



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΪΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ**



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΤΣΙΑΜΑΣΙΩΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. ΠΛΑΤΗ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ

Αθήνα, Αύγουστος 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), υπό την επίβλεψη της Λέκτορα κας Χριστίνας Πλατή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κα Πλατή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγησή της καθόλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα Κωνσταντίνα Γεωργούλη, για την υποδειγματική και καθοριστική συνεργασία, όσο και για την προθυμία και υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Σημαντική ήταν και η συμβολή του κου Ανδρέα Λοΐζου, οι συμβουλές του οποίου σε συγκεκριμένα θέματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, με βοήθησαν στη συνέχιση των ερευνών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Οδοποιίας για την πολύτιμη βοήθειά τους, όποτε τη χρειάστηκα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, για τη στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται διερεύνηση των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων και αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητάς τους σε ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης ποικίλης κοκκομετρικής και ογκομετρικής σύστασης, με τη γυροσκοπική μέθοδο. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των υπόψη δοκιμίων προσδιορίστηκε εργαστηριακά και εκτιμήθηκε μέσω των διεθνώς αναγνωρισμένων αλγορίθμων πρόβλεψης Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch. Κατόπιν της επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων, προέκυψε η ανάγκη βαθμονόμησης των αλγορίθμων με στόχο τη μείωση των σφαλμάτων και κατ'επέκταση τη δυνατότητα επιτυχούς εφαρμογής τους στα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, dynamic modulus predictive algorithms are investigated. Also, their applicability on asphalt mixes used in Greece is evaluated. For this purpose, specimens of asphalt base and wearing (antiskid) course were prepared with the gyratory compactor at the Laboratory of Pavement Engineering of NTUA, with varying granulometric and volumetric composition. Dynamic modulus was determined through laboratory testing and estimated through the most widely used prediction algorithms, Witczak 1-37A, Witczak 1-40D and Hirsch. Following the data processing and analysis, the need for calibration of the current algorithms emerged, aiming at error minimization and consequently at their successful applicability on asphalt mixes used in Greece. The results and conclusions are included in this diploma thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1 Γενική επισκόπηση.....	- 1 -
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	- 2 -
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	- 2 -
2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	- 3 -
2.1 Γενικά στοιχεία	- 3 -
2.2 Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	- 3 -
2.3 Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης.....	- 4 -
2.4 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E*	- 8 -
2.4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	- 8 -
2.4.2 Αλγόριθμοι εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	- 12 -
2.4.2.1 Ιστορική αναδρομή	- 12 -
2.4.2.2 Αλγόριθμος Witczak 1-37A.....	- 16 -
2.4.2.3 Αλγόριθμος Witczak 1-40D.....	- 18 -
2.4.2.4 Αλγόριθμος Hirsch	- 21 -
3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	- 24 -
3.1 Πειραματικά ασφαλτομίγματα	- 24 -
3.2 Προσδιορισμός μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους.....	- 32 -
3.3 Συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων με τη γυροσκοπική μέθοδο	- 33 -
3.4 Δοκίμια ελέγχου	- 37 -
3.5 Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους.....	- 38 -
3.6 Προσδιορισμός κενών αέρα ασφαλτομίγματος	- 40 -
3.7 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο	- 42 -
3.8 Εκτίμηση δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων.....	- 46 -
3.8.1 Αλγόριθμος Witczak 1-37A	- 46 -
3.8.2 Αλγόριθμος Witczak 1-40D	- 49 -
3.8.3 Αλγόριθμος Hirsch.....	- 49 -
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	- 51 -
4.1 Γενικά	- 51 -
4.2 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων.....	- 51 -

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

4.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης	- 55 -
4.4 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	- 57 -
4.4.1 Βαθμονόμηση για την ισοπεδωτική στρώση	- 57 -
4.4.2 Βαθμονόμηση για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Α.....	- 60 -
4.4.3 Βαθμονόμηση για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Β.....	- 64 -
4.5 Επαλήθευση βαθμονομημένων αλγορίθμων πρόβλεψης	- 67 -
4.5.1 Ισοπεδωτική στρώση.....	- 67 -
4.5.2 Αντιολισθηρή στρώση μίγματος Α.....	- 69 -
4.5.3 Αντιολισθηρή στρώση μίγματος Β.....	- 70 -
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 72 -
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 75 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	- 78 -

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική επισκόπηση

Ο σωστός σχεδιασμός ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς αφορά αφενός στην ασφάλεια και την άνεση του χρήστη και αφετέρου στη δομική επάρκεια του οδοστρώματος καθόλη τη διάρκεια ζωής του. Η δομική συμπεριφορά του οδοστρώματος καθορίζεται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος, όπως είναι το μέτρο δυσκαμψίας.

Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο σχεδιασμού ενός οδοστρώματος γιατί καθορίζει την απομείωση των τάσεων που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Γενικά, οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος βρίσκονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης (Λοΐζος & Πλατή 2013). Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας περιγράφει ικανοποιητικά την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος δηλαδή την εξάρτηση αυτής από τη θερμοκρασία και το χρόνο-συχνότητα φόρτισης. Προς τούτου χρησιμοποιείται σαν παράμετρος σχεδιασμού του ασφαλτομίγματος, και κατ'έκταση του οδοστρώματος, σε πλήθος μεθοδολογιών διαστασιολόγησης, όπως για παράδειγμα ο πρόσφατος μηχανικό-εμπειρικός οδηγός σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Mechanic-Empirical Pavement Design Guide-MEPDG) κατά AASHTO (NCHRP 2004).

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης. Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό απαιτείται ειδικός εργαστηριακός εξοπλισμός και η διαδικασία είναι χρονοβόρα. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις ογκομετρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος και κάποια χαρακτηριστικά της ασφάλτου. Οι πιο διαδεδομένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι οι αναφερόμενοι ως Witczak 1-37A (Andrei et al. 1999), Witczak 1-40D (Bari & Witczak 2006) και Hirsch (Christensen et al. 2003).

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, σε ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό διερευνώνται οι τρεις διεθνώς αποδεκτοί και αναγνωρισμένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης (Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch). Μέσω κατάλληλων στατιστικών αναλύσεων πραγματοποιείται αξιολόγηση αυτών, η οποία αναμένεται να οδηγήσει στη βαθμονόμηση ενός ή περισσότερων αλγορίθμων πρόβλεψης.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, συνίσταται από έξι κεφάλαια. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται αναλυτικά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται μια ανασκόπηση επί του θεωρητικού υπόβαθρου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και περιγράφονται οι τρόποι προσδιορισμού του μέσω εργαστηριακών δοκιμών και μέσω αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η ερευνητική διαδικασία που περιλαμβάνει τη μεθοδολογία παρασκευής δοκιμών μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου και τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω εργαστηριακών και μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης.

Στο κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται η επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και η βαθμονόμηση των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν, καθώς και προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης.

Στο κεφάλαιο 6 περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των επιμέρους εδαφίων.

Τέλος, στο παράρτημα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα στοιχεία των αναλύσεων.

2 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

2.1 Γενικά στοιχεία

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στο πλαίσιο διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Κατά τη διάρκεια ερευνητικών προγραμμάτων που πραγματοποιήθηκαν στις ΗΠΑ (NCHRP 2004), το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας επιλέχθηκε ως η κατάλληλη παράμετρος για να εκφράσει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης του ασφαλτομίγματος, καθώς περιγράφει ικανοποιητικά την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος δηλαδή την εξάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Επίσης, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας σχετίζεται ικανοποιητικά με τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος έναντι κόπωσης και παραμενουσών παραμορφώσεων για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων (Dongre et al. 2005).

2.2 Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι ένας μιγαδικός αριθμός που συσχετίζει τη τάση με την παραμόρφωση υπό επαναλαμβανόμενη ημιτονοειδή φόρτιση (Yoder & Witczak 1975, Witczak et al. 2002). Ο μιγαδικός αριθμός ορίζεται ως ο λόγος πλάτους της ημιτονοειδούς τάσης (σε οποιαδήποτε τιμή και συχνότητα φόρτισης) και της ημιτονοειδούς παραμόρφωσης (Dougan et al. 2003).

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \sin(\omega t)}{\varepsilon_o \sin(\omega t - \delta)} \quad (2.1)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

σ_o : μέγιστη τάση

ε_o : μέγιστη παραμόρφωση

δ : γωνία υστέρησης, μοίρες

ω : γωνιακή συχνότητα

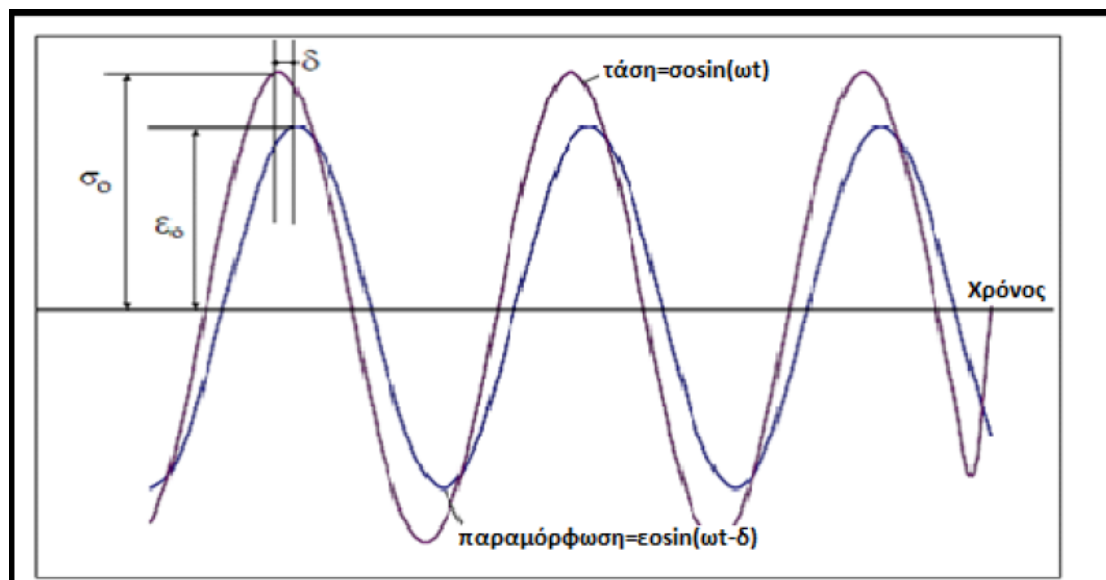
t : χρόνος φόρτισης

Η απόλυτη τιμή του μιγαδικού αριθμού $|E^*|$ αποτελεί μαθηματικώς το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας:

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (2.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι παρότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου, για λόγους απλοποίησης στην παρούσα διπλωματική θα εμφανίζεται απλώς ως E^* αντί για $|E^*|$.

Η γωνία υστέρησης (δ) περιγράφει την χρονική υστέρηση της μέγιστης παραμόρφωσης σε σχέση με την μέγιστη επιβαλλόμενη τάση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Σχέση τάσης- παραμόρφωσης ασφαλτομίγματος υπό ημιτονοειδείς συνθήκες φόρτισης

Αυτή η διαφορά φάσης απεικονίζει την χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος και εκφράζει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του. Η γωνία υστέρησης κυμαίνεται από 0° έως 90° . Για τελείως ελαστικά υλικά η γωνία είναι μηδέν ($\delta=0$), δηλαδή δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιβολής της μέγιστης τάσης και της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης. Αντίθετα, για τελείως ιξώδη υλικά η γωνία υστέρησης είναι ενενήντα μοίρες ($\delta=90^\circ$), δηλαδή η παραμόρφωση υστερεί της τάσης κατά 90° .

2.3 Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αναπαριστάται για όλο το εύρος των θερμοκρασιών και των συχνοτήτων φόρτισης από μία κεντρική καμπύλη (master curve), η οποία έχει κατασκευαστεί σε μία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 70° F ή $21,1^\circ \text{ C}$). Η κεντρική καμπύλη απεικονίζει την απόκριση του ασφαλτομίγματος στη συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς για ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων ή χρόνου φόρτισης (Christensen & Anderson 1992). Επομένως, είναι δυνατή η σύγκριση του E^* το οποίο έχει προσδιοριστεί σε διαφορετικούς χρόνους φόρτισης (συχνότητες) και θερμοκρασίες. Μία κεντρική καμπύλη κατασκευάζεται αξιοποιώντας την αρχή

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας, η οποία περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος (Pellinen & Witczak 2002).

Οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες (Εικόνα 2.2), μετατοπίζονται ως προς το χρόνο, ώστε όλες οι καμπύλες να συγχωνευτούν και να δημιουργηθεί η ενιαία κεντρική καμπύλη (Εικόνα 2.3) (Pellinen et al. 2002), η οποία περιγράφει τη χρονική εξάρτηση του υλικού. Επίσης, το μέγεθος της μετατόπισης σε κάθε θερμοκρασία, που απαιτείται για να σχηματιστεί η κεντρική καμπύλη, περιγράφει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξάρτηση του ασφαλτομίγματος από τη θερμοκρασία.

Ο παράγοντας μετατόπισης $a(T)$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \rightarrow \log a(T) = \log t - \log t_r \quad (2.3)$$

Όπου:

$a(T)$: παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας

t : χρόνος φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία

t_r : χρόνος φόρτισης στη θερμοκρασία αναφοράς

T : επιθυμητή θερμοκρασία

Ο παράγοντας μετατόπισης μπορεί να προκύψει και σε συνάρτηση με τη συχνότητα φόρτισης:

$$a(T) = \frac{f_r}{f} \rightarrow \log a(T) = \log f_r - \log f \quad (2.4)$$

Όπου:

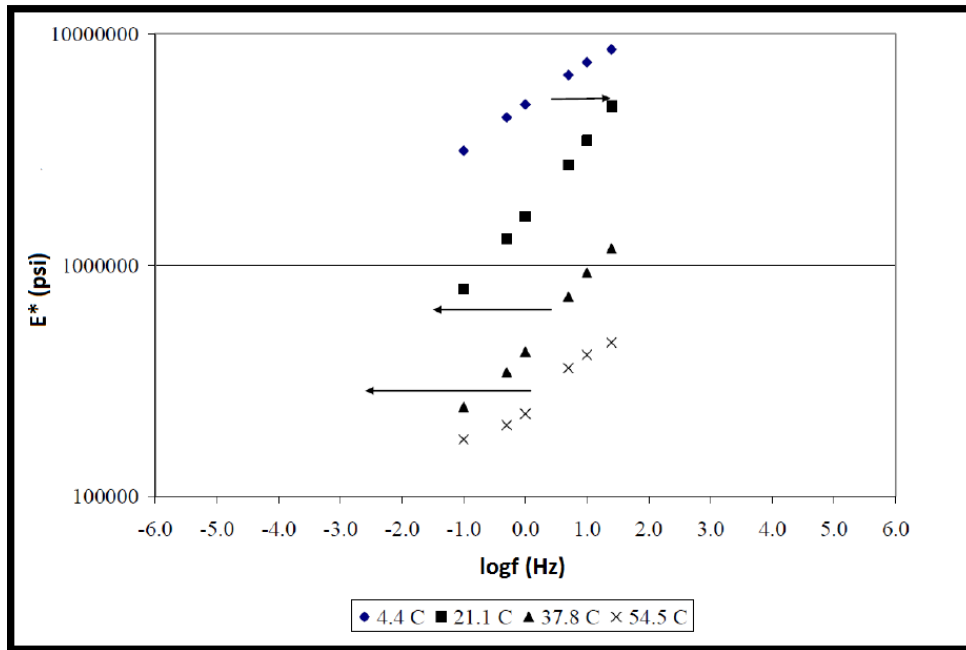
$a(T)$: παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας

f_r : χρόνος φόρτισης στη θερμοκρασία αναφοράς

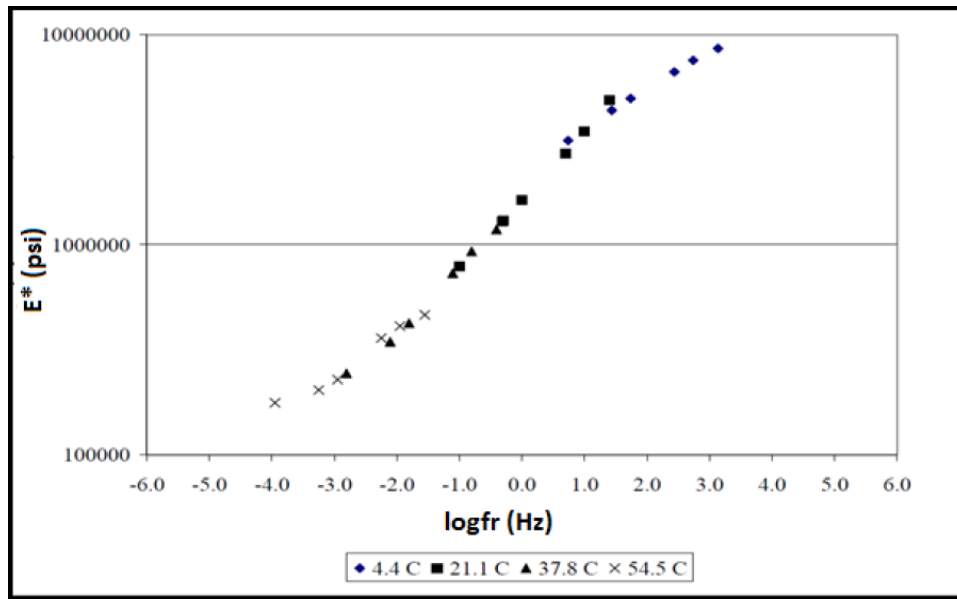
f : χρόνος φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία

T : επιθυμητή θερμοκρασία

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 2.2 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας σε διάφορες θερμοκρασίες (Cross 2007)



Εικόνα 2.3 Μετατόπιση των δεδομένων για τη κατασκευή της κεντρικής καμπύλης (Cross 2007)

Η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μπορεί να παραστεί από μία σιγμοειδή καμπύλη (NCHRP 2004), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log t_r}} \quad (2.5)$$

Όπου:

$|E^*|$: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

t_r : χρόνος φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία (μειωμένος χρόνος)

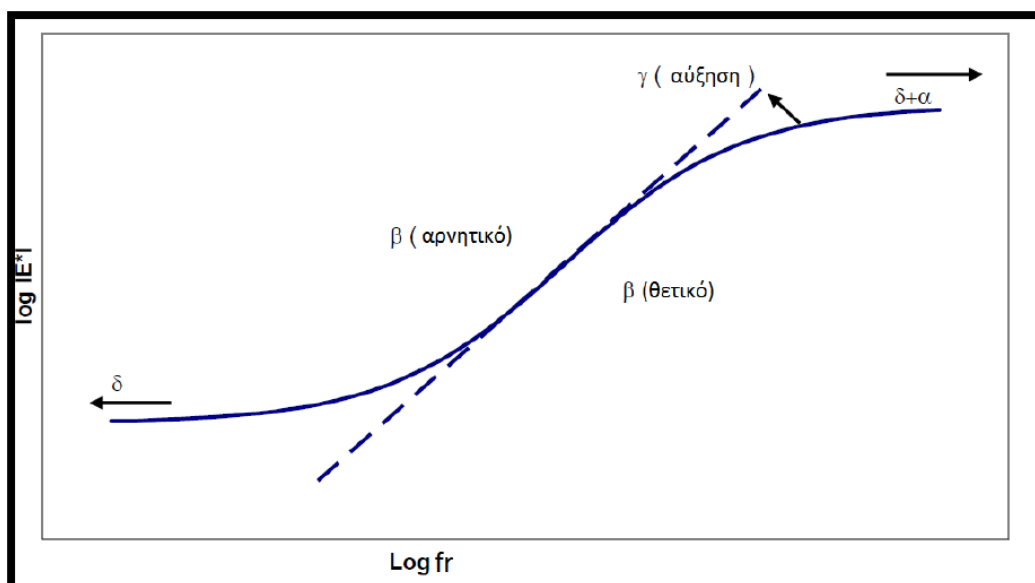
Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

δ : ελάχιστη τιμή του $|E^*|$

$\delta+\alpha$: μέγιστη τιμή του $|E^*|$

β, γ : παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της σιγμοειδούς καμπύλης

Η παράμετρος (γ) σχετίζεται με την κλίση της συνάρτησης, δηλαδή το ρυθμό μεταβολής μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων τιμών και η παράμετρος (β), με την οριζόντια θέση του σημείου καμπής. Επίσης, οι παράμετροι (δ) και (α) εξαρτώνται από τη κοκκομετρική διαβάθμιση, το ποσοστό ασφάλτου και το ποσοστό κενών. Αντίθετα, οι παράμετροι (β) και (γ) εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου και από το μέγεθος των (δ), (α) (NCHRP 2004). Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται η τυπική μορφή μιας σιγμοειδούς καμπύλης.



Εικόνα 2.4 Μορφή σιγμοειδούς καμπύλης

Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς συνάρτησης για την περιγραφή της κεντρικής καμπύλης βασίζεται στις φυσικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4, το άνω τμήμα της σιγμοειδούς καμπύλης προσεγγίζει ασυμπτωτικά τη μέγιστη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος και το οποίο εξαρτάται από τη δυσκαμψία της ασφάλτου στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Σε υψηλές θερμοκρασίες η θλιπτική τάση προκαλεί μεγαλύτερη επίδραση από το ιξώδες της ασφάλτου και το μέτρο δυσκαμψίας πλησιάζει μία τιμή ισορροπίας, η οποία εξαρτάται από την κοκκομετρία. Επομένως, η σιγμοειδής συνάρτηση αναπαριστά τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος όταν αυτό υπόκειται σε συνθήκες περιοδικής θλιπτικής φόρτισης για όλο το φάσμα θερμοκρασιών (Pellinen & Witczak 2002).

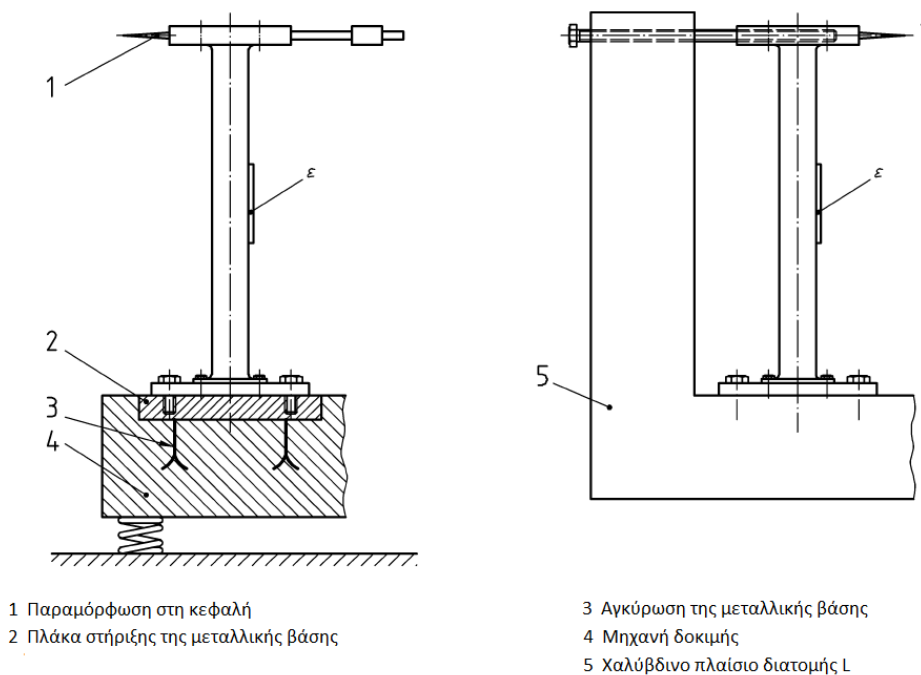
2.4 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E*

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιείται, είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών, είτε μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης.

2.4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο. Αυτές περιλαμβάνουν δοκιμές κάμψης και δοκιμές άμεσου και έμμεσου εφελκυσμού. Οι δοκιμές εκτελούνται σε συμπυκνωμένα ασφαλτομίγματα υπό ημιτονοειδή φόρτιση, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους δοκιμών και διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας. Σύμφωνα με το EN 12697-26 υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο.

Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται **δοκιμή κάμψης σε δύο σημεία** η οποία εφαρμόζεται σε δοκίμια τραπεζοειδούς (2PB-TR) ή πρισματικής γεωμετρίας (2PB-PR). Σύμφωνα με τη μέθοδο το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη δοκιμή κάμψης προβόλου. Η διάταξη της δοκιμής επιτρέπει την επιβολή δυναμικής ημιτονοειδούς παραμόρφωσης στη κορυφή του δοκιμίου σε ένα εύρος συχνοτήτων φόρτισης από 3 έως 30 Hz. Η πειραματική διάταξη της δοκιμής παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης σε δύο σημεία

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

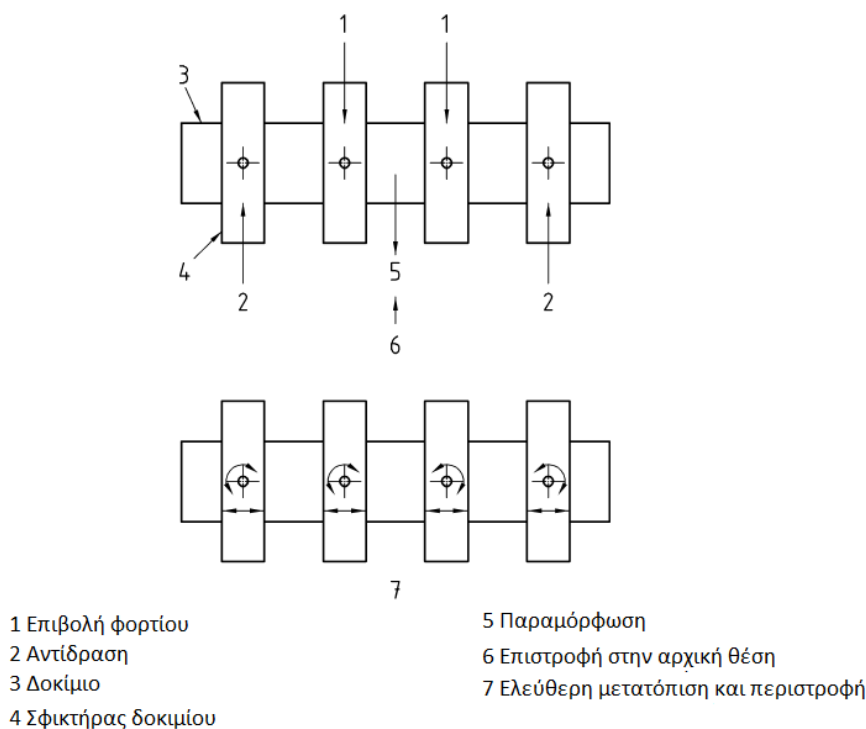
Τα δοκίμια έχουν τραπεζοειδή ή πρισματική γεωμετρία με σταθερό πάχος και τις προβλεπόμενες διαστάσεις που φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Προβλεπόμενες διαστάσεις δοκιμών

Διαστάσεις δοκιμών	Δοκίμια πρισματικής μορφής	Δοκίμια τραπεζοειδούς μορφής		
		D ≤ 14 mm	D ≤ 22 mm	D ≥ 22 mm
mm	D ≤ 14 mm	D ≤ 14 mm	D ≤ 22 mm	D ≥ 22 mm
B	40	56	70	75
B	40	25	25	30
E	40	25	25	35
H	120	250	250	250

Το δοκίμιο τοποθετείται στη βάση ενός άκαμπτου προβόλου και ασκείται στην επιφάνειά του ημιτονοειδής δύναμη $F = F_0 \times \sin \omega t$ ή ημιτονοειδής εκτροπή $z = z_0 \times \sin \omega t$, η οποία πρέπει να προκαλεί παραμόρφωση $\varepsilon \leq 50 \times 10^{-6}$ στο μεγαλύτερο κομμάτι του δοκιμίου. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται σε τουλάχιστον 4 θερμοκρασίες, που η μεταξύ τους διαφορά δεν ξεπερνά τους 10°C, και για κάθε θερμοκρασία σε τουλάχιστον 3 συχνότητες φόρτισης.

Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται **δοκιμή κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων** σε πρισματικά δοκίμια. Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της συγκεκριμένης μεθόδου.



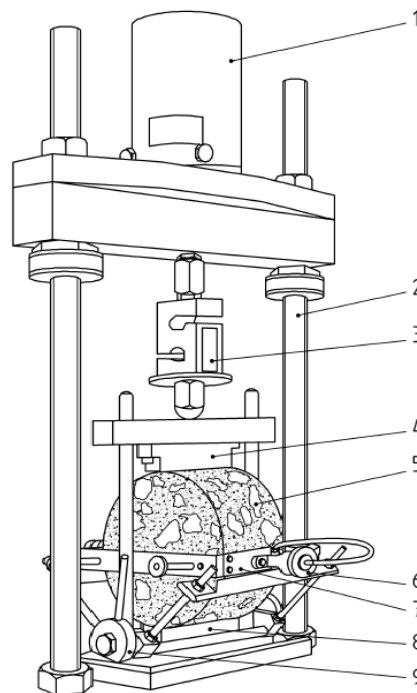
Εικόνα 2.6 Πειραματική διάταξη της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το δοκίμιο υποβάλλεται σε περιοδική κάμψη σε τρία ή τέσσερα σημεία με ελεύθερη περιστροφή και οριζόντια μετατόπιση των σημείων φόρτισης και αντιδράσεων. Η κάμψη γίνεται εμφανής από την κίνηση των κεντρικών σημείων φόρτισης σε διεύθυνση κάθετη προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου. Οι κάθετες θέσεις των δύο ακραίων σημείων παραμένουν σταθερές.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφεται η δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση του δοκιμίου ως συνάρτηση του χρόνου και η διαφορά φάσης μεταξύ της δύναμης και της παραμόρφωσης. Κατόπιν προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος.

