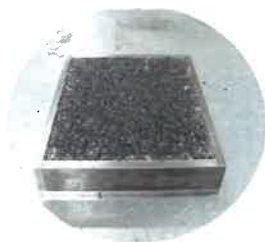




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗ



ΧΑΤΖΗΡΟΔΟΥ ΑΝΤΩΝΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α. ΛΟΪΖΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2010

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2 ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗ.....	7
2.1 ΜΟΡΦΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ:	7
2.2 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	8
2.3 ΑΙΤΙΕΣ ΠΟΥ ΕΝΙΣΧΥΟΥΝ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ.....	10
2.3.1 Χαρακτηριστικά σύνθεσης του ασφαλτομίγματος	10
2.3.2 Κλιματολογικές συνθήκες	13
2.3.3 Συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος.....	13
2.4 ΟΙ ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΩΝ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.	15
2.4.1 Απόκλιση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων από την τελείως επίπεδη επιφάνεια	15
2.4.2 Έντονα φαινόμενα υδρολίσθησης των τροχών.....	15
3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	17
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	17
3.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	17
3.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	18
3.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	18
3.5 ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	19
3.6 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΑΤΑ SUPERPAVE	21
3.7 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	21
4 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	23
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	23
4.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΔΙΕΘΝΩΣ	23
4.2.1 Hamburg Wheel Rut Tester (HWRT).....	23
4.2.2 French Laboratory Rutting Tester (FLRT)	26
4.2.3 Georgia loaded wheel tester (GLWT).....	28
4.2.4 Asphalt Pavement Analyzer (APA).....	30
4.2.5 Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device (PURW).....	32
4.2.6 Model Mobile Load Simulator (MMLS3)	33
4.2.7 Wheel Tracker Device	34

4.2.8	Ανασκόπηση των συσκευών τροχοαυλάκωσης.....	37
4.3	ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ (ACCELERATED PAVEMENT TESTING)	38
4.3.1	Γενικά.....	38
4.3.2	LCPC TEST TRACK	39
4.3.3	NCAT TEST TRACK	42
4.3.4	WEST TRACK	44
4.3.5	MODEL MOBILE LOAD SIMULATOR (MMLS3)	45
4.3.6	HEAVY VEHICLE SIMULATOR (HVS)	46
5	Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ΕΝ 12697-22	48
5.1	ΔΟΚΙΜΗ ΕΡΠΥΣΜΟΥ ΥΠΟ ΣΤΑΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	48
5.2	ΔΟΚΙΜΗ ΕΡΠΥΣΜΟΥ ΥΠΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	49
5.3	ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ	51
5.3.1	Δειγματοληψία ασφαλτομίγματος	53
5.3.2	Δειγματοληψία πυρήνων	53
5.4	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	54
5.5	ΠΑΧΟΣ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	54
5.6	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	54
5.7	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	55
5.7.1	Προετοιμασία δοκιμών	55
5.7.2	Προετοιμασία πυρήνων.....	58
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	64
6.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	64
6.2	ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΜΙΓΜΑ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	65
6.2.1	Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης	65
6.2.2	Προετοιμασία και έλεγχος πυρήνων αντιολισθηρής στρώσης.....	67
6.2.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	69
6.2.4	Προετοιμασία και έλεγχος δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης	73
6.2.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	74
6.2.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων και δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης (Κενά 10% και 12%)	77
6.3	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ ΙΣΟΠΕΔΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ (ΠΕΤΕΠ ΑΣ20).....	80
6.3.1	Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης	80
6.3.2	Προετοιμασία και έλεγχος πυρήνων ισοπεδωτικής στρώσης.....	83

6.3.3	Προετοιμασία και έλεγχος δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης	86
6.3.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	87
6.3.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων και δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης(Κενά 4% και 6%)	89
6.3.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων αντιστοιχιστικής και ισοπεδωτικής στρώσης	92
6.3.7	Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών αντιστοιχιστικής και ισοπεδωτικής στρώσης	94
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	96
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ.	99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιφανειακή παραμόρφωση των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, υπό μορφή τροχοαυλάκωσης, με δεδομένη την επαρκή συμπίκνωση της στρώσης έδρασης και των λοιπών στρώσεων, αποδεικνύεται ότι οφείλεται σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό στην ιξωελαστική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων. Η επιλογή του βέλτιστου ασφαλτομίγματος καθορίζεται κατά το στάδιο της μελέτης σύνθεσης με τη μέθοδο Marshall και συγκεκριμένα από τον προσδιορισμό εμπειρικών ιδιοτήτων, όπως η παραμόρφωση και η ευστάθεια. Εν τούτοις, η υπόψη διαδικασία δεν εξασφαλίζει στην πράξη το θέμα της παραμένουσας παραμόρφωσης. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε προκαταρκτικά η αντίσταση ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης κυκλοφορίας με τη δοκιμή της τροχοαυλάκωσης όπως προδιαγράφεται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12697-22:2003. Ειδικότερα διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση του όγκου των κενών αέρα (%) και της διαδικασίας συμπίκνωσης, επί τόπου στο έργο και στο εργαστήριο στην αντίσταση των μιγμάτων σε τροχοαυλάκωση, με τη βοήθεια της συσκευής τροχοαυλάκωσης μικρής κλίμακας του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας, φόρτισης και για το ίδιο ποσοστό κενών ούτως ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

ABSTRACT

Permanent deformation of asphalt pavements, which takes the form of rut depth on the surface of the pavement, given that the foundation layer and all the pavement layers are adequately compacted, is mainly due to the visco-elastic behavior of the asphalt mixture. The selection of the best asphaltic mixture takes place at the stage of the composition with the empirical method Marshall and from the estimation of properties like stability and flow. In fact, this procedure is not efficient in assessing mixtures' permanent deformation. In this Diploma Thesis, two asphaltic mixtures used for the wearing and the binder course were submitted to the wheel tracking test in accordance with the European Standard 12697-22:2003, in order to assess their resistance to rutting. In particular, beam specimens compacted by roller compactor in the NTUA laboratory of Highway Engineering and cores taken from trial sections were tested in the laboratory small size wheel tracking device. Tests were conducted under the same conditions (wheel load, specimen size, wheel passes, temperature) so that the extracted results could be comparative.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την αναλυτική διαδικασία διαστασιολόγησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων λαμβάνονται υπόψη δυο βασικά σχεδιαστικά κριτήρια: α) η οριζόντια εφελκυστική τάση ή η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση (e_r) που προκαλεί την ρηγμάτωση στην κατώτατη επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος και β) η κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση (e_z) που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Μέσω του υπολογισμού της ορθής παραμόρφωσης e_z ελέγχεται η παραμένουσα παραμόρφωση που οφείλεται στη στρώση έδρασης και εμφανίζεται υπό μορφή αυλακώσεων στα ίχνη των τροχών των οχημάτων (subgrade rutting) συνοδευόμενη συνήθως από μεγάλης έκτασης ρωγμές τύπου αλιγάτορα.

Η επιφανειακή παραμόρφωση των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, που εμφανίζεται με την μορφή τροχοαυλάκωσης, αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αστοχίες ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Έρευνες έχουν δείξει ότι όταν δεν αστοχεί η στρώση έδρασης το πρόβλημα εστιάζεται στην παραμένουσα παραμόρφωση, υπό μορφή τροχοαυλακώσεων, των μιγμάτων των ασφαλτικών στρώσεων. Μέχρι σήμερα, σε ορισμένες χώρες όπως και στην Ελλάδα, κατά το στάδιο της μελέτης σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων η επιλογή του βέλτιστου μίγματος βασίζεται στον προσδιορισμό ιδιοτήτων, που χαρακτηρίζονται ως εμπειρικές, όπως η παραμόρφωση και η ευστάθεια κατά Marshall. Κατά συνέπεια, η μελέτη σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall, δεν εξασφαλίζει στην πράξη το θέμα της παραμένουσας παραμόρφωσης των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση της τροχοαυλάκωσης. Πλην όμως, η σημαντική αυτή αδυναμία μπορεί να παρακαμφθεί μέσω του υπολογισμού των θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων, όπως η αντοχή σε παραμένουσα παραμόρφωση και το μέτρο δυσκαμψίας. Προς αυτή την κατεύθυνση στρέφονται πλέον τα περισσότερα ερευνητικά εργαστήρια μέσω της εκτέλεσης κατάλληλων εργαστηριακών δοκιμών εκτίμησης της αντίστασης των μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση, όπως η δοκιμή σε τροχοαυλάκωση και οι δοκιμές υπό μονοαξονική και τριαξονική φόρτιση, έτσι ώστε να γίνεται αξιολόγηση και επιλογή του καταλληλότερου ασφαλτικού μίγματος κατά το στάδιο της σύνθεσής του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε, η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης, σύμφωνα με την αντίστοιχη προδιαγραφή EN 12697-22 :2003 και διερευνήθηκε η αντίσταση σε τροχοαυλάκωση δυο τύπων μιγμάτων, αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν πυρήνες και δοκίμια αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής

στρώσης κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης της διαδικασίας συμπίκνωσης και του βαθμού συμπίκνωσης και κατ' επέκταση των κενών αέρα (%) στην αντίσταση τους σε παραμένονσα παραμόρφωση. Ακόλουθα παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της διπλωματικής εργασίας .

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του φαινομένου της τροχοαυλάκωσης λόγω αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων, αναλύονται οι αιτίες που ενισχύουν την εμφάνισή του, και παρουσιάζονται οι αρνητικές επιπτώσεις του στη λειτουργικότητα των οδοστρωμάτων. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που εκπονούνται διεθνώς για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων σε παραμένονσα παραμόρφωση. Ως μία από αυτές αναφέρεται και η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης. Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθενται οι συσκευές τροχοαυλάκωσης που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την εκτέλεση δοκιμών τροχοαυλάκωσης τόσο στο εργαστήριο όσο και σε πειραματικά οδοστρώματα. Ανάμεσα στις συσκευές τροχοαυλάκωσης γίνεται αναλυτική αναφορά και στην αρχή λειτουργίας της συσκευής τροχοαυλάκωσης μικρής κλίμακας του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την διπλωματική εργασία. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση της δοκιμής τροχοαυλάκωσης, όπως προδιαγράφεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12697 -22:2003 . Στο 6^ο κεφάλαιο αναπτύσσεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματά της και ακολουθεί το 7^ο κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται τα σχόλια και τα συμπεράσματα της υπόψη διαδικασίας.

2 ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗ.

2.1 Μορφές τροχοαυλάκωσης ασφαλτικών στρώσεων:

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο τονίσθηκε, ότι υπό την προϋπόθεση ότι δεν αστοχεί η στρώση έδρασης, η παραμόρφωση του οδοστρώματος υπό μορφή αυλακώσεων οφείλεται στην αστοχία των ανώτατων ασφαλτικών στρώσεων (mix rutting). Σημειώνεται ότι στο έργο εντοπίζονται δυο τυπικές μορφές τροχοαυλακώσεων ,οι οποίες περιγράφονται στην συνέχεια.

A) Τροχοαυλακώσεις που εμφανίζονται λόγω πλευρικής μετακίνησης μιας ή περισσότερων στρώσεων κάτω από την επίδραση των αξονικών φορτίων και συνοδεύονται από τοπικές ανυψώσεις δεξιά και αριστερά της αυλάκωσης και καθ' όλο το μήκος αυτής(σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 : Τοπικές ανυψώσεις κατά μήκος εμφάνισης των τροχοαυλακώσεων

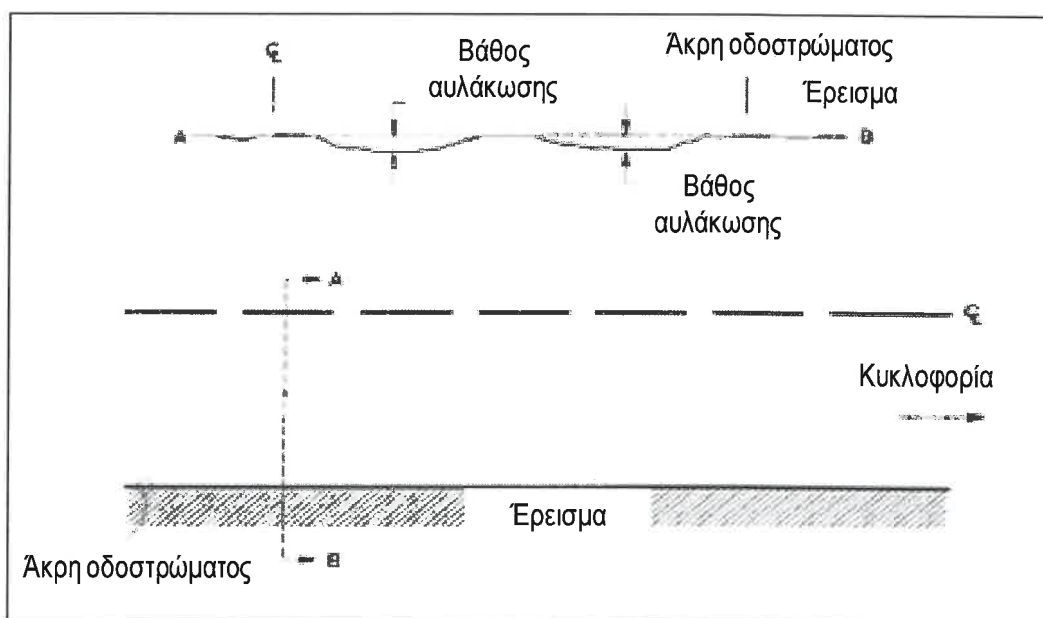
B) Τροχοαυλακώσεις που εμφανίζονται λόγω περαιτέρω συμπίκνωσης των ασφαλτικών στρώσεων υπό την επίδραση της κυκλοφορίας και δεν συνοδεύονται από πλευρικές μετατοπίσεις (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 : Εμφάνιση τροχοαυλακώσεων λόγω συμπίκνωσης των στρώσεων από την κυκλοφορία

2.2 Τρόποι μέτρησης της τροχοαυλάκωσης

Πρέπει να τονιστεί ότι η τροχοαυλάκωση συσχετίζεται με την εγκάρσια κατατομή της επιφάνειας του οδοστρώματος και προσδιορίζεται με τον υπολογισμό του βάθους αυλάκωσης (rut depth) σε χιλιοστά (mm) (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 : Βάθος τροχοαυλάκωσης σε οδοστρώματα (Rut Depth)

Ο συνήθης τρόπος υπολογισμού του βάθους αυλάκωσης είναι με την τοποθέτηση πήχη εγκάρσια στον άξονα της οδού. Η διαδικασία αυτή μας δίνει μεν μία άμεση μέτρηση της τροχοαυλάκωσης αλλά είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και δεν μας παρέχει πληροφορίες για όλο το μήκος της οδού (σχήμα 2.4).



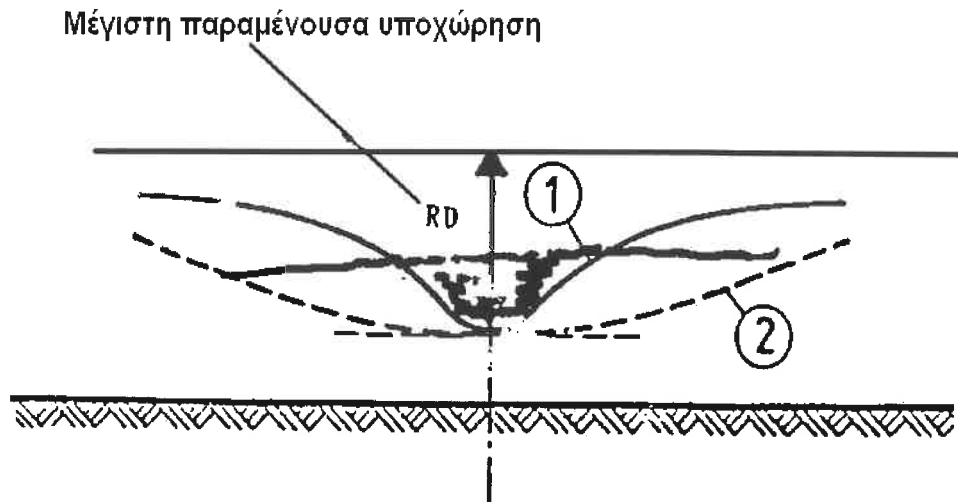
Σχήμα 2.4 : Μέτρηση του βάθους τροχοαυλάκωσης με την τοποθέτηση πήχη

Τα τελευταία χρόνια το βάθος αυλάκωσης μετριέται και με τα εξελιγμένα συστήματα προφιλόμετρησης που δίνουν τη δυνατότητα ταχείας και συνεχούς καταγραφής ενδεχόμενων τροχοαυλακώσεων σε ένα οδόστρωμα (σχήμα 2.5). Συγκεκριμένα καταγράφουν το προφίλ του οδοστρώματος ηλεκτρονικά ως προς ένα σχετικό οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Η αποτύπωση του προφίλ μπορεί να γίνεται με ακτίνες λέιζερ όπου μετράται η ανάκλαση των ακτίνων και μετατρέπεται σε υψομετρικές διαφορές.



Σχήμα 2.5 : Μέτρηση βάθους τροχοαυλάκωσης με την χρήση προφιλόμετρου

Στο σχήμα 2.6 που ακολουθεί φαίνεται η μέτρηση του βάθους αυλάκωσης για δύο διαφορετικά προφίλ επιφάνειας οδοστρώματος. Παρατηρούμε ότι παρόλο που τα προφίλ είναι διαφορετικά το μετρούμενο βάθος αυλάκωσης είναι το ίδιο και ίσο με RD (Rut Depth).



Σχήμα 2.6 : Δυο διαφορετικά προφίλ επιφάνειας οδοστρώματος δίνουν ίδιο βάθος αυλάκωσης.

2.3 Αιτίες που ενισχύουν τη δημιουργία τροχοαυλακώσεων

Η αυλάκωση που εμφανίζεται λόγω καθίζησης της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης κατά μήκος της πορείας των τροχών οφείλεται κυρίως σε αιτίες που σχετίζονται με:

- A) τα χαρακτηριστικά σύνθεσης του ασφαλτομίγματος
- B) τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής του έργου.
- Γ) τις συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος.

2.3.1 Χαρακτηριστικά σύνθεσης του ασφαλτομίγματος

2.3.1.1 Το υψηλό ποσοστό κενών αέρος στο μίγμα

Η συμπίκνωση αποτελεί το πιο κρίσιμο στάδιο κατασκευής των ασφαλτικών στρώσεων και από αυτήν θα εξαρτηθεί σε σημαντικό βαθμό η καλή συμπεριφορά του οδοστρώματος. Κατά την συμπίκνωση τα αδρανή υλικά του ασφαλτομίγματος συμπίεζονται και επαναδιατάσσονται με στόχο να αυξηθεί η πυκνότητα του μίγματος και να επιτευχθεί ένα βέλτιστο ποσοστό κενών αέρος σε αυτό.

Από έρευνες έχει παρατηρηθεί ότι όσο πιο υψηλό είναι το ποσοστό κενών αέρος στο ασφαλτόμικτο τόσο πιο αυξημένο είναι και το βάθος τροχοαυλάκωσης που παρατηρείται

(Cooley et al ,2000, Maupin et al ,2006). Το μίγμα στην ουσία, δεν συμπυκνώνεται επαρκώς (insufficient compaction) με αποτέλεσμα οι ασφαλτικές στρώσεις να συμπυκνώνονται ανομοιόμορφα από την κυκλοφορία και να εμφανίζονται πρόωρες τροχοαυλακώσεις κατά μήκος της πορείας των τροχών.

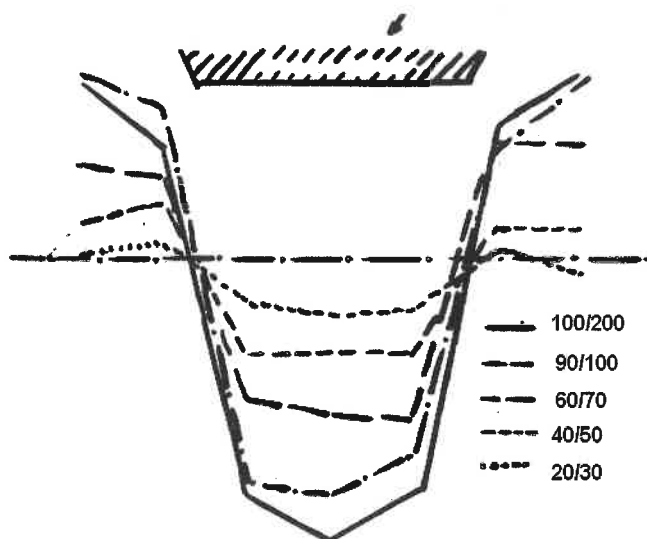
2.3.1.2 . Η πλεονάζουσα ποσότητα ασφάλτου στο μίγμα

Η αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα λειτουργεί μέχρι ενός σημείου θετικά ως προς την εργασιμότητα –συμπύκνωση. Αυτό προέρχεται από το γεγονός ότι η άσφαλτος λειτουργεί ως «λιπαντικό» μέσο των αδρανών υλικών και μειώνει τις τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ τους κατά την συμπύκνωση.

Από έρευνες ωστόσο παρατηρείται ότι το βάθος τροχοαυλάκωσης αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα (Tarefder et al 2003, Uzarowski et al 2004)). Σε περίπτωση που το ποσοστό αυτό ξεπεράσει το προβλεπόμενο βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου στο μίγμα το αποτέλεσμα είναι να έχουμε σημαντική απώλεια της συνοχής των αδρανών υλικών αφού μειώνονται οι επιφάνειες επαφής μεταξύ τους και δεν αναπτύσσεται πλέον ικανοποιητική εσωτερική τριβή. Τα αξονικά φορτία αναλαμβάνονται πλέον κατά μεγάλο ποσοστό μόνο από το ασφαλτικό συνδετικό υλικό με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντίσταση των ασφαλτικών στρώσεων σε τροχοαυλάκωση και να αυξάνεται σημαντικά το βάθος αυλάκωσης που παρατηρείται.

2.3.1.3 Ο τύπος ασφάλτου

Η παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων εξαρτάται επιπλέον από τον τύπο της ασφάλτου και πιο συγκεκριμένα από τη διεισδυτικότητα του ασφαλτικού υλικού. Από σχετικές έρευνες παρατηρείται ότι όσο πιο μαλακή είναι η άσφαλτος που χρησιμοποιείται όσο δηλαδή αυξάνεται η διεισδυτικότητά της τόσο μεγαλύτερο είναι και το βάθος τροχοαυλάκωσης που προκύπτει (Corte' et al 1994, Brown et al 2002)(σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7 : Επίδραση του τύπου της ασφάλτου στην παραμένουσα παραμόρφωση

Η διεισδυτικότητα, όπως και άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες της ασφάλτου όπως η μάλθωση και ο δείκτης διεισδυτικότητας επηρεάζουν το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου και αντίστοιχα το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Όσο πιο μαλακή είναι η άσφαλτος και όσο περισσότερο ευαίσθητη είναι στις θερμοκρασιακές μεταβολές τόσο πιο μικρό είναι το μέτρο δυσκαμψίας και τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση αυτού με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Σε υψηλές λοιπόν θερμοκρασίες όπου η άσφαλτος μαλακώνει και συμπεριφέρεται περισσότερο ως ιξώδες υλικό, η μείωση του μέτρου δυσκαμψίας της συνεπάγεται μείωση της αντίστασης του ασφαλτομίγματος σε τροχοαυλάκωση. Διευκολύνονται πλέον οι πλευρικές μετακινήσεις των ασφαλικών στρώσεων κατά μήκος της πορείας των τροχών με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αυξημένα βάθη τροχοαυλάκωσης (σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 : Πλευρική μετακίνηση ασφαλικών στρώσεων υπό την επίδραση αξονικών φορτίων

Έρευνες αποδεικνύουν ότι με την χρήση τροποποιημένης ασφάλτου το βάθος τροχοαυλάκωσης μειώνεται σημαντικά (*Corte' et al 1994, Fung 2009*). Στην ουσία μειώνεται η ευπάθεια της ασφάλτου σε θερμοκρασιακές μεταβολές ,αυξάνεται η δυσκαμψία του μίγματος σε υψηλές θερμοκρασίες ενώ παράλληλα διατηρούνται οι ιδιότητες της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια αυξάνεται η αντίσταση του μίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση και επιλύεται έτσι σημαντικά το πρόβλημα της πρόωρης παραμόρφωσης των ασφαλικών στρώσεων που παρατηρείται κυρίως σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες και υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.

2.3.1.4 Η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος

Η διαβάθμιση των αδρανών υλικών στο μίγμα επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την συμπεριφορά της ασφαλικής στρώσης σε παραμένουσα παραμόρφωση. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση λεπτόκοκκων αδρανών σε μεγάλο ποσοστό έχει ως αποτέλεσμα τη σύνθεση μίγματος που εμφανίζει χαμηλή ευστάθεια και μειωμένη εσωτερική συνοχή με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η πλευρική μετακίνηση υλικών από την ασφαλική στρώση υπό την επίδραση αξονικών φορτίων και τα βάθη τροχοαυλάκωσης που παρατηρούνται να είναι αυξημένα (*Kim et al ,2008*).

Κατά συνέπεια με τη χρήση χονδροκόκκων αδρανών υλικών με τραχεία επιφάνεια σε μεγαλύτερα ποσοστά αν και μειώνεται η εργασιμότητα του μίγματος, εντούτοις επιτυγχάνεται καλύτερη ευστάθεια και κατ' επέκταση καλύτερη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση (*Masad et al ,2001*)

2.3.2 **Κλιματολογικές συνθήκες**

2.3.2.1 Αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση αποδεικνύεται σημαντική. Έρευνες αποδεικνύουν ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται και το βάθος τροχοαυλάκωσης που παρατηρείται στις ασφαλικές στρώσεις (*Shami et al ,1997*). Σε υψηλές θερμοκρασίες η δυσκαμψία της ασφάλτου μειώνεται με συνέπεια να μειώνεται και η δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος. Η άσφαλτος μαλακώνει με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η πλευρική μετακίνηση υλικών της ασφαλικής στρώσης κατά μήκος της πορείας των τροχών και να παρατηρούνται αυξημένα βάθη τροχοαυλάκωσης.

2.3.2.2 Υγρασία

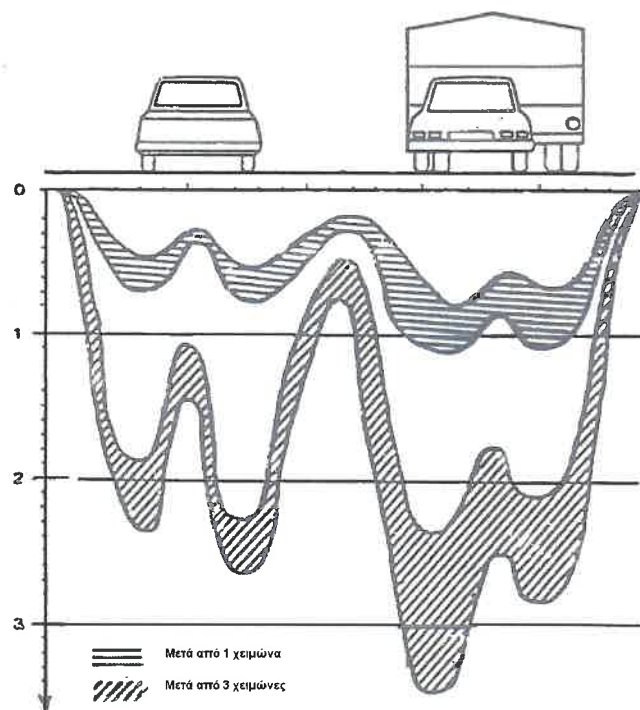
Η υγρασία μειώνει την συνοχή μεταξύ των αδρανών υλικών και της ασφάλτου. Η μείωση αυτή οδηγεί με το πέρασμα του χρόνου σε μείωση της συνοχής του μίγματος και υπό την επίδραση αξονικών φορτίων σε μετακίνηση υλικών από τα ανώτατο στρώμα του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η εμφάνιση αυλακώσεων (*Tarefder et al,2003*).

2.3.3 **Συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος**

2.3.3.1 Αυξημένο ποσοστό βαρέων οχημάτων και αυξημένη πίεση επαφής των ελαστικών

Η αύξηση του ποσοστού των βαρέων οχημάτων αυξάνει και τις επιπονήσεις των ασφαλικών στρώσεων υπό την επίδραση αξονικών φορτίων. Στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί

φαίνεται η παραμένουσα παραμόρφωση ανά λωρίδα κυκλοφορίας μετά από ένα και μετά από τρία χρόνια κυκλοφορίας του οδοστρώματος. Παρατηρούμε ότι στη λωρίδα όπου κινούνται τα βαρέα οχήματα (λωρίδα βαρείας κυκλοφορίας) η παραμένουσα παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη και με την πάροδο του χρόνου το βάθος αυλάκωσης αυξάνεται (Λοΐζος 2008).



