

NO: 16322.

κωδ: 16190.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ Ή ΚΑΙ
ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

RABAB JOUNI

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Σ. ΚΟΛΙΑΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2006

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στην αγαπημένη μου χώρα, Συρία.

Στη δεύτερη μου χώρα, Ελλάδα.

Στη ψυχή του πατέρα μου, που του υποσχέθηκα να ακούσει κάποια μέρα ότι η κόρη του έγινε διδάκτορας.

Στη μητέρα μου, που με περίμενε όλα τα χρόνια αυτά, με μεγάλη υπομονή και μεγάλη ελπίδα.

Στα αδέρφια μου, που έχουν μεγάλη αγάπη και μεγάλη εμπιστοσύνη σε μένα.

Στα ανίψια μου, που βρίσκω τη χαρά μου μαζί τους.

Στους Έλληνες, που με αγάπησαν και με βοήθησαν.

Rabab

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο Κοράνι αναφέρεται ότι κάθε άνθρωπος πρέπει να προσπαθεί να συμπεριφέρεται σαν να είναι ένα έθνος. Δεν μπόρεσα να καταλάβω τα λόγια αυτά, μέχρι που δούλεψα με τον Καθηγητή μου, επιβλέποντά της παρούσας διδακτορικής διατριβής, κ. **Στυλιανό Κόλια**, και ανακάλυψα σε αυτόν ένα ολόκληρο έθνος! Γιατί με τη μεγάλη του εμπειρία, τις δυνάμεις, το μυαλό και την καρδιά, δουλεύει σαν ένα έθνος. Και όλα αυτά με τη διάθεση να μεταλαμπαδεύει τον πακτωλό των γνώσεων του όποτε και όπου του δοθεί ευκαιρία.

Τον θαυμάζω από τον τρόπο του να προσεγγίζει τους μαθητές του, να τους διδάσκει, να τους συμβουλεύει και να τους εισαγάγει στην έρευνα και στην επιστήμη. Κατά τη διάρκεια της διδακτορικής έρευνας μου, με έμαθε να σκέφτομαι λογικά και *επιστημονικά*, να δουλεύω με συνέπεια, και μου υπέδειξε τον τρόπο για να ανταπεξέρχομαι στα όσα έπρεπε να κάνω, με την όποια δύναμη έχω.

Τον ευχαριστώ με όλη μου την καρδιά που δέχτηκε να επιβλέψει τη διατριβή μου, παρόλο που προερχόμουν από διαφορετικό πανεπιστήμιο, με ξένη γλώσσα. Τον ευχαριστώ που δέχτηκε να αρχίσει μαζί μου από το μηδέν, και να με βοηθάει σε όλα τα προβλήματα που συνάντησα για να μπορέσω να προχωρήσω. Δε θα ξεχάσω ποτέ το μεγάλο κόπο που κατέβαλλε για να διορθώσει αυτή τη διατριβή, και το μεγάλο κουράγιο που μου έδωσε για να τη γράψω. Όμως ένα ευχαριστώ δεν είναι αρκετό, γι' αυτό θα ήθελα να του πω: "Θα προσπαθήσω να διευρύνω τις γνώσεις που κατάφερα να μάθω από σας, και θα τις μεταφέρω στη χώρα μου για να γυρίζει το καλό σε σας για πάντα".

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. **Α. Λοΐζο**, Αν. Καθηγητή ΕΜΠ, μέλος της τριμελούς Επιτροπής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για τις σημαντικές υποδείξεις του στην διατριβή μου. Επίσης τον ευχαριστώ για τη συμπαράστασή του, που συντέλεσε στην ταχύτερη ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Ένας άλλος καθηγητής παρακολουθούσε την πρόοδο της διατριβής μου με μεγάλο ενδιαφέρον. Η συμβολή του στην επίλυση των προβλημάτων που αντιμετώπισα ήταν καθοριστική. Η παρουσία του με έκανε να νιώθω πάντα ασφαλής. Για όλα αυτά, και για τις σημαντικές διορθώσεις και παρατηρήσεις του στο περιεχόμενο της διατριβής

μου, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο και θερμό ευχαριστώ στον κ. **Γ. Κανελλαΐδη**, Καθηγητή ΕΜΠ, μέλος της τριμελούς επιτροπής.

Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλη την ομάδα του καθηγητή κ. Στυλιανού Κόλια, Μ. Κατσάκου, Ε. Κυρκιλή, Α. Καραχάλιο, Κ. Ζόμπολα, για τη σημαντική βοήθειά της τόσο στην παρασκευή των δοκιμών όσο και στη διεξαγωγή των δοκιμών. Με τη μεγάλη εργαστηριακή εμπειρία της, διευκολύνθηκε κατά πολύ το έργο μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την ομάδα του καθηγητή κ. Α. Λοΐζου στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ, για την καλή συνεργασία της. Ιδιαίτερα τις συνεργάτιδες (Ε. Παπαχριστοφόρου, Χ. Πλατή, Σ. Δημητρέλλου, Ε. Σφακιανάκη), για την υποστήριξή τους.

Ευχαριστώ επίσης το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών της Ελλάδος, το οποίο παρείχε την οικονομική υποστήριξη, για την εκπόνηση αυτής της διδακτορικής διατριβής. Ιδιαίτερα τις κυρίες Μ. Μικεδάκη και Γ. Μαμά για το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που έδειξαν στην επίλυση των προβλημάτων που συνάντησα.

Δράττομαι της ευκαιρίας για να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Αλούπη από την εταιρεία ΕΣΧΑ, για τα υλικά (ασφαλικό γαλάκτωμα) που μας παρείχε καθώς και για τις συμβουλές του, σε σχετικά θέματα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά της αδερφής μου, για τη φιλοξενία της. Χωρίς τη στήριξη και τη βοήθειά της, στα δύο πρώτα χρόνια μου στην Ελλάδα, δε θα μπορούσα να προχωρήσω ούτε να αντέξω μακριά από την οικογένειά μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
----------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	6
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	6
1.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ	6
1.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ	14
1.4. ΤΥΠΟΙ/ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ	15
1.4.1. Κριτήριο "Οδόστρωμα"	15
1.4.1.1. Ανακύκλωση εύκαμπτων οδοστρωμάτων	15
1.4.1.2. Ανακύκλωση οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα	15
1.4.2. Κριτήριο θερμοκρασίας	15
1.4.2.1. Ψυχρή ανακύκλωση	15
1.4.2.2. Θερμή ανακύκλωση	16
1.4.3. Κριτήριο θέσεως	16
1.4.3.1. Ανακύκλωση επιτόπου	16
1.4.3.2. Ανακύκλωση σε σταθερή εγκατάσταση ανάμιξης	16
1.4.4. Κριτήριο συνδετικού υλικού	16
1.4.4.1. Ανακύκλωση σε ασύνδετες στρώσεις	16
1.4.4.2. Ανακύκλωση σε συνδεδεμένα υλικά	17
1.4.4.2.1. Σταθεροποίηση με υδραυλικές κονίες (Τσιμέντο, Άσβεστος, Ιπτάμενη Τέφρα)	17
1.4.4.2.2. Σταθεροποίηση με ασφαλτικά υλικά	18
1.4.4.2.2.1. Ασφαλτικό γαλάκτωμα	18
1.4.4.2.2.2. Αφρώδης άσφαλτος	20
1.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ Η ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟ	23
2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	23
2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ	23
2.2.1. Ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους	25

2.2.2. Ανακύκλωση στρώσης μικρού βάθους	25
2.2.3. Αναβάθμιση μη επίπεδων χαλικοστρωμένων δρόμων	26
2.3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	28
2.3.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση	28
2.3.2. Περιεκτικότητα σε άσφαλτο	29
2.3.3. Διείσδυση και ιξώδες	29
2.4. ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΑ	29
2.4.1. Κατηγορίες των ασφαλτικών γαλακτωμάτων	30
2.4.2. Ιδιότητες του ασφαλτικού γαλακτώματος	32
2.4.2.1. Διάσπαση του γαλακτώματος	32
2.4.2.2. Ιξώδες του γαλακτώματος	33
2.4.2.3. Σταθερότητα των γαλακτωμάτων	35
2.4.2.4. Η Κροκύδωση	36
2.4.2.5. Συγχώνευση	36
2.4.3. Επίδραση του ασφαλτικού γαλακτώματος στην παλιά άσφαλτο των φρεζαρισμένων ασφαλτομιγμάτων	37
2.5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ	37
2.5.1. Διάστρωση	37
2.5.2. Συμπύκνωση	38
2.5.3. Συντήρηση	39
2.5.4. Προστασία της εργασίας	40
2.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΎΓΡΑΣΙΑΣ	40
2.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ	41
2.8. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ

ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	47
3.1. ΤΛΙΚΑ	47
3.1.1. Συνδετικά υλικά	47
3.1.2. Αδρανή υλικά	48
3.2. ΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ	49
3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΎΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ	50
3.4. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	52

3.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΥ ΤΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ (δοκιμή εκχύλισης)	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ – ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	66
4.1. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	66
4.1.1. Προετοιμασία των μιγμάτων	66
4.1.2. Προετοιμασία των δοκιμών	66
4.1.2.1. Συμπύκνωση των δοκιμών	67
4.1.2.2. Προφυλακτικά μέτρα για την φύλαξη και συντήρηση των δοκιμών	68
4.1.2.3. Συντήρηση των δοκιμών.....	69
4.2. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	71
4.2.1. Μέτρο δυσκαμψίας	71
4.2.2. Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό - Διάρρηξη	72
4.2.3. Δοκιμή υδρεμποτισμού	73
4.2.4. Δοκιμές συμπίκνωσης (Proctor)	73
4.2.5. Δοκιμή κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	75
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	75
5.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ	76
5.3. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΜΙΞΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	80
5.4. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	83
5.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟΥ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ	95
6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	95
6.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΎΓΡΩΝ	96
6.3. ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΤΡΙΚΟΥ - ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	99
6.3.1. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	108

6.4. ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	113
6.5. ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΑΔΡΑΝΩΝ	119
6.6. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	121
6.7. ΤΔΡΕΜΠΟΤΙΣΜΟΣ	122
6.7.1. Πρώτη σειρά δοκιμών	124
6.7.2. Δεύτερη σειρά δοκιμών-Επίδραση του είδους και του ποσοστού του συνδετικού υλικού στα μίγματα 50%ΦΑ και 100%ΦΑ	128
6.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ

ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

7.1. ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ..	138
7.2. ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΤΑΞΗΣ (ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ)	140
7.3. ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	143
7.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	146
7.5. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΤSM	148
7.5.1. Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας θερμών ασφαλτομιγμάτων με τον αριθμό των επαναλήψεων των φορτίσεων	151
7.5.2. Σύγκριση της τάσης που αναπτύσσεται στη δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό με την τιμή της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη	154
7.6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝ Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	155
7.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ Ή ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	155
7.8. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ	160
7.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	161

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	162
8.1. ΓΕΝΙΚΑ	162
8.2. ΚΟΠΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	166
8.2.1. Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά σε κόπωση των ασφαλτομιγμάτων	167
8.2.1.1. Συμπύκνωση δοκιμίων	167
8.2.1.2. Τρόπος φόρτισης	167
8.2.1.3. Χαρακτηριστικά μίγματος	170
8.2.1.4. Τρόπος μεταβολής του φορτίου	170
8.2.2. Δοκιμές κόπωσης ασφαλτομιγμάτων	170
8.2.2.1. Δοκιμές κόπωσης σε κάμψη	170
8.2.2.2. Δοκιμές κόπωσης σε κάμψη με συνεχή έδραση	172
8.2.2.3. Δοκιμές κόπωσης σε μονοαξονική φόρτιση	173
8.2.2.4. Δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη (Εμμεσος Εφελκυσμός)	173
8.2.2.5. Δοκιμές κόπωσης σε τριαξονική φόρτιση	174
8.2.2.6. Δοκιμές κόπωσης με αρχές θραυστομηχανικής	174
8.2.2.7. Δοκιμές κόπωσης με φόρτιση από κινούμενο τροχό	174
8.2.3. Γενικές αρχές της δοκιμής κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό	175
8.2.3.1. Διαδικασία δοκιμών κόπωσης	176
8.3. ΚΟΠΩΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ Ή ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟ	181
8.3.1. Εργαστηριακές δοκιμές	181
8.3.1.1. Εκτέλεση δοκιμών κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό (Αντιδιαμετρική θλίψη)	181
8.3.2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων	187
8.3.3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες έρευνες	204
8.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	214
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	216
 ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	220
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	221
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Α-	A-1
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Β-	B-1

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διατριβή εξετάζεται συστηματικά, ένα ευρύ φάσμα υλικών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στις εργασίες της επιτόπου σε βάθος ψυχρής ανακύκλωσης φθαρμένων ασφαλικών οδοστρωμάτων με ασφατικό γαλάκτωμα με ή χωρίς τσιμέντο. Τα υλικά που εξετάζονται είναι φρεζαρισμένο ασφατόμιγμα (ΦΑ) και μίγματα αυτού με θραυστό αμμοχάλικο (ΘΑ), όπως είναι δυνατόν να βρεθούν στην πράξη σε εργασίες ανακύκλωσης. Τα μίγματα που εξετάζονται αποτελούνται από 100% Φρεζαρισμένο Ασφατόμιγμα (100%ΦΑ) και από μίγμα Φρεζαρισμένου Ασφατομίγματος (ΦΑ) και Θραυστού Αμμοχάλικου (ΘΑ) σε αναλογίες κ.β 50% ΦΑ και 50% ΘΑ (50%ΦΑ). Εξετάζεται επίσης για λόγους πληρότητας της ερευνητικής εργασίας και υλικό που αποτελείται από 100% θραυστό αμμοχάλικο καίτοι η πιθανότητα περιπτώσεων ανακύκλωσης τέτοιων υλικών είναι μάλλον σπάνια. Ως συνδετικά υλικά για την ανακύκλωση εξετάζονται ανιονικό γαλάκτωμα (τύπου ΑΕ-5 βραδείας διάσπασης με ποσοστό ασφάλτου 60%), σε συνδυασμό με τσιμέντο (CEM II/B-M 32.5 N) ή χωρίς τσιμέντο σε ποσοστά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1.: Ποσοστά συνδετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

Γαλάκτωμα % κ.β	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Τσιμέντο % κ.β	0	0	0	2	2	2	3	3	3	4	4	4

Επισημαίνεται ότι αντίθετα με πολλές άλλες έρευνες στην ερευνητική αυτή εργασία το τσιμέντο θεωρείται ως συνδετικό υλικό και όχι ως απλό φύλλερ, και για τον λόγο αυτό πολλές από τις διαδικασίες και μεθόδους δοκιμών έπρεπε να εξετασθούν προσεκτικά και σε ορισμένες περιπτώσεις να αναθεωρηθούν για να αναδειχθεί η επιρροή του τσιμέντου στα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι :

- ο Μέτρο δυσκαμψίας με φόρτιση σε έμμεσο εφελκυσμό
- ο Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

- ο Ανθεκτικότητα σε υδρεμποτισμό με έλεγχο της μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας
- ο Ανθεκτικότητα σε υδρεμποτισμό με έλεγχο της μεταβολής της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη)
- ο Αντοχή σε κόπωση σε έμμεσο εφελκυσμό.

Η ερευνητική πειραματική εργασία διακρίνεται σε τρία κυρίως μέρη:

Το πρώτο μέρος αφορά στη διερεύνηση των διαδικασιών παρασκευής συντήρησης και δοκιμασίας των υλικών έτσι ώστε να μην παρεμποδίζεται το τσιμέντο να αναπτύξει τους δεσμούς του, δεδομένου ότι στην πράξη αυτό είναι εφικτό στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Το μέρος αυτό περιλαμβάνει τις ακόλουθες έρευνες σχετικά με την επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό των ακόλουθων παραγόντων:

- ο Σειρά ανάμιξης γαλακτώματος, τσιμέντου, νερού
- ο Χρόνος αναμονής από το πέρας της ανάμιξης μέχρι την έναρξη της συμπίκνωσης
- ο Μέθοδος συντήρησης και ξήρανσης των δοκιμίων

Το δεύτερο μέρος αφορά στη διερεύνηση της επίδρασης στο μέτρο δυσκαμψίας και στη αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό των ακόλουθων παραγόντων:

- ο Αναλογίες ανάμιξης φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και θραυστού αμμοχάλικου
- ο Ποσοστά συνδετικών υλικών (γαλακτώματος με ή χωρίς συνδυασμό με τσιμέντο)
- ο Διάσταση μέγιστου κόκκου
- ο Θερμοκρασία δοκιμών
- ο Υδρεμποτισμός
- ο Χρόνος συντήρησης

Το τρίτο μέρος αφορά συστηματικές δοκιμές σε κόπωση σε 9 μίγματα κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από 20 έως 40 δοκίμια. Οι δοκιμές έγιναν σε επαναλαμβανόμενο έμμεσο εφελκυσμό υπό ελεγχόμενη τάση.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας είναι:

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

- Η σειρά ανάμιξης επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας, αλλά όχι την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.
- Η προανάμιξη του γαλακτώματος με το νερό ελαττώνει το μέτρο δυσκαμψίας των μιγμάτων και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων.
- Για τις δοκιμές στο εργαστήριο, φαίνεται ότι η σειρά ανάμιξης αδρανή - τσιμέντο - νερό - γαλάκτωμα είναι προτιμητέα.
- Όταν η συμπίκνωση των μιγμάτων γίνεται αμέσως μετά το πέρας της ανάμιξης επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές στο μέτρο δυσκαμψίας, ενώ η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό δεν φαίνεται να επηρεάζεται
- Για τα μίγματα με 50%ΦΑ αύξηση της μέγιστης διάστασης αδρανούς από 12.5mm σε 19mm, έχει ως συνέπεια την αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, αλλά και την αύξηση της μεταβλητότητας στις δοκιμές αυτές.
- Η συντήρηση των δοκιμών αμέσως μετά την παρασκευή τους συνιστάται να είναι:
 - Για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο: 3 ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C.
 - Για τα μίγματα με τσιμέντο: 7 ημέρες σε υγρό θάλαμο (RH > 98%) και 2 ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο στους 60°C.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΣΥΔΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΦΑ ΚΑΙ ΘΑ

- Το μέτρο δυσκαμψίας αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου, ενώ η αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος από 2% σε 3% και 4% επιφέρει το αντίθετο αποτέλεσμα.
- Το τσιμέντο βελτιώνει την αντοχή των μιγμάτων με 50%ΦΑ καλύτερα από τα μίγματα με 100%ΦΑ.
- Αύξηση του ποσοστού του ΦΑ μειώνει το μέτρο δυσκαμψίας των μιγμάτων.
- Οι λόγοι g/R και t/T των μέτρων δυσκαμψίας και των αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό σε κορεσμένη και σε ξηρή κατάσταση αντίστοιχα για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν, είναι μέσα στα όρια αποδοχής των προδιαγραφών (PIARC, 2002).

- Δίνονται ενδεικτικές τιμές των βέλτιστων ποσοστών γαλακτώματος και τσιμέντου για την επίτευξη των μέγιστων τιμών στο α) μέτρο δυσκαμψίας, β) αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, γ) ανθεκτικότητα στην επίδραση του νερού.

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

- Το τσιμέντο διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των μιγμάτων σε κόπωση μειώνοντας την κλίση της γραμμής κόπωσης ως προς τον άξονα των επαναλήψεων των φορτίσεων και μεταθέτοντας αυτή προς τα πάνω (μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης $\epsilon_{x\max}$).
- Η αύξηση της περιεκτικότητας σε γαλάκτωμα από 2% έως 3% φαίνεται ότι ελαττώνει την αντοχή των μιγμάτων σε κόπωση όταν περιέχουν τσιμέντο, ενώ δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση όταν τα μίγματα δεν περιέχουν τσιμέντο.
- Τα μίγματα που δεν περιέχουν τσιμέντο με 100%ΦΑ παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από τα αντίστοιχα μίγματα με 50%ΦΑ,
- Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος για την καλύτερη αντοχή σε κόπωση βρέθηκε για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο 2%- 3%, και για τα μίγματα με τσιμέντο 2%, τόσο για τα μίγματα με 100%ΦΑ όσο και για εκείνα με 50%ΦΑ.
- Η αντοχή σε κόπωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από των ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων με γαλάκτωμα.
- Η αντοχή σε κόπωση των αφρωδών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 50%ΦΑ ανακυκλωμένων με ασφαλτικό γαλάκτωμα, ενώ είναι παρόμοια με την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 100%ΦΑ.

SUMMARY

A wide range of materials which can be used in cold in place recycling of flexible pavements, with bitumen emulsion with or without cement, is systematically examined in the laboratory in order to determine the mechanical characteristics of the resulting recycled materials. The examined materials consist of mixtures of milled bituminous material (designated MBM), with crushed limestone aggregates (designated CA) in proportions b.m. 100% MBM or 50% MBM with 50% CA. For reasons of better understanding of the mechanical behaviour of the recycled materials, mixtures of 100% CA are also examined, although the possibility of recycling of this type of materials is rather remote. Slow braking, anionic emulsion (AE-5) and cement type CEM II B/M 32.5 N were used as binders in proportions b.m. of dry materials shown in Table 1.

Table 1: Binder contents used in the research work

emulsion % b.m	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Cement % b.m	0	0	0	2	2	2	3	3	3	4	4	4

It is noted that in this research work cement is considered as a binder and not as filler and for this reason a number of testing procedures had to be modified in order to allow for cement hydration and strength development.

The mechanical characteristics, which are examined, are:

- Stiffness modulus in indirect tension (ITSM)
- Indirect tensile strength (ITS)
- Water sensitivity as estimated by the changes in stiffness modulus after water soaking for 24 hrs

- Water sensitivity as estimated by the changes in indirect tensile strength after water soaking for 24 hrs
- Fatigue tests in indirect tensile tests under controlled stress mode

The research work consists of three parts:

In the first part the procedures of making and curing specimens are examined and modified in order to develop procedures which allow the development of bonding of cement and aggregate particles (either of MBM or CA) since in the majority of cases in practice this is feasible. In this part the influence of

- the mixing sequence of emulsion, cement and water
- the time allowed after completion of mixing until the start of the compaction
- the method of specimen curing and drying

on stiffness modulus (ITSM) and on indirect tensile strength (ITS) is examined.

In the second part the influence of the following parameters:

- mix proportions of MBM and CA
- binder combinations and contents
- max size of aggregates
- specimen temperature
- water soaking
- time of curing

on ITSM and ITS values is examined.

In the third part repeated indirect tensile fatigue tests are carried out on 9 mixes consisting of either 50% MBM and 50% CA or 100% MBM with various percentages of emulsion and cement. For each mix between 20 and 40 specimens were tested in fatigue.

The main conclusions of this research work are:

Specimen preparation and curing

- Mixing sequence affects stiffness modulus values but it does not seem to affect indirect tensile strength.
- Pre-mixing emulsion and water decreases stiffness modulus and the variability of the test.
- When compaction starts immediately after completion of mixing, higher stiffness values are obtained while indirect tensile strength does not seem to be affected.
- 50% MBM 50% CA mixes showed higher stiffness and higher indirect tensile strength when the max aggregate size increased from 12.5mm to 19mm. The variability of the tests however, also increased.
- It is recommended that the curing of the specimens immediately after compaction should be:
 - For the mixes without cement: 3 days in well ventilated oven at 60 °C
 - For the mixes containing cement: 7 days in a moist curing room (RH > 98%) and 2 days in a well ventilated oven at 60 °C.

Influence of binders and proportions of MBM and CA in the mix

- Stiffness modulus values increase with the increase of cement content but increase in the emulsion content from 2% to 3% or 4% decreases stiffness values.
- Cement increases tensile strength of mixes with 50%MBM more effectively than it increases for the mixes with 100% MBM.
- Increase of MBM content decreases stiffness.
- The ratios r/R and t/T of stiffness and indirect tensile strength values in soaked and dry state respectively are within the range of accepted values for all mixes examined.
- Optimum percentages of binders in order to achieve maximum values in: a) stiffness modulus, b) indirect tensile strength and no sensitivity to water saturation are suggested.

Fatigue tests

- Cement modifies the fatigue behaviour of the recycled materials by reducing the slope to the axis of X ($\log N$) of the fatigue line and by transferring the line towards higher values of strain $\epsilon_{\max}$.
- Increase of the emulsion content from 2% to 3% b.m. seems to reduce the fatigue life of mixes containing cement but it does not affect significantly the fatigue behaviour of mixes with emulsion only.
- Comparing mixes without cement the 100%MBM have superior behaviour than the 50%MBM (50%CA) mixes.
- The optimum emulsion content for best fatigue behaviour is for mixes without cement between 2% and 3% and for mixes with cement 2% for both 100% MBM and 50%MBM (50% CA) mix proportions.
- Fatigue behaviour of the ordinary hot asphalt mixes is superior than that of the recycled mixes without cement.
- 100% MBM recycled mixes without cement have fatigue behaviour which is not significantly different than that of foamed asphalt mixes while 50%MBM (50%CA) recycled mixes are inferior than the foamed asphalt mixes.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -1-

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η πρώτη μορφή ανακύκλωσης των οδοστρωμάτων εμφανίστηκε πριν 80 περίπου χρόνια, πλην όμως η βιομηχανία κατασκευής και συντήρησης των οδοστρωμάτων άρχισε να δίνει ιδιαίτερη έμφαση μόνο μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση (1973), η οποία όπως είναι γνωστό επέφερε αύξηση του κόστους των πρώτων υλών (άσφαλτος και αδρανή). Από το 1973 και για μία δεκαετία η έρευνα και η εφαρμογή της ανακύκλωσης παρουσίασε έξαρση σε όλες σχεδόν της χώρες. Με την πτώση και την ομαλοποίηση των τιμών του αργού πετρελαίου στο τέλος της δεκαετίας του '80 η εφαρμογή της ανακύκλωσης σταθεροποιήθηκε. Έτσι, σήμερα χρησιμοποιείται ως ισοδύναμη εναλλακτική λύση για τη συντήρηση, την αποκατάσταση, την ενίσχυση, ή ακόμη και την ανακατασκευή των οδοστρωμάτων. Με δεδομένο το περιβαλλοντικό και ενεργειακό πρόβλημα το οποίο οξύνεται κατά καιρούς, η ανακύκλωση δε θα πάψει να βρίσκει όλο και περισσότερους οπαδούς.

Στην Ελλάδα, η πρώτη δοκιμαστική εφαρμογή ανακύκλωσης έγινε κατά το διάστημα 1984-85. Στα πειραματικά κομμάτια που ανακυκλώθηκαν χρησιμοποιήθηκε η θερμή ανακύκλωση και ειδικότερα οι τεχνικές αναμόρφωσης, αναδιάστροφης και επανάμιξης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μετά από ένα χρόνο χρήσης των ταπήτων κρίθηκαν ικανοποιητικά. Το οικονομικό όφελος έναντι των συμβατικών μεθόδων συντήρησης στις περισσότερες των θέσεων που εφαρμόστηκε η ανακύκλωση, δεν ήταν εμφανές. Αυτό αιτιολογήθηκε από το γεγονός ότι ήταν πειραματική εφαρμογή, και ως συνέπεια είχε αυξημένες λειτουργικές δαπάνες.

Συμπερασματικά αναφέρθηκε ότι σε ευρείας κλίμακας εφαρμογή της ανακύκλωσης αναμένεται μείωση του κόστους κατασκευής κατά 25% (Νικολαΐδης, 2002).

1.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων συνίσταται στην επαναχρησιμοποίηση των άχρηστων/ παρωπρωϊόντων υλικών (τα ασφαλτομίγματα και τα ασύνδετα αμμοχάλικα), που προκύπτουν

από τις εργασίες συντήρησης και αναβάθμισης φθαρμένων οδοστρωμάτων, και στη δημιουργία ενός ομογενούς σταθεροποιημένου ή μη σταθεροποιημένου μίγματος, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της στρώσης υποβάσης ή βάσης του νέου ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση απαιτεί τη χρήση των τυπικών μηχανών ανακύκλωσης με ένα θάλαμο ανάμιξης. Ενώ η διαδικασία φρεζαρίσματος πραγματοποιείται στο μπροστινό μέρος της μηχανής, το φρεζαρισμένο υλικό περνάει μέσα από ένα θάλαμο ανάμιξης όπου αναμιγνύεται με τα συνδετικά υλικά (τσιμέντο, ασφαλτικό γαλάκτωμα, αφρώδη άσφαλτο, άσβεστος, και ιπτάμενη τέφρα). Έστερα το μίγμα τοποθετείται στη μεριά του οδοστρώματος που έχει φρεζαριστεί και συμπτυνώνεται (Romanoschi and Mustaque, 2003). Η διαδικασία πραγματοποιείται με μία διέλευση με ειδική μηχανή όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1 (PIARC, 2002), ή με σειρά μηχανημάτων όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2 και στη φωτογραφία 1.1.

Στην πράξη υπάρχει μεγάλη ποικιλία μηχανικού εξοπλισμού:

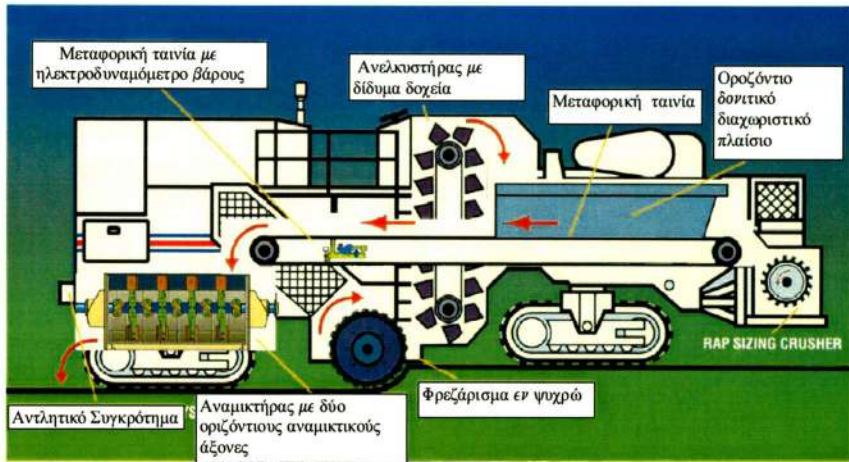
α) Μηχανή μίας διέλευσης

- Μηχανή μίας διέλευσης με δεξαμενή γαλακτώματος και διαστρωτήρα
- Μηχανή μίας διέλευσης φρεζάρει υπάρχον οδόστρωμα, διανέμει το συνδετικό υλικό ανακύκλωσης και εναποθέτει το υλικό σε σειράδια
- Ο διαστρωτήρας παραλαμβάνει το ανακυκλωμένο υλικό και το διαστρώνει με ένα πήχυ.

β) Συρμός μηχανημάτων μίας διέλευσης

-Συστατικά του συρμού:

- 1-Μηχανή φρεζαρίσματος εν ψυχρώ
- 2-Μεταφερόμενος θραυστήρας
- 3-Μεταφερόμενος αναμικτήρας
- 4-Μηχανή διάστρωσης



Σχήμα 1.1: Διαδικασία ανακύκλωσης σε μηχανή μίας διέλευσης (PIARC, 2002).



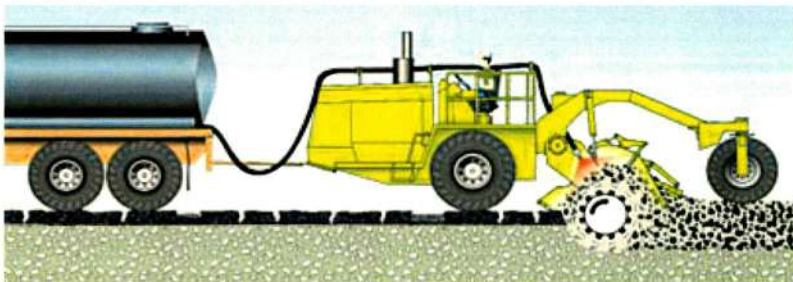
Σχήμα 1.2: Διαδικασία ανακύκλωσης με συρμό μηχανημάτων.

Στην ανακυκλωμένη στρώση διαστρώνεται στρώση επάλειψης, προκειμένου να προστατευθεί από την κυκλοφορία και τις καιρικές μεταβολές κατά τη διάρκεια των έργων. Ο ανακυκλωμένος δρόμος μπορεί να δοθεί για κυκλοφορία αμέσως όταν η στρώση επάλειψης θα έχει ολοκληρωθεί. Η κυκλοφορία γίνεται αφού διαμορφωθεί μία στρώση, η οποία -για δρόμους ελαφράς κυκλοφορίας- μπορεί να είναι μία λεπτή στρώση θερμού ασφαλτομίγματος ή μια απλή επάλειψη με αδρανή, ενώ για δρόμους βαριάς κυκλοφορίας απαιτείται τόσο μία ασφατική βάση όσο και μία επιφανειακή ασφατική στρώση κύλισης.

Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση συνίσταται από τις ακόλουθες θεμελιώδεις διαδικασίες:

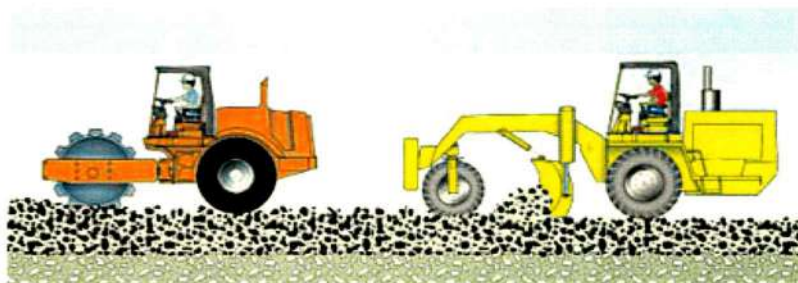
- Φρεζάρισμα του φθαρμένου οδοστρώματος.
- Μεταμόρφωση των φρεζαρισμένων υλικών σε ένα ομογενές υλικό.
- προσθήκη αμμοχάλικου, αν είναι απαραίτητο.
- προσθήκη ενός νέου ασφατικού συνδετικού υλικού.
- ανάμιξη όλων των συστατικών υλικών.
- διάστρωση του νέου μίγματος.
- συμπίκνωση του μίγματος.
- συντήρηση του μίγματος.
- διαμόρφωση μιας επιφανειακής ασφατικής στρώσης. (Davidson, 2004).

Βλ. Σχ. 1.3 (α, β, γ, δ).

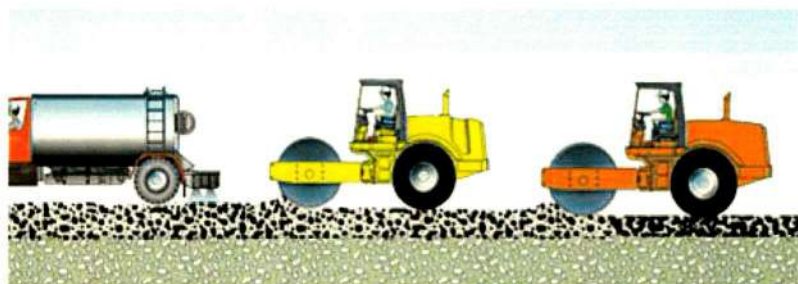


Σχ. 1.3.α: Φρεζάρισμα του φθαρμένου οδοστρώματος με προσθήκη νερού, συνδετικών υλικών και νέου αμμοχάλικου αν χρειάζεται. Συνήθως χρειάζονται πολλές διελεύσεις του μηχανήματος φρεζαρίσματος.





Σχ. 1.3.β: Συμπύκνωση αμέσως μετά το φρεζάρισμα, ύστερα επιπέδωση και διαμόρφωση με τον διαμορφωτήρα (grader).



Σχ. 1.3.γ: Προσθήκη αναγκαίου νερού πριν την ενδιάμεση συμπύκνωση. Μετά τελική συμπύκνωση.



Σχ. 1.3.δ: Προστατευτικό κάλυμμα της ανακυκλωμένης στρώσης από συνδετικό υλικό, ύστερα διαμόρφωση νέου τάπητα από θερμό ασφαλτόμιγμα ή μια απλή επάλειψη με αδρανή (ανάλογα με τα φορτία του οδοστρώματος).

Σχήμα 1.3 (α, β, γ, δ): Διαδικασία κατασκευής ανακυκλωμένου οδοστρώματος

1.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η ανακύκλωση θα παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της "αειφόρου ανάπτυξης" για τους ακόλουθους λόγους:

1. Από την πλευρά του περιβάλλοντος συμβάλλει στην
 - Ελαχιστοποίηση του όγκου των άχρηστων/παραπροϊόντων των φθαρμένων οδοστρωμάτων.
 - Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης νέων αδρανών, διότι οι πηγές είναι περιορισμένες και είναι απαραίτητο να γίνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη οικονομία
 - Ελαχιστοποίηση των θαλάμων απόθεσης άχρηστων υλικών
2. Από την πλευρά της οικονομίας συμβάλλει στην
 - Ελαχιστοποίηση του κόστους των αδρανών.
 - Μείωση των αναγκών μεταφοράς υλικών για τις ανάγκες του έργου.
 - Ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης γενικά και ειδικότερα της κατανάλωσης πετρελαίου.
3. Από την πλευρά της δομικής και λειτουργικής κατάστασης των οδοστρωμάτων συμβάλλει στην
 - Βελτίωση της επιτεδότητας των οδοστρωμάτων
 - Βελτίωση της δομικής ικανότητας των οδοστρωμάτων

Για τους παραπάνω λόγους πολλές χώρες ανακυκλώνουν συστηματικά τα ανακτώμενα από τα οδοστρώματα υλικά , ειδικότερα εκείνες οι οποίες δεν έχουν δικές τους πηγές πετρελαίου. Όταν όμως το κόστος της ανακύκλωσης δεν είναι επαρκώς "ελκυστικό" τότε παρατηρείται προτίμηση στα νέα υλικά. Επομένως απαιτείται πολιτική απόφαση συνδυασμένη με επαρκή νομοθετική ρύθμιση για να ενθαρρυνθεί η ανακύκλωση (Miro, 2000), (PIARC, 2001).

1.4. ΤΥΠΟΙ/ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η ανακύκλωση μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στις ασφαλικές στρώσεις όσο και στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή, όπως επίσης και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Οι τύποι/ μέθοδοι ανακύκλωσης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με πολλά κριτήρια:

1.4.1. Κριτήριο "Οδόστρωμα"

1.4.1.1. Ανακύκλωση εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή το υπάρχον οδόστρωμα, που έχει υποστεί φθορές και χρειάζεται σημαντικής μορφής επισκευές, αναμοχλεύεται- φρεζάρεται μέχρι ένα ορισμένο βάθος (που μπορεί να περιλαμβάνει μέρος της στρώσης βάσης και της υπόβασης) και τα υλικά που αποκτώνται με τον τρόπο αυτό υφίστανται μία κατεργασία δηλ. σταθεροποιούνται με την χρήση συνήθως ενός συνδετικού μέσου (όπως ασφάλτου υπό μορφή γαλακτώματος ή αφρώδους ασφάλτου, ή με υδραυλικές κονίες) ή με μόνη τη χρήση συμπίκνωσης για να αποτελέσουν μία νέα στρώση βάσης ή υπόβασης για το ανανεωμένο οδόστρωμα

1.4.1.2. Ανακύκλωση οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα

Το οδόστρωμα καθαιρείται και θρυμματίζεται και τα προϊόντα χρησιμοποιούνται ως χονδρά αδρανή για την κατασκευή νέου οδοστρώματος από σκυρόδεμα. Τα λεπτά προϊόντα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της υπόβασης, η οποία είναι συνήθως σταθεροποιημένη με τσιμέντο ή άλλες υδραυλικές κονίες (Koubowetz, 2000).

1.4.2. Κριτήριο θερμοκρασίας

1.4.2.1. Ψυχρή ανακύκλωση

Η ανάμιξη, διάστρωση και συμπίκνωση εκτελούνται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος με τον περιορισμό ότι αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 6°C. Η ψυχρή ανακύκλωση μπορεί να διακριθεί σε 3 κατηγορίες (Wirtgen, 1998):

- Βαθιά ανακύκλωση.
- ανακύκλωση μικρού πάχους.
- αναβάθμιση των μη επιστρωμένων αμμοχαλικόστρωτων οδοστρωμάτων.

1.4.2.2. Θερμή ανακύκλωση

Ο τύπος αυτός περιλαμβάνει προθέρμανση των ανακτωμένων ασφαλτομιγμάτων για την απόκτηση υλικού περίπου της ίδιας ποιότητας όπως το αρχικό ασφαλτόμιγμα με την προσθήκη – αν χρειάζεται – νέων υλικών ή ανανεωτικών παραγόντων. Με τον τρόπο αυτό οι ανακυκλούμενες στρώσεις μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως νέες ασφαλικές στρώσεις. Η ανακύκλωση ασύνδετων αδρανών (βάσεως και υποβάσεως) με θερμό ασφαλτόμιγμα δεν έχει λάβει έκταση λόγω των προβλημάτων που μπορούν να υπάρξουν από την ανομοιομορφία και την ποιότητα των υλικών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα ασφατικά υλικά μπορεί να είναι "μολυσμένα" από πίσσα. Η ανθρακική πίσσα περιέχει μεγάλες συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH). Οι υδρογονάνθρακες αυτοί δεν πρέπει να έλθουν σε επαφή με το υπόγειο νερό, διότι είναι βλαπτικοί για την υγεία όπως επίσης και οι αέριες εκπομπές αυτών σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 160°C. Για τους λόγους αυτούς οι ασφαλικές στρώσεις που περιέχουν πίσσα επαναχρησιμοποιούνται με ψυχρή ανακύκλωση με σταθεροποίηση με τσιμέντο ή ασφατικό γαλάκτωμα (PIARC, 2001), (Koubowetz, 2000).

1.4.3. Κριτήριο θέσεως

1.4.3.1. Ανακύκλωση επιτόπου

Το φρεζάρισμα, η ανάμιξη, η διάστρωση και η συμπύκνωση γίνονται επιτόπου.

1.4.3.2. Ανακύκλωση σε σταθερή εγκατάσταση ανάμιξης

Η ανάμιξη γίνεται σε σταθερή εγκατάσταση.

Η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων έχει σοβαρό αντίκτυπο στα λογιστικά και την οικονομία του έργου (PIARC, 2002).

1.4.4. Κριτήριο συνδετικού υλικού

1.4.4.1. Ανακύκλωση σε ασύνδετες στρώσεις

Γενικά ασύνδετες στρώσεις αδρανών υλικών τα οποία περιέχουν μεγάλες ποσότητες λεπτών υλικών δεν χρησιμοποιούνται λόγω της μικρότερης φέρουσας ικανότητάς των και της μεγαλύτερης ευαισθησίας τους σε παγετό. Για τον λόγο αυτό η επιπλέον ποσότητα των λεπτών θα πρέπει να απομακρύνεται ή η περιεκτικότητά τους να μειώνεται

με προσθήκη χονδρών υλικών. Ανακύκλωση υπόβασης για κατασκευή ανακυκλωμένης ασύνδετης υπόβασης δεν είναι συνήθης. Διατάξεις καθιστούν δύσκολη την ανακύκλωση υποβάσεων χωρίς έρευνα για υλικά που προκαλούν μόλυνση (PIARC, 2001).

1.4.4.2. Ανακύκλωση σε συνδεδεμένα υλικά

1.4.4.2.1. Σταθεροποίηση με υδραυλικές κονίες (Τσιμέντο, Άσβεστος, Ιπτάμενη Τέφρα)

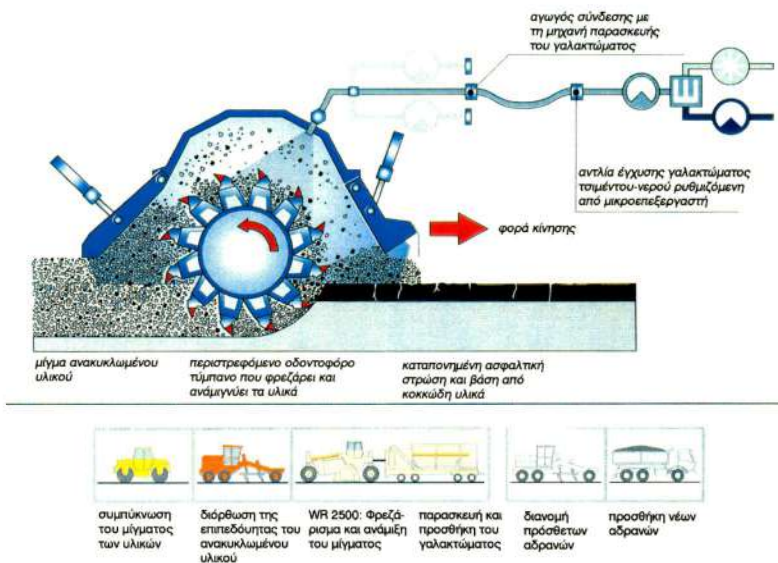
Το τσιμέντο είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος σταθεροποιητής για πολλούς λόγους: διαθεσιμότητα, αποδοχή ως κατασκευαστικό υλικό, ραγδαία βελτίωση στη θλιπτική αντοχή στα περισσότερα υλικά, ύπαρξη πλήθους κανονισμών, μεθόδων δοκιμής, προδιαγραφών για σταθεροποίηση με τσιμέντο όπως επίσης και πολλά παραδείγματα επιτυχών εφαρμογών.

Γενικά οι υδραυλικές κονίες προσδίδουν στα κατεργασμένα/ ανακυκλωμένα υλικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας ενώ η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι περιορισμένη (υλικό ψαθυρό) με αποτέλεσμα η συμπεριφορά των στρώσεων από τα υλικά αυτά να διακρίνεται από την εμφάνιση ρωγμών που οφείλονται σε παρεμποδιζόμενη παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή προκαλείται κυρίως από τις θερμοκρασιακές μεταβολές και για τον λόγο αυτό η προκαλούμενη ρηγμάτωση είναι αναπόφευκτη. Με την καινούργια σχετικά τεχνική όμως της προρηγμάτωσης σε αποστάσεις 3m-5m η σοβαρότερη συνέπεια της ρηγμάτωσης δηλ. η ανάδυση των ρηγματώσεων στην επιφάνεια περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό. Τα ανακυκλωμένα με τσιμέντο υλικά εύκαμπτων οδοστρωμάτων λόγω της ύπαρξης φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος παρουσιάζουν μειωμένη ψαθυρότητα σε σύγκριση με τα κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα όπως αποδείχθηκε σε πρόσφατη ερευνητική εργασία του ΕΜΠ (Κατσάκου 2005).

Με υλικά πολύ πλαστικά, όπως συγκεκριμένα αμμοχάλικα μολυσμένα με άργιλο, μπορεί να είναι καλύτερη η επεξεργασία με συνδυασμό άσβεστου και τσιμέντου.

Η υδραυλική κονία διανέμεται πάνω στο φθαρμένο οδόστρωμα σε μορφή σκόνης, ύστερα προστίθεται η αναγκαία ποσότητα του νερού πριν την έναρξη της κυρίως διαδικασία ανακύκλωσης. Εναλλακτικά η υδραυλική κονία αναμιγνύεται με την απαιτούμενη δόση νερού και προστίθεται με αντλία μέσα στην ανακυκλωτήρα σε μορφή

αιωρήματος αποφεύγοντας τη διάχυση σκόνης (τσιμέντου, ασβέστου) στο περιβάλλον, βλ. Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Διαδικασία ανακύκλωσης με τσιμέντο σε μορφή γαλακτώματος (Wirtgen, 1998).

1.4.4.2.2. Σταθεροποίηση με ασφαλτικά υλικά (Ασφαλτικό γαλάκτωμα και αφρώδης άσφαλτος)

1.4.4.2.2.1. Ασφαλτικό γαλάκτωμα:

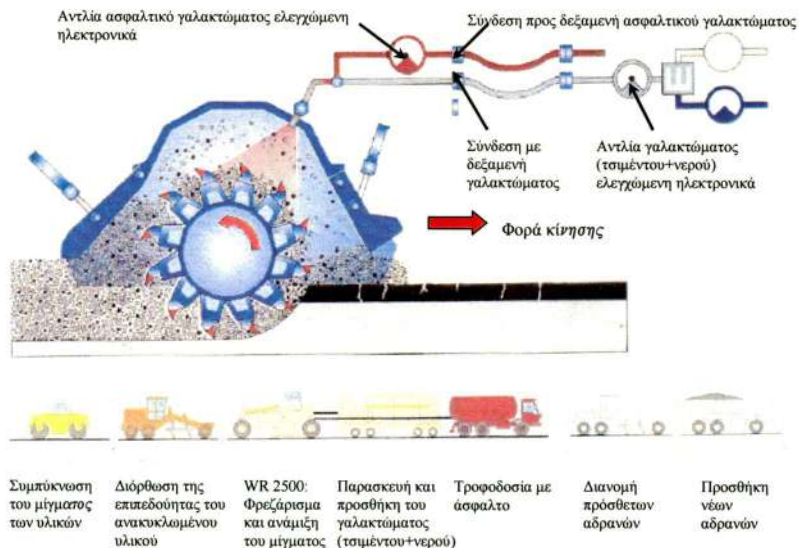
Τα ασφαλτικά γαλακτώματα αποτελούνται από σωματίδια ασφάλτου διασκορπισμένα μέσα σε νερό, το οποίο αποτελεί το μέσον διασποράς.

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα παράχθηκαν προκειμένου να αποφευχθούν οι δυσκολίες της εργασίας με θερμή άσφαλτο και να επιτευχθεί η σταθεροποίηση και ανάμιξη με υγρό υλικό σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Wirtgen, 1998). Από τη στιγμή που διαστρώνεται και συμπυκνώνεται, μπορεί να επιτευχθεί ένα υλικό με χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά του αμμοχάλικου κατεργασμένου με γαλάκτωμα ή ενός εν ψυχρώ πυκνού

ασφαλτομίγματος. Η σταθεροποίηση με γαλάκτωμα δημιουργεί ένα ελαστικό υλικό, με αυξημένη αντοχή σε κόπωση. Αλλά η ακατάλληλη εφαρμογή του γαλακτώματος μπορεί να οδηγήσει στην υψηλή περιεκτικότητα της ασφάλτου (που οδηγεί σε εξίδρωση της ασφάλτου), και η υπερβολική επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει στο υψηλό περιεχόμενο παιπάλης (που οδηγεί σε αυλακώσεις λόγω της χαμηλής σταθερότητας).

Συνήθως χρησιμοποιείται τσιμέντο σε συνδυασμό με γαλάκτωμα. Το τσιμέντο συμβάλλει στη διατήρηση της αντοχής και στην ανάπτυξη πρώιμης αντοχής και επομένως στη παράδοση στη κυκλοφορία ενωρίς.

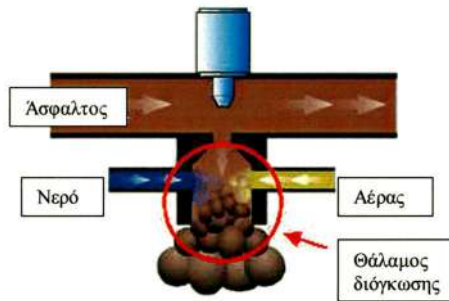
Η διαδικασία της ανακύκλωσης με ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο πραγματοποιείται με διανομή τσιμέντου στο οδόστρωμα και προσθήκη της απαιτούμενης ποσότητας νερού, ενώ το ασφαλτικό γαλάκτωμα ψεκάζεται μέσα στην αναμικτήρα. Εναλλακτικά το τσιμέντο αναμιγνύεται με νερό μέσα σε βυτιοφόρο φορτηγό και ψεκάζεται μέσα στην αναμικτήρα, βλ. Σχήμα 1.5. υπό μορφή αιωρήματος.



Σχήμα 1.5: Διαδικασία της ανακύκλωσης με ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο (Wirtgen, 1998).

1.4.4.2.2. Αφρώδης άσφαλτος:

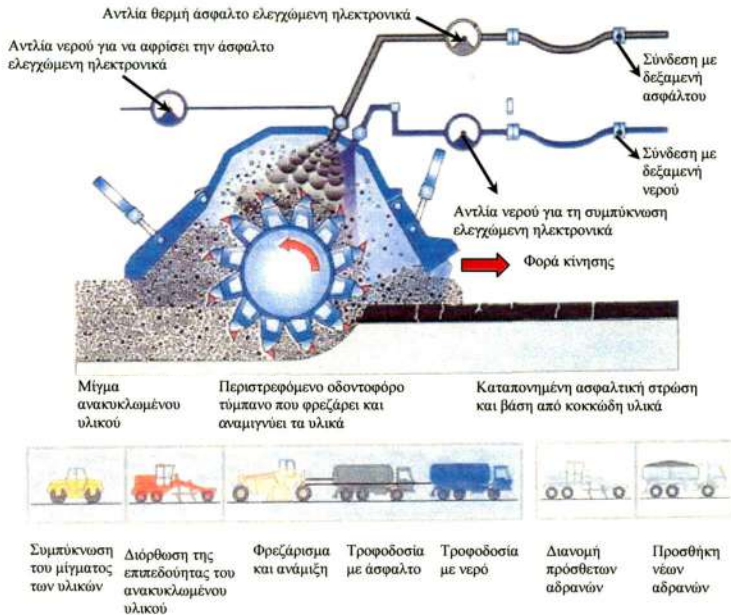
Η αφρώδης άσφαλτος παράγεται όταν μικρή ποσότητα νερού προστίθεται σε θερμή άσφαλτο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ειδική επιφάνεια και ελαττώνεται σημαντικά το ιξώδες της ασφάλτου. Η αφρώδης άσφαλτος χαρακτηρίζεται από τον λόγο διαστολής/διόγκωσης και το 1/2 του χρόνου ζωής. Η θερμοκρασία της ασφάλτου πρέπει να είναι υψηλή (170°C) για να αντιδράσει επιτυχώς το νερό, βλ. Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Παραγωγή την αφρώδη άσφαλτου.

Όπως με το ασφατικό γαλάκτωμα η αφρώδης άσφαλτος δείχνει μεγαλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση και κόπωση. Αλλά η ποιότητα του σταθεροποιημένου υλικού καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της αφρώδους ασφάλτου που εξαρτώνται από την ποιότητα της ασφάλτου. Οι πιο μαλακές άσφαλτοι συνήθως έχουν καλύτερα αφρώδη χαρακτηριστικά. Αδρανή υλικά με έλλειψη λεπτών υλικών δεν παράγουν επιτυχή μίγματα. Το ελάχιστο ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο 0.075mm δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 5% κβ. Επιπλέον έχει γίνει συχνά τυποποιημένη πρακτική να προστίθεται μικρή ποσότητα τσιμέντου ή άλλου σταθεροποιητή (Wirtgen, 1998).

Η διαδικασία της ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλτο γίνεται με παραγωγή της αφρώδους ασφάλτου μέσα στην ανακυκλωτήρα. Το νερό προστίθεται από δύο μεριές, από τη μία μεριά πάνω στη θερμή άσφαλτο για να δημιουργηθεί αφρώδης άσφαλτος, και από την άλλη μεριά προστίθεται στην αναγκαία ποσότητα για την ενυδάτωση, ανάμιξη και συμπύκνωση, βλ. Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Διαδικασία της ανακύκλωσης με αφρώδη άσφαλτο (Wirtgen, 1998).

1.5. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση συνεχώς κερδίζει έδαφος και παγκόσμια αναγνώριση περισσότερο από τις άλλες μεθόδους, ως η πιο οικονομική μέθοδος αναβάθμισης φθαρμένων οδοστρωμάτων (Roberts et al, 1996).

Η επιλογή του κατάλληλου συνδετικού υλικού δεν είναι άμεση. Πρέπει να πραγματοποιηθεί: μελέτη σύνθεσης (περιεκτικότητα σε νερό, ποσοστό των λεπτών κόκκων), έλεγχος κλίματος, διαθέσιμος εξοπλισμός, αδρανή, οικονομική ανάλυση, για να μπορέσει να επιλεγεί το καταλληλότερο συνδετικό υλικό (Jostein, 1997).

Ο συνδυασμός τσιμέντου και ασφαλτικού συνδετικού υλικού είναι δυνατόν να προσδώσει στο μίγμα βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με αυτά που έχουν τα ανακυκλωμένα υλικά με συνδετικό υλικό μόνο ασφαλτικό γαλάκτωμα ή μόνο τσιμέντο.

Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην αυξημένη ευκαμψία που προσθέτει το γαλάκτωμα και στην σε μικρή ηλικία αυξημένη ευστάθεια (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας) που προσδίδει το τσιμέντο. Ο βέλτιστος συνδυασμός είναι στην περίπτωση αυτή ο στόχος των σχετικών ερευνών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -2-

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ Ή ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η χρήση του ασφαλτικού γαλακτώματος για την ανακαίνιση/ αναβάθμιση των οδοστρωμάτων δεν είναι νέα τεχνική. Χρησιμοποιήθηκε πριν από 40 χρόνια στις ΗΠΑ, και την δεκαετία του 50 στο ΗΒ με το όνομα "Retread Process" (Διαδικασία Επανακατεργασίας) σύμφωνα με την έκθεση της επιτροπής (PIARC 7/8, 2002). Η μέθοδος "Retread Process" εφαρμόστηκε μόνο σε δρόμους με μικρή κυκλοφορία.

Οι πρώτες εφαρμογές περιελάμβαναν θρυμματισμό ή αποσύνθεση του παλαιού οδοστρώματος με τον αναμοχλευτικό μηχανισμό των ισοπεδωτήρων (graders).

Τη δεκαετία του 60 αναπτύχθηκαν περιστρεφόμενοι αναμικτήρες αποτελούμενοι από οριζόντιο τύμπανο εφοδιασμένο με εξαρτήματα (δόντια) θρυμματισμού του οδοστρώματος και με τη δυνατότητα ψεκασμού γαλακτώματος μέσα στο θάλαμο ανάμιξης. Στα μέσα της δεκαετίας του 70 σχεδιάστηκαν νέες μηχανές φρεζαρίσματος με μεγάλη ιπποδύναμη και καλύτερο έλεγχο του βάθους φρεζαρίσματος (PIARC 7/8, 2002). Κατά την διάρκεια των επόμενων δεκαετιών η τεχνική παρουσίασε πρόοδο με τον σχεδιασμό ειδικών μηχανημάτων και έγινε οικονομικά πιο αποδοτική μετά το 70 με την πετρελαϊκή κρίση. Εντούτοις, η ανακύκλωση με γαλάκτωμα παραμένει περιορισμένη σε πολλές χώρες.

2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ

Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση εύκαμπτων οδοστρωμάτων θεωρείται γενικά ως πολύ καλή αποκατάσταση των φθαρμένων οδοστρωμάτων που παρουσιάζουν ρωγμές σε βάθη από περίπου 100 έως 150mm (4 έως 6 ίντσες) μικρού βάθους σύμφωνα με Asphalt Institute. Σύμφωνα με (Mallick, 2002) μπορεί να αποκαταστήσει ένα οδόστρωμα με ρωγμές σε βάθη 100mm έως 300mm, καλύτερα από την θερμή ανακύκλωση, υπό τον όρο ότι το τμήμα οδοστρώματος μετά την ανακύκλωση είναι δομικά υγιές και αποστραγγιζόμενο επαρκώς

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους του επιτόπου εν ψυχρώ ανακυκλωμένου οδοστρώματος συνιστάται από το Asphalt Institute η χρήση των Οδηγιών υπολογισμού AASHTO. Δεδομένου ότι υπάρχει ουσιαστικά μικρή ή καμία διαφορά στη σύνθεση και τις δομικές ιδιότητες του ανακυκλωμένου σε κεντρική εγκατάσταση αναμίξεως ψυχρού μίγματος και των ψυχρών επιτόπου ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων υλικών, το εύρος των τιμών των δομικών συντελεστών στρώσεων που συνιστώνται για τα ανακυκλωμένα σε κεντρική εγκατάσταση ψυχρά μίγματα (0.25 έως 0.35) ισχύει επίσης για τα ψυχρά επιτόπου ανακυκλωμένα μίγματα. Τα ψυχρά επιτόπου ανακυκλωμένα μίγματα δεν συνιστώνται για χρήση ως επιφανειακές στρώσεις κύλισης (Drive, UD).

Το ψυχρό ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα χρησιμοποιείται συνήθως σε οδοστρώματα με τους όγκους κυκλοφορίας μικρότερους από 3.000 οχήματα ανά ημέρα και καλύπτεται είτε με μια διπλή ασφαλτική επάλειψη είτε με ένα θερμό ασφαλτόμιγμα επιφανειακής στρώσης.

Εντούτοις, ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση μεγάλου βάθους έχει χρησιμοποιηθεί και σε δρόμους βαριάς κυκλοφορίας. Τυχόν υπάρχοντα ανώτερα όρια κυκλοφορίας για τη ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση μεγάλου βάθους με γαλάκτωμα/ τσιμέντο μπορούν να μην ληφθούν υπόψη εφόσον γίνει κατάλληλη μελέτη του απαιτούμενου πάχους του οδοστρώματος (Favretti and Longueuil, 1999).

Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση με ασφαλτικό γαλάκτωμα μπορεί να εφαρμοστεί για:

- ο Ανακύκλωση ενός μέρους των άνω ασφαλτικών στρώσεων για να δημιουργηθεί μία συνδετική ασφαλτική στρώση ή μία σταθεροποιημένη βάση του νέου ανακυκλωμένου οδοστρώματος.
- ο Ανακύκλωση ολόκληρου ή ενός μέρους των ασφαλτικών στρώσεων με ένα μέρος των αμμοχάλικων από τη βάση από κοκκώδη υλικό, με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία νέα βάση.
- ο Αναβάθμιση χαλικοστρωμένων οδοστρωμάτων με ανώμαλη επιφάνεια κύλισης με τη δημιουργία μίας νέας σταθεροποιημένης βάσης ή υπόβασης (ονομάζεται στις ΗΠΑ. Full-depth reclamation), (PIARC, 2002).

Έτσι η ψυχρή επί τόπου ανακύκλωση με ασφαλτικό γαλάκτωμα μπορεί να καταταγεί, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προς ανακύκλωση υλικού και με το βάθος

επεξεργασίας του παλιού οδοστρώματος, σε τρεις κατηγορίες: ανακύκλωση μεγάλου βάθους, ανακύκλωση μικρού βάθους και ανακύκλωση για αναβάθμιση χαλικοστρωμένων δρόμων με μη επίπεδη επιφάνεια κύλισης (Wirtgen, 1998). Σε πολλές περιπτώσεις η διάκριση μεταξύ των δύο πρώτων κατηγοριών δεν είναι σαφής και επομένως κάποια επικάλυψη των δύο αυτών προσεγγίσεων είναι πολύ συχνό φαινόμενο.

2.2.1. Ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους

Με την ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους θρυμματίζεται επιτόπου η ασφαλτική στρώση και αναμιγνύεται με ένα μέρος των αμμοχάλικων της ασύνδετης βάσης, που υπολογίζεται να είναι τουλάχιστον 25% του ολόκληρου μίγματος. Το μίγμα αμέσως μετά υφίσταται κατεργασία (ανάμιξη επιτόπου) με ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Το βάθος της διαδικασίας αυτής κυμαίνεται από 125mm έως 250mm. Συνήθως πραγματοποιείται στα οδοστρώματα με λεπτή ασφαλτική στρώση (Davidson, 2004), και μπορεί να γίνει και με ασφαλτική στρώση μεγαλύτερου πάχους με βάθος ανακύκλωσης μεγαλύτερο από 150mm (Wirtgen, 1998).

Παρόλο που μερικές μηχανές φρεζαρίσματος έχουν την ικανότητα φρεζαρίσματος μεγαλύτερη από 350mm εντούτοις, λόγω αδυναμίας ικανοποιητικής συμπύκνωσης της ανακυκλωμένης στρώσης στην πράξη το πάχος της ανακύκλωσης περιορίζεται σε 50mm έως 120 mm για ανακύκλωση μόνο ασφαλτομιγμάτων και σε 100mm έως 350mm για ασύνδετα (PIARC, 2002), βλ. Σχ. 2.1 και Σχ. 2.2.

Σήμερα η ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους χρησιμοποιείται ευρέως σε αστικές και εθνικές οδούς, καθώς και σε αεροδρόμια.

2.2.2. Ανακύκλωση στρώσης μικρού βάθους

Με την ανακύκλωση στρώσης μικρού βάθους επαναχρησιμοποιείται μόνο η υπάρχουσα φθαρμένη ασφαλτική στρώση η οποία θρυμματιζόμενη αναμιγνύεται με ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Το βάθος της διαδικασίας αυτής κυμαίνεται συνήθως από 65mm έως 125mm (Davidson, 2004), ή από 80mm έως 150mm (Wirtgen, 1998).

Η ανακύκλωση λεπτής στρώσης οδοστρώματος ουσιαστικά γίνεται για την εξάλειψη σοβαρών ρηγματώσεων των ασφαλτικών στρώσεων, ταυτόχρονα για τη βελτίωση της ποιότητας κύλισης. Επιπλέον, με την ανακύκλωση λεπτής στρώσης οδοστρώματος επιτυγχάνεται βελτίωση στη δομική ικανότητα του οδοστρώματος, λόγω της επιρροής της μεταγενέστερης – πρόσθετης ασφαλτικής στρώσης που συνήθως διαστρώνεται. Ο

περιορισμός της εισόδου του νερού στις κατώτερες στρώσεις συμβάλλει στην παράταση της ζωής του οδοστρώματος, (Wirtgen, 1998).

2.2.3. Αναβάθμιση μη επίπεδων χαλικοστρωμένων δρόμων

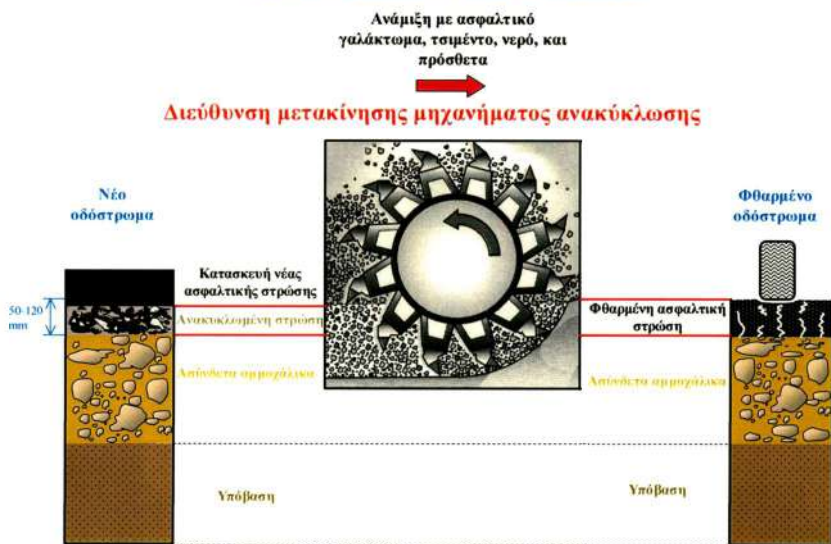
Η αναβάθμιση χαλικοστρωμένων, μη επίπεδων δρόμων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ανακύκλωση-ανάμιξη (σταθεροποίηση) του υπάρχοντος επιτόπου αμμοχάλικου είτε με ασφαλτικό γαλάκτωμα είτε με αφρώδη άσφαλτο. Στην επιφάνεια διαστρώνεται στη συνέχεια μια λεπτή ασφαλτική επιφανειακή στρώση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου αναβάθμισης οδοστρώματος συμπεριλαμβάνουν την δυνατότητα οδήγησης χωρίς να σηκώνεται σκόνη από το πέρασμα των οχημάτων όταν επικρατούν ξηρές καιρικές συνθήκες και ασφαλέστερη οδήγηση σε βροχερό καιρό. Επιπλέον, γίνεται μία πολύ καλή χρήση των πηγών του υλικού αφού το αμμοχάλικο δε χρειάζεται να αντικατασταθεί σε συχνά μικρά χρονικά διαστήματα. Έχει παρατηρηθεί ότι το φαινόμενο της απώλειας χαλικιού είναι πολύ συχνό, και είναι της τάξης των 20 έως 30mm ετησίως, σε μη επίπεδους, χαλικοστρωμένους δρόμους, λόγω της κίνησης της κυκλοφορίας και της επίδρασης του καιρού. Αυτή η κατηγορία ανακύκλωσης οδοστρωμάτων συνήθως πραγματοποιείται σε βάθος 100mm έως 150mm. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η ανακύκλωση χαλικοστρωμένων μη επίπεδων οδοστρωμάτων μπορεί να γίνει επίσης είτε με τσιμέντο είτε με υδράσβεστο ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Σε αυτή την περίπτωση όμως, απαιτείται μεγαλύτερο βάθος επεξεργασίας, της τάξης των 200mm, κι επομένως μεταπίπτουμε στην κατηγορία της ανακύκλωσης στρώσης μεγάλου βάθους, (Wirtgen, 1998).

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ



Σχήμα 2.1.: Ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους.

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΒΑΘΟΥΣ



Σχήμα 2.2.: Ανακύκλωση στρώσης μικρού βάθους.

2.3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί η σύνδεση των κόκκων του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (RAP) και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις για τη χρήση των ανακυκλωμένων υλικών στα οδοστρώματα, είναι να επιτευχθεί ανανέωση ή αύξηση της περιεκτικότητας της περιεχόμενης ασφάλτου, μείωση του ιξώδους δηλ. αύξηση της διεσδυτικότητας (pen). Αυτό επιτυγχάνεται με ανάμιξη με έναν ή περισσότερους παράγοντες ανακύκλωσης που συνίστανται είτε από ασφαλικό γαλάκτωμα είτε από αφρώδη άσφαλτο με συνδυασμό ή όχι με ανανεωτικό παράγοντα. Είναι πιθανόν να απαιτηθούν και πρόσθετα ασύνδετα αμμοχάλικα για την βελτίωση της διαβάθμισης του ανακυκλωμένου μίγματος και την μείωση των κενών.

Τα χαρακτηριστικά του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος για χρήση σε εργασίες ανακύκλωσης που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η διαβάθμιση, η περιεκτικότητα σε άσφαλτο και η διεσδυση και το ιξώδες του ασφαλικού συνδετικού υλικού.

2.3.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η διαβάθμιση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος εξαρτάται άμεσα από την διαβάθμιση του αρχικού ασφαλτομίγματος, και από τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος που εκτελεί το φρεζάρισμα. Επομένως οι δυνατότητες που υπάρχουν για ρύθμιση της διαβάθμισης είναι περιορισμένες και κυρίως συνίστανται στην δυνατότητα προσθήκης ασύνδετου κυρίως υλικού για διόρθωση (ολική ή μερική) της διαβάθμισης. Αυτός είναι ίσως και ο λόγος που δεν υπάρχουν απαιτήσεις ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση με ευρεία – διεθνή αποδοχή. Συνήθως δίνονται ορισμένες απαιτήσεις ως προς την ζώνη διαβάθμισης του φρεζαρισμένου υλικού, αλλά είναι φυσικό από χώρα σε χώρα να υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Οι απαιτήσεις αυτές αποσκοπούν κυρίως στην εξασφάλιση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης πυκνότητας και μικρότερου ποσοστού κενών στο ανακυκλωμένο μίγμα. Έτσι πχ. στις ΗΠΑ συνήθως απαιτείται η ικανοποίηση των προτύπων ASTM D 692 και D1073 για χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα υλικά ή AASHTO T11 και T27. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν επιτρέπεται η ξήρανση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος σε φούρνο σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω της αλλοίωσης της περιεχόμενης ασφάλτου (Mallick, 2002).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος είναι κάπως λεπτότερη από τα αρχικά θραυστά αδρανή. Αυτό οφείλεται στη μηχανική υποβάθμιση κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης. Επίσης είναι χαρακτηριστικό ότι τα φρεζαρισμένα

ασφαλμίγματα έχουν μικρή περιεκτικότητα σε λεπτού κόκκους και ιδιαίτερα στην περιοχή της παιπάλης.

Κανονικά η διάσταση μέγιστου κόκκου αδρανών ανακυκλωμένων με ασφαλικό γαλάκτωμα είναι $D = 16, 22, 32 \text{ mm}$ σύμφωνα με (Jostein, 1997). $D \leq 32 \text{ mm}$ (PIARC, 2002). $D \leq 25 \text{ mm}$ (Giuliani and Restelli, 1997). Η περιεκτικότητα σε παιπάλη κυμαίνεται από 2 - 15% (Kanno et al, 2001), (Drive, UD), και από 4 - 8% (PIARC, 2002) και (Giuliani and Restelli, 1997), και από 0 - 10% (Mallick, 2002).