Η τρίτη μέθοδος είναι η **δοκιμή έμμεσης φόρτισης**, η οποία εφαρμόζεται σε κυλινδρικά δοκίμια (IT-CY). Τα δοκίμια παρασκευάζονται είτε στο εργαστήριο είτε προέρχονται από πυρηνοληψία σε υφιστάμενο οδόστρωμα. Είναι κυλινδρικά πάχους από 30 mm και 75 mm με ονομαστική διάμετρο 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm ή 200 mm. Το δοκίμιο τοποθετείται σε ειδικό θάλαμο, ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία του δοκιμίου και στη συνέχεια στην ειδική συσκευή, όπου τοποθετούνται προσαρμόζονται οι αισθητήρες μέτρησης της παραμόρφωσης. Η πειραματική διάταξη της δοκιμής απεικονίζεται στην Εικόνα 2.7.



- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 1 Ενεργοποιητής φορτίου | 6 Εξάρτημα ρύθμισης LVDT |
| 2 Χαλύβδινο πλαίσιο φορτίου | 7 Πλαίσιο στήριξης LVDT |
| 3 Μετατροπέας φορτίου | 8 Κάτω πλάκα φόρτισης |
| 4 Άνω πλάκα φόρτισης | 9 Σύστημα ευθυγράμμισης LVDT |
| 5 Δοκίμιο | |

Εικόνα 2.7 Πειραματική διάταξη της δοκιμής έμμεσης φόρτισης

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Απαιτούνται τουλάχιστον δέκα παλμοί φόρτισης για να γίνει προσαρμογή του μεγέθους του φορτίου και της διάρκειας. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται επιπλέον πέντε φορτίσεις στο δοκίμιο και καταγράφεται η μεταβολή του εφαρμοζόμενου φορτίου, η οριζόντια διαμετρική παραμόρφωση, καθώς και ο συντελεστής επιφάνειας της φόρτισης. Το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0,27)}{(z \times h)} \quad (2.6)$$

Όπου:

S_m : μέτρο δυσκαμψίας, MPa

F: μέγιστη τιμή της εφαρμοσμένης κάθετης δύναμης, N

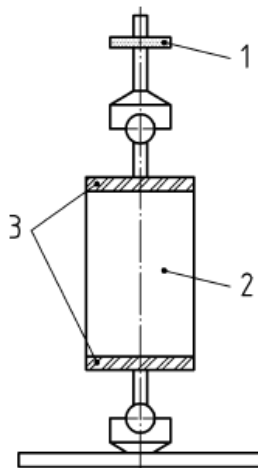
z: εύρος της οριζόντιας μετατόπισης σε ένα κύκλο φόρτισης, mm

h: πάχος του δοκιμίου, mm

ν : λόγος Poisson

Οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες δοκιμής είναι 2°C, 10°C και 20°C, ωστόσο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και άλλες θερμοκρασίες.

Η τέταρτη μέθοδος ονομάζεται **δοκιμή άμεσης τάσης** σε κυλινδρικά δοκίμια (DTC-CY). Τα δοκίμια είναι κυλινδρικής γεωμετρίας και προέρχονται είτε από πυρηνοληψία σε υφιστάμενο οδόστρωμα είτε μέσω της συμπύκνωσης στο εργαστήριο με τη γυροσκοπική μέθοδο. Τα δοκίμια έχουν διάμετρο από 50 mm έως 160 mm και ύψος από 1,8 έως και 3 φορές τη διάμετρο του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, μέσω ειδικού εμβόλου, επιβάλλεται θλιπτική τάση ημιτονοειδούς μορφής στο δοκίμιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της συγκεκριμένης μεθόδου.



- 1 Μετατροπέας φορτίου
- 2 Δοκίμιο
- 3 Μεταλλικές πλάκες

Εικόνα 2.8 Πειραματική διάταξη της δοκιμής άμεσης τάσης

Η προκύπτουσα παραμόρφωση του δοκιμίου καταγράφεται μέσω ειδικών αισθητήρων (LVDTs) και στη συνέχεια προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης. Σύμφωνα με το πρότυπο, οι προτεινόμενες θερμοκρασίες είναι 10, 20, 30 και 40°C και οι προτεινόμενες συχνότητες φόρτισης είναι 0.1, 0.3, 1.0, 3.0, 10 και 20Hz.

Η υπόψη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της ερευνητικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.4.2 Αλγόριθμοι εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

2.4.2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό. Επίσης, η σπουδαιότητα και η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι εμπειρικοί ή ημιεμπειρικοί και βασίζονται στη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στις ογκομετρικές τους ιδιότητες.

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από το 1967 και μετά.

Πίνακας 2.2 Εξέλιξη των αλγορίθμων από το 1967 και μετά

Αριθμός αλγορίθμων	Μορφή αλγορίθμων	Περίοδος
1A	$\log_{10} E^* = \alpha_0 + \alpha_1 \rho_{200} + \alpha_2 V_a + \alpha_3 \eta_{70;10^6} + \alpha_4 \rho_{ac}^{\alpha_5} t_p^{\alpha_6}$	1967-1969
1B	$\log_{10} E^* = b_0 + b_1 \rho_{200} + b_2 V_a + b_3 \rho_{ac}^{b_4} (\log \eta_t)^{b_5}$	
1C	$E = c_0 * c_1^{-(tc_2)} p$	
2A	$\log_{10} E^* = d_0 + d_1 (\rho_{200}) f^{d_2} + d_3 V_a + d_4 \eta_{70;10^6} + d_5 \left[t_p^{(d_6+d_7 \log f)} \rho_{ac}^{d_8} \right] + d_9 \left[t_p^{(d_6+d_7 \log f)} \rho_{ac}^{d_8} f^{d_{10}} \right] + d_{11} f^{d_{12}}$	1977-1980
2B	$\log_{10} E^* = e_0 + e_1 V_a + e_2 \eta_{70;10^6} + e_3 t_p^{e_4} V_{beff}^{e_5}$	
3	$\log_{10} E^* = g_0 + g_1 (\rho_{200}) f^{g_2} + g_3 V_a + g_4 \eta_{70;10^6} + g_5 f^{g_6} + \left[g_7 t_p^{(g_8+g_9 \log f)} + g_{10} f^{g_{11}} t_p^{(g_8+g_9 \log f)} \right] [\rho_{ac} - \rho_{opt} + g_{12}]^{g_{13}}$	1982-1983
4A	$\log_{10} E^* = h_0 + h_1 V_a + h_2 \rho_{3/4} + h_3 \eta_{70;10^6} + h_4 t_p + h_5 \log f + h_6 \log(f t_p^2) + h_7 (V_{beff} - V_{beffopt} + h_8)^{h_9} t_p^2 + h_{10} (V_{beff} \rho_4) + h_{11} (\rho_{200} \rho_{abs})$	1983-1984
4B	$\log_{10} E^* = k_0 + k_1 V_{beff} + k_2 V_a + k_3 \rho_{200} + k_4 \rho_4 + k_5 \rho_{abs} + k_6 t_p + k_7 f + k_8 t_p^2 + k_9 V_{beff}^2 + k_{10} \rho_{200}^2 + k_{11} \rho_{3/4}^2 + k_{12} \rho_{3/8}^2 + k_{13} \rho_4^2 + k_{14} \rho_{abs}^2 + k_{15} \eta_{70;10^6} + k_{16} f^2 + k_{17} \rho_{3/8} V_{beff} + k_{18} \rho_{3/4} V_{beff} + k_{19} \rho_{3/4} \rho_4 + k_{20} \rho_{3/8} \rho_4 + k_{21} \rho_{3/8} \rho_{abs}$	
5A	$\log_{10} E^* = l_0 + l_1 V_{beff} + l_2 V_a + l_3 \rho_{200} + l_4 \rho_{abs} + l_5 t_p + l_6 f + l_7 t_p^2 + l_8 V_{beff}^2 + l_9 \rho_{200}^2 + l_{10} \rho_{3/4}^2 + l_{11} \rho_{3/8}^2 + l_{12} \rho_{abs}^2 + l_{13} (\eta_{70;10^6})^2 + l_{14} f^2 + l_{15} \rho_{3/8} V_{beff} + l_{16} \rho_{3/4} V_{beff} + l_{17} \rho_{3/4} \rho_4 + l_{18} \rho_{3/8} \rho_4 + l_{19} \rho_{3/8} \rho_{abs}$	1985-1989
5B	$\log_{10} E^* = m_0 + m_1 V_a + m_2 \rho_{3/4} + m_3 \eta_{70;10^6} + m_4 t_p + m_5 \log f + m_6 \log(f t_p^2) + m_7 (V_{beff} - V_{beffopt} + m_8)^{m_9} t_p^2 + m_{10} (V_{beff} \rho_4) + m_{11} (\rho_{200} \rho_{abs})$	

Από ιστορική άποψη, υπάρχουν πέντε χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες πραγματοποιείται έρευνα για την ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης του E^* (Witczak & Fonseca 1996).

Περίοδος 1 (1967-1972)

Οι πρώτοι αλγόριθμοι (1Α-1Β-1Γ) πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφατομιγμάτων αναπτύχθηκαν από τους Shook & Kallas (1967). Για την ανάπτυξή τους χρησιμοποιήθηκαν 29 διαφορετικά μίγματα και μία συχνότητα φόρτισης (4 Hz). Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Witczak επεξεργάστηκε ξανά τα δεδομένα και ενσωμάτωσε σε αυτά τον παράγοντα της συχνότητας.

Περίοδος 2 (1977-1980)

Ως εξέλιξη των αλγορίθμων της 1ης περιόδου, η βάση δεδομένων αυξήθηκε σε 41 μίγματα, καθένα από τα οποία ελέγχθηκε κάτω από συγκεκριμένη θερμοκρασία-συχνότητα φόρτισης. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι 2Α και 2Β. Βασικές διαφορές από τους αρχικούς αλγορίθμους αποτελούν η εισαγωγή του ιξώδους για τον χαρακτηρισμό της ακαμψίας της ασφάλτου και η επιλογή του ενεργού ποσοστού της περιεχόμενης ασφάλτου αντί του ποσοστού ασφάλτου.

Περίοδος 3 (1982-1983)

Σε αυτή την περίοδο, η βάση δεδομένων διευρύνεται από 41 σε 131 μίγματα. Τα μίγματα προήλθαν από μία έρευνα του πανεπιστημίου του Maryland και αποτελούνταν από αδρανή υλικά που περιείχαν χαλίκια, σκωρία και άμμο. Τα αρχικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξίσωση 2Α δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα για τα μίγματα από θρυμματισμένη πέτρα, αλλά παρουσιάζει αδυναμία στα υπόλοιπα μίγματα. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης και ανάπτυξης του αλγορίθμου 3.

Περίοδος 4 (1983-1984)

Κατά την περίοδο αυτή, πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς στατιστικές μελέτες με την υπάρχουσα βάση δεδομένων με σκοπό να βελτιωθεί η ακρίβεια του αλγορίθμου πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, μείζονος σημασίας και σπουδαιότητας ήταν η ενσωμάτωση μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφατομίγματος, όπως φαίνεται στους αλγορίθμους 4Α και 4Β.

Περίοδος 5 (1985-1989)

Στο διάστημα αυτό προστέθηκαν ακόμα περισσότερα μίγματα από τη συνεχή έρευνα του πανεπιστημίου του Maryland, δημιουργώντας μια βάση δεδομένων 149 μιγμάτων και 1429 σημείων. Από τη νέα στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι 5A και 5B.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος έχουν καλή στατιστική εφαρμογή και αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμησή του.

Παρ' όλα αυτά, οι αλγόριθμοι αυτοί περιέχουν αρκετούς περιορισμούς. Ο πρώτος σημαντικός περιορισμός είναι ότι η βάση δεδομένων περιέχει μόνο ασφαλτομίγματα που παρασκευάστηκαν με συνδετικό υλικό την κοινή άσφαλτο. Επομένως, δεν είναι εφικτή η εφαρμογή των ανωτέρω αλγορίθμων σε ασφαλτομίγματα που περιέχουν τροποποιημένη άσφαλτο.

Ο δεύτερος περιορισμός των παραπάνω αλγορίθμων συνδέεται με τις στατιστικές αρχές και παραμέτρους που ακολουθήθηκαν ώστε να προκύψει η τελική τους μορφή. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 5°C έως 40°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, για χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας να παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Τέλος, ο τρίτος περιορισμός είναι η επίδραση του παράγοντα της γήρανσης, καθώς οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας δίνουν εξαιρετικά αποτελέσματα για νέα δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί στο εργαστήριο και παρουσιάζουν αδυναμία σε ασφαλτομίγματα στα οποία έχει επιδράσει ο παράγοντας της γήρανσης.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί πραγματοποιήθηκε έρευνα στο Πανεπιστήμιο του Maryland, με βασικό στόχο την εκτίμηση της επίδρασης του παράγοντα της γήρανσης στα ασφαλτομίγματα για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας-χρόνου φόρτισης και τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων με ασφαλτομίγματα διαφορετικών χαρακτηριστικών, όπως η τροποποιημένη άσφαλτος. Οι τρεις πιο πρόσφατοι και διαδεδομένοι αλγόριθμοι για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος είναι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D και ο αλγόριθμος Hirsch, οι οποίοι αποτελούν μέρος διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναλύονται παρακάτω.

2.4.2.2 Αλγόριθμος Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A εκτιμά το E^* μέσω της ογκομετρικής σύστασης και της κοκκομετρικής διαβάθμισης του ασφαλτομίγματος, καθώς επίσης και του ιξώδους της ασφάλτου. Ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και χρόνου φόρτισης. Επίσης λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της γήρανσης. Η εξίσωση που περιγράφει τον αλγόριθμο Witczak 1-37A δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(n))}} \quad (2.7)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

n : ιξώδες ασφάλτου, 10^6 poise

f : συχνότητα φόρτισης, Hz

V_a : ποσοστό κενών κατ' όγκο ασφαλτομίγματος, %

V_{beff} : ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος, %

ρ_{34} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 19 mm, %

ρ_{38} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 9,5 mm, %

ρ_4 : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 4,75 mm, %

ρ_{200} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 0,075mm, %

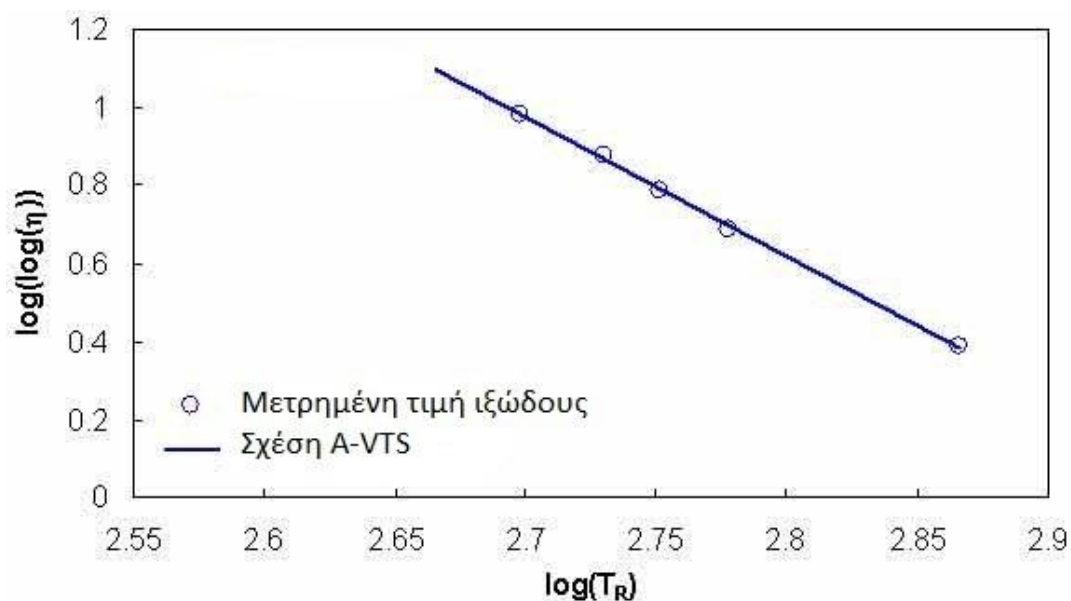
Η ανάπτυξη του υπόψη αλγορίθμου βασίστηκε σε μία βάση δεδομένων 2.750 μετρήσεων του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αυτά τα δεδομένα προήλθαν από δοκιμές σε 205 διαφορετικά ασφαλτομίγματα, από τα οποία τα 171 περιείχαν κοινή άσφαλο και τα 34 τροποποιημένη άσφαλο (Andrei et al. 1999). Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία για την βάση δεδομένων και τη στατιστική ανάλυση (Garcia & Thompson 2007).

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας 2.3 Βάση δεδομένων για την ανάπτυξη του Witczak 1-37A

Στατιστική ανάλυση	Τιμές
Συντελεστές προσαρμογής	$R^2=0.96$ $Se/Sy=0.24$
Θερμοκρασία °C	-17.8 έως 54.4
Συχνότητα φόρτισης	0.1 έως 25 Hz
Ασφαλτομίγματα	205 συνολικά 171 με καθαρή ασφαλτο 34 με τροποποιημένη ασφαλτο
Είδη ασφάλτου	23 συνολικά 9 καθαρή ασφαλτο 14 τροποποιημένη ασφαλτος
Αδρανή υλικά	39
Μέθοδος συμπίκνωσης	Γυροσκοπική μέθοδος
Μέγεθος δοκιμίων	Κυλινδρικά δοκίμια 10.2 έως 20.3 cm ή 7 έως 14 cm

Το ιξώδες της ασφάλτου για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών προσδιορίζεται από τη γραμμική σχέση μεταξύ του διπλού λογάριθμου του ιξώδους και του λογάριθμου της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9 (Bari & Witczak 2006). Η σχέση είναι της μορφής που περιγράφεται από την εξίσωση (2.8).



Εικόνα 2.9 Διάγραμμα της σχέσης A και VTS

$$\log \log n = A + VTS \log T_R \quad (2.8)$$

Όπου:

n: ιξώδες ασφάλτου, cP

A: σταθερός όρος

VTS: κλίση της καμπύλης

T_R: θερμοκρασία, Rankine

Οι παράμετροι A και VTS αποτελούν μοναδικές ιδιότητες του εκάστοτε τύπου ασφάλτου και προσδιορίζονται με γραμμική παλινδρόμηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων του ιξώδους της ασφάλτου σε σχέση με τη θερμοκρασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι απαιτείται δύο τουλάχιστον ζεύγη ιξώδους-θερμοκρασίας ώστε να προσδιοριστούν πλήρως οι παράμετροι A και VTS.

Στην περίπτωση που ο εργαστηριακός προσδιορισμός του ιξώδους της ασφάλτου σε δεν είναι εφικτός, η εκτίμησή του πραγματοποιείται αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής μάλθωσης και διείδυσης. Σύμφωνα με έρευνες (Bari & Witczak 2007), το ιξώδες της ασφάλτου στη θερμοκρασία μάλθωσης (σημείο μάλθωσης) είναι 13.000 poise. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Mirza & Witczak(1995) η σχέση μεταξύ του ιξώδους της ασφάλτου και του δείκτη διεισδυτικότητας στους 25°C περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log n = 10.5012 - 2.2601 \log(Pen) + 0.00389[\log(Pen)]^2 \quad (2.9)$$

Όπου:

n: ιξώδες ασφάλτου, poise

Pen: δείκτης διεισδυτικότητας στους 25°C

2.4.2.3 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D αποτελεί ουσιαστικά την αναθεωρημένη μορφή του αλγορίθμου Witczak 1-37A. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε από τους Bari & Witczak (2006) οι οποίοι χρησιμοποίησαν τη βάση δεδομένων του αλγορίθμου Witczak 1-37A και τη διεύρυναν με νέες δοκιμές σε επιπλέον δοκίμια. Συνολικά η βάση δεδομένων αποτελείται από 7.400 μετρήσεις σε 346 δοκίμια ασφαλτομίγματος (Witczak et al. 2006) . Η εξίσωση που περιγράφει τον αλγόριθμο είναι η εξής:

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$$\log E^* = -0.349 + 0.754(|G_b^*|) * \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a} \right) \right) + \frac{2.56+0.03V_a+0.71\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right)+0.012\rho_{38}-0.0001(\rho_{38})^2-0.01\rho_{34}}{1+e^{(-0.7814-0.5785\log|G_b^*|)+0.8834\log\delta_b}} \quad (2.10)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

$|G_b^*|$: δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου, psi

δ_b : γωνία υστέρησης της ασφάλτου η οποία σχετίζεται με το $|G_b^*|$, μοίρες

V_a : ποσοστό κενών κατ' όγκο ασφαλτομίγματος, %

V_{beff} : ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος, %

ρ_{34} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19 mm, %

ρ_{38} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 9,5 mm, %

ρ_4 : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 4,75 mm, %

ρ_{200} : το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 0,075mm, %

Η σημαντικότερη διαφορά από τον προγενέστερο αλγόριθμο είναι η αντικατάσταση του ιξώδους της ασφάλτου με το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας, G_b^* και της γωνίας υστέρησης, δ_b , για την περιγραφή της συμπεριφοράς της ασφάλτου (Witczak et al. 2006).

Ο λόγος που κρίθηκε απαραίτητη η αντικατάσταση αυτή είναι ότι η περιγραφή της συμπεριφοράς της ασφάλτου από το ιξώδες της ασφάλτου δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της συχνότητας ή το χρόνο φόρτισης.

Το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου μπορεί να προσδιοριστεί είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων. Σύμφωνα με τους Bari & Witczak (2007) η εκτίμηση του δυναμικού διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της εξίσωσης (2.11).

$$|G_b^*| = 0.0051f_s n_{f_s,T} (\sin \delta_b)^{7.1542-0.4929f_s+0.0211f_s^2} \quad (2.11)$$

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Όπου:

$|G_b^*|$: δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου, Pa (όταν $|G_b^*| > 1$ GPa, λαμβάνεται $|G_b^*| = 1$ GPa)

f_s : συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή $|G_b^*|$, Hz

$n_{f_s,T}$: ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP

δ_b : γωνία υστέρησης της ασφάλτου η οποία σχετίζεται με το $|G_b^*|$, μοίρες

Το ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης υπολογίζεται με μη γραμμική βελτιστοποίηση των παρακάτω εξισώσεων:

$$\log \log n_{f_s,T} = A' + VTS' \log T_R \quad (2.12)$$

$$A' = 0.9699 f_s^{-0.0527} \times A \quad (2.13)$$

$$VTS' = 0.9668 f_s^{-0.0575} \times VTS \quad (2.14)$$

Όπου:

$n_{f_s,T}$: ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP (όταν $n_{f_s,T} > 3 \times 10^{12}$ cP, λαμβάνεται $n_{f_s,T} = 3 \times 10^{12}$ cP)

f_s : συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή $|G_b^*|$, Hz

T_R : θερμοκρασία, Rankine

A' , VTS' : μετασχηματισμένοι συντελεστές, ώστε να συμπεριληφθεί η συχνότητα

Η γωνία υστέρησης δ_b προκύπτει από μη γραμμική βελτιστοποίηση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\delta_b = 90 + (b_1 + b_2 VTS') \times \log(f_s \times n_{f_s,T}) + (b_3 + b_4 VTS') \times \log(f_s \times n_{f_s,T})^2 \quad (2.15)$$

Όπου:

δ_b : γωνία υστέρησης, μοίρες (αν $\delta_b > 90^\circ$, λαμβάνεται $\delta_b = 90^\circ$)

$$VTS' = 0.9668 f_s^{-0.0575} \times VTS$$

f_s : συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή $|G_b^*|$, Hz

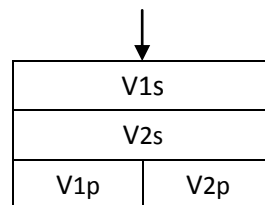
$n_{f_s,T}$: ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP

b_1, b_2, b_3, b_4 : παράμετροι προσαρμογής (-7.3146, -2.6162, 0.1124, 0.2029 αντίστοιχα)

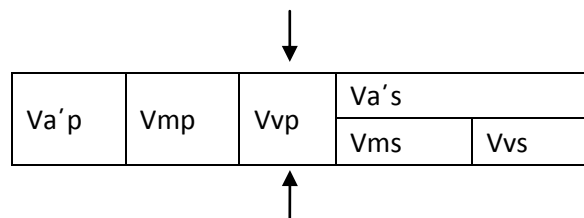
2.4.2.4 Αλγόριθμος Hirsch

Ο αλγόριθμος Hirsch βασίζεται στο νόμο των μιγμάτων για σύνθετα υλικά (Christensen 2003), ο οποίος συνδυάζει τα στοιχεία των φάσεων σειριακά ή παράλληλα. Γενικά, η ασφαλτος τείνει να συμπεριφερθεί ως σύνθετο υλικό σε σειρά σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ως σύνθετο υλικό σε παράλληλη μορφή σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Ο Christensen (2003) παρουσίασε την εφαρμογή του μοντέλου Hirsch (Εικόνα 2.10) το οποίο βασίστηκε στην εναλλακτική εκδοχή του τροποποιημένου μοντέλου του Hirsch, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11, στην οποία η σχετική αναλογία του υλικού σε παράλληλη διάταξη δεν είναι σταθερή, αλλά διαφέρει ως προς το χρόνο και τη θερμοκρασία (Garcia & Thompson 2007).



Εικόνα 2.10 Μοντέλο Hirsch



Εικόνα 2.11 Εναλλακτική εκδοχή του μοντέλου Hirsch

Αν και πολλοί μελετητές υπολόγισαν διάφορες εναλλακτικές εκδοχές του αλγορίθμου Hirsch, το πιο αποτελεσματικό είναι το πιο απλό, στο οποίο το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος προσδιορίζεται απευθείας μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας, $|G_b^*|$, των κενών μεταξύ των αδρανών (VMA) και των κενών που έχουν πληρωθεί με ασφαλτο (VFA) (Christensen 2003).

Η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο του Hirsch και ορίζει τον αντίστοιχο αλγόριθμο δίνεται παρακάτω:

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$$|E^*| = P_C \left[4.200.000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G^*|_b \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10.000} \right) \right] + (1 - P_C) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4.200.000} + \frac{VMA}{VFA \cdot 3|G^*|_b} \right]^{-1} \quad (2.16)$$

$$P_C = \frac{\left(20 + \frac{VFA \cdot 3|G^*|_b}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \cdot 3|G^*|_b}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (2.17)$$

Όπου:

$|E^*|$: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

P_C : συντελεστής επαφής αδρανών

VMA: ποσοστό κενών μεταξύ των αδρανών, %

VFA: ποσοστό κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο, %

$|G_b^*|$: δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου, Pa (εξίσωση 2.11)

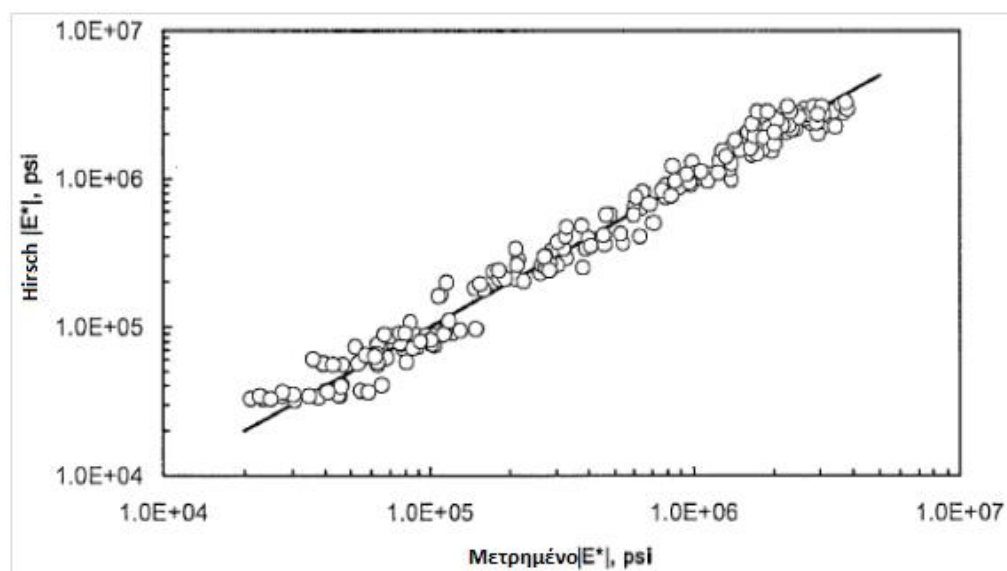
Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου Hirsch παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.4. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του μοντέλου για ιδιαίτερα υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες δεν ήταν ακριβή. Γι' αυτό το λόγο, η βάση δεδομένων διευρύνθηκε και περιελάμβανε επιπλέον δεδομένα για θερμοκρασίες από -9 έως 54°C (Gabriel & Marshall 2007).

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας 2.4 Βάση δεδομένων για την ανάπτυξη του μοντέλου Hirsch

Μέθοδος σχεδιασμού	Marshall	Marshall	Superpave	Σύνολο
Είδος ασφάλτου	AC-5, 10, 20	AC-20	PG 64-22	2
	SBS-τροποποιημένη	120/150-Pen		8
	PE-τροποποιημένη			
Μέγεθος αδρανών και διαβάθμιση	19-mm πυκνό	9.5-mm λείο	19-mm λείο	5
	37.5-mm λείο		19-mm πυκνό	
Ασφαλτομίγματα	7	5	6	18
Συνολικές Μετρήσεις	78	59	69	206
Για όλη τη βάση δεδομένων				
Ποσοστό κενών %	5.6 έως 11.2			
Ποσοστό VMA %	13.7 έως 21.6			
Ποσοστό VFA %	38.7 έως 68.0			
Θερμοκρασία °C	4, 21, 38			
Συχνότητα	0.1 και 5			
$ E^* $, Mpa	183 έως 20.900			

Η συσχέτιση του μετρημένου E^* στο εργαστήριο και του προβλεπόμενου E^* από την εξίσωση του Hirsch απεικονίζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12 Διάγραμμα συσχέτισης μετρημένου E^* και E^* Hirsch

Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 είναι 98.2 %, που σημαίνει ότι η συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι εξαιρετική.

