



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ



ΓΙΑΝΝΙΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή και Αντρέα Λοΐζου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κο Λοΐζο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, για τη καθοδήγησή του 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.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου Οδοποιίας για τη πολύτιμη και πρόθυμη βοήθεια τους, όποτε τη χρειάστηκα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιείται διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (Witczak 1-37A, Witczak 1-40D, Hirsch) σε μίγματα ισοπεδωτικής στρώσης που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν οκτώ δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης με τη γυροσκοπική μέθοδο και στη συνέχεια προσδιορίσθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας τόσο στο εργαστήριο όσο και με την εφαρμογή των υπόψη αλγορίθμων. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε τόσο μέσω της σύγκρισης των κεντρικών καμπυλών όσο και των σχετικών σφαλμάτων. Επίσης, αναπτύχθηκαν απλά γραμμικά μοντέλα για τη συσχέτιση του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με αυτά που προκύπτουν από τους αλγορίθμους. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα, περιλαμβάνονται στη παρούσα Διπλωματική Εργασία.

ABSTRACT

In the framework of the present Diploma Thesis, the investigation of dynamic modulus prediction algorithms (Witczak 1-37A, Witczak 1-40D, Hirsch) applicability on asphalt base course mixes used in Greece, is performed. For this purpose, eight specimens of asphalt base course mixes were produced with the gyratory compaction method. The dynamic modulus of these specimens was determined not only through laboratory testing but the above mentioned algorithms were also enabled. The evaluation process was based on the developed master curves and on the relative errors. Moreover, simple linear models were developed for the correlation of the laboratory determined dynamic modulus and the dynamic modulus that resulted from the algorithms. Relevant results and conclusions are included in the present Diploma Thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενική ανασκόπηση.....	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3	Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	2
2	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ.....	4
2.1	Γενικά στοιχεία.....	4
2.2	Άσφαλτος.....	6
2.3	Αδρανή υλικά.....	7
2.4	Ποσοστό κενών.....	10
2.5	Τύποι ασφαλτομιγμάτων.....	11
3	ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	15
3.1	Γενικά στοιχεία.....	15
3.2	Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας.....	17
3.2.1	Εργαστηριακός προσδιορισμός.....	17
3.2.2	Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων.....	18
3.2.3	Επιτόπου προσδιορισμός.....	18
4	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	20
4.1	Γενικά στοιχεία.....	20
4.2	Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	20
4.3	Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης.....	22
4.4	Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	26
4.4.1	Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	26
4.4.2	Αλγόριθμοι προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	27
4.4.2.1	Εξίσωση Witczak 1-37A.....	27
4.4.2.2	Εξίσωση Witczak 1-40D.....	29
4.4.2.3	Αλγόριθμος του Hirsch.....	32
5	ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	33
5.1	Γενικά.....	33
5.2	Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο.....	33
5.3	Δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης A265B- Μίγμα Α.....	36
5.4	Δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης A265B- Μίγμα Β.....	38
6	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ	41
6.1	Γενικά.....	41
6.2	Προσδιορισμός κενών.....	41

6.2.1	Προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους	41
6.2.2	Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους.....	42
6.2.3	Υπολογισμός κενών	44
6.3	Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	45
6.3.1	Εργαστηριακός προσδιορισμός.....	45
6.3.2	Εκτίμηση δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων	49
6.3.2.1	Αλγόριθμος Witczak 1-37A.....	49
6.3.2.2	Αλγόριθμος Witczak 1-40D	50
6.3.2.3	Αλγόριθμος Hirsch.....	50
7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	51
7.1	Γενικά.....	51
7.2	Κεντρικές καμπύλες (Master Curves)	51
7.2.1	Αποτελέσματα εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E^*_{lab}).....	51
7.2.2	Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Witczak 1-37A (E^*_{1-37A})	60
7.2.3	Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Witczak E^* 1-40D (E^*_{1-40D})	67
7.2.4	Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Hirsch (E^*_{Hirsch})...	75
7.3	Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων	83
7.3.1	Αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών	84
7.3.2	Αξιολόγηση σχετικών σφαλμάτων	92
7.4	Συσχέτιση μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	97
7.4.1.1	Συσχέτιση E^*_{lab} με E^*_{1-37A}	99
7.4.1.2	Συσχέτιση E^*_{lab} με E^* Witczak 1-40D.....	100
7.4.1.3	Συσχέτιση E^*_{lab} με E^*_{Hirsch}	101
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	111

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Ο ορθός σχεδιασμός, στα πλαίσια διαστασιολόγησης ενός οδοστρώματος είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς θα πρέπει να εξασφαλίζεται τόσο η άνεση και η ασφάλεια για το χρήστη όσο και η δομική επάρκεια του οδοστρώματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Η συμπεριφορά ενός οδοστρώματος καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων.