2.3.2. Περιεκτικότητα σε ασφαλτο

Η περιεκτικότητα σε ασφαλτο των περισσότερων παλαιών οδοστρωμάτων κυμαίνεται περίπου από 4.5 έως 6% και η μέγιστη διακύμανση 3% έως 7% κατά βάρος και 10% έως 20% κατ'όγκο του μίγματος σύμφωνα με το (Drive, UD).

Τα φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή έχουν ποσοστό ασφάλτου 4.95% κ.β. αδρανών, και 4.72% κ.β. ασφαλτομίγματος.

2.3.3. Διείσδυση και ιξώδες

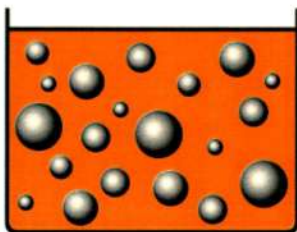
Λόγω της οξείδωσης κατά τη διάρκεια του χρόνου, το ασφαλικό υλικό έχει σκληρύνει και συνεπώς έχει μεγαλύτερο ιξώδες και χαμηλότερες τιμές διείσδυσης από την αρχική ασφαλτο.

Ανάλογα με το χρονικό διάστημα που το αρχικό οδόστρωμα ήταν σε λειτουργία, η ασφαλτος που προέρχεται από τα φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα μπορεί να έχει τις τιμές διείσδυσης από 10 έως 80 και τις απόλυτες τιμές ιξώδους σε 60°C (140°F) από 2.000 poises ως 50.000 poises ή μεγαλύτερο, ή από 4.000 έως 25.000 poises (Drive, UD).

2.4. ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΑ

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα είναι συστήματα δύο φάσεων που αποτελούνται από ασφαλτο, νερό και μια ή περισσότερες πρόσθετες ουσίες που χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη δημιουργία και στη σταθεροποίηση του διφασικού συστήματος και ενδεχομένως στη τροποποίηση των ιδιοτήτων του γαλακτώματος, βλ. Σχ. 2.3. Η ασφαλτος είναι διασκορπισμένη σε όλη τη φάση του νερού υπό μορφή ασυνεχών σωματιδίων, διαμέτρου 0.1 - 50μm, που αιωρούνται μέσα στο νερό χάρις σε ηλεκτροστατικά φορτία που σταθεροποιούνται από έναν γαλακτωματοποιητή (Read, 2003). Η περιεκτικότητα σε ασφαλτο εξαρτάται από την προοριζόμενη εφαρμογή του

γαλακτώματος, και η τυπική αναλογία ασφάλτου και νερού είναι 60%/40% κατά βάρος αντίστοιχα, που σημαίνει ότι 60% του όγκου του γαλακτώματος αποτελείται από την ασφαλτο, που διασκορπίζεται σε 40% του όγκου που είναι νερό, (Νικολαΐδης, 2002), (wirtgen, 1998), και σπάνια να είναι χαμηλότερη από 40% ή υψηλότερη από 70%



Σχήμα 2.3.: Αιωρούμενα σωματίδια ασφάλτου σε νερό

2.4.1. Κατηγορίες των ασφαλτικών γαλακτωμάτων

Οι ακόλουθες τρεις κατηγορίες γαλακτώματος είναι διαθέσιμες για την ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση.

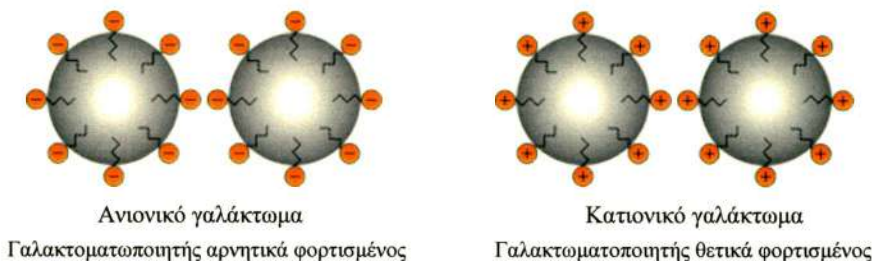
- τυποποιημένο γαλάκτωμα,
- τροποποιημένο ασφαλτικό γαλάκτωμα ή
- ανανεωτικού τύπου γαλάκτωμα (Martin, UD).

Το τυποποιημένο κοινό ασφαλτικό γαλάκτωμα μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερις κατηγορίες. Οι πρώτες δύο είναι, κατά πολύ, οι πιο χρησιμοποιούμενες κατηγορίες (Read, 2003):

- Ανιονικό γαλάκτωμα
- Κατιονικό γαλάκτωμα
- Μη ιονικό γαλάκτωμα
- Γαλάκτωμα σταθεροποιημένο με άργιλο

Οι όροι ανιονικού και κατιονικού γαλακτώματος προέρχονται από τα ηλεκτρικά φορτία των ασφαλτικών σωματιδίων. Τα ασφαλτικά σωματίδια σε ένα μη-ιονικό ασφαλτικό γαλάκτωμα είναι ουδέτερα και επομένως, δεν θα μεταναστεύσουν σε κανέναν πόλο. Τα μη-ιονικά γαλακτώματα χρησιμοποιούνται σπάνια στην οδοποιία.

Τα ανιονικά γαλακτώματα αναπτύχθηκαν αρχικά στις αρχές των δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα. Βρήκαν αρκετές εφαρμογές αλλά η αύξηση χρήσης ήταν σχετικά αργή. Στη μέση δεκαετία του '40 εισήχθησαν τα κατιονικά γαλακτώματα, τα οποία απετέλεσαν μια σημαντική τεχνική βελτίωση.



Σχήμα 2.4: Δύο τύποι κοινού ασφαλτικού γαλακτώματος

Τα σταθεροποιημένα με άργιλο γαλακτώματα προορίζονται για βιομηχανική χρήση και όχι για δρόμους (Read, 2003), (Wirtgen, 1998).

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα, εκτός της βασικής ταξινόμησης με βάση το είδος της επιφανειακής φόρτισης των σωματιδίων της ασφάλτου, διακρίνονται και σε τρεις άλλες κατηγορίες αναλόγως του ρυθμού διάσπασης. Οι τρεις κατηγορίες είναι τα βραδείας, μέσης και ταχείας διάσπασης γαλακτώματα. Ένα γαλάκτωμα ταχείας διάσπασης έχει ελάχιστη ή καμία δυνατότητα ανάμιξης με αδρανή, ένα γαλάκτωμα μέσης ταχύτητας διάσπασης αναμένεται να αναμιχθεί ικανοποιητικά με χονδρούς κόκκους αλλά όχι με λεπτούς κόκκους, και ένα αργό γαλάκτωμα σχεδιάζεται για ανάμιξη με το λεπτούς κόκκους. Οι Βρετανικές προδιαγραφές BS 434-1:1984 έχουν και μια τέταρτη κατηγορία, τα γαλακτώματα πολύ βραδείας διάσπασης, αλλά μόνο για ανιονικά γαλακτώματα. Για την ευκολότερη διάκριση των γαλακτωμάτων οι Βρετανικές προδιαγραφές τα χαρακτηρίζουν με συνδυασμό γραμμάτων και αριθμών. Το πρώτο σύμβολο A ή K σημαίνει ανιονικό ή κατιονικό αντίστοιχα, το δεύτερο σύμβολο είναι αριθμός 1εώς 4 δείχνει ταχύτητα διάσπασης. Για παράδειγμα A4-60 είναι ανιονικό γαλάκτωμα βραδείας διάσπασης με 60% περιεκτικότητα σε ασφαλτο (Read, 2003), (Νικολαΐδης, 2002).

Στην περίπτωση της προσθήκης των γαλακτωματοποιητών, ο τύπος του γαλακτώματος εξαρτάται από τον τύπο του προστιθέμενου γαλακτωματοποιητή. Εάν ο γαλακτωματοποιητής

είναι κατιονικού τύπου, τα ασφαλτικά σωματίδια θα φορτιστούν θετικά (κατιονικό γαλάκτωμα). ενώ με έναν ανιονικό γαλακτωματοποιητή η φόρτιση θα είναι αρνητική (ανιονικό γαλάκτωμα) βλ. Σχ. 2.4. (Dybalski, 1983).

Χημικές ουσίες, γνωστές ως "σταθεροποιητές" προστίθενται και στους δύο τύπους γαλακτωμάτων για να παρατείνουν το χρόνο διάσπασης του γαλακτώματος με αποτέλεσμα να μειώσουν το μέγεθος της ηλεκτρικής φόρτισης των ασφαλικών σωματιδίων, και να μειώσουν την έλξη τους στα αδρανή. Κατ' αυτό τον τρόπο η διάσπαση του γαλακτώματος ή η έλξη των ασφαλικών σωματιδίων στα αδρανή, καθυστερούν.

Ο μόνος λόγος για τη χρησιμοποίηση της ασφαλικού γαλακτώματος ως σταθεροποιητικού παράγοντα είναι να καταστεί δυνατή η ανάμιξη της ασφάλτου με ψυχρά υγρά υλικά. Αυτό είναι μια παροδική-ενδιάμεση φάση, διότι το επιθυμητό τελικό προϊόν είναι ένα υλικό συνδεδεμένο με άσφαλτο που απαιτεί ότι το γαλάκτωμα, πρέπει να διασπαστεί προκειμένου η άσφαλτος να ενεργήσει ως συνδετικό υλικό. Είναι επομένως οι συνθήκες διάσπασης που είναι σημαντικές και όχι απαραίτητως το περιβάλλον στο πλαίσιο του οποίου η άσφαλτος βρίσκεται σε αιώρηση μέσα στο νερό (Wirtgen, 1998).

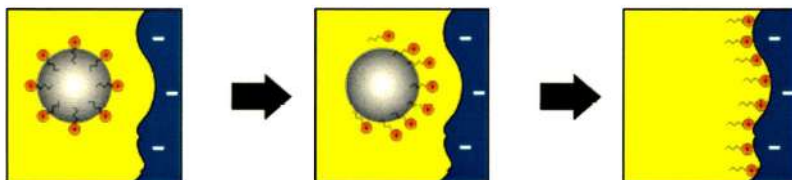
2.4.2. Ιδιότητες του ασφαλικού γαλακτώματος

2.4.2.1. Διάσπαση του γαλακτώματος

Όταν το ασφαλικό γαλάκτωμα αναμιγνύεται με τα αδρανή, το νερό αποχωρίζεται – εξαιμίζεται και αποστραγγίζεται λόγω βαρύτητας- και τα ασφαλικά σωματίδια επανασυνδέονται σε ένα συνεχές λεπτό κάλυμμα που επικάθεται στην επιφάνεια των αδρανών βλ. Σχ. 2.5. Αυτό είναι γνωστό ως "διάσπαση" (Wirtgen, 1998). Το γαλάκτωμα πρέπει να είναι σταθερό κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και της μεταφοράς αλλά πρέπει να διασπάται σε καθορισμένο χρόνο όταν χρησιμοποιείται στην οδοστρωσία.

Η ποιότητα αυτή επιτυγχάνεται πιο εύκολα με τα κατιονικά γαλακτώματα δεδομένου ότι τα γαλακτώματα αυτά αντιδρούν αρχικά με χημική αντίδραση και κατόπιν με αφυδάτωση του γαλακτώματος (Νικολαΐδης, 2002). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα αδρανή έχουν αρνητικό ηλεκτροστατικό φορτίο και επομένως ο θετικός φορτισμένος

γαλακτωματοποιητής έλκεται ηλεκτροστατικά στα αδρανή αναγκάζοντας το γαλάκτωμα να διασπαστεί. Επιπλέον, ο γαλακτωματοποιητής λειτουργεί ως παράγοντας προσκόλλησης σε αυτό το σημείο



Σχήμα 2.5: Διάσπαση του ασφαλτικού γαλακτώματος (Dybalski, 1983).

Ένα ανιονικό γαλάκτωμα δεν διασπάται χημικά. Το νερό εξατμίζεται και αναγκάζει το γαλάκτωμα να διασπαστεί. Αυτό είναι πολύ πιο αργή διαδικασία και η συνάφεια (προσκόλληση) είναι πολύ αδύνατη. Με την έναρξη της διάσπασης του γαλακτώματος η επιφάνεια των αδρανών αρχίζει να καλύπτεται από άσφαλτο. Πλήρης διάσπασης των ανιονικών ασφαλτικών γαλακτωμάτων επέρχεται μόνο μετά την ολική, ή τη μερική αλλά κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό, απομάκρυνση του νερού από το σύστημα. Άλλως το σύστημα, ανιονικό γαλάκτωμα και αδρανή, μπορεί να επαναγαλακτωματοποιηθεί με την παρουσία ύδατος (πχ. από βροχή), (Νικολαΐδης, 2002).

Η διάσπαση μπορεί να ελεγχθεί από την περιεκτικότητα και την επιλογή του γαλακτωματοποιητή. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάσπαση είναι θερμοκρασία, υγρασία και ο τύπος της ασφάλτου.

Υπάρχουν, κατ' αρχήν, έξι παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αλλάξουν τις ιδιότητες της διάσπασης:

- Περιεκτικότητα σε άσφαλτο
- Σύσταση της υδατική φάσης
- Κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της ασφάλτου. Περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Γαρμπίλι
- Χρήση παραγόντων διάσπασης.

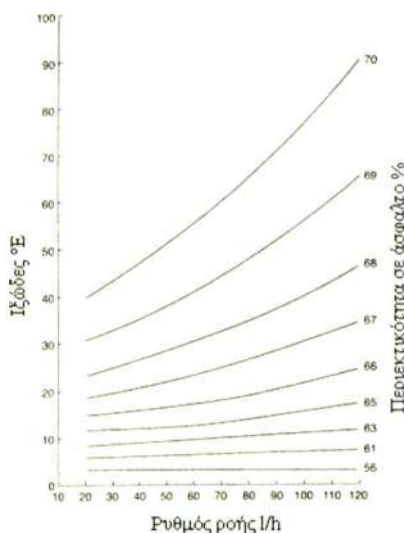
2.4.2.2. Ιξώδες του γαλακτώματος

Υπάρχουν, κατ' αρχήν, τρεις τρόποι αύξησης του ιξώδους του γαλακτώματος:

- με αύξηση της συγκέντρωσης της φάσης της διασποράς (της ασφάλτου)
- με αύξηση του ιξώδους της συνεχούς φάσης.
- με μείωση του εύρους διακύμανσης της κατανομής των σωματιδίων (πιο ισόκοκκα σωματίδια) (Read and Whiteoak, 2003).

Το ιξώδες του γαλακτώματος είναι σχεδόν ανεξάρτητο από το ιξώδες της ασφάλτου. Εάν τα μεγέθη των ασφαλτικών σωματιδίων μειωθούν, το ιξώδες του γαλακτώματος θα αυξηθεί.

Με την αύξηση της ταχύτητας διέλευσης (ροής) από τον μύλο της ασφάλτου, η κατανομή των μεγεθών των ασφαλτικών σωματιδίων αλλάζει. Για περιεκτικότητα σε άσφαλτο λιγότερη από 65%, το ιξώδες του γαλακτώματος είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο από την ταχύτητα διέλευσης. Εντούτοις, για περιεκτικότητες ασφάλτου μεγαλύτερες από 65% όπου τα σωματίδια της ασφάλτου είναι τοποθετημένα το ένα πολύ κοντά στο άλλο, αλλαγή στη κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων με την αλλαγή της ταχύτητας ροής, έχει έντονη επίδραση στο ιξώδες όπως φαίνεται στο Σχ. 2.6 (Read and Whiteoak, 2003).



Σχήμα 2.6: Μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία και το ποσοστό ροής (Read and Whiteoak, 2003).

Το ιξώδες ρυθμίζεται-ελέγχεται από την περιεκτικότητα σε ασφαλτο, τη θερμοκρασία και τον τύπο γαλακτωματοποιητή. Η εξάρτηση του ιξώδους από την ασφαλτο μπορεί να ρυθμιστεί με την προσθήκη CaCl_2 .

Έτσι για τη ρύθμιση του ιξώδους :

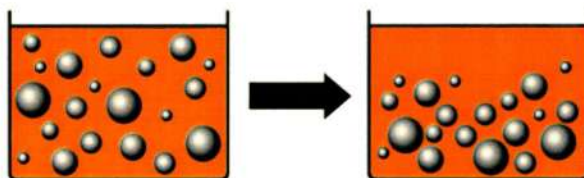
- Αυξάνεται ή μειώνεται η περιεκτικότητα σε ασφαλτο
- προστίθενται ελεγμένες ποσότητες CaCl_2
- γίνεται αλλαγή στον τύπο γαλακτωματοποιητή

2.4.2.3. Σταθερότητα των γαλακτωμάτων

Η ασφαλτος έχει μια ελαφρώς υψηλότερη πυκνότητα από το νερό και επομένως, λόγω βαρύτητας, τα σταγονίδια τείνουν να προσανατολιστούν στο κατώτατο σημείο του δοχείου βλ. Σχ. 2.7. Εάν προστεθεί διαλύτης στην ασφαλτο, η ασφαλτος μπορεί να αποκτήσει χαμηλότερη πυκνότητα από το νερό και ως εκ τούτου να προσανατολιστεί στην επιφάνεια. Αυτό καλείται ανάδυση.

Η καθίζηση του γαλακτώματος μπορεί να μειωθεί με:

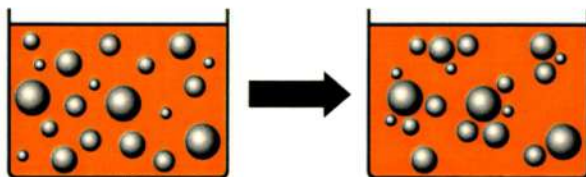
- βελτίωση των όρων αποθήκευσης, π.χ. κρατώντας το γαλάκτωμα σε υψηλότερη θερμοκρασία, και αναδεύοντάς το ανά μικρά χρονικά διαστήματα.
- μείωση της πυκνότητας της ασφάλτου με την προσθήκη ενός διαλύτη.
- αποτροπή της κροκύδωσης με αλλαγή των τύπων και των συγκεντρώσεων του σταθεροποιητή και του γαλακτωματοποιητή ή με την αλλαγή του pH.
- αύξηση της περιεκτικότητας σε ασφαλτο.
- αύξηση του ιξώδους ασφάλτου.



Σχήμα 2.7: Τα ασφαλτικά σταγονίδια τείνουν να προσανατολιστούν στο κατώτατο σημείο του δοχείου

2.4.2.4. Η Κροκύδωση

Η κροκύδωση είναι μια διαδικασία όπου τα σταγονίδια αρχίζουν προσφύονται – συγκολλώνται το ένα στο άλλο, βλ. Σχ. 2.8. Πολύ συχνά υπάρχει ένα μεγάλο κεντρικό σωματίδιο με τα μικρότερα που το περιβάλλουν. Τα σχηματισμένα κροκιδώματα μπορούν συχνά να διαχωριστούν πάλι, με ανάδευση ή επανανάμιξη.

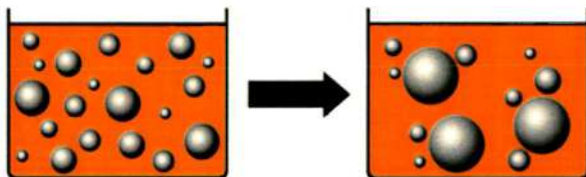


Σχήμα 2.8: Τα σταγονίδια αρχίζουν προσφύονται – συγκολλώνται το ένα στο άλλο

2.4.2.5. Συγχώνευση

Παραπλήσια είναι και η έννοια της συγχώνευσης κατά την οποία τα σωματίδια συγχωνεύονται και διαμορφώνουν μεγαλύτερα σωματίδια, με τελική κατάληξη τη διάσπαση του γαλακτώματος, βλ. Σχ. 2.9. Αυτό αρχίζει συχνά με την κροκύδωση, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από:

- ανεπαρκή περιεκτικότητα σε γαλακτωματοποιητή
- λανθασμένο τύπο γαλακτωματοποιητή.
- λανθασμένες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της παραγωγής.
- λανθασμένη θερμοκρασία αποθήκευσης
- μηχανικές επιδράσεις. (Παρατεταμένη κυκλοφορία με αντλία, παρατεταμένη μεταφορά).
- ακατάλληλη άσφαλτος.



Σχήμα 2.9: Τα σταγονίδια συγχωνεύονται και διαμορφώνουν μεγαλύτερα σταγονίδια

2.4.3. Επίδραση του ασφαλτικού γαλακτώματος στην παλιά άσφαλτο των φρεζαρισμένων ασφαλτομιγμάτων

Υπάρχουν δύο αντιτιθέμενες απόψεις σχετικά με την επίδραση του γαλακτώματος στο φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. Η μία άποψη βασίζεται στην υπόθεση ότι η παλιά άσφαλτος του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος είναι ανενεργή και το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα αντιμετωπίζεται ως μαύρο αδρανές. Η άλλη άποψη υποθέτει ότι η παλιά άσφαλτος είναι ακόμα ενεργή, και ότι η προσθήκη ενός ασφαλτικού γαλακτώματος αποκαθιστά την παλιά άσφαλτο στα αρχικά χαρακτηριστικά του.

Παρατηρήσεις πεδίου και εργαστηριακή έρευνα δείχνουν ότι και οι δύο απόψεις εν μέρει ισχύουν. Πράγματι ένα μέρος της παλιάς ασφάλτου παραμένει ανενεργό και το υπόλοιπο μέρος της ασφάλτου συνδυάζεται με την προστιθέμενη νέα άσφαλτο, που περιλαμβάνεται στο γαλάκτωμα, για να παραγάγει τελικά ένα νέο ενεργό συνδετικό υλικό. Η ποσότητα της παλιάς ασφάλτου που συνδυάζεται με την προστιθέμενη νέα άσφαλτο εξαρτάται από τη διαβάθμιση των φρεζαρισμένων ασφαλτομιγμάτων, την περιεκτικότητα σε άσφαλτο και την σκληρότητα της παλιάς και της νέας ασφάλτου.

Αυτή η τρίτη άποψη της ανανεωτικής δράσης της ασφάλτου υποστηρίζεται από τις παρατηρήσεις που δείχνουν ότι η μηχανική απόδοση των ανακυκλωμένων μιγμάτων βελτιώνεται κατά τη διάρκεια των πρώτων μηνών λειτουργίας. Αυτοί οι πρώτοι μήνες λειτουργίας αντιπροσωπεύουν πιθανώς το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η προστιθέμενη νέα άσφαλτος αναμιγνύεται και μαλακώνει-ρευστοποιεί την παλιά άσφαλτο (Martin, UD).

2.5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

2.5.1. Διάστρωση

Η διάστρωση του ψυχρού επιτόπου ανακυκλωμένου υλικού γίνεται με τους εξοπλισμούς του ανακυκλωτήρα (Potti et al, UD). Η διάστρωση πρέπει να γίνει σε μια συνεχή λειτουργία χωρίς διαχωρισμό. Εάν παρατηρηθεί διαχωρισμός πίσω από διαστρωτήρα, η εργασία πρέπει να σταματήσει και να ληφθούν άμεσα μέτρα για να διορθωθεί το πρόβλημα. Η διορθωτική δράση μπορεί να περιλάβει τη ρύθμιση της ταχύτητας μετακίνησης του μηχανήματος φρεζαρίσματος, τη ρύθμιση της ροής του υλικού στον θραυστήρα ή/ και την αντικατάσταση του εξοπλισμού.

(NN, www.conndot.ct.gov/specpro/0403872A.DOC).

2.5.2. Συμπύκνωση

Η επιτυχής ανακύκλωση/ ανανέωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων εξαρτάται ιδιαίτερα από την συμπύκνωση του μίγματος. Οι ίδιοι εξοπλισμοί και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα ψυχρά ασφαλτομίγματα, εφαρμόζονται επίσης στο ψυχρό ανακυκλωμένο μίγμα (Lewis, 1999), (Νικολαΐδης, 2002), (Asphalt Institute), αλλά η συμπεκνωτική ενέργεια στην περίπτωση αυτή πρέπει να είναι πιο μεγάλη από την περίπτωση του θερμού ασφαλτομίγματος, επειδή το ψυχρό ανακυκλωμένο ασφαλτόμικτο έχει την τάση δημιουργίας συσσωματωμάτων γεγονός που δείχνει ότι η εσωτερική τριβή μεταξύ των μορίων είναι υψηλή (Davidson, 2004), (PIARC, 2002), (NPRA¹). Για τον λόγο αυτό ο συμπεκνωτήρας πρέπει να ακολουθήσει κοντά πίσω από το διαστρωτήρα, και η διαδικασία συμπύκνωσης πρέπει να ολοκληρωθεί σε μια ώρα μετά από την διάστρωση του οδοστρώματος (Wallace, UD). Στο θέμα αυτό υπάρχει σχετική ασάφεια στις οδηγίες που δίδονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, όπως π.χ. από τους (Favretti and Longueuil, 1999) και (Drive, UD) αναφέρεται ότι η συμπύκνωση των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων αρχίζει μόνο όταν το γαλάκτωμα έχει εν μέρει διασπαστεί. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την αλλαγή χρώματος του μίγματος από καφέ σε μαύρο, σε 30- 45 λεπτά περίπου.

Η απαίτηση συμπύκνωσης δίνεται υπό μορφή προδιαγραφών μεθόδου. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν απαιτήσεις για:

- Συνολικό ποσοστό περιεχομένων υγρών στο μίγμα (νερό και συνδετικό υλικό)
- Τύπο συμπεκνωτήρα
- Μέγιστο πάχος στρώσης

Η συμπύκνωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια όσο το δυνατόν ισχυρότερων συμπεκνωτικών μηχανών. Τα μηχανήματα συμπύκνωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον σκοπό και καθορίζονται μετά από εκτέλεση δοκιμαστικών τμημάτων. (Potti et al, UD), (Drive, UD).

Το ψυχρό ανακυκλωμένο ασφαλτόμικτο συμπυκνώνεται συνήθως με ένα βαρύ συμπεκνωτήρα με ελαστικούς τροχούς σε συνδυασμό με ένα μεγάλο δονητικό συμπεκνωτήρα με χαλύβδινο τύμπανο (Davidson, 2004), (Asphalt Institute, UD), (Favretti and Longueuil, 1999).

¹ NPRA : Norwegian Public Roads Administration.

Οι συμπτυκνωτήρες αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως στην αρχική και την ενδιάμεση φάση της συμπτώκνωσης, με μια ταχύτητα που δεν υπερβαίνει 4km ανά ώρα (67m ανά λεπτό). και στο τέλος χρησιμοποιείται ένα στατικός συμπτυκνωτήρας με δύο χαλύβδινους τροχούς ή δονητικός συμπτυκνωτήρας με διπλό δονητικό τύμπανο που λειτουργεί στατικά. (wirtgen, 1998).

Όλες οι συμπτυκνωτικές διαδικασίες πρέπει να γίνουν με αργή και ομοιόμορφη ταχύτητα. Όταν οι συμπτυκνωτήρες χρειάζονται να ακολουθήσουν την αντίστροφη κατεύθυνση, πρέπει να δοθεί από το χειριστή ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να μη λάβει χώρα μετατόπιση υλικού.

(NN, www.dot.state.ny.us/tech_serv/mat/manuals/ciprguide2003.pdf).

Για να μην κολλήσει το ασφαλτικό υλικό στους τροχούς /τα τύμπανα των συμπτυκνωτήρων, απαγορεύεται να χρησιμοποιούνται διαλύτες αλλά επιτρέπεται ο ψεκασμός με νερό. Το νερό αυτό δε επηρεάζει το γαλάκτωμα επειδή ήδη το γαλάκτωμα θα έχει διασπαστεί στο σημείο της συμπτώκνωσης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μικρές ποσότητες απορρυπαντικού με το νερό.

Η πυκνότητα του ψυχρού ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος καθορίζεται ταχύτατα και πολύ απλά με τη χρήση τους πυρηνικών μετρητών πυκνότητας. Συνιστάται να πραγματοποιούνται δέκα τουλάχιστον τυχαίες μετρήσεις σε διαφορετικές περιοχές του οδοστρώματος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός δοκιμαστικού τμήματος μήκους περί τα 100m για να γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι της επιτυγχανόμενης πυκνότητας. Συνήθως αν η πυκνότητα δεν μεταβληθεί περισσότερο από 16kg/m³ μετά από 4 διελεύσεις του συμπτυκνωτήρα (με δόνηση) η πυκνότητα αυτή θεωρείται ως η μέγιστη επιτευκταία πυκνότητα για τις εργασίες ψυχρής ανακύκλωσης και τα κατώτερα όρια ελέγχου καθορίζονται στο 97% της πυκνότητας αυτής (Drive, UD) ή στο 96% της μέγιστης εργαστηριακής πυκνότητας (Farvetti and Longueuil, 1999)

Το συμπτυκνωμένο ψυχρό ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα πρέπει να έχει επίπεδη επιφάνεια και σύμφωνη με τα υψόμετρα της μελέτης με αποκλίσεις μικρότερες από 3/8in (10mm) όπως μετριέται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση με κανόνα μήκους 10ft (3m).

Η συμπίκνωση των ψυχρών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων επιτυγχάνεται κανονικά σε μια περιεκτικότητα σε υγρασία 1% με 2% σε ελάχιστο ποσοστό 97% της εργαστηριακής μέγιστης πυκνότητας (Drive, UD), (Potti et al, UD).

2.5.3. Συντήρηση

Μετά το πέρας της συμπίκνωσης και της τελικής διαμόρφωσης της επιφάνειας της ανακυκλωμένης στρώσης είναι απαραίτητο να προβλεφθεί ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο η στρώση παραμένει χωρίς κάλυψη έτσι ώστε να εξατμιστεί το περιεχόμενο νερό και η στρώση να ενισχυθεί αναπτύσσοντας συνοχή, ευστάθεια και τα λοιπά μηχανικά της χαρακτηριστικά. Καθ'όλο το διάστημα αυτό το οποίο ονομάζεται διάστημα συντήρησης/ ωρίμανσης (curing) η στρώση πρέπει να προστατεύεται από τυχόν μεγάλα φορτία τα οποία μπορούν να επιφέρουν φθορές και αυλακώσεις στην επιφάνεια. Ο χρόνος συντήρησης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιείται και κατά κανόνα κυμαίνεται από 2 έως 14 ημέρες για τους θερινούς μήνες ή για εποχές με θερμοκρασίες άνω των 16°C (Wallace, UD). Σημειώνεται ότι το διάστημα αυτό πρέπει να αυξηθεί σημαντικά (πχ. σε ένα μήνα) αν εν τω μεταξύ βρέξει. (Νικολαΐδης, 2002), (Davidson, 2004), (Potti et al, UD), (NN, www.conndot.ct.gov/specpro/0403872A.DOC), (NN, www.TFHRC.GOV/HNR20/RECYCLE/WASTE/RAP133.HTM), (NN, www.dot.state.ny.us/tech_serv/mat/manuals/ciprguide2003.pdf).

2.5.4. Προστασία της εργασίας

Μετά από τη διάστρωση και τη συμπίκνωση του ψυχρού ανακυκλωμένου ασφαλτομίγματος, η κυκλοφορία δεν θα επιτραπεί στην επιφάνεια αυτή για τουλάχιστον 2 ώρες ή για ένα χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο έως η στρώση αποκτήσει ευστάθεια έτσι ώστε να μη παραμορφώνεται υπέρμετρα κατά την διέλευση των οχημάτων. Επισημαίνεται ότι η ανακυκλωμένη στρώση έχει μελετηθεί ως ενδιάμεση στρώση και όχι ως επιφανειακή στρώση, διότι το ψυχρό ανακυκλωμένο μίγμα μπορεί να έχει κενά περισσότερα από ένα σύνηθες επιφανειακό μίγμα, και χρειάζεται καλή κάλυψη με μία επιφανειακή στρώση (NN, www.conndot.ct.gov/specpro/0403872A.DOC), (Dybalski, 1983), (Drive, UD).

Μετά από περίπου 2 εβδομάδες συντήρησης τα ψυχρά ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα, επικαλύπτονται με μια επιφανειακή στρώση το πάχος της οποίας εξαρτάται από

κλιματολογικές συνθήκες, και τους όγκους κυκλοφορίας του ανακυκλωμένου οδοστρώματος. Η επιφανειακή στρώση είναι συνήθως θερμός ασφαλτοτάπητας, στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται σε περιοχές με βαριά κυκλοφορία, ή με απλή ασφατική επάλειψη (Wallace,UD),

(NN, WWW.TFHRC.GOV/HNR20/RECYCLE/WASTE/RAP133.HTM)

2.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΎΓΡΑΣΙΑΣ

Η βέλτιστη υγρασία του μίγματος μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαβάθμιση του μίγματος και ιδιαίτερα με το ποσοστό του υλικού που είναι μικρότερο από 75μm. Μπορεί να προσδιοριστεί ως η τιμή που επιτρέπεται στο μίγμα να αποκτήσει τη μέγιστη πυκνότητα με τη βοήθεια δοκιμών που παρασκευάζονται με διάφορα ποσοστά νερού (Kanno et al, 2001) Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ 3% και 7% και το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στη πράξη (Saubot, UD) ενώ έχουν αναφερθεί και διαφορετικές τιμές όπως 5% Favretti και 6% Mallick. Πιστεύεται ότι οι διαφορές αυτές οφείλονται στις διαφορές των προς ανακύκλωση υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Επισημαίνεται ότι σε μερικές περιπτώσεις η απαραίτητη ποσότητα του νερού για την ανάμιξη μπορεί να είναι πιο μεγάλη από την ποσότητα που χρειάζεται για τη συμπίκνωση, (Davidson, 2004), (Favretti and Longueuil, 1999).

2.7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται οι μέθοδοι προσδιορισμού του ποσοστού ασφαλτικού γαλακτώματος τόσο για ανακυκλωμένα μίγματα όσο και για ψυχρά ασφαλτομίγματα δεδομένου ότι και στην περίπτωση των ανακυκλωμένων μιγμάτων θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι μέχρις ένα βαθμό τα μίγματα αυτά περιέχουν ήδη άσφαλτο.

Η σύνθεση των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων κλειστού τύπου γίνεται με μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν από οργανισμούς ή εργαστήρια του δημοσίου ή ιδιωτικού φορέα του εξωτερικού, και μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μία διεθνώς αποδεκτή μέθοδος μελέτης σύνθεσης (Νικολαΐδης, 2002).

Η βέλτιστη ποσότητα του ασφαλτικού γαλακτώματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες

1. Την ποσότητα της ασφάλτου στα φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα.
2. Την ποσότητα του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα.
3. Την ποσότητα των λεπτών κόκκων (παιπάλη) στο μίγμα.
4. Τα χαρακτηριστικά του γαλακτώματος που χρησιμοποιείται.

Τα χαρακτηριστικά του γαλακτώματος που χρησιμοποιείται εξαρτώνται από τα προς ανακύκλωση υλικά. Τα χημικά χαρακτηριστικά του γαλακτώματος συνδέονται άμεσα με το ποσοστό των λεπτών υλικών των αδρανών και από το πόσο ενεργά είναι.

Στην Νορβηγία, το ελάχιστο ποσοστό ασφαλτικού γαλακτώματος είναι 3%, και αυξάνεται με την αύξηση της συνολικής επιφάνειας των αδρανών που επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε λεπτούς κόκκους. Το ποσοστό αυτό μπορεί να εκτιμηθεί με βάση το ποσοστό των λεπτών υλικών από την ακόλουθη σχέση (Jostien, 1997):

$$P_a = 0.14 P_{75} + 2.6$$

Όπου:

P_a : το ελάχιστο ποσοστό κ.β ασφαλτικού συνδετικού ($P_a > 3\%$)

P_{75} : το ποσοστό των αδρανών που είναι μικρότερα από 75μm

Στην Ιαπωνία το ποσοστό του ασφαλτικού συνδετικού υπολογίζεται από το συνδυασμό των κόκκων αδρανών της ανακυκλωμένης στρώσης και τους λόγους ανάμιξης που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$P = 0.04a + 0.07b + 0.12c - 0.013d$$

Όπου:

P: ποσοστό κατά βάρος του ασφαλτικού γαλακτώματος σε σχέση με το συνολικό βάρος του μίγματος.

a: ποσοστό κ.β των αδρανών που συγκρατούνται στο κόσκινο των 2.36 mm.

b: ποσοστό κ.β των αδρανών που συγκρατούνται στο κόσκινο των 75μm αλλά διέρχονται από το 2.36mm.

c: ποσοστό διερχόμενο κ.β από το κόσκινο των 75μm

d: λόγος ανάμιξης που δίνεται από τη σχέση:

$$\text{λόγος ανάμιξης (\%)} = \frac{H1 \times e}{H1 \times e + H2 \times f} \times 100$$

Όπου

H1: Το πάχος της υπάρχουσας ασφαλτικής στρώσης

H2: Το συνολικό πάχος ανακύκλωσης

e: Πυκνότητα του υπάρχοντος ασφαλτομίγματος (συνήθως 2.4 g/cm³)

f: Πυκνότητα της υπάρχουσας στρώσης από ασύνδετο αδρανές (συνήθως 2.1g/cm³)

Συνήθως το ποσοστό του ασφαλτικού γαλακτώματος είναι περίπου 5% (Kanno et al, 2001).

Στο Νότιο Αφρική, για ψυχρά ασφαλτομίγματα με θραυστά αδρανή χωρίς φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα το ποσοστό του γαλακτώματος είναι περίπου 5%. Εάν το οδόστρωμα περιέχει ασφαλτική στρώση μεγάλου σχετικού πάχους, τότε η ποσότητα του γαλακτώματος μπορεί να ελαττωθεί στα 3% έως 4% ανάλογα με το ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα (Lewis, 1999). Το ποσοστό του ασφαλτικού υλικού καθορίζεται με αντοχή $\pm 0.5\%$ (Verhaeghe and Long, 2004).

Στην Αμερική, χρησιμοποιήθηκαν δύο ποσότητες ασφαλτικού γαλακτώματος 2.2%, 3.4% κβ σε μια κατασκευή οδοστρώματος. Βρέθηκε ότι με την ποσότητα 2.2% γαλακτώματος τα αδρανή έχουν χάσει την επικάλυψη τους με την άσφαλτο και τη συνάφεια μεταξύ τους. Ενώ με την ποσότητα 3.4% γαλακτώματος τα αδρανή ήταν σε καλύτερη κατάσταση. Επισημαίνεται επίσης ότι η ποσότητα αυτή 3.4% είναι πολύ κοντά στην συνιστώμενη ποσότητα 3%. (Mallick, 2001).

Στην Ισπανία, η ελάχιστη ποσότητα του γαλακτώματος προέρχεται από τη δοκιμή αντοχή σε θλίψη. Βρέθηκε ότι όσο αυξάνει το ποσοστό του γαλακτώματος τόσο ελαττώνεται η αντοχή σε θλίψη, (Miro, 2000).

Στον Τομέα Μεταφορών του Quebec στον Καναδά χρησιμοποιείται μέθοδος που είναι προσαρμογή της μεθόδου Marshall με τα ακόλουθα κριτήρια (PIARC, 2002):

-ευστάθεια ξηρού δοκιμίου > 6000N.

-μείωση της ευστάθειας μετά από τον υδρεμποτισμό με υποπίεση < 40%.

Ο Favretti αναφέρει ότι σε περιπτώσεις ανακύκλωσης ασφαλικής στρώσης μεγάλου πάχους (Favretti and Longueuil, 1999) η βέλτιστη ποσότητα του ασφαλικού γαλακτώματος κυμαίνεται από 3.5% έως 3.8%

Στην Γερμανία η ποσότητα του γαλακτώματος καθορίζεται ανάλογα με το είδος των αδρανών. Για τις περιπτώσεις συνδυασμού με τσιμέντο βρέθηκε τα ακόλουθα αποτελέσματα (με χρήση τσιμέντου σε ποσοότητες 1-2%), (Wirtgen, 1998):

- ο Για μίγματα 50%ΦΑ/50%ΘΑ, το γαλάκτωμα κυμαίνεται από 1.5% έως 3%
- ο Για μίγματα με 100%ΘΑ, το γαλάκτωμα κυμαίνεται από 2.5% έως 4%.
- ο Για φυσικό (συλλεκτό) αμμοχάλικο με $PI < 10$, $CBR > 30$, το γαλάκτωμα κυμαίνεται από 3% έως 4.5%,

Σε πολλές χώρες χρησιμοποιείται το μέθοδος Marshall για τον προσδιορισμό της ποσότητας γαλακτώματος. Στο Asphalt Institute συνιστάται η δοκιμή Marshall και η βέλτιστη περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα καθορίζεται με τις αναλύσεις της ευστάθειας και των κενών σε ένα εύρος τιμών 8-10%. Εναλλακτικά γίνονται δοκιμές αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό ή μέτρου ελαστικότητας (PIARC, 2002).

Στην Ελλάδα, σε ψυχρά ασφατομίγματα με θραυστά αδρανή, και ασφατικό γαλάκτωμα με άσφαλο 80/100 pen, η βέλτιστη ποσότητα του ασφαλικού γαλακτώματος είναι 5.35% κβ. (Νικολαΐδης, 2002).

2.8. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η κύρια ερώτηση που μπορεί να διατυπωθεί είναι εάν το ασφατικό γαλάκτωμα και τσιμέντο μπορούν να διαμορφώσουν ένας απολύτως νέο συνδετικό υλικό, ή το κάθε ένα λειτουργεί ανεξάρτητα από τον άλλο ή το γαλάκτωμα εμποδίζει την ενυδάτωση του τσιμέντου. Για τη διερεύνηση αυτού του θέματος, έγινε (Giuliani, 2001) ανάλυση δοκιμών περίθλασης ακτίνων X προκειμένου να προσδιοριστούν τα διάφορα συστατικά του μίγματος τσιμέντου-γαλακτώματος, και να ανιχνευθούν οι πιθανές αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις. Μετά από τον έλεγχο των αποτελεσμάτων, επιβεβαιώθηκε, ότι η παρουσία του γαλακτώματος στο τσιμέντο δεν εμποδίζει την παραγωγή των ιδιαίτερων ενώσεων ενυδάτωσης του τσιμέντου. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν μετά από σχετική έρευνες οι (Kasselouri et al, 2003), (Montepara and Giuliani, 2001). Το τσιμέντο επιταχύνει την διάσπαση του γαλακτώματος προσλαμβάνει νερό από το νερό του γαλακτώματος ή από το ελεύθερο νερό του μίγματος και ενυδατώνεται.

Έμμεσα αυτό επιβεβαιώνεται από την ευεργετική δράση του τσιμέντου στην παραγωγή μίγματος με πολύ καλή αντίσταση όχι σε αυλάκωση και υψηλή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας στα εργαστηριακά πειράματα, ακόμα και μετά από υδρεμποτισμό (Brown and Needham, 2000), (Zawadzki, 2000), (Montepara and Giuliani, 2001) Από τις παραπάνω έρευνες αποδείχθηκε πώς το τσιμέντο έχει σημαντική φυσικό-χημική δράση στο μίγμα, ενώ τα άλλα είδη φύλλερ είναι «αδρανή» υλικά δεν έχουν καμία δράση μέσα στο μίγμα εκτός από η μηχανική δράση λόγω του όγκου τους. Αυτό επιβεβαιώνεται από την πρόσφατη εμπειρία (Oulahna et al, 1996), και είναι βασισμένη στο γεγονός ότι η ενυδάτωση του τσιμέντου πραγματοποιείται με την βοήθεια της υδατικής φάσης του ασφαλικού γαλακτώματος, και συνεπώς, το τσιμέντο δεν θεωρείται κανένα αδρανές υλικό φύλλερ, αλλά παράγει ισχυρές δομές (Giuliani, 2001).

Ο συνδυασμός του τσιμέντου μαζί με την άσφαλτο ως συνδετικών υλικών των φρεζαρισμένων ασφαλτομιγμάτων δεν είναι μόνο καινοτόμος, αλλά εισάγει ορισμένα πλεονεκτήματα των δύο συνδετικών υλικών και αποβάλλει ορισμένα μειονεκτήματα που υπάρχουν όταν χρησιμοποιείται κάθε ένα χωριστά. Το γαλάκτωμα προσφέρει στο μίγμα αυξημένη ευκαμψία και το τσιμέντο προσφέρει αυξημένη ευστάθεια (αντοχή , μέτρο ελαστικότητας) ιδιαίτερα σε στην μικρή ηλικία ή και υπό δυσμενείς κλιματικές συνθήκες (Lewis, 1999). Είναι ευρέως γνωστό ότι τα μίγματα που δεσμεύονται μόνο από τσιμέντο τείνουν να ρηγματωθούν. Με την προσθήκη του ασφαλικού γαλακτώματος προσδίδεται στο μίγμα μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης, και ελαττώνεται ο σχηματισμός ρηγμών συστολής (Rossberg, 2001).

Η επιτάχυνση του ρυθμού αύξησης του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής και η επίτευξη μεγαλύτερων τελικών τιμών καθώς και η μείωση των μόνιμων παραμορφώσεων και η βελτίωση της ανθεκτικότητας αποδίδεται στη δράση του τσιμέντου μέσα στο μίγμα λόγω :

- ο ταχύτερης διάσπασης του γαλακτώματος
- ο ταχύτερης ανάπτυξης δυσκαμψίας από το διασπώμενο γαλάκτωμα
- ο βελτιωμένης πρόσφυσης του γαλακτώματος
- ο δημιουργίας συνδετικής μάζας ινώδους μορφής αυξημένης αντοχής και δυσκαμψίας λόγω των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου

Η επιτάχυνση της διάσπασης του γαλακτώματος αποδίδεται στην ανάπτυξη ελκτικών φορτίων μεταξύ αδρανών και ασφάλτου και απορρόφησης νερού από το τσιμέντο που καταλύει την ισορροπία του γαλακτώματος.

Στην ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση με γαλάκτωμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όλα τα είδη τσιμέντου

Ο βέλτιστος συνδυασμός είναι στην περίπτωση αυτή ο στόχος των σχετικών ερευνών. Σύμφωνα με την έρευνα του (Rossberg, 2001), ο συνδυασμός αυτός έχει μελετηθεί με κριτήρια την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό και τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στη δοκιμή αυτή, και την αντοχή σε θλίψη. Βρέθηκε ότι η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό αυξάνει προοδευτικά με την αύξηση της περιεκτικότητας του τσιμέντου, ενώ η αύξηση της περιεκτικότητας του γαλακτώματος δημιουργεί μικρή και γραμμική αύξηση στην αντοχή. Το ίδιο συμπέρασμα εξήχθει σχετικά με την αντοχή σε θλίψη, αλλά η αύξηση στην αντοχή δεν είναι γραμμική πάντοτε. Σε άλλα επιπλέον πειράματα με τσιμέντο 4% ή 6% βρέθηκε ότι η αντοχή αυξάνει με την αύξηση του γαλακτώματος μόνο στην αρχή (μέχρι 3% γαλάκτωμα) και μετά ελαττώνεται ξανά. Η τιμή της παραμόρφωσης σε έμμεσο εφελκυσμό αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο λίγο μέχρι την περιεκτικότητα του τσιμέντου είναι 3%, και μετά ελαττώνεται σημαντικά. Αυτό παρατηρείται σε μίγματα με μικρές ποσότητες του γαλακτώματος. Ενώ η αύξηση της περιεκτικότητας σε γαλάκτωμα προκαλεί ελαφρή αύξηση στην παραμόρφωση όταν το τσιμέντο είναι 6%, όταν το τσιμέντο είναι σε μικρές ποσότητες τότε η παραμόρφωση αυξάνεται οριακά με την αύξηση του γαλακτώματος.

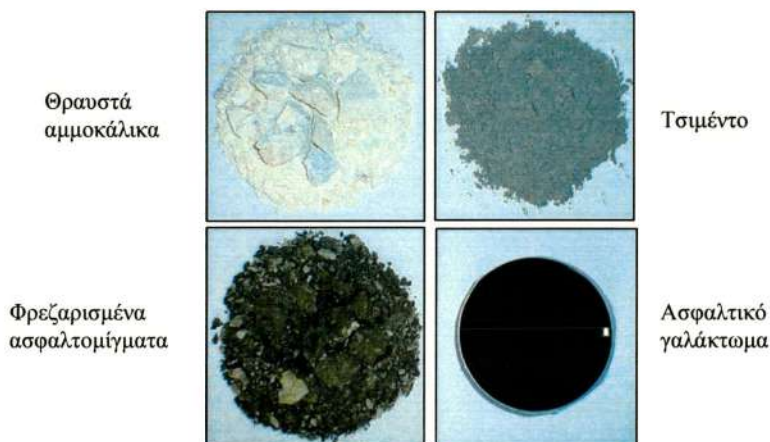
Συνήθως, το ποσοστό του τσιμέντου που προστίθεται στα μίγματα που περιέχουν γαλάκτωμα, εξαρτάται από την μελέτη που χρησιμοποιείται και μπορεί χαρακτηριστικά να κυμαίνεται από 1% έως 3%. (Lewis, 1999). ή μεταξύ 0.5 και 2.5% (PIARC, 2002), (Favretti and Longueuil, 1999), (Wirtgen, 1998).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -3-

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

3.1. ΥΛΙΚΑ

Στην διδακτορική έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα υλικά, βλ. φωτο. 3.1:



Φωτο. 3.1.: Υλικά δοκιμών

3.1.1. Συνδετικά υλικά

- Τσιμέντο: CEM II/B-M 32.5 N.
- Ασφαλτικό γαλάκτωμα: Ανιονικό γαλάκτωμα τύπου AE-5 βραδείας διάσπασης με ποσοστό ασφάλτου 60% και με τους ιδιότητες που φαίνονται στον πίνακα 3.2.

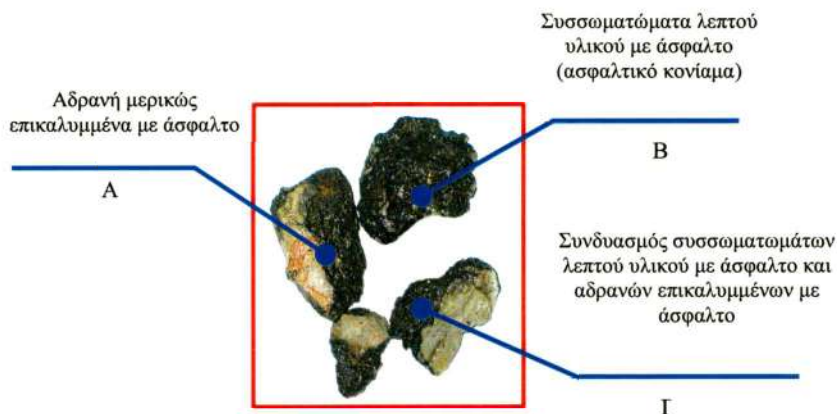
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες του γαλακτώματος που χρησιμοποιήθηκε

Δείκτης Διεισδυτικότητα pen (0.1mm)	Ολκιμότητα (cm) στους 25 °C	Σημείο Μάλθωσης 15 °C	Φοινόμενο ειδικό βάρος
80/100	>100 cm	43-47 °C	1.01

3.1.2. Αδρανή υλικά

Ως αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν:

- ένα φρεζαρισμένο-ασφαλτόμιγμα κλειστής σύνθεσης ΠΤΠ Α265, από εργασίες συντήρησης οδού στην περιοχή Αττικής το οποίο θα συμβολίζεται για συντομία ως (ΦΑ). Το ΦΑ αυτό περιέχει ποσοστό ασφάλτου 4.72% κ.β. αδρανών, και 4.92%κ.β. ασφαλτομίγματος (βλ. παράγραφο3.5). Αποτελείται κυρίως από αδρανή υλικά, πλήρως ή μερικώς περιβεβλημένα με άσφαλτο, από συσσωματώματα λεπτών αδρανών υλικών με άσφαλτο (ασφαλτικό κονίαμα) καθώς και από συνδυασμό των δύο παραπάνω υλικών βλ. φωτογραφία 3.1.
- ένα θραυστό ασβεστολιθικό αμμοχάλικο (προερχόμενο από την υποκείμενη βάση ασύνδετων υλικών ΠΤΠ Ο 155), από λατομείο της δ. Αττικής το οποίο θα συμβολίζεται ως (ΘΑ).



Φωτ. 3.2: Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (Κόλιας, 2004).

3.2. ΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ:

Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα παραλήφθηκε βρεγμένο σε δύο κλάσματα - χονδρόκοκκο ($> 12\text{mm}$ περίπου) και λεπτόκοκκο ($< 12\text{mm}$ περίπου). Για την ξήρανσή του δεν χρησιμοποιήθηκε φούρνος διότι θα αλλοίωνε τις ιδιότητες του. Αποφασίστηκε να απλωθεί κατ'αρχήν εκτός εργαστηρίου για μερικές ημέρες βλ. φωτο3.2(α, β), ώστε να εξατμιστεί μεγάλο μέρος του περιεχόμενου νερού. Μετά από πάροδο 2-3 ημερών περίπου, το ασφαλτόμιγμα μεταφέρθηκε μέσα στο εργαστήριο (Θερμοκρασία $> 23^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία 50% - 60%) και τοποθετήθηκε σε μεγάλα ορθογώνια δοχεία σε λεπτές στρώσεις (με πάχος μικρότερο από 50mm). Το ΦΑ παρέμενε μέσα στα δοχεία αυτά τουλάχιστον μία εβδομάδα αναμειγνύμενο με το φυτάρι ελαφρά (τουλάχιστον 4-5 φορές κάθε ημέρα) και αποθηκεύονταν σε δοχεία (βαρέλια).

Το φρεζαρισμένο γαρμπύλι κοσκινίστηκε στο κόσκινο 4.75mm, επειδή είχε μεγάλη ποσότητα άμμου, και το χαλίκι χρειάστηκε να κοσκινιστεί στο κόσκινο 19mm για να απορριφθούν οι μεγαλύτεροι από 19 mm.



α) Έξω από το εργαστήριο.



β) Μέσα στο εργαστήριο

Φωτογραφία 3.2: στέγνωση των ΦΑ

Τα θραυστά αμμοχάλικα αδρανή ΘΑ ήταν χωρισμένα σε τρία κλάσματα βλ. Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: κλάσματα των θραυστών αδρανών

ΑΜΜΟΣ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΧΑΛΙΚΙ
$\leq 4.75\text{ mm}$	$\geq 4.75\text{ και } \leq 12.5\text{ mm}$	$\geq 12.5\text{ και } \leq 19\text{ mm}$

Η υγρασία των θραυστών αδρανών ήταν 0.3% έτσι ώστε δεν χρειάζονται ξήρανση. Το θραυστό γαρμπίλι είχε σχετικά μεγάλη ποσότητα των λεπτών κόκκων 4%, για τον λόγο αυτό χρειάστηκε να κοσκινιστεί στο κόσκινο 2mm = No.10.

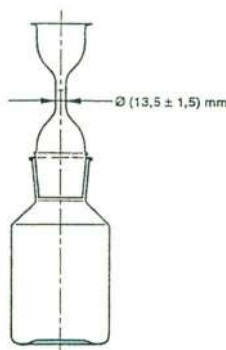
Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.5 η ποσότητα της παιτάλης (υλικό διερχόμενο από το κόσκινο 75μm) είναι 17.7% και για μεγαλύτερη ακρίβεια, η ποσότητα αυτή καθορίστηκε επίσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM C117 (πού εφαρμόζει πλύσιμο), και βρέθηκε 19.8%.

3.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

Οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό της πυκνότητας και της υδαταπορρόφησης των αδρανών πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 1097-6.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένες έννοιες που χαρακτηρίζουν τις φυσικές ιδιότητες των αδρανών .

- Πυκνότητα ξηραμένων στο φούρνο αδρανών.
- Φαινόμενη πυκνότητα αδρανών (ξηρών αδρανών).
- Πυκνότητα κορεσμένων αλλά επιφανειακά στεγνών αδρανών.
- Υδαταπορρόφηση.



Εικόνα 3.1: Πυκνόμετρο

Μετρούνται τα εξής μεγέθη:

M_1 : η μάζα των κορεσμένων αλλά επιφανειακά στεγνών αδρανών (σε γραμμάρια).

M_2 : η μάζα του πυκνόμετρου με το δείγμα των αδρανών (σε γραμμάρια).

M_3 : η μάζα του πυκνόμετρου γεμάτου με νερό (σε γραμμάρια).

M_4 : η μάζα των ξηραμένων στο φούρνο αδρανών (σε γραμμάρια).

Υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \text{ Φαινόμενη πυκνότητα αδρανών (ξηρών αδρανών)}^1$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \text{ Πυκνότητα ξηραμένων στο φούρνο αδρανών}$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \text{ Πυκνότητα κορεσμένων και επιφανειακά στεγνών αδρανών}$$

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \text{ Υδαταπορρόφηση σε ποσοστό της ξηρής μάζας των αδρανών.}$$

Οι υπολογισμοί ελέγχονται με την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_{ssd} = 1 + \rho_{rd} - \frac{\rho_{rd}}{\rho_a} \text{ Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι τα παρακάτω:}$$

Πίνακας 3.3: Τιμές πυκνότητας και υδαταπορρόφησης θραυστών αδρανών

	Φαινόμενη πυκνότητα	Πυκνότητα ξηρών στο φούρνο αδρανών	Πυκνότητα κορεσμένων επιφανειακά στεγνών αδρανών	Υδαταπορ- ρόφηση %
Χαλίκι	2.72	2.62	2.66	1.31
Γαρμπίλι	2.72	2.69	2.70	0.34
Άμμος	2.71	2.68	2.69	0.38

¹ ρ_a : apparent particle density, σύμφωνα με EN 1097-6.2000

Πίνακας 3.4: Τιμές πυκνότητας και υδαταπορρόφησης φρεζαρισμένων αδρανών

	Φαινόμενη πυκνότητα	Πυκνότητα ξηρών στο φούρνο αδρανών	Πυκνότητα κορεσμένων επιφανειακά στεγνών αδρανών	Υδαταπορ- ρόφηση %
Χαλίκι	2.49	2.39	2.43	1.67
Γαρμπίλι	2.56	2.47	2.51	1.48
Άμμος	2.54	2.48	2.50	1.01

Παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι οι εξής :

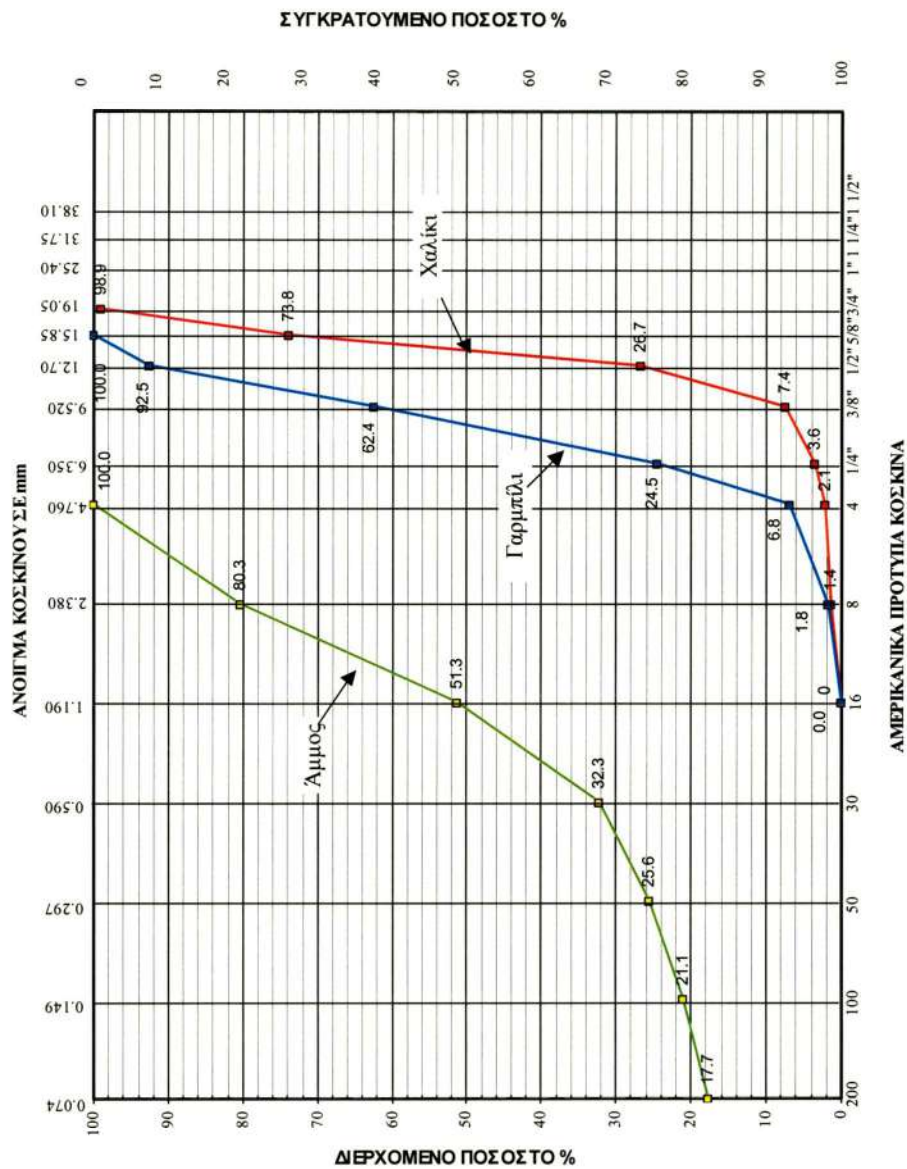
Τα θραυστά αδρανή έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και μικρότερη υδαταπορρόφηση από τα φρεζαρισμένα λόγω της σύστασης τους. Τα μεν πρώτα είναι ασβεστολιθικά πετρώματα ενώ τα δεύτερα είναι μίγμα θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών με μερική ή ολική επικάλυψη με λεπτό υμένα ασφάλτου και ασφαλικών συσσωματωμάτων. Σημειώνεται ότι η πυκνότητα της ασφάλτου είναι σημαντικά μικρότερη εκείνης των θραυστών αδρανών και είναι περίπου ίση με εκείνη του νερού. Μια πηγή περαιτέρω διαφορών είναι το γεγονός ότι η διαδικασία μέτρησης εμπεριέχει ποιοτική και όχι ακριβή εξακρίβωση του επιφανειακού στεγνώματος των αδρανών.

3.4. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM C136 χρησιμοποιήθηκαν αμερικανικά κόσκινα, σε δείγματα που λήφθηκαν από τις ποσότητες που είχαν συγκεντρωθεί με τη μέθοδο του τετραμερισμού. Για κάθε διαβάθμιση εξετάστηκαν τρία δείγματα, για κάθε ένα από τα τρία κλάσματα, και υπολογίστηκε ο μέσος όρος, βλ. πίνακα 3.5, και σχήμα 3.1.

Πίνακας 3.5: Κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστών υλικών

Κόσκινο ASTM	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)		
		Χαλίκι	Γαμπύλι	Άμμος
1"	25.00	98.9	100.0	100.0
3/4"	19.05	73.8	100.0	100.0
5/8"	15.85	26.7	100.0	100.0
1/2"	12.7	7.4	92.5	100.0
3/8"	9.52	3.6	62.4	100.0
1/4"	6.35	2.1	24.5	100.0
No. 4	4.76	1.4	6.8	100.0
No. 8	2.38	0.0	1.8	80.3
No. 16	1.19	0.0	0.0	51.3
No. 30	0.59	0.0	0.0	32.3
No. 50	0.297	0.0	0.0	25.6
No. 100	0.149	0.0	0.0	21.1
No. 200	0.074	0.0	0.0	17.7

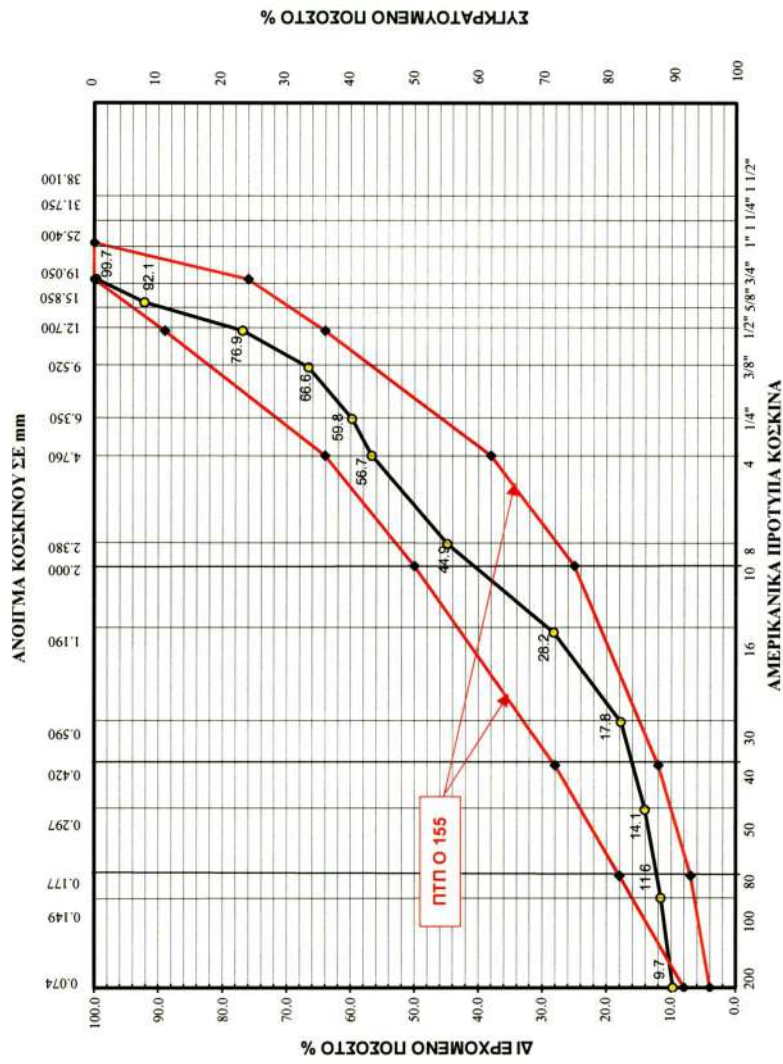


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης θραυστού υλικού

Από αυτά τα τρία θραυστά ασβεστολιθικά κλάσματα, πραγματοποιήθηκε ένα μίγμα ($100\% \Theta A = 0.3X + 0.15\Gamma + 0.55A$) με τις αναλογίες που φαίνονται στον Πίνακα 3.6, οι οποίες επιλέχθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή (ΠΤΠ Ο 155), βλ. Σχ. 3.2.

Πίνακας 3.6: Μίγμα (100% ΘA):

Κόσκινο ASTM	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)			
		0.30 Χαλίκι	0.15 Γαρμπίλι	0.55 Άμμος	Άθροισμα
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.05	29.7	15.0	55.0	99.7
5/8"	15.85	22.1	15.0	55.0	92.1
1/2"	12.7	8.0	13.9	55.0	76.9
3/8"	9.52	2.2	9.4	55.0	66.6
1/4"	6.35	1.1	3.7	55.0	59.8
No. 4	4.76	0.6	1.0	55.0	56.7
No. 8	2.38	0.4	0.3	44.2	44.9
No. 16	1.19	0.0	0.0	28.2	28.2
No. 30	0.59	0.0	0.0	17.8	17.8
No. 50	0.297	0.0	0.0	14.1	14.1
No. 100	0.149	0.0	0.0	11.6	11.6
No. 200	0.074	0.0	0.0	9.7	9.7

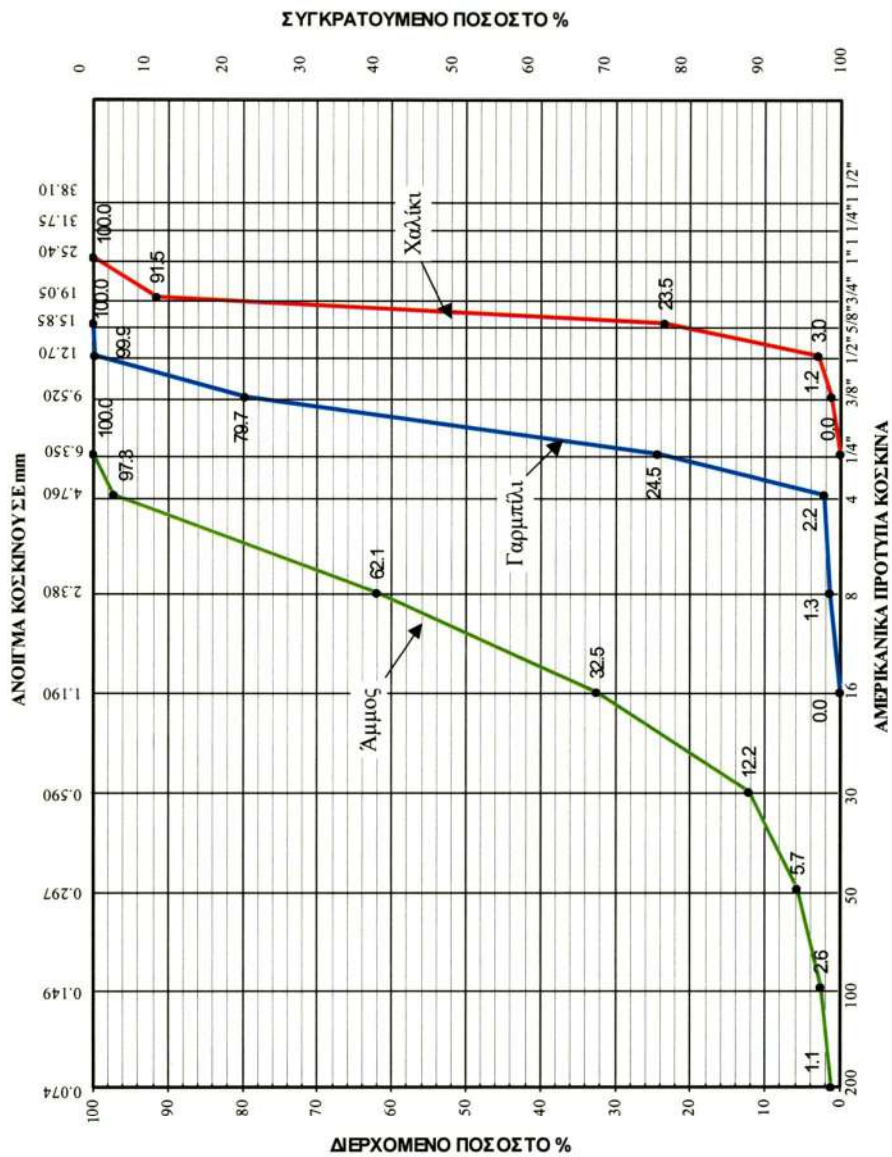


Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση μύγατος (100% ΘΑ) κατά τη (ΠΤΠ Ο 155).

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε επίσης στα τρία κλάσματα του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, βλ. Πίνακα 3.7, και Σχ. 3.3.