Σχήμα 2.9 : Παραμένουσα παραμόρφωση ανά λωρίδα κυκλοφορίας

Κατά μήκος λοιπόν της πορείας βαρέων οχημάτων παρατηρούνται αυξημένα βάθη τροχοαυλάκωσης. Η κυκλοφορία συνήθως αυτού του τύπου οχημάτων γίνεται με μειωμένες ταχύτητες κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη διάρκεια επαφής τροχού με οδόστρωμα άρα και μεγαλύτερη διάρκεια φόρτισης. Η αυξημένη διάρκεια φόρτισης επιδρά αρνητικά στην συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων σε παραμένουσα παραμόρφωση.

Επιπρόσθετα έρευνες αποδεικνύουν ότι όσο πιο αυξημένη είναι η πίεση επαφής που μεταβιβάζεται στο οδόστρωμα μέσω των οχημάτων τόσο πιο πολύ αυξάνεται και το βάθος τροχοαυλάκωσης που παρατηρείται (Corte' et al, 1994).

2.4 Οι αρνητικές συνέπειες των τροχοαυλακώσεων στην λειτουργία των οδοστρωμάτων.

2.4.1 *Απόκλιση της επιφάνειας των οδοστρωμάτων από την τελείως επίπεδη επιφάνεια*

Η εμφάνιση τροχοαυλακώσεων είναι μία από τις αιτίες που οδηγούν στην απώλεια της επιπεδότητας της επιφάνειας των οδοστρωμάτων. Η απόκλιση της επιφάνειας από την τελείως επίπεδη επιφάνεια επηρεάζει την δυναμική του οχήματος, την ποιότητα οδήγησης, τα δυναμικά φορτία και την αποστράγγιση των επιφανειακών υδάτων. Επηρεάζεται η κάθετη μετακίνηση του οχήματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται στον οδηγό το αίσθημα της μη καλής ποιότητας οδήγησης και της ανασφάλειας κατά την οδήγηση.

2.4.2 *Έντονα φαινόμενα υδρολίσθησης των τροχών*

Οι αυλακώσεις γίνονται άμεσα αντιληπτές μετά από βροχοπτώσεις εφόσον μετατρέπονται σε θύλακες συγκέντρωσης όμβριων. Η, κατά καιρούς, συγκέντρωση νερού στις τροχοαυλακώσεις επιταχύνει και την περαιτέρω φθορά των οδοστρωμάτων.

Είναι γνωστό ότι η αντίσταση σε ολίσθηση αυξάνεται όσο αυξάνεται η επιφάνεια της ξηρής επαφής μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Στην περίπτωση συσσώρευσης νερού στις αυλακώσεις υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου υδρολίσθησης των τροχών (σχήμα 2.10). Συγκεκριμένα, σε υγρό οδόστρωμα δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα νερού ανάμεσα στο οδόστρωμα και στο ελαστικό με αποτέλεσμα να χάνεται η επιφάνεια ελαστικού-οδοστρώματος προκαλώντας απώλεια του ελέγχου της πορείας του οχήματος.



Σχήμα 2.10 : Τροχοαυλακώσεις ως θύλακες συγκέντρωσης όμβριων υδάτων

Επηρεάζεται η ασφάλεια του οχήματος τόσο κατά την οδήγηση (κυρίως στις στροφές) όσο και κατά την πέδηση. Το νερό που συσσωρεύεται στις αυλακώσεις είναι δυνατό να εισχωρήσει στο εσωτερικό του οδοστρώματος με πιθανό αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών σε αυτό.

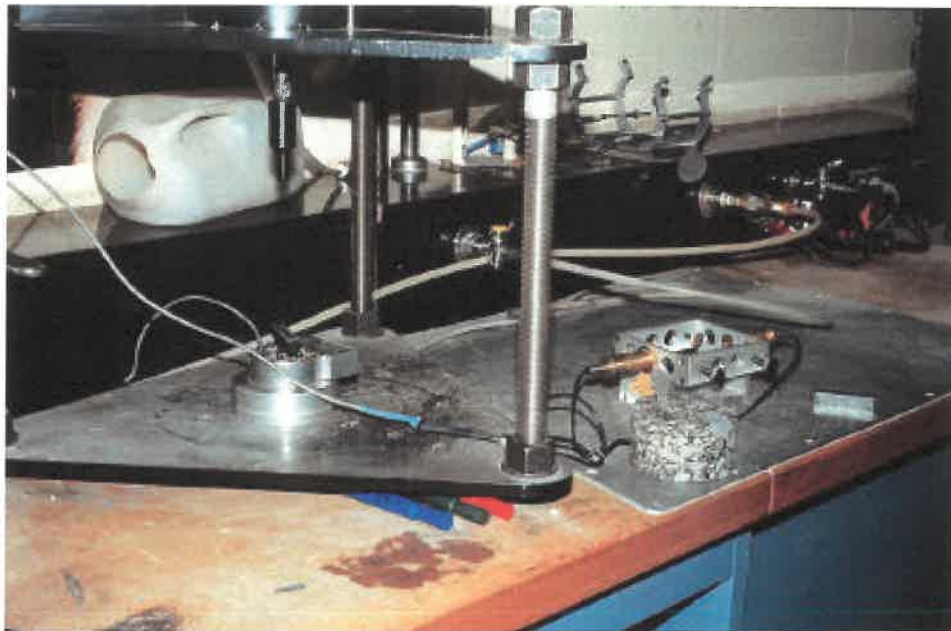
3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι εργαστηριακές δοκιμές που εκπονούνται για τον καθορισμό της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: α)αντιδιαμετρικές δοκιμές, β)μονοαξονικές δοκιμές, γ) τριαξονικές δοκιμές, δ)εμπειρικές δοκιμές (empirical tests), ε) δοκιμές διάτμησης και ζ) η δοκιμή της τροχοαλάκωσης (simulative test) (Brown et al,2001).

3.2 Δοκιμές σε αντιδιαμετρική θλίψη

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε αντιδιαμετρική θλίψη (σχήμα 3.1) επηρεάζονται σε μεγάλο ποσοστό από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου του μίγματος, γεγονός που οδηγεί σε υπερεκτίμηση της τροχοαλάκωσης και καθιστά τις δοκιμές αυτές μη κατάλληλες για την αξιολόγηση των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση.



Σχήμα 3.1 : Συσκευή εκτέλεσης δοκιμών σε αντιδιαμετρική θλίψη

3.3 Δοκιμές υπό μονοαξονική φόρτιση

Η αρχή λειτουργίας των δοκιμών σε μονοαξονική φόρτιση (σχήμα 3.2) είναι απλή και το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό. Εντούτοις η πολυπλοκότητα και το κόστος τους αυξάνεται όταν αντί για στατικά φορτία επιβάλλονται δυναμικές φορτίσεις. Επιπλέον το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι στο εργαστήριο δεν μπορούν να προσομοιωθούν ακριβώς οι συνθήκες κυκλοφορίας και θερμοκρασίας που επικρατούν στο εργοτάξιο αφού κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε άμεση καταστροφή των δοκιμών. Για το λόγο αυτό οι δοκιμές εκτελούνται με μειωμένα φορτία και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε μη ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση.



Σχήμα 3.2 : Συσκευή εκτέλεσης μονοαξονικής δοκιμής ερπυσμού

3.4 Δοκιμές υπό τριαξονική φόρτιση

Οι δοκιμές υπό τριαξονική φόρτιση (σχήμα 3.3) σε σχέση με τις μονοαξονικές μας επιτρέπουν να αυξήσουμε κατά την εκτέλεση τους το φορτίο και την θερμοκρασία έτσι ώστε να προσομοιάσουμε καλύτερα τις συνθήκες που επικρατούν στο έργο (φόρτιση, θερμοκρασία). Είναι αρκετά πολύπλοκες στην εκτέλεση τους όμως μας δίνουν

ικανοποιητικές πληροφορίες σε σχέση με τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 3.3 : Συσκευή εκτέλεσης δοκιμών υπό τριαξονική φόρτιση

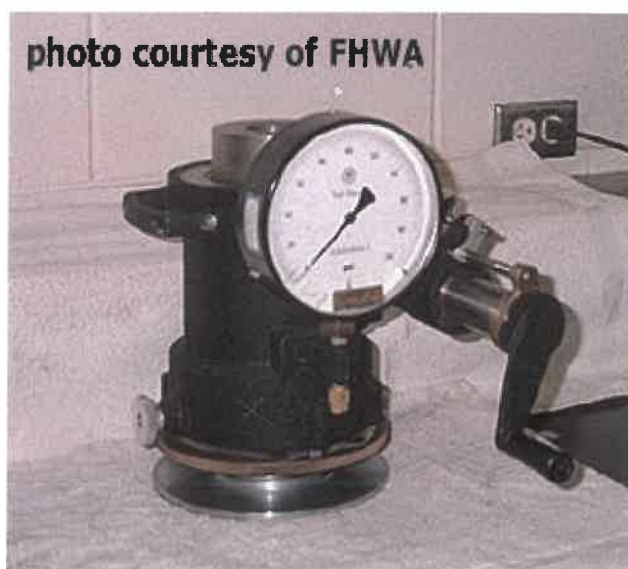
3.5 Εμπειρικές δοκιμές

Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται κατά την μελέτη σύνθεσης θερμού ασφαλτομίγματος για το προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου και διακρίνονται στην δοκιμή Marshall η οποία είναι και η πλέον διαδεδομένη και στην δοκιμή Hveem που χρησιμοποιείται από ορισμένα μόνο εργαστήρια κυρίως των ΗΠΑ. Κατά την δοκιμή Marshall ελέγχονται δοκίμια συγκεκριμένης διαμέτρου σε ευστάθεια και παραμόρφωση με την ειδική συσκευή Marshall (σχήμα 3.4). Παράλληλα ελέγχονται και άλλες ιδιότητες που είναι όλες μαζί γνωστές ως ιδιότητες Marshall. Οι ιδιότητες Marshall ωστόσο δεν είναι θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή σε κόπωση και σε παραμένουσα παραμόρφωση, χαρακτηρίζονται ως εμπειρικές και για αυτό δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικές για την σύνθεση ασφαλτικών μιγμάτων.



Σχήμα 3.4 : Συσκευή ελέγχου δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση (συσκευή Marshall)

Κατά την δοκιμή Hveem ελέγχονται δοκίμια συγκεκριμένης διαμέτρου σε ευστάθεια και διόγκωση χρησιμοποιώντας το ευσταθειόμετρο Hveem (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 : Συσκευή Hveem ελέγχου δοκιμών σε ευστάθεια

Το μίγμα με την βέλτιστη περιεκτικότητα σε άσφαλτο θα πρέπει να ικανοποιεί τα σχεδιαστικά κριτήρια όπως ορίζονται κατά την μεθοδολογία Hveem.

3.6 Δοκιμές διάτμησης κατά Superpave

Όλες οι δοκιμές διάτμησης εκτελούνται με τη συσκευή διάτμησης Superpave Shear Tester (SST) (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 : Συσκευή διάτμησης (Superpave Shear Tester)

Σημειώνεται ότι είναι δοκιμές πολύπλοκες, δαπανηρές και δεν συνίσταται η χρήση τους για την εκτίμηση της αντίστασης των μιγμάτων σε τροχοαυλάκωση

3.7 Η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης

Η δοκιμή τροχοαυλάκωσης (wheel tracking test) προσομοιάζει με τον καλύτερο τρόπο τις συνθήκες φόρτισης των ασφαλτικών στρώσεων. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής μας δίνουν την δυνατότητα να αξιολογήσουμε την αντοχή των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένονσα παραμόρφωση και να απορρίψουμε ορισμένα ως μη κατάλληλα. Αυτό είναι δυνατόν μετά την καθιέρωση μέγιστων επιτρεπτών τιμών ρυθμού και βάθους τροχοαυλάκωσης.

Η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης εκτελείται, α) σε πειραματικό οδόστρωμα (full scale testing), διαδικασία ιδιαίτερα δαπανηρή και χρονοβόρα, β) σε ασφαλτομίγματα που

παρασκευάζονται στο εργαστήριο ή παρασκευάζονται σε ειδική μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος και επιλέγονται δείγματα, και γ)σε πυρήνες που αποκόπτονται από το οδόστρωμα.

.

4 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ

4.1 Γενικά

Οι δοκιμές τροχοαυλάκωσης έχουν ως στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση κάτω από συνθήκες περισσότερο κοντά στις συνθήκες που αναπτύσσονται στο έργο. Κατά τις αντίστοιχες δοκιμές το προς αξιολόγηση μίγμα φορτίζεται με κινούμενο τροχό, ο οποίος προσομοιάζει την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος, υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί αρκετές συσκευές για τη διενέργεια της δοκιμής τροχοαυλάκωσης, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στην συνέχεια (Cooley, *et al* 2000, Brown *et al*, 2001).

4.2 Συσκευές τροχοαυλάκωσης που χρησιμοποιούνται διεθνώς

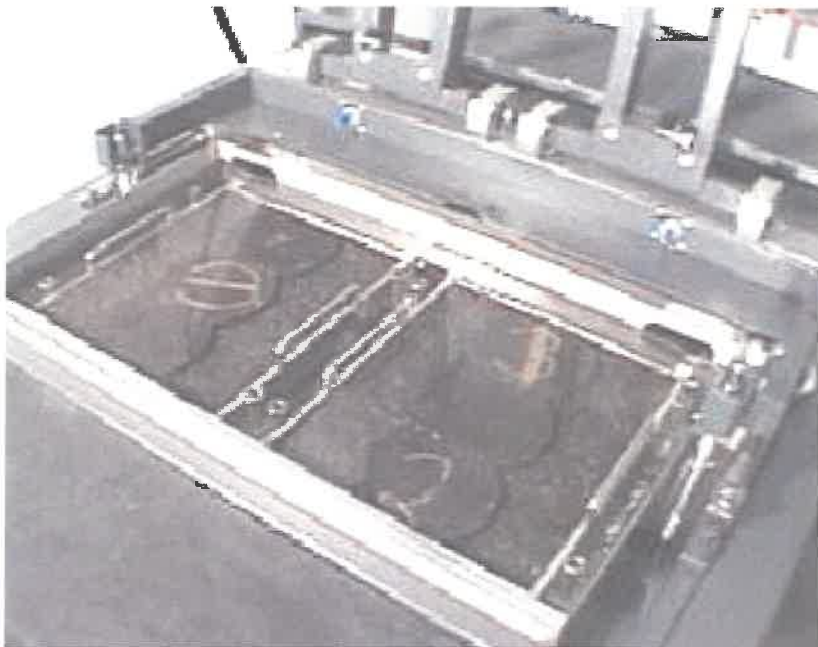
4.2.1 Hamburg Wheel Rut Tester (HWRT)

Η συσκευή HWRT (σχήμα 4.1) χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της δοκιμής τροχοαυλάκωσης στην Γερμανία και στις ΗΠΑ και εκτός από την εκτίμηση της αντίστασης των μιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση μελετά και την επίδραση της υγρασίας στα ασφαλτικά μίγματα.



Σχήμα 4.1 : Συσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης HWRT

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής έχει ως εξής: μία πλάκα από θερμό ασφαλτόμιγμα βυθίζεται σε ζεστό νερό (η δοκιμή μπορεί ωστόσο να εκτελεστεί και σε ξηρές συνθήκες) και ένας ατσάλινος ή ελαστικός τροχός (πλάτους 47mm και 50mm αντίστοιχα) διατρέχει την επιφάνεια της. Η ταχύτητα του τροχού είναι περίπου 1,1km/h (αντιστοιχεί περίπου σε 53±2 φορτίσεις στο λεπτό), το φορτίο του κυμαίνεται από 710-1N έως 710 +1 N και ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων ανέρχεται σε 20.000, παρόλο που ακόμα και 100.000 φορτίσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν. Η θερμοκρασία της δοκιμής κυμαίνεται από 25 °C έως 70°C.



Σχήμα 4.2 : Έλεγχος δοκιμίων σε υγρές συνθήκες



Σχήμα 4.3 : Έλεγχος δοκιμίων σε ξηρές συνθήκες

Σημειώνεται ότι τα προς εξέταση δείγματα τύπου πλάκας, προτού υποβληθούν σε έλεγχο, συμπυκνώνονται σε κενό αέρος $7\pm 1\%$ συνήθως με βάση την γυροσκοπική Superpave μέθοδο. Μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα δυο μίγματα με διαστάσεις $260 \times 300 \text{ mm}$ και πάχος πλάκας 40,80,120mm ή δυο (ή τρεις) πυρήνες με διάμετρο 150mm (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 : Δείγματα πριν και μετά την δοκιμή τροχοαυλάκωσης

Η αντίσταση του μίγματος σε παραμένουσα παραμόρφωση εκτιμάται με βάση μέγιστες επιτρεπτές τιμές βάθους τροχοαυλάκωσης (σε mm). Τα ερευνητικά ινστιτούτα, σε Ευρώπη και Αμερική, ανάλογα με το αριθμό φορτίσεων δίνουν τα εξής όρια:

α) Η Γερμανία, όπου και κατασκευάστηκε η συσκευή από την γερμανική εταιρία Helmut-Wind, συστήνει μέγιστο επιτρεπτό όριο βάθους τροχοαυλάκωσης 10mm για 20000 φορτίσεις και για θερμοκρασία δοκιμής 20°C (σε υγρές συνθήκες).

β) Το τμήμα μεταφορών του Κολοράντο (COLORADO DOT) συστήνει μέγιστο επιτρεπτό όριο βάθους τροχοαυλάκωσης 4.0mm για 10.000 φορτίσεις και 10mm για 20.000 φορτίσεις.

γ) Το τμήμα μεταφορών του Τέξας (TEXAS DOT) απαιτεί το όριο βάθους τροχοαυλάκωσης να είναι λιγότερο από 12mm στις 20.000 φορτίσεις (για μία δοκιμή σε υγρό περιβάλλον και για χρήση ατσάλινου τροχού).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με τις συνθήκες διεξαγωγής της δοκιμής μεταβάλλονται και τα αποδεκτά όρια του βάθους τροχοαυλάκωσης.

4.2.2 French Laboratory Rutting Tester (FLRT)

Η συσκευή τροχοαυλάκωσης LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) γνωστή και ως French Rutting Tester (FRT) (σχήμα 4.5) χρησιμοποιείται 15 χρόνια με μεγάλη επιτυχία για την αξιολόγηση της αντίστασης ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση, που χρησιμοποιούνται στους Γαλλικούς αυτοκινητοδρόμους. Χρησιμοποιείται επίσης και για την αξιολόγηση ασφαλτικών μιγμάτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων.



Σχήμα 4.5 : Συσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης FLRT

Στην δοκιμή, η φόρτιση του μίγματος πραγματοποιείται μέσω ενός ελαστικού τροχού (σχήμα 4.6), που έχει διάμετρο 400mm και πλάτος 80mm, ασκεί στο δείγμα πίεση $600 \pm 30 \text{ KP}$ (αντίστοιχο φορτίο $5000 \pm 50 \text{ N}$) και διατρέχει την επιφάνεια του με συχνότητα 1Hz. Η κίνηση του τροχού είναι παλινδρομική.



Σχήμα 4.6 : Ελαστικός τροχός φόρτισης

Σημειώνεται ότι τα προς εξέταση δοκίμια παρασκευάζονται στο εργαστήριο και συμπυκνώνονται με ειδική συσκευή (LCPC laboratory-tired compactor). Κάθε μίγμα συμπυκνώνεται (σχήμα 4.7) σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες, με το πέρασμα ενός τροχού πάνω από μία μήτρα που έρχεται σε επαφή. Η μήτρα έχει διαστάσεις, μήκος 500mm, πλάτος 180mm, και ύψος 50mm για έλεγχο μιγμάτων της επιφανειακής στρώσης και αντίστοιχα πάχος 100mm για έλεγχο μιγμάτων της ασφαλικής βάσης.

Μετά την συμπύκνωση το δείγμα μεταφέρεται στην συσκευή FLRT για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή. Εκεί μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα δυο δείγματα. Η θερμοκρασία της δοκιμής κυμαίνεται από 30 °C έως 70°C.



Σχήμα 4.7 : Συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων

Το βάθος της τροχοαυλάκωσης (σχήμα 4.8) καταγράφεται στην μηχανή για 100,300,1000,3000,10.000,30.000 κύκλους φόρτισης. Οι προδιαγραφές συστήνουν επιτρεπτό βάθος τροχοαυλάκωσης 10mm μετά από 3000 φορτίσεις για την επιφανειακή στρώση (50mm πάχος δείγματος) και 10mm μετά από 30000 φορτίσεις για την ασφαλική βάση (100mm πάχος δείγματος).



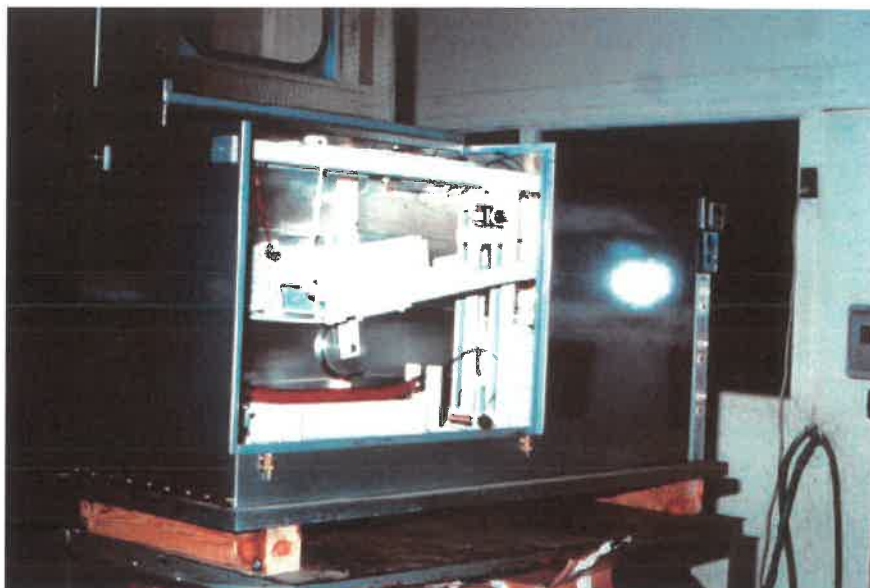
Σχήμα 4.8 : Βάθος τροχοαυλάκωσης σε δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής

Αξίζει να σημειωθεί ότι και για αυτή την δοκιμή τα μέγιστα επιτρεπτά όρια βάθους τροχοαυλάκωσης μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες διεξαγωγής της δοκιμής.

4.2.3 *Georgia loaded wheel tester (GLWT)*

Η συσκευή GLWT (σχήμα 4.9) εξελίχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 80' από τη συνεργασία του Τμήματος Μεταφορών του Πανεπιστημίου της Georgia (Department of Transportation) και του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Georgia (Institute of Technology).

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής ένας ατσάλινος τροχός που συνδέεται με ένα γραμμικό ελαστικό σωλήνα διατρέχει την επιφάνεια του συμπυκνωμένου δείγματος ασκώντας σε αυτό πίεση 650 KPa. Η θερμοκρασία της δοκιμής κυμαίνεται από τους 35°C έως τους 60°C.



Σχήμα 4.9 : Συσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης GLWT

Τα προς εξέταση δείγματα από θερμό ασφαλτόμιγμα μπορεί να είναι ορθογωνικά είτε κυλινδρικά. Τα ορθογωνικά δείγματα έχουν συνήθως διαστάσεις 125mm πλάτος, 300mm μήκος και 75mm ύψος. Η συμπίκνωσή τους επιτυγχάνεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Με βάση τον πρώτο τρόπο το θερμό ασφαλτόμιγμα τοποθετείται σε ένα καλούπι, το οποίο στηρίζεται πάνω σε κινούμενη βάση. Καθώς η βάση κινείται ένα φορτίο συμπυκνώνει το δείγμα. Με βάση τον δεύτερο τρόπο ένα κινούμενο φορτίο το οποίο ασκεί δύναμη 267 KN διασχίζει την επιφάνεια του δείγματος και το συμπυκνώνει. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τέσσερις φορές.

Τα κυλινδρικά δείγματα έχουν διάμετρο 150 mm και πάχος 75mm. Η διαδικασία συμπίκνωσης που ακολουθείται βασίζεται στο δεύτερο τρόπο που περιγράφηκε προγενέστερα και στη γυροσκοπική μέθοδο. (σχήμα 4.10)



Σχήμα 4.10 : Συμπύκνωση κυλινδρικών δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο (Gyratory Compactor)

Τα συμπυκνωμένα δείγματα μεταφέρονται στην συσκευή GLWT και όταν συμπληρωθούν 8000 κύκλοι φόρτισης μετράται το βάθος της τροχοαυλάκωσης, ως η διάφορα των

διαστάσεων του δοκιμίου πριν και μετά το πείραμα. Μέχρι στιγμής δεν έχουν καθοριστεί μέγιστα επιτρεπτά όρια βάθους τροχοαυλάκωσης.

4.2.4 **Asphalt Pavement Analyzer (APA)**

Η συσκευή APA (σχήμα 4.11) είναι μια εξέλιξη της συσκευής τροχοαυλάκωσης GLWT και κατασκευάστηκε το 1996. Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του φαινομένου της τροχοαυλάκωσης και της αντοχής σε υγρασία των ασφαλτομιγμάτων (*Uzarowski et al* ,2004).



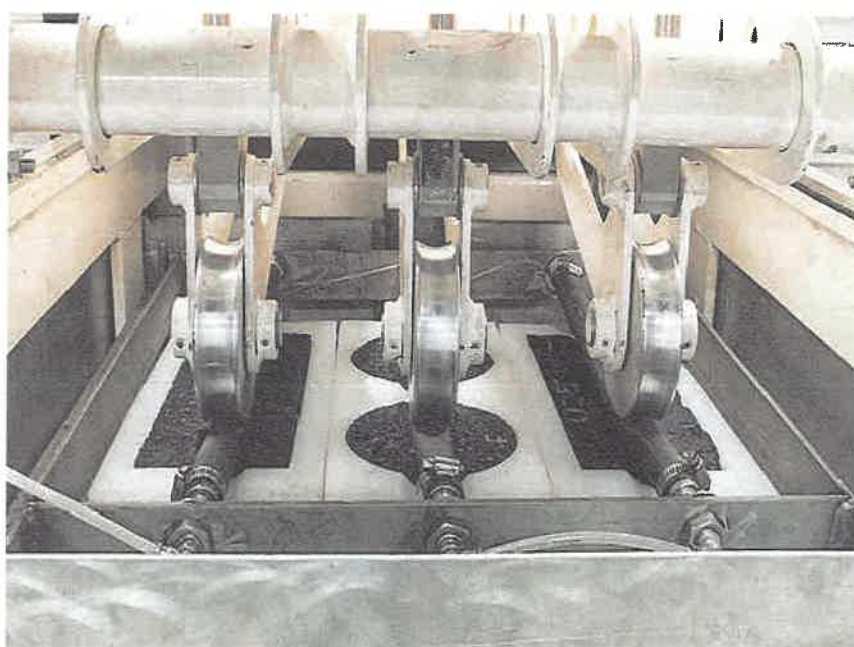
Σχήμα 4.11 : Συσκευή τροχοαυλάκωσης APA

Η συσκευή APA ελέγχει ορθογωνικά, κυλινδρικά δείγματα πάχους 75 mm ή πυρήνες με διάμετρο 150 mm και πάχος 75 mm. Τα μίγματα τοποθετούνται σε ένα θάλαμο ελέγχου και καταγράφεται το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης υπό την επίδραση φορτίου. Τα κυλινδρικά δείγματα συμπυκνώνονται με βάση την γυροσκοπική μέθοδο σε κενό αέρος από 4 έως 7% και τα ορθογωνικά δείγματα συμπυκνώνονται σε κενό αέρος 7% με ειδική συσκευή συμπύκνωσης τύπου Vibratory Compactor (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 : Συσκευής συμπίκνωσης δειγμάτων (Vibratory Compactor)

Κατά την διάρκεια της δοκιμής οι συνθήκες κυκλοφορίας προσομοιώνονται με την βοήθεια κοίλων ατσάλινων τροχών (σχήμα 4.13) οι οποίοι κινούνται πάνω σε τρεις ελαστικούς σωλήνες (8000-10000 κύκλοι φόρτισης). Οι ελαστικοί σωλήνες δέχονται πίεση 700 ± 35 KPa και το φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε τροχό είναι ίσο με 445 ± 22 N. Τέλος η θερμοκρασία της δοκιμής κυμαίνεται από 40.6°C έως 64°C και σε αντίθεση με τη συσκευή GLWT, τα μίγματα μπορούν να εξεταστούν και σε υγρές συνθήκες



Σχήμα 4.13 : Συσκευή τροχοαλάκωσης ΑΡΑ



Σχήμα 4.14 : Βάθος τροχοαυλάκωσης σε δείγματα μετά από 8000 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 4.15 : Δείγμα ανθεκτικό (αριστερά) και μη ανθεκτικό (δεξιά) στην τροχοαυλάκωση

Ως μέγιστο επιτρεπτό όριο βάθους τροχοαυλάκωσης ορισμένα ερευνητικά ινστιτούτα συστήνουν τα 8mm μετά από 8000 κύκλους φόρτισης.

