήκη θερμοπλαστικού υλικού στην ασφάλτο αυξάνει το ιξώδες αυτής και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γίνεται πιο σκληρή. Η ελαστική συμπεριφορά της δεν βελτιώνεται σημαντικά. Ειδικότερα μειώνεται η διεισδυτικότητα και αυξάνεται το σημείο μάλθωσης. Επίσης αυξάνεται η συνδετική ικανότητα της ασφάλτου, θετική αλλαγή για την καλύτερη πρόσφυση ασφάλτου – αδρανών.

Η χρήση θερμοπλαστικής ασφάλτου για την παραγωγή ασφαλτομίγματος αυξάνει κατά κανόνα το μέτρο δυσκαμψίας του, δεν βελτιώνει όμως την ελαστική συμπεριφορά του.

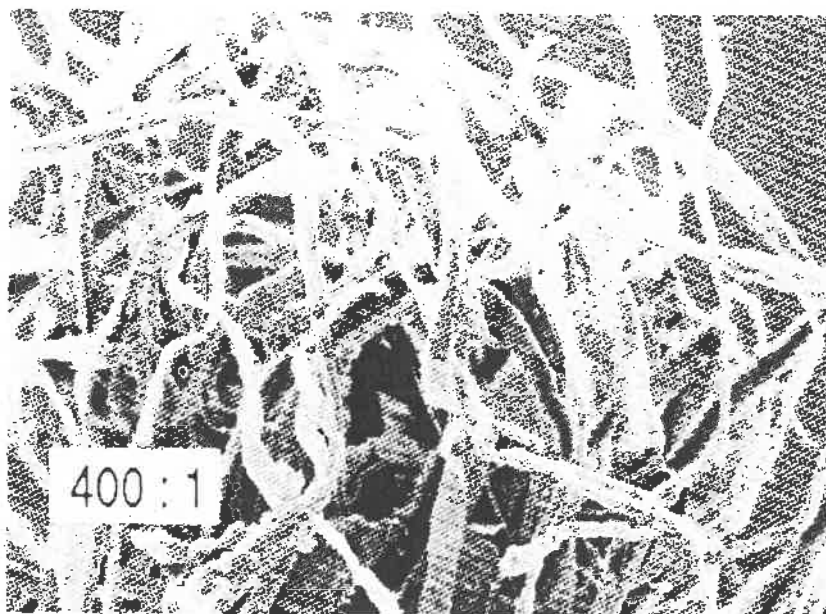
5.3.1.3 Θερμοσκληρυνόμενα

Τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι πολυμερή τα οποία μορφοποιούνται με χημική αντίδραση με την επίδραση της θερμοκρασίας και καταλύτη, σε άτηκτη, αδιάλυτη μάζα η οποία δεν μπορεί να ξαναμορφοποιηθεί, δηλαδή να καταστεί εύπλαστη με θέρμανση. Ονομάζονται συνήθως και ρητίνες. Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικό υλικό είναι η εποξειδική ρητίνη. Η εποξειδική ασφαλτος παρουσιάζει τις ιδιότητες του θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς και όχι της ασφάλτου.

Τα ασφαλτομίγματα τα οποία παρασκευάζονται με εποξειδική ασφαλτο έχουν πολύ υψηλό μέτρο δυσκαμψίας, άριστη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση και είναι περισσότερο ελαστικά με συνέπεια να παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση.

5.3.2 Ίνες

Οι ίνες γενικά χωρίζονται σε φυσικές και τεχνητές. Ως φυσικές θεωρούνται οι ίνες αμιάντου και οι ίνες κυτταρίνης, ενώ ως τεχνητές οι ίνες ύαλου, οι ορυκτές, οι σιδήρου οι πλαστικές και λοιπά. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες στην Παρασκευή ασφαλτομιγμάτων είναι οι ίνες κυτταρίνης (σχήμα 5.3)



Σχήμα 5.3 Ίνες κυτταρίνης (Roads/Routes, 1999)

Έχει αποδειχτεί ότι αυτό το οποίο επιτυγχάνεται με την χρήση ινών σε ασφαλτόμιγμα είναι η αύξηση της ειδικής επιφάνειας ώστε μεγαλύτερο ποσοστό ασφάλτου να μπορεί να κρατηθεί στο μίγμα χωρίς να διαρρεύσει, αλλά και η αύξηση του πάχους του υμένα της ασφάλτου γύρω από τα αδρανή (Harders, 1993).

Έτσι η χρήση τέτοιων ινών επηρεάζει το ασφαλτόμιγμα βραχυπρόθεσμα, με την αποτροπή της στράγγισης της ασφάλτου κατά την μεταφορά από τον χώρο παραγωγής στον χώρο διάστρωσης και μακροπρόθεσμα με την ανθεκτικότητα σε γήρανση (λόγω παχύτερου υμένα).

5.3.3 Υδρογονάνθρακες

Δύο είναι οι κυριότεροι υδρογονάνθρακες οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στην ασφαλτο οδοστρωσίας. Η ασφαλτος Trinidad (Trinidad Epuré) και το Gilsonite. Η ασφαλτος Trinidad συλλέγεται από την φυσική ασφαλτολίμνη του ομώνυμου νησιού και περιέχει περίπου 1:1 αναλογία φυσικής ασφάλτου και παιπάλης, ενώ το Gilsonite είναι φυσικός υδρογονάνθρακας σε στερεή μορφή. Και τα δυο αυτά πρόσθετα μειώνουν την διείσδυση της ασφάλτου και αυξάνουν το ιξώδες αυτής. Με άλλα λόγια

μειώνουν την θερμική ευαισθησία της ασφάλτου, βελτιώνοντας έτσι την συμπεριφορά των μιγμάτων στα οποία χρησιμοποιούνται.

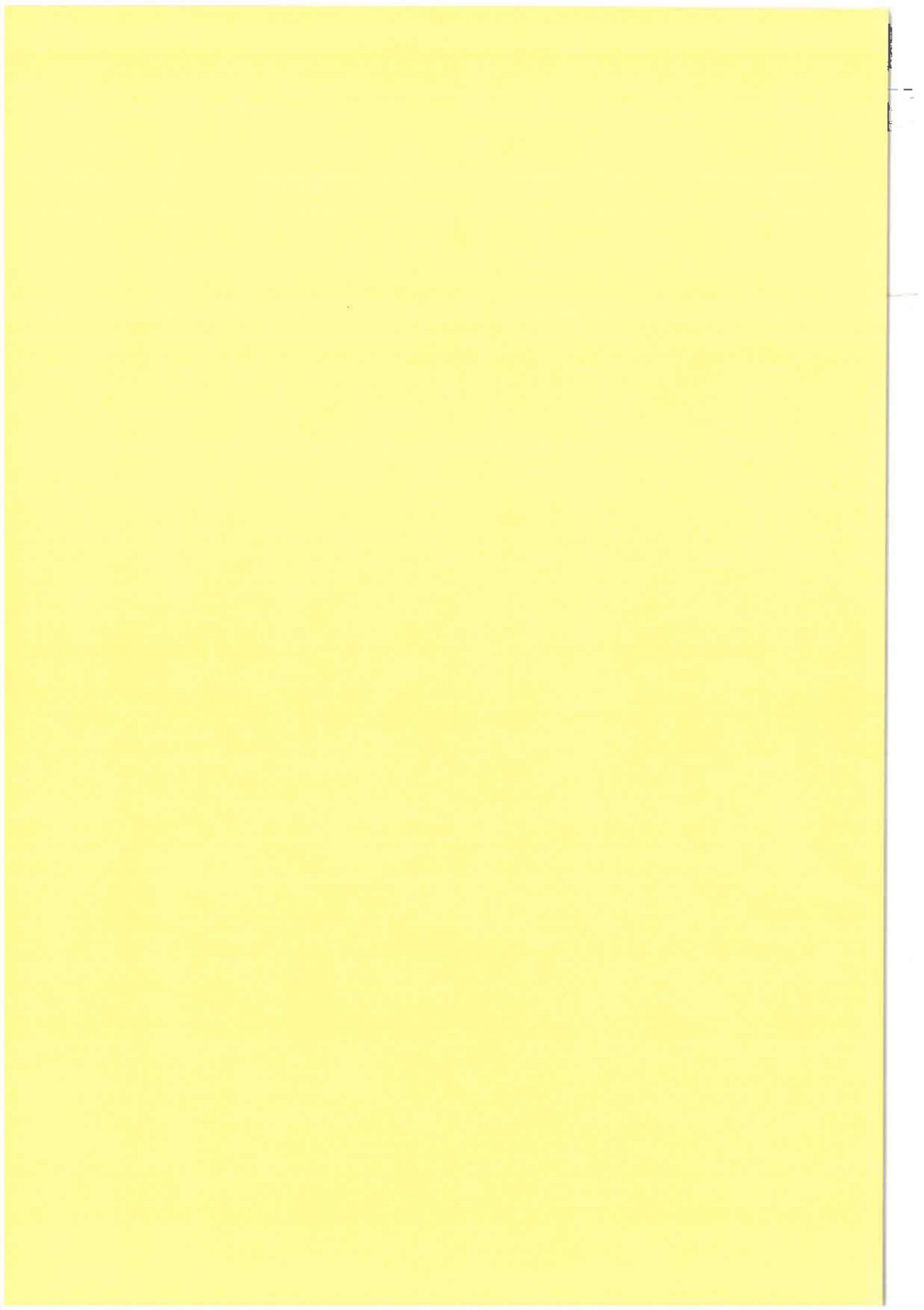
5.4 Τροποποιητικά και τροποποιημένη ασφάλτος σε μίγματα SMA

Όπως έχει αναφερθεί η χρήση ινών είναι επιβεβλημένη στα μίγματα SMA για να αποτρέπουν την αποστράγγιση του μεγάλου ποσοστού ασφάλτου το οποίο περιέχουν (Harders, 1993). Μάλιστα έχουν αναπτυχθεί και εργαστηριακές δοκιμές για να διασφαλίζουν την μη αποστράγγιση (Schellenberg, 1986).

Δεν είναι όμως λίγες οι φορές όπου την χρήση ινών υποκαθιστά η τροποποιημένη ασφάλτος.

Άλλοτε πάλι γίνεται συνδυασμένη χρήση και ινών και τροποποιημένης ασφάλτου για αποτροπή της αποστράγγισης αλλά και αύξηση του χρόνου ζωής του ασφαλτομίγματος.

Αυτό το οποίο δεν είναι ξεκάθαρο μέχρι στιγμής είναι αν η χρήση τροποποιημένης ασφάλτου επιδρά στην απόδοση και την μηχανική συμπεριφορά στα μίγματα SMA όπως συμβαίνει με τα ασφαλικά σκυροδέματα και αν ναι σε ποιο βαθμό.



6

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ SMA ΜΕΣΩ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

6.1 Γενικά

Για να αξιολογηθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των μιγμάτων SMA αλλά και της δυνατότητας να παραχθούν αυτά στην Ελλάδα έγινε τέσσερις σειρές δοκιμών SMA (ίδιας διαβάθμισης) με στοιχείο διαφοροποίησης τον τύπο της ασφάλτου καθώς και μία σειρά δοκιμών ασφαλτοσκυροδέματος παρόμοιο με αυτό το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα στην Ελλάδα σαν τελική στρώση κυκλοφορίας. Το ασφαλτοσκυρόδεμα έγινε για λόγους αναφοράς στην αξιολόγηση των SMA.

6.2 Παρασκευή και συμπύκνωση

Η Παρασκευή και οι συμπύκνωση των εν λόγω δοκιμών έγινε στο εργαστήριο δημοσίων έργων της περιφέρειας Ηπείρου στα Ιωάννινα σε συνεργασία με το προσωπικό του εργαστηρίου.

6.2.1 Αδρανή – Κοκκομετρική διαβάθμιση

Για όλα τα δοκίμια τα οποία παρασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια αδρανή. Η προέλευση τους ήταν από την περιοχή του Αώου και είχαν τα εξής χαρακτηριστικά :

Πίνακας 6.1

Χαρακτηριστικές Ιδιότητες Αδρανών	Τιμή
Ειδικό βάρος (gr/cm^3)	2,79
PSV(αντίσταση σε στίλβωση)	53
AAV(αντοχή σε απότριψη)	2,4
LA(Φθορά κατά Los Angeles)	18,5

Για τα μίγματα SMA χρησιμοποιήθηκε η κοκκομετρική καμπύλη των Γερμανικών προδιαγραφών (ZTV asphalt Stb 94) 0/8 (προσαρμοσμένη στην σειρά κόσκινων ASTM ως 3/8").

Πίνακας 6.2

Κόσκινο	Διερχόμενα	
	Όρια	Καμπύλη εφαρμογής
#200	7-12	9
#8	20-30	25
#4	30-45	37
3/8"	90-100	100

Για τα δοκίμια ασφαλτοσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η κοκκομετρική καμπύλη «Τύπος 1,συνεχούς διαβάθμισης – ημιτραχείας υφής 9,5 mm» των τεχνικών οδηγιών για την κατασκευή αντιστοιχισμένων στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα, ΚΕΔΕ 1985.

Πίνακας 6.3

Κόσκινο	Διερχόμενα	
	Όρια	Καμπύλη εφαρμογής
#200	4-10	7
#50	14-23	18
#8	32-45	38
#4	50-65	58
3/8"	88-100	93
1/2"	100	100

6.2.2 Προσδιορισμός βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου

Η άσφαλτος η οποία χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τα διυλιστήρια της Ε.Κ.Ο. στην Θεσσαλονίκη. Ύστερα από εργαστηριακές δοκιμές διαπιστώθηκε ότι τα χαρακτηριστικά της ήταν τα εξής :

Πίνακας 6.4

Χαρακτηριστικές Ιδιότητες Ασφάλτου	Τιμή
Pen @ 25°C(Δείσδυση)	67
Σημείο μάλθωσης (Ring&Ball)	48

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου στα μίγματα SMA παρασκευάστηκαν τρεις σειρές των δυο δοκιμών με ποσοστά ασφάλτου 5.5 % - 6.0% - 6.5% (κατά βάρος αδρανών). Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Πίνακας 6.5

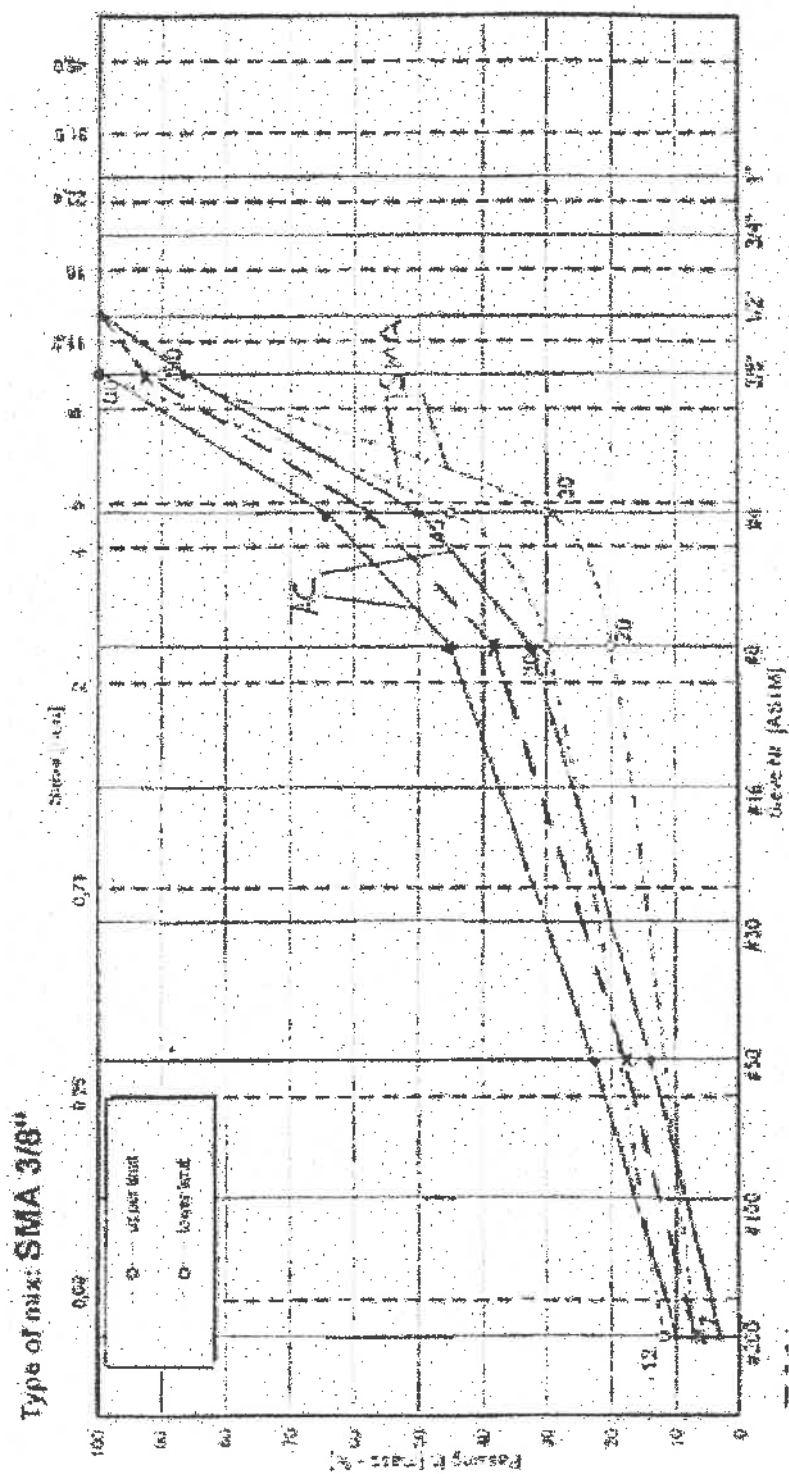
Στοιχεία δοκιμών	No1	No2	No3	No4	No5	No6
Βάρος δοκιμίου gr	1238,3	1240,6	1255,1	1252,8	1245,3	1246,3
Ύψος cm	6,51	6,58	6,49	6,47	6,42	6,41
Ένδειξη Marshall	0,89	0,87	1,00	0,99	0,98	0,99
Συντελ. Marshall	0,96	0,96	0,96	0,96	1,00	1,00
Διορθ. Marshall	0,85	0,84	0,96	0,95	0,98	0,99
Ευστάθεια (Lbs)	1376	1360	1550	1535	1582	1598
Υποχώρηση 0,01"	10,0	10,1	10,6	10,8	10,2	10,3
Όγκος cm ³	527,31	527,3	525,69	524,07	520,02	519,21
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2348	2353	2388	2391	2395	2400
Ασφαλτος στο μίγμα%	5,5/5,21	5,5/5,21	6,0/5,66	6,0/5,66	6,5/6,10	6,5/6,10
Βάρος ασφάλτου σε Kg/m ³ ασφαλ/τος	123,3	122,6	135,2	135,3	146,1	146,4
Βάρος αδρανών/m ³ ασφ/τος συμπιεσμένου	2225,7	2230,4	2252,8	2255,7	2248,9	2253,6
Όγκος συμπιεσμένων αδρανών/m ³ ασφ/τος	797,7	799,4	807,5	808,5	806,1	807,7
Συνολικός όγκος ασφάλτου & αδρανών/ m ³ συμπιεσμένου	920,0	922,0	942,7	943,8	952,2	954,1
Κενά συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος %	8,0	7,8	5,7	5,6	4,8	4,6
Κενά συμπιεσμένων αδρανών %	20,2	20,1	19,3	19,2	19,4	19,2
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με ασφαλτο %	60	61	70	71	75	76
Ειδικό βάρος αδρανών gr/cm ³	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79	2,79

Η ανάμιξη και η συμπύκνωση των δοκιμών έγινε στους 147 ° C και με 50 χτύπους κάθε πλευράς του δοκιμίου στην σφύρα Marshall όπως ορίζουν οι προδιαγραφές όλων των χωρών. Η επιλογή του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου έγινε με βάση μόνο το επιθυμητό ποσοστό κενών και ως εκ τούτου επελέγη ως βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου το 6,5 % κατά βάρος αδρανών.

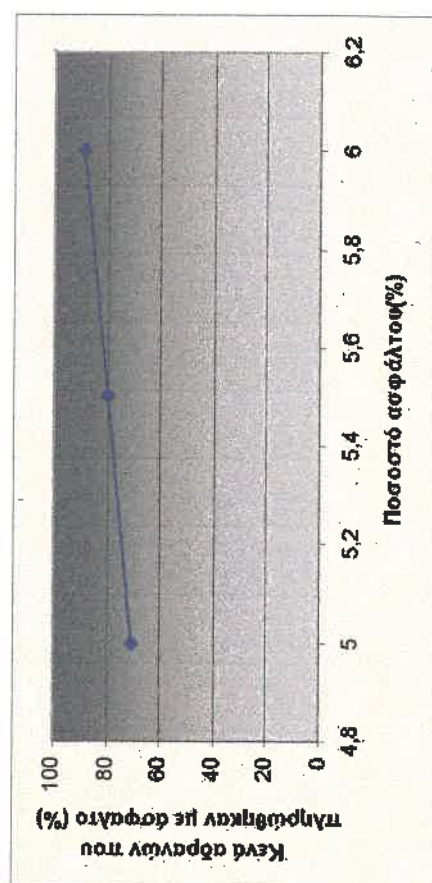
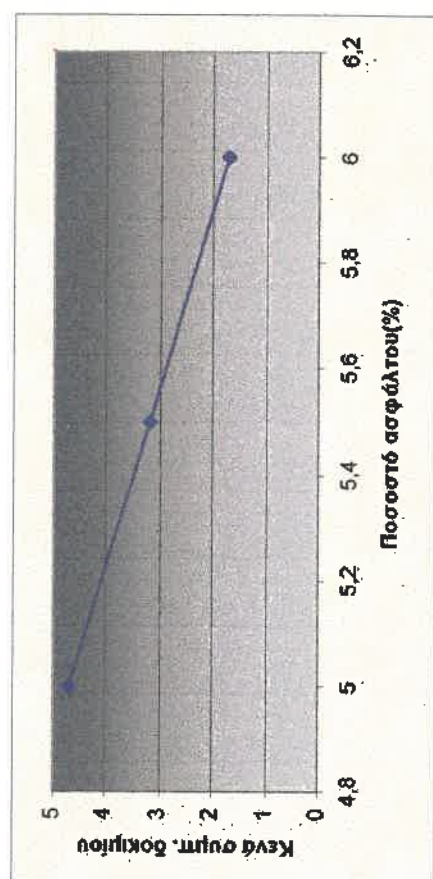
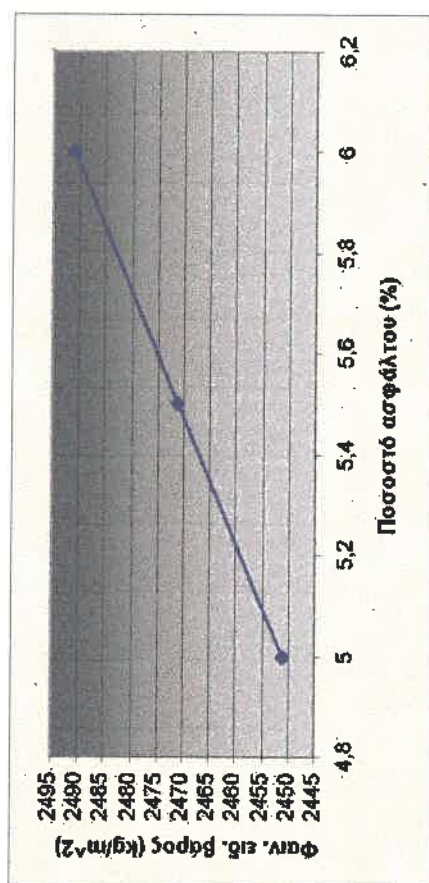
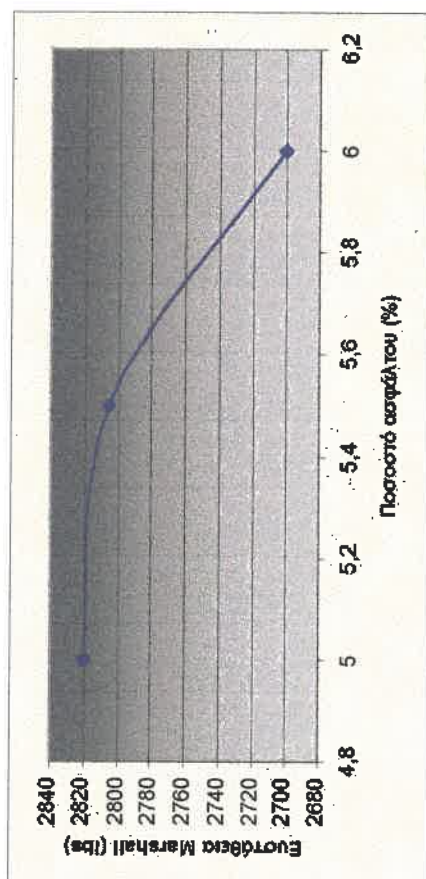
Σε ότι αφορά τα δοκίμια από ασφαλικό σκυρόδεμα για την μελέτη σύνθεσης παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια με ποσοστά ασφάλτου κατά βάρος αδρανών: 5,0% - 5.5 % -6,0 % . Τα αποτελέσματα είναι τα εξής :

Πίνακας 6.6

Στοιχεία δοκιμών	No1	No2	No3
Βάρος δοκιμίου gr	1230,9	1231,1	1251,0
Ύψος cm	6,2	6,15	6,2
Ένδειξη Marshall	1,81	1,80	1,73
Συντελ. Marshall	1,04	1,04	1,04
Διορθ. Marshall	1,88	1,87	1,80
Ευστάθεια (Lbs)	2820	2805	2700
Υποχώρηση 0,01"	12,1	13,9	15,6
Όγκος cm ³	502,2	498,2	502,2
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2451	2471	2491
Άσφαλτος στο μίγμα%	5,0/4,76	5,5/5,21	6,0/5,66
Βάρος ασφάλτου σε Kg/m ³ ασφαλ/τος	116,7	128,7	141,0
Βάρος αδρανών/m ³ ασφ/τος συμπιεσμένου	2334,3	2342,3	2350
Όγκος συμπιεσμένων αδρανών/m ³ ασφ/τος	836,7	839,5	842,3
Συνολικός όγκος ασφάλτου & αδρανών/ m ³ συμπιεσμένου	953,4	968,2	983,3
Κενά συμπιεσμένου ασφαλομίγματος %	4,7	3,2	1,7
Κενά συμπιεσμένων αδρανών %	16,3	16,1	15,8
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με άσφαλτο %	71	80	89
Ειδ.βάρος αδρανών gr/cm ³	2,79	2,79	2,79



Σχήμα 6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των μινμάτων που παρασκευάσθηκαν στο εργαστήριο (AC = ασφαλτικό σκυρόδεμα)



Σχήμα 6.2 Προσδιορισμός ποσοστού ασφάλτου για το μίγμα ασφαλτικού σκυροδέματος

Η συμπύκνωση των δοκιμίων του ασφαλτοσκυροδέματος έγινε στους 147°C με 75 χτύπους από κάθε πλευρά του δοκιμίου με την σφύρα Marshall. Ως βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου προσδιορίστηκε το 5,0 % κατά βάρος αδρανών.

6.2.3 Πρόσθετα στο ασφαλτικό συνδετικό

Για την αποφυγή της αποστράγγισης της ασφάλτου , όπως έχει εξηγηθεί, προστέθηκαν κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος ίνες κυτταρίνης στα αδρανή πριν την ανάμιξη τους με την ασφαλτο. Αυτό έγινε για όλα τα δοκίμια SMA και σε ποσοστό 0,45 % κατά βάρος ασφαλτομίγματος. Οι ίνες είχαν την μορφή μικρών βόλων και ήταν καλυμμένες με πολύ λεπτό στρώμα ασφάλτου. Αποφασίστηκε να παρασκευασθούν τέσσερις σειρές των δώδεκα δοκιμίων. Η πρώτη δεν θα περιείχε τροποποιημένη ασφαλτο ενώ οι υπόλοιπες τρεις θα περιείχαν ασφαλτο τροποποιημένη με : EVA , HMA , SBS, αντίστοιχα. Η ανάμιξη και η συμπύκνωση των δοκιμίων έγινε πανομοιότυπα με την μελέτη προσδιορισμού του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου , δηλαδή στους 147 ° C και με 50 χτύπους με τον κόπανο Marshall από κάθε πλευρά του δοκιμίου. Αναλυτικά έχουμε τα εξής :

ΣΕΙΡΑ 1

Στο μίγμα προσετέθησαν μόνο ίνες κυτταρίνης σε ποσοστό 0,45 % κατά βάρος ασφαλτομίγματος . Αυτό έγινε σε προθερμασμένα αδρανή λίγο πριν την εισαγωγή της ασφάλτου. Η χρησιμοποιούμενη ασφαλτος είχε διεισδυτικότητα 67 (Pen 67 @ 25° C) , και σημείο μάλθωσης 48° C (Trb=48° C).

ΣΕΙΡΑ 2

Στο μίγμα προσετέθησαν ίνες κυτταρίνης σε ποσοστό 0,45% κατά βάρος ασφαλτομίγματος και επίσης τροποποιητικό της ασφάλτου τύπου EVA σε ποσοστό 5% κατά βάρος ασφάλτου. Ίνες και τροποποιητικό προσετέθησαν σε προθερμασμένα αδρανή πριν την εισαγωγή της ασφάλτου. Η χρησιμοποιούμενη ασφαλτος είχε διεισδυτικότητα 45 (Pen 45 @ 25° C) , και σημείο μάλθωσης 53,5° C (Trb=53,5° C).

ΣΕΙΡΑ 3

Στο μίγμα προσετέθησαν ίνες κυτταρίνης σε ποσοστό 0,45% κατά βάρος ασφαλτομίγματος και επίσης ως τροποποιητικό της ασφάλτου μίγμα τριμμάτων παλαιών ελαστικών αυτοκινήτων και Gilsonite σε ποσοστό 10 % κατά βάρος ασφάλτου , το οποίο ήταν σε μορφή σκόνης και προσετέθη σε προθερμασμένα αδρανή πριν την εισαγωγή της ασφάλτου. Η χρησιμοποιούμενη ασφαλτος είχε διεισδυτικότητα 35 (Pen 35 @ 25° C) , και σημείο μάλθωσης 55° C (Trb=55° C).

ΣΕΙΡΑ 4

Στο μίγμα προσετέθησαν ίνες κυτταρίνης σε ποσοστό 0,45% κατά βάρος ασφαλτομίγματος χρησιμοποιήθηκε όμως ασφαλτος τροποποιημένη με SBS σε ποσοστό 5%. Η τροποποίηση έγινε στο εργαστήριο του εργοστασίου παραγωγής της ασφάλτου σε αρχική ασφαλτο 50/70 .

Η χρησιμοποιούμενη ασφαλτος είχε διεισδυτικότητα 43 (Pen 43 @ 25° C) , και σημείο μάλθωσης 54° C (Trb=54° C).

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα τα ουσιώδη χαρακτηριστικά κάθε σειράς δοκιμών κατά την ανάμιξη και την συμπύκνωση αυτών:

Πίνακας 6.7

	Θερ/σία συμπι/σης	Χτύποι/ πλευρά	Άσφαλτος (pen@25°C)	Ίνες(%κ.β.α)	Τροπ/κό ασφάλτου
ΣΕΙΡΑ1	147° C	50	67	0,45	-----
ΣΕΙΡΑ2	147° C	50	45	0,45	EVA 5% κ.β.α
ΣΕΙΡΑ3	147° C	50	35	0,45	HMA10% κ.β.α
ΣΕΙΡΑ4	147° C	50	43	0,45	SBS 5%

*** κ.β.α. = κατά βάρος ασφάλτου.**

Στην σειρά δοκιμών από ασφαλτικό σκυρόδεμα δεν χρησιμοποιήθηκαν ίνες ή τροποποιητικό και συμπυκνώθηκαν στους 147°C με 75 χτύπους από κάθε πλευρά του δοκιμίου με τον κόπανο Marshall.

6.2.4 Έλεγχος αποστράγγισης της ασφάλτου

Για να πιστοποιηθεί η καλή συμπεριφορά του μίγματος σε αποστράγγιση της ασφάλτου έγινε έλεγχος αποστράγγισης (Schellenberg ,Von der Weppen ,1986) ως εξής :

Παρασκευάστηκε ασφαλτόμιγμα βάρους 1000 gr σε θερμοκρασία ανάμιξης 147 °C και το υλικό εισήχθη σε γυάλινο δοχείο διαμέτρου 98 mm και ύψους 136 mm (DIN 12 332) το οποίο τοποθετήθηκε σε φούρνο στους 170 °C ,καλύφθηκε και παρέμεινε εκεί για μια ώρα. Στη συνέχεια αδειάσθηκε το περιεχόμενο του , ζυγίστηκε και υπολογίσθηκε η απώλεια βάρους (εκφράζεται ως ποσοστό). Η δοκιμή ορίζει ότι το ποσοστό αυτό πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,2 % έως 0,3% για να χαρακτηριστεί το μίγμα αποδεκτό. Στην προκειμένη περίπτωση είχαμε αποστράγγιση 0,27%.

Δεδομένης της καλής συμπεριφοράς του μίγματος έναντι αποστράγγισης μόνο με την προσθήκη ινών δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να επαναληφθεί η δοκιμή και με τροποποιημένη άσφαλτο.

6.2.5 Αποτελέσματα παρασκευής δοκιμών

Στους πίνακες οι οποίοι ακολουθούν (Πίνακας 6.8 έως Πίνακας 6.12) παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των παρασκευασθέντων δοκιμών.

Πίνακας 6.8

Βάρος gr	Ύψος cm	Όγκος cm ³	Φ.Ε. βάρος kg/m ³	Ασφαλτος στο μίγμα %	Βάρος σε kg/m ³	Βάρος αδρανών ανα m ³ συμπ.	Όγκος συμπ. αδρανών ανά m ³ Ασφ/τος	Όγκος ασφάλτου & αδρανών ανα m ³	Κενά συμπ.	Κενά συμπ. Αδρανών %	Κενά συμπτ. αδρανών που γερμ. με άσφαλτο
1260.2	6.48	524.9	2401	6.1	146.5	2254.5	0.81	0.9545	4.5	19.2	76.3
1253	6.44	521.6	2402	6.1	146.5	2255.5	0.81	0.9550	4.5	19.2	76.5
1175.6	5.96	482.8	2435	6.1	148.5	2286.6	0.82	0.9681	3.2	18.0	82.3
1245.4	6.4	518.4	2402	6.1	146.5	2255.8	0.81	0.9551	4.5	19.1	76.5
1255.3	6.48	524.9	2392	6.1	145.9	2245.7	0.80	0.9508	4.9	19.5	74.8
1263.4	6.58	533.0	2370	6.1	144.6	2225.8	0.80	0.9424	5.8	20.2	71.5
1252	6.46	523.3	2393	6.1	146.0	2246.7	0.81	0.9512	4.9	19.5	75.0
1251.8	6.55	530.6	2359	6.1	143.9	2215.5	0.79	0.9380	6.2	20.6	69.9
1258.7	6.57	532.2	2365	6.1	144.3	2220.9	0.80	0.9403	6.0	20.4	70.7
1249.5	6.48	524.9	2381	6.1	145.2	2235.3	0.80	0.9464	5.4	19.9	73.0
1260.9	6.46	523.3	2410	6.1	147.0	2262.7	0.81	0.9580	4.2	18.9	77.8
1259.6	6.56	531.4	2371	6.1	144.6	2225.9	0.80	0.9424	5.8	20.2	71.5

Χαρακτηριστικά δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο

Πίνακας 6.9

Βάρος gr	Ύψος cm	Όγκος cm³	Φ.Ε. βάρος kg/m³	Ασφαλτος στο μίγμα %	Βάρος ασφάλτου σε kg/m³	Βάρος αδρανών ανα m³ συμπ.	Όγκος συμπ. αδρανών ανα	Όγκος ασφάλτου& αδρανών ανα m³	Κενά συμπ.	Κενά συμπ.	Κενά συμπ. αδρανών που
						Ασφ/τος	m³ Ασφ/τος	συμπ. Ασφ/τος	Ασφ/τος %	Αδρανών %	γεμ. με άσφαλτο
1252.2	6.43	520.8	2404	6.1	146.7	2257.6	0.81	0.9558	4.4	19.1	76.9
1253.4	6.41	519.2	2414	6.1	147.3	2266.8	0.81	0.9597	4.0	18.8	78.5
1252.1	6.4	518.4	2415	6.1	147.3	2268.0	0.81	0.9602	4.0	18.7	78.7
1254.8	6.53	528.9	2372	6.1	144.7	2227.6	0.80	0.9431	5.7	20.2	71.8
1248.2	6.4	518.4	2408	6.1	146.9	2260.9	0.81	0.9572	4.3	19.0	77.5
1260.3	6.5	526.5	2394	6.1	146.0	2247.7	0.81	0.9517	4.8	19.4	75.1
1263.4	6.52	528.1	2392	6.1	145.9	2246.3	0.81	0.9511	4.9	19.5	74.9
1255.6	6.51	527.3	2381	6.1	145.2	2235.9	0.80	0.9466	5.3	19.9	73.1
1254.9	6.48	524.9	2391	6.1	145.8	2245.0	0.80	0.9505	5.0	19.5	74.7
1269.4	6.55	530.6	2393	6.1	145.9	2246.7	0.81	0.9512	4.9	19.5	74.9
1251.9	6.49	525.7	2381	6.1	145.3	2236.2	0.80	0.9468	5.3	19.9	73.2
1258.8	6.46	523.3	2406	6.1	146.7	2258.9	0.81	0.9564	4.4	19.0	77.1

Χαρακτηριστικά δοκιμών SMA με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA

Πίνακας 6.10

Βάρος gr	Ύψος cm	Όγκος cm ³	Φ.Ε. βάρος kg/m ³	Ασφαλτος στο μίγμα %	Βάρος σε kg/m ³	Βάρος αδρανών ανα m ³ συμπ.	Όγκος συμπ. αδρανών ανά m ³ Ασφ/τος	Όγκος ασφάλτου & αδρανών ανα m ³	Κενά συμπ.	Κενά αδρανών που γειμ. με ασφαλτο
1253.2	6.58	533.0	2351	6.1	143.4	2207.9	0.79	0.9348	20.9	68.7
1267.1	6.65	538.7	2352	6.1	143.5	2208.9	0.79	0.9352	20.8	68.9
1261.7	6.63	537.0	2349	6.1	143.3	2206.1	0.79	0.9340	20.9	68.5
1261.8	6.55	530.6	2378	6.1	145.1	2233.2	0.80	0.9455	20.0	72.7
1261	6.58	533.0	2366	6.1	144.3	2221.6	0.80	0.9406	20.4	70.8
1248.1	6.52	528.1	2363	6.1	144.2	2219.1	0.80	0.9395	20.5	70.5
1252.9	6.56	531.4	2358	6.1	143.8	2214.1	0.79	0.9374	20.6	69.7
1252.7	6.55	530.6	2361	6.1	144.0	2217.1	0.79	0.9387	20.5	70.1
1260.5	6.5	526.5	2394	6.1	146.0	2248.1	0.81	0.9518	19.4	75.2
1263.5	6.55	530.6	2381	6.1	145.3	2236.2	0.80	0.9468	19.8	73.2
1263.1	6.54	529.7	2384	6.1	145.4	2238.9	0.80	0.9479	19.8	73.6
1267.8	6.67	540.3	2347	6.1	143.1	2203.5	0.79	0.9329	21.0	68.1

Χαρακτηριστικά δοκιμών SMA με ασφαλτο τροποποιημένη με ΗΜΑ

Πίνακας 6.11

Βάρος gr	Ύψος cm	Όγκος cm ³	Φ.Ε. βάρος kg/m ³	Ασφαλτος στο μίγμα %	Βάρος σε kg/m ³	Βάρος αδρανών ανα m ³ συμπ.	Όγκος συμπ. αδρανών ανα m ³ Ασφ/τος	Όγκος ασφάλτου & αδρανών ανα m ³	Κεά συμπ.	Κεά συμπ. Ασφ/τος %	Αδρανών %	Κεά συμπ. αδρανών που γερμ. με ασφαλτο
1247.8	6.6	534.6	2334	6.1	142.4	2191.7	0.79	0.9279	7.2	21.4	66.4	
1230.9	6.55	530.6	2320	6.1	141.5	2178.5	0.78	0.9224	7.8	21.9	64.6	
1235.1	6.6	534.6	2310	6.1	140.9	2169.4	0.78	0.9185	8.2	22.2	63.4	
1248.5	6.54	529.7	2357	6.1	143.8	2213.1	0.79	0.9370	6.3	20.7	69.5	
1245.2	6.55	530.6	2347	6.1	143.2	2203.8	0.79	0.9331	6.7	21.0	68.1	
1248.5	6.64	537.8	2321	6.1	141.6	2179.7	0.78	0.9229	7.7	21.9	64.7	
1245.2	6.67	540.3	2305	6.1	140.6	2164.2	0.78	0.9163	8.4	22.4	62.7	
1247.9	6.61	535.4	2331	6.1	142.2	2188.6	0.78	0.9266	7.3	21.6	66.0	
1249.5	6.64	537.8	2323	6.1	141.7	2181.5	0.78	0.9236	7.6	21.8	65.0	
1237.5	6.61	535.4	2311	6.1	141.0	2170.3	0.78	0.9189	8.1	22.2	63.5	
1258.8	6.64	537.8	2340	6.1	142.8	2197.7	0.79	0.9305	7.0	21.2	67.3	
1254	6.65	538.7	2328	6.1	142.0	2186.0	0.78	0.9255	7.4	21.6	65.6	

Χαρακτηριστικά δοκιμών SMA με ασφαλτο τροποποιημένη με SBS

Πίνακας 6.12

Βάρος gr	Ύψος cm	Όγκος cm ³	Φ.Ε. βάρος kg/m ³	Ασφαλτος στο μίγμα %	Βάρος σε kg/m ³	Βάρος αδρανών ανα m ³ συμπ.	Όγκος συμπ. αδρανών ανά m ³ Ασφ/τος	Όγκος ασφάλτου & αδρανών ανα m ³	Κενά συμπ.	Κενά συμπ.	Κενά συμπ. αδρανών που γέμ. με ασφαλτο
1243.6	6.23	504.6	2464	4.76	117.3	Ασφ/τος 2347.1	0.84	0.9586	4.1	15.9	73.9
1242	6.26	507.1	2449	4.76	116.6	2332.8	0.84	0.9527	4.7	16.4	71.2
1239.4	6.25	506.3	2448	4.76	116.5	2331.7	0.84	0.9523	4.8	16.4	70.9
1237.4	6.2	502.2	2464	4.76	117.3	2346.7	0.84	0.9584	4.2	15.9	73.8
1237.2	6.12	495.7	2496	4.76	118.8	2377.0	0.85	0.9708	2.9	14.8	80.2
1239.9	6.28	508.7	2437	4.76	116.0	2321.5	0.83	0.9481	5.2	16.8	69.1

Χαρακτηριστικά δοκιμών ασφαλτικού σκυροδέματος

6.3 Ευστάθεια και παραμόρφωση Marshall

Αποφασίστηκε ότι τέσσερα δοκίμια από κάθε σειρά να ελεγχθούν με την συσκευή Marshall ως προς τις ιδιότητες τους (ευστάθεια Marshall και παραμόρφωση Marshall).

Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 6.13 έως Πίνακας 6.18)

Πίνακας 6.13

Στοιχεία δοκιμών	No3	No6	No8	No9
Βάρος δοκιμίου gr	1249,3	1261,7	1278,6	1250,2
Ύψος cm	5,96	6,58	6,55	6,57
Ένδειξη Marshall	1,00	1,03	1,02	0,99
Συντελ. Marshall	1,00	0,96	0,96	1,00
Διορθ. Marshall	1,00	0,99	0,98	0,99
Ευστάθεια (Lbs)	1614	1598	1582	1598
Υποχώρηση 0,01"	11,0	10,9	11,1	10,8
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2348	2353	2388	2391
Κενά συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος %	4,8	4,98	5,1	4,8
Κενά συμπιεσμένων αδρανών %	19,4	19,6	19,6	19,4
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με άσφαλτο %	75	75	74	75

Ιδιότητες Marshall δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο

Πίνακας 6.14

Στοιχεία δοκιμών	No3	No4	No8	No11
Βάρος δοκιμίου gr	1247,3	1267,3	1264,0	1261,1
Ύψος cm	6,40	6,53	6,51	6,49
Ένδειξη Marshall	1,24	1,27	1,26	1,28
Συντελ. Marshall	1,00	0,96	0,96	0,96
Διορθ. Marshall	1,24	1,22	1,21	1,23
Ευστάθεια (Lbs)	1996	1964	1948	1980
Υποχώρηση 0,01"	12,3	11,8	12,5	12,1
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2406	2396	2397	2399
Κενά συμπίεσμένου ασφαλτομίγματος %	4,3	4,7	4,7	4,6
Κενά συμπίεσμένων αδρανών %	19,0	19,4	19,3	19,3
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με ασφαλτο %	77	76	76	76

Ιδιότητες Marshall δοκιμών SMA με τροποποιημένη ασφαλτο EVA

Πίνακας 6.15

Στοιχεία δοκιμών	No4	No9	No10	No11
Βάρος δοκιμίου gr	1252,6	1241,5	1254,2	1245,7
Ύψος cm	6,55	6,50	6,55	6,54
Ένδειξη Marshall	1,20	1,23	1,21	1,23
Συντελ. Marshall	0,96	0,96	0,96	0,96
Διορθ. Marshall	1,15	1,18	1,16	1,18
Ευστάθεια (Lbs)	1853	1900	1868	1900
Υποχώρηση 0,01"	11,1	10,8	10,9	10,8
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2361	2358	2364	2353
Κενά συμπίεσμένου ασφαλτομίγματος %	6,1	6,3	6,0	6,5
Κενά συμπίεσμένων αδρανών %	20,5	20,6	20,4	20,8
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με ασφαλτο %	70	69	71	69

Ιδιότητες Marshall δοκιμών SMA με τροποποιημένη ασφαλτο HMA

Πίνακας 6.16

Στοιχεία δοκιμών	No2	No3	No7	No10
Βάρος δοκιμίου gr	1236,7	1233,8	1238,2	1252,9
Ύψος cm	6,55	6,60	6,67	6,61
Ένδειξη Marshall	1,10	1,14	1,09	1,07
Συντελ. Marshall	0,96	0,96	0,96	0,96
Διορθ. Marshall	1,06	1,09	1,05	1,03
Ευστάθεια (Lbs)	1590	1635	1575	1545
Υποχώρηση 0,01"	13,7	14,4	14,0	13,9
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2331	2329	2335	2340
Κενά συμπίεσμένου ασφαλτομίγματος %	7,3	7,4	7,2	6,9
Κενά συμπίεσμένων αδρανών %	21,6	21,6	21,4	21,2
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με ασφαλτο %	66	66	66	67

Ιδιότητες Marshall δοκιμών SMA με τροποποιημένη ασφαλτο SBS

Πίνακας 6.17

Στοιχεία δοκιμών	No1	No2	No3
Βάρος δοκιμίου gr	1249,2	1274,4	1261,3
Ύψος cm	6,30	6,45	6,35
Ένδειξη Marshall	1,86	1,85	1,89
Συντελ. Marshall	1,00	1,00	1,00
Διορθ. Marshall	1,86	1,85	1,89
Ευστάθεια (Lbs)	2790	2775	2835
Υποχώρηση 0,01"	12,1	12,4	12,0
Φ.Ε.Βάρος Kg/m ³	2448	2775	2452
Κενά συμπίεσμένου ασφαλτομίγματος %	4,8	5,1	4,6
Κενά συμπίεσμένων αδρανών %	16,4	16,7	16,3
Κενά Συμπ. Αδρανών που γεμίστηκαν με ασφαλτο %	71	69	72

Ιδιότητες Marshall δοκιμών ασφαλτικού σκυροδέματος

Πίνακας 6.18

	Ευστάθεια Marshall		Παραμόρφωση Marshall	
	Lbs.	Newton	0,01"	mm
SMA	1598	7108	10,95	2,7
SMA+EVA	1972	8770	12,18	3,1
SMA+HMA	1880	8362	14,00	3,6
SMA+SBS	1586	7055	14,00	3,6
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	2800	12455	12,20	3,1

Σύνοψη αποτελεσμάτων δοκιμής Marshall

6.4 Σχόλια – Συμπεράσματα

Παρακάτω αναφέρονται σχόλια και συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν κατά την παρασκευή και συμπύκνωση των δοκιμίων, καθώς και από τον έλεγχο των ιδιοτήτων Marshall

6.4.1 Σχόλια στην διαδικασία ανάμιξης και συμπύκνωσης των δοκιμίων

- Η προσθήκη των ινών κυτταρίνης δεν αποτέλεσε πρόβλημα κατά την ανάμιξη, ενώ δεν παρατηρήθηκαν συσσωματώματα ινών στο δείγμα κάτι το οποίο θα αποτελούσε δείγμα κακής ανάμιξης. Ο χρόνος ανάμιξης δεν αυξήθηκε λόγω των ινών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ίνες είναι σε μορφή μικρών βόλων καλυμμένων με ασφαλτο ώστε να εξασφαλίζεται η γρήγορη και αποτελεσματική διασπορά τους στο μίγμα.
- Η χρήση τροποποιημένης ασφάλτου έκανε το ασφαλτικό συνδετικό πιο σκληρό ώστε να απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια κατά την ανάμιξη (περισσότερη ενέργεια και περισσότερος χρόνος). Στην περίπτωση του SBS ο σχετικός εξοπλισμός του εργαστηρίου απαιτούσε συχνό καθαρισμό με διαλύτη γιατί τα υπολείμματα της ασφάλτου δεν απομακρύνονταν μόνο με θέρμανση πράγμα το οποίο προκάλεσε καθυστέρηση. Στην περίπτωση επίσης του HMA η έντονη οσμή 'καμένου ελαστικού'

προκαλούσε αίσθημα δυσφορίας (σημειωτέον ότι το ΗΜΑ περιέχει και τρίμματα παλαιών ελαστικών αυτοκινήτων).

- iii. Η συμπίκνωση των δοκιμών SMA με 50 χτύπους ανά πλευρά δοκιμίου (πράγμα στο οποίο συμφωνούν οι προδιαγραφές όλων των χωρών) σε αντίθεση με τα δοκίμια ασφαλτικού σκυροδέματος στα οποία οι χτύποι ήταν 75. Θεωρείται ότι τα μίγματα SMA λόγω του ισχυρού λίθινου σκελετού τους απαιτούν μικρότερη ενέργεια συμπίκνωσης, ενώ παραπάνω χτύποι οδηγούν σε θραύση των αδρανών. Στο εργαστήριο έγινε δοκιμαστικά μελέτη προσδιορισμού βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο σε δοκίμια SMA και συμπίκνωση και με 75 χτύπους και το αποτέλεσμα ήταν για το ίδιο ποσοστό ασφάλτου να έχουμε κενά από 3,6% μέχρι 3,2% . Το γεγονός αυτό δείχνει ότι από κάποιο σημείο μετά τους 50 χτύπους το δοκίμιο δεν συμπυκνώνεται άλλο και αρχίζει η θραύση των αδρανών.

6.4.2 Σχόλια στα αποτελέσματα ευστάθειας και παραμόρφωσης

- iv. Η ευστάθεια των δοκιμών SMA κρίνεται χαμηλή σε σύγκριση με αυτή των δοκιμών από ασφαλτικό σκυρόδεμα . Η ευστάθεια είναι αυξημένη όταν γίνεται χρήση τροποποιημένης ασφάλτου.
- v. Οι τιμές της παραμόρφωσης Marshall δεν φαίνονται διαφορετικές από αυτές των μιγμάτων ασφαλτικού σκυροδέματος .

7

ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

7.1 Γενικά

Η συνολική συμπεριφορά ενός ευκάμπτου οδοστρώματος εξαρτάται ως γνωστόν σημαντικά από την επιμέρους συμπεριφορά των υλικών των ασφαλικών στρώσεων που το αποτελούν. Η παράμετρος η οποία είναι δυνατόν να εκφράσει συνολικά και ποσοτικά την φέρουσα ικανότητα του ασφαλτομίγματος που συνθέτει την ασφαλική στρώση είναι η δυσκαμψία του.

Μια αναλυτική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οποιασδήποτε κατασκευής βασίζεται στην γνώση των θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών από τα οποία πρόκειται να κατασκευασθεί καθώς και στην γνώση, γενικότερα της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών. Ως θεμελιώδης μηχανικές ιδιότητες μπορούν να χαρακτηριστούν το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε εφελκυσμό, η αντοχή σε θλίψη, σε κόπωση κλπ. Κάτι αντίστοιχο υπάρχει και στην αναλυτική προσέγγιση διαστασιολόγησης των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Σε ότι λοιπόν αφορά τα ασφαλτομίγματα τρεις είναι οι βασικές ιδιότητες οι οποίες πρέπει να καθοριστούν: η σχέση τάσης – παραμόρφωσης του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση φορτίου, η αντοχή σε κόπωση (ή αντοχή σε ρηγμάτωση) και η αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση. Το πρώτο εκφράζεται με το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, το δεύτερο με την μέγιστη ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση για ρηγμάτωση (εξίσωση κόπωσης) και το τρίτο με το στατικό (ιξώδες) μέτρο δυσκαμψίας. Η βασική διαφορά με άλλες κατασκευές, πχ. χάλυβα, είναι ότι το ασφαλτόμιγμα δεν συμπεριφέρεται ως υλικό ελαστικό αλλά ως ιξωδοελαστικό λόγω της παρουσίας της ασφάλτου. Τα άλλα υλικά του όπως τα συμπυκνωμένα αδρανή και το έδαφος μπορούν να χαρακτηριστούν ως ελαστικά.

7.2 Περί μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων

Το ασφαλτόμιγμα εμπεριέχει δυο υλικά με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά . Την άσφαλτο με ιξωδοελαστική, κάτω από συνήθεις συνθήκες φόρτισης, και τα συμπυκνωμένα αδρανή με ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της άσφαλτου υπερισχύει και έτσι το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται και αυτό, κάτω από τις συνθήκες φόρτισης, ως ιξωδοελαστικό υλικό. Η μεγάλη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων των συστατικών του ασφαλτομίγματος καθώς και των αναλογιών αυτών στο μίγμα, κάνουν την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς ακόμα πιο δύσκολη υπόθεση.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι το ασφαλτόμιγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από την θεμελιώδη χαρακτηριστική ιδιότητα των ελαστικών υλικών που εκφράζεται με το μέτρο ελαστικότητας (E). Στην περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων, κατ' αντιστοιχία με την άσφαλτο, χρησιμοποιείται ο όρος *μέτρο δυσκαμψίας* (stiffness modulus), όρος ο οποίος προτάθηκε από τον Van der Poel (Van der Poel , 1954). Η χαρακτηριστική και θεμελιώδης αυτή ιδιότητα εξαρτάται (σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας όπου η παραμόρφωση εξαρτάται μόνο από το επιβαλλόμενο φορτίο) και από την θερμοκρασία (T) και από τον χρόνο φόρτισης (t) . Το μέτρο δυσκαμψίας υπολογίζεται από την παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση :

$$S_m = (\sigma / \epsilon)_{T,t}$$

όπου σ = επιβαλλόμενη τάση

ϵ = αντιστοιχούσα ανηγμένη παραμόρφωση.

7.2.1 Χρόνος φόρτισης οδοστρωμάτων

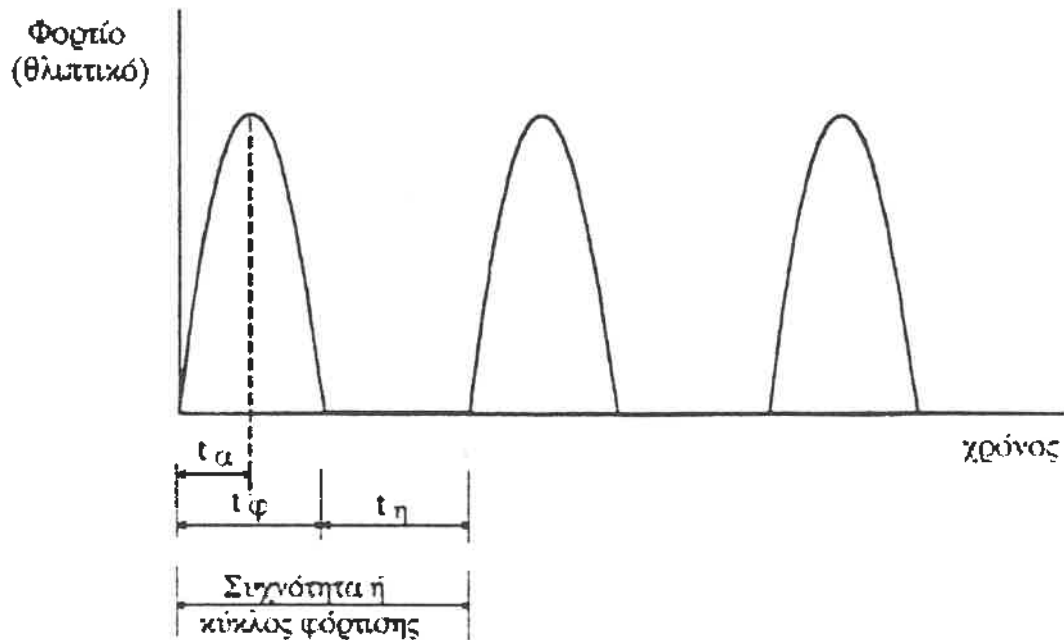
Η επιβολή του φορτίου από τα κινούμενα οχήματα σε ένα τυχαίο σημείο του οδοστρώματος γίνεται για χρονικό διάστημα ανάλογο της ταχύτητας του αυτοκινήτου και αναμφισβήτητα είναι επαναλαμβανόμενη. Η ανάπτυξη της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης δηλαδή η μορφή της καμπύλης «επαναλαμβανόμενο φορτίο (ή τάση) – χρόνος φόρτισης» είναι επίσης άλλη

μια βασική παράμετρος για των καθορισμό των «ελαστικών» ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων. Η κάθετη τάση η οποία αναπτύσσεται από ένα κινούμενο φορτίο τροχού, σε οποιοδήποτε βάθος του οδοστρώματος, θεωρείται ότι έχει περίπου την μορφή μιας ημιπεριόδου ημιτονοειδούς καμπύλης. Αντίστοιχη είναι και η μορφή της καμπύλης της ανηγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της διάρκειας φόρτισης. Η συχνότητα επανάληψης είναι πάντοτε μεγαλύτερη του χρόνου που απαιτείται για να αναπτυχθεί και να μηδενιστεί η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση. Έτσι, η προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης στο εργαστήριο γίνεται με την χρήση δυναμικής φόρτισης συγκεκριμένης συχνότητας ή ρυθμού ή παλμού της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 7.1(α).

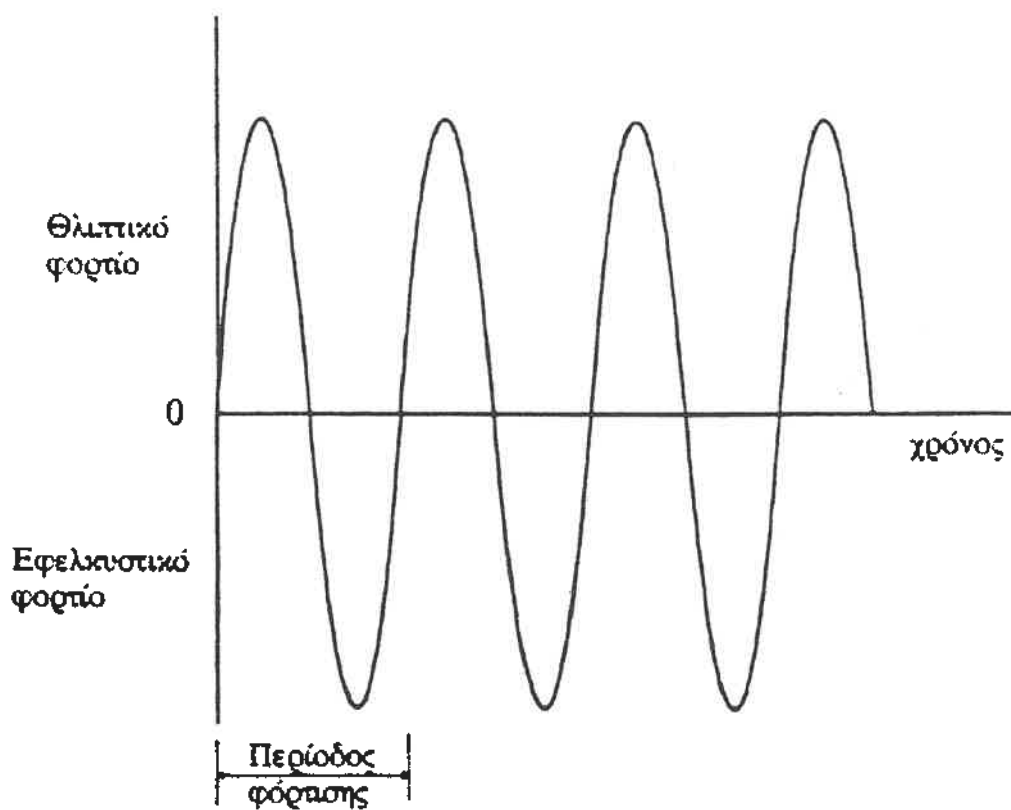
Στην παλμική φόρτιση μορφής μισής ημιτονοειδούς καμπύλης επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα και κατόπιν μεσολαβεί μια μικρή περίοδος ηρεμίας (τη) ή ανάκτησης. Ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να λάβει το φορτίο την μέγιστη επιθυμητή τιμή ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time) (t_a), ενώ ο συνολικός χρόνος φόρτισης/αποφόρτισης ονομάζεται χρόνος φόρτισης (t_F), συνήθως ο χρόνος αυτός 0,1 sec. έως 0,4 sec. Ο συνολικός χρόνος $t_a + t_F$ ονομάζεται ταχύτητα παλμού και μετριέται σε sec ή Hz. Η συχνότητα παλμού συνήθως είναι από 3 έως 1 sec. Το στάδιο φόρτισης/αποφόρτισης και ηρεμίας μαζί κάνουν ένα πλήρη κύκλο φόρτισης. Μεταξύ δύο φορτίσεων η προκληθείσα παραμόρφωση σε καθαρώς ελαστικά υλικά ανακτάται πλήρως.

Μια άλλη μορφή φόρτισης που χρησιμοποιείται στις εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων είναι η μορφή πλήρους ημιτονοειδούς καμπύλης (αρμονικής) (σχήμα 7.1(β)). Στην περίπτωση της πλήρους ημιτονοειδούς φόρτισης επιβάλλεται θλιπτική και εφελκυστική δύναμη (φορτίο) δίχως να υπάρχει περίοδος ηρεμίας. Το πλάτος της ημιτονοειδούς καμπύλης καθορίζει το μέγεθος του επιθυμητού φορτίου και η συχνότητα αυτής τη συχνότητα φόρτισης.

Και οι δύο τύποι δυναμικής φόρτισης θεωρούνται ικανοποιητικοί για την προσομοίωση της φόρτισης που υφίσταται το ασφαλτόμιγμα στην πράξη.



(α) Παλμική φόρτιση τριγωνικής μορφής

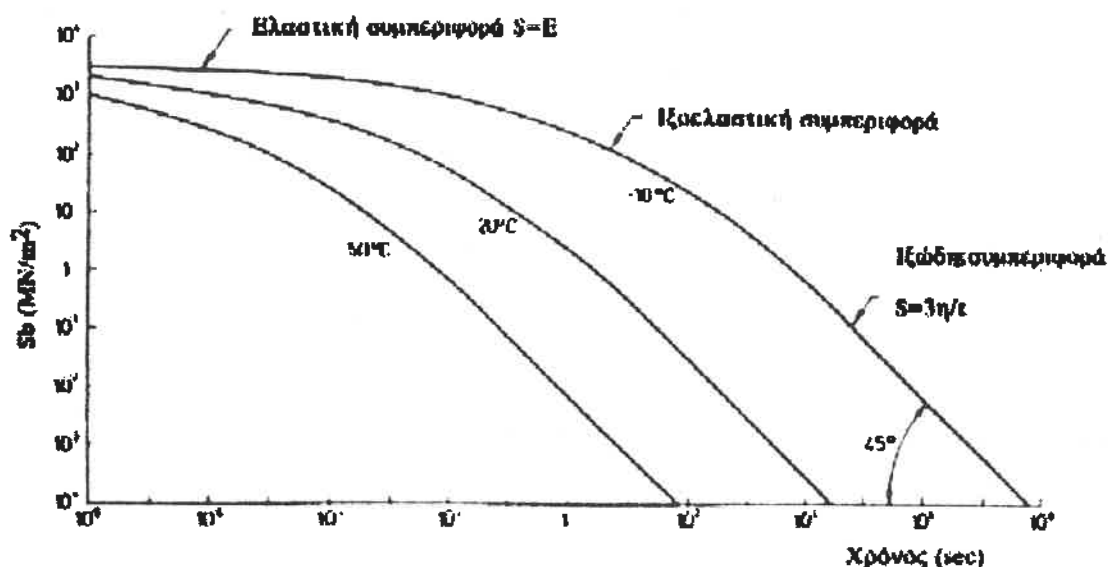


(β) Ημιτονοειδής φόρτιση (αρμονική)

Σχήμα 7.1 Τυπικές μορφές φόρτισης για εργαστηριακές δοκιμές
(Νικολαΐδης, 1996)

7.2.2 Επιρροή της θερμοκρασίας φόρτισης στην δυσκαμψία ασφαλτομιγμάτων

Όπως έχει αναφερθεί η μεταβλητότητα του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων είναι συνάρτηση και της θερμοκρασίας φόρτισης. Αυτό οφείλεται στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου. Όπως φαίνεται από το σχήμα 7.2 σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και όταν ο χρόνος φόρτισης είναι πολύ μικρός η συμπεριφορά της ασφάλτου είναι ελαστική (απεικόνιση με ευθεία γραμμή) και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου λαμβάνει την μέγιστη τιμή. Αντιθέτως, όταν ο χρόνος φόρτισης είναι πολύ μεγάλος ή/ και οι θερμοκρασίες πολύ υψηλές η ασφαλτος συμπεριφέρεται ως καθαρά ιξώδες υλικό (απεικόνιση με κεκλιμένη ευθεία 45°). Στο ενδιάμεσο διάστημα, όπως προαναφέρθηκε, η συμπεριφορά είναι ιξωδοελαστική. Οι αυξομειώσεις αυτές επηρεάζουν κατ' επέκταση τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων.



Σχήμα 7.2 Μηχανική συμπεριφορά της ασφάλτου συναρτήσει του χρόνου φόρτισης και της θερμοκρασίας (Pell, 1985)

7.3 Περί μέτρησης δυσκαμψίας στο εργαστήριο

Ο καθορισμός του μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο γίνεται με συσκευές οι οποίες δύνανται να επιβάλλουν δυναμικό φορτίο, μορφής μιας από τις δυο προαναφερθείσες, σε δοκίμιο συμπυκνωμένου ασφαλομίγματος. Υπάρχει πληθώρα πειραματικών διατάξεων οι σημαντικότερες όμως και πιο διαδεδομένες είναι δυο : η δοκιμή έμμεσης διάτμησης με επαναλαμβανόμενο φορτίο και η μονοαξονική δοκιμή με επαναλαμβανόμενο φορτίο.

7.3.1 Δοκιμή έμμεσης διάτμησης με επαναλαμβανόμενο φορτίο

Η δοκιμή αυτή αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ (Schmidt ,1972) από την δοκιμή έμμεσης διάτμησης η οποία εκτελείται εδώ και πολλά χρόνια στο σκυρόδεμα. Προδιαγράφεται μάλιστα από την προδιαγραφή ASTM D 4123 (1982). Αναλυτικότερα, στην δοκιμή αυτή επιβάλλεται παλμική φόρτιση κατά μήκος της καθέτου διαμέτρου κυλινδρικού δοκιμίου (διαμέτρου 100 mm) . Το επιβαλλόμενο φορτίο επιφέρει μια οριζόντια και εφελκυστική τάση (-σ_ψ) και μια κάθετη (+σ_χ). Εφ' όσον ισχύουν και οι παραδοχές ότι : οι τάσεις που αναπτύσσονται βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, το υλικό είναι ελαστικό, ομοιογενές και ισότροπο η εντατική κατάσταση προκύπτει από την θεωρία που προτάθηκε από τον Frocht (Frocht , 1957) και είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 7.3.

Μετρώντας την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που ανακτάται κατά τη διάρκεια του χρόνου αποφόρτισης και γνωρίζοντας το αρχικό επιβαλλόμενο φορτίο, υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας (σε MPa) από την σχέση :

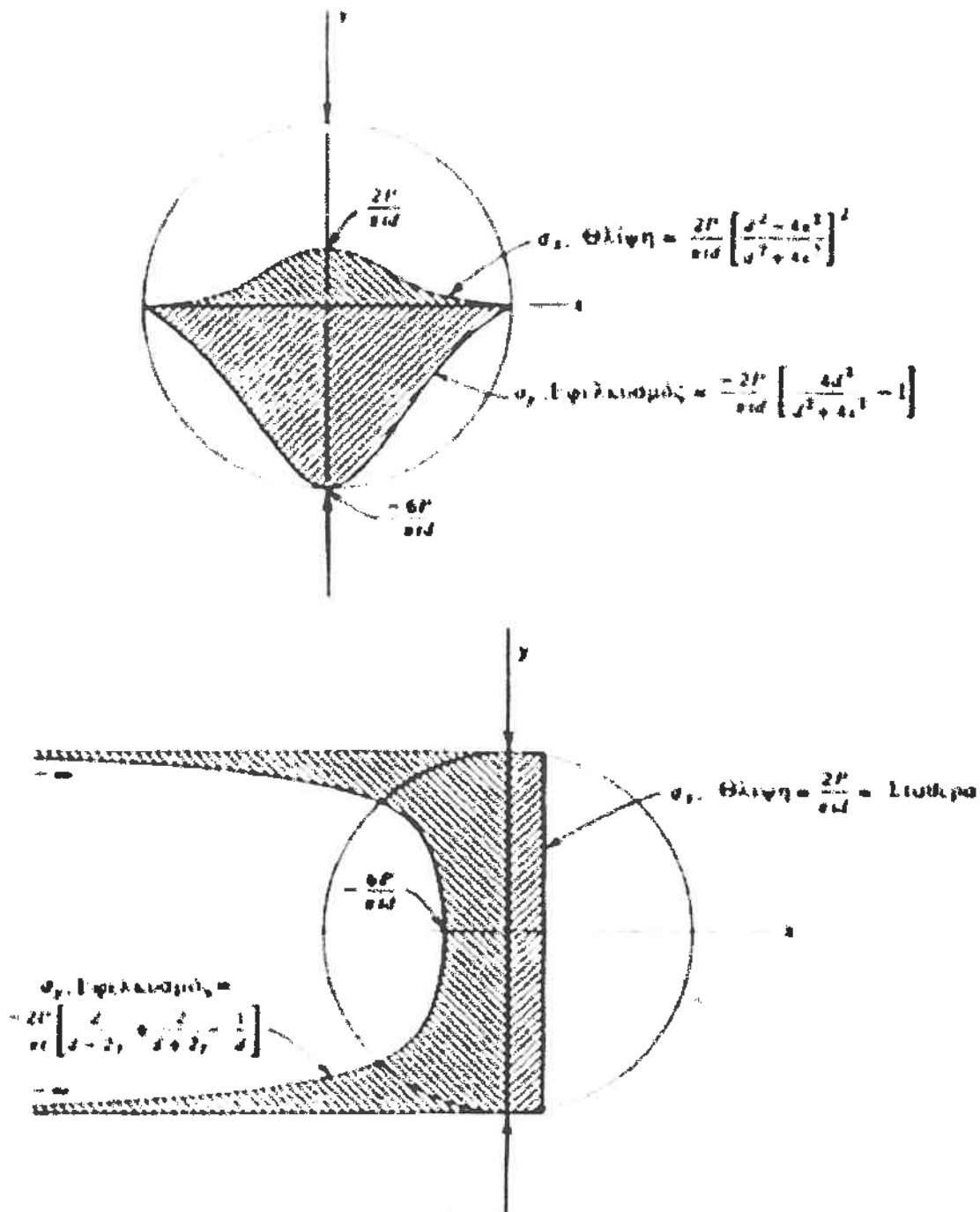
$$E_t = P(\mu + 0.27) / (t \cdot \Delta \ln)$$

όπου : P= επιβαλλόμενο φορτίο (N)

μ= λόγος Poisson

t= πάχος δοκιμίου (mm)

Δln= η ανακτώμενη παραμόρφωση στον κύκλο φόρτισης η
(η= 1,2,3..., συνήθως η=5)



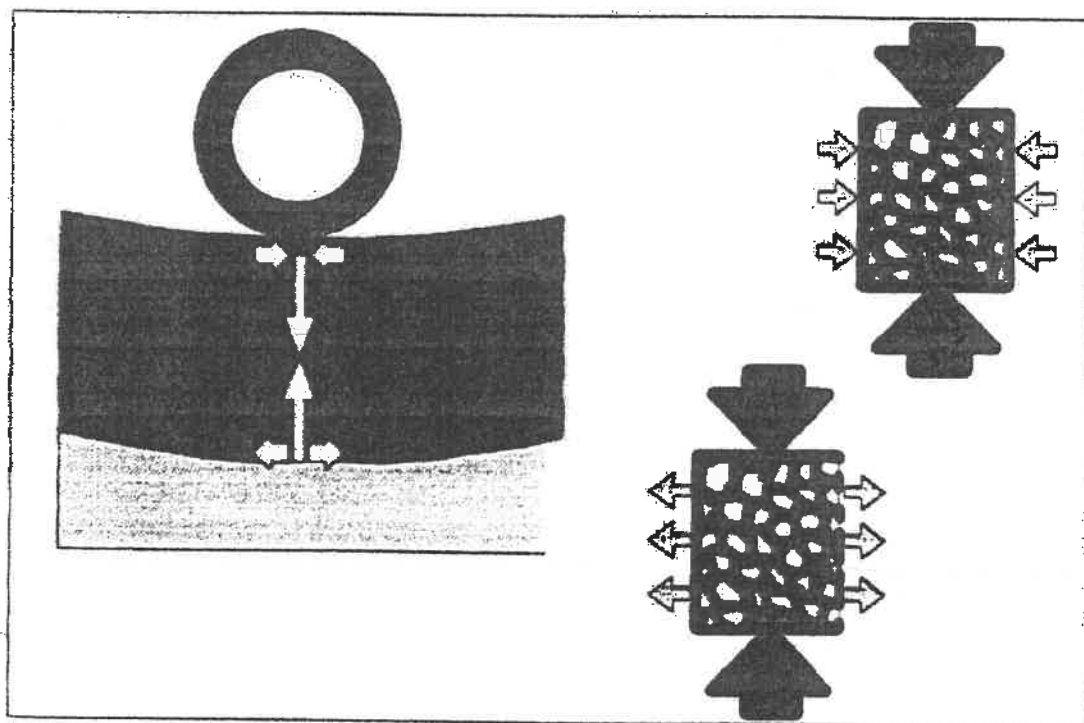
Σχήμα 7.3 Κατανομή τάσεων σε οριζόντιο και κατακόρυφο διαμετρικά επίπεδα για έμμεση δοκιμή εφελκυσμού κατά Frocht (Yoder, Witczack, 1987)

Πέντε κύκλοι φόρτισης θεωρούνται ικανοποιητικοί για επιβαλλόμενα φορτία από 22.24 έως 111.21 N. Ως μέτρο δυσκαμψίας λαμβάνεται ο μέσος όρος των πέντε μετρήσεων. Συνιστάται όπως χρησιμοποιούνται τρία τουλάχιστο δοκίμια από το ίδιο μίγμα και από κάθε δοκίμιο να λαμβάνονται

δύο τιμές μέτρου δυσκαμψίας, μία σε τυχούσα θέση και μια αφού περιστραφεί το δοκίμιο κατά 90°. Η τελική αντιπροσωπευτική τιμή του ελαστικού μέτρου δυσκαμψίας είναι ο μέσος όρος των λαμβανομένων τιμών.

Η θερμοκρασία ελέγχου πρέπει να διατηρείται σταθερή και ομοιόμορφα κατανεμημένη στο δοκίμιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση θερμοθαλάμου ακριβείας που περιβάλλει όλη την συσκευή μέτρησης. Οι θερμοκρασίες ελέγχου είναι συνήθως 5°C, 20°C και 5°C. Ο δε χρόνος φόρτισης καθορίζεται από τον κατασκευαστή και συνιστάται να είναι 0.33, 0.5 και 1 Hz.

Η δοκιμή έμμεσης διάτμησης με επαναλαμβανόμενο φορτίο προσομοιώνει την εντατική κατάσταση του κάτω μέρους των ασφαλικών στρώσεων οι οποίες βρίσκεται σε κατάσταση εφελκυσμού όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.4 (Von Quintus ,Scheroman, Hughes 1989).



Σχήμα 7.4 Σχηματική παράσταση εντατικής κατάστασης οδοστρώματος (Cooper, 1993)

Πρέπει να τονισθεί ότι το μέτρο δυσκαμψίας το οποίο υπολογίζεται από αυτή την δοκιμή ονομάζεται *επανατακτικό μέτρο δυσκαμψίας (Resilient modulus)*.

7.3.2 Μονοαξονική δοκιμή με επαναλαμβανόμενο φορτίο

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται επίσης για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας ασφαλομιγμάτων. Μάλιστα η δυσκαμψία όπως προσδιορίζεται με την δοκιμή αυτή καλείται δυναμικό μέτρο (dynamic modulus).

Η δοκιμή ονομάζεται επίσης δοκιμή μιγαδικού (ή σύνθετου) μέτρου (complex modulus). Το μιγαδικό μέτρο E^* , ορίζεται σαν ο μιγαδικός αριθμός ο οποίος συσχετίζει τάση και παραμόρφωση για ένα γραμμικό ιξωδοελαστικό υλικό, που υπόκειται σε ημιτονοειδή φόρτιση. Η απόλυτη τιμή του $|E^*|$ καλείται δυναμικό μέτρο.

Οι δοκιμές αξονικού μέτρου ασφαλομιγμάτων διεξάγονται σε ανεμπόδιστα δοκίμια, χρησιμοποιώντας ημιτονοειδής τάσεις, οι οποίες εφαρμόζονται μονοαξονικά. Οι αξονικές παραμορφώσεις μετρούνται συνεχώς με την βοήθεια συσκευών καταγραφής.

Η ημιτονοειδής τάση είναι :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$$

όπου σ_0 = το εύρος της τάσης (ΜΡα)

ω = η γωνιακή ταχύτητα (ακτίνια ανά δευτερόλεπτο)

t = ο χρόνος (sec)

Η προκύπτουσα ημιτονοειδής ανακτώμενη ανηγμένη παραμόρφωση ε είναι :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

όπου ε_0 = το εύρος της ανακτώμενης θλιπτικής ανηγμένης παραμόρφωσης

φ = η διαφορά φάσης (μοίρες).