Πίνακας 3.7: Κοκκομετρική διαβάθμιση φρεζαρισμένων υλικών

Κόσκινο ASTM	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)		
		Χαλίκι	Γαρμπίλι	Άμμος
1"	25.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.05	91.5	100.00	100.00
5/8"	15.85	23.5	100.00	100.00
1/2"	12.7	3.0	99.9	100.00
3/8"	9.52	1.2	79.7	100.00
1/4"	6.35	0.0	24.5	100.00
No. 4	4.76	0.0	2.2	97.3
No. 8	2.38	0.0	1.3	62.1
No. 16	1.19	0.0	0.0	32.5
No. 30	0.59	0.0	0.0	12.2
No. 50	0.297	0.0	0.0	5.7
No. 100	0.149	0.0	0.0	2.6
No. 200	0.074	0.0	0.0	1.1



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης φρεζαρισμένου υλικού

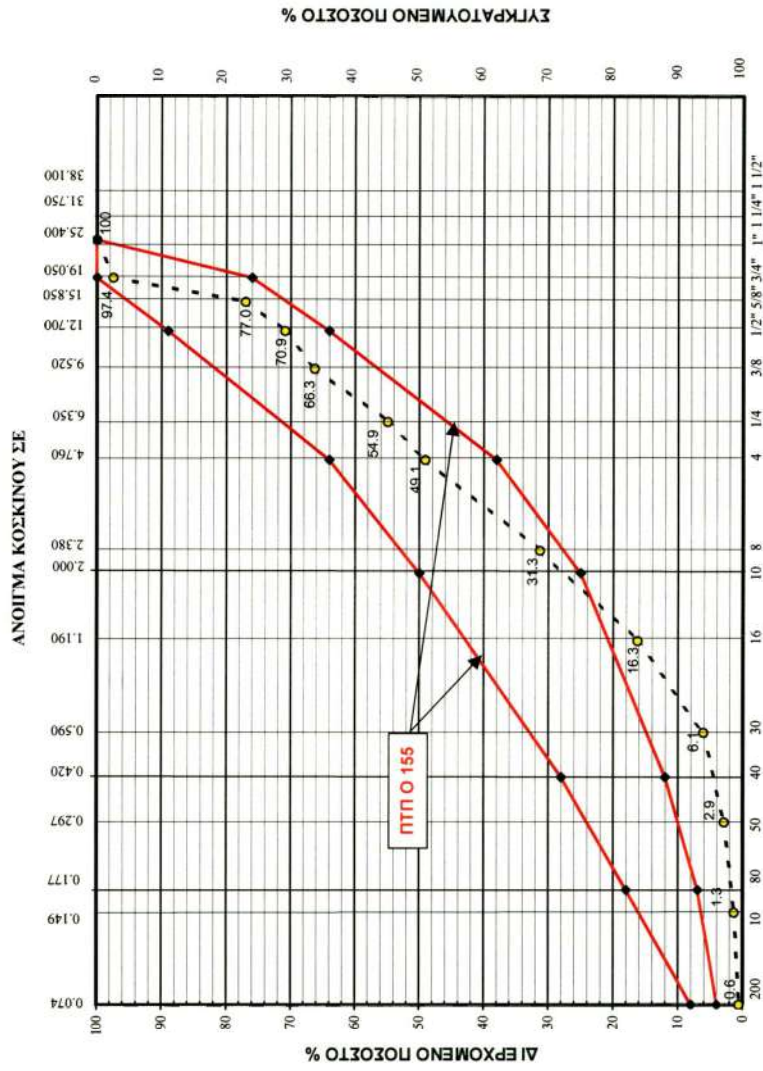
Στην συνέχεια δημιουργήθηκε φρεζαρισμένο μίγμα με τις αναλογίες 0.3 Χαλίκι + 0.2 Γαρμπίλι + 0.5 Άμμος = 100% ΦΑ, έτσι ώστε η διαβάθμιση να είναι σε μεγάλο τμήμα της μέσα στα όρια της (ΠΤΠ Ο 155), βλ. Πίνακα 3.8, και Σχ. 3.4. (εκτός από την περιοχή των λεπτόκοκκων κλασμάτων).

Πίνακας 3.8: Μίγμα (100% ΦΑ):

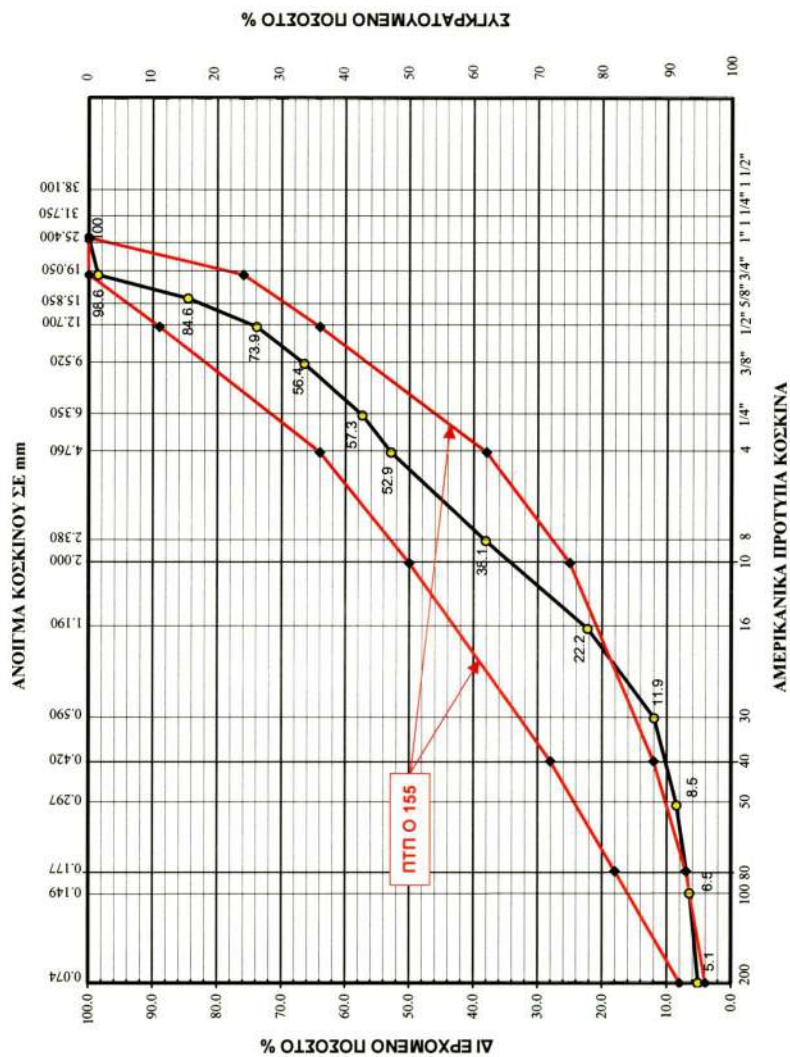
Κόσκινο ASTM	Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)			
		0.30 Χαλίκι	0.2Γαρμπίλι	0.50 Άμμος	Άθροισμα
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.05	27.4	20.0	50.0	97.4
5/8"	15.85	7.0	20.0	50.0	77.0
1/2"	12.7	0.9	20.0	50.0	70.9
3/8"	9.52	0.3	15.9	50.0	66.3
1/4"	6.35	0.0	4.9	50.0	54.9
No. 4	4.76	0.0	0.4	48.7	49.1
No. 8	2.38	0.0	0.3	31.1	31.3
No. 16	1.19	0.0	0.0	16.3	16.3
No. 30	0.59	0.0	0.0	6.1	6.1
No. 50	0.297	0.0	0.0	2.9	2.9
No. 100	0.149	0.0	0.0	1.3	1.3
No. 200	0.074	0.0	0.0	0.6	0.6

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4, η διαβάθμιση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος είναι σε μεγάλο βαθμό, δεδομένη και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος που εκτελεί το φρεζάρισμα. Στις εργασίες ανακύκλωσης δεν υπάρχουν στην πράξη μεγάλες δυνατότητες για μεταβολή των διαβαθμίσεων των ανακυκλούμενων υλικών, ιδιαίτερα στην περιοχή των λεπτόκοκκων κλασμάτων.

Με ανάμιξη των δύο αυτών υλικών (100%ΘΑ), (100%ΦΑ) με αναλογίες %κ.β επί του συνολικού υλικού 50%ΘΑ και 50%ΦΑ, δημιουργήθηκε ένα τρίτο μίγμα (50%ΦΑ, 50%ΘΑ), βλ. Σχ. 3.5.



Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος (100% ΦΑ) κατά την (ΠΤΗ Ο 155).



Σχήμα 3.5: Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος (50% ΘΑ / 50%ΦΑ) κατά την (ΠΤΠ Ο 155).

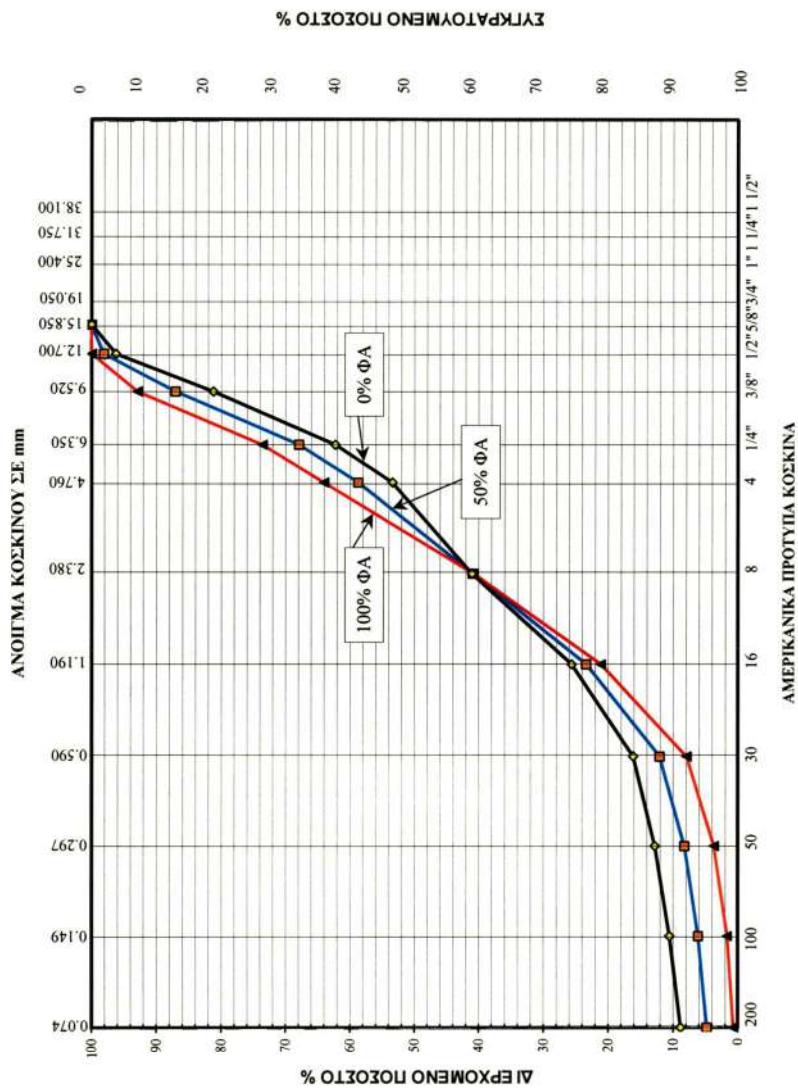
Είναι γνωστό ότι η σχέση μεταξύ μέγιστου κόκκου αδρανών ($\max D$) και ελάχιστης διάστασης δοκιμίου ($\min L$) επηρεάζει σημαντικά την ομοιομορφία των αποτελεσμάτων των δοκιμών αντοχής και των μετρήσεων των ανηγμένων παραμορφώσεων. Η ελάχιστη διάσταση των δοκιμών δεν αναμένεται να είναι μικρότερη από 50mm ($\min$ αναμενόμενο ύψος δοκιμών Marshall) και επομένως με την προϋπόθεση ότι για λόγους ομοιομορφίας επιλέχθηκε $\min L / \max D = 4$ προκύπτει ότι η μέγιστη διάσταση κόκκου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 12.5mm.

Με μέγιστο επομένως κόκκο 12.5 mm δημιουργήθηκαν τρία μίγματα ονομαζόμενα χάριν συντομίας : 100% ΘΑ, 100%ΦΑ, και 50% ΦΑ με τις ακόλουθες αναλογίες %κ.β επί του συνολικού υλικού :

- ο 100%ΘΑ : 50% θραυστό γαρμπίλι και 50% θραυστή άμμο
- ο 100% ΦΑ: 35% φρεζαρισμένο γαρμπίλι και 65% φρεζαρισμένη άμμο
- ο 50% ΦΑ : 50% ΦΑ και 50% ΘΑ

Οι αναλογίες αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να μην διαφέρουν σημαντικά οι κοκκομετρική διαβάθμισή τους (βλ. Σχ 3.6) για να μην προστεθεί και μία επιπλέον παράμετρος σε ένα ήδη πολυπαραμετρικό πρόβλημα . Το τρίτο μίγμα (50%ΦΑ) είναι ένα μίγμα το οποίο θα μπορούσε να αντιπροσωπεύσει ένα σύνθετες ανακυκλωμένο μίγμα στο οποίο η συμμετοχή του φρεζαρισμένου υλικού είναι 50%.

Έτσι η έρευνα περιελάμβανε δύο υλικά που θα μπορούσαν να προέλθουν από εργασίες ανακύκλωσης, (100%ΦΑ) και (50%ΦΑ), και επίσης για λόγους πληρότητας ένα τρίτο υλικό (100%ΘΑ) που αποτελεί μία όχι συχνή περίπτωση ενδιαφέρουσα όμως για ερευνητικούς λόγους.



Σχήμα 3.6: Κοκκομετρική διαβάθμιση μπετόν με μέγεθος κόκκου (12.5mm).

3.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΥ ΤΩΝ

Φ ΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ (δοκιμή εκχύλισης)

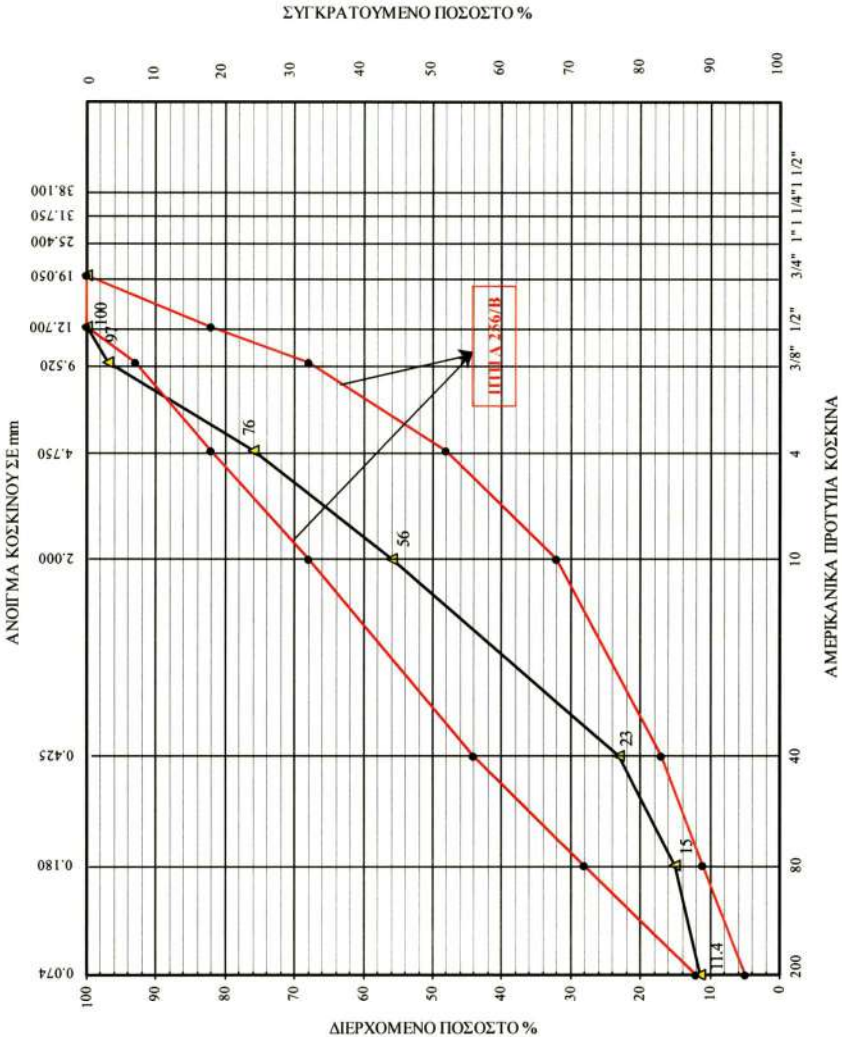
Η περιεκτικότητα σε άσφαλτο των περισσότερων παλαιών οδοστρωμάτων συνήθως κυμαίνεται από 3% έως 7% κατά βάρος και 10% έως 20% κατ'όγκο, (Asphalt Institute).

Τα φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή εξετάστηκαν για τον προσδιορισμό του ποσοστού της ασφάλτου σύμφωνα με (AASHTO T 164-01), και της κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα (AASHTO T 30-98).

Ένα δείγμα ΦΑ (2Kg περίπου) με μέγιστο διάμετρο κόκκου 12.5mm χρησιμοποιήθηκε στην εκχύλιση αυτή και το ποσοστό ασφάλτου ήταν 4.95% κ.β. αδρανών, και 4.72% κ.β. ασφαλτομίγματος, βλ. Πίνακα 3.9 και Σχ. 3.7.

Πίνακας 3.9: Προσδιορισμός ποσοστού ασφάλτου (AASHTO T 164-01) & κοκκομετρική ανάλυσης με κόσκινα (AASHTO T 30-98)

Πρότυπο Μέγεθος Κοσκίνου (σε mm)	Αριθμός Κόσκινο (σε in)	Διερχόμενο Βάρος (%)	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ Π.Τ.Π. Α-265/Β-ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	
			ΚΑΤΩ ΟΡΙΑ	ΑΝΩ ΟΡΙΑ
19.05	3/4"	100	100	100
12.7	1/2"	100	82	100
9.52	3/8"	97	68	93
4.75	No. 4	76	48	82
2.00	No. 10	56	32	68
0.425	No. 40	23	17	44
0.180	No. 80	15	11	28
0.074	No. 200	11.4	5	12
Ποσοστό Ασφάλτου (κ.β. Αδρανών)		4.94%	5.0%	8.0%
Ποσοστό Ασφάλτου (κ.β. Ασφαλτομίγματος)		4.72%	4.8%	7.4%



Σχήμα 3.7: Κοκκομετρική διαβάθμιση μγμάτων μέγιστο κόκκο (12.5mm).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -4-

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ – ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια Marshall, με διαστάσεις: διάμετρος 102 mm, ύψος 64 mm. Με τα δοκίμια αυτά έγιναν δοκιμές για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας, της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη, και της αντοχής σε κόπωση.

4.1.1. Προετοιμασία των μιγμάτων

Στον σχεδιασμό της ερευνητικής αυτής εργασίας διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν ορισμένα θέματα τα οποία χρειάζονταν προκαταρκτική διερεύνηση πριν ξεκινήσουν οι κύριες δοκιμές. Τα θέματα αυτά αφορούσαν:

- Την επιλογή της κατάλληλης σειράς ανάμιξης των συνδετικών υλικών (ανάμιξη πρώτα του γαλακτώματος ή του τσιμέντου)
- Τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ του πέρατος ανάμιξης και έναρξης της συμπίκνωσης των δοκιμίων. Ο χρόνος αυτός σχετίζεται με τον χρόνο διάσπασης του γαλακτώματος (βλ κεφάλαιο 5).

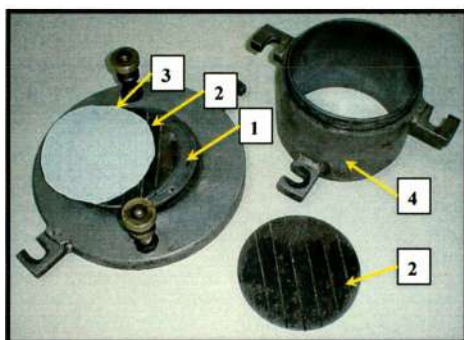
4.1.2. Προετοιμασία των δοκιμίων

Το δοκίμιο που προκύπτει από φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (με ή χωρίς αμμοχάλικο (ΘΑ)) και περιέχει ασφαλικό γαλάκτωμα, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διάρκεια της παρασκευής και ωρίμανσης του (Texas, WWW.tpub.com/inteng/17j.htm). Έτσι μερικές χώρες (ΗΠΑ, Νότιος Αφρική, Γερμανία) αφήνουν τα δοκίμια μέσα στις μήτρες τους για 24ώρες μέσα στο περιβάλλον του εργαστηρίου πριν την εξόλκευσή τους. Στην έρευνα αυτή επειδή πρόκειται να παρασκευάζονται πολλά δοκίμια σε κάθε παρτίδα δεν ήταν δυνατόν να μένουν τα δοκίμια μέσα στις μήτρες τους. Έτσι έγινε προσπάθεια να εξολκεύονται τα

δοκίμια αμέσως μετά την συμπίκνωσή τους λαμβάνοντας της κατάλληλες προφυλάξεις για την αποφυγή δημιουργίας φθορών στο δοκίμιο

4.1.2.1. Συμπύκνωση των δοκιμίων

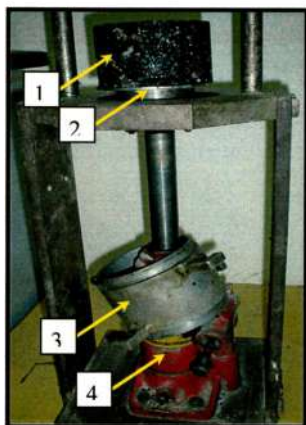
Από το μίγμα που περιλαμβάνει γαλάκτωμα χρειάζεται κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης να μπορεί να διαφύγει το νερό, γιατί διαφορετικά εμποδίζεται η πλήρης συμπίκνωση. Έτσι στη Νορβηγία χρησιμοποιούνται διάτρητες μήτρες (Jostein, 1997), και στις άλλες χώρες (Γερμανία, ΗΠΑ) τοποθετείται πάνω στη βάση της μήτρας ένας ειδικός δίσκος από πλαστικό ή από χαρτί ή από επικερωμένο χαρτί. Στην εργασία αυτή αποφασίστηκε να τοποθετηθεί μια μεταλλική πλάκα με εγχοπές οι οποίες παρείχαν τη δυνατότητα διαφυγής του νερού κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης. Την διαφυγή αυτή διευκόλυνε επίσης και πρόσθετο φύλλο απορροφητικού χαρτιού που παρεμβάλλετο μεταξύ υλικού και μεταλλικής πλάκας. (βλ. Φωτο. 4.1). Το χαρτί αυτό είχε ταυτόχρονα και δράση φίλτρου, έτσι ώστε να παρεμποδίζεται η διαφυγή τσιμέντου ή άλλων λεπτόκοκκων υλικών μαζί με το νερό.



- 1: Η βάση της μήτρας.
- 2: Μεταλλική πλάκα με εγχοπές.
- 3: Φύλλο απορροφητικό χαρτί.
- 4: Η μήτρα.

Φωτο. 4.1: Προετοιμασία της μήτρας

Τα δοκίμια Marshall συμπτκνώνονται στην ομόνυμη μηχανή συμπίκνωσης με 75 χτυπήματα σε κάθε βάση (Wirtgen.1998). Η μεταλλική πλάκα που τοποθετήθηκε στη βάση της μήτρας, παραμένει στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της εξόλκευσής του, για να δευκολύνει την διαδικασία εξόλκευσης, βλ. Φωτ. 4.2 παρέχοντας επιπλέον προστασία και ασφάλεια σ' αυτό.



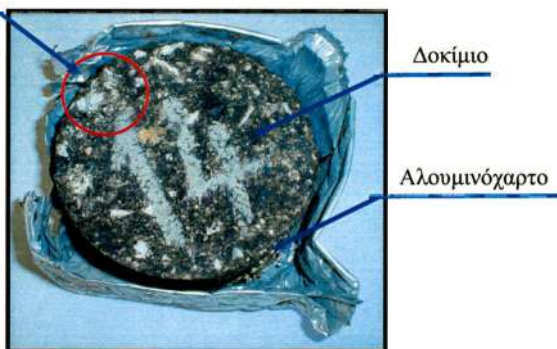
- 1: Το δοκίμιο.
- 2: Η μεταλλική πλάκα
- 3: Το καλούπι
- 4: Υδραυλικός γρύλλος

Φωτο. 4.2: Εξόλκευση του δοκιμίου

4.1.2.2. Προφυλακτικά μέτρα για την φύλαξη και συντήρηση των δοκιμών

Επειδή τα δοκίμια μετά την εξόλκεσή τους είναι ιδιαίτερα εύθρυπτα υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης αδρανών ή τεμαχίων από τα άκρα τους. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να τοποθετηθεί το δοκίμιο (μετά από την εξόλκεσή του) σε ένα δοχείο από χοντρό αλουμινόχαρτο μέχρι το πέρας της συντήρησής του, βλ. Φωτ.4.3.

Αδρανές που αποκολλήθηκε



Φωτο. 4.3: Το δοκίμιο τοποθετείται μέσα σε δοχείο από χοντρό αλουμινόχαρτο για να είναι προφυλαγμένο κατά τη διάρκεια της συντήρησής

4.1.2.3. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα ανακυκλωμένα με γαλάκτωμα και τσιμέντο υλικά αντιμετωπίζονται στην εργασία αυτή ως σταθεροποιημένα υλικά και όχι ως ψυχρά ασφαλτομίγματα. Για τον λόγο αυτό η συντήρηση/ωρίμανση των δοκιμίων δεν διέπεται από την ανάγκη απομάκρυνσης του περιεχόμενου νερού μόνο, όπως γίνεται στις περιπτώσεις ασφαλτομιγμάτων με γαλάκτωμα, αλλά από την προσπάθεια να γίνει η μεγαλύτερη πρακτικά δυνατή εκμετάλλευση της ύπαρξης του τσιμέντου μέσα στο μίγμα πριν την απομάκρυνση του νερού. Για τον λόγο αυτό η συντήρηση των δοκιμίων γίνεται τις πρώτες ημέρες σε υγρό θάλαμο σκυροδέματος (πριν τα δοκίμια συντηρηθούν στο φούρνο) για να δοθεί η δυνατότητα στο περιεχόμενο τσιμέντο να αναπτύξει ένα σημαντικό βαθμό ενυδάτωσης και επομένως να δημιουργήσει δεσμούς με τους κόκκους των υλικών ΦΑ και ΘΑ. Άλλωστε και στην πράξη η συμπτυκνωμένη στρώση περιέχει υγρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα και έτσι παρέχεται η δυνατότητα ενυδάτωσης μέχρι ένα βαθμό στο τσιμέντο, βλ. Φωτ.4.4(α, β).

(α)



(β)



Φωτ. 4.4: Συντήρηση δοκιμίων που περιέχουν τσιμέντο με γαλάκτωμα
(α μέσα στο υγρό θάλαμο, β. μέσα στο φούρνο)

Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί εάν έχει κάποια επίδραση στην συντήρηση των δοκιμών η θέση του δοκιμίου μέσα στο φούρνο, αφού μετρήσεις έδειξαν ότι η θερμοκρασία διαφέρει περίπου $\pm 2^{\circ}\text{C}$ μεταξύ τα τριών επίπεδων (ραφιών) στο φούρνο.

4.2. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Πρωταρχικός σκοπός αυτής της ερευνητικής εργασίας είναι να διερευνήσει τα μηχανικά εκείνα χαρακτηριστικά που καθορίζουν κατά αποφασιστικό τρόπο τη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων με συνδυασμό γαλακτώματος και τσιμέντου στρώσεων. Η συμπεριφορά αυτή καθορίζεται από:

- το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού το οποίο καθορίζει το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων.
- την αντοχή σε κόπωση του υλικού, η οποία καθορίζει τις επαναλήψεις φορτίσεων που μπορεί να αναλάβει η στρώση και επομένως το χαρακτηριστικό αυτό είναι καθοριστικής σημασίας παράγοντας εκτίμησης των επιτρεπόμενων διελεύσεων των εμπορικών οχημάτων που μπορεί να αναλάβει η στρώση.
- την επίδραση του υδρεμποτισμού στα παραπάνω μεγέθη. Ο υδρεμποτισμός αποτελεί την βασικότερη περιβαλλοντική επιπόνηση του υλικού για τις χώρες που δεν έχουν κίνδυνο παγετού.
- την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού. Η ιδιότητα αυτή του υλικού επελέγη σαν ένα απαραίτητο στοιχείο για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κόπωση και σαν μία καλή εκτιμήτρια της επίδρασης του υδρεμποτισμού στην αντοχή σε κόπωση. Σημειώνεται ότι η προσθήκη τσιμέντου στο μίγμα συνεπάγεται την τροποποίηση των ιδιοτήτων του μίγματος και της συμπεριφοράς του σε κόπωση με τη στατική αντοχή αναδεικνυόμενη πιθανόν σε απαραίτητο μέγεθος για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κόπωση.

Με τα παραπάνω δεδομένα αποφασίστηκε στην εργασία αυτή να γίνουν οι ακόλουθες μετρήσεις:

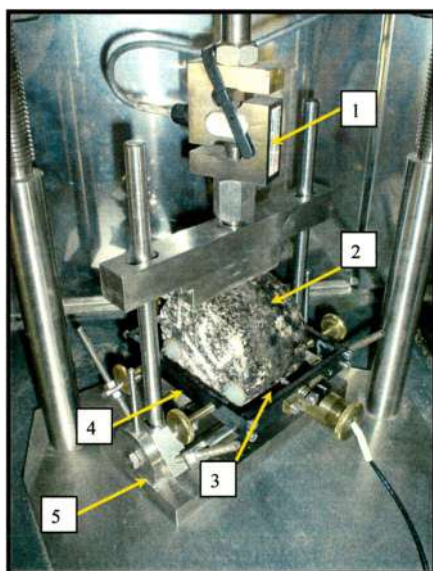
1. Μέτρο δυσκαμψίας
2. Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη)

3. Επίδραση του υδρεμποτισμού στο μέτρο δυσκαμψίας και την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό
4. Αντοχή σε κόπωση σε έμμεσο εφελκυσμό

Αποφασίστηκε επίσης ότι κατά την εκτέλεση των δοκιμών να επελεγούν ορισμένα μίγματα για να γίνει επίσης διερεύνηση μικρής έκτασης της επίδρασης της θερμοκρασίας των δοκιμίων κατά τις δοκιμές 1 και 2 έτσι ώστε να αποκτηθεί μία εικόνα της επίδρασης και αυτού του περιβαλλοντικού παράγοντα.

4.2.1. Μέτρο δυσκαμψίας

Η εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε στην συσκευή NAT σύμφωνα με το Βρετανικό σχέδιο Προτύπου BS DD 213.1993 (χρόνος φόρτισης 120 msec, επιδιωκόμενη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση 5mm, 5 προφορτίσεις και 5 φορτίσεις μέτρησης). Χρησιμοποιούνται δοκίμια Marshall, βλ. Φωτογραφία 4.5.

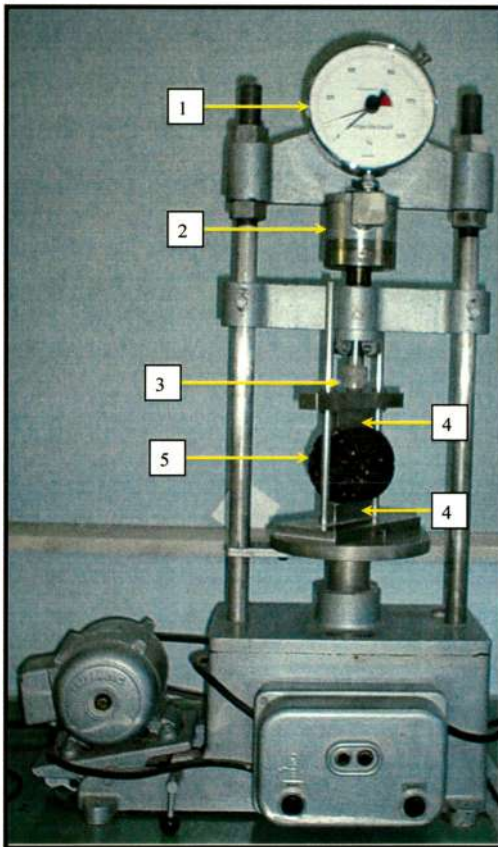


- 1: Ηλεκτροδυναμόμετρο
- 2: Δοκίμιο
- 3: επαγωγικό παραμορφωσιμόμετρο
- 4: Πλαίσιο συγκράτησης
παραμορφωσιμομέτρων
- 5: Πλαίσιο φόρτισης δοκιμίου

Φωτο. 4.5: Δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στην συσκευή NAT.

4.2.2. Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό - Διάρρηξη

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη- αντιδιαμετρική θλίψη) προσδιορίστηκε σε συσκευή Marshall βλ. Φωτογραφία 2.6, μέγιστου φορτίου 15 kN, με ταχύτητα επιβολής παραμόρφωσης 50 ± 2 mm/min σύμφωνα με το Πρότυπο EN12697 - 23.



- 1: Ένδειξη φορτίου
- 2: Υδραυλική μέτρηση φορτίου
- 3: Επιβολή φορτίου μέσω σφαιρικής άρθρωσης
- 5: Δοκίμιο
- 4: Μεταλλικό τεμάχιο επιβολής φορτίου

Φωτο. 4.6: Δοκιμή αντιδιαμετρική θλίψη (διάρρηξη) στην συσκευή Marshall

4.2.3. Δοκιμή υδρεμποτισμού

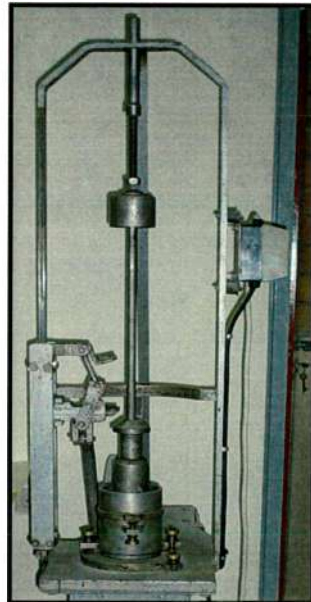
Η δοκιμή υδρεμποτισμού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του Προτύπου EN 12697-12 με την διαφορά ότι τα δοκίμια Marshall παρέμειναν σε δοχείο με νερό επί 48 ώρες, βλ. Φωτογραφία 4.7 αντί του υδρεμποτισμού με υποπίεση.



Φωτο. 4.7: Υδρεμποτισμός των δοκιμίων

4.2.4. Δοκιμές συμπίκνωσης (Proctor)

Η βέλτιστη υγρασία προσδιορίστηκε στα δοκίμια Marshall με την εκτέλεση δοκιμών συμπίκνωσης, χρησιμοποιώντας την μηχανή συμπίκνωσης Marshall με 50 χτυπήματα σε κάθε βάση, βλ. Φωτογραφία 4.8.

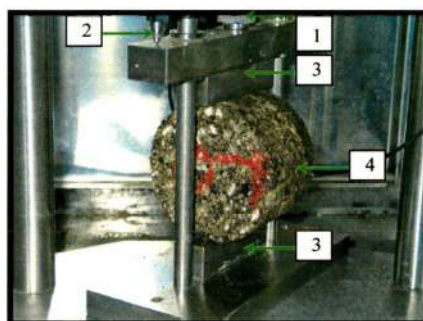
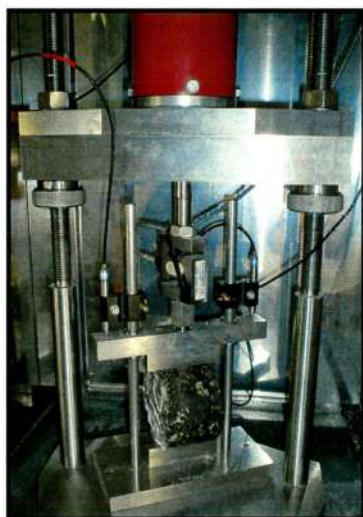


Φωτο.4.8: Μηχανή συμπίκνωσης Marshall

4.2.5. Δοκιμή κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη

Σύμφωνα με τις οδηγίες του πρωτοκόλλου Protocol Version 1.0, Link Bitutest Project Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT). Η δοκιμή κόπωσης πραγματοποιήθηκε σε συσκευή NAT, βλ. Φωτογραφία 2.9 σε δοκίμια Marshall, τα οποία φορτίζονται κατακόρυφα και αντιδιαμετρικά υπό παλμική επαναλαμβανόμενη θλιπτική φόρτιση σταθερού προσήμου με διαστήματα ανάπαυλας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις και ο αντίστοιχος αριθμός επαναφορτίσεων.

Η αστοχία του δοκιμίου ορίζεται όταν η μηχανή δεν μπορεί να εφαρμόσει θλιπτικό φορτίο, λόγω του ότι η μετρούμενη κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση έχει ξεπεράσει τα 5-9mm, πράγμα που σημαίνει ότι το δοκίμιο έχει ρηγματωθεί.



- 1: Σφαιρική μετάδοση του φορτίου
- 2: Μηκυνσίόμετρο
- 3: Μεταλλικό τεμάχιο επιβολής φορτίου
- 4: Δοκίμιο Marshall.

Φωτο. 4.9: Δοκιμή κόπωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -5-

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη διεθνή πρακτική υπάρχει σχετική ασυμφωνία σε ότι αφορά τη μέθοδο παρασκευής δοκιμίων, κυρίως σε περιπτώσεις συνδυασμού των δύο συνδετικών υλικών (τσιμέντο και ασφαλτικό γαλάκτωμα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνδυασμός των δύο συνδετικών υλικών εισάγει νέους παράγοντες, η επιρροή των οποίων δεν έχει μελετηθεί επαρκώς. Έτσι δεν έχει ακόμη καθοριστεί ευρύτατα διαδεδομένη μεθοδολογία εκτέλεσης της μελέτης σύνθεσης των ανακυκλωμένων μιγμάτων όταν χρησιμοποιείται συνδυασμός τσιμέντου και ασφαλτικού γαλακτώματος.

Για τον λόγο αυτό έγινε προσπάθεια να διερευνηθούν οι επιπτώσεις στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη, των ακόλουθων παραγόντων:

- Της μεθόδου ανάμιξης και της σειράς ανάμιξης γαλακτώματος, νερού και τσιμέντου.
- Του χρόνου αναμονής από την έναρξη της ανάμιξης έως την έναρξη της συμπίκνωσης του δοκιμίου. Εξετάστηκαν οι χρόνοι 0 - 30 - 90 min.
- Της μεθόδου συντήρησης των δοκιμίων (χρόνος και περιβάλλον συντήρησης, συμπεριλαμβανόμενης της θερμοκρασίας και της υγρασίας).

Με βάση τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής καθορίστηκε η μεθοδολογία παρασκευής και συντήρησης των δοκιμίων.

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μίγμα αδρανών υλικών 50%ΦΑ και 50%ΘΑ το οποίο αναμίχθηκε: α) με 3%κ.β. γαλάκτωμα και β) με 3% γαλάκτωμα και 3%τσιμέντο. Το βέλτιστο συνολικό ποσοστό υγρών για συμπίκνωση των παραπάνω μιγμάτων ήταν 6% κ.β. όπως προσδιορίστηκε με δοκιμές συμπίκνωσης οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6).

Με τα ως άνω μίγματα (με 3%γαλάκτωμα και με συνδυασμό 3%γαλάκτωμα και 3%τσιμέντο) παρασκευάστηκαν δοκίμια Marshall τα οποία μετά την παρασκευή τους

και την εξόλκευσή τους, υπέστησαν την προδιαγεγραμμένη από την εργασία αυτή συντήρηση και δοκιμάστηκαν μετά από 24ώρες παραμονής στο περιβάλλον του εργαστηρίου (θερμοκρασία $23\pm 2^{\circ}\text{C}$).

5.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΑΝΑΜΙΞΗΣ

Στις εργασίες ανακύκλωσης συχνά προστίθεται νερό στην αρχή, για να βοηθήσει το φρεζάρισμα, μετά προστίθενται τα συνδετικά υλικά και το υπόλοιπο νερό για να επιτευχθεί το βέλτιστο ποσοστό υγρών. Σε άλλες περιπτώσεις το τσιμέντο διασκορπίζεται στην επιφάνεια του προς ανακύκλωση οδοστρώματος πριν από την έναρξη του φρεζαρίσματος και της ανακύκλωσης, αλλά με την μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να χαθεί ένα ποσοστό τσιμέντου όταν επικρατούν άνεμοι στην περιοχή. Για τον λόγο αυτό θεωρείται σκόπιμο να προστεθεί νερό πριν να διασκορπιστεί τσιμέντο ή -καλύτερα- το τσιμέντο να διασκορπιστεί μαζί με το νερό υπό μορφή αιωρήματος.

Σε άλλες περιπτώσεις -κυρίως σε χώρες με πολλές βροχοπτώσεις- το προς ανακύκλωση υλικό περιέχει υψηλό σχετικά ποσοστό υγρασίας και αυτό αποτελεί πρόσθετη δυσκολία για την ανακύκλωση ιδίως με ασφαλτικό γαλάκτωμα -αφού το συνολικό ποσοστό υγρών είναι μεγαλύτερο από την βέλτιστη υγρασία για συμπίκνωση- Η δυσκολία αυτή μπορεί ορισμένες φορές να επιλυθεί με την προσθήκη τσιμέντου (ή υδρασβέστου) σε κατάλληλη ποσότητα. Στην περίπτωση αυτή η χρήση του τσιμέντου ή της υδρασβέστου γίνεται για την μείωση της υπάρχουσας υγρασίας. Δεδομένου όμως ότι τα συνδετικά αυτά υλικά μπορεί να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά του μίγματος αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη.

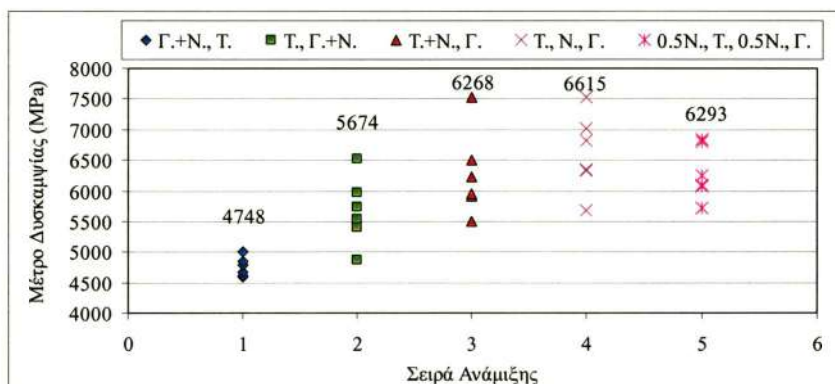
Είναι φανερό ότι οι προς διερεύνηση δυνατότητες συνδυασμών είναι ευρύτατες, αλλά στην εργασία αυτή δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να εξαντληθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για την διερεύνηση της επίδρασης της σειράς ανάμιξης. Επελέγησαν οι 5 συνδυασμοί ανάμιξης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. οι οποίοι πιστεύεται ότι καλύπτουν τις πλειονότητα των δυνατών περιπτώσεων στην πράξη, και με αυτούς τους συνδυασμούς παρασκευάστηκαν δοκίμια Marshall.

Από κάθε μίγμα παρασκευάστηκαν 6δοκίμια τα οποία συντηρήθηκαν για 7ημέρες σε υγρό θάλαμο (θερμοκρασία $18 - 20^{\circ}\text{C}$, σχετική υγρασία $> 95\%$) και μετά τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ξήρανσης (αεριζόμενο κλίβανο) θερμοκρασίας 60°C για δύο ημέρες. Μετά το πέρας των δύο ημερών τα δοκίμια παρέμειναν για 24ώρες στο

περιβάλλον του εργαστηρίου (θερμοκρασία $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) και προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.1: Σειρά ανάμιξης

Μίγμα	Σειρά ανάμιξης
1	Αρχικά Γαλάκτωμα με Νερό μαζί, μετά Τσιμέντο
2	Αρχικά Τσιμέντο, μετά Γαλάκτωμα με Νερό μαζί
3	Αρχικά Τσιμέντο με Νερό μαζί, μετά Γαλάκτωμα
4	Αρχικά Τσιμέντο, μετά Νερό, μετά Γαλάκτωμα
5	Αρχικά 50% Νερό, αναμονή 15 λεπτών, μετά Τσιμέντο, μετά 50% Νερό, μετά Γαλάκτωμα



Σχήμα 5.1: Επίδραση της σειράς ανάμιξης στο μέτρο δυσκαμψίας

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.1 και στον Πίνακα 5.2 και γίνεται έλεγχος αν οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους με την δοκιμή t (Student test) σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Η σειρά ανάμιξης 1 δίνει μικρότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας, που διαφέρουν σημαντικά από όλες τις άλλες τιμές και έχει την μικρότερη μεταβλητότητα. Αυτό αποδίδεται στο ότι η ανάμιξη του γαλακτώματος με το νερό έχει δύο αντίθετα αποτελέσματα: το μίγμα νερό + γαλάκτωμα έχει μικρότερο ιξώδες, αναμιγνύεται ευκολότερα και επομένως παράγει πιο ομοιογενή μίγματα. Εντούτοις, το πάχος της επικάλυψης γύρω από τα

αδρανή είναι λεπτότερο και επομένως η συνδετική του ικανότητα είναι πολύ μικρότερη. Επιπλέον επειδή το γαλάκτωμα αναμίχθηκε πρώτα, περιέβαλλε τα αδρανή με ασφαλτό γεγονός που παρεμποδίζει το τσιμέντο να αναπτύξει πλήρη συνάφεια με τα αδρανή. Αποτέλεσμα των δύο παραπάνω δράσεων είναι η μικρή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας 5.2: Στατιστική σύγκριση του μέτρου δυσκαμψίας των μιγμάτων

(MPa)	t-test				
	Γ+N, T	T, Γ+N	T+N, Γ	T, N, Γ	0.5N, T, 0.5N, Γ
	1	2	3	4	5
1		Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
2	Ναι		Όχι	Ναι	Όχι
3	Ναι	Όχι		Όχι	Όχι
4	Ναι	Ναι	Όχι		Όχι
5	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	
$\bar{x}$ ¹	4748	5674	6268	6615	6293
Sd. ²	160.36	561.21	702.98	64.58	447.31
cv.% ³	3.38	9.89	11.21	9.77	7.11

Η σειρά ανάμιξης 2 (T, Γ+N) δίνει αποτελέσματα που δεν διαφέρουν σημαντικά από τις σειρές 3 και 5, αλλά διαφέρουν από τις 1 και 4, και παρουσιάζουν σχετικά υψηλό συντελεστή μεταβλητότητας. Ομοίως η σειρά 3 δίνει αποτελέσματα που δεν διαφέρουν από εκείνα των σειρών 2, 4, και 5 αλλά έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή μεταβλητότητας.

Η σειρά ανάμιξης 4 δίνει αποτελέσματα με τη μεγαλύτερη μέση τιμή με σχετικά μεγάλο όμως συντελεστή μεταβλητότητας. Η σειρά ανάμιξης 5 δίνει υψηλές τιμές που δεν διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές των σειρών 2, 3 και 4 και παρουσιάζει σχετικά μικρότερο συντελεστή μεταβλητότητας.

Σχετικά με την τελικώς επιλέξιμη σειρά ανάμιξης παρατηρούνται τα ακόλουθα:

¹ $\bar{x}$: average= μέσος όρος

² sd.: standard deviation = τυπική απόκλιση

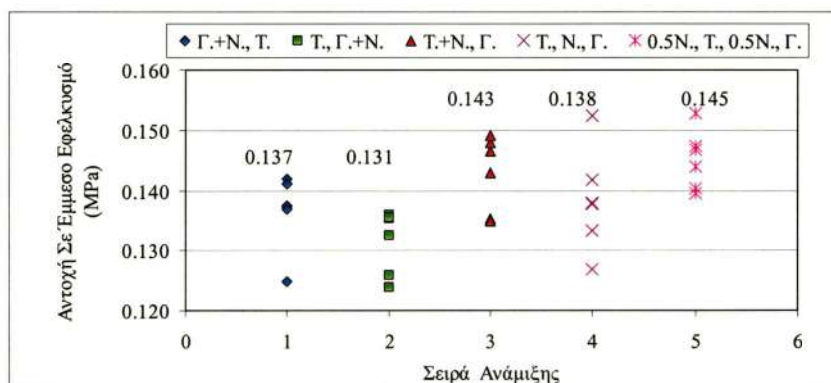
³ cv.: coefficient of variation= συντελεστής μεταβλητότητας

Η σειρά1 δεν είναι επιλέξιμη, καίτοι έχει την μικρότερη μεταβλητότητα, γιατί υπάρχει η επιφύλαξη ότι μπορεί να δίνει μικρότερες τιμές στο μέτρο δυσκαμψίας.

Η σειρά5 έχει την δεύτερη κατά σειρά μεταβλητότητα 7.1% αλλά έχει το μειονέκτημα της χρονοβόρου και πολύπλοκης διαδικασίας και γι' αυτό θεωρείται πρακτικά (για το εργαστήριο) μειονεκτική.

Οι άλλες σειρές δεν διαφέρουν ουσιαστικά πολύ μεταξύ τους και από αυτές επιλέγεται τελικά η 4 επειδή έχει την μικρότερη από τις τρεις μεταβλητότητα και πρακτικά είναι πολύ απλή στην εφαρμογή της.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζονται στο Σχ. 5.2 και συγκρίνονται ως προς την μεταβλητότητά τους και ως προς την στατιστική σημαντικότητα των διαφορών των αποτελεσμάτων τους στον Πίνακα 5.3.



Σχήμα 5.2: Επίδραση της σειράς ανάμιξης στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Είναι φανερό ότι οι τιμές των αντοχών έχουν μικρή μεταβλητότητα και δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους πλην τις σειρές 5 όταν συγκρίνεται με την 1 και 2.

Πίνακας 5.3: Στατιστική σύγκριση της εφελκυστικής αντοχής των μιγμάτων

(MPa)	t-test				
	Γ+N, T	T, Γ+N	T+N, Γ	T, N, Γ	0.5N, T, 0.5N, Γ
	1	2	3	4	5
1		Όχι	Όχι	Όχι	Ναι
2	Όχι		Όχι	Όχι	Ναι
3	Όχι	Όχι		Όχι	Όχι
4	Όχι	Όχι	Όχι		Όχι
5	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	
$\bar{x}$	0.137	0.131	0.143	0.138	0.145
sd.	0.006090	0.005290	0.006281	0.008549	0.004404
cv.%	4.46	4.02	4.40	6.18	3.01

• Συμπέρασμα

Από τα παραπάνω και σύμφωνα με τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, κρίθηκε ότι η σειρά ανάμιξης⁴ (T., N., Γ.) είναι προτιμητέα για να χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή.

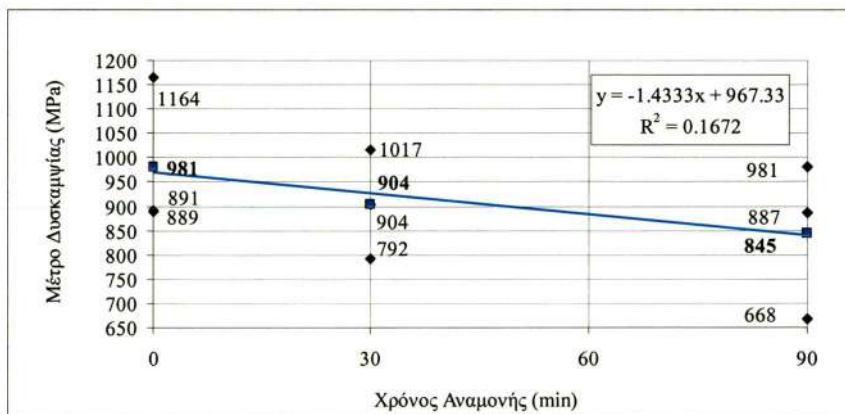
5.3. ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΜΙΞΗ ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Ο χρόνος αναμονής από την έναρξη της ανάμιξης των υλικών μέχρι την έναρξη της συμπίκνωσης θεωρείται σημαντικός παράγων για την ορθή παρασκευή των δοκιμίων αλλά και για τον ορθό καθορισμό της διαδικασίας ανακύκλωσης στην πράξη. Στο θέμα αυτό υπάρχει σχετική ασάφεια στις οδηγίες που δίδονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, όπως π.χ. από τους (Νικολαΐδης, 1996), (Favretti and Longueuil, 1999) και (Asphalt Institue), αναφέρεται ότι η συμπίκνωση των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων αρχίζει μόνο όταν το γαλάκτωμα έχει εν μέρει διασπαστεί. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την αλλαγή χρώματος του μίγματος από καφέ σε μαύρο, πού χρειάζεται 30λεπτά περίπου. Ενώ στα Εγχειρίδια για Ανακύκλωση (Wirtgen, 2000), (Wallace, UD), και (Davidson, 2004), (Mallick, 2003) αναφέρεται ότι η συμπίκνωση πρέπει να ακολουθεί τη διάστρωση χωρίς καθυστέρηση. Αυτό θεωρείται ότι πρακτικά είναι πιο εύκολο και οικονομικά εφαρμόσιμο για τις περιπτώσεις επιτόπου ανακυκλώσεων με τα σύγχρονα μεγάλα μηχανήματα ανακυκλώσεως. Επίσης όταν το γαλάκτωμα

διασπάται, η ασφαλτος χωρίζεται από το αιώρημα και επανέρχεται στην ιξώδη μορφή της. Οι μεμονωμένοι κόκκοι των ανακυκλωμένων υλικών, τότε θα είναι είτε καλυμμένοι πλήρως ή μερικώς με ένα λεπτό υμένα από ψυχρή ιξώδη ασφαλτο, που κάνει τη συμπίκνωση πιο δύσκολη. Έτσι η συμπίκνωση πρέπει να ολοκληρωθεί πριν το γαλάκτωμα να έχει διασπαστεί.

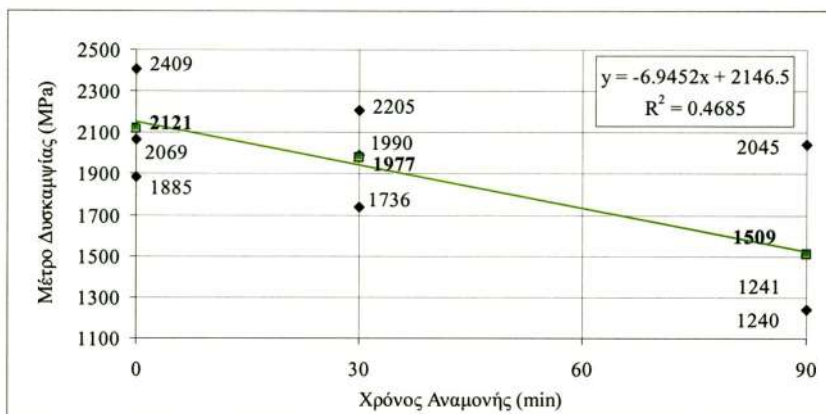
Για να εξετασθεί το θέμα αυτό αποφασίστηκε να παρασκευαστούν δοκίμια από μίγματα που είχαν παραμείνει χωρίς συμπίκνωση επί 0, 30 και 90 min. Οι χρόνοι των 30 και 90 min επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι κοντά (ο πρώτος) και αρκετά μετά (ο δεύτερος) από τον αναμενόμενο χρόνο διάσπασης του γαλακτώματος.

Παρασκευάστηκαν 3ομάδες δοκιμίων από μίγμα με 0% τσιμέντο και 3% γαλάκτωμα τα οποία συντηρήθηκαν επί 3ημέρες μετά την παρασκευή τους σε αεριζόμενο φούρνο στους 40°C και μετά προσαρμογή μίας ημέρας στους 24°C δοκιμάστηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.3.



Σχήμα 5.3: Επίδραση του «χρόνου αναμονής» στο μέτρο δυσκαμψίας (T.=0%, Γ.=3% συντήρηση 3ημερών σε φούρνο 40°C)

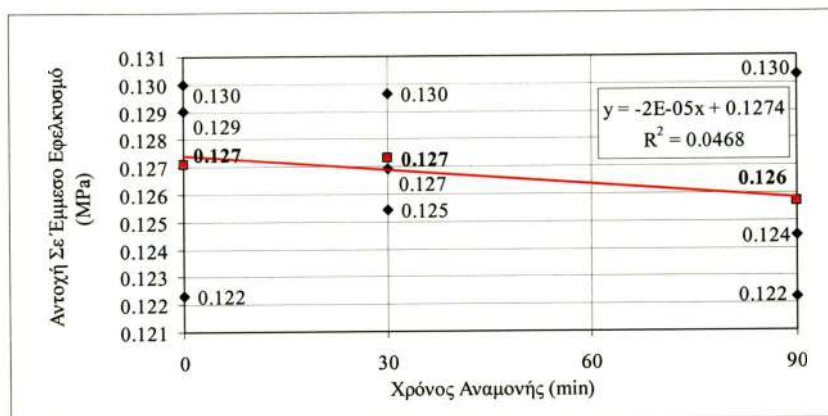
Μετά από παρέλευση τριών ημερών τα δοκίμια τοποθετήθηκαν εκ νέου σε φούρνο στους 60°C επί 3ημέρες -για τους λόγους που αναφέρονται στην επόμενη παράγραφο- και δοκιμάστηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας τους μετά από 24ωρη προσαρμογή στους 24°C. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.4.



Σχήμα 5.4: Επίδραση του «χρόνου αναμονής» στο μέτρο δυσκαμψίας (T.=0%, Γ.=3% συντήρηση 3ημερών σε φούρνο 60°C)

Και τα δύο σχήματα δείχνουν ότι το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται όσο το χρονικό διάστημα από την έναρξη της ανάμιξης έως την έναρξη της συμπίκνωσης είναι μεγαλύτερο. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στους ακόλουθους λόγους:

- α) Μεγαλύτερος χρόνος αναμονής επιφέρει μεγαλύτερη εξάτμιση της υγρασίας του υλικού και επομένως απομάκρυνση από την βέλτιστη τιμή με αποτέλεσμα ελαττωμένη συμπίκνωση του δοκιμίου
- β) Η διάσπαση του γαλακτώματος αυξάνει το ιξώδες του μίγματος και προκαλεί ανάπτυξη συνάφειας μεταξύ των κόκκων με αποτέλεσμα την παρεμβολή δυσκολιών στην μετακίνηση των κόκκων και επομένως επίτευξη μικρότερης πυκνότητας που συνεπάγεται μικρότερο μέτρο δυσκαμψίας.
- γ) Η μη διάσπαση του γαλακτώματος δεν φαίνεται να έχει αρνητικές συνέπειες διότι με τους δίσκους με εγκοπές και το απορροφητικό χαρτί που χρησιμοποιήθηκε δεν παρατηρήθηκε καμία δυσκολία στην εκροή νερού από το μίγμα.



Σχήμα 5.5: Επίδραση του «χρόνου αναμονής» στην αντοχή σε έμμεσο εμφελευσμό (T.=0%, Γ.=3%).

Στο Σχ. 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής προσδιορισμού της αντοχής σε έμμεσο εμφελευσμό των δοκιμίων της έρευνας αυτής. Παρατηρείται μία μικρή και στατιστικώς όχι σημαντική μείωση της αντοχής με την αύξηση του χρόνου αναμονής.

Συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι τα δοκίμια μπορούν να συμπυκνωθούν αμέσως μετά την ανάμιξη των υλικών χωρίς περίοδο αναμονής.

5.4. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη μελέτη της συντήρησης των δοκιμίων από φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα και θραυστά αμμοχάλικα ανακυκλωμένα με ασφαλτικό γαλάκτωμα ή και τσιμέντο, έγινε ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στις ακόλουθες χώρες.

• Νορβηγία:

Τα δοκίμια συντηρούνται μέσα στο αεριζόμενο φούρνο για 7ημέρες στους 40°C. Στην περίπτωση μην επάρκειας χρόνου, η συντήρηση των δοκιμών μπορεί να είναι για 3ημέρες στους 60°C (Norwegian Public Roads Administration).

• Ισπανία

Τα δοκίμια συντηρούνται στο φούρνο στους 60°C για 72 ώρες.

Η αντοχή των δοκιμίων που έχουν συντηρηθεί στους 60°C για 3ημέρες είναι πιο μεγάλη από την αντοχή των δοκιμίων που έχουν συντηρηθεί για μικρό διάστημα, και ελαφρώς μικρότερη από την αντοχή των δοκιμίων που έχουν συντηρηθεί για μεγάλο διάστημα μέσα στο περιβάλλον του εργαστηρίου (Miro, 2000).

• **Νότιος Αφρική**

- Τα δοκίμια παραμένουν μέσα στις μήτρες τους στο περιβάλλον του εργαστηρίου για 24ώρες πριν την εξολκευσή τους, και μετά συντηρούνται μέσα σε αεριζόμενο φούρνο για 72ώρες στους 60°C.

- Αν η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό είναι < 8% τα δοκίμια παραμένουν μέσα στις μήτρες τους στο περιβάλλον του εργαστηρίου για 24ώρες, και μετά συντηρούνται μέσα στο αεριζόμενο φούρνο στους 40°C.

- Αν η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό είναι > 8% τα δοκίμια συντηρούνται για 45ώρες στους 60°C.

- Σημειώνεται ότι το όριο της περιεκτικότητας σε νερό 8% είναι απλώς μία ενδεικτική καθοδηγητική τιμή και πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή.

- Εναλλακτικά, τα δοκίμια μπορεί να συντηρούνται για 7ημέρες στο περιβάλλον του εργαστηρίου (όταν περιέχουν τσιμέντο), ή για 28ημέρες στο περιβάλλον του εργαστηρίου (όταν δεν περιέχουν τσιμέντο). Ο σκοπός της συντήρησης αυτής είναι για να πραγματοποιηθεί διάσπαση στο ασφαλτικό γαλάκτωμα. (Lewis, 1999).

• **Γερμανία:**

- Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους, συντηρούνται σε υγρό θάλαμο για 7ημέρες, και μετά για 21ημέρες σε ξηρό χώρο.

- Για δοκιμές κόπωσης, ο χρόνος της συντήρησης των δοκιμίων επιλέγεται πιο μεγάλος από τις άλλες δοκιμές για να μειωθεί η επίδραση της αύξησης της αντοχής με τον χρόνο (Rossberg, 2000).

- Επιτρέπεται στα δοκίμια να συντηρηθούν για 24ώρες μέσα στις μήτρες τους στη θερμοκρασία του εργαστηρίου πριν την εξολκευσή τους.

- Τα δοκίμια τοποθετούνται στο δίσκο και συντηρούνται στο αεριζόμενο φούρνο για περισσότερο από 72ώρες στους 40°C, (Wirtgen, 1998).

• **Αυστραλία**

Συντήρηση για 3ημέρες στο αεριζόμενο φούρνο στους 60°C (Αυστραλία).

• **Σουηδία**

-Για να μετρηθεί το μέτρο δυσκαμψίας (NAT) και η ανηγμένη παραμόρφωση τα δοκίμια συντηρούνται για 3ημέρες στους 60°C, τα ίδια αποτελέσματα έχουν βρεθεί σε δοκίμια τα οποία έχουν συντηρηθεί για 7ημέρες (Gunnar, Hillgren).

• **ΗΠΑ**

Για να μετρηθεί η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, τα δοκίμια συντηρούνται στους 60°C για 48ώρες, και μετά ελέγχονται κάθε 2ώρες έως ότου η διαφορά βάρους τους δεν είναι μεγαλύτερη από 0.05% κ.β οπότε η δοκιμή μπορεί να γίνει.

(WWW.Kochpavementsolutions.com/Ssolutions/reflex.htm).

1. Καλιφόρνια:

Μετράται η ευστάθεια με την ειδική συσκευή (stabilometer). Για τον σκοπό αυτό τα αδρανή ξηραίνονται μέχρι σταθερού βάρους, μετά εξάγονται από τον φούρνο και παραμένουν στη θερμοκρασία του εργαστηρίου για 2h±30min. Ύστερα η μήτρα και η βάση της τοποθετούνται μέσα στο φούρνο στους 60°C για 30min πριν χρησιμοποιηθούν και εισάγεται ένας δίσκος από μοριοσανίδα (cardboard) μέσα στη μήτρα πάνω από τη βάση στήριξης της μήτρας.

Μετά την παρασκευή του δοκιμίου, το δοκίμιο τοποθετείται μέσα στο πρότυπο δίσκο συντήρησης και συντηρείται στους 60°C για 16 ± 1hr (California. 2000).

2. Utah:

Στην τροποποιημένη μελέτη σύνθεσης της μεθόδου Marshall, τα αδρανή θερμαίνονται στη θερμοκρασία ανάμιξης για 1hr μέσα στο φούρνο, και μετά το ασφαλτικό γαλάκτωμα θερμαίνεται στους 60°C. Η μήτρα θερμαίνεται στους 60°C για 1hr, και το δοκίμιο συμπυκνώνεται στην μηχανή Marshall με 50χτυπήματα σε κάθε βάση. Τα δοκίμια συντηρούνται μέσα στα καλούπια τους για 6ώρες στους 60°C. Ύστερα τα καλούπια εξάγονται από τον φούρνο και αφήνονται να κρυσώσουν στη θερμοκρασία του εργαστηρίου μέχρι την επόμενη μέρα πριν να έχουν εξολκευθούν από τα καλούπια τους, (N.N., 2003).

3. Texas:

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας της ασφάλτου για την μελέτη σύνθεσης ψυχρών ασφαλτομιγμάτων για δρόμους ελαφράς κυκλοφορίας, πρέπει να γίνει στέγνωμα των αδρανών μέχρι την αναμενόμενη κατά τη κατασκευή υγρασία. Πριν την συμύκνωση, το μίγμα θερμαίνεται στο φούρνο στους $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ για 12ώρες. Τα δοκίμια μετά την παρασκευή και πριν την εξόλκευσή τους, αφήνονται για να κρυσώσουν στη θερμοκρασία του εργαστηρίου.

Η εξόλκευση των δοκιμίων πρέπει να γίνει με προσοχή για να μην υποστούν φθορές. Ακολουθεί η δοκιμή Marshall αφού προηγουμένως τα δοκίμια τοποθετηθούν σε φούρνο θερμοκρασίας 38°C , (WWW.tpub.com/inteng/17h.htm).

4. IOWA:

Παρασκευάζονται δοκίμια Marshall στην ομώνυμη μηχανή συμύκνωσης. Τα αδρανή ξηραίνονται μέσα σε φούρνο σε θερμοκρασία $<135^{\circ}\text{C}$ μέχρι σταθερού βάρους, για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε νερό για την μέγιστη πυκνότητας (βέλτιστη υγρασία).

Τα καλούπια πρέπει να είναι σε θερμοκρασία του εργαστηρίου, και δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί δίσκος από χαρτί αλλά πλαστικός δίσκος ή δίσκος από επικερωμένο χαρτί ή να καλύπτεται το καλούπι και η βάση του με λεπτή στρώση από ελαφρό λάδι, (Jahren et al, 1998).

• Καναδάς

Για τον προσδιορισμό την ευστάθειας και της ευαισθησίας στην δράση του νερού, δοκίμια Marshall συντηρήθηκαν σε θερμοκρασία του εργαστηρίου σε τρεις ηλικίες 1ημέρα, 7ημέρες, 28ημέρες. Αποδείχθηκε ότι τα δοκίμια που περιέχουν τσιμέντο με ασφαλτικό γαλάκτωμα παρουσίασαν μεγάλη τιμή ευστάθειας από την πρώτη μέρα ενώ η αύξηση στις 7 και 28ημέρες ήταν μικρή. Τα δοκίμια όμως που περιείχαν μόνο ασφαλτικό γαλάκτωμα δεν έδειξαν σημαντική τιμή ευστάθειας την πρώτη μέρα αλλά η τιμή αυτή αυξήθηκε γρήγορα μετά από 7ημέρες και 28ημέρες (Paley, 1998).

Από την ανασκόπηση που παρουσιάστηκε, φαίνεται ότι υπάρχει μεγάλη ασυμφωνία στην μεθοδολογία συντήρησης δοκιμίων ακόμη και μέσα σε ίδια χώρα (Γερμανία, ΗΠΑ). Παρόλα αυτά μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε περισσότερες χώρες

(Νορβηγία, Ισπανία, Νότιος Αφρική, Αυστραλία, Σουηδία) η συντήρηση των δοκιμίων γίνεται σε αεριζόμενο φούρνο για 3ημέρες στους 60°C.

Σε μερικές χώρες (Νότιος Αφρική, Γερμανία, ΗΠΑ) τα δοκίμια αφήνονται μέσα στα καλούπια τους στη θερμοκρασία του εργαστηρίου για 24ώρες, και σε άλλες χώρες (Ισπανία, Νότιος Αφρική, Γερμανία, Καναδά) τα δοκίμια συντηρούνται στο περιβάλλον του εργαστηρίου.

Στην Γερμανία έγινε μία προσπάθεια να δοθεί ευκαιρία ενυδάτωσης στο τσιμέντο μέσα στο υγρό περιβάλλον (Rossberg, 2000).

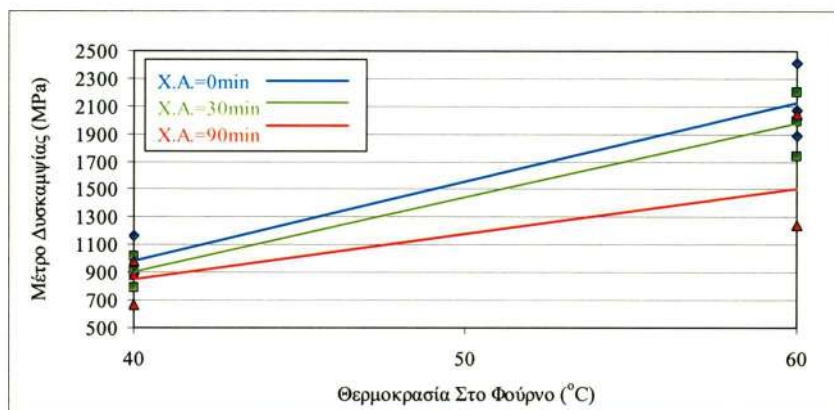
Στην ΗΠΑ τα αδρανή, τα καλούπια, και το γαλάκτωμα έχουν θερμαίνονται σε φούρνο πριν την συμπίκνωση των δοκιμίων.

Λόγω αυτής της διεθνώς παρατηρούμενης ασυμφωνίας, κρίθηκε απαραίτητο στην εργασία αυτή να εξετασθούν λεπτομερώς οι ακόλουθοι παράγοντες:

1. η θερμοκρασία της συντήρησης μέσα στο φούρνο. Εξετάστηκαν δύο θερμοκρασίες 40°C και 60°C.
2. η παραμονή των δοκιμίων μέσα στο φούρνο. Εξετάστηκε η επίδραση παραμονής 2, 3 και 4 ημερών.
3. η παραμονή των δοκιμίων μέσα σε υγρό θάλαμο. Εξετάστηκε η επίδραση παραμονής 2, 4 και 7 ημερών.
4. η παραμονή των δοκιμίων μέσα στο φούρνο μέχρι σταθερού βάρους.
5. η παραμονή των δοκιμίων στο περιβάλλον του εργαστηρίου 1, 7, 23, 30, 248 ημέρες μετά από την συντήρησή τους (μέσα στο υγρό θάλαμο και μέσα στο φούρνο).
6. η θέση του δοκιμίου μέσα στο φούρνο (επάνω, μέση, κάτω).

Τα δοκίμια χωρίς τσιμέντο αποφασίστηκε να συντηρηθούν για 3ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο στους 60°C σύμφωνα με την πρακτική άλλων χωρών. Αυτή η απόφαση ενισχύεται με τα αποτελέσματα των δοκιμίων που έχουν παρουσιαστεί στην προηγούμενη παράγραφο -για τον έλεγχο της επίδρασης του χρόνου αναμονής πριν την συμπίκνωση Σχ. 5.3, 5.4.- τα οποία συντηρήθηκαν στο φούρνο δύο φορές αρχικά στους 40°C και στη συνέχεια στους 60°C. Τα αποτελέσματα αυτά παρέχουν την δυνατότητα εκτίμησης της επίδρασης της θερμοκρασίας συντήρησης στο μέτρο δυσκαμψίας.

Όπως φαίνεται στο Σχ5.6 η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας είναι αυξημένη στους 60°C γεγονός που αποδίδεται στην αυξημένη εξάτμιση του νερού του μίγματος.



Σχήμα 5.6: Επίδραση της θερμοκρασίας συντήρησης μέσα στο φούρνο στο μέτρο δυσκαμψίας (X.A.: χρόνος αναμονής πριν την συμπίκνωση).