4.2.5 **Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device (PURW)**

Η συσκευή τροχοαυλάκωσης που απεικονίζεται στο σχήμα 4.16 κατασκευάστηκε στο Purdue University. Η συσκευή διαθέτει έναν ελαστικό τροχό ο οποίος φορτίζεται μέσω

υδραυλικής αντλίας με δύναμη 385 lb και διατρέχει την επιφάνεια του δείγματος ασκώντας σε αυτό πίεση 620 KPa. Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε υγρές είτε σε ξηρές συνθήκες.



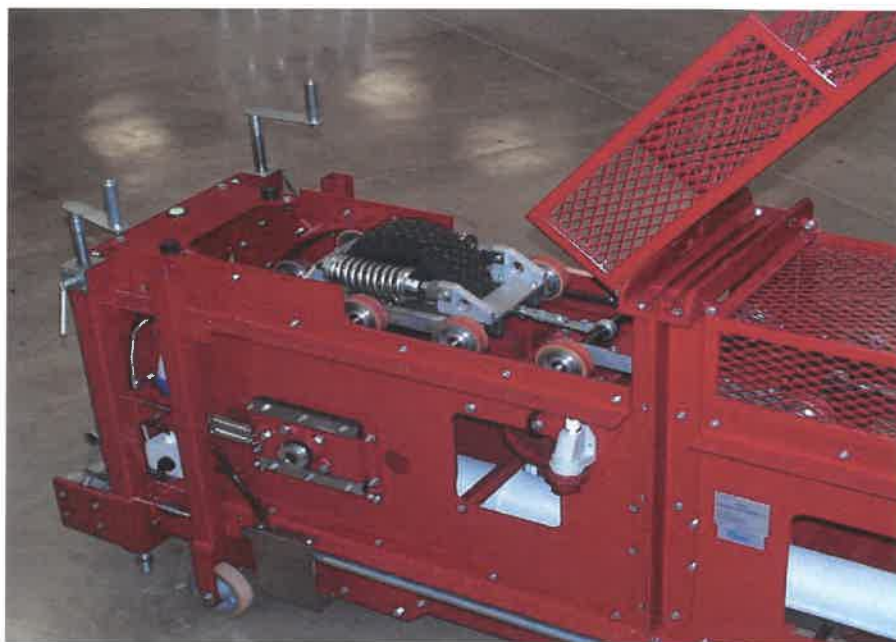
Σχήμα 4.16 : Συσκευή τροχοαυλάκωσης PURW

Τα προς εξέταση δείγματα είναι είτε δοκίμια που παρασκευάζονται στο εργαστήριο ή πυρήνες που αποκόπτονται από τους ασφαλοτάπητες των αυτοκινητοδρόμων. Τα δοκίμια τύπου πλάκας έχουν διαστάσεις 290 mm πλάτος και 310 mm μήκος. Το πάχος του κάθε δείγματος εξαρτάται από τον τύπο του προς διερεύνηση μίγματος. Για μίγματα επιφανειακής στρώσεως το πάχος είναι περίπου 38 mm ενώ για μίγματα συνδετικής στρώσης και ασφαλικής βάσης το πάχος είναι 51mm και 76mm αντίστοιχα. Τα δείγματα συμπυκνώνονται ώστε το ποσοστό κενών αέρος να κυμαίνεται από 6 έως 8%. Η μέθοδος συμπίκνωσης είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην δοκιμή ελέγχου με χρήση της συσκευής HWTB. Η μόνη διαφορά είναι στο γεγονός ότι σε δοκιμή με χρήση της συσκευής PURW μπορούν να συμπυκνωθούν και μεγαλύτερων διαστάσεων δείγματα. Η δοκιμή εκτελείται μέχρι να συμπληρωθούν 20.000 κύκλοι φόρτισης ή μέχρι να παρατηρηθεί βάθος τροχοαυλάκωσης 20mm.

4.2.6 **Model Mobile Load Simulator (MMLS3)**

Η συσκευή τροχοαυλάκωσης Model Mobile Load Simulator (MMLS3) (σχήμα 4.17) αναπτύχθηκε πρόσφατα στην Νότια Αφρική και είναι μικρότερης κλίμακας. Κατά την διάρκεια της δοκιμής τα δοκίμια φορτίζονται περίπου 7200 φορές (μονές φορτίσεις) μέσα σε μία ώρα από τροχό με διάμετρο 300 mm, πλάτος 80 mm, ο οποίος ασκεί πίεση της τάξεως

των 800 kPa. Η συσκευή χρησιμοποιείται για δοκιμές σε ξηρές και υγρές συνθήκες. Θερμοκρασίες 50 °C και 60 °C χρησιμοποιούνται για δοκιμές σε ξηρές συνθήκες και 30 °C για υγρές συνθήκες .



Σχήμα 4.17 : Συσκευή τροχοαυλάκωσης MMLS3

Τα δείγματα που εξετάζονται έχουν μήκος 1.2m και πλάτος 240mm. Με την συγκεκριμένη δοκιμή μπορεί επίσης να εκτιμηθεί η ευαισθησία του δείγματος στην υγρασία.

4.2.7 **Wheel Tracker Device**

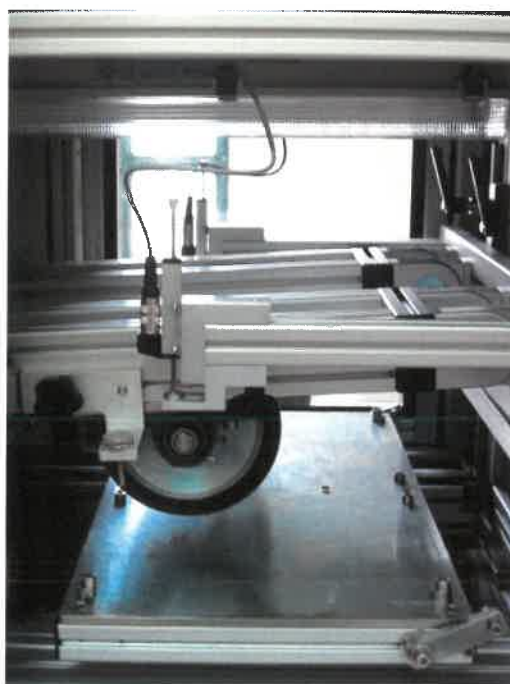
Η μικρής κλίμακας συσκευή Wheel Tracker (σχήμα 4.18) χρησιμοποιείται ευρύτατα στον ευρωπαϊκό χώρο, για τη δοκιμή της τροχοαυλάκωσης. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί : 1) για την αξιολόγηση νέων υλικών, 2) για τον έλεγχο μιγμάτων διαφορετικής σύνθεσης και 3) για τη μελέτη της επίδρασης της συμπίκνωσης στην ευαισθησία σε τροχοαυλάκωση.

Η υπόψη συσκευή αποτελείται από ένα αλουμινένιο πλαίσιο που διαθέτει θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας, η οποία κυμαίνεται από +5°C έως 60°C με ακρίβεια ($\pm$) 0.5°C. Περιλαμβάνει επίσης δύο τροχούς και εκτελεί δοκιμές που είναι εναρμονισμένες με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12697-22.



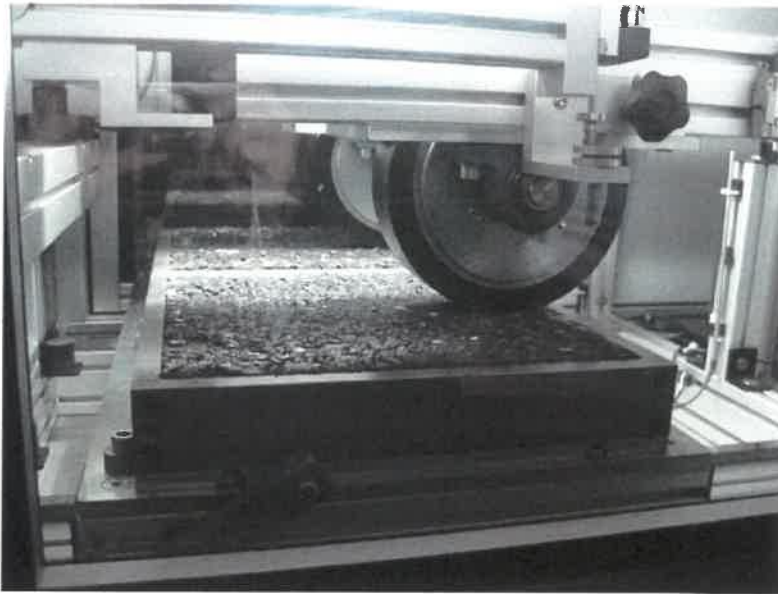
Σχήμα 4.18 : Μικρής κλίμακας συσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης

Τα προς εξέταση δείγματα τοποθετούνται σε επίπεδη επιφάνεια. Οι φορτισμένοι λαστιχοφόροι τροχοί εξωτερικής διαμέτρου 200-205 mm (σχήμα 4.19) διατρέχουν την επιφάνεια του δείγματος με σταθερή ταχύτητα (53 φορτίσεις/λεπτό) και καλύπτουν απόσταση $230\text{mm} \pm 10\text{mm}$. Η πίεση που ασκούν οι τροχοί στο δοκίμιο είναι 520-700N. Το βάθος της τροχοαυλάκωσης που δημιουργείται μετράται με τη βοήθεια ειδικών βαθμονομημένων ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.

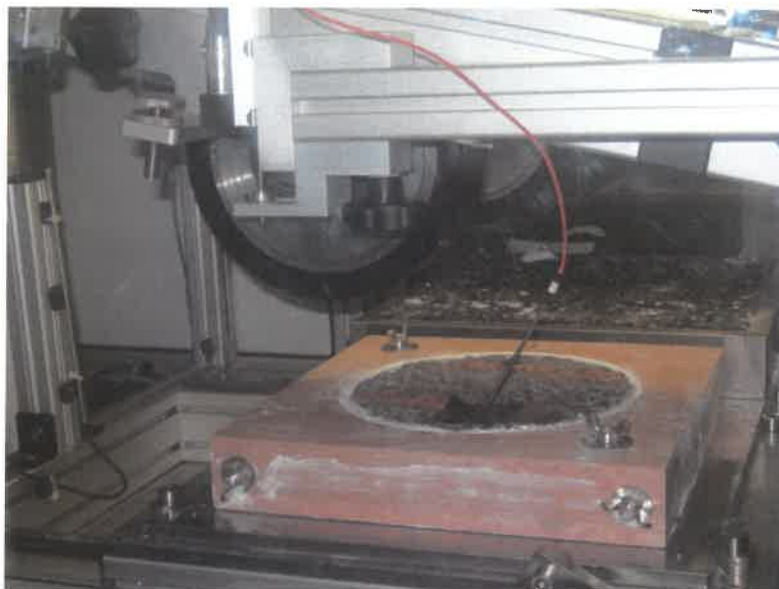


Σχήμα 4.19 : Λαστιχοφόρος τροχός φόρτισης δοκιμών

Η συσκευή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο δοκιμίων που έχουν συμπτυκνωθεί στο εργαστήριο (σχήμα 4.20) ή για τον έλεγχο πυρήνων (σχήμα 4.21) που έχουν αποκοπεί από το οδόστρωμα.



Σχήμα 4.20 : Έλεγχος τετραγωνικών δοκιμίων στην συσκευή τροχοαυλάκωσης Wheel Tracker



Σχήμα 4.21 : Έλεγχος πυρήνων στην συσκευή τροχοαυλάκωσης Wheel Tracker

Ο ελάχιστος αριθμός δειγμάτων για δοκιμή σε συνθήκες αέρα είναι 2.

4.2.8 Ανασκόπηση των συσκευών τροχοαυλάκωσης

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 4.1) γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση των συσκευών τροχοαυλάκωσης που παρουσιάστηκαν παραπάνω και των κυριότερων διαφορών που επισημαίνονται .

Πίνακας 4.1:Ανασκόπηση συσκευών τροχοαυλάκωσης

Είδος Συσκευής	Συνθήκες ελέγχου δοκιμίου	Δυνατότητα εξέτασης πυρήνων	Θερμοκρασία ελέγχου	Φόρτιση που ασκείται στο δοκίμιο	Κίνηση τροχών
Hamburg Wheel Tracking Device (HWTB)	Ξηρές και υγρές	OXI	25°C - 70°C	705 N (158-lb)	παλινδρομική
French Wheel Tracker(FLRT)	Ξηρές	OXI	50 - 60°C	600 kPa (87 psi)	παλινδρομική
Asphalt Pavement Analyzer (APA)	Ξηρές και υγρές	NAI	40.6°C - 64°C	445 N	παλινδρομική
Georgia Loaded Wheel Tester(GLWT)	Ξηρές	OXI	35°C - 60°C	690kPa(100 psi)	παλινδρομική
Purdue Wheel Tracking Device(PURW)	Ξηρές και υγρές	NAI	25°C - 70°C	620 kPa (90 psi)	παλινδρομική
MMLS3	Ξηρές και υγρές	NAI	50 - 60°C	800 kPa	μονή κίνηση
Wheel Tracker	Ξηρές	NAI	5°C - 60°C	520-700 N	παλινδρομική

Από τον παραπάνω πίνακα διαπιστώνουμε ότι οι διαφορές των συσκευών τροχοαυλάκωσης δεν είναι σημαντικές. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στη δυνατότητα που

έχουν οι συσκευές να εξετάζουν δοκίμια σε ξηρές ή σε υγρές συνθήκες, καθώς και την δυνατότητα να εξετάζουν πυρήνες από τους ασφαλοτάπητες των αυτοκινητοδρόμων. Τέλος παρατηρούμε διαφορές στο μέγεθος της φόρτισης που ασκείται στο δοκίμιο, καθώς και στη θερμοκρασία ελέγχου.

4.3 Δοκιμές τροχοαυλάκωσης που πραγματοποιούνται σε πειραματικό οδόστρωμα (accelerated pavement testing)

4.3.1 Γενικά

Οι δοκιμές τροχοαυλάκωσης που πραγματοποιούνται σε πειραματικά οδοστρώματα (σχήμα 4.22) έχουν ως στόχο την γενικότερη εκτίμηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων κάτω από δεδομένες κυκλοφοριακές και κλιματολογικές συνθήκες. Πρόκειται για δοκιμές ιδιαίτερα δαπανηρές και χρονοβόρες.



Σχήμα 4.22 : Δοκιμή τροχοαυλάκωσης σε πειραματικό οδόστρωμα (full scale testing)

Το βασικό τους όμως πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να μας δώσουν αξιόπιστες πληροφορίες σε θέματα που αφορούν: 1) την συμπεριφορά των επιφανειακών ασφαλτικών στρώσεων σε παραμένουσα παραμόρφωση και 2) την φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος υπό την επίδραση των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων από τον κυκλοφοριακό φόρτο.

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών τα φορτία που ασκούνται στην επιφάνεια του οδοστρώματος μπορεί να είναι πραγματικά αξονικά φορτία (πραγματικά οχήματα) και τότε έχουμε τα λεγόμενα test roads ή να προέρχονται από συσκευές που είναι σε θέση να προσομοιώνουν τις συνθήκες κυκλοφορίας με τη βοήθεια τροχών που φορτίζουν το πειραματικό οδόστρωμα (test tracks) (Coetzee. *et al*,2001).



Σχήμα 4.23 : Συσκευή προσομοίωσης φόρτισης οδοστρώματος (LCPC)

Τα test tracks βρίσκουν αυτή την στιγμή ιδιαίτερη εφαρμογή αφού δεν είναι τόσο δαπανηρά όσο τα test roads.

4.3.2 **LCPC TEST TRACK**

Το τμήμα μεταφορών του LCPC διεξάγει από το 1989 δοκιμές σε πειραματικά οδοστρώματα με κύριους στόχους: 1) την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών στρώσεων, 2) την αξιολόγηση νέων μεθόδων που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοστρωμάτων, 3) τον έλεγχο και την εκτίμηση της συμπεριφοράς νέων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των οδοστρωμάτων, 4) το σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Με βάση πρόσφατη δοκιμή τροχοαυλάκωσης κατασκευάζεται πειραματικό οδόστρωμα με διαδικασίες ανάλογες με αυτές που ακολουθούνται για την κατασκευή ενός πραγματικού οδοστρώματος (σύνθεση και παραγωγή μιγμάτων, διάστρωση, συμπίκνωση). Το προς εξέταση οδόστρωμα καλύπτει κυκλική περιοχή μήκους 122 m και μέγιστου πλάτους 6 m. Είναι επίσης χωρισμένο σε τέσσερις τομείς (I,II,III,IV) και σε κάθε τομέα η επιφανειακή ασφατική στρώση κατασκευάζεται από ασφαλτόμιγμα με διαφορετικό τύπο ασφάλτου (συμβατική και τροποποιημένη άσφαλτος) (Corte' et al,1994).

Η εγκατάσταση (carousel) συνολικής ισχύος 750KW, που προσομοιώνει τις συνθήκες κυκλοφορίας αποτελείται από ένα κεντρικό πύργο ελέγχου και από τέσσερις βραχίονες μήκους 20m (ο καθένας) πάνω στους οποίους ενσωματώνονται οι τροχοί δημιουργώντας έτσι διαφορετικούς συνδυασμούς φορτίσεων (45kN έως 135kN) (σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.24 : Εγκατάσταση που προσομοιώνει τις συνθήκες κυκλοφορίας (carousel)

Το πείραμα εκτελείται σε δυο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση συμπληρώνονται 202.000 κύκλοι φόρτισης. Οι τέσσερις βραχίονες του carousel που διατρέχουν το προς εξέταση οδόστρωμα (ταχύτητα περιστροφής 6,5 rpm) δημιουργούν τους εξής συνδυασμούς φορτίσεων: μονοί τροχοί φορτίζουν (42,5 kN ανά τροχό) τους τομείς IV και II (σχήμα 4.25) και διπλοί τροχοί φορτίζουν (65 kN ανά διπλό τροχό) τους τομείς I και III (σχήμα 4.26). Οι θερμοκρασίες που καταγράφονται κατά την πρώτη φάση της δοκιμής κυμαίνονται από 5°C έως 45 °C.



Σχήμα 4.25 : Κυλιόμενοι μονοί τροχοί ενσωματωμένοι στους βραχίονες του



Σχήμα 4.26 : Κυλιόμενοι διπλοί τροχοί ενσωματωμένοι στους βραχίονες του carousel

Κατά την δεύτερη φάση συμπληρώνονται 80000 κύκλοι φόρτισης με ταχύτητα περιστροφής του carousel 3rpm. Σε αυτή την φάση μονοί τροχοί φορτίζουν τους τομείς I και III και διπλοί τροχοί τους τομείς IV και II. Οι θερμοκρασίες που καταγράφονται είναι μικρότερες από 30 °C.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1)Μικρότερο βάθος τροχοαυλάκωσης (σχήμα 4.27) παρατηρείται στα τμήματα όπου χρησιμοποιείται πολύ σκληρός τύπος συμβατικής ασφάλτου και στα τμήματα όπου χρησιμοποιείται τροποποιημένη άσφαλτος.



Σχήμα 4.27 : Μετρήσεις βάθους τροχοαυλάκωσης σε πειραματικό οδόστρωμα

2)Σημαντική επίδραση φαίνεται να έχει στο βάθος της τροχοαυλάκωσης, που παρατηρείται, και το είδος της φόρτισης (μονοί ή διπλοί τροχοί αντίστοιχα). Κατά την φόρτιση με μονούς τροχούς όπου η πίεση επαφής αυξάνεται, το βάθος τροχοαυλάκωσης αυξάνεται.

4.3.3 **NCAT TEST TRACK**

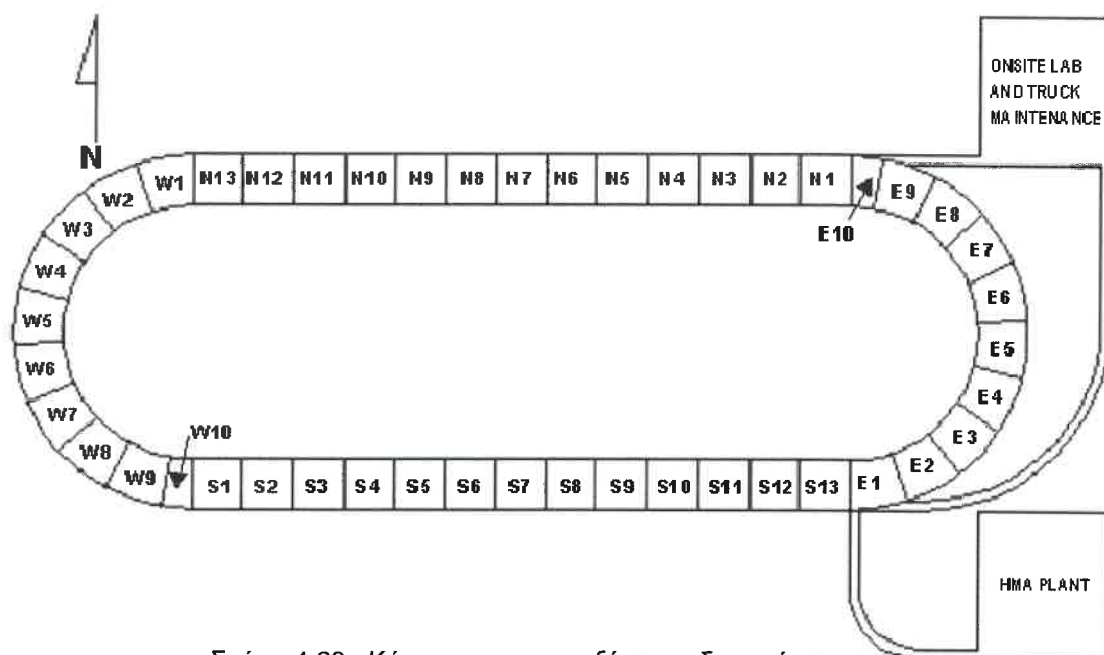
Το τμήμα μεταφορών της Αλαμπάμα (Alabama DOT) σε συνεργασία με το τεχνολογικό κέντρο NCAT διεξάγουν δοκιμές σε πειραματικά οδοστρώματα με στόχο την εκτίμηση της συμπεριφοράς διαφόρων τύπων ασφαλτομιγμάτων σε παραμένονσα παραμόρφωση.

Το προς εξέταση οδόστρωμα (σχήμα 4.28) καλύπτει μία περιοχή συνολικής έκτασης 2,8 χιλιομέτρων, η οποία δημιουργείται από δυο μεγάλα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνονται μεταξύ τους με δυο ημικυκλικά τμήματα.



Σχήμα 4.28 : Πειραματικό οδόστρωμα (NCAT test track)

Το πειραματικό οδόστρωμα είναι επίσης χωρισμένο σε τομείς E1-E10, N1-N13, W1-W13, S1-S13 (σχήμα 4.29) και σε κάθε τομέα, μήκους 60m, η επιφανειακή ασφαλτική στρώση είναι κατασκευασμένη από ασφαλτομίγματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά σύνθεσης (τύπος και ποσοστό ασφάλτου ,κοκκομετρική διαβάθμιση) (*Brown et al,2002*).



Σχήμα 4.29 : Κάτοψη του προς εξέταση οδοστρώματος

Η δοκιμή ολοκληρώνεται μέσα σε χρονικό διάστημα δυο ετών. Μέσα σε αυτό διάστημα τα οδοστρώματα φορτίζονται με την βοήθεια τεσσάρων ερπυστριοφόρων οχημάτων (σχήμα 4.30) καθένα από τα οποία ασκεί φορτίο 152.000 pounds. Η συνολική διερχόμενη κυκλοφορία ισοδυναμεί με 10.000.000 ESALs.



Σχήμα 4.30 : Φόρτιση πειραματικού οδοστρώματος με την βοήθεια ερπυστριοφόρων προωθητών

Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται σε εβδομαδιαία βάση το βάθος της τροχοαυλάκωσης. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) σημαντικό βάθος τροχοαυλάκωσης παρατηρείται σε τρεις φάσεις: το πρώτο διάστημα μετά την κατασκευή και την συμπύκνωση της στρώσης καθώς και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (2001-2002). Επίσης μετρήσεις έδειξαν ότι ο ρυθμός τροχοαυλάκωσης μειώνεται σημαντικά όταν ο εβδομαδιαίος μέσος όρος της θερμοκρασίας πέφτει κάτω από τους 28°C.
- 2) αυξημένο βάθος τροχοαυλάκωσης παρατηρείται σε μίγματα που από την αρχή ήταν γνωστό ότι, λόγω της σύνθεσής τους, είναι λιγότερο ανθεκτικά σε παραμένουσα παραμόρφωση. Ωστόσο είναι μικρότερο από το αναμενόμενο.
- 3) το βάθος της αυλάκωσης είναι κατά 60% λιγότερο σε τμήματα όπου χρησιμοποιήθηκε σκληρή ασφαλτος (PG-76) σε σχέση με τμήματα όπου χρησιμοποιήθηκε πιο μαλακή ασφαλτος (PG-67).
- 4) αύξηση κατά 0.5 %, της ποσότητας ασφάλτου σε μίγματα με τύπο ασφάλτου PG-67 έχει ως αποτέλεσμα αύξηση κατά 50% του βάθους τροχοαυλάκωσης αλλά δεν έχει σημαντική επίδραση σε μίγματα με τύπου ασφάλτου PG-76.

4.3.4 **WEST TRACK**

Το κέντρο ερευνών Nevada Automotive Test Center σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο της Νεβάδα διεξάγει δοκιμές σε πειραματικά οδοστρώματα με κύριο σκοπό την εκτίμηση της συμπεριφοράς διαφόρων τύπων ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση. Ερευνά πως τα χαρακτηριστικά σύνθεσης των μιγμάτων (μελέτη σύνθεσης, τύπος

ασφάλτου, ποσοστό ασφάλτου, κοκκομετρική διαβάθμιση) επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων υπό την επίδραση της κυκλοφορίας (Epps et al, 1999).

Το προς εξέταση οδόστρωμα είναι μία περιοχή έκτασης 3 χιλιομέτρων και αποτελείται από δυο μεγάλα ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με δυο ημικυκλικά τμήματα. Τα ευθύγραμμα τμήματα είναι χωρισμένα σε 26 τομείς. Κάθε τομέας έχει μήκος 70 m. Οι συνθήκες κυκλοφορίας προσομοιώνονται με την βοήθεια πραγματικών αξονικών φορτίων.

Μία πρόσφατη δοκιμή ολοκληρώθηκε σε χρονικό διάστημα δυο ετών. Μέσα σε αυτό το διάστημα το οδόστρωμα φορτίζεται με την βοήθεια τεσσάρων ερπυστριοφόρων οχημάτων καθένα από τα οποία ασκεί φορτίο 670 KN (100psi) και κινείται με μέγιστη ταχύτητα 64km/h. Η συνολική διερχόμενη κυκλοφορία ισοδυναμεί με 10.000.000 ESALs.

4.3.5 **MODEL MOBILE LOAD SIMULATOR (MMLS3)**

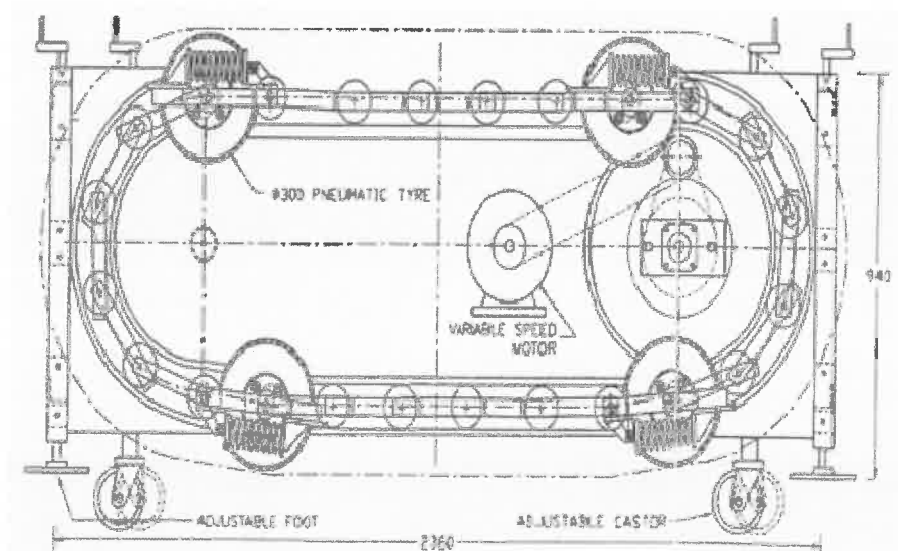
Η συσκευή τροχοαυλάκωσης MMLS3 (σχήμα 4.31) αναπτύχθηκε πρόσφατα στην Νότια Αφρική και χρησιμοποιείται με επιτυχία για την εξέταση του φαινομένου της τροχοαυλάκωσης των ασφαλικών στρώσεων επί τόπου στο έργο. Δοκιμές τροχοαυλάκωσης με χρήση της συσκευής MMLS3 έχουν πραγματοποιηθεί σε οδοστρώματα τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ.