Στην περίπτωση εύκαμπτου οδοστρώματος, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος, από το οποίο συνίστανται οι ασφατικές στρώσεις, αποτελούν βασικές παραμέτρους στο πλαίσιο του σχεδιασμού αλλά και της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Το σημαντικότερο από αυτά είναι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, το οποίο καθορίζει την απομείωση των τάσεων οι οποίες μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Συνεκτιμώντας το γεγονός ότι ο πυθμένας των ασφατικών στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας, διαφαίνεται η άμεση συσχέτιση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος τόσο με τη συμπεριφορά των ασφατικών στρώσεων όσο και του συνόλου του οδοστρώματος.

Σύμφωνα με τον πρόσφατο οδηγό διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων M-EPDG (Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide), ο οποίος αναπτύχθηκε από την AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), βασική παράμετρο σχεδιασμού αποτελεί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων. Η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και η αντικατάσταση άλλων εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας από αυτό, κρίθηκε απαραίτητη καθώς το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας θεωρείται ότι περιγράφει πληρέστερα την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος.

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιείται είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας προϋποθέτει ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό και αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι πρόβλεψης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Για την ενεργοποίηση των αλγορίθμων αυτών απαραίτητα στοιχεία είναι οι ογκομετρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος και κάποια χαρακτηριστικά της ασφάλτου. Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι του Witczak 1-37A, του Witczak 1-40D και του Hirsch.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας και της προσαρμογής των προαναφερθέντων αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε μίγματα ισοπεδωτικής στρώσης τα οποία χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και αυτών που προκύπτουν από την ενεργοποίηση των υπόψη αλγορίθμων. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο οκτώ δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης, τα οποία υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για το προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και κατόπιν ενεργοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch για την εκτίμησή του. Η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων οδήγησε στην αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης και στην ανάπτυξη κατάλληλων συσχετίσεων μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και εκείνων που προκύπτουν από τους αλγορίθμους.

1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

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

Στο κεφάλαιο 2 δίνονται κάποια γενικά στοιχεία για τα ασφαλτομίγματα, που αφορούν στη σύστασή τους και στους διάφορους τύπους ασφαλτομιγμάτων.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος και συγκεκριμένα στο μέτρο δυσκαμψίας του, για το οποίο δίνονται κάποια γενικά στοιχεία και οι τρόποι προσδιορισμού του.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση επί του θεωρητικού υπόβαθρου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και στη συνέχεια περιγράφονται οι τρόποι προσδιορισμού του μέσω εργαστηριακών δοκιμών και μέσω εφαρμογής αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η μεθοδολογία παρασκευής των δοκιμών μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της επίτευξης του στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφονται αναλυτικά οι εργαστηριακές μετρήσεις και οι επικοινωνικές εργασίες που ακολουθήθηκαν για το προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

Στο κεφάλαιο 7 περιλαμβάνονται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων, καθώς και τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και την εφαρμογή των αλγορίθμων.

Στο κεφάλαιο 8 αναπτύσσονται εκτενώς τα συμπεράσματα που αφορούν το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

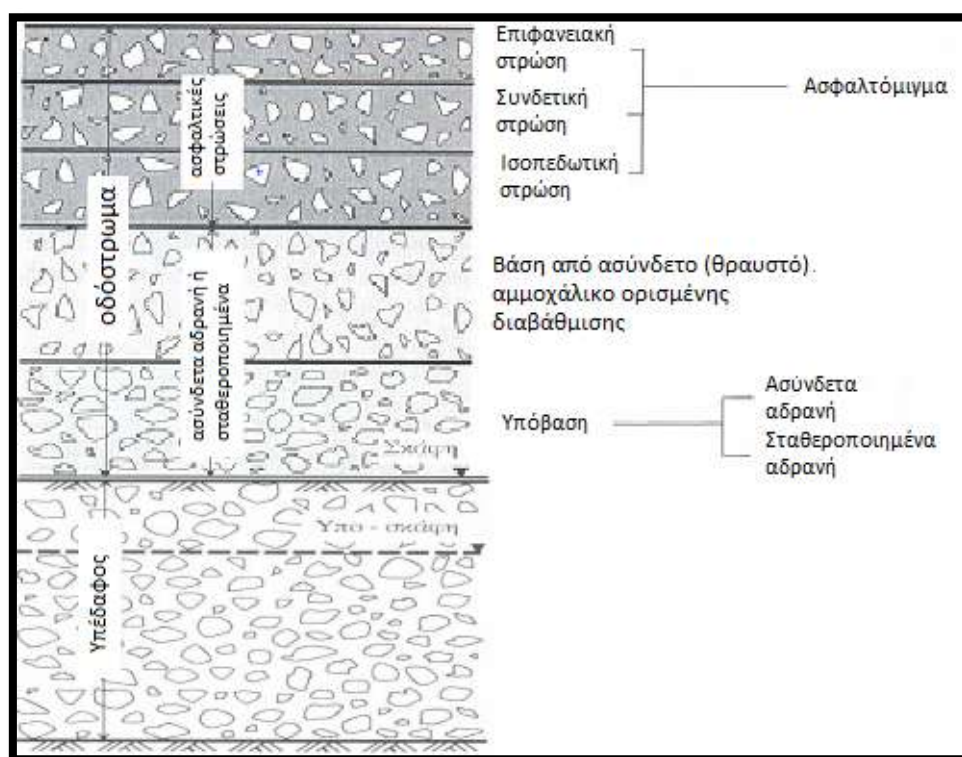
Στο κεφάλαιο 9 δίνεται η διεθνής βιβλιογραφία στην οποία στηρίχθηκε η ανάπτυξη των επιμέρους εδαφίων.