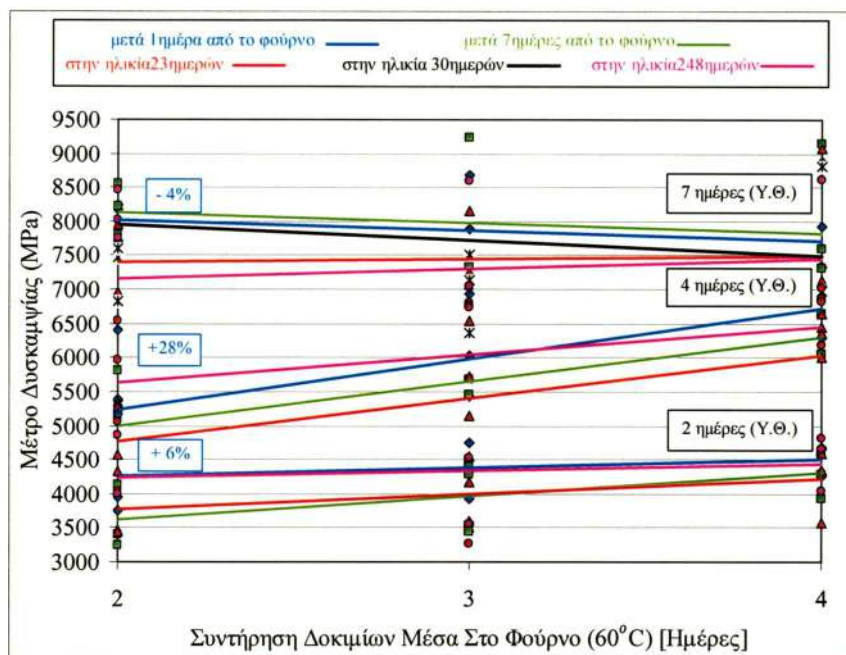
Στα δοκίμια που περιέχουν τσιμέντο και γαλάκτωμα θα πρέπει να παρασχεθεί η δυνατότητα στο τσιμέντο να αναπτύξει σε κάποιο βαθμό την ενυδάτωσή του πριν τα δοκίμια συντηρηθούν στο φούρνο στον οποίο η ενυδάτωση διακόπτεται λόγω εξάτμισης. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να διερευνηθεί περαιτέρω ο χρόνος παραμονής στον υγρό θάλαμο συντήρησης (υγρός θάλαμος, 22±2 °C, RH>95%) και ο χρόνος παραμονής στον αεριζόμενο φούρνο σε διάφορους συνδυασμούς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Συνδυασμοί συντήρησης (ημέρες)

Υγρός Θάλαμος	2			4			7		
Αεριζόμενος Φούρνος (60°C)	2	3	4	2	3	4	2	3	4

Η διερεύνηση αυτή έγινε σε μίγμα 50%ΦΑ/ 50%ΘΑ με 3% τσιμέντο και 3% γαλάκτωμα. Από κάθε συνδυασμό παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια. Τα δοκίμια μετά το πέρας της καθορισμένης συντήρησης παρέμειναν 1 ημέρα σε χώρο σταθερής

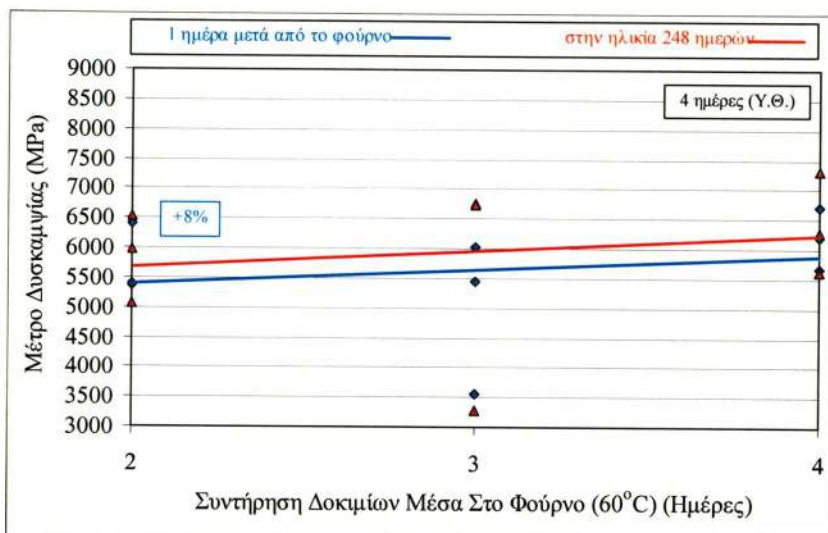
θερμοκρασίας 24°C για να προσαρμοστούν και μετά υποβάλλονται σε μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.7 με μπλε γραμμές.



Σχήμα 5.7: Επίδραση του χρόνου συντήρησης σε υγρό θάλαμο και του χρόνου ξήρανσης σε φούρνο 60°C και στις διάφορες ηλικίες, στο μέτρο δυσκαμψίας.

Από το σχήμα αυτό συμπεραίνεται ότι:

- Η συντήρηση σε υγρό θάλαμο για 7ημέρες δίνει τις μεγαλύτερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας από τη συντήρηση των 4 ή 2ημερών.
- Η ξήρανση των δοκιμών στους 60°C για περισσότερες από δύο ημέρες (3, 4ημέρες) δεν έχει σημαντική επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας (-4%, +6%) (τα αποτελέσματα είναι μέσα στο εύρος της αποδεκτής επαναληψιμότητας του +10%, -20% (BSI. DD 213-1993)). Στην περίπτωση της συντήρησης 4ημέρες Υ.Θ. και 4ημέρες φούρνου, η αύξηση +28% είναι πολύ μεγάλη και δεν θεωρείται αξιόπιστη. Για τον λόγο αυτό παρασκευάστηκαν επαναληπτικά 3δοκίμια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.8.



Σχήμα 5.8: Επίδραση του χρόνου συντήρησης σε υγρό θάλαμο και του χρόνου ξήρανσης σε φούρνο 60°C στο μέτρο δυσκαμψίας στην ηλικία 1 ημέρα και στην ηλικία 248 ημερών.

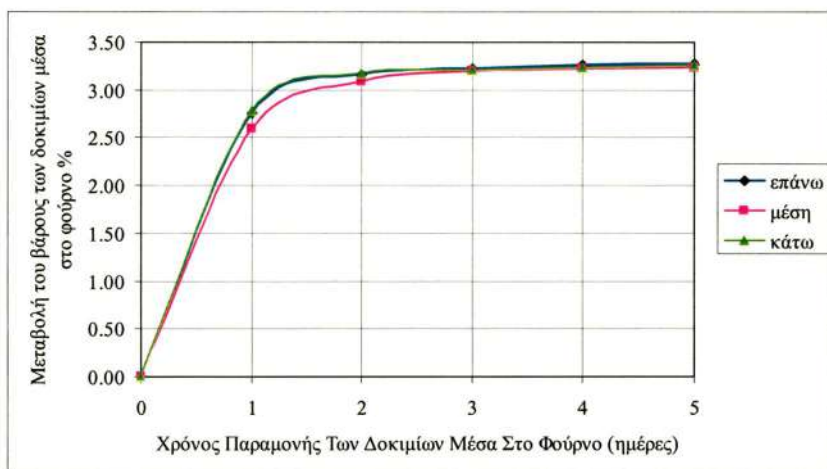
Το Σχ. 5.8 δείχνει ότι η αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια της συντήρησης των δοκιμίων στο φούρνο έως 4 ημέρες είναι +8%. Αυτή η αύξηση δεν διαφέρει ουσιαστικά από τις αυξήσεις που παρουσιάζονται στο Σχ. 5.7 γεγονός που υποδεικνύει ότι η ξήρανση των δοκιμίων στους 60°C για περισσότερες από δύο ημέρες δεν έχει σημαντική επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας.

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται με πρόσθετα νέα δοκίμια, τα οποία τοποθετήθηκαν στο φούρνο και ζυγίζονταν κάθε ημέρα για 5 ημέρες μέχρις ότου αποκτήσουν σταθερό βάρος βλ. Σχ. 5.9 και Πίνακα 5.5.

Πίνακα 5.5: Ποσοστιαία μείωση του βάρους των δοκιμίων σε σχέση με το βάρος της προηγούμενης ημέρας

Ημέρα	1	2	3	4	5
%	2.66	0.43	0.07	0.03	0.02

Γίνεται φανερό ότι η μείωση στο βάρος των δοκιμίων την τρίτη μέρα είναι μόλις 0.07% και μπορούμε να πούμε ότι δεδομένου ότι η απώλεια νερού είναι τόσο μικρή δεν προκαλείται ιδιαίτερη μεταβολή στα δοκίμια και επομένως η συντήρηση των δοκιμίων στους 60°C για 2ημέρες είναι αρκετή.



Σχήμα 5.9: ποσοστιαία μεταβολή του βάρους των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της συντήρησής μέσα στο φούρνο

Οι μετρήσεις αυτές έδωσαν επίσης την δυνατότητα εκτίμησης της επίδρασης της θέσεως των δοκιμίων μέσα στον φούρνο στην απώλεια βάρους, στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε τρία διαφορετικά ράφια μέσα στον φούρνο που καταλάμβαναν τρία διαφορετικά καθ' ύψος επίπεδα μέσα στον φούρνο (πάνω, μεσαίο και κάτω). Είναι φανερό ότι ο ρυθμός εξάτμισης των δοκιμίων εξαρτάται από την θερμοκρασία που επικρατεί σε κάθε ράφι και από το ρεύμα αέρα που αναπτύσσεται. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7 και στο Σχ. 5.9

Οι μετρήσεις του μέτρου δυσκαμψίας επαναλήφθηκαν με τα ίδια δοκίμια (αφού η δοκιμή δεν είναι καταστροφική) για κάθε περίπτωση συντήρησης μετά 7 ημέρες από την ημέρα εξαγωγής των δοκιμίων από τον φούρνο. Κατά το διάστημα αυτό τα δοκίμια παρέμειναν στο περιβάλλον του εργαστηρίου (20±2 °C, Σχ. Υγρασία 60%).

Πίνακας 5.6: επίδραση των τριών επιπέδων του φούρνου στο μέτρο δυσκαμψίας

t-test	Επάνω	Μεσαίο	Κάτω
Επάνω	Όχι	όχι	όχι
Μεσαίο	Όχι	όχι	όχι
Κάτω	Όχι	όχι	όχι
$\bar{x}$ MPa	6186	5609	5634
sd.MPa	619.07	182.04	550.35
cv.%	10.01	3.25	9.77

Πίνακας 5.7: επίδραση των τριών επιπέδων στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (MPa)

t-test	Επάνω	Μεσαίο	Κάτω
Επάνω	όχι	όχι	όχι
Μεσαίο	όχι	όχι	όχι
Κάτω	όχι	όχι	όχι
$\bar{x}$ MPa	0.134	0.133	0.131
sd. MPa	0.002025	0.002164	0.002874
cv.%	1.51	1.63	2.19

Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν επίσης όταν τα δοκίμια είχαν ηλικία :

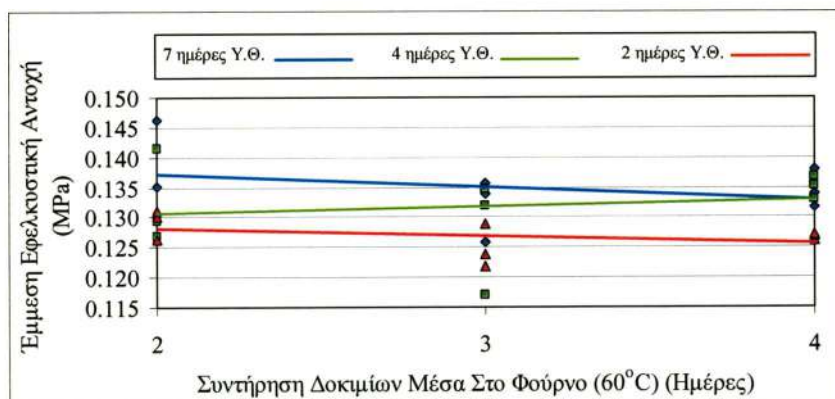
- 23 ημερών
- 30 ημερών
- 248 ημερών

Σημειώνεται ότι τα δοκίμια παρέμεναν στο περιβάλλον του εργαστηρίου όλο το υπόλοιπο διάστημα (μετά την εξαγωγή τους από τον φούρνο). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 5.7 και Σχ. 5.8 επιβεβαιώνουν τα αρχικά συμπεράσματα σχετικά με την συντήρηση στο υγρό θάλαμο και την ξήρανση στο φούρνο και επιπλέον υποδεικνύουν ότι ο χρόνος παραμονής των δοκιμίων στο περιβάλλον του εργαστηρίου – εφ'όσον αυτά έχουν υποστεί την προαναφερθείσα συντήρηση

(θάλαμος και φούρνος) - δεν έχει σημαντική επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας (τα αποτελέσματα είναι μέσα στο εύρος της αποδεκτής επαναληψιμότητας της δοκιμής (BSI DD 213-1993).

Τα δοκίμια που παρέμειναν μετά από την μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας από τις άλλες σειρές δοκιμών της ερευνητικής εργασίας (πχ. δοκιμή συμπίκνωσης, χρόνος αναμονής από το πέρας της ανάμιξης έως την έναρξη της συμπίκνωσης, σειρά ανάμιξης των συνδετικών υλικών, έλεγχος της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του φούρνου, επίδραση της μέγιστης διάστασης κόκκου, κ.α) χρησιμοποιήθηκαν μετά από μακροχρόνια παραμονή στο περιβάλλον του εργαστηρίου για τη μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό. Τα αποτελέσματα δίνονται υπό μορφή Πινάκων στο Παράρτημα Α. Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή την ανάλυση των πρόσθετων αυτών στοιχείων επιβεβαιώνει το προηγούμενο συμπέρασμα ότι η μακρόχρονη παραμονή των δοκιμών στο εργαστήριο δεν επιφέρει σημαντική επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.

Τα δοκίμια του Σχ. 5.7 τελικά υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης στους 24°C και οι τιμές της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζονται στο Σχ. 5.10.



Σχήμα 5.10: Επίδραση του χρόνου ξήρανσης στο φούρνο και του χρόνου συντήρησης στο υγρό θάλαμο στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Δοκίμια ηλικίας 248 ημερών.

Από το Σχ. 5.10 φαίνεται ότι ο χρόνος παραμονής στον υγρό θάλαμο επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό ενώ αντίθετα η επίδραση του χρόνου

ξήρανσης σε φούρνο 60°C δεν είναι σημαντική ούτε με κριτήρια επαναληψιμότητας (DD 213) ούτε στατιστικά (t-test), και μάλιστα υπάρχει ένδειξη ότι αυξημένη διάρκεια ξήρανσης μπορεί να μειώσει την αντοχή σε εφελκυσμό.

Τόσο από τις μετρήσεις του μέτρου δυσκαμψίας όσο και από τις μετρήσεις της αντοχής σε εφελκυσμό προκύπτει ότι η ξήρανση για 2ημέρες στους 60°C μετά από παραμονή 7ημερών σε υγρό θάλαμο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στα μεγέθη αυτά.

5.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 1 Προανάμιξη του γαλακτώματος με το νερό ελαττώνει το μέτρο δυσκαμψίας των ανακυκλωμένων μιγμάτων που περιέχουν τσιμέντο.
- 2 Για τις δοκιμές στο εργαστήριο φαίνεται ότι η σειρά ανάμιξης αδρανή - τσιμέντο - νερό - γαλάκτωμα είναι προτιμητέα.
- 3 Η σειρά ανάμιξης επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας αλλά όχι την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.
- 4 Η συμπίκνωση των μιγμάτων μπορεί να γίνεται αμέσως μετά το πέρας της ανάμιξης για να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας. Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τον χρόνο αναμονής του μίγματος μέχρι την έναρξη της συμπίκνωσης.
- 5 Η ξήρανση των δοκιμίων -που περιέχουν τσιμέντο - για 2ημέρες στους 60°C μετά από παραμονή 7ημερών σε υγρό θάλαμο, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στο μέτρο δυσκαμψίας, και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη.
- 6 Η συντήρηση των δοκιμίων -που περιέχουν τσιμέντο- σε υγρό θάλαμο αυξάνει σημαντικά την τιμή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη.
- 7 Η συντήρηση των δοκιμίων μετά την παρασκευή τους μπορεί να είναι:
 - Για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο: 3ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C.
 - Για τα μίγματα με τσιμέντο: 7ημέρες σε υγρό θάλαμο (RH > 95%) και 2ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο 60°C.
- 8 Η ηλικία των δοκιμίων φαίνεται ότι δεν έχει επίδραση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ούτε στην εφελκυστική αντοχή τους.
- 9 Η θέση του δοκιμίου μέσα στο φούρνο δεν έχει καμία επίδραση στη συντήρηση των δοκιμίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -6-

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΘΡΑΥΣΤΟΥ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διερεύνηση των χαρακτηριστικών μιγμάτων φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και θραυστού ασβεστολιθικού υλικού, με γαλάκτωμα ή με γαλάκτωμα και τσιμέντο. Διερευνάται η επίδραση του ποσοστού του ασφαλτικού γαλακτώματος και του τσιμέντου στο μέτρο δυσκαμψίας, την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Επίσης εξετάζεται η ευαισθησία των μιγμάτων στην δράση του νερού (υδρεμποτισμός), η επίδραση της θερμοκρασίας, και του μέγιστου κόκκου αδρανούς (12.5mm και 19mm).

Εξετάζονται τρία μίγματα με διαφορετικές αναλογίες κ.β. Φρεζαρισμένου Ασφαλτομίγματος (ΦΑ) και Θραυστού Αμμοχαλικού (ΘΑ), 100%ΦΑ, 50%ΦΑ + 50%ΘΑ, και 100%ΘΑ.

Με τα παραπάνω μίγματα υλικών παρασκευάστηκαν δοκίμια Marshall με τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρά (που προσδιορίστηκε με τη δοκιμή Proctor στο κεφάλαιο αυτό), τα οποία συντηρήθηκαν με προκαθορισμένη μέθοδο και εξετάστηκαν στη συσκευή NAT για τη μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας, και στη συσκευή Marshall για τον προσδιορισμό της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό χωρίς υδρεμποτισμό ή μετά υδρεμποτισμό για 48ώρες (αντί του υδρεμποτισμού με υποπίεση).

Η μέθοδος ανάμιξης, παρασκευής και συντήρησης των δοκιμίων ήταν αποτέλεσμα ιδιαίτερης διερεύνησης που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο 5.

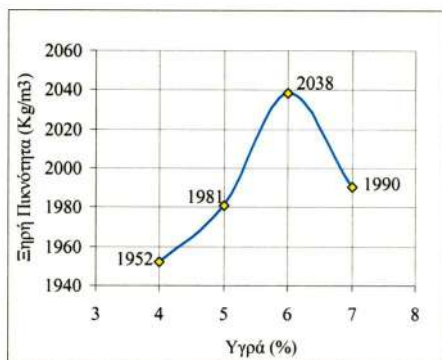
Σημειώνεται ότι τα ανακυκλωμένα με γαλάκτωμα και τσιμέντο υλικά αντιμετωπίζονται στην εργασία αυτή ως σταθεροποιημένα υλικά και όχι ως ψυχρά ασφαλτομίγματα. Για τον λόγο αυτό η συντήρηση/ ωρίμανση των δοκιμίων δεν διέπεται από την ανάγκη απομάκρυνσης του περιεχόμενου νερού μόνο, όπως γίνεται στις περιπτώσεις ασφαλτομιγμάτων

με γαλάκτωμα, αλλά από την προσπάθεια να γίνει η μεγαλύτερη πρακτικά δυνατή εκμετάλλευση της ύπαρξης του τσιμέντου μέσα στο μίγμα πριν την απομάκρυνση του νερού. Για τον λόγο αυτό η συντήρηση των δοκιμών γίνεται τις πρώτες 7 ημέρες σε υγρό θάλαμο σκυροδέματος για να δοθεί η δυνατότητα στο περιεχόμενο τσιμέντο να αναπτύξει ένα σημαντικό βαθμό ενυδάτωσης και επομένως να δημιουργήσει δεσμούς με τους κόκκους των υλικών ΦΑ και ΘΑ. Άλλωστε και στην πράξη η συμπακνωμένη στρώση περιέχει υγρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα και έτσι παρέχεται η δυνατότητα ενυδάτωσης μέχρι ένα βαθμό στο τσιμέντο.

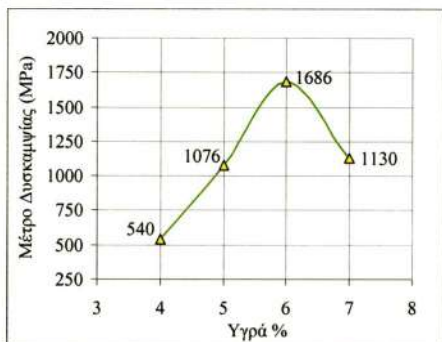
6.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΎΓΡΩΝ

Η βέλτιστη υγρασία προσδιορίστηκε με την εκτέλεση δοκιμών συμπίκνωσης σε μίγμα 50%ΦΑ, 50%ΘΑ, χρησιμοποιώντας την μηχανή συμπίκνωσης Marshall με 50 χτυπήματα. Παρασκευάστηκαν δοκίμια με ασφαλτικό γαλάκτωμα 4% και τσιμέντο 0% και 4 διαφορετικά ποσοστά υγρασίας: 0%, 1%, 2% και 3% κ.β. Για κάθε ποσοστό υγρασίας παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια. Στο Σχ. 6.1 δίνεται η ξηρή πυκνότητα των δοκιμών ως συνάρτηση του συνολικού ποσοστού των περιεχόμενων υγρών. Τόσο το μέτρο δυσκαμψίας όσο και η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δίνονται ως συνάρτηση του ποσοστού της περιεκτικότητας σε υγρά (συνολικά).

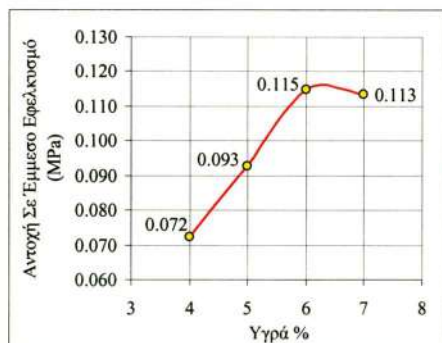
Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους παρέμειναν για τρεις ημέρες σε θερμοκρασία 60°C. Στη συνέχεια εκτελέστηκαν δοκιμές μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας και τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 6.2, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών διάρρηξης για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής δίνονται στο Σχ. 6.3.



Σχήμα 6.1: Καμπύλη συμπίκνωσης υλικού 50%ΦΑ, 50%ΘΑ, Γ= 4%, Τ= 0%

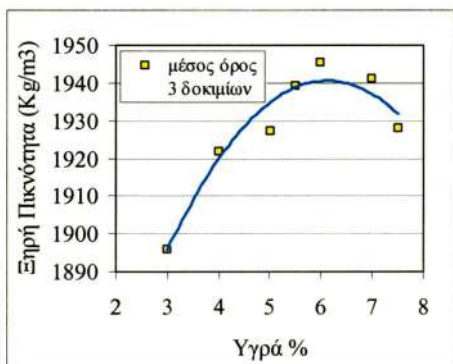


Σχήμα 6.2: Μεταβολή του μέτρου Δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε συνολικά υγρά

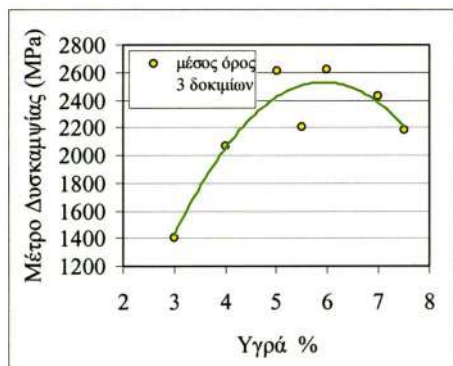


Σχήμα 6.3: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε συνολικά υγρά

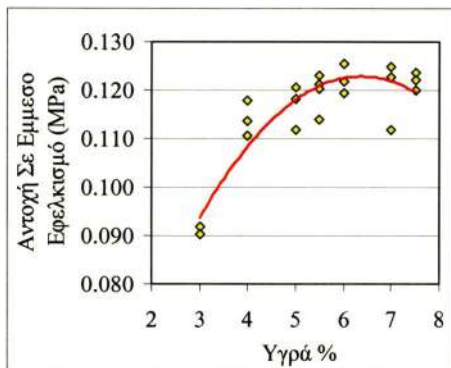
Από τα παραπάνω σχήματα διακρίνεται ότι για το υλικό (50%ΦΑ / 50%ΘΑ) το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας είναι το 6%κ.β. Ανάλογες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και για τα δοκίμια του μίγματος 100%ΦΑ τα οποία παρασκευάστηκαν με ασφαλτικό γαλάκτωμα 3% και τιμέντο 2%. Τα ποσοστά υγρασίας ήταν 0%, 1%, 2%, 2.5%, 3%, 4%, 4.5%κ.β. Για κάθε ποσοστό υγρασίας παρασκευάστηκαν 3δοκίμια. Τα δοκίμια αυτή τη φορά παρέμειναν για 7ημέρες στο θάλαμο συντήρησης και για 2ημέρες σε θερμοκρασία 60οC. Τα αποτελέσματα μέτρησης της ξηρής πυκνότητας των δοκιμίων, του μέτρου δυσκαμψίας και αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) δίνονται στα σχήματα 6.4, 6.5 και 6.6, αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι το βέλτιστο ποσοστό είναι και στην περίπτωση αυτή 6%.



Σχήμα6.4: Μεταβολή της ξηρής πυκνότητας με την περιεκτικότητα σε συνολικά υγρά



Σχήμα6.5: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε συνολικά υγρά



Σχήμα 6.6: Μεταβολή της έμμεσης Εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε συνολικά υγρά

6.3. ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΥ ΤΛΙΚΟΥ - ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της ποσότητας του συνδετικού υλικού παρασκευάστηκαν δοκίμια και με τα τρία υλικά (50%ΦΑ/50%ΘΑ, 100%ΦΑ και 100%ΘΑ) με διαφορετικά ποσοστά τσιμέντου και ασφαλτικού γαλακτώματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, τρία δοκίμια από κάθε ποσοστό.

Πίνακας 6.1: Συνδετικά υλικά %κ.β.

T%	0	0	0	2	2	2	3	3	3	4	4	4
Γ%	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4

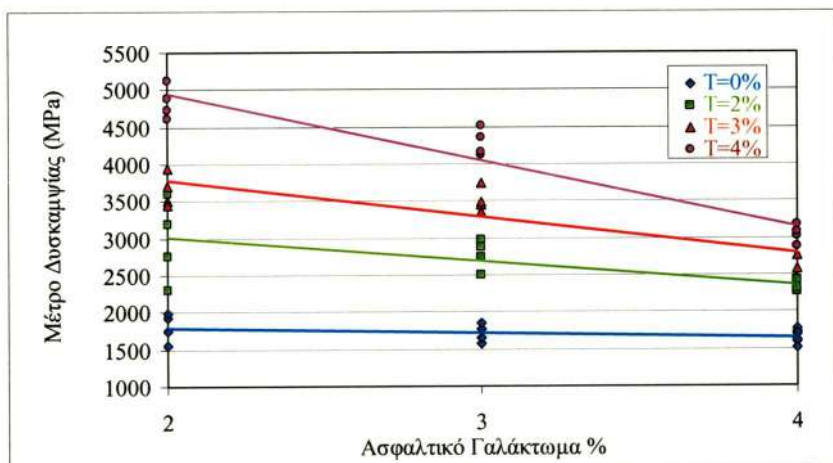
Τα δοκίμια αυτά παρέμειναν στο θάλαμο συντήρησης για 7ημέρες, στη συνέχεια 2ημέρες στους 60°C, και μετά μία ημέρα στη θερμοκρασία της δοκιμής τους για το μέτρο δυσκαμψίας 25°C. Τα αποτελέσματα δίνονται στα σχήματα 6.7, 6.8, και 6.9, για τα τρία μίγματα, αντίστοιχα.

Στα σχήματα αυτά φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου οδηγεί γενικά σε αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας, ενώ η αύξηση του ποσοστού ασφαλτικού γαλακτώματος πάνω από 2%κ.β. έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Επισημαίνεται ότι τα σχόλια που

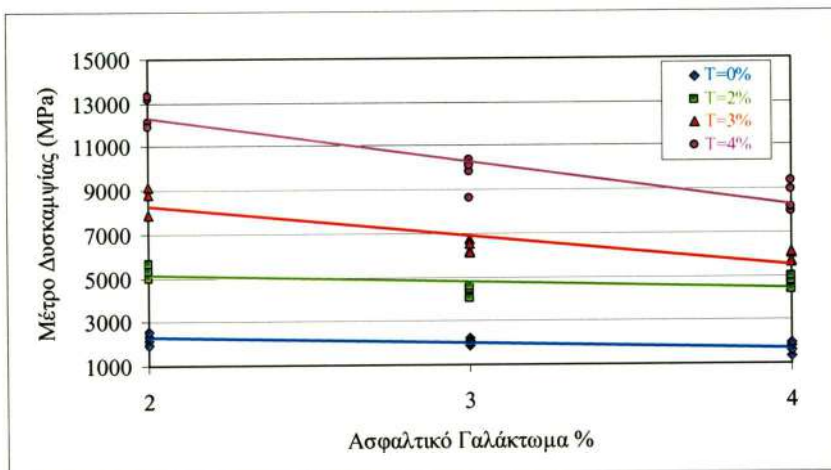
ακολουθούν έχουν ισχύ μόνο για τις τιμές του τσιμέντου, του γαλακτώματος και τις αναλογίες ΦΑ/ΘΑ που εξετάστηκαν. Κάθε επέκταση των αποτελεσμάτων σε άλλες τιμές σταθεροποιητών ή συνθέσεων ενδέχεται να οδηγήσει σε σφάλματα

Οι διαφορές στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των μιγμάτων μικραίνουν όσο αυξάνει το ποσοστό του γαλακτώματος (για γαλάκτωμα 4% τα σημεία δείχνουν να μην διαφέρουν πολύ). Παρατηρείται επίσης ότι η αύξηση του ποσοστού τσιμέντου μειώνει την επιρροή του ποσοστού ασφαλικού γαλακτώματος.

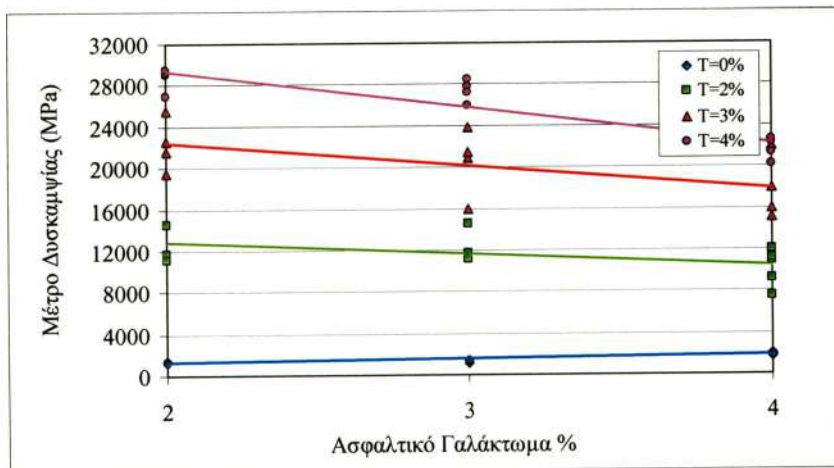
Οι παρατηρήσεις αυτές θα μπορούσε να εξηγηθούν όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο 6.3.1.



Σχήμα 6.7: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλικό γαλάκτωμα (υλικό 100% ΦΑ).

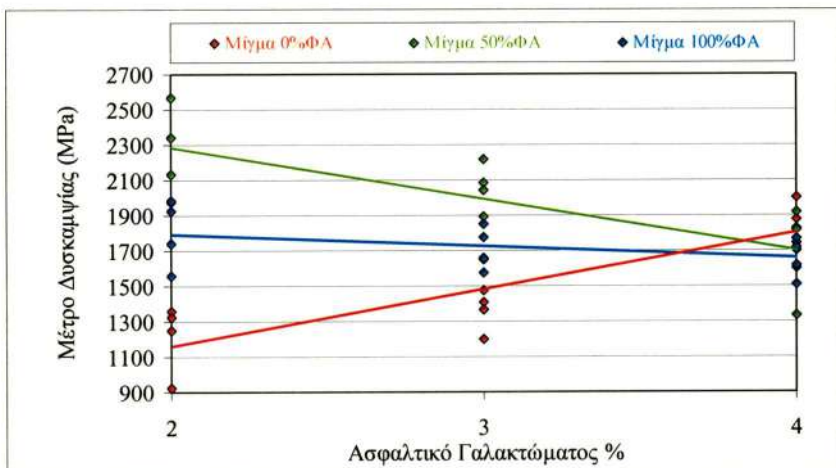


Σχήμα 6.8: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 50% ΦΑ)

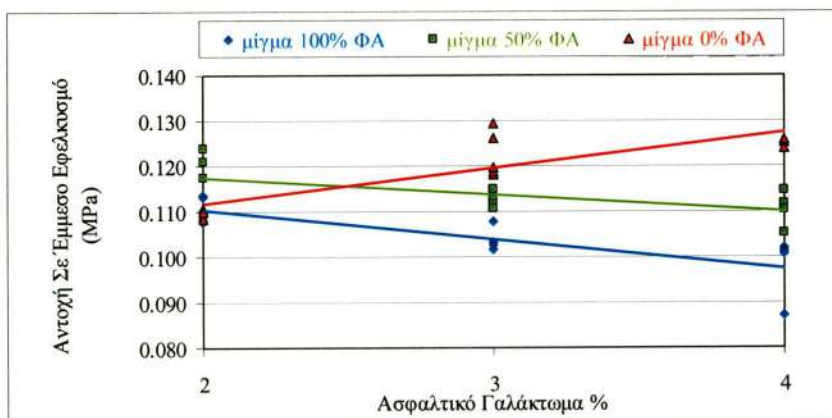


Σχήμα 6.9: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 0% ΦΑ)

Τα σχήματα 6.10, 6.11 παρουσιάζουν τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, με την περιεκτικότητα του γαλακτώματος στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο για τα τρία μίγματα (0%ΦΑ, 50%ΦΑ, 100%ΦΑ).



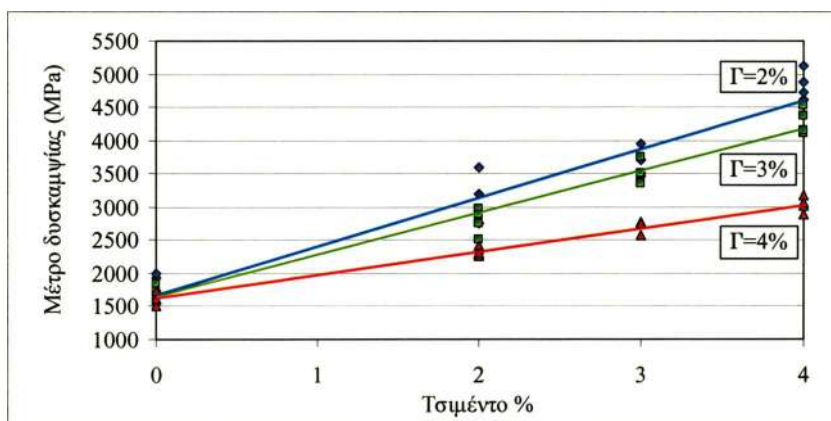
Σχήμα 6.10: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα με $T=0\%$



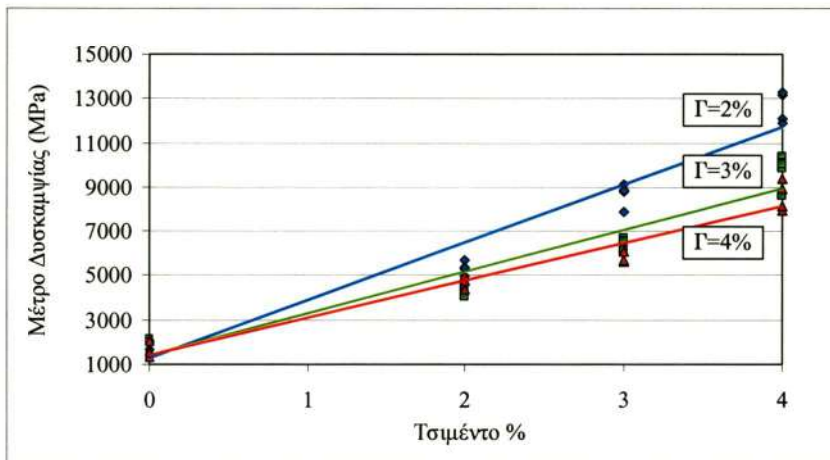
Σχήμα 6.11: Μεταβολή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα με $T=0\%$

Από τα δύο σχήματα αυτά φαίνεται ότι στα δύο μίγματα 50%ΦΑ, και 100%ΦΑ, η αύξηση της περιεκτικότητας του γαλακτώματος ελαττώνει γενικά το μέτρο δυσκαμψίας και την αντοχή. Αντίθετα για το μίγμα 0%ΦΑ τόσο το μέτρο δυσκαμψίας όσο και η αντοχή αυξάνουν όσο αυξάνει το ποσοστό του γαλακτώματος (μέχρι 4%). Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο 6.3.1.

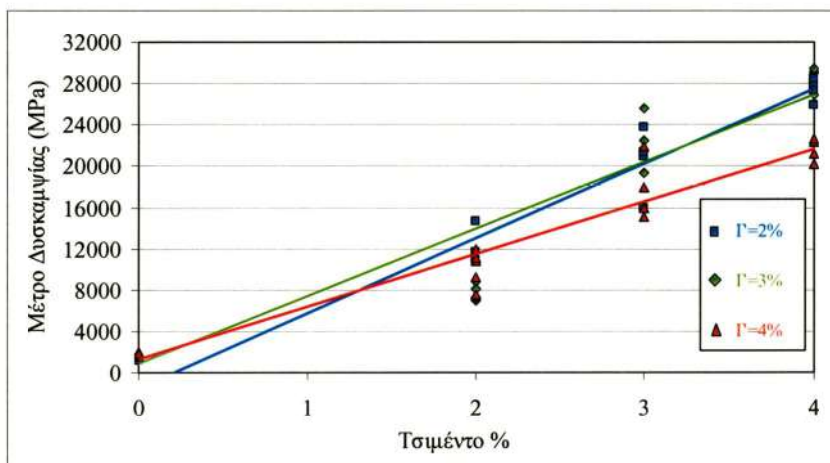
Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 6.12, 6.13, και 6.14 ως μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα του τσιμέντου.



Σχήμα 6.12: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο(υλικό 100% ΦΑ)

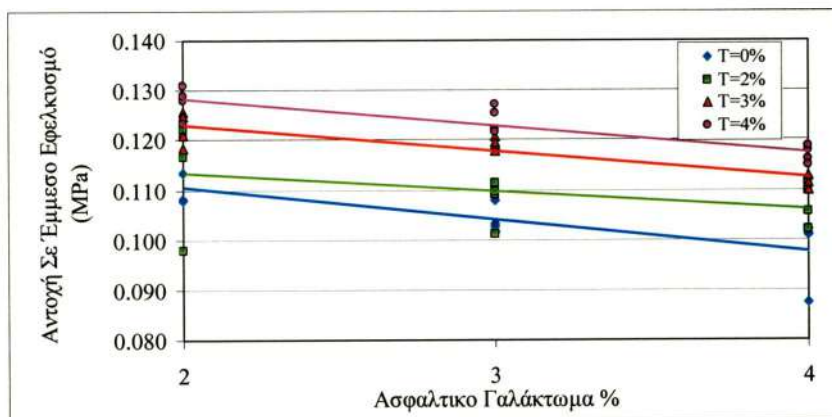


Σχήμα 6.13: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 50% ΦΑ)

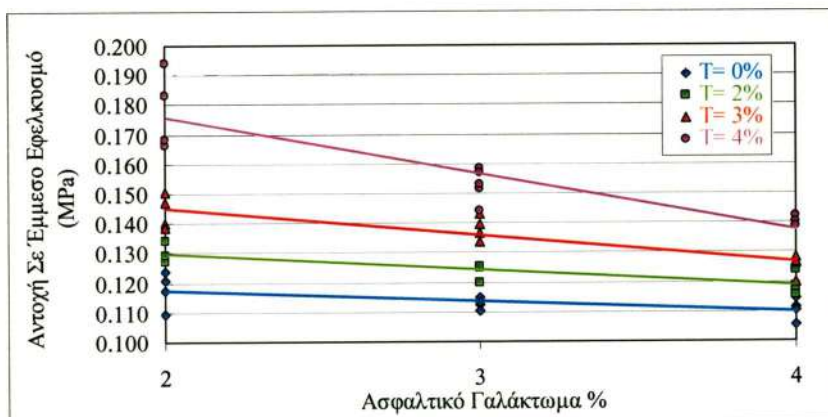


Σχήμα 6.14: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο (υλικό 0% ΦΑ)

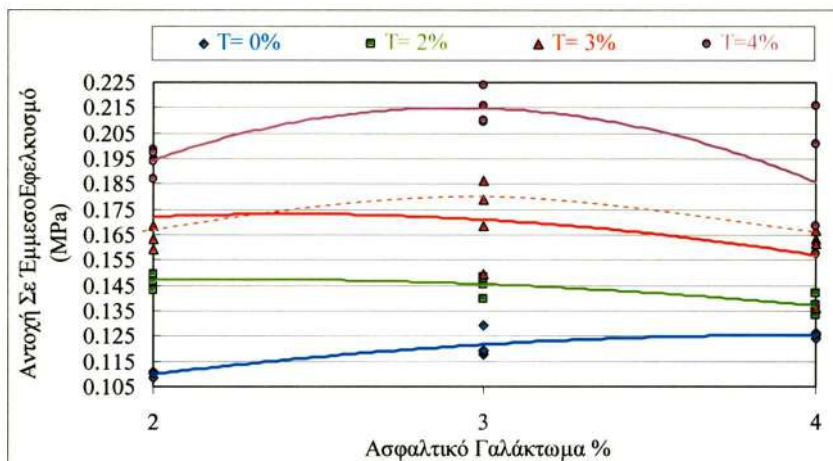
Εκτός από τις δοκιμές μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας εκτελέστηκαν και δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (διάρρηξη) σε θερμοκρασία $23 \pm 2^\circ\text{C}$, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στα σχήματα Σχ. 6.15 ως Σχ. 6.20.



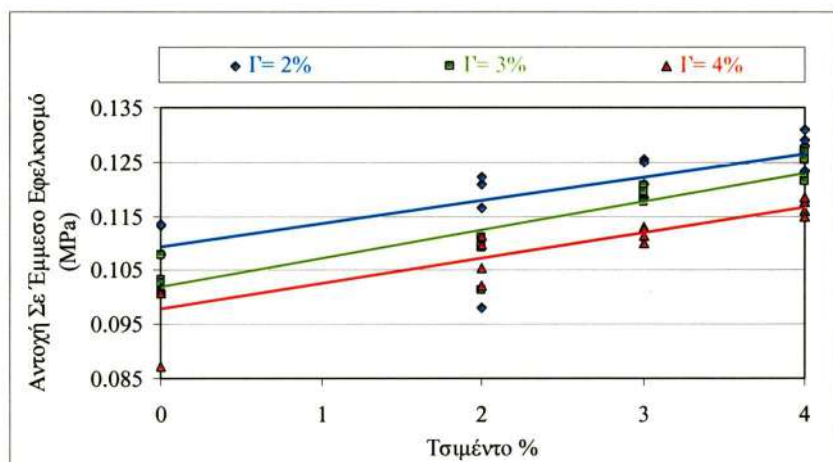
Σχήμα 6.15: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 100% ΦΑ).



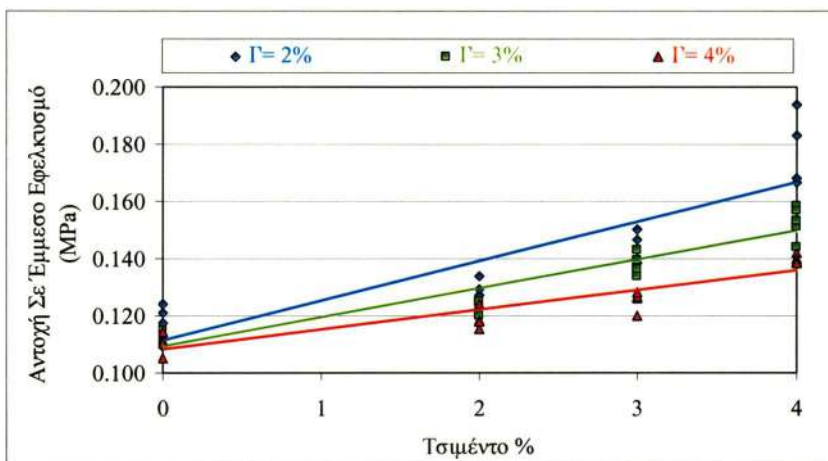
Σχήμα 6.16: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 50% ΦΑ)



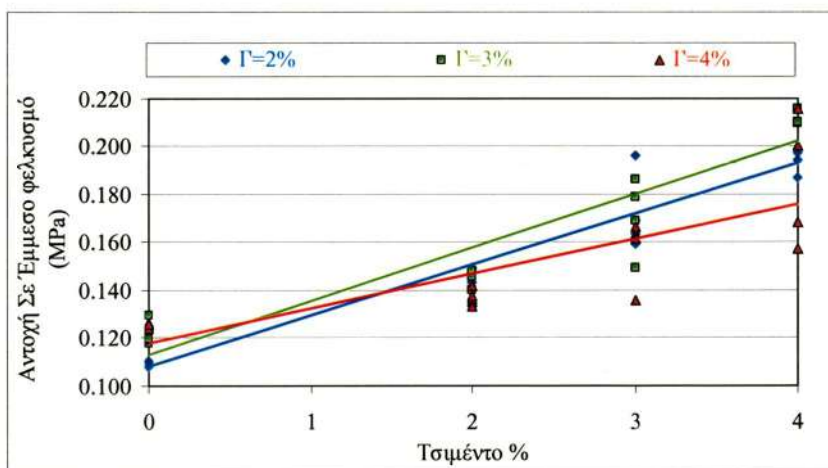
Σχήμα 6.17: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα (υλικό 0% ΦΑ)



Σχήμα 6.18: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο (υλικό 100% ΦΑ).



Σχήμα 6.19: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο (υλικό 50% ΦΑ)



Σχήμα 6.20: Μεταβολή της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο (υλικό 0% ΦΑ)

Στα σχήματα αυτά επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις αναφορικά με τις αντοχές σε έμμεσο εφελκυσμό.

Είναι φανερή η διαφορετική απόκριση στην αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος των μιγμάτων που περιέχουν ΦΑ και του μίγματος που αποτελείται από αμιγές αμμοχάλικο (0%ΦΑ). Στο μίγμα με 0%ΦΑ υπάρχει σαφώς ένα βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος εξαρτώμενο από τα εκάστοτε ποσοστά τσιμέντου. Όταν το μίγμα 0%ΦΑ έχει τσιμέντο, το βέλτιστο ποσοστό ασφαλικού γαλακτώματος είναι 3%. Αντίθετα όταν δεν έχει τσιμέντο όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα τόσο αυξάνει η αντοχή βλ. Σχ. 6.17, αν και υπάρχει σαφής ένδειξη ότι ο ρυθμός αύξησης της αντοχής μικραίνει και ότι το βέλτιστο ποσοστό είναι κοντά στο 4%. Στα μίγματα που περιέχουν ΦΑ (50%ΦΑ και 100%ΦΑ) όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα τόσο ελαττώνεται η αντοχή. Στην επόμενη παράγραφο 6.3.1 γίνεται προσπάθεια να δοθεί ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών.

6.3.1. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

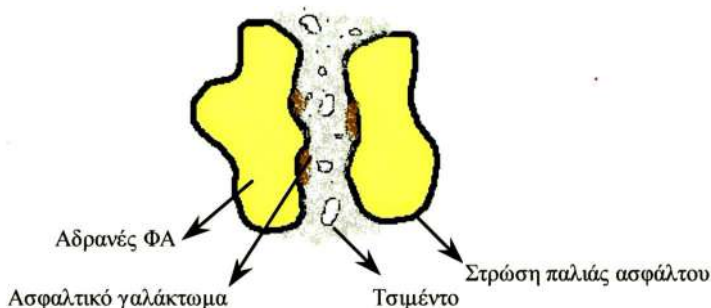
Η προσθήκη τσιμέντου και ασφαλικού γαλακτώματος στα διαφορετικά είδη αδρανών (ΦΑ και ΘΑ) δημιουργεί διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης συνάφειας, επειδή το τσιμέντο δημιουργεί διαφορετικής φύσεως συνδέσμους (από άποψη αντοχής και παραμορφωσιμότητας) από'τι το ασφαλικό γαλάκτωμα. Το τσιμέντο έχει καλή πρόσφυση με τις ασφαλικές επιφάνειες (Kasselouri et al, 2003) αλλά η αντοχή αυτής της σύνδεσης είναι φυσικό να είναι μικρότερη από την αντοχή της σύνδεσης τσιμέντου και επιφάνειας καθαρών αδρανών. Είναι αναμενόμενο επομένως η αντοχή μίγματος καθαρών αδρανών και τσιμέντου να είναι μεγαλύτερη από εκείνη μίγματος αδρανών επικαλυμμένων με ασφαλτο ή μίγματος ασφαλικού κονιάματος αδρανών και τσιμέντου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης οι παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα είναι επόμενο να είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση τσιμέντου και ασφαλικών επιφανειών, διότι ο υμένας της ασφάλτου επιτρέπει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τις παραμορφώσεις που επιτρέπονται στην διεπιφάνεια καθαρού αδρανούς και σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Κάπως διαφορετικές είναι οι συνθήκες στην περίπτωση ασφαλικού γαλακτώματος που συνδυάζεται χημικά με την παλιά ασφαλτο του ΦΑ πιθανόν καλύτερα από τις επιφάνειες του ΘΑ, που έχουν ηλεκτρικά φορτία και μπορεί να επιφέρουν δυσκολίες στη κάλυψη

αυτή. Σε κάθε όμως περίπτωση συνάφειας με γαλάκτωμα η αντοχή είναι μικρότερη σε σύγκριση με το τσιμέντο αλλά και οι παραμορφώσεις μεγαλύτερες.

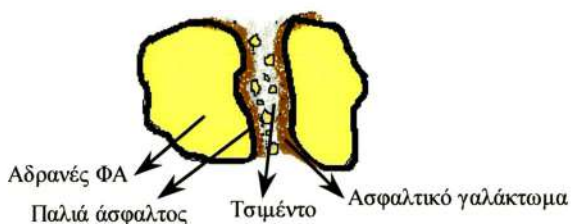
ο Μίγματα που περιέχουν ΦΑ

Όταν το ποσοστό του γαλακτώματος στο μίγμα (ΦΑ με τσιμέντου) είναι μικρό, τότε το τσιμέντο έχει την δυνατότητα να καλύψει εν μέρει (αν το ποσοστό του τσιμέντου είναι μικρό) ή σε μεγάλο μέρος (αν το ποσοστό είναι μεγάλο) τις επιφάνειες των κόκκων του ΦΑ και να αναπτύξει συνδέσμους οι οποίοι είναι ισχυρότεροι από τους συνδέσμους που μπορεί να αναπτύξει το γαλάκτωμα με τους κόκκους του ΦΑ και να τους συνδέσει μεταξύ τους. Όσο το ποσοστό του τσιμέντου αυξάνει τόσο η κάλυψη των κόκκων του ΦΑ γίνεται πληρέστερη και η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας/ δυσκαμψίας γίνονται μεγαλύτερα Σχ. 6.21. Όταν όμως το ποσοστό του γαλακτώματος αυξάνει με σταθερό ποσοστό τσιμέντου τόσο λιγότερες επιφάνειες είναι διαθέσιμες για άμεση συγκόλληση με το τσιμέντο γιατί παρεμβάλλεται ένας υμένας γαλακτώματος. Σε μεγάλα ποσοστά γαλακτώματος ο υμένας αποκτά μεγαλύτερο πάχος γεγονός που μειώνει την αντοχή και επιτρέπει μεγαλύτερες παραμορφώσεις –άρα ελαττώνει το μέτρο ελαστικότητας/ δυσκαμψίας βλ. Σχ. 6.22. Στην περίπτωση που το μίγμα δεν περιέχει τσιμέντο ($T=0\%$) η συμπεριφορά του μίγματος διέπεται από τις αρχές που διέπουν τα κοινά ασφαλτομίγματα δηλ. μικρό ποσοστό ασφάλτου συνεπάγεται μικρή συνάφεια και μικρή αντοχή, μεγάλο ποσοστό ασφάλτου συνεπάγεται μεγάλο πάχος υμένα μικρή αντίσταση στη παραμόρφωση αφού οι κόκκοι δεν έρχονται σε επαφή γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη παραμόρφωση και μικρή αντοχή. Υπάρχει όμως ένα βέλτιστο ποσοστό με το οποίο γίνεται ο καλύτερος συνδυασμός ανάπτυξης τριβής και συνάφειας μεταξύ των κόκκων λόγω του βέλτιστου ποσοστού ασφαλικού υλικού. Τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση κοινών (καθαρών) αδρανών. Στην περίπτωση που αντί για κοινά αδρανή χρησιμοποιούνται κόκκοι από φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα ισχύει βασικά η ίδια αρχή με τη διαφορά ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το ΦΑ περιέχει άσφαλτο μέρος της οποίας γίνεται ενεργό λόγω της ανανεωτικής δράσης του γαλακτώματος ενώ το υπόλοιπο μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας και ανάπτυξης τριβής των κόκκων μεταξύ τους με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του μίγματος σε ότι αφορά την αντοχή και το μέτρο δυσκαμψίας να βελτιώνεται αρχικά για μικρά ποσοστά αλλά να μικραίνει για

μεγαλύτερα. Σχ. 6.23. Τα όρια αυτά φαίνεται ότι είναι πολύ μικρά για το συγκεκριμένο ΦΑ που χρησιμοποιήθηκε με ποσοστό ασφάλτου 4.72% ασφαλτομίγματος.

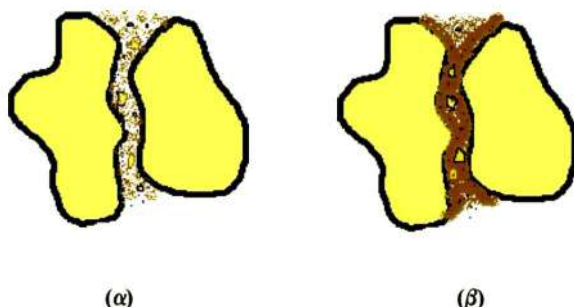


Σχήμα 6.21: αδρανήΦΑ συνδέονται με τσιμέντο, και λίγη ποσότητα γαλακτώματος



Σχήμα 6.22: αδρανή ΦΑ συνδέονται με τσιμέντο, και μεγάλη ποσότητα γαλακτώματος.

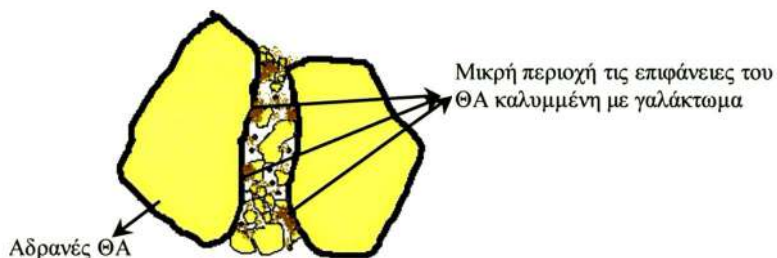
Είναι φανερό ότι λόγω του μεγάλου πάχους της ασφαλτικής στρώσης οι μετακινήσεις διευκολύνονται



Σχήμα 6.23: αδρανή ΦΑ συνδέονται με: α) μικρή, ή β) μεγάλη ποσότητα γαλακτώματος αντίστοιχα χωρίς τσιμέντο. Η μετακίνηση των κόκκων μεταξύ τους είναι πολύ πιο εύκολη στη περίπτωση (β) από την περίπτωση (α) όπου ενεργοποιείται η τριβή μεταξύ των κόκκων.

ο Μίγματα ΘΑ

Όταν το μίγμα με ΘΑ δεν περιέχει τσιμέντο τότε η συμπεριφορά του είναι παρόμοια με εκείνη των κοινών θερμών ασφαλτομιγμάτων. Μικρή ποσότητα γαλακτώματος συνεπάγεται μικρή συνοχή, μικρή αντοχή και μικρό μέτρο δυσκαμψίας Σχ. 6.24. Μεγάλη ποσότητα γαλακτώματος συνεπάγεται μεγάλο πάχος ασφαλικού υμένα που περιβάλλει τα αδρανή, μεγάλες παραμορφώσεις, μικρό μέτρο δυσκαμψίας και μικρή αντοχή. Εντούτοις, υπάρχει ένα ποσοστό γαλακτώματος με το οποίο επιτυγχάνεται ο καλύτερος συνδυασμός συνοχής και αντίστασης στη μετακίνηση λόγω τριβής μεταξύ των κόκκων που συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο δυσκαμψίας Σχ. 6.25. σύμφωνα με διάφορες έρευνες (PIARC, 2002), (A. Lewis, 1999) είναι περίπου 5%

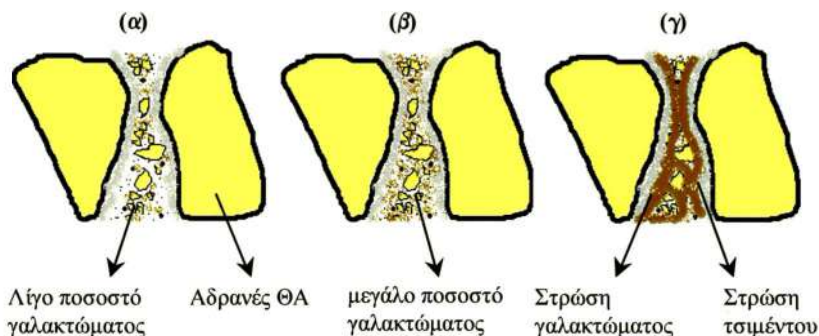


Σχήμα 6.24: μίγμα ΘΑ χωρίς τσιμέντο με μικρό ποσοστό γαλακτώματος



Σχήμα 6.25: μίγμα ΘΑ χωρίς τσιμέντο με μεγάλο ποσοστό γαλακτώματος

Όταν τα αδρανή με ΘΑ περιέχουν αρκετό τσιμέντο και μικρό ποσοστό γαλακτώματος, τότε οι επιφάνειες των αδρανών καλύπτονται σε ικανοποιητικό βαθμό από το τσιμέντο και το γαλάκτωμα απλώς υποβοηθάει στην ανάπτυξη περαιτέρω αντοχής. Η σύνθεση αυτή δίνει καλό συνδυασμό και παρουσιάζει μεγάλες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας και αντοχής, βλ. Σχ. 6.26-α.

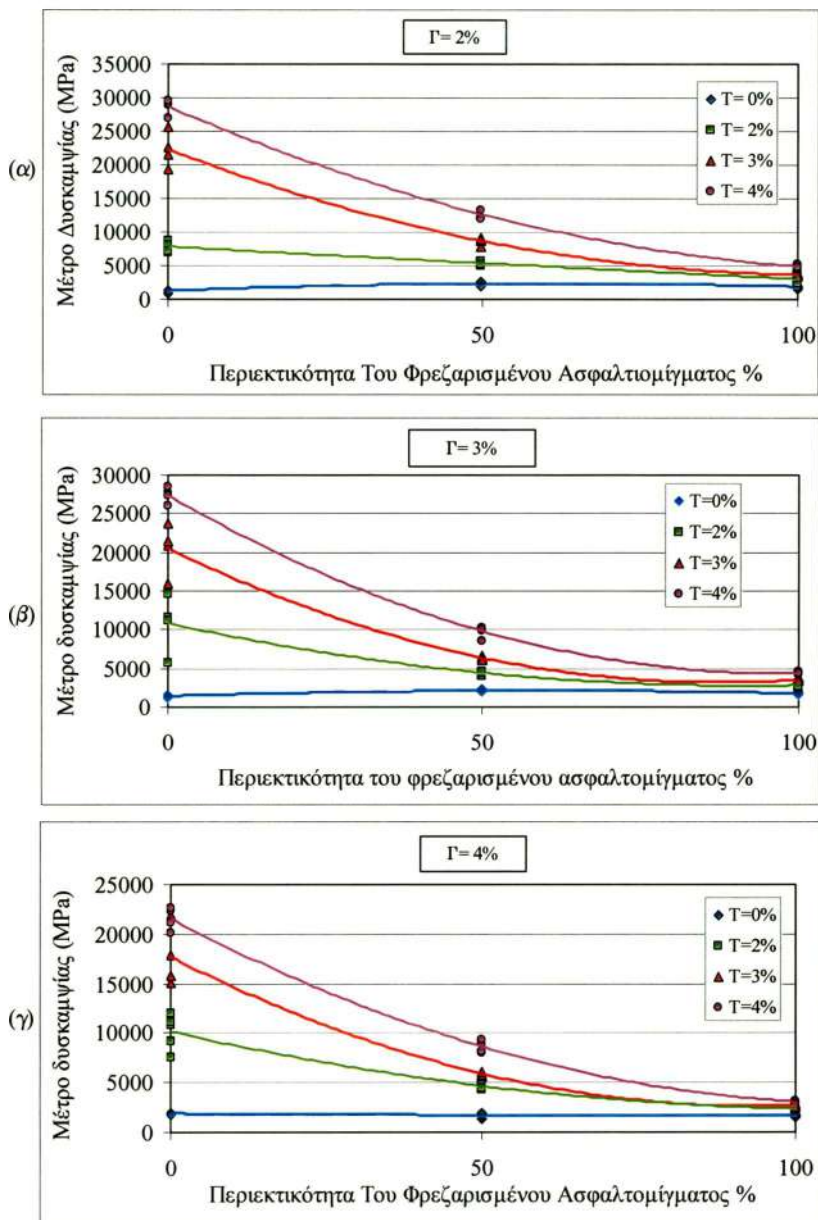


Σχήμα 6.26: μίγμα ΘΑ με μεγάλο ποσοστό τσιμέντου και διαφορετικά ποσοστά γαλακτώματος

Όταν το ποσοστό του γαλακτώματος αυξάνεται (μέχρι 3% στη παρούσα εργασία) με σταθερή ποσότητα τσιμέντου, τότε το γαλάκτωμα γεμίζει τα κενά που βρίσκονται μεταξύ των αδρανών, αυτό το πράγμα οδηγεί το μίγμα να συνδυάζεται καλύτερα, βλ. Σχ. 6.26-β, πού παρουσιάζει μεγάλη αντοχή βλ. Σχ. 6.17, αλλά επειδή η παραμόρφωση του γαλακτώματος είναι μεγάλη η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ελαττώνεται βλ. Σχ. 6.9. Όταν το ποσοστό του γαλακτώματος αυξάνεται ακόμη περισσότερο (έως 4% στην παρούσα έρευνα), τότε το γαλάκτωμα δημιουργεί παχιά στρώση ασφάλτου μεταξύ των αδρανών βλ. Σχ. 6.26-γ, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι τιμές της αντοχής και της δυσκαμψίας βλ. Σχ. 6.9, Σχ. 6.17

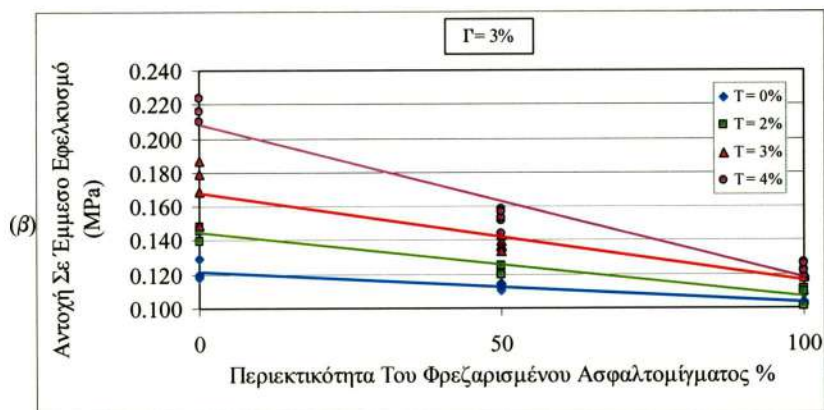
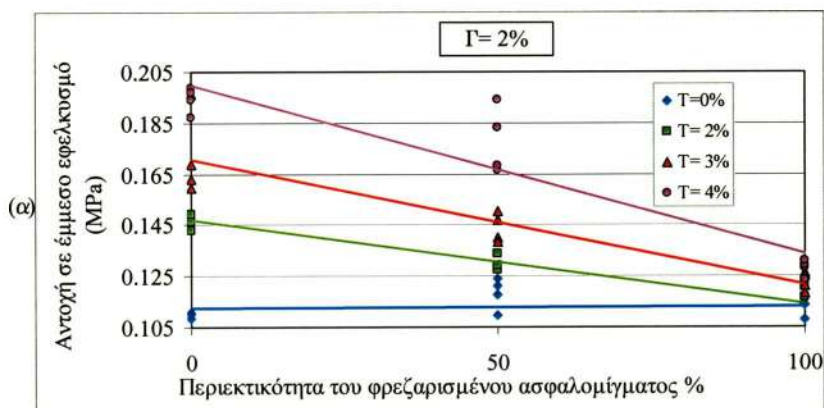
6.4. ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

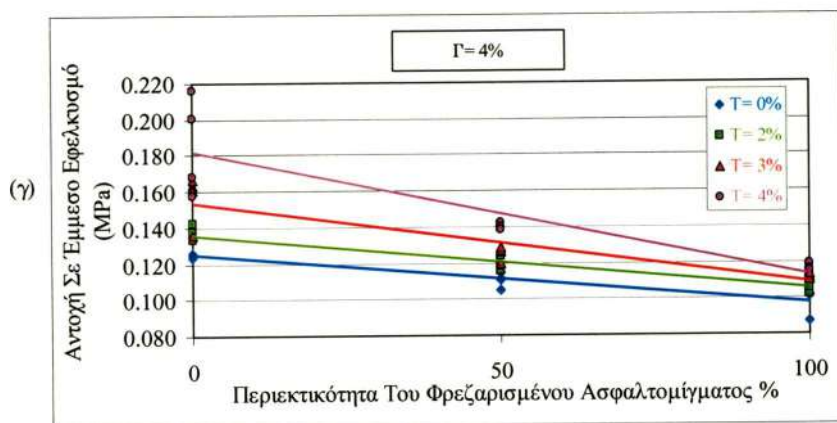
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα ΦΑ και ΘΑ για διάφορα ποσοστά γαλακτώματος και τσιμέντου: α) στο μέτρο δυσκαμψίας, β) στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό, και γ) στον λόγο Sm/ITS του μέτρου δυσκαμψίας προς την αντίστοιχη αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.



Σχήμα 6.27(α, β, γ): Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα του ΦΑ

Από τα τρία παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι, όσο αυξάνεται η ποσότητα του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα τόσο ελαττώνεται το μέτρο δυσκαμψίας, εκτός από την περίπτωση των μιγμάτων χωρίς τσιμέντο. Στα μίγματα αυτά ($T=0\%$) δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική μεταβολή, και για γαλάκτωμα 2% και 3% υπάρχει ένδειξη ελαφριάς αύξησης.





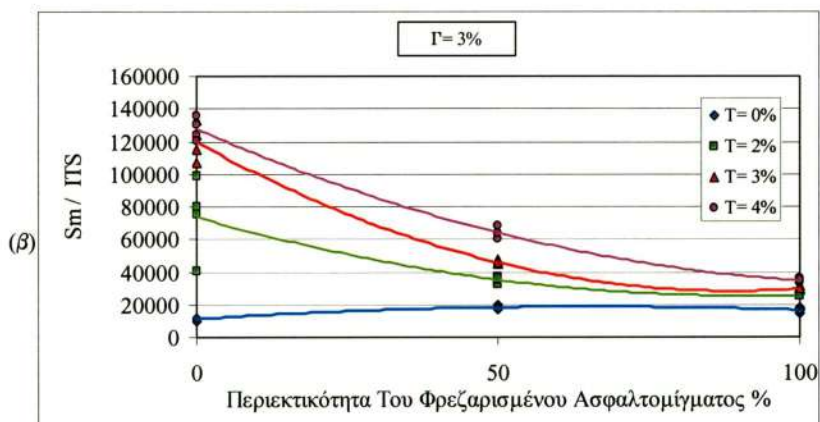
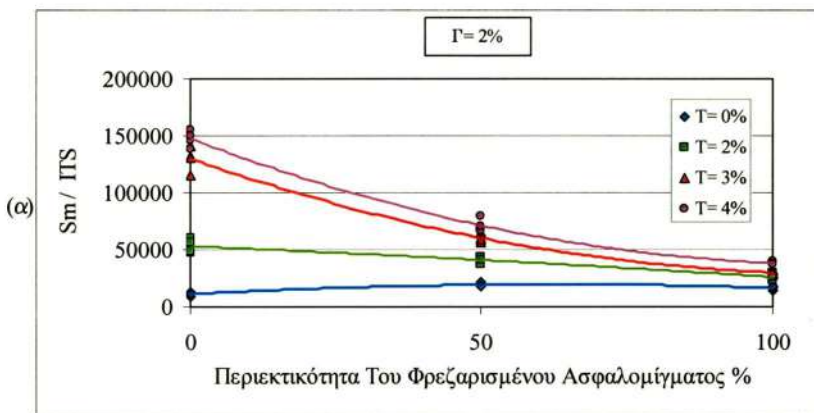
Σχήμα 6.28 (α, β, γ): Μεταβολή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με την περιεκτικότητα του ΦΑ.

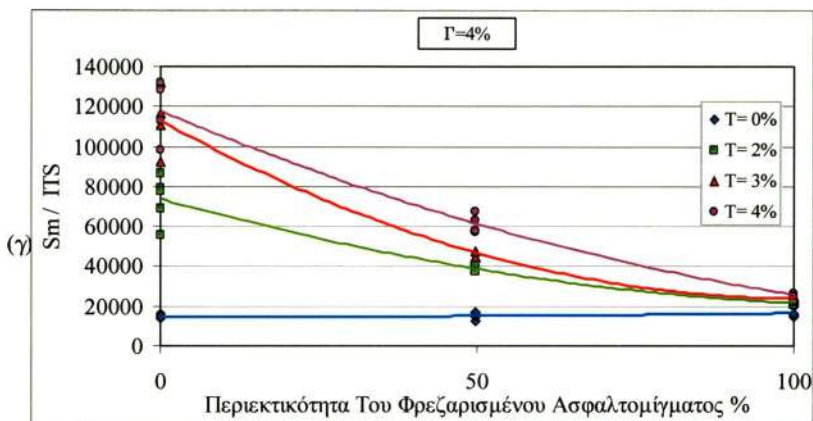
Από το σχήμα 6.28(α, β, γ) είναι φανερό ότι η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) για όλα τα μίγματα, ελαττώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος. Παρατηρείται ότι παρουσιάζεται ελάττωση αντοχής με την αύξηση του ποσοστού ΦΑ και στα μίγματα χωρίς τσιμέντο με ποσοστά γαλακτώματος 3% και 4%, ενώ για τα μίγματα με 2% γαλάκτωμα υπάρχει ένδειξη μικρής αύξησης.

Με τον λόγο S_m/ITS μπορεί να εξακριβωθεί πιο μέγεθος επηρεάζεται περισσότερο από την μεταβολή του ΦΑ στο μίγμα. Εφ'όσον είναι γνωστό ότι και τα δύο μεγέθη μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση (ελαττώνονται) τότε ελάττωση του λόγου σημαίνει ότι το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται πιο γρήγορα απότι η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Επίσης ο λόγος S_m/ITS δίνει μια χοντρική εκτίμηση του λόγου σ/ϵ της αναπτυσσόμενης τάσης προς την αντοχή, όσο μεγαλύτερος ο λόγος S_m/ITS τόσο μεγαλύτερη είναι και η αναπτυσσόμενη τάση, σε σχέση με προς την αντοχή.

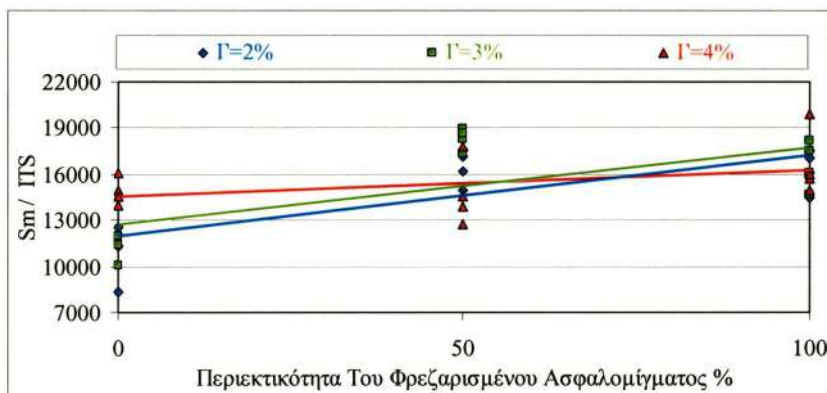
Όσο μικρότερος είναι τόσο η αναπτυσσόμενη τάση είναι μικρότερη σε σχέση με την αντοχή. Επομένως ο λόγος αυτός μας δίνει μια εκτίμηση του περιθωρίου αντοχής που υπάρχει.