Σχήμα 4.31 : Συσκευής ελέγχου τροχοαυλάκωσης MMLS3

Σε μία από τις έρευνες που διεξήχθη από τα ερευνητικά ινστιτούτα (EMPA) η διαδικασία της δοκιμής είχε ως εξής: Κατά την πραγματική διεύθυνση κυκλοφορίας του οδοστρώματος κινείται τροχός με μέγιστη ταχύτητα 9 km/h, που ασκεί φορτίο 2,1 KN και πίεση 600 KPa .Ο

κάθε ένας από τους 4 τροχούς διαμέτρου 300mm που διαθέτει η συσκευή διατρέχει μία επιφάνεια συνολικής έκτασης 1000mm (σχήμα 4.32). Η θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνεια του προς εξέταση τμήματος ρυθμίζεται και ελέγχεται με την βοήθεια ρεύματος θερμού αέρα που παράγεται από βοηθητική συσκευή.



Σχήμα 4.32 : Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας της συσκευής τροχοαυλάκωσης MMLS3

Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν συμπληρωθούν 72.000 μονές φορτίσεις. Το βάθος της τροχοαυλάκωσης είναι δυνατό να μετρηθεί ανά 0,5mm. Το σημείο στο μέσο του εξεταζόμενου οδοστρώματος δεν παρουσιάζει συνήθως έντονη τροχοαυλάκωση ωστόσο αποτελεί αντιπροσωπευτική τιμή της δοκιμής όπως έχει αποδειχτεί και από άλλες σχετικές έρευνες όπου διαφοροποιούνται τα φορτία, η ταχύτητα και ο αριθμός των φορτίσεων (Cubler et al, 2004).

Η συσκευή MMLS3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε δοκιμές τροχοαυλάκωσης στο εργοτάξιο ακόμα και όταν οι συνθήκες περιβάλλοντος δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές. Στις ΗΠΑ έχει αναπτυχθεί η αντίστοιχη συσκευή TxMLS (Hugo, 1996).

4.3.6 **HEAVY VEHICLE SIMULATOR (HVS)**

Η συσκευή τροχοαυλάκωσης HVS (σχήμα 4.33) αναπτύχθηκε στην Νότια Αφρική το διάστημα 1968-1972 και χρησιμοποιείται, με επιτυχία, για την εξέταση του φαινομένου της τροχοαυλάκωσης των ασφαλτομιγμάτων τόσο στο εργοτάξιο όσο και σε διάφορα APTs στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ.



Σχήμα 4.33 : Συσσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης HVS

Σε περισσότερα από 500 τμήματα έχουν εκτελεστεί δοκιμές τροχοαυλάκωσης με χρήση της συσκευής HVS. Τα φορτία που ασκούνται κυμαίνονται από 20 έως 100 KN με μέγιστες ταχύτητες 14km/h . Για δοκιμές σε οδοστρώματα αεροδρομίων το φορτίο αυξάνεται σε 200 KN. Η επιφάνεια που διατρέχει η συσκευή έχει μήκος 8m ενώ οι φορτίσεις μπορεί να είναι μονής ή διπλής κατεύθυνσης (Powell ,2008).

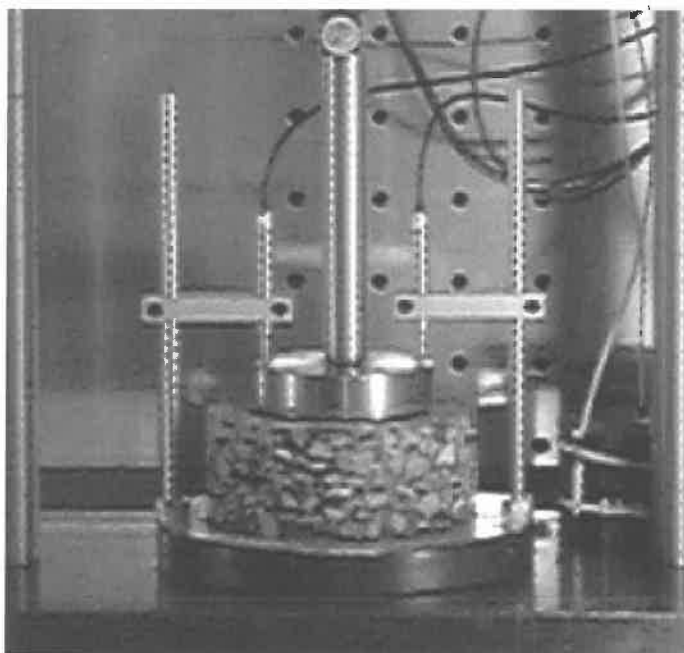
5 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΗΣ ΤΡΟΧΟΑΥΛΑΚΩΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ EN 12697-22

Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές η αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων σε παραμένουσα παραμόρφωση επιτυγχάνεται με τις ακόλουθες δοκιμές: α) δοκιμή ερπυσμού υπό στατικό φορτίο, β) δοκιμή ερπυσμού υπό δυναμικό φορτίο και γ) η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης.

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας των δυο πρώτων και περιγράφεται αναλυτικότερα η μεθοδολογία της δοκιμής τροχοαυλάκωσης.

5.1 Δοκιμή ερπυσμού υπό στατικό φορτίο.

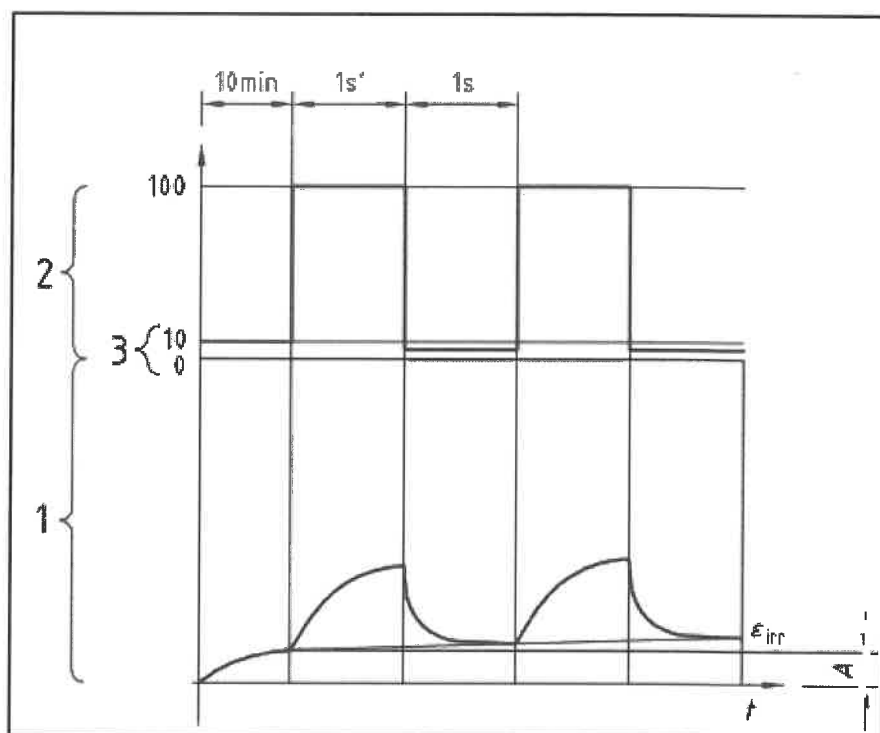
Με την δοκιμή ερπυσμού καθορίζεται το στατικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Η γνώση του στατικού μέτρου δυσκαμψίας μας δίνει αφενός την δυνατότητα να αξιολογήσουμε τα ασφαλικά μίγματα σε παραμένουσα παραμόρφωση και αφετέρου την δυνατότητα να εκτιμήσουμε την ολική παραμένουσα παραμόρφωση των ασφαλικών στρώσεων στην διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.



Σχήμα 5.1 : Διάταξη εκτέλεσης δοκιμής ερπυσμού υπό στατικό φορτίο

Κατά την διάρκεια της δοκιμής το δείγμα υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη υπό φορτίο 0,1MPa σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C για 1 ώρα. Πριν εφαρμόσουμε την

επιβαλλόμενη τάση, προφορτίζουμε το δοκίμιο με τάση 0,01MPa για δυο λεπτά προκειμένου να εξασφαλίσουμε καλή επαφή της φορτιζόμενης πλάκας με την επιφάνεια του δοκιμίου.



Σχήμα 5.2 : Φόρτιση δοκιμίου κατά την δοκιμή ερπυσμού υπό στατικό φορτίο

Στο διάστημα της μίας ώρας η παραμόρφωση που επέρχεται στο δοκίμιο μετράται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (EN 12697-25).

5.2 Δοκιμή ερπυσμού υπό δυναμικό φορτίο

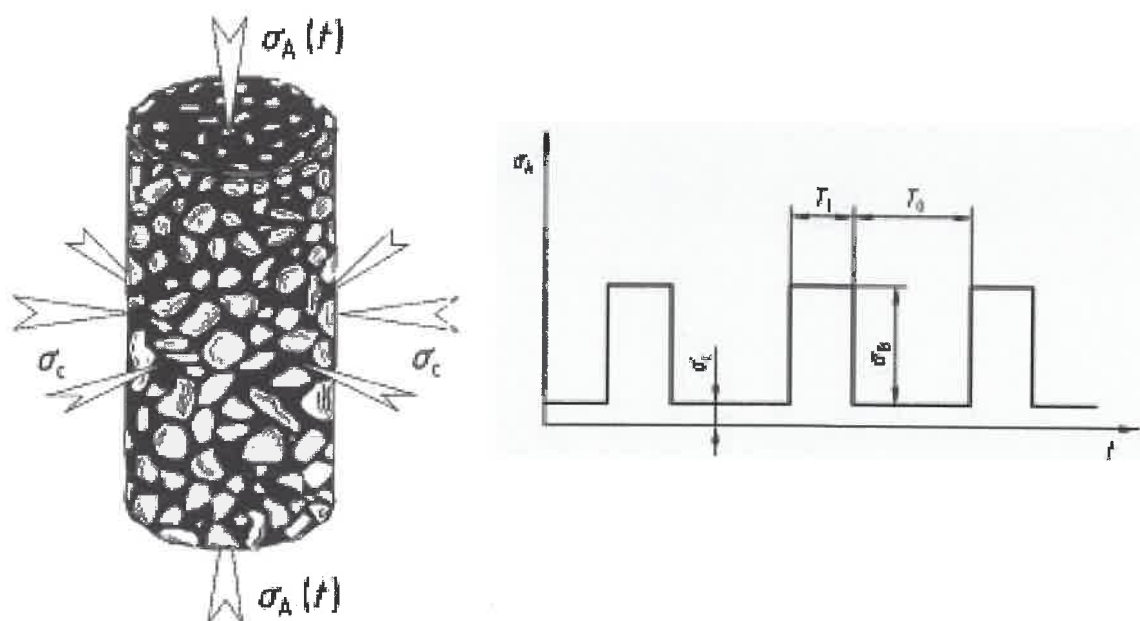
Η δοκιμή ερπυσμού υπό δυναμικό φορτίο (dynamic creep test) παρουσιάζει ομοιότητες με την δοκιμή ερπυσμού υπό στατικό φορτίο. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι με την επιβολή δυναμικού φορτίου προσομοιάζεται καλύτερα ο τρόπος φόρτισης του δοκιμίου με αυτόν του οδοστρώματος. Επίσης η δοκιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ασφαλτομιγμάτων με τροποποιημένη άσφαλτο.

Η διάταξη της συσκευής που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της δοκιμής απεικονίζεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 : Διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής ερπυσμού υπό δυναμικό φορτίο

Κατά την διάρκεια της δοκιμής επιβάλλεται μέγεθος φορτίου 0,1 MPa σε σταθερή θερμοκρασία ελέγχου 40°C όπως και στην δοκιμή ερπυσμού υπό στατικό φορτίο (σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 : Φόρτιση δοκιμίου κατά την δοκιμή ερπυσμού υπό δυναμικό φορτίο

Ο χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής είναι συνολικά μία ώρα και η συχνότητα φόρτισης – αποφόρτισης κυμαίνεται από 0,2 έως 1 sec.

5.3 Δοκιμή τροχοαυλάκωσης

Η προδιαγραφή EN12697 22 περιγράφει την δοκιμή της τροχοαυλάκωσης. Τα προς εξέταση δείγματα ή παράγονται στο εργαστήριο (χαλαρό ασφαλτόμιγμα) ή είναι πυρήνες που λαμβάνονται από το οδόστρωμα.

Οι συσκευές ελέγχου που χρησιμοποιούνται διακρίνονται με βάση τις διαστάσεις τους σε μεγάλης κλίμακας (large, extra-large size device) και σε μικρής κλίμακας (small size device) συσκευές ελέγχου. Οι συσκευές αυτές προσομοιώνουν τις συνθήκες κυκλοφορίας με την βοήθεια ενός τροχού που διατρέχει την επιφάνεια του προς εξέταση δείγματος. Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τριών συσκευών ελέγχου.

Πίνακας 5.1 Συγκριτικός πίνακας συσκευών τροχοαυλάκωσης

Χαρακτηριστικά	extra-large size device	large size device	small size device
Φορτίο τροχού	10000±100N	5000±50N	700±10N
Πλάτος τροχού	110±5 mm	80±5mm	20±2 mm
Συχνότητα φόρτισης	(24±0.5)κύκλοι φόρτισης/λεπτό	1,0±1Hz	(26,5±1) κύκλοι φόρτισης/λεπτό

Η συσκευή ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η μικρής κλίμακας συσκευή τροχοαυλάκωσης Wheel tracker του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Η αντίσταση του ασφαλτικού μίγματος στην τροχοαυλάκωση, εκτιμάται, μετρώντας κατά την διάρκεια της δοκιμής το βάθος της τροχοαυλάκωσης (σε mm) ή τον ρυθμό της τροχοαυλάκωσης (σε mm/h), που παρατηρείται στο δείγμα.

Σύμφωνα με την αντίστοιχη ευρωπαϊκή προδιαγραφή (EN 12697-22) προβλέπονται δυο διαδικασίες ελέγχου για τις συσκευές τροχοαυλάκωσης μικρού μεγέθους:

Κατά την διαδικασία Α μετράται το βάθος της τροχοαυλάκωσης, σε ξηρές μόνο συνθήκες, σε έξι διαφορετικά δείγματα και υπολογίζεται ο μέσος όρος. Συγκεκριμένα για κάθε δείγμα μετράμε την κάθετη μετατόπιση του τροχού στο κέντρο του δείγματος. Η κάθετη αυτή μετατόπιση μας δίνει στην ουσία το βάθος της αυλάκωσης στο δείγμα. Κάθε φορά που συμπληρώνονται 25 ± 1 κύκλοι φόρτισης λαμβάνουμε μία μέτρηση με την βοήθεια ηλεκτρομηκυνσιομέτρων. Ο κύκλος φόρτισης ισοδυναμεί με δυο περάσματα του τροχού κατά μήκος της επιφάνειας φόρτισης.

Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν συμπληρωθούν 1000 κύκλοι φόρτισης ή όταν καταγραφεί βάθος τροχοαυλάκωσης 15mm, ό,τι από τα δυο επιτευχθεί πιο γρήγορα.

Κατά την διαδικασία Β εξετάζονται μόνο δύο δείγματα σε ξηρές ή υγρές συνθήκες και μετράται το βάθος της τροχοαυλάκωσης σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του μίγματος. Συγκεκριμένα θέτουμε την συσκευή σε λειτουργία και μετράμε την κάθετη μετατόπιση του τροχού σε 25 τουλάχιστον σημεία κατά μήκος του δείγματος που απέχουν ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Λαμβάνουμε 6 -7 μετρήσεις την πρώτη ώρα και στην συνέχεια μία μέτρηση κάθε φορά που συμπληρώνονται 500 κύκλοι φόρτισης.

Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν συμπληρωθούν 10000 κύκλοι φόρτισης ή όταν καταγραφεί βάθος τροχοαυλάκωσης 20mm, ό,τι από τα δυο επιτευχθεί πιο γρήγορα.

Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό των προς εξέταση δειγμάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής προδιαγραφής.

Πίνακας 5.2:Ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός δειγμάτων

Συσκευή	Ελάχιστος αριθμός δειγμάτων
Large ή extra large size device	2
Small size device (δοκιμή σε ξηρές συνθήκες-διαδικασία Α)	6
Small size device (δοκιμή σε ξηρές συνθήκες-διαδικασία Β)	2
Small size device (δοκιμή σε υγρές συνθήκες-διαδικασία Β)	2

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη δοκιμή τροχοαυλάκωσης, όπως προδιαγράφεται στο σχετικό πρότυπο (EN 12697-22) αναπτύσσεται αναλυτικά παρακάτω.

5.3.1 **Δειγματοληψία ασφαλτομίγματος**

Τα δείγματα δοκιμής μπορεί να είναι: 1) ασφαλτομίγματα που παρασκευάζονται στο εργαστήριο ή 2) ασφαλτομίγματα που παρασκευάζονται σε μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος και επιλέγονται δείγματα (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 : Επιλεγμένο δείγμα από μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος

Τα δείγματα προτού υποβληθούν σε δοκιμή τροχοαυλάκωσης συμπυκνώνονται στο επιθυμητό κενό αέρος σε ειδικές μήτρες με την βοήθεια ενός δονητικού συμπυκνωτή.

5.3.2 **Δειγματοληψία πυρήνων**

Στην περίπτωση ελέγχου πυρήνων που αποκόπτονται από το οδόστρωμα, τα δείγματα πρέπει να έχουν διάμετρο τουλάχιστον 200 mm. Κάθε πυρήνας πρέπει να σηματοδοτείται έτσι ώστε να δείχνει την κατεύθυνση της κυκλοφοριακής ροής (σχήμα 5.6)



Σχήμα 5.6 : Πυρήνας με προσημασμένη την κατεύθυνση κυκλοφοριακής ροής

5.4 Ονομαστικό πάχος δειγμάτων

Το ονομαστικό πάχος του δείγματος επιλέγεται να είναι ίσο με το πάχος που απαιτείται να έχει το μίγμα μετά την διάστρωση του στο οδόστρωμα. Στην περίπτωση των μιγμάτων που σχεδιάζονται για να τοποθετηθούν σε σειρά ή σε ένα πάχος, τότε το απαιτούμενο πάχος του δείγματος θα είναι το πλησιέστερο στο πάχος σχεδιασμού:

- 1) 25 mm για μίγματα με ανώτερο μέγεθος κόσκινου λιγότερο από 8 mm
- 2) 40 mm για τα μίγματα με ανώτερο μέγεθος κόσκινου μεγαλύτερο ή ίσο με 8 mm και λιγότερο από 16mm.
- 3) 60 mm για τα μίγματα με ανώτερο μέγεθος κόσκινου μεγαλύτερο ή ίσο με 16 mm και λιγότερο ή ίσο από 22 mm
- 4) 80 mm για τα μίγματα με ανώτερο μέγεθος κόσκινου μεγαλύτερο από 22 mm και λιγότερο ή ίσο από 32 mm

5.5 Πάχος και κανονικότητα επιφάνειας δείγματος

Το πάχος του προς εξέταση δείγματος μετράται σε τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία. Στην περίπτωση που ελέγχονται πυρήνες το πάχος τους μετράται αντιδιαμετρικά σε τέσσερα σημεία. Για τα ορθογώνια δείγματα μετράται το πάχος στο μέσο της κάθε πλευράς. Οι τέσσερις μετρήσεις σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να διαφέρουν από το ονομαστικό πάχος περισσότερο από 2,5mm όταν το ονομαστικό πάχος είναι λιγότερο ή ίσο από 50mm, ούτε κατά περισσότερο από 5% του ονομαστικού πάχους όταν το ονομαστικό πάχος είναι μεγαλύτερο από 50 mm. Καταγράφουμε τον μέσο όρο των τεσσάρων μετρήσεων ως το τελικό πάχος του δείγματος

Για τον έλεγχο της επιπεδότητας της επιφάνειας του προς εξέταση δείγματος, τοποθετούμε χάρακα κατά μήκος της διαμέτρου της προς έλεγχου επιφάνειας και απορρίπτουμε οποιοδήποτε δείγμα με ανισοσταθμία περισσότερο από 2 mm. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία σε τρεις περαιτέρω διαμέτρους με διαφορά 45°.

5.6 Μεταφορά και αποθήκευση δειγμάτων

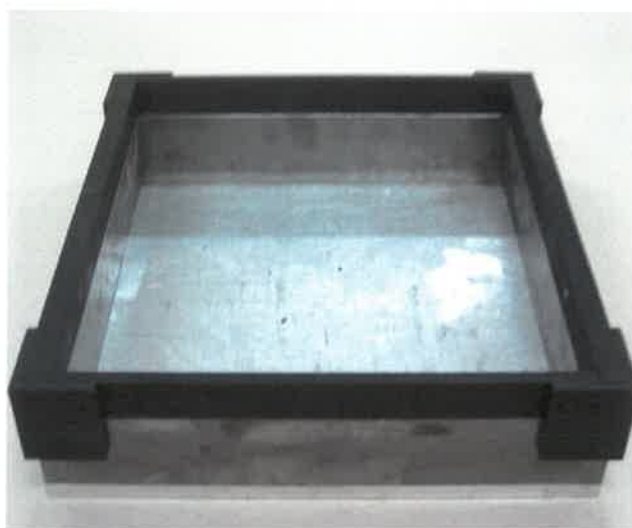
Μετά από τη δειγματοληψία το δείγμα μεταφέρεται στο εργαστήριο σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 30°C με την επιφάνεια δοκιμής οριζόντια και διατηρείται σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 25°C.

Η δοκιμή τροχοαυλάκωσης πραγματοποιείται αφού έχουν παρέλθει τουλάχιστον 2 ημέρες από την τελική συμπίκνωση.

5.7 Προετοιμασία δειγμάτων

5.7.1 Προετοιμασία δοκιμών

Το δοκίμιο του ασφαλτομίγματος συμπυκνώνεται σε ειδική ατσάλινη μήτρα διαστάσεων 305*305mm.



Σχήμα 5.7 : Τετραγωνική μήτρα συμπίκνωσης ασφαλτομίγματος

Η μάζα του ασφαλτομίγματος που εισάγεται στη μήτρα είναι συνάρτηση της μέγιστης πυκνότητας του ασφαλτομίγματος, των εσωτερικών διαστάσεων της μήτρας, του πάχους του δείγματος και των κενών αέρος, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$M = 10^{-6} \times L \times I \times e \times p_m \times \left(\frac{100-v}{100}\right) \quad (5.1)$$

όπου:

M η μάζα του ασφαλτομίγματος (kg)

L το εσωτερικό μήκος της μήτρας (mm)

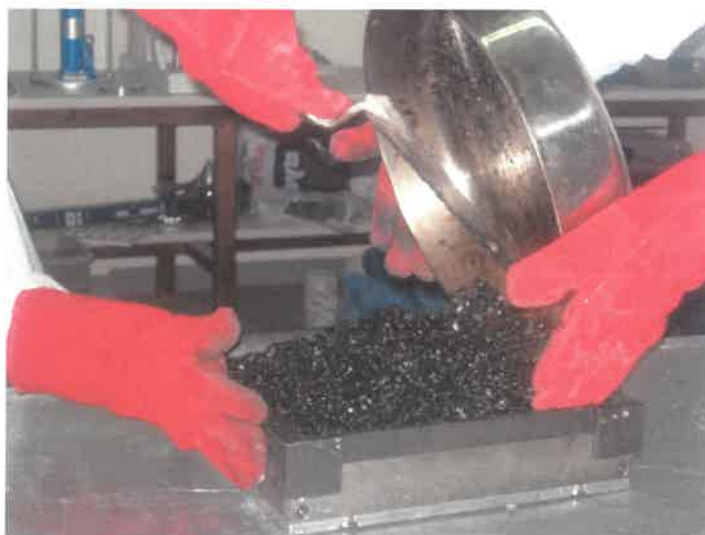
I το εσωτερικό πλάτος της μήτρας (mm)

e το πάχος του δείγματος (mm)

ρ_m η μέγιστη πυκνότητα του ασφαλτομίγματος (kg/m^3)

v τα κενά αέρος στο μίγμα (%)

Αρχικά το μίγμα προθερμαίνεται σε θερμοκρασία η οποία εξαρτάται από τον τύπο της ασφάλτου που χρησιμοποιείται στο μίγμα. Στη συνέχεια μεταφέρεται στην τετραγωνική μήτρα (σχήμα 5.8) η οποία, προηγουμένως, έχει ψεκαστεί με ένα μη συγκολλητικό προϊόν, που δεν αναμιγνύεται με την ασφαλτο. Το μίγμα απλώνεται ομοιόμορφα στο καλούπι αποφεύγοντας οποιοδήποτε διαχωρισμό, και συμπυκνώνεται ελαφρά, συμπεριλαμβανομένων των γωνιών για να επιτευχθεί κατά το δυνατόν ομαλή επιφάνεια, προτού εισαχθεί στη συσκευή συμπίκνωσης (σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.8 : Μεταφορά μάζας ασφαλτομίγματος στην τετραγωνική μήτρα



Σχήμα 5.9 : Προσυμπύκνωση μίγματος

Πριν ξεκινήσει η συμπίκνωση καθαρίζεται και λειαίνεται η κεφαλή του συμπακνωτή ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της επικόλλησης μέρους του ασφαλτομίγματος και καλύπτεται η επιφάνεια του δείγματος ώστε να μην συσσωρευτούν στην κεφαλή μεγάλες ποσότητες χαλαρού υλικού κατά την διάρκεια της συμπίκνωσης .



Σχήμα 5.10 : Συσκευή συμπίκνωσης τύπου Roller Compactor

Στην συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η συσκευή και ο κύλινδρος αρχίζει να διατρέχει την επιφάνεια του δείγματος ασκώντας σε αυτό σταδιακά αυξανόμενη πίεση μέχρι να συμπακνωθεί στο επιθυμητό πάχος (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11 : Κύλινδρος συμπίκνωσης

Όταν ολοκληρωθεί η συμπίκνωση η συσκευή καθαρίζεται και προετοιμάζεται για το επόμενο δείγμα.



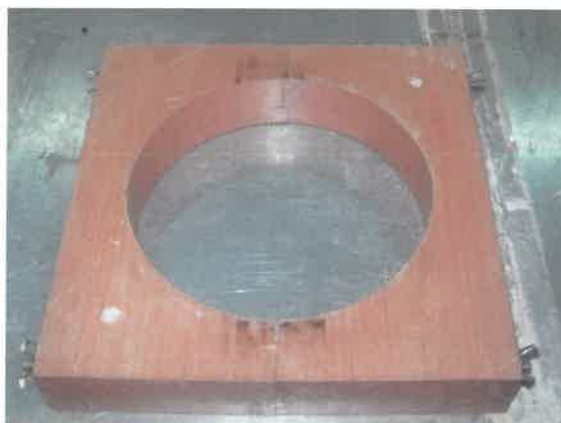
Σχήμα 5.12 : Συμπυκνωμένο δείγμα

5.7.2 Προετοιμασία πυρήνων

Τα δοκίμια, κατά τη διάρκεια του ελέγχου με τη συσκευή τροχοαυλάκωσης, συγκρατούνται από ένα κοχλιωτό σφιγκτήρα μέσα σε ξύλινη μήτρα διαμέτρου 200mm, προσανατολισμένα έτσι ώστε η κατεύθυνση φόρτισης των τροχών να συμπίπτει με την κατεύθυνση της οδικής κυκλοφορίας. Για να εκτελεστεί με επιτυχία η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης πρέπει η ανώτερη επιφάνεια των πυρήνων, που έρχεται σε επαφή με το φορτίο –τροχό της συσκευής ελέγχου, να είναι επίπεδη.

Η προετοιμασία των πυρήνων για να εκτελεστεί η δοκιμή ελέγχου αποτελείται από τα εξής βήματα:

1)Ενώνουμε τα δυο ξύλινα καλούπια με την χρήση συνδετήριων πείρων.



Σχήμα 5.13 : Μήτρα ελέγχου πυρήνων ασφαλτομιγμάτων

2)Καλύπτουμε με κολλητική ταινία πλήρως την μήτρα.