Η διαφορά φάσης είναι απλά η γωνία κατά την οποία η ε_0 διαφέρει από την σ_0 :

$$\varphi = t_i/t_p \text{ (360}^\circ\text{)}$$

όπου t_i = η χρονική διαφορά ανάμεσα σε ένα κύκλο ημιτονοειδούς τάσης και
ένα κύκλο παραμόρφωσης

t_p = ο χρόνος για έναν κύκλο τάσης

Το μιγαδικό μέτρο είναι εξ ορισμού :

$$E^* = E' + i E'' \quad \text{ή}$$

$$E^* = |E^*| e^{i\phi}$$

όπου : E' αναφέρεται στο πραγματικό μέρος του μιγαδικού μέτρου

E'' αναφέρεται στο φανταστικό μέρος του μιγαδικού μέτρου

Για ένα ελαστικό υλικό $\phi = 0$ και έτσι :

$$E^* = |E^*| = \sigma_0/\epsilon_0$$

Έτσι, όπως σημειώθηκε, το δυναμικό (ή ελαστικό) μέτρο ενός ασφαλτομίγματος (αγνοώντας την επίδραση του ιξώδους) μπορεί να προσδιοριστεί με τον λόγο του εύρους της τάσης αιχμής προς τον λόγο της παραμόρφωσης αιχμής από την δοκιμή μιγαδικού μέτρου.

Η δοκιμή γίνεται σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm και διπλάσιου ύψους (200 mm), σε θερμοκρασίες 5, 25 και 40 °C . Το εύρος του φορτίου είναι από 0 έως 241 kPa ενώ η συχνότητα φόρτισης είναι 1, 4 και 16 Hz για κάθε θερμοκρασία. Οι παραμορφώσεις μετρώνται με ηλεκτρικές γέφυρες ανίχνευσης παραμορφώσεων (strain gauges) οι οποίες επικολλώνται επί της διαμέτρου του δοκιμίου στο μέσον του ύψους του.

Η παραπάνω δοκιμή έχει αναγνωριστεί ως πρότυπη για τον καθορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων (γράμμικώς ιξωδοελαστικά σώματα) και περιγράφεται αναλυτικά από την προδιαγραφή ASTM D 3497 (1979).

7.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός δυσκαμψίας μιγμάτων SMA

Για να γίνει εφικτή η αξιολόγηση των μιγμάτων SMA από πλευράς μηχανικών χαρακτηριστικών μετρήθηκε η δυσκαμψία τους στο εργαστήριο. Ως αναφορά μετρήθηκε και η δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα στην χώρα μας ως επιφανειακή στρώση (τύπος 1 τεχνικών οδηγιών ΚΕΔΕ).

7.4.1 Προσδιορισμός μέτρου δυσκαμψίας με την συσκευή NAT

Η μέτρηση της δυσκαμψίας με την συσκευή NAT έγινε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ τον Ιανουάριο του 2000. Έγινε με την χρήση της συσκευής NAT (Cooper research technology Ltd.) ενώ ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM D 4123. Χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια τα οποία περιγράφονται στους πίνακες 6.8 έως 6.12 , δηλαδή δοκίμια SMA με διαφορετικό ασφαλτικό συνδετικό (τροποποιημένη άσφαλτος ή μη) καθώς και δοκίμια ασφαλτικού σκυροδέματος.

Η δοκιμή για κάθε δοκίμιο έγινε σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες : την μέση θερμοκρασία δωματίου (22°C), μια χαμηλή($\approx 6^{\circ}\text{C}$) και μια υψηλή θερμοκρασία($\approx 37^{\circ}\text{C}$). Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γινόταν με την χρήση ενός δοκιμίου θερμοκρασίας (δοκίμιο με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό θερμόμετρο) η οποία καταγραφόταν ανά δοκιμή, ενώ η διαδικασία μέτρησης σε θερμοκρασίες εκτός αυτής του δωματίου γινόταν εντός θερμοθαλάμου.

Ο λόγος του Poisson ελήφθη $\nu = (0,25) , (0,35) , (0,45)$ στους (6°C) , (22°C) , (37°C) αντίστοιχα. Κάθε δοκίμιο μετρήθηκε δυο φορές ως προς την δυσκαμψία του, κατά δυο διαμέτρους οι οποίες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 45° (σύμφωνα με τις συστάσεις του SHRP P07).

Στους πίνακες 7.1 έως 7.5 αναφέρονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανά δοκίμιο και αναφέρεται και η θερμοκρασία του δοκιμίου στην θερμοκρασία φόρτισης, καθώς και η διεύθυνση φόρτισης. Στους πίνακες 7.6 έως 7.10 αναφέρονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων (ανά δοκίμιο και διεύθυνση φόρτισης) ανηγμένα όμως σε κοινή θερμοκρασία για να μπορεί να γίνει στατιστική επεξεργασία τους. Επίσης (πίνακες 7.6 έως 7.10) αναφέρονται

και η μέση τιμή των μετρήσεων, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας για κάθε διεύθυνση μέτρησης. Η δεύτερη μέτρηση γίνεται για να επαληθεύσει την πρώτη και για αυτόν το λόγο δεν πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους πάνω από 10 %. Σε αντίθετη περίπτωση η δεύτερη μέτρηση επαναλαμβάνεται και αν πάλι υφίσταται διαφορά αναφέρονται και οι δύο τιμές. Στα σχήματα 7.6 έως 7.9 μπορεί κανείς να δει αντιπροσωπευτικές τιμές δυσκαμψίας των εξεταζομένων μιγμάτων (αναφέρονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων κατά την διεύθυνση (α), δηλαδή την πρώτη μέτρηση σε κάθε δοκίμιο, ενώ στα σχήματα 7.12 έως 7.14 την τυπική απόκλιση και στα σχήματα 7.10 έως 7.14 τον συντελεστή μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε μίγματος. Στα σχήματα 7.15 έως 7.16 φαίνεται η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με την θερμοκρασία ενώ στο σχήμα 7.17 είναι ένα τυπικό output του προγράμματος το οποίο χρησιμοποιεί η συσκευή NAT.



Σχήμα 7.5 Η συσκευή NAT

Πίνακας 7.1

Χαμηλή Θερμοκρασία			Μέση Θερμοκρασία			Υψηλή Θερμοκρασία		
a	t	b	t	a	t	b	a	t
8787	7,2	8767	7,2	2914	22,3	2881	434	37
11650	6,5	11640	6,5	2723	22,3	2682	378	35,7
13241	5,8	12913	6,2	2953	22,3	2786	367	36,5
12012	5,1	12407	5,6	2759	22,3	2633	320	35,2
10769	6,4	11555	6,6	2874	22,3	2772	473	34,5
							278	36
							304	35,4
							335	35,7
							269	34,9
							430	34,1

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) ασφαλτικού σκυροδέματος (Μρα)

Πίνακας 7.2

Χαμηλή Θερμοκρασία				Μέση Θερμοκρασία				Υψηλή Θερμοκρασία			
a	t	b	t	a	t	b	t	a	t	b	t
9540	7,8	10076	8	3087	22,3	3142	22,3	365	35,6	450	34,9
9123	7,5	9274	7,6	2881	22,3	2995	22,3	412	36	336	36
11939	7,4	10845	7,9	2949	22,3	2654	22,3	327	34,6	275	34,3
12469	6,9	12150	7	3255	22,3	3179	22,3	447	37	452	36,8
11504	6,8	11448	7	2914	22,3	2720	22,3	384	34,1	439	33,7

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίνιματος SMA με κοινή άσφαλτο (Μρα)

Πίνακας 7.3

Χαμηλή Θερμοκρασία				Μέση Θερμοκρασία				Υψηλή Θερμοκρασία			
a	t	b	t	a	t	b	t	a	t	b	t
13791	5	14458	5,4	3592	22,3	3521	22,3	424	37,4	432	36,8
11700	6,6	11291	6,7	3154	22,3	3011	22,3	426	40,4	344	39,1
12768	6	12649	6,1	3404	22,3	3838	22,3	506	35,3	506	35
12632	6,7	11938	7	3954	22,3	3614	22,3	512	38,6	450	38
12350	6,1	12150	6,2	3806	22,3	3664	22,3	466	34	501	33,7

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (EVA 5%) (MPa)

Πίνακας 7.4

Χαμηλή Θερμοκρασία				Μέση Θερμοκρασία				Υψηλή Θερμοκρασία			
a	t	b	t	a	t	b	t	a	t	b	t
12885	5,1	13288	5,1	3763	22,3	3871	22,3	474	37,6	431	37,2
10490	7	9841	7,2	3382	22,3	3826	22,3	499	40,5	497	39,8
11539	5,1	11565	5,6	3891	22,3	3636	22,3	486	36,9	401	36,6
11315	7,5	10478	7,8	3974	22,3	3998	22,3	553	39,2	539	38,1
13421	7	11805	7	3448	22,3	3433	22,3	456	36,5	452	36,1

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (HMA 10%) (MPa)

Πίνακας 7.5

Χαμηλή Θερμοκρασία				Μέση Θερμοκρασία				Υψηλή Θερμοκρασία			
a	t	b	t	a	t	b	t	a	t	b	t
16565	6,4	16215	6,7	4407	22,3	4248	22,3	480	40	480	39
17439	5,2	17535	5,4	5225	22,3	4685	22,3	551	36,3	675	35,8
15273	6,8	15399	7	4562	22,3	4325	22,3	581	37,4	598	36,8
16500	6	16227	6	4186	22,3	4428	22,3	543	41,7	519	40,9
13699	6,2	13723	6,4	4024	22,3	3927	22,3	460	38,5	500	38

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (SBS 5%) (MPa)

Πίνακας 7.6

Δοκίμιο No	6,5°C		22°C		37°C	
	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)
1	16425	16501	4407	4248	695	620
2	15886	16067	5225	4685	494	570
3	15641	16064	4562	4325	613	582
4	15080	15582	4186	4428	884	808
6	13355	13613	4024	3927	560	569
$\bar{X}$	15277,4	15565,4	4480,8	4322,6	649,2	629,8
s	1178,36	1138,83	464,07	275,91	150,48	101,75
$\hat{C}_v$	7,713	7,32	10,36	6,38	23,18	16,16

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) ασφαλτικού σκυροδέματος

Πίνακας 7.7

Δοκίμιο Νο	6,5°C		22°C		37°C	
	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)
1	9258	9241	2914	2881	434	235
4	11650	11640	2723	2682	313	235
5	12410	12542	2953	2786	342	274
7	10634	11395	2759	2633	239	186
10	10678	11663	2874	2772	230	275
$\bar{X}$	10926	11296,2	2844,6	2750,8	311,6	241
S	1189,06	1228,65	99,43	96,50	83,42	36,54
$\hat{C}_v$	10,88	10,88	3,50	3,51	26,77	15,16

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίνιματος SMA με κοινή άσφαλτο

Πίνακας 7.8

Δοκίμιο Νο	6,5°C		22°C		37°C	
	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)
1	10578	11416	3087	3142	293	328
5	9878	10110	2881	2995	359	287
7	13014	12472	2949	2654	215	167
9	12921	12705	3255	3179	447	440
12	11820	12010	2914	2720	236	262
$\bar{X}$	11642,2	11742,6	3017,2	2938	310	296,8
S	1395,86	1037,03	154,33	240,37	94,82	99,54
$\hat{C}_v$	11,98	8,83	5,11	8,18	30,59	33,53

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (EVA 5%)

Πίνακας 7.9

Δοκίμιο No	6,5°C		22°C		37°C	
	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)
1	12447	13166	3592	3521	448	420
2	11800	11488	3154	3011	617	449
3	12251	12275	3404	3838	397	370
5	12825	12423	3954	3614	623	513
8	11990	11877	3806	3664	276	286
$\bar{X}$	12262,6	12245,8	3582	3529,6	472,2	407,6
s	399,6	630,3	317,6	311,9	148,7	85,4
$\hat{C}_v$	3,25	5,14	8,86	8,83	31,5	20,95

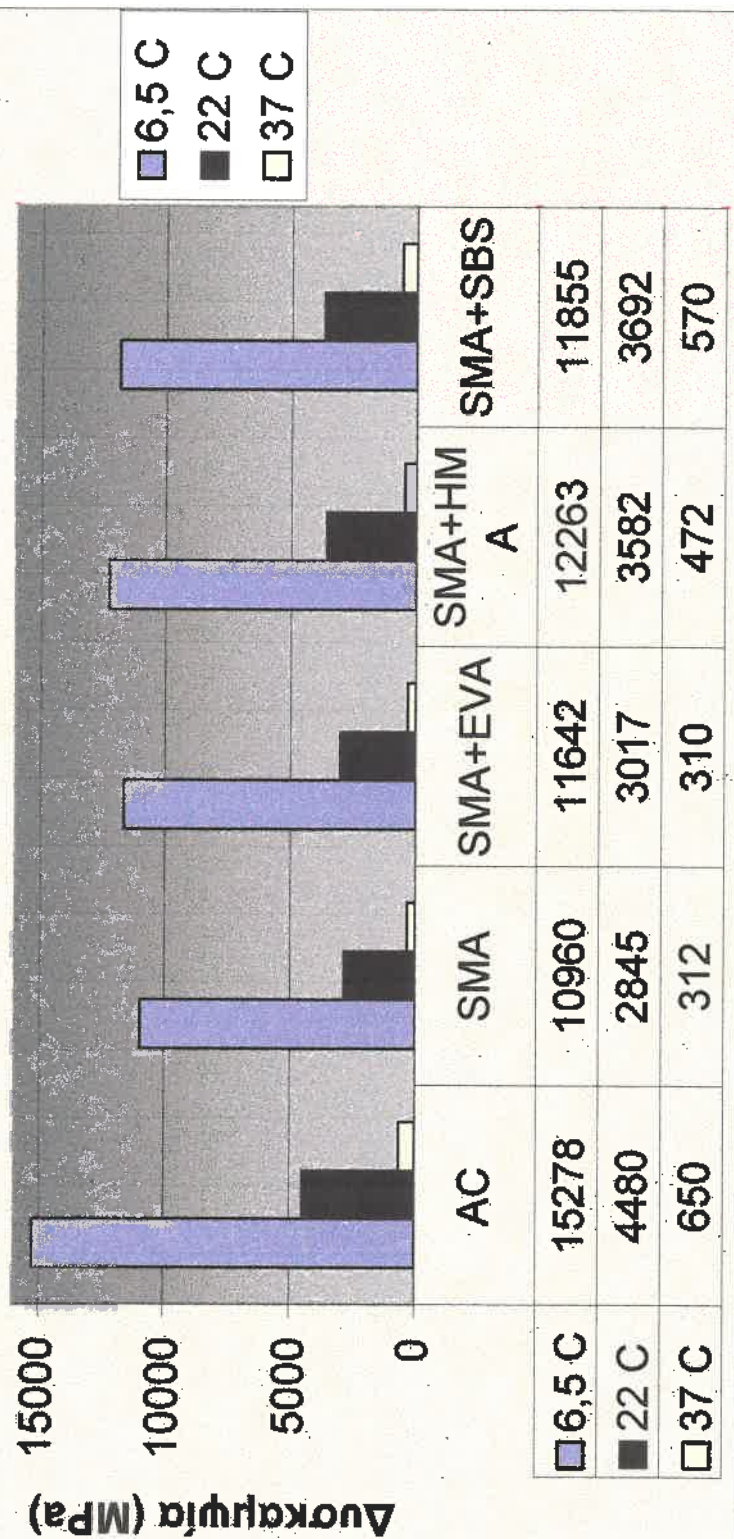
Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (HMA 10 %)

Πίνακας 7.10

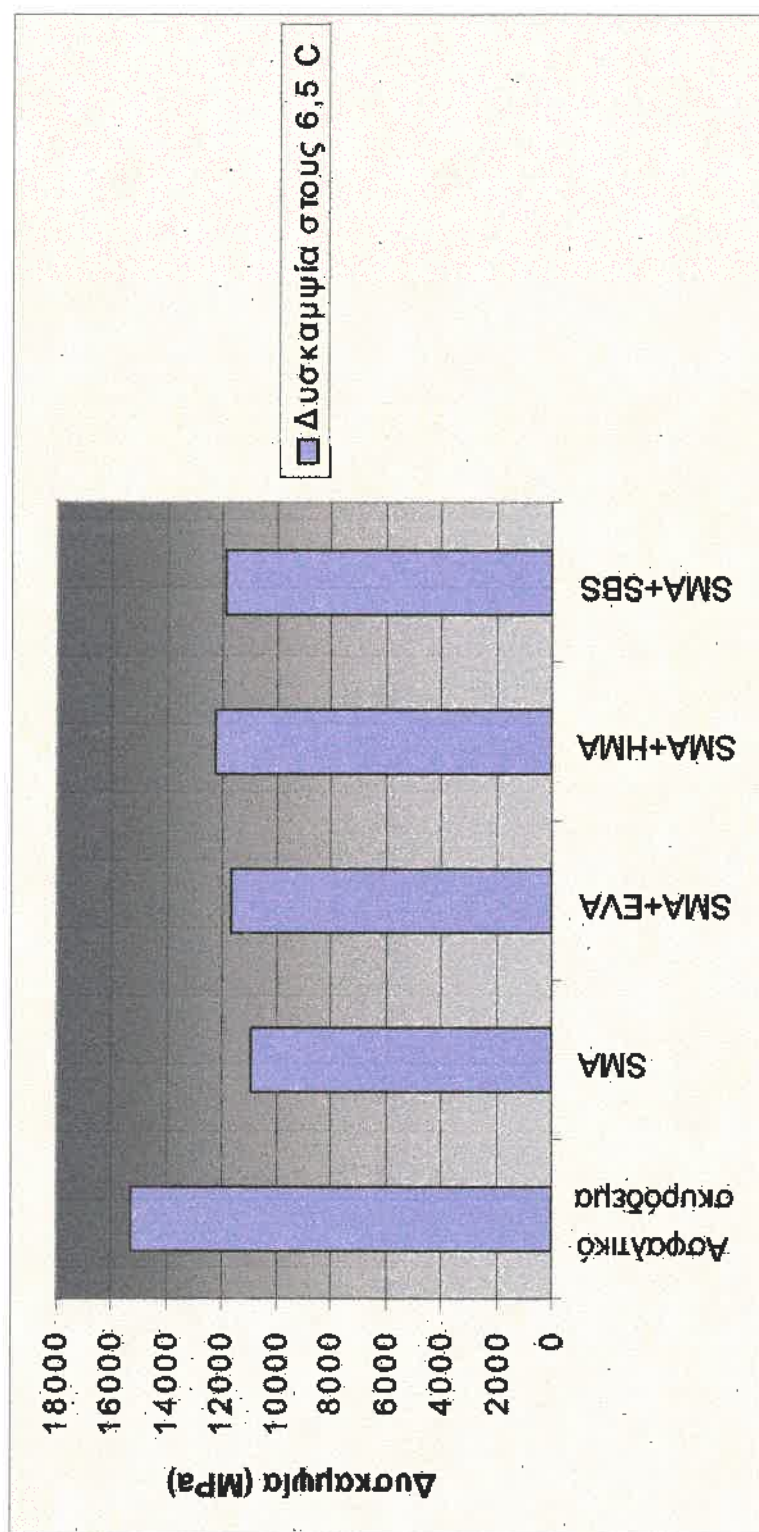
Δοκίμιο Νο	6,5°C		22°C		37°C	
	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)	a(Mpa)	b(Mpa)
6	11636	11948	3763	3871	513	444
8	10893	10156	3382	3826	717	685
9	10545	10854	3891	3636	479	378
11	12162	11444	3974	3998	712	618
12	14043	12301	3448	3433	425	397
$\bar{X}$	11856	11341	3691,6	3752,8	569,2	504,4
S	1375,78	857,62	264,48	221,00	136,31	138,46
$\hat{C}_v$	11,60	7,56	7,16	5,89	23,95	27,45

Αποτελέσματα δυσκαμψίας (NAT) μίγματος SMA με τροποποιημένη άσφαλτο (SBS 5%)

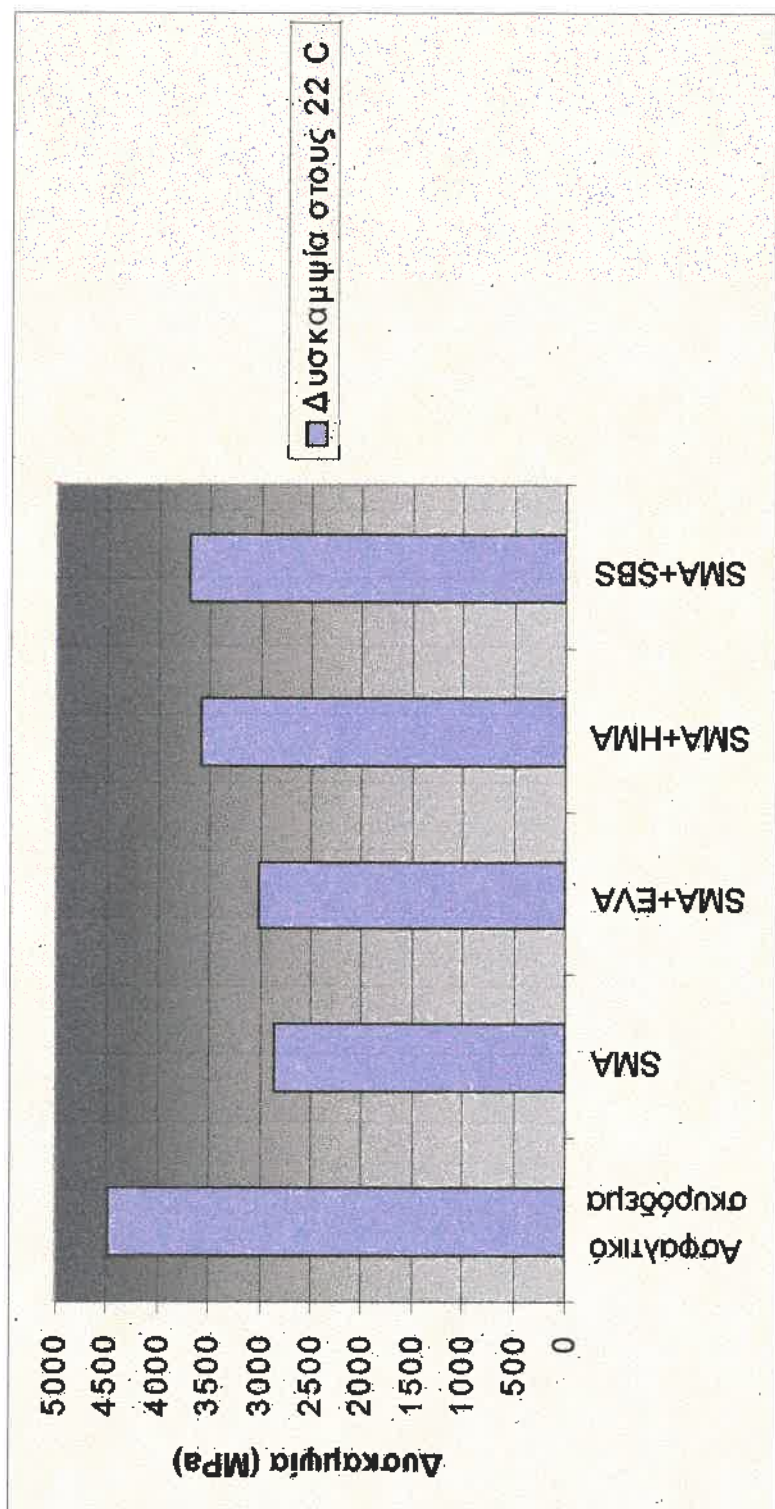
Αποτελέσματα Δυσκαμψίας με την συσκευή NAT



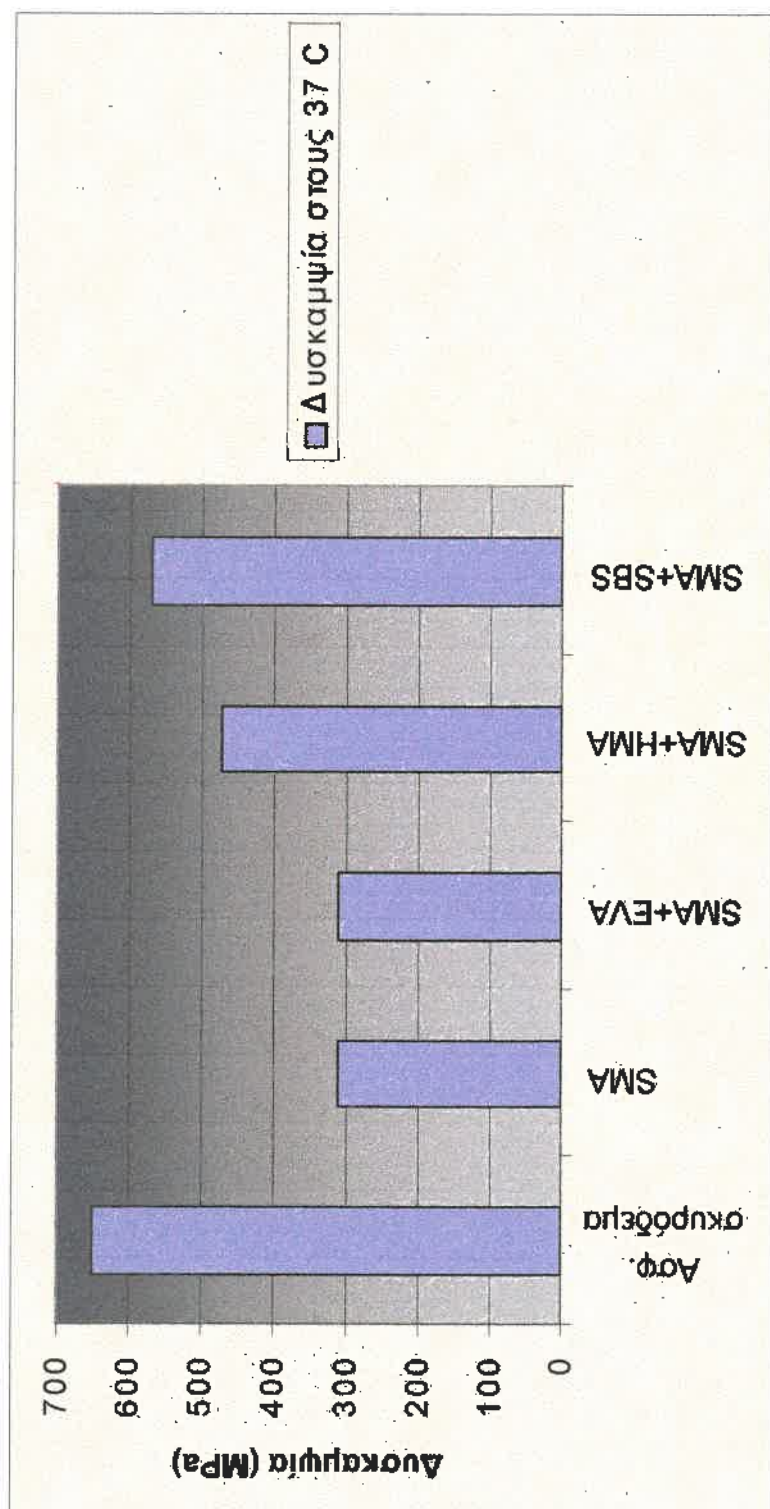
Σχήμα 7.6 Αποτελέσματα δυσκαμψίας (συσκευή NAT)