Τα συμπεράσματα για την μεταβολή του λόγου S_m/ITS είναι παρόμοια με εκείνα για το μέτρο δυσκαμψίας, βλ. Σχ. 6.29 (α, β, γ). Παρατηρείται ότι όπως και για το μέτρο δυσκαμψίας ο λόγος για $T=0\%$ αυξάνεται ελαφρά αντί να ελαττώνεται γεγονός που σημαίνει ότι το μέτρο δυσκαμψίας αυξάνει ελαφρώς ενώ η αντοχή μπορεί να ελαττώνεται ή να αυξάνει με μικρότερο ρυθμό.





Σχήμα 6.29(α, β, γ): Μεταβολή του Sm/ITS με την περιεκτικότητα του ΦΑ.



Σχήμα 6.30: Μεταβολή του Sm/ITS με την περιεκτικότητα του ΦΑ.

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται φανερό ότι η αύξηση στον λόγο Sm/ITS με την αύξηση του ΦΑ είναι σημαντική και αυτό επιβεβαιώνεται στατιστικά με τη δοκιμή t-test, βλ. Πίνακας 6.2.

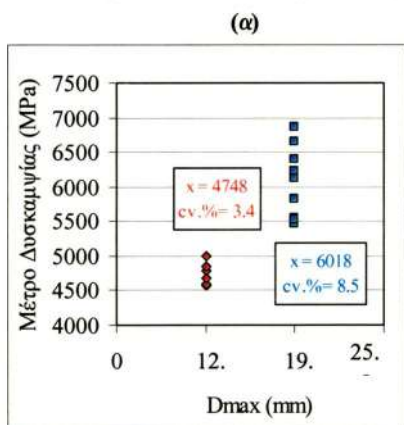
Πίνακας 6.2: Στατιστική σύγκριση της εφελκυστικής αντοχής των μιγμάτων (MPa)

Μίγμα	0%ΦΑ			100%ΦΑ		
Γαλάκτωμα	2%	3%	4%	2%	3%	4%
N*	4	4	4	4	5	4
$\bar{x}$	11074	11220	14865	16270	16478	16639
sd.	1868.43	804.18	914.86	1335.49	1401.17	2241.88
cv. %	16.87	7.17	6.15	8.21	8.50	13.47
t- test	Ναι					

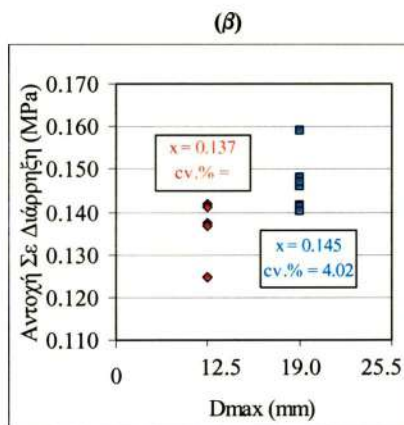
N*: Αριθμός δοκιμίων.

6.5. ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΑΔΡΑΝΩΝ

Για την εξέταση της επίδρασης της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου αδρανούς παρασκευάστηκαν από το μίγμα 50%ΦΑ, 50%ΘΑ με τσιμέντο 3% και γαλάκτωμα 3%, 10 δοκίμια με μέγιστο κόκκο 19mm (3/4") και 6 δοκίμια με μέγιστο κόκκο 12.5mm (1/2"). Οι κόκκοι αυτοί λήφθηκαν επίσης σε αναλογία 50%ΦΑ και 50%ΘΑ Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχ. 6.31(α, β) και Πίνακα 6.3



Σχήμα 6.31-α: Επίδραση του μέγιστου κόκκου στο μέτρο δυσκαμψίας



Σχήμα 6.31-β: Επίδραση του μέγιστου κόκκου στην έμμεση εφελκυστική αντοχή

Πίνακας 6.3: Στατιστική σύγκριση του μέτρου δυσκαμψίας και της εφελκυστικής αντοχής των μιγμάτων (MPa)

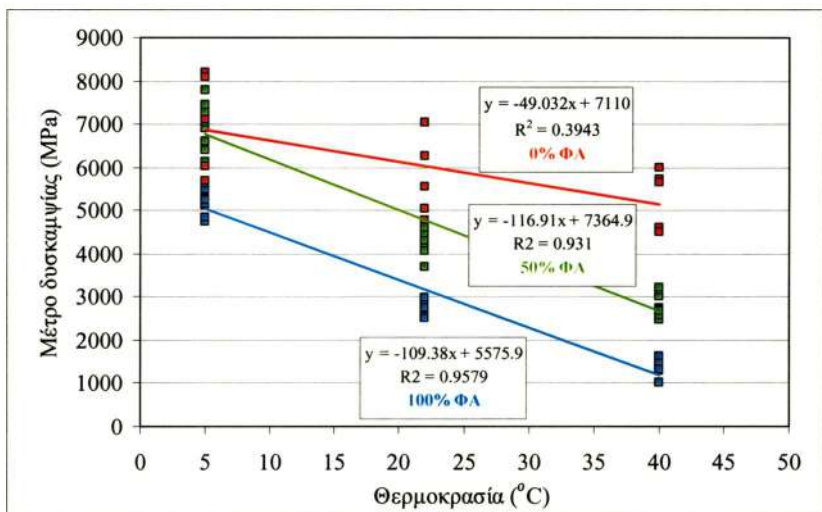
Μέτρο δυσκαμψίας			Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό		
t-test	Ναι		t-test	Ναι	
Dmax	19 mm	12.5 mm	Dmax	19 mm	12.5 mm
N*	10	6	N*	10	6
$\bar{x}$ (MPa)	6018	4748	$\bar{x}$	0.145	0.137
sd. (MPa)	509.88	160.36	sd.	0.00584	0.00609
cv. %	8.5	3.4	cv. %	4.02	4.46

N*: Αριθμός δοκιμών.

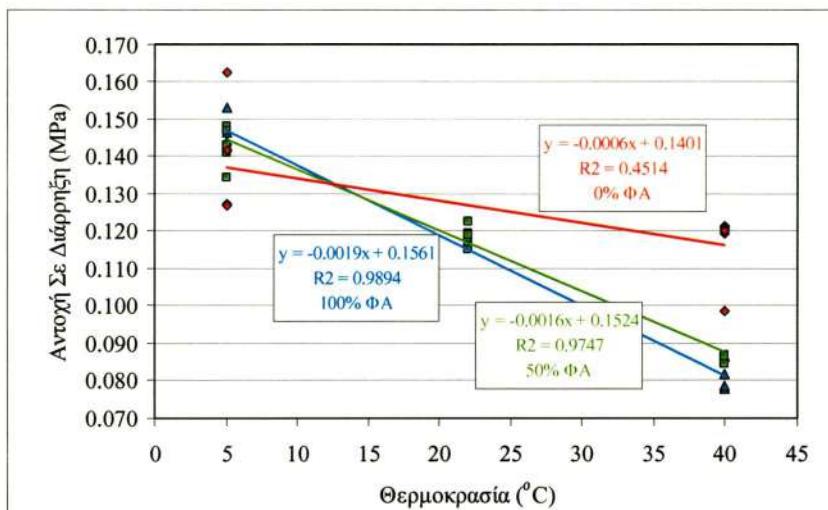
Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη η διάσταση του μέγιστου κόκκου, τόσο μεγαλύτερο προκύπτει το μέτρο δυσκαμψίας, η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό αλλά και η μεταβλητότητα των μετρήσεων, όπως αυτή εκτιμάται από τον συντελεστή μεταβλητότητας. Η αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας με την αύξηση του μέγιστου κόκκου αποδίδεται στο γεγονός ότι αύξηση του μέγιστου κόκκου συνεπάγεται και αύξηση του όγκου που καταλαμβάνεται από συμπαγές υλικό (αδρανή ΘΑ και ΦΑ με $D_{\max}=19\text{mm}$) το οποίο έχει μέτρο δυσκαμψίας μεγαλύτερο από εκείνο της συνδετικού υλικού δηλ. της ασφάλτου. Σημειώνεται ότι οι κόκκοι ΦΑ πρέπει να έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μέτρο δυσκαμψίας από την ασφαλτο διότι αποτελούνται από μίγμα αδρανών και ασφάλτου η οποία όμως λόγω γήρανσης και οξείδωσης έχει γίνει πολύ πιο σκληρή. Αυτό άλλωστε έχει παρατηρηθεί και στα θερμά ασφαλτομίγματα αλλά και στα σκυροδέματα. Η αύξηση της αντοχής θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι η ειδική επιφάνεια των αδρανών μικραίνει με την αύξηση του μέγιστου κόκκου και έτσι παραμένει περισσότερος τσιμεντοπολτός και άσφαλτος για να δημιουργήσει του απαραίτητους συνδέσμους μεταξύ των κόκκων. Το θέμα όμως αυτό χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση για αναλυθεί πλήρως.

6.6. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η επιρροή της θερμοκρασίας εξετάστηκε με την εκτέλεση δοκιμών μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας και αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό για τα τρία μίγματα σε τρεις θερμοκρασίες 5°C, 22°C και 40°C. Οι θερμοκρασίες αυτές καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τις αναμενόμενες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις μιας ασφαλικής βάσεως. Τα δοκίμια είχαν ποσοστό τιμέντου 2% και ασφαλικού γαλακτώματος 3% και μετά την παρασκευή τους παρέμειναν για 2ημέρες στην απαιτούμενη θερμοκρασία ακριβώς πριν την εκτέλεση της κάθε δοκιμής, βλ. Σχ. 6.32-α και Σχ. 6.32-β.



Σχήμα 6.32-α: Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας.



Σχήμα 6.32-β: Επίδραση της θερμοκρασίας στην έμμεση εφελκυστική αντοχή

Στα σχήματα 6.32(α-β) διακρίνεται ότι το μέτρο δυσκαμψίας και η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό του μίγματος 0%ΦΑ επηρεάζεται από την θερμοκρασία πολύ λιγότερο από ότι επηρεάζονται τα άλλα μίγματα, όπως άλλωστε θα έπρεπε να αναμένεται, αφού το μίγμα δεν περιέχει ΦΑ ως αδρανές αλλά 3% γαλακτώμα ως συνδετικό υλικό. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένδειξη ότι η επιρροή του γαλακτώματος στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή του μίγματος είναι σχετικώς μικρή. Αντίθετα στα άλλα δύο μίγματα η δυσκαμψία και η αντοχή επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από την θερμοκρασία (και μάλιστα η επιρροή αυτή είναι σχεδόν παρόμοια) λόγω της περιεκτικότητας σε αδρανή από ΦΑ και του επηρεασμού της δυσκαμψίας και της αντοχής τους από τη θερμοκρασία (υψηλή θερμοκρασία μικρή δυσκαμψία και μικρή αντοχή κόκκων ΦΑ και αντίθετα).

6.7. ΥΔΡΕΜΠΟΤΙΣΜΟΣ

Η δοκιμή υδρεμποτισμού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του EN 12697-12 με τη διαφορά ότι τα δοκίμια παρέμειναν σε δοχείο με νερό επί 48ώρες αντί του υδρεμποτισμού με υποπίεση. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε για να βρεθεί την ευαισθησία σε νερό μιγμάτων που αποτελούνται από διαφορετικά αδρανή (ΦΑ, ΘΑ), και

διαφορετικές περιεκτικότητες σε τσιμέντο και γαλάκτωμα. Σημειώνεται ότι η επίδραση του νερού στη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων υλικών πρέπει να θεωρείται ως μία απαραίτητη δοκιμή (δοκιμή υδρεμποτισμού) η οποία μπορεί να επηρεάσει την τελική επιλογή του ποσοστού και του είδους του σταθεροποιητή. Οι απαιτήσεις της ανθεκτικότητας σε υδρεμποτισμό πρέπει να ικανοποιούνται πέραν και πάνω από τα αποτελέσματα της μελέτης άλλων μηχανικών ιδιοτήτων. Η ευαισθησία σε νερό των μιγμάτων αυτών διερευνήθηκε ως προς τη μεταβολή της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Τα αποτελέσματα κρίθηκαν με δύο τρόπους: στατιστικής ανάλυσης και λόγων r/R , t/T όπου:

r : Μέτρο δυσκαμψίας δοκιμών μετά από υδρεμποτισμό

R : Μέτρο δυσκαμψίας ξηρών δοκιμών

t : Έμμεση εφελκυστική αντοχή δοκιμών μετά από υδρεμποτισμό

T : Έμμεση εφελκυστική αντοχή ξηρών δοκιμών

Στο Quebec το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος προσδιορίζεται με τη μέθοδο Marshall, και απαιτείται $t/T > 60\%$ όπου t και T είναι οι τιμές της ευστάθειας κατά Marshall μετά από υδρεμποτισμό και χωρίς υδρεμποτισμό αντίστοιχα.

Στην Ισπανία το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος προσδιορίζεται με τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη, και ο λόγος της αντοχής σε θλίψη μετά από υδρεμποτισμό προς την αντοχή σε θλίψη χωρίς υδρεμποτισμό, t/T , πρέπει να είναι $\geq 75\%$ για κυκλοφορία 1000 έως 10000 εμπορικών οχημάτων ανά κατεύθυνση ανά ημέρα, και $t/T \geq 70\%$ για ≤ 1000 εμπορικά οχήματα ανά κατεύθυνση ανά ημέρα (Ισπανικό πρότυπο NLT-161), (PIARC, 2002).

Στην Γαλλία ο προσδιορισμός της ευαισθησίας σε υδρεμποτισμό γίνεται σύμφωνα με τη δοκιμή Duriez (NF P 98 251-4).

Η παρούσα έρευνα για την επιρροή του υδρεμποτισμού στα ανακυκλωμένα μίγματα έγινε με δύο σειρές δοκιμών: Η πρώτη σειρά περιελάμβανε σταθερό ποσοστό σταθεροποιητών και μεταβολή του προς ανακύκλωση υλικού από 0%ΦΑ σε 50%ΦΑ και 100%ΦΑ ενώ η δεύτερη σειρά περιελάμβανε την επίδραση του είδους και του ποσοστού των σταθεροποιητών σε δύο μίγματα 50% ΦΑ και 100% ΦΑ.

6.7.1. Πρώτη σειρά δοκιμών

Από τα τρία μίγματα (0%ΦΑ, 50%ΦΑ, 100%ΦΑ) παρασκευάστηκαν 5-10 δοκίμια με τσιμέντο 2% και γαλάκτωμα 3%, και υποβλήθηκαν σε υδρεμποτισμό για 2 ημέρες σε θερμοκρασία 20°C.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 6.33 και Σχ. 4.34 και στους Πίνακες 6.4 και 6.5 Είναι φανερό ότι το μέτρο δυσκαμψίας δεν επηρεάζεται δυσμενώς από τον υδρεμποτισμό στα τρία μίγματα. Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζει με τον υδρεμποτισμό ουσιώδη αύξηση για μίγματα 50%ΦΑ και 100%ΦΑ ενώ δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή για 0%ΦΑ. Στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων (βλ. Πίνακα 6.4 και 6.5) επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα αυτά. Παρατηρείται ότι οι τιμές των λόγων r/R και t/T είναι μεγαλύτερες από 75% επομένως τηρείται η απαίτηση ανθεκτικότητας στην επίδραση του νερού.

Οι λόγοι r/R και t/T των μέτρων δυσκαμψίας και των αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό σε κορεσμένη και σε ξηρή κατάσταση αντίστοιχα, είναι μέσα στα όρια αποδοχής των προτύπων (PIARC, 2002).

Πίνακας 6.4: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας

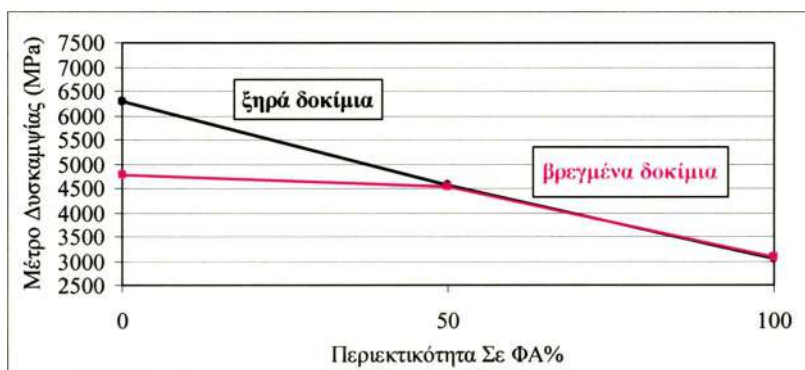
(T.=2%, Γ.=3%)

(MPa)	Μίγμα (100% ΦΑ)		Μίγμα (50% ΦΑ)		Μίγμα (0% ΦΑ)	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
N*	5	5	10	10	5	5
$\bar{x}$	3044	3066	4561	4519	6290	4759
sd.	207.83	195.11	367.9	211.6	1178	352
cv.%	6.83	6.36	8.07	4.68	18.72	7.39
t-test	Όχι	$r/R=99.3\%$	Όχι	$r/R=99.1\%$	Όχι	$r/R=75.7\%$

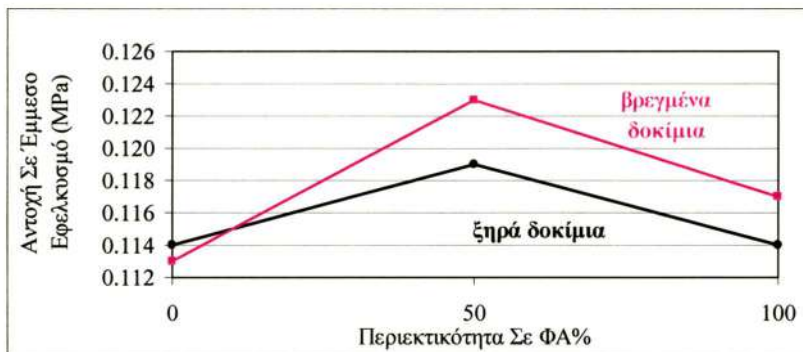
N*: Αριθμός δοκιμών.

Πίνακας 6.5: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (T.=2%, Γ.=3%)

(MPa)	Μίγμα (100% ΦΑ)		Μίγμα (50% ΦΑ)		Μίγμα (0% ΦΑ)	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
N*	5	5	10	10	5	5
$\bar{x}$	0.114	0.117	0.119	0.123	0.114	0.113
sd.	0.003	0.002	0.12	0.14	0.003124	0.001836
cv.%	2.69	1.70	1.00	1.14	2.75	1.1.63
t-test	Όχι	t/T=102.63%	Όχι	t/T=103.36%	Όχι	t/T=99.18%



Σχήμα 6.33: μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τον υδρεμποτισμό στα τρία μίγματα 0%ΦΑ, 50%ΦΑ, και 100%ΦΑ.



Σχήμα 6.34: μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής με τον υδρεμποτισμό στα τρία μίγματα 0%ΦΑ, 50%ΦΑ, και 100%ΦΑ.

Παρόλο ότι ο υδρεμποτισμός δεν επηρεάζει τα τρία μίγματα, είναι φανερό ότι η δυσκαμψία του μίγματος 0%ΦΑ παρουσιάζει μεγαλύτερη ελάττωση από τα άλλα μίγματα. Αυτό θα μπορούσε πιθανόν να αποδοθεί, (όπως αναπτύχθηκε στην παράγραφο 6.3.1) στο ότι το αδρανές ΦΑ είναι καλυμένο με μια παλιά ασφαλτική στρώση που συνδέεται χημικά πολύ εύκολα με το ασφαλτικό γαλάκτωμα, και το νερό δεν μπορεί να μπει μεταξύ τους. Ενώ το ποσοστό 3% γαλακτώματος δεν είναι αρκετό να καλύψει όλες τις επιφάνειες του ΘΑ οπότε το αδρανές ΘΑ θα απορροφά νερό γεγονός που επηρεάζει τη συνάφεια του ασφαλτικού γαλακτώματος στη επιφάνεια του ΘΑ. Κυρίως η συνάφεια αυτή γίνεται μέσω των ηλεκτρικών φορτίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του αδρανούς ΘΑ (βλ. Σχ.6.35-α) και το νερό μπορεί να μπει εύκολα μεταξύ της επιφάνειας αυτής και της ασφαλτικής στρώσης που προέρχεται από το ασφαλτικό γαλάκτωμα βλ. Σχ. 6.35-β. Όταν το νερό καταφέρει να χωρίσει την ασφαλτική στρώση αυτήν μακριά από την επιφάνεια του αδρανούς (ΘΑ) τότε γίνεται αποκόλληση (stripping) , βλ. Σχ. 6.35-γ.

Η αύξηση της αντοχής που παρατηρείται με τον υδρεμποτισμό θα μπορούσε να αποδοθεί σε πιθανή ολοκλήρωση της ενυδάτωσης ορισμένων κόκκων τσιμέντου που αύξησε την συνάφεια του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού με τις επιφάνειες των διαφόρων αδρανών.

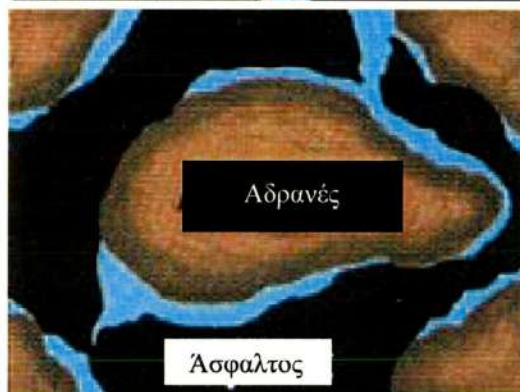
(α)



(β)



(γ)



Σχήμα 6.35: Υδρεμποτισμός αδρανούς ΘΑ καλυμμένου με μια ασφαλτική στρώση. Αποκόλληση του ασφαλτικού υμένα από την επιφάνεια του αδρανούς (Solaimanian et al, 2003).

6.7.2. Δεύτερη σειρά δοκιμών – Επίδραση του είδους και του ποσοστού του συνδετικού υλικού στα μίγματα 50%ΦΑ και 100%ΦΑ

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε σε δύο μίγματα αδρανών 50%ΦΑ και 100%ΦΑ, με διαφορετικές ποσότητες γαλακτώματος σε δύο περιπτώσεις: α) όταν το μίγμα δεν περιέχει τσιμέντο, β) όταν το μίγμα περιέχει τσιμέντο 3%κ.β. όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.6. Συνολικά παρασκευάστηκαν 10 μίγματα και από κάθε ένα μίγμα κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια Marshall (3 δοκιμές ξηρών δοκιμίων και 3 για δοκιμές μετά από υδρεμποτισμό).

Πίνακας 6.6: Συνδετικά υλικά %κ.β.

T%	0	0	0	3	3
Γ%	2	3	4	2	3

Τα αποτελέσματα δίδονται στους Πίνακες 6.7 έως 6.14 και παρουσιάζονται γραφικά στα Σχ. 6.35 έως Σχ. 6.38 υπό μορφή μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας (Σχ. 6.35, Σχ. 6.36) ή της μεταβολής της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (Σχ. 6.37, Σχ.6.38) σε συνάρτηση με το ποσοστό του ασφαλτικού γαλακτώματος.

α) Μίγματα χωρίς τσιμέντο:

Πίνακας 6.7: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας, μίγμα 100%ΦΑ, T.=0%.

MPa	Γ.=2%		Γ.=3%		Γ.=4%	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	1801	1808	1756	1644	1383	1510
sd.	99.64	146.55	42.93	113.18	73.41	87.08
cv.%	5.53	8.10	2.45	6.88	5.31	5.77
t-test	Όχι	r/R=100.4%	Όχι	r/R=93.7%	Όχι	r/R=109.2%

Πίνακας 6.8: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, μίγμα 100%ΦΑ, T.=0%.

MPa	Γ.=2%		Γ.=3%		Γ.=4%	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	0.098	0.103	0.097	0.102	0.090	0.097
sd.	0.001314	0.003466	0.000077	0.003541	0.000544	0.001275
cv.%	1.35	3.37	0.08	3.49	0.61	1.31
t-test	Όχι	t/T=105.4%	Όχι	t/T=104.9%	Ναι	t/T=108.3%

Από τα δύο παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι ο υδρεμποτισμός δεν έχει επίδραση στο μίγμα 100%ΦΑ χωρίς τσιμέντο στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ούτε στην αντοχή.

Πίνακας 6.9: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας, μίγμα 50%ΦΑ, T.=0%.

MPa	Γ.=2%		Γ.=3%		Γ.=4%	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	1863	1800	1528	1619	1446	1530
sd.	97.14	83.23	92.61	56.33	51.26	63.93
cv.%	5.22	4.62	6.06	3.48	3.55	4.18
t-test	Όχι	r/R=96.6%	Όχι	r/R=105.9%	Όχι	r/R=100.4%

Πίνακας 6.10: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, μίγμα 50%ΦΑ, T.=0%.

MPa	Γ.=2%		Γ.=3%		Γ.=4%	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	0.096	0.101	0.088	0.099	0.088	0.096
sd.	0.000443	0.000449	0.000147	0.000389	0.000298	0.000363
cv.%	0.46	0.45	0.17	0.39	0.34	0.38
t-test	Ναι	t/T=105.2	Ναι	t/T=111.6%	Ναι	t/T=108.4%

Για τα μίγματα 50%ΦΑ χωρίς τσιμέντο, φαίνεται από τους πίνακες 6.9, 6.10 ότι ο υδρεμποτισμός δεν επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας, ενώ μεγαλώνει την αντοχή στατιστικώς σημαντικά. Επίσης φαίνεται από τους λόγους r/R , t/T ότι η ευαισθησία σε νερό έχει μεγαλύτερη τιμή όταν η ποσότητα του γαλακτώματος είναι $\Gamma=3\%$.

β) Μίγματα με τσιμέντο ($\Gamma=3\%$):

Οι πίνακες 6.11, 6.12 δείχνουν ότι, όταν τα μίγματα 100%ΦΑ περιέχουν τσιμέντο, ο υδρεμποτισμός ελαττώνει τη δυσκαμψία τους στατιστικώς σημαντικά, ενώ δεν επηρεάζει την αντοχή τους. Σχετικά με τους λόγους r/R , t/T δεν υπάρχει σημαντική επίδραση στη δυσκαμψία ούτε στην αντοχή. Επίσης η μεταβολή της ποσότητας του γαλακτώματος μεταξύ 2% έως 3% δεν έχει καμία επίδραση στην ευαισθησία των μιγμάτων σε νερό.

Πίνακας 6.11: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας, μίγμα 100%ΦΑ, $\Gamma=3\%$.

MPa	$\Gamma=2\%$		$\Gamma=3\%$	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	3654	3244	3018	2695
sd.	96.21	40.16	134.97	69.90
cv.%	2.63	1.24	4.47	2.59
t-test	Ναι	$r/R = 88.8\%$	Ναι	$r/R = 89.3$

Πίνακας 6.12: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, μίγμα 100%ΦΑ, $\Gamma=3\%$.

MPa	$\Gamma=2\%$		$\Gamma=3\%$	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	0.101	0.100	0.096	0.096
sd.	0.001890	0.001940	0.000683	0.000085
cv.%	1.88	1.94	0.71	0.09
t-test	Όχι	$t/T = 99.6\%$	Όχι	$t/T = 100.2\%$

Από τους πίνακες 6.13, 6.14 φαίνεται ότι ο υδρεμποτισμός ελαττώνει τη δυσκαμψία και την αντοχή των μιγμάτων 50%ΦΑ που περιέχουν τσιμέντο3%, και η ελάττωση αυτή είναι σημαντική στατιστικώς, εκτός από την περίπτωση $\Gamma = 3\%$ στην οποία ο υδρεμποτισμός δεν ελαττώνει την αντοχή στατιστικώς σημαντικά. Επίσης σχετικά με τους λόγους r/R , t/T φαίνεται ότι το μίγμα που περιέχει $\Gamma = 3\%$ δεν επηρεάζεται από το νερό.

Πίνακας 6.13: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας, μίγμα 50%ΦΑ, $T = 3\%$.

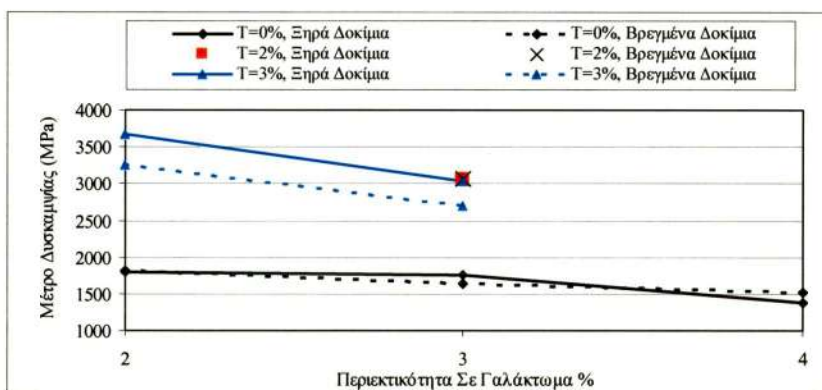
MPa	$\Gamma = 2\%$		$\Gamma = 3\%$	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	6882	5021	6130	4854
sd.	259.08	199.71	389.18	465.68
cv%	3.76	3.98	6.35	9.59
t-test	Ναι	$r/R = 73\%$	Ναι	$r/R = 79.2\%$

Πίνακας 6.14: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό, μίγμα 50%ΦΑ, $T = 3\%$.

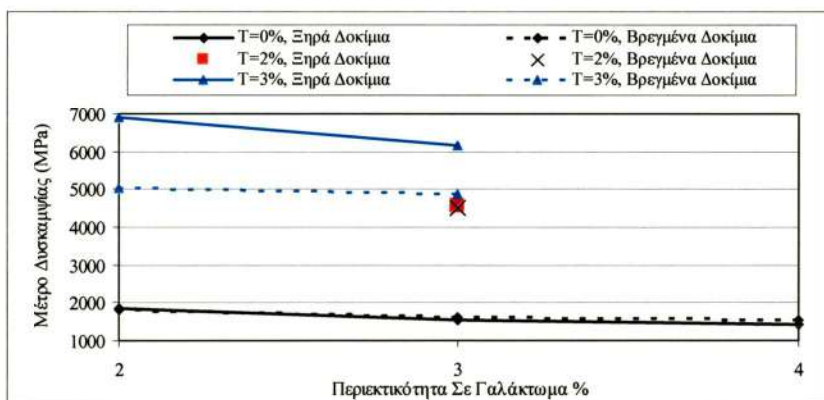
MPa	$\Gamma = 2\%$		$\Gamma = 3\%$	
	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)	στεγνά(R)	βρεγμένα(r)
$\bar{x}$	0.107	0.103	0.107	0.102
sd.	0.000348	0.000979	0.002607	0.000479
cv%	0.32	0.95	2.43	0.47
t-test	Ναι	$t/T = 96.0\%$	Όχι	$t/T = 94.8\%$

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα από Σχ. 6.35 έως Σχ. 6.38, τα οποία δείχνουν τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής με την περιεκτικότητα του ασφαλτικού γαλακτώματος και του τσιμέντου σε δύο περιπτώσεις ξηρά αδρανή και βρεγμένα αδρανή σε δύο μίγματα 100%ΦΑ και 50%ΦΑ.

Τα δύο σχήματα 6.35 και Σχ. 6.36 επιβεβαιώνουν τα προηγούμενα αποτελέσματα του παραγράφου 6.3, βλ. Σχ. 6.7 και Σχ. 6.8 διότι με την αύξηση της περιεκτικότητας του γαλακτώματος ελαττώνεται το μέτρο δυσκαμψίας. Επίσης τα δύο σχήματα Σχ. 6.35 και Σχ. 6.36 δείχνουν ότι η ευαισθησία σε νερό γίνεται πιο μεγάλη όταν το μίγμα περιέχει τσιμέντο έως 3%κβ, αλλά αυτό χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

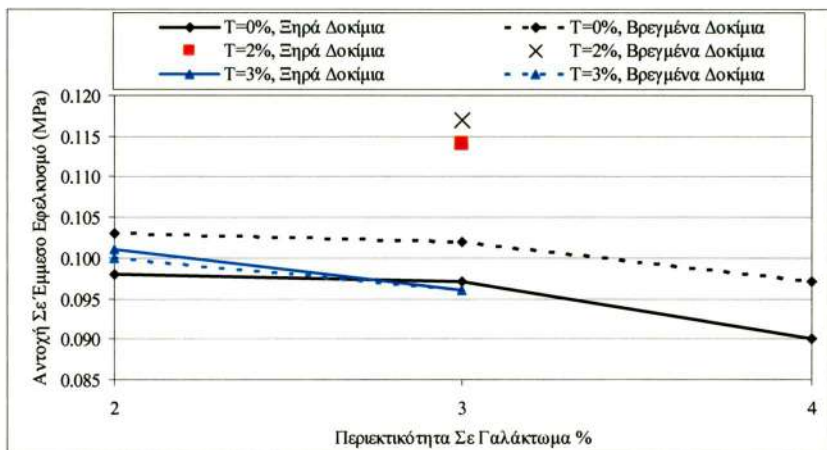


Σχήμα 6.35: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο (υλικό 100% ΦΑ)

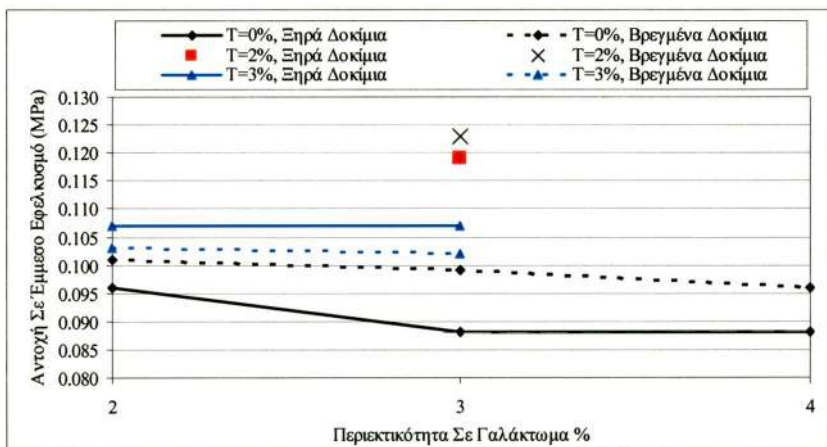


Σχήμα 6.36: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο (υλικό 50% ΦΑ)

Το Σχ. 6.37 δείχνει ότι ο υδρεμποτισμός μπορεί να αυξάνει την αντοχή των μιγμάτων που δεν περιέχουν τσιμέντο. Αυτό φαίνεται και στο Σχ. 6.38.



Σχήμα 6.37: Μεταβολή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο (υλικό 100% ΦΑ)



Σχήμα 6.38: Μεταβολή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό γαλάκτωμα και τσιμέντο (υλικό 50% ΦΑ).

Παρατηρείται :

1. Τόσο το μέτρο δυσκαμψίας όσο και η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού του ασφαλικού γαλακτώματος.
2. Για περιεκτικότητα σε τσιμέντο 0% παρατηρείται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας ή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με τον υδρεμποτισμό, συμπεράσμα το οποίο δεν διαφέρει από εκείνο της παραγράφου 6.7.1 για μίγματα με 50% ή 100% ΦΑ. Παρατηρείται όμως ότι (για $T=0\%$) τόσο το μέτρο δυσκαμψίας όσο και η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό είναι μεγαλύτερα μετά τον υδρεμποτισμό. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε ενδεχόμενη μείωση της θερμοκρασίας των δοκιμών που διατηρήθηκαν μέσα στο νερό και επομένως σε έμμεση επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας στην αντοχή και το μέτρο δυσκαμψίας.
3. Για περιεκτικότητα τσιμέντου 3% παρατηρείται μία ουσιαστική μείωση του μέτρου δυσκαμψίας αλλά όχι της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό μετά από υδρεμποτισμό. Αυτό δεν είναι σύμφωνο με τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου 3.7.1 που αφορούσαν μίγματα 50%ΦΑ και 100%ΦΑ με τσιμέντο 2% και γαλάκτωμα 3%. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα σχήματα 4.35 έως 4.38 ως μεμονωμένα σημεία ($X \square$). Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία δοκιμής των μιγμάτων αυτών ήταν πιο μικρή από τη θερμοκρασία της δοκιμής των μιγμάτων με 0% και 3% τσιμέντο περίπου 4°C . Δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμο το γεγονός ότι για 0% τσιμέντο και 2% τσιμέντο δεν παρουσιάζεται αξιόλογη μεταβολή ενώ για 3% τσιμέντο παρουσιάζεται πτώση στις τιμές μετά τον υδρεμποτισμό. Γενικά πτώση στην αντοχή και στο μέτρο δυσκαμψίας παρατηρείται σε πολλά υλικά σταθεροποιημένα ή κατεργασμένα με τσιμέντο και για τον λόγο αυτό υπάρχουν και αντίστοιχες απαιτήσεις στις Προδιαγραφές των υλικών αυτών ως προς την πτώση της αντοχής. Είναι φανερό ότι χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να αναλυθεί το θέμα αυτό αλλά δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αυτό στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής εργασίας.
4. Οι λόγοι t/R και t/T των μέτρων δυσκαμψίας και των αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό σε ξηρή και σε κορεσμένη κατάσταση αντίστοιχα (Πίνακες 6.7 - 6.14) δεν είναι μικρότεροι από 0.75 σε όλες τις περιπτώσεις για την αντοχή ενώ για το μέτρο δυσκαμψίας σε μία περίπτωση μόνο (50%ΦΑ, $T=3\%$, $\Gamma=2\%$) ο λόγος έχει τιμή οριακά μικρότερη 0.73.

5. Γενικά ο λόγος r/R των μέτρων δυσκαμψίας είναι πιο ευαίσθητος στον υδρεμποτισμό από τον λόγο U/T , γεγονός που αποδίδεται στο ότι η επίδραση του νερού στους συνδέσμους που πραγματοποιούν το τσιμέντο και η ασφαλτος (από το γαλάκτωμα) προκαλεί κάποια χαλάρωση ώστε να επιτρέπουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις κάτω από το ίδιο φορτίο, ενώ η αντοχή παρουσιάζει πολύ μικρότερη ή ασήμαντη μείωση. Αυτό υποδεικνύει ότι θα έπρεπε να εξετασθεί η επίδραση του νερού για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια για να διαπιστωθεί αν η μεγαλύτερη διάρκεια υδρεμποτισμού (κορεσμού) δεν έχει σημαντικότερες επιπτώσεις στην αντοχή.

6.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου αυτού συμπεραίνεται κατ'αρχήν ότι:

1. Για τις διαβαθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν το βέλτιστο ποσοστό συνολικών υγρών για συμπίκνωση είναι 6%. Με το ποσοστό αυτό επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη πυκνότητα, η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας, και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμού.
2. Για τα μίγματα με 50%ΦΑ αύξηση της μέγιστης διάστασης αδρανούς από 12.5mm σε 19mm, έχει ως συνέπεια την αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, αλλά και την αύξηση της μεταβλητότητας στις δοκιμές αυτές.
3. Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό για όλα τα εξετασθέντα μίγματα. Το μίγμα που δεν περιείχε ΦΑ έδειξε την μικρότερη εξάρτηση.
4. Όσο αυξάνεται το ποσοστό ΦΑ στο μίγμα τόσο ελαττώνεται η αντοχή και το μέτρο δυσκαμψίας και ο λόγος του μέτρου δυσκαμψίας προς την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό S/ITS γεγονός που δείχνει ότι το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται ταχύτερα από την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.
5. Η αύξηση της περιεκτικότητας του γαλακτώματος στα μίγματα που περιέχουν ΦΑ ελαττώνει τη δράση του τσιμέντου.
6. Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος στο μίγμα 0%ΦΑ αυξάνεται με την ελάττωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου.

7. Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού του ασφαλτικού γαλακτώματος όταν συνδυάζεται ή δε συνδυάζεται με τσιμέντο, βρέθηκαν τα ακόλουθα αποτελέσματα ανάλογα με τη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας και την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό:

-α) Μίγματα χωρίς τσιμέντο $T=0\%$:

100%ΦΑ $\Gamma.=2\%$

50%ΦΑ $\Gamma.=2\%$

0%ΦΑ $\Gamma.> 4\%$. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται με άλλες έρευνες σε ανακυκλωμένα μίγματα (PIARC, 2002), (Kanno et al, 2001), (Lewis, 1999), και σε ψυχρά ασφαλτομίγματα (Νικολαΐδης, 1997).

-β) Μίγματα με τσιμέντο (μικρό ποσοστό $T=2\%$):

100%ΦΑ $\Gamma.=2\%$

50%ΦΑ $\Gamma.=2\% - 3\%$

0%ΦΑ $\Gamma.=2\% - 3\%$

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται με άλλες έρευνες (PIARC, 2002), (Wirtgen, 1998).

-γ) Μίγματα με τσιμέντο (μεγάλο ποσοστό $T=3\%-4\%$):

100%ΦΑ $\Gamma.=2\%$

50%ΦΑ $\Gamma.=2\%$

0%ΦΑ $\Gamma.=2\% - 3\%$

8. Τόσο το μέτρο δυσκαμψίας όσο και η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού του ασφαλτικού γαλακτώματος. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου 6.3 και επιβεβαιώνουν και συμπληρώνουν το συμπέρασμα που εξήχθη κατά το ότι η αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος μειώνει τα μεγέθη αυτά είτε πρόκειται για δοκιμές με ξηρά δοκίμια, είτε για δοκιμές μετά από υδρεμποτισμό.
9. Για περιεκτικότητα σε τσιμέντο 0% παρατηρείται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας ή της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό με τον υδρεμποτισμό.

10. Οι λόγοι r/R και t/T των μέτρων δυσκαμψίας και των αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό σε κορεσμένη και σε ξηρή κατάσταση αντίστοιχα, είναι μέσα στα όρια αποδεχτής των προδιαγραφών (PIARC, 2002).
11. Γενικά ο λόγος r/R των μέτρων δυσκαμψίας είναι πιο ευαίσθητος στον υδρεμποτισμό από τον λόγο t/T .
12. Σε υδρεμποτισμό δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των μίγμάτων 50%ΦΑ και 100%ΦΑ όταν δεν περιέχουν τσιμέντο.
13. Σε υδρεμποτισμό το προτεινόμενο ποσοστό γαλακτώματος στα μίγματα 50%ΦΑ και 100%ΦΑ είναι 3% είτε έχουν τσιμέντο είτε δεν έχουν τσιμέντο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεράσματα θα μπορούσε να βρεθεί ένα βέλτιστος συνδυασμός τσιμέντου και γαλακτώματος, που επιτυγχάνει μέγιστες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε διάρρηξη ενώ ταυτόχρονα να μην παρουσιάζει ευαισθησία σε υδρεμποτισμό όπως:

- ο Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος ανάλογα με τις τιμές των λογίων r/R και t/T σε υδρεμποτισμό είναι:
 - α) για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο:
 - Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
 - Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 3\%$.
 - β) για τα μίγματα με τσιμέντο:
 - Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
 - Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.

Πιστεύεται ότι η παρούσα ερευνητική εργασία δεν εξάντλησε το θέμα της επιλογής του βέλτιστου συνδυασμού ποσοστών τσιμέντου και γαλακτώματος και ότι θα απαιτηθεί ευρύτερη διερεύνηση του θέματος σε συνδυασμό με παρατηρήσεις της συμπεριφοράς δοκιμαστικών τμημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -7-

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

7.1. ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

Η άσφαλτος είναι ιξο-ελαστικό υλικό και η ελαστική ή ιξώδης συμπεριφορά της εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον χρόνο φόρτισης . Ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης (σ) προς την συνεπαγόμενη ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ) για δεδομένη θερμοκρασία και δεδομένο χρόνο φόρτισης ορίστηκε από τον Van der Poel ως μέτρο

$$\text{δυσκαμψίας } S_{(t,\theta)} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Όπου:}$$

t: είναι ο χρόνος φόρτισης.

θ : είναι η θερμοκρασία της ασφάλτου

Το Μέτρο Δυσκαμψίας είναι ένα μέγεθος ανάλογο του μέτρου ελαστικότητας των απολύτως ελαστικών υλικών (μέτρο Young), ή υλικών με σχεδόν ελαστική συμπεριφορά (πχ. σκυρόδεμα) με τη διαφορά ότι ορίζεται για δεδομένη θερμοκρασία και δεδομένο χρόνο φόρτισης. Η παραπάνω σχέση υποδεικνύει ότι αν χρησιμοποιηθεί άλλος χρόνος φόρτισης (t_1) ή άλλη θερμοκρασία (θ_1) τότε θα μετρηθεί και διαφορετικός λόγος σ/ϵ . Η απλοποιημένη αυτή θεώρηση της συμπεριφοράς της ασφάλτου έχει μεγάλη σημασία για τις συνήθεις εφαρμογές πολιτικού μηχανικού στον υπολογισμό των οδοστρωμάτων και τη μελέτη σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων (Brown, 1978), (Jackson and Ravindra, 1996).

Στο Σχ. 7.1 παρουσιάζεται η εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Για πολύ μικρούς χρόνους φόρτισης ή/και χαμηλές θερμοκρασίες οι καμπύλες είναι οριζόντιες γεγονός που υποδηλώνει "ελαστική συμπεριφορά", ενώ για πολύ μεγάλους χρόνους φόρτισης το μέτρο δυσκαμψίας S δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{3\eta}{t}$$

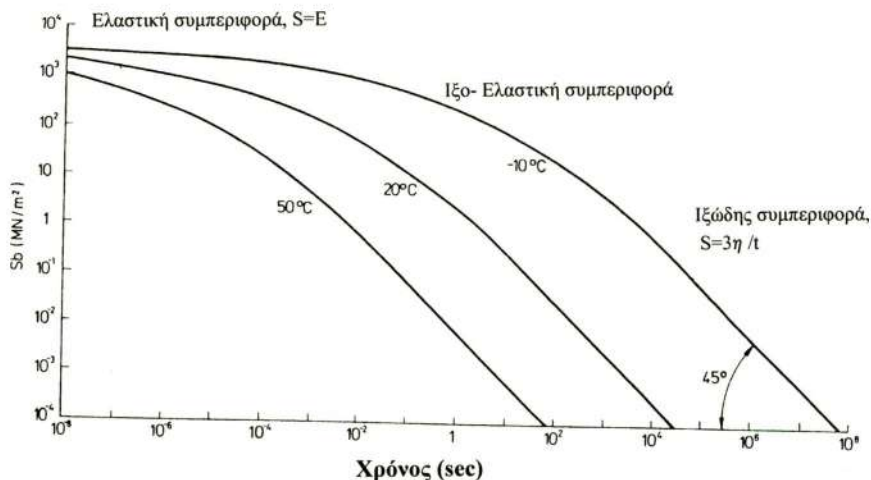
Όπου:

H: είναι το δυναμικό ιξώδες.

T: ο χρόνος φόρτισης.

Η σχέση αυτή είναι ενδεικτική της τελείως ιξώδους συμπεριφοράς που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των υγρών υλικών. Για χρόνους φόρτισης με ενδιάμεσες τιμές η συμπεριφορά του υλικού είναι ιξο-ελαστική (καμπυλόγραμμος κλάδος), που χαρακτηρίζεται από παραμόρφωση στην οποία σημαντικό μέρος έχει τόσο η ελαστική όσο και η ιξώδης παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά των ιξο-ελαστικών υλικών "περιγράφεται" ακριβέστερα από το Σύνθετο Μέτρο Δυσκαμψίας και την εξάρτησή του από τη θερμοκρασία και τον χρόνο φόρτισης. Η μέτρηση όμως του Σύνθετου Μέτρου Δυσκαμψίας απαιτεί μηχανές δοκιμής με μεγάλες δυνατότητες φόρτισης και μέτρησης των παραμορφώσεων.



Σχήμα 7.1: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου με το χρόνο και θερμοκρασία (Brown, 1978)

Στο Σχ. 7.1 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας. Γίνεται επίσης φανερό ότι υπάρχει μία συσχέτιση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της επίδρασης του χρόνου φόρτισης δηλ. μία δεδομένη μεταβολή της θερμοκρασίας συνεπάγεται ορισμένη μεταβολή στο μέτρο δυσκαμψίας η οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί με σταθερή θερμοκρασία αλλά με ανάλογη μεταβολή του χρόνου φόρτισης. Αυτή η δυνατότητα "αμοιβαίας αντικαταστάσεως" είναι μία σημαντική ιδιότητα των ασφαλικών συνδετικών υλικών που τα κατατάσσει στα "θερμορολογικά απλά" υλικά.

Στα οδοστρώματα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στα ασφαλτομίγματα και την συμπεριφορά τους κάτω από συνθήκες φόρτισης που προσεγγίζουν τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης που επιβάλλει η κυκλοφορία των εμπορικών οχημάτων. Για τον λόγο αυτό είναι επόμενο να υπάρχει ανάγκη εκτίμησης του μέτρου δυσκαμψίας κάποιου ασφαλτομίγματος από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλικού συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται και από τις αναλογίες σύνθεσης του ασφαλτομίγματος.

Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος εξαρτάται από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλικού συνδετικού υλικού και από τον βαθμό "συγκέντρωσης" των αδρανών στο μίγμα που ορίζεται (Van der Poel) από τη σχέση:

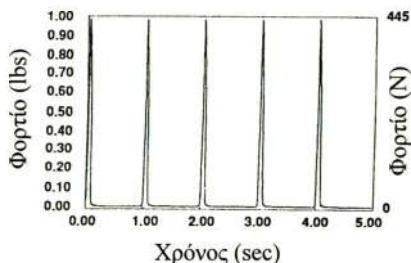
$$C_v = \frac{\text{Όγκος_αδρανών}}{\text{Όγκος_αδρανών} + \text{Όγκος_ασφάλτου}}$$

7.2. ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΤΑΞΗΣ (μέτρο ελαστικής συμπεριφοράς)

Το Σχ. 7.2 παρουσιάζει την συμπεριφορά πολλών υλικών συνδεδεμένων με κάποιο συνδετικό υλικό (άσφαλτος ή υδραυλικές κονίες ή ασβέστης) υπό επαναλαμβανόμενο φορτίο του οποίου η ένταση είναι κατά πολύ μικρότερη εκείνης που θα προκαλέσει αστοχία του υλικού.

Μέτρο Επανάταξης (M_r) ορίζεται ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης (σ_d) προς την αναίρεσιμη ανηγμένη παραμόρφωση, η οποία μετράται μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα αφού ανααιρεθεί το φορτίο βλ. Σχ.7.3.

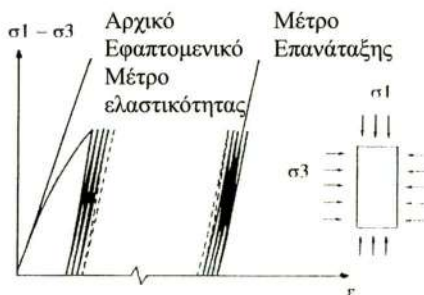
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$



Σχήμα 7.3: Επιβαλλόμενο φορτίο σε σχέση με τον χρόνο (Fairhurst, 1990)

Όπου η επιβαλλόμενη σ_d τάση μπορεί να είναι η αξονική επιβαλλόμενη τάση σε περίπτωση μονοαξονικής φόρτισης ή η αξονική επιβαλλόμενη τάση επιπλέον της πλευρικής επιβαλλόμενης τάσης σε περίπτωση τριαξονικής δοκιμής βλ. Σχ. 7.4.

Η τιμή του μέτρου επανάταξης μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του υπό εξέταση υλικού, με το επίπεδο της φόρτισης, τον χρόνο φόρτισης, τον χρόνο που μεσολαβεί από την ανάφραση του φορτίου μέχρι τη μέτρηση της παραμόρφωσης, και τη θερμοκρασία κλπ.



Σχήμα 7.4: Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στην τριαξονική δοκιμή. Μέτρο επανάταξης (Mamlouk, 1988).

7.3 ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε και βρήκε ευρύτατη εφαρμογή η μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων με τη δοκιμή σε έμμεσο εφελκυσμό κυλινδρικών δοκιμίων τα οποία είτε παρασκευάζονται στο εργαστήριο είτε είναι αποκοπέντες πυρήνες από ασφατικές στρώσεις από οδοστρώματα σε λειτουργία.

Η αρχή της δοκιμής παρουσιάζεται στο Σχ. 7.5. (Chatti and El Mohtar, 2004), (Benedetto et al, 1998), (Fairhurst, 1990), (Bonvino, 1990). Σύμφωνα με αυτή ένα κυλινδρικό δοκίμιο ή πυρήνας που έχει αποκοπεί από οδόστρωμα φορτίζεται σε θλίψη κατά δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες και μετράται η εφελκυστική παραμόρφωση της διαμέτρου του δοκιμίου (D) που ευρίσκεται στο κάθετο επίπεδο προς το επίπεδο του φορτίου. Θεωρώντας τη συμπεριφορά του υλικού ως ελαστική το μέτρο δυσκαμψίας/ ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{L}{(D \times t)} \times (\nu + 0.27)$$

Όπου:

L : είναι το μέγιστο φορτίο που επέβαλλε η μηχανή [kN]

D : είναι η μέγιστη μετρηθείσα παραμόρφωση της διαμέτρου του δοκιμίου που είναι σε ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο επιβολής του φορτίου

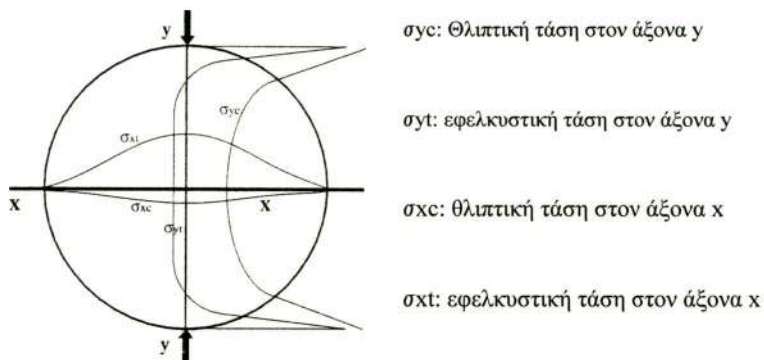
t : είναι το πάχος του δοκιμίου

ν : είναι ο λόγος του Poisson στη θερμοκρασία της δοκιμής που συνήθως λαμβάνεται από προηγούμενες μετρήσεις. Υπάρχει η δυνατότητα με χρήση κατάλληλης διάταξης μέτρησης παραμορφώσεων να υπολογιστεί ο λόγος του Poisson κατά την εκτέλεση της δοκιμής

Η δοκιμή έχει πολλά πλεονεκτήματα τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι:

- το υλικό δοκιμάζεται σε εφελκυσμό που είναι η κρίσιμη φόρτιση για τα ασφαλτομίγματα
- η δοκιμή είναι εύκολη και γρήγορη
- μπορεί να χρησιμοποιηθούν πυρήνες που αποκόπτονται από οδοστρώματα σε λειτουργία και να περιλαμβάνει το υλικό μόνο μιας στρώσεως.

- είναι μη καταστροφική δοκιμή, έτσι το ίδιο δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές δοκιμές υπό διαφορετικά φορτία και διαφορετικές περιβαλλοντικές περιπτώσεις (Yang H. Huang, 1993).



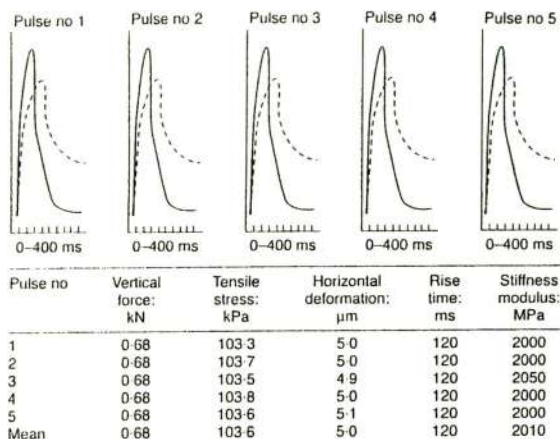
Σχήμα 7.5: Οι τάσεις που δημιουργούνται στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (γραμμική ελαστική θεώρηση) (Chattii and El Mohtar, 2004).

Υπάρχουν διάφορες μηχανές δοκιμής για τη μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη από σύνθετες υδραυλικές μηχανές με σερβο-μηχανισμό και ηλεκτρονικό μηχανισμό ελέγχου και αυτόματης διόρθωσης της διαδικασίας φόρτισης μέχρι απλούστερες μηχανές με φόρτιση με πεπιεσμένο αέρα.

Στην ερευνητική αυτή εργασία χρησιμοποιήθηκε μηχανή του δεύτερου τύπου γνωστή ως NAT (Nottingham Asphalt Tester). Παρακάτω γίνεται μία περιληπτική περιγραφή των διαδικασιών της δοκιμής

Ο χειριστής της μηχανής επιλέγει την επιδιωκόμενη οριζόντια παραμόρφωση και την επιδιωκόμενο χρόνο φόρτισης (από μηδενικό φορτίο μέχρι το μέγιστο). Στη συνέχεια υπολογίζεται με βάση αυτά τα δεδομένα με την βοήθεια ενσωματωμένου λογισμικού το μέγεθος του απαιτούμενου φορτίου και επιβάλλονται στο δοκίμιο 5 προφορτίσεις. Οι προφορτίσεις αυτές έχουν σκοπό να ελέγξουν και να διορθώσουν το μέγεθος του φορτίου έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιδιωκόμενη παραμόρφωση μέσα στο δοθέντα χρόνο φόρτισης και να επιφέρουν τη καλύτερη δυνατή επαφή των μεταλλικών λωρίδων φόρτισης. Ακολουθούν 5 φορτίσεις κατά την διάρκεια των οποίων

καταγράφεται το φορτίο που επιβάλλεται και οι παραμορφώσεις στο διαμετρικό επίπεδο του δοκιμίου που είναι κάθετο προς το επίπεδο της φόρτισης βλ. Σχ. 7.6. Με γνωστή τη διάμετρο και το ύψος του δοκιμίου καθώς και το μέγιστο φορτίο και την μέγιστη παραμόρφωση υπολογίζονται μέσω του λογισμικού της μηχανής η επιβληθείσα τάση η μετρήθαισα ανηγμένη παραμόρφωση και τελικά το μέτρο δυσκαμψίας. Το Σχ. 7.6 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα της δοκιμής αυτής. (Read and Whiteoak, 2003).



Σχήμα 7.6: Τυπικά αποτελέσματα της δοκιμής προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό (Read and Whiteoak, 2003)

Οι απαιτήσεις για τις δοκιμές μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό (αντιδιαμετρική θλίψη) είναι:

- Διαμετρική ανηγμένη παραμόρφωση $5 \pm 2 \mu\text{m} = 0.005\%$ της διαμέτρου του δοκιμίου
- Χρόνος φόρτισης (από 0 έως max Φορτίο) $124 \pm 4 \text{ ms}$ που ισοδυναμεί με συχνότητα φόρτισης 1.33Hz.

Τα δοκίμια που συνήθως χρησιμοποιούνται έχουν διάμετρο 100mm, 150mm και 200mm

Το πάχος/ύψος του δοκιμίου είναι 30mm έως 70mm

Η δοκιμή εκτελείται συνήθως στους 20°C αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες θερμοκρασίες.

7.4. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

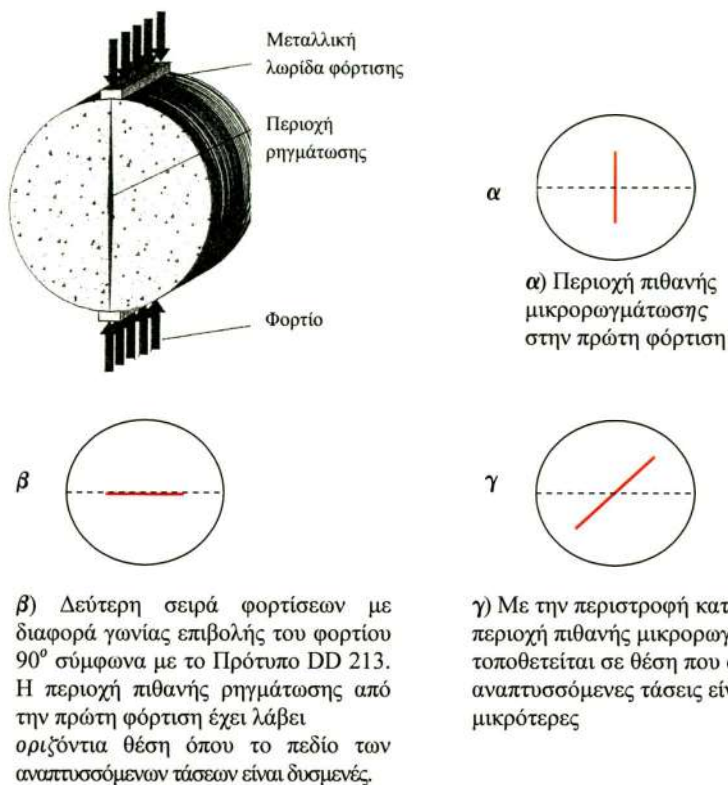
Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας με τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) είναι οι ακόλουθοι (Widyatmoko, 2002):

- Προφορτίσεις
- Χρόνος φόρτισης
- Διαμετρική παραμόρφωση
- Διαστάσεις δοκιμίων
- Μέγιστη δυνατότητα φόρτισης της μηχανής
- Σχήμα της καμπύλης φόρτισης
- Συντελεστής επιφάνειας φόρτισης

Υπάρχει άλλες παράγοντες που μπορούν να επηρεάζουν του μέτρου δυσκαμψίας (Κόλιας et al, 1995):

- Θερμοκρασία δοκιμής βλ. παράγραφο 6.6.
- Διείσδυση: Ο βαθμός διείσδυσης (pen) της ασφάλτου εκφράζει έμμεσα το ιξώδες του υλικού για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μεγαλύτερος βαθμός διείσδυσης αντιστοιχεί σε μικρότερο ιξώδες της ασφάλτου και επομένως σε μικρότερη δυσκαμψία του ασφαλομίγματος.
- Κοκκομετρική Διαβάθμιση .

Στη ερευνητική αυτή εργασία πολλά από τα δοκίμια που εξετάστηκαν περιείχαν τσιμέντο γεγονός που περιόριζε την δυνατότητα παραμόρφωσης αυτών και επομένως σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλης δυσκαμψίας η επιβολή διαμετρικής παραμόρφωσης 5mm προκαλούσε κίνδυνο δημιουργίας μικρορωγμών βλ. Σχ. 7.7-α. Για τον λόγο αυτό η δεύτερη σειρά φορτίσεων που πραγματοποιείται στα δοκίμια με διαφορά γωνίας επιβολής του φορτίου 90° σύμφωνα με το Πρότυπο DD 213:1993, βλ Σχ. 7.7-β, τροποποιήθηκε και πραγματοποιήθηκε με γωνία 45° βλ Σχ. 7.7-γ, σε μία προσπάθεια περιορισμού της επιρροής της περιοχής στην οποία μπορεί να έχουν δημιουργηθεί μικρορωγμές στα αποτελέσματα της δεύτερης σειράς φορτίσεων.



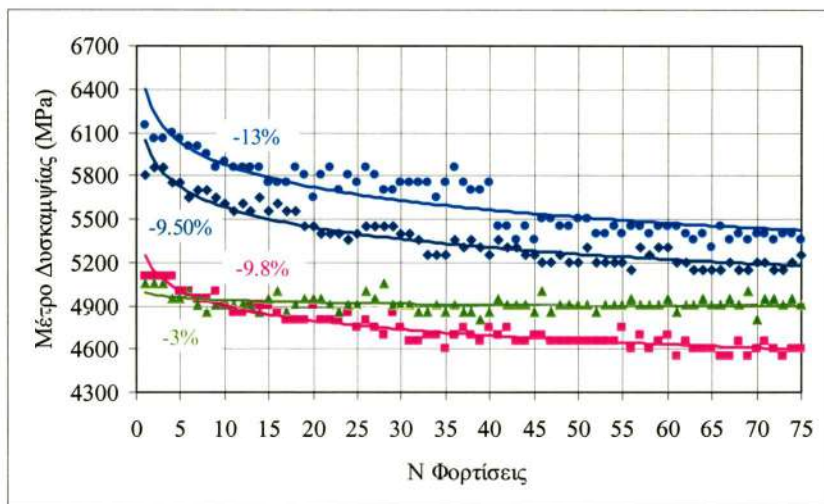
Σχήμα 7.7: Σχολιασμός των συνεπειών της πρώτης φόρτισης σε σχέση με τη κατεύθυνση της δεύτερης φόρτισης.

Στην έρευνα αυτή η δοκιμή ITSM πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή DD 213, επειδή η δοκιμή αυτή αποτελεί την σημαντικότερη δοκιμή της ερευνητικής αυτής εργασίας, αποφασίστηκε να γίνει μία διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας σε μία προσπάθεια διεύρυνσης της κατανόησης των χαρακτηριστικών της δοκιμής για να διευκολυνθεί η ανάλυση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

7.5. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ITSM

Η δοκιμή του μέτρου δυσκαμψίας είναι μην καταστροφική δοκιμή, και για τον λόγο αυτό ήταν δυνατόν να γίνουν μετρήσεις δυσκαμψίας των ίδιων δοκιμίων στις διαφορετικές ηλικίες, (βλ. Σχ. 5.7). Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών παρατηρήθηκε ότι συχνά η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ελαττώνεται με κάθε επανάληψη δοκιμής. Η ελάττωση αυτή είναι μέσα στο εύρος της αποδεκτής επαναληψιμότητας του +10%, -20% (BSI. DD 213-1993), και στατιστικά δεν είναι σημαντική, αλλά παρέχει μια ένδειξη ότι η επαναληψιμότητα της δοκιμής αυτής δεν είναι σταθερή. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να διερευνηθεί η επίδραση του αριθμού των φορτίσεων στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας.

Για τον έλεγχο αυτό δύο δοκίμια από το μίγμα 50%ΦΑ δοκιμάστηκαν 15 φορές σε κάθε διεύθυνση συνεχώς, δηλ. έγιναν 75 φορτίσεις (κάθε μέτρηση αποτελείται από 5 φορτίσεις). Αν ληφθεί υπόψη ότι σε κάθε μέτρηση προηγούνται 5 προφορτίσεις τότε οι πραγματικές φορτίσεις ανήλθαν σε 150 σε κάθε διεύθυνση. Το Σχ. 7.8 δείχνει τις μετρήσεις για κάθε δοκίμιο σε δύο διευθύνσεις.

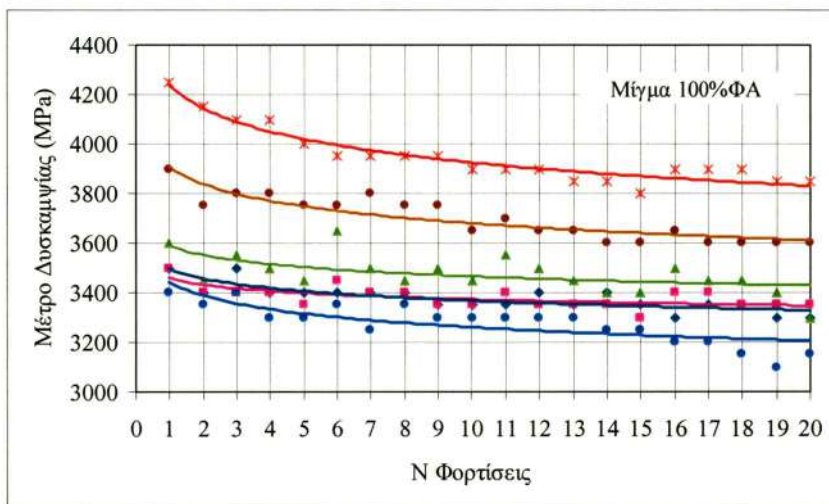


Σχήμα 7.8: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων

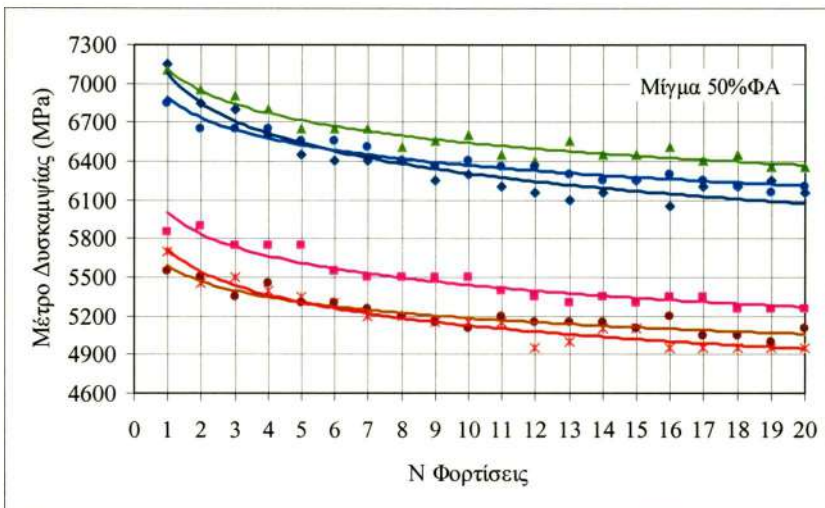
Στο Σχ. 7.8 φαίνεται ότι υπάρχει σαφής ελάττωση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων η οποία όμως είναι μικρότερη από 20% της

αρχικής τιμής εντός δηλ. των ορίων επαναληψιμότητας της δοκιμής αυτής σύμφωνα με το σχέδιο Προτύπου BSI. DD 213-1993. Η ελάττωση αυτή γίνεται γρήγορα στην αρχή και μετά ο ρυθμός μείωσης γίνεται σχεδόν σταθερός.

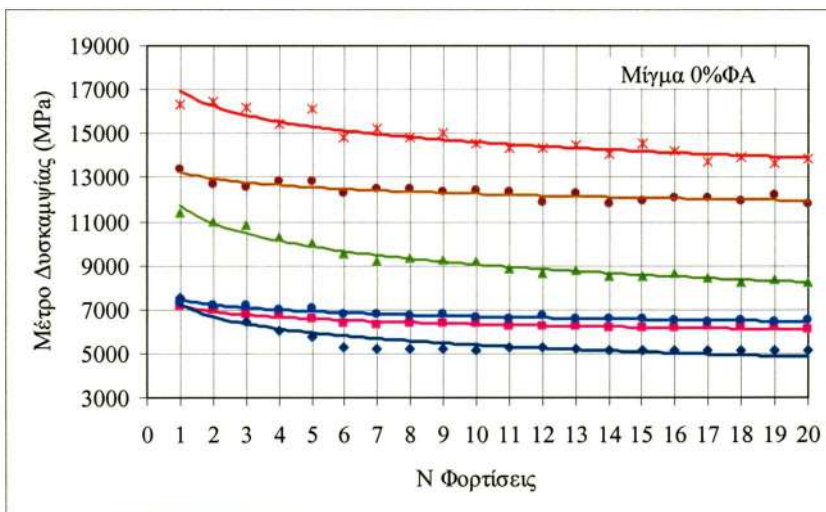
Ο έλεγχος αυτός επαναλήφθηκε με όλα τα είδη αδρανών 0%ΦΑ, 50%ΦΑ, 100%ΦΑ, με 2% τσιμέντο και 2% γαλάκτωμα, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχ. 7.9 έως Σχ. 7.11.



Σχήμα 7.9: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων.
Μίγμα 100%ΦΑ.



Σχήμα 7.10: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων.
Μίγμα 50%ΦΑ.



Σχήμα 7.11: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων.
Μίγμα 0%ΦΑ.