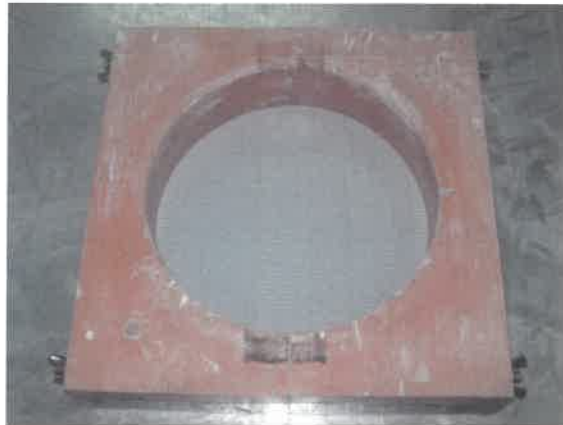
Σχήμα 5.14 : Επικάλυψη κενής επιφάνειας μήτρας

3)Επικαλύπτουμε με κολλητική ταινία την επιφάνεια του πυρήνα που θα υποβληθεί σε έλεγχο τροχοαυλάκωσης. Η κολλητική ταινία προεκτείνεται κατά 5mm περιμετρικά ούτως ώστε να αποφύγουμε την διαρροή ποσότητας γύψου.



Σχήμα 5.15 : Επικάλυψη πυρήνα

4)Αναποδογυρίζουμε το καλούπτι και το τοποθετούμε σε μία επίπεδη σταθερή επιφάνεια.



Σχήμα 5.16 : Τοποθέτηση μήτρας σε επίπεδη επιφάνεια

5)Τοποθετούμε το δείγμα στο κέντρο της μήτρας :



Σχήμα 5.17 : Τοποθέτηση πυρήνα εντός της μήτρας

6) Προετοιμάζουμε το ασβεστοκονίαμα και το απλώνουμε στην επιφάνεια και περιμετρικά του πυρήνα επιβεβαιώνοντας ότι καλύπτεται κάθε κενό που μπορεί να υπάρχει ανάμεσα στο καλούπι και στο δείγμα λόγω διαφοράς στις διαστάσεις τους.



Σχήμα 5.18 : Πλήρωση κενών μεταξύ μήτρας και πυρήνα

7) Αφαιρούμε το πλεόνασμα της ποσότητας του κονιάματος ώστε να δημιουργηθεί επίπεδη επιφάνεια.



Σχήμα 5.19 : Απομάκρυνση πλεονάσματος ασβεστοκονιάματος

8)Το δείγμα αφήνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να στερεοποιηθεί το ασβεστοκονίαμα.



Σχήμα 5.20 :: Σκλήρυνση ασβεστοκονιάματος

9)Αφού στερεοποιηθεί το κονίαμα αναστρέφουμε και πάλι την μήτρα και αφαιρούμε την κολλητική ταινία.



Σχήμα 5.21 : Απομάκρυνση κολλητικής ταινίας

10)Οι πυρήνες τοποθετούνται εντός της συσκευής τροχοαυλάκωσης και προθερμαίνονται στην θερμοκρασία ελέγχου για 4 έως 16 ώρες πριν από την έναρξη της δοκιμής.



Σχήμα 5.22 : Προθέρμανση πυρήνα στη συσκευή τροχοαυλάκωσης

11) Χρησιμοποιώντας ένα χάρακα ελέγχουμε ότι η επιφάνεια του πυρήνα είναι επίπεδη. Στην περίπτωση που παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις η διαδικασία επαναλαμβάνεται από τη αρχή μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1 Σκοπός του πειράματος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι: α) η διερεύνηση της επίδρασης της διαδικασίας συμπίκνωσης (επί τόπου στο έργο και στο εργαστήριο) και β) η διερεύνηση της επίδρασης των κενών αέρος (voids content) στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση.

Προς αυτή την κατεύθυνση ελέγχονται πυρήνες που έχουν αποκοπεί από το οδόστρωμα και δοκίμια, που συμπακνώνονται στο εργαστήριο, ασφαλτομιγμάτων αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης. Σημειώνεται ότι η διερεύνηση της αντίστασης των υπόψη μιγμάτων σε τροχοαυλάκωση πραγματοποιείται με την βοήθεια της συσκευής τροχοαυλάκωσης μικρής κλίμακας του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ (σχήμα 6.1) σε ίδιες συνθήκες ελέγχου (επιβαλλόμενη φόρτιση, κύκλοι φόρτισης, θερμοκρασία και για τον ίδιο βαθμό συμπίκνωσης) έτσι ώστε τα εξαγόμενα αποτελέσματα να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους .



Σχήμα 6.1 : Συσκευή ελέγχου τροχοαυλάκωσης (Wheel tracker device)

Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα υπό διερεύνηση μίγματα της αντιολισθηρής και της ισοπεδωτικής στρώσης.

6.2 Ασφαλικό μίγμα αντιολισθηρής στρώσης

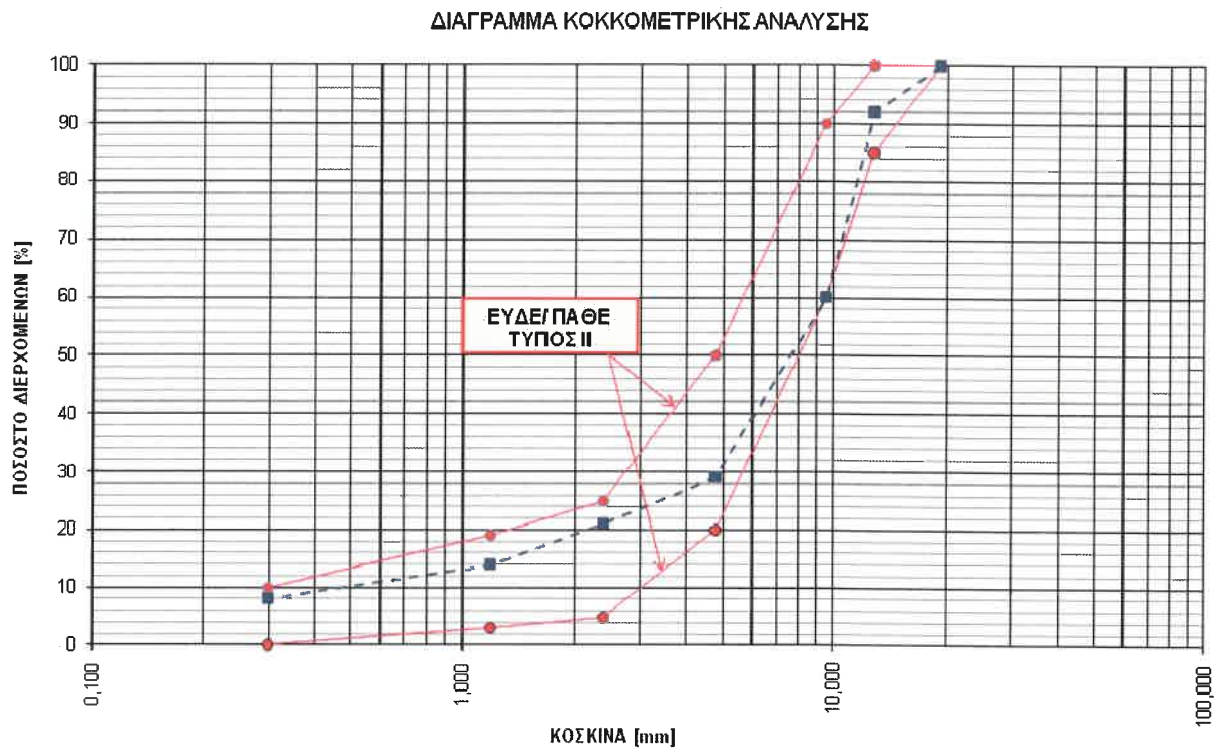
6.2.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης

Το υπό διερεύνηση ασφαλτόμιγμα, είναι μίγμα αντιολισθηρής στρώσης κυκλοφορίας από ασφαλικό σκυρόδεμα ανοιχτής ή ασυνεχούς διαβάθμισης τραχείας υφής, σύμφωνα με το Σχέδιο Τεχνικών Οδηγιών ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ, με ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου αδρανών 12,5 mm. Σημειώνεται ότι η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου ασφαλτομίγματος για την στρώση κυκλοφορίας, εξασφαλίζει μεγαλύτερη μακροϋφή με αποτέλεσμα την καλύτερη διατήρηση της αντίστασης σε ολίσθηση και υψηλές ταχύτητες.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών του μίγματος καθώς και τα όρια της υπόψη προδιαγραφής παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 και γραφικά στο σχήμα 6.2 .

Πίνακας 6.1 : Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών υλικών και ποσοστό ασφάλτου

Τύπος 2 Ανοιχτής Σύνθεσης Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου 12.5 χλστ.		
Μέγεθος κοσκίνου τετραγωνικής οπής	Όρια	Μίγμα
	Ποσοστά διερχόμενα από τα αντίστοιχα κόσκινα τετρ. οπής	
19.0 χλστ (3/4")	100	100
12.5 χλστ (1/2")	85 - 100	92
9.5 χλστ (No3/8)	60 - 90	60
4.75 χλστ (No 4)	20 - 50	29
2.36 χλστ (No 8)	5 - 25	21
1.18 χλστ (No16)	3 - 19	14
0.30 χλστ (No50)	0 - 10	8
0.074 χλστ (No200)	-	3
Ποσοστό ασφάλτου % κατά βάρος επί του ασφαλτομίγματος	4 - 11	4.0



Σχήμα 6.2 : Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών υλικών αντιολισθηρής στρώσης

Ως προς το συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται άσφαλτος τροποποιημένη με ελαστομερή χημικά πρόσθετα, οι χαρακτηριστικές ιδιότητες της οποίας παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2 : Χαρακτηριστικές ιδιότητες τροποποιημένης ασφάλτου

Ιδιότητες τροποποιημένης ασφάλτου	Τιμές
Σημείο μάλθωσης (°C)	80
Διείσδυση (pen)	50
Ελαστική επαναφορά (%)	96
Ιξώδες 160°C (cPs)	600

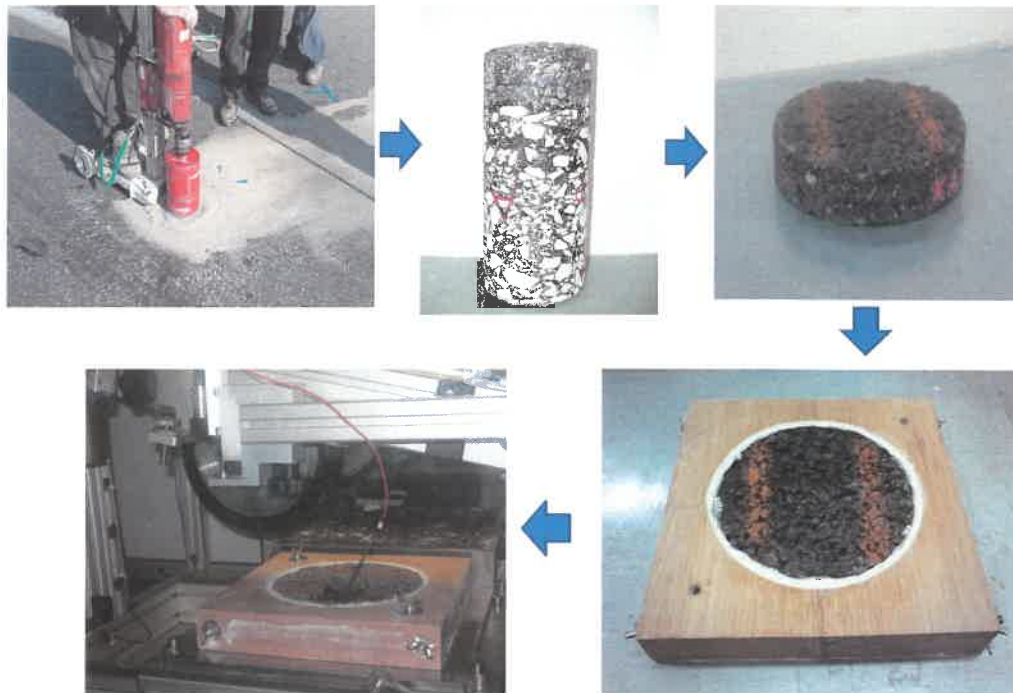
Επιπλέον, στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος όπως αυτά έχουν προκύψει κατά την μελέτη σύνθεσης του ασφαλτομίγματος με την μέθοδο Marshall για το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου.

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος

Χαρακτηριστικά	Όρια Τύπου II	Μελέτη σύνθεσης
Συμπύκνωση, αριθμός κτύπων σε κάθε πλευρά του δοκιμίου	75	75
Ευστάθεια στους 60° C N. (Newton)	6000	18940
Παραμόρφωση δοκιμίων (χλστ)	2 - 5	4.4
Κενά αέρος % συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος	5 - 15	10

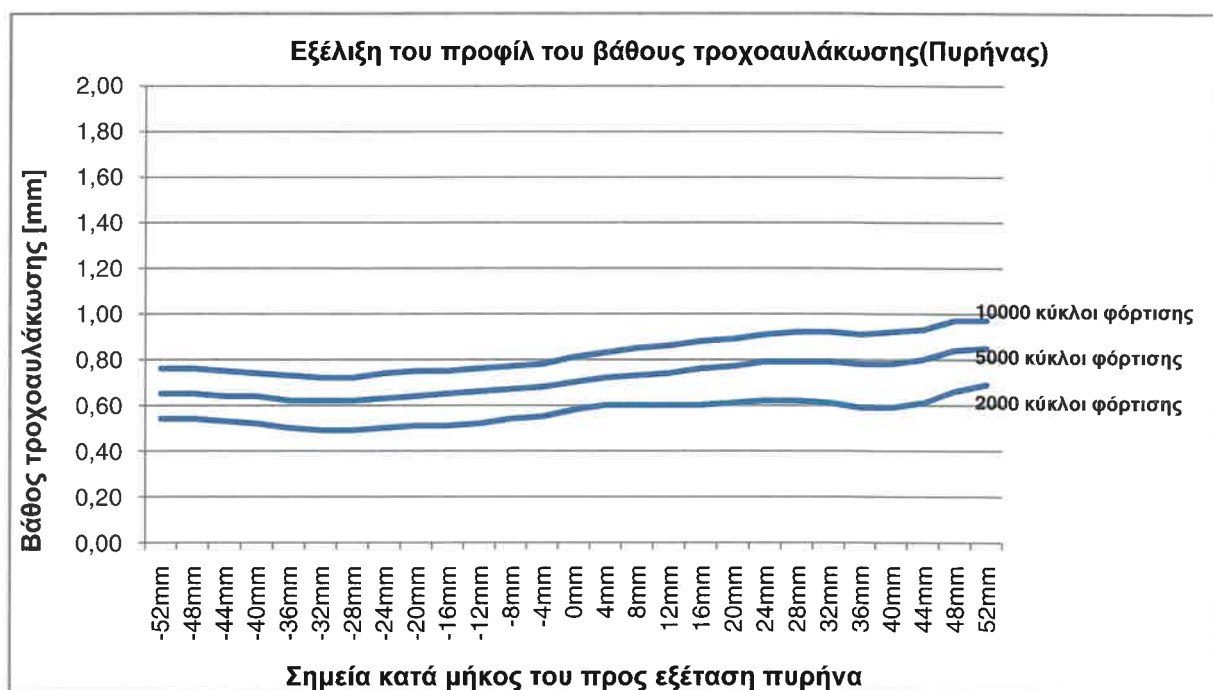
6.2.2 Προετοιμασία και έλεγχος πυρήνων αντιολισθηρής στρώσης

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας διάστρωσης και συμπύκνωσης του ασφαλτομίγματος πραγματοποιήθηκε αποκοπή των πυρήνων από χαρακτηριστικές θέσεις του οδοστρώματος. Οι πυρήνες μεταφέρθηκαν και διατηρήθηκαν στο εργαστήριο σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 25 °C. Στη συνέχεια με ειδική συσκευή αποκόπηκαν και προέκυψαν επιμέρους δείγματα μίγματος αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης. Στα υπόψη επιμέρους δείγματα προσδιορίστηκε ο βαθμός συμπύκνωσης και κατ' επέκταση τα κενά αέρος του ασφαλτομίγματος. Με βάση τα αποτελέσματα της διαδικασίας προέκυψε ότι τα κενά στο μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης λαμβάνουν τιμές 10% και 12% αντίστοιχα. Ακολούθως οι προς εξέταση πυρήνες, συγκρατούμενοι από μήτρα διαμέτρου 200mm, προετοιμάστηκαν κατάλληλα με βάση την διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.7.2, ώστε κατά τον έλεγχο τροχοαυλάκωσης η επιφάνεια φόρτισης να είναι επίπεδη. Με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας των πυρήνων ακολούθησε ο έλεγχος τους στην συσκευή τροχοαυλάκωσης και μετά την εφαρμογή 10.000 κύκλων φόρτισης καταγράφηκε το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης. Μία σχηματική απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 : Σχηματική απεικόνιση προετοιμασίας και ελέγχου πυρήνων

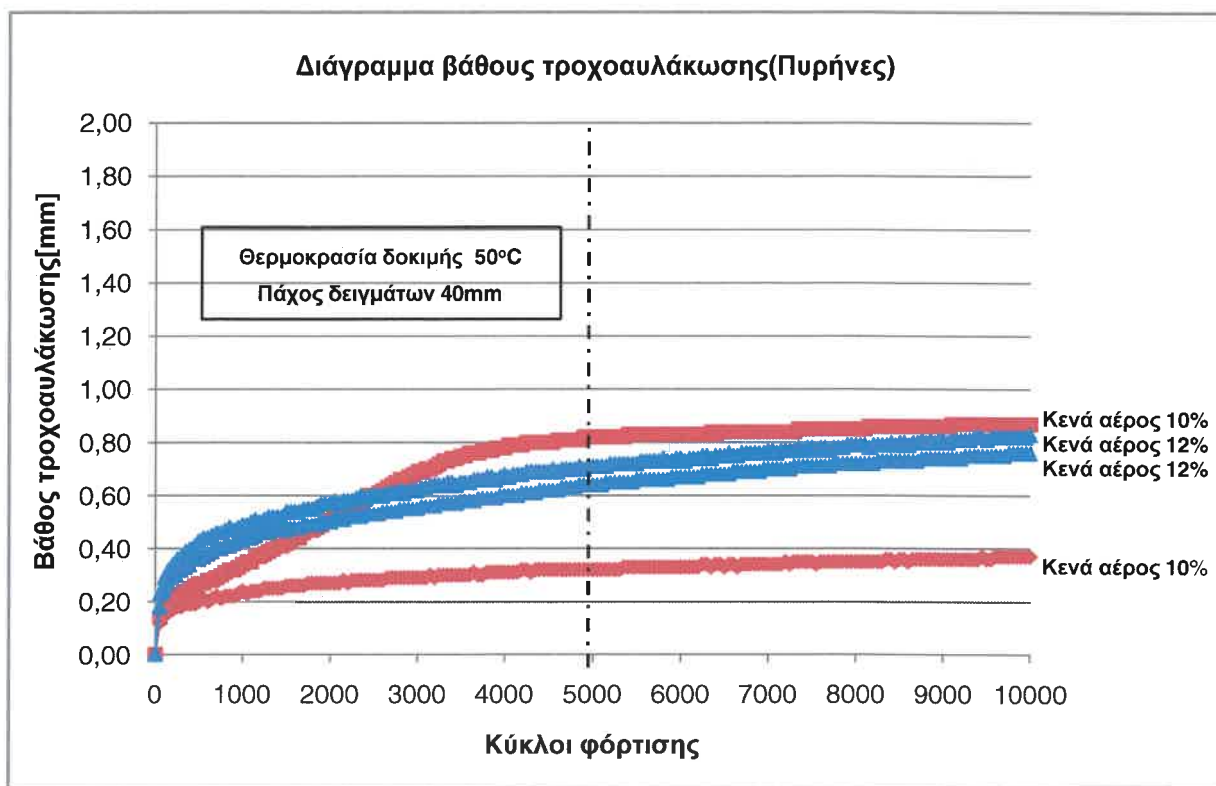
Σημειώνεται ότι κατά την δοκιμή της τροχοαυλάκωσης μετράται με την βοήθεια ηλεκτρομηκυσιομέτρων η κάθετη θέση του τροχού που μας δίνει στην ουσία το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης στους πυρήνες. Η κάθετη θέση του τροχού ορίζεται, για κάθε κύκλο φόρτισης, ως η μέση τιμή 27 σημειακών μετρήσεων σε ένα μήκος ± 50 mm γύρω από το κέντρο της περιοχής φόρτισης. Ενδεικτικά παρουσιάζεται διάγραμμα που δείχνει την εξέλιξη του προφίλ πυρήνα (μετρήσεις βάθους τροχοαυλάκωσης σε 27 σημεία) για διάφορους κύκλους φόρτισης (σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.4 : Εξέλιξη του προφίλ του βάθους τροχοαυλάκωσης

6.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

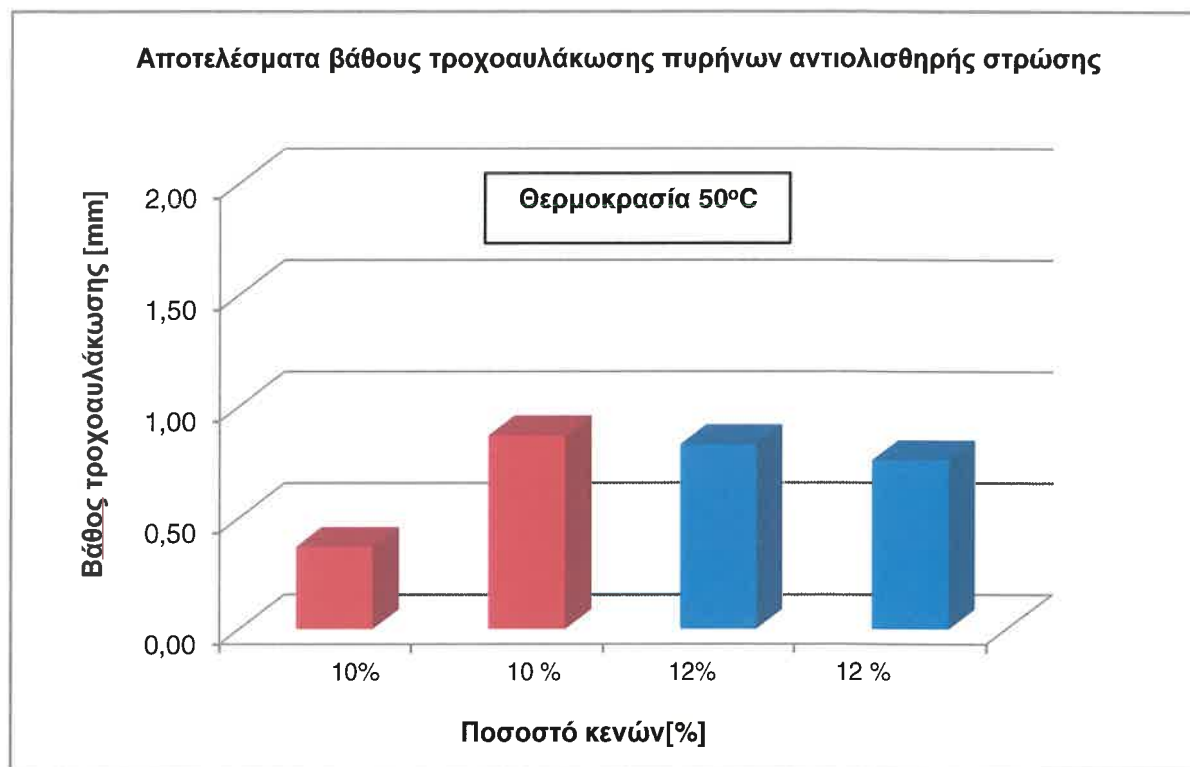
Τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης (βάθος τροχοαυλάκωσης) σε πυρήνες αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστά κενών αέρος 10% και 12% παρουσιάζονται στο σχήμα 6.5. Στο σχήμα απεικονίζεται η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης με την αύξηση των κύκλων φόρτισης.



Σχήμα 6.5 : Εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης

Η τροχοαυλάκωση εξελίσσεται σε δυο φάσεις (σχήμα 6.5). Κατά την πρώτη φάση, μέχρι δηλαδή τους 2000 κύκλους φόρτισης παρατηρείται απότομη μεταβολή της κλίσης του βάθους τροχοαυλάκωσης. Κατά το στάδιο αυτό οι πυρήνες ουσιαστικά επανασυμπυκνώνονται (densification). Κατά την δεύτερη φάση η κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} ομαλοποιείται και το βάθος τροχοαυλάκωσης που καταγράφεται οφείλεται στην πλευρική μετακίνηση υλικού κατά μήκος της επιφάνειας φόρτισης. Κατά την φάση αυτή όσο πιο ανθεκτικό σε τροχοαυλάκωση είναι το υπό μελέτη μίγμα τόσο μειώνεται και το βάθος τροχοαυλάκωσης που παρατηρείται.

Το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης για κάθε πυρήνα παρουσιάζεται με την μορφή ραβδογράμματος στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων αντιολισθηρής στρώσης

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή (EN 12696-22), η αντίσταση των προς εξέταση πυρήνων σε τροχοαυλάκωση προσδιορίζεται μέσω του υπολογισμού της κλίσης WTS_{AIR} . Η κλίση για κάθε μεμονωμένο δείγμα υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$WTS_{AIR} = (d_{10000} - d_{5000})/5 \quad (6.1)$$

όπου :

WTS_{AIR} : η κλίση της αλλαγής τροχοαυλάκωσης, σε χιλιοστά ανά 10^3 κύκλους φορτίων

d_{10000} και d_{5000} το πάχος της τροχοαυλάκωσης σε mm μετά από 5000 και 10000 κύκλους φόρτισης.

Σημειώνεται ότι, σε περίπτωση που η δοκιμή ολοκληρωθεί προτού επιτευχθούν 10000 κύκλοι φόρτισης, η κλίση της αλλαγής τροχοαυλάκωσης θα υπολογιστεί στο γραμμικό μέρος της καμπύλης του βάθους τροχοαυλάκωσης, υπό τον όρο ότι καλύπτει τουλάχιστον μια σειρά 2000 κύκλων φόρτισης.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε η κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} για τους πυρήνες της αντιολισθηρής στρώσης και παρουσιάζεται στον πίνακα 6.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.4 :Υπολογισμός της κλίσης WTS_{AIR} για κάθε πυρήνα (κενά 10% και 12%)

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ(%)	10%		12%	
Πυρήνες	Πυρήνας 1	Πυρήνας 2	Πυρήνας 3	Πυρήνας 4
d5000	0.32	0.82	0.71	0.64
d10000	0.37	0.87	0.83	0.76
$WTS_{AIR}(mm/10^3)$	0.01	0.01	0.02	0.02

Με στόχο την καθιέρωση ενός ενιαίου τρόπου σύγκρισης της αντίστασης των προς εξέταση μιγμάτων σε τροχοαυλάκωση προβλέπεται η κατηγοριοποίηση τους σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 13108-1:2006. Κατά την προδιαγραφή, η κατηγοριοποίηση των δειγμάτων γίνεται με βάση την υπολογισμένη κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} .

Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας κατηγοριοποίησης WTS_{AIR} , σύμφωνα με το πρότυπο EN 13108-1:2006 (πίνακας 6.5).

Πίνακας 6.5 : Πίνακας κατηγοριοποίησης μιγμάτων κατά EN 13108-1:2006 (συσκευή ελέγχου μικρής κλίμακας –διαδικασία Β)

Μέγιστη τιμή της κλίσης WTS_{AIR}	Κατηγορία WTS_{AIR}
0.03	$WTS_{AIR0.03}$
0.05	$WTS_{AIR0.05}$
0.07	$WTS_{AIR0.07}$
0.10	$WTS_{AIR0.10}$
0.15	$WTS_{AIR0.15}$
0.30	$WTS_{AIR0.30}$
0.40	$WTS_{AIR0.40}$
0.50	$WTS_{AIR0.50}$
0.60	$WTS_{AIR0.60}$
1.00	$WTS_{AIR1.00}$

Σημειώνεται ότι, μείωση της κλίσης τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} συνεπάγεται υψηλότερη αντίσταση του δείγματος σε τροχοαυλάκωση.