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

2 ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ

2.1 Γενικά στοιχεία

Το ασφαλτόμιγμα χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ανώτερων στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος οι οποίες καλούνται ασφατικές στρώσεις. Οι ασφατικές στρώσεις περιλαμβάνουν την επιφανειακή, η οποία σύμφωνα με τις Πρότυπες Τυπικές Προδιαγραφές (Π.Τ.Π) θα πρέπει να είναι αντιολισθηρή, τη συνδετική στρώση και την ισοπεδωτική στρώση. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.



Σχήμα 2.1. Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (Λοΐζος και Πλατή 2013)

Η επιφανειακή ή αντιολισθηρή στρώση αποτελεί την ανώτερη στρώση του οδοστρώματος, η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με την κυκλοφορία. Ως εκ τούτου, η τελική επιφάνεια της στρώσης αυτής θα πρέπει να προσφέρει άνεση και ασφάλεια στο χρήστη της οδού, εξασφαλίζοντας υψηλό επίπεδο ποιότητας κύλισης και αντιολισθητικής ικανότητας. Επίσης, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευστάθεια και υδατοστεγανότητα, αντίσταση σε ρηγμάτωση και παραμόρφωση. Το πάχος της επιφανειακής στρώσης δεν υπερβαίνει συνήθως τα 5 εκατοστά.

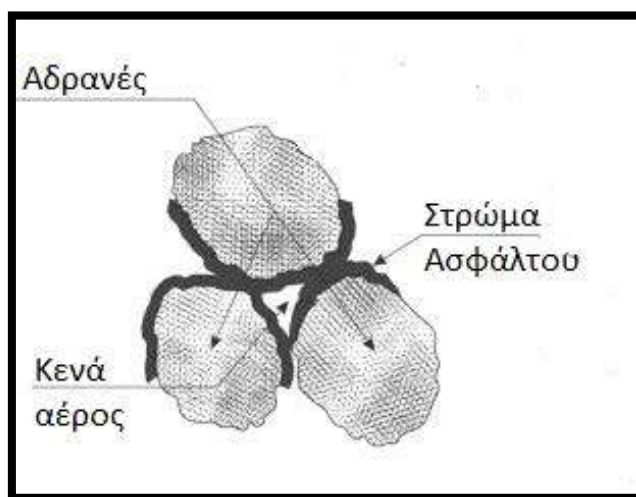
Η υποκείμενη της αντιολισθηρής στρώσης είναι η συνδετική στρώση. Η στρώση αυτή παρέχει ομαλή επίπεδη επιφάνεια και επιθυμητές κλίσεις για τη διάστρωση της στρώσης

κυκλοφορίας. Συνήθως παραλείπεται δεδομένου ότι η καλή επιφάνεια επιτυγχάνεται με τη διάστρωση της ισοπεδωτικής στρώσης. Απαιτείται μόνο αν ο τάπητας κυκλοφορίας είναι πορώδης.

Τέλος, ισοπεδωτική στρώση ονομάζεται η στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος, στην επιφάνεια της οποίας διαστρώνονται οι προβλεπόμενες επικείμενες στρώσεις. Η ισοπεδωτική στρώση είναι μεταβλητού πάχους και διαστρώνεται με σκοπό την επίτευξη των κλίσεων και της εξάλειψης των επιφανειακών ανωμαλιών. Παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις και προσδίδει στο οδόστρωμα δυσκαμψία και αντοχή σε κόπωση.

Συνοψίζοντας, οι βασικές απαιτήσεις που θα πρέπει να ικανοποιούν τα ασφαλτομίγματα είναι η αντίσταση σε παραμένουσες παραμορφώσεις και σε ρηγματώσεις λόγω κόπωσης, η παροχή υδατοστεγανότητας στις υποκείμενες στρώσεις και τέλος η συνεισφορά τους στη συνολική φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Επιπλέον, όσον αφορά στα ασφαλτομίγματα της αντιστοιχιστικής στρώσης θα πρέπει να εξασφαλίζεται υψηλό επίπεδο αντιστοιχιστικής ικανότητας και ποιότητας κύλισης, υψηλή δυσκαμψία, χαμηλή παραμορφωσιμότητα και μικρή διαπερατότητα.