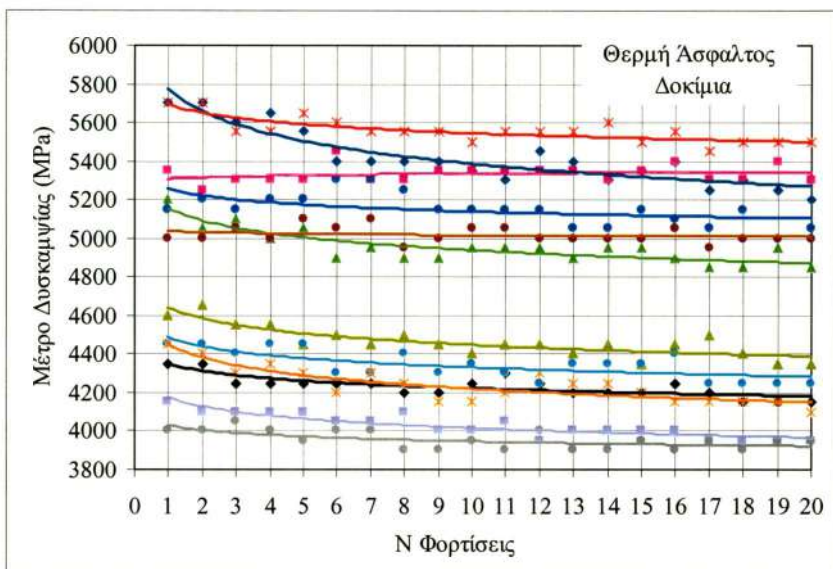
Και τα τρία παραπάνω σχήματα δείχνουν μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής τα αδρανή καταρχύν (αλλάζουν ελαφρώς τη θέση τους) μικρομετακινούνται γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της παραμόρφωσης και ελάττωση της δυσκαμψίας. Σταδιακά με την αύξηση του αριθμού των φορτίσεων τα αδρανή έρχονται σε καλύτερη επαφή μεταξύ τους, γεγονός που τους δίνει μεγαλύτερη σταθερότητα και οδηγεί σε σταθερή τιμή της δυσκαμψίας. Στο 7.11 μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο μίγμα 0%ΦΑ η αρχική ελάττωση δεν είναι τόσο μεγάλη όσο είναι στα μίγματα που περιέχουν αδρανή ΦΑ. Αυτό παρέχει μια ένδειξη ότι μπορεί η δοκιμή αυτή να επηρεάζεται από τα αδρανή ΦΑ, επειδή το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα αποτελείται κυρίως από αδρανή υλικά, πλήρως ή μερικώς περιβεβλημένα με άσφαλτο, από συσσωματώματα λεπτών αδρανών υλικών με άσφαλτο (ασφαλτικό κονίαμα) καθώς και από συνδυασμό των δύο παραπάνω υλικών. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής ενδέχεται να σπάσουν τα συσσωματώματα αυτά, και να εμφανίσουν μικρές ρωγμές που αυξάνουν την παραμόρφωση με αποτέλεσμα οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας να είναι μικρότερες.

Για την επιβεβαίωση της υπόθεσης αυτής κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν:

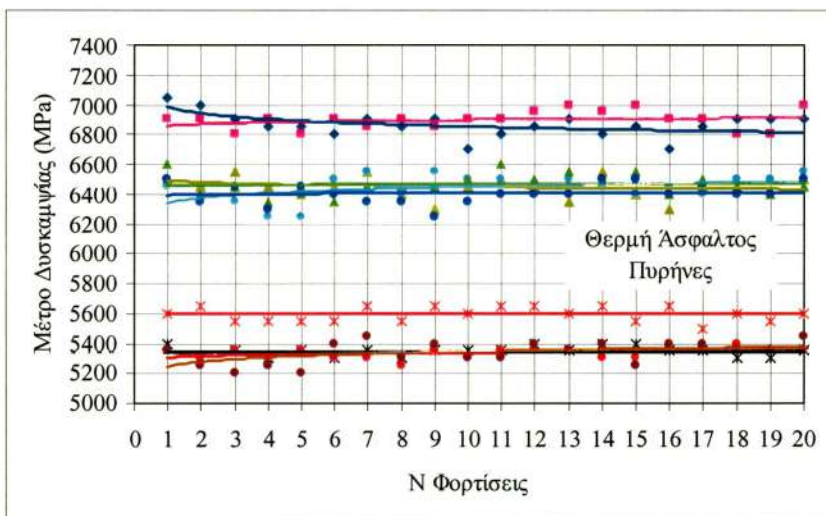
- ο Δοκιμές με δοκίμια από κοινά ασφαλτομίγματα.
- ο Έλεγχος της αναπτυσσόμενης τάσης που δημιουργείται στη δοκιμή ITSM, εάν είναι πιο μεγάλη από την αντοχή των δοκιμίων που περιέχουν αδρανή ΦΑ.

7.5.1. Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας θερμών ασφαλτομιγμάτων με τον αριθμό των επαναλήψεων των φορτίσεων

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε σε δύο είδη δοκιμίων: εργαστηριακά δοκίμια Marshall και πυρήνες που είχαν αποκοπεί από υπάρχοντα οδοστρώματα, βλ. Σχ. 7.12 και Σχ. 7.13.



Σχήμα 7.12: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων.
Εργαστηριακά δοκίμια από θερμό ασφαλτόμγμα



Σχήμα 7.13: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων.
Θερμό ασφαλτόμγμα πυρήνες.

Οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των κοινών ασφαλομιγμάτων στα δύο σχήματα Σχ. 7.12 και Σχ. 7.13 είναι σχεδόν σταθερές, αλλά μπορεί να παρατηρηθεί μια μικρή αρχική ελάττωση όταν τα δοκίμια είναι εργαστηριακά. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να εξαχθούν δύο συμπεράσματα:

- ο Οι πυρήνες από θερμά κοινά ασφαλομίγματα έχουν συμπεκνωθεί στο οδόστρωμα με την κυκλοφορία καλύτερα από τα άλλα δοκίμια που έχουν συμπεκνωθεί στο εργαστήριο. Αυτό σημαίνει ότι τα αδρανή μέσα στους πυρήνες είναι πιο κοντά ένα στο άλλο και πιο σταθερά. Ενώ στα δοκίμια που έχουν παρασκευαστεί στο εργαστήριο τα αδρανή έχουν δυνατότητα να πραγματοποιήσουν μικρομετακινήσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής ITSM γεγονός που αυξάνει την παραμόρφωση και ελαττώνει την τιμή του μέτρου δυσκαμψίας.
- ο Η επαναληψιμότητα της δοκιμής ITSM στα κοινά ασφαλομίγματα είναι πιο καλή από εκείνη των ανακυκλωμένων ασφαλομιγμάτων. Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε δύο λόγους α) η θερμή άσφαλτος είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη γύρω από τα αδρανή και τα συνδέει με ισχυρότερους και πιο ομοιόμορφους δεσμούς. β) τα αδρανή των δοκιμών που περιέχουν ΦΑ δεν είναι τόσο σταθερά όσο είναι στα δοκίμια που αποτελούνται από κοινά ασφαλομίγματα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί δύο αιτίες: I. είτε τα αδρανή ΦΑ θραύονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. II. είτε απλά μετακινούνται λόγω της ελλιπούς σύνδεσής τους που τους παρέχει το γαλάκτωμα. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί με τη σύγκριση της αντοχής των ανακυκλωμένων μιγμάτων με την μέγιστη τάση που αναπτύσσεται κατά τη δοκιμή ITSM.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο αυτό της μείωσης της τιμής του Μέτρου Δυσκαμψίας με τον αριθμό των φορτίσεων έχει παρατηρηθεί και στη μέτρηση του Σύνθετου Μέτρου Δυσκαμψίας θερμών ασφαλομιγμάτων (Neifar and Di Benedetto, 2002) και αποδίδεται σε αύξηση της θερμοκρασίας και στις θιζοτροπικές ιδιότητες της ασφάλτου. Επίσης το ίδιο φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε ανακυκλωμένα μίγματα με γαλάκτωμα και με ή χωρίς τσιμέντο στη μέτρηση του Σύνθετου Μέτρου Δυσκαμψίας που έγιναν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ (Σεγρεδάκης, 2001)

7.5.2. Σύγκριση της τάσης που αναπτύσσεται στη δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό με την τιμή της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε σε μερικά δοκίμια (από την δοκιμή βέλτιστης ποσότητας του συνδυασμού τσιμέντου και ασφαλικού γαλακτώματος), τα οποία αποτελούνται από 50%ΦΑ, 50%ΘΑ, T= 2%, Γ= 2%. Τα δοκίμια αυτά δοκιμάστηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας (δοκιμή ITSM), και ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών των τάσεων που αναπτύχθηκαν παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1. Από το ίδιο μίγμα παρασκευάστηκαν 6 δοκίμια για να μετρηθεί η έμμεση εφελκυστική αντοχή τους σε μια θλιπτική συσκευή που έχει δυνατότητα να εφαρμόσει την ίδια ταχύτητα παραμόρφωσης με εκείνη της δοκιμής ITSM που είναι $120 \text{ msec}/5\mu\text{m} = 2.5 \text{ mm}/\text{min}$, ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών, και ο μέσος όρος των αντοχών παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακα 7.1: Σύγκριση την αντοχή των δοκιμών ITS, με την τάση που δημιουργείται στη δοκιμή ITSM

Η τάση στη ITSM "NAT"	ITS "θλιπτική συσκευή"
2.5 mm/min	2.5 mm/min
0.278 (MPa)	0.452(MPa)

Ο Πίνακας 7.1 δείχνει ότι με την ίδια ταχύτητα παραμόρφωσης $2.5\text{mm}/\text{min}$, η αντοχή των δοκιμών είναι πιο μεγάλη από την μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσεται στη δοκιμή μέτρου δυσκαμψίας στη συσκευή NAT. Ετσι συμπεραίνεται ότι η δοκιμή ITSM δεν δημιουργεί ρωγμές στα δοκίμια κατά τη διάρκεια της δοκιμής του μέτρου δυσκαμψίας. Η ελάττωση επομένως στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας λόγω των επαναλήψεων των φορτίσεων, αποδίδεται στο ότι η δοκιμή αυτή προκαλεί μικρομετακινήσεις και ανακατατάξεις των αδρανών (πλησιάζει τα χονδρά αδρανή πιο κοντά ένα στο άλλο) και η κίνηση αυτή αυξάνει την παραμόρφωση του δοκιμίου που οδηγεί σε μικρότερη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας. Η μετακίνηση αυτή

επαναλαμβάνεται σε κάθε φορά που γίνεται φόρτιση μέχρι να βρουν τα αδρανή μια σταθερή θέση, οπότε η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας γίνεται σχεδόν σταθερή.

7.6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝ Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΠΡΙΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΕΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για τον έλεγχο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν 10 δοκίμια μετά από υδρεμποτισμό από το μίγμα 50%ΦΑ, 50%θα με $T = 2\%$, $\Gamma = 3\%$ (βλ. παράγραφο 6.7). Σε πέντε από τα δοκίμια αυτά προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό και εν συνεχεία προσδιορίστηκε η αντοχή τους σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη. Στα υπόλοιπα πέντε δοκίμια προσδιορίστηκε η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό χωρίς να προηγηθεί μέτρηση του μέτρου δυσκαμψίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό

MPa	ITS μετά από ITSM (5δοκίμια)	ITS χωρίς ITSM (5δοκίμια)	D%	t-test
$\bar{x}$	0.122	0.124	1.6	
sd.	0.000811	0.001379		Όχι
cv.%	0.665	1.115		

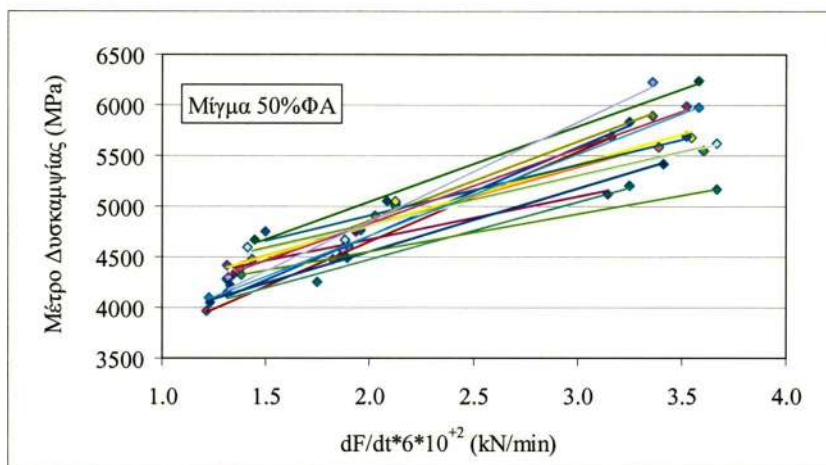
Ο πίνακας 7.2 δείχνει ότι η εκτέλεση της δοκιμής ITSM δεν επηρεάζει την τιμή της αντοχής των δοκιμών μετά από υδρεμποτισμό.

7.7. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ Ή ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

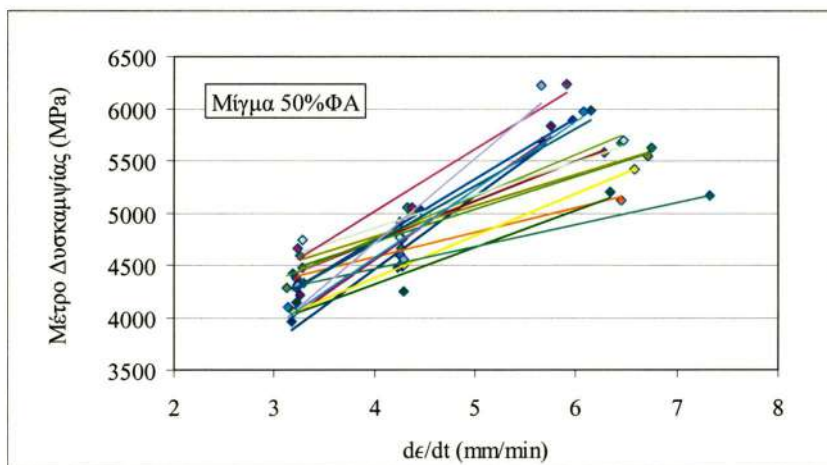
Η διερεύνηση αυτή έγινε σε δύο μίγματα ένα με 50%ΦΑ και ένα με 0% ΦΑ Και τα δύο μίγματα σταθεροποιήθηκαν με $T = 2\%$ και $\Gamma = 3\%$. Προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας για οριζόντια παραμόρφωση 5μm, αλλά μεταβλήθηκε ο χρόνος φόρτισης (από περίπου 60msec σε περίπου 160msec).

Από τις καταγραφές της μηχανής είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο ρυθμός αύξησης της δύναμης dF/dt και ο ρυθμός αύξησης της παραμόρφωσης de/dt θεωρώντας ότι η αύξηση του φορτίου και της παραμόρφωσης είναι γραμμική. Τα αποτελέσματα

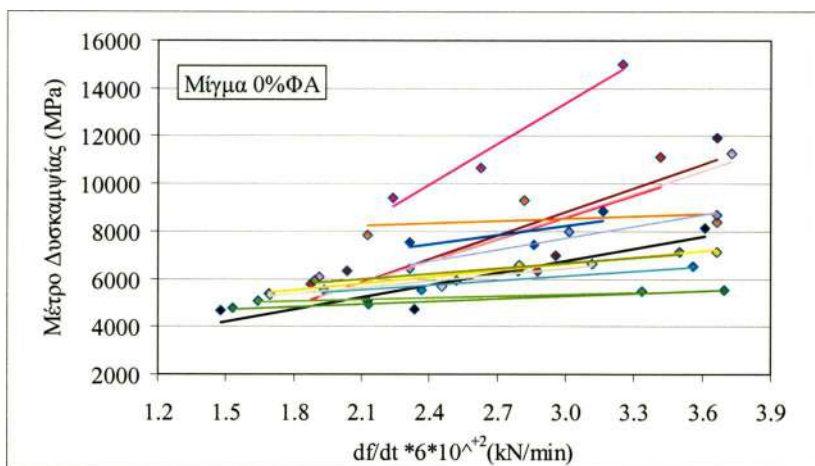
παρουσιάζονται στα Σχ. 7.14, Σχ. 7.15 για το μίγμα με 50% ΦΑ και στα Σχ. 7.16, Σχ. 7.17 για το μίγμα με 0%ΦΑ.



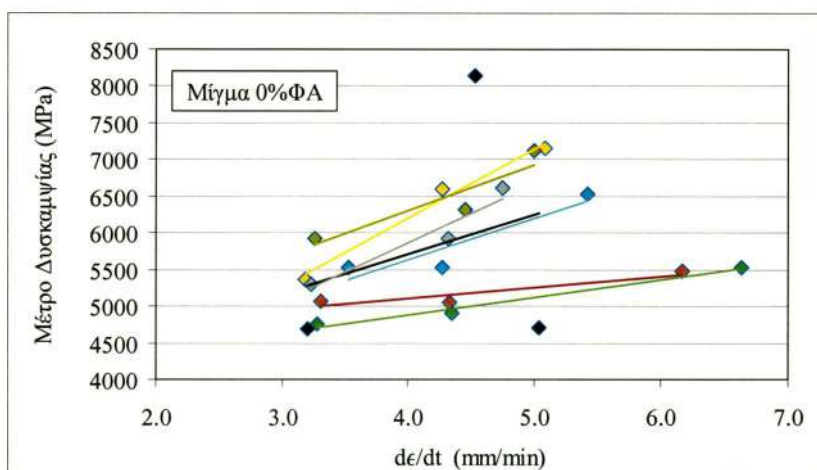
Σχήμα 7.14: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την ταχύτητα φόρτισης.



Σχήμα 7.15: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την ταχύτητα παραμόρφωσης.



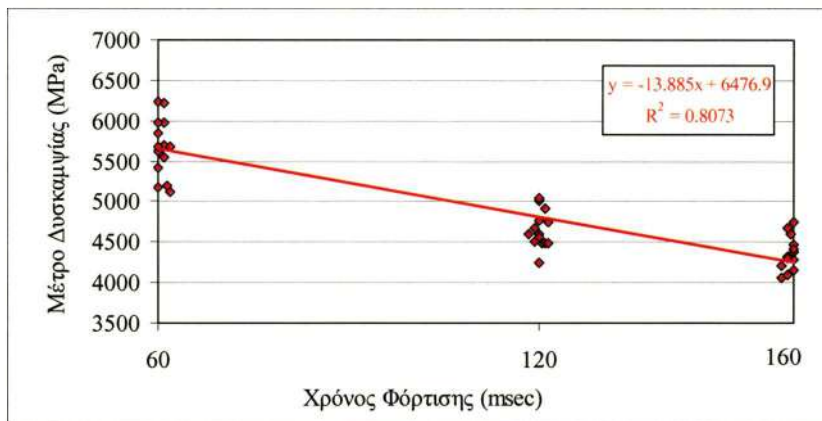
Σχήμα 7.16: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την ταχύτητα φόρτισης.



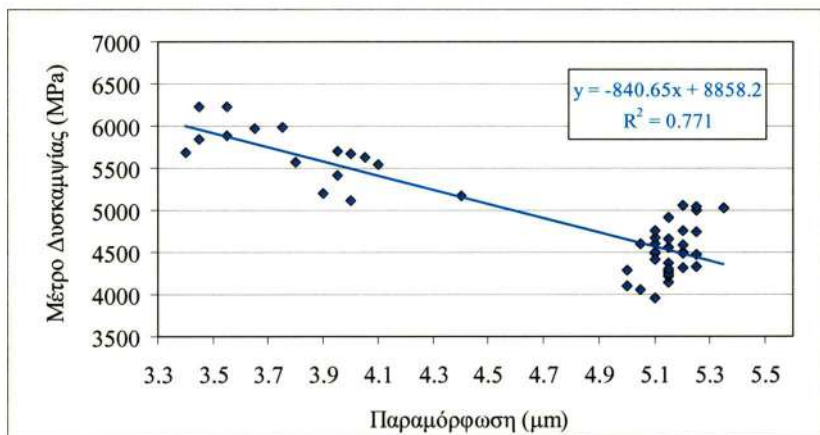
Σχήμα 7.17: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την ταχύτητα παραμόρφωσης.

Από τα παραπάνω σχήματα επιβεβαιώνεται η γενική σχέση μεταξύ της μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με την ταχύτητα παραμόρφωσης και την ταχύτητα φόρτισης.

Κατά τη διάρκεια του ελέγχου αυτού στο μίγμα 50%ΦΑ, $\Gamma = 3\%$, $T = 2\%$, και με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης ορισμένων παραγόντων στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας, έγινε αλλαγή της τιμής του χρόνου φόρτισης από 60 σε 120 και σε 160 msec. Έτσι βρέθηκε η σχέση που συνδέει το μέτρο δυσκαμψίας με τον χρόνο φόρτισης βλ. Σχ. 7.18. Κατά τον ίδιο τρόπο επίσης βρέθηκε η σχέση μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας και της παραμόρφωσης λόγω της μεταβολής της τιμής του χρόνου φόρτισης βλ. Σχ. 7.19.



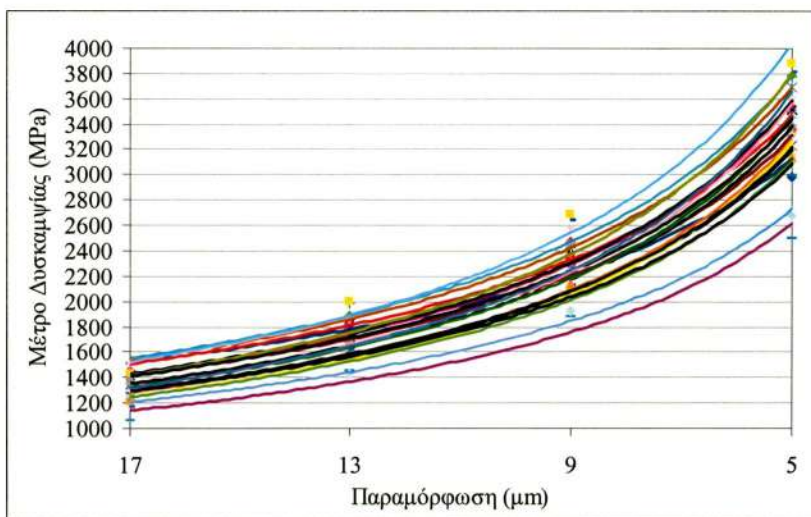
Σχήμα 7.18: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με το χρόνο φόρτισης



Σχήμα 7.19: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την οριζόντια παραμόρφωση λόγω της μεταβολής του χρόνου φόρτισης.

Συμπεραίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δυσκαμψία των κοινών ασφαλομιγμάτων ισχύουν και στα ψυχρά ανακυκλωμένα ασφαλομίγματα.

Επίσης σε άλλα δοκίμια από το ίδιο μίγμα, τα οποία παρασκευάστηκαν για τη δοκιμή κόπωσης, βρέθηκε η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την αλλαγή της οριζόντιας παραμόρφωσης 5 μm έως 17 μm με σταθερή τιμή του χρόνου φόρτισης 120msec. βλ. Σχ. 7.20.

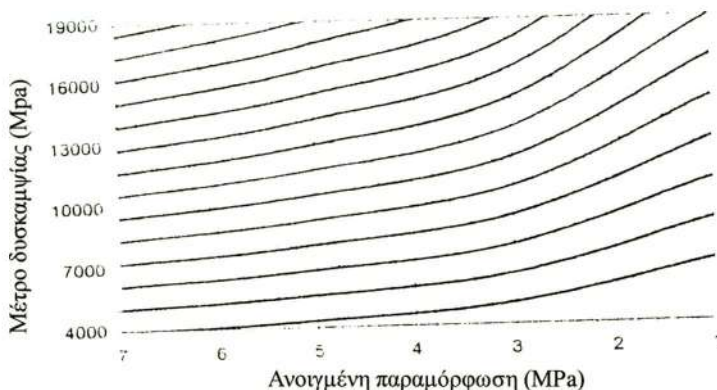


Σχήμα 7.20: μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με το μέγεθος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης

Όσο μεγαλύτερες ήταν οι επιβαλλόμενες από τη μηχανή ανηγμένες παραμορφώσεις, τόσο μικρότερο ήταν το μετρούμενο μέτρο δυσκαμψίας βλ. Σχ. 7.20. Το φαινόμενο αυτό της εξάρτησης του μέτρου δυσκαμψίας από το μέγεθος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης είναι γνωστό και στα θερμά ασφαλομίγματα (Protocol ITFT Version 1.0).

Το σχήμα αυτό, Σχ. 7.20, μπορεί να επεκταθεί σε μικρές τιμές της παραμόρφωσης και να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η πραγματική τιμή του μέτρου δυσκαμψίας όταν η συσκευή NAT δεν μπορεί να επιτύχει παραμόρφωση 5 μm (λόγω μεγάλης δυσκαμψίας δοκιμίου). Τέτοια έρευνα έγινε από (Widyatmoko, 2002), με τιμές της

παραμόρφωσης από 1μm έως 7μm, βλ. Σχ. 7.21. Το σχήμα αυτό προσδιορίστηκε από πυρήνες από (D.B.M.) Dence Bitumen Macadam. Η καμπύλη παλινδρόμησης υπολογίσθηκε για κάθε πυρήνα, και μετά υπολογίσθηκε η γενική καμπύλη παλινδρόμησης για το μίγμα αυτό (D.B.M.). Βέβαια τέτοιο σχήμα χρειάζεται να επεκταθεί και σε άλλα μίγματα.



Σχήμα 7.21: μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με την αντιδιαμετρική παραμόρφωση (Widyatmoko, 2002).

7.8. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό (ITSM) βρέθηκε ότι τα δοκίμια που αποτελούνται από 50%ΦΑ, $T=2\%$, $\Gamma=0\%$, θραύονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής ITSM. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι τα μίγματα αυτά λόγω του τσιμέντου και της απουσίας γαλακτώματος έχουν πολύ μικρή παραμορφωσιμότητα. Όταν η μηχανή φορτίζει τα δοκίμια έτσι ώστε να αποκτήσουν την απαιτούμενη από το πρότυπο οριζόντια διαμετρική παραμόρφωση ίση με 5μm ουσιαστικά προσεγγίζει τα όρια παραμορφωσιμότητας των δοκιμών και τα εξαναγκάζει σε θραύση. Τέτοιες θραύσεις δεν παρατηρήθηκαν σε μίγματα 100% ΦΑ διότι προφανώς η ύπαρξη περισσότερου υλικού ΦΑ στο μίγμα του αύξησε την παραμορφωσιμότητα. Η παρατήρηση αυτή έγινε και στην έρευνα του (Widyatmoko, 2002).

7.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Βρέθηκε ότι η ελάττωση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων:

- ο Στα ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα, είναι πιο μεγάλη από τα κοινά θερμά ασφαλτομίγματα
- ο Στα μίγματα που περιέχουν αδρανή ΦΑ, είναι πιο μεγάλη από τα μίγματα που δεν περιέχουν καθόλου αδρανή ΦΑ.
- ο Στα δοκίμια κοινού θερμού ασφαλτομίγματος, είναι πιο μεγάλη από τις πυρήνες.

2. Οι τάσεις που δημιουργούνται στη δοκιμή του μέτρου δυσκαμψίας στη συσκευή NAT, είναι πιο μικρές από τις αντοχές των ψυχρών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων, άρα η δοκιμή ITSM δεν επηρεάζει των δοκιμών κατά τη διάρκεια της δοκιμής του μέτρου δυσκαμψίας.

3. Η εκτέλεση της δοκιμής ITSM δεν επηρεάζει την τιμή της αντοχής των δοκιμών.

4. Συμπεραίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δυσκαμψία των κοινών ασφαλτομιγμάτων ισχύουν και στα ψυχρά ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -8-

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

8.1. ΓΕΝΙΚΑ

Κόπωση ονομάζεται γενικά το φαινόμενο της βαθμιαίας μεταβολής των χαρακτηριστικών που υφίσταται ένα υλικό όταν επιπονείται κατά επαναλαμβανόμενο τρόπο με μέγεθος επιπόνησης (τάσεως ή παραμορφώσεως) μικρότερο από εκείνο που είναι δυνατόν να επιφέρει αστοχία του υλικού με μία μόνο επιπόνηση. Αποτέλεσμα της "κόπωσης" του υλικού είναι συνήθως η αστοχία του, η οποία μπορεί να επέλθει μετά από μικρό ή μεγάλο αριθμό επαναλήψεων επιπονήσεων, ανάλογα με το μέγεθος των επιβαλλόμενων τάσεων ή παραμορφώσεων.

8.2. ΚΟΠΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

Η κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων των οχημάτων αλλά και των περιβαλλοντικών μεταβολών, αποτελεί κύρια αιτία αστοχίας του, γεγονός που υποδείχτηκε, για πρώτη ίσως φορά από τον Hveem το 1955. Έκτοτε έχει διεξαχθεί μεγάλος αριθμός ερευνών πάνω στο θέμα της αντοχής σε κόπωση των ασφαλτομιγμάτων (Finn, 1967), (Pell, 1973), (Yoder and Witczak, 1977), (Cooper and Pell, 1974), (Verstraeten, 1972), (Kirk, UD), (Monismith, 1994), (Read and Brown, 1996), (Di Benedetto and Chantal, 1998).

Η εισαγωγή των χαρακτηριστικών κόπωσης των ασφαλτικών υλικών στην ανάλυση και διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων απαιτεί την μελέτη και περιγραφή της συμπεριφοράς αυτών των υλικών σε καταπονήσεις που πλησιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές.

Ανάλογα με τον τρόπο επιβολής της επιπόνησης στα δοκίμια, οι δοκιμές σε κόπωση διακρίνονται σε δοκιμές επιβολής εναλλασσόμενης παραμόρφωσης *ελεγχόμενου* εύρους (max., min. τιμή), που ονομάζονται δοκιμές "ελεγχόμενης παραμόρφωσης" ή

σε δοκιμές εναλλασσόμενης τάσης ελεγχόμενου εύρους που ονομάζονται δοκιμές "ελεγχόμενης τάσης".

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κόπωση παρουσιάζονται σε διαγράμματα Wöhler γνωστά σαν διαγράμματα S-N, Σχ. 8.1, ή με αναλυτική έκφραση με τις ακόλουθες μορφές:

$$N = C * \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^m \quad \text{ή} \quad \varepsilon = A * N^{(-b)} \quad \text{και}$$

$$N = D * \left(\frac{1}{\sigma} \right)^d \quad \text{ή} \quad \sigma = B * N^{(-a)}$$

Για τις ανάγκες του υπολογισμού του πάχους των οδοστρωμάτων χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτητα (Monismith, 1992) η ακόλουθη σχέση:

$$N = k * \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^a * \left(\frac{1}{S_m} \right)^b \quad \text{όπου:}$$

N: ο αριθμός των φορτίσεων

ε: η επιβαλλόμενη ανηγμένη παραμόρφωση

σ: η επιβαλλόμενη τάση

S_m: το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος

A, B, C, D, a, b, c, d, k: σταθερές που προκύπτουν από τα πειράματα και εκφράζουν την επίδραση κυρίως των χαρακτηριστικών του μίγματος.

Στο Σχ. 8.2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές διαφορές που παρατηρούνται στα διαγράμματα S-N ανάλογα με το αν οι δοκιμές γίνονται υπό "ελεγχόμενη τάση" ή υπό "ελεγχόμενη παραμόρφωση". Παρατηρείται ότι το μέτρο δυσκαμψίας επηρεάζει κατά αντίστροφο τρόπο τα αποτελέσματα βλ. Σχ. 8.2(β, δ). Είναι επίσης αξιοσημείωτο το γεγονός ότι αν στις δοκιμές "ελεγχόμενης τάσης" υπολογιστεί η προκαλούμενη παραμόρφωση από την τάση η οποία επιβάλλεται το μέτρο δυσκαμψίας παύει να έχει τόσο σημαντική επίδραση.

Οι διαφορές στην συμπεριφορά του υλικού στους δύο τύπους επιπονήσεως, ερμηνεύονται με τον μηχανισμό επέκτασης των δημιουργούμενων ρωγμών, που είναι διαφορετικός στις δύο δοκιμές. Στις δοκιμές "ελεγχόμενη παραμόρφωση" η επιβαλλόμενη

τάση μειώνεται διαδοχικά, διότι η μηχανή ελαττώνει το επιβαλλόμενο φορτίο για να διατηρήσει σταθερό το προκαθορισμένο εύρος παραμόρφωσης. Αντίθετα, στις δοκιμές υπό "ελεγχόμενη τάση" η ρωγμάτωση επιφέρει μείωση της ενεργούς (πραγματικής) διατομής του δοκιμίου και επειδή η μηχανή κόπωσης επιβάλλει σταθερό $\max$ και $\min$ φορτίο, οι πραγματικές αναπτυσσόμενες τάσεις (στην κορυφή της ρωγμής) αυξάνουν, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η αστοχία του υλικού σε σύγκριση με τη δοκιμή υπό "ελεγχόμενη παραμόρφωση".

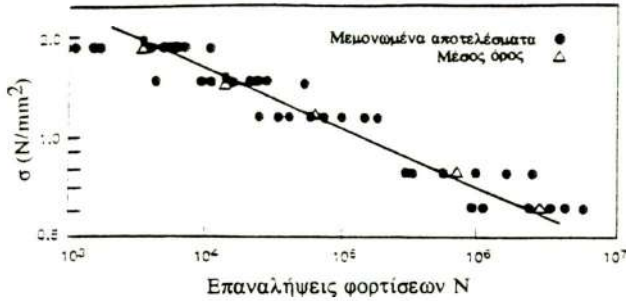
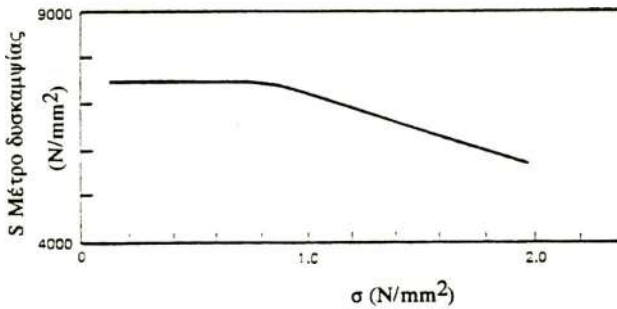
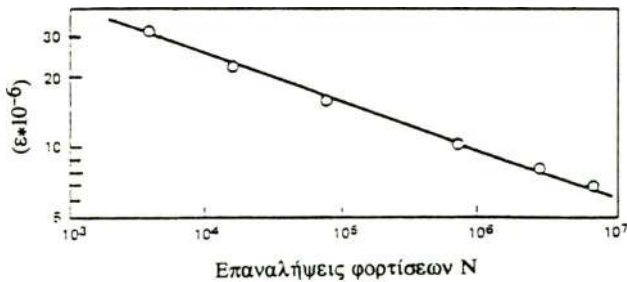
Στην πράξη, στα οδοστρώματα εν λειτουργία, η μορφή επιπόνησης (ελεγχόμενη τάση ή ελεγχόμενη παραμόρφωση) εξαρτάται από το πάχος της ασφαλτικής στρώσης και την ακαμψία της στρώσης αυτής $[E \cdot h^3 / (1 - \nu^2)]$ σε σχέση με τις ακαμψίες των άλλων στρώσεων του οδοστρώματος, όπου: E είναι μέτρο ελαστικότητας, h : είναι πάχος της στρώσης, και ν είναι ο λόγος του Poisson. Για οδοστρώματα με λεπτή ασφαλτική στρώση (μέχρι περίπου 50mm) η δοκιμή της "ελεγχόμενης παραμόρφωσης" προσομοιάζει καλύτερα την πραγματική επιπόνηση, ενώ για οδοστρώματα με μεγάλο πάχος ασφαλτικής στρώσης (μεγαλύτερο από 150mm περίπου) η δοκιμή της "ελεγχόμενης τάσης" είναι πιο αρμόζουσα (Monismith and Deacon, 1969).

Θα πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό η μεγάλη επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων και επομένως η επιρροή που αναπόφευκτα εξασκεί η θερμοκρασία στην επιλογή της δοκιμής που προσομοιάζει ορθότερα την πραγματική κατάσταση. Γι' αυτό τα πάχη που αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να θεωρούνται τελείως ενδεικτικά.

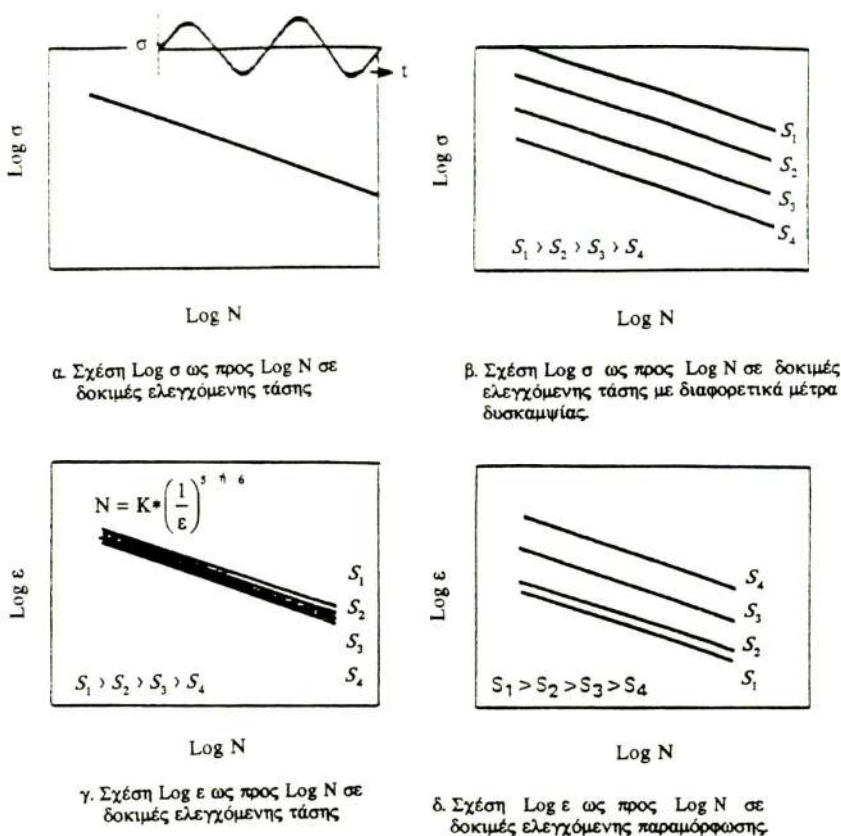
Στη Γαλλία οι δοκιμές κόπωσης που εκτελούνται είναι κυρίως δοκιμές "ελεγχόμενης παραμόρφωσης" (Peyronne and Caroff, 1984). Ενώ οι περισσότερες δοκιμές που έγιναν στην Αγγλία από τους Read, Brown, και Pell (Read and Brown, 1996), (Di Benedetto and Chantal, 1998), (Francken and Verstraeten, 1998) και (Pell, 1973) ήταν "ελεγχόμενης τάσης".

Παρακάτω περιγράφονται και αξιολογούνται διάφορες εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης ασφαλτομιγμάτων, σύμφωνα και με την διεθνή εμπειρία. Αντικειμενικός σκοπός των εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης είναι η διαμόρφωση σχέσεων μεταξύ επιβαλλόμενων τάσεων ή ανηγμένων παραμορφώσεων και επιτρεπομένων επαναφορτίσεων μέχρι την θραύση. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι εργαστηριακές μέθοδοι είναι

απαραίτητη η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά των ασφαλικών υλικών σε κόπωση. Η κόπωση στην παρούσα φάση θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα μόνο των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων και όχι και των μεταβολών της θερμοκρασίας.

α. Σχέση σ - Nβ. Σχέση S - σ γ. Σχέση ϵ - N

Σχήμα 8.1: Τυπικά αποτελέσματα δοκιμής σε κόπωση ελεγχόμενης τάσης (Croney, 1977)



Σχήμα 8.2: Δοκιμές κόπωσης ασφαλτομίγματος (Croney, 1977)

8.2.1. Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά σε κόπωση των ασφαλοτοιμμάτων

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά σε κόπωση των δοκιμών ασφαλοτοιμμάτος είναι :

8.2.1.1. Συμπύκνωση δοκιμών

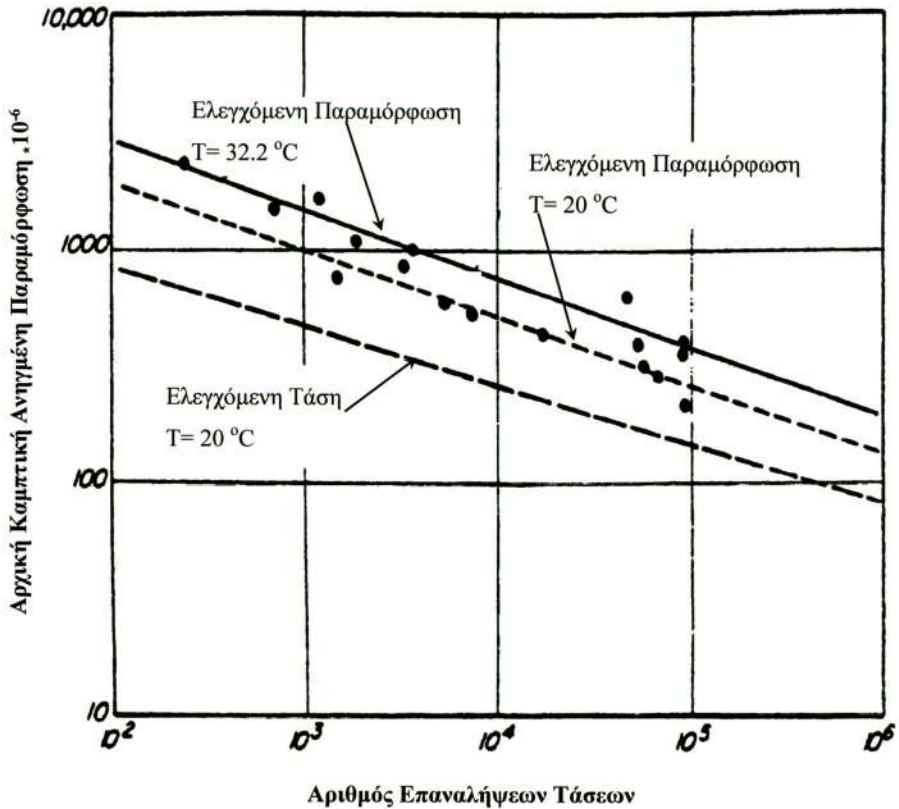
Η συμπύκνωση των δοκιμών πρέπει να γίνεται έτσι ώστε τα δοκίμια να έχουν την ίδια σύνθεση, πυκνότητα και μηχανικά χαρακτηριστικά με την ασφαλική στρώση όπως αυτή διαστρώνεται και συμπυκνώνεται στο εργοτάξιο. Γενικά οι μέθοδοι συμπύκνωσης είναι :

- στατική συμπύκνωση
- κρουστική συμπύκνωση (συμπύκνωση δοκιμών Marshall)
- συμπύκνωση με ζυμωτική δράση
- γυροσκοπική συμπύκνωση
- συμπύκνωση με κυλιόμενο τροχό

Σημειώνεται ότι ο τύπος των δοκιμών που θα παρασκευαστούν (π.χ. κύλινδροι ή πρίσματα) και επομένως και ο τύπος της δοκιμής κόπωσης που θα εκτελεστεί συνδέεται άμεσα με την μέθοδο συμπύκνωσης.

8.2.1.2. Τρόπος φόρτισης

Η φόρτιση κατά τις δοκιμές κόπωσης είναι δυναμική δεδομένης συχνότητας με δεδομένη θερμοκρασία. Η δυναμική φόρτιση μπορεί να είναι είτε "ελεγχόμενης τάσης" (το φορτίο ή η τάση έχει σταθερό εύρος και σταθερό ή εναλλασσόμενο πρόσημο), είτε "ελεγχόμενης παραμόρφωσης" (η παραμόρφωση ή η ανηγμένη παραμόρφωση έχει σταθερό εύρος και σταθερό ή εναλλασσόμενο πρόσημο). Το είδος της δοκιμής ανάλογα και με τη θερμοκρασία (και επομένως το μέτρο δυσκαμψίας) έχει συχνά παρατηρηθεί ότι μπορεί να επηρεάσει την μετρούμενη αντοχή σε κόπωση βλ. Σχ. 8.3. Στον Πίνακα1 συνοψίζονται οι διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο τύποι δοκιμών.



Σχήμα 8.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών κόπωσης υπό ελεγχόμενη τάση και ελεγχόμενη παραμόρφωση. [Monismith et al. 1977].

Πίνακας 8.1. Σύγκριση δοκιμών "ελεγχόμενης τάσης" και ελεγχόμενης παραμόρφωσης" [Κόλιας, 2003].

Παράμετροι υπολογισμού	Δοκιμή "ελεγχόμενης τάσης"	Δοκιμή "ελεγχόμενης παραμόρφωσης"
Πάχος στρώσεων ασφαλτομίγματος	Σχετικά μεγάλο πάχος	Μικρό πάχος (< 8cm)
Εκτίμηση αριθμού επαναλήψεων φορτίσεων μέχρι αστοχίας	Συγκεκριμένη τιμή εφόσον το δοκίμιο σπάει	Αυθαίρετη τιμή εφόσον η δοκιμή διακόπεται όταν το φορτίο μειωθεί κάτω από ένα ορισμένο ποσοστό της αρχικής του τιμής (π.χ. 50%)
Διασπορά αποτελεσμάτων	Μικρότερη	Μεγαλύτερη
Απαιτούμενος αριθμός δοκιμών	Μικρότερος	Μεγαλύτερος
Προσομοίωση συνθηκών μετά από πολύ χρόνο ¹	Αύξηση της δυσκαμψίας ως αποτέλεσμα της γήρανσης οδηγεί σε αύξηση της αντοχής σε κόπωση	Αύξηση της δυσκαμψίας ως αποτέλεσμα της γήρανσης οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κόπωση
Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων	Μικρότερος	Μεγαλύτερος
Επίδραση χαρακτηριστικών ασφαλτομίγματος	Περισσότερη ευαισθησία	Μικρότερη ευαισθησία
Απώλειες ενέργειας	Γρήγορα	Αργά
Διάδοση ρωγμών	Γρηγορότερα από ότι συμβαίνει στην πραγματικότητα	Καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης
Οφέλη των περιόδων ανάπαυλας	Μεγαλύτερα	Μικρότερα

¹Η γήρανση της ασφάλτου μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε κόπωση στο βαθμό που αντισταθμίζει την παρουσία μεγαλύτερων κενών στο επί τόπου έργο και την φθορά λόγω κυκλοφορίας. Στις χαμηλές όμως θερμοκρασίες μάλλον μειώνει την αντοχή σε ρηγμάτωση διότι αυξάνεται η ψαθυρότητα.

Πίνακας 8.2. Παράμετροι μίγματος που επηρεάζουν την δυσκαμψία και τα χαρακτηριστικά κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων συνεχούς διαβάθμισης, [Κόλιας, 2003].

Παράμετρος	Μεταβολή παραμέτρου	Δυσκαμψία ασφαλτομίγματος	Αντοχή σε κόπωση υπό ελεγχόμενη τάση	Αντοχή σε κόπωση υπό ελεγχόμενη παραμόρφωση
Δυσκαμψία ασφάλτου	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Μείωση
Ποσοστό ασφάλτου	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Κοκκομετρία	Ανοιχτού τύπου	Αύξηση	Αύξηση	Μείωση
Ποσοστό κενών	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Αύξηση
Θερμοκρασία	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Μείωση

¹Η συμπίκνωση λόγω κυκλοφορίας των οχημάτων έχει παρατηρηθεί ότι αυξάνει την αντοχή σε κόπωση, λόγω του συνδυασμού αύξησης της δυσκαμψίας και μείωσης του ποσοστού κενών.

8.2.1.3. Χαρακτηριστικά μίγματος

Στον Πίν.8.2 παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός ασφαλτομίγματος και ο τρόπος που έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση, σύμφωνα με διάφορους ερευνητές. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι η δράση των παραμέτρων είναι συνδυαστική με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η μελέτη κάθε παράγοντα μεμονωμένα.

8.2.1.4. Τρόπος μεταβολής του φορτίου

Στο Σχ.8.4 δίνονται οι διάφοροι τρόποι μεταβολής της επαναλαμβανόμενης φόρτισης στις εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης.

8.2.2. Δοκιμές κόπωσης ασφαλτομιγμάτων

Οι δοκιμές κόπωσης ασφαλτομιγμάτων διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες :

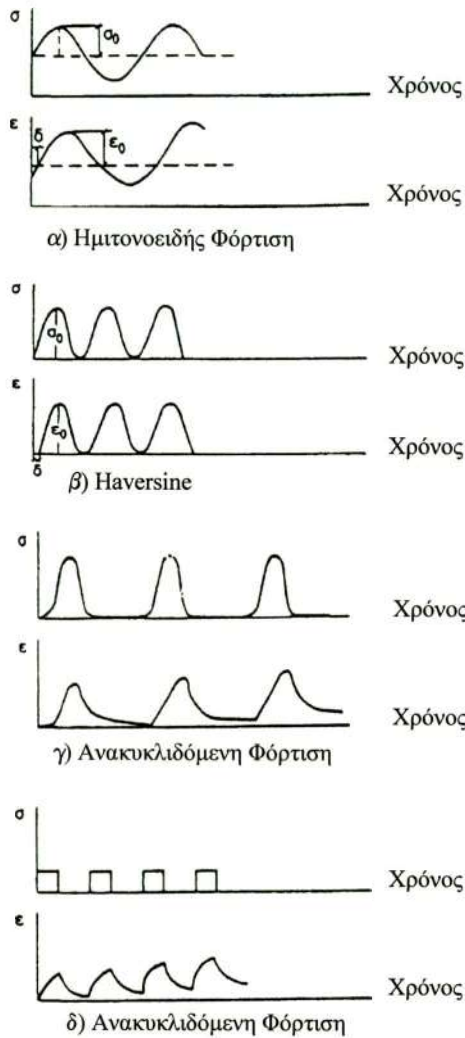
8.2.2.1. Δοκιμές κόπωσης σε κάμψη

Χρησιμοποιούνται:

- ο *πρισματικά* δοκίμια τα οποία κάμπτονται με φόρτιση «τεσσάρων σημείων» ή «τριών σημείων» παλμικής ή ημιτονοειδούς μορφής σταθερού ή εναλλασσόμενου προσήμου.
- ο *τραπεζοειδείς* πρόβολοι ή περιστρεφόμενοι πρόβολοι οι οποίοι κάμπτονται υπό ημιτονοειδή φόρτιση σταθερού ή εναλλασσόμενου προσήμου.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.

Οι δοκιμές αυτές είναι γνωστές και χρησιμοποιούνται ευρέως (τα πρισματικά δοκίμια κυρίως στις ΗΠΑ, ενώ οι πρόβολοι στην Ευρώπη). Συγχρόνως όμως είναι δοκιμές μεγάλου κόστους λόγω κυρίως του απαιτούμενου εξοπλισμού. Η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται είναι μονοαξονική και όχι τριαξονική που είναι και η πραγματική. Τα αποτελέσματα (αριθμός επαναφορτίσεων σε σχέση με την αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση ή ανηγμένη παραμόρφωση) μπορούν με χρήση ενός συντελεστή αναγωγής να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν στον υπολογισμό του οδοστρώματος έναντι κόπωσης. Η δυσκολία βέβαια επικεντρώνεται στην εκτίμηση αυτού του συντελεστή. Ο υπολογισμός των τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων γίνεται με τη βοήθεια της θεωρίας ελαστικότητας.



Σχήμα 8.4: Τρόποι επιβολής επαναλαμβανόμενου φορτίου και συνεπαγόμενες ανηγμένες παραμορφώσεις κατά την διάρκεια της δοκιμής. α) ημιτονοειδής φόρτιση, β) παλμική φόρτιση, γ) και δ) κυκλική φόρτιση. [Said 1988].

Ένα βασικό πλεονέκτημα της δοκιμής κόπωσης πρισμάτων με φόρτιση τεσσάρων σημείων έναντι της κόπωσης πρισμάτων με φόρτιση τριών σημείων και των τραπεζοειδών προβόλων είναι ότι ένα μεγάλο μέρος του δοκιμίου καταπονείται στο μέγιστο ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο. Έτσι, η εντατική κατάσταση του δοκιμίου πλησιάζει περισσότερο την πραγματικά αναπτυσσόμενη στο εν λειτουργία έργο.

Συγκριτικά στις δοκιμές κόπωσης σε κάμψη πρισμάτων αποφεύγονται τα πιθανά προβλήματα στα άκρα των δοκιμίων που παρουσιάζονται κατά την πάκτωση των προβόλων. Η παρασκευή και εξέταση των πρισματικών δοκιμών είναι πιο σύντομη έναντι των τραπεζοειδών δοκιμών, λόγω κυρίως της διαδικασίας πάκτωσης των τραπεζοειδών.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι παρασκευής δοκιμών στο εργαστήριο δεν φαίνεται να είναι κατάλληλες για την παρασκευή πρισματικών δοκιμών για δοκιμές σε κάμψη στατικές ή επαναλαμβανόμενες.

Η γεωμετρία των δοκιμών κόπωσης σε κάμψη είναι τέτοια ώστε γενικά είναι καλύτερο να αποκόπτονται από μεγαλύτερα τεμάχια ήδη συμπτυκνωμένα, εξασφαλίζοντας έτσι ομοιόμορφες επιφανειακές συνθήκες και ομοιογένεια των δοκιμών.

8.2.2.2. Δοκιμές κόπωσης σε κάμψη με συνεχή έδραση

Χρησιμοποιούνται πρίσματα ή κυκλικές πλάκες που εδράζονται σε διάφορα συνεχή μέσα (π.χ. ελαστική στρώση) και φορτίζονται παλμικά.

Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα.

Η φόρτιση είναι κυρίως μονοαξονική και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σταθερού προσήμου (ανάλογα με την διάταξη) προσεγγίζει όμως καλύτερα την πραγματική κατάσταση λόγω της συνεχούς έδρασης. Στις υψηλές μάλιστα θερμοκρασίες αποφεύγονται τα προβλήματα κύρτωσης των δοκιμών λόγω του ίδιου βάρους τους. Η συνεχής έδραση συμβάλει επίσης στην μείωση της διασποράς των αποτελεσμάτων λόγω πιθανών ατελειών των δοκιμών. Οι δοκιμές σε σύγκριση με τις δοκιμές κάμψης σε πρίσματα είναι χρονοβόρες, σύνθετες και μεγάλου κόστους.

8.2.2.3. Δοκιμές κόπωσης σε μονοαξονική φόρτιση

Χρησιμοποιούνται πρίσματα (κυλινδρικά ή τετραγωνικά) τα οποία φορτίζονται μονοαξονικά και η φόρτιση είναι παλμική ή ημιτονοειδής, σταθερού ή εναλλασσόμενου προσήμου.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα:

Γενικά, τα αποτελέσματα των δοκιμών μπορεί να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην μελέτη σύνθεσης των ασφατομιγμάτων και στην διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστός ο συντελεστής αναγωγής στις πραγματικές συνθήκες. Σε σχέση με τις δοκιμές κόπωσης σε κάμψη οι δοκιμές αυτές είναι απλούστερες, φθηνότερες και συντομότερες, ενώ τα μεγέθη καταγράφονται με μεγαλύτερη ευκολία. Η μονοαξονική φόρτιση σταθερού προσήμου δηλαδή ο μονοαξονικός εφελκυσμός, δεν προσεγγίζει την πραγματική φόρτιση πράγμα το οποίο συμβαίνει στις εναλλασσόμενες φορτίσεις (θλίψη / εφελκυσμός / θλίψη). Η εφαρμογή όμως εναλλασσόμενου φορτίου απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και περισσότερο χρόνο και κόστος. Σημαντικό επίσης ρόλο στην μετρούμενη διάρκεια ζωής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές εναλλασσόμενου εφελκυσμού και θλίψης παίζει η εναλλαγή του προσήμου, δηλαδή εάν λαμβάνει μέρος πρώτα ο εφελκυσμός και μετά η θλίψη και αντίστροφα.

8.2.2.4. Δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη (Έμμεσος Εφελκυσμός)

Χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια τα οποία φορτίζονται κατακόρυφα και αντιδιαμετρικά υπό παλμική θλιπτική φόρτιση σταθερού προσήμου. Έμμεσα επομένως οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι εφελκυστικές. Η εντατική κατάσταση είναι διαξονική και μάλιστα στο κέντρο του δοκιμίου η κατακόρυφη θλιπτική τάση είναι πολλαπλάσια της οριζόντιας εφελκυστικής.

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.

Οι δοκιμές αυτές είναι πολύ απλές και απαιτούν εξοπλισμό χαμηλού κόστους. Η ρηγματώση συμβαίνει στην περιοχή όπου αναπτύσσεται ομοιόμορφη εντατική κατάσταση. Σημειώνεται ότι λόγω της διαξονικότητας δεν είναι ξεκάθαρο ποια είναι η κρίσιμη τάση : η οριζόντια εφελκυστική ή η διαφορά οριζόντιας εφελκυστικής και κατακόρυφης θλιπτικής. Η διαξονική εντατική κατάσταση μάλλον προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα από τη μονοαξονική, όμως στη αντιδιαμετρική θλίψη η θλιπτική τάση είναι πολύ μεγαλύτερη της εφελκυστικής. Συγκριτικά με άλλες δοκιμές κόπωσης η αντιδιαμετρική θλίψη δίνει μικρότερες αντοχές σε κόπωση. Βασικό μειονέκτημα των

δοκιμών είναι η αδυναμία επιβολής επαναλαμβανόμενου φορτίου εναλλασσόμενου προσήμου.

8.2.2.5. Δοκιμές κόπωσης σε τριαξονική φόρτιση

Χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια τα οποία φορτίζονται όπως και στην μονοαξονική φόρτιση με τη διαφορά ότι υπάρχει και πλευρική παρεμπόδιση, με αποτέλεσμα την τριαξονική εντατική κατάσταση.

8.2.2.6. Δοκιμές κόπωσης με αρχές θραυστομηχανικής

Χρησιμοποιούνται οι αρχές της θραυστομηχανικής για την εκτίμηση του χρόνου ή του αριθμού των φορτίσεων για διάδοση των ρωγμών στο εργαστήριο με μέτρηση μεγεθών της θραυστομηχανικής όπως ολοκλήρωμα J συντελεστής έντασης τάσεως k και a . (Collop and Cebon, 1993), (Zhiming et al, 2002), (Yongqi et al, 2004) και (Kumara et al, 2004).

8.2.2.7. Δοκιμές κόπωσης με φόρτιση από κινούμενο τροχό

Γίνονται στο εργαστήριο ή σε πειραματικά οδικά τμήματα, όπου γίνεται συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού ρηγμάτωσης, του αριθμού διελεύσεων του τροχού και των μετρούμενων ή υπολογιζόμενων τάσεων/παραμορφώσεων.

Μία βασική παράμετρος που πρέπει να ελέγχεται κατά τις δοκιμές κόπωσης είναι ο βαθμός εις τον οποίο το δοκίμιο επιτρέπεται να παραμορφωθεί ανελαστικά. Στην πραγματικότητα η ασφαλιστική στρώση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος μπορεί να παραμορφωθεί ανελαστικά ως αποτέλεσμα της συμπύκνωσης από την κυκλοφορία, της διάτμησης και παραμόρφωσης των κατώτερων στρώσεων. Αυτό βέβαια που πρέπει να συμβαίνει σε ένα επαρκώς διαστασιολογημένο οδόστρωμα είναι η ελαχιστοποίηση των μόνιμων παραμορφώσεων που οφείλονται στις κατώτερες στρώσεις. Στις δοκιμές κόπωσης εναλλασσόμενου φορτίου οι παραμένουσες παραμορφώσεις μηδενίζονται ή είναι πολύ μικρές. Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, σε μερικές αξονικές και στις δοκιμές κάμψης με συνεχή έδραση η φόρτιση δεν είναι εναλλασσόμενη και έτσι δεν περιορίζονται οι παραμένουσες παραμορφώσεις.

Μία άλλη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η παρουσία ή όχι περιόδων ανάπαυλας. Στην πραγματικότητα μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων τροχών μεσολαβεί ένα διάστημα ανάπαυλας και επομένως μία φόρτιση παλμική δίνει την δυνατότητα μελέτης του φαινομένου αυτού. Μία συνεχής επαναλαμβανόμενη

φόρτιση συνήθως οδηγεί σε μικρότερες αντοχές κόπωσης κάνοντας συγχρόνως συντομότερες τις δοκιμές.

8.2.3. Γενικές αρχές της δοκιμής κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό

Στην συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται οι γενικές αρχές των δοκιμών κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη σύμφωνα με τις οδηγίες του πρωτοκόλλου: PROTOCOL VERSION 1.0, LINK BITUTEST PROJECT INDIRECT TENSILE FATIGUE TEST (ITFT). Πρόκειται για δοκιμές «ελεγχόμενης τάσης», υπό παλμική επαναλαμβανόμενη φόρτιση σταθερού προσήμου με διαστήματα ανάπαυλας, οι οποίες εκτελούνται στη μηχανή NAT (Nottingham Asphalt Tester). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις (ελαστικές και παραμένουσες) και ο αντίστοιχος αριθμός επαναφορτίσεων. Ως αστοχία του δοκιμίου ορίζεται όταν η μηχανή δεν μπορεί να εφαρμόσει θλιπτικό φορτίο λόγω του ότι η μετρούμενη κατακόρυφη παραμόρφωση έχει ξεπεράσει τα 5 - 9 μm πράγμα που σημαίνει ότι το δοκίμιο έχει ρηγματωθεί.

Στο Σχ. 8.5 δίνεται η ιδεατή κατανομή των τάσεων στον οριζόντιο άξονα (x) κατά τη διάρκεια της αντιδιαμετρικής θλίψης. Η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση κατά την αντιδιαμετρική θλίψη ($\epsilon_{x\max}$) αναπτύσσεται στο κέντρο του δοκιμίου και είναι η παραμόρφωση ρηγμάτωσης του δοκιμίου. Εάν θεωρηθεί ότι :

- η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται το δοκίμιο είναι επίπεδη
- το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, ομογενές και ισότροπο
- το κατακόρυφο φορτίο είναι γραμμικά κατανεμημένο

τότε η $\epsilon_{x\max}$ δίνεται από την σχέση (εξισώσεις Frocht):

$$\begin{aligned}\epsilon_{x\max} &= (\sigma_{x\max} / S_m) - (\nu \cdot \sigma_{y\max} / S_m) \\ &= [2P / (\pi \cdot d \cdot t \cdot S_m)] - [(\nu \cdot (-6 \cdot P)) / (\pi \cdot d \cdot t \cdot S_m)] \\ &= [2 \cdot P \cdot (1+3 \cdot \nu)] / (\pi \cdot d \cdot t \cdot S_m) \Rightarrow\end{aligned}$$

$$\boxed{\epsilon_{x\max} = \sigma_{x\max} \cdot (1+3 \cdot \nu) / S_m} \quad (8.1)$$

όπου:

$\epsilon_{x\max}$ = η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση στο κέντρο του δοκιμίου

$\sigma_{x\max}$ = η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στο κέντρο του δοκιμίου

$\sigma_{y\max}$ = η μέγιστη κατακόρυφη θλιπτική τάση στο κέντρο του δοκιμίου

ν = λόγος του Poisson

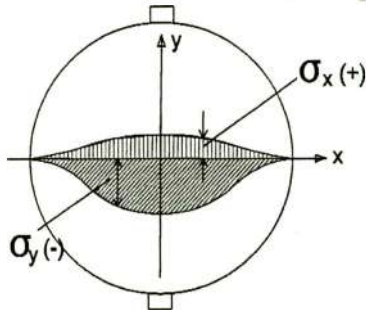
S_m = Μέτρο Δυσκαμψίας δοκιμίου σε αντιδιαμετρική θλίψη.

P = το κατακόρυφο φορτίο

d = η διάμετρος του δοκιμίου

t = το πάχος του δοκιμίου

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση ο υπολογισμός της $\varepsilon_{x\max}$ γίνεται για έναν δεδομένο λόγο του Poisson (ν), μία προεπιλεγμένη ($\sigma_{x\max}$) και το αντίστοιχο μέτρο δυσκαμψίας (S_m) του δοκιμίου σύμφωνα με την δοκιμή μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη (Benedetto and Chantal, 1998), (Francken and Verstraeten, 1998), (Fairhurst, 1990) και (Bonvino, 1990).



Σχήμα 8.5: Ιδεατή κατανομή τάσεων στον οριζόντιο άξονα (x) που διέρχεται από το κέντρο της διατομής, κατά τη διάρκεια αντιδιαμετρικής φόρτισης (Read and Brown, 1996).

8.2.3.1. Διαδικασία δοκιμών κόπωσης

- Προηγούνται δοκιμές μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική

θλίψη.

Οι δοκιμές εκτελούνται σύμφωνα με το BSI DD 213-1993. Επιπλέον της προδιαγραφής η ζητούμενη μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση λαμβάνει τις τιμές : 5, 9, 13 και 17 μm και για τις δύο διευθύνσεις φόρτισης. Από τις δοκιμές

καταγράφονται οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις στο μέσον του δοκιμίου και τα αντίστοιχα μέτρα δυσκαμψίας.

- Έτσι προκύπτουν 8 ζεύγη τιμών ($\sigma_{x\max}$ - S_m) για τα οποία γίνεται γραμμική παλινδρόμηση (βλ. σχέση (8.2))

Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ο υπολογισμός του S_m για διάφορα επίπεδα τάσεων, εφόσον είναι γνωστή η εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας από το μέγεθος της αναπτυσσόμενης τάσης λόγω της ιζοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος.

$$S_m = (a \times \sigma_{x\max}) + b \quad (8.2)$$

όπου:

a, b είναι σταθερές των πειραματικών αποτελεσμάτων.

$\sigma_{x\max}$ είναι η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στο κέντρο του δοκιμίου.

- Εκτελούνται οι δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη για μια ομάδα τιμών τάσεων ($\sigma_{x\max}$)

Η δοκιμή εκτελείται με βάση το πρόγραμμα “FATIGUE3” με το οποίο ρυθμίζονται οι διάφορες αρχικές συνθήκες της δοκιμής και στην συνέχεια ελέγχονται κατά την διάρκεια της, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται οι μεταβολές διαφόρων παραμέτρων

Για την προετοιμασία των δοκιμών ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δοκιμή μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας (Κόλιας, 1994).

Τα αρχικά δεδομένα εισαγωγής είναι:

- Η διάμετρος και το πάχος του δοκιμίου
- Η επιδιωκόμενη μέγιστη τάση εφελκυσμού
- Ο επιδιωκόμενος χρόνος επίτευξης της μέγιστης τάσης ευελκυσμού
- Η μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση
- Η θερμοκρασία

Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ο αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής μέχρι την θραύση του δοκιμίου.
- Η τιμή της επιβαλλόμενης μέγιστης δύναμης
- Η τιμή της προκαλούμενης μέγιστης εφελκυστικής τάσης

- Η τιμή της αναιρέσιμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (ελαστικές και παραμένουσες)
- Η τιμή της μόνιμης παραμόρφωσης (αθροιστικώς)
- Ο χρόνος επίτευξης της μέγιστης τάσης
- Η τιμή του εκτιμώμενου μέτρου δυσκαμψίας

Στην οθόνη του υπολογιστή δίνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής σε λογαριθμικό διάγραμμα η κατακόρυφη παραμόρφωση ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων (Κόλιας, 1994).

- **Υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_{xmax})**

στο μέσον του δοκιμίου εφαρμόζοντας την σχέση (8.1) για τις δεδομένες τιμές σ_{xmax} και S_m . Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση αυτή είναι η αρχική παραμόρφωση.

- **Τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης παρουσιάζονται σε λογαριθμικό διάγραμμα ($\log N \sim \log \epsilon$)**

μεταβολής των μέγιστων οριζόντιων εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων στο μέσον του δοκιμίου σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναφορτίσεων μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η κατάστρωση του διαγράμματος κόπωσης για ένα συγκεκριμένο τύπο ασφαλοτόμιγματος απαιτεί την εκτέλεση μίας σειράς δοκιμών κόπωσης σε διαφορετικά επίπεδα μέγιστης οριζόντιας εφελκυστικής τάσης.

- **Επιπλέον υπολογίζεται και ο αλγόριθμος κόπωσης ($\log N \sim \log \epsilon$) με γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων όλων των δοκιμών που αντιστοιχούν στο ίδιο ασφαλοτόμιγμα. Πρόκειται για σχέσεις της μορφής (8.3).**

$$\log N = a \times (\log \epsilon)^b \quad (8.3)$$

όπου:

N : συνολικός αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.

ϵ : αναπτυσσόμενη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση από σχέση (8.1)

a, b : σταθερές παλινδρόμησης. Σύμφωνα με εργαστηριακές έρευνες οι σταθερές αυτές εξαρτώνται από ιδιότητες του ασφαλοτόμιγματος όπως δυσκαμψία, ποσοστό

κενών και ασφάλτου, ιξώδες ασφάλτου, κοκκομετρία, διαστάσεις των δοκιμίων, θερμοκρασία δοκιμών.

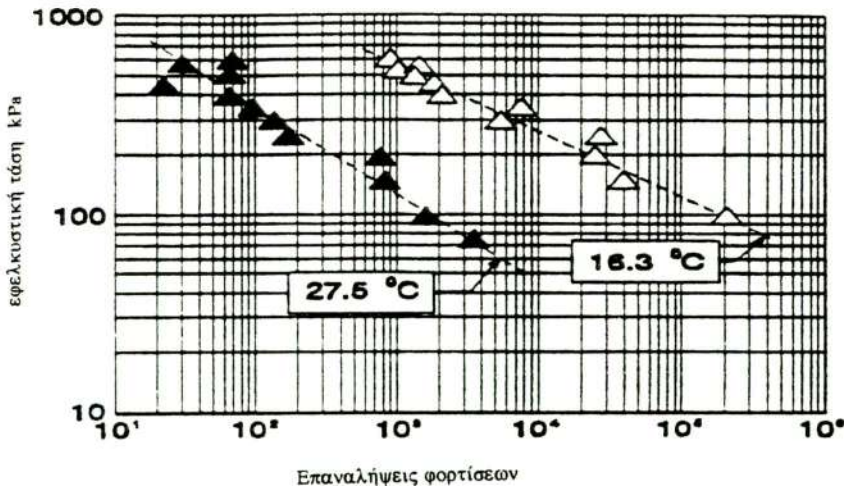
Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας πρέπει να είναι ίδια με τη θερμοκρασία των δοκιμών κόπωσης. Σε περίπτωση εκτέλεσης δοκιμών κόπωσης δοκιμίων του ίδιου ασφαλτομίγματος σε διάφορες θερμοκρασίες η γραμμή κόπωσης σε διάγραμμα $\log N - \log \sigma$ μετατοπίζεται σχεδόν παράλληλα, έτσι ώστε η μείωση της θερμοκρασίας ή αλλιώς η αύξηση της δυσκαμψίας να οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής του ασφαλτομίγματος, βλ. Σχ. 8.6α. Η γραμμή κόπωσης όμως σε διάγραμμα $\log N - \log \epsilon$ δεν θα αλλάξει εφόσον πρόκειται για το ίδιο μίγμα, βλ. Σχ. 8.6β, διότι τα αποτελέσματα στην ουσία ανάγονται ως προς το μέτρο δυσκαμψίας (σχέση (8.1)) – η παρατήρηση αυτή έχει καταγραφεί από πολλούς ερευνητές και αναφέρεται και ως «strain criterion». Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που είναι σκοπιμότερο να καταστρώνονται διαγράμματα $\log N - \log \epsilon$. Ο λόγος του Poisson για τα ασφαλτικά υλικά μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία σύμφωνα με το Σχ. 8.7, και μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση:

$$\nu = T \cdot 0.01 + 0.15$$

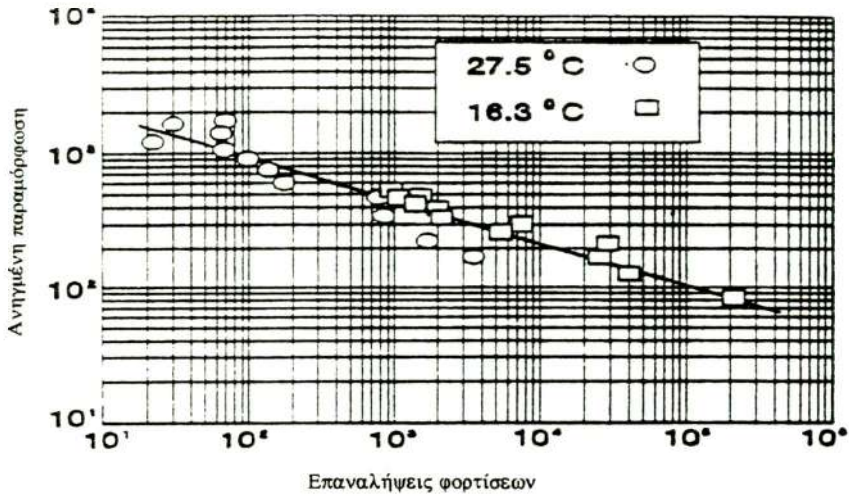
Όπου:

ν : Poisson's ratio

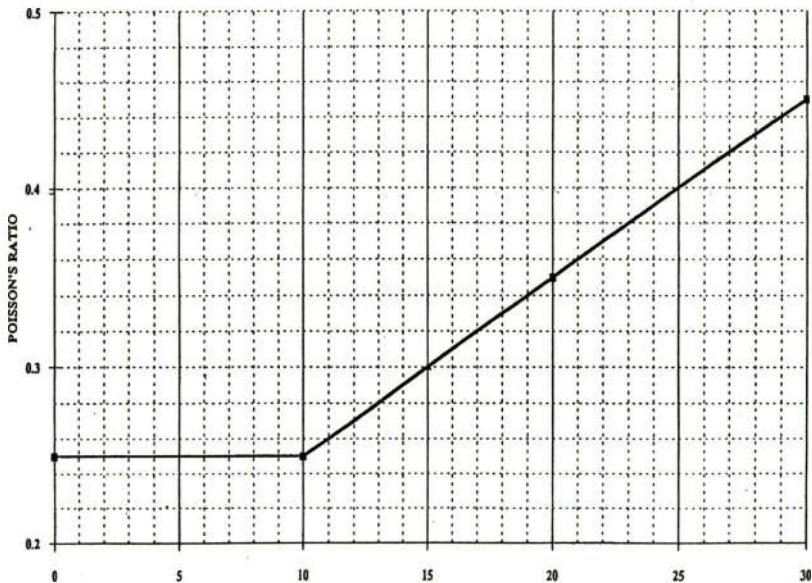
T: θερμοκρασία °C



Σχήμα 8.6α: Διάγραμμα κόπωσης $\log \sigma \sim \log N$. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης σε δύο θερμοκρασίες (Brown and Cooper, 1993).