3 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Πειραματικά ασφαλτομίγματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ 60 συνολικά κυλινδρικά δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής και αντιολισθηρής στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν 36 δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης με ασβεστολιθικά αδρανή και 24 δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης με βάση τη σκωρία, τα οποία διέφεραν μεταξύ τους ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου.

Επιπλέον, τα δοκίμια του ίδιου μίγματος διαφοροποιούνταν ως προς το περιεχόμενο ποσοστό κενών αέρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συμπύκνωση όλων των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τη γυροσκοπική μέθοδο, η οποία αποτελεί την πιο ενδεδειγμένη μέθοδο παρασκευής δοκιμών. Τέλος, τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν, υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών τους χαρακτηριστικών (φαινόμενο ειδικό βάρος, ποσοστό κενών αέρα) και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού και πειραματικών διατάξεων.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα υπόψη ασφαλτομίγματα προέρχονται από εργοτάξια κατασκευής αυτοκινητοδρόμων στην Ελλάδα. Αυτό έγινε ώστε τα ασφαλτομίγματα που θα παρασκευαστούν στο εργαστήριο να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με εκείνα που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Επίσης, επισημαίνεται ότι η ισοπεδωτική στρώση περιλαμβάνει τρεις διαφορετικούς τύπους μιγμάτων (Α-Β-Γ), όπου διέφεραν μεταξύ τους ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση. Αντίθετα, η αντιολισθηρή στρώση περιλαμβάνει δύο διαφορετικούς τύπους μιγμάτων (Α-Β) με την ίδια διαφοροποίηση. Επιπλέον κάθε τύπος μίγματος διέφερε ως προς το ποσοστό ασφάλτου, καθώς το ποσοστό σε κάθε τύπο ήταν 4%, 4,5% και 5%.

Κωδικοποίηση δοκιμών

Με βάση τις προαναφερόμενες διαφοροποιήσεις, έγινε κωδικοποίηση των παραχθέντων δοκιμών με τις εξής αναφορές:

ΙΣ: Ισοπεδωτική στρώση

ΑΝΤ: Αντιολισθηρή στρώση

Α, Β, Γ: τύπος μίγματος ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση

I, II, III: ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4,5%, και 5,0% αντίστοιχα

1, 2, 3, 4: αριθμός δοκιμών ανά μίγμα

Για την πιο εύκολη κατανόηση της κωδικοποίησης παρουσιάζονται 3 παραδείγματα:

- Δοκίμιο ΙΣ_Α_Ι_1 σημαίνει το 1ο δοκίμιο μίγματος ισοπεδωτικής στρώσης, κοκκομετρίας Α, με ποσοστό ασφάλτου 4%
- Δοκίμιο ΙΣ_Γ_III_2 σημαίνει το 2ο δοκίμιο μίγματος ισοπεδωτικής στρώσης, κοκκομετρίας Γ, με ποσοστό ασφάλτου 5%
- Δοκίμιο ΑΝΤ_Β_II_3 σημαίνει το 3ο δοκίμιο μίγματος αντιολισθηρής στρώσης, κοκκομετρίας Β, με ποσοστό ασφάλτου 4,5%

Παρακάτω παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση κάθε μίγματος της ισοπεδωτικής και της αντιολισθηρής στρώσης ξεχωριστά.

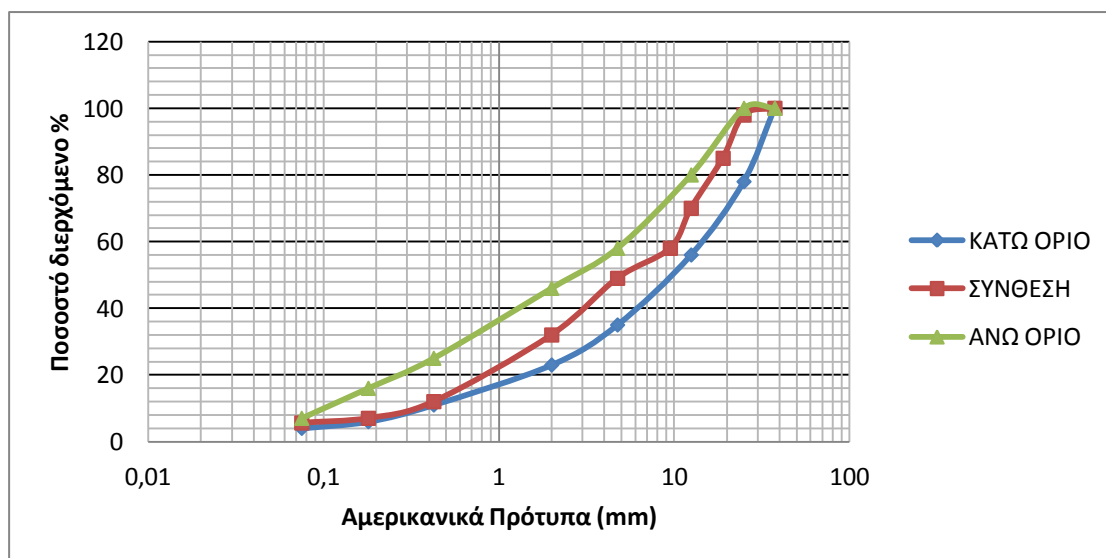
Ισοπεδωτική Στρώση-Μίγμα Α (ΙΣ_Α)

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Α έγινε σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, ενώ η άσφαλτος είναι τύπου 50/70.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στην Εικόνα 3.1 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α ισοπεδωτικής στρώσης

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
37,5	1 1/2"	100	100	100	0
25	1"	78	98	100	2
19	3/4"	-	85	-	15
12,5	1/2"	56	70	80	30
9,5	3/8"	-	58	-	42
4,75	No4	35	49	58	51
2	No10	23	32	46	68
0,425	No40	11	12	25	88
0,18	No80	6	7	16	93
0,075	No200	3	5,6	7	94,4



Εικόνα 3.1 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Α ισοπεδωτικής στρώσης

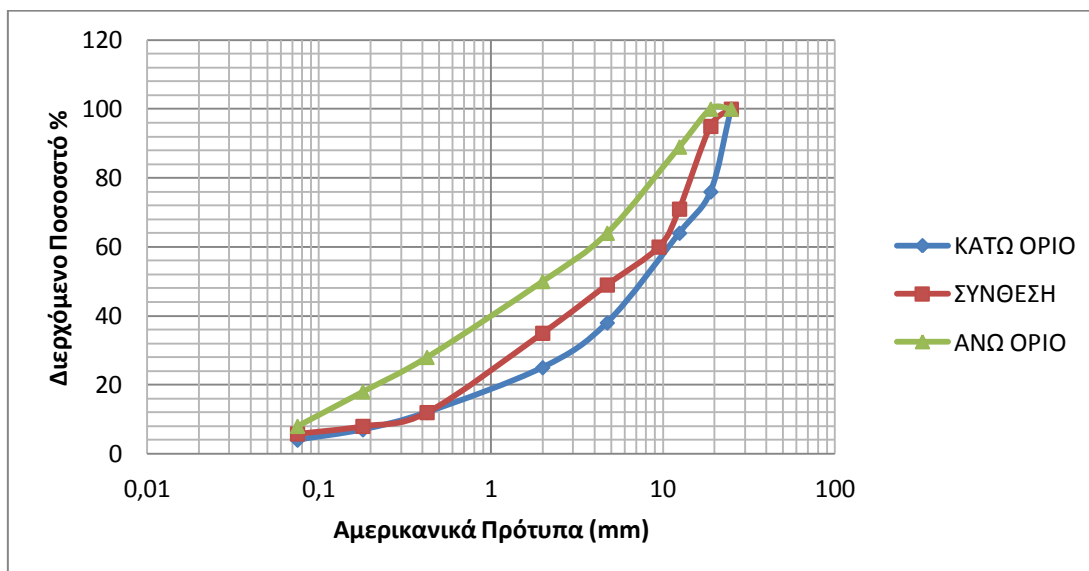
Ισοπεδωτική Στρώση-Μίγμα Β (ΙΣ_Β)

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Β έγινε σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, ενώ η άσφαλτος είναι τύπου 50/70.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στην Εικόνα 3.2 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Β ισοπεδωτικής στρώσης

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
25	1"	100	100	100	0
19	3/4"	76	95	100	5
12,5	1/2"	64	71	89	29
9,5	3/8"	-	60	-	40
4,75	No4	38	49	64	51
2	No10	25	35	50	65
0,425	No40	12	12	28	88
0,18	No80	7	8	18	92
0,075	No200	4	5,8	8	94,2



Εικόνα 3.2 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Β ισοπεδωτικής στρώσης

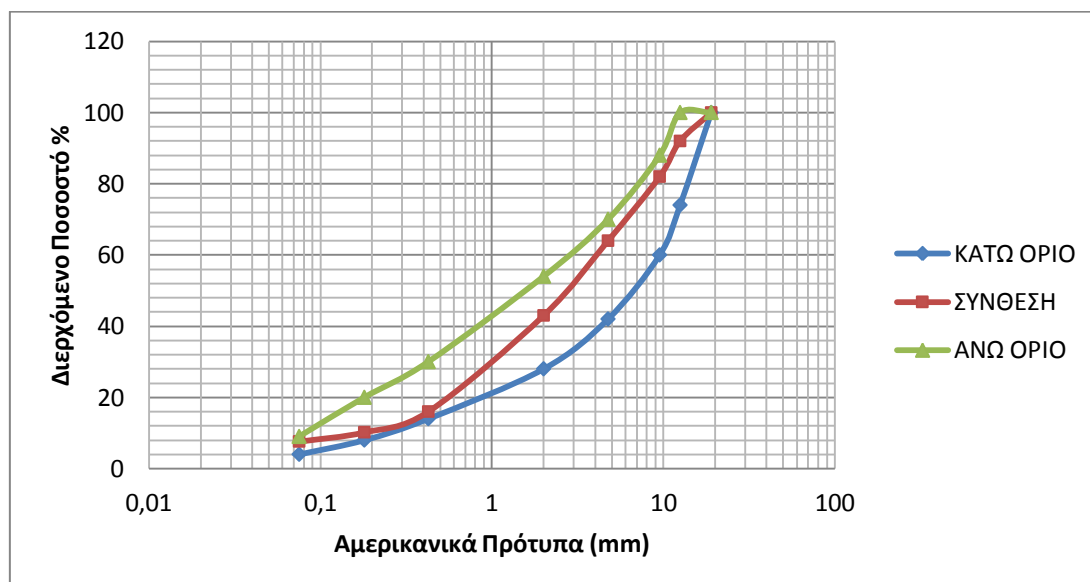
Ισοπεδωτική Στρώση-Μίγμα Γ (ΙΣ_Γ)

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Γ έγινε σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, ενώ η άσφαλτος είναι τύπου 50/70.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στην Εικόνα 3.3 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Γ ισοπεδωτικής στρώσης

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	74	92	100	8
9,5	3/8"	60	82	88	18
4,75	No4	42	64	70	36
2	No10	28	43	54	57
0,425	No40	14	16	30	84
0,18	No80	8	10,2	20	89,8
0,075	No200	4	7,6	9	92,4



Εικόνα 3.3 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Γ ισοπεδωτικής στρώσης

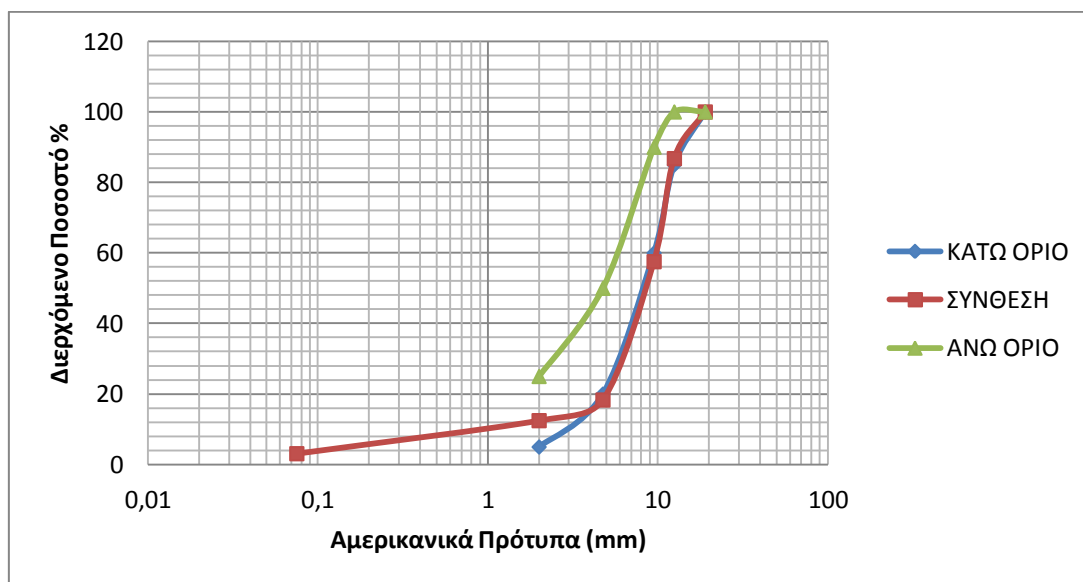
Αντιολισθηρή Στρώση-Μίγμα Α (ANT_A)

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Α έγινε σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης με βάση τη σκωρία, ενώ η ασφάλτος είναι SBS-τροποποιημένη τύπου 80/100. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών διαφοροποιείται ανάλογα με το ποσοστό της ασφάλτου.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 4,0% και στην Εικόνα 3.4 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.4 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστό ασφάλτου 4,0%

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	85	86,8	100	13,2
9,5	3/8"	60	57,6	90	42,5
4,75	No4	20	18,3	50	81,7
2	No10	5	12,5	25	87,5
0,075	No200	-	3,1	-	96,9



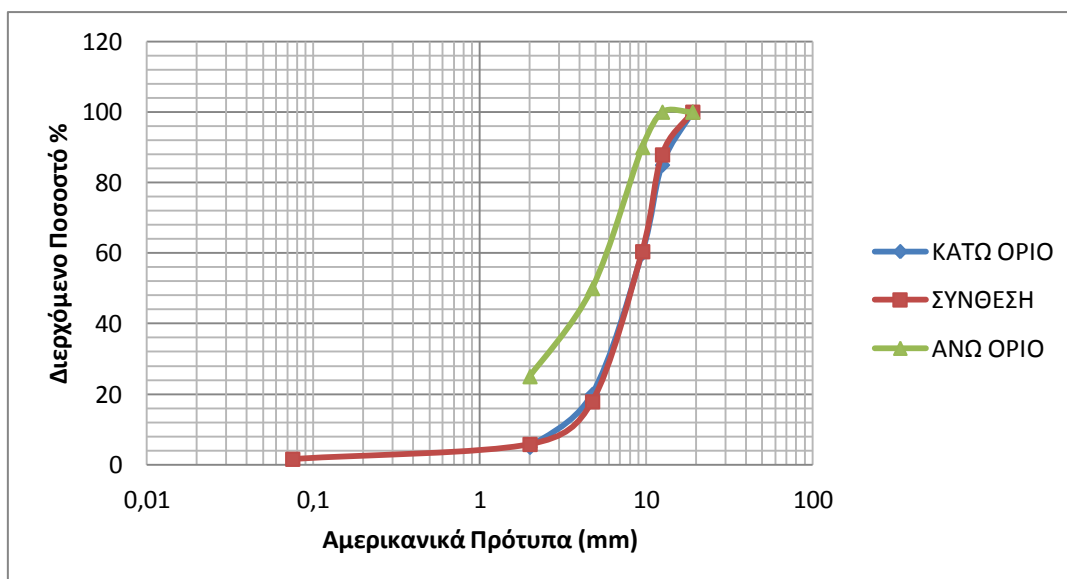
Εικόνα 3.4 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Α αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστό ασφάλτου 4,0%

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 4,5% και την Εικόνα 3.5 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α αντιολισθηρής στρώσης με ποσοστό ασφάλτου 4,5%

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	85	87,9	100	12,1
9,5	3/8"	60	60,4	90	39,6
4,75	No4	20	17,9	50	82,1
2	No10	5	5,8	25	94,2
0,075	No200	-	1,6	-	98,4



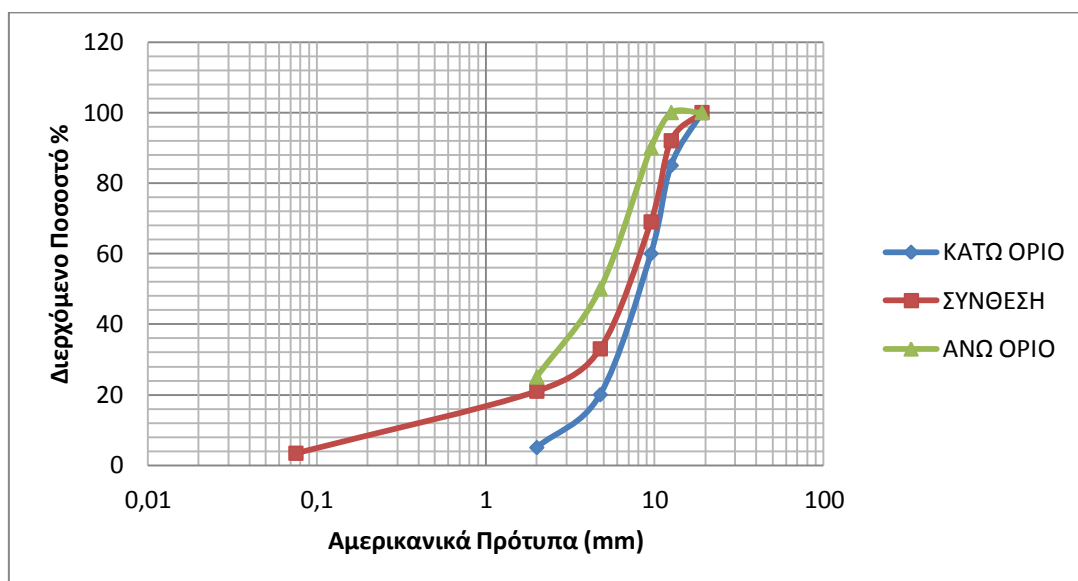
Εικόνα 3.5 Κοκκομετρική καμπύλη αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 4,5%

Τέλος, στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 5,0% και την Εικόνα 3.6 η αντίστοιχη καμπύλη.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας 3.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 5,0%

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	85	92	100	8
9,5	3/8"	60	69	90	31
4,75	No4	20	33	50	67
2	No10	5	21	25	79
0,075	No200	-	3,4	-	96,6



Εικόνα 3.6 Κοκκομετρική καμπύλη αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α με ποσοστό ασφάλτου 5,0%

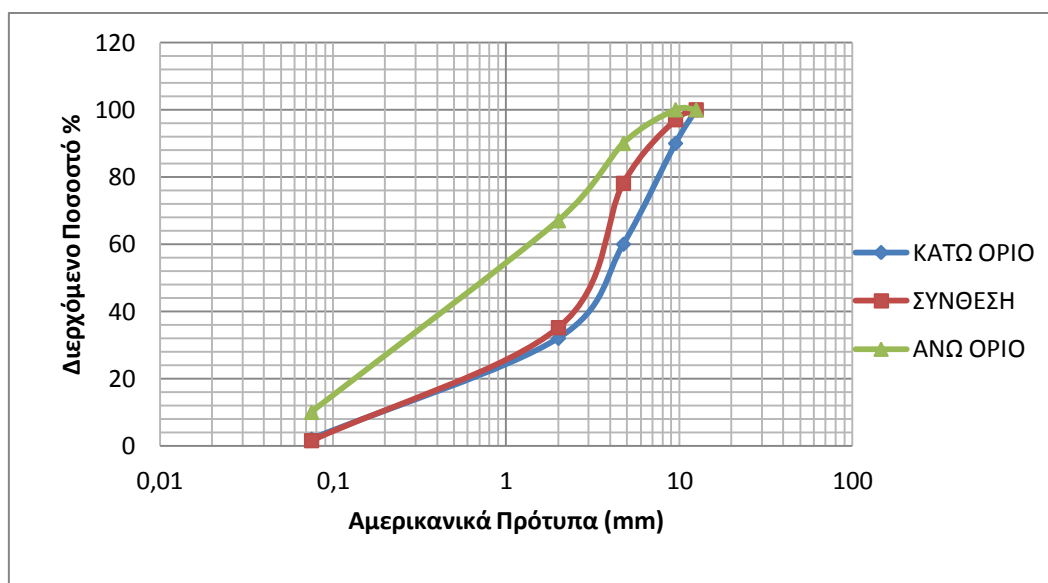
Αντιολισθηρή Στρώση-Μίγμα Β (ANT_B)

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης του μίγματος Α έγινε σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης με βάση τη σκωρία, ενώ η ασφαλτος είναι τροποποιημένη-SBS τύπου 80/100.

Στον πίνακα 3.7 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στην εικόνα 3.7 η αντίστοιχη καμπύλη.

Πίνακας 3.7 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Β αντιολισθηρής στρώσης

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	-
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	100	100	100	0
9,5	3/8"	90	97	100	3
4,75	No4	60	78,1	90	21,9
2	No10	32	35,2	67	64,8
0,075	No200	2	1,6	10	98,4



Εικόνα 3.7 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Β αντιολισθηρής στρώσης

3.2 Προσδιορισμός μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους

Με τη δοκιμή Rice πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους ενός μη συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (Λοΐζος 2012). Η δοκιμή έγινε σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12697-05 (2007). Αρχικά, το χαλαρό ασφαλτόμιγμα ποσότητας μεγαλύτερης των 1.500 γραμμαρίων θερμάνθηκε, ώστε να αποβληθεί η υγρασία και να μπορεί να διαχωριστεί εύκολα με τα χέρια, με το μέγιστο μέγεθος κόκκου να είναι μικρότερο από 6 mm.

Στη συνέχεια, το μίγμα αφού κρύωσε σε θερμοκρασία δωματίου (25°C), τοποθετήθηκε σε πυκνόμετρο γνωστής μάζας, όπου μετρήθηκε το βάρος του μίγματος (Α). Μετά, προστέθηκε, στο πυκνόμετρο, νερό θερμοκρασίας 25°C, μέχρις ότου να καλυφθεί όλο το μίγμα, σφραγίστηκε με το καπάκι της συσκευής και τέθηκε σε λειτουργία για 15 λεπτά. Η βασική λειτουργία της συσκευής είναι ότι αφαιρεί τον

αέρα από το εσωτερικό του πυκνόμετρου και με τη δόνηση, που υφίσταται το νερό, εισχωρεί στα κενά του μίγματος παίρνοντας τη θέση του αέρα, ο οποίος με τη μορφή φυσαλίδων βγαίνει από το δοχείο, εξαιτίας του κενού που έχει εφαρμοστεί στο πυκνόμετρο, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται μια πίεση μικρότερη από 4 kPa.

Μετά το πέρας της λειτουργίας της συσκευής το δοχείο αφαιρέθηκε και προστέθηκε σε αυτό νερό θερμοκρασίας 25°C έως ότου γεμίσει. Το πυκνόμετρο σφραγίστηκε με το ειδικό καπάκι δίνοντας έμφαση να μην παγιδευτεί αέρας μέσα στο δοχείο, σκουπίστηκε εξωτερικά και τοποθετήθηκε στη ζυγαριά, όπου καταγράφηκε το βάρος του πυκνομέτρου, του μίγματος και του νερού (E). Τέλος, το πυκνόμετρο καθαρίστηκε και αφού πληρώθηκε με νερό θερμοκρασίας 25°C, του τοποθετήθηκε το καπάκι και ζυγίστηκε καταγράφοντας το βάρος του πυκνομέτρου και του νερού (B). Επομένως, το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{max} = \frac{A}{(A+B-E)} \quad (3.1)$$

Όπου:

G_{max} : μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος, kg/m³

A: βάρος δείγματος στον αέρα, g

B: βάρος πυκνόμετρου και νερού, g

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

3.3 Συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων με τη γυροσκοπική μέθοδο

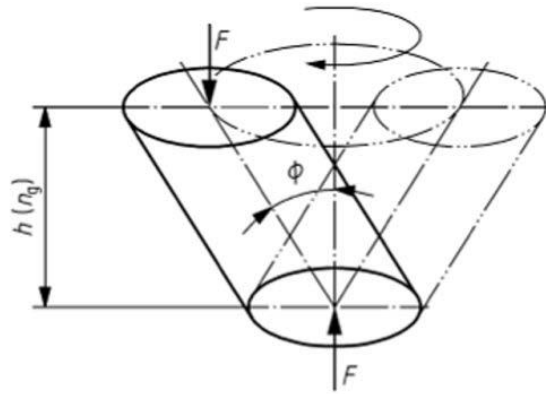
Η γυροσκοπική μέθοδος είναι η πλέον ενδεδειγμένη διαδικασία για τη συμπύκνωση δοκιμών συγκεκριμένου ύψους για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Η παρασκευή δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ χρησιμοποιώντας το γυροσκοπικό συμπιεστή (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 Γυροσκοπικός συμπιεστής (Gyrotory Compactor)

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12697-31 (2007), η συμπύκνωση επιτυγχάνεται με τη συνεχή επιβολή κάθετης στατικής τάσης και της διατμητικής έντασης που προκύπτει από την κίνηση του άξονα της μήτρας που παράγει μια κωνική επιφάνεια από την περιστροφή υπό σταθερή γωνία, ενώ στο τέλος της συμπύκνωσης το δοκίμιο θα πρέπει να παραμείνει κάθετο στον άξονα της κωνικής επιφάνειας.

Μέσω κατάλληλου λογισμικού, υπολογίζονται αυτόματα ο αριθμός των περιστροφών, η πυκνότητα, το ποσοστό κενών αέρα καθώς και το ύψος του δοκιμίου. Από το λογισμικό πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου συμπύκνωσης, η οποία πραγματοποιείται είτε για προκαθορισμένο αριθμό περιστροφών είτε για προκαθορισμένο ύψος δοκιμίου. Στην Εικόνα 3.9 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας της συμπύκνωσης με τη συγκεκριμένη μέθοδο.



- F η συνολική αξονική δύναμη
 $h (n_g)$ ύψος του δοκιμίου μετά από έναν αριθμό περιστροφών
 ϕ γωνία περιστροφής

Εικόνα 3.9 Διάγραμμα περιστροφής του δοκιμίου με τη γυροσκοπική μέθοδο

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων και πυκνότητας. Αρχικά το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε σε ειδικό φούρνο σε θερμοκρασία 160 °C μαζί με τη μεταλλική μήτρα και τις δύο μεταλλικές πλάκες για περίπου 3 ώρες έως ότου το ασφαλτόμιγμα να γίνει εργάσιμο και να έχει πάνω κάτω την ίδια θερμοκρασία με τη μήτρα και τις πλάκες, ώστε να μην υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας. Στη συνέχεια, το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε στη μεταλλική μήτρα διαμέτρου 150mm και ύψους 200mm, αφού πρώτα τοποθετήθηκε η μία μεταλλική πλάκα, λιπάνθηκε με ειδικό γράσο σιλικόνης ολόκληρη η εσωτερική επιφάνεια για να μην υπάρξει πρόβλημα κατά την εξαγωγή του δοκιμίου από τη μήτρα και τοποθετήθηκε και η άνω μεταλλική πλάκα.

Επόμενο βήμα είναι η τοποθέτηση της μήτρας με το ασφαλτόμιγμα στο γυροσκοπικό συμπιεστή για να αρχίσει η διαδικασία της συμπύκνωσης του ασφαλτομίγματος. Η συμπύκνωσή του ολοκληρώθηκε όταν επιτεύχθηκε το απαιτούμενο ύψος του δοκιμίου (170mm). Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της συμπύκνωσης, το δοκίμιο εξήλθε από τη μήτρα με προσοχή, αφού πρώτα είχε κρυώσει, για να μην διαλυθεί (Εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 Δοκίμιο αμέσως μετά τη συμπύκνωση

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα και σχετικές έρευνες (Chehab et al. 2007), για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, τα δοκίμια πρέπει να είναι διαστάσεων 150mm x 100mm. Έτσι, μετά τη συμπύκνωση με τη γυροσκοπική μέθοδο πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια πυρηνοληψία, με ειδικό μηχάνημα, (Εικόνα 3.11), από το κέντρο του δοκιμίου και στη συνέχεια κόπηκαν καθ' ύψος με ειδικό τροχό.



Εικόνα 3.11 Ειδικό μηχάνημα πυρηνοληψίας



Εικόνα 3.12 Μορφή δοκιμίου πριν και μετά την πυρηνοληψία

Στην Εικόνα 3.12, δίνεται η μορφή του δοκιμίου που προκύπτει από τη γυροσκοπική μέθοδο και εκείνου από την απόσπαση καρότου από το εσωτερικό του. Οι αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου μετά τη συμπύκνωση είναι 170mm x 150mm, ενώ μετά την πυρηνοληψία 150mm x 100mm.

3.4 Δοκίμια ελέγχου

Δοκίμια Ισοπεδωτικής στρώσης-Μίγμα Α

Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια μίγματος Α, 4 δοκίμια με ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4 δοκίμια με ποσοστό 4,5% και 4 δοκίμια με ποσοστό 5,0%. Επίσης, τα δοκίμια για κάθε τύπο περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα.

Δοκίμια Ισοπεδωτικής στρώσης-Μίγμα Β

Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια μίγματος Β, 4 δοκίμια με ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4 δοκίμια με ποσοστό 4,5% και 4 δοκίμια με ποσοστό 5,0%. Επίσης, τα δοκίμια για κάθε τύπο περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα.

Δοκίμια Ισοπεδωτικής στρώσης-Μίγμα Γ

Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια μίγματος Γ, 4 δοκίμια με ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4 δοκίμια με ποσοστό 4,5% και 4 δοκίμια με ποσοστό 5,0%. Επίσης, τα δοκίμια για κάθε τύπο περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα.

Δοκίμια Αντιολισθηρής στρώσης-Μίγμα Α

Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια μίγματος Α, 4 δοκίμια με ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4 δοκίμια με ποσοστό 4,5% και 4 δοκίμια με ποσοστό 5,0%. Επίσης, τα δοκίμια για κάθε τύπο περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα

Δοκίμια Αντιολισθηρής στρώσης-Μίγμα Β

Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 δοκίμια μίγματος Β, 4 δοκίμια με ποσοστό ασφάλτου 4,0%, 4 δοκίμια με ποσοστό 4,5% και 4 δοκίμια με ποσοστό 5,0%. Επίσης, τα δοκίμια για κάθε τύπο περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα.