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα 6.5 και με υπολογισμένη την κλίση WTS_{AIR} οι προς εξέταση πυρήνες κατηγοριοποιούνται ως εξής (πίνακας 6.6):

Πίνακας 6.6 : Κατηγοριοποίηση πυρήνων αντιολισθηρής στρώσης

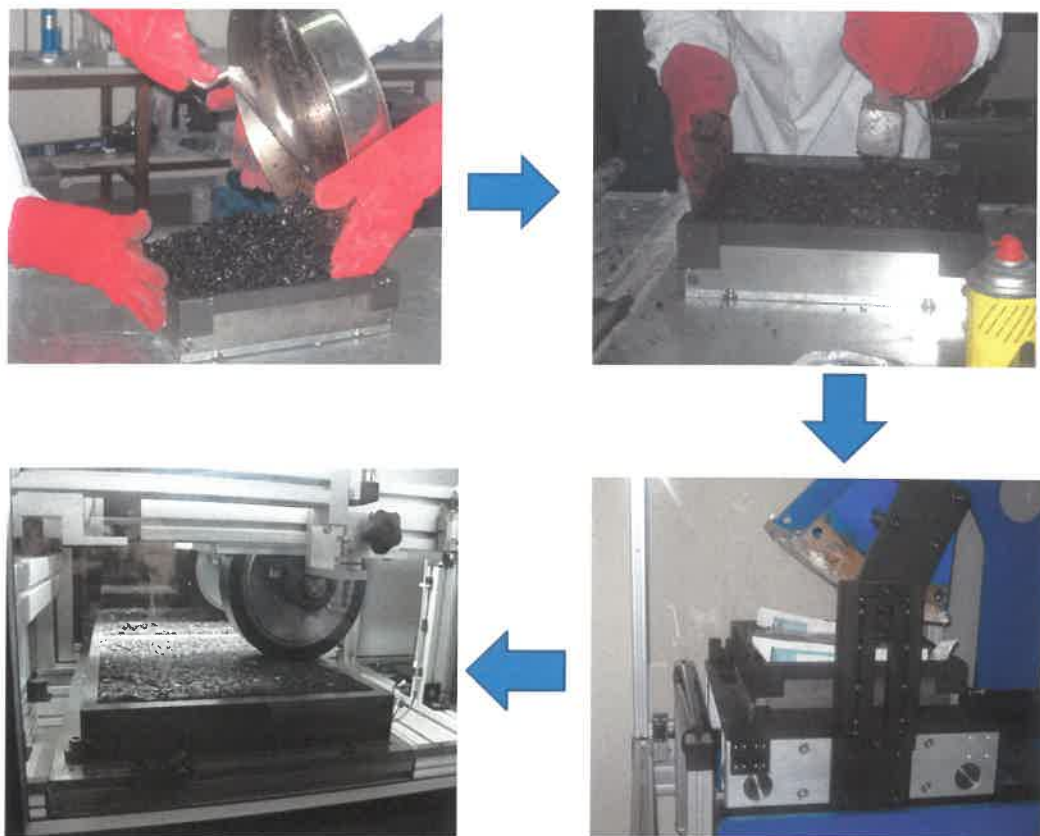
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ(%)	ΠΥΡΗΝΕΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR}	
10%	$WTS_{AIR\ 0,01}$	$WTS_{AIR\ 0,01}$
12%	$WTS_{AIR\ 0,02}$	$WTS_{AIR\ 0,02}$

Με βάση τα αποτελέσματα που περιγράφηκαν εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος από 10% σε 12% το βάθος τροχοαυλάκωσης αυξάνεται (σχήμα 6.6) .Η αύξηση δεν είναι σημαντική ,όμως, όπως αποδεικνύεται και από σχετικές έρευνες, υποδηλώνει ότι το ποσοστό κενών αέρος σε ασφαλτικά μίγματα ίδιας σύνθεσης είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση τους σε τροχοαυλάκωση..
- Επιπρόσθετα με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος παρατηρείται μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση δηλαδή αύξηση της κλίσης WTS_{AIR} . Οι πυρήνες με ποσοστό κενών 10% παρουσιάζουν καλύτερη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση, αφού για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας εμφανίζουν μικρότερη κλίση τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} σε σχέση με τους πυρήνες με ποσοστό κενών 12%.

6.2.4 Προετοιμασία και έλεγχος δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης

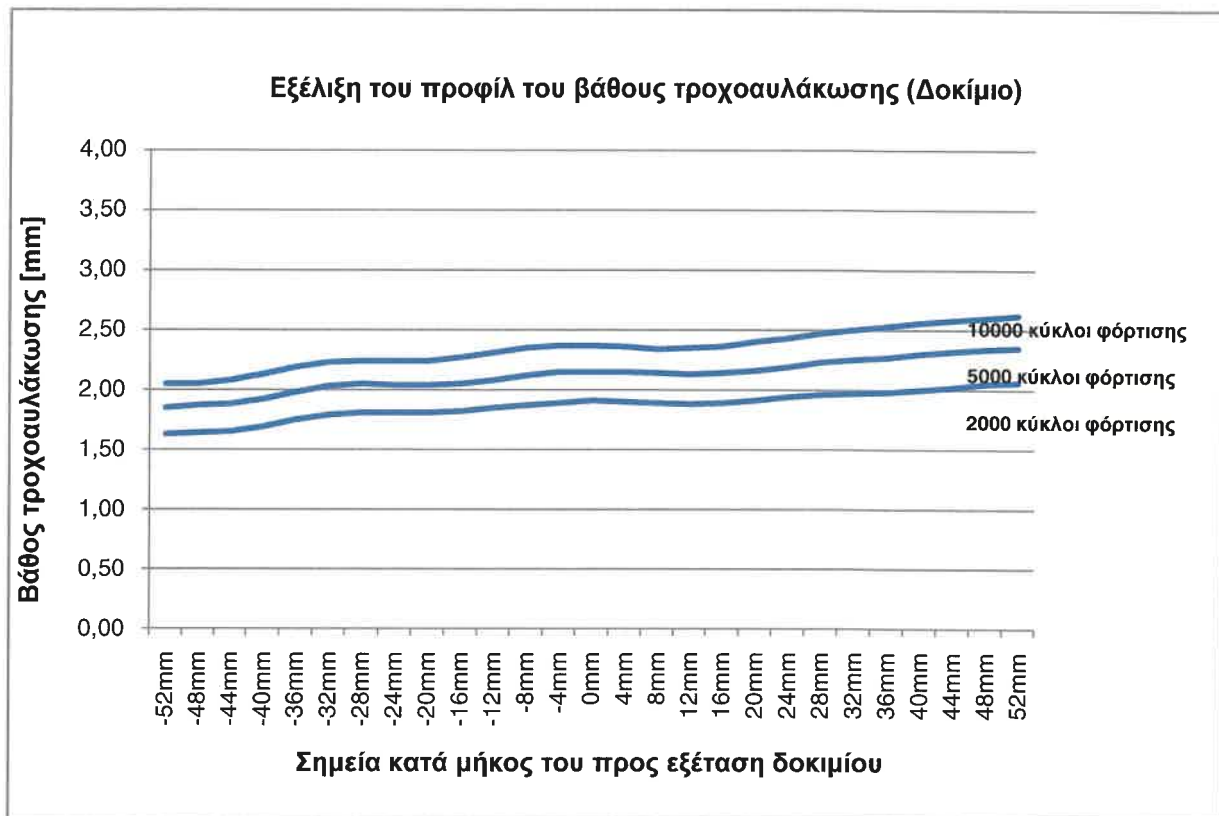
Κατά την φάση της διάστρωσης του μίγματος της αντιολισθηρής στρώσης πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία από τον αυτοκινούμενο διαστρωτήρα (finisher). Το χαλαρό ασφαλτόμιγμα μεταφέρθηκε στο εργαστήριο και συμπυκνώθηκε σε τετραγωνικές μήτρες στα ίδια με τους πυρήνες κενά αέρος (10% και 12% αντίστοιχα). Το δείγματα που παρασκευάστηκαν διατηρήθηκαν στο εργαστήριο τουλάχιστον για δυο μέρες προτού υποβληθούν στην δοκιμή της τροχοσυλάκωσης. Στη συνέχεια εκτελέστηκε η δοκιμή ελέγχου της αντίστασης των προς εξέταση δοκιμών σε τροχοσυλάκωση. Μία σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στο σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7 : Σχηματική απεικόνιση προετοιμασίας και ελέγχου τετραγωνικών δοκιμών

Κατά αντιστοιχία με τους πυρήνες η δοκιμή ελέγχου ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή 10.000 κύκλων φόρτισης. Όπως ήδη αναφέρθηκε το βάθος τροχοσυλάκωσης του δοκιμίου, που καταγράφεται για κάθε κύκλο φόρτισης, είναι η μέση τιμή 27 σημειακών μετρήσεων κατά μήκος της επιφάνειας φόρτισης. Με βάση την παρατήρηση αυτή παρουσιάζεται, ενδεικτικά, διάγραμμα (σχήμα 6.8) που δείχνει την εξέλιξη του προφίλ του βάθους

τροχοαυλάκωσης δείγματος που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο για διάφορους κύκλους φόρτισης.

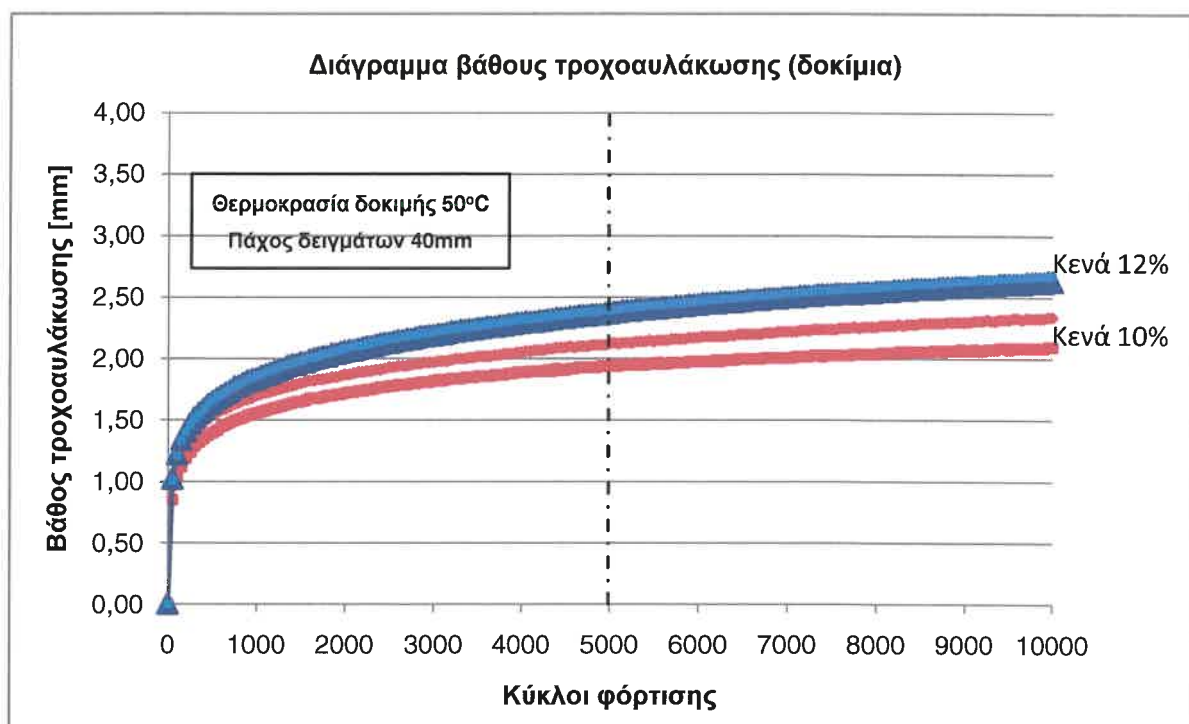


Σχήμα 6.8 : Εξέλιξη του προφίλ του βάθους τροχοαυλάκωσης

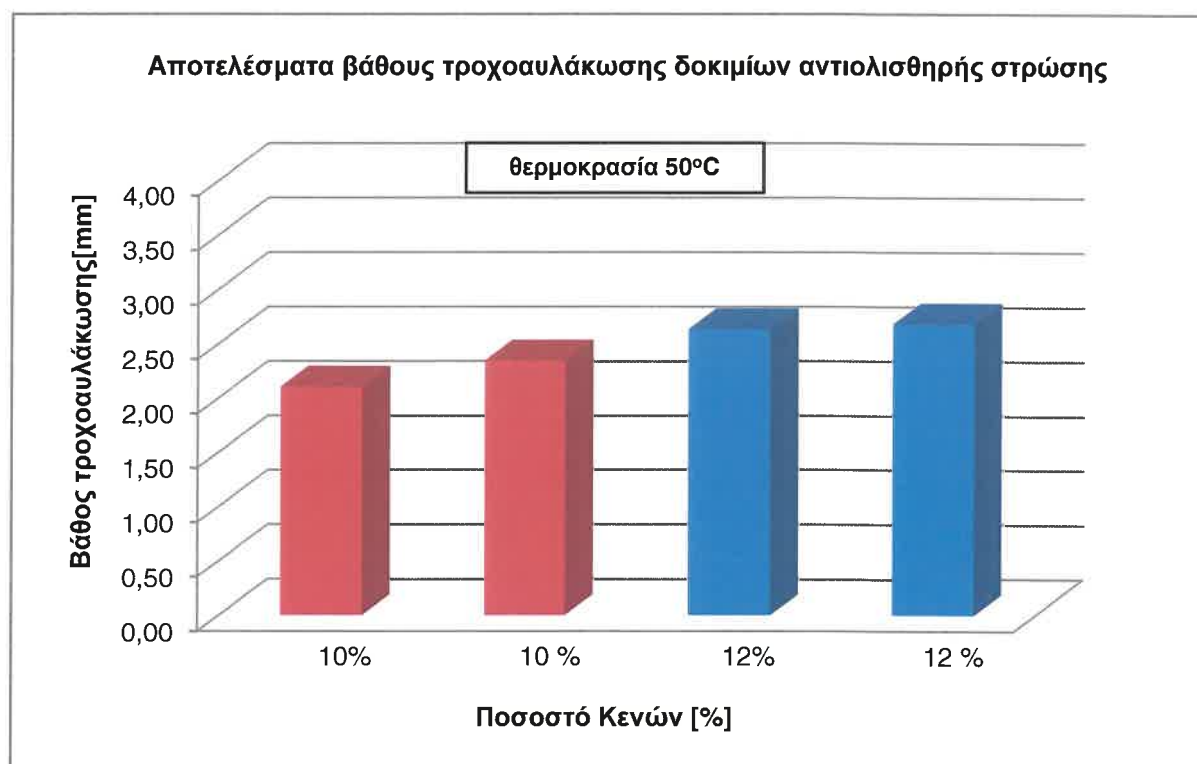
6.2.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης στα τετραγωνικά δοκίμια με ποσοστό κενών αέρος 10% και 12% αντίστοιχα παρουσιάζονται στο σχήμα 6.9 που ακολουθεί. Στο σχήμα απεικονίζεται η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης με την αύξηση των κύκλων φόρτισης.

Επιπρόσθετα, το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης των προς εξέταση δοκιμίων παρουσιάζεται στο σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.9 : Εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης



Σχήμα 6.10 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης

Κατά αντιστοιχία με τους πυρήνες, η τροχοαυλάκωση εξελίσσεται σε δυο φάσεις. Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.9 ,κατά την πρώτη φάση μέχρι δηλαδή τους 2000 κύκλους φόρτισης, η μεταβολή της κλίσης WTS_{AIR} είναι απότομη .Κατά την φάση αυτή το προς εξέταση δοκίμιο ουσιαστικά επανασυμπυκνώνεται. Κατά την δεύτερη φάση η κλίση της τροχοαυλάκωσης ομαλοποιείται.

Σημειώνεται ότι, η αντίσταση των δειγμάτων σε τροχοαυλάκωση εκτιμάται μέσω του υπολογισμού της κλίσης της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} μεταξύ των 5000 και 10000 κύκλων φόρτισης και ο αναλυτικός υπολογισμός της ,για τα δοκίμια της αντιστοιχισμένης στρώσης, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.7 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.7 : Υπολογισμός της κλίσης WTS_{AIR} για κάθε δοκίμιο (κενά 10% και 12%)

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ (%)	10%		12%	
ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2	ΔΕΙΓΜΑ 3	ΔΕΙΓΜΑ 4
d5000	2.12	1.94	2.39	2.37
d10000	2.34	2.10	2.68	2.63
$WTS_{AIR}(\text{mm}/1000^3$ κύκλοι φόρτισης)	0.04	0.03	0.06	0.05

Λαμβάνοντας υπόψη την υπολογισμένη κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} γίνεται η κατηγοριοποίηση των δοκιμών όπως αυτή προβλέπεται κατά EN13108-1:2006 (πίνακας 6.8).

Πίνακας 6.8 : Κατηγοριοποίηση δοκιμών αντιστοιχισμένης στρώσης

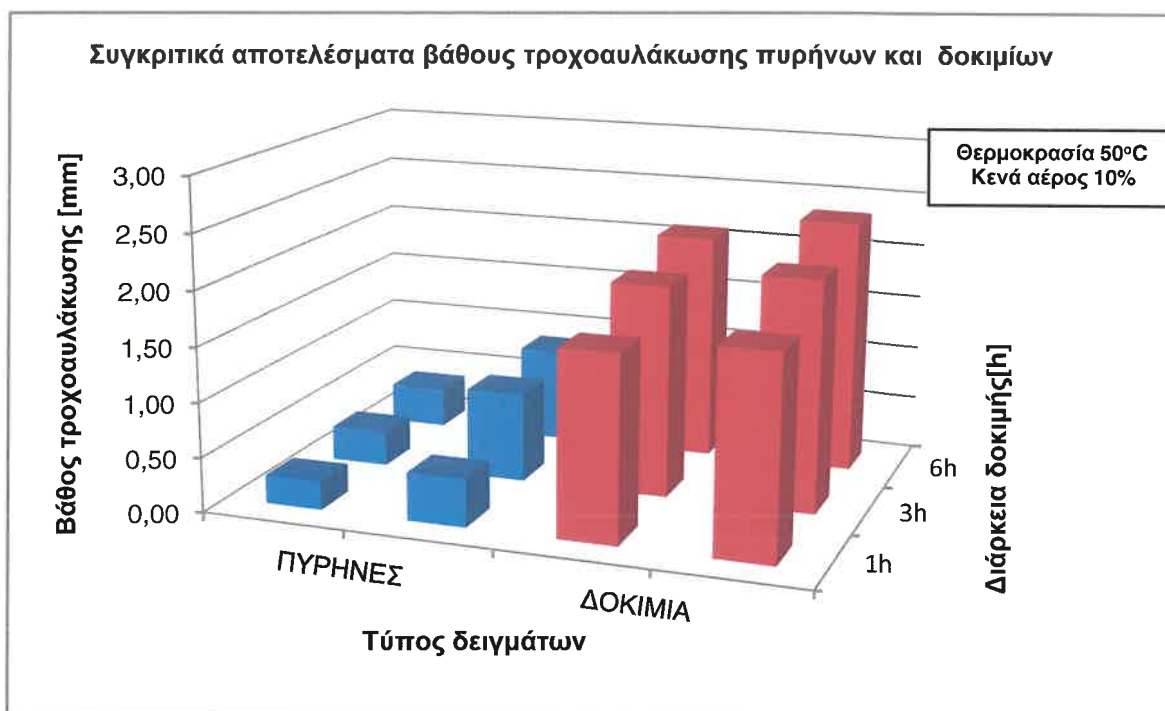
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ(%)	ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR}	
10%	$WTS_{AIR} 0,04$	$WTS_{AIR} 0,03$
12%	$WTS_{AIR} 0,06$	$WTS_{AIR} 0,05$

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης σε δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστά κενών αέρος 10% και 12% αντίστοιχα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

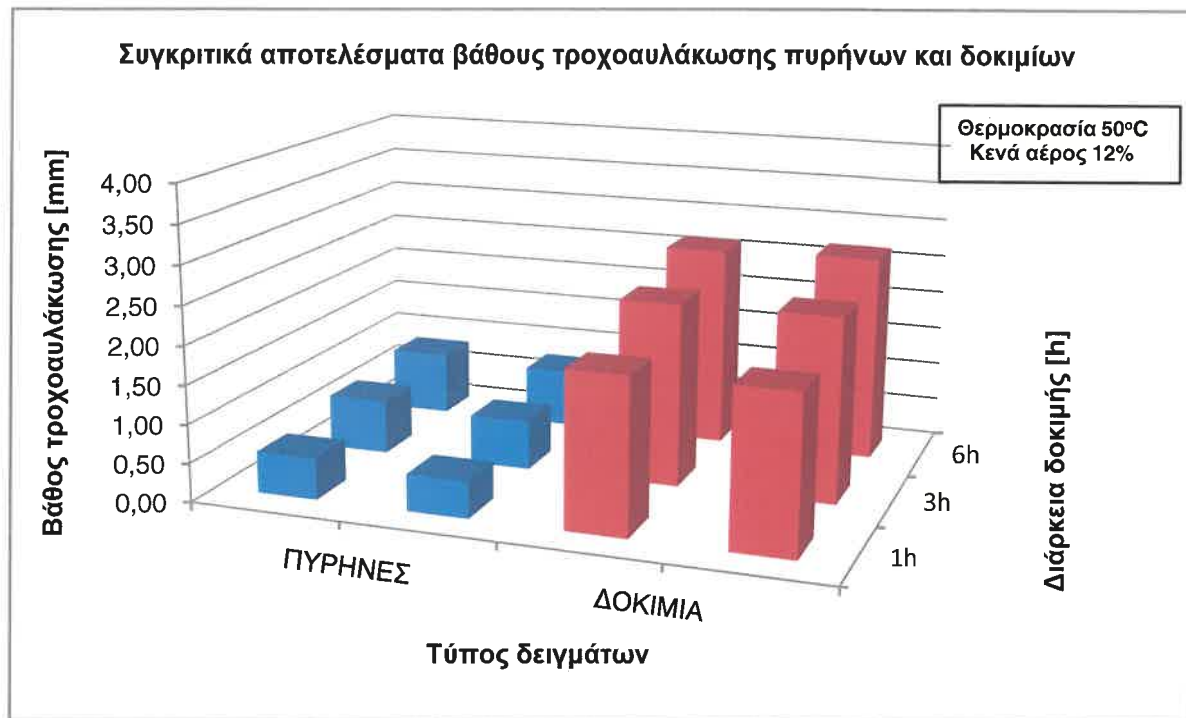
- Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος το βάθος τροχοαυλάκωσης στα προς εξέταση δοκίμια αυξάνεται (σχήμα 6.10). Όπως και στους πυρήνες αντιολισθηρής στρώσης, αποδεικνύεται ότι το ποσοστό κενών αέρος στο μίγμα επηρεάζει την αντίσταση του σε τροχοαυλάκωση και συγκεκριμένα αύξηση του ποσοστού αυτού συνεπάγεται αύξηση του βάθους τροχοαυλάκωσης.
- Επιπλέον με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος από 10% σε 12% στα δοκίμια αυξάνεται η κλίση WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μειώνεται η αντίσταση σε τροχοαυλάκωση.

6.2.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων και δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης (Κενά 10% και 12%)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης σε πυρήνες και δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστό κενών αέρος (10% και 12% αντίστοιχα) παρουσιάζονται στα σχήματα 6.11 και 6.12. Στα σχήματα αυτά απεικονίζεται συγκριτικά η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων και δοκιμών για το ίδιο ποσοστό κενών.



Σχήμα 6.11 : Συγκριτικά αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων και δοκιμών σε κενά αέρος 10%



Σχήμα 6.12 :Συγκριτικά αποτελέσματα βάθους τροχοαλάκωσης πυρήνων και δοκιμίων για κενά 12%

Από το σχήμα 6.11,συγκρίνοντας πυρήνες και δοκίμια με ποσοστό κενών αέρος 10% παρατηρείται ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν υψηλότερο βάθος τροχοαλάκωσης ($2\text{ mm} < \text{RD} < 3\text{ mm}$) σε σχέση με τους πυρήνες (από $0 < \text{RD} < 1\text{ mm}$).

Από το σχήμα 6.12,συγκρίνοντας πυρήνες και δοκίμια σε ποσοστό κενών αέρος 12% παρατηρείται ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν υψηλότερο βάθος τροχοαλάκωσης ($2\text{ mm} < \text{RD} < 3\text{ mm}$) σε σχέση με τους πυρήνες (από $0 < \text{RD} < 1\text{ mm}$).

Στην συνέχεια παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας με την κατηγοριοποίηση των πυρήνων και των δοκιμίων της αντιολισθηρής στρώσης για ποσοστά κενών αέρος 10% και 12% αντίστοιχα, με βάση την κλίση τροχοαλάκωσης WTS_{AIR} .

Πίνακας 6.9:Κατηγοροποίηση WTS_{AIR} πυρήνων και δοκιμίων αντιολισθηρής στρώσης

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ(%)	ΠΥΡΗΝΕΣ		ΔΟΚΙΜΙΑ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS _{AIR} (mm/10 ³ κύκλοι φόρτισης)			
10%	WTS _{AIR 0,01}	WTS _{AIR 0,01}	WTS _{AIR 0,04}	WTS _{AIR 0,03}
12%	WTS _{AIR 0,02}	WTS _{AIR 0,02}	WTS _{AIR 0,06}	WTS _{AIR 0,05}

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι :

- Για το ίδιο ποσοστό κενών αέρος (10% και 12% αντίστοιχα) τα δοκίμια παρουσιάζουν αυξημένη κλίση τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση σε σχέση με τους πυρήνες. Για τις ίδιες δηλαδή συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και για τα ίδιο ποσοστό κενών τα δοκίμια εμφανίζονται να παραμορφώνονται περισσότερο.
- Επιπλέον η αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της κλίση τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση τόσο σε πυρήνες όσο και σε δοκίμια. Εντούτοις παρατηρείται μεγαλύτερη η επίδραση του ποσοστού των κενών στα δοκίμια.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η επίδραση της διαδικασίας συμπύκνωσης στην αντίσταση σε τροχοαυλάκωση. Συγκρίνοντας δοκίμια συμπυκνωμένα στο εργαστήριο και πυρήνες συμπυκνωμένους επί τόπου στο έργο παρατηρείται σημαντική μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση, στα δοκίμια.

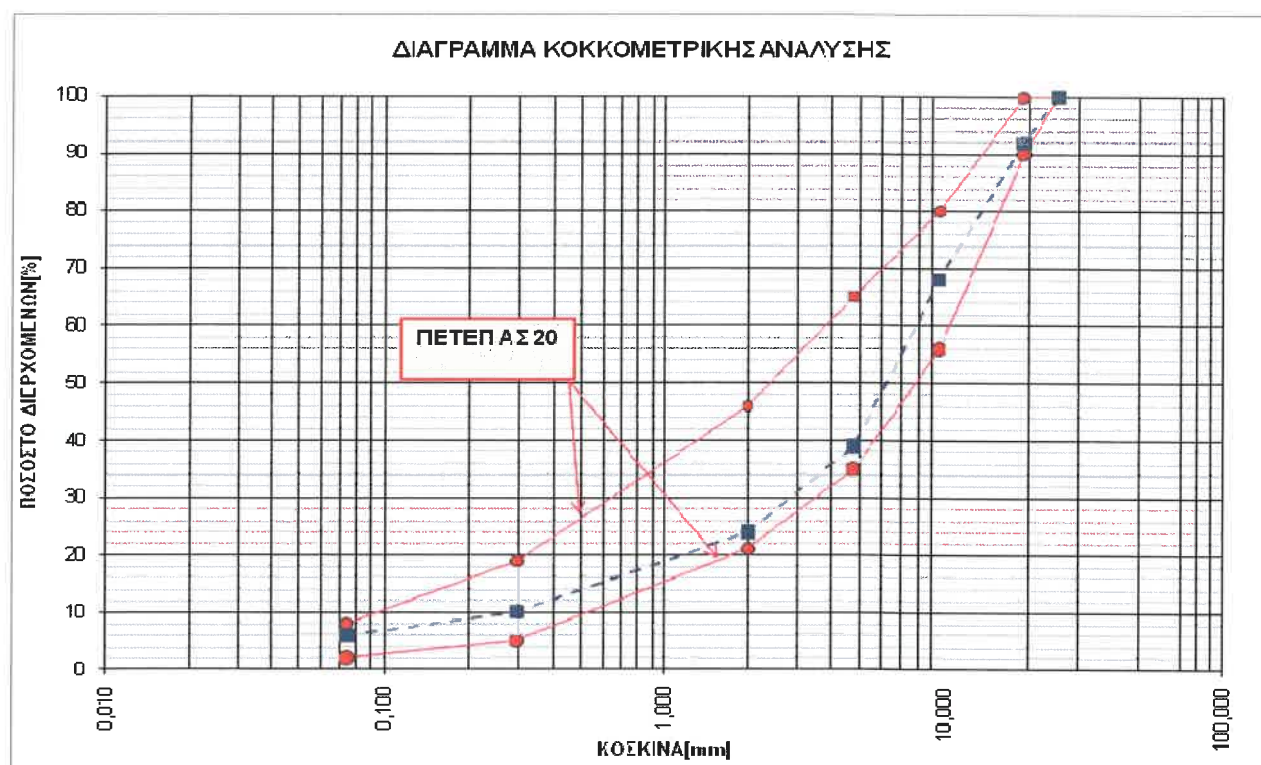
6.3 Ασφαλτόμιγμα ισοπεδωτικής στρώσης (ΠΕΤΕΠ ΑΣ20)

6.3.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης

Το προς εξέταση ασφαλτόμιγμα είναι μίγμα ισοπεδωτικής στρώσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου (τύπος ΑΣ20). Ο χαρακτηρισμός του ασφαλτικού σκυροδέματος ως ΑΣ20 δηλώνει ασφαλτικό σκυρόδεμα με αδρανή συγκρατούμενα έως και 10% κατά βάρος από κόσκινο βροχίδας 20mm. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών στο μίγμα, καθώς και τα όρια της υπόψη προδιαγραφής για τύπο ασφαλτικού σκυροδέματος ΑΣ20 παρουσιάζονται στον πίνακα 6.10 και γραφικά στο σχήμα 6.13.