Σχήμα 8.6β.: Διάγραμμα κόπωσης $\log \sigma \sim \log N$. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης σε δύο θερμοκρασίες (Brown and Cooper, 1993).



Σχήμα 8.7: Μεταβολή λόγου του Poisson (ν) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ($^\circ\text{C}$). [TRL Recommendation for Poisson ratio – Linear interpolation between points]

8.3. ΚΟΠΩΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ Ή ΚΑΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Οι δοκιμές κόπωσης που περιελάμβανε η ερευνητική αυτή εργασία είχαν τους ακόλουθους στόχους:

- α) Σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μιγμάτων που εξετάστηκαν προηγουμένως με κριτήριο την αντοχή σε κόπωση με σκοπό να διερευνηθεί ο ρόλος κάθε σταθεροποιητή (γαλακτώματος και τσιμέντου).
- β) Σύγκριση της αντοχής σε κόπωση των παραπάνω μιγμάτων με την αντοχή σε κόπωση άλλου τύπου ασφαλτομιγμάτων όπως θερμά ασφαλτομίγματα, και ασφαλτομίγματα από ανακύκλωση με αφρώδη ασφαλτο.

8.3.1. Εργαστηριακές δοκιμές

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό (αντιδιαμετρική θλίψη), των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων ανακυκλωμένων με ασφαλτικό γαλακτώμα ή και τσιμέντο, που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

Παρασκευάστηκαν 5 μίγματα από αδρανή 50%ΦΑ, και άλλα 5 μίγματα από αδρανή 100%ΦΑ, με διαφορετικά ποσοστά τσιμέντου και γαλακτώματος, βλ. Πίνακα8.3.

Πίνακας 8.3: Ψυχρά ανακυκλωμένα μίγματα που φτιάχτηκαν στην εργασία αυτή

ΦΑ%	50					100				
№.	I	II	III	IV	IX	V	VI	VII	VIII	X
Γ. %	2	3	2	3	0	2	3	2	3	0
T. %	2	2	0	0	2	2	2	0	0	2

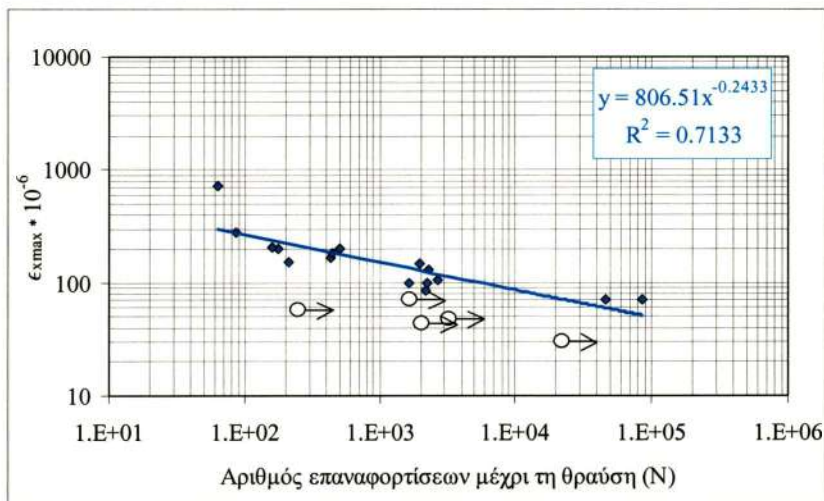
8.3.1.1. Εκτέλεση δοκιμών κόπωσης σε έμμεσο εφελκυσμό (Αντιδιαμετρική θλίψη)

Παρασκευάστηκαν από κάθε μίγμα (Πίν.8.3) από 20 έως 40 κυλινδρικά δοκίμια "Marshall" με ύψος 60mm και διάμετρο 100mm. Οι δοκιμές έγιναν με την μηχανή Nottingham Asphalt Tester σύμφωνα με τις οδηγίες του πρωτοκόλλου : PROTOCOL VERSION 1.0, LINK BITUTEST PROJECT INDIRECT TENSILE FATIGUE TEST

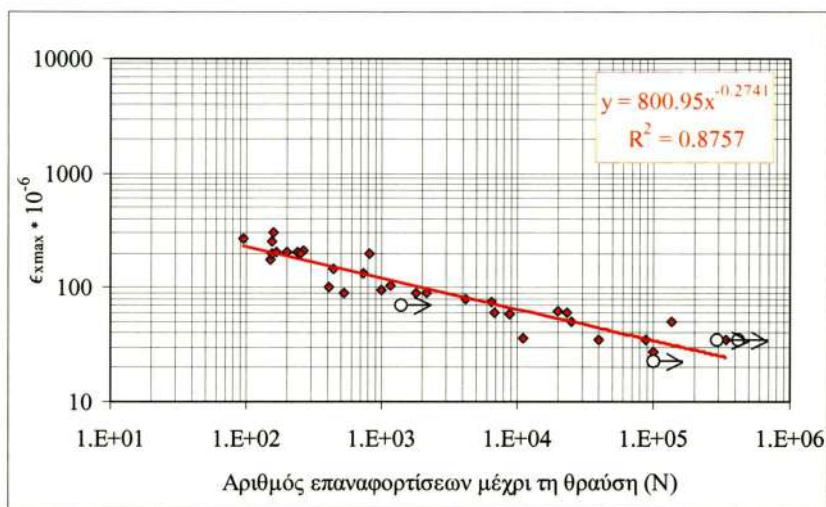
(ITFT). Η διαδικασία είναι η ίδια με αυτή που περιγράφεται στην παράγραφο 8.2.3 για τα συμβατικά ασφαλομίγματα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης παρουσιάζονται στα σχήματα 8.8 έως 8.16 στα οποία παρουσιάζονται τα διαγράμματα κόπωσης ως συνάρτηση της μέγιστης αρχικής επιβαλλόμενης εφελκυστικής ανηγμένης παραμόρφωσης $\epsilon_{x\max}$. Τα διαγράμματα είναι σε λογαριθμική μορφή ($\log \epsilon_{\max} - \log N$), η γραμμή παλινδρόμησης από τα σημεία των αποτελεσμάτων είναι στην περίπτωση αυτή ευθεία γραμμή.

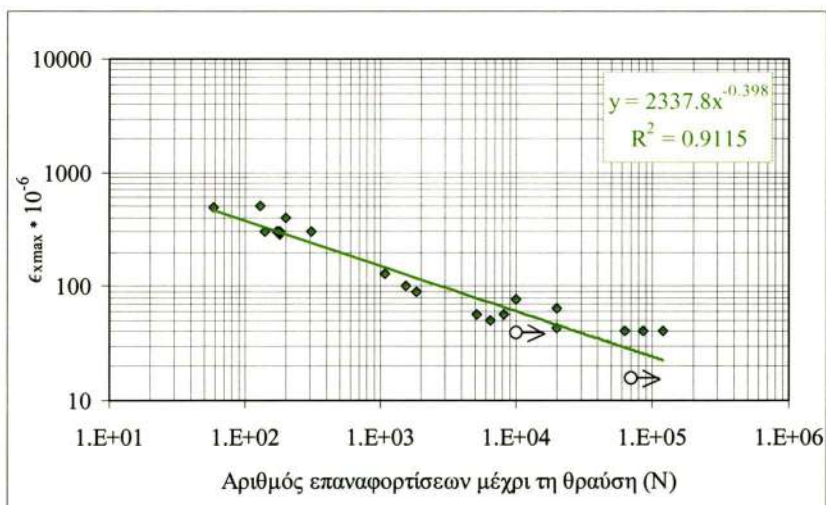
Σημειώνεται ότι κατά την εκτέλεση των προκαταρκτικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ μέτρου δυσκαμψίας και επιβαλλόμενης τάσης $S = f(\sigma)$ παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια του μίγματος ΙΧ θραύοντο και επομένως το μίγμα αυτό δεν δοκιμάστηκε σε κόπωση. (βλ. παράγραφο 7.8).



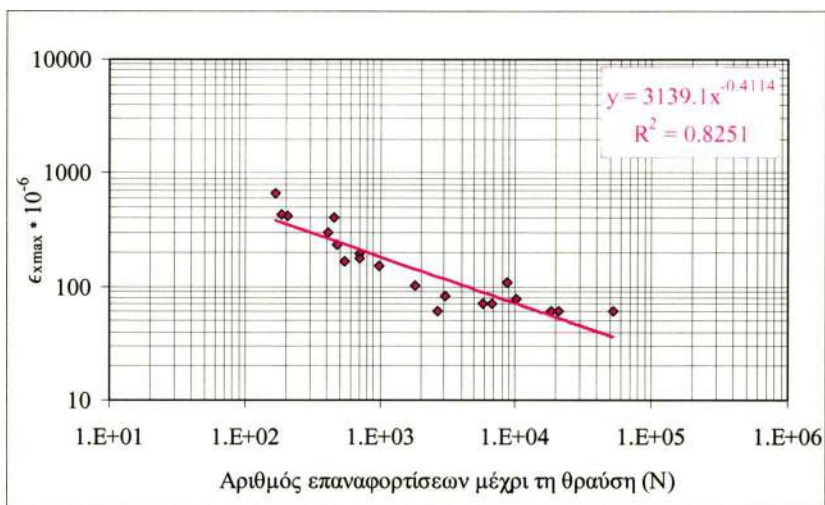
Σχήμα 8.8: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα Ι (50%ΦΑ, $T=2\%$, $\Gamma=2\%$)



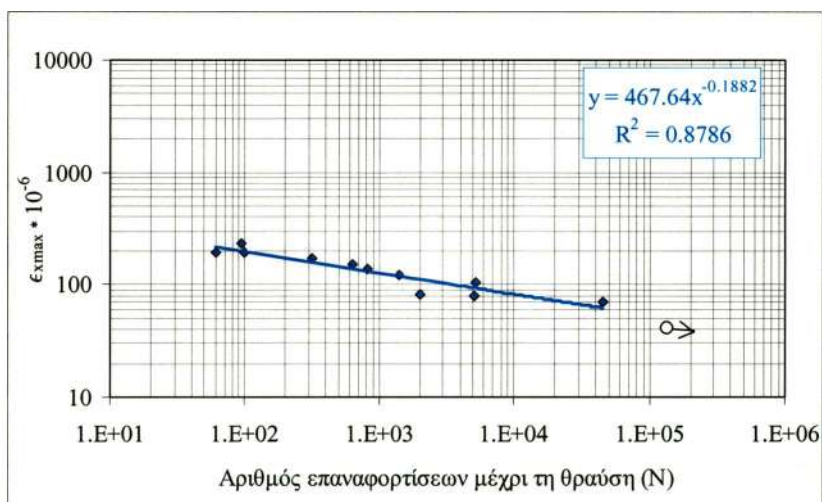
Σχήμα 8.9: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα II (50%ΦΑ, $T=2\%$, $\Gamma=3\%$)



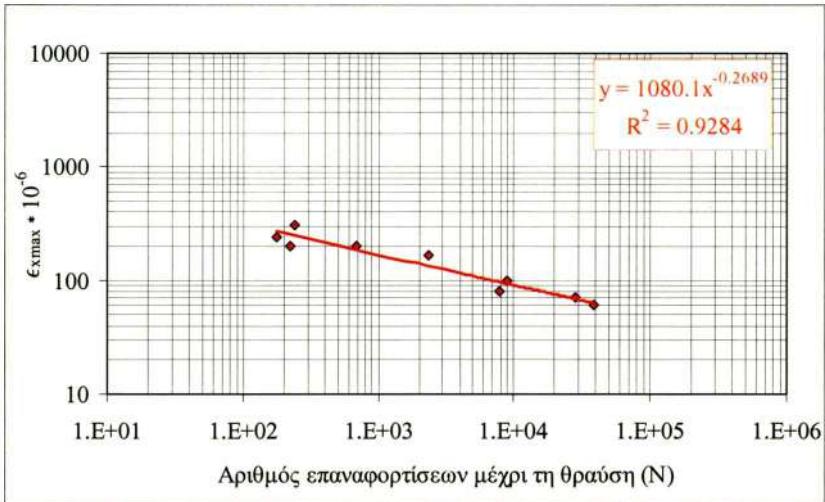
Σχήμα 8.10: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα III (50%ΦΑ, $T=0\%$, $\Gamma=2\%$)



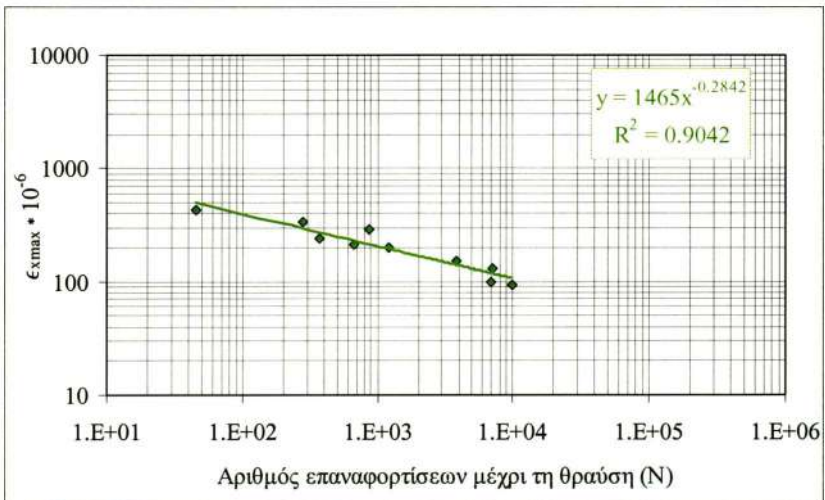
Σχήμα 8.11: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα IV (50%ΦΑ, $T=0\%$, $\Gamma=3\%$)



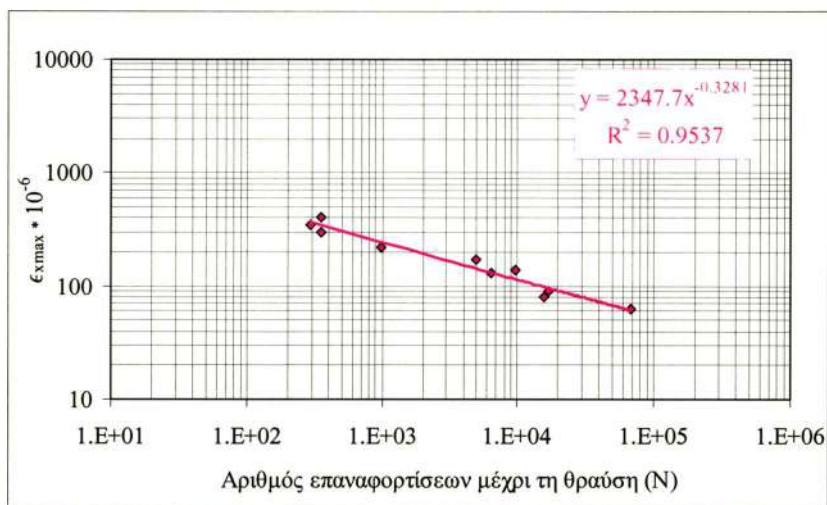
Σχήμα 8.12: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα V (100%ΦΑ, $T=2\%$, $\Gamma=2\%$)



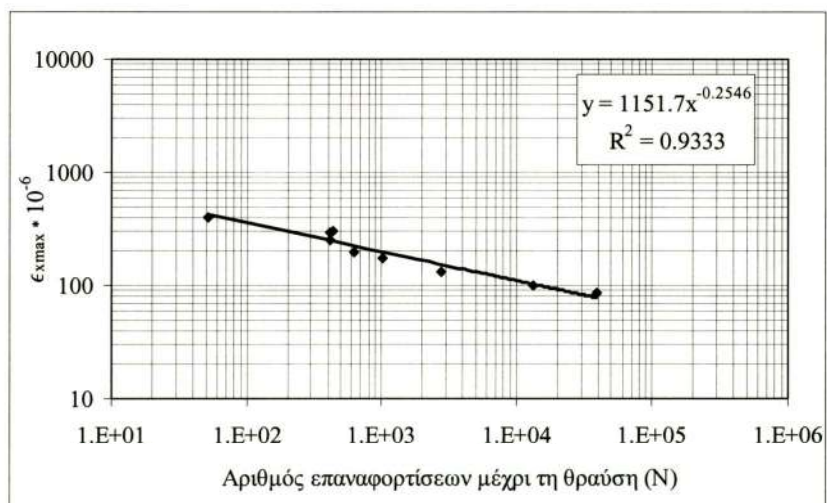
Σχήμα 8.13: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα VI (100%ΦΑ, $T=2\%$, $\Gamma=3\%$)



Σχήμα 8.14: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα VII (100%ΦΑ, $T=0\%$, $\Gamma=2\%$)



Σχήμα 8.15: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα VIII (100%ΦΑ, T.=0%, Γ.=3%).



Σχήμα 8.16: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για το μίγμα X (100%ΦΑ, T.=2%, Γ.=0%).

8.3.2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε σε δύο ομάδες ομοειδών μιγμάτων 50%ΦΑ, και 100%ΦΑ βλ. Σχ. 8.17, Σχ. 8.18.

Μετά από γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων προέκυψαν εξισώσεις οι οποίες δίνονται στα διαγράμματα κόπωσης (με λογαριθμική κλίμακα $\text{Loge} - \text{LogN}$) ως:

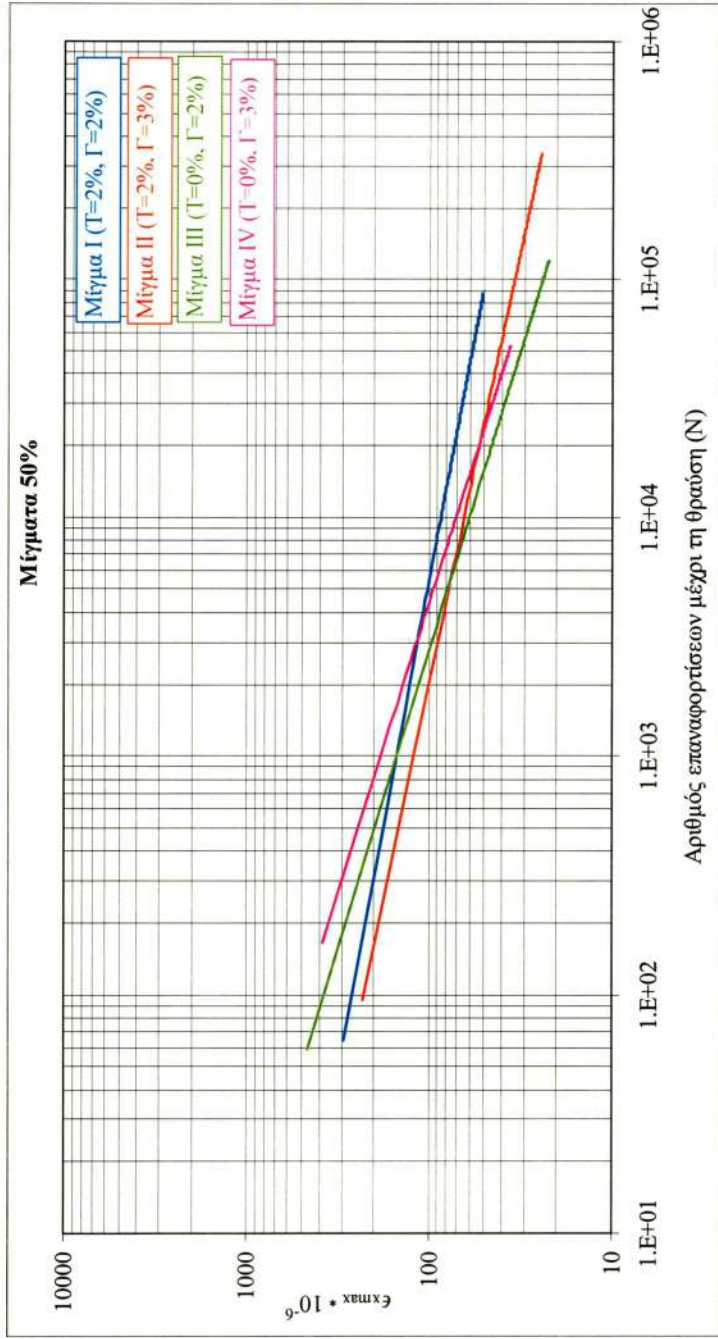
$$\epsilon_{x\max} = a \cdot N^{-b} \quad (8.4)$$

$$\Rightarrow N = a^{1/b} \cdot \epsilon^{-1/b}$$

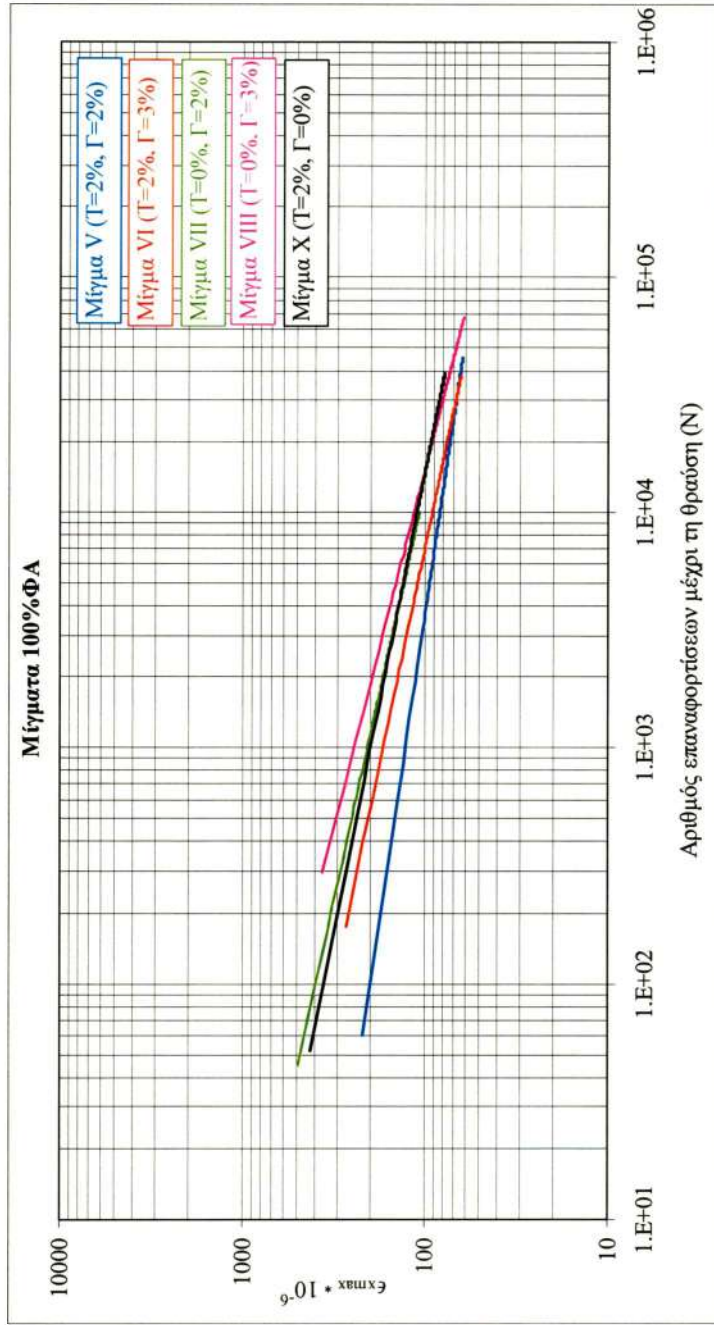
Ο πίνακας 8.4 δίνει τις τιμές των σταθερών των εξισώσεων κόπωσης. Σημειώνεται ότι τόσο τα διαγράμματα των σχημάτων 8.17 και 8.18 όσο και οι τιμές των σταθερών δεν παρέχουν πλήρη σύγκριση των γραμμών κόπωσης. Η σύγκριση των γραμμών ή των αλγορίθμων κόπωσης πρέπει να γίνει σε όλη το εύρος των εκτιμώμενων φορτίσεων και γι'αυτό δεν αρκεί μόνο η κλίση της γραμμής κόπωσης ή μόνο η σχετική θέση της. Προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν πληρέστερη σύγκριση υπολογίστηκαν οι τιμές των επιτρεπόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων από την εξίσωση (4) για τα υλικά που δοκιμάστηκαν, για $N = 10^5, 10^6, 10^7, 10^8$ οι οποίες ονομάζονται $\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7, \epsilon_8$ αντίστοιχα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5.

Πίνακας 8.4: Σταθερές των αλγορίθμων κόπωσης:

Μίγματα		T. %	Γ. %	a	b
50%ΦΑ	I	2	2	806.51	0.2433
	II	2	3	800.95	0.2741
	III	0	2	2337.8	0.398
	IV	0	3	3139.1	0.4114
100%ΦΑ	V	2	2	467.64	0.1882
	VI	2	3	1080.1	0.2689
	VII	0	2	1465	0.2842
	VIII	0	3	2347.7	0.3281
	X	2	0	1151.7	0.2546



Σχήμα 8.17: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων που περιέχουν 50%ΦΑ ανάλογα με τις τιμές $\epsilon_{\max}$.



Σχήμα 8.18: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων που περιέχουν 100%ΦΑ ανάλογα με τις τιμές ϵ_{max} .

Ο πίνακας 8.5 δείχνει επίσης τις αναπτυσσόμενες ανηγμένες παραμορφώσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης του οδοστρώματος του σχήματος 8.19 και τις υπολογιζόμενες επαναλήψεις φορτίσεων που μπορούν να λάβουν χώρα μέχρι την αστοχία από κόπωση όπως προβλέπεται από τις δοκιμές.

Με κριτήριο το μέγεθος των επιτρεπόμενων παραμορφώσεων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.5 είναι δυνατόν τα μίγματα με 50%ΦΑ να καταταγούν από άποψη αντοχής σε κόπωση στη σειρά I, II, III και IV ανεξάρτητα από τις επαναλήψεις φορτίσεων. Αντίθετα τα μίγματα με 100%ΦΑ παρουσιάζουν εξάρτηση από τις προβλεπόμενες επαναφορτίσεις και για $N \leq 10^5$ η σειρά είναι X, VII, VIII και V, VI ενώ για $N \geq 10^6$ η σειρά γίνεται V, X, VII, VI, VIII.

Πίνακας 8.5: Επιτρεπόμενες Ανηγμένες Παραμορφώσεις για 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 επαναλήψεων φορτίσεων. Αναπτυσσόμενες ανηγμένες παραμορφώσεις και επιτρεπόμενες επαναφορτίσεις.

Μίγματα				Επιτρεπόμενες ανηγ. παραμορφώσεις				ϵ_r αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις 10^{-6}	N_{er} υπολογιζόμενες επαναφορτίσεις
No.	ΦΑ %	T. %	Γ. %	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8		
I	50	2	2	49	28	16	9	35	398340
II		2	3	34	18	10	5	35	91202
III		0	2	24	10	4	2	54	12930
IV		0	3	28	11	4	2	57	17050
V	100	2	2	54	35	23	15	32	1545101
VI		2	3	49	26	14	8	34	385180
VII		0	2	56	29	15	8	42	267810
VIII		0	3	54	25	12	6	47	150284
X		2	0	61	34	19	11	45	339423

Το μίγμα X είναι λίγο διαφορετικό από τα άλλα μίγματα επειδή δεν περιέχει γαλάκτωμα αλλά μόνο τσιμέντο 2% και φαίνεται ότι είναι το καλύτερο μίγμα μέχρι $N = 10^5$ αλλά μετά για πιο μεγάλες τιμές του N (10^6 , 10^7 , 10^8) η γραμμή κόπωσης έχει ελαφρώς πιο μεγάλη κλίση ως προς τον άξονα X επομένως παρουσιάζει μεγαλύτερη

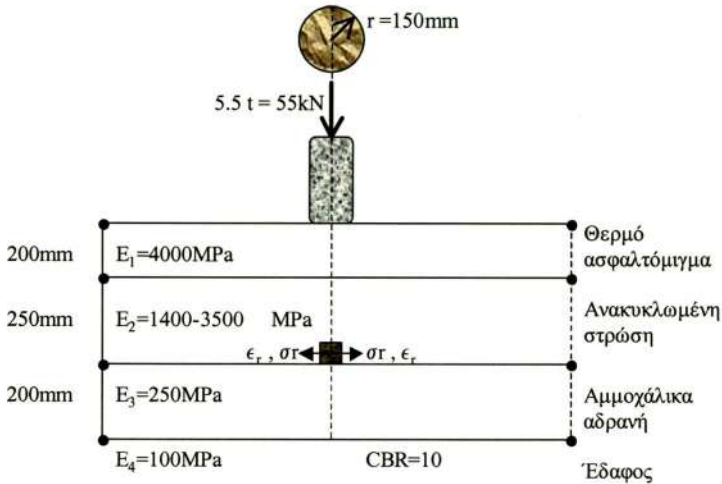
ευασησία σε ρηγμάτωση από το μίγμα V που έχει το ίδιο ποσοστό τσιμέντου 2% αλλά επιπλέον έχει ποσοστό γαλακτώματος 2%.

Με την επιφύλαξη ότι οι δοκιμές κόπωσης παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων και επομένως για να εξαχθούν απολύτως ασφαλή αποτελέσματα χρειάζεται μεγάλος αριθμός δοκιμών, θα μπορούσαν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα για τα ποσοστά συνδετικών υλικών που εξετάστηκαν, και για τιμές επαναφορτίσεων $N \geq 10^5$:

- ο Τα μίγματα που περιέχουν τσιμέντο (2%) δείχνουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από τα μίγματα που δεν περιέχουν τσιμέντο (μεγαλύτερες επιτρεπόμενες τιμές ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ για επίτευξη 10^5 , 10^6 , 10^7 , 10^8 επαναλήψεις φορτίσεων).
- ο Όταν τα μίγματα περιέχουν τσιμέντο, το ποσοστό 2% γαλακτώματος δίνει καλύτερα αποτελέσματα (μεγαλύτερες τιμές επιτρεπόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ) από το ποσοστό 3%.
- ο Υπάρχει η ένδειξη ότι όταν τα μίγματα δεν περιέχουν τσιμέντο, η αύξηση του ποσοστού γαλακτώματος από 2% σε 3% επιφέρει μικρή αλλά όχι σημαντική επιδείνωση (μικρότερες τιμές ϵ) στην αντοχή σε κόπωση.
- ο Στα μίγματα 100%ΦΑ όσο η περιεκτικότητα σε γαλάκτωμα είναι μικρή τόσο καλύτερη φαίνεται ότι είναι η συμπεριφορά σε κόπωση.
- ο Τα μίγματα με 100%ΦΑ παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση (μεγαλύτερες τιμές ϵ) από τα μίγματα με 50%ΦΑ.
- ο Το τσιμέντο επιφέρει μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση των επιτρεπόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ και επομένως βελτιώνει την αντοχή των μιγμάτων με 50%ΦΑ καλύτερα από τα μίγματα με 100%ΦΑ.

Θα πρέπει όμως να παρατηρηθεί ότι ούτε και αυτή η σύγκριση είναι πλήρης διότι δεν λαμβάνει υπόψη της την επάρρη του μέτρου δυσκαμψίας στην εντατική κατάσταση του οδοστρώματος. και τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος από τα οποία εξαρτάται και το μέγεθος της αναπτυσσόμενης οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης. Για τον λόγο αυτό η σύγκριση επεκτείνεται και στο οδόστρωμα του σχήματος 6.19 με τα αναγραφόμενα σε αυτό πάχη στρώσεων και μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών. Υπολογίζεται, με τη βοήθεια του προγράμματος BISAR, η αναπτυσσόμενη ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_r στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης

και οι αντιστοιχούσες σε αυτή επιτρεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων N_{ef} . Τα δύο αυτά μεγέθη δίνονται στις δύο τελευταίες στήλες του Πίνακα 8.5.



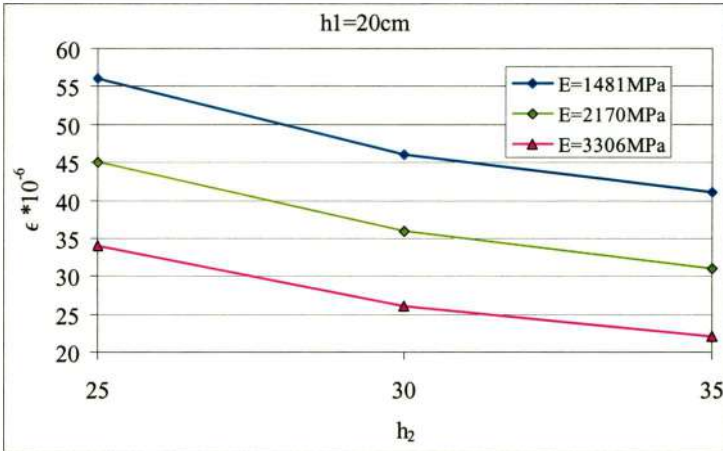
Σχήμα 8.19: Διατομή οδοστρώματος που εξετάστηκε.

Από το Πίνακα 8.5 φαίνεται ότι με τέτοιο οδόστρωμα μόνο τα μίγματα I, V, VI, VII, VIII, X, και οριακά το II, έχουν επιτρεπόμενες παραμορφώσεις μεγαλύτερες από τις αναπτυσσόμενες και μάλιστα μόνο για $N=10^5$. Για μεγαλύτερο αριθμό φορτίσεων το οδόστρωμα πρέπει να ενισχυθεί με μεγαλύτερο πάχος ασφαλτικών στρώσεων (θερμό ασφαλτόμιγμα). Επιβεβαιώνεται επομένως η πρακτική των χωρών που εφαρμόζουν αυτή την μέθοδο ανακύκλωσης σύμφωνα με την οποία περιορίζεται η ανακύκλωση με γαλάκτωμα σε οδούς με ελαφριά ή μέτρια κυκλοφορία.

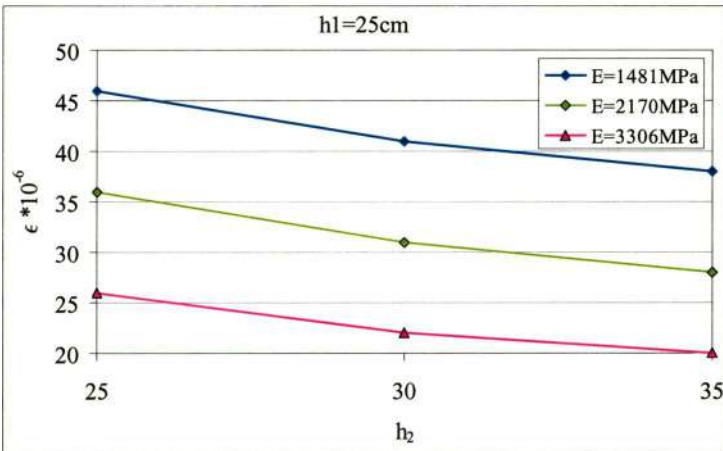
Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν για τον υπολογισμό του πάχους των οδοστρώματων διότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης απαιτούν βαθμονόμηση σε σχέση με τη συμπεριφορά των πραγματικών οδοστρώματων για να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως ανάπαυλες φορτίσεων, διαφορές των φορτίσεων κόπωσης από εκείνες του πραγματικού οδοστρώματος (εργαστήριο: διαξονική επιπόνηση, οδοστρώματα εν λειτουργία: τριαξονική επιπόνηση), επίδραση του θερμοκρασιακού κύκλου, διασπορά πάχους στρώσεων και αποτελεσμάτων κόπωσης, κ.α. Μπορεί όμως

να γίνει χρήση αυτών σε συγκριτικές μελέτες όπως έγινε παραπάνω. Με την επιφύλαξη αυτή και σε μία προσπάθεια να διευρυνθεί η δυνατότητα σύγκρισης των μιγμάτων και επίσης να διερευνηθεί κατά προσέγγιση το πεδίο πιθανής χρήσεως των ανακυκλωμένων αυτών υλικών, η ανάλυση του οδοστρώματος του σχήματος 6.19 επεκτάθηκε και για πάχη ανακυκλωμένων στρώσεων $h_2 = 300 \text{ mm}$ και 350 mm καθώς και για πάχος θερμών ασφαλτομιγμάτων $h_1 = 250 \text{ mm}$ και 300 mm . Τα μίγματα που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή, ομαδοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με τις τιμές δυσκαμψίας που μετρήθηκαν. Για κάθε ομάδα λήφθηκε ο μέσος όρος και με τις τιμές των μέσων όρων έγινε ανάλυση του οδοστρώματος με το λογισμικό BISAR και υπολογίστηκαν οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ_r στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης. Τα σχήματα Σχ. 8.20 έως Σχ. 8.22 παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης και του πάχους h_2 .

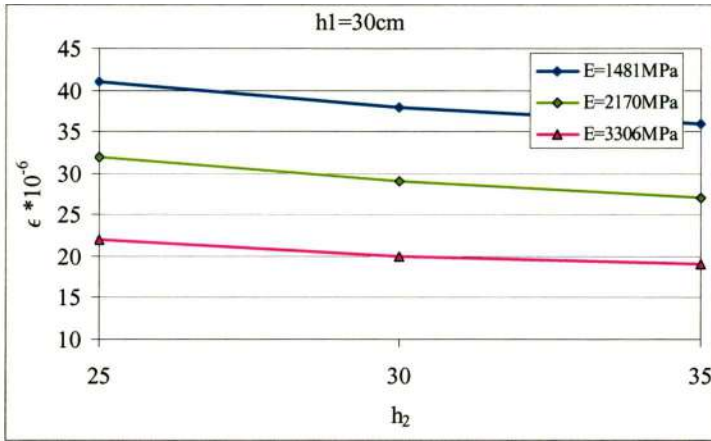
Από τα τρία σχήματα αυτά φαίνεται ότι οι τιμές των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων ϵ_r κυμαίνονται από 56×10^6 έως 19×10^6 . Για τις στρώσεις με μεγαλύτερο πάχος ($h_1 = 30 \text{ cm}$, $h_2 = 35 \text{ cm}$) η ανάλυση του οδοστρώματος δείχνει ότι μόνο στα μίγματα III, IV και VIII (που έχουν μικρή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας) οι τιμές των ϵ_r είναι πιο μεγάλες από τις τιμές των επιτρεπόμενων παραμορφώσεων ϵ_6 όταν $N = 10^6$, ενώ τα άλλα μίγματα μπορούν να αντέξουν 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων/ διελεύσεων οχημάτων.



Σχήμα 8.20: Μεταβολή των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων με το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης όταν το πάχος της επιφανειακής στρώσης από θερμή άσφαλτο είναι 20cm.



Σχήμα 8.21: Μεταβολή των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων με το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης όταν το πάχος της επιφανειακής στρώσης από θερμή άσφαλτο είναι 25cm.



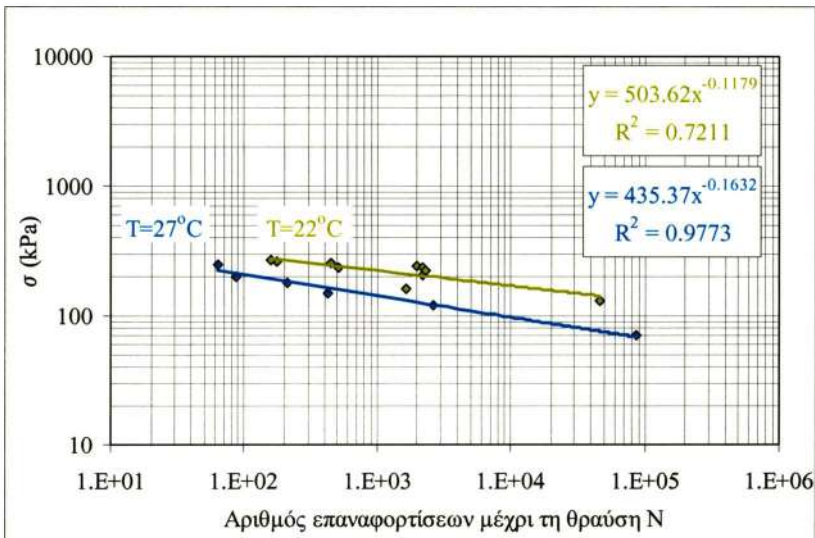
Σχήμα 8.22: Μεταβολή των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων με το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης όταν το πάχος της επιφανειακής στρώσης από θερμή άσφαλτο είναι 30cm.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σχολιάζονται παρακάτω σε σχέση με την επιβαλλόμενη μέγιστη εφελκυστική τάση. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των δοκιμών κόπωσης των μιγμάτων με 50%ΦΑ, χρειάστηκε, όπως ήδη έχει αναφερθεί, να μεταβληθεί η θερμοκρασία των δοκιμών για να επέλθει θραύση σε σχετικά σε μεγάλο αριθμό των επαναφορτίσεων N . Αυτό ήταν αναγκαίο να γίνει μόνο για τα μίγματα με 50%ΦΑ, ενώ για τα μίγματα με 100%ΦΑ δεν παρουσιάστηκε η ανάγκη να γίνουν δοκιμές σε διαφορετική θερμοκρασία. Είναι γνωστό (βλ παράγραφο 8.2.3.1) ότι οι δοκιμές κόπωσης (ιδίως υπό ελεγχόμενη τάση) δίνουν αποτελέσματα τα οποία εξαρτώνται από το μέτρο δυσκαμψίας και επομένως και από την θερμοκρασία των δοκιμών κατά την διάρκεια της δοκιμής [Monismith, Pell, Croney, Brown]. Όταν όμως τα διαγράμματα γίνουν υπό μορφή $\text{Log} \epsilon - \text{Log} N$ όπου ϵ είναι η αρχικώς επιβαλλόμενη παραμόρφωση (η οποία υπολογίζεται από το μέτρο δυσκαμψίας και την επιβαλλόμενη τάση, σχέση 8.1) η επίδραση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας (και της θερμοκρασίας) δεν φαίνεται να υπάρχει και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μία ευθεία γραμμή.

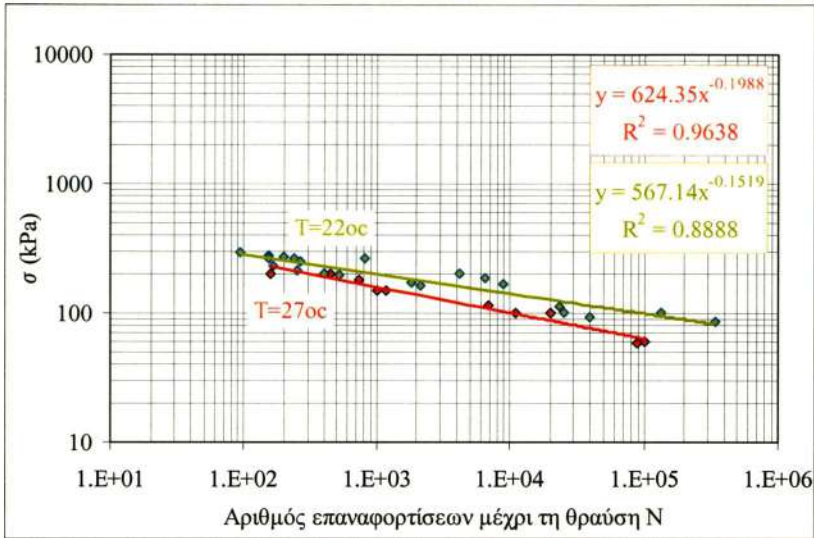
Στα Σχήματα 8.23 έως 8.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης υπό μορφή $\text{log} \sigma - \text{log} N$, όπου σ είναι η επιβαλλόμενη μέγιστη εφελκυστική τάση. Παρατηρείται ότι όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη, οπότε το μέτρο δυσκαμψίας είναι μεγαλύτερο, η καμπύλη κόπωσης είναι μετατεθειμένη σε υψηλότερη θέση ως

προς τον άξονα Υ, δηλ. για τον ίδιο αριθμό φορτίσεων όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη τάση πρέπει να επιβληθεί για επέλθει θραύση. Η παρατήρηση αυτή είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών για θερμά ασφαλομίγματα [Pell, Brown, Croney].

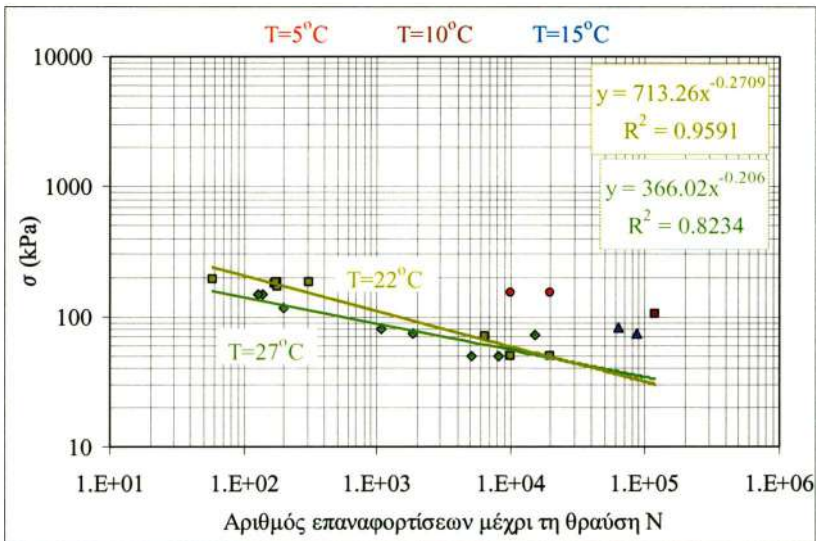
Η σύγκριση των διαγραμμάτων κόπωσης των σχημάτων 8.8 έως 8.11 με 8.23 έως 8.26 επιβεβαιώνει το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης υπό ελεγχόμενη τάση μπορούν να παρουσιαστούν υπό μορφή $\log\sigma - \log N$ σε μία γραμμή ανεξάρτητα από την θερμοκρασία της δοκιμής.



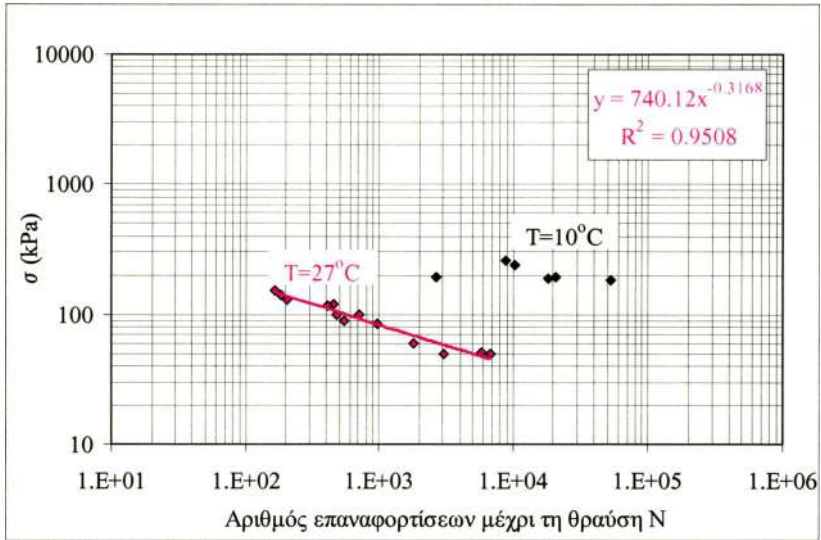
Σχήμα 8.23: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης ($\log\sigma - \log N$). Μίγμα 50%ΦΑ I(T=2%, Γ=2%). Σύγκριση με το Σχ. 8.8.



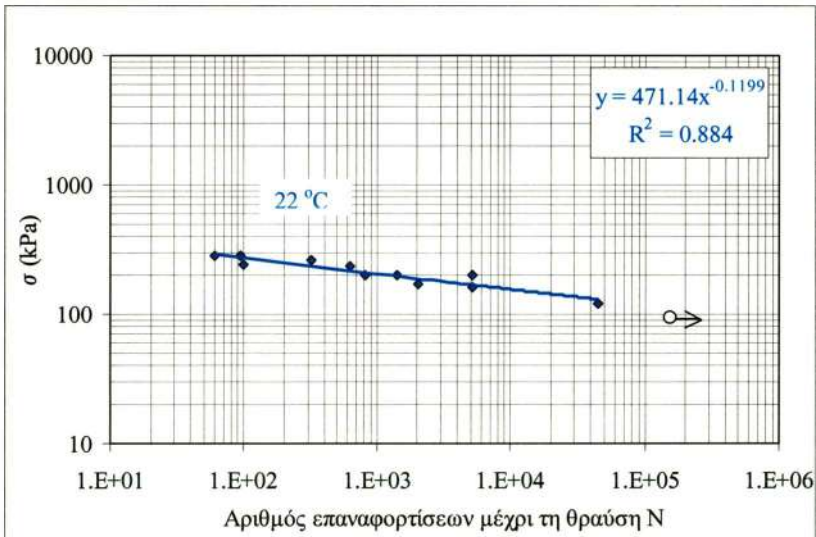
Σχήμα 8.24: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης (logσ - logN). Μίγμα 50%ΦΑ ΙΙ(T=2%, Γ=3%) Σύγκριση με το Σχ. 8.9.



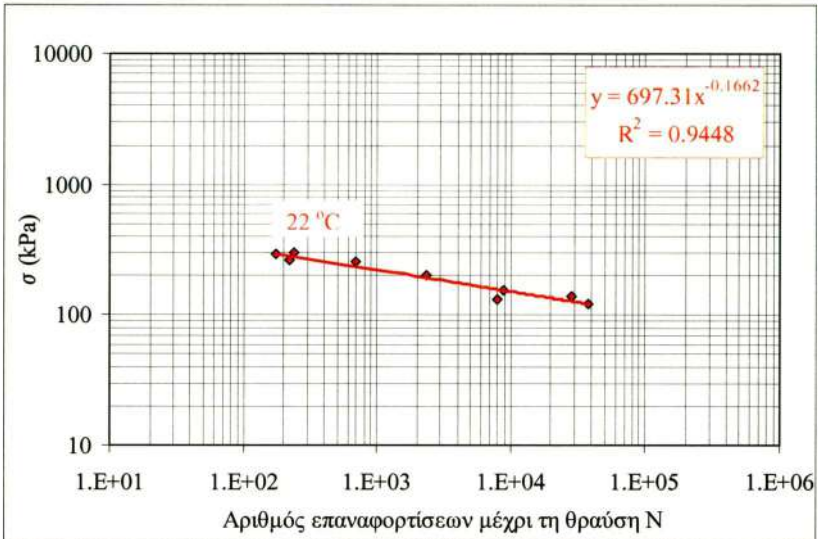
Σχήμα 8.25: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης (logσ - logN). Μίγμα 50%ΦΑ ΙΙΙ(T=0%, Γ=2%). Σύγκριση με το Σχ. 8.10.



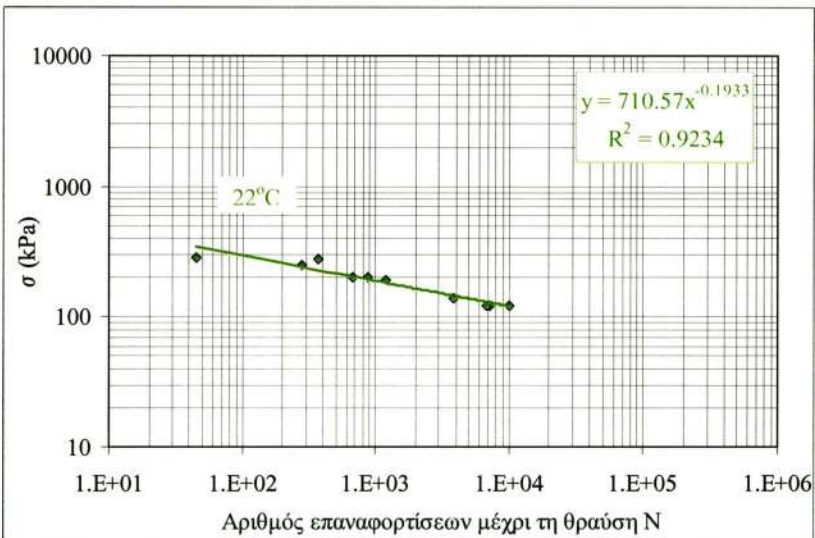
Σχήμα 8.26: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης ($\log \sigma$ - $\log N$). Μίγμα 50%ΦΑ IV ($T=0\%$, $\Gamma=3\%$). Σύγκριση με το Σχ. 8.11.



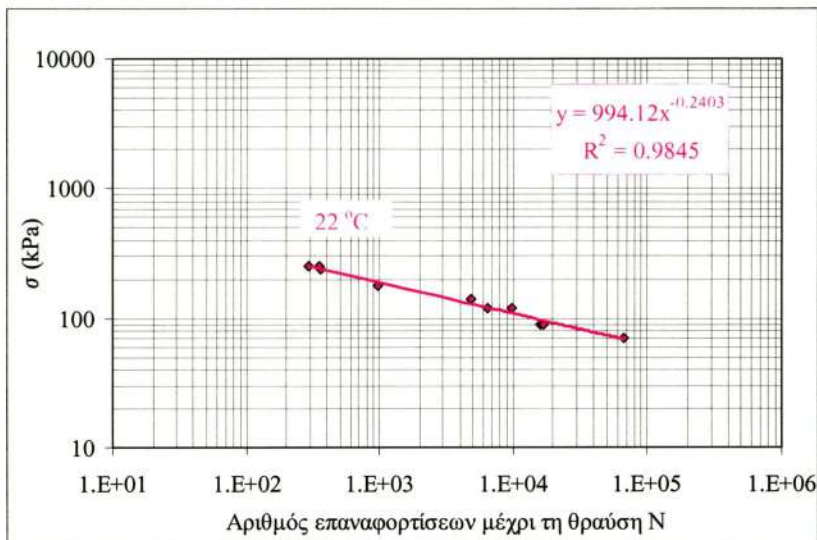
Σχήμα 8.27: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης ($\log \sigma$ - $\log N$). Μίγμα 100%ΦΑ V ($T=2\%$, $\Gamma=2\%$).



Σχήμα 8.28: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης (logσ - logN). Μίγμα 100%ΦΑ VI(T=2%, Γ=3%).



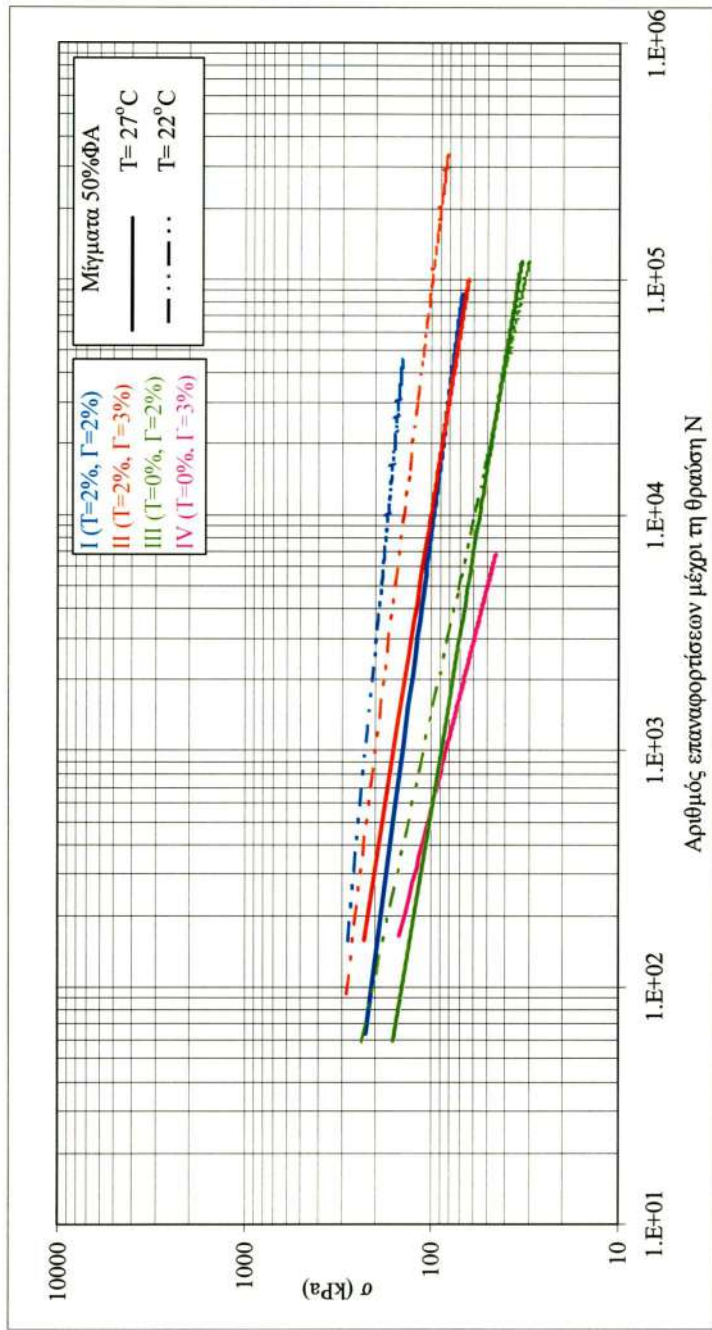
Σχήμα 8.29: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης (logσ - logN). Μίγμα 100%ΦΑ VII(T=0%, Γ=2%).



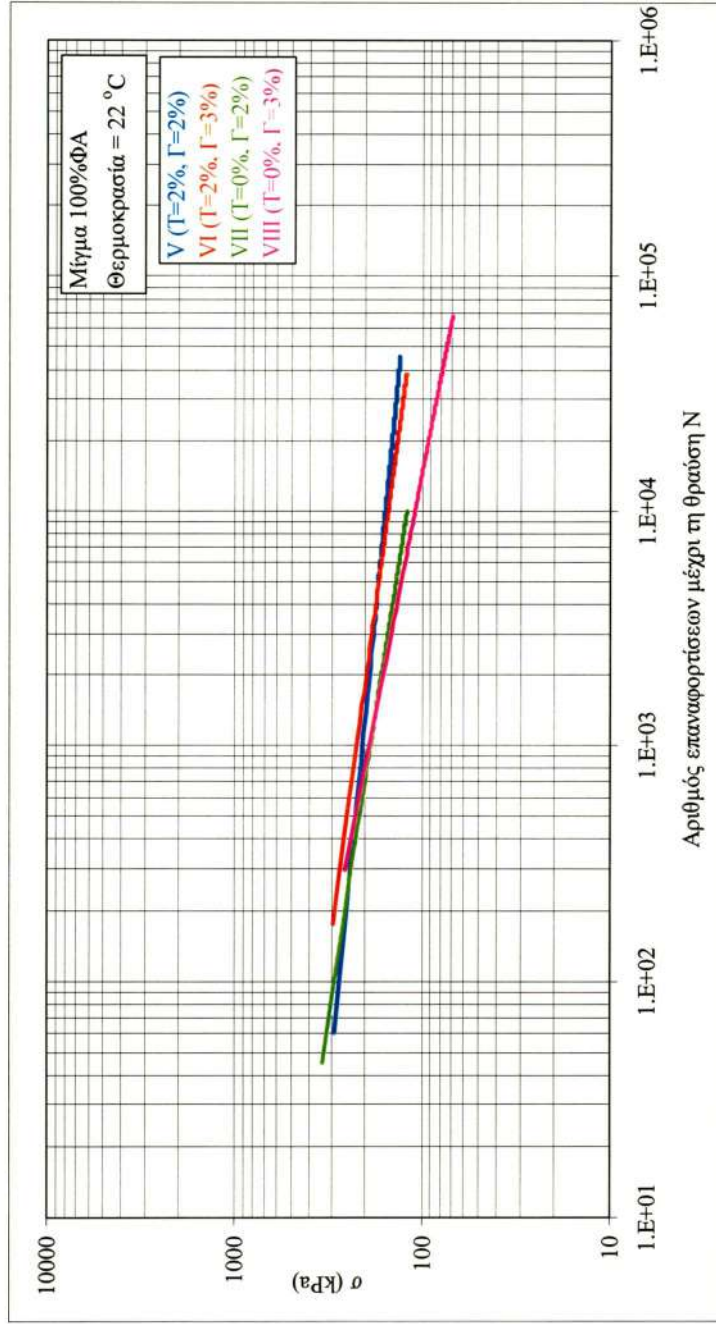
Σχήμα 8.30: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης (logσ - logN). Μίγμα 100%ΦΑ VIII(T=0%, Γ=3%).

Τα Σχήματα 8.31 και 8.32 παρουσιάζουν συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα για τα μίγματα με 50%ΦΑ (θερμοκρασία 22°C και 27 °C) και 100%ΦΑ (22°C) αντίστοιχα. Στο Σχ 8.33 συγκρίνονται τα μίγματα με 50%ΦΑ και 100%ΦΑ για θερμοκρασία δοκιμής 22°C.

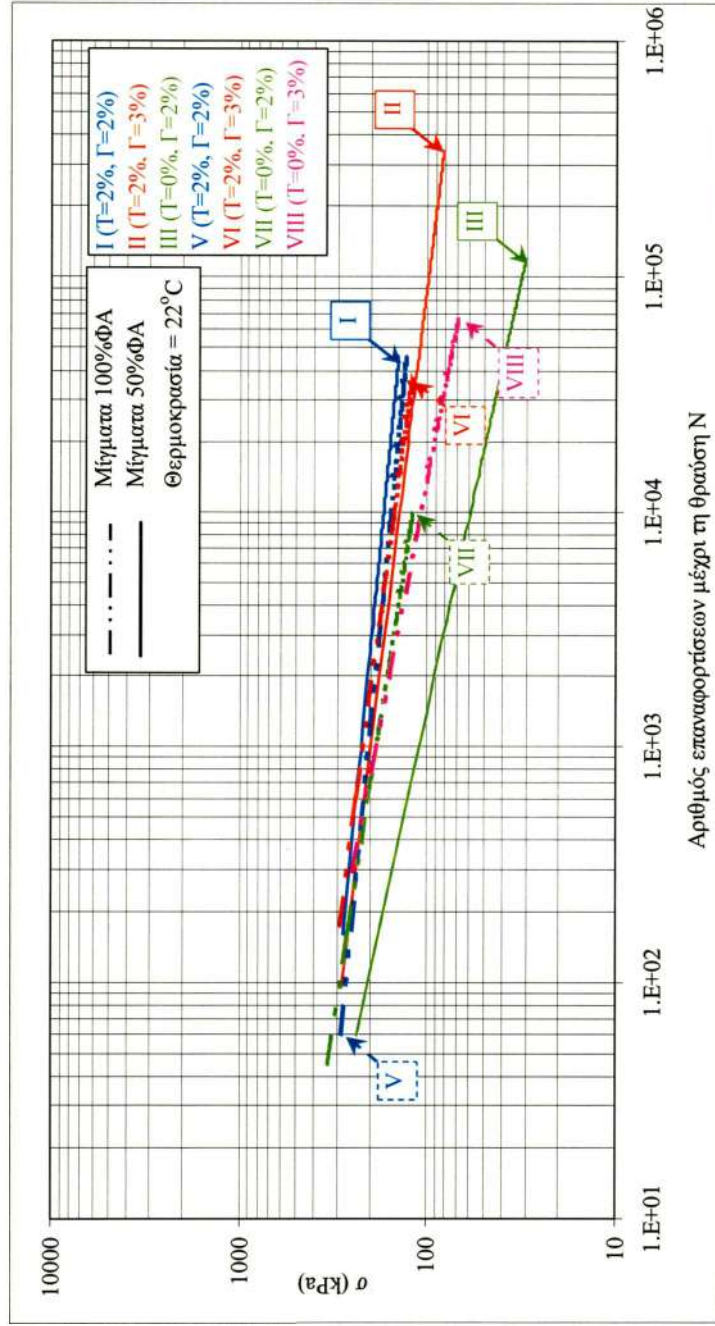
Όπως είναι αναμενόμενο τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη εξέταση των διαγραμμάτων κόπωσης σε μορφή (logσ - logN) δεν διαφέρουν από εκείνα που ήδη έχουν εξαχθεί από τα διαγράμματα (logε - logN).



Σχήμα 8.31: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για τα μίγματα με 50%ΦΑ εκφρασμένα από μορφή σ-N επιβαλλόμενης τάσης – επαναλαμβανόμενες φορτίσεις



Σχήμα 8.32: Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης για τα μίγματα με 100%ΦΑ εκφρασμένα από μορφή $\sigma - N$ επβαλλόμενη τάσης – επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.



Σχήμα 8.33: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων που περιέχουν 50%ΦΑ με 100%ΦΑ ανάλογα με τις τιμές σ

8.3.3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες έρευνες

Γενικά στην σύγκριση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένες επιφυλάξεις διότι είναι γνωστό ότι πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης και για να είναι μία σύγκριση ακριβής θα πρέπει οι παράγοντες αυτοί να έχουν διατηρηθεί οι ίδιοι στις συγκρινόμενες δοκιμές πράγμα που σπανίως συμβαίνει. Οι κυριότεροι από τους παράγοντες αυτούς είναι:

- ο Είδος δοκιμής: θλίψη, κάμψη, μονοαξονικός εφελκυσμός, έμμεσος εφελκυσμός, ανακυκλιζόμενες δοκιμές (εναλλαγή πρόσημου αναπτυσσόμενης τάσης από εφελκυσμό σε θλίψη)
- ο Τύπος δοκιμής (κάμψη αμφιέριστης δοκού με επιβολή δύο φορτίων στα τρίτα του ανοίγματος ή ενός φορτίου στο μέσον του ανοίγματος, ή κάμψη σε δοκίμια – προβόλους με μεταβαλλόμενη τραπεζοειδή διατομή ή κυλινδρικά δοκίμια – πρόβλους, κάμψη με συνεχή υποστήριξη του δοκιμίου, κ.α)
- ο Θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος
- ο Ανάπαυλες φόρτισης Συχνότητα φόρτισης

Συχνά οι λεπτομέρειες της διεξαγωγής των δοκιμών δεν είναι πλήρως γνωστές και μπορεί να επηρεάσουν τα συμπεράσματα της σύγκρισης.

Με τις επιφυλάξεις αυτές θα γίνει μία προσπάθεια σύγκρισης των αποτελεσμάτων της έρευνας αυτής με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών για να διαπιστωθούν και να σχολιαστούν τυχόν συμφωνίες και ασυμφωνίες.

Κατ'αρχήν η σύγκριση θα γίνει με άλλες εργασίες που έγιναν στο ίδιο εργαστήριο με την ίδια δοκιμή (έμμεσος εφελκυσμός) με την ίδια μηχανή αλλά με άλλα υλικά. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζει σχετικά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας και προσφέρει μία δυνατότητα σύγκρισης των υλικών μεταξύ τους. Στη συνέχεια η σύγκριση αυτή θα επεκταθεί σε δοκιμές του ίδιου τύπου σε διαφορετικά εργαστήρια με τα παραλήσια ή διαφορετικά υλικά.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ (Κόλιας, 1994), (Κόλιας, 2003) σε συμβατικά ασφαλτομίγματα και σε αφρώδη ασφαλτο αντίστοιχα. Επίσης συγκρίνονται και με άλλες έρευνες (Read and Brown, 1996), και (Khalid, 2000) που πραγματοποιήθηκαν στα συμβατικά ασφαλτομίγματα. Όλες οι έρευνες αυτές αφορούν κόπωση σε έμμεσο

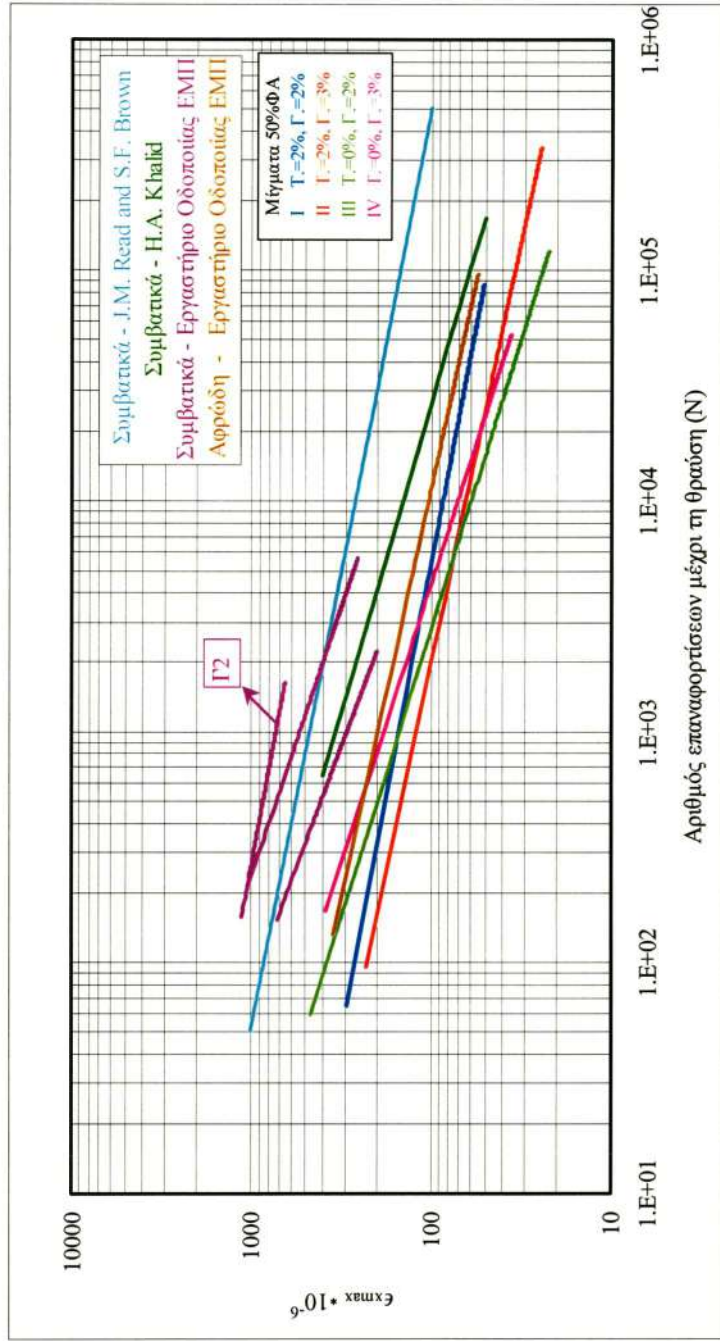
εφελκυσμό (αντιδιαμετρική θλίψη) υπό ελεγχόμενη τάση στον ίδιο τύπο μηχανής (Nottingham Asphalt Tester).