Από αυτά τα δοκίμια, τα 43 χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της καταλληλότητας των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για τα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας στην Ελλάδα. Τα υπόλοιπα 16 δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων ανάλυσης. Σημειώνεται ότι τα 16 δοκίμια επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προέρχονται από όλο το εύρος του πληθυσμού του συνολικού δείγματος των δοκιμίων.

3.5 Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους έγινε σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 12697-06 (2007). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους για τα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο SSD (Saturated Surface Dry), ενώ για τα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης με τη μέθοδο των διαστάσεων του δοκιμίου. Ο διαχωρισμός έγινε γιατί τα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης δεν είχαν τη δυνατότητα συγκράτησης του νερού εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού κενών.

Μέθοδος SSD

Αρχικά, τα δοκίμια καθαρίστηκαν προσεκτικά από τυχόν ξένες ουσίες και αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου 25°C μέχρι να ξηρανθούν. Στην συνέχεια, ζυγίστηκαν στον αέρα με τη βοήθεια ειδικής ζυγαριάς ακρίβειας 0,1 g και καταγράφηκε η μάζα τους (m_1). Έπειτα, κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε μέσα σε ένα διχτυωτό καλάθι το οποίο ήταν βυθισμένο σε ένα λουτρό νερού θερμοκρασίας 25 °C, ώστε να επιτρέπεται ελεύθερα η κυκλοφορία του νερού γύρω από το δοκίμιο. Η στάθμη του νερού κάλυπτε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου και ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού γινόταν με ειδικό θερμόμετρο. Το δοκίμιο παρέμεινε μέσα στο νερό για τριάντα λεπτά μέχρι να κορεσθεί πλήρως.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι το διχτυωτό καλάθι ήταν συνδεδεμένο με τη ζυγαριά και ήταν δυνατή η καταγραφή του βάρους του δοκιμίου στο νερό

(m_2). Τέλος, το δοκίμιο απομακρύνθηκε από το νερό, σκουπίστηκε επιφανειακά με μια απορροφητική πετσέτα και στη συνέχεια ζυγίστηκε. Η μέτρηση αυτή είναι το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου στο νερό (m_3).

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{bulk} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.2)$$

Όπου:

G_{bulk} : φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος, kg/m^3

m_1 : βάρος ξηρού δοκιμίου στον αέρα, g

m_2 : βάρος κορεσμένου δοκιμίου στο νερό, g

m_3 : βάρος κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα, g

ρ_w : πυκνότητα νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (25°C), $997,1 \text{ kg/m}^3$

Μέθοδος διαστάσεων

Είναι η πιο απλή μέθοδος υπολογισμού του φαινόμενου ειδικού βάρους. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω κάθε δοκίμιο ζυγίστηκε στον αέρα, αφού πρώτα είχε ξηρανθεί (m_1). Στη συνέχεια, μετρήθηκε η διάμετρος και το ύψος του κάθε δοκιμίου, υπολογίζοντας το μέσο όρο τεσσάρων διαφορετικών μετρήσεων. Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους με αυτή τη μέθοδο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{bulk} = \frac{m_1}{\frac{\pi \times h \times d^2}{4}} \times 10^6 \quad (3.3)$$

Όπου:

G_{bulk} : φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος, kg/m^3

m_1 : βάρος ξηρού δοκιμίου στον αέρα, g

h: ύψος δοκιμίου, mm

d: διάμετρος δοκιμίου, mm

Κατόπιν του προσδιορισμού του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους και του φαινόμενου ειδικού βάρους, είναι εφικτός ο υπολογισμός των κενών αέρα.

3.6 Προσδιορισμός κενών αέρα ασφαλτομίγματος

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού κενών αέρα του ασφαλτομίγματος πρέπει να υπολογιστεί εκτός από το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος και το φαινόμενο ειδικό βάρος.

Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12697-08 (2007) το ποσοστό κενών αέρα υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{max} - G_{bulk}}{G_{max}} \quad (3.4)$$

Όπου:

V_a : ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, %

G_{max} : μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος, kg/m^3

G_{bulk} : φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος, kg/m^3

Επίσης, τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA), τα οποία ορίζονται ως τα κενά ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών σε ένα συμπυκνωμένο μίγμα, υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$VMA = V_a + V_{eff} \quad (3.5)$$

Όπου:

VMA: ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών, %

V_a : ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, %

V_{eff} : όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου στο δοκίμιο, %

Τέλος, το ποσοστό κενών που πληρώθηκαν με άσφαλο (VFA) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$VFA = 100 \times \frac{V_{eff}}{VMA} = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (3.6)$$

Όπου:

VFA: ποσοστό κενών που πληρώθηκαν με άσφαλο, %

V_{eff} : όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου στο δοκίμιο, %

VMA: ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών, %

PAV: ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, %

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Στους Πίνακες 3.8-3.9 παρουσιάζονται τα στοιχεία ογκομετρικής σύστασης του κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 3.8 Στοιχεία ογκομετρικής σύστασης των δοκιμίων της ισοπεδωτικής στρώσης

Κωδικός Δοκιμίου	Va (SSD)	VMA	VFA	Veff
ΙΣ_Α_Ι_1	2,87	12,4	76,8	9,49
ΙΣ_Α_Ι_2	4,27	13,6	68,6	9,32
ΙΣ_Α_Ι_3	4,74	14,0	66,2	9,29
ΙΣ_Α_Ι_4	5,71	14,9	61,6	9,18
ΙΣ_Α_ΙΙ_1	2,83	13,4	78,8	10,55
ΙΣ_Α_ΙΙ_2	4,27	14,6	70,8	10,35
ΙΣ_Α_ΙΙ_3	5,40	15,6	65,4	10,20
ΙΣ_Α_ΙΙ_4	5,76	15,9	63,9	10,18
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_1	2,58	14,3	82,0	11,74
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_2	4,23	15,7	73,1	11,51
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_3	5,30	16,7	68,2	11,37
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_4	6,38	17,6	63,7	11,20
ΙΣ_Β_Ι_1	3,61	12,9	72,1	9,33
ΙΣ_Β_Ι_2	4,13	13,3	69,0	9,21
ΙΣ_Β_Ι_3	6,09	15,1	59,7	9,03
ΙΣ_Β_Ι_4	6,54	15,5	57,8	8,95
ΙΣ_Β_ΙΙ_1	3,59	13,9	74,2	10,31
ΙΣ_Β_ΙΙ_2	4,54	14,8	69,3	10,26
ΙΣ_Β_ΙΙ_3	5,98	16,1	62,7	10,08
ΙΣ_Β_ΙΙ_4	6,38	16,4	61,1	9,99
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_1	3,45	14,9	76,8	11,41
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_2	4,85	16,1	69,8	11,21
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_3	5,61	16,7	66,4	11,08
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_4	6,70	17,7	62,1	10,97
ΙΣ_Γ_Ι_1	3,55	12,8	72,2	9,234
ΙΣ_Γ_Ι_2	4,93	14,0	64,9	9,10
ΙΣ_Γ_Ι_3	5,71	14,7	61,2	8,99
ΙΣ_Γ_Ι_4	6,82	15,7	56,5	8,85
ΙΣ_Γ_ΙΙ_1	3,21	13,6	76,3	10,35
ΙΣ_Γ_ΙΙ_2	4,63	14,8	68,7	10,17
ΙΣ_Γ_ΙΙ_3	5,86	15,9	63,2	10,04
ΙΣ_Γ_ΙΙ_4	6,59	16,5	60,1	9,93
ΙΣ_Γ_ΙΙΙ_1	3,24	14,7	77,9	11,42
ΙΣ_Γ_ΙΙΙ_2	4,27	15,6	72,6	11,29
ΙΣ_Γ_ΙΙΙ_3	5,53	16,6	66,7	11,09
ΙΣ_Γ_ΙΙΙ_4	6,85	17,8	61,6	10,97

Πίνακας 3.9 Στοιχεία ογκομετρικής σύστασης των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης

Κωδικός δοκιμίου	Va (%)	VMA	VFA	Veff
ANT_A_I_1	19,2	29,0	33,8	9,80
ANT_A_I_2	18,5	28,4	34,8	9,88
ANT_A_I_3	17,5	27,5	36,4	10,00
ANT_A_I_4	16,3	26,4	38,4	10,15
ANT_A_II_1	20,8	31,7	34,5	10,96
ANT_A_II_2	21,7	32,6	33,2	10,83
ANT_A_II_3	21,6	32,4	33,5	10,85
ANT_A_II_4	22,5	33,2	32,3	10,73
ANT_A_III_1	19,6	31,7	38,0	12,03
ANT_A_III_2	18,7	30,9	39,4	12,17
ANT_A_III_3	22,7	34,3	33,8	11,57
ANT_A_III_4	18,6	30,8	39,5	12,18
ANT_B_I_1	10,4	19,8	47,6	9,42
ANT_B_I_2	9,7	19,2	49,4	9,49
ANT_B_I_3	10,8	20,2	46,4	9,37
ANT_B_I_4	12,3	21,5	42,8	9,22
ANT_B_II_1	9,6	20,1	52,2	10,47
ANT_B_II_2	10,4	20,7	50,0	10,38
ANT_B_II_3	9,8	20,2	51,7	10,45
ANT_B_II_4	12,8	22,9	44,1	10,09
ANT_B_III_1	10,3	21,5	52,0	11,17
ANT_B_III_2	8,7	20,0	56,7	11,37
ANT_B_III_3	12,6	23,4	46,4	10,89
ANT_B_III_4	12,4	23,3	46,8	10,90

Το εύρος του ποσοστού κενών των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης κυμαίνεται από 2,5 έως 6,8% ενώ το εύρος του ποσοστού κενών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης κυμαίνεται από 8,5 έως 22,5%.

3.7 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο T 342-11 (AASHTO) χρησιμοποιώντας τη συσκευή NAT (Nottigham Asphalt Tester). Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα θάλαμο όπου μπορεί να επιτευχθεί σταθερή θερμοκρασία, ένα έμβολο επιβολής φορτίου και ένα σύστημα μέτρησης και εξαγωγής σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στην Εικόνα 3.13 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.



*Εικόνα 3.13 Πειραματική διάταξη προσδιορισμού E^**

Ο θάλαμος έχει τη δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου της θερμοκρασίας των δοκιμών για ένα εύρος από $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ με ακρίβεια $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ο ειδικός αυτός θάλαμος είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να χωράει και ένα δοκίμιο ελέγχου, στο κέντρο του οποίου είναι τοποθετημένο ειδικό θερμόμετρο, έτσι ώστε να ελέγχεται η εσωτερική θερμοκρασία των δοκιμών. Επίσης, το σύστημα είναι απόλυτα συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο καταγράφεται το ιστορικό των τάσεων και των αξονικών παραμορφώσεων σε ειδικό αρχείο, καθώς και η μέτρηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και της γωνίας υστέρησης.

Κατά την προετοιμασία του δοκιμίου, ειδικά μεταλλικά στηρίγματα τοποθετήθηκαν στο σώμα του δοκιμίου σε συγκεκριμένες αποστάσεις, για να τοποθετηθούν σε αυτά οι αισθητήρες καταγραφής των παραμορφώσεων (LVDT's). Τα μεταλλικά αυτά στηρίγματα τοποθετήθηκαν σε μία ειδική συσκευή (εικόνα 3.14), τα οποία συγκρατούσε με μαγνήτη και απαλείφθηκαν με ειδική κόλλα.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Στη συνέχεια, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη συσκευή και με τη χρήση ενός διακόπτη τα μεταλλικά στηρίγματα τοποθετήθηκαν στο δοκίμιο και συγκρατήθηκαν μέχρι να κολλήσουν (περίπου μισή ώρα).



Εικόνα 3.14 Ειδική συσκευή προσάρτησης μεταλλικών στηριγμάτων στο δοκίμιο

Μετά το πέρας της προετοιμασίας, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στον ειδικό θάλαμο και παρέμεινε μέχρι να αποκτήσει την κατάλληλη θερμοκρασία. Στον Πίνακα 3.10 φαίνονται οι χρόνοι παραμονής του δοκιμίου μέσα στο θάλαμο.

Πίνακας 3.10 Χρόνοι παραμονής του δοκιμίου στον ειδικό θάλαμο

Θερμοκρασία δοκιμίου °C	Χρόνος όταν το δοκίμιο προέρχεται από θερμοκρασία δωματίου περίπου 25°C, (h)	Χρόνος από προηγούμενη δοκιμή δεδομένης θερμοκρασίας, (h)
-10	Όλη τη νύχτα	Όλη τη νύχτα
4	Όλη τη νύχτα	4 ώρες ή όλη τη νύχτα
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Όταν το δοκίμιο απέκτησε τη κατάλληλη θερμοκρασία για τη δοκιμή, τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο κυλινδρικές πλάκες από ανοξείδωτο αλουμίνιο υψηλής αντοχής, διαστάσεων $104,5 \pm 5$ mm. Πρέπει να σημειωθεί ότι ανάμεσα στις πλάκες και στο δοκίμιο προστέθηκαν ειδικές μεμβράνες σιλικόνης, ώστε να μειθούν οι αναπτυσσόμενες τριβές και να αποφευχθεί η δημιουργία διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου. Έπειτα, το σύστημα αυτό ευθυγραμμίστηκε ως προς το έμβολο επιβολής του φορτίου, ώστε να αποφευχθεί η έκκεντρη φόρτιση. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν οι ειδικοί αισθητήρες (LVDT's) στα μεταλλικά στηρίγματα, οι οποίοι καταγράφουν τις μονοαξονικές παραμορφώσεις κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Στην Εικόνα 3.15 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής υπολογισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.



Εικόνα 3.15 Πειραματική διάταξη προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Επόμενο βήμα της δοκιμής είναι η άσκηση του δυναμικού φορτίου ημιτονοειδούς μορφής και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Το δυναμικό φορτίο επιλέχθηκε, ώστε οι μονοαξονικές παραμορφώσεις να κυμαίνονται από 50 έως 150 microstrains.

Γενικά, όσο μικρότερη η θερμοκρασίας της δοκιμής τόσο μεγαλύτερο το δυναμικό φορτίο.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μετρήθηκε σε πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25, 37 °C και σε έξι συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz για κάθε θερμοκρασία. Άρα, το κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε για τους 30 συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης, ξεκινώντας από τη χαμηλότερη θερμοκρασία προς την υψηλότερη. Αντίθετα, η δοκιμή σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ξεκίνησε από την υψηλότερη συχνότητα στη χαμηλότερη. Στον Πίνακα 3.11 φαίνονται οι κύκλοι φόρτισης ανά συχνότητα.

Πίνακας 3.11 Αριθμός κύκλων σε κάθε συχνότητα

Συχνότητα φόρτισης, Hz	Αριθμός κύκλων
25	200
10	200
5	100
1	20
0.5	15
0.1	15

Τέλος, πρέπει να διευκρινιστεί ότι μέσω ειδικού λογισμικού αποθηκεύονται τα στοιχεία των πέντε τελευταίων κύκλων σε κάθε συχνότητα και με κατάλληλη επεξεργασία υπολογίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο φαίνονται στον Πίνακα Π1 του Παραρτήματος.

3.8 Εκτίμηση δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων

3.8.1 Αλγόριθμος Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας όλων των δοκιμών για πέντε θερμοκρασίες (4, 15, 20, 25, 37°C) και έξι συχνότητες (0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz). Για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω του αλγορίθμου αυτού είναι απαραίτητη η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, το ποσοστό κενών, το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα και το ιζώδες της ασφάλτου (εξίσωση 2.7).

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

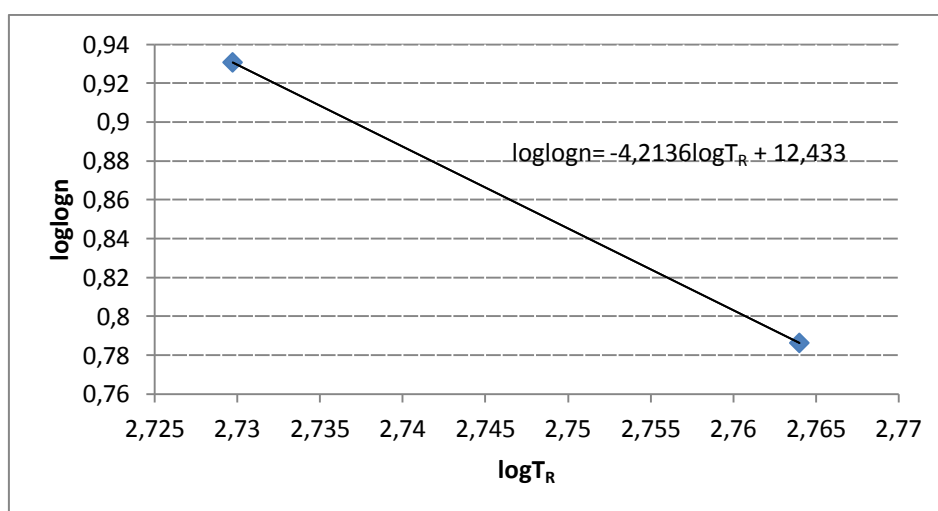
Η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, το ποσοστό κενών ασφαλτομίγματος καθώς και το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.1 και 3.4.

Το ιξώδες της ασφάλτου εκτιμήθηκε από το συνδυασμό των δοκιμών μάλθωσης και διείδυσης. Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η θερμοκρασία μάλθωσης (σημείο μάλθωσης) αντιστοιχεί σε θερμοκρασία όπου το ιξώδες της ασφάλτου είναι 13.000.000 cP, ενώ το ιξώδες της ασφάλτου από τη δοκιμή διείδυσης, δηλαδή το δείκτη Pen στους 25°C υπολογίζεται από τη εξίσωση 2.9. Στον Πίνακα 3.12 δίνεται Ο δείκτης Pen στους 25°C και η θερμοκρασία μάλθωσης για την ισοπεδωτική και την αντιολισθηρή στρώση.

Πίνακας 3.12 Δείκτης Pen και θερμοκρασία μάλθωσης

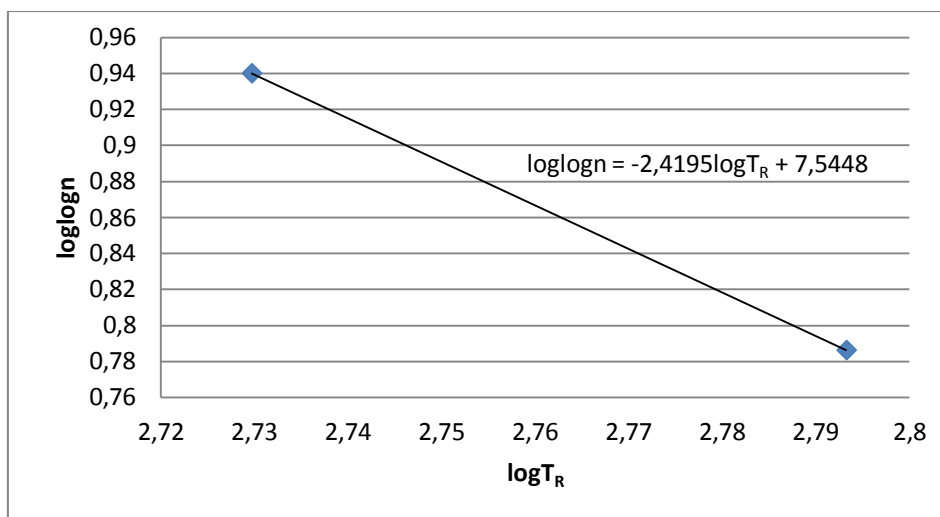
	Pen	Θερμοκρασία μάλθωσης °C
Ισοπεδωτική στρώση	58	49,5
Αντιολισθηρή στρώση	48	72

Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων A, VTS προσδιορίστηκαν με γραμμική παλινδρόμηση για την ισοπεδωτική στρώση (Εικόνα 3.16) και για την αντιολισθηρή στρώση (Εικόνα 3.17). Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.18.



Εικόνα 3.16 Διάγραμμα υπολογισμού του ιξώδους για την ισοπεδωτική στρώση

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 3.17 Διάγραμμα υπολογισμού του ιξώδους για την αντιολισθηρή στρώση

Πίνακας 3.13 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων A, VTS

	A	VTS
Ισοπεδωτική στρώση	12,43	-4,213
Αντιολισθηρή στρώση	7,544	-2,419

Επομένως, η εξίσωση υπολογισμού του ιξώδους για την ισοπεδωτική στρώση είναι η εξής:

$$\log\log n = -4,2136\log T_R + 12,433 \quad (3.7)$$

Στον Πίνακα 3.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ιξώδους για τις θερμοκρασίες που πραγματοποιήθηκαν όλες οι δοκιμές.

Πίνακας 3.14 Ιξώδες για κάθε θερμοκρασία

T(οC)	T _R	n (10 ⁶ poi)
4	498,87	3725,80
15	518,67	66,25
20	527,67	13,63
25	536,67	3,21
37	558,27	0,16

Επίσης, η εξίσωση υπολογισμού του ιξώδους για την αντιολισθηρή στρώση είναι η εξής:

$$\log\log n = -2,4195\log T_R + 7,5448 \quad (3.8)$$

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Τα αποτελέσματα του ιξώδους για τις θερμοκρασίες που πραγματοποιήθηκαν όλες οι δοκιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.15.

Πίνακας 3.15 Ιξώδες για κάθε θερμοκρασία για την αντιολισθηρή στρώση

T(οC)	T _R	n (10 ⁶ poi)
4	498,87	258,72
15	518,67	30,00
20	527,67	12,33
25	536,67	5,53
37	558,27	0,86

Τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2 του Παραρτήματος.

3.8.2 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών για τις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες, όπως ο αλγόριθμος Witczak 1-37A. Στον αλγόριθμο αυτό εκτός από την κοκκομετρική διαβάθμιση, το ποσοστό κενών και το ποσοστό του όγκου ενεργής ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα εισέρχεται το διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης ως αντικατάσταση του ιξώδους της ασφάλτου (εξίσωση 2.10). Ο προσδιορισμός του διατμητικού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε μέσω της εξίσωσης 2.11 για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης, καθώς και η γωνία υστέρησης υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις 2.12 και 2.15 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα Π3 του Παραρτήματος.

3.8.3 Αλγόριθμος Hirsch

Ο αλγόριθμος Hirsch χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών για τις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες, όπως στους δύο προηγούμενους αλγόριθμους. Είναι ο πιο απλός τρόπος προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (εξίσωση 2.16), καθώς απαραίτητα στοιχεία είναι το ποσοστό κενών των αδρανών (VMA) (εξίσωση 3.5), το ποσοστό των κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλο (VFA) (εξίσωση 3.6), ο συντελεστής επαφής των αδρανών P_c (εξίσωση 2.17) και το διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, όπως

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

προσδιορίστηκε και στον αλγόριθμο Witczak 1-40D. Τα αποτελέσματα των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης μέσω του αλγορίθμου Hirsch παρουσιάζονται στον Πίνακα Π4 του Παραρτήματος.

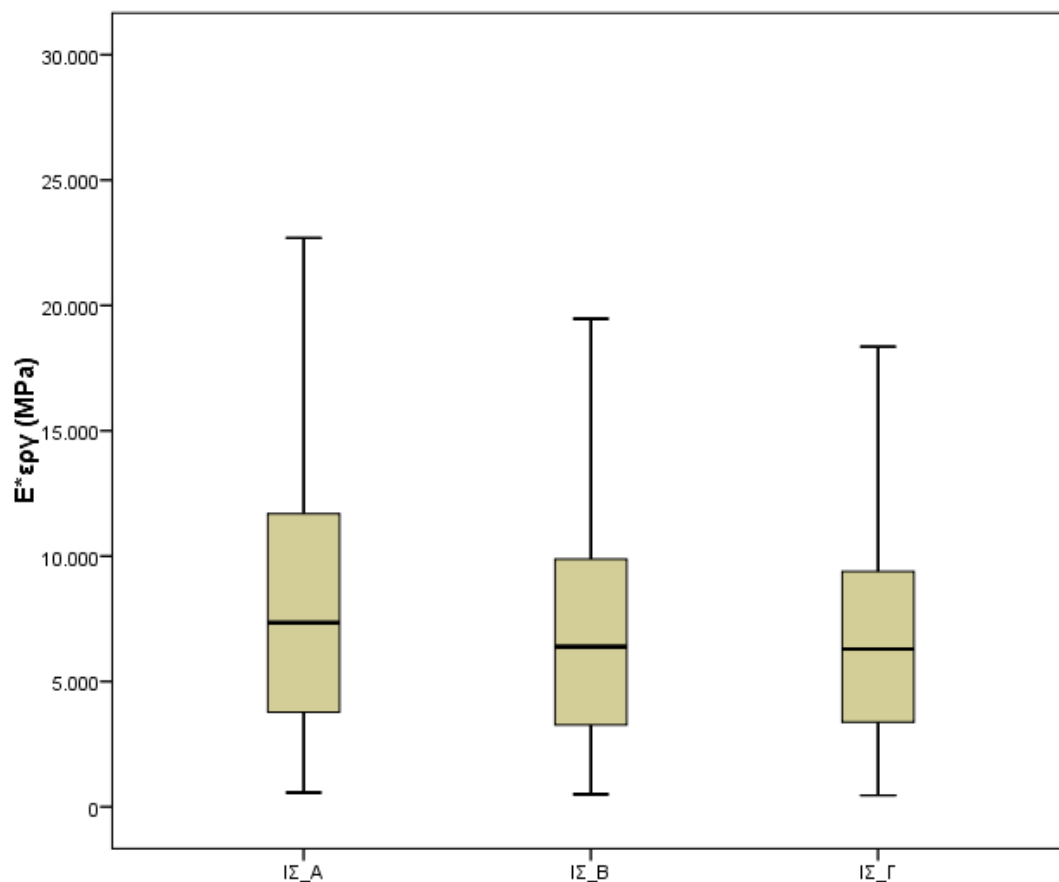
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και στη συνέχεια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων πρόβλεψης. Η υπόψη αξιολόγηση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των σφαλμάτων των τριών αλγορίθμων πρόβλεψης με βάση τα οποία θα επιλεγεί ένας αλγόριθμος προς περαιτέρω διερεύνηση. Η διερεύνηση αυτή περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου και την επαλήθευση αυτής.

4.2 Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό για κάθε τύπο ισοπεδωτικής στρώσης, υπό τη μορφή θηκογραμμάτων (boxplots).

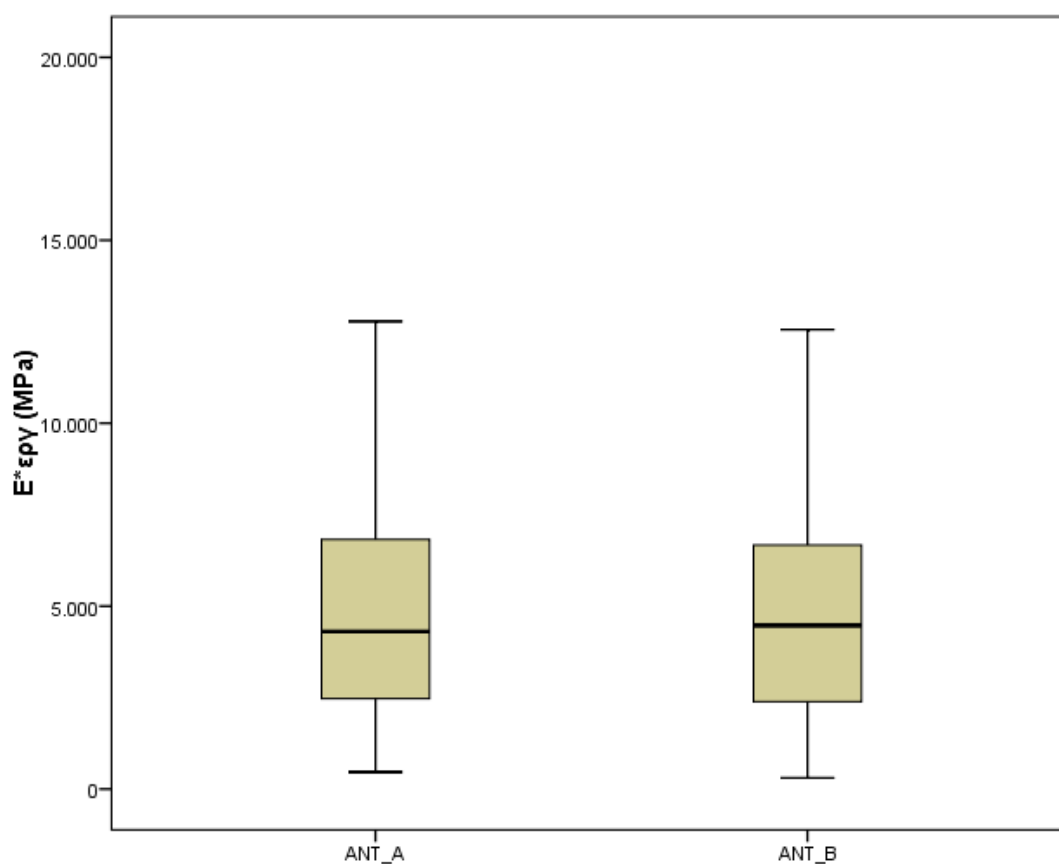


Εικόνα 4.1 $E^*_{εργ}$ ισοπεδωτικής στρώσης

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

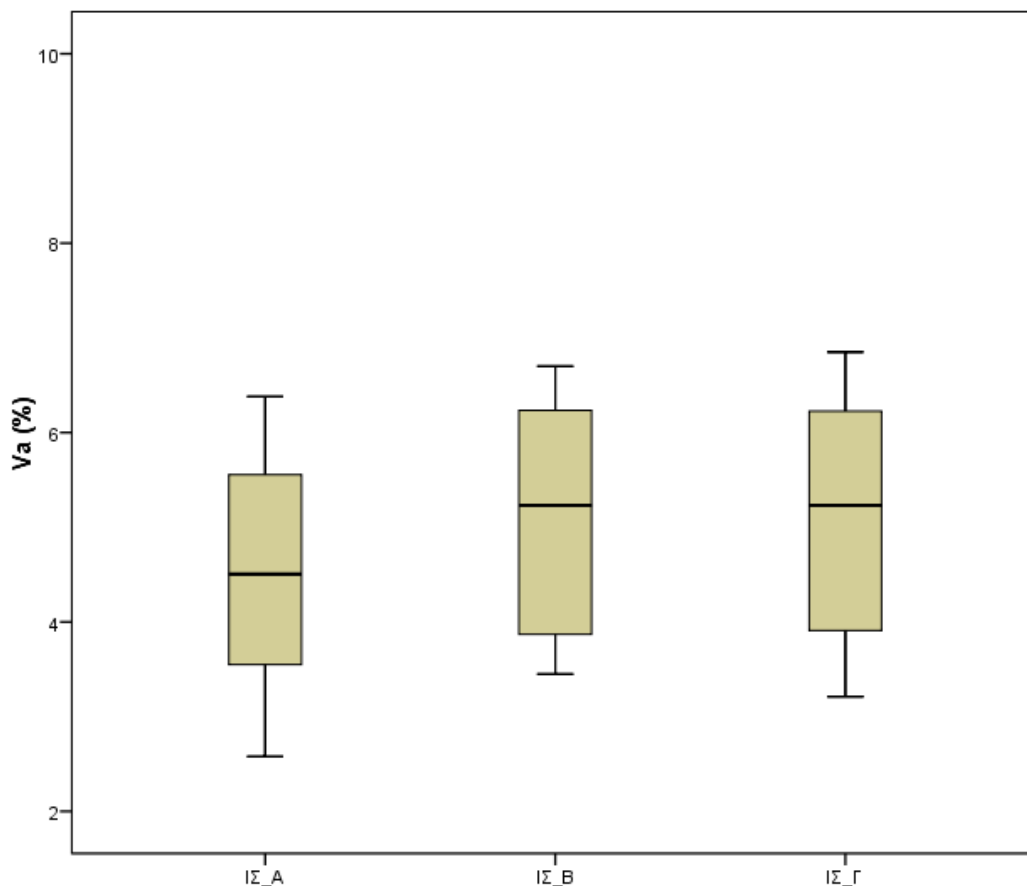
Οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το μίγμα Α κυμαίνονται από 500 έως 22500 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι 7364 MPa. Επίσης, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το μίγμα Β κυμαίνονται από 500 έως 19500 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι 6389 MPa. Τέλος, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το μίγμα Γ κυμαίνονται από 500 έως 18500 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι 6239 MPa.