Πίνακας 6.10 : Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος ισοπεδωτικής στρώσης αδρανών υλικών και ποσοστό ασφάλτου

Ασφαλτικό σκυρόδεμα ΑΣ 20 Κλειστού τύπου		
Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου Κατά EN 933-2:1995(mm)	Όρια	Μίγμα
	Ποσοστά διερχόμενα από τα αντίστοιχα κόσκινα	
25,4 χλστ (1")	100	100
19 χλστ (3/4")	90-100	92
9,5 χλστ (3/8")	56-80	68
4,75 χλστ (No 4)	35-65	39
2 χλστ (No 10)	21-46	24
0,3 χλστ (No 50)	5-19	10
0,075 χλστ (No 200)	2-8	6
Ποσοστό ασφάλτου % κατά βάρος επί του ασφαλτομίγματος	4-11	4,0



Σχήμα 6.13 : Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης μίγματος ισοπεδωτικής στρώσης

Ως προς το συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται ασφαλτος τροποποιημένη με ελαστομερή χημικά πρόσθετα, οι χαρακτηριστικές ιδιότητες της οποίας παρουσιάζονται στον πίνακα 6.11. Σημειώνεται ότι ο τύπος της ασφάλτου που χρησιμοποιείται είναι ίδιος με τον τύπο της ασφάλτου που χρησιμοποιήθηκε στο μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης.

Πίνακας 6.11 : Χαρακτηριστικές ιδιότητες ασφάλτου

Ιδιότητες τροποποιημένης ασφάλτου	Τιμές
Σημείο μάλθωσης (°C)	80
Διείσδυση (pen)	50
Ελαστική επαναφορά (%)	96
Ιξώδες 160°C (cPs)	600

Επιπλέον στον πίνακα 6.12, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος όπως αυτά έχουν προκύψει κατά την μελέτη σύνθεσης του ασφαλτομίγματος με την μέθοδο Marshall, για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου.

Πίνακας 6.12. Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος

Χαρακτηριστικά	Όρια Τύπου II	Μελέτη σύνθεσης
Συμπύκνωση, αριθμός κτύπων σε κάθε πλευρά του δοκιμίου	75	75
Ευστάθεια στους 60 ^ο C N. (Newton)	8000	19040
Παραμόρφωση δοκιμίων (χλστ)	2 - 5	3.9
Κενά αέρος % συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος	3 - 8	5.2

Σημειώνεται ότι για την διασφάλιση της καλής συμπεριφοράς του τελικού μίγματος της επιφανειακής και της συνδετικής στρώσης συνίσταται, με βάση την προδιαγραφή ΠΕΤΕΠ, να εκτελείται και η δοκιμή της δοκιμής της τροχοαυλάκωσης. Ο ρυθμός και το βάθος τροχοαυλάκωσης κατά την δοκιμή σύμφωνα με το πρότυπο EN 12696-22 με την μικρή συσκευή τροχοαυλάκωσης θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του πίνακα 6.13 που παρουσιάζεται στην συνέχεια.

Πίνακας 6.13 : Απαιτήσεις προδιαγραφής ΠΕΤΕΠ ρυθμού και βάθους τροχοαυλάκωσης

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΣΗΣ	Θερμοκρασία ελέγχου °C	Τροχοαυλακώσεις	
		Ρυθμός mm/h	Βάθος mm
Μικρής καταπόνησης: αυτοκινητόδρομοι και λοιπές οδοί με ΕΟ<1500	Δεν απαιτείται		
Μεσαίας Έως υψηλής καταπόνησης: αυτοκινητόδρομοι με ΕΟ από 1501- 4000, τμήματα σε ανωφέρεια/κατωφέρεια με κλίση 3%- 10% και ΕΟ από 1001-2500, ή με κλίση >10% με ΕΟ από 501-150, προσέγγιση σε σηματοδοτούμενο κόμβο ή πλατεία με ΕΟ από 251-1000	45 °C	<2,0	<4,0
Υψηλή έως πολύ υψηλής καταπόνησης: αυτοκινητόδρομοι με ΕΟ>4000, τμήματα σε ανωφέρεια/κατωφέρεια με κλίση 3%- 10% και ΕΟ>2500, ή με κλίση >10% και ΕΟ>1500, προσέγγιση σε σηματοδοτούμενο κόμβο ή πλατεία με ΕΟ>1000	60 °C	<5,0	<7,0

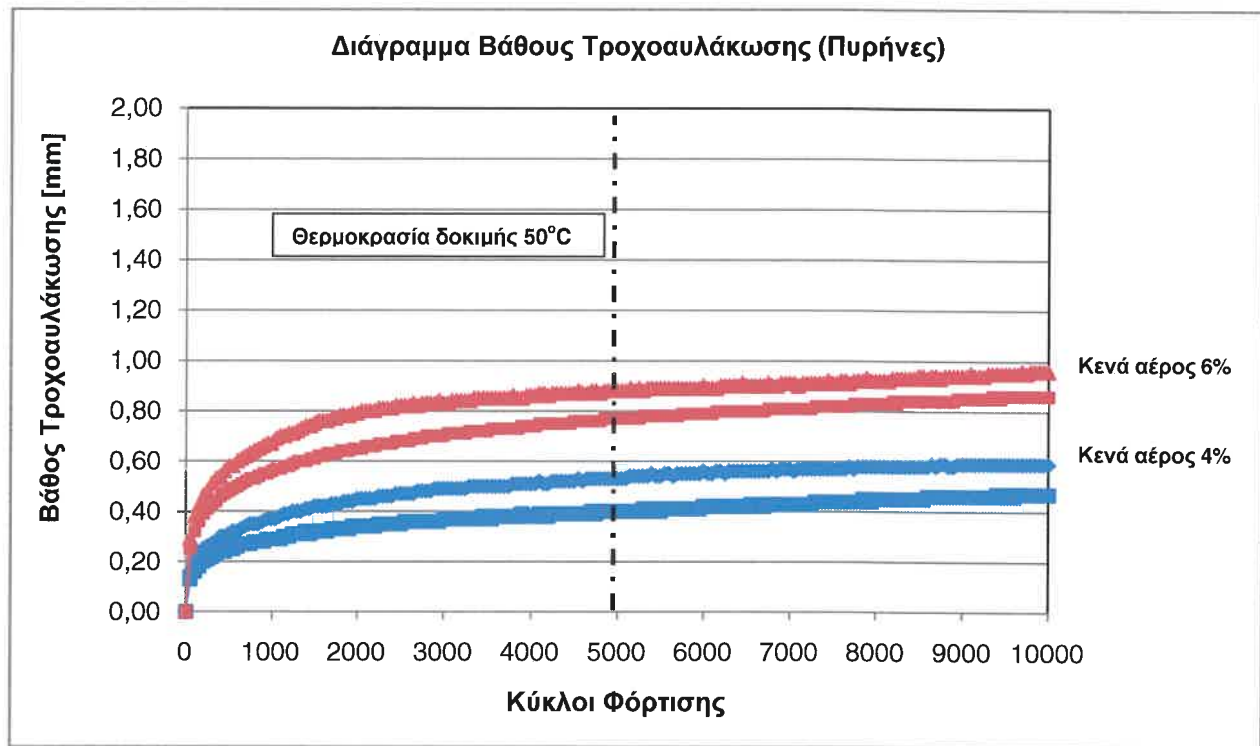
6.3.2 Προετοιμασία και έλεγχος πυρήνων ισοπεδωτικής στρώσης

Στη φάση αυτή ελέγχθηκαν πυρήνες ισοπεδωτικής στρώσης με ποσοστό κενών αέρος 4% και 6% αντίστοιχα (σχήμα 6.14). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία των πυρήνων προτού υποβληθούν σε έλεγχο στην συσκευή τροχοαυλάκωσης παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα (6.2.2).



Σχήμα 6.14 : Βάθος τροχοαυλάκωσης σε πυρήνα ισοπεδωτικής στρώσης

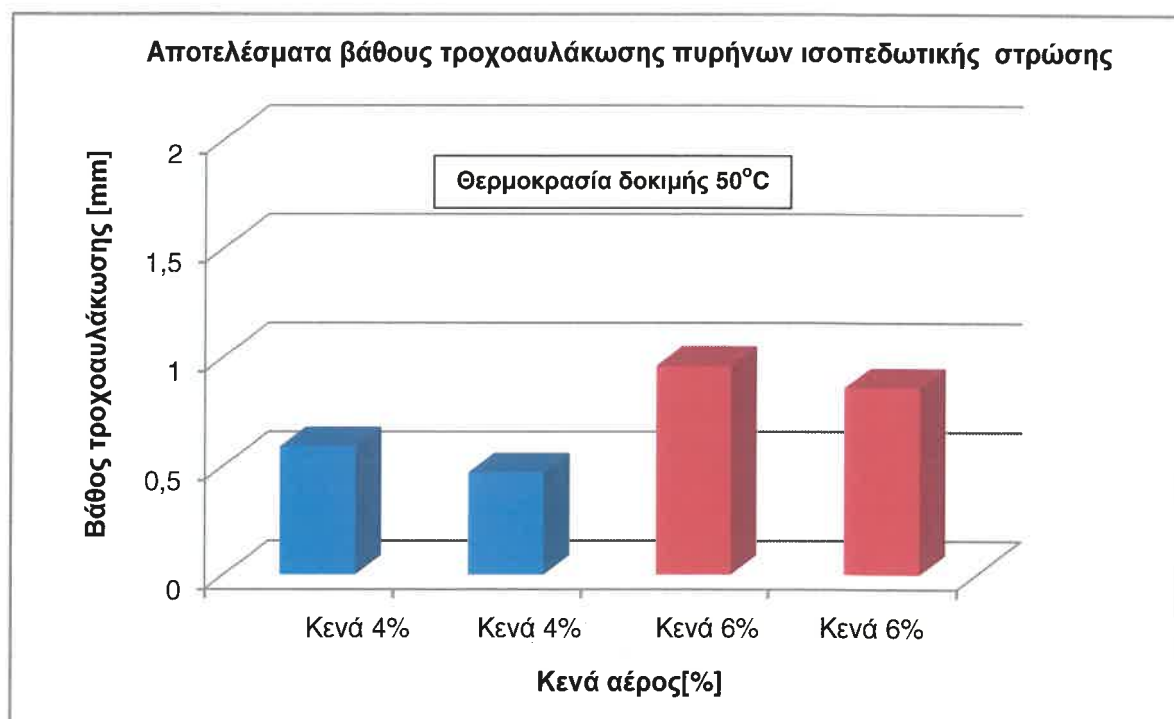
Η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης ολοκληρώνεται όταν εφαρμοσθούν 10000 κύκλοι φόρτισης. Κατά αντιστοιχία με τους πυρήνες της αντιολισθηρής στρώσης παρουσιάζονται στο σχήμα 6.15 τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης στους πυρήνες ισοπεδωτικής με ποσοστά κενών αέρος 4% και 6% . Στο σχήμα απεικονίζεται η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης με την αύξηση των κύκλων φόρτισης.



Σχήμα 6.15 : Εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης

Από το σχήμα 6.15 ,κατά το πρώτο στάδιο στο οποίο οι πυρήνες επανασυμπυκνώνονται παρατηρείται, απότομη αύξηση της κλίσης τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} . Στην συνέχεια η κλίση ομαλοποιείται και το βάθος τροχοαυλάκωσης που παρατηρείται κατά την φάση αυτή οφείλεται σε πλευρικές μετακινήσεις ποσότητας υλικού του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση του αξονικού φορτίου.

Επιπλέον το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης για τους προς εξέταση πυρήνες της ισοπεδωτικής στρώσης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.16, με την μορφή ραβδογράμματος.



Σχήμα 6.16 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων ισοπεδωτικής στρώσης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η αντίσταση σε τροχοαυλάκωση των προς εξέταση πυρήνων εκτιμάται μέσω του υπολογισμού της κλίσης τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} , της κλίσης μεταξύ των 5000 και των 10000 κύκλων φόρτισης. Ο υπολογισμός της κλίσης WTS_{AIR} για κάθε πυρήνα παρουσιάζεται αναλυτικά στον πίνακα 6.14 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.14: Υπολογισμός του μεγέθους WTS_{AIR} για κάθε πυρήνα (κενά 4% και 6%)

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ (%)	4%		6%	
ΠΥΡΗΝΕΣ	ΠΥΡΗΝΑΣ 1	ΠΥΡΗΝΑΣ 2	ΠΥΡΗΝΑΣ 3	ΠΥΡΗΝΑΣ 4
d5000	0.53	0.40	0.88	0.77
d10000	0.59	0.47	0.96	0.86
$WTS_{AIR}(mm/1000^3$ κύκλοι φόρτισης)	0.01	0.01	0.02	0.02

Ακολούθως, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα WTS_{AIR} , γίνεται και η κατηγοριοποίηση των πυρήνων της ισοπεδωτικής στρώσης όπως αυτή προβλέπεται κατά EN13108-1:2006 (πίνακας 6.15).

Πίνακας 6.15:Κατηγοριοποίηση πυρήνων της ισοπεδωτικής στρώσης

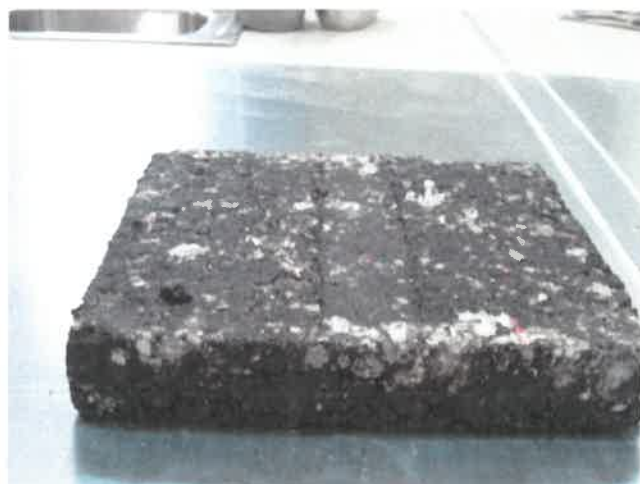
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ (%)	ΠΥΡΗΝΕΣ ΙΣΟΠΕΔΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR}	
4%	$WTS_{AIR\ 0,01}$	$WTS_{AIR\ 0,01}$
6%	$WTS_{AIR\ 0,02}$	$WTS_{AIR\ 0,02}$

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης σε πυρήνες ισοπεδωτικής στρώσης με ποσοστό κενών αέρος 4% και 6% αντίστοιχα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρα από 4% σε 6% στους υπό εξέταση πυρήνες παρατηρείται αύξηση του τελικού βάθους τροχοαυλάκωσης (σχήμα 6.16).
- Σημειώνεται επίσης ότι με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρα παρατηρείται αύξηση της κλίσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση.

6.3.3 Προετοιμασία και έλεγχος δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης

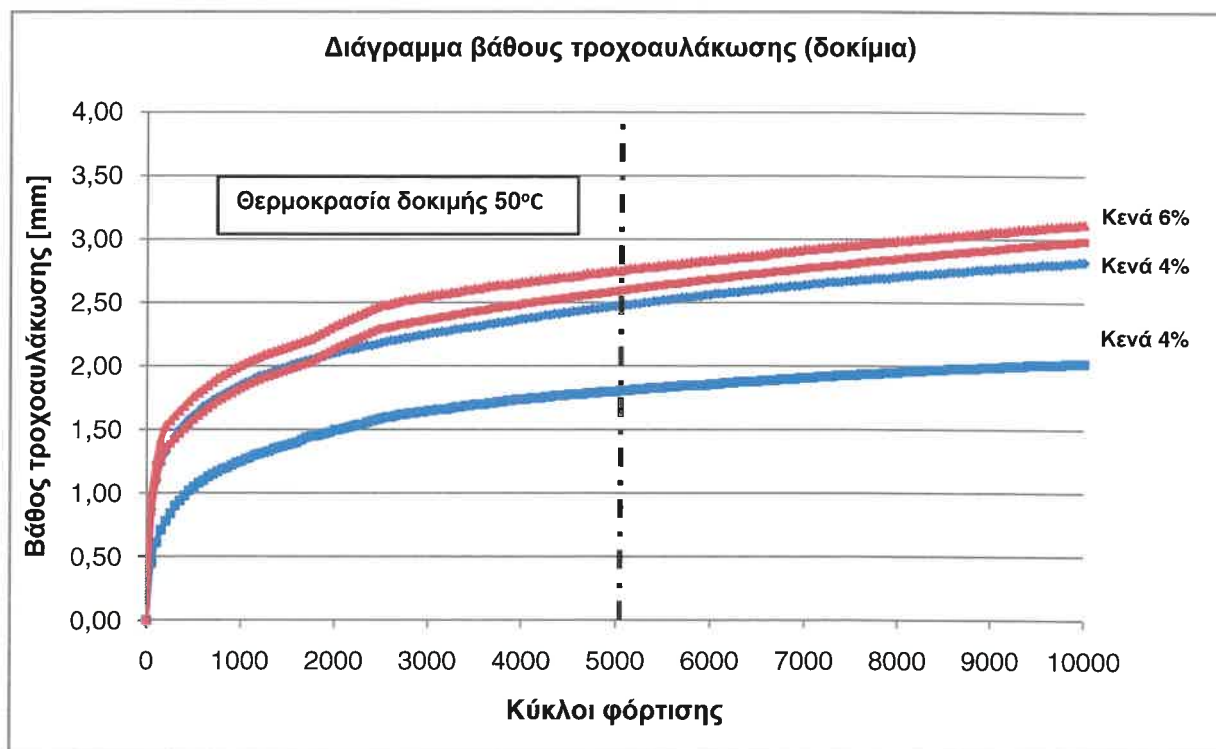
Τετραγωνικά δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης συμπυκνώθηκαν στο εργαστήριο σε ποσοστό κενών αέρος 4% και 6%, κατά αντιστοιχία με τους πυρήνες ισοπεδωτικής στρώσης, και ελέγχθηκε η αντίσταση τους σε τροχοαυλάκωση (σχήμα 6.17) .Η διαδικασία προετοιμασίας και ελέγχου των δοκιμών περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 6.2.4



Σχήμα 6.17 : Βάθος τροχοαυλάκωσης σε δοκίμιο ισοπεδωτικής στρώσης

6.3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

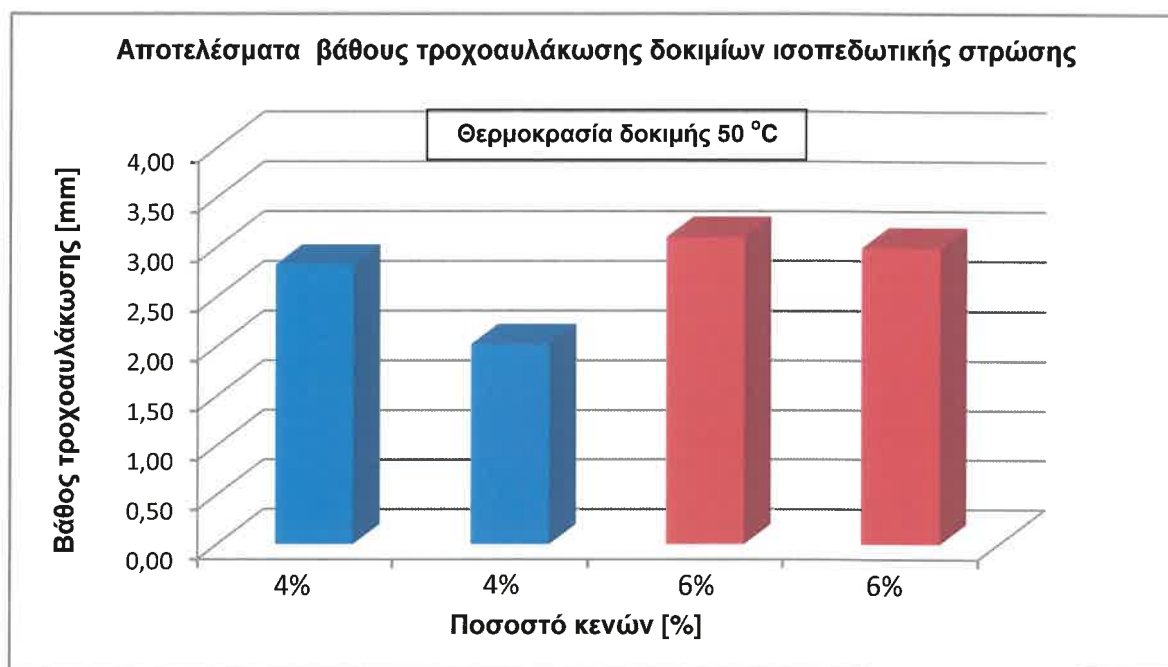
Η δοκιμή της τροχοαυλάκωσης ολοκληρώνεται όταν εφαρμοσθούν 10000 κύκλοι φόρτισης. Στο σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης στα τέσσερα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης, με την αύξηση των κύκλων φόρτισης.



Σχήμα 6.18 : Εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης

Από το σχήμα 6.18 παρατηρείται ότι μέχρι τους 2000 κύκλους φόρτισης, όπου τα δοκίμια επανασυμπυκνώνονται, η κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} είναι απότομη, ενώ στην συνέχεια ομαλοποιείται.

Επιπλέον στο σχήμα 6.19 απεικονίζεται η μεταβολή του τελικού βάθους τροχοαυλάκωσης των δοκιμών με την αύξηση του ποσοστού των κενών από 4% σε 6%.



Σχήμα 6.19 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης

Σημειώνεται ότι η αντίσταση στην τροχοαυλάκωση, των δοκιμών με ποσοστά κενών αέρος 4% και 6% προσδιορίζεται, μέσω του υπολογισμού της κλίσης της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} , όπως καθορίζεται στην ευρωπαϊκή προδιαγραφή (EN 12697-22). Ο αναλυτικός υπολογισμός της κλίσης WTS_{AIR} για κάθε δοκίμιο παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.16: Υπολογισμός της κλίσης WTS_{AIR} για κάθε δοκίμιο (κενά 4% και 6%)

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ (%)	4%		6%	
ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2	ΔΕΙΓΜΑ 3	ΔΕΙΓΜΑ 4
d5000	2.47	1.80	2.75	2.59
d10000	2.82	2.02	3.12	2.99
$WTS_{AIR}(mm/1000^3$ κύκλοι φόρτισης)	0.07	0.04	0.07	0.08

Ακολούθως, με βάση τα στοιχεία του πίνακα 6.16 γίνεται η κατηγοριοποίηση των τεσσάρων δοκιμών κατά EN 13108-1:2006.(πίνακας 6.17)

Πίνακας 6.17:Κατηγοριοποίηση των προς εξέταση δοκιμών

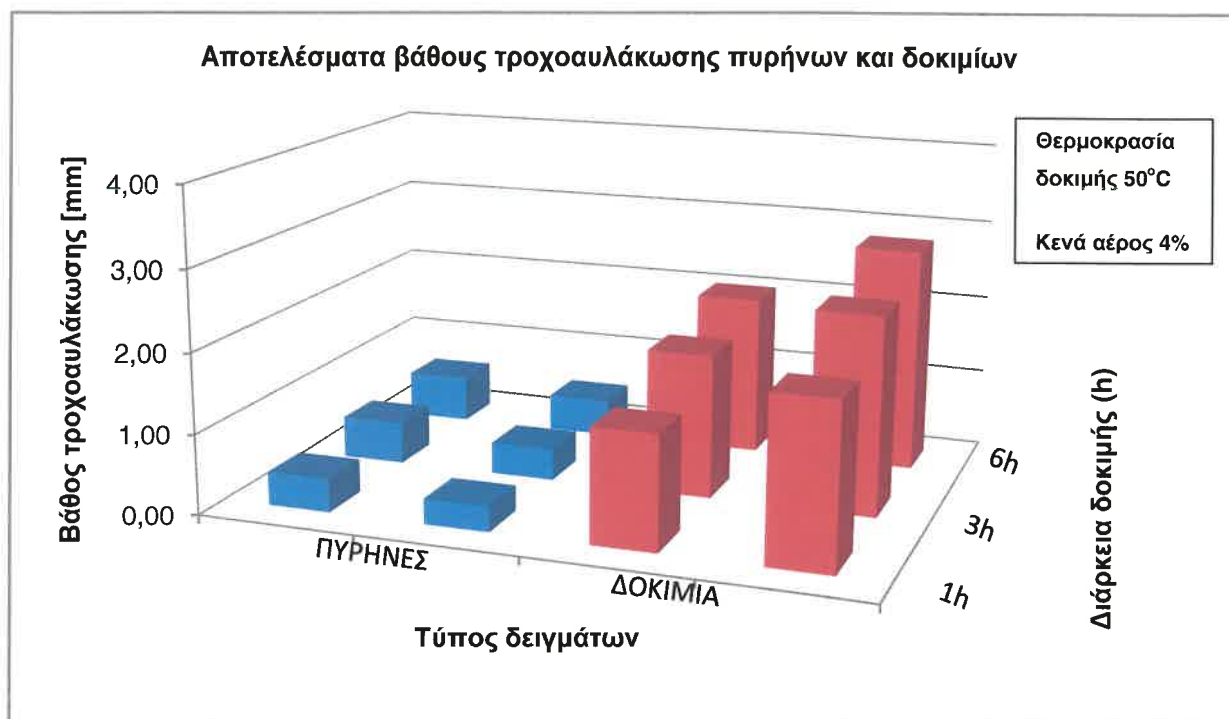
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ(%)	ΔΟΚΙΜΙΑ ΙΣΟΠΕΔΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR}	
4%	$WTS_{AIR\ 0,07}$	$WTS_{AIR\ 0,04}$
6%	$WTS_{AIR\ 0,07}$	$WTS_{AIR\ 0,08}$

Με βάση τα αποτελέσματα που περιγράφηκαν εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

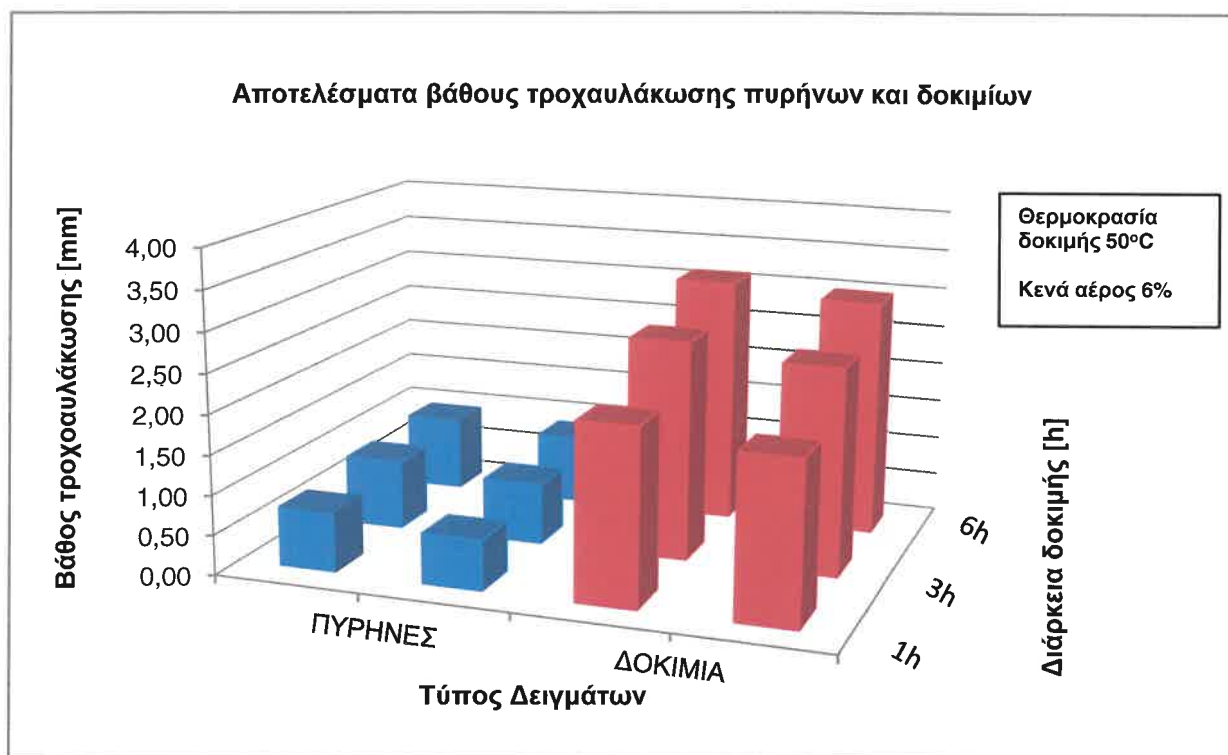
- Το βάθος τροχοαυλάκωσης στα προς εξέταση δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης κυμαίνεται από 2mm έως 4mm.
- Με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος από 4% σε 6% το βάθος τροχοαυλάκωσης στα ελεγχόμενα δοκίμια αυξάνεται .
- Σημειώνεται επίσης ότι με την αύξηση του ποσοστού των κενών αέρα παρατηρείται αύξηση της κλίσης τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και συνεπώς μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση.