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος (Κόλιας, 1994) εξετάστηκαν σε κόπωση 3 συμβατικά ασφαλτομίγματα ΠΤΠ Α265 στρώση κυκλοφορίας τύπου Γ στο άνω, μέσο και κάτω όριο της προβλεπόμενης ζώνης κοκκομετρικών διαβαμίσεων με 5-6% άσφαλτο 100pen. Οι δοκιμές κόπωσης έγιναν σε θερμοκρασίες 25°C και 30°C.

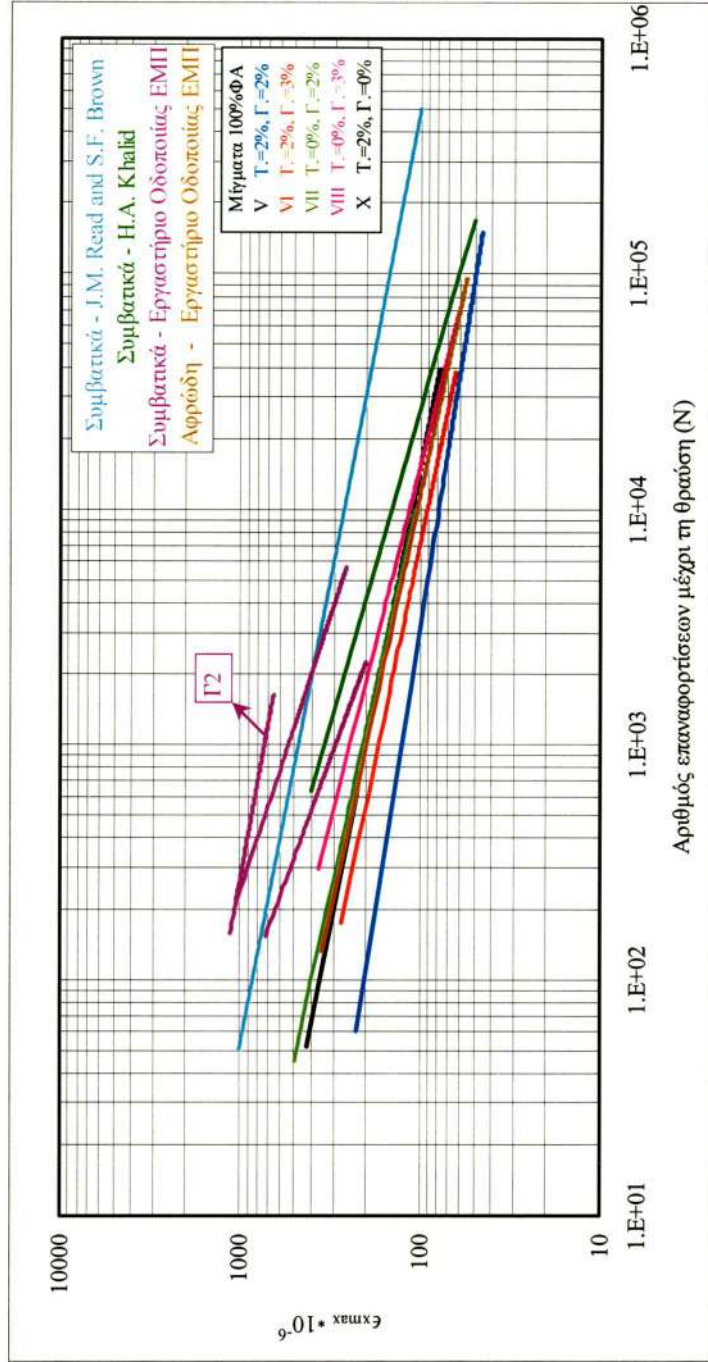
Πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (Λοΐζος, 2003) περιλαμβάνει πειραματική εργασία δοκιμών κόπωσης στο εργαστήριο σε έμμεσο εφελκυσμό (Κόλιας, 2003) αφρώδων ασφαλτομιγμάτων ανακύκλωσης. Το αφρώδες ασφαλτόμιγμα που εξετάζεται προέρχεται από το ανακυκλωμένο υλικό των ασφαλτικών στρώσεων (πάχους περίπου 8cm) και μέρους των στρώσεων ΚΘΑ (πάχους περίπου 20cm) του αυτοκινητόδρομου Αθηνών- Κορίνθου, τμήμα Παράκαμψη Διυλιστηρίων, όπως λεπτομερέστερα αναφέρεται στη (Loizos et al, 2004). Στο ανακυκλωμένο υλικό προστέθηκε 3% αφρώδης άσφαλτος, 15-20% άμμος και 1% τσιμέντο. Η θερμοκρασία των δοκιμών ήταν σταθερή και ίση με 23°C. Περισσότερες πληροφορίες για την επιτόπου συμπεριφορά του υπόψη ανακυκλωμένο οδοστρώματος αναφέρεται στην πηγή (Λοΐζος και Παπαβασιλείου, 2005).

Οι Βρετανικές έρευνες των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων που εκτελέστηκαν από (Read and Brown, 1996), (Khalid, 2000), έχουν - ανάμεσα στους διάφορους τύπους ασφαλτομιγμάτων που εξετάστηκαν - μίγματα Dense Bitumen Macadam με 4.7% άσφαλτο 100pen (συγκρίσιμα αποτελέσματα).

Στα σχήματα 8.34, 8.35 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών με τις καμπύλες της έρευνας αυτής των 50%ΦΑ, και 100%ΦΑ αντίστοιχα.



Σχήμα 8.34: Σύγκριση διαγραμμάτων κόπωσης των μιγμάτων αυτής που περιέχουν 50%ΦΑ με άλλες έρευνες



Σχήμα 8.35: Σύγκριση διαγραμμάτων κόπωσης της έρευνας αυτής που περιέχουν 100%ΦΑ με άλλες έρευνες.

Όπως παρατηρείται, οι καμπύλες των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο πάνω από εκείνες των ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων (αφρώδους και γαλακτώματος) - για το ίδιο ε ο αριθμός N στα ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα (αφρώδης άσφαλτος και γαλάκτωμα) είναι μικρότερος από τον αριθμό N του συμβατικού ασφαλτομίγματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και η μεγαλύτερη κλίση των συμβατικών καμπυλών. Εξαίρεση αποτελεί η καμπύλη του μίγματος Γ2 (συμβατικό ασφαλτόμιγμα), που έχει σχεδόν ίδια κλίση με την κλίση των ανακυκλωμένων καμπυλών. Η σημαντική διαφοροποίηση των καμπυλών των συμβατικών μιγμάτων λόγω διαφορετικής κοκκομετρίας δηλώνει την αδυναμία ορισμού μίας και μοναδικής καμπύλης κόπωσης για όλα τα συμβατικά ασφαλτομίγματα και την σκοπιμότητα ορισμού μίας ζώνης καμπυλών κόπωσης. Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα στο κάτω όριο αυτής της ζώνης βρίσκονται τα ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα (αφρώδης άσφαλτος και ασφατικό γαλάκτωμα).

Η μειωμένη αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με αφρώδη άσφαλτο θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι στα ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα ο ασφαλτοπολτός, δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος στο μίγμα και δεν περιβάλλει όλο το ασύνδετο υλικό σε αντίθεση με το συμβατικό ασφαλτόμιγμα στο οποίο ο ασφατικός υμένας είναι συνεχής και περιβάλλει πλήρως τα αδρανή.

Παρατηρείται επίσης ότι η καμπύλη της αφρώδους ασφάλτου είναι πάνω από τις καμπύλες των μιγμάτων 50%ΦΑ.

Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη της αφρώδους ασφάλτου είναι παρόμοια με την καμπύλη των μιγμάτων 100%ΦΑ: VII ($T=0\%$, $\Gamma=2\%$), X ($T=2\%$, $\Gamma=0\%$), και είναι πιο πάνω από τις καμπύλες για τα μίγματα που περιέχουν τσιμέντο, αλλά έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτές, γεγονός που σημαίνει ότι το μίγμα αυτό στο συγκεκριμένο εύρος επαναλήψεων φορτίσεων παρουσιάζεται με καλύτερη συμπεριφορά αλλά αυτό ανατρέπεται για μεγαλύτερο αριθμό φορτίσεων λόγω της μεγαλύτερης κλίσης.

Συμπεραίνεται ότι:

- ο Η αντοχή σε κόπωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από των ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων (αφρώδους και γαλακτώματος).

- ο Η αντοχή σε κόπωση των αφρωδών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 50%ΦΑ ανακυκλωμένων με ασφαλτικό γαλάκτωμα.

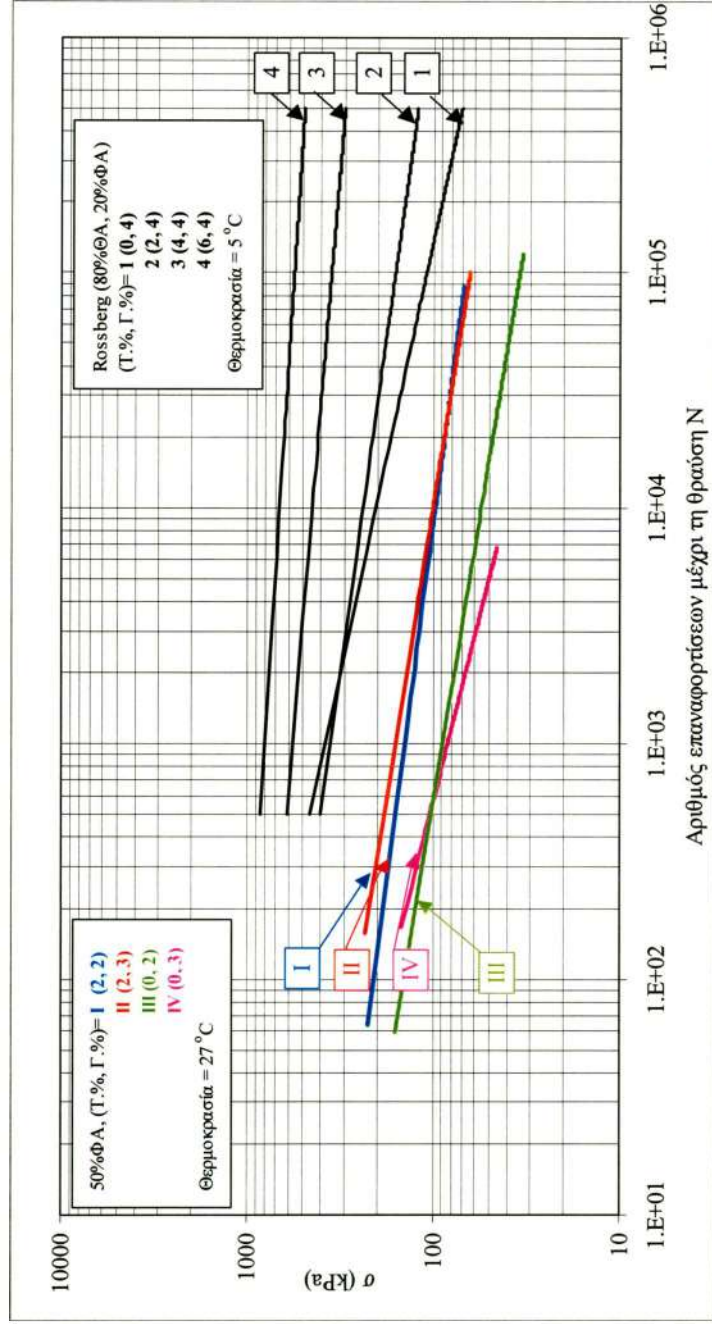
Στο Σχ 8.36 τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ανάλογης εργασίας του Πολυτεχνείου της Δρέσδης (Rossberg 2001).

Η έρευνα αυτή (Rossberg, 2001) πραγματοποιήθηκε σε μίγματα φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 20% και θραυστών αδρανών 80% με 4% γαλακτώματος και διαφορετικά ποσοστά τσιμέντου 0%, 2%, 4%, 6%. Η έρευνα αυτή αφορά κόπωση σε έμμεσο εφελκυσμό (αντιδιαμετρική θλίψη) υπό ελεγχόμενη τάση στον ίδιο τύπο μηχανής, με θερμοκρασία δοκιμών σταθερή και ίση με 5°C.

Το Σχ. 8.36 δείχνει τα ακόλουθα:

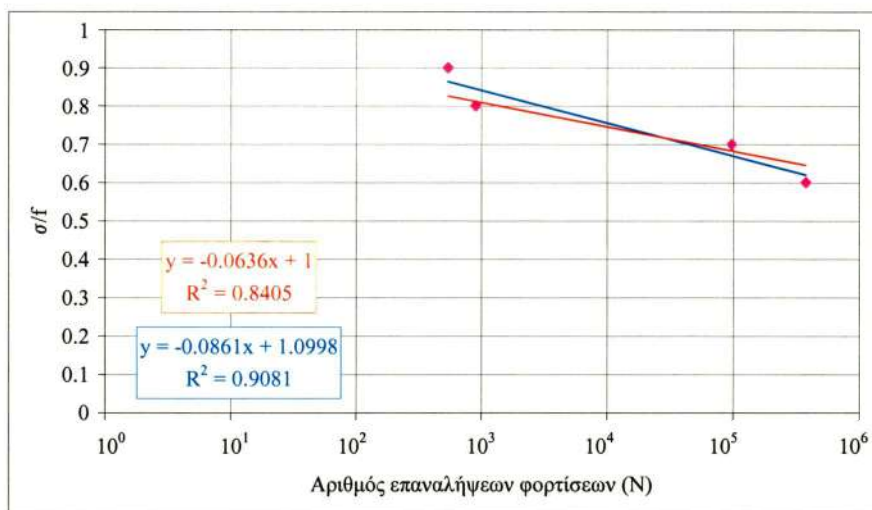
- ο Οι καμπύλες των μιγμάτων του Rossberg έχουν υψηλότερη θέση από τις καμπύλες των μιγμάτων της έρευνας αυτής. Αυτό αποδίδεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία (5°C) των δοκιμών σε σύγκριση με θερμοκρασία των 27°C της παρούσας έρευνας. Παρατηρείται μία αξιοσημείωτη παραλληλία των γραμμών κόπωσης των μιγμάτων που δεν περιέχουν τσιμέντο (I με IV) Η γραμμή κόπωσης 2 των αποτελεσμάτων Rossberg (2% τσιμέντο 4% γαλάκτωμα) έχει παρόμοια κλίση με την κλίση των μιγμάτων I και II της έρευνας αυτής με 2% τσιμέντο και γαλάκτωμα 2% και 3%

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές των δύο μιγμάτων πιστεύεται ότι οι ομοιότητες αυτές που παρατηρήθηκαν δίνουν αυξημένη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.



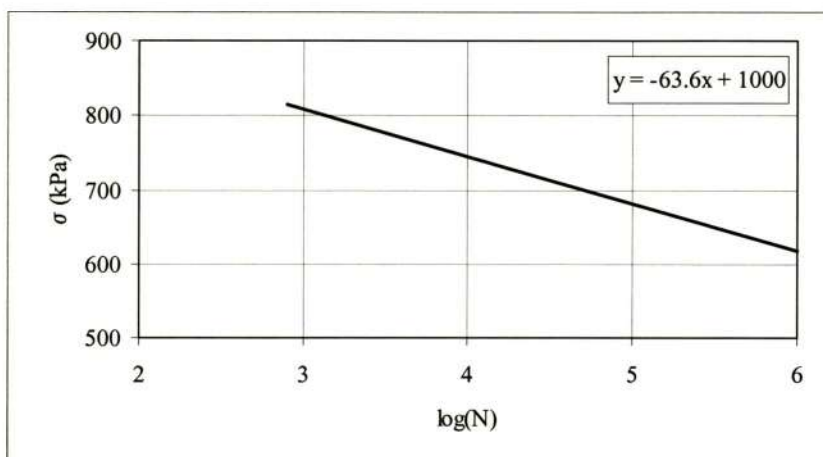
Σχήμα 8.36: Σύγκριση διαγραμμάτων κόπωσης των μιγμάτων της έρευνας αυτής με τα αποτελέσματα ανάλογης έρευνας από τον Rossberg

Το μίγμα Χ (ΦΑ=100%, Τ.=2%, Γ.=0%, θερμοκρασία= 23°C) μπορεί να συγκριθεί με έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ (Κατσάκου, 2005), σε φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα 100% με ποσοστό τσιμέντου 3% κβ. Το πρόγραμμα αυτό αφορά κόπωση σε κάμψη (αμφιέριστη δοκός 100mm × 100mm × 400mm, φόρτιση ημιτονοειδής (0-σ) με συχνότητα 10 Hz στα τρίτα του ανοίγματος) υπό ελεγχόμενο λόγο σ/f , η θερμοκρασία των δοκιμών ήταν σταθερή και ίση με 23°C.



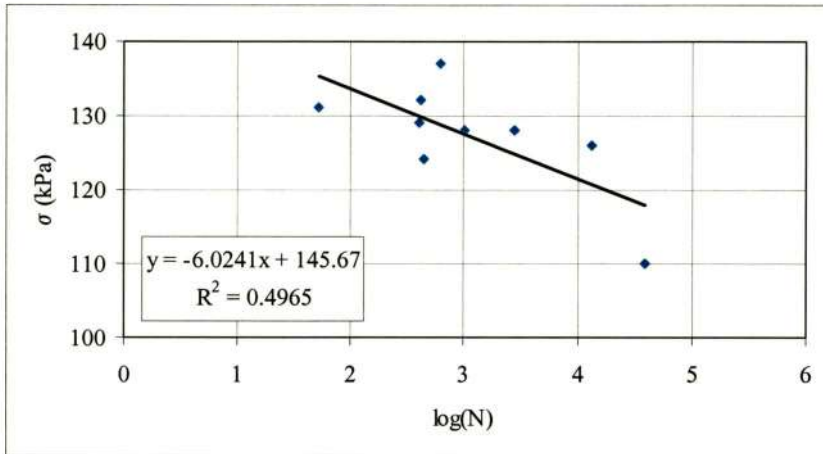
Σχήμα 8.37: Αποτελέσματα κόπωσης σε κάμψη σε μίγμα 100%ΦΑ, τσιμέντο 3%, Μέσοι όροι [Κατσάκου, 2005]

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό μορφή σ/f - $\log N$ στο Σχ.8.37 και μετατρέπονται σε διάγραμμα σ - $\log N$, βλ Σχ 8.38, λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση τιμή της καμπτικής αντοχής στα πειράματα αυτά ήταν 0.95 MPa.

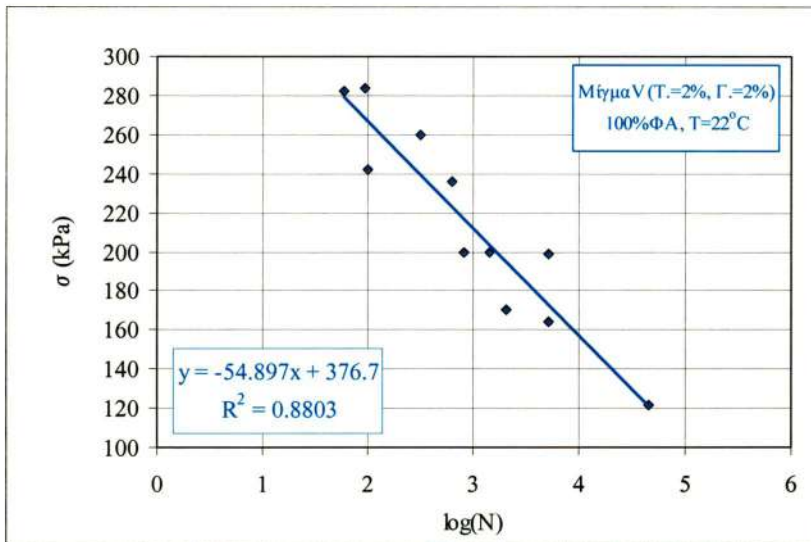


Σχήμα 8.38: Αποτελέσματα κόπωσης σε κάμψη 100%ΦΑ, τσιμέντο3%,
Μέσοι όροι (σ με logN), [Κατσάκου 2005].

Το σχήμα 8.39 δείχνει την καμπύλη της κόπωσης του μίγματος Χ στην ίδια μορφή (σ με logN). Παρατηρείται ότι η κλίση της καμπύλης είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την κλίση της καμπύλης του Σχ. 8.38. Γενικά θα πρέπει να επισημανθεί ότι η γραμμή κόπωσης του μίγματος Χ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές με τις γραμμές κόπωσης των άλλων μιγμάτων της εργασίας αυτής, γεγονός που σε συνδυασμό με τη μεγάλη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του μίγματος Χ, καθιστούν τα αποτελέσματα αυτά όχι πολύ αξιόπιστα.



Σχήμα 8.39: Αποτελέσματα κόπωσης μίγμα X(100%ΦΑ, T= 2%, Γ=0%)



Σχήμα 8.40: Αποτελέσματα κόπωσης μίγμα V(100%ΦΑ, T= 2%, Γ=2%)

Για να εξεταστεί περισσότερο το θέμα αυτό, στο Σχ. 8.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης του μίγματος V (100% ΦΑ, T=2%, Γ=2%). Παρατηρείται ότι η κλίση της γραμμής κόπωσης (-54.897) δεν διαφέρει πολύ από την κλίση (-63.6) της καμπύλης του Σχ.8.38, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι τα αποτελέσματα του μίγματος X δεν είναι πολύ αξιόπιστα. Η διαφορά αυτή μεταξύ του

μίγματος Χ και των αποτελεσμάτων κόπωσης σε κάμψη του Σχ. 8.38 θα μπορούσε να αποδοθεί στη μεγάλη μεταβλητότητα γεγονός που καθιστά αναγκαία την διεξαγωγή μεγαλύτερου αριθμού δοκιμών. Η διαφοράς μεταξύ των δύο δοκιμών σε έμμεσο εφελκυσμό και σε κάμψη (στο αναπτυσσόμενο πεδίο τάσεων, στη μορφή της φόρτισης στο μέγεθος και τη συμπίκνωση των δοκιμίων) δεν πιστεύεται ότι αποτελούν την πρωταρχική αιτία διαφορών αυτών δεδομένου ότι οι δοκιμές με άλλα μίγματα όπως αυτό του σχήματος 8. 40 δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλη διαφορά.

8.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ο Τα μίγματα που περιέχουν τσιμέντο (2%) δείχνουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από τα μίγματα που δεν περιέχουν τσιμέντο.
- ο Το τσιμέντο βελτιώνει την αντοχή των μιγμάτων με 50%ΦΑ καλύτερα από τα μίγματα με 100%ΦΑ.
- ο Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος ανάλογα με την τιμή της αντοχής σε κόπωση είναι:

α) Για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο είναι:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.

β) Για τα μίγματα με τσιμέντο είναι:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.

Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραγράφων 6.3, 6.7 η αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος μειώνει τα μεγέθοι του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό (είτε πρόκειται για δοκιμές με ξηρά δοκίμια, είτε για δοκιμές μετά από υδρεμποτισμό). Δεδομένου ότι στις δοκιμές υπό ελεγχόμενη τάση μείωση του μέτρου δυσκαμψίας έχει ως συνέπεια την μείωση της αντοχής σε κόπωση (βλ. παράγραφο 8.2., Σχ. 8.2.) τα αποτελέσματα αυτά της κόπωσης είναι αναμενόμενα.

- ο Τα μίγματα με 100%ΦΑ παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από τα μίγματα με 50%ΦΑ, αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στα μίγματα που δεν περιέχουν τσιμέντο.
- ο Η αντοχή σε κόπωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από των ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων με γαλάκτωμα.

- ο Η αντοχή σε κόπωση των αφρωδών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 50%ΦΑ ανακυκλωμένων με ασφαλτικό γαλάκτωμα, ενώ είναι παρόμοια με την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 100%ΦΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -9-

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

- Η σειρά ανάμιξης επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας, αλλά όχι την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.
- Η προανάμιξη του γαλακτώματος με το νερό ελαττώνει το μέτρο δυσκαμψίας των μιγμάτων και τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων.
- Για τις δοκιμές στο εργαστήριο, φαίνεται ότι η σειρά ανάμιξης αδρανή - τσιμέντο - νερό - γαλάκτωμα είναι προτιμητέα.
- Όταν η συμπίκνωση των μιγμάτων γίνεται αμέσως μετά το πέρας της ανάμιξης επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές στο μέτρο δυσκαμψίας, ενώ η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό δεν φαίνεται να επηρεάζεται
- Για τα μίγματα με 50%ΦΑ αύξηση της μέγιστης διάστασης αδρανούς από 12.5mm σε 19mm, έχει ως συνέπεια την αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, αλλά και την αύξηση της μεταβλητότητας στις δοκιμές αυτές.
- Η συντήρηση των δοκιμών αμέσως μετά την παρασκευή τους συνιστάται να είναι:
 - Για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο: 3 ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C.
 - Για τα μίγματα με τσιμέντο: 7 ημέρες σε υγρό θάλαμο (RH > 98%) και 2 ημέρες σε αεριζόμενο φούρνο στους 60°C.
- Η μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμών στο περιβάλλον του εργαστηρίου μετά την συντήρηση που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν φαίνεται να επηρεάζει τη δυσκαμψία και την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.

9.2. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΣΥΔΕΤΙΚΩΝ ΤΑΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΙΩΝ ΑΝΑΜΙΞΗΣ ΦΑ ΚΑΙ ΘΑ

- ο Το μέτρο δυσκαμψίας αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου, ενώ η αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος από 2% σε 3% και 4% επιφέρει το αντίθετο αποτέλεσμα.
- ο Το τσιμέντο βελτιώνει την αντοχή των μιγμάτων με 50%ΦΑ καλύτερα από τα μίγματα με 100%ΦΑ.
- ο Αύξηση του ποσοστού του ΦΑ μειώνει το μέτρο δυσκαμψίας των μιγμάτων.
- ο Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος για να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό είναι:

α) για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
- Μίγματα 0%ΦΑ: $\Gamma > 4\%$. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται με άλλες έρευνες σε ανακυκλωμένα μίγματα (PIARC, 2002), (Kanno, 2001), (Lewis, 1999), και σε ψυχρά ασφαλτομίγματα (Νικολαΐδης, 1997).

β) για τα μίγματα με τσιμέντο:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
- Μίγματα 0%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.

Τα αποτελέσματα αυτά επαβεβαιώνονται με άλλες έρευνες (PIARC, 2002), (Wirtgen, 1998).

- ο Οι λόγοι r/R και t/T των μέτρων δυσκαμψίας και των αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό σε κορεσμένη και σε ξηρή κατάσταση αντίστοιχα για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν, είναι μέσα στα όρια αποδοχής των προδιαγραφών (PIARC, 2002).
- ο Η ευαισθησία σε υδρεμπτισμό των μιγμάτων ΘΑ είναι πιο μεγάλη από ΦΑ.
- ο Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος ανάλογα με τις τιμές των λογίων r/R και t/T σε υδρεμπτισμό είναι:

α) για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.

- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 3\%$.

β) για τα μίγματα με τσιμέντο:

- Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
- Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.

9.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

- ο Το τσιμέντο διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των μιγμάτων σε κόπωση μειώνοντας την κλίση της γραμμής κόπωσης ως προς τον άξονα των επαναλήψεων των φορτίσεων και μεταθέτοντας αυτή προς τα πάνω (μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης $\epsilon_{\max}$).
- ο Η αύξηση της περιεκτικότητας σε γαλάκτωμα από 2% έως 3% φαίνεται ότι ελαττώνει την αντοχή των μιγμάτων σε κόπωση όταν περιέχουν τσιμέντο, ενώ δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση όταν τα μίγματα δεν περιέχουν τσιμέντο.
- ο Τα μίγματα που δεν περιέχουν τσιμέντο με 100%ΦΑ παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από τα αντίστοιχα μίγματα με 50%ΦΑ,
- ο Το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος ανάλογα με την τιμή της αντοχής σε κόπωση είναι:
 - α) Για τα μίγματα χωρίς τσιμέντο είναι:
 - Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
 - Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\% - 3\%$.
 - β) Για τα μίγματα με τσιμέντο είναι:
 - Μίγματα 100%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
 - Μίγματα 50%ΦΑ: $\Gamma = 2\%$.
- ο Η αντοχή σε κόπωση των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από των ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων με γαλάκτωμα.
- ο Η αντοχή σε κόπωση των αφρωδών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων είναι πιο μεγάλη από την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 50%ΦΑ ανακυκλωμένων με ασφαλικό γαλάκτωμα, ενώ είναι παρόμοια με την αντοχή σε κόπωση των μιγμάτων με 100%ΦΑ.

Από τον συνδυασμό των απαιτήσεων για μέγιστη τιμή στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε κόπωση, καθώς και για την καλύτερη

ανθεκτικότητα σε υδρεμποτισμό προκύπτει ότι το βέλτιστο ποσοστό γαλακτώματος είναι περίπου 2% έως 3%. Ενώ για το τσιμέντο δεν βρέθηκε σαφές ανώτατο όριο. Ως προς την τιμή επιλογής του μέτρου δυσκαμψίας και της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την επίλυση αυτού του θέματος.

Παράλληλα με την κυρία έρευνα διερευνήθηκαν και ορισμένοι παράγοντες που αφορούν την ακρίβεια της μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό. Τα κυριότερα συμπεράσματα είναι:

- Η ελάττωση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας με τις επαναλήψεις των φορτίσεων είναι πιο μεγάλη:
 - Σε ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα, από εκείνη σε κοινά θερμά ασφαλτομίγματα
 - Σε μίγματα που περιέχουν αδρανή ΦΑ, από εκείνη των μιγμάτων που δεν περιέχουν καθόλου αδρανή ΦΑ.
 - Σε δοκίμια κοινού θερμού ασφαλτομίγματος, από εκείνη σε πυρήνες θερμού ασφαλτομίγματος που αποκόπηκαν από οδοστρώματα εν λειτουργία.
- Η εκτέλεση της δοκιμής ITSM δεν επηρεάζει την τιμή της αντοχής των δοκιμίων (Οι τάσεις που δημιουργούνται στη δοκιμή του μέτρου δυσκαμψίας στη συσκευή NAT, είναι πιο μικρές από τις αντοχές των ψυχρών ανακυκλωμένων ασφαλτομιγμάτων)
- Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη δυσκαμψία των κοινών ασφαλτομιγμάτων ισχύουν και στα ψυχρά ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΦΑ	Φρεζαρισμένο Ασφαλτόμιγμα.
ΘΑ	Θραυστό Αμμοχάλικο.
Τ	Τσιμέντο.
Γ	Γαλάκτωμα.
Ν	Νερό.
50%ΦΑ	50% κβ. Φρεζαρισμένο Ασφαλτόμιγμα με 50%κβ. Θραυστό Αμμοχάλικο.
0%ΦΑ	100% κβ. Θραυστό Αμμοχάλικο.
ϵ_{xmax}	Μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση. Στις δοκιμές έμμεσο εφελκυσμό ϵ_{xmax} είναι η μέγιστη διαμετρική εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση.
σ_x	Η αναπτυσσόμενη τάση κατά τη διεύθυνση Χ.
σ_y	Η αναπτυσσόμενη τάση κατά τη διεύθυνση Υ.
ITS	Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.
ITSM	Μέτρο δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό.
ITSF	Κόπωση σε έμμεσο εφελκυσμό.

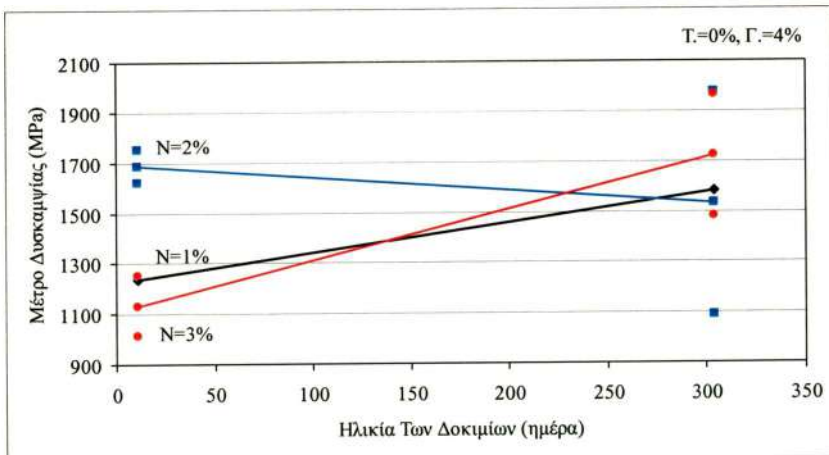
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Α-

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Η δοκιμή της μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας είναι μη καταστροφική μέθοδος και όσα δοκίμια δεν θραύστηκαν σε έμμεσο εφελκυσμό προσέφεραν την ευκαιρία διερεύνησης της επιρροής της μακρόχρονης συντήρησης στο μέτρο δυσκαμψίας και στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Τα δοκίμια αυτά παρέμειναν στο περιβάλλον του εργαστηρίου ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$) για ένα μακρό χρονικό διάστημα (μερικούς μήνες), μετά μετρήθηκε ξανά το μέτρο δυσκαμψίας στην ίδια θερμοκρασία της πρώτης φοράς και στη συνέχεια έγινε η μέτρηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους:

1. Δοκίμια της δοκιμής Proctor:

α) Μίγμα 50%ΦΑ/50%ΘΑ:



Σχήμα 1.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Proctor 50% ΦΑ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

Asphalt Institute, *"Asphalt Cold Mix Manual"*, 1981.

ASTM C117-90, *"Standard Test Method For Materials Finer Than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing"*, 1992.

ASTM C136-84a, *"Standard Method For Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates"*, 1992.

ASTM D 692-88, *"Standard Specification For Coarse Aggregate For Bituminous Paving Mixtures"*, 1992.

ASTM D1073-88, *"Standard Specification For Fine Aggregate For Bituminous Paving Mixtures"*, 1992.

Bissada F.A., "Structural Response of Foamed-Asphalt-Sand Mixtures in Hot Environments" In *Asphalt Materials and Mixtures*, Washington DC: TRB TRR1115, pp. 134-149, 1987.

Bonvino U., "Evaluation of The Cohesion of Bitumen Mixtures by Means of the Indirect Traction Resistance Test", In *"Mechanical Tests for Bituminous Mixes"*, RELIM, Chapman and Hall, 1990.

Brown S.F., "Material Characteristics for Analytical Pavement Design", In *"Developments in Highway Pavement Engineering-I"*, Pell P.S., 1978.

Brown S.F. and Cooper K.E. *"Simplified Methods for Determination of Fundamental Material Properties of Asphalt Mixes"*, Proc. Int. Conf. SHRP and traffic Safety on two continents the Hague, Netherlands, 1993.

Brown, S.F. and Needham D., "*A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures*". Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, *AAPT*, vol. 69, 2000.

BSI DD 213, "*Determination of The Indirect Tensile Stiffness Modulus of Bituminous Materials*", 1993.

Chatti K., El Mohtar C. "Effect of Different Axle Configurations on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixture" in Transportation Research Record "*Bituminous Paving Mixtures*", No. 1891, 2004,

Collop A.C. and Cebon D., "*A Theoretical Analysis of Fatigue Cracking of Flexible Pavements*", 1993.

Cooper K.E. and Pell P. S., "*The Effect of Mix Variables on The Fatigue Strength of Bituminous Materials*", TRRL Report Lr 633, 1974.

Croney D., "*The Design and Performance of Road Pavements*", London, HMSO 1977.

Davidson J.K., "*A Review of in-Place Cold Recycling/Reclamation in Canada*". 2004.

Di Benedetto H. and Ashayer A. S., "Fatigue Damage for Bituminous Mixtures" In, "*Mechanical Tests For Bituminous Materials*", Di Benedetto H. and Francken L., 1997.

Di Benedetto H. and Chantal de La Roche, "State of The Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures", In "*Bituminous Binders and Mixes*", RILEM Report 17, E & FN Spon, 1998.

Dybalski N.J., "*A Comparison of Properties of Laboratory Prepared Cold Mixed Emulsified and Hot Mixed Asphalt Mixtures*" Phase II, Presented at 10th Annual Meeting of The Asphalt Emulsion Manufacturers Association. Akzo Nobel Chemical, California, March 22-25/ 1983.

ΕΛΟΤ EN 12697.23, Ασφαλτικά Μίγματα-Μέθοδοι Δοκιμής Θερμού Ασφαλτομίγματος-Μέρος 23: *"Προσδιορισμός Της Έμμεσης Εφελκυστικής Αντοχής Δοκιμίων Ασφάλτου"*, 2004.

EN 1097-6, Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: *"Determination of Particles Density and Water Absorption"*, 2000.

Fairhurst C.E., "Resilient Modulus Testing Of Asphalt Specimens In Accordance With ASTM D4123-82", In *"Mechanical For Bituminous Mixes Characterization, Design And Quality Control"*. RILEM, Chapman and Hall. 1990.

Favretti P., Longueuil, *"Deep Cold In-Place Recycling With Emulsion/Cement"*, Quebec, Canada. 1999.

Finn, F.N., *"Factors Involved in The Design of Asphaltic Pavement Surfaces"*, National Cooperative Highway Research Program, Report 39, 1967.

Francken L. and Verstraeten J., "Interlaboratory Test Program on Complex Modulus and Fatigue", In *"Bituminous Binders and Mixes"*, RILEM Report 17, E & FN Spon, 1998.

François J.C., AIPCR/PIARC, France - *"Cold in-Place Recycling of Pavements With Emulsion or Foamed Bitumen"* – guideline Warsaw, 2002

Giuliani F. *"X-Ray Diffraction Method For Studying Cement-Modified Bitumen Emulsion Mixtures In Asphalt Pavement Cold Recycling"*. 1st International Symposium on Subgrade Stabilisation and In situ Pavement Recycling Using Cement, vol.2, Session 5, Spain, Salamanca, 2001.

Giuliani F., Rastelli S. *"An Analytical Approach to Evaluate The Performance of Cold Recycled Asphalt Mixtures"*. Italia. UD.

Jackson N. and Ravindra K. D., *"Civil Engineering Materials"*, fifth edition, 1996.

Jahren T.C., Cawley B., Ellsworth B., and Bergeson L. K., *"Review of Cold In-Place Asphalt Recycling in Iowa"*, 1998.

Jostein M., Senior Engineer, Norwegian Public Roads Administration, Akershus, Norway. *"The Use of Cold Bitumen Stabilized Base Course Mixes In Norway"*, 1997.

Kanno Y., Kurokawa T., and Marushima T. *"Application of Cement and Asphalt Emulsion to in Situ Recycling Base Course Method"*. 1st International Symposium on Subgrade Stabilisation and In situ Pavement Recycling Using Cement, vol.2, Session 5, Spain, Salamanca, 2001.

Kasselouri-Rigopoulou V., Kolias S., Louvardis M., Karahalios A., *"Study of The Hydration Products of Mixtures of Cement and Asphalt Emulsion Used in Recycling Works of Flexible Pavements"*, International Symposia Celebrating Concrete: People and Practice University of Dundee, Scotland 2003.

Κατσάκου Μ., *"Μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων με τσιμέντο αμμοχαλικών και φρεζαρισμένων ασφαλτομιγμάτων"*, ΕΜΠ. Αθήνα Ελλάδα, 2005.

Khalid H.A., *"A Comparison Between Bending and Diametral Fatigue Tests For Bituminous Materials"*, *Materials and Structures*, V33, 2000, pp. 457-465.

Kirk J.M., *"Relations Between Mix Design and Fatigue Properties of Asphalt Concrete"*, *ibid.*

Κόλιας Σ., *"Υπολογισμός Πάχους Νέων Οδοστρωμάτων Και Αξιολόγηση της Δομικής Κατάστασης Υφισταμένων Με Τη Βοήθεια Της Συσκευής F.W.D. Του Κ.Ε.Δ.Ε". Εργαστήριο Οδοποιίας Ε.Μ.Π., 1994.*

Κόλιας Σ., Κατοιάκου Μ., Κυρκλή Ε., *"Μέτρηση Μέτρου Δυσκαμψίας Ελληνικών Ασφαλτομημάτων"*. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Ελλάδα, Λάρισα, 1995.

Κόλιας Σ. *"Αξιολόγηση Της Πιλοτικής Εφαρμογής για Την Αποκατάσταση Τον Οδοστρωμάτων Στον Αυτοκινητόδρομο Αθηνών - Κορίνθου"*, Έκθεση ΙΙ, Αθήνα, Ελλάδα, 2003.

Koubowetz F., *"Aspecial Hydraulic Binder for Heavily Contaminated Tar-Bound Material"*, 1st International Symposium on Subgrade Stabilisation and In situ Pavement Recycling Using Cement, vol.2, Session 5, Spain, Salamanca, 2001.

Kumara M.W., Gunaratne M., Lu J.J., and Dietrich B., "Methodology for Random Surface-Initiated Crack Growth Prediction in Asphalt Pavements", Journal of *"Materials in civil engineering"*, 2004.

Λοΐζος Α., *"Αξιολόγηση Της Πιλοτικής Εφαρμογής για Την Αποκατάσταση Τον Οδοστρωμάτων Στον Αυτοκινητόδρομο Αθηνών - Κορίνθου"*, Έκθεση Ι, ΙΙΙ, Αθήνα, Ελλάδα, 2003.

Loizos A., Collins D., and Jenkins K., *"Rehabilitation of a Major Greek Highway by Recycling/ stabilizing with foamed bitumen"*, Proc., 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA 04), 119-1206, 2004.

Λοΐζος Α., Παπαβασιλείου Β., *"Αποκατάσταση Οδικών Αυτοκινητοδρόμων με Χρήση της Τεχνικής της Ανακυκλώσης με Αφρώδη Ασφαλτο"*. Πρακτικά 2^{ου} Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλλος, Μαΐος, 2005.

Martin J., *"Cold In Place Recycling: Performance and Practices"*, Canada, UD.

Miro R., *"Recasens, Mixed Recycling With Emulsion and Cement of Asphalt Pavement"*, *Design procedure and Improvements Achieved, Materials and Structures*, vol. 133. Ισπανία. 2000.

Monismith C.L., and Deacon J.A.J., Transp. Eng. Div. ASCE, 95, pp 317-346, 1969.

Monismith C.L., *"Analytically Based Asphalt Pavement Design and Rehabilitation: Theory to Practice"*, 1962-1992, Transportation Research Record 1354, 1992

Monismith C.L., *"Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes"*, SHRP-A-404, 1994.

Montepara A. and Giuliani F. *"The Role of Cement in The Recycling of Asphalt Pavement Cold-Stabilized With Bituminous Emulsions"*. 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Auburn, Alabama, USA, 2001.

Neifar M. and Di Benedetto H., *"Complex Modulus of Bituminous Mixes: How to Interpret Measurement"*, proc. On 3rd int. conf. Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 2002.

Nikolaides A., *"Effect of Binder Content Variation on The Stiffness and Fatigue of Asphaltic Concrete"*, proc. 2nd European Symposium, Performance and Durability of Bituminous Materials, Leeds, pp227-240, 1997.

Νικολαΐδης Α., *"Οδοποιία Οδοτρώματα-Υλικά Έλεγχος Ποιότητας"*, 2η έκδοση 2002.

N.N., *"Modified Marshall Mix Design Method For in-Place Cold Recycled Asphaltic Base"*, Section968, Part8-Materials Manual, 2003.

Oulahna, D., Zizi, Z. and Benhassaine A. *"Emulsion de Bitume-Ciment: Réactivité Hydraulique et Rupture de l'Émulsion"*. Proceeding of 1st Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg, France, 1996.

Paley J., *"Technical Data, Reports&Documentation: Cold In-Place Recycling"*, 1998.

Pell P.S., *"Characterisation of Fatigue Behavior"*, Highway Research Board, Special Report 140, pp 49-64, 1973.

Peyronne C., and Caroff G., *"Dimensionnement Des Chaussées, Presses Ponts et Chaussées"*, 1984.

PIARC, Technical Committee 7/8. *"Recycling of Existing Flexible Pavements"*, World Road Association 2001.

PIARC, Technical Committee 7/8 "Road Pavements", *"Cold in-Place Recycling of Pavements With Emulsion or Foamed Bitumen"*, Seminar on Road Pavement Recycling, draft guidelines, Warsaw, Poland 2002.

PrEN 12697-12, Bituminous Mixtures - test methods for hot mix asphalt - part12: *"Determination of The Water Sensitivity of Bituminous Specimens"*, 1999.

Protocol Version 1.0, Link Bitutest Project Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT).

Read J.M., and Brown S.F., *"Fatigue Characterisation of Bituminous Mixes Using a Simplified Test Method"*, *Performance and Durability of Bituminous Materials*, 1996.

Read J., and Whiteoak D., *"The Shell Bitumen Handbook"*, Shell Bitumen, Fifth edition, 2003

Roberts. F.L., Kandhal P.S., Browen E.R., Lee D.Y. and Kennedy T. *"Hot Mix Asphalt Materials"*, *Mixture Design and Construction*, Lanham, MD, 1996.

Romanoschi S.A., and Mustaque H. *"Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement"*, A Promising Technology for Mid-Western Roads, 2003.

Rosberg K., *"In-Situ Pavement Recycling Using Cement and Bitumen Combined as Binder-Strength Parameters and Long-Term Performance"*, 1st International Symposium on Subgrade Stabilisation and In situ Pavement Recycling Using Cement, vol.2, Session 5, Spain, Salamanca, 2001.

Saubot M., *"A Mix Hydraulic Road Binder-Recycled Bituminous"*, UD.

Solaimanian M., Harvey J., Tahmoressi M., and Tandon V., *"Test Methods For Determination of Moisture Damage"*, national seminar San Diego, California, 2003

Σεργεδάκης Λ., *"Μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένου Ασφαλτομίγματος Με Γαλάκτωμα Και Τσιμέντο"*. Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Οδοοιίας ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.

Verhaeghe BMJA and Long F.M., *"Cold in-Place Recycling With Bitumen Emulsion and Foamed-Bitumen: A South African Perspective"*, proc. on International seminar on Asphalt Pavement Technologies II, held in Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.

Verstraeten J., *"Moduli and Critical Strains in Repeated Bending of Bituminous Mixes - Application to Pavement Design"*, 3rd Int. Conf. on The Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, London 1972.

Wallace J., *"Cold In Place Finds Its Place on Roadways"*, New emulsion technology boosts CIR process.

Widyatmoko, *"Some Practical Aspects of Performance Related Testing of Bituminous Materials"*, In *"Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements"*, Zoorob S.E., Collop A.C., and Brown S.F., 2002.

Wirtgen Gmbh, *"Cold Recycling Manual"*, 1998.

Yoder E. and Witczak M., "*Principles of Pavement Design*, Wiley & Sons", Inc. 1977.

Yongqi Li, and Metcalf J.B., "Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete from Asphalt Slab Tests", *Journal of Materials in civil engineering*, 2004.

Zawadzki J. "*Some Properties of The Mineral -Portland Cement- Emulsion Mix*". Proceedings of 2nd Euraspalt & Eurobitume Congress, paper n. 305, vol. 2, Barcelona, Spain, 2000.

Zhiming Si, Little D.N. and R.L. Lytton, "Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures", *Journal of Materials in civil engineering*, 2002.

"An illustrated guide to the basic full-depth reclamation process" *Better Roads Magazine* July 2001.

Drive P. "*Reclaimed Asphalt Pavement- Material Description*", National Asphalt Pavement Association. Asphalt Institute, Lanham, UD.
(www.p2pays.org/ref/13/12842/rap131.htm).

N.N., "*Reclaimed Asphalt Pavement*", User Guideline, Asphalt Concrete (Cold Recycling). www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/rap133.htm

N.N., "*Cold In-Place Recycling Construction Inspection Guidelines*". May 2003
www.dot.state.ny.us/tech_serv/mat/manuals/ciprguide2003.pdf

N.N., "*Cold-In Place Recycled Pavement, Emulsified Asphalt*", UD.
www.conndot.ct.gov/specpro/0403872A.DOC

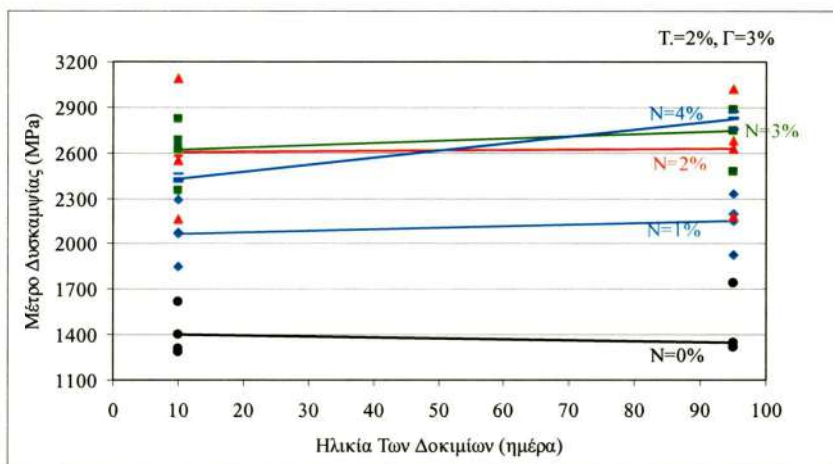
Potti J. J., Martínez M., and Mancebo J. A Step Forward In The Recycling Field. "*Mixed Recycling With Emulsion And Cement*", Spain. <http://Files/File Paper/p331.pdf>.

Πίνακας 1.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας μετά από μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Proctor 50%ΦΑ.

N.= 1%	11ημερών (1δοκ.)	304ημερών (1δοκ.)	D%
$\bar{x}$ (MPa)	1235	1583	28.2
N.= 2%	11ημερών (2δοκ.)	304ημερών (2δοκ.)	D%
$\bar{x}$ (MPa)	1686	1529	-9.27
N.= 3%	11ημερών (2δοκ.)	304ημερών (2δοκ.)	D%
$\bar{x}$ (MPa)	1130	1722	52.33
sd.	170	345	
cv. %	15.05	20.06	

N. = νερό

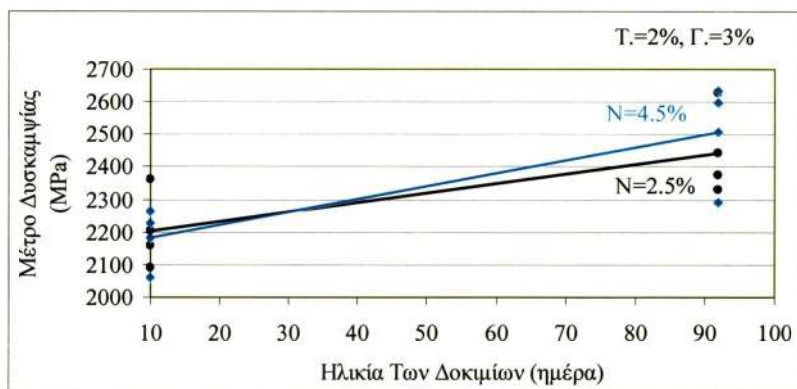
β)Μίγμα 100%ΦΑ:



Σχήμα 2: Μακρόχρονη συντήρηση στα δοκίμια της δοκιμής Proctor 100% ΦΑ.

Πίνακας 2.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας μετά από μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Proctor 100%ΦΑ.

N.= 4%	10ημερών (3δοκ.)	95ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2429	2818	16.01	Ναι
sd.	26	59		
cv. %	1.06	2.09		



Σχήμα 3.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Proctor 100% ΦΑ.

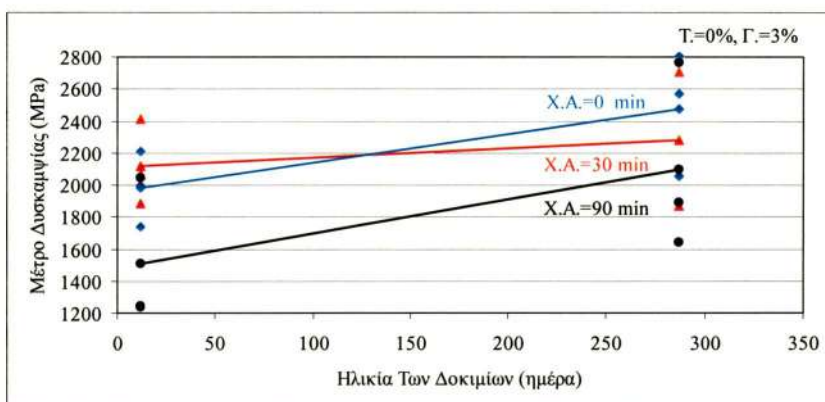
Πίνακας 3.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Proctor 100%ΦΑ.

N.= 2.5%	10ημερών (3δοκ.)	92ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2203	2443	10.91	Όχι
sd.	140	162		
cv. %	6.37	6.61		
N.= 4.5%	10ημερών (3δοκ.)	92ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2182	2506	14.84	Όχι
sd.	107	189		
cv. %	4.90	7.56		

2. Δοκιμή χρόνου αναμονής πριν την συμπίκνωση:

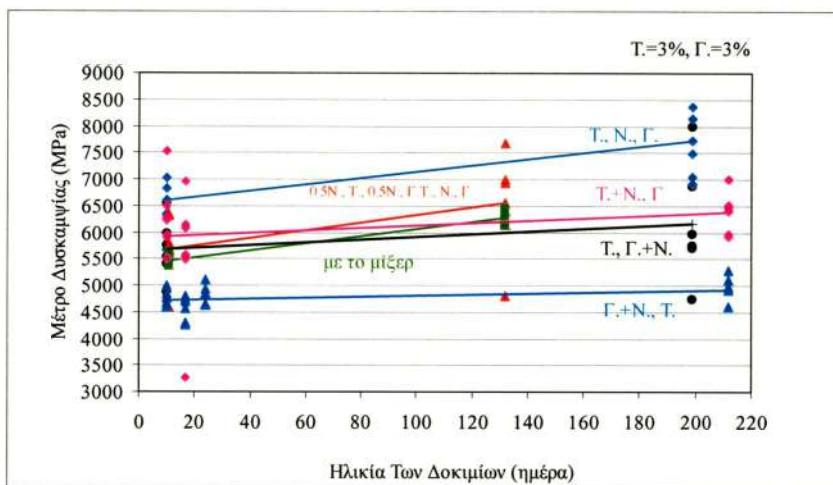
Πίνακας 4.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Χ.Α.=90min

Χ.Α.=90min	12ημερών (3δοκ.)	287ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	1509	2098	39.09	Όχι
sd.	464	589		
cv. %	30.77	28.05		



Σχήμα 4.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής Χ.Α.

3. Δοκιμή σειράς ανάμιξης:



Σχήμα 5.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της σειράς ανάμιξης.

Πίνακας 5.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της σειράς ανάμιξης

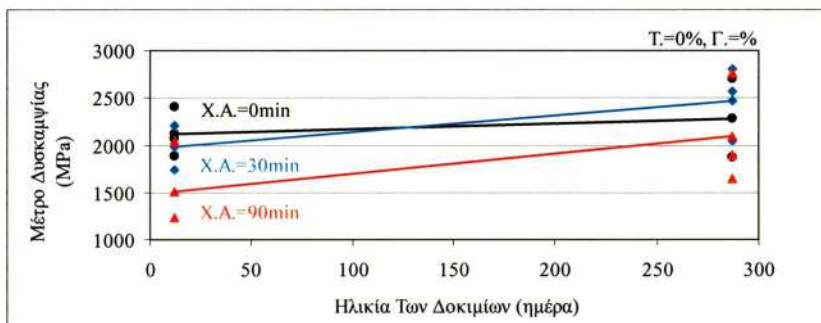
T., N., Γ.	10ημερών (6δοκ.)	199ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	6615	7719	16.7	Ναι
sd.	647	661		
cv.%	9.77	8.56		

T., Γ. + N.	10ημερών (6δοκ.)	199ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5674	6171	8.8	Όχι
sd.	561	1116		
cv.%	9.89	18.08		

Γ., + Ν., Τ.	10ημερών (6δοκ.)	212ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4748	4915	3.5	Όχι
sd.	160	272		
cv.%	11.21	5.54		
T., + Γ., Ν.	10ημερών (6δοκ.)	212ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	6268	6400	2.1	Όχι
sd.	703	400		
cv.%	11.21	6.25		
0.5N., Τ., 0.5N., Γ.	11ημερών (6δοκ.)	132ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5671	6558	15.65	Όχι
sd.	108	120		
cv.%	1.90	1.83		
0.5N., Τ., 0.5N., Γ. (με μίξερ)	11ημερών (6δοκ.)	132ημερών (6δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5461	6285	15.1	Ναι
sd.	108	120		
cv.%	1.98	1.91		

4. Δοκιμή συντήρησης:

α) Δοκίμια χωρίς τσιμέντο:

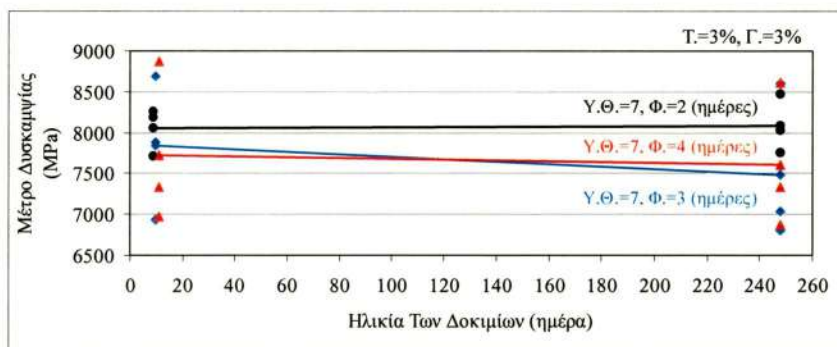


Σχήμα 6.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης χωρίς τσιμέντο.

Πίνακας 6.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης των δοκιμίων χωρίς τσιμέντο.

Ομάδα1	12ημερών (3δοκ.)	287ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa).	2121	2282	7.6	Όχι
sd.	266	418		
cv.%	12.55	18.33		
Ομάδα2	12ημερών (3δοκ.)	287ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa).	1977	2471	25	Όχι
sd.	235	384		
cv.%	11.86	15.55		
Ομάδα3	12ημερών (3δοκ.)	287ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa).	1509	2471	25	Όχι
sd.	464	589		
cv.%	23.48	23.82		

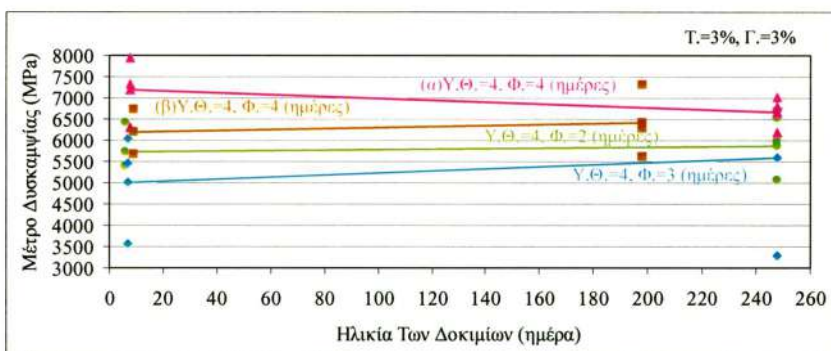
b) Δοκίμα με τσιμέντο:



Σχήμα 7.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης με τσιμέντο (Y.Θ.=7, Φ.=2,3,4 ημέρες).

Πίνακας 7.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης των δοκιμίων με Τ.

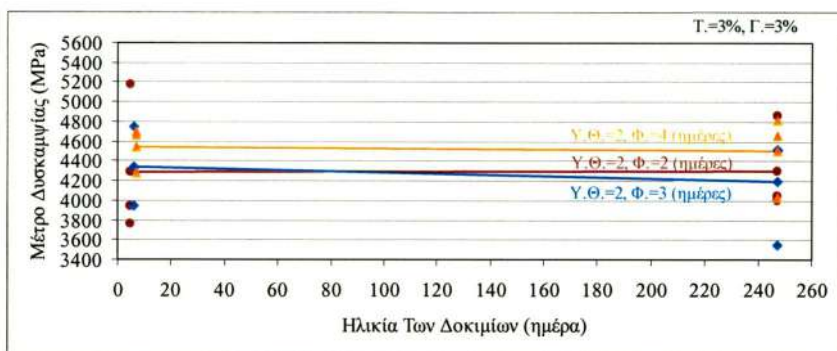
Τ.Θ.=7, Φ.=2 (ημέρες)	10ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	8045	8081	0.5	Όχι
sd.	291	358		
cv.%	3.62	4.43		
Τ.Θ.=7, Φ.=3 (ημέρες)	11ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	7834	7481	-4.5	Όχι
sd.	883	979		
cv.%	11.27	13.09		
Τ.Θ.=7, Φ.=4 (ημέρες)	12ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	7724	7607	-1.5	Όχι
sd.	1015	905		
cv.%	13.14	11.90		



Σχήμα 8.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης με τσιμέντο (Y.Θ.=4, Φ.=2,3,4 ημέρες)

Πίνακας 8.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης των δοκιμίων με τσιμέντο

Υ.Θ.=4, Φ.=2 (ημέρες)	7ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5723	5852	11.46	Όχι
sd.	482	607		
cv.%	8.43	10.38		
Τ.Θ.=4, Φ.=3 (ημέρες)	8ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5010	5584	2.25	Όχι
sd.	1286	2001		
cv.%	25.67	35.84		
α) Τ.Θ.=4, Φ.=4 (ημέρες)	9ημερών (3δοκ.)	248ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	7189	6677	-7.12	Όχι
sd.	826	436		
cv.%	11.48	6.53		
β) Τ.Θ.=4, Φ.=4 (ημέρες)	9ημερών (3δοκ.)	198ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	6193	6403	3.39	Όχι
sd.	528	854		
cv.%	8.53	13.34		

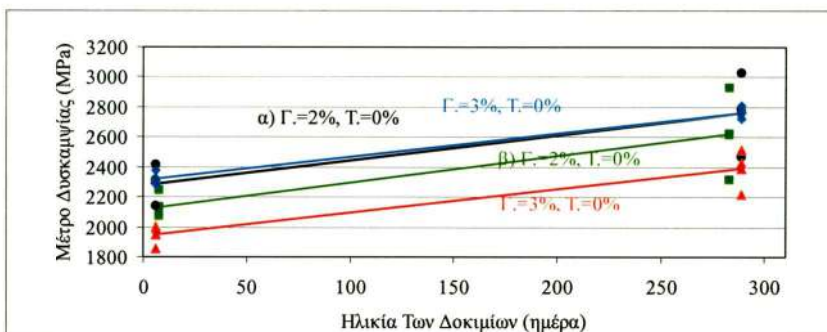


Σχήμα 9.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής της συντήρησης με τσιμέντο (Y.Θ.=2, Φ.=2,3,4 ημέρες).

Πίνακας 9.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση της δοκιμής της συντήρησης των δοκιμίων με T.

Τ.Θ.=2, Φ.=2 (ημέρες)	5ημερών (3δοκ.)	247ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4288	4298	0.2	Όχι
sd.	766	482		
cv.%	17.86	11.22		
Τ.Θ.=2, Φ.=3 (ημέρες)	6ημερών (3δοκ.)	247ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4335	4187	-3.4	Όχι
sd.	403	557		
cv.%	9.30	13.30		
Τ.Θ.=2, Φ.=4 (ημέρες)	7ημερών (3δοκ.)	247ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4536	4500	-0.8	Όχι
sd.	231	410		
cv.%	5.09	9.12		

5. Δοκιμή της περιεκτικότητας σε ασφαλτικό γαλάκτωμα



Σχήμα 10.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμών της δοκιμής της περιεκτικότητας σε ασφαλτο.

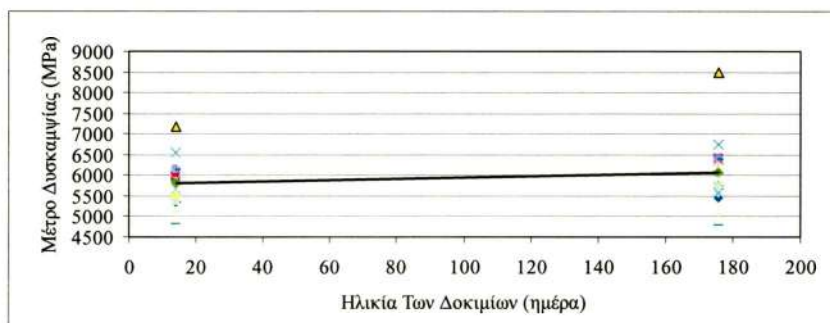
Πίνακας 10.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμών της δοκιμής της περιεκτικότητας σε ασφαλτο.

$\Gamma=4\%, T=0\%$	6ημερών (3δοκ.)	289ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	1949	2389	22.60	Ναι
sd.	80	155		
cv.%	4.12	6.48		
$\Gamma=3\%, T=0\%$	6ημερών (3δοκ.)	289ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2321	2763	19.1	Ναι
sd.	48	43		
cv.%	2.06	1.54		
α) $\Gamma=2\%, T=0\%$	6ημερών (3δοκ.)	289ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2287	2761	20.73	Όχι
sd.	139	280		
cv.%	6.09	10.13		
β) $\Gamma=2\%, T=0\%$	8ημερών (3δοκ.)	283ημερών (3δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2127	2614	22.92	Όχι
sd.	100	306		
cv.%	4.71	11.69		

6. Δοκιμή του έλεγχου της θερμοκρασίας μέσα στο φούρνο

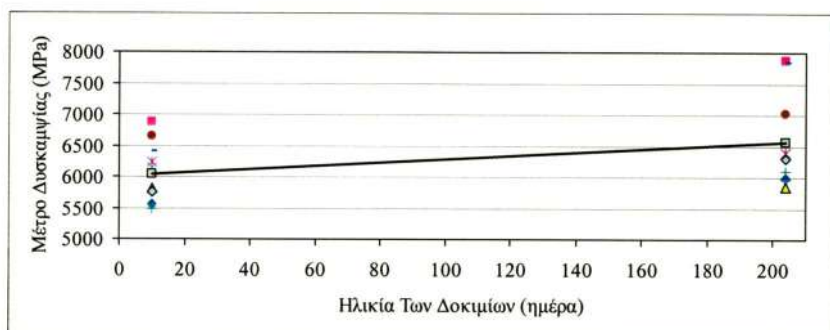
Πίνακας 11.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από τη μακρόχρονη συντήρηση της δοκιμής του έλεγχου της θερμοκρασίας μέσα στο φούρνο

Φούρνο	14ημερών (18δοκ.)	176ημερών (18δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5810	6053	4.2	Όχι
sd.	535	791		
cv.%	9.21	13.07		



Σχήμα 11.: Μακρόχρονη συντήρηση των δοκιμίων της δοκιμής του έλεγχου της θερμοκρασίας μέσα στο φούρνο

7. Δοκιμή της διάστασης του μέγιστου κόκκου αδρανών



Σχήμα 12.: Μακρόχρονη συντήρηση της δοκιμής της διάστασης του μέγιστου κόκκου αδρανών

Πίνακας 12.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από την μακρόχρονη συντήρηση της δοκιμής της διάστασης του μέγιστου κόκκου αδρανών

D_{max}	10ημερών (10δοκ.)	204ημερών (10δοκ.)	$D\%$	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	6038	6569	8.8	Όχι
sd.	493	754		
cv. %	8.17	11.47		

8. Δοκιμή της περιεκτικότητας των συνδετικών υλικών

Πίνακας 13.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψία μετά από την μακρόχρονη συντήρηση της δοκιμής της περιεκτικότητας των συνδετικών υλικών.

Γ.=2%, T.=0%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	1945	2253	-15.8	Όχι
sd.	210	257		
cv.%	10.79	11.41		
Γ.=2%, T.=2%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5310	5588	5.24	Όχι
sd.	289	275		
cv.%	5.44	4.92		
Γ.=2%, T.=3%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	8656	9877	14.1	Όχι
sd.	532	1334		
cv.%	6.15	13.50		
Γ.=2%, T.=4%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	12618	14408	14.2	Ναι
sd.	731	613		
cv.%	5.79	4.25		

Πίνακας 3.13 (συνέχεια):

Γ.=3%, T.=0%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	2063	2057	-0.29	Όχι
sd.	90	1320		
cv.%	4.38	6.44		
Γ.=3%, T.=2%	10μερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4358	4534	4.05	Όχι
sd.	215	224		
cv.%	4.93	4.93		
Γ.=3%, T.=3%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	6329	6647	5.02	Όχι
sd.	263	414		
cv.%	4.15	6.23		
Γ.=3%, T.=4%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	9799	10711	9.3	Όχι
sd.	684	1031		
cv.%	6.98	9.63		

Πίνακας 3.13 (συνέχεια):

Γ.=4%, T.=0%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	1634	1671	2.28	Όχι
sd.	294	259		
cv.%	18.00	15.47		
Γ.=4%, T.=2%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	4614	4532	-1.78	Όχι
sd.	305	151		
cv.%	6.61	3.33		
Γ.=4%, T.=3%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	5880	5999	2.03	Όχι
sd.	236	288		
cv.%	4.01	4.80		
Γ.=4%, T.=4%	10ημερών (4δοκ.)	39ημερών (4δοκ.)	D%	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	8597	8780	2.13	Όχι
sd.	672	784		
cv.%	7.81	8.93		

Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι 30.2% των αποτελεσμάτων παρουσιάζουν αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας αλλά δεν είναι σημαντική στατιστικώς, 14% των αποτελεσμάτων δείχνουν σημαντική στατιστική αύξηση, 30.2% δείχνουν σημαντική αύξηση σχετικά με το εύρος της αποδεκτής επαναληψιμότητας +10%, -20%, και 25.6% δείχνουν ελάττωση αλλά δεν είναι σημαντική.

• **Αποτέλεσμα**

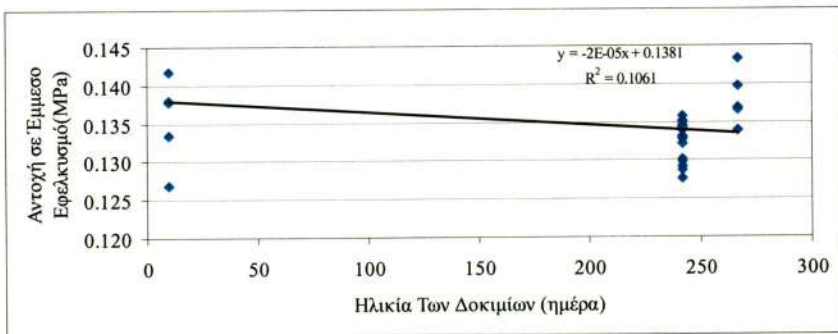
Στα δοκίμια της έρευνας αυτής που υποβλήθηκαν στην συντήρηση του κεφαλαίου 5, η ηλικία των δοκιμών δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Β-

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΑΠΟ ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Ορισμένα δοκίμια από το μίγμα 50%ΦΑ, Τ.= Γ.= Ν.= 3%, έδωσαν την δυνατότητα να εκτιμηθεί η επίδραση της ηλικίας στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό. Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια αυτά παρέμειναν επί 7 ημέρες μετά την παρασκευή τους σε υγρό θάλαμο (σχετική υγρασία > 98% θερμοκρασία $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$) και μετά τοποθετήθηκαν σε αεριζόμενο φούρνο 60°C για 2 ημέρες. Στην συνέχεια παρέμειναν στο περιβάλλον του εργαστηρίου μέχρι την δοκιμή τους.

Η ηλικία των δοκιμίων κατά τη θραύση ήταν 10, 242 και 267 ημερών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 14 μαζί με τη στατιστική ανάλυση για να προσδιοριστεί αν οι αντοχές στις διάφορες ηλικίες διέφεραν στατιστικώς σημαντικά.



Σχήμα 13.: Επίδραση της μακρόχρονης συντήρησης στην αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Πίνακας 14.: Στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό σε διαφορετικές ηλικίες των δοκιμίων

	10ημερών (5δοκ.)	242ημερών (18δοκ.)	267ημερών (6δοκ.)	t-test
$\bar{x}$ (MPa)	0.138	0.133	0.138	Όχι
sd.	0.0036	0.00248	0.00855	
cv. %	2.61	1.87	6.18	

ο **Συμπέρασμα:**

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη δεν μεταβάλλεται στατιστικώς σημαντικά με την αύξηση της ηλικίας των δοκιμίων, εφ' όσον τα δοκίμια υποβλήθηκαν στην συντήρηση που εφαρμόστηκε στην εργασία αυτή.