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές του $E^*_{εργ}$ αντιολισθηρής στρώσης. Οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το μίγμα Α κυμαίνονται από 500 έως 13000 MPa και η τιμή της διαμέσου του δείγματος είναι 4520 MPa. Επίσης, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το μίγμα Β κυμαίνονται από 200 έως 12500 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι 4352 MPa.



Εικόνα 4.2 $E^*_{εργ}$ αντιολισθηρής στρώσης

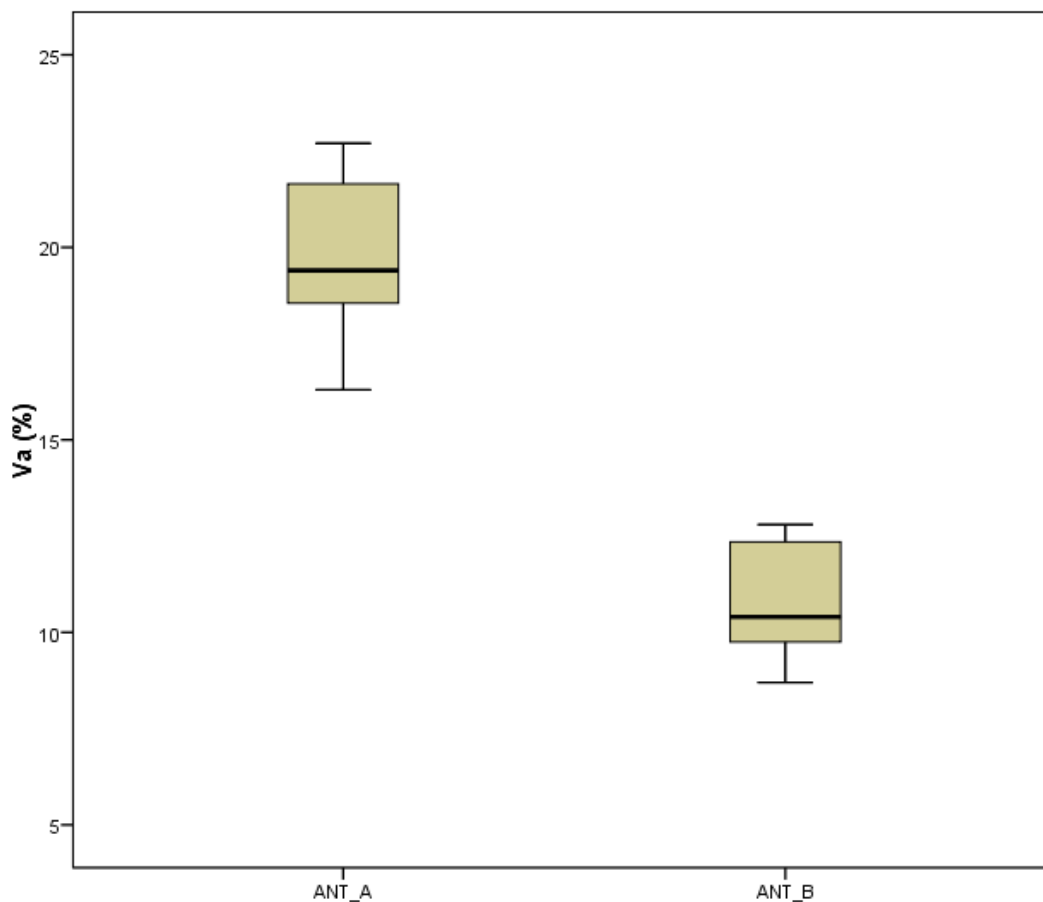
Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζονται τα ποσοστά των κενών των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης.



Εικόνα 4.3 Ποσοστό κενών ισοπεδωτικής στρώσης

Τα ποσοστά κενών ανά τύπο μίγματος για την ισοπεδωτική στρώση δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Τα ποσοστά κενών για το μίγμα Α κυμαίνονται από 2,5 έως 6,5% και η τιμή της διαμέσου είναι 4,5%. Επίσης, τα ποσοστά κενών για το μίγμα Β κυμαίνονται από 3,5 έως 6,7% και η τιμή της διαμέσου είναι 5,2%. Τέλος, τα ποσοστά κενών για το μίγμα Γ κυμαίνονται από 3,3% έως 6,8% και η τιμή της διαμέσου είναι 5,2%.

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζονται τα ποσοστά κενών των δοκιμών της αντιολισθηρής στρώσης.



Εικόνα 4.4 Ποσοστό κενών αντιολισθηρής στρώσης

Τα ποσοστά κενών ανά τύπο μίγματος για την αντιολισθηρή στρώση παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μίγμα A χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο ενώ το μίγμα B ως λεπτόκοκκο. Πιο αναλυτικά, τα ποσοστά κενών για το μίγμα A κυμαίνονται από 16,5 έως 22,5% και η τιμή της διαμέσου είναι 19,4%. Επίσης, τα ποσοστά κενών για το μίγμα B κυμαίνονται από 8,5 έως 12,5% και η τιμή της διαμέσου είναι 10,4%. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση τα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης δύναται να ομαδοποιηθούν ανεξαρτήτως τύπου (A, B ή Γ). Αντιθέτως, όσον αφορά στα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης λόγω των ιδιαίτερα μεγάλων διαφορών ως προς το ποσοστό των κενών, δεν είναι δυνατή η ομαδοποίηση των δύο τύπων και επομένως για την περαιτέρω διερεύνηση θεωρούνται ξεχωριστά.

4.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης

Η εφαρμοσιμότητα των τριών αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στα ελληνικά ασφαλτομίγματα εκτιμήθηκε μέσω του διαγράμματος διασποράς των μετρημένων (εργαστηριακών) τιμών ($E^*_{εργ}$) και των προβλεπόμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ($E^*_{προβ}$). Η αξιολόγηση της συσχέτισης πραγματοποιήθηκε με τον προσδιορισμό του συντελεστή συσχέτισης R^2 , ο οποίος εκφράζει ποσοτικά το πόσο ισχυρή είναι η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και δίνει το ποσοστό μεταβλητότητας των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής που υπολογίζονται από τις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Γενικά, όσο το R^2 πλησιάζει τη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή είναι η συσχέτιση των μεταβλητών.

Επίσης, μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης αναπτύχθηκε η εξίσωση $y = \alpha \cdot x + \beta$, λαμβάνοντας τον όρο β ίσο με το μηδέν. Ο συντελεστής α της εξίσωσης προσδιορίζει το βαθμό κατά τον οποίο διαφέρουν οι εργαστηριακές τιμές από τις προβλεπόμενες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά.

Επιπλέον, για την αξιολόγηση των σφαλμάτων πρόβλεψης υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού τυπικού σφάλματος-Root-Mean-Square-Error (RMSE) για κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά. Το RMSE αντιπροσωπεύει την τυπική απόκλιση των σφαλμάτων μεταξύ των προβλεπόμενων και των μετρημένων στο εργαστήριο τιμών. Αυτές οι διαφορές ονομάζονται σφάλματα πρόβλεψης. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός του RMSE τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο. Το RMSE προσδιορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^v (E^*_{προβ} - E^*_{εργ})^2}{v}} \quad (4.1)$$

Όπου:

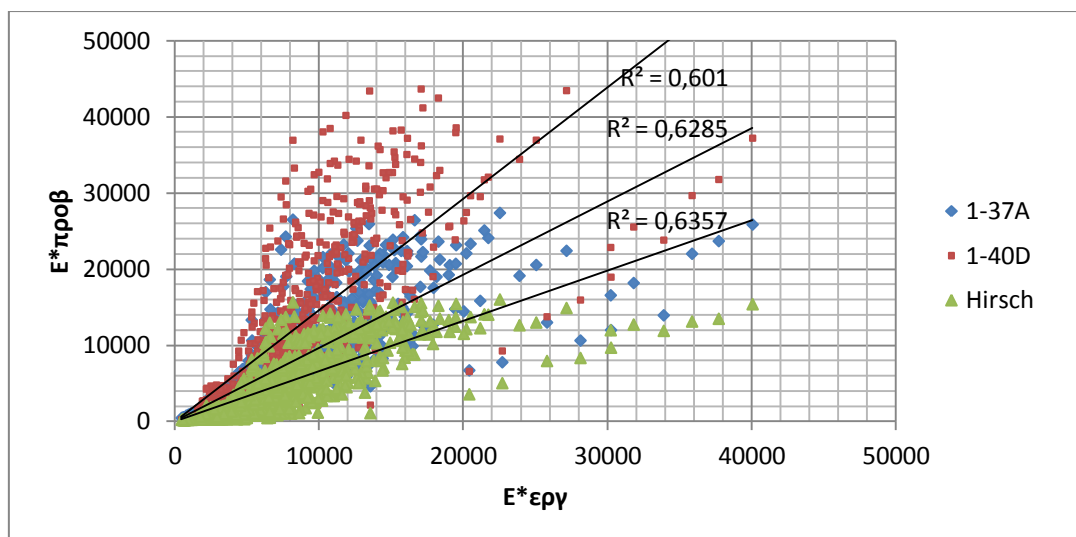
$E^*_{προβ}$: η προβλεπόμενη τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από τον αλγόριθμο

$E^*_{εργ}$: η μετρημένη τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο

v : το σύνολο του δείγματος

Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων (εργαστηριακών) τιμών και των προβλεπόμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για την ισοπεδωτική στρώση και στον Πίνακα 4.1 τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των αλγορίθμων πρόβλεψης.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 4.5 Διάγραμμα διασποράς των τριών αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για την ισοπεδωτική στρώση

Πίνακας 4.1 Στατιστικά στοιχεία-δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης

Ισοπεδωτική Στρώση	E*1-37A	E*1-40D	E*Hirsch
R ²	0,628	0,601	0,635
α	0,924302	1,501552	0,665006
RMSE	3857,365	7890,13	4169,417

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 για τους τρεις αλγόριθμους κυμαίνεται από 0,60 έως 0,635. Αυτό δείχνει ότι η συσχέτιση των τιμών είναι οριακά ικανοποιητική. Επίσης, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις, καθώς υπερεκτιμά τις μετρημένες τιμές κατά 50%. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch υποεκτιμούν τις μετρημένες τιμές κατά 7% και 34% αντίστοιχα. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του RMSE για κάθε αλγόριθμο προκύπτει ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα πρόβλεψης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε προς βαθμονόμηση είναι ο Witczak 1-37A.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα δοκίμια των δύο μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης. Ωστόσο, κατά τον υπολογισμό των παραμέτρων G_b^* και δ (που υπεισέρχονται στους αλγόριθμους πρόβλεψης Witczak 1-40D και Hirsch) μέσω των εξισώσεων (2.11 και 2.15) παρατηρήθηκε μία μη αναμενόμενη τάση. Πιο συγκεκριμένα, ενώ οι τιμές του G_b^* αναμένεται να μειώνονται με τη μείωση της συχνότητας φόρτισης (λόγω της ιξώδους φύσης της ασφάλτου) σύμφωνα με τον Πίνακα Π5 του Παραρτήματος παρατηρείται το αντίθετο. Αυτό ενδεχομένως να

οφείλεται στο γεγονός ότι οι παραπάνω σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τους Bari & Witczak (2006) δεν μπορούν να περιγράψουν τη συμπεριφορά της τροποποιημένης ασφάλτου από την οποία αποτελούνται τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης. Επομένως, κατέστη αδύνατη η εκτίμηση του E^* μέσω των αλγορίθμων Witczak 1-40D και Hirsch για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης και περιορίζεται στον αλγόριθμο Witczak 1-37A, ο οποίος και θα βαθμονομηθεί.

4.4 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η διαδικασία βαθμονόμησης βασίζεται στη μη γραμμική βελτιστοποίηση, που μεταβάλλει τους αριθμητικούς συντελεστές του αλγορίθμου, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα του τετραγώνου των σφαλμάτων που παρατηρούνται μεταξύ των μετρημένων (εργαστηριακών) τιμών και των προβλεπόμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (Birgisson et al. 2005, Singh et al. 2010, Robbins & Timm 2011) .

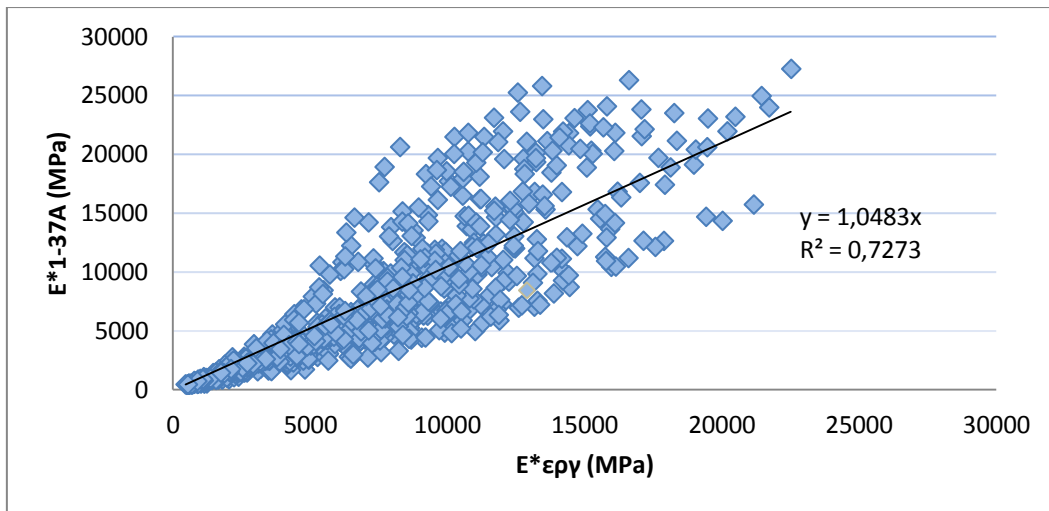
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των δεδομένων και έτσι θα βαθμονομηθεί ο αλγόριθμος Witczak 1-37A για την ισοπεδωτική στρώση, για την αντιολισθηρή στρώση του μίγματος A και για την αντιολισθηρή στρώση του μίγματος B ξεχωριστά.

Για τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν 25 δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης, 9 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος A και 9 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος B. Επίσης, εξαιρέθηκαν κάποια ζεύγη τιμών που παρουσίαζαν μεγάλες αποκλίσεις, οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται σε σφάλματα κατά τη μέτρηση.

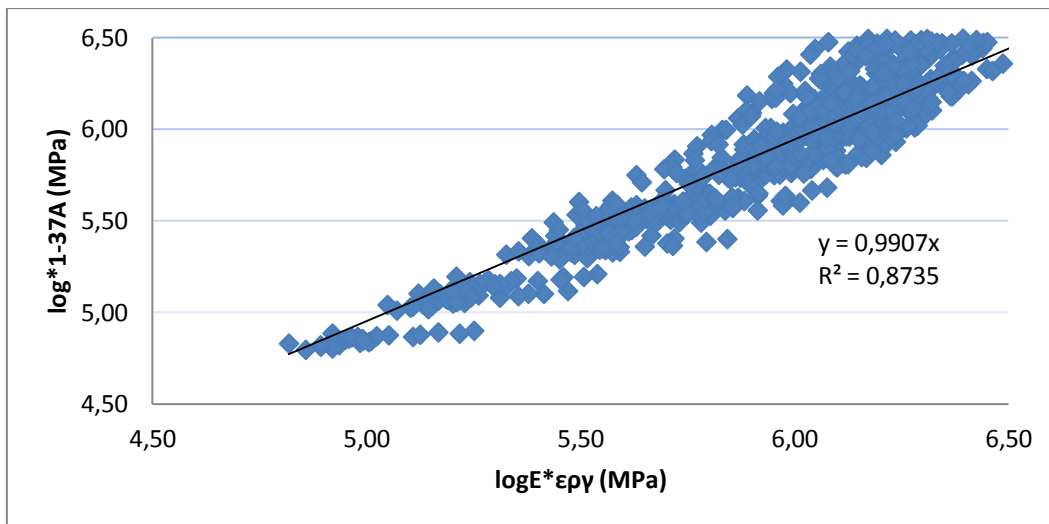
4.4.1 Βαθμονόμηση για την ισοπεδωτική στρώση

Στις εικόνες 4.6 και 4.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{εργ}$ και των τιμών που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου



Εικόνα 4.7 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου

Ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 1,048 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,727. Αντίστοιχα, ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,990 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,873. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και πιο συγκεκριμένα η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων.

Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων για την ισοπεδωτική στρώση

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*lab - \log E^*pred)^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*lab - E^*pred)^2$
Άθροισμα	19,22	7,60E+09

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Μέσω της μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιήθηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταβάλλοντας τους αρχικούς αριθμητικούς συντελεστές της εξίσωσης Witczak 1-37A. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε όταν οι παράμετροι παρέμειναν σταθεροί και δεν υπήρχε δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι αριθμητικοί συντελεστές.

Πίνακας 4.7 Βαθμονόμηση παραμέτρων αλγορίθμου Witczak 1-37A για την ισοπεδωτική στρώση

	Τελικοί	Αρχικοί
β1	3,988141	3,750063
β2	0,618751	0,02932
β3	0,04676	0,001767
β4	0,003643	0,002841
β5	0,124721	0,058097
β6	1,814832	0,802208
β7	4,052223	3,871977
β8	-2,57754	0,0021
β9	-6,83574	0,003958
β10	-0,08787	0,000017
β11	-0,06655	0,00547
β12	0,805043	0,603313
β13	0,531694	0,31335
β14	0,707974	0,393532

Επομένως, ο βαθμονομημένος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log|E^*| = 3.988141 + 0.618751\rho_{200} - 0.04676(\rho_{200})^2 - 0.003643\rho_4 - 0.124721V_a - 1.814832\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{4.052223+2.57754\rho_4-6.83574\rho_{38}+0.08787(\rho_{38})^2-0.06655\rho_{34}}{1+e^{(-0.805043-0.531694 \log(f)-0.707974 \log(n))}} \quad (4.2)$$

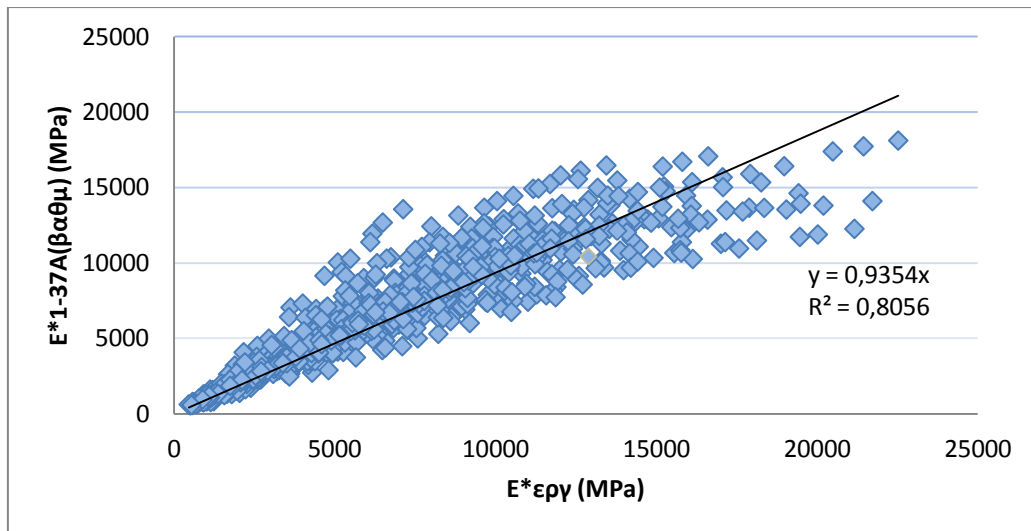
Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μετά την διαδικασία της βαθμονόμησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων μετά τη βαθμονόμηση

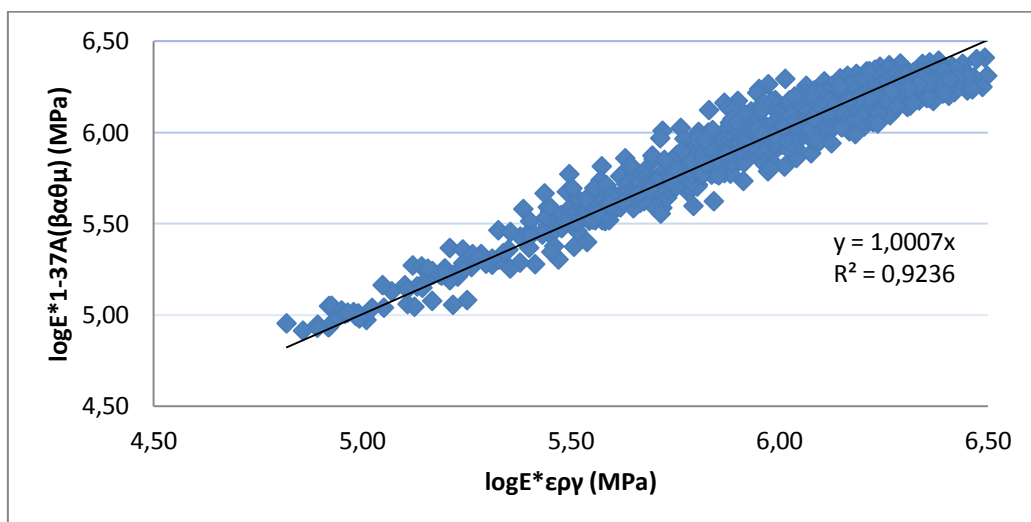
	Σφάλμα Σ(logE*lab-logE*pred)	Σφάλμα Σ(E*lab-E*pred)
Άθροισμα	6,43	2,59E+09

Στις εικόνες 4.8 και 4.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του E*_{εργ} και των τιμών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο (E*_{1-37A-βαθμ}), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) μετά τη βαθμονόμηση του αλγόριθμου



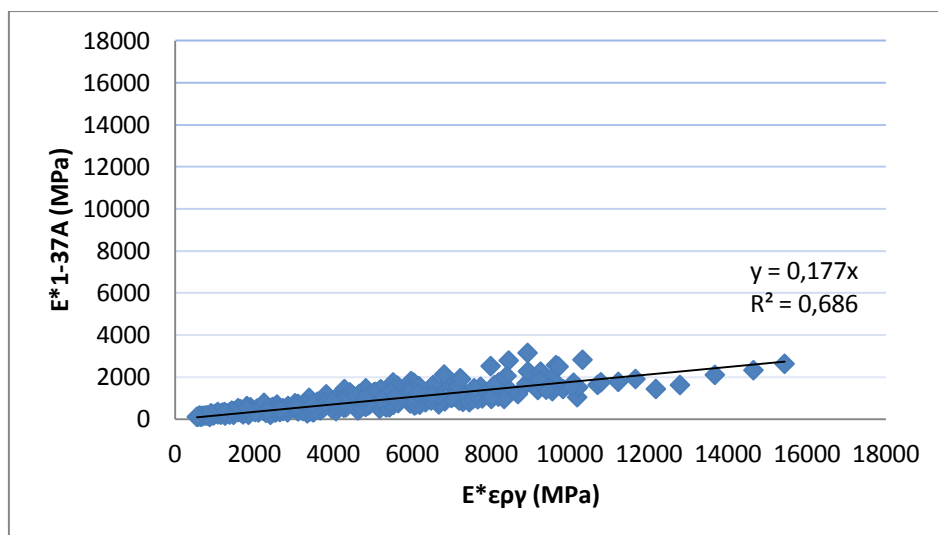
Εικόνα 4.9 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) μετά τη βαθμονόμηση του αλγόριθμου

Ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,935 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,805. Αντίστοιχα, ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 1 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,923.

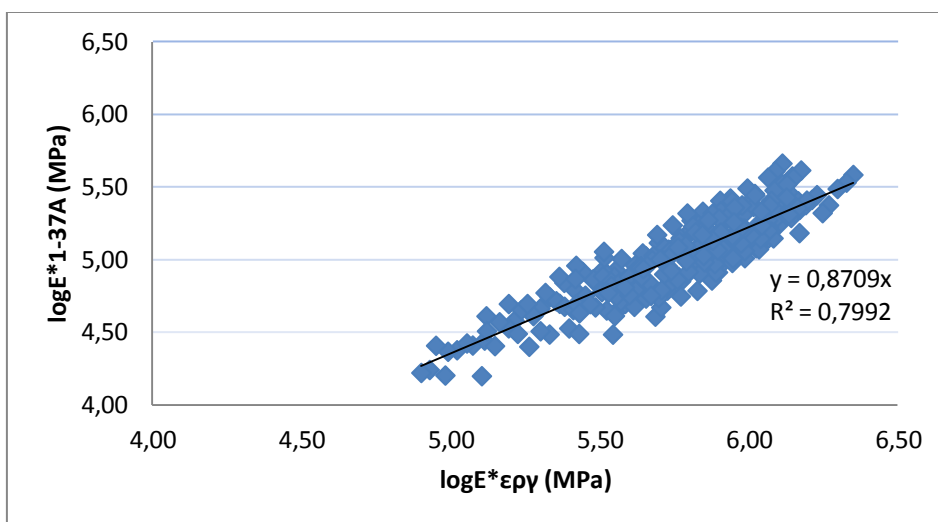
4.4.2 Βαθμονόμηση για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Α

Στις εικόνες 4.10 και 4.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{\text{εργ}}$ και των τιμών που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 4.10 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου



Εικόνα 4.11 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου

Ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,177 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,686. Αντίστοιχα, ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,870 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,799.

. Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων για την αντιολισθηρή στρώση του μίγματος Α

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*_{lab} - \log E^*_{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*_{lab} - E^*_{pred})^2$
Άθροισμα	145,77	5,70E+09

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Μέσω της μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιήθηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταβάλλοντας τους αρχικούς αριθμητικούς συντελεστές της εξίσωσης Witczak 1-37A. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε όταν οι αριθμητικοί συντελεστές παρέμειναν σταθεροί και δεν υπήρχε δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων. Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται οι αριθμητικοί συντελεστές.

Πίνακας 4.14 Βαθμονόμηση αριθμητικών συντελεστών αλγόριθμου Witczak 1-37A για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Α

	Τελικοί	Αρχικοί
β1	3,35667	3,750063
β2	-0,14007	0,02932
β3	-0,05209	0,001767
β4	-0,00112	0,002841
β5	0,016695	0,058097
β6	1,301094	0,802208
β7	4,312403	3,871977
β8	-0,04951	0,0021
β9	-0,19386	0,003958
β10	-0,00197	0,000017
β11	0,00547	0,00547
β12	0,923263	0,603313
β13	0,337982	0,31335
β14	0,687834	0,393532

Επομένως, ο βαθμονομημένος αλγόριθμος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log|E^*| = 3.35667 - 0.14007\rho_{200} + 0.05209(\rho_{200})^2 + 0.00112\rho_4 - 0.016695V_a - 1.301094\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{4.312403+0.04951\rho_4-0.19386\rho_{38}+0.00197(\rho_{38})^2+0.00547\rho_{34}}{1+e^{(-0.923263-0.337982 \log(f)-0.687834 \log(n))}} \quad (4.3)$$

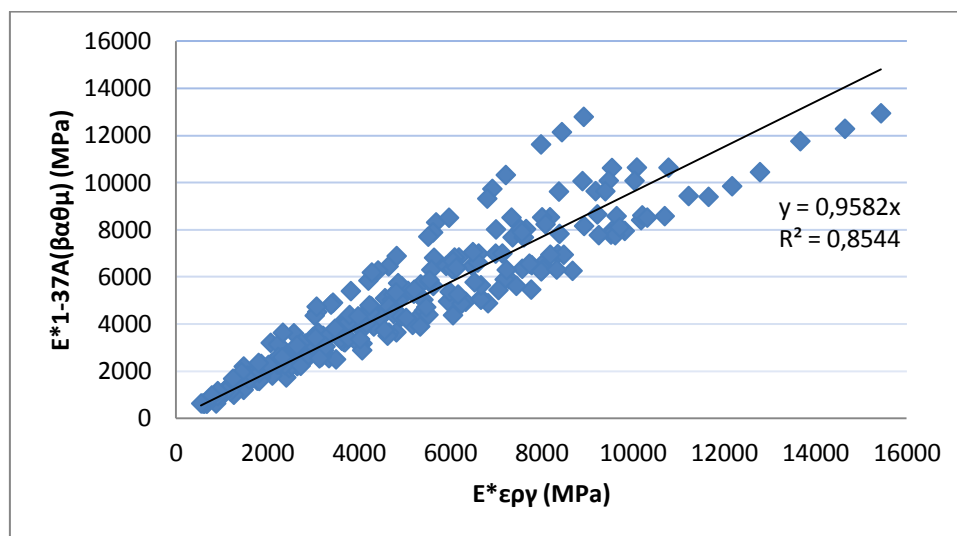
Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μετά την διαδικασία της βαθμονόμησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.15.