6.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων και δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης(Κενά 4% και 6%)

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής τροχοαυλάκωσης ελέγχονται δυο ζεύγη πυρήνων και δυο ζεύγη δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης με ποσοστά κενών αέρος 4%και 6% αντίστοιχα. Στα σχήματα 6.20 και 6.21 που ακολουθούν απεικονίζεται συγκριτικά, η εξέλιξη του βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων και δοκιμών για το ίδιο ποσοστό κενών αέρα.



Σχήμα 6.20 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων και δοκιμίων με ποσοστό κενών 4%



Σχήμα 6.21 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων και δοκιμίων με ποσοστό κενών 6%

Παρατηρείται ότι, σε ποσοστό κενών 4% τα δοκίμια παρουσιάζουν αυξημένο βάθος τροχοαυλάκωσης ($2\text{mm} < \text{RD} < 3\text{mm}$) σε σχέση με τους πυρήνες ($0\text{mm} < \text{RD} < 1\text{mm}$).

Αντίστοιχα για ποσοστό κενών 6% παρατηρείται ότι τα δοκίμια δίνουν το υψηλότερο βάθος τροχοαυλάκωσης ($2\text{mm} < \text{RD} < 4\text{mm}$).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι, σύμφωνα με την προδιαγραφή ΠΕΤΕΠ ο ρυθμός και το βάθος τροχοαυλάκωσης κατά την δοκιμή, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-22:2003 με την μικρή συσκευή τροχοαυλάκωσης θα πρέπει να ικανοποιούν της απαιτήσεις του πίνακα 6.13 που παρατίθεται στην ενότητα 6.3.1.

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω παρατηρήσεις και από τον πίνακα 6.13 διαπιστώνεται ότι ακόμα και για τη δυσμενέστερη περίπτωση ($\text{RD} < 4\text{mm}$), τόσο οι πυρήνες όσο και τα δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης (κενά αέρος 4% και 6%), που ελέγχθηκαν στο εργαστήριο, πληρούν τις απαιτήσεις της προδιαγραφής ΠΕΤΕΠ αφού το βάθος τροχοαυλάκωσης που δίνουν κυμαίνεται από 0 έως 4mm ($0 < \text{RD} < 4\text{mm}$).

Σημειώνεται ότι το σημαντικά μειωμένο βάθος τροχοαυλάκωσης σε σχέση με τα όρια της προδιαγραφής ΠΕΤΕΠ, στα υπό μελέτη δείγματα, πιστεύεται ότι οφείλεται στη χρήση τροποποιημένης ασφάλτου στο μίγμα της ισοπεδωτικής στρώσης. Όπως αποδεικνύεται από έρευνες η χρήση τροποποιημένης ασφάλτου στα ασφαλτομίγματα βελτιώνει σημαντικά την αντίσταση τους σε τροχοαυλάκωση σε σχέση με την χρήση συμβατικής ασφάλτου.

Στην συνέχεια παρατίθεται η κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} για τα προς εξέταση δείγματα της ισοπεδωτικής στρώσης (πυρήνες και δοκίμια) με ποσοστά κενών αέρος 4% και 6% (πίνακας 6.18).

Πίνακας 6.18:Κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} πυρήνων και δοκιμών ισοπεδωτικής στρώσης (ποσοστά κενών 4%, 6%)

ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ(%)	ΠΥΡΗΝΕΣ		ΔΟΚΙΜΙΑ	
	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS _{AIR} (mm/10 ³ κύκλοι φόρτισης)			
4%	WTS _{AIR} 0,01	WTS _{AIR} 0,01	WTS _{AIR} 0,07	WTS _{AIR} 0,04
6%	WTS _{AIR} 0,02	WTS _{AIR} 0,02	WTS _{AIR} 0,07	WTS _{AIR} 0,08

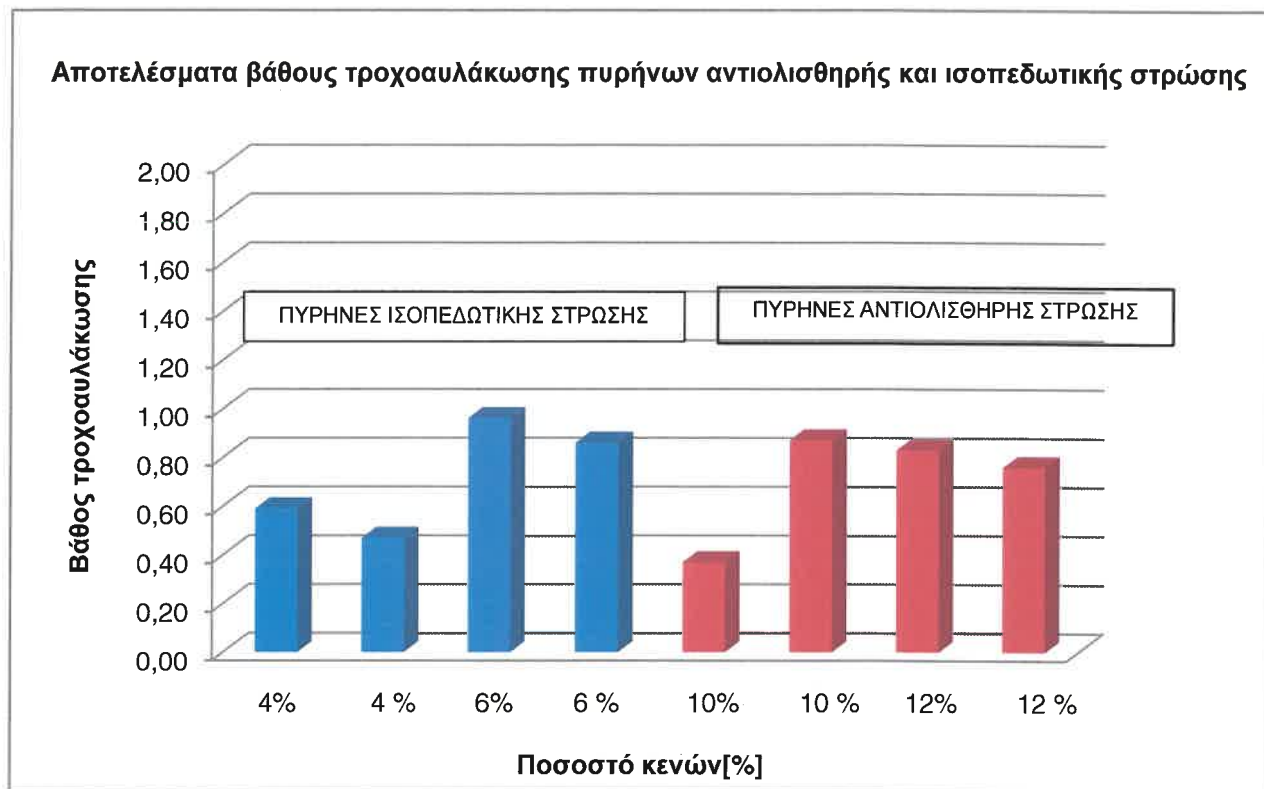
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι :

- Για το ίδιο ποσοστό κενών αέρος (4% και 6% αντίστοιχα) τα δοκίμια παρουσιάζουν αυξημένη κλίση τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση σε σχέση με τους πυρήνες. Για τις ίδιες δηλαδή συνθήκες φόρτισης, θερμοκρασίας και για τα ίδιο ποσοστό κενών τα δοκίμια εμφανίζονται να παραμορφώνονται περισσότερο.
- Επιπλέον η αύξηση του ποσοστού των κενών αέρος έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της κλίση τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση τόσο σε πυρήνες όσο και σε δοκίμια. Εντούτοις παρατηρείται μεγαλύτερη η επίδραση του ποσοστού των κενών στα δοκίμια.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτή η επίδραση της διαδικασίας συμπύκνωσης στην αντίσταση σε τροχοαυλάκωση. Συγκρίνοντας δοκίμια συμπυκνωμένα στο εργαστήριο και πυρήνες συμπυκνωμένους επί τόπου στο έργο παρατηρείται σημαντική μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση, στα δοκίμια.

6.3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων πυρήνων αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης

Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δοκιμών τροχοαυλάκωσης σε πυρήνες ισοπεδωτικής και σε πυρήνες αντιολισθηρής στρώσης προκειμένου να διερευνήσουμε την επίδραση του ποσοστού των κενών αέρος στην αντίσταση των μιγμάτων κλειστού (κενά αέρος 4%) και ανοιχτού τύπου (κενά αέρος 10%) στην τροχοαυλάκωση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τροχοαυλάκωσης σε πυρήνες ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης παρουσιάζονται συγκριτικά με την μορφή ραβδογράμματος στο σχήμα 6.22. Στο σχήμα απεικονίζεται το τελικό βάθος τροχοαυλάκωσης για κάθε ελεγχόμενο πυρήνα και για το αντίστοιχο ποσοστό κενών αέρος. Υπενθυμίζεται ότι στα μίγματα της αντιολισθηρής και της ισοπεδωτικής στρώσης χρησιμοποιήθηκε σε ίδιο ποσοστό ο ίδιος τύπος τροποποιημένης ασφάλτου .



Σχήμα 6.22 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης πυρήνων αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης

Με βάση το σχήμα 6.22 παρατηρούνται τα εξής:

- Το βάθος τροχοαυλάκωσης τόσο σε πυρήνες ισοπεδωτικής όσο και σε πυρήνες αντιολισθηρής στρώσης κυμαίνεται από 0 έως 1mm
- Με την αύξηση του ποσοστού των κενών στους υπό εξέταση πυρήνες τα βάθη τροχοαυλάκωσης αυξομειώνονται. Δεν είναι σαφής η μεταξύ τους διαφορά.

Στην συνέχεια παρατίθεται πίνακας με την κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} για πυρήνες ισοπεδωτικής στρώσης σε ποσοστό κενών 4% και 6% και για πυρήνες αντιολισθηρής στρώσης σε ποσοστό κενών 10% και 12%.(πίνακας 6.19).

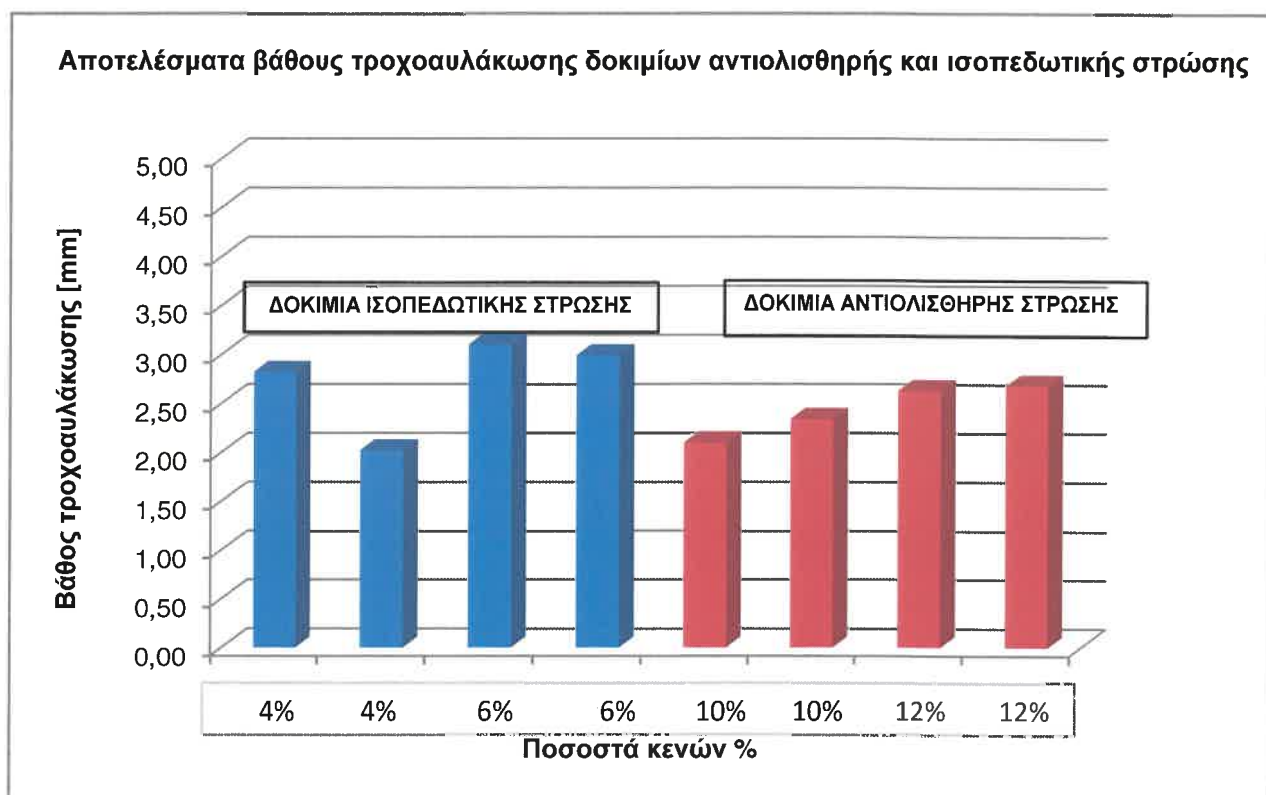
Πίνακας 6.19 : Κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} πυρήνων ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης

ΠΥΡΗΝΕΣ	ΚΕΝΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR} ($mm/10^3$ κύκλοι φόρτισης)	
ΠΥΡΗΝΕΣ ΙΣΟΠΕΔΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	4%	$WTS_{AIR\ 0,01}$	$WTS_{AIR\ 0,01}$
	6%	$WTS_{AIR\ 0,02}$	$WTS_{AIR\ 0,02}$
ΠΥΡΗΝΕΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	10%	$WTS_{AIR\ 0,01}$	$WTS_{AIR\ 0,01}$
	12%	$WTS_{AIR\ 0,02}$	$WTS_{AIR\ 0,02}$

- Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού των κενών αέρα από 4% σε 10% δεν έχει επίδραση στην αντίσταση των προς εξέταση πυρήνων κλειστού και ανοιχτού τύπου στην τροχοαυλάκωση. Η κλίση της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} , δεν μεταβάλλεται ($WTS_{AIR0.01}$) και κατά συνέπεια οι προς εξέταση πυρήνες παρουσιάζουν την ίδια αντίσταση σε τροχοαυλάκωση.

6.3.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης

Κατά αντιστοιχία με τους πυρήνες, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της δοκιμής τροχοαυλάκωσης σε δοκίμια ισοπεδωτικής και σε δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης. Στο σχήμα 6.23 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα του βάθους τροχοαυλάκωσης για δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης σε ποσοστό κενών 4% και 6% και για δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης σε ποσοστό κενών αέρος 10% και 12%.



Σχήμα 6.23 : Αποτελέσματα βάθους τροχοαυλάκωσης δοκιμών αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης

Με βάση το σχήμα 6.23 παρατηρούνται τα εξής :

- Το βάθος τροχοαυλάκωσης σε δοκίμια ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης κυμαίνεται από 2 mm έως 4mm

- Στα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης το βάθος τροχοαυλάκωσης είναι σημαντικά μειωμένο σε σχέση με τα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης.

Ακολουθώς παρατίθεται πίνακας με την κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} για τα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης σε ποσοστό κενών 4% και 6% και για τα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης σε ποσοστό κενών 10% και 12% (πίνακας 6.20).

Πίνακας 6.20 : Κατηγοριοποίηση WTS_{AIR} δοκιμών ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης

ΔΟΚΙΜΙΑ	ΚΕΝΑ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ WTS_{AIR} (mm/10 ³ κύκλοι φόρτισης)	
ΔΟΚΙΜΙΑ ΙΣΟΠΕΔΩΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	4%	$WTS_{AIR\ 0,07}$	$WTS_{AIR\ 0,04}$
	6%	$WTS_{AIR\ 0,07}$	$WTS_{AIR\ 0,08}$
ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ	10%	$WTS_{AIR\ 0,04}$	$WTS_{AIR\ 0,03}$
	12%	$WTS_{AIR\ 0,06}$	$WTS_{AIR\ 0,05}$

- Με βάση τα παραπάνω παρατηρείται μείωση της κλίσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια αύξηση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση στα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης. Η παραπάνω διαπίστωση έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα του ελέγχου σε παραμόρφωση δοκιμών αντιολισθηρής (κενά 10%) και ισοπεδωτικής στρώσης (κενά 4%) ,κατά την μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων με την μέθοδο Marshall, όπου το μίγμα ανοιχτού τύπου παρουσιάζει αυξημένη παραμόρφωση σε σχέση με το μίγμα κλειστού τύπου. Στο σημείο αυτό αποδεικνύεται και η αδυναμία της εμπειρικής δοκιμής Marshall, να εξασφαλίσει στην πράξη το θέμα της παραμένουσας παραμόρφωσης των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση της τροχοαυλάκωσης.
- Η μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση που παρατηρείται στα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης φαίνεται να επηρεάζεται από το γεγονός της ύπαρξης λεπτόκοκκων αδρανών στο μίγμα σε μεγαλύτερο ποσοστό. Η επίδραση των λεπτόκοκκων αδρανών στην αντίσταση σε τροχοαυλάκωση εξηγείται υπό την έννοια ότι, σε σχέση με τα περισσότερα χονδρόκοκκα αδρανή της αντιολισθηρής στρώσης, δεν εξασφαλίζουν ικανοποιητική αλληλεμπλοκή μεταξύ των αδρανών υλικών, με αποτέλεσμα το παραγόμενο μίγμα να έχει μειωμένη εσωτερική συνοχή, μειωμένη ευστάθεια και κατ' επέκταση μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση.
- Επιπρόσθετα αναφέρεται ότι η χρήση περισσότερο αδρών και σκληρών αδρανών υλικών στο μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης, με στόχο την εξασφάλιση επιφανειακής μακροϋφής, φαίνεται να καθιστά το μίγμα περισσότερο ανθεκτικό σε τροχοαυλάκωση.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της συσκευής τροχοαυλάκωσης μικρής κλίμακας του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ μία προκαταρκτική διερεύνηση της αντίστασης μιγμάτων (αντιολισθηρής και ισοπεδωτικής στρώσης) με τη δοκιμή της τροχοαυλάκωσης, σύμφωνα με την αντίστοιχη Ευρωπαϊκή προδιαγραφή (EN 12697-22). Με βάση τα αποτελέσματα διερευνήθηκε, 1) η επίδραση της διαδικασίας συμπίκνωσης (επί τόπου στο έργο και στο εργαστήριο) και 2) η επίδραση του όγκου των κενών αέρα (%) στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων στην τροχοαυλάκωση. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν έχουν ως εξής:

- Από τον έλεγχο των δοκιμών που έχουν συμπτυκνωθεί στο εργαστήριο και πυρήνων που κόπηκαν από τους ασφαλτοτάπητες, συμπτυκνωμένους επί τόπου στο έργο, που εμφανίζουν ίδιο όγκο κενών αέρα (%) στο μίγμα, παρατηρούνται σημαντικά μεγαλύτερες τιμές της κλίσης WTS_{AIR} και συνεπώς μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση, στα δοκίμια συγκριτικά με τους πυρήνες τόσο για το μίγμα της αντιολισθηρής όσο και για το μίγμα της ισοπεδωτικής στρώσης.
- Η αύξηση του όγκου των κενών αέρα (%) επιφέρει αύξηση της κλίσης της τροχοαυλάκωσης WTS_{AIR} και κατά συνέπεια μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση τόσο στους πυρήνες όσο και στα δοκίμια και για τα δύο μίγματα. Συγκεκριμένα η αύξηση του όγκου των κενών αέρα (%) έχει μεγαλύτερη επίδραση στη συμπεριφορά των δοκιμών σε σχέση με τους πυρήνες, στην τροχοαυλάκωση.
- Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι κατά την φάση συμπίκνωσης των ασφαλικών στρώσεων στο έργο, είναι σημαντικό να επιτευχθεί ο κατάλληλος βαθμός συμπίκνωσης, δεδομένου ότι βαθμός συμπίκνωσης μικρότερος από τον απαιτούμενο συνεπάγεται αύξηση στον όγκο των κενών αέρα (%) και κατ' επέκταση μειωμένη αντίσταση σε τροχοαυλάκωση.
- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατά το στάδιο μελέτης σύνθεσης κατά Marshall για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης των υπό διερεύνηση μιγμάτων, προέκυψε ότι το μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης εμφανίζει μεγαλύτερη παραμόρφωση συγκριτικά με το μίγμα της ισοπεδωτικής στρώσης. Εντούτοις από τα αποτελέσματα της δοκιμής της τροχοαυλάκωσης στα μίγματα παρατηρείται ότι το μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση στην τροχοαυλάκωση συγκριτικά με το μίγμα της ισοπεδωτικής στρώσης. Σε αυτό λοιπόν το σημείο διαπιστώνεται και η αδυναμία της εμπειρικής δοκιμής Marshall να εξασφαλίσει στην πράξη το θέμα της παραμένουσας παραμόρφωσης των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση της τροχοαυλάκωσης.

- Επιπρόσθετα, η καλύτερη συμπεριφορά σε τροχοαυλάκωση του μίγματος της αντιολισθηρής στρώσης πιστεύεται ότι οφείλεται στην αύξηση της εσωτερικής συνοχής, λόγω της ύπαρξης αδρών και χονδρόκοκκων αδρανών υλικών σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με το μίγμα της ισοπεδωτικής στρώσης.

Σημειώνεται επίσης ότι με βάση την Ευρωπαϊκή προδιαγραφή δεν έχουν προς το παρόν οριστεί μέγιστα επιτρεπτά όρια ρυθμού και βάθους τροχοαυλάκωσης. Πρόκειται για μία σημαντική αδυναμία του Ευρωπαϊκού προτύπου, για αυτό και με την συστηματική έρευνα όλες οι κατευθύνσεις, μελλοντικά, είναι σημαντικό να στραφούν στην καθιέρωση ορίων. Κατά αυτό τον τρόπο καθίσταται εύκολος ο προσδιορισμός της καλής ή μη συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, κατά το στάδιο σύνθεσης τους, σε παραμένουσα παραμόρφωση και κατ' επέκταση σε τροχοαυλάκωση, ανάλογα βέβαια και με τις συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας που επικρατούν στο εκάστοτε έργο.

Πλην όμως μέσω της δοκιμής τροχοαυλάκωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί διαδικασία κατάταξης των τύπων ασφαλτομιγμάτων ως προς την αντίσταση τους σε τροχοαυλάκωση. Κατά το στάδιο της μελέτης σύνθεσης επιβάλλεται ο έλεγχος μιγμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά (αδρανή υλικά, υλικά ασφάλτου, κοκκομετρική διαβάθμιση), ώστε να εξασφαλιστεί η επιλογή ενός μίγματος ανθεκτικού σε τροχοαυλάκωση.

Επιπρόσθετα η διερεύνηση της αντίστασης ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση θα μπορούσε να επεκταθεί στρέφεται επιμέρους κατευθύνσεις ως εξής:

- Πραγματοποίηση δοκιμών τροχοαυλάκωσης με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση.
- Διερεύνηση της επίδρασης της τροποποιημένης ασφάλτου σε σχέση με την επίδραση της συμβατικής ασφάλτου στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση.
- Πραγματοποίηση δοκιμών τροχοαυλάκωσης σε ασφαλτομίγματα με διαφορετικό ποσοστό ασφάλτου. Όπως αποδεικνύεται και από σχετικές έρευνες αύξηση του ποσοστού της ασφάλτου στο μίγμα πέρα από το προβλεπόμενο ποσοστό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση του βάθους τροχοαυλάκωσης και κατά συνέπεια μείωση της αντίστασης σε τροχοαυλάκωση.
- Μελέτη της επίδρασης της υγρασίας στην αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων σε τροχοαυλάκωση, μέσω της πραγματοποίησης δοκιμών τροχοαυλάκωσης σε υγρές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

Brown, E.R., Cooley, L. A., Hanson, D., Lynn, C., Powell, B., Prowell, B., and Watson, D. 2002. *NCAT test track design, construction, and performance*. NCAT Report 02-12. National Center for Asphalt Technology, Auburn University

Brown, R.A., Kandhal, P.S., and Zhang, J. 2001. *Performance for Hot Mix Asphalt (Executive Summary)*. NCAT Report 01-05 A. National Center for Asphalt Technology, Auburn University

Coetzee, N. F., Nokes, W., Monismith, C., Metcalf, J., and Mahoney, J. 2001. *Full-Scale/Accelerated Pavement Testing: Current Status and Future Directions*. A2B52: Task Force on Full-Scale/Accelerated Pavement Testing.

Cooley, L.A., Kandhal, P.S., Buchanam, M.S., Fee, F. and Epps, A. 2000. *Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice*. Transportation Research E-Circular No. E-C016, NCAT Report 00-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University

Corte ,J.F., Brosseaud Y., Simoncelli ,J.P. and Carrof ,G. 1994. Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration. *Transportation Research Record* 1436(136):28-37

Cubler, R., Kunzer, S. and Partl, M.N. 2004. Comparison rutting behavior on test sections and circular test track using a mobile load simulator. *Proceedings of the 1st International Symposium. on Design and Construction of Long Lasting Asphalt*. ISAP Auburn June 7– 9, 2004, pp:1–14

EN 12697-22 :2003+A1 :2007 Bituminous mixtures –Test method for Hot –mix asphalt Part 22: Wheel tracking test

EN 12697-33 :2003 Bituminous mixtures –Test method for Hot –mix asphalt Part 33 :Specimen prepared by roller compactor

EN 12697-25 :2002 Bituminous mixtures –Test methods for Hot –mix asphalt Part 25 :Dynamic Creep test

EN 13108-01:2009 Bituminous mixtures-Material specifications-Part 1:Asphalt Concrete

Epps, J. A., Leahy, R. B., Mitchell, T., Ashmore, C., Seeds, S., Alavi, S. and Monismith, C. L.1999.WESTRACK—the road to performance-related specifications. *Proceedings of the International Conference on Accelerated Pavement Testing*, October 1999 .Reno, NV

Fung , W. Y.2009.*Evaluation of Rutting on Different Types of Hot Mix Asphalt Gradation with Modified Bitumen as Bitumen*. Ph.D.thesis, The University of Technology, Malaysia

Hugo, F.1996.*Executive Summary report on the production of the Prototype Texas Mobile Load Simulator*. Research Report 1978-2F. Austin: Center for Transportation Research, University of Texas

Kandhal, P. S. and Cooley, L.A. 2003. *Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer*. National Cooperative Research Program Report 508, Washington, DC: Transportation Research Board

Kim, Y. R. , Park, H. M., Aragão, T. F.S. and Lutfi, J. E. S.2008. Effects of aggregate structure on hot-mix asphalt rutting performance in low traffic volume local pavements. *Construction and building materials* 23(6):2177-2182

Masad, E. , Olcott , D., White,T. and Tashman, L.2001. Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. *Journal of the Transportation Research Board* Volume 1757(172):148-156

Maupin, G.W. and Mokarem, D.W.2006.*Investigation of proposed AASHTO rut test procedure using the Asphalt Pavement Analyzer*. Virginia Transportation Research Council (VTRC) 07-R11 , Charlottesville: Virginia.

Powell P.E.2008. Comparing rutting performance under a Heavy Vehicle Simulator to rutting performance at the NCAT pavement test track. *Proceedings for Third International Conference on Accelerated Pavement Testing*. The National Center for Asphalt Technology.February 2008,Austin

Shami, H. I., Lai, J. S., D'Angelo, J. A. and Harmon. T. P. 1997. Development of Temperature Effect Model for Predicting Rutting of Asphalt Mixtures Using Georgia Loaded Wheel Tester. *Journal of the Transportation Research Board* 1590(122):17-22.

Tarefder, R.A. and Zaman, M. 2003. A Laboratory and Statistical Evaluation of Factors Affecting Rutting . *International Journal of Pavement Engineering* 4(1):59-68

Uzarowski L., Paradis M. and Lum P. 2004. Accelerated Performance of Testing of Canadian Asphalt Mixes Using Three Different Wheel Rut Testers. *At the Accelerated Field and Laboratory Pavement Testing Session of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*. Quebec City: Quebec

Λοΐζος Α. 2008. *Σημειώσεις οδοστρωμάτων*. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών .Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο