



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ



ΜΑΝΤΕΚΑΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΛΑΤΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, καθηγητή ΕΜΠ, που μου ανέθεσε την παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, Λέκτορα ΕΜΠ, για την καθοδήγηση της και την πολύτιμη βοήθεια της.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Κωνσταντίνα Γεωργούλη, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, η οποία συνέβαλε τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας με την καθημερινή καθοδήγηση της και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου, για την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφεραν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της συσχέτισης του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) με το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (E^*) ασφαλτομιγμάτων. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν δοκίμια Marshall αντιολισθηρής στρώσης και στη συνέχεια προσδιορίστηκε εργαστηριακά το ITSM και εκτιμήθηκε το E^* που προκύπτει από τη χρήση του πιο διαδεδομένου αλγόριθμου πρόβλεψης, του Witczak 1-37A. Μέσω της ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων, αναπτύχθηκε ένα στατιστικό προσομοίωμα για το συσχετισμό των δύο παραπάνω μεγεθών και διερευνήθηκε η προσαρμογή του σε ασφαλτόμιγμα αντιολισθηρής στρώσης συγκεκριμένης σύνθεσης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οδοστρωμάτων στην Ελλάδα. Επίσης, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης του εργαστηριακού E^* και του E^* που προκύπτει από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το μίγμα αντιολισθηρής στρώσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

ABSTRACT

The aim of the present Diploma Thesis is the investigation of the correlation between Indirect Tensile Stiffness Modulus (ITSM) and dynamic modulus (E^*) of hot mix asphalt mixtures. For this purpose, hot mix asphalt Marshall specimens of antiskid wearing course were prepared. ITSM was determined in the laboratory and E^* was estimated through Witczak 1-37A prediction algorithm, which is one of the most widely used algorithm. Through the analysis of the experimental data, a statistical model was developed for the correlation of the above mentioned moduli. Also, the fitness of the model for a particular antiskid wearing course mix used in Greece was investigated. Finally, a preliminary investigation was performed concerning the correlation of E^* determined in the laboratory and E^* estimated by the Witczak 1-37A algorithm for the aforementioned asphalt mix. The relevant results and conclusions are included in the present Diploma Thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενική ανασκόπηση	1
1.2	Στόχος-Μεθοδολογία	2
1.3	Δομή	3
2	ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	4
2.1	Γενικά	4
2.2	Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus:ITSM)	6
2.3	Μέτρο επανάταξης (Resilient modulus)	8
2.4	Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Dynamic Modulus)	11
2.4.1	Γενικά	11
2.4.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός του E^*	13
2.4.3	Αλγόριθμοι πρόβλεψης του E^*	14
2.4.3.1	Αλγόριθμος πρόβλεψης Witczak 1-37A	15
2.4.3.2	Αλγόριθμος πρόβλεψης Hirsch	17
2.4.3.3	Αλγόριθμος πρόβλεψης Witczak 1-40D	17
3	ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	20
3.1	Γενικά	20
3.2	Παρασκευή δοκιμών κατά Marshall	20
3.2.1	Προσδιορισμός ιδιοτήτων αδρανών και ασφάλτου	21
3.2.1.1	Δοκιμή Los Angeles	21
3.2.1.2	Δοκιμή Ισοδύναμου Άμμου	22
3.2.1.3	Δοκιμή μάλθωσης	23
3.2.1.4	Δοκιμή διείσδυσης	23
3.2.1.5	Δοκιμή ολκιμότητας	24
3.2.1.6	Δοκιμή ελαστικής επαναφοράς	25
3.2.2	Παρασκευή δοκιμών Marshall	25
3.2.3	Έλεγχος δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση	25
3.2.4	Υπολογισμός βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου	26
3.2.4.1	Μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος ασφαλτομίγματος	26
3.2.4.2	Φαινόμενο ειδικό βάρος (Φ.Ε.Β.) δοκιμών Marshall	27

3.2.4.3	Προσδιορισμός ποσοστού κενών	27
3.2.5	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το διαβάση	28
3.2.6	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το γάββρο	31
3.2.7	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς τη σκωρία	34
3.2.8	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το σπηλίτη	37
3.3	Παρασκευή δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο	40
4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	46
4.1	Γενικά	46
4.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός ITSM	46
4.2.1	Δοκίμια Marshall	46
4.2.2	Δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου	49
4.3	Προσδιορισμός E^* με χρήση αλγορίθμων	49
4.3.1	Δοκίμια Marshall	49
4.3.2	Δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου	50
4.4	Εργαστηριακός προσδιορισμός E^*	51
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	55
5.1	Γενικά	55
5.2	Συσχέτιση του ITSM με το E^*_{1-37A} - Δοκίμια Marshall	55
5.2.1	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου I	55
5.2.2	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου II	56
5.2.3	Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου III	57
5.2.4	Γενική συσχέτιση του ITSM με το E^*_{1-37A}	58
5.2.5	Διερεύνηση προσαρμογής μοντέλου	65
5.3	Συσχέτιση του E^*_{1-37A} με το E^*_{LAB}	68
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	76

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Η διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των παχών των επί μέρους στρώσεων καθώς και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται οι στρώσεις αυτές. Μια από τις βασικές παραμέτρους που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος από το οποίο αποτελούνται οι ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος (ασφαλτικές στρώσεις).

Η παράμετρος αυτή αποτελεί σημαντική συνιστώσα στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων τόσο κατά το σχεδιασμό του μίγματος, όσο και για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς όχι μόνο των ασφαλικών στρώσεων αλλά και του συνόλου του οδοστρώματος, καθώς ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη θέση αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.

Οι μέθοδοι διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων έχουν βασιστεί σε εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες είναι προϊόν του πειράματος AASHTO. Το πείραμα AASHTO πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '50, σε πειραματικά οδοστρώματα συγκεκριμένης δομής και υλικών, των οποίων η καταπόνηση λόγω κυκλοφορίας ήταν μέτρια. Όμως, στη σύγχρονη αντίληψη, ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος περιλαμβάνει το ρυθμό αύξησης της κυκλοφορίας, τις ιδιότητες των υλικών, τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες κ.α., ενώ το μέγεθος των φορτίων τα οποία καταπονούν τα οδοστρώματα που κατασκευάζονται στις μέρες μας διαφέρει αρκετά από αυτό που λήφθηκε υπόψη κατά το πείραμα AASHTO. Η διαφοροποίηση των φορτίων που καλείται να εξυπηρετήσει ένα οδόστρωμα αφενός και η εξέλιξη των υλικών αλλά και των μέσων και του τρόπου κατασκευής των οδοστρωμάτων αφετέρου, επέβαλλαν την ανάγκη της εξέλιξης της μεθόδου του AASHTO και της ανάπτυξης μιας νέας μεθόδου για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη μιας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού των οδοστρωμάτων γνωστή ως MEPDG (Mechanistical Empirical Pavement Design Guide) υπό την αιγίδα του οργανισμού NCHRP (National Cooperative Highway Research Program).

Η νέα εξελιγμένη μέθοδος σχεδιασμού των οδοστρωμάτων απαιτεί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (E^*) του ασφαλτομίγματος σαν παράμετρο υπολογισμού. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, το οποίο εξ' ορισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης, προσομοιώνει πιο εύστοχα την επίδραση της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται είτε απ' ευθείας (εργαστηριακά) είτε με τη χρήση αλγορίθμων. Όμως ο εργαστηριακός προσδιορισμός του απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και είναι αρκετά χρονοβόρος. Υπό το πρίσμα αυτό, καθίσταται ευκολότερη η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω των αλγορίθμων πρόβλεψης. Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος πρόβλεψης είναι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A, η χρήση του οποίου προτείνεται και από τον AASHTO.

Με την εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σαν βασικό μηχανικό χαρακτηριστικό του ασφαλτομίγματος στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, προκύπτει μια ασυνέπεια ως προς τις παραμέτρους, και συγκεκριμένα ως προς το μέτρο δυσκαμψίας, που λαμβάνονταν υπόψη διαχρονικά. Η πιο διαδεδομένη δοκιμή για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας ήταν και εξακολουθεί να είναι αυτή του έμμεσου εφελκυσμού, από όπου προκύπτει το αντίστοιχο μέτρο δυσκαμψίας ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus). Επομένως, κατά τη διάρκεια των περασμένων χρόνων και ως σήμερα, έχει δημιουργηθεί μια μεγάλη βάση δεδομένων που περιλαμβάνει στοιχεία του ITSM.

Η υιοθέτηση του νέου οδηγού (MEPDG) για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων και κατ' επέκταση η μετάβαση από το μέτρο δυσκαμψίας ITSM στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθιστά παρωχημένα τα στοιχεία του ITSM, εκτός αν αναπτυχθεί μια μεθοδολογία που θα επιτρέπει τη μετάβαση από το ένα στο άλλο.

1.2 Στόχος-Μεθοδολογία

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας ITSM, το οποίο προσδιορίζεται εργαστηριακά, και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας το οποίο προκύπτει από τον αλγόριθμο πρόβλεψης Witczak 1-37A όπως αυτός ορίζεται στον οδηγό MEPDG. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν 112 δοκίμια Marshall ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης, τα οποία υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του ITSM και στη συνέχεια εκτιμήθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μέσω του προαναφερθέντος αλγορίθμου πρόβλεψης. Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων οδήγησε στην ανάπτυξη ενός στατιστικού προσομοιώματος, το οποίο περιγράφει τη συσχέτιση των υπόψη μέτρων δυσκαμψίας. Επίσης, πραγματοποιήθηκε έλεγχος ως προς την προσαρμογή του μοντέλου σε ασφαλτόμιγμα συγκεκριμένης σύνθεσης αντίστοιχης των ασφαλτομιγμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της αντιολισθηρής στρώσης των οδοστρωμάτων στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν 4 νέα δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης με τη γυροσκοπική μέθοδο, τα οποία θεωρούνται αντιπροσωπευτικά του υπόψη μίγματος.

Η παρασκευή των δοκιμών αυτών με τη γυροσκοπική μέθοδο εξυπηρετεί και τον επιμέρους στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο οποίος είναι η προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που εκτιμάται από τον αλγόριθμο πρόβλεψης Witczak 1-37A. Η υπόψη διερεύνηση αφορά μόνο στο συγκεκριμένο μίγμα το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αντιπροσωπευτικό των μιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης στη χώρα μας.

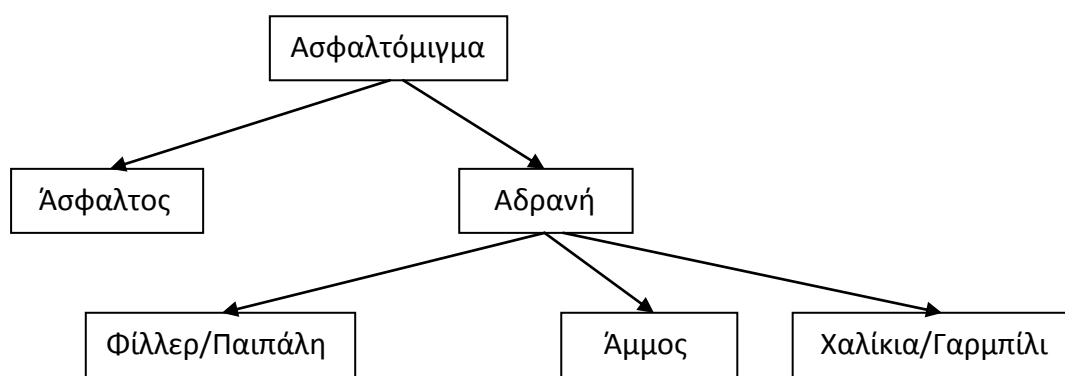
1.3 Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με αφετηρία το παρόν κεφάλαιο, περιλαμβάνει συνολικά επτά κεφάλαια. Αρχικά γίνεται αναφορά στη σημασία του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος και περιγράφονται οι πιο διαδεδομένες εκφράσεις του με ιδιαίτερη έμφαση στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, για τον υπολογισμό του οποίου παρουσιάζονται και οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, περιγράφεται η μεθοδολογία παρασκευής των δοκιμών Marshall τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη του κύριου στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και η διαδικασία παρασκευής των γυροσκοπικών δοκιμών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα (Κεφάλαιο 3). Οι εργαστηριακές μετρήσεις και οι επικουρικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων περιλαμβάνονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Ακολουθεί το Κεφάλαιο 5, όπου παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων συλλογής. Τα συμπεράσματα που αφορούν στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύσσονται εκτενώς, ανακεφαλαιώνοντας τους στόχους και τα αποτελέσματα της έρευνας (Κεφάλαιο 6). Η ανάπτυξη των εδαφίων υποστηρίζεται από σχετική διεθνή βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 7), ενώ τα στοιχεία των αναλύσεων περιλαμβάνονται στο παράρτημα.

2 ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

2.1 Γενικά

Ως ασφαλτόμιγμα ορίζεται το μίγμα ασφάλτου και αδρανών. Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί παριστάνεται γραφικά η σύσταση του ασφαλτομίγματος:



Σχήμα 2.1: Γενική μορφή σύστασης ασφαλτομίγματος

Η άσφαλτος και τα αδρανή έχουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Η άσφαλτος έχει ιξωδοελαστική συμπεριφορά, κάτω από συνήθεις συνθήκες φόρτισης και τα συμπυκνωμένα αδρανή παρουσιάζουν ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει και ως εκ τούτου το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται και αυτό ως ιξωδοελαστικό υλικό. Επομένως, η συμπεριφορά του εξαρτάται από τον χρόνο φόρτισης (t) και τη θερμοκρασία (T). Παράλληλα όμως, η επιπόνηση του υλικού στην πράξη είναι ως επί το πλείστον δυναμική.

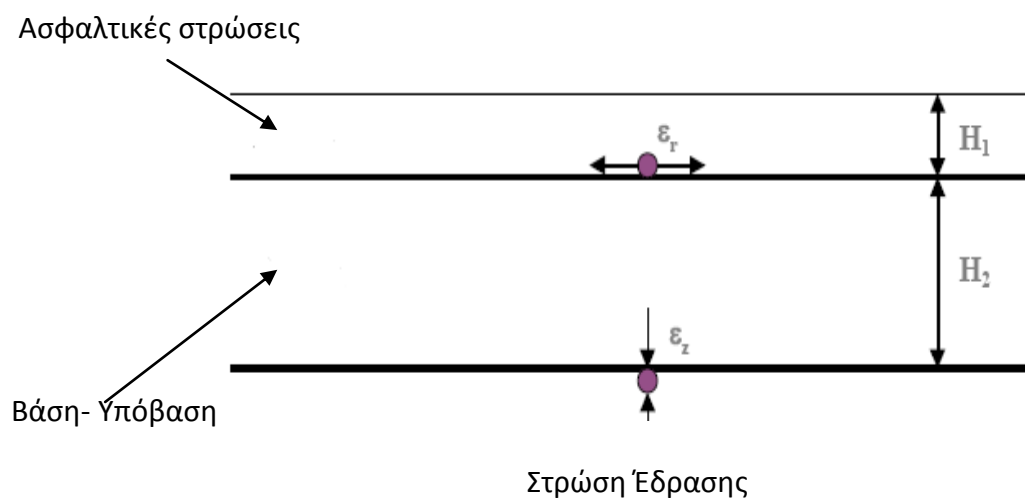
Μια από τις πλέον χαρακτηριστικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος είναι το μέτρο δυσκαμψίας του (s_m) και υπολογίζεται από την παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση (2.1) (Λοΐζος 2013).

$$s_m = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right)_{T,t} \quad (2.1)$$

όπου σ είναι η επιβαλλόμενη τάση και ε η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση.

Το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται όσο αυξάνει η συχνότητα φόρτισης.

Το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απομείωση των τάσεων που παραλαμβάνουν οι υποκείμενες στρώσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο δυσκαμψίας τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των τάσεων. Επομένως, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στο πλαίσιο του σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς η απομείωση των τάσεων θα πρέπει να είναι επαρκής έτσι ώστε να μην επέλθει αστοχία στις δυο κρίσιμες θέσεις οι οποίες είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (σχήμα 2.2). Τα κρίσιμα μεγέθη στις θέσεις αυτές είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις ϵ_r και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις ϵ_z , αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων έχει αναπτυχθεί πλήθος εργαστηριακών δοκιμών καθώς και αλγορίθμων, οδηγώντας στην ύπαρξη διαφορετικών εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας.

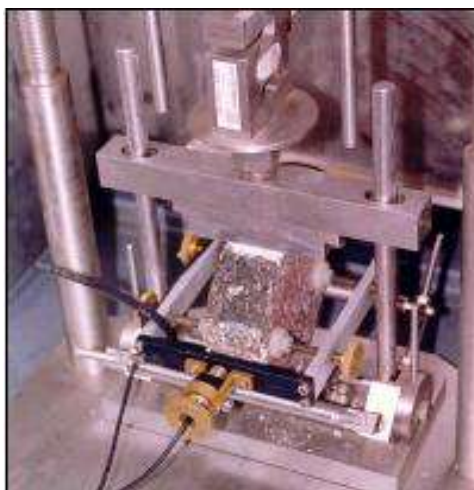
Οι κυριότερες και πιο ευρέως διαδεδομένες εκφράσεις του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος είναι:

- Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM)
- Το μέτρο επανάταξης (Resilient Modulus)
- Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Dynamic Modulus)

2.2 Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM)

Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού ITSM προκύπτει από τα αποτελέσματα της αντίστοιχης δοκιμής (Indirect Tensile Stiffness Modulus Test). Πρόκειται για μια απλή, εύκολη και γρήγορη εργαστηριακή δοκιμή η οποία εφαρμόζεται για πολλά χρόνια σε διάφορες χώρες της Ευρώπης και περιγράφεται στα πρότυπα του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης (ΕΛΟΤ).

Κατά τη δοκιμή αυτή σε κυλινδρικό δοκίμιο επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο κατά μήκος δύο αντίθετων γενετειρών. Αυτό προκαλεί μια ομοιόμορφη εφελκυστική τάση κάθετη και κατά μήκος του διαμετρικού επιπέδου του εφαρμοζόμενου φορτίου και απόσχιση που εμφανίζεται γενικά κατά μήκος του διαμετρικού επιπέδου (Yoder & Witczak 1975).



Εικόνα 2.1: Δοκιμή ITSM

Κατά το οριζόντιο διαμετρικό επίπεδο η εντατική κατάσταση δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d} \left[\frac{d^2 - 4x^2}{d^2 + 4x^2} \right]^2 \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = - \frac{2P}{\pi t d} \left[\frac{4d^2}{(d^2 + 4x^2)} - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Κατά το κατακόρυφο διαμετρικό επίπεδο οι τάσεις περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi t d} = \text{σταθερά} \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{2}{d-2y} + \frac{2}{d+2y} - \frac{1}{d} \right] \quad (2.5)$$

$$\tau_{xy} = 0$$

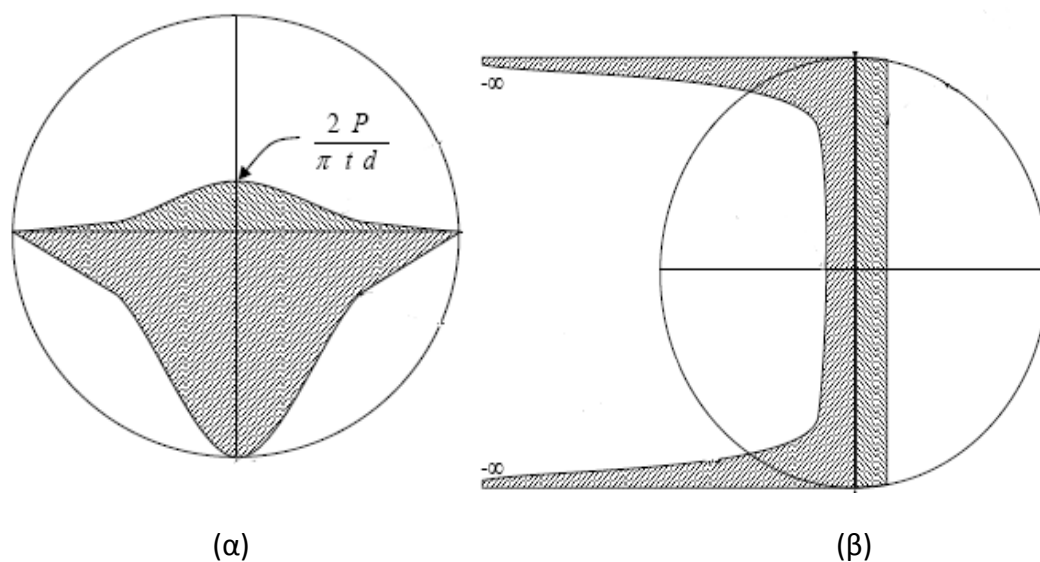
Όπου

P= ολικό εφαρμοζόμενο φορτίο

t= πάχος δοκιμίου

d= διάμετρος δοκιμίου

x,y= τιμές συντεταγμένων από το κέντρο του δοκιμίου



Σχήμα 2.3: α) Κατανομή τάσεων κατά τη δοκιμή του ITSM στο οριζόντιο και β) στο κατακόρυφο επίπεδο

Οι παραπάνω εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί από τον Frocht για ένα ιδεατό ελαστικό στερεό. Για τα περισσότερα υλικά κατασκευών, αρχική αστοχία συμβαίνει λόγω

εφελκυστικής απόσχισης. Επομένως, η εφελκυστική αντοχή δίνεται από την εξίσωση (2.4).

Στην πράξη, το εφαρμοζόμενο φορτίο κατανέμεται σε μια ορισμένη περιοχή φορτιζόμενων λωρίδων. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι το πλάτος και ο τύπος της φορτιζόμενης λωρίδας παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο κατανομής των τάσεων μέσα στο δοκίμιο. Επίσης, αν και τα αποτελέσματα φαίνεται να είναι γενικά ανεξάρτητα από το λόγο του μήκους προς τη διάμετρο, ωστόσο το μέγεθος του δοκιμίου έχει επίδραση πάνω σε αυτά (Yoder & Witczak 1975).

Με βάση τη δοκιμή του ITSM, το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικού υλικού μπορεί να προσδιορισθεί από τον εξής τύπο (Sunarjono 2007):

$$ITSM = \frac{L (\nu + 0.27)}{Dt} \quad (2.6)$$

Όπου

ITSM= μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (MPa)

L= μέγιστο εφαρμοζόμενο κατακόρυφο φορτίου (N)

D= μέσο πλάτος της οριζόντιας παραμόρφωσης (mm)

t= μέσο πάχος του δοκιμίου (mm)

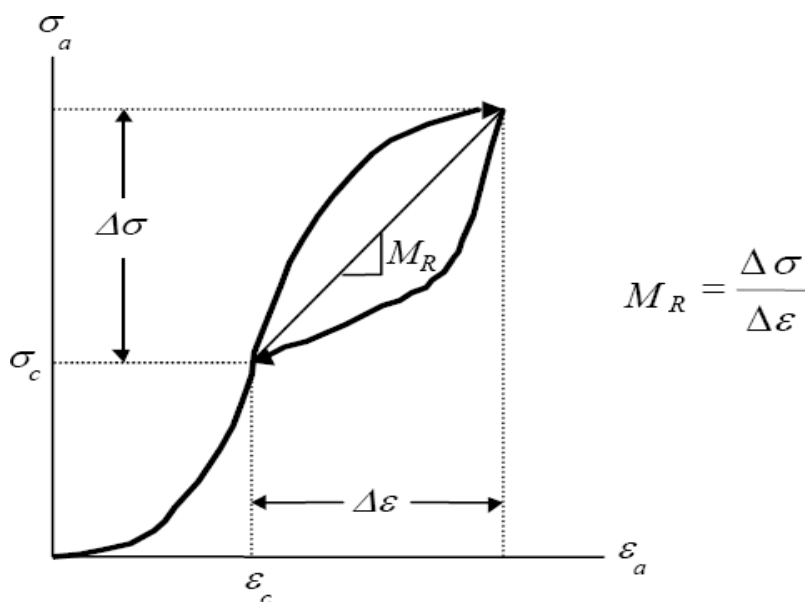
ν = λόγος του Poisson ο οποίος για ασφαλτικά μίγματα ισούται με 0.35

Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) χρήζει ευρείας αποδοχής και χρησιμοποιείται διεθνώς σαν βασική παράμετρος στο πλαίσιο του προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων. Ως εκ τούτου, αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.3 Μέτρο επανάταξης (Resilient modulus)

Το μέτρο επανάταξης M_R προκύπτει από μια δυναμική δοκιμή και ορίζεται ως ο λόγος της επαναλαμβανόμενης αξονικής τάσης σ_d προς την ανακτηθείσα αξονική παραμόρφωση ε_a . (Yoder & Witczak 1975)

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.4: Μέτρο επανάταξης M_R

Το μέτρο επανάταξης θεωρείται ότι χαρακτηρίζει τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών οδοστρώσις. Χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α για αμμοχάλικα και για ασφαλικά υλικά. Ο προσδιορισμός του πραγματοποιείται είτε εργαστηριακά είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων (Moossazadeh & Witczak 1981, Dunlap 1963, Seed et al. 1967, May & Witczak 1981, Uzan 1985).

Η δοκιμή διεξάγεται σε μια τριαξονική συσκευή κατάλληλη για συνθήκες επαναληπτικής φόρτισης. Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι συνήθως 10cm διάμετρος και 20cm ύψος. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του μέτρου επανάταξης είναι το ελαστικό τμήμα αυτής, δηλαδή αυτή που ανακτάται (recoverable strain).



Εικόνα 2.2: Δοκιμή μέτρου επανάταξης

Κατά τη δοκιμή ένα επαναληπτικό (παλμικό) φορτίο εφαρμόζεται διαμετρικά στο δοκίμιο. Το δυναμικό φορτίο προκαλεί δυναμικές παραμορφώσεις κατά το οριζόντιο διαμετρικό επίπεδο. Οι παραμορφώσεις αυτές καταγράφονται από αισθητήρες προσαρτημένους σε κάθε πλευρά του οριζόντιου άξονα του δοκιμίου. Δεδομένου του δυναμικού φορτίου και της παραμόρφωσης υπολογίζεται η τιμή του M_R .

Η κατανομή των τάσεων σ_x και σ_y για ένα ιδανικό ελαστικό υλικό που υπόκειται σε διαμετρικό φορτίο περιγράφεται από τις εξισώσεις 2.2 και 2.3. Με την παραδοχή επίπεδων τάσεων ($\sigma_z=0$) η παραμόρφωση που προκύπτει είναι:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu \sigma_y] = \frac{2P}{E\pi t d} \frac{d^4 (1 + 5\nu) - 8x^2 d^2 (1 - 3\nu) + 16x^4 (1 + \nu)}{(d^2 + 4x^2)^2} \quad (2.8)$$

Η παραμόρφωση κατά την έννοια του οριζόντιου διαμετρικού επιπέδου ($y=0$) βρίσκεται ολοκληρώνοντας την εξίσωση 2.8. Η οριζόντια παραμόρφωση που προκύπτει είναι:

$$\delta_h = \frac{P}{Et} \left[\frac{4}{\pi} + \nu - 1 \right] \quad (2.9)$$

Έτσι για ένα δυναμικό φορτίο P όπου μετράται η οριζόντια δυναμική παραμόρφωση το μέτρο ή η τιμή M_R είναι:

$$M_R = \frac{P (\nu + 0.2734)}{t \delta_h} \quad (2.10)$$

Για ασφαλτικά υλικά χρησιμοποιείται συνήθως για το λόγο του Poisson (ν) η τιμή $\nu=0,35$. Παρεκκλίσεις από την τιμή αυτή δεν επηρεάζουν σημαντικά την τιμή του M_R .

Το M_R χρησιμοποιείται κυρίως για βάσεις και υποβάσεις και λιγότερο για ασφαλτικές στρώσεις. Αναπαριστά μια βασική ιδιότητα του υλικού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη παραμέτρων όπως οι αυλακώσεις και η τραχύτητα (Purpala 2007).

2.4 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Dynamic Modulus)

Τα τελευταία χρόνια στο πλαίσιο του σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, λαμβάνεται υπόψη το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (E^*). Η εισαγωγή της έννοιας του E^* έχει σαν στόχο την αποτύπωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος η οποία επιτυγχάνεται μέσω της ποσοτικοποίησης της επίδρασης της θερμοκρασίας και της συχνότητας φόρτισης στη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος υπό δυναμική φόρτιση. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε διάφορες ταχύτητες κίνησης των οχημάτων και θερμοκρασίες.

2.4.1 Γενικά

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προκύπτει από τη μέτρηση της αντίστασης σε παραμόρφωση υπό ημιτονοειδή φόρτιση και ισούται με την απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας. Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας είναι ένας μιγαδικός αριθμός που αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό μέρος, το οποίο αφορά στην ελαστική δυσκαμψία και το φανταστικό μέρος το οποίο αφορά στην εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang 1993).

Το μιγαδικό μέτρο είναι εξ ορισμού (Yoder & Witczak 1975):

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.11)$$

Όπου:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi$$

και αναφέρεται στο πραγματικό μέρος του μιγαδικού μέτρου

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi$$

και αναφέρεται στο φανταστικό μέρος του μιγαδικού μέτρου

i = ένας φανταστικός αριθμός

Τα E' και E'' αναφέρονται στην αποθηκευμένη ενέργεια που αντιπροσωπεύει το ελαστικό τμήμα και την ενέργεια που διασκορπίζεται σαν θερμότητα που αντιπροσωπεύει το μη ελαστικό τμήμα, αντίστοιχα. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται ως storage modulus και loss modulus, αντίστοιχα (Meyers & Chawla 1999).

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθορίζεται από τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση και τη μέγιστη τιμή της μη παραμένουσας αξονικής παραμόρφωσης, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση 2.12 (Huang 1993). Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και

το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι η απόλυτη τιμή του μιγαδικού μέτρου $|E^*|$, συμβολίζεται απλά ως E^* .

$$E^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.12)$$

Όπου:

$|E^*|$ = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi)

σ_0 = εύρος τάσης (psi)

ε_0 = εύρος παραμόρφωσης (psi)

φ = γωνία υστέρησης (ακτίνια)

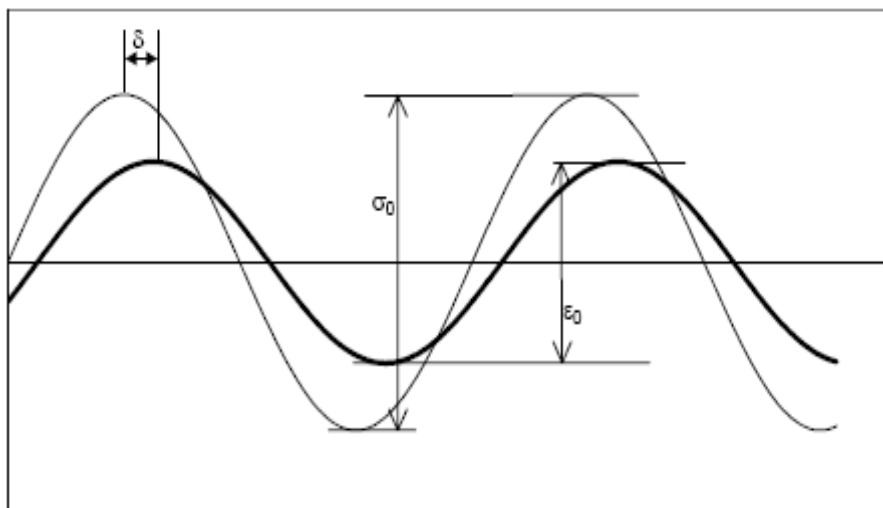
Η γωνία υστέρησης περιγράφει την καθυστέρηση στην επαγόμενη αξονική παραμόρφωση σε σχέση με την εφαρμοζόμενη θλιπτική τάση όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.5, όπου ο ημιτονοειδής εντατικός παλμός ορίζεται από την γωνιακή ταχύτητα, ω και τον χρόνο t . Αυτή η υστέρηση φάσεως αντανακλά την εξάρτηση των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος από τον χρόνο. Δεδομένης της σχέσης μεταξύ χρόνου-συχνότητας, συμπεραίνεται ότι οι ιδιότητες του ασφαλτομίγματος εξαρτώνται από την συχνότητα της φόρτισης. Ο εντατικός παλμός και η προκύπτουσα παραμόρφωση εξαρτώνται και οι δύο από την γωνιακή συχνότητα η οποία είναι με τη σειρά της μια συνάρτηση της συχνότητας φόρτισης (Robbins 2009):

$$\omega = 2\pi f \quad (2.13)$$

Όπου:

ω = γωνιακή συχνότητα (rad/sec)

f = συχνότητα φόρτισης (Hz)



Σχήμα 2.5: Διαφορά φάσης μεταξύ ημιτονοειδούς έντασης και της επαγόμενης παραμόρφωσης

Η ημιτονοειδής τάση σ ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad (2.14)$$

ενώ η ημιτονοειδής παραμόρφωση ε ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.15)$$

Η γωνία υστέρησης ορίζεται:

$$\varphi = \delta = \frac{t_i}{t_p} (360^\circ) \quad (2.16)$$

Όπου:

t_i είναι η χρονική διαφορά ανάμεσα σε ένα κύκλο ημιτονοειδούς τάσης και

t_p είναι ο χρόνος για ένα κύκλο εφαρμοζόμενης τάσης και ένα κύκλο παραμόρφωσης

Για καθαρά ελαστικά υλικά η γωνία υστέρησης μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης είναι μηδέν ($\varphi=0^\circ$) δηλαδή η μέγιστη παραμόρφωση συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη τάση. Για καθαρά ιξώδη υλικά η γωνία υστέρησης είναι $\varphi=90^\circ$. Τα ιξωδοελαστικά υλικά, όπως είναι το ασφαλτόμιγμα, επιδεικνύουν συμπεριφορά περίπου ενδιάμεση (Garcia & Thompson 2007).

2.4.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός του E^*

Κατά την υπόψη δοκιμή κατάλληλα προετοιμασμένα δοκίμια υποβάλλονται σε δυναμική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής σε διάφορες θερμοκρασίες και

συχνότητες φόρτισης. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προκύπτει από το λόγο της εφαρμοζόμενης τάσης προς την ανακτηθείσα παραμόρφωση για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας. Εκτενής περιγραφή της δοκιμής ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 2.3: Δοκιμή δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του E^* απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό και είναι χρονοβόρος. Η σπουδαιότητα του E^* αφενός και η πολυπλοκότητα του εργαστηριακού προσδιορισμού του αφετέρου, οδήγησαν στην ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης του E^* .

Στη συνέχεια αναφέρονται οι πιο ευρέως διαδεδομένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του E^* που χρησιμοποιούνται διεθνώς.

2.4.3 Αλγόριθμοι πρόβλεψης του E^*

Η ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης του E^* λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες και την ογκομετρική ανάλυση του μίγματος έχει αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης πολλών δεκαετιών. Οι αλγόριθμοι πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν τα τελευταία 60 χρόνια, σύμφωνα με τους Bari & Witczak (2006) παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Αλγόριθμοι πρόβλεψης E^* των τελευταίων 60 ετών

Μοντέλο πρόβλεψης	Έτος
Van der Poel	1954
Bonnaure	1977
Shook and Kallas	1969
Witczak	1972
Witczak and Shook	1978
Witczak	1981
Witczak, Miller and Uzan	1983
Witczak and Akhter	1984
Witczak, Leahy, Caves and Uzan	1989
Witczak and Fonseca	1996
Andrei, Witczak and Mirza	1999
Hirsch of Christensen, Pellinen and Bonaquist	2003

Οι Bonnaure et al. (1977) ανέπτυξαν ένα νομογράφημα βασισμένο στα αποτελέσματα της έρευνας του Van der Poel, με το οποίο εκτιμάται το E^* από τον όγκο της ασφάλτου, τον όγκο των αδρανών και το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου. Αυτό το νομογράφημα αναφέρεται συνήθως ως το νομογράφημα της Shell.

Οι τρεις πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του E^* είναι:

- Η εξίσωση των Andrei, Witczak και Mirza (1999) γνωστή ως Witczak 1-37A
- Η εξίσωση Hirsch των Christensen, Pellinen και Bonaquist (2003)
- Η αναθεωρημένη εξίσωση του Witczak (2006) γνωστή ως Witczak 1-40D

2.4.3.1 Αλγόριθμος πρόβλεψης Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος των Andrei, Witczak και Mirza (Witczak 1-37A) αναπτύχθηκε το 1999 και αποτελεί την ανανεωμένη εκδοχή του προγενέστερου προσομοιώματος πρόβλεψης του E^* από τους Witczak και Fonseca το 1996. Συνδυάζει στοιχειώδεις ογκομετρικές ιδιότητες και κοκκομετρικές διαβαθμίσεις του ασφαλτομίγματος με το ιώδες της ασφάλτου και τη συχνότητα φόρτισης, σε μια προσαρμοσμένη σιγμοειδή συνάρτηση. Επομένως, μέσω αυτής το E^* εκτιμάται σε οποιαδήποτε συχνότητα και θερμοκρασία. Η ανάπτυξη του αλγορίθμου Witczak 1-37A στηρίχθηκε στα αποτελέσματα του προγενέστερου προσομοιώματος καθώς επίσης και σε αυτά που προέκυψαν από τον εμπλουτισμό των μίγμάτων. Έτσι, δημιουργήθηκε μια νέα βάση δεδομένων από 56 επιπλέον μίγματα, 34 εκ των οποίων περιείχαν τροποποιημένη άσφαλτο. Πιο συγκεκριμένα, η αναθεωρημένη βάση δεδομένων περιλαμβάνει εργαστηριακά αποτελέσματα του E^* τα οποία προέκυψαν από τον έλεγχο δοκιμίων

με διαφορετικές διαβαθμίσεις αδρανών και μεγάλο εύρος τιμών του ιξώδους της ασφάλτου. Επίσης, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για πέντε θερμοκρασίες σε σύνολο είκοσι μίγμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της προγενέστερης βάσης δεδομένων καθώς και αυτά που προέκυψαν από τις επιπλέον δοκιμές, προέκυψε ο αναθεωρημένος αλγόριθμος ο οποίος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.0802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(n))}} \quad (2.17)$$

Όπου

E^* = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του μίγματος (10^5 psi)

n = ιξώδες της ασφάλτου (10^6 poise)

f = συχνότητα φόρτισης (Hz)

ρ_{200} = % διερχόμενο από το κόσκινο #200

ρ_4 = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο #4

ρ_{38} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/8 in.

ρ_{34} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/4 in.

V_a = κενά αέρος % κατ' όγκο

V_{beff} = ενεργό ποσοστό ασφάλτου % κατ' όγκο

Στην παραπάνω εξίσωση το ιξώδες της ασφάλτου προσδιορίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας μέσω της γραμμικής σχέσης μεταξύ του διπλού λογάριθμου του ιξώδους και του λογάριθμου της θερμοκρασίας (εξίσωση 2.18). Από το διάγραμμα διασποράς των δύο παραπάνω μεγεθών και την εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης προκύπτουν οι συντελεστές VTS και A, όπου το VTS είναι η κλίση της γραμμής και το A το σημείο τομής.

$$\log \log n = A + VTS \log T_R \quad (2.18)$$

Όπου

n = ιξώδες της ασφάλτου (centipoise)

A, VTS= παράμετροι παλινδρόμησης

T_R = θερμοκρασία (° Rankine)

2.4.3.2 Αλγόριθμος πρόβλεψης Hirsch

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Hirsch, η εκτίμηση του E^* πραγματοποιείται μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου, G_b^* , και των ογκομετρικών ιδιοτήτων του μίγματος. Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων από 18 διαφορετικά μίγματα. Το υπόψη προσομοίωμα είναι κατ'ουσίαν ένα απλό τριφασικό σύστημα από αδρανή, ασφαλτο και κενά αέρος. Δεδομένης της στενής επαφής μεταξύ των αδρανών, εισάγεται η έννοια του όγκου επαφής αδρανών (P_c). Η εξάρτηση του ασφαλτομίγματος από τη θερμοκρασία αναπαριστάται μερικώς από το P_c έτσι ώστε υψηλές τιμές του να σχετίζονται με μίγματα με μεγάλη δυσκαμψία και αντοχή και οι χαμηλές τιμές να αντιστοιχούν σε μικρή δυσκαμψία και αντοχή (Robbins 2009).

$$|E^*|_{max} = P_c \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_b \left(\frac{VFA \times VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - (VMA/100)}{4200000} + \frac{VMA}{3VFA|G^*|_b} \right]^{-1} \quad (2.20)$$

όπου

$$P_c (\text{όγκος επαφής αδρανών}) = \frac{\left(20 + \frac{VFA \times 3|G^*|_b}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \times 3|G^*|_b}{VMA} \right)^{0.58}}$$

$|E^*|$ = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi)

VMA= κενά στο σκελετό των αδρανών

VFA= κενά πληρωμένα με ασφαλτο σε συμπυκνωμένο ασφαλτόμιγμα

G_b^* = διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (psi)

2.4.3.3 Αλγόριθμος πρόβλεψης Witczak 1-40D

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου Witczak 1-40D αποτελεί την πιο πρόσφατη αναθεώρηση του προγενέστερου μοντέλου (Witczak 1-37A). Τα στοιχεία που αποτελούν κοινό παράγοντα στα δυο προσομοιώματα είναι το ποσοστό κενών, το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου και η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος. Η καινοτομία του αλγορίθμου Witczak 1-40D έγκειται στην εισαγωγή του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου και της αντίστοιχης γωνίας υστέρησης, για την εκτίμηση του E^* του ασφαλτομίγματος. Η εξίσωση που περιγράφει τον υπόψη αλγόριθμο είναι η ακόλουθη:

$$\log E^* = -0.349 + 0.754 (|G_b^*|^{-0.0062}) \times \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right) + \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0.012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + e^{(-0.7814 - 0.5785 \log |G_b^*| + 0.88341 \log \delta_b)}} \quad (2.21)$$

Όπου

E^* = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του μίγματος (10^5 psi)

n = ιξώδες της ασφάλτου (10^6 poise)

f = συχνότητα φόρτισης (Hz)

ρ_{200} = % διερχόμενο από το κόσκινο #200

ρ_4 = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο #4

ρ_{38} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/8 in.

ρ_{34} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/4 in.

V_a = κενά αέρος % κατ' όγκο

V_{beff} = ενεργό ποσοστό ασφάλτου % κατ' όγκο

G_b^* = διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (psi)

δ_b = γωνία υστέρησης του G_b (μοίρες)

Στο νέο αλγόριθμο 1-40D του Witczak αντί του ιξώδους εισήχθη μια νέα μεταβλητή: το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας G_b^* της ασφάλτου το οποίο μπορεί πιο αποτελεσματικά να συσχετίσει τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου με την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία και το ρυθμό φόρτισης (Witczak et al. 2006).

Επίσης κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου, ελήφθησαν υπόψη τα στάδια γήρανσης της ασφάλτου, στοιχείο το οποίο δεν έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο Witczak 1-37A (Robbins 2009).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφατομίγματος μέσω των τριών αλγορίθμων.

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες των υλικών για τον υπολογισμό του E^* ανά αλγόριθμο πρόβλεψης

Πληροφορία	Witczak (1-37A)	Witczak (1-40D)	Hirsch
Διαβάθμιση:			
ρ_{200}	x	x	
ρ_4	x	x	
P_{38}	x	x	
P_{34}	x	x	
VMA			x
V_A	x	x	x
VFA			x
V_{beff}	x	x	
f	x		
n	x		
G_b		x	x
δ_b		x	

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Witczak 1-37A ο οποίος χρήζει ευρείας αποδοχής διεθνώς. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι στη νέα μέθοδο σχεδιασμού οδοστρωμάτων MEPDG (Mechanistical Empirical Pavement Design Guide) που αναπτύχθηκε από την AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), δίνεται η δυνατότητα, σε περίπτωση έλλειψης εργαστηριακών αποτελεσμάτων, πρόβλεψης του E^* μέσω του υπόψη αλγορίθμου. Επομένως, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αξιοποιήθηκε ο υπόψη αλγόριθμος για την εκτίμηση του E^* .

3 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.1 Γενικά

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της συσχέτισης του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος ITSM και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος E^* παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο 112 δοκίμια Marshall σύμφωνα με τις ΠΤΠ (Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές). Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια αυτά αφορούν σε δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III (όπως αυτοί ορίζονται στην ΤΣΥ (Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων) με τέσσερα διαφορετικά είδη αδρανών: το διαβάση, το γάββρο, τη σκωρία και το σπηλίτη.

Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του ITSM με χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού και πειραματικών διατάξεων. Επίσης, εκτιμήθηκε το E^* μέσω της εξίσωσης του Witczak 1-37A, με σκοπό τη διερεύνηση της συσχέτισης των δυο μεγεθών.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την πρακτική στον ελλαδικό χώρο, παρασκευάστηκαν 4 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης, ίδιου μίγματος. Το μίγμα αυτό επιλέχθηκε ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό του μίγματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αντιολισθηρών στρώσεων οδοστρωμάτων στην Ελλάδα. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο και αξιοποιήθηκαν τόσο στο πλαίσιο της διερεύνησης της παραπάνω συσχέτισης, όσο και για την υποστήριξη της ανάπτυξης της συσχέτισης μεταξύ του E^* που προσδιορίζεται στο εργαστήριο και του E^* που προκύπτει από τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A.

3.2 Παρασκευή δοκιμών κατά Marshall

Η παρασκευή των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του ITSM αλλά και την εκτίμηση του E^* με την εξίσωση Witczak 1-37A βασίστηκε στη μελέτη σύνθεσης κατά Marshall.

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών αυτών είναι σύμφωνη με το άρθρο ΣΤ-4 της ΤΣΥ του ΥΠΕΧΩΔΕ για μέγιστη ονομαστική διάσταση αδρανούς 12,5 mm. Η ασφαλτος που χρησιμοποιήθηκε ήταν τροποποιημένη ασφαλτος Netoil (Polymer-Modified Bitumen: PMB, 25-55/75) η καταλληλότητα της οποίας εξετάστηκε σύμφωνα με την Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (Π.Τ.Π.) Α200.

Τα βασικά στάδια της μελέτης σύνθεσης με την μέθοδο Marshall είναι τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμός ιδιοτήτων αδρανών και ασφάλτου

- Παρασκευή δοκιμών Marshall
- Προσδιορισμός ευστάθειας και παραμόρφωσης
- Προσδιορισμός κενών αέρος
- Ανάλυση αποτελεσμάτων Marshall

3.2.1 Προσδιορισμός ιδιοτήτων αδρανών και ασφάλτου

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη σύνθεσης αρχικά καθορίζονται τα χαρακτηριστικά της καθαρής ασφάλτου και των αδρανών καθώς και οι κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών.

Ο καθορισμός των ιδιοτήτων των αδρανών πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων δεικτών, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι ο δείκτης Los Angeles και ο δείκτης του ισοδύναμου άμμου. Για αντιολισθηρά αδρανή, σημαντικοί δείκτες είναι επίσης και ο Δείκτης Πλακοειδούς, η αντοχή σε στίλβωση (PSV) και η αντοχή σε απότριψη (AAV). Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της ασφάλτου πραγματοποιείται μέσω βασικών εργαστηριακών δοκιμών κυριότερες εκ των οποίων είναι της μάλθωσης, της διείσδυσης, της ολκιμότητας και της ελαστικής επαναφοράς (Λοΐζος 2012).

3.2.1.1 Δοκιμή Los Angeles

Η δοκιμή εκτελείται χρησιμοποιώντας την ειδική συσκευή Los Angeles (εικόνα 3.1). Κατά τη δοκιμή δείγμα αδρανών υλικών βάρους 5Kg εισάγεται σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό δοχείο μαζί με σφαίρες από χυτοσίδηρο βάρους 0,44kg. Μετά από 500 στροφές εξάγεται και προσδιορίζεται το βάρος B του συγκρατούμενου υλικού στο κόσκινο Νο 12 (1,68mm).



Εικόνα 3.1: Συσκευή Los Angeles

Ο δείκτης LA υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LA = \frac{A - B}{A} 100\% \quad (3.1)$$

Όπου A το αρχικό βάρος του δείγματος.

Από τη δοκιμή αυτή αντλούνται πληροφορίες σχετικά με την αντοχή των αδρανών σε τριβή και κρούση.

3.2.1.2 Δοκιμή Ισοδύναμου Άμμου

Η δοκιμή αυτή εκτελείται με σκοπό τον γρήγορο καθορισμό της σχετικής αναλογίας της λεπτότατης σκόνης, αργιλώδους μορφής, στα αδρανή. Η ύπαρξη χαμηλού ποσοστού ισοδύναμου άμμου χαρακτηρίζει τα αδρανή ως μη καθαρά και είναι μια ένδειξη ότι στα λεπτόκοκκα αδρανή του μίγματος περιέχεται επιβλαβής ποσότητα πολύ λεπτών κόκκων διαστάσεων αργίλου.

Από αντιπροσωπευτικό δείγμα αδρανών υλικών λαμβάνεται επαρκής ποσότητα υλικού και τοποθετείται σε ειδικό διαφανή ογκομετρικό σωλήνα. Στο σωλήνα προστίθεται ποσότητα ειδικού υδατικού διαλύματος χλωριούχου ασβεστίου, γλυκερίνης και φορμαλδεΐδης. Το περιεχόμενο του σωλήνα αναταράσσεται με παλινδρομικές κινήσεις 90 φορές για 30sec. Στη συνέχεια αφήνεται σε ηρεμία για 20 λεπτά και κατόπιν μετράται το ύψος της άμμου h και το ύψος της αργίλου H (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Συσκευή Ισοδύναμου άμμου

Το ισοδύναμο άμμου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I. A. = \frac{h_{\text{άμμου}}}{H_{\text{αργίλου}}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.1.3 Δοκιμή μάλθωσης

Μέσω της δοκιμής αυτής καθορίζεται εμπειρικά η συνοχή της ασφάλτου. Ως σημείο μάλθωσης ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία συγκεκριμένη ποσότητα ασφάλτου κάτω από ειδικές συνθήκες φόρτισης διανύει απόσταση 25,4mm. Επομένως, καθορίζεται εμπειρικά η θερμοκρασία σταδιακής μεταβολής της ασφάλτου από στερεή σε ρευστή κατάσταση.



Εικόνα 3.3: Διάταξη δοκιμής μάλθωσης

Αρχικά το δείγμα της ασφάλτου θερμαίνεται ώστε να αποκτήσει την απαιτούμενη ρευστότητα. Η ασφαλτος τοποθετείται σε δυο δακτυλίους και αφήνεται για 30 λεπτά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια οι δακτύλιοι με την ασφαλτο τοποθετούνται σε υδατόλουτρο και αφήνονται για περίπου 15 λεπτά ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη θερμοκρασία (5°C) σε όλη τη μάζα της ασφάλτου. Μεταλλικές σφαίρες τοποθετούνται στο κέντρο των δακτυλίων και θερμαίνεται το υδατόλουτρο με σταθερό ρυθμό $5^{\circ}\text{C}/\text{λεπτό}$. Με την αύξηση της θερμοκρασίας και με την επίδραση του βάρους της μεταλλικής σφαίρας, η ασφαλτος μαλακώνει και σχηματίζεται ένας μηνίσκος. Τη στιγμή κατά την οποία ο μηνίσκος της ασφάλτου που περικλείει τη μεταλλική σφαίρα διανύσει την προκαθορισμένη απόσταση των 25,4mm καταγράφεται η θερμοκρασία. Ο μέσος όρος των δυο μετρήσεων (από τα δυο δείγματα της ασφάλτου) ορίζεται ως η θερμοκρασία μάλθωσης.

3.2.1.4 Δοκιμή διείσδυσης

Κατά τη δοκιμή αυτή προσδιορίζεται η σκληρότητα της ασφάλτου και συνίσταται στον καθορισμό του βάθους διείσδυσης πρότυπης βελόνης μέσα σε δοκίμιο ασφάλτου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, φόρτισης και χρόνου διείσδυσης.

Το δοκίμιο θερμαίνεται για να αποκτήσει την απαιτούμενη ρευστότητα και διοχετεύεται στη μήτρα σε κατάλληλο βάθος (τουλάχιστον 10 mm μεγαλύτερο από το αναμενόμενο βάθος διείσδυσης).

Κατόπιν, τοποθετείται η μήτρα μαζί με τα δείγματα σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 25°C για 1,5 ώρες. Το δείγμα εξάγεται από το υδατόλουτρο και τοποθετείται στο πενετρόμετρο το οποίο πρέπει να είναι μηδενισμένο. Η τυπική βελόνη έρχεται αρχικά σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου της ασφάλτου και υπό την επίδραση του ίδιου βάρους της και του συμπληρωματικού φορτίου αφήνεται ελεύθερη να εισχωρήσει για 5sec στην άσφαλτο. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής λαμβάνονται τρεις μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας της ασφάλτου και κατόπιν εξάγεται ο μέσος όρος αυτών.



Εικόνα 3.4: Διάταξη δοκιμή διείσδυσης

Το βάθος διείσδυσης μετράται σε μονάδες pen, όπου το 1 pen αντιστοιχεί σε ένα δέκατο του χιλιοστού του μέτρου ($1\text{ pen}=0,1\text{mm}$).

3.2.1.5 Δοκιμή ολκιμότητας

Η δοκιμή ολκιμότητας έμμεσα εξετάζει την αντοχή της ασφάλτου σε εφελκυσμό. Κατά τη δοκιμή προσδιορίζεται η απόσταση επιμήκυνσης της ασφάλτου ως τη θραύση της (Λοΐζος 2012).



Εικόνα 3.5: Πειραματική διάταξη δοκιμής ολκιμότητας

Δοκίμιο ασφάλτου επιμηκύνεται σε ειδική συσκευή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ταχύτητας και θερμοκρασίας (5cm/min, 25⁰ C) μέχρι να σπάσει. Το μήκος της επιμήκυνσης μόλις επέλθει η θραύση, μετρούμενο σε cm, ορίζεται ως η ολκιμότητα της ασφάλτου.

3.2.1.6 Δοκιμή ελαστικής επαναφοράς

Η δοκιμή ελαστικής επαναφοράς πραγματοποιείται για τον καθορισμό της βελτίωσης της ελαστικότητας της ασφάλτου στην περίπτωση προσθήκης βελτιωτικών ασφάλτου (τροποποιημένη άσφαλτος). Η διαδικασία που ακολουθείται, η προετοιμασία του δείγματος ασφάλτου καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός είναι ίδια όπως και στην δοκιμή ολκιμότητας. Η μόνη διαφορά είναι ότι το δοκίμιο δεν επιμηκύνεται μέχρι θραύσης αλλά μόνο 10 cm και αμέσως κόβεται στην μέση. Μετά την πάροδο 60 λεπτών μετريέται η συνολική απόσταση επαναφοράς που οφείλεται στη συρρίκνωση του δοκιμίου λόγω ελαστικότητας και ανάγεται στα 20 cm. Το ποσοστό που προκύπτει ορίζεται ως η ελαστική επαναφορά.

3.2.2 Παρασκευή δοκιμών Marshall

Κατόπιν του προσδιορισμού των παραπάνω, πραγματοποιήθηκε η ανάμιξη των κατάλληλων ποσοτήτων αδρανών και ασφάλτου για την παραγωγή του ασφατομίγματος. Η ποσότητα των υλικών ήταν επαρκής για την παραγωγή τριών δοκιμών κάθε συνθέσεως βάρους 1200 gr.

Ο χρόνος ανάμιξης ήταν τόσοσ ώστε να έχουμε ομοιόμορφη επικάλυψη των αδρανών με την άσφαλτο. Η θερμοκρασία ανάμιξης κυμάνθηκε από 155⁰ C έως 170⁰ C. Το μίγμα στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε ειδικές μήτρες και δέχθηκε μια προ-συμπύκνωση με μια σπάτουλα (15 φορές περιμετρικά και 10 στο κέντρο). Η συμπύκνωση των δοκιμών έγινε σε ειδική συσκευή. Κατά τη συμπύκνωση το δοκίμιο δέχτηκε 75 κτύπους για την αντιολισθηρή στρώση τύπου I και 55 κτύπους για τις αντιολισθηρές στρώσεις τύπου II και III. Η θερμοκρασία του δοκιμίου κυμάνθηκε από 135⁰ C έως 150⁰ C. Αφού τα δοκίμια παρέμειναν αδιατάραχτα, απομακρύνθηκαν από τις μήτρες για να υποβληθούν στον έλεγχο ευστάθειας και παραμόρφωσης.

3.2.3 Έλεγχος δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση

Η ευστάθεια και η παραμόρφωση των δοκιμών προσδιορίζεται με την ειδική συσκευή Marshall για θραύση δοκιμών. Πριν την εισαγωγή των δοκιμών στη συσκευή, τοποθετήθηκαν σε λουτρό ύδατος για 30 με 40 λεπτά σε θερμοκρασία 60⁰ (± 10⁰ C).

Ο προσδιορισμός της ευστάθειας του δοκιμίου προκύπτει από το μέγιστο φορτίο κατά τη θραύση του, ενώ η παραμόρφωση που δέχεται το δοκίμιο κατά τη θραύση καταγράφεται σαν παραμόρφωση Marshall (Λοΐζος 2012).

3.2.4 Υπολογισμός βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης πραγματοποιούνται δύο δοκιμές για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών στο ασφαλτόμιγμα και κατ' επέκταση του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου. Οι δοκιμές αυτές αφορούν τον προσδιορισμό του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους και του φαινόμενου ειδικού βάρους του ασφαλτομίγματος.

3.2.4.1 Μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος ασφαλτομίγματος

Για τον υπολογισμό του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους χαλαρού ασφαλτομίγματος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή Rice. Κατά τη δοκιμή οι κόκκοι του δείγματος διαχωρίστηκαν με τα χέρια και τοποθετήθηκαν στο πυκνόμετρο. Στη συνέχεια, προστέθηκε νερό θερμοκρασίας 25⁰ C μέχρι την πλήρη κάλυψη του υλικού. Το δείγμα δονήθηκε μέχρι να αφαιρεθεί ο αέρας που είναι τυχόν εγκλωβισμένος μεταξύ των κόκκων του μίγματος (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Δοκιμή Rice

Το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος χαλαρού ασφαλτομίγματος υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση (Λοΐζος 2012):

$$G_{max} = \frac{A}{A + D - E} \quad (3.3)$$

Όπου

A: βάρος δείγματος (g)

D: βάρος πυκνόμετρου και νερού (g)

E: βάρος πυκνόμετρου, νερού και υλικού στον αέρα (g)

3.2.4.2 Φαινόμενο ειδικό βάρος (Φ.Ε.Β.) δοκιμών Marshall

Για τον προσδιορισμό του Φ.Ε.Β τα δοκίμια Marshall ζυγίζονται ξηρή κατάσταση και τοποθετούνται σε νερό θερμοκρασίας 25°C για 3-5 λεπτά ώστε να υπολογιστεί το βάρος τους μέσα στο νερό. Στη συνέχεια, το δοκίμιο απομακρύνθηκε από το νερό, σκουπίστηκε επιφανειακά με απορροφητική πετσέτα και ζυγίστηκε. Με χρήση του παρακάτω πίνακα υπολογίστηκε αρχικά ο όγκος των δοκιμών και στη συνέχεια το φαινόμενο ειδικό βάρος των δοκιμών (Λοΐζος 2012).

Πίνακας 3.1: Πίνακας για τον υπολογισμό του φαινομένου ειδικού βάρους

Κωδ. Δοκιμίου	Βάρος Δοκιμίου στον Αέρα W (g)	Βάρος Δοκιμίου Στο Νερό W ₁ (g)	Βάρος Κορεσμένου Δοκιμίου στον Αέρα W _{ssd} (g)	Όγκος Δοκιμίου $V=W_{ssd}-W_1$ (cm ³)	Φαινόμενο Ειδικό Βάρος Δοκιμίου Marshall (g/cm ³)	
					ΔΟΚΙΜΙΩΝ	Μ.Ο
Ex1						

3.2.4.3 Προσδιορισμός ποσοστού κενών

Η μελέτη του ποσοστού των κενών αποτελεί βασικό στοιχείο κάθε μελέτης ασφαλτομίγματος και ως εκ τούτου ο ακριβής προσδιορισμός τους αποκτά αυξημένη βαρύτητα. Το ποσοστό κενών πρέπει να είναι τόσο, ώστε το οδόστρωμα να επιδέχεται ένα μικρό μόνο ποσοστό συμπίκνωσης από τα κυκλοφοριακά στοιχεία κατά τη διάρκεια της ζωής του (Λοΐζος 2012).

Υπάρχουν τρία είδη κενών στο ασφαλτόμιγμα: τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA) τα οποία υπολογίζονται προκειμένου να διασφαλίζεται η καλή συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, τα κενά πληρωμένα με άσφαλτο σε συμπυκνωμένο ασφαλτόμιγμα (VFA) και τα κενά αέρα του ασφαλτομίγματος (V_a). Ο υπολογισμός των (VMA), (VFA) και (V_a) δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις: (Λεβέντης 2011)

$$VMA = V_{eff} + V_a \quad (3.4)$$

$$VFA = 100 \frac{V_{eff}}{VMA} \quad (3.5)$$

$$V_a = 100 \frac{G_{max} - G}{G_{max}} \quad (3.6)$$

Όπου

Όπου V_{eff} = όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου

G = φαινόμενο ειδικό βάρος (g/cm^3)

G_{max} = μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος χαλαρού ασφαλτομίγματος (g/cm^3)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών, σχεδιάζονται τα εξής έξι διαγράμματα από τα οποία προκύπτει το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου:

- Ευστάθεια κατά Marshall-ποσοστό ασφάλτου
- Φ.Ε.Β μίγματος-ποσοστό ασφάλτου
- Παραμόρφωση-ποσοστό ασφάλτου
- VFA-ποσοστό ασφάλτου
- VMA-ποσοστό ασφάλτου
- Κενά αέρος (V_a)-ποσοστό ασφάλτου

Από τη συνδυαστική αξιολόγηση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτει το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου.

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία πραγματοποιήθηκαν συνολικά 28 μελέτες σύνθεσης κατά Marshall (επτά διαφορετικές συνθέσεις για κάθε τύπο αδρανούς που χρησιμοποιήθηκε). Αναλυτική περιγραφή δίνεται στα εδάφια που ακολουθούν.

3.2.5 Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το διαβάση

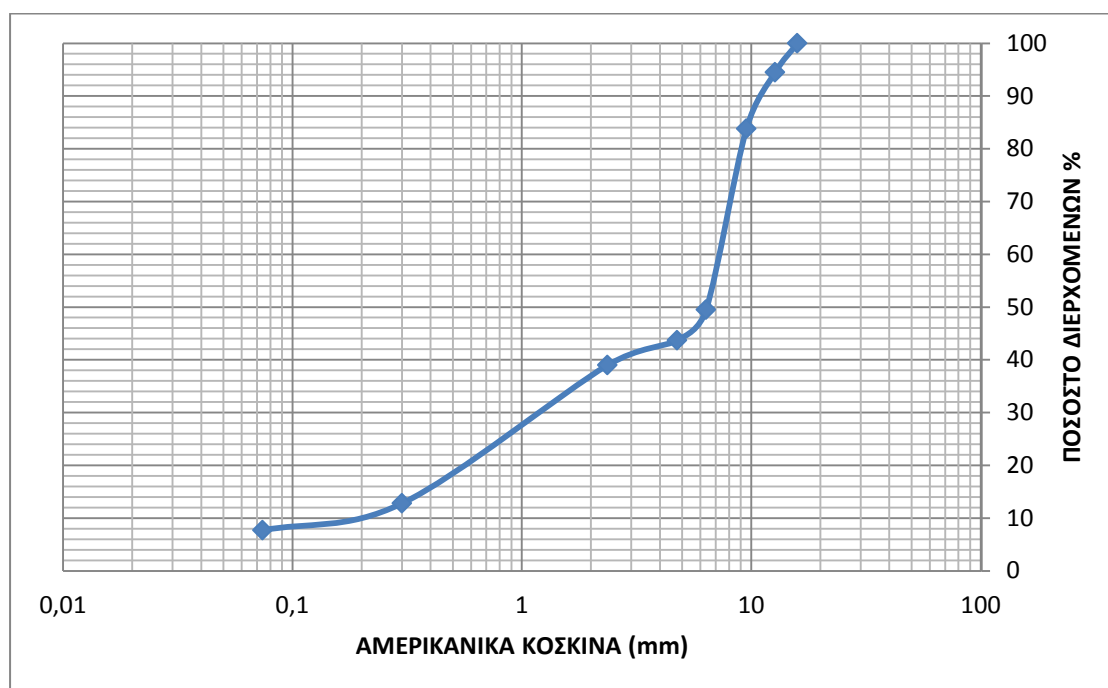
Ο διαβάσης είναι ένα πυριγενές πέτρωμα με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και επιφανειακή υφή. Είναι σκληρό πέτρωμα, με χαμηλό δείκτη απότριψης και υψηλό δείκτη στίλβωσης κατάλληλο για χρήση σε αντιολισθηρές στρώσεις.

Ο διαβάσης χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές για την παρασκευή 28 δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III. Τα δοκίμια ανάλογα με τα κενά τους χωρίστηκαν σε κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2.

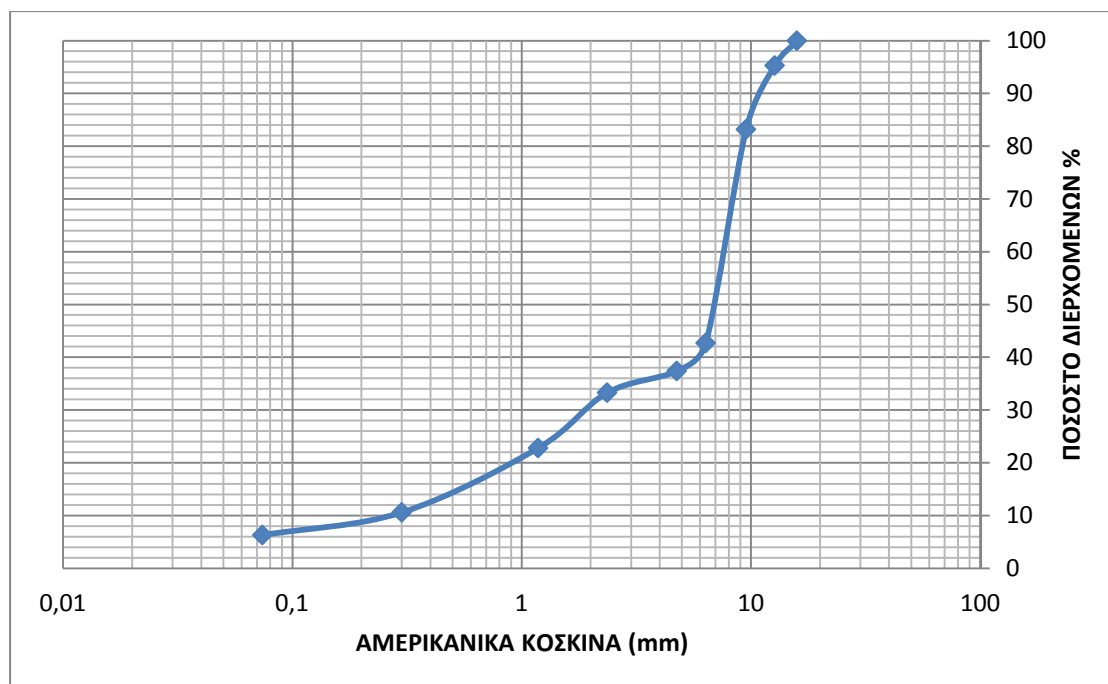
Πίνακας 3.2: Διαχωρισμός δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το διαβάση

ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΣΤΡΩΣΗ - ΔΙΑΒΑΣΗΣ								
ΤΥΠΟΣ I			ΤΥΠΟΣ II			ΤΥΠΟΣ III		
ΚΩΔΙΚΟΣ	% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών
A1-A4	3 έως 5	4	A5-A8	5 έως 8	4	A17-A20	15 έως 18	4
			A9-A12	8 έως 11	4	A21-A24	18 έως 21	4
			A13-A16	11 έως 15	4	A25-A28	21 έως 25	4
	ΣΥΝΟΛΟ	4			12			12

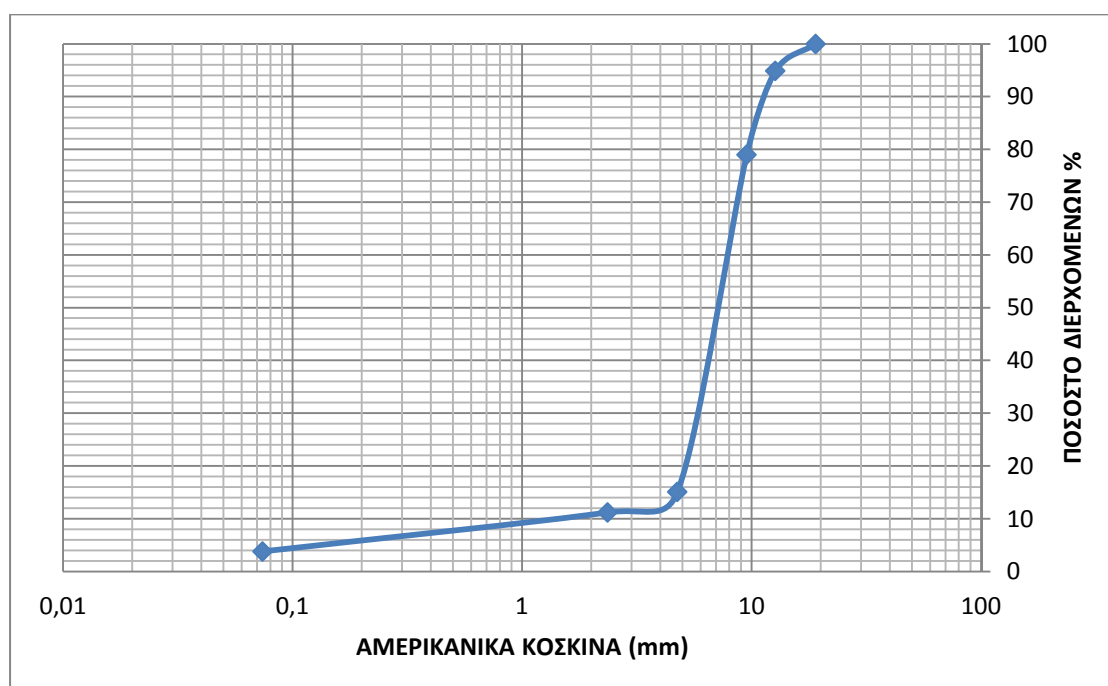
Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης για τους τύπους I, II και III με αδρανές το διαβάση παρουσιάζεται στα σχήματα 3.1, 3.2 και 3.3, αντίστοιχα:



Σχήμα 3.1: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I με τύπο αδρανούς το διαβάση



Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου II με τύπο αδρανούς το διαβάση



Σχήμα 3.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου III με τύπο αδρανούς το διαβάση

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών Los Angeles, Ισοδύναμου Άμμου, αντοχής σε στίλβωση (PSV), αντοχής σε απότριψη (AAV) και Δείκτη Πλακοειδούς για τα δοκίμια με αδρανές το διαβάση.

Πίνακας 3.3 : Στοιχεία δοκιμών με αδρανές το διαβάση

ΔΙΑΒΑΣΗΣ	
Ισοδύναμο άμμου	79
Los Angeles (%)	13,2
Αντοχή αδρανών σε απότριψη (%)	3,41
Δείκτης πλακοειδών (%)	19,9
Δοκιμή PSV	60

Τα ποσοστά ασφάλτου των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III, όπως προέκυψαν από τη μελέτη σύνθεσης δίνονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Ποσοστά ασφάλτου κατά βάρος των αδρανών της αντιολισθηρής στρώσης (διαβάσης)

Ποσοστό κενών	Τύπος Αντιολισθηρής Στρώσης		
	I	II	III
3-5%	5,00	-	-
5-8%	-	4,40	-
8-11%	-	4,10	-
11-15%	-	3,75	-
15-18%	-	-	4,50
18-21%	-	-	4,20
21-25%	-	-	3,75

Η μεταβολή του ποσοστού της ασφάλτου για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη ευρέως φάσματος ποσοστού κενών.

3.2.6 Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το γάββρο

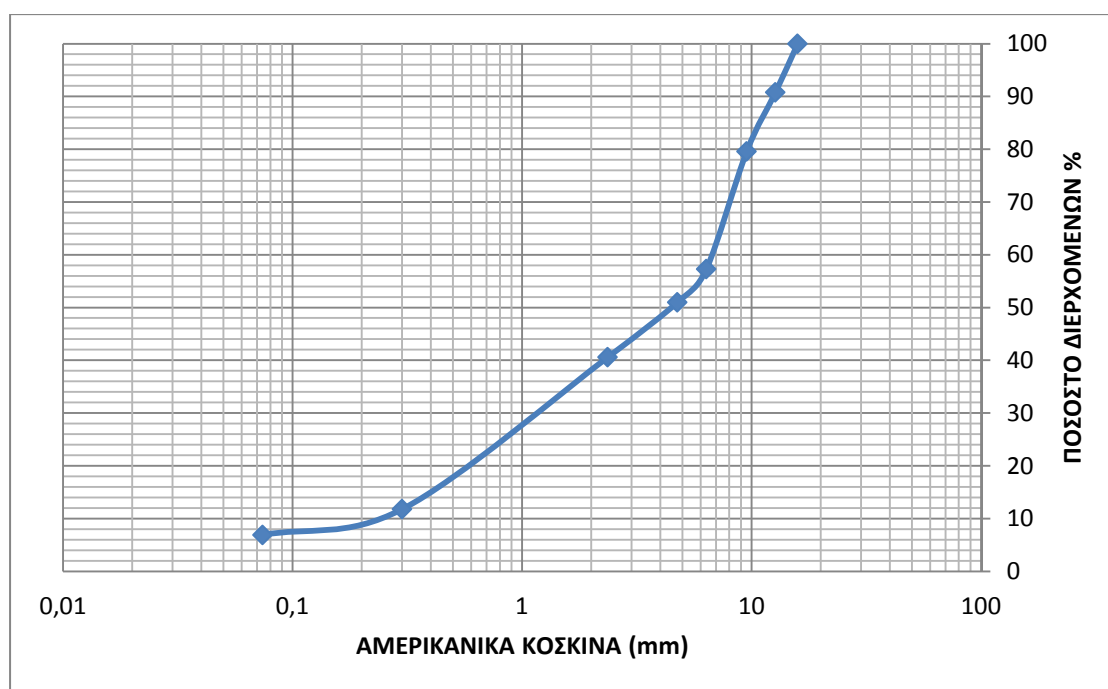
Ο γάββρος εντάσσεται στην κατηγορία των πυριγενών πετρωμάτων και από μηχανικής πλευράς, οι ιδιότητες του είναι παρόμοιες με αυτές του διαβάσης αφού πρόκειται για συγγενικά πετρώματα. Παρουσιάζει υψηλή αντοχή, χαμηλό δείκτη απότριψης και υψηλό δείκτη στίλβωσης.

Ο γάββρος χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές για την παρασκευή 28 δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III. Τα δοκίμια ανάλογα με τα κενά τους χωρίστηκαν σε κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 3.5 .

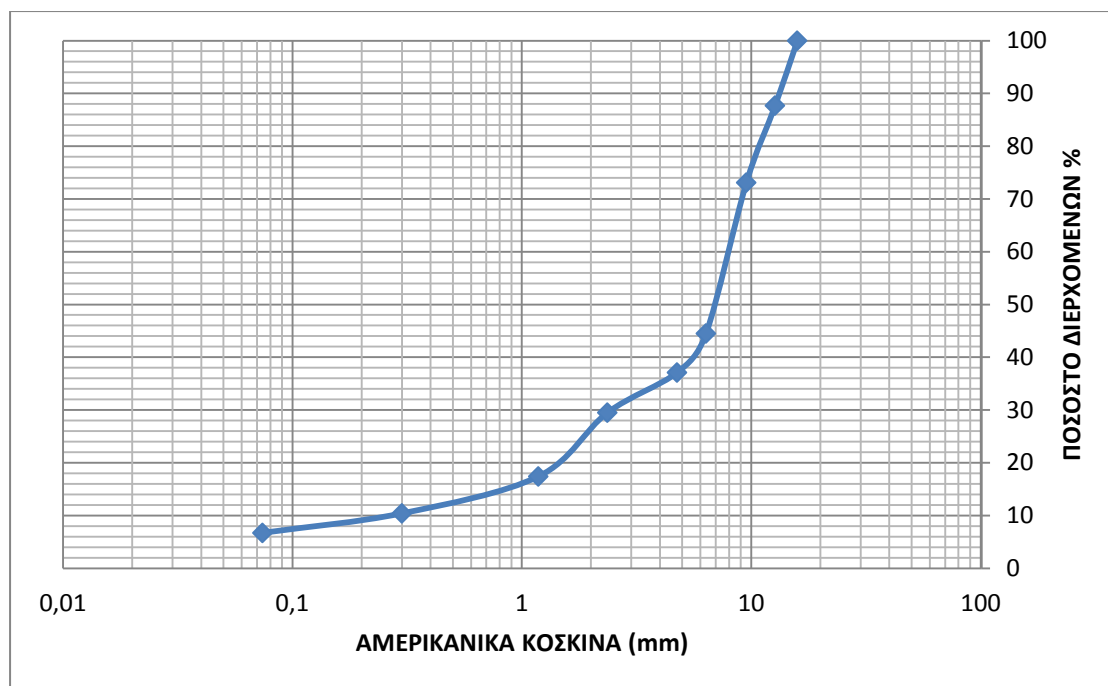
Πίνακας 3.5: Διαχωρισμός δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το γάββρο

ΔΟΚΙΜΙΑ								
ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΣΤΡΩΣΗ - ΓΑΒΡΟΣ								
	ΤΥΠΟΣ I			ΤΥΠΟΣ II			ΤΥΠΟΣ III	
ΚΩΔΙΚΟΣ	% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών
B1-B4	3 έως 5	4	B5-B8	5 έως 8	4	B17-B20	15 έως 18	4
			B9-B12	8 έως 11	4	B21-B24	18 έως 21	4
			B13-B16	11 έως 15	4	B25-B28	21 έως 25	4
	ΣΥΝΟΛΟ	4			12			12

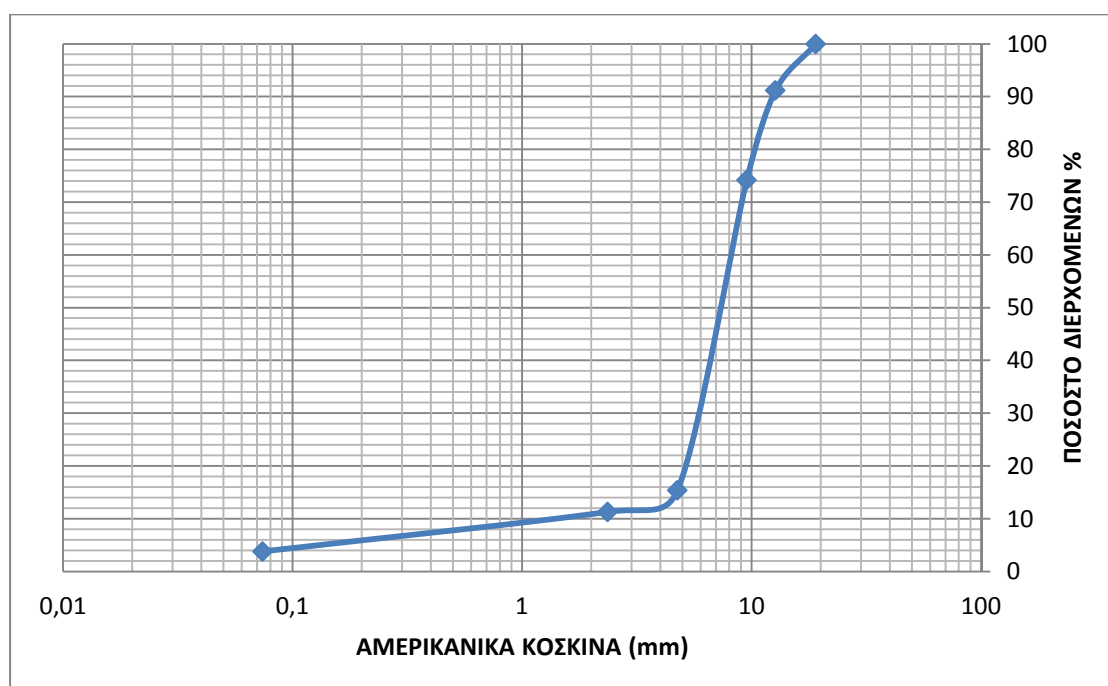
Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης για τους τύπους I, II και III με αδρανές το γάββρο παρουσιάζεται στα σχήματα 3.4, 3.5 και 3.6, αντίστοιχα:



Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I με τύπο αδρανούς το γάββρο



Σχήμα 3.5: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου II με τύπο αδρανούς το γάββρο



Σχήμα 3.6: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου III με τύπο αδρανούς το γάββρο

Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών Los Angeles, Ισοδύναμου Άμμου, αντοχής σε στίλβωση (PSV), αντοχής σε απότριψη (AAV) και Δείκτη Πλακοειδούς για τα δοκίμια με αδρανές το γάββρο.