Το ασφαλτόμγμα αποτελείται από δύο υλικά: την άσφαλτο και τα αδρανή. Επιπλέον ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου του μίγματος καταλαμβάνεται από τον αέρα (κενά αέρος).



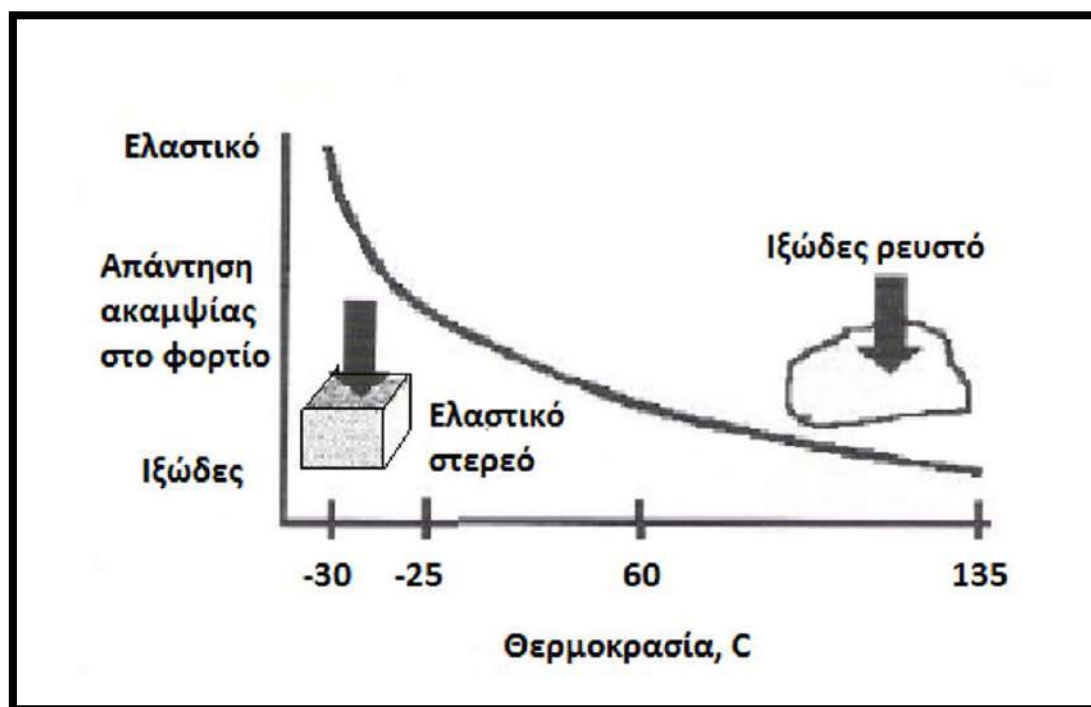
Σχήμα 2.2. Σύσταση ασφαλτομίγματος

Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τα υλικά σύστασης του ασφαλτόμγματος.

2.2 Ασφαλτος

Η ασφαλτος που χρησιμοποιείται στην οδοστρωσία παράγεται από τα υπολείμματα της απόσταξης του αργού πετρελαίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει ή να υποβληθεί σε χημικές και φυσικές διεργασίες που μεταβάλλουν τη σύνθεσή της, προκειμένου να δώσει συγκεκριμένες ιδιότητες.

Η ασφαλτος αποτελεί συνδετικό υλικό του ασφαλτομίγματος, προδίδοντάς του συνοχή και ομοιομορφία. Λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της, επηρεάζεται πρώτον από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, και αναλόγως ρευστοποιείται με την αύξησή της ή στερεοποιείται με τη μείωσή της, και δεύτερον από το χρόνο φόρτισης, η αύξηση του οποίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραμορφωσιμότητας της. Η ιδιότητα αυτή της ασφάλτου έχει σαν αποτέλεσμα το ασφαλτόμιγμα να αποκτά ιξωδοελαστική συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.3. Ιξωδης/ελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου

Εξαιτίας της πολύπλοκης χημικής της φύσης και της μεταβλητότητάς της, οι ιδιότητες της ασφάλτου διακρίνονται σε φυσικές και ρεολογικές. Οι ρεολογικές ιδιότητες περιλαμβάνουν την σκλήρυνση λόγω γήρανσης, τη συνοχή, την πλαστικότητα, το ιξώδες, την εξάρτηση από τη θερμοκρασία, τη διατμητική εξάρτηση και τη δυσκαμψία. Οι παραμορφώσεις των εύκαμπτων οδοστρώματων σχετίζονται με τις ιδιότητες αυτές της ασφάλτου επηρεάζοντας τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους χαρακτηρισμού της ασφάλτου είναι οι δοκιμές συνοχής που περιλαμβάνουν δοκιμές διεισδυτικότητας, σημείου μάλθωσης και ιξώδους.

Ο προσδιορισμός του ιξώδους της ασφάλτου αποτελεί μια από τις βασικές εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιούνται. Το ιξώδες εκφράζει την αντίσταση της ασφάλτου στη ροή, όταν επιβάλλεται σε αυτή εξωτερική φόρτιση. Για δεδομένη θερμοκρασία, το ιξώδες ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης προς τη διατμητική παραμόρφωση. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η άσφαλτος τείνει να συμπεριφέρεται ως Νευτώνιο υγρό (δηλαδή λεπτότερο υγρό, με μικρή τιμή ιξώδους και με περίπου σταθερό λόγο της διατμητικής τάσης προς τη διατμητική παραμόρφωση). Σε χαμηλότερες προς μεσαίες θερμοκρασίες, ωστόσο, ο λόγος δεν είναι σταθερός και επομένως η άσφαλτος συμπεριφέρεται ως μη-Νευτώνιο υγρό (παχύρευστο υγρό, με υψηλή τιμή ιξώδους).

Ο καθορισμός του εύρους αυτών των μεγεθών είναι αναγκαίος στο πλαίσιο του σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης ενός οδοστρώματος. Επιπλέον, ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού της ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα είναι πολύ σημαντικός. Χαμηλά ποσοστά ασφάλτου οδηγούν σε αποκόλληση των κόκκων των αδρανών και μείωση της συνοχής του ασφαλτομίγματος. Αντίθετα, υψηλά ποσοστά οδηγούν σε φαινόμενα τροχοαυλάκωσης, ανάδυσης της ασφάλτου, επιφανειακών παραμορφώσεων και μειωμένα επίπεδα αντιστοιχιστικής ικανότητας.

Η κατηγοριοποίηση της ασφάλτου πραγματοποιείται με βάση το δείκτη PEN. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζεται από τη δοκιμή διείσδυσης, η οποία αποτελεί μια έμμεση εκτίμηση της συνοχής και κατ' επέκταση της σκληρότητας της ασφάλτου. Κατά τη δοκιμή μια βελόνα πρότυπων διαστάσεων εισδύει επί 5 δευτερόλεπτα υπό φορτίο 100 γραμμαρίων εντός δοκιμίου σε θερμοκρασία 25°C. Όσο μαλακότερη η άσφαλτος τόσο υψηλότερος ο βαθμός διείσδυσης. Επομένως, υπάρχουν διάφοροι τύποι ασφάλτου όπως 50/60, 60/70, 80/100, 120/150, 180/220, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από το δείκτη PEN και πληρούν τις απαιτήσεις των Π.Τ.Π (Α200).

2.3 Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό του ασφαλτομίγματος και επομένως αποτελούν το δομικό σκελετό του, προσδίδοντάς του αντοχή και ανθεκτικότητα. Η καλή ποιότητα αυτών είναι σημαντική για την επίτευξη της επιθυμητής συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Το σχήμα, το μέγεθος και η ποσότητα των αδρανών στο μίγμα αποτελούν ιδιότητες που συνδέονται με αστοχίες του οδοστρώματος όπως τροχοαυλακώσεις, ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και διάβρωση.

Ανάλογα με την προέλευσή τους, τα αδρανή διακρίνονται σε θραυστά και συλλεκτά. Τα θραυστά προέρχονται από την κατεργασία του πετρώματος στα λατομεία με ειδικά μηχανήματα τους θραυστήρες. Χρησιμοποιούνται στις ανώτερες ασφατικές στρώσεις και στη βάση του οδοστρώματος, καθώς διαθέτουν πολύ καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Από

την άλλη, τα συλλεκτά αδρανή είναι υλικά φυσικών αποθέσεων, όπως το χαλίκι, το αμμοχάλικο και η φυσική άμμος. Δημιουργούνται από φυσικές διεργασίες και συλλέγονται από τα ποτάμια, τους χειμάρρους ή τις ακτές. Έχουν μικρότερο κόστος από τα θραυστά και χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή της υπόβασης.

Τα αδρανή ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα αδρανή και παιπάλη.

Τα χονδρόκοκκα αδρανή συγκρατούνται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής 2 χιλιοστών (No 10) και αποτελούνται από θραυστά υλικά (λίθοι ή χαλίκια) παραγόμενα από πολλαπλές θραύσεις σε ομοιόμορφο, συμπαγές και χωρίς προσμίξεις υλικό. Οι κόκκοι πρέπει να είναι όσο το δυνατό κυβικής μορφής και η αναλογία των πλακοειδών να είναι σημαντικά μικρή, τόσο προς την αποφυγή της μείωσης της αντοχής του ασφαλτομίγματος όσο και εξασφάλισης της ανθεκτικότητας σε τροχοαυλάκωση. Σύμφωνα με τις Π.Τ.Π (Α265) τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης για διάφορους τύπους ασφαλτικού σκυροδέματος (Α. Β. Γ και Δ) παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης χονδρόκοκκου αδρανούς υλικού

Αριθμός κοσκίνου (Αμερικανικά πρότυπα κόσκινα τετραγωνικής οπής, Α.Α.Σ.Η.Ο.: M-92)		Διερχόμενο ποσοστό % (κατά βάρος)			
Άνοιγμα βροχίδας		ΤΥΠΟΣ Α	ΤΥΠΟΣ Β	ΤΥΠΟΣ Γ	ΤΥΠΟΣ Δ
inch	mm				
1 1/2"	38,1	100	-	-	-
1"	25,4	90-100	100	-	-
3/4"	19,1	-	90-100	100	-
1/2"	12,7	25-60	-	90-100	100
3/8"	9,52	-	20-55	40-75	90-100
No 4	4,76	0-10	0-10	5-25	10-30
No 10	2	0-5	0-5	0-5	0-10

Τα λεπτόκοκκα αδρανή διέρχονται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής 2 χιλιοστών (No 10) και συγκρατούνται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής 0,074 χιλιοστών (No 200). Συνίστανται από φυσική ή θραυστή άμμο ή συνδυασμό αυτών και αποτελούνται από σκληρούς, ανθεκτικούς και τραχείας επιφάνειας κόκκους. Σύμφωνα με τις Π.Τ.Π (Α265) τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού.

Αριθμός κοσκίνου (Αμερικανικά πρότυπα κόσκινα τετραγωνικής οπής, Α.Α.Σ.Η.Ο.: M-92)		Διερχόμενο ποσοστό % (κατά βάρος)
Διερχόμενο	Συγκρατούμενο	
No 4		100
No 10		95-100
No 10	No 40	18-50
No 40	No 80	30-60
No 80	No 200	15-40
No 200	-	0-5

Η παιπάλη ορίζεται ως το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής 0,074 χιλιοστών (No 200). Η παιπάλη προστίθεται (σε περίπτωση έλλειψης) για να συμπληρώσει τη κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των αδρανών. Μπορεί να είναι λιθοσύντριμμα ορυκτής ή άλλης προέλευσης (σκόνη από σκωρίες), υδράσβεστος, τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα. Η παιπάλη θα πρέπει να είναι απαλλαγμένη από άργιλο ή οργανικές προσμίξεις. Κατά τη χρήση της θα πρέπει να είναι ξηρή, ώστε να ρέει και να μη δημιουργεί συσσωματώματα. Σύμφωνα με τις Π.Τ.Π (Α265), τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης της παιπάλης παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης παιπάλης

Αριθμός κοσκίνου (Αμερικανικά πρότυπα κόσκινα τετραγωνικής οπής, Α.Α.Σ.Η.Ο.: M-92)	Διερχόμενο ποσοστό % (κατά βάρος)
No 30	100
No 80	95 (ελάχιστο)
No 200	65 (ελάχιστο)

Ο τύπος της παιπάλης που χρησιμοποιείται έχει επίδραση α) στον προσδιορισμό του ποσοστού της ασφάλτου, β) στην εργασιμότητα του μίγματος κατά την ανάμιξη και συμπύκνωση και γ) στις μηχανικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος (Λοΐζος 2012).

Για τον καθορισμό της καταλληλότητας των αδρανών πραγματοποιούνται δοκιμές, κατά τις οποίες προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά τους. Οι κυριότερες δοκιμές είναι η δοκιμή του ισοδύναμου της άμμου και η δοκιμή Los Angeles, ενώ υπάρχει και πλήθος άλλων όπως η δοκιμή αντοχής σε συντριβή του πετρώματος, η δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση ή έλεγχος υγείας, η δοκιμή μπλε του μεθυλανίου κ.α. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών που

τελικά θα επιλεγούν για την κατασκευή του ασφαλτομίγματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των Π.Τ.Π.

2.4 Ποσοστό κενών

Με τον όρο κενά ασφαλτομίγματος ορίζονται οι θύλακες του αέρα που βρίσκονται ανάμεσα στα επικαλυμμένα με άσφαλο αδρανή ενός συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος.

Υπάρχουν τριών ειδών κενά. Τα κενά μεταξύ των αδρανών σε ένα συμπυκνωμένο μίγμα (VMA: Voids in the mineral aggregate), τα κενά που έχουν πληρωθεί με άσφαλο (VFA: Voids filled with asphalt) και τα κενά του συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος που πληρώνονται με αέρα ή άλλο υλικό όπως νερό (PAV: Percentage of air voids). Η βασικότερη παράμετρος στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος αλλά και της συμπεριφοράς του οδοστρώματος είναι το ποσοστό κενών αέρα.

Η συμπίκνωση του ασφαλτομίγματος και η επίτευξη του κατάλληλου ποσοστού κενών αέρα είναι πολύ σημαντική στην εξασφάλιση της ανθεκτικότητας του οδοστρώματος που πρόκειται να κατασκευαστεί. Χαμηλά ποσοστά κενών αέρα ενδέχεται να οδηγήσουν στην εμφάνιση τροχοαυλάκωσης, αφού δεν υπάρχει το απαιτούμενο ποσοστό κενών ώστε το συνδετικό να εισέλθει και να καλύψει τα αδρανή. Επίσης, μειώνεται η ικανότητα πρόσφυσης, ενώ αυξάνεται η πιθανότητα ανάδυσσης της ασφάλτου. Σε αντίθετη περίπτωση, υψηλό ποσοστό κενών αέρα επιτρέπει την είσοδο του αέρα στο σώμα του ασφαλτομίγματος προκαλώντας οξειδωση και επομένως γρηγορότερη γήρανση της ασφάλτου. Επιπλέον, μειώνεται η αντίσταση σε ρηγματώσεις και παραμένουσες παραμορφώσεις. Το ποσοστό κενών αέρα μειώνεται ή αυξάνεται, ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου. Μπορεί επίσης να αυξομειωθεί ανάλογα με το ποσοστό του μίγματος που διέρχεται από κόσκινο Νο200 (0,0075mm). Όσο περισσότερα λεπτόκοκκα αδρανή προστίθενται στο μίγμα, τόσο μειώνεται το ποσοστό των κενών αέρα.

Το ποσοστό των κενών μεταξύ των αδρανών, VMA, εκφράζει το διαθέσιμο χώρο μεταξύ των αδρανών για να παραλάβει τον ενεργό όγκο της περιεχόμενης ασφάλτου (δηλαδή το συνολικό όγκο της ασφάλτου, μειωμένο κατά τον όγκο που έχει απορροφηθεί από τα αδρανή) και τον όγκο των κενών αέρα που είναι απαραίτητος για το ασφαλτόμιγμα. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του VMA, τόσο περισσότερος ο χώρος μεταξύ των αδρανών για να παραληφθεί η άσφαλτος. Επομένως, μια λεπτή επικάλυψη ασφάλτου πάνω στα αδρανή έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντοχή του ασφαλτομίγματος. Το VMA επηρεάζεται κυρίως από το ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών που διέρχονται από κόσκινο Νο200 (0,0075mm). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα λεπτόκοκκα αδρανή τείνουν να απορροφώνται από την άσφαλο και επειδή καταλαμβάνουν όγκο, η άσφαλτος τείνει να επεκτείνεται, με αποτέλεσμα μικρότερες τιμές του VMA.

Με το VFA, διασφαλίζεται ότι επαρκές ποσοστό κενών πληρώθηκε με άσφαλτο και έμμεσα καθορίζει την απολύτως αναγκαία ποσότητα ασφάλτου στο μίγμα, δηλαδή, την ελάχιστη για να υπάρξει καλή συνεκτικότητα των κόκκων. Το κατάλληλο ποσοστό VFA συμβάλλει στην αποφυγή μειωμένης αντοχής του μίγματος, που οφείλεται στις λεπτές επικαλύψεις αδρανών με άσφαλτο.

2.5 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

Τα ασφαλτομίγματα, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα θερμά και τα ψυχρά ασφαλτομίγματα. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο ότι για την παρασκευή των θερμών απαιτείται θέρμανση των αδρανών και της ασφάλτου. Τα ψυχρά ασφαλτομίγματα παρασκευάζονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, χωρίς να απαιτείται θέρμανση των αδρανών ή της ασφάλτου. Το υλικό που χρησιμοποιείται ως συνδετικό του μίγματος είναι το ασφατικό γαλάκτωμα ή η αφρώδης άσφαλτος. Τα θερμά ασφαλτομίγματα παράγονται εν θερμώ σε ασφατική εγκατάσταση. Τα αδρανή και η άσφαλτος τοποθετούνται σε συγκεκριμένες αναλογίες, σε έναν αναμικτήρα του συγκροτήματος παρασκευής, στον οποίο όλα τα υλικά θερμαίνονται και αναμειγνύονται.