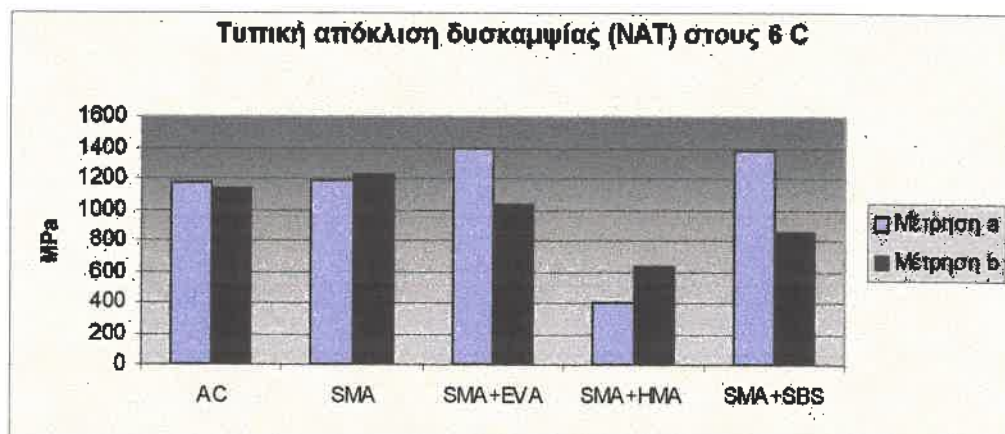
Σχήμα 7.7 Αποτελέσματα δυσκαμψίας στους 6.5°C



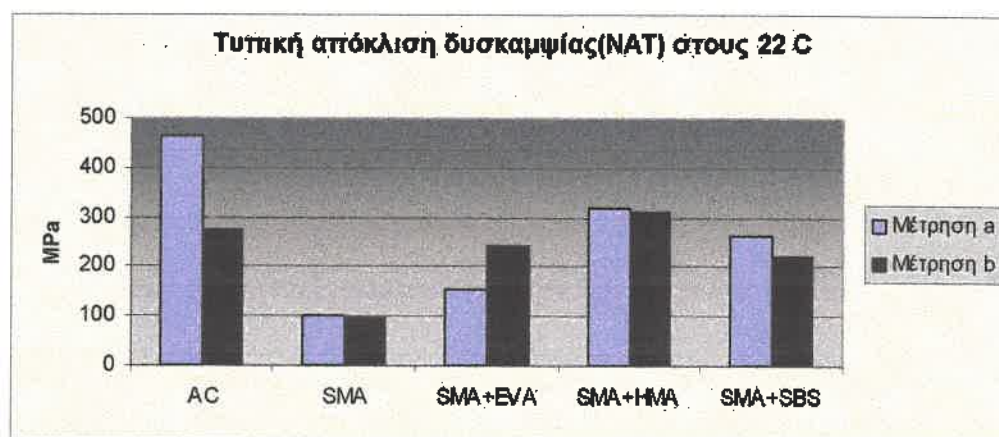
Σχήμα 7.8 Αποτελέσματα δυσκαμψίας στους 22°C



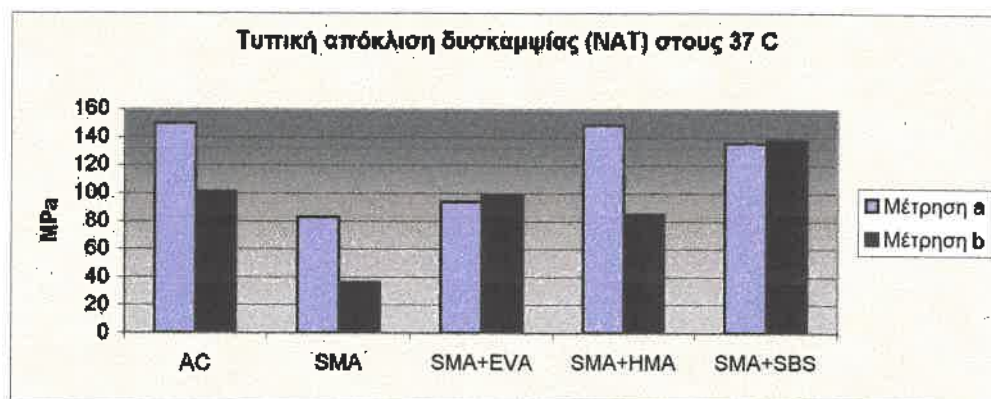
Σχήμα 7.9 Αποτελέσματα δυσκαμψίας στους 37°C



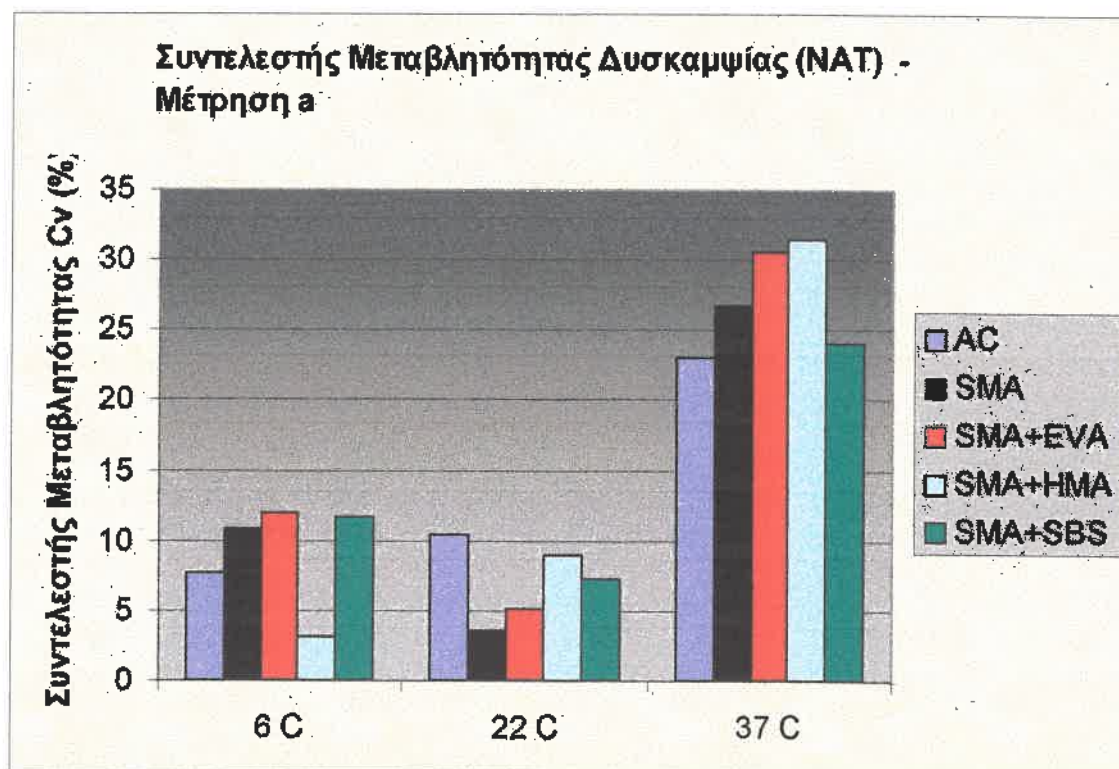
Σχήμα 7.12 Τυπική απόκλιση αποτελεσμάτων μέτρησης δυσκαμψίας με την συσκευή NAT στους 6°C



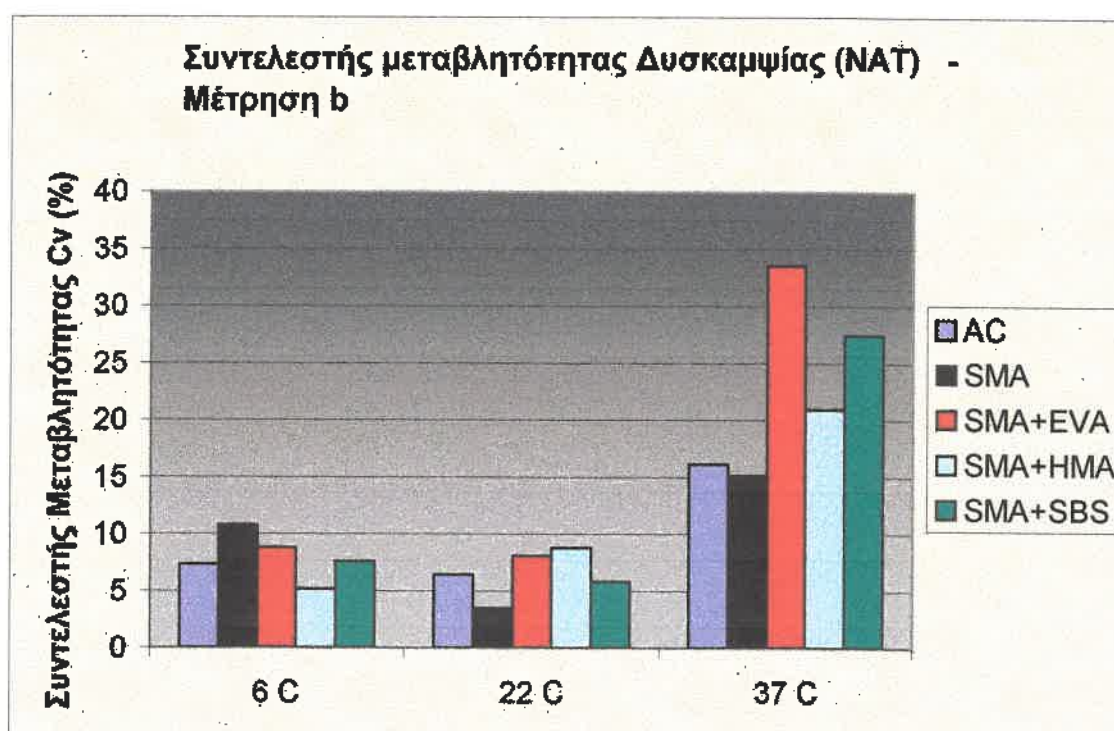
Σχήμα 7.13 Τυπική απόκλιση αποτελεσμάτων μέτρησης δυσκαμψίας με την συσκευή NAT στους 22°C



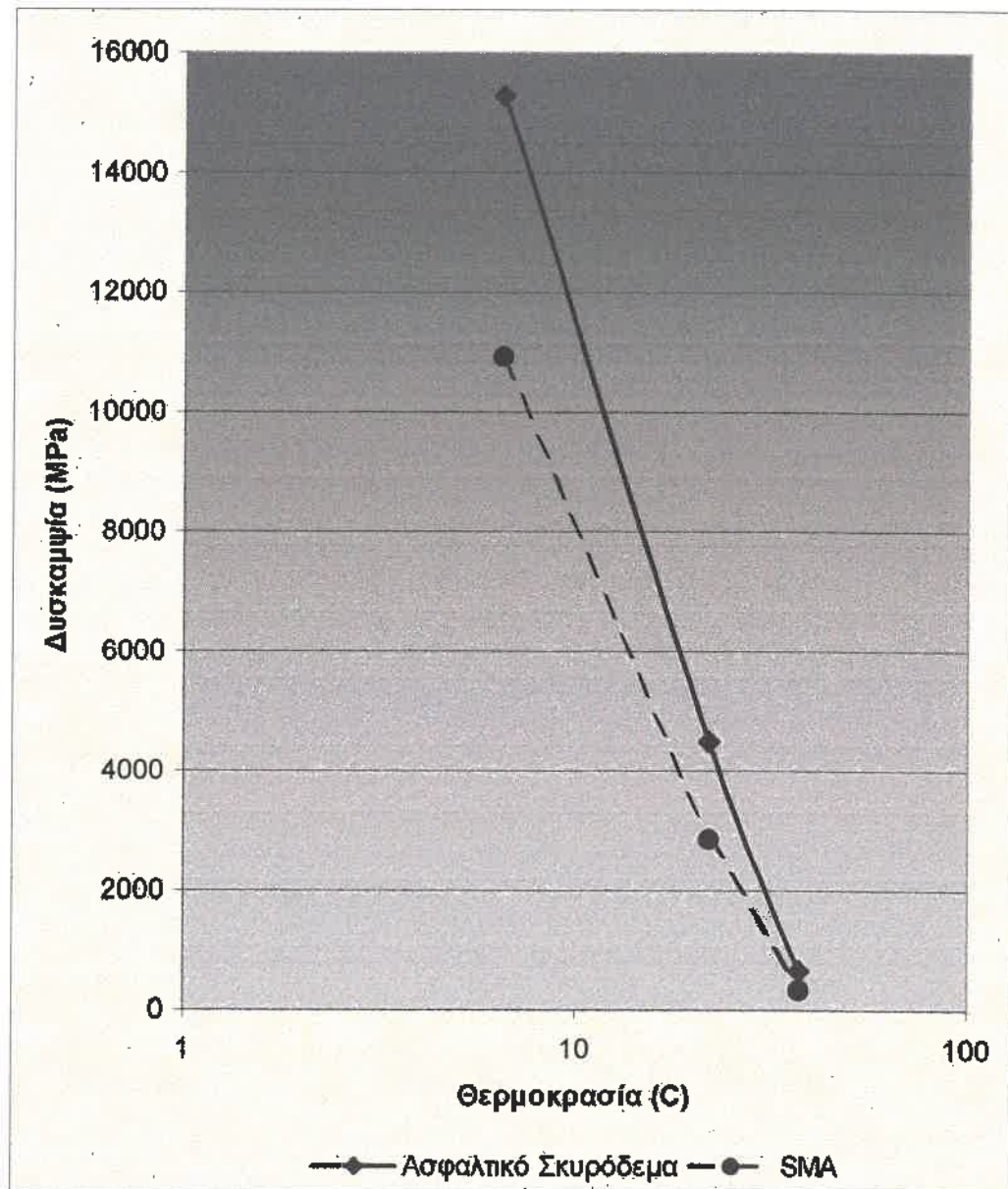
Σχήμα 7.14 Τυπική απόκλιση αποτελεσμάτων μέτρησης δυσκαμψίας με την συσκευή NAT στους 37°C



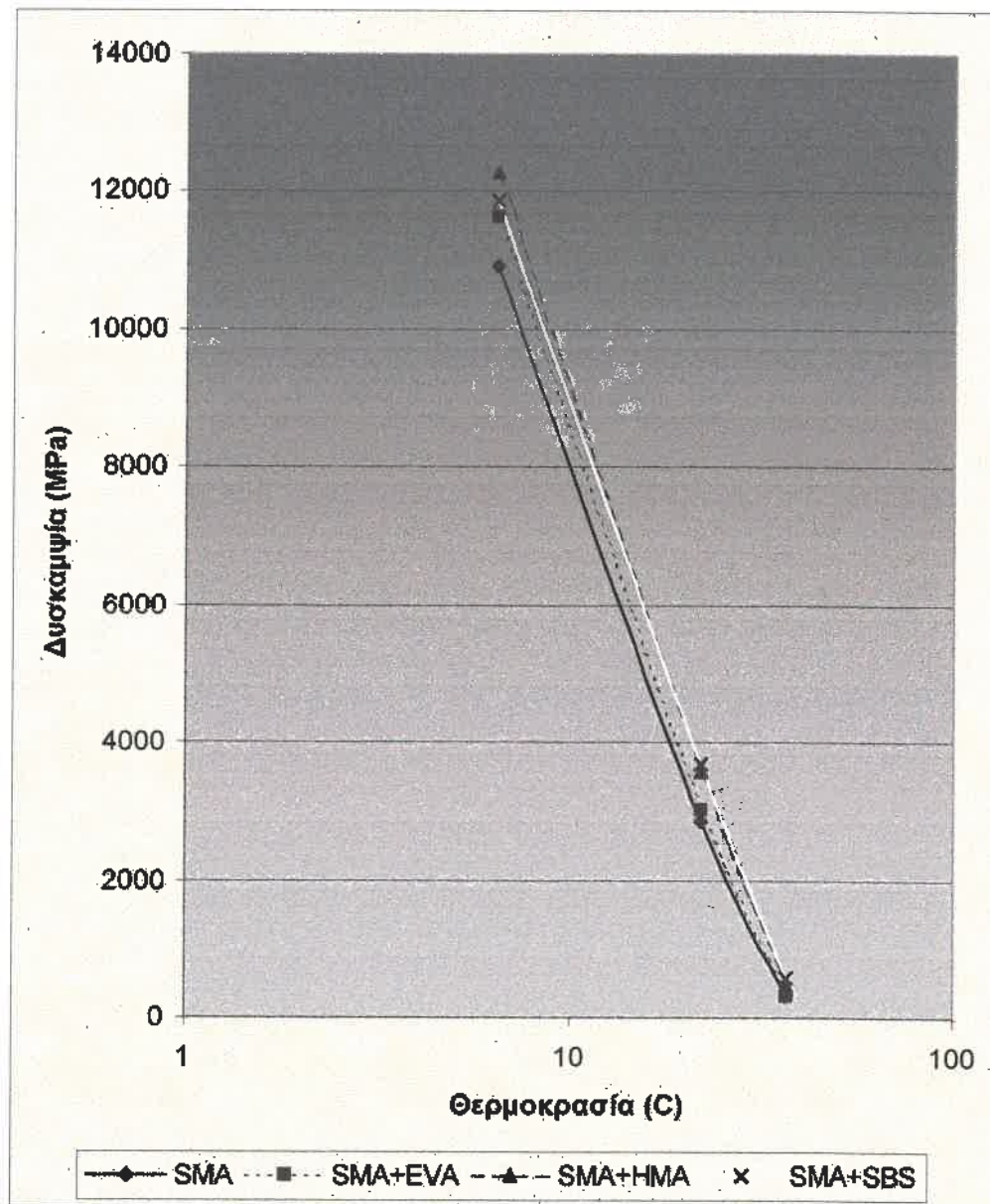
Σχήμα 7.10 Συντελεστές μεταβλητότητας μετρήσεων δυσκαμψίας με την συσκευή NAT (Μέτρηση α)



Σχήμα 7.11 Συντελεστές μεταβλητότητας μετρήσεων δυσκαμψίας με την συσκευή NAT (Μέτρηση b)

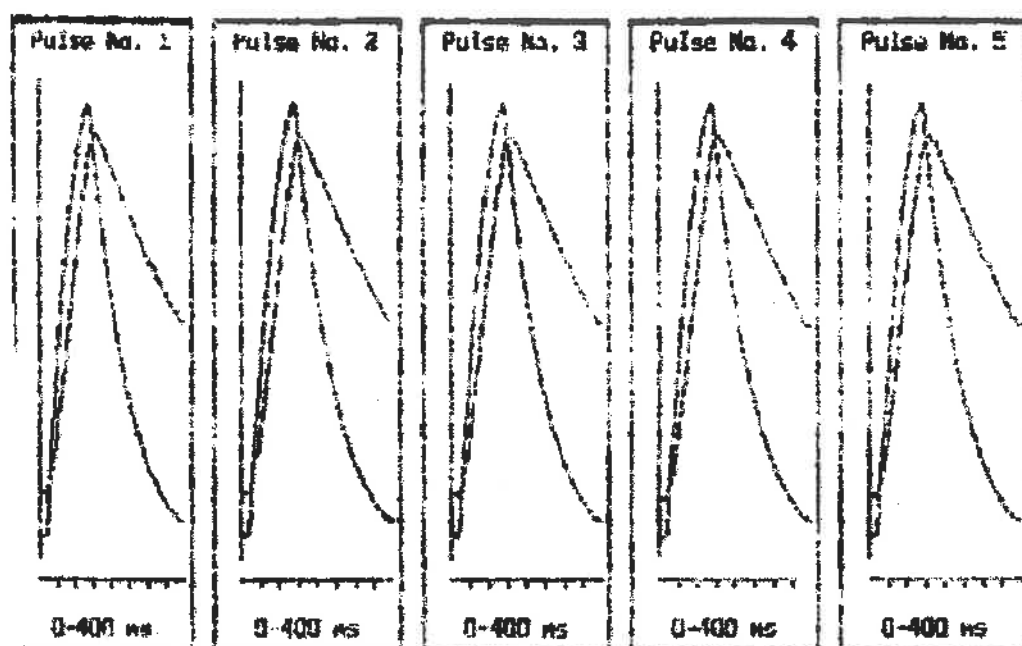


Σχήμα 7.15 Μεταβολή της δυσκαμψίας (μετρομένης με την συσκευή NAT) συναρτήσει της θερμοκρασίας .



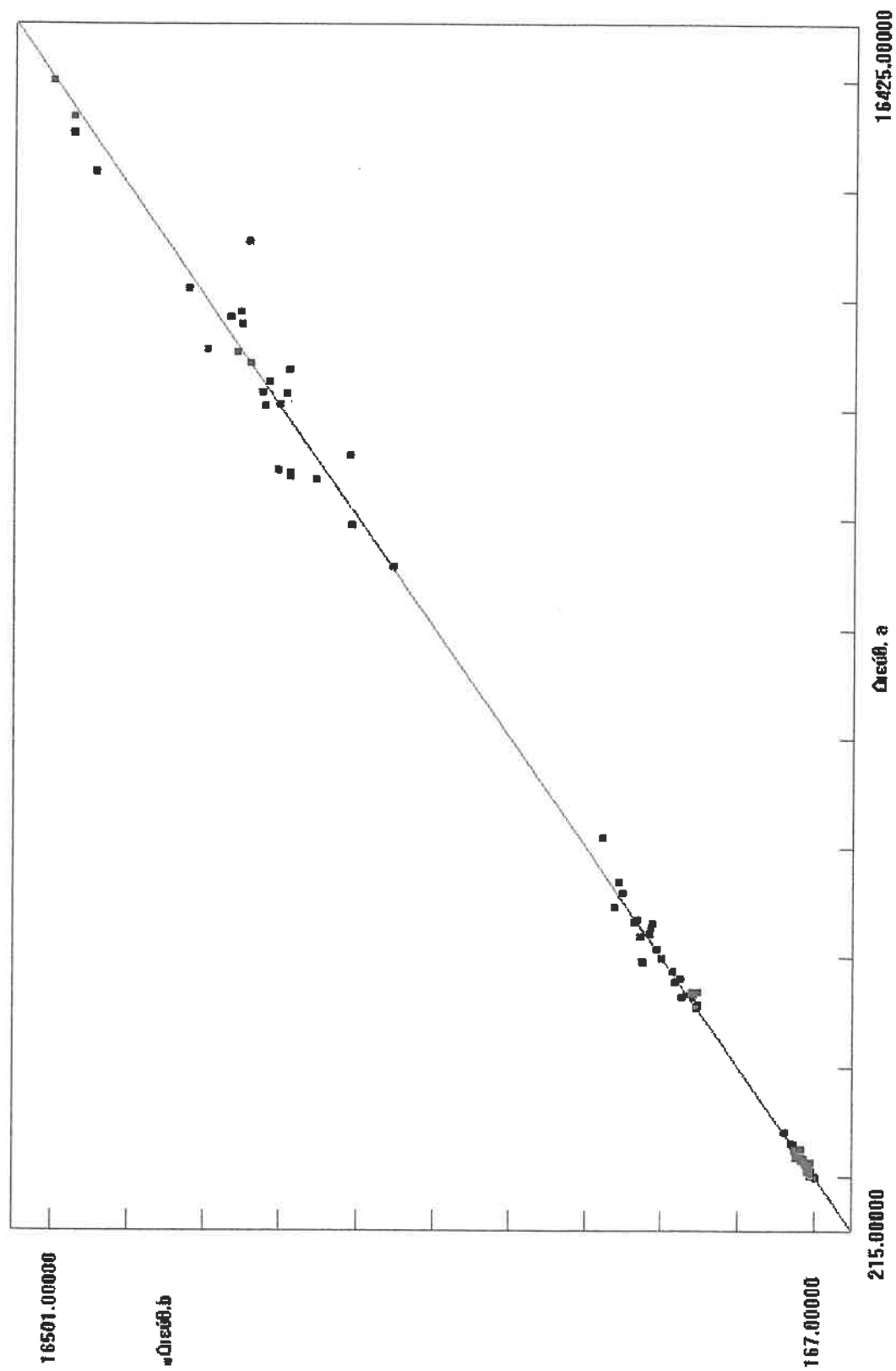
Σχήμα 7.16 Μεταβολή της δυσκαμψίας (μετρημένης με την συσκευή NAT) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Date= 11/2 Operator apulion
 Specimen name sbs6a
 Temp (C)= 23 Poissons ratio= 0.35
 Specimen d.a.= 101 mm Thickness= 65 mm



Pulse No.	Vertical force (kN)	Tensile stress (kPa)	Horiz. defn (microns)	Rise time (n.secs)	Elastic stiffness (MPa)
1	2.06	196.4	5.1	120	3800
2	2.07	197.4	5.2	120	3750
3	2.06	196.7	5.1	120	3750
4	2.07	197.5	5.1	120	3800
5	2.07	197.2	5.2	120	3700
Mean	2.06	197.1	5.2	120	3750

Σχήμα 7.17 Τυπικό output του προγράμματος μέτρησης της δυσκαμψίας με την συσκευή NAT



Σχήμα 7.18 Σχέση μέτρησης στην διεύθυνση α με την μέτρηση στην διεύθυνση β

7.5 Σχόλια επί των αποτελεσμάτων μέτρησης της δυσκαμψίας με την συσκευή NAT

7.5.1 Σύγκριση δυσκαμψιών μεταξύ μιγμάτων SMA και ασφαλτικού σκυροδέματος.

Η δυσκαμψία των δοκιμών του ασφαλτικού σκυροδέματος προέκυψε μεγαλύτερη από αυτήν των δοκιμών των μιγμάτων SMA. Αυτό ισχύει για όλο το φάσμα των θερμοκρασιών λειτουργίας. Επίσης τα δοκίμια μίγματος SMA τα οποία παρασκευάστηκαν με τροποποιημένη άσφαλτο είχαν μικρότερη δυσκαμψία απ' αυτήν των δοκιμών ασφαλτικού σκυροδέματος και για τις τρεις θερμοκρασίες μέτρησης.

7.5.2 Σύγκριση δυσκαμψιών μεταξύ δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο και δοκιμών SMA με τροποποιημένη άσφαλτο

Στους 6.5°C η δυσκαμψία των δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο είναι ελαφρώς μικρότερη απ' αυτή των δοκιμών με τροποποιημένη άσφαλτο.

Στους 22°C η δυσκαμψία των δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο είναι επίσης μικρότερη απ' αυτή των δοκιμών SMA με τροποποιημένη άσφαλτο.

Στους 37°C δεν υπάρχει διαφορά στην δυσκαμψία μεταξύ των δοκιμών SMA με κοινή άσφαλτο και SMA με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA. Τα δοκίμια όμως SMA με άσφαλτο τροποποιημένη με SBS και HMA παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη τιμή από τα δυο προαναφερθέντα.