Πίνακας 3.6: Στοιχεία δοκιμών με αδρανές το γάββρο

ΓΑΒΒΡΟΣ	
Ισοδύναμο άμμου	68
Los Angeles (%)	15
Αντοχή αδρανών σε απότριψη (%)	3,8
Δείκτης πλακοειδών (%)	14,7
Δοκιμή PSV	57

Τα ποσοστά ασφάλτου των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III, όπως προέκυψαν από τη μελέτη σύνθεσης δίνονται στον πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Ποσοστά ασφάλτου κατά βάρος των αδρανών της αντιολισθηρής στρώσης (γάββρος)

Ποσοστό κενών	Τύπος Αντιολισθηρής Στρώσης		
	I	II	III
3-5%	5,10	-	-
5-8%	-	4,60	-
8-11%	-	4,00	-
11-15%	-	3,50	-
15-18%	-	-	4,40
18-21%	-	-	3,75
21-25%	-	-	3,25

Η μεταβολή του ποσοστού της ασφάλτου για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη ευρέως φάσματος ποσοστού κενών.

3.2.7 Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς τη σκωρία

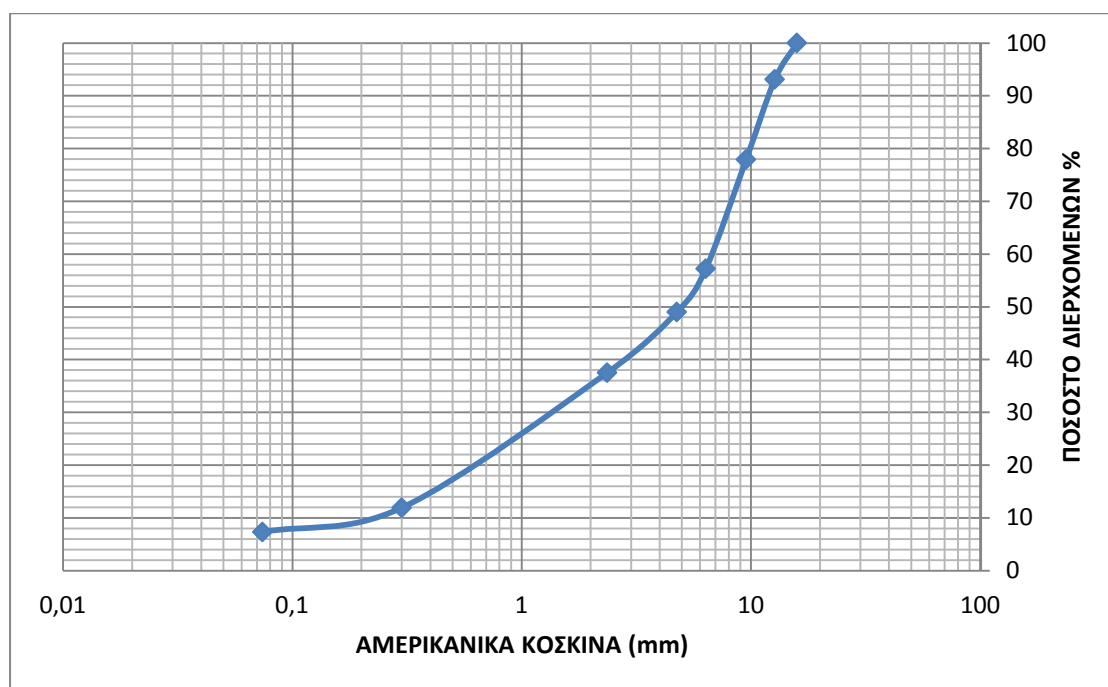
Οι σκωρίες αποτελούν παραπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας των χαλυβουργιών. Χρησιμοποιούνται σε αντιολισθηρούς τάπητες προσδίδοντας ανθεκτικότητα, ικανοποιητική μακροϋφή και αντιολισθητική ικανότητα στο οδόστρωμα.

Η σκωρία χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές για την παρασκευή 28 δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III. Τα δοκίμια ανάλογα με τα κενά τους χωρίστηκαν σε κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 3.8.

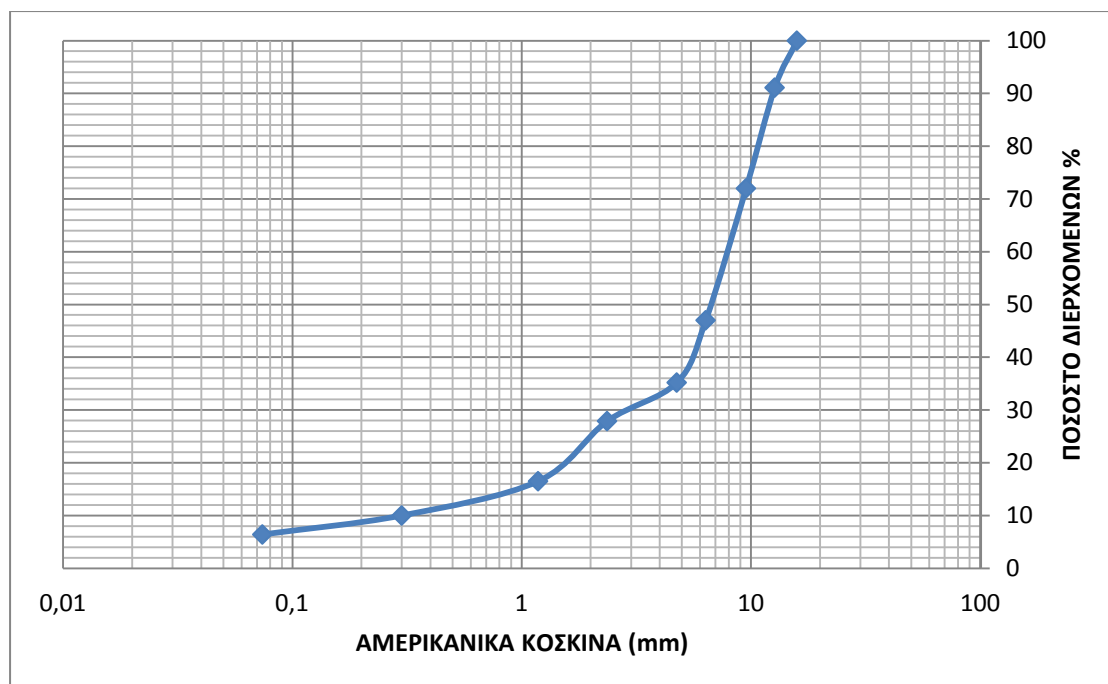
Πίνακας 3.8: Διαχωρισμός δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς τη σκωρία

ΔΟΚΙΜΙΑ								
ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΣΤΡΩΣΗ - ΣΚΩΡΙΑ								
	ΤΥΠΟΣ I			ΤΥΠΟΣ II			ΤΥΠΟΣ III	
ΚΩΔΙΚΟΣ	% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών
Γ1-Γ4	3 έως 5	4	Γ5-Γ8	5 έως 8	4	Γ17-Γ20	15 έως 18	4
			Γ9-Γ12	8 έως 11	4	Γ21-Γ24	18 έως 21	4
			Γ13-Γ16	11 έως 15	4	Γ25-Γ28	21 έως 25	4
	ΣΥΝΟΛΟ	4			12			12

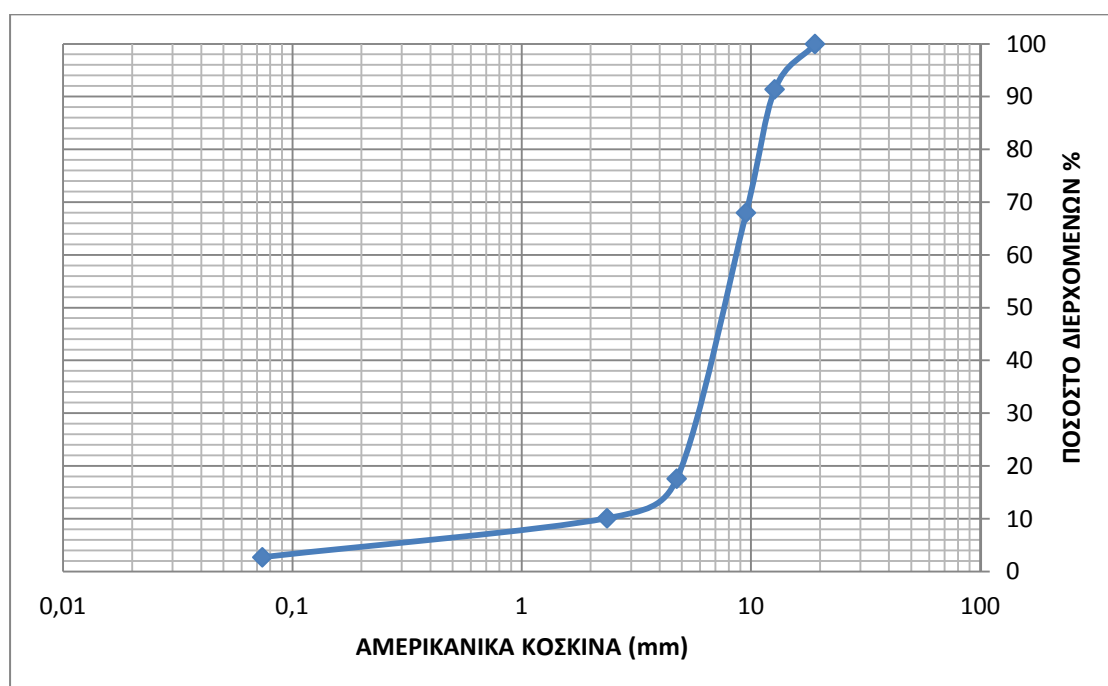
Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης για τους τύπους I, II και III με αδρανές τη σκωρία παρουσιάζεται στα σχήματα 3.7, 3.8 και 3.9, αντίστοιχα:



Σχήμα 3.7: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I με τύπο αδρανούς τη σκωρία



Σχήμα 3.8: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου II με τύπο αδρανούς τη σκωρία



Σχήμα 3.9: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου III με τύπο αδρανούς τη σκωρία

Στον πίνακα 3.9 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών Los Angeles, Ισοδύναμου Άμμου, αντοχής σε στίλβωση (PSV), αντοχής σε απότριψη (AAV) και Δείκτη Πλακοειδούς για τα δοκίμια με αδρανές τη σκωρία.

Πίνακας 3.9: Στοιχεία δοκιμών με αδρανές τη σκωρία

ΣΚΩΡΙΑ	
Ισοδύναμο άμμου	70
Los Angeles (%)	15,2
Αντοχή αδρανών σε απότριψη (%)	2,9
Δείκτης πλακοειδών (%)	13,3
Δοκιμή PSV	64

Τα ποσοστά ασφάλτου των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III, όπως προέκυψαν από τη μελέτη σύνθεσης δίνονται στον πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10: Ποσοστά ασφάλτου κατά βάρος των αδρανών της αντιολισθηρής στρώσης (σκωρία)

Ποσοστό κενών	Τύπος Αντιολισθηρής Στρώσης		
	I	II	III
3-5%	5,00	-	-
5-8%	-	4,50	-
8-11%	-	4,25	-
11-15%	-	3,60	-
15-18%	-	-	4,50
18-21%	-	-	3,80
21-25%	-	-	3,30

Η μεταβολή του ποσοστού της ασφάλτου για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη ευρέως φάσματος ποσοστού κενών.

3.2.8 Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

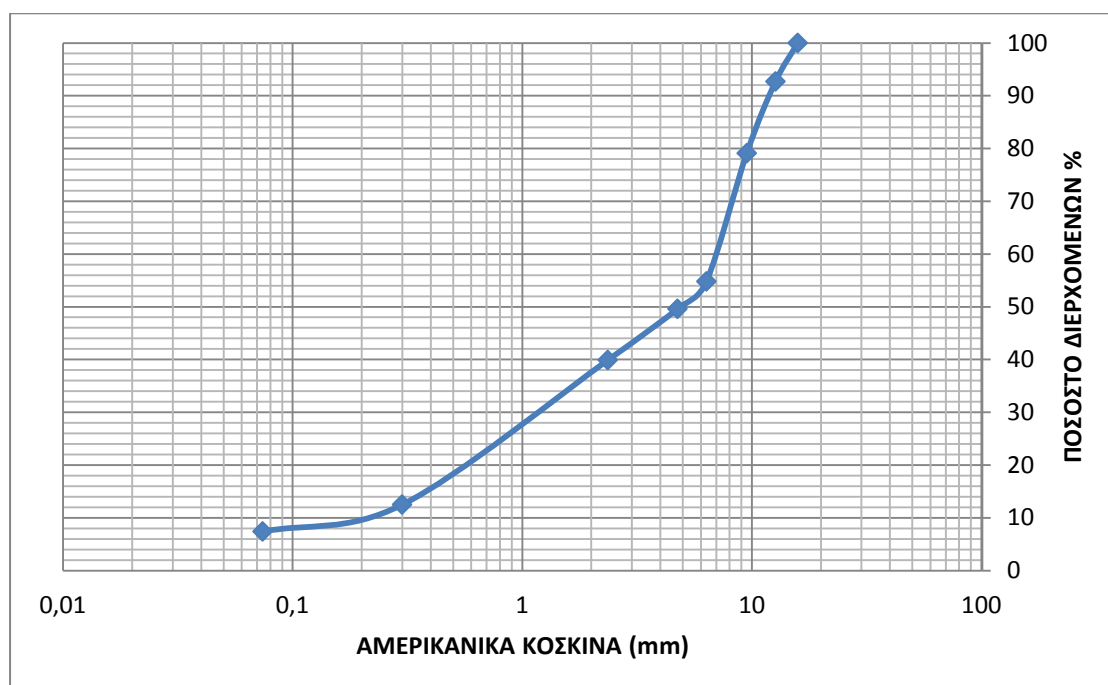
Ο σπηλίτης είναι ηφαιστειακό πέτρωμα με μεγάλη αντοχή και αντίσταση σε λείανση. Είναι ένα αδρανές κατάλληλο για χρήση σε αντιολισθηρούς τάπητες, το οποίο προσδίδει ικανοποιητική αντιολισθητική ικανότητα.

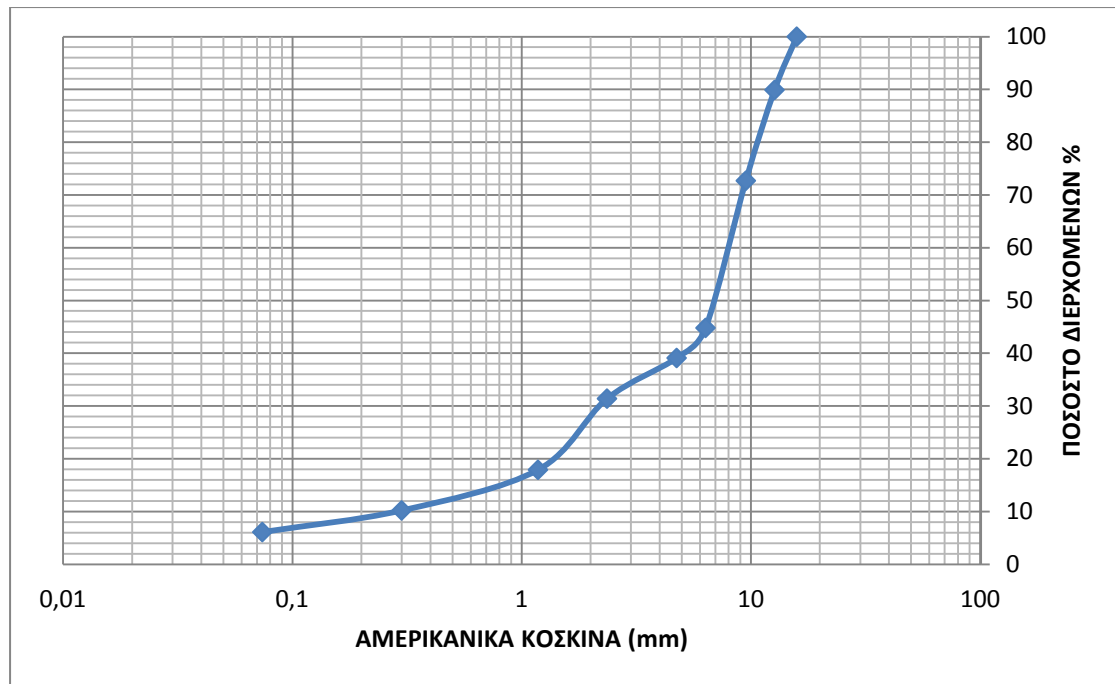
Ο σπηλίτης χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές για την παρασκευή 28 δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III. Τα δοκίμια ανάλογα με τα κενά τους χωρίστηκαν σε κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Διαχωρισμός δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

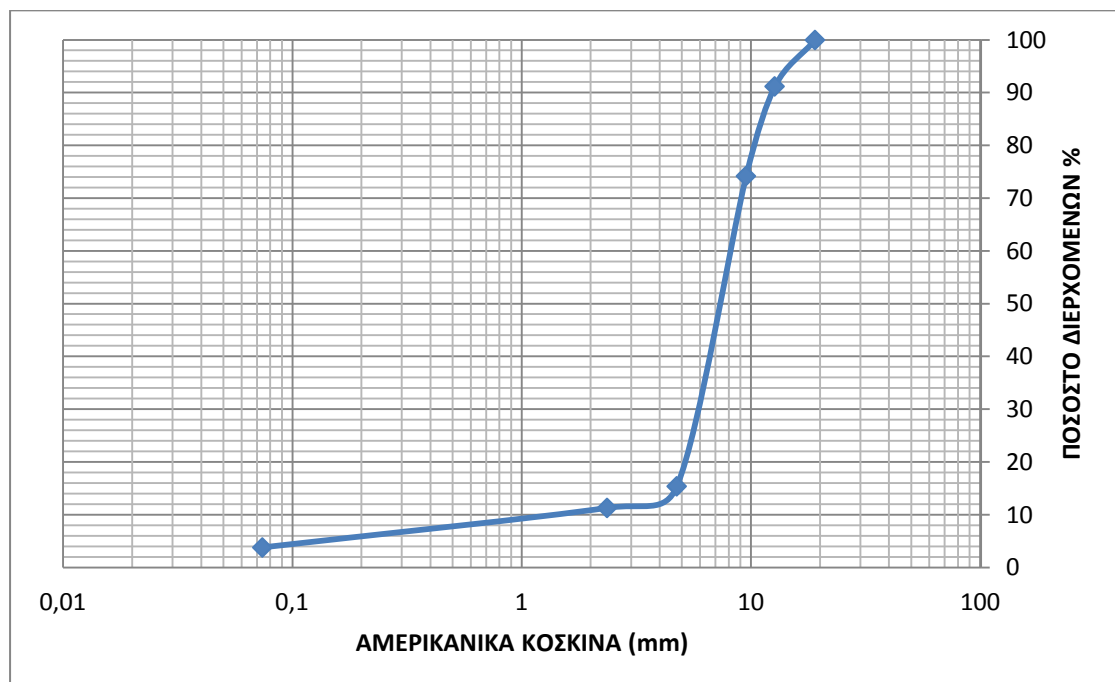
ΔΟΚΙΜΙΑ								
ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΣΤΡΩΣΗ - ΣΠΗΛΙΤΗΣ								
ΤΥΠΟΣ I			ΤΥΠΟΣ II			ΤΥΠΟΣ III		
ΚΩΔΙΚΟΣ	% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών		% κενά ασφ/τος	πλήθος δοκιμών
Δ1-Δ4	3 έως 5	4	Δ5-Δ8	5 έως 8	4	Δ17-Δ20	15 έως 18	4
			Δ9-Δ12	8 έως 11	4	Δ21-Δ24	18 έως 21	4
			Δ13-Δ16	11 έως 15	4	Δ25-Δ28	21 έως 25	4
	ΣΥΝΟΛΟ	4			12			12

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης για τους τύπους I, II και III με αδρανές το σπηλίτη παρουσιάζεται στα σχήματα 3.10, 3.11 και 3.12 αντίστοιχα:

**Σχήμα 3.10:** Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I με τύπο αδρανούς το σπηλίτη



Σχήμα 3.11: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου II με τύπο αδρανούς το σπηλίτη



Σχήμα 3.12: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών αντιολισθηρής στρώσης τύπου III με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

Στον πίνακα 3.12 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών Los Angeles, Ισοδύναμου Άμμου, αντοχής σε στίλβωση (PSV), αντοχής σε απότριψη (AAV) και Δείκτη Πλακοειδούς για τα δοκίμια με αδρανές το σπηλίτη.

Πίνακας 3.12: Στοιχεία δοκιμών με αδρανές το σπηλίτη

ΣΠΗΛΙΤΗΣ	
Ισοδύναμο άμμου	70,0
Los Angeles (%)	19,1
Αντοχή αδρανών σε απότριψη (%)	3,3
Δείκτης πλακοειδών (%)	12,0
Δοκιμή PSV	58,0

Τα αποτελέσματα των πινάκων 3.3, 3.6, 3.9 και 3.12 των εργαστηριακών δοκιμών των αδρανών για τα δοκίμια Marshall είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια όπως προβλέπονται από την ΤΣΥ.

Τα ποσοστά ασφάλτου των δοκιμών αντιολισθηρής στρώσης τύπου I, II και III, όπως προέκυψαν από τη μελέτη σύνθεσης δίνονται στον πίνακα 3.13.

Πίνακας 3.13: Ποσοστά ασφάλτου κατά βάρος των αδρανών της αντιολισθηρής στρώσης (σπηλίτης)

Ποσοστό κενών	Τύπος Αντιολισθηρής Στρώσης		
	I	II	III
3-5%	5,00	-	-
5-8%	-	4,80	-
8-11%	-	4,40	-
11-15%	-	3,60	-
15-18%	-	-	4,40
18-21%	-	-	3,90
21-25%	-	-	3,50

Η μεταβολή του ποσοστού της ασφάλτου για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης πραγματοποιήθηκε με σκοπό την επίτευξη ευρέως φάσματος ποσοστού κενών

3.3 Παρασκευή δοκιμών με τη γυροσκοπική μέθοδο

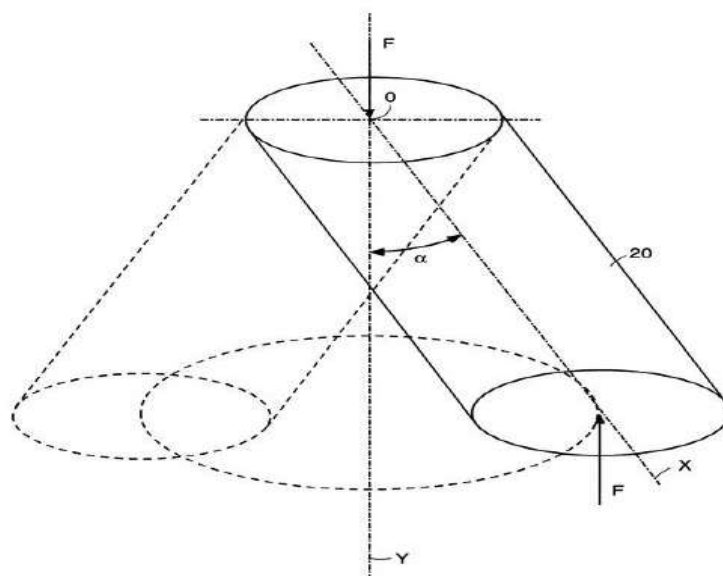
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πλέον των δοκιμών Marshall παρασκευάστηκαν 4 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης η σύνθεση των οποίων είναι αντίστοιχη με τη σύνθεση των μιγμάτων αντιολισθηρής στρώσης των οδοστρωμάτων που κατασκευάζονται στην Ελλάδα. Στόχος ήταν όχι μόνο η αξιοποίηση αυτών κατά τη διερεύνηση της συσχέτισης του ITSM με το E^* του Witczak 1-37A, αλλά και η περαιτέρω έρευνα που αφορά στη σχέση μεταξύ του E^* που προκύπτει από εργαστηριακές μετρήσεις και του E^* που προκύπτει από τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A.

Υπό το πρίσμα αυτό, τα υπόψη δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο, η οποία είναι διεθνώς η πλέον ενδεδειγμένη για τη συμπίκνωση δοκιμίων τα οποία πρόκειται να υποβληθούν σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του E^* .

Για τη παρασκευή των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές η σκωρία, η οποία έχει ευρεία χρήση στις αντιστοιχισθείς στρώσεις των ασφαλτομιγμάτων που κατασκευάζονται στην Ελλάδα. Η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε είναι τροποποιημένη άσφαλτος Netoil (Polymer-Modified Bitumen: PMB, 25-55/75), ίδια με εκείνη των δοκιμίων Marshall.

Σημειώνεται ότι τα τέσσερα αυτά δοκίμια είναι πανομοιότυπα ως προς τη σύνθεσή τους και επομένως στη συνέχεια δεν θα εξεταστούν σαν διαφορετικά δείγματα, αλλά θα διερευνηθεί η ορθότητα της θεώρησης ότι είναι αντιπροσωπευτικά του συγκεκριμένου μίγματος.

Η παρασκευή δοκιμίων με γυροσκοπική μέθοδο έγινε σύμφωνα με εγκεκριμένα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 12697-31: 2007) που ακολουθεί και ο Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ). Στα πρότυπα αυτά προσδιορίζεται η μέθοδος συμπίεσης κυλινδρικών δοκιμίων ασφαλτικών μιγμάτων κάνοντας χρήση του γυροσκοπικού συμπιεστή. Η συμπίεση επιτυγχάνεται από τη ταυτόχρονη δράση χαμηλής στατικής συμπίεσης και διατμητικής δράσης οι οποίες ασκούνται από μια μηχανική κεφαλή και προκύπτουν από την κίνηση του άξονα του καλουπιού. Η κίνηση αυτή παράγει μια κωνική επιφάνεια περιστροφής με εκκεντρότητα $0,82^\circ \pm 0,02^\circ$. Η κορυφή της επιφάνειας περιστρέφεται κατά γωνία 2α ενώ η βάση του δοκιμίου παραμένει κάθετη στον άξονα της κωνικής επιφάνειας (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Κίνηση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή της γυροσκοπικής συμπίεσης

Όπου: F = αξονική συνισταμένη δύναμη

α = γωνία περιστροφής

Η ταχύτητα της περιστροφής ελέγχεται με ακρίβεια μεγαλύτερη από 0,5 περιστροφών το λεπτό (rpm) με ειδικό όργανο. Το φορτίο εφαρμόζεται με έναν κύλινδρο πεπιεσμένου αέρα διαμέτρου 160 mm και κάθε συμπίεση ελέγχεται από ένα ρυθμιστή πίεσης. Το ύψος του δοκιμίου μετράται με έναν αισθητήρα μήκους 250 mm.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη επιλογής της μεθόδου συμπύκνωσης η οποία βασίζεται:

- Στην επίτευξη της επιδιωκόμενης πυκνότητας του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση του ποσοστού κενών αέρα
- Στην ολοκλήρωση συγκεκριμένων περιστροφών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τη γυροσκοπική μέθοδο παρασκευάστηκαν δοκίμια συγκεκριμένου ύψους και πυκνότητας τα οποία μετέπειτα υποβλήθηκαν σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Αρχικά το ασφαλτόμιγμα θερμάνθηκε για 4 ώρες στους 160°C ώστε να είναι εργάσιμο (εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Θέρμανση ασφαλτομίγματος και έλεγχος της θερμοκρασίας του πριν τη γυροσκοπική συμπίεση (Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ)

Ποσότητα ασφαλτομίγματος ίση με 7,5kg περίπου, τοποθετήθηκε μέσα σε μια κυλινδρική μεταλλική μήτρα διαμέτρου 150mm. Στη συνέχεια, η μήτρα με το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε στο γυροσκοπικό συμπιεστή για την έναρξη της συμπίκνωσης. Η δύναμη που ασκήθηκε στο δοκίμιο ήταν ίση με 600KPa. Ο τύπος του γυροσκοπικού συμπιεστή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.9: Γυροσκοπικός συμπιεστής CRT-GYR-EN

Η συμπίκνωση ολοκληρώθηκε όταν επιτεύχθηκε η επιθυμητή πυκνότητα καθώς και το απαιτούμενο ύψος του συμπυκνωμένου δοκιμίου (170mm). Η διαδικασία επαναλήφθηκε άλλες 3 φορές για την παραγωγή συνολικά 4 δοκιμίων.

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη συμπίκνωση των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο, το ποσοστό των κενών αέρα δεν είναι ομοιόμορφο λόγω των περιορισμών που επιβάλλει η μήτρα καθώς και το έμβολο επιβολής της δύναμης. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τα πρότυπα για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του E^* , το τελικό δοκίμιο που τελικά θα υποβληθεί στην εργαστηριακή δοκιμή (διαστάσεων 100mm x 150mm) προκύπτει από την απόσπαση καρότου από το αρχικό και την κοπή των άκρων του (εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10: Πυρηνοληψία δοκιμών με καροταρία

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στα 4 δοκίμια που παρασκευάστηκαν έγινε πυρηνοληψία με καροταρία και ακολούθως, τα 4 δοκίμια κόπηκαν καθ' ύψος με ειδικό μηχάνημα του εργαστηρίου για να επιτευχθεί ύψος δοκιμών περίπου 150 mm (εικόνα 3.11(α)). Οι προαναφερθείσες διαστάσεις (100 mm, 150 mm) είναι οι προβλεπόμενες από τα διεθνή πρότυπα διαστάσεις των δοκιμών που χρησιμοποιούνται στην δοκιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Τα 4 δοκίμια ασφαλτομίγματος που συντέθηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο φαίνονται στην εικόνα 3.11(β).



(α)

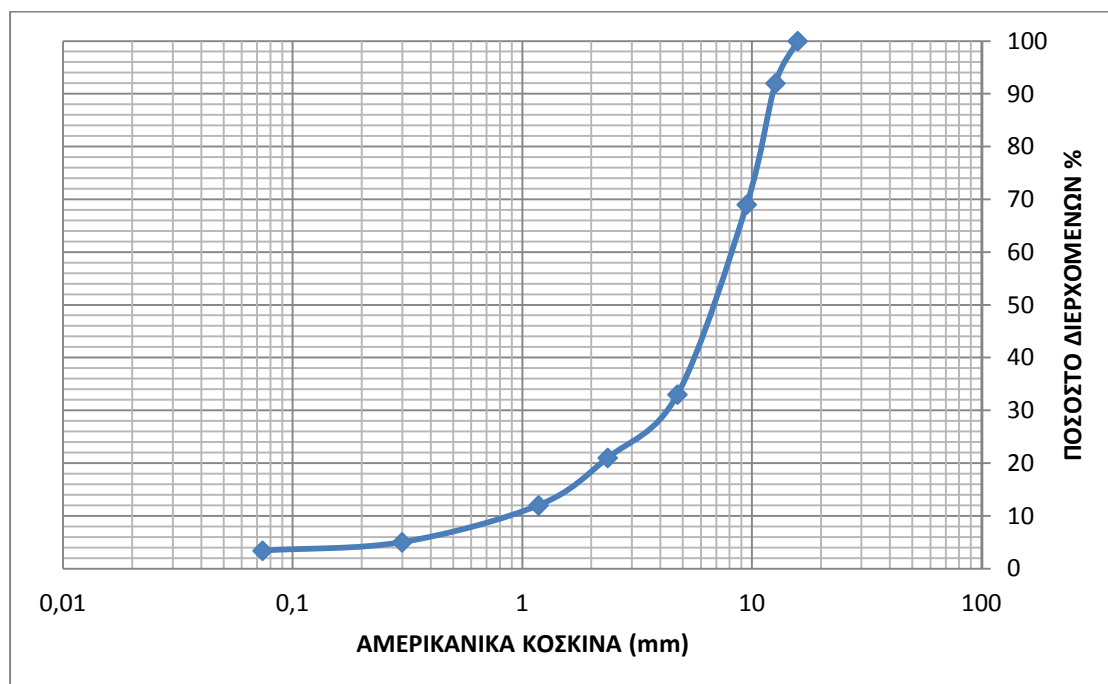


(β)

Εικόνα 3.11: α) Κοπή δοκιμών μετά τη γυροσκοπική συμπίεση και β) Τελική μορφή δοκιμών

Τα αποτελέσματα της δοκιμής της γυροσκοπικής συμπίεσης παρουσιάζονται στον πίνακα 2 του παραρτήματος.

Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης για τα 4 δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο.



Σχήμα 3.13: Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης

Στον πίνακα 3.14 παρουσιάζονται τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών Los Angeles, Ισοδύναμου Άμμου, αντοχής σε στίλβωση (PSV), αντοχής σε απότριψη (AAV) και Δείκτη Πλακοειδούς για τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο.

Πίνακας 3.14 Στοιχεία αδρανών δοκιμών γυροσκοπικής μεθόδου

ΔΟΚΙΜΙΑ 1-4	
Ισοδύναμο άμμου	77
Los Angeles (%)	20,9
Αντοχή αδρανών σε απότριψη (%)	1,5
Δείκτης πλακοειδών (%)	13
Δοκιμή PSV	65

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.14 των εργαστηριακών δοκιμών των αδρανών για τα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια όπως προβλέπονται από την ΤΣΥ.

Το ποσοστό της ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος είναι ίσο με 4,6% ενώ το ποσοστό των κενών αέρα είναι της τάξης του 11,3%.

4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

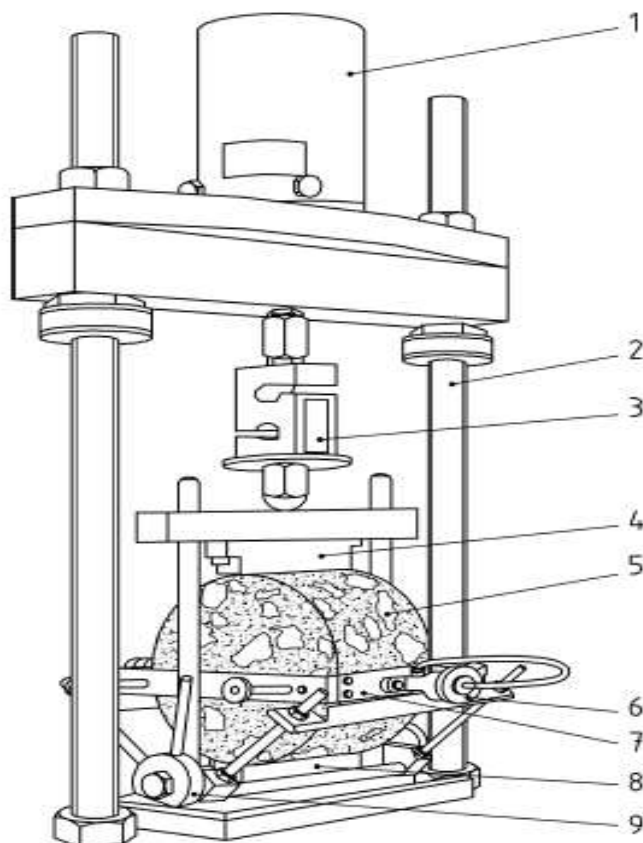
4.1 Γενικά

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πιστοποιημένο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ, με κατάλληλες πειραματικές διατάξεις και όργανα, ήταν σύμφωνες με τα ευρωπαϊκά και αμερικάνικα πρότυπα. Τα δοκίμια Marshall υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας ITSM ενώ τα δοκίμια που παρήχθησαν με τη γυροσκοπική μέθοδο υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές τόσο για τον προσδιορισμό του E^* κατόπιν κατάλληλης προεργασίας, όσο και για τον προσδιορισμό του ITSM. Επίσης, για όλα τα δοκίμια προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μέσω του αλγορίθμου Witczak 1-37A.

4.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός ITSM

4.2.1 Δοκίμια Marshall

Ο προσδιορισμός του ITSM για τα 112 δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο Marshall έγινε με τη συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester) τύπου CRT-NU14 σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12627-97 και συγκεκριμένα σύμφωνα με τη δοκιμή IT-CY (Indirect Tensile to Cylindrical Specimens). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασίες 15, 20 και 25°C. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η διάταξη της δοκιμής του ITSM.



Εικόνα 4.1 : Πειραματική διάταξη δοκιμής ITSM

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Ενεργοποιητής φορτίου | 6. Προσαρμογέας LVDT |
| 2. Χαλύβδινο πλαίσιο φορτίου | 7. Πλαίσιο τοποθέτησης LVDT |
| 3. Κυψέλη φορτίου | 8. Κάτω φορτιζόμενη πλάκα |
| 4. Άνω φορτιζόμενη πλάκα | 9. Σημείο ευθυγράμμισης LVDT |
| 5. Δοκίμιο | |

Τα δοκίμια, αφού απέκτησαν την απαιτούμενη θερμοκρασία, τοποθετήθηκαν πάνω σε ένα υποπλαίσιο, το οποίο είχε κατάλληλη διάταξη ώστε να συγκρατεί τα δοκίμια κατακόρυφα και να επιτρέπει στο πλαίσιο του ζεύγους των αισθητήρων LVDT να τοποθετείται στην οριζόντια διάμετρο των δοκιμίων (εικόνα 4.2). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων ώστε οι πλευρές του πλαισίου των αισθητήρων LVDT να είναι παράλληλες με τις πλευρές του δοκιμίου και να ισαπέχουν από αυτό.



Εικόνα 4.2 : Τοποθέτηση δοκιμίου στο υποπλαίσιο

Κατόπιν της τοποθέτησης των δοκιμίων στο πλαίσιο, οι αισθητήρες LVDT ρυθμίστηκαν έτσι ώστε να εφάπτονται στις πλαϊνές πλευρές των δοκιμίων και στη συνέχεια η διάταξη τοποθετήθηκε μέσα στο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τις ενδείξεις ειδικού λογισμικού ρυθμίστηκαν οι αισθητήρες LVDT κατάλληλα και απελευθερώθηκε το δοκίμιο από τις πλαϊνές στηρίξεις του υποπλαισίου έτσι ώστε να ακουμπάει μόνο στη βάση του.

Τα στοιχεία τα οποία καταχωρούνται πριν την έναρξη της δοκιμής είναι ο κωδικός του δοκιμίου, η διάμετρος και το ύψος του δοκιμίου, ο χρόνος φόρτισης, η θερμοκρασία, ο λόγος του Poisson και η επιθυμητή οριζόντια παραμόρφωση. Δεδομένου ότι πρόκειται για δοκίμια Marshall η διάμετρος όλων των δοκιμίων ήταν σταθερή και ίση με περίπου 100mm ενώ το ύψος προσδιορίστηκε από το μέσο όρο τεσσάρων μετρήσεων σε αντιδιαμετρικές θέσεις του δοκιμίου. Ο λόγος του Poisson θεωρήθηκε ίσος με 0,35. Ο χρόνος φόρτισης ορίστηκε στα 124ms, που αντιστοιχεί σε συχνότητα φόρτισης περίπου 8Hz. Ο χρόνος φόρτισης των 124ms αποτελεί το βασικό χρόνο φόρτισης για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Η επιθυμητή οριζόντια παραμόρφωση ορίστηκε στα 5μm. Αυτό σημαίνει ότι στο δοκίμιο ασκήθηκε η απαραίτητη δύναμη έτσι ώστε η παραμόρφωση του να είναι ίση με 5μm.

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των παραπάνω στοιχείων πραγματοποιήθηκε η έναρξη της δοκιμής με την προφόρτιση. Η προφόρτιση περιλαμβάνει 10 παλμούς φόρτισης ώστε να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για την επίτευξη του επιθυμητού χρόνου φόρτισης και της παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, ακολούθησε η τελική φόρτιση με 5 παλμούς, κατά την οποία προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας ITSM. Μετά την κάθε δοκιμή ακολούθησε μια δεύτερη κατά την οποία το δοκίμιο περιστράφηκε κατά 90 μοίρες. Το τελικό μέτρο δυσκαμψίας προέκυπτε ως ο μέσος όρος των δυο δοκιμών. Στην περίπτωση που η διαφορά των δύο μετρήσεων ήταν εκτός του εύρους -20%-10%, το οποίο ορίζεται από τα πρότυπα, η δοκιμή επαναλήφθηκε μετά την πάροδο κάποιων ωρών, ώστε να αποφορτιστεί το δοκίμιο. Επίσης ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο σχήμα του παλμού φόρτισης το οποίο πρέπει

να αποτυπώνεται από μια ημιτονοειδή συνάρτηση και να μην παρουσιάζει επίπεδο τμήμα στην κορυφή, καθώς και το σχήμα της αναπτυσσόμενης παραμόρφωσης το οποίο πρέπει να ακολουθεί αυτό της εφαρμοζόμενης τάσης με μια διαφορά φάσης (γωνία υστέρησης).

4.2.2 Δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου

Η εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του ITSM προϋποθέτει τα δοκίμια να έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις: περίπου 10cm διάμετρο και 4-6cm ύψος. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο έχουν την απαιτούμενη διάμετρο αλλά το ύψος τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο (15cm). Προκειμένου να είναι δυνατή η διεξαγωγή της δοκιμής τα δοκίμια κόπηκαν σε τρία επιμέρους ίσων διαστάσεων (10cm διάμετρος και 5cm ύψος).

Η υπόψη δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε όλα τα επιμέρους δοκίμια σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12627-97. Η διαδικασία της δοκιμής είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.1. με μόνη διαφορά ότι η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε επιπλέον θερμοκρασίες αντίστοιχες με αυτές της δοκιμής για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του E^* (4, 15, 20, 25 και 37°C). Η δοκιμή έγινε για συχνότητα 8Hz (χρόνος φόρτισης 124ms).

4.3 Προσδιορισμός E^* με χρήση αλγορίθμων

4.3.1 Δοκίμια Marshall

Η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας έγινε με τον αλγόριθμο πρόβλεψης Witczak 1-37A όπως προτείνεται και στον MEPDG.

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.0802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.005470\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(n))}} \quad (4.1)$$

Όπου:

E^* = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του μίγματος (10^5 psi)

n = ιξώδες της ασφάλτου (10^6 poise)

f = συχνότητα φόρτισης (Hz)

ρ_{200} = % διερχόμενο από το κόσκινο #200

ρ_4 = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο #4

ρ_{38} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/8 in.

ρ_{34} = αθροιστικό % που συγκρατείται στο κόσκινο 3/4 in.

V_a = κενά αέρος % κατ' όγκο

V_{beff} = ενεργό ποσοστό ασφάλτου % κατ' όγκο

Για την εφαρμογή της υπόψη σχέσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ιξώδους της ασφάλτου συναρτήσει της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη σχέση 2.18. Κατόπιν του προσδιορισμού του ιξώδους σε τρεις θερμοκρασίες (25°C, 82°C, 160°C) έγινε το διάγραμμα διασποράς του διπλού λογαρίθμου του ιξώδους ($\log \log n$, σε cP) σε σχέση με τη θερμοκρασία ($\log T_R$, σε Rankine). Η εξίσωση που περιγράφει τη σχέση τους είναι η ακόλουθη:

$$\log \log n = 9,68 - 3,19 \log T_R \quad (4.2)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ο συντελεστής A είναι ίσος με 9,68 και ο VTS ίσος με -3,19.

Το ενεργό ποσοστό ασφάλτου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{beff} = V_b - \left[(V_s \times G_b) \times \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} \times G_{sb}} \right) \right] \quad (4.3)$$

Όπου:

V_b = ποσοστό ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα

V_s = ποσοστό αδρανών στο ασφαλτόμιγμα

G_b = ειδικό βάρος ασφάλτου

G_{se} = ενεργό ειδικό βάρος αδρανών

G_{sb} = θεωρητικό βάρος αδρανών

Η εξίσωση Witczak 1-37A εφαρμόστηκε για τρεις θερμοκρασίες (15°C, 20°C 25°C) και μια συχνότητα φόρτισης (8Hz), έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία με τις παραμέτρους που ελήφθησαν υπόψη κατά τη δοκιμή του ITSM. Κατ' αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4.3.2 Δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου

Η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε και για αυτά τα δοκίμια με το μοντέλο πρόβλεψης Witczak 1-37A (σχέση 4.1).

Η εξίσωση Witczak 1-37A εφαρμόστηκε για πέντε θερμοκρασίες (4, 15, 20 ,25 και 37°C) και επτά συχνότητες φόρτισης (25, 10, 8, 5, 1, 0.1 και 0.5Hz), έτσι ώστε να

υπάρχει πλήρης αντιστοιχία με τις παραμέτρους που ελήφθησαν υπόψη κατά τη δοκιμή του ITSM και την εργαστηριακή δοκιμή του E^* .

Το $\log n$ υπολογίστηκε με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.2. Η εξίσωση που προέκυψε και περιγράφει τη σχέση $\log n$ και θερμοκρασίας για τα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου είναι η εξής:

$$\log \log n = 9,99 - 3,31 \log T_R \quad (4.4)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ο συντελεστής A είναι ίσος με 9,99 και ο VTS ίσος με -3,31

Το ενεργό ποσοστό ασφάλτου υπολογίζεται όπως και στην παράγραφο 4.2.2 από τη σχέση 4.3.

4.4 Εργαστηριακός προσδιορισμός E^*

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του E^* των τεσσάρων δοκιμών που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο πρότυπο AASHTO T-342-11.

Για την διεξαγωγή της εργαστηριακής δοκιμής του E^* ήταν απαραίτητα:

- Μια συσκευή ικανή να παράγει μια ελεγχόμενη θλιπτική φόρτιση. Το φορτίο θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να εφαρμόζεται σε εύρος συχνοτήτων από 0,1-25 Hz και να έχει εύρος τάσεων ως 2800 KPa (400 psi).
- Ένα θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας. Ο θάλαμος αυτός πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ελέγχει και να ρυθμίζει τη θερμοκρασία του δοκιμίου από -10 ως 60°C με ακρίβεια $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- Ένα σύστημα μετρήσεων το οποίο ελέγχεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή και έχει την ικανότητα να μετράει και να καταγράφει τη χρονική ιστορία του εφαρμοζόμενου φορτίου και των αξονικών παραμορφώσεων. Ακόμα, θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα μέτρησης της περιόδου του εφαρμοζόμενου ημιτονοειδούς φορτίου και των παραμορφώσεων που θα προκύψουν με ακρίβεια 0,5%. Το φορτίο μετράται με μια ηλεκτρονική κυψέλη που είναι σε επαφή με το δοκίμιο. Το σύστημα μέτρησης του φορτίου πρέπει να έχει ένα ελάχιστο εύρος από 0 ως 25 kN με ακρίβεια 1.2N. Οι αξονικές παραμορφώσεις μετρούνται με γραμμικούς μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές (LVDT's) που τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία. Οι παραμορφώσεις να μετρούνται σε δυο σημεία με διαφορά 180 μοιρών, σε τρία σημεία με διαφορά 120 μοιρών ή σε τέσσερα σημεία με διαφορά 90 μοιρών. Τα LVDT's πρέπει να έχουν εύρος $\pm 0,5\text{mm}$. Στην εργαστηριακή δοκιμή που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν δυο LVDT's.

- Πλάκες φόρτισης, μεγέθους $104,5 \pm 0,5\text{mm}$, οι οποίες μεταφέρουν το φορτίο από το μηχάνημα στο δοκίμιο και πρέπει να είναι κατασκευασμένες από σκληρυμένο χάλυβα ή αλουμίνιο υψηλής αντοχής.
- Ειδικές μεμβράνες που τοποθετούνται μεταξύ των άκρων του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης για τη μείωση των τριβών.

Η εργαστηριακή συσκευή που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 :Συσκευή Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ για τη δοκιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Στο στάδιο της προετοιμασίας του δοκιμίου προσαρτήθηκαν 4 μεταλλικές βάσεις σε προκαθορισμένες αποστάσεις. Οι βάσεις αυτές αρχικά τοποθετούνται σε ειδική συσκευή και συγκρατούνται με μαγνήτη. Στη συνέχεια ακολουθεί η επάλειψη αυτών με ειδική κόλλα και η τοποθέτηση του δοκιμίου επί της συσκευής η οποία συγκρατεί τις μεταλλικές βάσεις σε επαφή με το δοκίμιο. Μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, οι μεταλλικές βάσεις είχαν προσαρτηθεί στο δοκίμιο.



Εικόνα 4.4 : Συσκευή CRT-SPLTV για την ενσωμάτωση μεταλλικών βάσεων στο δοκίμιο όπου θα τοποθετηθούν τα LVDT's στην εργαστηριακή δοκιμή του E*

Κατόπιν, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας για να αποκτήσει την απαιτούμενη θερμοκρασία.

Η δοκιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για τα 4 δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της γυροσκοπικής συμπίεσης έγινε σε θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C και σε συχνότητες φόρτισης 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz για κάθε θερμοκρασία. Δοκιμές για τις επιπλέον θερμοκρασίες που ορίζονται από το πρότυπο (-10°C, 54°C) δεν έγιναν καθώς έχουν παρατηρηθεί αναξιόπιστα αποτελέσματα στις θερμοκρασίες αυτές.

Η δοκιμή έγινε από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη θερμοκρασία και από την υψηλότερη στη χαμηλότερη συχνότητα όπως ορίζεται στο πρότυπο T342-11 (AASHTO 2011). Το φορτίο που ασκήθηκε ήταν 15-2800 KPa σύμφωνα με τους εξής περιορισμούς: οι αξονικές παραμορφώσεις να κυμαίνονται από 50-150 microstrains και οι παραμένουσες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από 1500 microstrains. Στην αρχή της δοκιμής έγινε προφόρτιση του δοκιμίου 200 κύκλων σε συχνότητα 25Hz. Έπειτα ακολούθησε η φόρτιση που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1:

Πίνακας 4.1 : Αριθμός κύκλων για τις συχνότητες φόρτισης

Συχνότητα (Hz)	Αριθμός Κύκλων
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε τελικά για κάθε φόρτιση μέσω του λογισμικού παρουσιάζεται σε πίνακες του παραρτήματος.

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η διερεύνηση της συσχέτισης των πειραματικών δεδομένων, τα οποία αφορούν στα μεγέθη του ITSM και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Η διερεύνηση αποτελείται από δύο σκέλη: Το πρώτο σκέλος αφορά στη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του ITSM και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας το οποίο εκτιμάται από τον αλγόριθμο πρόβλεψης του Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}) και πραγματοποιείται αξιοποιώντας τα στοιχεία που προέκυψαν από εργαστηριακά πειράματα και την ενεργοποίηση του αλγορίθμου, αντίστοιχα, στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν.

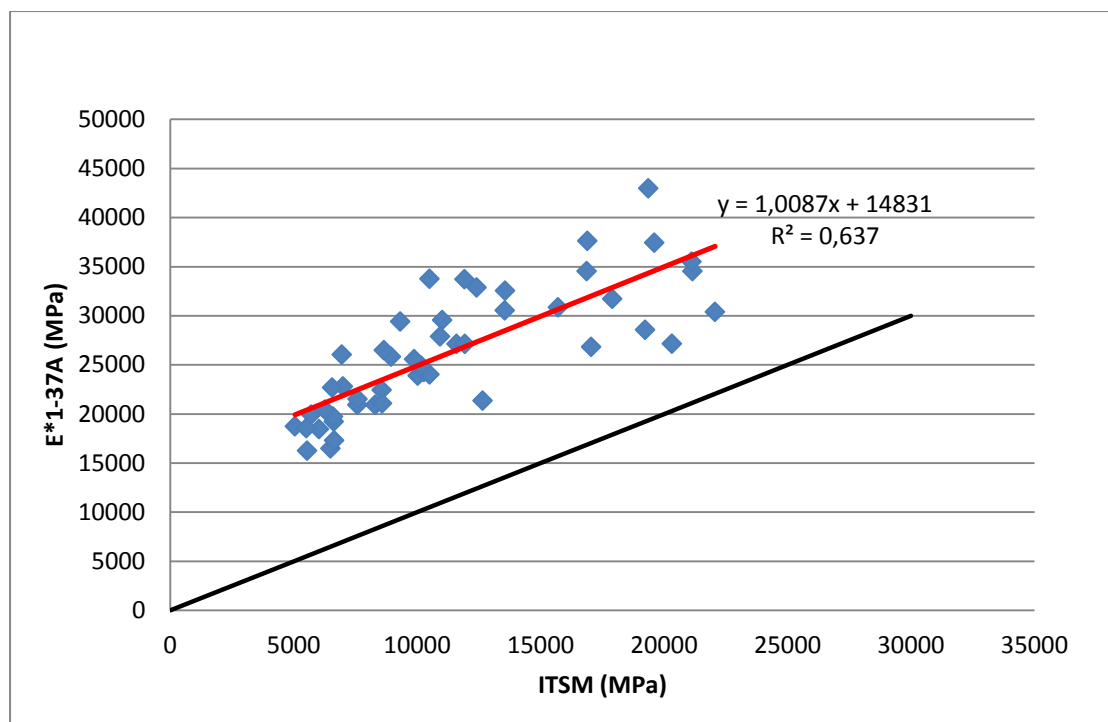
Το δεύτερο σκέλος αφορά στην προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας το οποίο προσδιορίζεται μέσω εργαστηριακών δοκιμών (E^*_{lab}) και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τον αλγόριθμο πρόβλεψης του Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}). Η διερεύνηση αυτή αφορά σε συγκεκριμένο μίγμα αντιολισθηρής στρώσης και πιο συγκεκριμένα σε αυτό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των οδοστρωμάτων στην Ελλάδα. Κατ' αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την υπόψη διερεύνηση θα μπορούν να έχουν μια άμεση πρακτική εφαρμογή.

5.2 Συσχέτιση του ITSM με το E^*_{1-37A} - Δοκίμια Marshall

Η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του ITSM και του E^*_{1-37A} , πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμική παλινδρόμησης, αρχικά χωριστά για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης και στη συνέχεια συνολικά για όλα τα δοκίμια.

5.2.1 Δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου I

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα της σχέσης του ITSM με το E^*_{1-37A} για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιολισθηρού τύπου I, ανεξάρτητα του τύπου αδρανούς.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα διασποράς ITSM - E^*_{1-37A} δοκιμών Marshall αντιστοιχισθής στρώσης τύπου Ι.

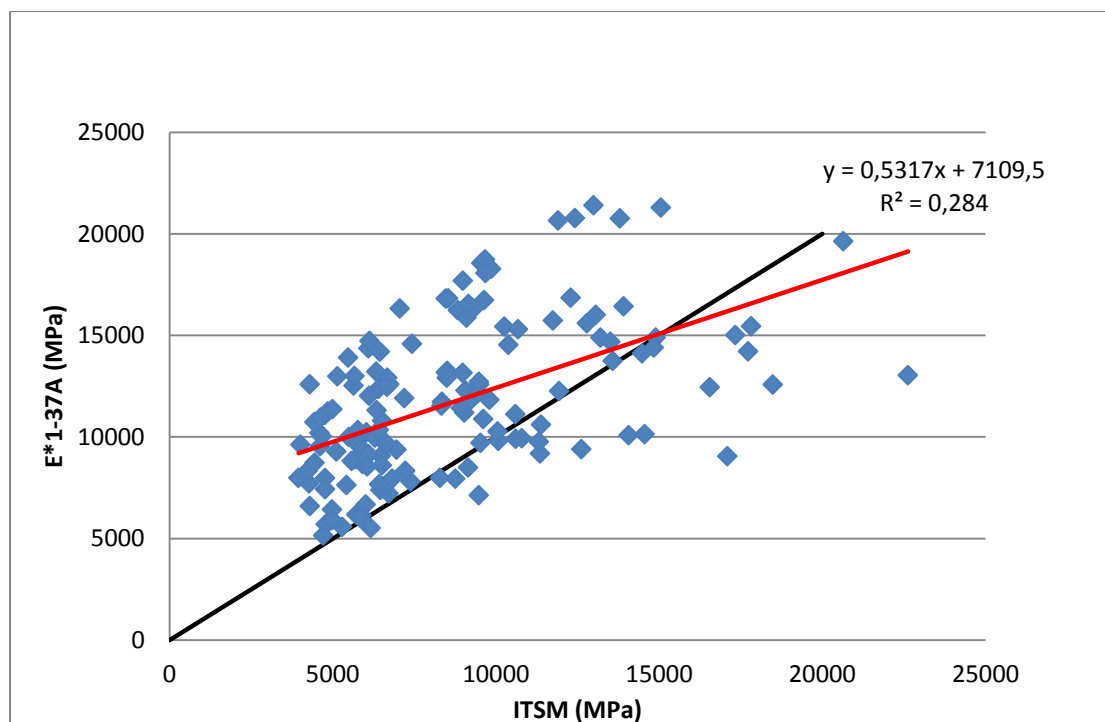
Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο:

$$E^*_{1-37A} = 1,0087(ITSM) + 14831 \quad (5.1)$$

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι 0,637 υποδεικνύοντας πως υπάρχει μέτρια αλληλεξάρτηση των υπόψη μεγεθών. Επίσης, στο διάγραμμα παρουσιάζεται και η ταυτοτική συνάρτηση $y=x$ (δηλαδή $ITSM=E^*_{1-37A}$). Παρατηρείται ότι τα σημεία που προκύπτουν από τα ζεύγη τιμών ($ITSM, E^*_{1-37A}$) είναι πάνω από την ευθεία της ταυτοτικής συνάρτησης και επομένως οι τιμές του ITSM είναι μικρότερες από αυτές του E^*_{1-37A} .

5.2.2 Δοκίμια αντιστοιχισθής στρώσης τύπου ΙΙ

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα της σχέσης του ITSM με το E^*_{1-37A} για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιστοιχισθούς τύπου ΙΙ, ανεξάρτητα του τύπου αδρανούς.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα διασποράς ITSM - E^*_{1-37A} δοκιμών Marshall αντιστοιχισθηρής στρώσης τύπου II.

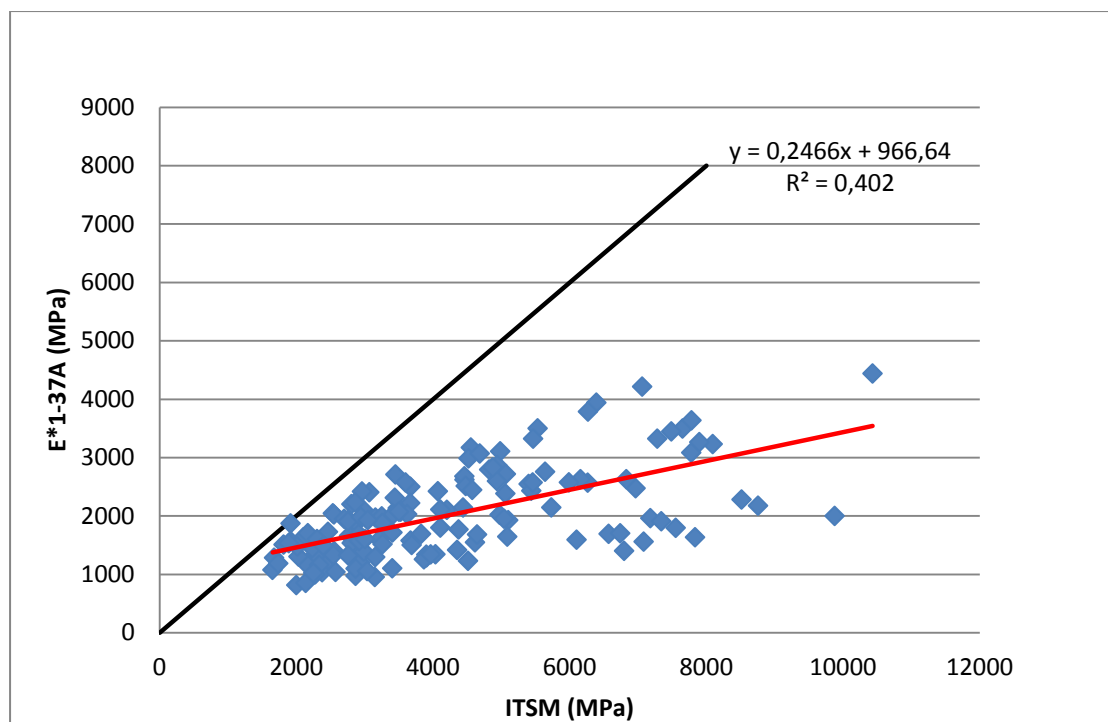
Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο:

$$E^*_{1-37A} = 0,5317(\text{ITSM}) + 7109,5 \quad (5.2)$$

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι 0,284 υποδεικνύοντας πως δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση των υπόψη μεγεθών. Επίσης, στο διάγραμμα παρουσιάζεται και η ταυτοτική συνάρτηση $y=x$ (δηλαδή $\text{ITSM} = E^*_{1-37A}$). Παρατηρείται ότι τα σημεία που προκύπτουν από τα ζεύγη τιμών (ITSM , E^*_{1-37A}) είναι κατά κύριο λόγο πάνω από την ευθεία της ταυτοτικής συνάρτησης και επομένως οι τιμές του ITSM είναι μικρότερες από αυτές του E^*_{1-37A} . Παρατηρούνται όμως και κάποια σημεία κάτω από την ευθεία $y=x$, δηλαδή υπάρχουν σημεία για τα οποία το ITSM είναι μεγαλύτερο από το E^*_{1-37A} .

5.2.3 Δοκίμια αντιστοιχισθηρής στρώσης τύπου III

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα της σχέσης του ITSM με το E^*_{1-37A} για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιστοιχισθηρού τύπου III, ανεξάρτητα του τύπου αδρανούς.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα διασποράς ITSM - E^*_{1-37A} δοκιμών Marshall αντιστοιχισμένης στρώσης τύπου III.

Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο:

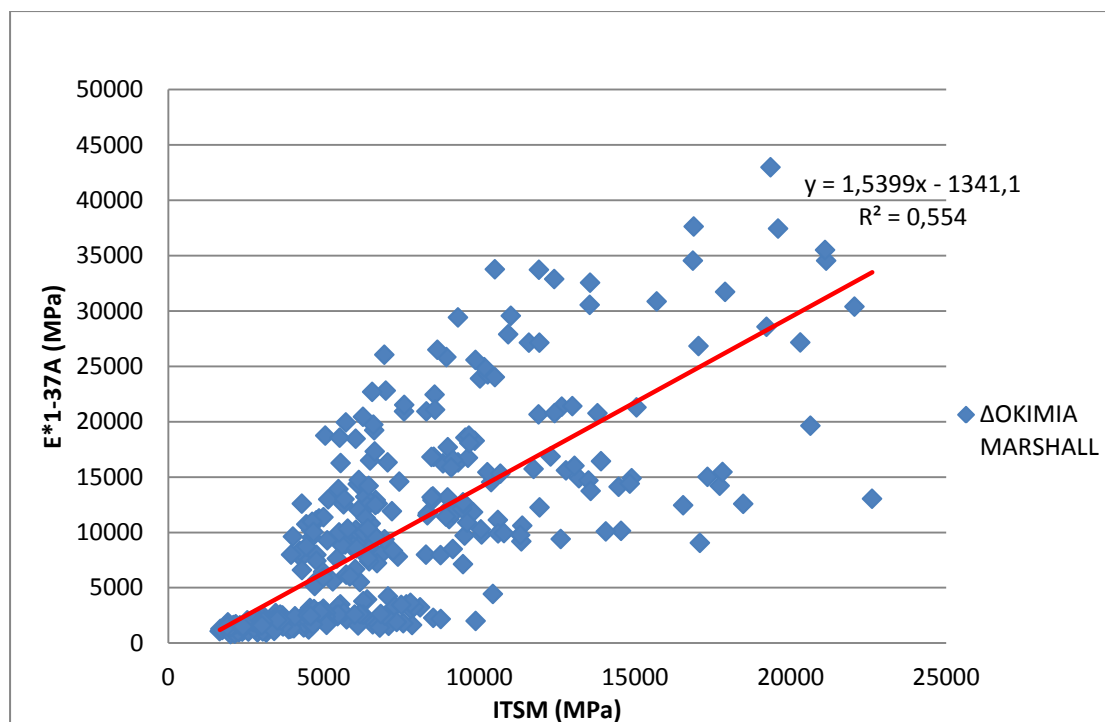
$$E^*_{1-37A} = 0,2466(\text{ITSM}) + 966,64 \quad (5.3)$$

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι 0,402 υποδεικνύοντας πως δεν υπάρχει ισχυρή αλληλεξάρτηση των υπόψη μεγεθών. Επίσης, στο διάγραμμα παρουσιάζεται και η ταυτοτική συνάρτηση $y=x$ (δηλαδή $\text{ITSM}=E^*_{1-37A}$). Παρατηρείται ότι τα σημεία που προκύπτουν από τα ζεύγη τιμών (ITSM , E^*_{1-37A}) είναι κάτω από την ευθεία της ταυτοτικής συνάρτησης και επομένως οι τιμές του ITSM είναι μεγαλύτερες από αυτές του E^*_{1-37A} .

5.2.4 Γενική συσχέτιση του ITSM με το E^*_{1-37A}

Κατόπιν της διερεύνησης της συσχέτισης μεταξύ του ITSM και του E^*_{1-37A} για κάθε επιμέρους τύπο αντιστοιχισμένης στρώσης ανεξαρτήτως τύπου αδρανούς, πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση με βάση το σύνολο των δοκιμών Marshall. Στόχος είναι η διερεύνηση της γενικής συσχέτισης των υπόψη μεγεθών.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα της σχέσης του ITSM με το E^*_{1-37A} για όλα τα δοκίμια Marshall.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα διασποράς ITSM - E^*_{1-37A} δοκιμών Marshall αντιολισθηρών στρώσεων I, II και III

Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο:

$$E^*_{1-37A} = 1,5399(ITSM) - 1341,1 \quad (5.4)$$

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι 0,554 υποδεικνύοντας πως υπάρχει μέτρια συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών. Επομένως, το απλό γραμμικό μοντέλο δεν είναι κατάλληλο να περιγράψει την ενδεχόμενη συσχέτιση των υπόψη μεγεθών.

Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός πολλαπλού γραμμικού μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους όπως τη θερμοκρασία και το ποσοστό των κενών. Η επιλογή των παραμέτρων αυτών στηρίζεται στην εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας από τη θερμοκρασία, καθώς επίσης και στη διακύμανση της τιμής του λόγου ITSM/ E^*_{1-37A} ανάλογα με το ποσοστό κενών, σύμφωνα με τα παραπάνω. Η εξίσωση που προέκυψε είναι η ακόλουθη:

$$E^*_{1-37A_{pred}} = 13836,407 + 0,229*(ITSM) - 132,291*(T) - 468,134*(Va) \quad (5.5)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 της παραπάνω εξίσωσης είναι ίσος με 0,96, υποδεικνύοντας μια άριστη συσχέτιση των υπόψη μεγεθών. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η ανάλυση της διασποράς (ANOVA) η οποία εξετάζει τη σχέση της εξαρτημένης (E^*_{1-37A}) με τις ανεξάρτητες μεταβλητές (ITSM, T, Va). Στην ουσία υπολογίζει το αν η μεταβλητότητα των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από τη μεταβλητότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Πίνακας 5.1: Ανάλυση της διασποράς

Μοντέλο	Άθροισμα τετραγώνων	df	Μέσο τετράγωνο	F	Sig.
1 Παλινδρόμηση	5.396E9	3	1.799E9	1732.702	.000 ^a
Υπόλοιπο	3.447E8	332	1038148.768		
Σύνολο	5.741E9	335			

Η στατιστική συνάρτηση F χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σημαντικότητας της παλινδρόμησης, δηλαδή της εξέτασης της υπόθεσης όλων των συντελεστών των μεταβλητών ταυτόχρονα

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

Έναντι της

$$H_1: \text{τουλάχιστον ένα } \beta_i \neq 0$$

Η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται όταν η p -τιμή του ελέγχου είναι μικρότερη από 0,05. Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα η p -τιμή (Sig.) είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα δεν είναι ποτέ μηδενική αλλά όταν η τιμή είναι πολύ μικρή και προσεγγίζει το μηδέν θεωρείται ίση με το μηδέν.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου t .

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα ελέγχου t

Μοντέλο	Μη κανονικοποιημένοι συντελεστές		Κανονικοποιημένοι συντελεστές	t	Sig.
	B	Τυπικό σφάλμα	Beta		
(σταθερά)	13836.407	737.014		18.774	.000
ITSM	.229	.026	.238	8.828	.000
T	-132.291	21.276	-.131	-6.218	.000
Va	-468.134	13.016	-.774	-35.966	.000

Οι επιμέρους έλεγχοι t εξετάζουν κάθε συντελεστή χωριστά. Οι έλεγχοι βασίζονται στη διαπίστωση ότι, αν μια μεταβλητή δε συμβάλει στη συνάρτηση παλινδρόμησης, τότε ο συντελεστής της συγκεκριμένης μεταβλητής είναι το μηδέν. Ο έλεγχος που γίνεται είναι η εξέταση των υποθέσεων

$$H_0: \beta_i = 0, \text{ δηλαδή η } x_i \text{ δε συμβάλει στο μοντέλο}$$

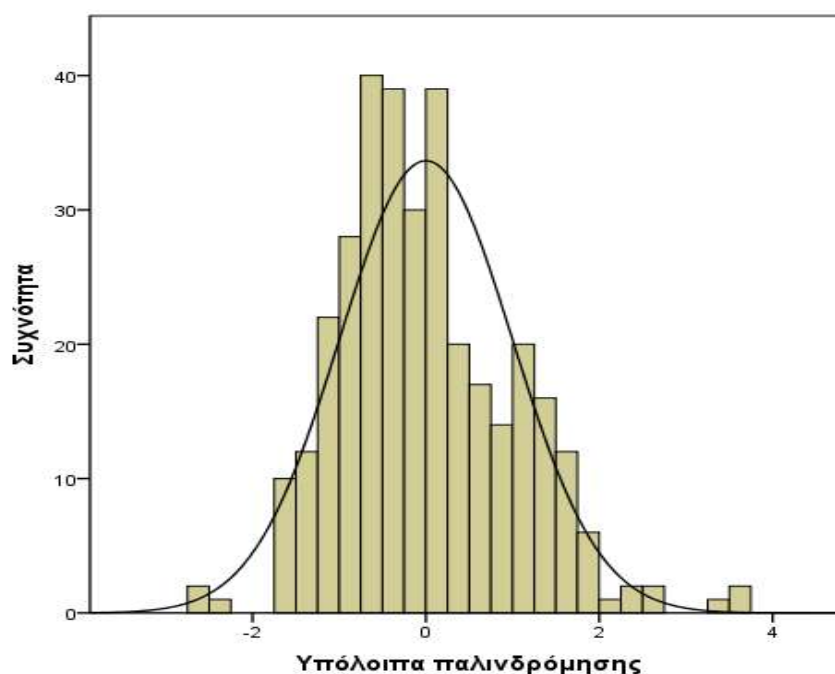
Έναντι της

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

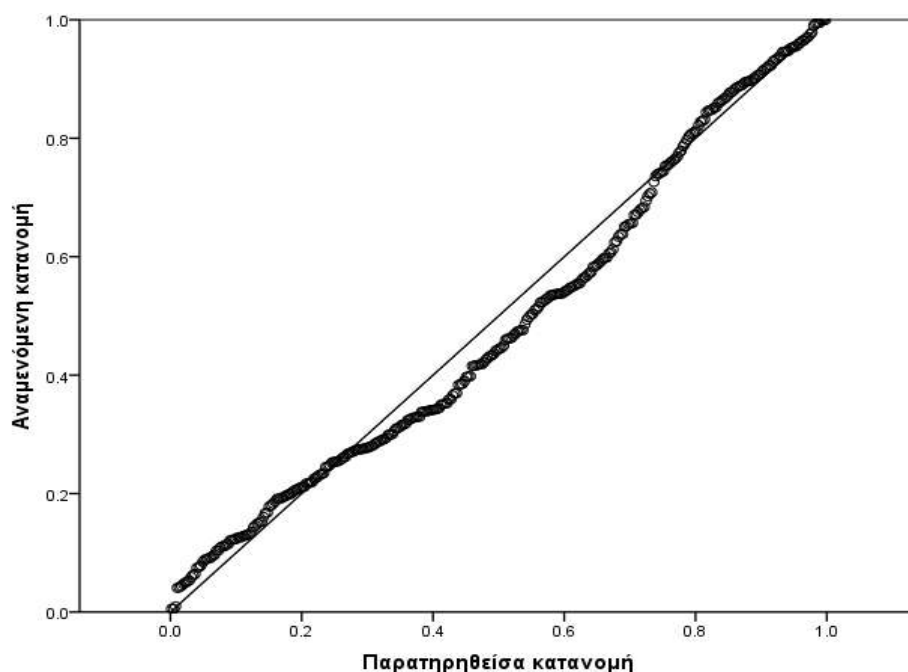
Η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται όταν η p -τιμή του ελέγχου είναι μικρή ($<0,05$). Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η p -τιμή (Sig.) είναι πολύ μικρή για όλους του συντελεστές. Επομένως, οι υπόψη ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο.

Επιπλέον των παραπάνω στατιστικών ελέγχων, είναι απαραίτητος ο έλεγχος των υπολοίπων. Η ορθότητα του μοντέλου εξετάζεται μέσω της κατανομής των υπολοίπων, τα οποία θα πρέπει να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Η υπόθεση αυτή εξετάζεται μέσω γραφικών ελέγχων (σχήματα 5.5 και 5.6).

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των υπολοίπων καθώς και η καμπύλη της κανονικής κατανομής. Παρατηρείται ότι η κατανομή των υπολοίπων πλησιάζει αρκετά την κανονική κατανομή. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται μια συγκριτική αξιολόγηση της κατανομής των υπολοίπων (σημεία) σε σχέση με την αναμενόμενη κανονική κατανομή (γραμμή). Στο διάγραμμα αυτό εντοπίζονται κάποια άτυπα σημεία (απόμακρα) τα οποία δε συμπίπτουν με τη γραμμή της κανονικής κατανομής. Επομένως, τίθενται ερωτήματα για την καταλληλότητα του μοντέλου και τη διερεύνηση μετασχηματισμού κάποιας παραμέτρου.

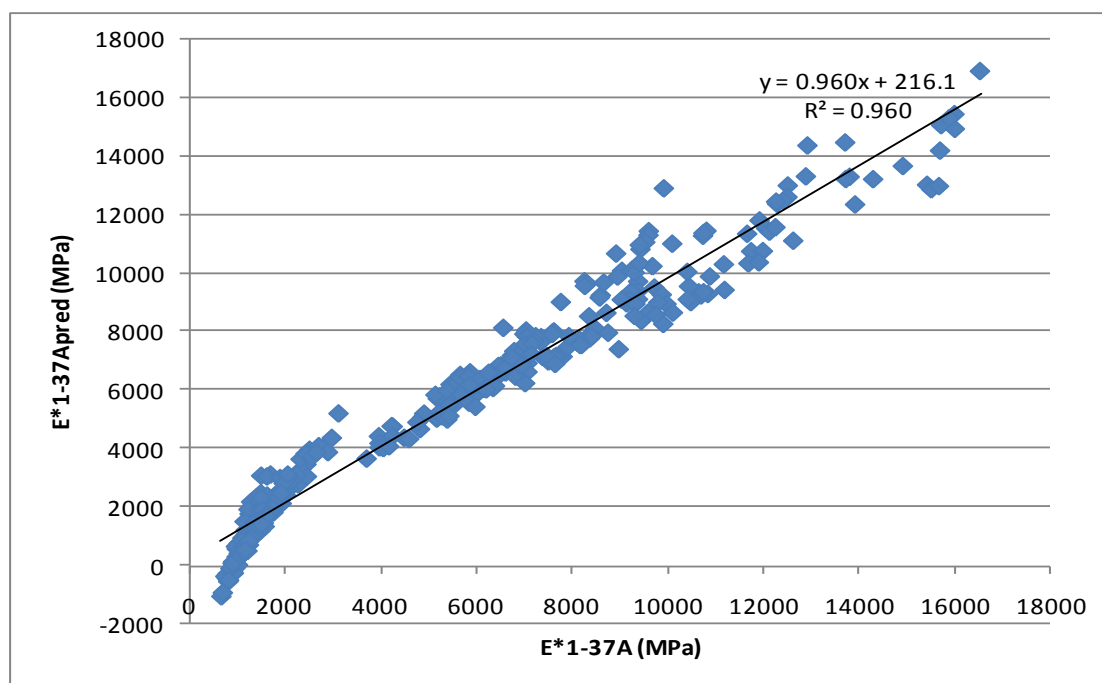


Σχήμα 5.5: Ιστόγραμμα υπολοίπων σε σχέση με την καμπύλη της κανονικής κατανομής



Σχήμα 5.6: Συγκριτική αξιολόγηση της κατανομής των υπολοίπων σε σχέση με την αναμενόμενη κανονική κατανομή

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς μεταξύ των τιμών του E^*_{1-37A} και των εκτιμώμενων τιμών ($E^*_{1-37Apred}$) που προκύπτουν από την εξίσωση (5.5).



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα διασποράς E^*_{1-37A} - $E^*_{1-37Apred}$ δοκιμών Marshall

Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι προκύπτουν κάποιες αρνητικές τιμές για το $E^*_{1-37A_{pred}}$, το οποίο είναι μη αποδεκτό. Επίσης, οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε δοκίμια με ποσοστό κενών μεγαλύτερο του 20%.

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, στο πλαίσιο της ανάπτυξης ενός αναθεωρημένου μοντέλου δεν ελήφθησαν υπόψη τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με ποσοστό κενών μεγαλύτερο από 20%. Επίσης, κατόπιν διερεύνησης η ανεξάρτητη μεταβλητή V_a μετασχηματίστηκε σε $\log V_a$ και συμπεριλήφθηκε και αυτή στο μοντέλο. Η εξίσωση που περιγράφει το αναθεωρημένο μοντέλο είναι:

$$E^*_{1-37A_{pred}} = 23999,825 + 0.075 \cdot (ITSM) - 356,395 \cdot (T) - 605,252 \cdot (V_a) - 2944,29 \cdot (\log V_a) \quad (5.6)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) της παραπάνω εξίσωσης είναι ίσος με 0,96, υποδεικνύοντας μια άριστη συσχέτιση των υπόψη μεγεθών. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζεται η ανάλυση της διασποράς ενώ στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ελέγχου t.

Πίνακας 5.3 Ανάλυση της διασποράς

Μοντέλο	Άθροισμα τετραγώνων	df	Μέσο τετράγωνο	F	Sig.
Παλινδρόμηση	1.956E9	4	4.891E8	1258.561	.000 ^a
Υπόλοιπο	76939938.312	198	388585.547		
Σύνολο	2.033E9	202			

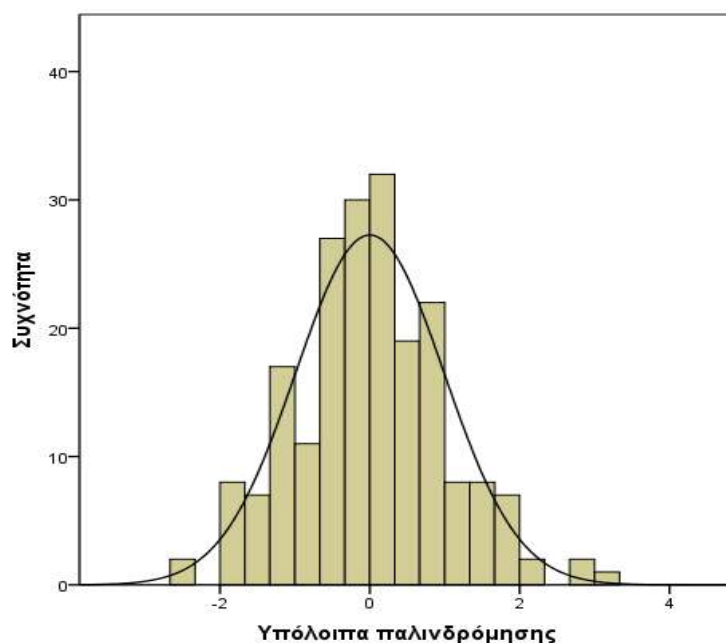
Η p-τιμή του ελέγχου F (Sig.) είναι πολύ μικρή και επομένως η μεταβλητότητα των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από τη μεταβλητότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα ελέγχου t

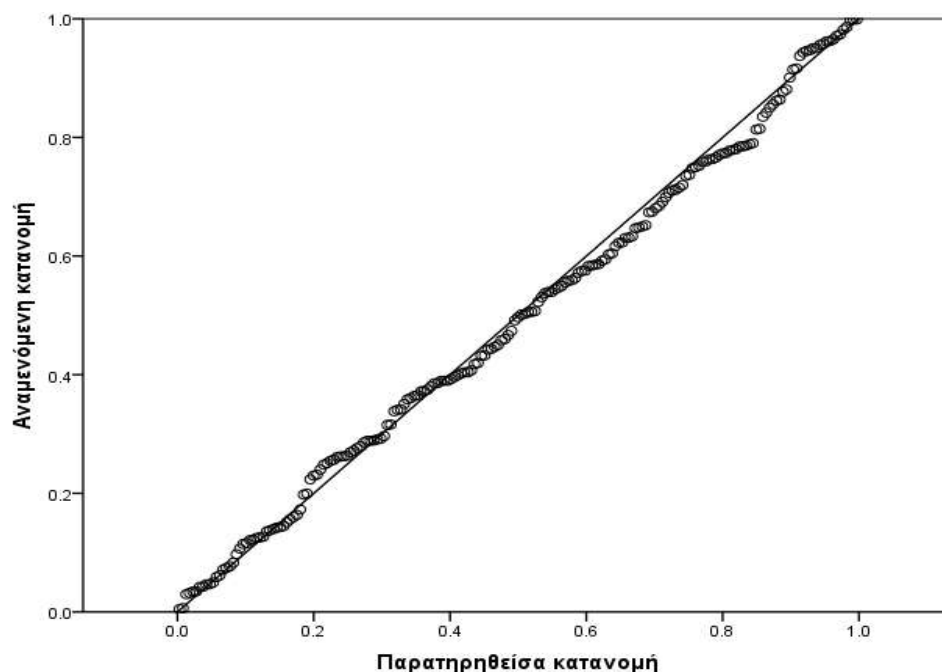
Μοντέλο	Μη κανονικοποιημένοι συντελεστές		Κανονικοποιημένοι συντελεστές	t	Sig.
	B	Τυπικό σφάλμα	Beta		
σταθερά	23999.825	939.495		25.545	.000
ITSM	.075	.019	.100	3.963	.000
V_a	-605.252	57.600	-.674	-10.508	.000
T	-356.395	18.674	-.457	-19.085	.000
$\log V_a$	-2944.299	1300.436	-.144	-2.264	.025

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η p -τιμή (Sig.) είναι πολύ μικρή για όλους του συντελεστές. Επομένως, οι υπόψη ανεξάρτητες μεταβλητές θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο.

Στα σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι γραφικοί έλεγχοι που έγιναν για την εξέταση των υπολοίπων.



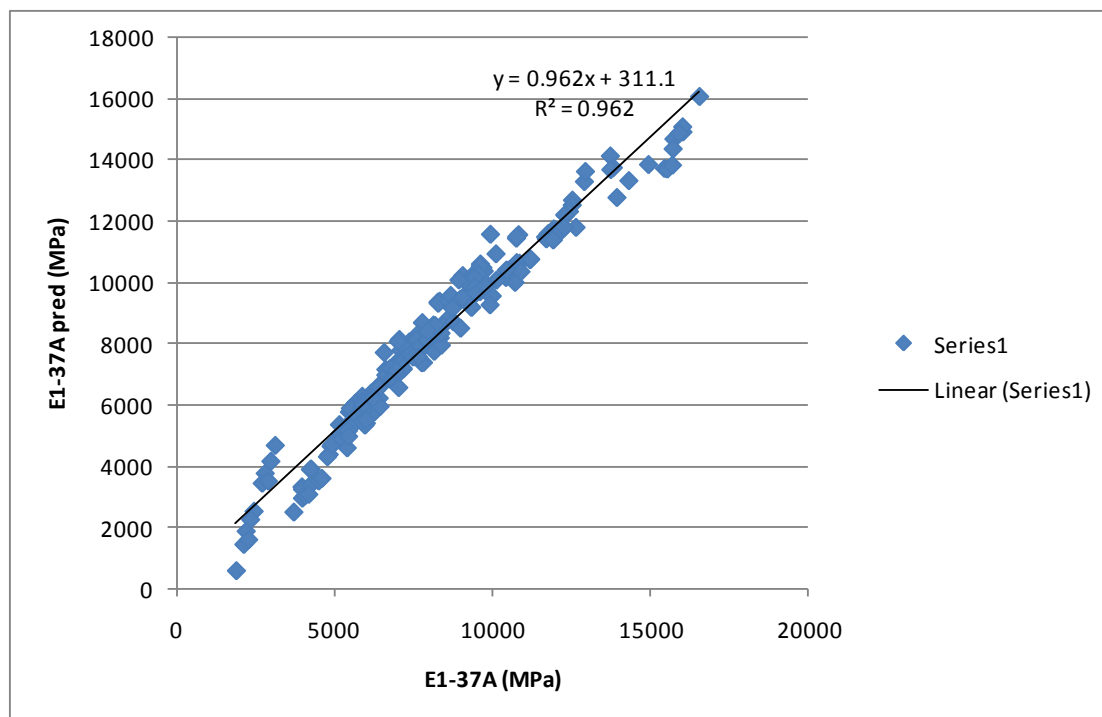
Σχήμα 5.8: Ιστογράμμα υπολοίπων σε σχέση με την καμπύλη της κανονικής κατανομής



Σχήμα 5.9: Συγκριτική αξιολόγηση της κατανομής των υπολοίπων σε σχέση με την αναμενόμενη κανονική κατανομή

Από τη γραφική παράσταση της κανονικής κατανομής παρατηρείται ότι τα σημεία εμφανίζουν μια σχετικά καλή γραμμικότητα και επομένως οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η υπόθεση για την κανονικότητα των υπολοίπων δεν παραβιάζεται σε μεγάλο βαθμό.

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς μεταξύ των τιμών του E^*_{1-37A} και των εκτιμώμενων τιμών ($E^*_{1-37A\text{pred}}$) που προκύπτουν από την εξίσωση (5.6).



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα διασποράς $E^*_{1-37A} - E^*_{1-37A\text{pred}}$ δοκιμίων Marshall

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, κρίνεται ότι το τελικό μοντέλο που αναπτύχθηκε έχει καλή προσαρμογή και περιγράφει ικανοποιητικά τη συσχέτιση των υπόψη μεγεθών.

5.2.5 Διερεύνηση προσαρμογής μοντέλου

Κατόπιν της ανάπτυξης του παραπάνω μοντέλου και των στατιστικών και διαγνωστικών ελέγχων που ακολούθησαν για την καταλληλότητα αυτού, πραγματοποιείται διερεύνηση της προσαρμογής του μοντέλου στην περίπτωση ασφαλτομιγμάτων ίδιας σύνθεσης με αυτά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της αντιολισθηρής στρώσης των οδοστρωμάτων στην Ελλάδα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, από το μίγμα αυτό παρασκευάστηκαν τέσσερα πανομοιότυπα δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου II με αδρανές τη σκωρία και ποσοστό κενών της τάξης του 11,2%. Παρόλο που τα δοκίμια αυτά είναι πανομοιότυπης σύνθεσης πραγματοποιήθηκαν κατάλληλοι έλεγχοι για να διαπιστωθεί αν ο μέσος όρος του μέτρου δυσκαμψίας (τόσο του

ITSM όσο και του E^*_{1-37A}) των υπόψη δοκιμών μπορεί να θεωρηθεί ως η σταθμισμένη τιμή που αντιπροσωπεύει το μέτρο δυσκαμψίας του συγκεκριμένου μίγματος.

Υπενθυμίζεται ότι, για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του ITSM το καθένα από τα τέσσερα αρχικά δοκίμια κόπηκαν σε τρία επιμέρους ίδιων διαστάσεων. Σε αυτή την περίπτωση, καταρχήν διερευνήθηκε αν η μέση τιμή του ITSM των τριών επιμέρους δοκιμών είναι αντιπροσωπευτική του αρχικού δοκιμίου. Προς τούτο, για κάθε τριάδα επιμέρους δοκιμών υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταβλητότητας (Coefficient of Variation: CV). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Συντελεστής Μεταβλητότητας δοκιμών εργαστηριακής δοκιμής ITSM

CV (%)	4°C	15°C	20°C	25°C	37°C
Δοκίμιο 1	6,8	10,0	10,5	7,6	9,4
Δοκίμιο 2	2,6	9,8	4,0	8,0	10,1
Δοκίμιο 3	9,3	6,9	7,8	10,8	4,5
Δοκίμιο 4	4,5	10	2,1	2,4	5,7

Στη συνέχεια μέσω της ίδιας διαδικασίας διερευνήθηκε αν ο μέσος όρος των τιμών, τόσο του ITSM όσο και του E^*_{1-37A} , των τεσσάρων δοκιμών είναι αντιπροσωπευτικός του μέτρου δυσκαμψίας ITSM και E^*_{1-37A} , αντίστοιχα, του μίγματος. Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό του CV των δεδομένων των δύο μέτρων δυσκαμψίας.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα προσδιορισμού CV του ITSM

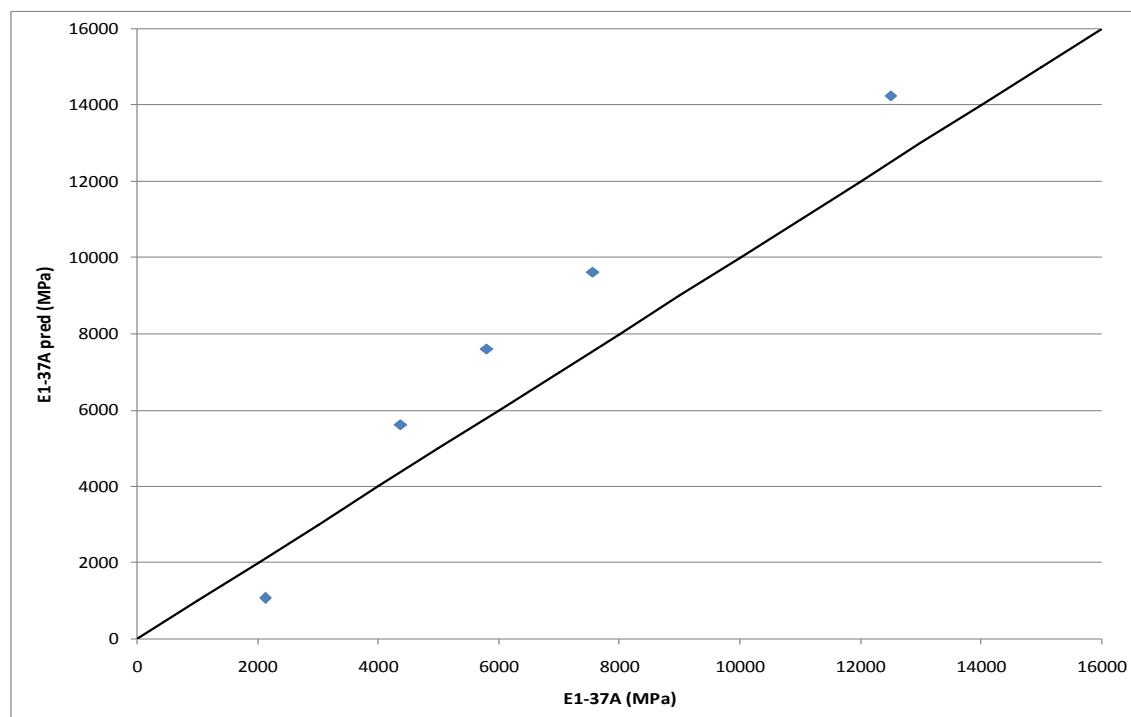
T (°C)	ITSM		
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	CV (%)
4	21226	859.9846	4.05
15	11543	848.9603	7.35
20	8529	568.3395	6.66
25	5699	273.256	4.79
37	2065	178.2537	8.63

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα προσδιορισμού CV του E^*_{1-37A}

T (°C)	E1-37A		
	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	CV (%)
4	12502	187.7964	1.50
15	7563	113.6118	1.50
20	5797	87.0785	1.50
25	4366	65.58778	1.50
37	2124	31.90947	1.50

Παρατηρείται ότι, σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μικρότερος του 10% και επομένως, ο μέσος όρος των τιμών των μέτρων δυσκαμψίας των τεσσάρων δοκιμών θεωρείται αντιπροσωπευτικός του υπόψη μίγματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο έλεγχος της προσαρμογής του μοντέλου που περιγράφεται από τη σχέση (5.6). Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται μέσω του διαγράμματος διασποράς τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγόριθμου του Witczak (E^*_{1-37A}) και τα αντίστοιχα από την εφαρμογή της σχέσης (5.6) ($E^*_{1-37A \text{ pred}}$). Επίσης, φαίνεται και η γραμμή της ταυτοτικής συνάρτησης $y=x$.

**Σχήμα 5.11:** Διάγραμμα διασποράς E^*_{1-37A} - $E^*_{1-37A \text{ pred}}$ δοκιμών αντιστοιχίας στρώσης τύπου II γυροσκοπικής μεθόδου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα δεδομένα συγκεντρώνονται πάνω από τη γραμμή της ταυτοτικής συνάρτησης, υποδεικνύοντας πως οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από την ενεργοποίηση της σχέσης (5.6) είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις πραγματικές τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης του Witczak 1-37A.

Ακολούθως, πραγματοποιείται ο στατιστικός έλεγχος t test ώστε να προσδιοριστεί αν οι διαφορές που παρατηρούνται είναι στατιστικά σημαντικές. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.8

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα ελέγχου t test

	Μέσος Όρος	95% Διάστημα εμπιστοσύνης της διαφοράς		p-τιμή
		Κατώτατο	Ανώτατο	
$E^*_{1-37Apred} - E^*_{1-37A}$	1162.20000	-422.70941	2747.10941	.111

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα, για διάστημα εμπιστοσύνης 95% οι τιμές που προκύπτουν από την ενεργοποίηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε δε διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A, αφού η p-τιμή του ελέγχου είναι μεγαλύτερη από 0,05 (Sig. 0.111). Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι μέσω του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτιμάται ικανοποιητικά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^*_{1-37A} .

5.3 Συσχέτιση του E^*_{1-37A} με το E^*_{LAB}

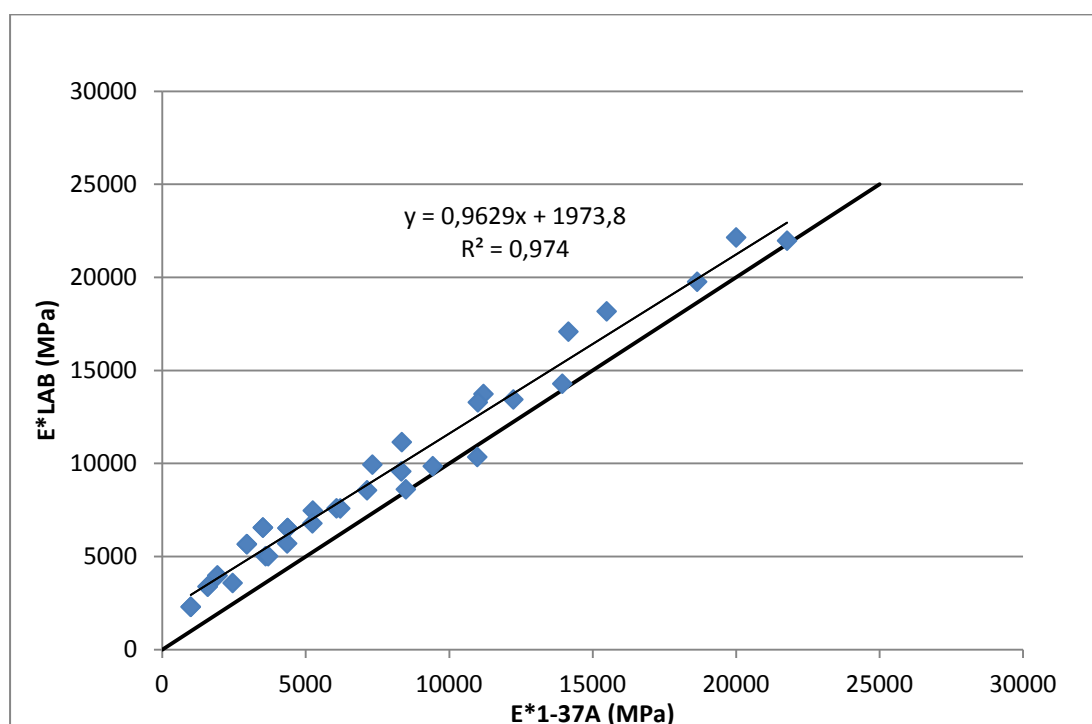
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από την εργαστηριακή δοκιμή (E^*_{LAB}) με το μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από την ενεργοποίησης του αλγορίθμου του Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}). Η προκαταρκτική αυτή διερεύνηση πραγματοποιείται με βάση το μίγμα των τεσσάρων δοκιμών που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε και στα τέσσερα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προηγουμένως, αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV) των αποτελεσμάτων των τεσσάρων δοκιμών για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9: Συντελεστής Μεταβλητότητας δοκιμών εργαστηριακής δοκιμής E^*

$T(^{\circ}C)$ - $f(Hz)$	0,1	0,5	1	5	10	25
4	11,7	12,7	12,2	18,4	12,3	14,6
15	7,9	8,3	9,3	12,4	11,7	11,9
20	17,6	14,9	13,4	15,2	15,7	14,8
25	19,9	19,2	18,9	16,0	17,8	17,1
37	20,0	22,5	22,2	24,2	25,7	25,1

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι μικρότερος από 20% και επομένως ο μέσος όρος των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας για κάθε συχνότητα φόρτισης και κάθε θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικός του δείγματος. Εξάιρεση αποτελούν οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας στους $37^{\circ}C$ σε όλες τις συχνότητες, οι οποίες τελικά δεν ελήφθησαν υπόψη.

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μεγεθών του E^*_{LAB} και του E^*_{1-37A} καθώς και η ταυτοτική συνάρτηση.

**Σχήμα 5.12:** Διάγραμμα διασποράς E^*_{1-37A} - E^*_{LAB} δοκιμών αντιστοιχισμένης στρώσης τύπου II που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο

Η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών περιγράφεται από την εξίσωση της μορφής

$$E^*_{LAB} = 0,96 (E^*_{1-37A}) - 1973,8 \quad (5.7)$$

Η τιμή του συντελεστή R^2 είναι αρκετά υψηλή ($R^2 = 0,974$) υποδεικνύοντας άριστη συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών.

Επίσης, από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα δεδομένα συγκεντρώνονται πάνω από τη γραμμή της ταυτοτικής συνάρτησης και επομένως ο αλγόριθμος Witczak E^*_{1-37A} υποεκτιμά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από την εργαστηριακή δοκιμή.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού ITSM, το οποίο προσδιορίζεται εργαστηριακά, και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^* το οποίο προκύπτει από τον αλγόριθμο πρόβλεψης Witczak 1-37A, για ασφαλτομίγματα αντιολισθηρής στρώσης. Τα οφέλη από αυτή τη διαδικασία είναι η δυνατότητα μετάβασης από ITSM, το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο στην Ευρώπη και έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη βάση δεδομένων, στο E^* το οποίο αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων σύμφωνα με το νέο οδηγό διαστασιολόγησης MEPDG που αναπτύχθηκε από την AASHTO. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης του E^* που προκύπτει εργαστηριακά με το E^* που προκύπτει από τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A, για συγκεκριμένο τύπο μίγματος αντιολισθηρής στρώσης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οδοστρωμάτων στην Ελλάδα.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές καθώς και οι απαιτούμενες επικουρικές εργασίες σε πλήθος δοκιμών Marshall για τον προσδιορισμό του ITSM και του E^* . Από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Όσον αφορά στη σχέση του ITSM με το E^*_{1-37A} που πραγματοποιήθηκε με βάση τα δοκίμια Marshall, προέκυψε ότι ο λόγος ITSM/ E^*_{1-37A} λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες ή μικρότερες της μονάδας, ανάλογα με τον τύπο της αντιολισθηρής στρώσης και κατ'επέκταση με το ποσοστό των κενών αέρα. Σε γενικές γραμμές, για ποσοστό κενών αέρα μικρότερο από 20% οι τιμές του E^*_{1-37A} είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές του ITSM, ενώ το αντίστροφο παρατηρείται όταν το ποσοστό κενών αέρα είναι μεγαλύτερο από 20%. Τα παραπάνω ισχύουν ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης καθώς και του τύπου του αδρανούς των ασφαλτομιγμάτων.

Κατά τη συσχέτιση των δύο μέτρων δυσκαμψίας για κάθε τύπο αντιολισθηρής στρώσης μέσω της απλής γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε ασθενής αλληλεξάρτηση. Πιο συγκεκριμένα, για τις αντιολισθηρές στρώσεις ημιανοιχτού και πορώδους τύπου (τύποι II και III) η συσχέτιση των μεγεθών ήταν εξαιρετικά ασθενής ενώ για την αντιολισθηρή στρώση κλειστού τύπου (τύπος I) παρατηρήθηκε μέτρια συσχέτιση των υπόψη μεγεθών. Η καλύτερη συσχέτιση στην περίπτωση αντιολισθηρής στρώσης κλειστού τύπου ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάπτυξη του αλγορίθμου πρόβλεψης του Witczak βασίστηκε σε κλειστού τύπου ασφαλτομίγματα. Επίσης, και στην περίπτωση που ελήφθησαν υπόψη όλα τα στοιχεία ανεξαρτήτου τύπου αντιολισθηρής στρώσης δεν κατέστη δυνατή η συσχέτιση του ITSM και του E^* . Λόγω της αδυναμίας του απλού γραμμικού

μοντέλου να περιγράψει ικανοποιητικά τη συσχέτιση μεταξύ του ITSM και του E^*_{1-37A} , πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάλυση με εφαρμογή ενός μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο τελικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του E^*_{1-37A} είναι το ITSM, η θερμοκρασία, το ποσοστό κενών αέρα και ο λογάριθμος του ποσοστού κενών αέρα. Η άριστη συσχέτιση των μεγεθών ($R^2=0,96$) αφενός και τα αποτελέσματα των ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στο υπόψη μοντέλο αφετέρου, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών μπορεί να περιγραφεί από ένα μοντέλο αυτής της μορφής. Σημειώνεται ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν έχει καθολική ισχύ καθώς περιέχει περιορισμούς, όπως η σταθερή συχνότητα φόρτισης (ίση με 8Hz) και το ποσοστό κενών του ασφατομίγματος να είναι μικρότερο από 20%.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου που αναπτύχθηκε σε συγκεκριμένο μίγμα αντιολισθηρής στρώσης το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα της υπόψη διερεύνησης είναι ενθαρρυντικά καθώς για το συγκεκριμένο μίγμα αντιολισθηρής στρώσης που παρασκευάστηκε η προσαρμογή ήταν καλή.

Όσον αφορά στην προκαταρκτική διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του E_{LAB}^* και του E^*_{1-37A} για το συγκεκριμένο μίγμα, προκύπτει ότι ο αλγόριθμος του Witczak 1-37A υποεκτιμά τις τιμές του E_{LAB}^* . Ωστόσο, η συσχέτισή τους είναι εφικτή και χαρακτηρίζεται ως άριστη.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση της σχέσης του ITSM με το E^* που προκύπτει τόσο από εργαστηριακές δοκιμές όσο και από αλγόριθμους πρόβλεψης πέραν του Witczak 1-37A. Για την επίτευξη των παραπάνω, θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη και άλλα μίγματα, όπως για παράδειγμα ισοπεδωτικής στρώσης, για τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων και τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου δείγματος.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO T342-11 (2011), "Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

COOPER RESEARCH TECHNOLOGY (2009), " CRT-GYR-EN User Manual", Derbyshire.

COOPER RESEARCH TECHNOLOGY (2009), " CRT-SPLTV User Manual", Derbyshire.

BIRGISSON B., SHOLAR G., ROQUE R., (2005), "Evaluation of a predicted dynamic modulus for Florida mixtures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1929/2005, Washington, D.C.

CELAYA M., NAZARIAN S., ZEA M., TANDON V. (2006), " Use of NDT equipment for construction quality control of Hot Mix Asphalt pavements", Center for Transportation Infrastructure Systems, University of Texas, El Paso.

EKINGEN E.R. (2004), "Determining gradation and creep effects in mixtures using the complex modulus test", Thesis, University of Florida.

ΕΛΟΤ EN 12697.26 (2005), "Ασφαλτικά μίγματα - Μέθοδοι δοκιμής θερμού ασφαλτομίγματος - Μέρος 26: Δυσκαμψία.

ΕΛΟΤ EN 12697.31 (2007), "Ασφαλτικά μίγματα - Μέθοδοι δοκιμής θερμού ασφαλτομίγματος - Μέρος 31: Παρασκευή δοκιμών με συσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης.

GARCIA G., THOMPSON M. (2007), "HMA dynamic modulus predictive models-a review", Research Report FHWA-ICT-07-005, , Illinois Center of Transportation, Urbana.

HARRAN G., SHALABY A. (2009), "Improving the prediction of the dynamic modulus of fine-graded asphalt concrete mixtures at high temperatures", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 36 (2).

HOPKINS T.C., BECKHAM T.L., SUN C., NI B. (2004), "Resilient modulus of Kentucky soils", Research Report KTC-01-07/SPR-163-95-1F, Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky.

HUANG Y.H. (1993), "Pavement Analysis and Design", Pearson Prentice Hall, New Jersey

IM S., KIM Y-R, BAN H. (2010), "Layer moduli of Nebraska pavements for the new mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG)", Nebraska Transportation Center, University of Nebraska-Lincoln, Nebraska Department of Roads.

KHAZANOVICH L. (2011), "Overview of the MEPDG (2002) Pavement Design Guide", University of Minnesota.

ΛΕΒΕΝΤΗΣ Α. (2011), "Εκτίμηση παραμέτρων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων στο εργαστήριο μέσω γεωφυσικών μεθόδων", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

ΛΟΪΖΟΣ Α. (2013), "Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα 8^ο εξάμηνο", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΛΟΪΖΟΣ Α. (2012), "Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων 9^ο εξάμηνο", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

LI X., WILLIAMS C.R. (2008), "Dynamic modulus testing of Iowa asphalt mixtures", Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University.

ROBBINS M.M. (2009), "An investigation into dynamic modulus of hot-mix asphalt and its contributing factors", Thesis, Auburn University, Auburn, Alabama.

PUPPALA A.J. (2007), "Estimating Stiffness of Subgrades and Unbound Materials for Pavement Design", The University of Texas, Arlington

SUNARJONO S. (2007), "Tensile strength and stiffness modulus of foamed asphalt applied to a grading representative of Indonesian road recycled pavement materials", University of Nottingham

SINGH D., ZAMAN M., COMMURI S. (2011), "Evaluation of predictive models for estimating dynamic modulus of HMA mixes used in Oklahoma", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2210/2011, Washington D.C.

YODER E.J., WITCZAK M.W. (1975), 'Αρχές σχεδιασμού οδοστρωμάτων', Μόσχος Γκιούρδας, Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1: Πάχος δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης πριν τη δοκιμή του ITSM

Πάχος δοκιμίων (mm)	I	II	III	IV
1	50	48,5	47,5	46,5
2	46	47,5	46	48
3	42	45	44,5	49

Πίνακας 2: Αποτελέσματα δοκιμής γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Δοκίμια	M(gr)	h(mm)	d(mm)	ρ	Gmax	Va
1	7574,6	170	150	2521,38	2836,6	11,11%
2	7564,2	170	150	2517,92	2836,6	11,23%
3	7566,6	170	150	2518,72	2836,6	11,21%
4	7544	170	150	2511,19	2836,6	11,47%

Πίνακας 3: ITSM (MPa) δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης (8Hz)

ITSM (MPa)	4 ⁰ C	15 ⁰ C	20 ⁰ C	25 ⁰ C	37 ⁰ C
Δοκίμιο 1	22251	12518	8876	5768	2058
Δοκίμιο 2	21020	11717	7904	5549	2200
Δοκίμιο 3	21530	11355	8211	5429	1816
Δοκίμιο 4	20875	11458	9127	6051	2187

Πίνακας 4: E^*_{1-37A} δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης - Δοκίμιο 1

E (MPa)							
Δοκίμιο 1							
T(°C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	8	10	25
4	11417	14435	15794	19009	19950	20395	22204
15	5352	7470	8515	11216	12067	12479	14218
20	3675	5339	6195	8497	9248	9616	11196
25	2504	3768	4442	6329	6965	7280	8659
37	1016	1618	1963	3009	3388	3580	4456

Πίνακας 5: E^*_{1-37A} δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης - Δοκίμιο 2

E (MPa)							
Δοκίμιο 2							
T(°C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	8	10	25
4	11209	14172	15507	18663	19587	20024	21800
15	5255	7334	8360	11012	11847	12252	13959
20	3608	5242	6082	8343	9080	9441	10992
25	2459	3699	4361	6214	6838	7147	8501
37	998	1589	1927	2954	3326	3515	4375

Πίνακας 6: E^*_{1-37A} δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης - Δοκίμιο 3

E (MPa)							
Δοκίμιο 3							
T(°C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	8	10	25
4	11261	14238	15578	18749	19677	20116	21900
15	5279	7368	8399	11063	11902	12308	14023
20	3624	5266	6110	8381	9121	9484	11043
25	2470	3716	4381	6242	6870	7180	8540
37	1002	1596	1936	2968	3341	3531	4395

Πίνακας 7: E^*_{1-37A} δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης - Δοκίμιο 4

E (MPa)							
Δοκίμιο 4							
T(⁰ C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	8	10	25
4	10904	13787	15085	18156	19054	19479	21207
15	5112	7134	8133	10713	11525	11919	13579
20	3510	5099	5917	8116	8833	9184	10693
25	2392	3599	4243	6045	6652	6953	8270
37	971	1545	1875	2874	3236	3419	4256

Πίνακας 8: E^*_{LAB} δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης - Δοκίμιο 1

E (MPa)						
Δοκίμιο 1						
T(⁰ C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	10	25
4	13982	17127	18127	17195	20562	20199
15	6737	8920	9818	11194	11725	12272
20	4637	6321	7102	8879	9139	9620
25	3311	4607	5226	6806	7446	7608
37	2954	4529	5296	7780	9051	8999

Πίνακας 9: E^*_{LAB} δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης - Δοκίμιο 2

E (MPa)						
Δοκίμιο 2						
T(⁰ C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	10	25
4	14613	18193	18773	21557	22815	22336
15	7249	9611	10826	12878	12579	13608
20	5102	7166	8085	10072	10219	10888
25	3352	4824	5537	7573	8371	8514
37	2116	3036	3579	5033	5661	5706

Πίνακας 10: E^*_{LAB} δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης - Δοκίμιο 3

E (MPa)						
Δοκίμιο 3						
T(⁰ C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	10	25
4	11387	14022	15216	16289	19512	19025
15	7802	10579	11895	15061	15223	16137
20	4124	5654	6434	7986	8218	8676
25	2826	3947	4488	6234	7161	7114
37	1403	2013	2370	3290	3733	3752

Πίνακας 11: E^*_{LAB} δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης - Δοκίμιο 4

E (MPa)						
Δοκίμιο 4						
T(⁰ C)-f(Hz)	0,1	0,5	1	5	10	25
4	14931	18967	20560	23991	25671	26305
15	8064	10618	12028	13989	14209	15103
20	6190	7969	8713	11342	11819	12183
25	4801	6666	7536	9703	11239	11187
37	2695	3944	4636	6534	7759	7640

Πίνακας 12 : ITSM (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το διαβάση

ΔΙΑΒΑΣΗΣ			
Δοκίμιο	ITSM 15°C	ITSM 20°C	ITSM 25°C
A1	22058	10019	6023
A2	20316	12648	6487
A3	15700	10268	5045
A4	13546	10499	5508
A5	12784	9065	5840
A6	17725	9029	5918
A7	14895	9171	6474
A8	13200	8344	6056
A9	14476	10595	6505
A10	17332	9798	6092
A11	14554	8283	5719
A12	14064	8753	5873
A13	16551	10071	6493
A14	18481	10601	6645
A15	17088	9473	6159
A16	22622	10048	6818
A17	8517	4108	2555
A18	9880	3673	2452
A19	4976	3217	2192
A20	8758	3408	2543
A21	6572	3903	2378
A22	7182	4616	2932
A23	6741	4037	2574
A24	5733	3827	2279
A25	7837	3906	2263
A26	6102	3868	2867
A27	7084	4513	3149
A28	7553	4354	2868

Πίνακας 13: ITSM (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το γάββρο

ΓΑΒΒΡΟΣ			
Δοκίμιο	ITSM 15°C	ITSM 20°C	ITSM 25°C
B1	19358	10497	6945
B2	16890	11011	6991
B3	19601	9311	6554
B4	17899	10156	6619
B5	13796	9314	6733
B6	11902	8832	5635
B7	12988	8534	5141
B8	9550	7425	4846
B9	12289	8505	6029
B10	15051	9633	6668
B11	13909	8492	6288
B12	20641	10256	7189
B13	17816	9443	6952
B14	13506	8329	5684
B15	10378	8924	5577
B16	13058	9487	6624
B17	10434	5532	3451
B18	6392	4985	3069
B19	7062	5466	3599
B20	7653	5642	3485
B21	8095	5401	3158
B22	7781	5440	2879
B23	7899	5460	3251
B24	7784	4942	3667
B25	6269	4522	3442
B26	7283	4462	3419
B27	7489	5068	4204
B28	4555	3670	2764

Πίνακας 14: ITSM (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς τη σκωρία

ΣΚΩΡΙΑ			
Δοκίμιο	ITSM 15°C	ITSM 20°C	ITSM 25°C
Γ1	21147	11592	7578
Γ2	19230	8561	6636
Γ3	21112	10926	7584
Γ4	16863	11929	8296
Γ5	8460	6331	4592
Γ6	9475	5491	4271
Γ7	9851	6090	4758
Γ8	8985	5469	4436
Γ9	9664	6124	4988
Γ10	11743	6398	4609
Γ11	9525	5418	4938
Γ12	10675	6111	5109
Γ13	11349	6710	5287
Γ14	10790	7380	5835
Γ15	12614	6457	4783
Γ16	9145	6009	4706
Γ17	4375	2989	1651
Γ18	4107	2773	1675
Γ19	5102	3263	2152
Γ20	5060	3258	2234
Γ21	7342	3689	2336
Γ22	4937	2536	2073
Γ23	4441	2915	2032
Γ24	5041	2812	1736
Γ25	5088	3156	2278
Γ26	3967	3037	2000
Γ27	6798	3405	2137
Γ28	4646	2759	2248

Πίνακας 15: ITSM (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

ΣΠΗΛΙΤΗΣ			
Δοκίμιο	ITSM 15°C	ITSM 20°C	ITSM 25°C
Δ1	17044	8577	5539
Δ2	13558	9875	6592
Δ3	12406	8940	5707
Δ4	11914	8649	6258
Δ5	9677	6442	4625
Δ6	9156	5665	4666
Δ7	8978	5767	4762
Δ8	9095	6660	4006
Δ9	13577	6509	4228
Δ10	14835	6343	4441
Δ11	12419	7051	4292
Δ12	11934	6641	4763
Δ13	11379	7221	4976
Δ14	8464	6411	3946
Δ15	9609	6054	4296
Δ16	11313	6421	4986
Δ17	4460	2975	2105
Δ18	4685	2962	1916
Δ19	6265	2552	1917
Δ20	4823	2807	2169
Δ21	4875	2862	2464
Δ22	6966	2702	1814
Δ23	4072	2758	2014
Δ24	4480	2947	1890
Δ25	6159	3527	2304
Δ26	5990	3623	2920
Δ27	6830	3502	3005
Δ28	4575	3046	2397

Πίνακας 16 : E^*_{1-37A} (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το διαβάση

ΔΙΑΒΑΣΗΣ			
Δοκίμιο	E^*_{1-37A} 15°C	E^*_{1-37A} 20°C	E^*_{1-37A} 25°C
A1	29473	23060	17718
A2	26334	20604	15831
A3	29927	23415	17991
A4	29624	23178	17809
A5	15131	11860	9130
A6	13788	10807	8320
A7	14444	11322	8715
A8	14444	11322	8715
A9	13693	10733	8262
A10	14566	11417	8789
A11	9835	7709	5934
A12	9784	7669	5903
A13	12077	9466	7287
A14	12202	9564	7362
A15	8783	6884	5299
A16	12647	9913	7631
A17	2214	1738	1341
A18	1941	1524	1176
A19	1962	1541	1188
A20	2111	1658	1279
A21	1644	1291	996
A22	1904	1495	1153
A23	1653	1298	1001
A24	2082	1635	1261
A25	1570	1233	951
A26	1546	1214	936
A27	1514	1189	917
A28	1744	1369	1056

Πίνακας 17 : E^*_{1-37A} (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το γάββρο

ΓΑΒΒΡΟΣ			
Δοκίμιο	E^*_{1-37A} 15°C	E^*_{1-37A} 20°C	E^*_{1-37A} 25°C
B1	41672	32569	24994
B2	36484	28514	21883
B3	36303	28372	21774
B4	30760	24040	18449
B5	20132	15743	12089
B6	20030	15663	12027
B7	20756	16231	12463
B8	17995	14072	10806
B9	16345	12782	9815
B10	20646	16145	12397
B11	15934	12460	9568
B12	19039	14888	11433
B13	14986	11719	8999
B14	14243	11138	8552
B15	14099	11025	8466
B16	15529	12143	9325
B17	4307	3379	2603
B18	3823	2999	2311
B19	4089	3208	2472
B20	3393	2661	2051
B21	3135	2459	1895
B22	2993	2348	1809
B23	3167	2485	1914
B24	3529	2768	2133
B25	3674	2882	2221
B26	3225	2530	1949
B27	3345	2624	2022
B28	3077	2414	1860

Πίνακας 18 : E^*_{1-37A} (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς τη σκωρία

ΣΚΩΡΙΑ			
Δοκίμιο	E^*_{1-37A} 15°C	E^*_{1-37A} 20°C	E^*_{1-37A} 25°C
Γ1	33494	26175	20085
Γ2	27701	21648	16612
Γ3	34428	26905	20646
Γ4	33494	26175	20085
Γ5	16305	12750	9791
Γ6	12333	9644	7406
Γ7	17722	13858	10642
Γ8	17157	13417	10303
Γ9	18172	14211	10913
Γ10	15256	11930	9161
Γ11	9416	7363	5654
Γ12	14839	11604	8911
Γ13	8910	6968	5351
Γ14	9635	7535	5786
Γ15	9118	7130	5475
Γ16	8239	6443	4947
Γ17	1716	1344	1034
Γ18	2047	1603	1233
Γ19	1870	1465	1127
Γ20	2313	1811	1393
Γ21	1852	1451	1116
Γ22	2521	1974	1519
Γ23	2080	1629	1253
Γ24	1894	1483	1141
Γ25	1597	1251	962
Γ26	1301	1019	784
Γ27	1361	1066	820
Γ28	1633	1279	984

Πίνακας 19 : E^*_{1-37A} (MPa) δοκιμών Marshall με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

ΣΠΗΛΙΤΗΣ			
Δοκίμιο	E^*_{1-37A} 15°C	E^*_{1-37A} 20°C	E^*_{1-37A} 25°C
Δ1	26016	20335	15607
Δ2	31563	24670	18934
Δ3	31883	24920	19127
Δ4	32697	25556	19614
Δ5	17522	13697	10513
Δ6	16044	12541	9626
Δ7	12759	9973	7655
Δ8	15391	12031	9234
Δ9	13327	10417	7996
Δ10	13964	10915	8378
Δ11	20144	15746	12086
Δ12	11887	9291	7132
Δ13	10286	8041	6172
Δ14	12777	9987	7666
Δ15	10556	8251	6333
Δ16	9469	7402	5681
Δ17	2600	2039	1570
Δ18	2978	2335	1798
Δ19	2494	1955	1506
Δ20	2711	2126	1637
Δ21	2748	2155	1660
Δ22	2401	1883	1450
Δ23	2351	1844	1420
Δ24	2439	1912	1473
Δ25	2551	2000	1541
Δ26	2499	1960	1509
Δ27	2551	2000	1541
Δ28	2373	1861	1433

Πίνακας 20: Δοκίμια Marshall με τύπο αδρανούς το διαβάση

Δοκίμιο	G	Gmax	Va (%)	p34	p38	p4	p200	Vbeff	VMA	VFA	Gse	Gsb	Vba	Vb
A1	2,320	2,477	6,34	0	16,2	50,5	7,7	4,70	15,5	59,1	2,671	2,65	0,30	5
A2	2,298	2,477	7,23	0	16,2	50,5	7,7	4,70	15,5	53,4	2,671	2,65	0,30	5
A3	2,323	2,477	6,22	0	16,2	50,5	7,7	4,70	15,5	59,9	2,671	2,65	0,30	5
A4	2,321	2,477	6,30	0	16,2	50,5	7,7	4,70	15,5	59,4	2,671	2,65	0,30	5
A5	2,259	2,52	10,36	0	16,8	64,6	6,3	3,98	18,9	45,2	2,688	2,659	0,42	4,4
A6	2,241	2,52	11,07	0	16,8	64,6	6,3	3,98	18,9	41,4	2,688	2,659	0,42	4,4
A7	2,250	2,52	10,71	0	16,8	64,6	6,3	3,98	18,9	43,3	2,688	2,659	0,42	4,4
A8	2,250	2,52	10,71	0	16,8	64,6	6,3	3,98	18,9	43,3	2,688	2,659	0,42	4,4
A9	2,248	2,53	11,15	0	16,8	64,6	6,3	3,68	18,9	41,0	2,688	2,659	0,42	4,1
A10	2,260	2,53	10,67	0	16,8	64,6	6,3	3,68	18,9	43,5	2,688	2,659	0,42	4,1
A11	2,184	2,53	13,68	0	16,8	64,6	6,3	3,68	18,9	27,6	2,688	2,659	0,42	4,1
A12	2,183	2,53	13,72	0	16,8	64,6	6,3	3,68	18,9	27,4	2,688	2,659	0,42	4,1
A13	2,245	2,555	12,13	0	16,8	64,6	6,3	3,33	18,9	35,8	2,688	2,659	0,42	3,75
A14	2,247	2,555	12,05	0	16,8	64,6	6,3	3,33	18,9	36,2	2,688	2,659	0,42	3,75
A15	2,183	2,555	14,56	0	16,8	64,6	6,3	3,33	18,9	23,0	2,688	2,659	0,42	3,75
A16	2,254	2,555	11,78	0	16,8	64,6	6,3	3,33	18,9	37,7	2,688	2,659	0,42	3,75
A17	1,943	2,525	23,05	0	21	84,9	3,8	4,29	30	23,2	2,703	2,688	0,21	4,5
A18	1,918	2,525	24,04	0	21	84,9	3,8	4,29	30	19,9	2,703	2,688	0,21	4,5
A19	1,920	2,525	23,96	0	21	84,9	3,8	4,29	30	20,1	2,703	2,688	0,21	4,5
A20	1,934	2,525	23,41	0	21	84,9	3,8	4,29	30	22,0	2,703	2,688	0,21	4,5
A21	1,886	2,525	25,31	0	21	84,9	3,8	3,99	30	15,6	2,703	2,688	0,21	4,2

A22	1,914	2,525	24,20	0	21	84,9	3,8	3,99	30	19,3	2,703	2,688	0,21	4,2
A23	1,887	2,525	25,27	0	21	84,9	3,8	3,99	30	15,8	2,703	2,688	0,21	4,2
A24	1,931	2,525	23,52	0	21	84,9	3,8	3,99	30	21,6	2,703	2,688	0,21	4,2
A25	1,890	2,54	25,59	0	21	84,9	3,8	3,54	18,9	-35,4	2,703	2,688	0,21	3,75
A26	1,885	2,54	25,79	0	21	84,9	3,8	3,54	18,9	-36,4	2,703	2,688	0,21	3,75
A27	1,881	2,54	25,94	0	21	84,9	3,8	3,54	18,9	-37,3	2,703	2,688	0,21	3,75
A28	1,908	2,54	24,88	0	21	84,9	3,8	3,54	18,9	-31,7	2,703	2,688	0,21	3,75

Πίνακας 21: Δοκίμια Marshall με τύπο αδρανούς το γάββρο

Δοκίμιο	G	Gmax	Va (%)	p34	p38	p4	p200	Vbeff	VMA	VFA	Gse	Gsb	Vba	Vb
B1	2,397	2,493	3,85	0	20,4	49	6,9	4,86	16,4	76,5	2,69	2,673	0,24	5,1
B2	2,370	2,493	4,93	0	20,4	49	6,9	4,86	16,4	69,9	2,69	2,673	0,24	5,1
B3	2,369	2,493	4,97	0	20,4	49	6,9	4,86	16,4	69,7	2,69	2,673	0,24	5,1
B4	2,336	2,493	6,30	0	20,4	49	6,9	4,86	16,4	61,6	2,69	2,673	0,24	5,1
B5	2,309	2,532	8,81	0	27	63,1	6,7	4,21	18,9	53,4	2,716	2,688	0,39	4,6
B6	2,308	2,532	8,85	0	27	63,1	6,7	4,21	18,9	53,2	2,716	2,688	0,39	4,6
B7	2,315	2,532	8,57	0	27	63,1	6,7	4,21	18,9	54,7	2,716	2,688	0,39	4,6
B8	2,287	2,532	9,68	0	27	63,1	6,7	4,21	18,9	48,8	2,716	2,688	0,39	4,6
B9	2,285	2,552	10,46	0	27	63,1	6,7	3,61	18,9	44,6	2,716	2,688	0,39	4
B10	2,331	2,552	8,66	0	27	63,1	6,7	3,61	18,9	54,2	2,716	2,688	0,39	4
B11	2,280	2,552	10,66	0	27	63,1	6,7	3,61	18,9	43,6	2,716	2,688	0,39	4

B12	2,315	2,552	9,29	0	27	63,1	6,7	3,61	18,9	50,9	2,716	2,688	0,39	4
B13	2,283	2,57	11,17	0	27	63,1	6,7	3,11	18,9	40,9	2,716	2,688	0,39	3,5
B14	2,273	2,57	11,56	0	27	63,1	6,7	3,11	18,9	38,9	2,716	2,688	0,39	3,5
B15	2,271	2,57	11,63	0	27	63,1	6,7	3,11	18,9	38,4	2,716	2,688	0,39	3,5
B16	2,290	2,57	10,89	0	27	63,1	6,7	3,11	18,9	42,4	2,716	2,688	0,39	3,5
B17	2,081	2,546	18,26	0	25,8	84,7	3,8	4,28	30	39,1	2,724	2,715	0,12	4,4
B18	2,058	2,546	19,17	0	25,8	84,7	3,8	4,28	30	36,1	2,724	2,715	0,12	4,4
B19	2,071	2,546	18,66	0	25,8	84,7	3,8	4,28	30	37,8	2,724	2,715	0,12	4,4
B20	2,035	2,546	20,07	0	25,8	84,7	3,8	4,28	30	33,1	2,724	2,715	0,12	4,4
B21	2,038	2,57	20,70	0	25,8	84,7	3,8	3,63	30	31,0	2,724	2,715	0,12	3,75
B22	2,029	2,57	21,05	0	25,8	84,7	3,8	3,63	30	29,8	2,724	2,715	0,12	3,75
B23	2,040	2,57	20,62	0	25,8	84,7	3,8	3,63	30	31,3	2,724	2,715	0,12	3,75
B24	2,061	2,57	19,81	0	25,8	84,7	3,8	3,63	30	34,0	2,724	2,715	0,12	3,75
B25	2,044	2,54	19,53	0	25,8	84,7	3,8	3,13	18,9	-3,3	2,724	2,715	0,12	3,25
B26	2,019	2,54	20,51	0	25,8	84,7	3,8	3,13	18,9	-8,5	2,724	2,715	0,12	3,25
B27	2,026	2,54	20,24	0	25,8	84,7	3,8	3,13	18,9	-7,1	2,724	2,715	0,12	3,25
B28	2,010	2,54	20,87	0	25,8	84,7	3,8	3,13	18,9	-10,4	2,724	2,715	0,12	3,25

Πίνακας 22: Δοκίμια Marshall με τύπο αδρανούς τη σκωρία

Δοκίμιο	G	Gmax	Va (%)	p34	p38	p4	p200	Vbeff	VMA	VFA	Gse	Gsb	Vba	Vb
Γ1	2,573	2,725	5,58	0	22,1	51	7,3	4,68	16,4	66,0	2,972	2,945	0,32	5
Γ2	2,532	2,725	7,08	0	22,1	51	7,3	4,68	16,4	56,8	2,972	2,945	0,32	5
Γ3	2,579	2,725	5,36	0	22,1	51	7,3	4,68	16,4	67,3	2,972	2,945	0,32	5
Γ4	2,573	2,725	5,58	0	22,1	51	7,3	4,68	16,4	66,0	2,972	2,945	0,32	5
Γ5	2,511	2,8	10,32	0	28	64,8	6,4	4,13	18,9	45,4	3,057	3,024	0,37	4,5
Γ6	2,451	2,8	12,46	0	28	64,8	6,4	4,13	18,9	34,1	3,057	3,024	0,37	4,5
Γ7	2,529	2,8	9,68	0	28	64,8	6,4	4,13	18,9	48,8	3,057	3,024	0,37	4,5
Γ8	2,522	2,8	9,93	0	28	64,8	6,4	4,13	18,9	47,5	3,057	3,024	0,37	4,5
Γ9	2,552	2,82	9,50	0	28	64,8	6,4	3,88	18,9	49,7	3,057	3,024	0,37	4,25
Γ10	2,514	2,82	10,85	0	28	64,8	6,4	3,88	18,9	42,6	3,057	3,024	0,37	4,25
Γ11	2,410	2,82	14,54	0	28	64,8	6,4	3,88	18,9	23,1	3,057	3,024	0,37	4,25
Γ12	2,508	2,82	11,06	0	28	64,8	6,4	3,88	18,9	41,5	3,057	3,024	0,37	4,25
Γ13	2,431	2,86	15,00	0	28	64,8	6,4	3,23	18,9	20,6	3,057	3,024	0,37	3,6
Γ14	2,448	2,86	14,41	0	28	64,8	6,4	3,23	18,9	23,8	3,057	3,024	0,37	3,6
Γ15	2,436	2,86	14,83	0	28	64,8	6,4	3,23	18,9	21,6	3,057	3,024	0,37	3,6
Γ16	2,414	2,86	15,59	0	28	64,8	6,4	3,23	18,9	17,5	3,057	3,024	0,37	3,6
Γ17	2,190	2,934	25,36	0	32	82,4	2,7	4,12	30	15,5	3,203	3,165	0,38	4,5
Γ18	2,229	2,934	24,03	0	32	82,4	2,7	4,12	30	19,9	3,203	3,165	0,38	4,5
Γ19	2,209	2,934	24,71	0	32	82,4	2,7	4,12	30	17,6	3,203	3,165	0,38	4,5
Γ20	2,256	2,934	23,11	0	32	82,4	2,7	4,12	30	23,0	3,203	3,165	0,38	4,5
Γ21	2,233	2,97	24,81	0	32	82,4	2,7	3,42	30	17,3	3,203	3,165	0,38	3,8

Γ22	2,302	2,97	22,49	0	32	82,4	2,7	3,42	30	25,0	3,203	3,165	0,38	3,8
Γ23	2,259	2,97	23,94	0	32	82,4	2,7	3,42	30	20,2	3,203	3,165	0,38	3,8
Γ24	2,238	2,97	24,65	0	32	82,4	2,7	3,42	30	17,8	3,203	3,165	0,38	3,8
Γ25	2,214	2,99	25,95	0	32	82,4	2,7	2,92	18,9	15,6	3,203	3,165	0,38	3,3
Γ26	2,168	2,99	27,49	0	32	82,4	2,7	2,92	18,9	17,2	3,203	3,165	0,38	3,3
Γ27	2,178	2,99	27,16	0	32	82,4	2,7	2,92	18,9	16,1	3,203	3,165	0,38	3,3
Γ28	2,219	2,99	25,79	0	32	82,4	2,7	2,92	18,9	18,4	3,203	3,165	0,38	3,3

Πίνακας 23: Δοκίμια Marshall με τύπο αδρανούς το σπηλίτη

Δοκίμιο	G	Gmax	Va (%)	p34	p38	p4	p200	Vbeff	VMA	VFA	Gse	Gsb	Vba	Vb
Δ1	2,305	2,494	7,58	0	20,9	50,4	7,4	4,56	16,4	53,8	2,687	2,656	0,44	5
Δ2	2,343	2,494	6,05	0	20,9	50,4	7,4	4,56	16,4	63,1	2,687	2,656	0,44	5
Δ3	2,345	2,494	5,97	0	20,9	50,4	7,4	4,56	16,4	63,6	2,687	2,656	0,44	5
Δ4	2,350	2,494	5,77	0	20,9	50,4	7,4	4,56	16,4	64,8	2,687	2,656	0,44	5
Δ5	2,251	2,501	10,00	0	27,4	60,9	6,1	4,51	18,9	47,1	2,687	2,667	0,29	4,8
Δ6	2,234	2,501	10,68	0	27,4	60,9	6,1	4,51	18,9	43,5	2,687	2,667	0,29	4,8
Δ7	2,190	2,501	12,44	0	27,4	60,9	6,1	4,51	18,9	34,2	2,687	2,667	0,29	4,8
Δ8	2,226	2,501	11,00	0	27,4	60,9	6,1	4,51	18,9	41,8	2,687	2,667	0,29	4,8
Δ9	2,210	2,515	12,13	0	27,4	60,9	6,1	4,11	18,9	35,8	2,687	2,667	0,29	4,4
Δ10	2,219	2,515	11,77	0	27,4	60,9	6,1	4,11	18,9	37,7	2,687	2,667	0,29	4,4
Δ11	2,290	2,515	8,95	0	27,4	60,9	6,1	4,11	18,9	52,7	2,687	2,667	0,29	4,4

Δ12	2,188	2,515	13,00	0	27,4	60,9	6,1	4,11	18,9	31,2	2,687	2,667	0,29	4,4
Δ13	2,183	2,543	14,16	0	27,4	60,9	6,1	3,31	18,9	25,1	2,687	2,667	0,29	3,6
Δ14	2,225	2,543	12,50	0	27,4	60,9	6,1	3,31	18,9	33,8	2,687	2,667	0,29	3,6
Δ15	2,188	2,543	13,96	0	27,4	60,9	6,1	3,31	18,9	26,1	2,687	2,667	0,29	3,6
Δ16	2,167	2,543	14,79	0	27,4	60,9	6,1	3,31	18,9	21,8	2,687	2,667	0,29	3,6
Δ17	1,983	2,537	21,84	0	27,1	84,1	2,6	4,05	30	27,2	2,713	2,688	0,35	4,4
Δ18	2,009	2,537	20,81	0	27,1	84,1	2,6	4,05	30	30,6	2,713	2,688	0,35	4,4
Δ19	1,975	2,537	22,15	0	27,1	84,1	2,6	4,05	30	26,2	2,713	2,688	0,35	4,4
Δ20	1,991	2,537	21,52	0	27,1	84,1	2,6	4,05	30	28,3	2,713	2,688	0,35	4,4
Δ21	2,004	2,551	21,44	0	27,1	84,1	2,6	3,55	30	28,5	2,713	2,688	0,35	3,9
Δ22	1,978	2,551	22,46	0	27,1	84,1	2,6	3,55	30	25,1	2,713	2,688	0,35	3,9
Δ23	1,974	2,551	22,62	0	27,1	84,1	2,6	3,55	30	24,6	2,713	2,688	0,35	3,9
Δ24	1,981	2,551	22,34	0	27,1	84,1	2,6	3,55	30	25,5	2,713	2,688	0,35	3,9
Δ25	2,004	2,57	22,02	0	27,1	84,1	2,6	3,15	18,9	16,5	2,713	2,688	0,35	3,5
Δ26	2,000	2,57	22,18	0	27,1	84,1	2,6	3,15	18,9	17,3	2,713	2,688	0,35	3,5
Δ27	2,004	2,57	22,02	0	27,1	84,1	2,6	3,15	18,9	16,5	2,713	2,688	0,35	3,5
Δ28	1,990	2,57	22,57	0	27,1	84,1	2,6	3,15	18,9	19,4	2,713	2,688	0,35	3,5

Πίνακας 24: Δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου

Δοκίμιο	G	Gmax	Va (%)	p34	p38	p4	p200	Vbeff	Gse	Gsb	Vba	Vb
1	2,521	2,836	11,11	0	31	67	3,4	4,05	3,235	3,18	0,55	4,6
2	2,517	2,836	11,25	0	31	67	3,4	4,05	3,235	3,18	0,55	4,6
3	2,518	2,836	11,21	0	31	67	3,4	4,05	3,235	3,18	0,55	4,6
4	2,511	2,836	11,46	0	31	67	3,4	4,05	3,235	3,18	0,55	4,6