Πίνακας 4.15 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων για την αντιολισθηρή στρώση του μίγματος Α μετά τη βαθμονόμηση

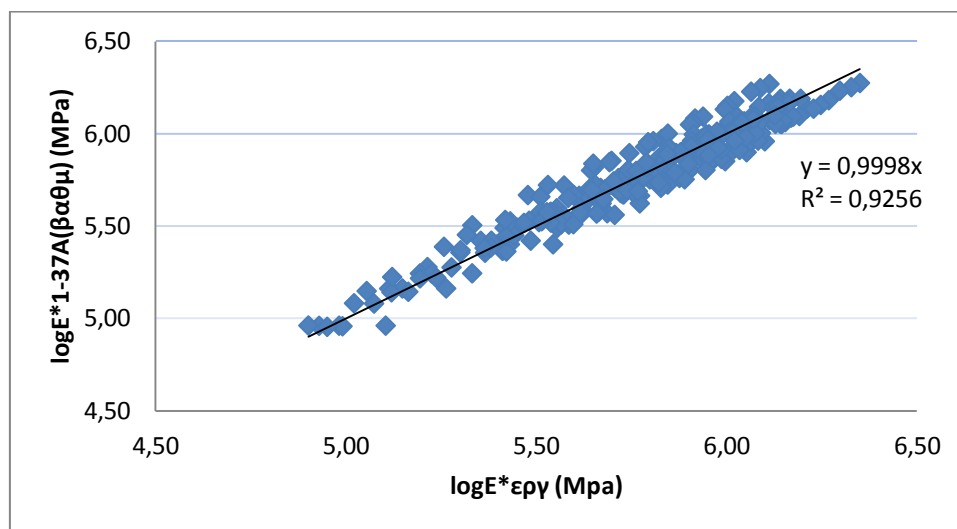
	Σφάλμα $\Sigma(\log E^* _{lab}-\log E^*_{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^* _{lab}-E^*_{pred})^2$
Άθροισμα	1,64	2,99E+08

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Στις Εικόνες 4.12 και 4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{\text{εργ}}$ και των τιμών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο ($E^*_{1-37A-\beta\alpha\theta\mu}$), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.



Εικόνα 4.12 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) μετά την βαθμονόμηση του αλγορίθμου

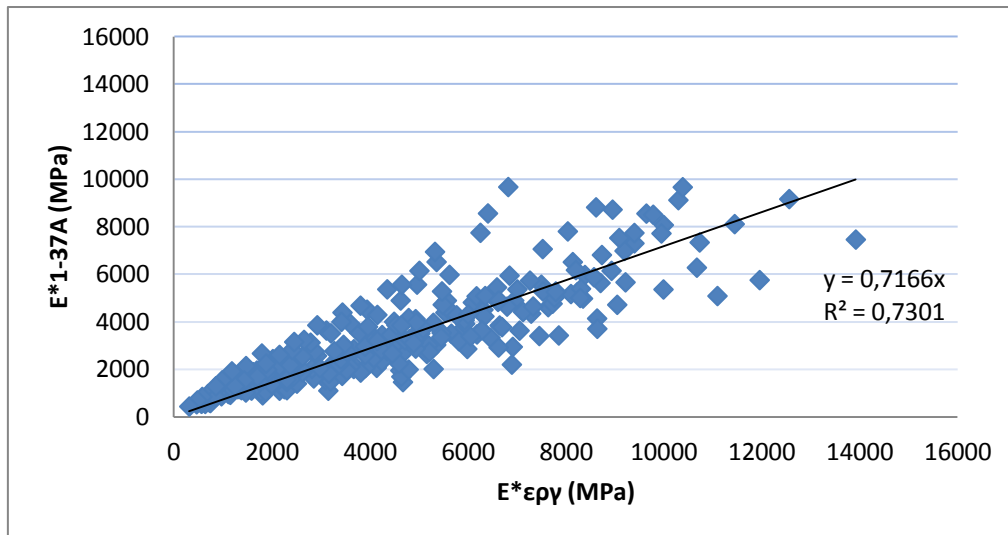


Εικόνα 4.13 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) μετά τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου

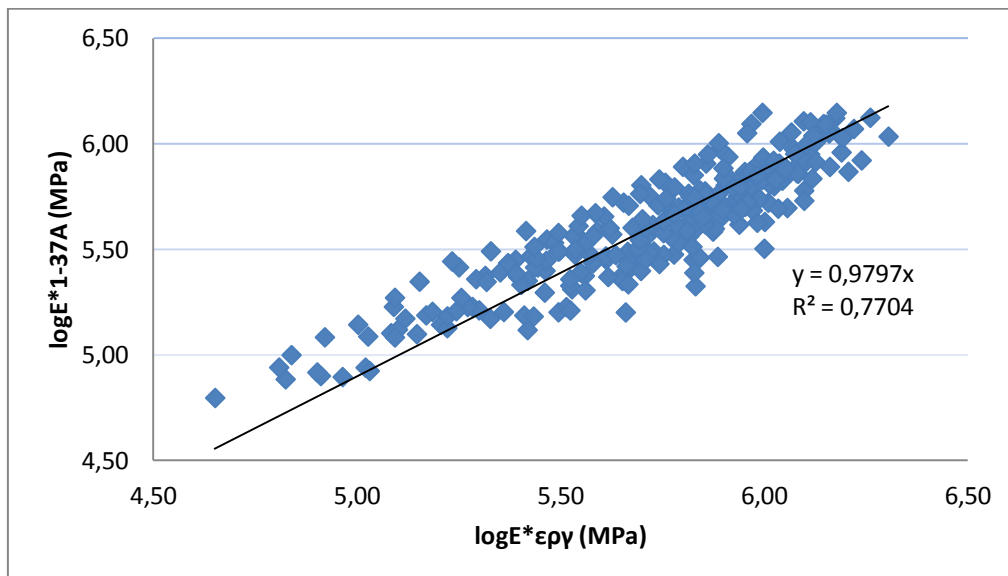
Ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,958 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,854. Αντίστοιχα, ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,999 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,925.

4.4.3 Βαθμονόμηση για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Β

Στις εικόνες 4.14 και 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{\text{εργ}}$ και των τιμών που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.



Εικόνα 4.14 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου



Εικόνα 4.15 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) πριν τη βαθμονόμηση του

Ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,716 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,730. Αντίστοιχα, ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,979 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,770.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.17.

Πίνακας 4.17 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων για την αντιολισθηρή στρώση του μίγματος Β

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^* I_{ab} - \log E^* \text{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^* I_{ab} - E^* \text{pred})^2$
Άθροισμα	8,61	9,13E+08

Μέσω της μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιήθηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταβάλλοντας τους αρχικούς αριθμητικούς συντελεστές της εξίσωσης Witczak 1-37A. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε όταν οι αριθμητικοί συντελεστές παρέμειναν σταθεροί και δεν υπήρχε δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων. Στον Πίνακα 4.18 παρουσιάζονται οι αριθμητικοί συντελεστές.

Πίνακας 4.18 Βαθμονόμηση παραμέτρων αλγόριθμου Witczak 1-37A για την αντιολισθηρή στρώση μίγματος Β

	Τελικοί	Αρχικοί
β_1	3,09293113	3,750063
β_2	-0,41829075	0,02932
β_3	0,58389107	0,001767
β_4	-0,28865171	0,002841
β_5	0,17816966	0,058097
β_6	4,53582899	0,802208
β_7	3,35866304	3,871977
β_8	-0,39044647	0,0021
β_9	-0,65755869	0,003958
β_{10}	0,76407503	0,000017
β_{11}	0,00547	0,00547
β_{12}	0,77117714	0,603313
β_{13}	0,41007985	0,31335
β_{14}	0,87582159	0,393532

Επομένως, ο βαθμονομημένος αλγόριθμος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log|E^*| = 3,09293113 - 0,41829075\rho_{200} - 0,58389107(\rho_{200})^2 + 0,28865171\rho_4 - 0,17816966V_a - 4,53582899\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{3,35866304+0,39044647\rho_4-0,65755869\rho_{38}-0,76407503(\rho_{38})^2+0,00547\rho_{34}}{1+e^{(-0,77117714-0,41007985 \log(f)-0,87582159 \log(\pi))}} \quad (4.4)$$

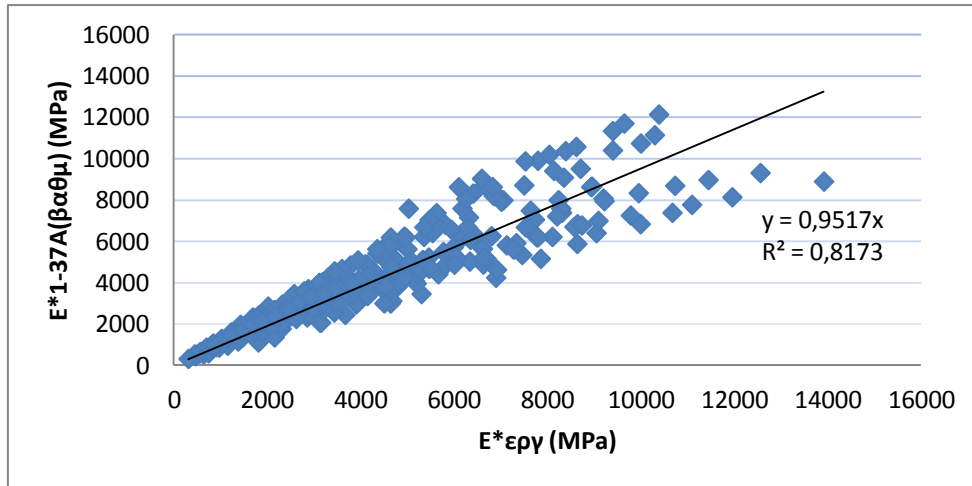
Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων μετά την διαδικασία της βαθμονόμησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.19.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

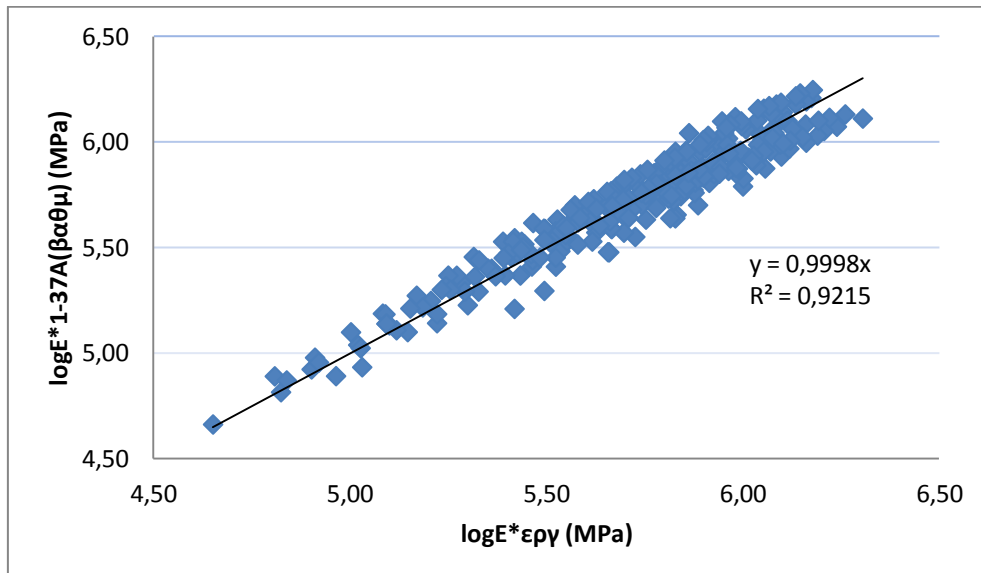
Πίνακας 4.19 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων μετά την βαθμονόμηση

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*_{lab} - \log E^*_{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*_{lab} - E^*_{pred})^2$
Άθροισμα	2,07	3,57E+08

Στις Εικόνες 4.12 και 4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{εργ}$ και των τιμών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο ($E^*_{1-37A-\beta\alpha\theta\mu}$), σε αριθμητική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα.



Εικόνα 4.16 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) μετά τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου



Εικόνα 4.17 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) μετά τη βαθμονόμηση του αλγορίθμου

Ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,951 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,817. Αντίστοιχα, ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,999 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,921.

4.5 Επαλήθευση βαθμονομημένων αλγορίθμων πρόβλεψης

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η επαλήθευση των τριών βαθμονομημένων αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που αναπτύχθηκαν. Με αυτό τον τρόπο αξιολογείται η καλή προσαρμοστικότητα των αλγορίθμων σε ασφαλτομίγματα τα οποία χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για την επαλήθευση των βαθμονομημένων αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν 10 δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης (τύποι Α, Β και Γ), 3 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου Α και 3 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης τύπου Β.

Αρχικά, προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο αλγόριθμο για κάθε μίγμα. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων του βαθμονομημένου αλγορίθμου. Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού E^* και αυτών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο.

4.5.1 Ισοπεδωτική στρώση

Η κοκκομετρική σύνθεση των δοκιμίων παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.1, 3.2, 3.3, η ογκομετρική σύσταση στον Πίνακα 3.8 και το ιξώδες της ασφάλτου στον Πίνακα 3.14.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εκτιμήθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και τις συχνότητες φόρτισης χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο αλγόριθμο (εξίσωση 4.2).

Τα αποτελέσματα του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων φαίνονται στον Πίνακα 4.20.

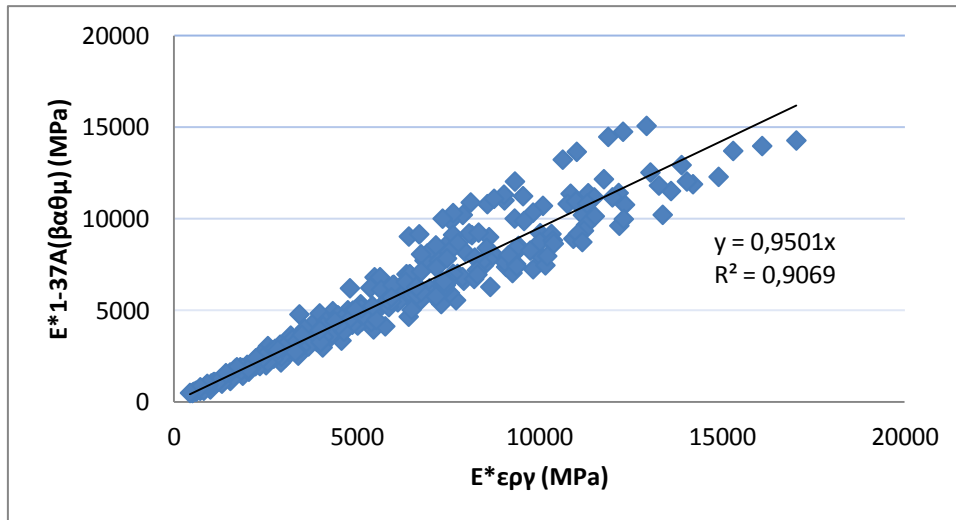
Πίνακας 4.20 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*_{lab} - \log E^*_{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*_{lab} - E^*_{pred})^2$
Άθροισμα	1,26	3,54E+08

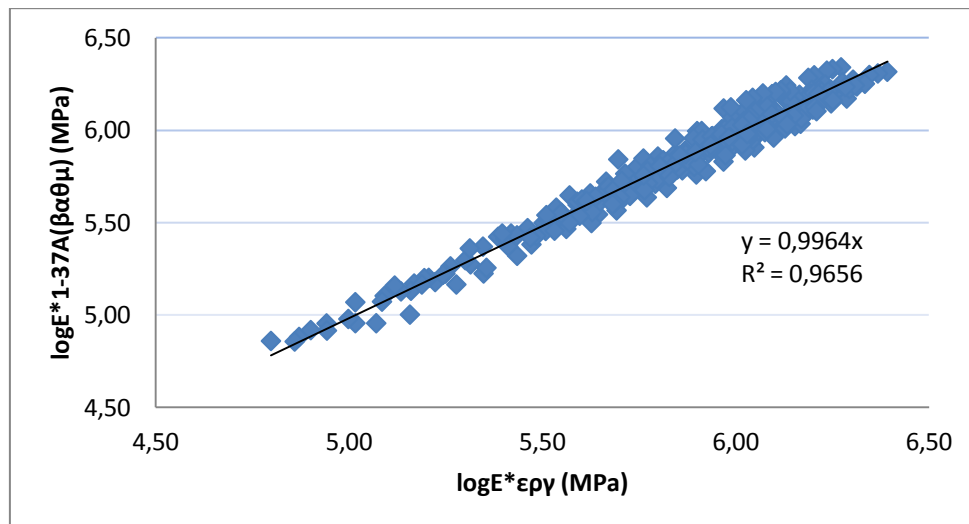
Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων του λογαρίθμου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι 1,26 και υποδεικνύει την καλή προσαρμογή του αλγορίθμου.

Το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{\text{εργ}}$ και των τιμών του E^* του βαθμονομημένου αλγορίθμου είναι:



Εικόνα 4.18 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου ισοπεδωτικής στρώσης



Εικόνα 4.19 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου ισοπεδωτικής στρώσης

Ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,950 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,906. Αντίστοιχα, ο συντελεστής a στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,996 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,965. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συσχέτιση των τιμών είναι άριστη.

4.5.2 Αντιολισθηρή στρώση μίγματος Α

Η κοκκομετρική σύνθεση των δοκιμών παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.4, 3.5, 3.6, η ογκομετρική σύσταση στον Πίνακα 3.9 και το ιξώδες της ασφάλτου στον Πίνακα 3.15.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εκτιμήθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και τις συχνότητες φόρτισης χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο αλγόριθμο (εξίσωση 4.3).

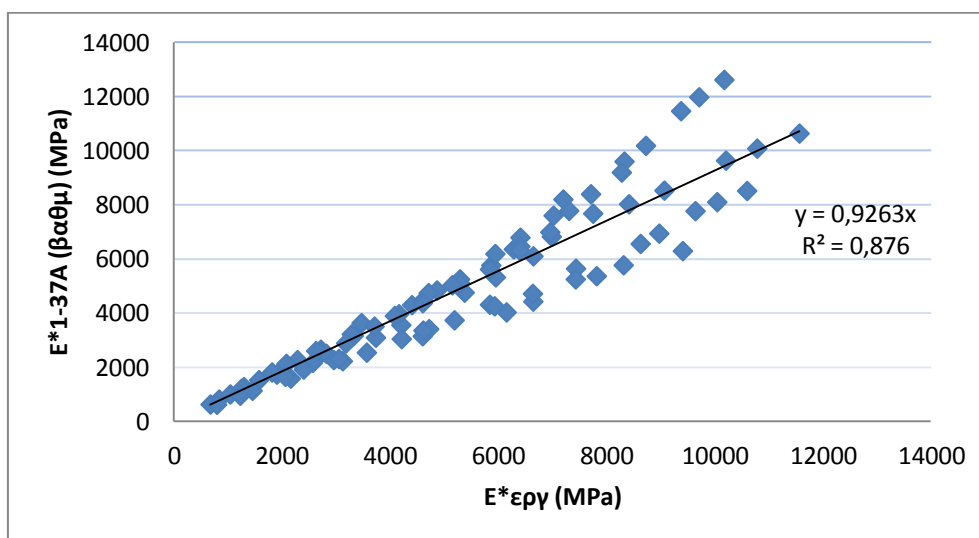
Τα αποτελέσματα του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων φαίνονται στο πίνακα 4.21.

Πίνακας 4.21 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*_{lab} - \log E^*_{pred})^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*_{lab} - E^*_{pred})^2$
Άθροισμα	0,63	1,08E+08

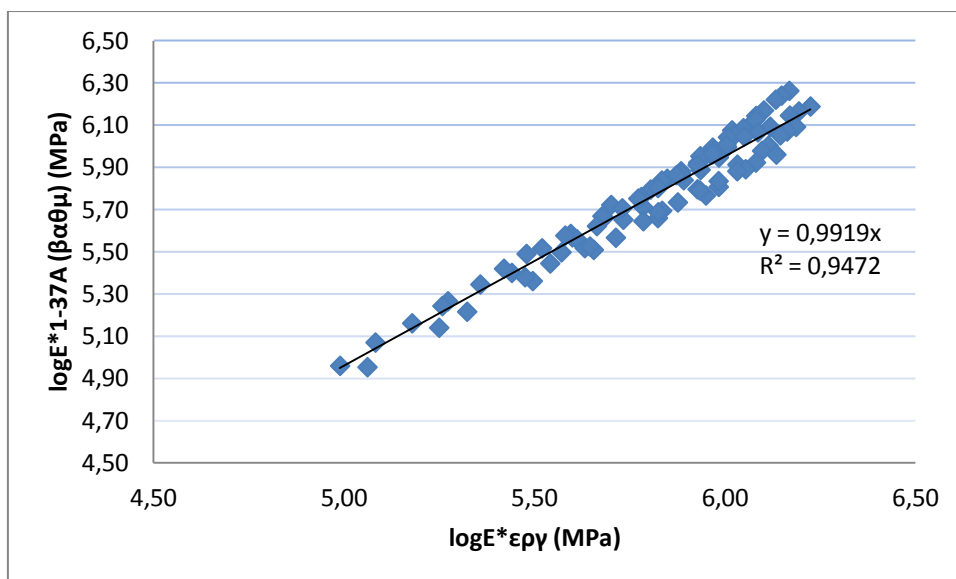
Το τετράγωνο των σφαλμάτων του λογαρίθμου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι 0,63 και υποδεικνύει την καλή προσαρμογή του αλγορίθμου.

Το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{εργ}$ και των τιμών του E^* του βαθμονομημένου αλγορίθμου είναι:



Εικόνα 4.20 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας



Εικόνα 4.21 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου

Ο συντελεστής α της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,926 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,876. Αντίστοιχα, ο συντελεστής α στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,991 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,947. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συσχέτιση των τιμών είναι άριστη.

4.5.3 Αντιολισθηρή στρώση μίγματος Β

Η κοκκομετρική σύνθεση των δοκιμίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.7, η ογκομετρική σύσταση στον Πίνακα 3.9 και το ιξώδες της ασφάλτου στον Πίνακα 3.15.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εκτιμήθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για όλες τις θερμοκρασίες και τις συχνότητες φόρτισης χρησιμοποιώντας το βαθμονομημένο αλγόριθμο (εξίσωση 4.4).

Τα αποτελέσματα του άθροισματος των τετραγώνων των σφαλμάτων φαίνονται στο πίνακα 4.22.

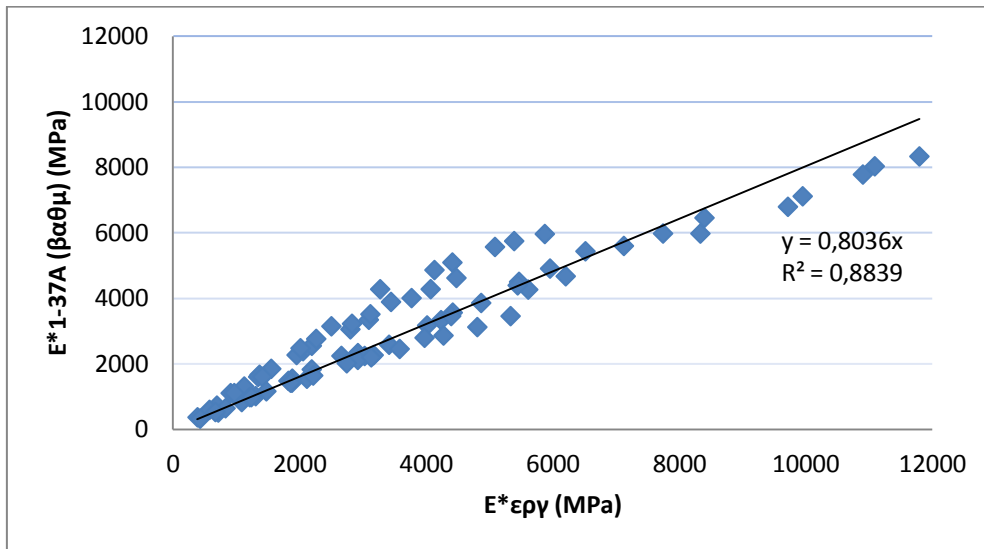
Πίνακας 4.22 Άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων

	Σφάλμα $\Sigma(\log E^*lab - \log E^*pred)^2$	Σφάλμα $\Sigma(E^*lab - E^*pred)^2$
Άθροισμα	0,86	9,74E+07

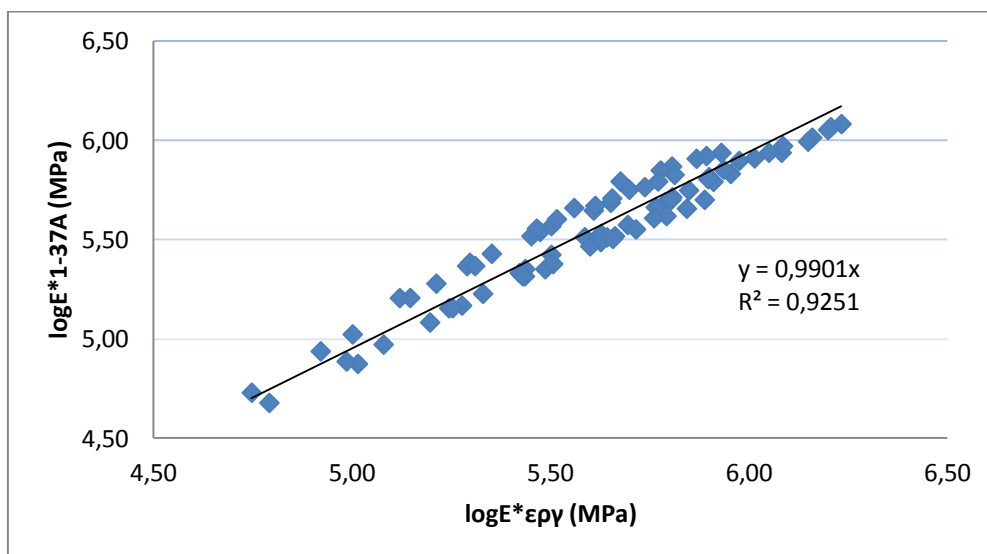
Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων του λογαρίθμου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι 0,86 και υποδεικνύει την καλή προσαρμογή του αλγορίθμου.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το διάγραμμα διασποράς των τιμών του $E^*_{\text{εργ}}$ και των τιμών του E^* του βαθμονομημένου αλγορίθμου είναι:



Εικόνα 4.22 Διάγραμμα διασποράς (αριθμητική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα διασποράς (λογαριθμική κλίμακα) βαθμονομημένου αλγορίθμου

Ο συντελεστής a της εξίσωσης $y = a * x$ στην αριθμητική κλίμακα είναι ίσος με 0,803 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,883. Αντίστοιχα, ο συντελεστής a στη λογαριθμική κλίμακα είναι ίσος με 0,990 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι ίσος με 0,925. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συσχέτιση των τιμών είναι άριστη.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκαν τρεις αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται διεθνώς, με στόχο την εφαρμογή τους σε ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας 60 δοκίμια ασφαλτομίγματος από τα οποία τα 36 ήταν ισοπεδωτικής στρώσης και τα 24 αντιολισθηρής στρώσης. Τα συγκεκριμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές, προκειμένου να προσδιοριστούν τα ογκομετρικά τους χαρακτηριστικά (φαινόμενο ειδικό βάρος, ποσοστό κενών αέρα) και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίστηκε στο εργαστήριο μέσω ειδικής πειραματικής διάταξης σε πέντε θερμοκρασίες (4, 15, 20, 25, 37 °C) και σε έξι συχνότητες (25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 HZ). Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε για κάθε δοκίμιο το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μέσω των αλγορίθμων Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch για τις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης.

Από την επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψε ότι τα δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης δύναται να ομαδοποιηθούν ανεξαρτήτως τύπου (Α, Β ή Γ). Αντιθέτως, όσον αφορά στα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης λόγω των ιδιαίτερα μεγάλων διαφορών ως προς το ποσοστό των κενών, δεν είναι δυνατή η ομαδοποίηση των δύο τύπων και επομένως για την περαιτέρω διερεύνηση θεωρούνται ξεχωριστά.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων πρόβλεψης με τους υπό διερεύνηση αλγόριθμους προέκυψε ότι οι προβλεπόμενες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω των αλγορίθμων Witczak 1-40D και Hirsch για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης δεν ήταν σωστές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας, G_b^* και η γωνία υστέρησης, δ δεν παρουσιάζουν την αναμενόμενη τάση, δηλαδή όταν μειώνεται η συχνότητα φόρτισης και όταν αυξάνεται η θερμοκρασία να μειώνονται οι δύο μεταβλητές. Επομένως, ο μοναδικός αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης είναι ο Witczak 1-37A.