7.5.2 Σύγκριση δυσκαμψιών μεταξύ δοκιμών SMA παρασκευασμένων με διαφορετικούς τύπους τροποποιημένης ασφάλτου.

Στους 6.5°C δεν υπάρχει αισθητή διαφορά μεταξύ των δυσκαμψιών των δοκιμών SMA ανεξαρτήτως του είδους της τροποποιημένης ασφάλτου.

Στους 22°C η δυσκαμψία είναι μικρότερη για τα δοκίμια με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA σε σχέση με τα δοκίμια με άσφαλτο τροποποιημένη με SBS ή HMA. Για τα δυο τελευταία δεν υπάρχει ιδιαίτερη διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ τους.

Στους 37°C χαμηλότερη δυσκαμψία μετρήθηκε στα δοκίμια παρασκευασμένα με ασφαλτο τροποποιημένη με EVA, ενώ τα δοκίμια με ασφαλτο τροποποιημένη με HMA είχαν 1,5 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία και τα δοκίμια με ασφαλτο τροποποιημένη με SBS περίπου δυο φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία. Γενικά, σε ότι αφορά την δυσκαμψία η συμπεριφορά των δοκιμίων με τροποποιημένη ασφαλτο SBS και HMA δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα καθώς πρόκειται για τροποποιητές ιδίου τύπου (ελαστομερή).

7.5.3 Γενικά σχόλια

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της δυσκαμψίας αυτής της εργασίας έρχονται σε συμφωνία, σε γενικές γραμμές με μετρήσεις άλλων ερευνητών και σε ότι αφορά τις τιμές και ως προς την μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων (Brown, Manglorkar, 1993). Η τιμή της δυσκαμψίας δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την διεύθυνση φόρτισης.

8

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

8.1 Γενικά

Εδώ και πολλά χρόνια συντελείται μια μετάβαση στην φιλοσοφία σχεδιασμού των οδοστρωμάτων από τις εμπειρικές μεθόδους στις εμπειρικές – μηχανιστικές (empirical – mechanistic) ή αμιγώς μηχανιστικές, ενώ όπως φαίνεται στο μέλλον θα παγιωθούν (Seeds, 1999). Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται κυρίως στην ελαστική θεωρία και ως εκ τούτου απαιτούν ως δεδομένα ελαστικά χαρακτηριστικά (όπως μέτρο ελαστικότητας, μέτρο δυσκαμψίας κλπ.) Ο προσδιορισμός των σταθερών αυτών στο εργαστήριο είναι μια διαδικασία χρονοβόρα, επίπονη και δαπανηρή ενώ επιπροσθέτως απαιτεί πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό όπως και προσωπικό. Ήδη λοιπόν από την δεκαετία του εξήντα ξεκίνησαν προσπάθειες συσχετισμού του μέτρου δυσκαμψίας με άλλα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος υπό μορφή εξίσωσης υπολογισμού (γνωστοί και ως αλγόριθμοι υπολογισμού μέτρου δυσκαμψίας).

8.2 Αλγόριθμοι υπολογισμού μέτρου δυσκαμψίας

Οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι υπολογισμού του μέτρου δυσκαμψίας είναι αυτός της εταιρίας πετρελαιοειδών Shell , αυτός του Asphalt Institute και αυτός των Bonnaure, Gest, Gravois, Uge ενώ προσφάτως έχει αναπτυχθεί και σχετικό λογισμικό (PAMINA, BANDS, κλπ).

8.2.1 Ο αλγόριθμος της Shell

Ο Αλγόριθμος της εταιρίας πετρελαιοειδών Shell (Shell Oil Company) προέκυψε μετά από πλέον της εικοσαετίας πειράματα και στατιστική ανάλυση και χρησιμοποιείται στην μέθοδο διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της ίδιας εταιρίας (Claessen, 1977). Βασίζεται στο νομογράφημα του Van der Poel (Van

der Poel, 1954), από το οποίο υπολογίζει κανείς το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (stiffness modulus). Οι Heukelom και Klomp ανέπτυξαν μια σχέση που συνδέει την δυσκαμψία της ασφάλτου με αυτή του ασφαλτομίγματος (Heukelom, Klomp, 1964). Για ένα ορισμένο ασφαλικό μίγμα η δυσκαμψία S_m του μίγματος βρίσκεται με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης, όπου S_b καθορίζεται από το διάγραμμα του σχήματος 8.1 :

$$S_m = S_b \left[1 + \left(\frac{2,5}{n} \right) \left(\frac{C'_v}{1 - C'_v} \right) \right]^n$$

όπου : S_m = Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος (N/m^2)

S_b = Μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου (N/m^2)

$$C_v = V_a / (V_a + V_b)$$

$$C'_v = C_v / \{1 + (0,01 * V_v - 0,03)\}$$

V_a = Περιεκτικότητα αδρανών κ.ο. ασφαλτομίγματος (%)

V_b = Περιεκτικότητα ασφάλτου κ.ο. ασφαλτομίγματος (%)

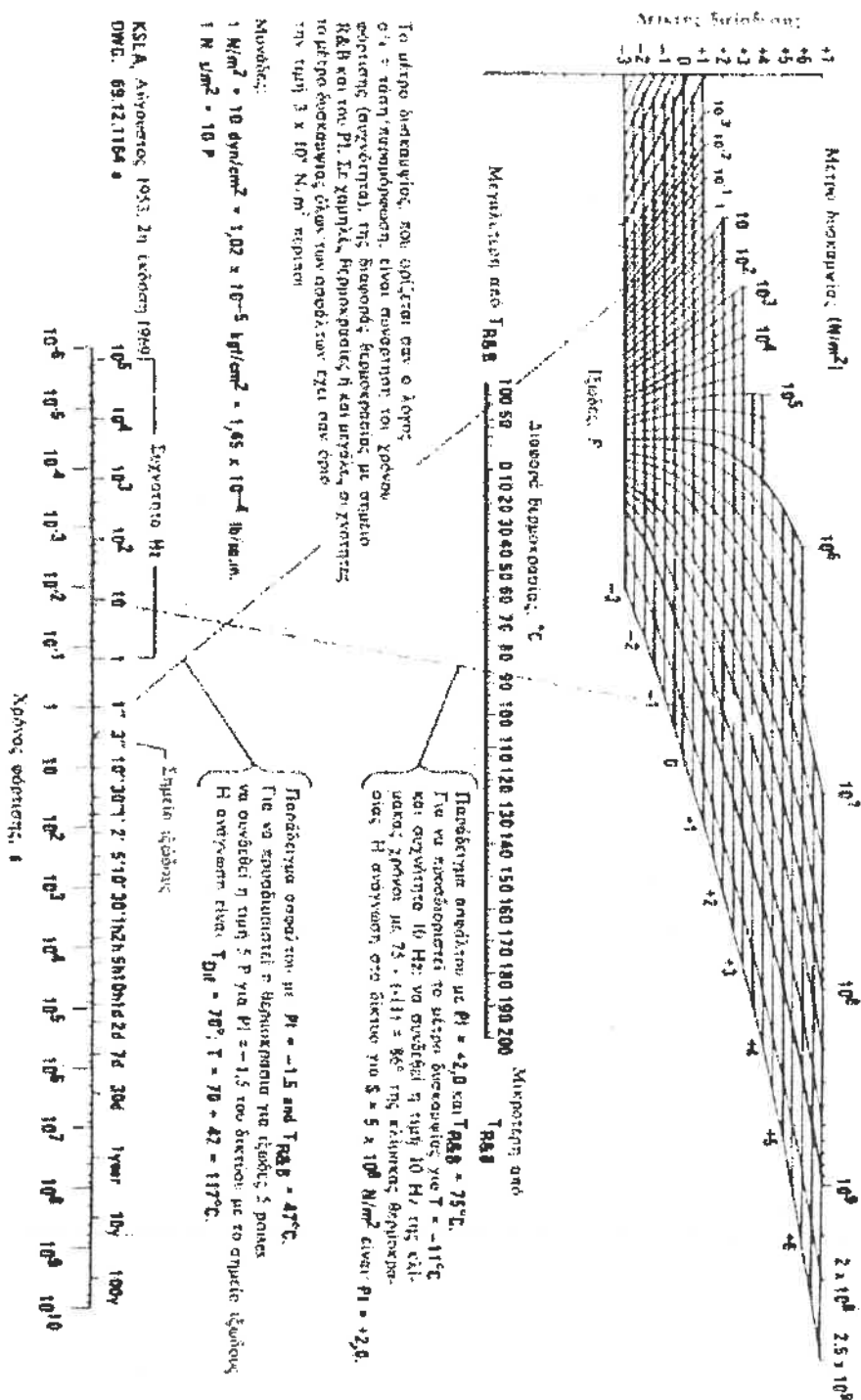
V_v = Περιεκτικότητα κενών κ.ο. ασφαλτομίγματος (%)

$$n = 0,83 \log (40000/S_b).$$

Η εξίσωση όπως προτείνεται παραπάνω ισχύει για ασφαλτομίγματα με κενά μεγαλύτερα του 3% (Van Draat, Sommer, 1965).

Σε ότι αφορά την δυσκαμψία της ασφάλτου από το νομογράφημα απαιτείται ο δείκτης διείσδυσης PI (Penetration Index) όπως ορίζεται από την σχέση των Pfieffer – Van Doormaal (Pfieffer – Van Doormaal, 1936)

$$\frac{20 - PI}{10 + PI} = 50 \left(\frac{\log 800 - \log Pen}{T_{RB} - T} \right)$$



Σχήμα 8.1 Νομογράφημα υπολογισμού μέτρου δεικνύοντι ασφάλτου κατά Shell Oil Co (Yoder, Witczak, 1987)

Για τον υπολογισμό του δείκτη διεύθυνσης απαιτούνται οι τιμές του σημείου μάλθωσης T_{RB} καθώς και της διεύθυνσης στους 25° Κελσίου (ASTM D 36, 1986 και ASTM D 5, 1986 αντίστοιχα).

Πολλοί ερευνητές υπολογίζουν την δυσκαμψία της ασφάλτου από τον παρακάτω τύπο ο οποίος όμως έχει προκύψει από το νομογράφημα του Van der Poel :

$$S_b = (1,157 * 10^{-7}) * t^{-0,368} * e^{-PI} * (T_{RB} - T_b)^5$$

Η ισχύς αυτού του τύπου είναι για χρόνο φόρτισης από 0,01 sec έως 0,1 sec. Για να μπορέσει το αποτέλεσμα να αναχθεί σε χρόνο φόρτισης 0,24 sec χρησιμοποιείται ο τύπος μετατροπής :

$$S_{m(0,24 \text{ sec})} = \frac{S_{m(0,02)}}{\left(\frac{0,24}{0,02}\right)^{(0,09 + 0,008 * T)}}$$

Τα αποτελέσματα τα οποία λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά τα οποία λαμβάνονται από το νομογράφημα.

8.2.2 Ο αλγόριθμος Bonnaure, Uge, Gest, Gravois

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μια εξέλιξη του αλγόριθμου της Shell. Βασίζεται λοιπόν και αυτός στον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας της χρησιμοποιούμενης ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα η οποία υπολογίζεται από το νομογράφημα του σχήματος 8.1. Η δυσκαμψία υπολογίζεται ως εξής (Bonnaure et al, 1977) :

Αρχικώς υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος S_m για δυσκαμψία της ασφάλτου ίση με $3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$:

$$\log (S_m \times 3 \times 10^9) = 10,82 - 1,342 (100 - V_a)/(V_a + V_b) = S_3$$

και για δυσκαμψία της ασφάλτου ίση με 10^8 N/m^2 :

$$\log (S_m \times 10^8) = 8,0 + 5,68 \times 10^{(-3)} V_a + 2,135 \times 10^{(-4)} V_a^2 = S_2$$

στη συνέχεια βρίσκοντας το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου από το σχήμα 8.1 υπολογίζουμε τους παρακάτω δυο παράγοντες :

Για μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου μεταξύ 5×10^6 και 10^8 N/m^2

$$S_1 = 0,6 \times \log [(1,37 V_b^2 - 1) / (1,33 V_b - 1)]$$

Και για μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου μεταξύ 10^8 και 10^9 N/m^2

$$S_4 = 1,12 (S_3 - S_2) / \log 30$$

Γνωρίζοντας τα $S_i \quad \{i = 1,2,3,4\}$ υπολογίζουμε το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος S_m για δεδομένο μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου S_b .

α) Για μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 < S_b < 10^9 \text{ N/m}^2$

$$\log S_m = (\log S_b - 8) \times (S_4 + S_1)/2 + |\log S_b - 8| \times (S_4 - S_1) / 2 + S_2$$

β) Για μέτρο δυσκαμψίας ασφάλτου $1 \times 10^9 \text{ N/m}^2 < S_b < 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

$$\log S_m = S_2 + S_4 + [(S_3 - S_2 - S_4) \times (\log S_b - 9) / \log 3]$$

όπως και στην παράγραφο 8.2.1. ισχύουν :

V_a = Περιεκτικότητα αδρανών κ.ο. ασφαλομίγματος (%)

V_b = Περιεκτικότητα ασφάλτου κ.ο. ασφαλομίγματος (%)

8.2.3 Ο αλγόριθμος του Asphalt Institute

Ο αλγόριθμος αυτός προτάθηκε από τους Kallas και Shook και το 1969 βασισμένος σε σχετικά μικρό αριθμό πειραμάτων (Kallas, Shook 1969). Έκτοτε συμπληρώθηκε και τροποποιήθηκε (Witczak, 1978, Miller et al, 1983) και η σημερινή του μορφή είναι η εξής : (Asphalt Institute, 1988)

$$\begin{aligned} \log_{10} [E^*] = & 5 + 2,250053 - 0,091756 * V_{be} - 0,027949 * V_a - 0,096881 * p_{200} + \\ & 0,250094 * p_{abs} - 0,006447 * t_p + 0,060612 * f - 0,00007404 * t_p^2 + \\ & 0,0001909 * p_{3/8}^2 - 0,0801155 * p_{abs}^2 + 0,0148592 * \eta_{70,10^6}^2 - \\ & 0,0024159 * f^2 + 0,00094015 * p_{3/8} * V_{be} + 0,00084534 * p_{3/4} * V_{be} + \\ & 0,0004965 * p_{3/4} * p_4 - 0,00034328 * p_{3/8} * p_4 - 0,00316297 * p_{3/8} * p_{abs} \end{aligned}$$

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο τύπος:

$$\begin{aligned} \log_{10} [E^*] = & 5,553833 + 0,028829 * p_{200} * f^{-0,17033} - 0,03476 * V_a + 0,070377 * \eta_{70,10^6} \\ & + 0,000005 * \left[t_p^{(1,3+0,49825 \log(f))} * p_{ac}^{0,5} \right] - 0,00189 \left[t_p^{(1,3+0,49825 \log(f))} * p_{ac}^{0,5} * f^{-1,1} \right] \\ & + 0,931757 * f^{-0,02774} \end{aligned}$$

όπου :

E^* = Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (psi)

V_a = Ποσοστό κενών στο μίγμα (%)

f = Η συχνότητα του κύματος φόρτισης (Hz)

$\eta_{70,10^6}$ = το ιξώδες της ασφάλτου στους 70 F (21°C) (10⁶ Poises)

t_p = Η θερμοκρασία της δοκιμής (F)

p_{200} = Το διερχόμενο ποσοστό αδρανών από το κόσκινο No200 (%)

p_{ac} = Το ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος του μίγματος (%)

p_{abs} = Το ποσοστό της απορρόφησης ασφάλτου κατά βάρος αδρανών και το

$p_{3/4}$ = Το συγκρατούμενο ποσοστό αδρανών στο κόσκινο 3/4"

$p_{3/8}$ = Το συγκρατούμενο ποσοστό αδρανών στο κόσκινο 3/8"

p_4 = Το συγκρατούμενο ποσοστό αδρανών στο κόσκινο No 4.

Πίνακας 8.1

SMA - Θερμοκρασία 6.5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(MPa)
1	4203	9258
4	4171	11650
5	4106	12410
7	4179	10634
10	3612	10678

Σύγκριση δυσκαμψίας μινμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.2

SMA - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(MPa)
1	454	2914
4	449	2723
5	440	2953
7	450	2759
10	369	2874

Σύγκριση δυσκαμψίας μινμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 22°C)

Πίνακας 8.3

SMA - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	46	434
4	45	313
5	44	342
7	45	320
10	35	473

Σύγκριση δυσκαμψίας μινμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 37°C)

Πίνακας 8.4

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 6,5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	6898	16425
2	6937	15886
3	6944	15641
4	6904	15080
6	5821	13355

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.5

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	902	4407
2	909	5225
3	911	4562
4	903	4186
6	712	4024

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 22°C)

Πίνακας 8.6

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Heukelom(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	344	695
2	347	494
3	348	613
4	345	884
6	265	560

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Heukelom – Klomp (Θερμοκρασία 37°C)

Πίνακας 8.7

SMA - Θερμοκρασία 6,5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	4416	9258
4	4413	11650
5	4045	12410
7	4434	10634
10	4018	10678

Σύγκριση δυσκαμψίας μιγμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all. (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.8

SMA - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	439	2914
4	438	2723
5	411	2953
7	449	2759
10	396	2874

Σύγκριση δυσκαμψίας μιγμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all. (Θερμοκρασία 22°C)

Πίνακας 8.9

SMA - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	51	434
4	51	313
5	48	342
7	53	320
10	45	473

Σύγκριση δυσκαμψίας μινμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all. (Θερμοκρασία 37°C)

Πίνακας 8.10

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 6,5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	6057	16425
2	6110	15886
3	6120	15641
4	6065	15080
6	5515	13355

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all. (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.11

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	703	4407
2	739	5225
3	745	4562
4	709	4186
6	645	4024

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all.
(Θερμοκρασία 22°C)

Πίνακας 8.12

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Bonnaure et all.(MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	94	695
2	103	494
3	105	613
4	96	884
6	87	560

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο Bonnaure et all.
(Θερμοκρασία 37°C)

Πίνακας 8.13

SMA - Θερμοκρασία 6,5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(MPa)
1	13264	9258
4	13264	11650
5	12846	12410
7	12846	10634
10	12342	10678

Σύγκριση δυσκαμψίας μιγμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.14

SMA - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(MPa)
1	4073	2914
4	4073	2723
5	3945	2953
7	3945	2759
10	3790	2874

Σύγκριση δυσκαμψίας μιγμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 22°C)

Πίνακας 8.15

SMA - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	960	434
4	960	313
5	930	342
7	930	320
10	893	473

Σύγκριση δυσκαμψίας μιγμάτων SMA προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 37°C)

Πίνακας 8.16

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 6,5 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	13835	16425
2	13187	15886
3	13082	15641
4	13725	15080
6	12669	13355

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 6,5°C)

Πίνακας 8.17

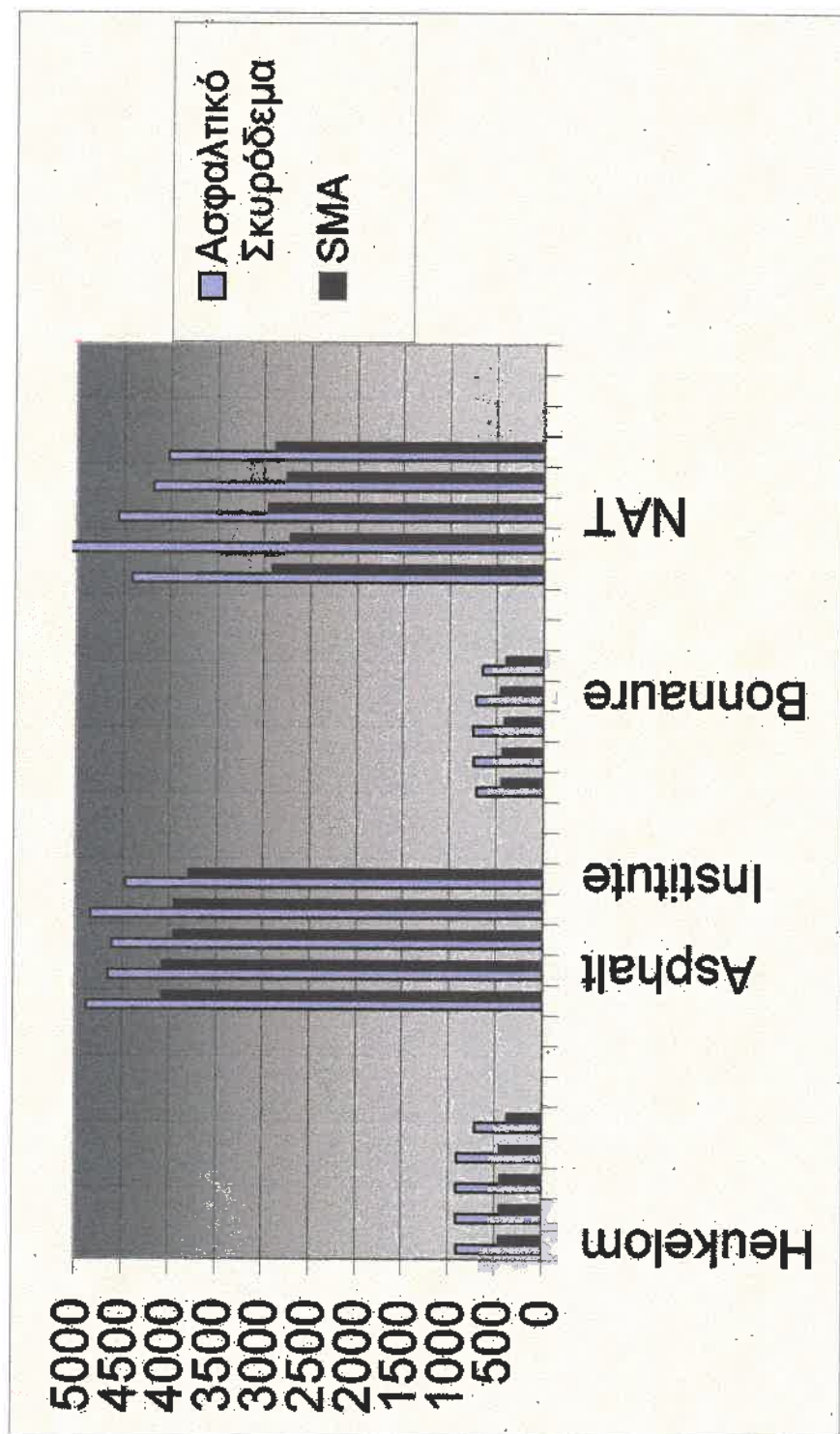
Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 22 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	4879	4407
2	4651	5225
3	4614	4562
4	4841	4186
6	4468	4024

Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 22°C)

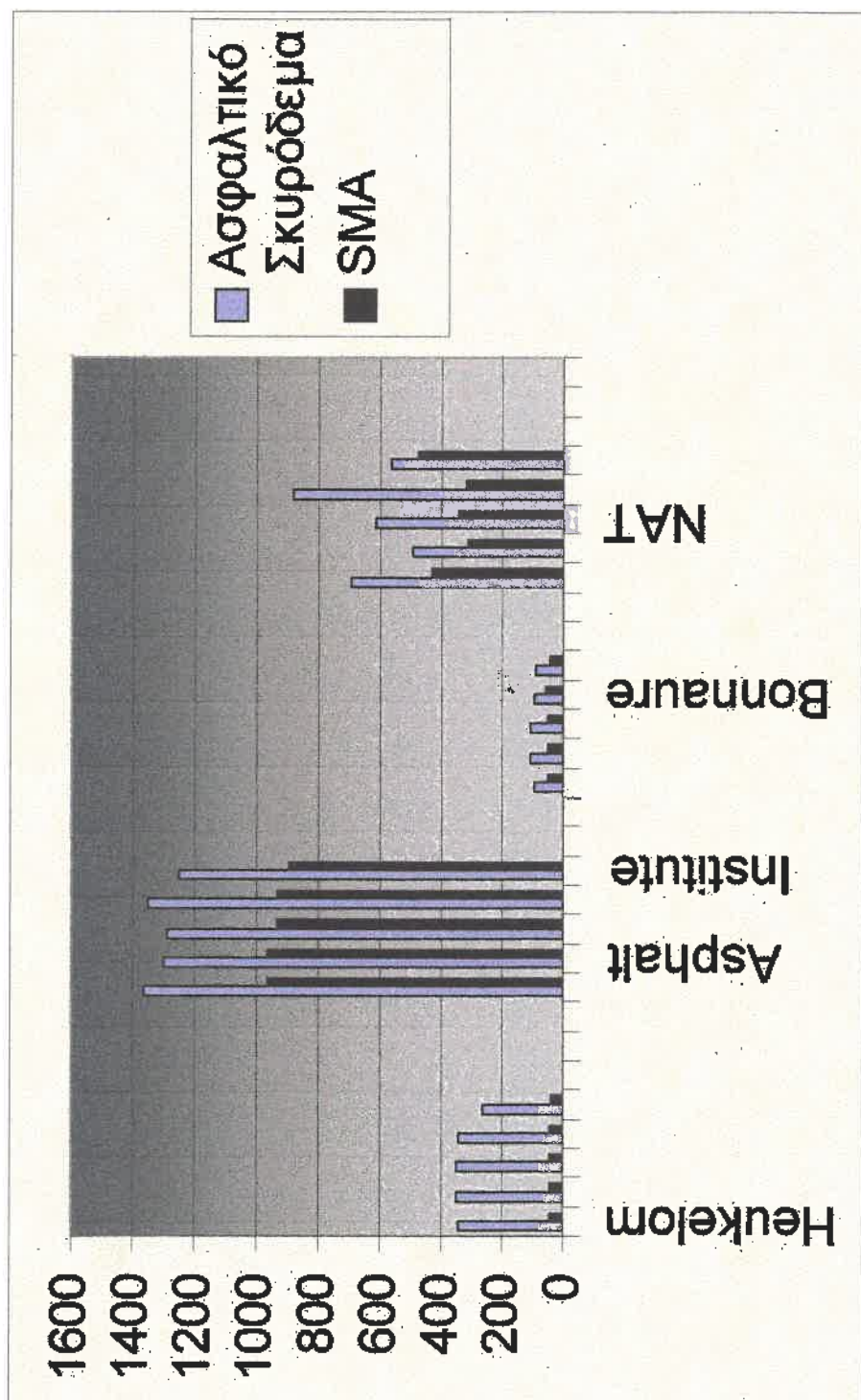
Πίνακας 8.18

Ασφαλτικό Σκυρόδεμα - Θερμοκρασία 37 °C		
Αριθμός δοκιμίου	Αλγόριθμος Asphalt Institute (MPa)	Δυσκαμψία NAT(Mpa)
1	1362	695
2	1298	494
3	1288	613
4	1351	884
6	1247	560