Όσον αφορά στην ισοπεδωτική στρώση, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των σφαλμάτων πρόβλεψης. Από τα σχετικά διαγράμματα διασποράς προκύπτει ότι η συσχέτιση των προβλεπόμενων τιμών μέσω των αλγορίθμων και των μετρημένων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο για την ισοπεδωτική στρώση ήταν οριακά ικανοποιητική.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Επίσης, μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης, προέκυψε ότι οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch υποεκτιμούν το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας για όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Αντίθετα, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D δεν εμφανίζει ενιαία τάση και ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης υποεκτιμά ή υπερεκτιμά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης RMSE, ο οποίος εκφράζει την τυπική απόκλιση των σφαλμάτων που παρατηρούνται μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στο εργαστήριο. Από τη σύγκριση των τιμών του δείκτη RMSE για τους τρεις αλγορίθμους προέκυψε ότι πέραν του ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας της αντιολισθηρής στρώσης, παρουσιάζει και τα μικρότερα σφάλματα πρόβλεψης. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ως ο καταλληλότερος για το σκοπό της έρευνας και βαθμονομήθηκε κατάλληλα για την περαιτέρω καλύτερη προσαρμογή στα υπό διερεύνηση μίγματα.

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του αλγορίθμου Witczak 1-37A, χρησιμοποιήθηκαν 25 δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης, 9 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α και 9 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Β. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν οι υπόψη μετρήσεις επί των δοκιμίων σε 5 θερμοκρασίες και 6 συχνότητες φόρτισης. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων. Η βαθμονόμηση των αριθμητικών συντελεστών του αλγορίθμου 1-37A προσδιορίστηκε μέσω της μη γραμμικής βελτιστοποίησης, η οποία μεταβάλλει τους αριθμητικούς συντελεστές, ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων. Μετά τη βαθμονόμηση των αλγορίθμων ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών του $E^*_{εργ}$ και των τιμών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο $E^*_{1-37A (βαθμ)}$ υποδεικνύει ότι η συσχέτιση είναι πολύ καλή.

Για την επαλήθευση των βαθμονομημένων αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκαν 10 δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης, 3 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α και 3 δοκίμια αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Β. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν οι υπόψη μετρήσεις επί των δοκιμίων σε 5 θερμοκρασίες και 6 συχνότητες φόρτισης. Από τον υπολογισμό του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων προκύπτει η καλή προσαρμοστικότητα του βαθμονομημένου αλγορίθμου. Τέλος, ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών του $E^*_{εργ}$ και των τιμών που προκύπτουν από το βαθμονομημένο αλγόριθμο $E^*_{1-37A (βαθμ)}$ υποδεικνύει ότι η συσχέτιση είναι άριστη.

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση εφαρμοσιμότητας των βαθμονομημένων αλγορίθμων πρόβλεψης, λαμβάνοντας υπόψη μεγαλύτερο στατιστικό δείγμα μέσω της διαφοροποίησης ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως τον τύπο και τα ποσοστά ασφάλτου, τον τύπο και τις ιδιότητες των αδρανών καθώς και το εύρος του ποσοστού κενών αέρα. Τέλος, προτείνεται η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας προσαρμοσμένων στα ελληνικά ασφαλτομίγματα.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO T 342-111, *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2011.

Andrei D., Witczak M.W., Mirza M.W., *Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*, NCHRP 1-37A Interim Team Report, Department of Civil Engineering, University of Maryland, 1999.

Bari J., Witczak M.W., *Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, No. 75, 2006.

Bari J., Witczak M.W., *New Predictive Models for the Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders for use with the Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2001, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.

Birgisson B., Sholar G. Roque R., *Evaluation of a Predicted Dynamic Modulus for Florida Mixtures*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1929, Transportation Research Board of the National Academies, pp.193-199, Washington, D.C., 2005.

Chehab R. G., O'Quinn E., Kim Y.R., *Specimen Geometry Study for Direct Tension Test Based on Mechanical Tests and Air Void Variation in Asphalt Concrete Specimens Compacted by Superpave Gyrotory Comactor*, Transportation Research Record 1723, Paper No. 00-1324, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, 2007.

Christensen D.W., Anderson D.A., *Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cement*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 61, pp 67-116, 1992.

Christensen D.W., Pellinen T., Bonaquist R., *Hirsch Model for Estimating the Modulus of 5 Asphalt Concrete*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies, vol. 72, pp. 97-121, 2003.

Cross S.A., *Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures*, The Oklahoma Department of Transportation, 2007

Dongre R., Myers L., D'Angelo J, Paugh C. and Gudimettla J., Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists from the Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 74, 2005.

Dougan C.E., Stephens J.E., Mahoney J., Hansen G., E*-Dynamic Modulus Test Protocol-Problems and Solutions, University of Connecticut, Department of Transportation, In Cooperation with U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2003.

EN 12697-31, Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 31: Specimen Preparation by Gyrotory Compactor, European Standard, 2007.

EN 12697-8, Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 8: Determination of Voids Characteristics of Bituminous Specimens, European Standard, 2003.

EN 12697-26, Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 26: Stiffness, European Standard, 2004.

EN 12697-5:2002+A1, Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 5: Determination of the Maximum Density, European Standard, 2007.

EN 12697-6:2003+A1, Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens, European Standard, 2007.

Garcia G., Thompson M., HMA Dynamic Modulus Predictive Models-A Review, No. 07-005, Illinois Center for Transportation, Illinois, 2007.

Λοΐζος Α., Ειδικά θέματα οδοστρωμάτων, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.

Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., Οδοστρώματα, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.

NCHRP, Design Guide: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP Study Report 1-37A, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington D.C., 2004

ΠΤΠ Α265, Ασφαλικό Σκυρόδεμα, Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές, 1964.

ΠΤΠ Α200, Άσφαλτος Οδοστρώσεως, Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές, 1964.

Pellinen T.K., Witczak M.W., Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 71, pp. 281-309, 2002.

Robbins M.M, Timm D.H, *Evaluation of Dynamic Modulus Predictive Equations for NCAT Test Track Asphalt Mixtures*, TRB 90th Annual Meeting Compendium of papers, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.

Schwartz C.W., *Evaluation of the Witczak Dynamic Modulus Predictive Model*, 84th Annual Meeting Compendium of papers CD-ROM, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.

Singh D., Zaman M., Commuri S., *Evaluation of Predictive Models for Estimating Dynamic Modulus of HMA Mixes used in Oklahoma*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2210, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.

Sotil A., Kaloush E. K., Witczak M.W., Reduced Confined Dynamic Modulus Testing Protocol for Asphalt Mixtures, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1891, Transportation Research Council, Washington, D.C., 2004.

Witczak M.W., Fonseca O.A., Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures, Transportation Research No. 1540, Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, 1996.

Yoder E.J., Witczak M.W., *Principles of Pavement Design*, John Wiley & Sons, Inc., Second edition, USA, 1975.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

www.trb.com

www.fhwa.dot.gov

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας Π1: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^*_{lab} (MPa)

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	22529	21450	20493	18981	17924	15929	ΙΣ_A_I_1
15	19428	17890	16596	13876	13168	9900	
20	15972	14453	13277	10197	9059	6572	
25	13376	11894	11009	8218	7097	4803	
37	4000	3540	3192	2385	2037	1230	
4	16616	15811	15202	13787	13178	11763	ΙΣ_A_I_2
15	16104	14734	13778	11462	10804	8048	
20	14230	12891	11995	9698	8678	6400	
25	12594	11282	10151	7579	6477	4292	
37	4831	4170	3614	2219	1791	1138	
4	13448	12649	12024	11172	10556	8841	ΙΣ_A_I_3
15	10700	9803	8988	7496	6836	5065	
20	8661	7808	7310	5752	5176	3773	
25	7178	6340	5538	4270	3719	2473	
37	3323	2870	2470	1546	1260	777	
4	12931	12286	11881	11018	10635	9327	ΙΣ_A_I_4
15	11762	10851	10093	8619	7960	6199	
20	11187	10018	9446	7320	6627	4705	
25	8736	7754	6986	5145	4508	3039	
37	3794	3480	2871	1877	1537	991	
4	8170	7671	7349	6565	6285	5309	ΙΣ_A_II_1
15	7125	6490	6169	5091	4677	3619	
20	6103	5483	5211	4001	3573	2587	
25	5900	5247	4660	3445	2946	1920	
37	2163	1887	1678	1118	911	574	
4	12564	11695	11336	10047	9647	8002	ΙΣ_A_II_2
15	10887	9930	9227	8031	7297	5375	
20	9508	8582	7781	5999	5290	3609	
25	7342	6378	5905	4372	3716	2446	
37	2569	2238	2069	1329	1073	657	
4	21726	20202	19049	16201	15470	12466	ΙΣ_A_II_3
15	15798	14168	13275	11218	9935	6987	
20	12236	10961	9758	7379	6368	4026	
25	9694	8315	7304	5091	4237	2636	
37	3867	2870	2272	1376	1123	706	
4	21334	19616	18317	15663	14201	10770	ΙΣ_A_II_4
15	14684	13371	12184	9968	9085	6441	
20	10327	9399	8422	6072	5135	3190	
25	9825	8653	7715	5458	4580	2923	
37	3904	2939	2346	1422	1152	716	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	40060	37712	35860	31810	30217	25799	ΙΣ_A_III_1
15	33896	30238	28119	22697	20406	13543	
20	16474	14393	12853	9472	7931	4977	
25	11376	10177	8929	6310	5327	3267	
37	3018	2667	2402	1831	1458	925	
4	17029	16094	15301	13888	13035	11333	ΙΣ_A_III_2
15	13600	12340	11512	9424	8618	6300	
20	11270	10007	9141	6991	6121	4012	
25	9054	7927	7069	5022	4275	2598	
37	3620	2691	2258	1378	1108	687	
4	14630	13637	12762	11185	10626	8487	ΙΣ_A_III_3
15	11310	10210	9552	7794	7050	5086	
20	9050	8066	7413	5698	5155	3240	
25	7091	6316	5747	4097	3459	2074	
37	3111	2296	1898	1184	934	571	
4	12166	11499	10995	9824	9320	8149	ΙΣ_A_III_4
15	8073	7472	6927	5484	4811	3428	
20	6851	6358	5754	4341	3831	2565	
25	5789	5114	4498	3193	2685	1676	
37	2861	2198	1749	1080	852	512	
4	17066	16117	15242	14171	13573	11317	ΙΣ_B_I_1
15	14352	13170	12194	10140	9275	7083	
20	12035	10806	9959	7596	6771	4689	
25	9974	8629	7710	5657	4745	3081	
37	2864	2534	2284	1732	1413	885	
4	18264	17078	15294	13470	12433	9537	ΙΣ_B_I_2
15	13256	12031	11091	9242	8341	5982	
20	9250	8072	7309	5685	4885	3283	
25	7297	6201	5515	3944	3360	2175	
37	3079	2418	1944	1201	957	582	
4	10253	9648	9213	8361	7944	6744	ΙΣ_B_I_3
15	8426	7667	7311	6097	5533	4203	
20	6846	6068	5554	4488	4024	2962	
25	6460	5590	5080	3785	3251	2112	
37	3065	2363	1920	1204	981	595	
4	14902	14033	13268	11996	11305	9577	ΙΣ_B_I_4
15	12306	11216	10365	8477	7892	5701	
20	9380	8408	7637	5912	5165	3447	
25	7482	6526	5877	4317	3618	2341	
37	3148	2445	1998	1262	1016	603	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	13491	12888	12066	11220	10766	9256	ΙΣ_B_II_1
15	10964	9913	9340	7590	6879	5057	
20	8585	7695	7207	5498	4785	3375	
25	6920	6171	5569	4108	3587	2339	
37	3183	2512	2030	1268	1015	615	
4	17184	16078	15077	13539	12777	10388	ΙΣ_B_II_2
15	12410	11257	10439	8553	7735	5624	
20	9881	8858	8026	6290	5444	3736	
25	8793	7669	6824	4868	4152	2592	
37	3493	2683	2173	1367	1098	666	
4	19468	18131	17011	15562	14915	11610	ΙΣ_B_II_3
15	13983	12527	10910	8947	7794	5576	
20	10332	9127	8389	6318	5420	3654	
25	8202	7260	6182	4398	3712	2261	
37	3111	2391	1943	1191	961	574	
4	9550	9041	8572	7900	7574	6423	ΙΣ_B_II_4
15	7633	7164	6757	5635	5368	3983	
20	7247	6442	6010	4753	4158	2902	
25	5662	5105	4480	3234	2761	1810	
37	2940	2254	1876	1224	997	604	
4	27151	25051	23890	21166	20027	15747	ΙΣ_B_III_1
15	17578	16136	14208	11796	10551	7347	
20	11755	10308	9126	6792	5778	3737	
25	9749	8632	7537	5263	4382	2695	
37	2482	2184	1958	1463	1168	697	
4	11846	11047	10562	9286	8763	7317	ΙΣ_B_III_2
15	8532	7928	7422	6053	5427	3922	
20	7500	6751	6133	4563	4016	2670	
25	6316	5589	4933	3547	3016	1948	
37	2775	2192	1747	1088	873	539	
4	10751	9969	9404	8354	7869	6233	ΙΣ_B_III_3
15	8437	7817	7337	5882	5259	3827	
20	7322	6483	6118	4642	4058	2776	
25	6669	6007	5315	3795	3263	1950	
37	2857	2115	1650	1022	811	497	
4	14117	13132	12335	10926	10391	8228	ΙΣ_B_III_4
15	11015	10160	9260	7547	6641	4875	
20	8212	7375	6758	5394	4648	3028	
25	7309	6419	5777	4064	3395	2044	
37	2935	2225	1779	1064	839	499	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15109	14430	13826	12747	12393	10898	ΙΣ_Γ_Ι_1
15	12432	11461	10787	9362	8867	6986	
20	9986	8983	8377	6832	6083	4517	
25	9059	8224	7356	5681	4945	3476	
37	3312	2929	2640	1989	1647	1014	
4	15191	14421	13234	12281	11768	9580	ΙΣ_Γ_Ι_2
15	11488	10648	9812	8235	7516	5596	
20	10432	9303	8583	6637	5898	4138	
25	8514	7577	6776	4929	4251	2690	
37	3601	2786	2316	1501	1208	728	
4	10758	10243	9612	8947	8567	7302	ΙΣ_Γ_Ι_3
15	9089	8313	7811	6719	6107	4731	
20	8020	7262	6566	5375	4823	3434	
25	7063	6364	5625	4275	3755	2494	
37	3744	2824	2256	1413	1134	674	
4	9027	8757	8116	7635	7347	6708	ΙΣ_Γ_Ι_4
15	8332	7765	7523	6460	5983	4890	
20	7468	6760	6341	5118	4601	3329	
25	6677	5949	5443	4090	3677	2516	
37	3468	2724	2345	1564	1307	811	
4	19493	18359	17688	16331	15748	13297	ΙΣ_Γ_ΙΙ_1
15	17144	15778	14421	12711	11576	8603	
20	13114	11919	10508	8373	7248	4925	
25	11869	10492	9197	6565	5654	3584	
37	3341	2937	2631	1958	1560	920	
4	14213	13225	12798	11745	11047	9175	ΙΣ_Γ_ΙΙ_2
15	11071	10049	9386	7787	6917	5206	
20	9161	8165	7417	5686	5016	3418	
25	7726	6851	6143	4491	3870	2416	
37	3508	2711	2182	1350	1068	626	
4	8273	7708	7507	6610	6313	5340	ΙΣ_Γ_ΙΙ_3
15	6272	5711	5322	4417	4082	2945	
20	5457	4771	4408	3421	3032	2133	
25	4583	4034	3656	2653	2250	1462	
37	2373	1903	1562	990	771	454	
4	15571	14325	13511	11881	11051	8555	ΙΣ_Γ_ΙΙ_4
15	11669	10210	9361	7439	6638	4832	
20	8282	7468	6758	5179	4507	2997	
25	7166	6498	5531	4010	3352	2104	
37	3313	2563	2031	1207	940	549	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15682	14840	13981	12971	12271	10395	ΙΣ_Γ_III_1
15	12414	11231	10416	8451	7622	5485	
20	9768	8578	7786	5859	5122	3499	
25	8195	7126	6220	4507	3881	2462	
37	2200	1939	1742	1305	1056	637	
4	14084	13221	12814	11702	11190	9536	ΙΣ_Γ_III_2
15	10473	9569	8738	7098	6500	4721	
20	8605	7557	6831	5492	4884	3340	
25	6701	5921	5201	3787	3238	2072	
37	3172	2533	2066	1365	1118	679	
4	11284	10587	10120	9303	8692	7379	ΙΣ_Γ_III_3
15	9013	8355	7447	6210	5547	4226	
20	7035	6267	5723	4517	3906	2721	
25	5748	5149	4590	3379	2911	1864	
37	2704	2111	1741	1087	884	538	
4	12882	11928	11171	9747	9162	7179	ΙΣ_Γ_III_4
15	9378	8300	7385	5839	5124	3573	
20	6628	5946	5428	4079	3498	2370	
25	4957	4398	3986	2837	2436	1531	
37	2234	1717	1416	905	716	433	
4	15434	14645	13667	12783	12173	10180	ANT_A_I_1
15	11221	10206	9552	8007	7287	5424	
20	9522	8355	7578	5951	5359	3673	
25	8679	7775	6829	4823	4080	2532	
37	3109	2467	2086	1376	1128	723	
4	19128	17760	16307	14645	13849	10428	ANT_A_I_2
15	11657	10697	9822	7785	7192	5429	
20	9614	8487	8026	6339	5524	3695	
25	7994	7058	6250	4658	3997	2651	
37	3628	2858	2431	1598	1304	816	
4	8925	8446	7990	7217	6923	5692	ANT_A_I_3
15	6812	5974	5626	4651	4209	3087	
20	5520	4827	4421	3434	3034	2071	
25	4285	3825	3391	2578	2233	1479	
37	1936	1551	1329	875	726	468	
4	10175	9710	9375	8726	8328	7198	ANT_A_I_4
15	8279	7709	7305	6281	5865	4595	
20	7018	6404	5940	4863	4399	3322	
25	6644	5949	5372	4201	3731	2567	
37	3285	2714	2282	1571	1292	833	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	9542	8897	8381	7343	7003	5647	ANT_A_II_1
15	4622	4223	3966	3345	3075	2337	
20	5587	4937	4574	3580	3215	2297	
25	4726	4160	3684	2867	2562	1719	
37	2235	1798	1557	1078	895	586	
4	10088	9472	9184	8185	7663	6192	ANT_A_II_2
15	7366	6622	5912	4757	4272	3112	
20	8332	7449	6676	5178	4629	3345	
25	6673	6062	5344	4073	3500	2411	
37	3179	2476	2106	1478	1263	876	
4	10780	10036	9397	8013	7541	6096	ANT_A_II_3
15	7614	6995	6481	5299	4704	3433	
20	6098	5630	4927	3967	3512	2447	
25	5415	4889	4327	3234	2845	1857	
37	2376	1948	1660	1156	969	661	
4	11565	10783	10206	9067	8413	6984	ANT_A_II_4
15	7749	6956	6403	5288	4708	3466	
20	6392	5840	5290	4160	3706	2741	
25	5145	4599	4082	3179	2817	1901	
37	2625	2077	1813	1249	1040	673	
4	9644	8932	8394	7143	6604	5354	ANT_A_III_1
15	6045	5542	5075	4137	3706	2823	
20	5205	4663	4288	3300	2997	2214	
25	4478	4065	3600	2839	2529	1776	
37	2258	1907	1655	1190	1005	675	
4	10315	9711	9254	8192	7735	6673	ANT_A_III_2
15	7238	6535	5989	4762	4166	2978	
20	6174	5474	4930	3770	3268	2380	
25	5036	4563	4027	3137	2726	1818	
37	2249	1815	1594	1078	907	615	
4	9222	8087	7571	6498	6063	4859	ANT_A_III_3
15	6137	5547	5214	4252	3778	2737	
20	4813	4233	3798	3008	2642	1861	
25	3985	3478	3048	2324	2022	1378	
37	1805	1432	1246	911	781	549	
4	10596	10044	9641	8972	8628	7432	ANT_A_III_4
15	9408	8313	7815	6642	6148	4597	
20	7426	6635	5840	4716	4209	2955	
25	5928	5186	4609	3564	3120	2157	
37	3049	2397	2059	1450	1225	794	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	10297	9999	9399	8708	8349	7054	ANT_B_I_1
15	8933	8235	7638	6459	5986	4619	
20	13305	12062	10485	8220	6897	4673	
25	8637	7855	6915	5299	4639	3148	
37	4503	3668	3126	2152	1807	1189	
4	10386	9644	9399	8389	7794	6647	ANT_B_I_2
15	8141	7499	6944	5809	5351	4136	
20	7009	6316	5943	4705	4241	3091	
25	5538	4998	4553	3691	3244	2251	
37	2680	2161	1915	1324	1107	723	
4	8617	8039	7526	6593	6099	5026	ANT_B_I_3
15	6849	6176	5632	4715	4352	3291	
20	5569	4931	4502	3542	3183	2323	
25	4493	4097	3670	2819	2498	1773	
37	2016	1690	1423	1019	835	561	
4	11797	11092	10904	9952	9719	8335	ANT_B_I_4
15	8400	7745	7125	6206	5613	4236	
20	6518	5958	5468	4420	4015	2921	
25	5446	4870	4395	3414	3027	2114	
37	2660	2191	1883	1305	1084	713	
4	16254	15044	13921	11957	11095	8641	ANT_B_II_1
15	10675	9993	9048	7457	6626	4788	
20	8104	7291	6696	5160	4591	3194	
25	6336	5661	5193	3904	3432	2302	
37	2917	2364	2000	1374	1147	740	
4	8953	9952	9198	8308	7728	6184	ANT_B_II_2
15	8574	7766	7125	5815	5211	3808	
20	6614	5933	5462	4078	3597	2507	
25	5294	4805	4228	3187	2851	1870	
37	2463	2010	1712	1148	966	635	
4	12561	11447	10732	9217	8292	6285	ANT_B_II_3
15	8204	7533	6799	5455	4932	3526	
20	6352	5768	5086	3899	3371	2300	
25	4789	4248	3898	2814	2438	1580	
37	2342	1839	1548	1055	868	550	
4	5876	5391	5088	4415	4131	3273	ANT_B_II_4
15	4478	4071	3769	3093	2802	2053	
20	3444	3118	2827	2192	1951	1366	
25	2502	2262	2013	1551	1343	909	
37	1408	1124	966	692	575	385	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$\frac{f}{T}$	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	9783	9090	8735	7795	7332	6053	ANT_B_III_1
15	7267	6631	6006	4892	4456	3161	
20	5484	4946	4426	3404	2977	1991	
25	4539	4146	3529	2619	2300	1464	
37	2099	1618	1351	905	733	460	
4	6823	6408	6255	5624	5470	4641	ANT_B_III_2
15	5359	4960	4626	3780	3460	2574	
20	4351	3939	3596	2875	2510	1809	
25	3437	3110	2786	2146	1884	1288	
37	1791	1468	1226	848	693	443	
4	5327	5009	4650	4149	3958	3271	ANT_B_III_3
15	3806	3415	3202	2622	2369	1744	
20	2923	2653	2411	1900	1696	1208	
25	2452	2152	1878	1433	1242	853	
37	1179	981	853	574	475	309	
4	12956	11851	11031	9390	8616	6458	ANT_B_III_4
15	7476	6776	6084	4794	4201	2919	
20	5334	4809	4274	3170	2744	1822	
25	3975	3581	3132	2214	1878	1210	
37	1856	1473	1236	828	668	426	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας Π2: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^*_{1-37A} (MPa)

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	27383	25079	23319	19251	17540	13760	ΙΣ_A_I_1
15	14755	12707	11250	8230	7101	4892	
20	10479	8766	7590	5270	4448	2918	
25	7246	5899	5004	3319	2750	1738	
37	2849	2204	1804	1113	900	545	
4	26420	24197	22499	18574	16923	13277	ΙΣ_A_I_2
15	14237	12260	10854	7941	6851	4720	
20	10111	8458	7323	5085	4291	2815	
25	6991	5691	4828	3203	2654	1676	
37	2748	2127	1740	1074	868	526	
4	25918	23737	22071	18221	16602	13024	ΙΣ_A_I_3
15	13966	12027	10648	7790	6721	4630	
20	9918	8297	7184	4988	4210	2762	
25	6858	5583	4736	3142	2603	1645	
37	2696	2086	1707	1054	852	516	
4	24767	22682	21090	17412	15864	12446	ΙΣ_A_I_4
15	13345	11492	10175	7444	6423	4425	
20	9478	7929	6865	4767	4023	2639	
25	6553	5335	4525	3002	2488	1571	
37	2576	1993	1631	1007	814	493	
4	26498	24268	22565	18629	16973	13315	ΙΣ_A_II_1
15	14278	12296	10886	7964	6872	4734	
20	10140	8483	7344	5100	4304	2824	
25	7011	5708	4842	3212	2661	1681	
37	2756	2133	1745	1077	871	528	
4	25362	23228	21597	17830	16245	12745	ΙΣ_A_II_2
15	13666	11769	10419	7623	6577	4531	
20	9706	8119	7030	4881	4119	2703	
25	6711	5463	4634	3074	2547	1609	
37	2638	2041	1671	1031	833	505	
4	24095	22067	20519	16940	15434	12108	ΙΣ_A_II_3
15	12984	11181	9899	7242	6248	4305	
20	9221	7714	6678	4638	3914	2568	
25	6376	5190	4403	2921	2420	1529	
37	2506	1939	1587	980	792	480	
4	23616	21629	20111	16603	15127	11868	ΙΣ_A_II_4
15	12726	10959	9702	7098	6124	4219	
20	9038	7560	6546	4545	3836	2517	
25	6249	5087	4315	2863	2372	1499	
37	2457	1901	1556	960	776	470	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	25858	23682	22020	18179	16563	12994	ΙΣ_A_III_1
15	13933	11999	10623	7772	6706	4620	
20	9895	8278	7167	4977	4200	2755	
25	6842	5570	4725	3135	2597	1641	
37	2690	2081	1703	1051	850	515	
4	24423	22367	20798	17170	15644	12273	ΙΣ_A_III_2
15	13160	11333	10034	7341	6333	4363	
20	9346	7818	6769	4701	3967	2602	
25	6462	5261	4463	2961	2453	1550	
37	2541	1966	1609	993	802	486	
4	23180	21229	19739	16296	14847	11648	ΙΣ_A_III_3
15	12490	10756	9523	6967	6011	4141	
20	8870	7420	6425	4461	3765	2470	
25	6133	4993	4235	2810	2328	1471	
37	2411	1866	1527	943	762	462	
4	21800	19965	18564	15326	13964	10955	ΙΣ_A_III_4
15	11747	10116	8956	6552	5653	3895	
20	8342	6979	6042	4196	3541	2323	
25	5768	4696	3983	2643	2190	1383	
37	2268	1755	1436	886	716	434	
4	23921	21936	20419	16906	15425	12145	ΙΣ_B_I_1
15	13010	11228	9959	7321	6330	4385	
20	9287	7790	6759	4719	3993	2636	
25	6457	5273	4484	2993	2487	1582	
37	2574	2000	1641	1021	827	505	
4	23612	21653	20155	16688	15226	11988	ΙΣ_B_I_2
15	12842	11083	9831	7226	6248	4329	
20	9167	7689	6672	4658	3941	2602	
25	6374	5205	4426	2954	2455	1562	
37	2541	1974	1620	1007	817	499	
4	21578	19789	18420	15251	13915	10956	ΙΣ_B_I_3
15	11736	10129	8984	6604	5710	3956	
20	8378	7027	6097	4257	3602	2378	
25	5825	4757	4045	2700	2243	1427	
37	2322	1804	1481	921	746	456	
4	21060	19313	17978	14885	13581	10693	ΙΣ_B_I_4
15	11454	9886	8769	6445	5573	3861	
20	8177	6858	5951	4155	3515	2321	
25	5685	4642	3948	2635	2190	1393	
37	2267	1761	1445	899	728	445	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	23085	21170	19706	16315	14886	11721	ΙΣ_B_II_1
15	12555	10836	9611	7065	6109	4232	
20	8962	7518	6523	4554	3853	2544	
25	6231	5089	4327	2888	2400	1527	
37	2484	1930	1584	985	798	488	
4	22235	20390	18980	15715	14338	11289	ΙΣ_B_II_2
15	12093	10437	9257	6805	5884	4076	
20	8632	7241	6283	4387	3711	2450	
25	6002	4901	4168	2782	2312	1470	
37	2393	1859	1526	949	769	470	
4	20702	18984	17671	14631	13349	10511	ΙΣ_B_II_3
15	11259	9717	8619	6336	5478	3795	
20	8037	6742	5849	4084	3456	2281	
25	5588	4563	3881	2590	2152	1369	
37	2228	1731	1420	883	716	437	
4	20263	18583	17297	14321	13067	10288	ΙΣ_B_II_4
15	11021	9512	8437	6201	5362	3715	
20	7867	6599	5726	3998	3382	2233	
25	5470	4467	3798	2535	2107	1340	
37	2181	1694	1390	865	701	428	
4	22407	20549	19127	15836	14449	11377	ΙΣ_B_III_1
15	12187	10518	9329	6858	5930	4108	
20	8699	7297	6331	4421	3740	2469	
25	6049	4939	4200	2804	2330	1482	
37	2411	1873	1537	956	775	473	
4	21145	19391	18050	14944	13635	10736	ΙΣ_B_III_2
15	11500	9925	8804	6471	5596	3877	
20	8209	6886	5975	4172	3529	2330	
25	5708	4661	3964	2646	2198	1398	
37	2276	1768	1451	902	731	447	
4	20344	18657	17366	14378	13119	10329	ΙΣ_B_III_3
15	11065	9550	8470	6226	5384	3730	
20	7898	6625	5748	4014	3396	2242	
25	5492	4484	3813	2546	2115	1345	
37	2189	1701	1396	868	704	430	
4	19039	17460	16252	13456	12277	9667	ΙΣ_B_III_4
15	10355	8937	7927	5827	5038	3491	
20	7392	6200	5380	3756	3178	2098	
25	5139	4197	3569	2382	1979	1259	
37	2049	1592	1306	812	658	402	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	23861	21911	20418	16955	15492	12244	ΙΣ_Γ_Ι_1
15	13101	11333	10071	7439	6447	4492	
20	9401	7908	6876	4828	4096	2722	
25	6574	5385	4591	3084	2570	1646	
37	2659	2073	1707	1069	870	535	
4	22728	20871	19449	16151	14757	11663	ΙΣ_Γ_Ι_2
15	12479	10796	9593	7086	6141	4279	
20	8955	7532	6550	4599	3901	2592	
25	6262	5130	4373	2938	2448	1568	
37	2533	1975	1626	1019	828	510	
4	21927	20135	18764	15581	14237	11251	ΙΣ_Γ_Ι_3
15	12039	10415	9255	6836	5924	4128	
20	8640	7267	6319	4437	3764	2501	
25	6041	4949	4219	2834	2362	1513	
37	2443	1905	1569	983	799	492	
4	20608	18924	17635	14644	13380	10575	ΙΣ_Γ_Ι_4
15	11315	9788	8698	6424	5568	3879	
20	8120	6830	5939	4170	3537	2351	
25	5678	4651	3965	2664	2220	1422	
37	2296	1791	1474	924	751	462	
4	23147	21256	19808	16448	15029	11878	ΙΣ_Γ_ΙΙ_1
15	12709	10994	9770	7216	6254	4358	
20	9120	7671	6671	4684	3973	2640	
25	6377	5224	4454	2992	2493	1597	
37	2579	2011	1656	1037	844	519	
4	22033	20232	18854	15656	14305	11306	ΙΣ_Γ_ΙΙ_2
15	12098	10465	9300	6869	5953	4148	
20	8681	7302	6350	4458	3782	2513	
25	6070	4973	4239	2848	2373	1520	
37	2455	1915	1576	987	803	494	
4	20716	19024	17728	14721	13451	10630	ΙΣ_Γ_ΙΙ_3
15	11375	9840	8744	6458	5597	3900	
20	8163	6866	5970	4192	3556	2363	
25	5708	4676	3986	2678	2231	1429	
37	2308	1800	1482	928	755	465	
4	19873	18249	17006	14122	12903	10197	ΙΣ_Γ_ΙΙ_4
15	10912	9439	8388	6195	5369	3741	
20	7830	6586	5727	4021	3411	2267	
25	5475	4485	3824	2569	2140	1371	
37	2214	1727	1422	891	724	446	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	22395	20565	19164	15914	14540	11492	ΙΣ_Γ_III_1
15	12296	10637	9453	6982	6051	4216	
20	8824	7422	6454	4532	3844	2554	
25	6170	5054	4309	2895	2412	1545	
37	2495	1946	1602	1004	816	502	
4	21536	19776	18429	15303	13983	11051	ΙΣ_Γ_III_2
15	11825	10229	9090	6714	5819	4054	
20	8485	7137	6206	4358	3697	2456	
25	5933	4861	4144	2784	2320	1486	
37	2400	1871	1541	965	785	483	
4	20265	18609	17341	14400	13158	10399	ΙΣ_Γ_III_3
15	11127	9625	8554	6318	5475	3815	
20	7985	6716	5840	4101	3478	2312	
25	5583	4574	3899	2619	2183	1398	
37	2258	1761	1450	908	739	455	
4	18686	17159	15990	13278	12132	9588	ΙΣ_Γ_III_4
15	10260	8875	7887	5825	5049	3518	
20	7363	6193	5385	3781	3207	2131	
25	5148	4217	3595	2415	2013	1289	
37	2082	1624	1337	837	681	419	
4	2645	2342	2120	1636	1446	1055	ANT_A_I_1
15	1781	1521	1338	966	829	565	
20	1465	1232	1070	751	637	423	
25	1197	991	852	582	489	318	
37	725	581	488	317	261	164	
4	2851	2524	2284	1763	1558	1136	ANT_A_I_2
15	1919	1639	1442	1041	893	609	
20	1579	1327	1154	809	686	456	
25	1290	1068	918	627	526	342	
37	782	627	526	342	281	176	
4	3167	2804	2537	1959	1731	1262	ANT_A_I_3
15	2132	1821	1602	1156	992	676	
20	1754	1474	1281	899	762	506	
25	1433	1186	1019	697	585	380	
37	868	696	584	380	313	196	
4	3582	3172	2870	2216	1959	1428	ANT_A_I_4
15	2412	2060	1812	1308	1122	765	
20	1984	1668	1450	1017	862	573	
25	1622	1342	1153	788	662	430	
37	982	787	661	429	354	222	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	1922	1702	1541	1190	1052	768	ANT_A_II_1
15	1295	1107	974	703	604	412	
20	1066	896	779	547	464	309	
25	872	722	620	424	356	232	
37	529	424	356	231	191	120	
4	1743	1544	1397	1079	954	696	ANT_A_II_2
15	1175	1003	883	638	547	373	
20	967	813	707	496	421	280	
25	790	654	563	385	323	210	
37	479	384	323	210	173	108	
4	1762	1560	1412	1091	964	704	ANT_A_II_3
15	1187	1014	893	645	553	377	
20	977	822	714	501	425	283	
25	799	662	569	389	327	212	
37	485	388	326	212	175	110	
4	1595	1413	1279	988	873	637	ANT_A_II_4
15	1075	918	808	584	501	342	
20	885	744	647	454	385	256	
25	723	599	515	352	296	192	
37	439	352	295	192	158	99	
4	2583	2287	2069	1598	1412	1030	ANT_A_III_1
15	1739	1485	1307	943	809	551	
20	1431	1203	1045	733	622	413	
25	1169	968	832	568	477	310	
37	708	568	476	310	255	160	
4	2839	2514	2275	1756	1552	1132	ANT_A_III_2
15	1912	1633	1436	1036	889	606	
20	1573	1322	1149	806	684	454	
25	1285	1064	914	625	524	341	
37	779	624	524	340	280	176	
4	1846	1635	1479	1142	1009	736	ANT_A_III_3
15	1243	1062	934	674	578	394	
20	1023	860	747	524	444	295	
25	836	692	594	406	341	222	
37	506	406	341	221	182	114	
4	2870	2541	2299	1775	1569	1144	ANT_A_III_4
15	1932	1650	1452	1048	899	613	
20	1590	1336	1161	815	691	459	
25	1299	1075	924	632	530	345	
37	787	631	529	344	283	178	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	9155	8106	7336	5663	5005	3650	ANT_B_I_1
15	6164	5264	4631	3342	2868	1955	
20	5072	4263	3705	2599	2204	1464	
25	4144	3430	2947	2015	1691	1099	
37	2511	2012	1689	1098	904	566	
4	9702	8590	7774	6002	5305	3868	ANT_B_I_2
15	6532	5579	4908	3542	3039	2072	
20	5375	4517	3926	2754	2336	1552	
25	4392	3635	3124	2135	1792	1165	
37	2661	2133	1790	1163	958	600	
4	8851	7837	7093	5476	4839	3529	ANT_B_I_3
15	5960	5090	4478	3231	2773	1890	
20	4903	4121	3582	2513	2131	1416	
25	4007	3317	2850	1948	1635	1063	
37	2428	1946	1633	1061	874	548	
4	7742	6855	6204	4789	4233	3087	ANT_B_I_4
15	5213	4452	3917	2826	2425	1653	
20	4289	3605	3133	2198	1864	1238	
25	3505	2901	2493	1704	1430	930	
37	2123	1702	1428	928	764	479	
4	9352	8280	7494	5785	5113	3728	ANT_B_II_1
15	6297	5377	4731	3414	2929	1997	
20	5181	4354	3785	2655	2251	1496	
25	4233	3504	3011	2058	1727	1123	
37	2565	2056	1725	1121	923	579	
4	8754	7751	7015	5415	4786	3490	ANT_B_II_2
15	5894	5033	4429	3196	2742	1869	
20	4849	4076	3543	2485	2108	1400	
25	3963	3280	2818	1927	1617	1051	
37	2401	1924	1615	1049	864	542	
4	9200	8146	7372	5691	5030	3668	ANT_B_II_3
15	6194	5290	4654	3358	2882	1964	
20	5097	4284	3723	2612	2215	1472	
25	4165	3447	2962	2025	1699	1105	
37	2523	2022	1697	1103	908	569	
4	7078	6266	5671	4378	3870	2822	ANT_B_II_4
15	4765	4070	3581	2584	2217	1511	
20	3921	3295	2864	2009	1704	1132	
25	3204	2652	2279	1558	1307	850	
37	1941	1556	1305	849	699	438	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	8538	7560	6842	5282	4668	3404	ANT_B_III_1
15	5749	4909	4320	3117	2675	1823	
20	4730	3975	3455	2424	2056	1366	
25	3865	3199	2749	1879	1577	1025	
37	2342	1877	1575	1024	843	528	
4	9710	8597	7780	6007	5309	3871	ANT_B_III_2
15	6537	5583	4912	3544	3042	2073	
20	5379	4521	3929	2756	2338	1553	
25	4395	3638	3126	2137	1793	1166	
37	2663	2134	1791	1164	958	601	
4	6970	6171	5585	4312	3811	2779	ANT_B_III_3
15	4693	4008	3526	2544	2183	1488	
20	3861	3245	2821	1979	1678	1115	
25	3155	2612	2244	1534	1287	837	
37	1912	1532	1286	836	688	431	
4	7103	6289	5692	4394	3884	2832	ANT_B_III_4
15	4783	4084	3594	2593	2225	1517	
20	3935	3307	2875	2017	1710	1136	
25	3215	2662	2287	1563	1312	853	
37	1948	1561	1310	852	701	440	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας Π3: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^*_{1-40D} (Μρα)

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	37089	31731	29640	25548	22888	13841	ΙΣ_A_I_1
15	23847	19017	16032	9358	6663	2204	
20	17325	13013	10314	5006	3291	1013	
25	11907	8386	6259	2635	1670	569	
37	4312	2697	1847	724	495	255	
4	34456	29501	27566	23778	21314	12921	ΙΣ_A_I_2
15	22202	17725	14955	8752	6242	2076	
20	16155	12152	9642	4697	3093	958	
25	11123	7847	5865	2479	1575	539	
37	4048	2538	1741	686	470	243	
4	33569	28744	26860	23171	20772	12596	ΙΣ_A_I_3
15	21637	17276	14578	8534	6088	2026	
20	15747	11847	9401	4582	3018	936	
25	10844	7652	5721	2420	1538	527	
37	3949	2477	1700	670	459	237	
4	31774	27209	25427	21937	19667	11929	ΙΣ_A_I_4
15	20485	16358	13805	8084	5768	1921	
20	14911	11219	8904	4341	2861	887	
25	10271	7248	5420	2294	1458	499	
37	3742	2348	1611	635	435	225	
4	36928	31568	29479	25393	22738	13717	ΙΣ_A_II_1
15	23694	18874	15898	9256	6580	2165	
20	17187	12891	10206	4937	3238	992	
25	11790	8289	6178	2590	1638	555	
37	4249	2652	1813	708	483	248	
4	34189	29245	27317	23545	21093	12750	ΙΣ_A_II_2
15	21976	17521	14769	8617	6134	2027	
20	15961	11986	9498	4608	3028	932	
25	10966	7721	5761	2424	1536	522	
37	3968	2481	1699	666	455	234	
4	32080	27444	25636	22100	19800	11974	ΙΣ_A_II_3
15	20628	16449	13868	8095	5764	1907	
20	14986	11256	8921	4331	2847	877	
25	10299	7253	5414	2279	1445	492	
37	3730	2333	1598	627	428	221	
4	31413	26872	25102	21639	19387	11723	ΙΣ_A_II_4
15	20197	16105	13577	7924	5642	1866	
20	14671	11019	8733	4239	2786	858	
25	10082	7100	5299	2231	1414	481	
37	3650	2283	1564	613	419	216	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	37198	31772	29660	25531	22849	13748	ΙΣ_A_III_1
15	23814	18947	15945	9258	6570	2149	
20	17244	12916	10213	4922	3222	981	
25	11806	8286	6167	2574	1624	547	
37	4233	2635	1798	698	476	243	
4	34010	29065	27139	23375	20928	12616	ΙΣ_A_III_2
15	21808	17365	14624	8507	6045	1986	
20	15810	11854	9381	4534	2972	909	
25	10839	7617	5675	2376	1502	508	
37	3901	2433	1662	648	442	227	
4	31997	27345	25534	21995	19693	11873	ΙΣ_A_III_3
15	20520	16340	13761	8007	5690	1870	
20	14878	11155	8829	4268	2798	856	
25	10201	7169	5342	2237	1415	478	
37	3672	2291	1565	610	416	213	
4	30037	25665	23964	20641	18480	11136	ΙΣ_A_III_4
15	19256	15330	12908	7507	5333	1751	
20	13956	10462	8278	3999	2621	801	
25	9566	6721	5006	2095	1324	447	
37	3440	2145	1465	571	389	199	
4	43648	37180	34669	29772	26595	15866	ΙΣ_B_I_1
15	27736	21981	18446	10612	7488	2405	
20	19975	14888	11726	5583	3629	1083	
25	13589	9480	7021	2888	1809	598	
37	4789	2958	2005	767	519	262	
4	42473	36189	33749	28990	25902	15467	ΙΣ_B_I_2
15	27011	21416	17977	10353	7310	2352	
20	19464	14515	11438	5453	3547	1061	
25	13251	9251	6854	2824	1770	586	
37	4678	2893	1962	751	509	258	
4	38023	32402	30221	25967	23205	13866	ΙΣ_B_I_3
15	24196	19189	16111	9285	6559	2114	
20	17442	13012	10256	4894	3186	954	
25	11879	8297	6150	2537	1591	528	
37	4200	2598	1764	676	458	232	
4	37044	31566	29441	25296	22605	13506	ΙΣ_B_I_4
15	23570	18692	15693	9043	6388	2058	
20	16990	12674	9989	4766	3102	929	
25	11570	8081	5990	2470	1549	514	
37	4090	2530	1717	658	446	226	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	43396	36933	34428	29545	26379	15697	ΙΣ_B_II_1
15	27514	21780	18261	10478	7381	2357	
20	19782	14723	11583	5495	3564	1057	
25	13432	9354	6917	2833	1770	582	
37	4709	2902	1964	747	504	254	
4	41177	35052	32678	28051	25048	14917	ΙΣ_B_II_2
15	26125	20687	17349	9962	7021	2246	
20	18792	13992	11011	5229	3394	1009	
25	12766	8896	6581	2699	1688	555	
37	4483	2765	1872	713	482	243	
4	37923	32282	30096	25837	23073	13742	ΙΣ_B_II_3
15	24064	19055	15981	9178	6469	2070	
20	17310	12889	10144	4818	3128	930	
25	11760	8195	6063	2487	1555	512	
37	4130	2548	1725	657	444	224	
4	37055	31542	29406	25245	22544	13425	ΙΣ_B_II_4
15	23511	18617	15613	8966	6319	2022	
20	16911	12591	9910	4707	3055	908	
25	11489	8005	5923	2430	1519	500	
37	4034	2488	1685	642	434	218	
4	43440	36940	34422	29521	26342	15635	ΙΣ_B_III_1
15	27481	21728	18202	10415	7324	2326	
20	19725	14659	11519	5445	3524	1039	
25	13367	9293	6862	2798	1745	570	
37	4663	2867	1936	733	494	248	
4	40187	34181	31857	27329	24392	14491	ΙΣ_B_III_2
15	25444	20125	16864	9659	6796	2163	
20	18273	13586	10680	5055	3274	968	
25	12391	8620	6368	2601	1623	531	
37	4330	2664	1801	683	460	231	
4	38472	32722	30496	26163	23351	13873	ΙΣ_B_III_3
15	24358	19266	16144	9247	6506	2071	
20	17493	13006	10224	4839	3135	926	
25	11862	8252	6096	2490	1554	509	
37	4145	2551	1724	654	441	221	
4	36064	30665	28577	24513	21876	12986	ΙΣ_B_III_4
15	22819	18042	15114	8650	6083	1933	
20	16379	12172	9566	4523	2928	864	
25	11100	7717	5699	2325	1450	474	
37	3873	2382	1609	609	410	206	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	38159	32661	30513	26308	23575	14274	ΙΣ_Γ_Ι_1
15	24561	19598	16529	9660	6884	2283	
20	17859	13424	10645	5176	3406	1052	
25	12285	8659	6467	2728	1732	591	
37	4460	2793	1914	752	515	266	
4	35397	30311	28324	24432	21901	13280	ΙΣ_Γ_Ι_2
15	22814	18216	15371	8998	6419	2136	
20	16603	12491	9912	4830	3182	986	
25	11434	8068	6031	2551	1621	555	
37	4164	2611	1792	706	484	250	
4	33872	29006	27105	23384	20963	12715	ΙΣ_Γ_Ι_3
15	21836	17437	14715	8616	6147	2047	
20	15894	11959	9491	4627	3049	945	
25	10947	7726	5776	2444	1554	532	
37	3989	2502	1717	677	464	240	
4	31747	27182	25400	21912	19642	11909	ΙΣ_Γ_Ι_4
15	20459	16334	13782	8067	5754	1914	
20	14888	11199	8886	4330	2852	884	
25	10251	7232	5406	2286	1453	497	
37	3732	2340	1606	633	433	224	
4	38560	32968	30787	26521	23750	14332	ΙΣ_Γ_ΙΙ_1
15	24748	19717	16611	9674	6879	2265	
20	17956	13471	10667	5162	3387	1038	
25	12321	8665	6459	2710	1714	581	
37	4443	2774	1897	741	506	260	
4	35697	30534	28521	24581	22020	13309	ΙΣ_Γ_ΙΙ_2
15	22942	18291	15418	8994	6402	2115	
20	16662	12512	9914	4809	3160	972	
25	11447	8059	6013	2529	1603	545	
37	4141	2589	1772	694	475	244	
4	33269	28457	26581	22911	20525	12406	ΙΣ_Γ_ΙΙ_3
15	21384	17048	14370	8384	5968	1972	
20	15530	11662	9241	4483	2946	906	
25	10669	7512	5605	2358	1494	508	
37	3860	2414	1653	647	442	228	
4	31877	27263	25465	21948	19661	11880	ΙΣ_Γ_ΙΙ_4
15	20484	16328	13762	8026	5712	1886	
20	14873	11166	8847	4290	2818	866	
25	10215	7190	5364	2256	1429	485	
37	3694	2309	1580	619	423	217	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$\frac{f}{T}$	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	38264	32691	30520	26276	23519	14162	ΙΣ_Γ_III_1
15	24511	19509	16423	9542	6775	2220	
20	17758	13306	10525	5078	3326	1014	
25	12165	8542	6360	2658	1679	566	
37	4368	2721	1858	723	492	252	
4	36158	30900	28852	24847	22245	13407	ΙΣ_Γ_III_2
15	23181	18457	15543	9039	6422	2109	
20	16804	12598	9969	4816	3157	965	
25	11519	8094	6029	2524	1595	539	
37	4144	2584	1765	688	469	240	
4	33656	28763	26857	23133	20711	12485	ΙΣ_Γ_III_3
15	21582	17185	14472	8419	5982	1965	
20	15646	11731	9284	4487	2942	899	
25	10727	7538	5616	2352	1487	502	
37	3860	2408	1645	641	437	224	
4	31118	26583	24819	21374	19132	11522	ΙΣ_Γ_III_4
15	19937	15868	13358	7763	5513	1807	
20	14444	10823	8562	4132	2707	826	
25	9895	6949	5174	2163	1366	461	
37	3554	2215	1512	588	401	205	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας Π4: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^*_{Hirsch} (MPa)

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	16016	14071	13705	13300	12537	8367	ΙΣ_A_I_1
15	12452	10178	8778	5325	3789	1163	
20	9312	7079	5664	2732	1752	489	
25	6399	4496	3342	1342	817	289	
37	2151	1304	868	342	266	224	
4	15039	13102	12741	12343	11597	7599	ΙΣ_A_I_2
15	11513	9318	7987	4773	3375	1030	
20	8493	6394	5084	2424	1550	443	
25	5763	4017	2971	1188	727	273	
37	1905	1154	771	318	255	221	
4	14730	12798	12440	12044	11304	7366	ΙΣ_A_I_3
15	11221	9054	7746	4609	3252	992	
20	8243	6187	4911	2334	1491	430	
25	5571	3874	2862	1143	701	269	
37	1833	1111	743	311	251	220	
4	14080	12165	11812	11423	10698	6891	ΙΣ_A_I_4
15	10617	8512	7255	4277	3008	915	
20	7731	5769	4562	2153	1375	403	
25	5185	3588	2644	1055	650	260	
37	1690	1025	688	297	245	217	
4	15646	13716	13355	12954	12201	8104	ΙΣ_A_II_1
15	12116	9879	8506	5140	3651	1119	
20	9029	6847	5469	2630	1685	473	
25	6184	4336	3219	1291	787	282	
37	2070	1254	835	333	261	222	
4	14723	12805	12449	12056	11319	7391	ΙΣ_A_II_2
15	11237	9077	7771	4632	3271	998	
20	8268	6213	4935	2348	1501	431	
25	5596	3895	2879	1151	705	268	
37	1845	1118	748	311	250	218	
4	14018	12119	11768	11382	10662	6875	ΙΣ_A_II_3
15	10581	8489	7237	4271	3004	914	
20	7712	5757	4555	2151	1374	402	
25	5176	3583	2641	1054	649	259	
37	1689	1024	687	296	243	215	
4	15313	13438	13086	12697	11963	7965	ΙΣ_A_II_4
15	11881	9700	8359	5061	3599	1103	
20	8870	6735	5384	2594	1662	465	
25	6086	4272	3173	1274	776	276	
37	2042	1237	823	326	255	215	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15395	13482	13124	12727	11982	7940	ΙΣ_A_III_1
15	11898	9689	8336	5028	3569	1093	
20	8852	6704	5351	2570	1646	463	
25	6053	4240	3145	1261	769	278	
37	2022	1225	816	327	257	219	
4	14389	12493	12141	11754	11028	7176	ΙΣ_A_III_2
15	10947	8826	7547	4485	3164	964	
20	8032	6025	4780	2269	1450	419	
25	5424	3769	2784	1112	682	263	
37	1783	1080	723	304	246	215	
4	13744	11868	11522	11142	10432	6712	ΙΣ_A_III_3
15	10353	8295	7067	4163	2926	890	
20	7532	5617	4440	2094	1337	393	
25	5048	3491	2572	1026	632	254	
37	1644	997	670	290	239	213	
4	13161	11308	10968	10595	9901	6306	ΙΣ_A_III_4
15	9823	7827	6646	3885	2722	828	
20	7092	5262	4146	1945	1241	372	
25	4721	3252	2391	953	590	247	
37	1526	926	625	279	234	210	
4	15544	13599	13235	12833	12077	7986	ΙΣ_B_I_1
15	11992	9754	8386	5049	3581	1096	
20	8907	6738	5374	2577	1650	466	
25	6081	4256	3155	1264	771	281	
37	2027	1228	819	330	260	223	
4	15196	13254	12892	12492	11742	7713	ΙΣ_B_I_2
15	11658	9448	8105	4854	3435	1049	
20	8616	6495	5169	2468	1579	450	
25	5856	4086	3024	1210	740	276	
37	1940	1176	785	322	257	222	
4	13881	11971	11620	11233	10513	6746	ΙΣ_B_I_3
15	10432	8347	7105	4177	2933	893	
20	7575	5641	4456	2099	1340	396	
25	5067	3501	2578	1028	634	258	
37	1647	999	672	294	243	217	
4	13600	11700	11352	10968	10255	6549	ΙΣ_B_I_4
15	10176	8119	6900	4041	2834	862	
20	7361	5468	4313	2026	1293	385	
25	4909	3385	2489	992	614	254	
37	1589	964	650	288	240	215	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15199	13272	12912	12515	11768	7750	ΙΣ_B_II_1
15	11685	9483	8141	4885	3460	1057	
20	8652	6531	5201	2488	1592	452	
25	5890	4114	3047	1220	745	275	
37	1956	1185	791	322	256	220	
4	14560	12645	12290	11898	11165	7268	ΙΣ_B_II_2
15	11083	8938	7644	4545	3207	977	
20	8135	6104	4843	2300	1470	424	
25	5495	3820	2821	1127	691	266	
37	1807	1095	733	307	249	218	
4	13666	11778	11430	11048	10337	6625	ΙΣ_B_II_3
15	10258	8201	6978	4098	2877	875	
20	7441	5537	4372	2058	1313	389	
25	4973	3434	2528	1008	622	254	
37	1615	979	659	289	240	214	
4	13455	11575	11230	10850	10144	6477	ΙΣ_B_II_4
15	10066	8031	6825	3997	2803	853	
20	7281	5408	4265	2003	1278	381	
25	4855	3348	2462	981	607	251	
37	1572	954	643	285	238	213	
4	14898	12990	12634	12241	11505	7552	ΙΣ_B_III_1
15	11422	9254	7936	4750	3361	1026	
20	8437	6358	5059	2415	1545	440	
25	5732	3998	2959	1184	724	270	
37	1898	1150	768	315	252	218	
4	14061	12172	11823	11438	10720	6932	ΙΣ_B_III_2
15	10640	8549	7295	4315	3038	925	
20	7771	5810	4600	2176	1390	405	
25	5225	3622	2671	1066	656	259	
37	1709	1036	695	297	243	214	
4	13646	11770	11425	11045	10337	6636	ΙΣ_B_III_3
15	10258	8209	6989	4110	2887	878	
20	7451	5550	4384	2065	1318	389	
25	4986	3445	2537	1012	624	253	
37	1621	983	661	288	238	212	
4	13032	11183	10844	10472	9782	6214	ΙΣ_B_III_4
15	9705	7722	6551	3822	2676	814	
20	6993	5181	4080	1911	1219	367	
25	4647	3198	2350	937	581	245	
37	1499	910	615	277	233	210	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15596	13650	13285	12882	12125	8024	ΙΣ_Γ_Ι_1
15	12040	9797	8426	5076	3601	1102	
20	8948	6772	5403	2592	1660	468	
25	6113	4279	3173	1272	776	282	
37	2039	1236	824	331	261	223	
4	14655	12723	12365	11970	11231	7305	ΙΣ_Γ_Ι_2
15	11148	8986	7684	4565	3220	981	
20	8178	6133	4865	2310	1476	426	
25	5521	3836	2833	1132	694	268	
37	1814	1099	736	310	251	220	
4	14138	12219	11866	11476	10748	6928	ΙΣ_Γ_Ι_3
15	10667	8555	7293	4302	3025	921	
20	7771	5800	4588	2166	1383	405	
25	5214	3609	2660	1061	654	261	
37	1700	1031	692	299	245	218	
4	13436	11543	11196	10814	10105	6434	ΙΣ_Γ_Ι_4
15	10026	7987	6781	3963	2776	845	
20	7237	5368	4230	1984	1266	380	
25	4816	3317	2438	972	602	252	
37	1556	945	637	285	239	215	
4	15436	13506	13145	12746	11996	7934	ΙΣ_Γ_ΙΙ_1
15	11911	9690	8332	5017	3559	1089	
20	8849	6695	5340	2561	1640	463	
25	6043	4229	3136	1257	767	279	
37	2015	1221	814	328	259	221	
4	14527	12612	12257	11865	11133	7242	ΙΣ_Γ_ΙΙ_2
15	11051	8908	7617	4526	3193	973	
20	8107	6080	4824	2290	1463	422	
25	5474	3803	2809	1122	688	266	
37	1799	1090	730	307	248	218	
4	13773	11880	11532	11148	10434	6698	ΙΣ_Γ_ΙΙ_3
15	10354	8286	7054	4148	2914	887	
20	7521	5602	4425	2085	1331	393	
25	5032	3478	2561	1021	630	255	
37	1636	992	667	291	241	215	
4	13356	11479	11135	10756	10053	6407	ΙΣ_Γ_ΙΙ_4
15	9975	7950	6752	3948	2767	842	
20	7205	5347	4214	1977	1262	378	
25	4798	3306	2430	969	600	250	
37	1551	942	635	283	237	213	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

f T	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	15035	13124	12767	12373	11634	7656	ΙΣ_Γ_III_1
15	11551	9371	8043	4824	3416	1044	
20	8548	6450	5136	2456	1571	446	
25	5817	4062	3008	1204	736	272	
37	1931	1170	781	318	253	218	
4	14404	12506	12154	11765	11039	7183	ΙΣ_Γ_III_2
15	10958	8834	7554	4489	3167	965	
20	8040	6031	4784	2271	1451	419	
25	5429	3773	2786	1113	683	263	
37	1784	1081	724	304	246	216	
4	13701	11823	11477	11096	10387	6674	ΙΣ_Γ_III_3
15	10308	8253	7028	4135	2905	884	
20	7492	5583	4411	2079	1327	391	
25	5016	3468	2554	1018	628	254	
37	1632	990	665	290	239	213	
4	12967	11120	10783	10412	9723	6170	ΙΣ_Γ_III_4
15	9646	7670	6505	3791	2654	807	
20	6945	5143	4048	1895	1209	365	
25	4612	3173	2330	929	577	245	
37	1486	903	610	276	232	209	

Βαθμονόμηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Πίνακας Π5: Αποτελέσματα διατμητικού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αντιολισθηρής στρώσης

Gb (psi)	T(°C)				
	4	15	20	25	37
	log T(°R)				
fs	2,697987	2,714891	2,722362	2,729707	2,746844
3,980892	746,3	239,9	143,0	85,8	26,3
1,592357	606,0	194,6	113,7	66,5	18,9
0,796178	603,2	187,4	106,5	60,3	15,7
0,159236	762,6	206,8	106,6	54,3	11,0
0,079618	880,7	222,1	108,8	52,5	9,3
0,015924	1250,9	261,7	111,4	46,3	5,8

Πίνακας Π6: Αποτελέσματα γωνίας υστέρησης αντιολισθηρής στρώσης

δ (degree)	T(°C)				
	4	15	20	25	37
	log T(°R)				
fs	2,697987	2,714891	2,722362	2,729707	2,746844
3,980892	40,41	46,47	48,88	51,11	55,78
1,592357	40,44	47,29	49,98	52,45	57,59
0,796178	40,39	47,90	50,83	53,50	59,01
0,159236	40,03	49,36	52,91	56,10	62,54
0,079618	39,80	50,03	53,89	57,33	64,18
0,015924	39,20	51,86	56,49	60,55	68,37