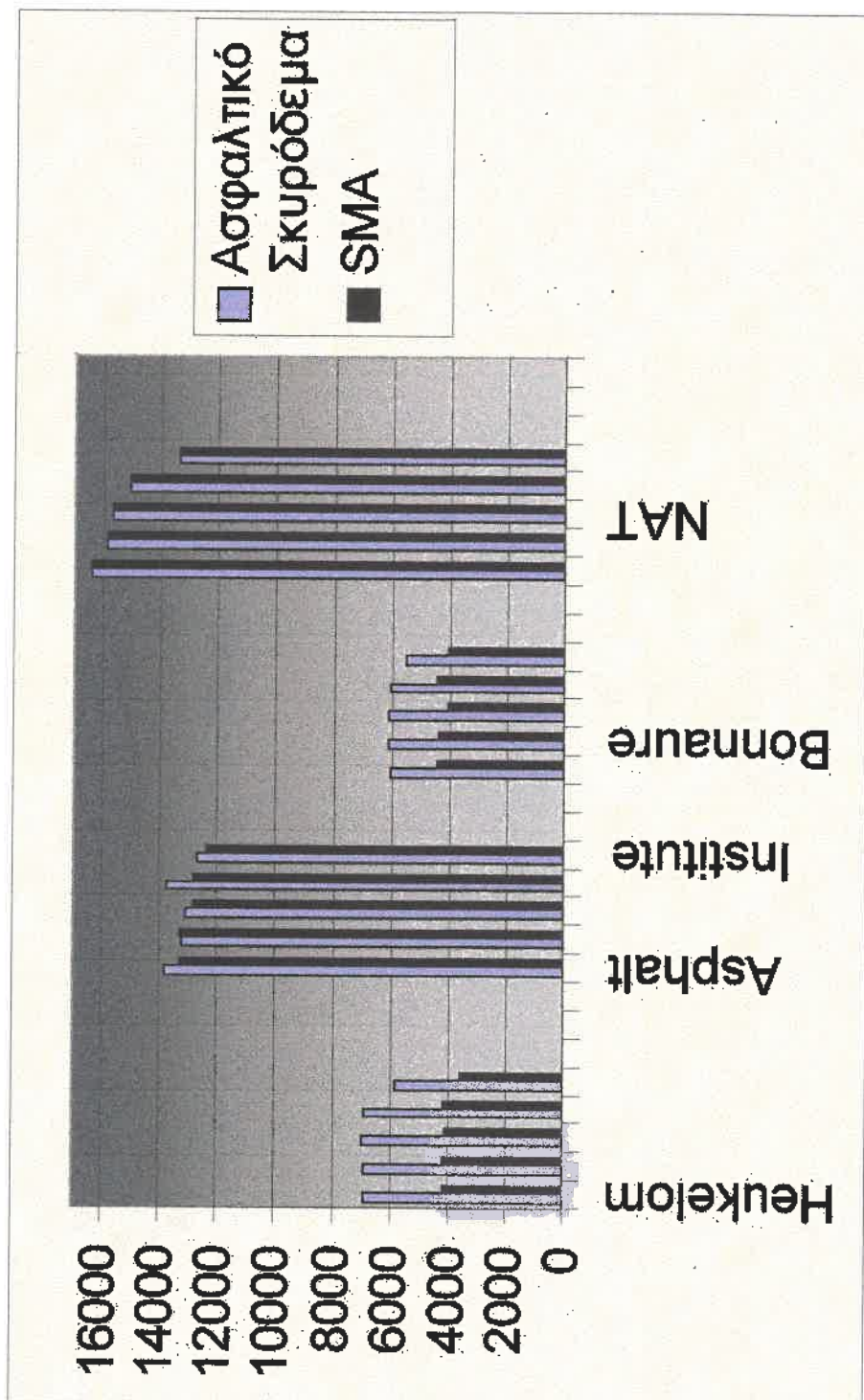
Σύγκριση δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος προσδιορισμένης με την συσκευή NAT και τον αλγόριθμο του Asphalt Institute (Θερμοκρασία 37°C)



Σχήμα 8.2 Αποτελέσματα αλγορίθμων στους 22°C



Σχήμα 8.3 Αποτελέσματα αλγορίθμων στους 37°C



Σχήμα 8.4 Αποτελέσματα αλγορίθμων στους 6,5°C

8.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων δυσκαμψίας με την χρήση αλγορίθμων

8.4.1 Αλγόριθμος Heukelom – Klomp

Ο αλγόριθμος Heukelom – Klomp δίνει τιμές κατά πολύ χαμηλότερες από της μετρημένες με την συσκευή NAT δυσκαμψίες. Αυτό ισχύει για όλες τις θερμοκρασίες. Δίνει επίσης πολλαπλάσιες τιμές δυσκαμψίας για τα μίγματα ασφαλικού σκυροδέματος σε σχέση με τα δοκίμια SMA.

8.4.2 Αλγόριθμος Bonnaure et all.

Ο αλγόριθμος Bonnaure et all. δίνει πολύ χαμηλές τιμές γενικά για όλα τα δοκίμια, σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών. Η δυσκαμψία των δοκιμών ασφαλικού σκυροδέματος δίδεται σχεδόν διπλάσια από αυτή των δοκιμών SMA.

8.4.3 Αλγόριθμος Asphalt Institute

Ο αλγόριθμος του Asphalt Institute δίνει γενικά τιμές δυσκαμψίας μεγαλύτερες από αυτές οι οποίες μετρήθηκαν με την συσκευή NAT.

Οι τιμές οι οποίες προκύπτουν για τα δοκίμια ασφαλικού σκυροδέματος είναι σε όλες τις θερμοκρασίες σχεδόν διπλάσιες από αυτές των δοκιμών SMA. Η μόνη περίπτωση στην οποία οι τιμές του αλγορίθμου προσεγγίζουν αρκετά τις τιμές δυσκαμψίας που προέκυψαν από την συσκευή NAT είναι στα δοκίμια ασφαλικού σκυροδέματος σε θερμοκρασία 22°C.

8.4.4 Γενικά σχόλια

Όπως φαίνεται οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται δεν προσεγγίζουν τις τιμές οι οποίες μετρήθηκαν εργαστηριακά με την συσκευή NAT.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν έγινε υπολογισμός δυσκαμψίας με την χρήση των αλγορίθμων για τα δοκίμια SMA τα οποία παρασκευάστηκαν με τροποποιημένη άσφαλτο καθώς οι παραδοχές των αλγορίθμων σχετικά με την δυσκαμψία και το ιξώδες της ασφάλτου δεν ισχύουν εν γένει για την τροποποιημένη άσφαλτο.

9

ΠΕΡΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

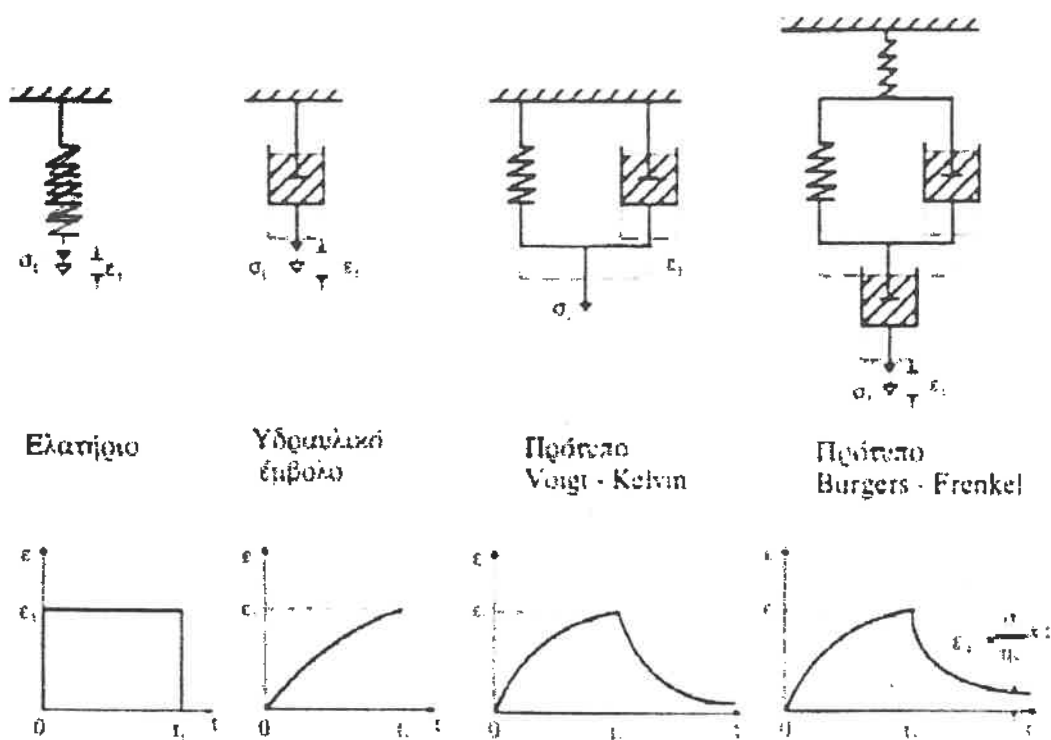
9.1 Γενικά

Όπως είναι γνωστό η μόνιμη παραμόρφωση της επιφάνειας των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αποτελεί ένα σημαντικό κριτήριο για την λειτουργική συμπεριφορά τους. Η μόνιμη αυτή παραμόρφωση λαμβάνει χώρα με την μορφή της τροχαυλάκωσης. Αν παραβεί κάποιο όριο θεωρείται ότι έχει συντελεστεί αστοχία του οδοστρώματος. Η προσπάθεια λοιπόν έχει επικεντρωθεί σε παγκόσμιο επίπεδο στην εξέταση της επίδρασης των παραγόντων, από πλευράς σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων, οι οποίοι επιδρούν στην τροχαυλάκωση και στην παρουσίαση ενός μοντέλου πρόβλεψης αυτής.

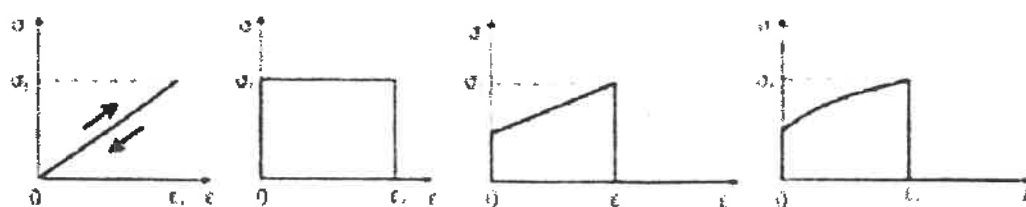
9.2 Χαρακτηριστικά παραμόρφωσης ασφαλτομιγμάτων

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί το ασφαλτόμιγμα κάτω από της συνήθεις συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας παρουσιάζει ιξωδοελαστική συμπεριφορά λόγω της παρουσίας της ασφάλτου. Αυτό οδηγεί, με την πάροδο του χρόνου, σε ανάπτυξη μονίμων παραμορφώσεων. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 9.1 το πρότυπο (δ) περιγράφει ουσιαστικά την πολύπλοκη ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου (και κατ' επέκταση και του ασφαλτομίγματος). Έτσι εάν στο πρότυπο αυτό εφαρμοστεί σταθερή τάση (σ_1), η ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ), μετά από χρόνο (τ), για συγκεκριμένη θερμοκρασία, θα μπορούσε να υπολογισθεί από το πρότυπο Burgers – Frankel, από την παρακάτω εξίσωση :

$$\epsilon = \sigma_1/E_1 + (\sigma_1/E_2) * (1 - e^{(-k)} + (\sigma_1/\eta_3) * \tau$$



Διαγράμματα ανηγμένης παραμόρφωσης - χρόνου φόρτισης



Διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης

σ = τάση, ϵ = ανηγμένη παραμόρφωση, t = χρόνος φόρτισης

- | | | | |
|---|--|--|--|
| α) Ελαστική συμπεριφορά. Αναίρεσιμη παραμόρφωση | β) Ιξώδη (πλαστική) συμπεριφορά. Μη αναιρέσιμη παραμόρφωση | γ) Ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Αναίρεσιμη παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου | δ) Ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Αναίρεσιμη και παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου |
|---|--|--|--|

Σχήμα 9.1 Συμπεριφορά ελαστικών, ιξωδών και ιξωδοελαστικών σωμάτων (Νικολαΐδης, 1996).

όπου : $\kappa = \tau * (E_2/\eta_2)$,

E_1, E_2 = μέτρα ελαστικότητας ελατηρίου και ελαστομερούς συμπεριφοράς αντίστοιχα

η_1, η_2 = ιξώδες της ελαστομερούς και νευτώνειας συμπεριφοράς

τ = χρόνος φόρτισης

Μετά την αποφόρτιση ανακτάται αμέσως η ελαστική παραμόρφωση, κατόπιν ανακτάται σιγά – σιγά η παραμόρφωση που οφείλεται στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου και τέλος, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα παραμένει μια παραμόρφωση, μη αναιρέσιμη, γνωστή ως παραμένουσα παραμόρφωση.

9.3 Εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης στο εργαστήριο

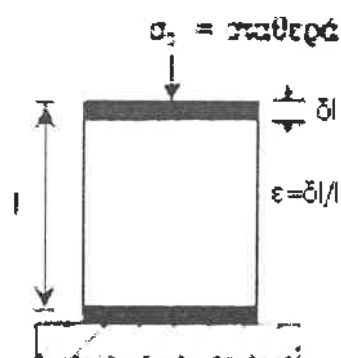
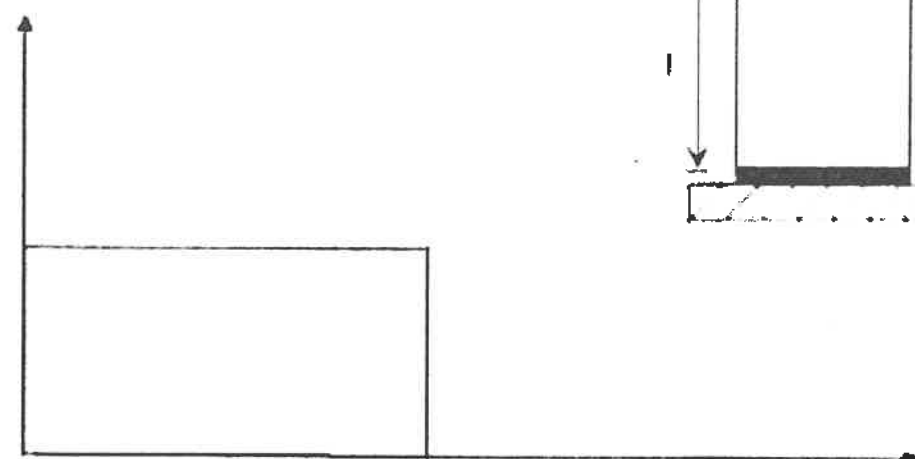
Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών παραμορφωσιμότητας των ασφαλτομιγμάτων γίνεται στο εργαστήριο με συσκευές οι οποίες επιβάλουν μονοαξονικό στατικό (ή επαναλαμβανόμενο) φορτίο για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (μια έως δυο ώρες). Αυτό έχει οδηγήσει πολλούς στο να χαρακτηρίζουν τέτοιου είδους δοκιμές ως δοκιμές καθορισμού στατικού μέτρου δυσκαμψίας ή ως δοκιμές ερπυσμού.

9.3.1 Δοκιμή με στατικό φορτίο

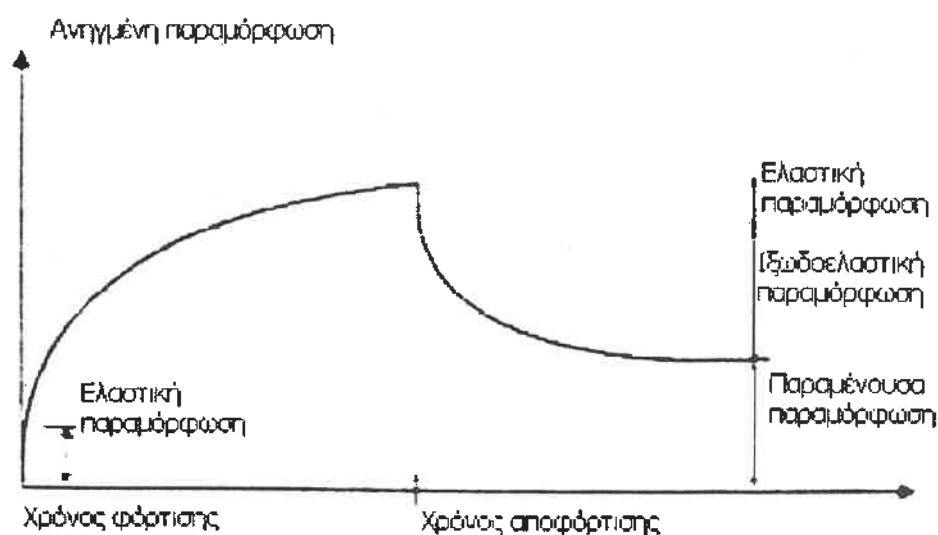
Κατά την δοκιμή αυτή σε δοκίμιο Marshall επιβάλλεται στατικό, σταθερό, μονοαξονικό φορτίο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι συνθήκες έχουν καθιερωθεί (Van de Loo, 1974) να είναι : επιβαλλόμενη σταθερή τάση $\sigma_0 = 0,1$ Μρα, θερμοκρασία ελέγχου = 40° C και χρόνος φόρτισης 1 ώρα. Πριν την εφαρμογή της επιβαλλόμενης τάσης στο δοκίμιο επιβάλλεται, για δύο λεπτά, τάση προετοιμασίας δοκιμίου 0,01 Μρα, για να διασφαλιστεί η καλή επαφή της φορτιζόμενης πλάκας με την επιφάνεια του δοκιμίου. Για την αποφυγή ανάπτυξης τριβής μεταξύ των μεταλλικών πλακών και του δοκιμίου γίνεται επάλειψη των επιφανειών του δοκιμίου με γράσσο και γραφίτη.

Η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε ερπυσμό ακολουθεί την μορφή της καμπύλης του σχήματος 9.2. Όπως γίνεται αντιληπτό η καμπύλη αυτή είναι παρόμοια με αυτή του σχήματος 9.1 (δ).

Εφαρμοζόμενη τάση $\sigma = 0$



Χρόνος φόρτισης



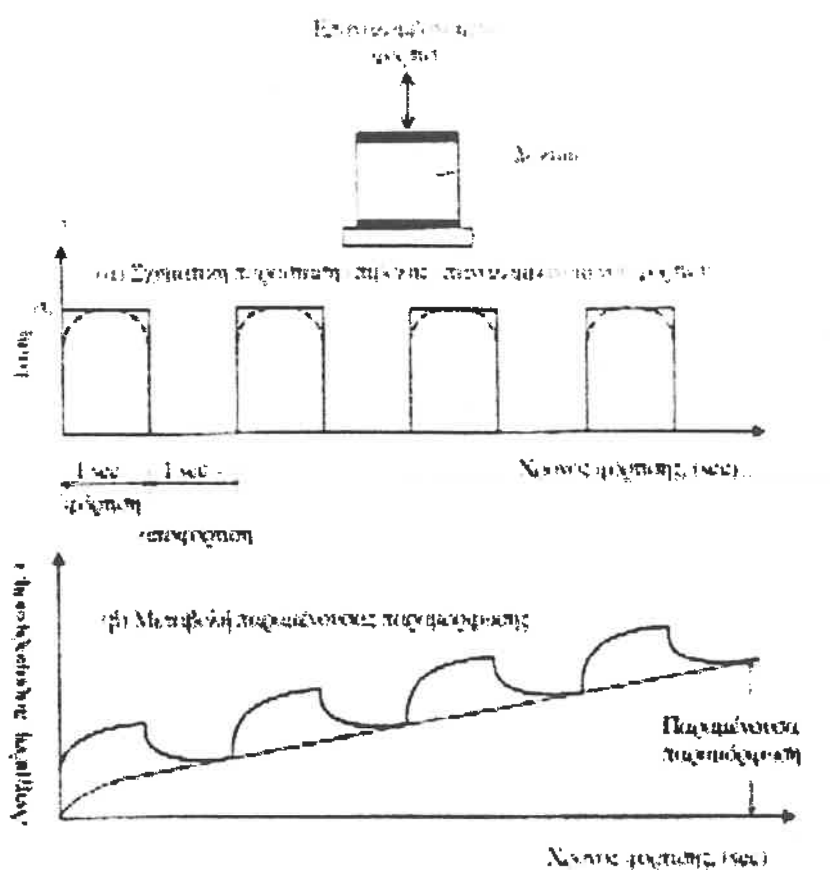
Σχήμα 9.2 Σχηματική παράσταση συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος σε ερπυσμό

9.3.2 Δοκιμή με επαναλαμβανόμενο φορτίο

Η δοκιμή ερπυσμού με επαναλαμβανόμενο φορτίο πιθανόν να ακούγεται ως σχήμα οξύμωρο δεδομένου ότι στη δοκιμή ερπυσμού επιβάλλεται πάντα σταθερό φορτίο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η δοκιμή αυτή άρχισε να χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια από ορισμένους ερευνητές δεδομένου ότι ο τρόπος φόρτισης προσομοιάζει καλύτερα την πραγματική φόρτιση των οδοστρωμάτων. Η δοκιμή είναι παρόμοια με αυτή η

οποία περιγράφηκε πριν με μόνη διαφορά ότι το φορτίο που επιβάλλεται είναι περίπου τετραγωνικής μορφής και η διάρκεια φόρτισης μεγαλύτερη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.3 κατά την διάρκεια της ηρεμίας η ελαστική παραμόρφωση ανακτάται και έτσι η συνολική παραμόρφωση μετά το πέρας της δοκιμής εμπεριέχει μόνο την παραμένουσα ή ιξώδη παραμόρφωση. Κατά την δοκιμή χρησιμοποιούνται δοκίμια Marshall και ο χρόνος φόρτισης είναι 1 sec και αποφόρτισης επίσης 1 sec.

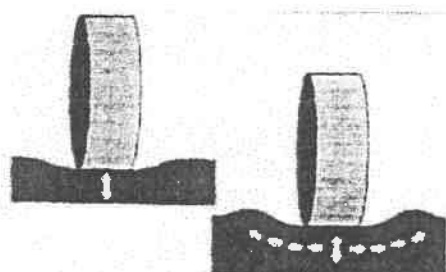
Η δοκιμή χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την αξιολόγηση των ασφαλτομιγμάτων σε ότι αφορά την συμπεριφορά αυτών σε παραμένουσα παραμόρφωση. Το βασικό πλεονέκτημα της δοκιμής είναι ότι είναι δυνατόν να εξεταστεί με καλή πιστότητα η επίδραση της τροποποιημένης ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση (Valkering et al, 1990). Και αυτό διότι ο τρόπος φόρτισης του μίγματος επιτρέπει την ελαστική παραμόρφωση να ανακληθεί, κατά την διάρκεια της περιόδου ηρεμίας.



Σχήμα 9.3 Σχηματική παράσταση παραμόρφωσης ερπυσμού κάτω από επαναλαμβανόμενο φορτίο

9.4 Η εκδήλωση της μονίμου παραμορφώσεως στα εύκαμπτα οδοστρώματα

Η εκδήλωση της μονίμου παραμορφώσεως στα εύκαμπτα οδοστρώματα εμφανίζεται με την μορφή της τροχαυλακώσεως (rutting). Τροχαυλάκωση καλείται το φαινόμενο της εμφάνισης αυλακιού κατά την διεύθυνση της κίνησης των τροχών των οχημάτων. Θεωρείται λειτουργική αστοχία κυρίως της επιφανειακής στρώσης. Στην πραγματικότητα ο μηχανισμός της τροχαυλάκωσης είναι αυτός ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 9.5. Έχουμε δηλαδή αρχικά μια συμπύκνωση του οδοστρώματος κάτω από τα φορτία της κυκλοφορίας και έπειτα λόγω των ασκουμένων διατμητικών τάσεων μια ανύψωση της επιφάνειας στα άκρα της τροχιάς των ελαστικών. Τις τάσεις αυτές σε συνήθη ασφαλτικά σκυροδέματα καλείται να αναλάβει το μίγμα ασφάλτου και λεπτών αδρανών.



Σχήμα 9.5 Μηχανισμός δημιουργίας τροχαυλακώσεως (Cooper, 1993)

9.4 Προσδιορισμός παραμένουσας παραμόρφωσης στο εργαστήριο

Προκειμένου να εκτιμηθεί εργαστηριακά η δυνατότητα των μιγμάτων SMA ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση αλλά και να συγκριθούν αυτά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε ασφαλτικά σκυροδέματα, έγινε η δοκιμή επαναληπτικής φόρτισης (Repeated Load Axial Test).

Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή του προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας, η οποία όπως έχει εξηγηθεί είναι μη καταστροφική δοκιμή. Η δοκιμή έγινε με την συσκευή NAT. Η θερμοκρασία της δοκιμής ήταν οι 73°C.

Αρχικά σε κάθε δοκίμιο επεβλήθη σε κάθε δοκίμιο τάση 10 kPa επί δυο λεπτά για να σταθεροποιηθεί το δοκίμιο και στην συνέχεια εφαρμόζεται τάση

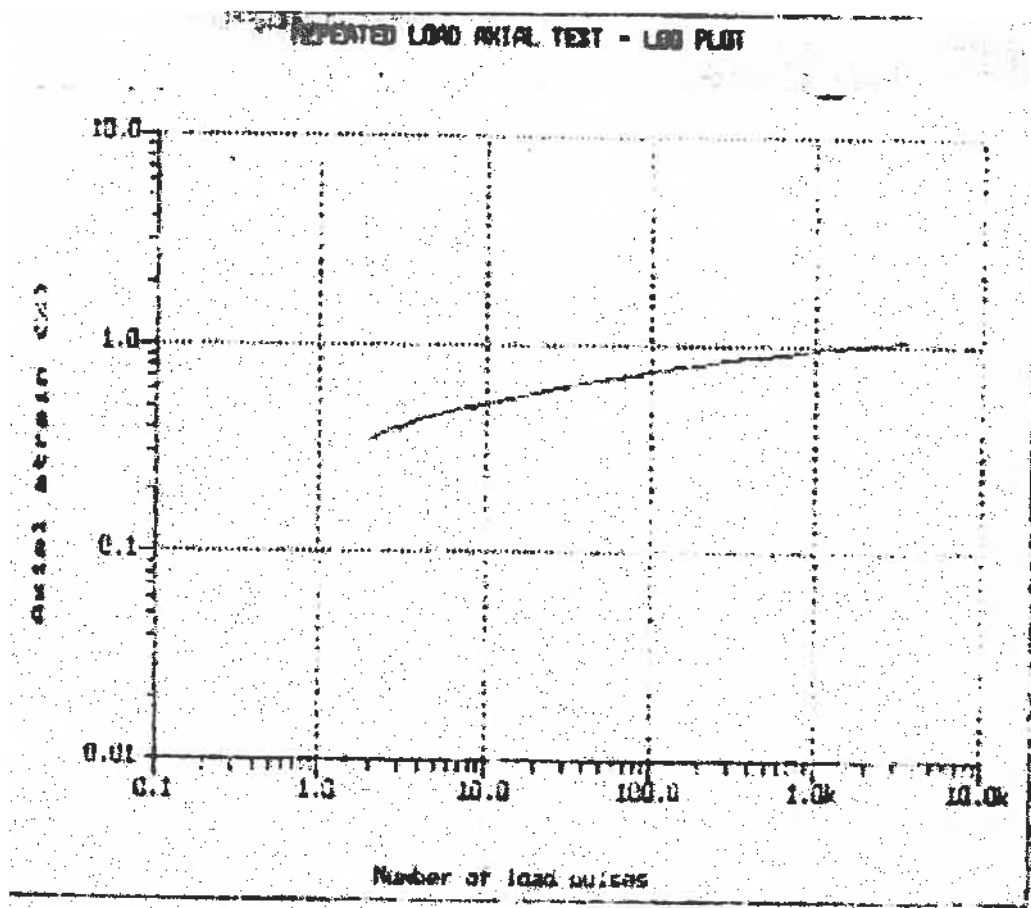
100 kPa για 3600 κύκλους φόρτισης (1 sec φορτίο 1 sec ηρεμία). Κατά την διάρκεια της δοκιμής κατεγράφησαν οι αξονικές παραμορφώσεις κατά τακτά χρονικά διαστήματα και στο τέλος εξήχθη διάγραμμα χρόνου – αξονικής παραμόρφωσης. Ένα τέτοιο διάγραμμα (όπως προκύπτει από το πρόγραμμα επεξεργασίας της συσκευής NAT) φαίνεται στο σχήμα 9.5.

Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται τρία κριτήρια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της εν λόγω δοκιμής (Hussein, et all., 1993). Εξετάζονται:

- Η τελική τιμή της παραμόρφωσης
- Η διαφορά της τελικής από την αρχική παραμόρφωση
- Η κλίση του τελευταίου τρίτου της καμπύλης η οποία σχηματίζεται (καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης – αριθμού κύκλου φόρτισης).

Για τα τέσσερα μίγματα SMA και το μίγμα ασφαλικού σκυροδέματος δίνονται οι τιμές των παραπάνω κριτηρίων στον πίνακες 9.1. Επίσης στο σχήμα 9.6 φαίνονται οι καμπύλες αξονικής παραμόρφωσης – αριθμού κύκλου φόρτισης για κάθε μίγμα όπως προκύπτουν από την δοκιμή επαναλαμβανόμενης αξονικής φόρτισης.

Σημειώνεται ότι για κάθε μίγμα αναφέρεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων τεσσάρων δοκιμών (ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους).



Σχήμα 9.5 Τυπική καμπύλη αξονικής παραμόρφωσης – αριθμού κύκλου φόρτισης όπως προκύπτει από την συσκευή NAT

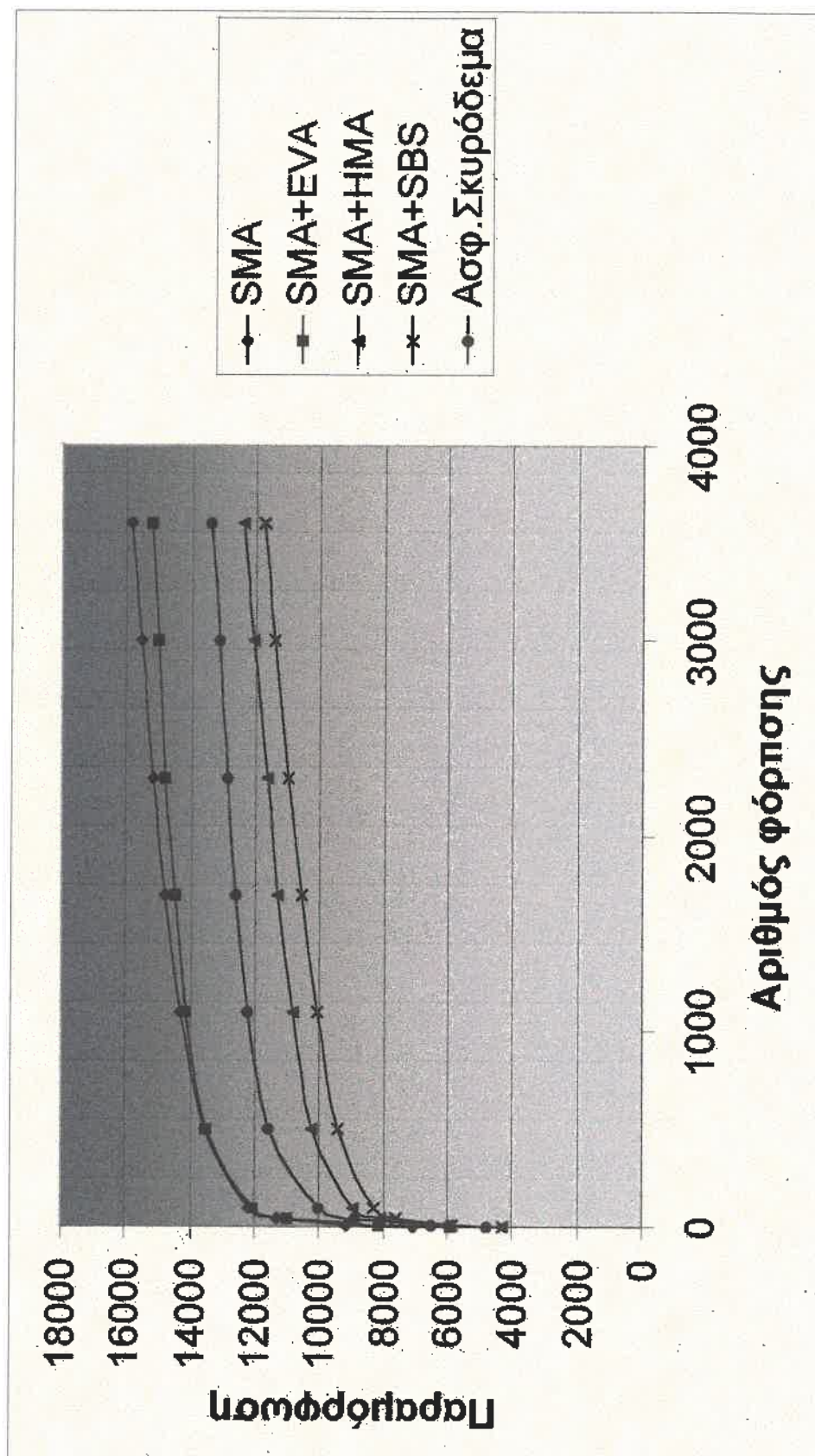
Πίνακας 9.1

Μόνιμη Παραμόρφωση			
	Ε _Τ	Ε _Τ - Ε _α	Κλίση καμπύλης
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	13372	10316	0,38
SMA	15851	11436	0,51
SMA + EVA	15216	11995	0,35
SMA + HMA	12369	9432	0,55
SMA + SBS	11759	8559	0,60

Εφαρμογή κριτηρίων μόνιμης παραμόρφωσης στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.

όπου :

- E_T = αξονική ανηγμένη παραμόρφωση μετά το πέρας της δοκιμής (10^6)
- $E_T - E_a$ = διαφορά της τελικής παραμόρφωσης (στο πέρας της δοκιμής) με την αρχική παραμόρφωση (λόγω της προφόρτισης) (10^6)
- κλίση καμπύλης = η κλίση του τελευταίου τρίτου της καμπύλης αξονικής παραμόρφωσης – χρόνου.



Σχήμα 9.5 Διάγραμμα αξονικής παραμόρφωσης – αριθμού φορτίσεων κατά την δοκιμή επαναλαμβανόμενου αξονικού φορτίου.

9.5 Σχόλια στα αποτελέσματα της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης.

9.5.1 Κριτήριο της τελικής τιμής της παραμόρφωσης

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης με βάση την τιμή της παραμόρφωσης η οποία καταγράφεται στο τέλος της δοκιμής προκύπτει ότι το μίγμα SMA παρασκευασμένο με τροποποιημένη με SBS άσφαλτο εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει το μίγμα SMA παρασκευασμένο με άσφαλτο τροποποιημένη με HMA. Έπονται το μίγμα ασφαλτικού σκυροδέματος, το μίγμα SMA παρασκευασμένο με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA και το μίγμα SMA παρασκευασμένο με κοινή άσφαλτο.

9.5.2. Κριτήριο της διαφοράς της τελικής από την αρχική τιμή παραμόρφωσης

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης με βάση την διαφορά της τελικής από την αρχική τιμή παραμόρφωσης, προκύπτει ότι το μίγμα SMA παρασκευασμένο με τροποποιημένη με SBS άσφαλτο εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει το μίγμα SMA παρασκευασμένο με άσφαλτο τροποποιημένη με HMA. Έπονται το μίγμα ασφαλτικού σκυροδέματος, το μίγμα SMA παρασκευασμένο με κοινή άσφαλτο και το μίγμα SMA παρασκευασμένο με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA .

9.5.3 Κριτήριο της κλίσης του τελευταίου τρίτου της καμπύλης παραμόρφωσης – χρόνου.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης με κριτήριο την κλίση του τελευταίου τρίτου της καμπύλης παραμόρφωσης – χρόνου, το μίγμα SMA παρασκευασμένο με άσφαλτο τροποποιημένη με EVA, εμφανίζεται να έχει την μεγαλύτερη αντίσταση έναντι παραμένουσας παραμόρφωσης ενώ αμέσως καλύτερη συμπεριφορά εμφανίζουν τα δοκίμια ασφαλτικού σκυροδέματος. Ακολουθούν το μίγμα SMA με κοινή άσφαλτο και το μίγμα SMA με άσφαλτο τροποποιημένη με HMA, ενώ

μικρότερη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση παρουσιάζει το μίγμα SMA με άσφαλτο τροποποιημένη με SBS.

9.5.4 Γενικά σχόλια

Όπως φαίνεται από τα κριτήρια τα οποία αξιολογούν τα μίγματα βάσει απολύτων τιμών παραμορφώσεων προκύπτουν αντικρουόμενα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά των κριτηρίων τα οποία αξιολογούν τα μίγματα βάση της κλίσης της καμπύλης παραμόρφωσης – χρόνου.

10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

10.1 Συμπεράσματα επάνω στην δυνατότητα συμβατικών εργαστηριακών δοκιμών να αξιολογήσουν τα μίγματα SMA.

Η ευστάθεια των δοκιμίων SMA κρίνεται χαμηλή σε σύγκριση με αυτή των δοκιμίων από ασφαλτικό σκυρόδεμα . Δεν πρέπει να παραβλέπει κανείς το γεγονός ότι η ευστάθεια δεν είναι θεμελιώδης μηχανική ιδιότητα των ασφαλτομιγμάτων αλλά εμπειρικό μέτρο για να εξασφαλιστεί ότι το μίγμα δεν έχει την τάση να παραμορφώνεται κάτω από την φόρτιση της κυκλοφορίας και το οποίο έχει προκύψει από παρατήρηση σε μίγματα τύπου ασφαλτικού σκυροδέματος . Όπως είναι γνωστό όμως στα μίγματα SMA ο μηχανισμός μεταφοράς των τάσεων αλλά και γενικά η αντίσταση σε παραμόρφωση προκύπτουν από την επαφή των χονδρόκοκκων αδρανών μεταξύ τους. Στις συνθήκες φόρτισης της εν λόγω δοκιμής ο μηχανισμός αυτός δεν ενεργοποιείται καθώς έχουμε μονοαξονική φόρτιση και ταυτόχρονα έλλειψη πλευρικής στήριξης του δοκιμίου (ή καλύτερα των αδρανών του δοκιμίου). Η επιρροή πάντως της τροποποιημένης ασφάλτου στα μίγματα SMA είναι παρόμοια με αυτήν σε ασφαλτικά σκυροδέματα αφού βλέπουμε θερμοπλαστικά και υδρογονάνθρακες να ανεβάζουν την ευστάθεια ενώ τα ελαστομερή να έχουν επίδραση μόνο στην αύξηση της παραμόρφωσης. Η δοκιμή ευστάθειας Marshall λοιπόν κρίνεται ανεπαρκής για τον χαρακτηρισμό των μιγμάτων SMA.

10.2 Συμπεράσματα επί της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων SMA

Όπως διαπιστώνει κανείς η δυσκαμψία των μιγμάτων SMA, όπως μετράται από την συσκευή NAT, έχει μικρότερη τιμή σε σχέση με την δυσκαμψία των μιγμάτων ασφαλτικού σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι τα μίγματα SMA συμπεριφέρονται χειρότερα από τα μίγματα

ασφαλτικού σκυροδέματος. Άλλωστε δεν έχει διαπιστωθεί ακόμα συσχέτιση χαμηλής τιμής δυσκαμψίας σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλής αντίστασης σε παραμένουσα παραμόρφωση (Brown, Manglorkar, 1993). Στις χαμηλές θερμοκρασίες μια υψηλή τιμή δυσκαμψίας θα σήμαινε ότι το υλικό θα γινόταν πιο ψαθυρό και άρα με μεγαλύτερη πιθανότητα να ρηγματωθεί. Συμπεραίνει κανείς λοιπόν ότι τα ασφαλομίγματα τύπου SMA ενδέχεται να ρηγματώνονται δυσκολότερα (πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται από την πράξη (Brown et al, 1997),(ΕΑΡΑ, 1998)).

Όπως ακριβώς συμβαίνει και ασφαλικά σκυροδέματα, έτσι και στα μίγματα SMA, η τροποποίηση της ασφάλτου με ελαστομερές αυξάνει την δυσκαμψία στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ δεν αυξάνεται η δυσκαμψία με την χρήση ασφάλτου τροποποιημένης με πλαστομερή.

Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς τάσεων και παραμορφώσεων σε μεθοδολογίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων οι οποίες αποδέχονται συστήματα ελαστικών στρώσεων.

Έχουν εν τούτοις διατυπωθεί επιφυλάξεις σχετικά με την χρήση της συσκευής NAT για την μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας μιγμάτων SMA (ΕΑΡΑ, 1998). Οι εν λόγω επιφυλάξεις βασίζονται στο ότι λόγω του τρόπου επιβολής της φόρτισης (η οποία όπως αναφέρθηκε είναι μονοαξονική), δεν έχουμε ενεργοποίηση του μηχανισμού της επαφής των αδρανών μεταξύ τους, αφού δεν έχουμε πλευρική στήριξή τους από άλλα αδρανή. Σημειώνεται ότι αυτός είναι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς των τάσεων σε αυτά τα μίγματα. Επίσης η προκύπτουσα τάση στο δοκίμιο είναι εφελκυστική, γεγονός που συμβαίνει στις κατώτερες ασφαλτικές βάσεις ενώ τα μίγματα SMA χρησιμοποιούνται συχνά ως λεπτές επιφανειακές στρώσεις.

10.3 Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης.

Η αντίσταση των μιγμάτων SMA σε παραμένουσα παραμόρφωση προκύπτει από την αλληλεμπλοκή και τριβή των χονδρόκοκκων αδρανών μεταξύ τους. Η συμπεριφορά τους στην πράξη είναι επιβεβαιωμένη σε όλες τις χώρες στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν (ΕΑΡΑ, 1998). Αυτό όμως δεν συμβαδίζει

με τα αποτελέσματα τα εν λόγω δοκιμής, όπου εμφανίζεται το ασφαλικό σκυρόδεμα να έχει μεγαλύτερη αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση από τα μίγματα SMA. Στην δοκιμή αυτή δεν υπάρχει πλευρική στήριξη του δοκιμίου και δεν ενεργοποιείται πλήρως ο μηχανισμός επαφής μεταξύ των αδρανών, δεν προσομοιώνεται λοιπόν πλήρως η πραγματικότητα. Η αδυναμία αυτή έχει διαπιστωθεί και για άλλα είδη μιγμάτων και έχουν προταθεί διάφορες τροποποιήσεις της διάταξης της δοκιμής. Σε μια απ' αυτές προτείνεται η διάμετρος του δοκιμίου να γίνει 150 mm ενώ η πλάκα φόρτισης να παραμείνει στα 100 mm, ώστε να εξασφαλίζεται μια ελάχιστη πλευρική στήριξη των αδρανών (Ulmgren, 1996). Επίσης με το TRL σε συνεργασία με ιδιωτικούς φορείς δοκιμάζουν μια διάταξη στην οποία το δοκίμιο βρίσκεται σε κενό αέρος.

Όπως φαίνεται από την ασυμβατότητα των συμπερασμάτων ως προς την αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση βάσει των διαφόρων κριτηρίων ερμηνείας των αποτελεσμάτων της δοκιμής, αλλά και της συνεχιζόμενης έρευνας η οποία λαμβάνει χώρα για την βελτίωση της ίδιας της δοκιμής, ενδεχομένως να μην επαρκεί πλήρως για την αξιολόγηση ασφαλομιγμάτων τύπου SMA.

Φαίνεται επίσης να κερδίζει έδαφος η δοκιμή τροχαυλακώσεως με παλλινδρομούντα τροχό (wheel – tracking test) ως δοκιμή αξιολόγησης της αντίστασης σε παραμένουσα παραμόρφωση για τα μίγματα SMA, αφού περιλαμβάνεται στο προσωρινό πρότυπο της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με το SMA (prEN 13108-5, Μάιος 1998).

10.3 Συμπεράσματα για την χρήση των αλγορίθμων υπολογισμού μέτρου δυσκαμψίας σε μίγματα SMA.

Οι αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση πολλών μετρήσεων. Η χρήση τους λοιπόν πρέπει να περιορίζεται για τιμές των παραμέτρων τους στα στενά όρια των τιμών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα αυτά. Η διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση των μιγμάτων SMA δεν φαίνεται να έχουν ληφθεί υπ' όψη.

Επίσης οι αλγόριθμοι έχουν προκύψει από δοκιμές με συνθήκες φόρτισης διαφορετικές από της δοκιμής έμμεσης διάτμησης (NAT), και ενδεχομένως χρειάζονται κάποια διόρθωση.

Λόγω των πολύ διαφορετικών τιμών δυσκαμψίας που δίνουν σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών σε σχέση με της αντίστοιχες τιμές της συσκευής NAT, δεν προτείνεται η χρήση τους για τα μίγματα SMA.

Ένα επίσης μειονέκτημα των αλγορίθμων είναι ότι δεν λαμβάνουν υπ' όψη τους την χρήση τροποποιημένης ασφάλτου μιας και στηρίζονται σε παραδοχές οι οποίες ισχύουν μόνο για την κοινή ασφαλτο οδοστρωσίας (ως προς την δυσκαμψία της ασφάλτου και του ιξώδους της).

10.4 Γενικά συμπεράσματα

Κατά το πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας έλαβαν χώρα εργαστηριακές δοκιμές σε ένα ευρύ φάσμα. Σε πρώτη φάση μετρήθηκε η δυσκαμψία των μιγμάτων SMA με κοινή ασφαλτο και SMA με τροποποιημένη ασφαλτο (με χρήση διαφορετικών αντιπροσωπευτικών τροποποιητικών). Από τα δεδομένα των δοκιμών (κενά, ποσοστό ασφάλτου, κλπ.) ενεργοποιήθηκαν αλγόριθμοι, οι οποίοι φέρονται ως εναλλακτικοί για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας. Δεν διαπιστώθηκε κάποια σχέση με τις τιμές των αλγορίθμων. Τέλος διαπιστώθηκε η αδυναμία της χρήσης των υπάρχουσών εργαστηριακών μεθόδων, τόσο συμβατικών (Marshall), όσο και περισσότερο εξελιγμένων (δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης) για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς σε παραμένουσα παραμόρφωση αυτών των μιγμάτων.

10.5 Προτάσεις

Ελλείπει αντιπροσωπευτικών δοκιμών για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των μιγμάτων SMA στην πράξη, η αξιολόγηση μεθόδων κατασκευής και σύνθεσης πρέπει να γίνεται με κατασκευή δοκιμαστικών τμημάτων οδών και παρακολούθηση τους.

Επίσης πρέπει να υπολογιστεί με την βοήθεια πολυκριτηριακής ανάλυσης, αν το αυξημένο κόστος κατασκευής τους αντισταθμίζεται από τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.Asphalt Institute (1988),** *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot – Mix Types*, Manual series No.2, College Park, Maryland.
- 2.ASTM D 4123 (1987),** *Standard Test Method for Indirect test for Resilient modulus of bituminous mixtures*, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol.04.03.
- 3.Bitumen (1999),** *Splittmastixasphalt*, Heft 1/99.
- 4.Bonnaure F., Gest G., Gravois A. and Uge P. (1977)** *A new method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46 p.64.
- 5.Brown E.R. (1993),** *Evaluation of SMA in Michigan (1991)*, NCAT Report No. 93-4.
- 6.Brown E.R., Haddock J.E., Mallick R.B., and Bukowski J. (1997),** *Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures in the United States*, NCAT Report No. 97-1.
- 7.Brown E.R., Manglorkar H. (1993),** *Evaluation of Laboratory Properties of SMA Mixtures*, NCAT Report No. 93-5.
- 8.Bukowski J. (1997),** *Stone upon stone put to the test*, Highway TechNet, FHWA.
- 9.CEN (1998),** *European Standard, Stone Mastic Asphalt (SMA), Final draft prEN13108-5.*
- 10.Claessen, A.I.M. and others (1977),** *Asphalt Pavement Design: The Shell Method*, Proceedings, 4th International Conference on the structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor.
- 11.Cooper Research Technology Limited (1993),** *Nottingham Asphalt Mix Tester Manual.*
- 12.EAPA (1998),** *Heavy Duty Surfaces: The arguments for SMA.*
- 13.Frocht M.M. (1957),** *Photoelasticity, Vol. 2*, John Wiley and Sons, New York.

- 14.Harders O. (1993),** *Effect of Mortar Stabilizers in Splitt-Mastic-Asphalt*, 5th Eurobitume Congress, Stockholm.
- 15. Hussein E., Mohamed H., Yue Z., (1994),** *Criteria for evaluation of Rutting Potential based on Repetitive Uniaxial Compression Test*, Paper No940286, Transportation Research Board, 73rd Annual Meeting.
- 16.ΚΕΔΕ (1985),** *Τεχνικές οδηγίες για την κατασκευή αντιστοιχισμένων στρώσεων*, Αθήνα.
- 17.Kennepohl G.J., Davidson J.K. (1992),** *Introduction of Stone Mastic Asphalts (SMA) in Ontario*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61 p.517.
- 18.Kallas B.F., Shook, J.F. (1969),** *Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete*, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 38.
- 19.Κόλιας Σ. Λοιζος Α. (1992)** *Σημειώσεις οδοστρωμάτων*, Ε.Μ.Π.
- 20.Maycock G. (1966),** *The problem of water thrown up by vehicles running on wet roads*, Road Research Laboratory, Report No.4.
- 21.Miller, J.S., Uzan J., Witczack M.W.(1983),** *Modification of the Asphalt Institute Bituminous Mix Modulus Predictive Equation*, Transportation Research Record 911, Transportation Research Board.
- 22.National Cooperative Highway Research Program (1999),** *Report 425, Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures for Rut-Resistant Pavements*, Transportation Research Board.
- 23,Νικολαΐδης ΑΘ. Φ. (1996),** *Οδοποιία, Οδοστρώματα – Υλικά – Έλεγχος Ποιότητας*, Θεσσαλονίκη.
- 24.Pell P.S. (1988),** *Developementsin Highway Engineering -1*, A.S. London.
- 25.Pfeiffer J., Van Doormaal P. (1936),** *The Rheological Properties of Asphaltic Bitumens*, Journal of the Institution of Petroleum, Vol. 22, p.414.
- 26.Roads/Routes (1999),** *Modified Binders, Binders with additives and special Bitumens*, No. 303, III- 1999, July 1999.
- 27.Report on the 1990 European Asphalt Study Tour (1991),** AASHTO.

- 28.Rode F., Erdlen H. (1998),** *Wearing Course Types in Asphalt Road Paving*, FAZ Special Publication.
- 29.Schellenberg K., Von der Weppen W. (1986),** *Verfahren zur Bestimmung der Homogenitäts – Stabilität von Splittmastixasphalt*, Bitumen 1, pp. 13-14.
- 30.Scherocman J.A. (1992),** *Construction of Stone Mastic Asphalt Test Sections in the U.S.*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61 p.638.
- 31.Schmidt R.J.(1972),** *A practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes*, Highway Research Record 404, Highway Research Board.
- 32.Seeds S. (1999),** *Flexible Pavement Design. Summary of the State of the Art*, The TRB Millennium Papers, Transportation Research Board.
- 33.SHRP (1992),** *Protocol P07, Resilient Modulus of Asphalt Concrete*, Long Term Pavement Performance Program Directive M-1, November 1.
- 34.Ulmgren N. (1996),** *Functional Testing of Asphalt Mixes for Permanent Deformation by Dynamic Creep Test Modification of Method and Round Robin Test*, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg.
- 35.Valkering C.P., Lancon D.J.L., De Hilster E. and Stoker D.A. (1990),** *Rutting Resistance of Asphalt Mixes Containing Non – Conventional and Polymer Modified Binders*, Paper presented at the AAPT meeting, Albuquerque, 19 – 21 February.
- 36.Van de Loo P.J. (1974),** *Creep Testing, a Simple Tool to Judge Asphalt Stability*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43 p.253.
- 37.Van Draat W.E.F., Sommer P. (1965),** *Ein Geratzur Bestimmung der Dynamischen Elastizitats modulu von Asphalt*, Strasse und Autobahn, Vol. 35.
- 38.Von Quintus H.L., Scherockman J. and Hughes C. (1989),** *Asphalt Concrete Mixture Analysis System: Philosophy of the Concept*, Asphalt Concrete Mix Design: Development of More Rational Approaches, ASTM STP 1041.

- 39.Vonk W.C., Phillips M.C., Roele M. (1993),** *Ageing Resistance of Bituminous Road Binders: The Benefits of SBS Modification*, 5th Eurobitume, Vol. 1, p.156, Stockholm.
- 40.Witczack M.W. (1978),** *Development of Regression Model for Asphalt Concrete Modulus for Use in MS – 1 Study*, Research Report, University of Maryland, College Park.
- 41.Woltereck G. (1997),** *Erfahrungen mit Splittmastixasphalt auf bayerischen Autobahnen*, Bitumen 2/97.
- 42.Yoder E., Witczack M., (1975),** *Principles of pavement design*, John Wiley & Sons, Inc.
- 43.ZTV Asphalt – StB, 1998.**