Ένας επιπλέον διαχωρισμός των θερμών ασφαλτομιγμάτων, γίνεται αναλόγως της χρήσης τους. Η σύνθεση του ασφαλτομίγματος καθώς και οι απαιτήσεις των μηχανικών, και όχι μόνο, χαρακτηριστικών του εξαρτώνται από την ασφατική στρώση για την οποία προορίζονται. Έτσι υπάρχουν ασφαλτομίγματα επιφανειακής ή αντιολισθηρής στρώσης, ισοπεδωτικής και συνδετικής στρώσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ισοπεδωτική στρώση είναι η κατώτερη ασφατική στρώση επί της οποίας διαστρώνονται οι επικείμενες στρώσεις (συνδετική και επιφανειακή). Ο πυθμένας της στρώσης αυτής αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας του οδοστρώματος λόγω των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Η συνιστώμενη κοκκομετρική διαβάθμιση για ισοπεδωτικές στρώσεις παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4 σύμφωνα με τις Π.Τ.Π (Α265).

Πίνακας 2.4. Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης

Αριθμός κοσκίνου (Αμερικανικά πρότυπα κόσκινα τετραγωνικής οπής, Α.Α.Σ.Η.Ο.: M-92		Διερχόμενο ποσοστό % (κατά βάρος)			
Ανοιγμα βροχίδας		Ισοπεδωτική στρώση			
inch	mm	ΤΥΠΟΣ Α	ΤΥΠΟΣ Β	ΤΥΠΟΣ Γ	ΤΥΠΟΣ Δ
1 1/2"	38,1	100	-	-	-
1"	25,4	78-100	100	-	-
3/4"	19,1	-	76-100	100	-
1/2"	12,7	56-80	64-89	74-100	100
3/8"	9,52	-	-	60-88	74-100
No 4	4,76	35-58	38-64	42-70	50-80
No 10	2	23-46	25-50	28-54	32-62
No 40	0,42	11-25	12-28	14-30	16-34
No 80	0,177	6-16	7-18	8-20	10-22
No 200	0,074	3-7	4-8	4-9	4-9
Άσφαλτος % του βάρους των αδρανών		4,0- 6,0	4,0- 6,5	4,5- 7,0	4,5- 7,0
Συνιστώμενο πάχος συμπιεσμένου ασφ/τος σε εκατοστά		7,5- 10,0	3,75- 7,5	2,5- 5,0	-

Τα ασφαλτομίγματα της αντιολισθηρής στρώσης ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό κενών διακρίνονται περαιτέρω σε κλειστού τύπου, ανοιχτού τύπου και πορώδη.

Τα πορώδη ασφαλτομίγματα (πορώδεις τάπητες) και τα μίγματα ανοιχτού τύπου, με την προϋπόθεση ότι τα αδρανή έχουν καλή επιφανειακή μικρουφή, αναμένεται να έχουν υψηλή αντιολισθητική ικανότητα. Αυτού του είδους τα μίγματα, λόγω του υψηλού πορώδους που διαθέτουν (μεγάλο ποσοστό αλληλοσυνδεδεμένων κενών ώστε να διευκολύνεται η διέλευση ύδατος και αέρα), δρουν σαν επιφανειακές στραγγιστικές στρώσεις, γεγονός που οδηγεί αφενός στη διατήρηση υψηλού ποσοστού στεγνής επιφάνειας επαφής μεταξύ της στρώσης κυκλοφορίας και των ελαστικών των οχημάτων και αφετέρου εκμηδενίζει την εκπομπή σωματιδίων νερού λόγω της κίνησης των τροχών σε υγρό οδόστρωμα. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου βάθους υφής και του υψηλού ποσοστού κενών, παράγονται μειωμένα επίπεδα θορύβου. Παράγονται σχεδόν αποκλειστικά από σκληρά αδρανή και λόγω του υψηλού πορώδους είναι απαραίτητο η υποκείμενη στρώση να κατασκευαστεί από πυκνό ασφαλτικό

σκυρόδεμα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος ανοιχτού τύπου και πορώδους.

Πίνακας 2.5. Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων ανοιχτού τύπου και πορώδους σύνθεσης.

Μέγεθος κοσκίνου τετραγωνικής οπής (mm)	Τύπος II Ανοιχτής σύνθεσης		Τύπος III Πορώδους σύνθεσης	
	Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου		Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου	
	12,5mm	9,5 mm	12,5mm	9,5 mm
	Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος		Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος	
19	100	-	100	100
12,5	85-100	100	90-100	100
9,5	60-90	85-100	60-100	90-100
4,75	20-50	40-70	15-40	30-50
2,36	5-25	10-35	4-12	5-15
1,18	3-19	5-25	-	-
0,3	0-10	0-12	-	-
0,075	-	-	2-5	2-5
%κενών	5-15		15-25	
Συνιστώμενο πάχος στρώσης	3-4 cm	2,5-3 cm	4-5 cm	3-4 cm

Στη σύνθεση του πυκνού ασφαλτικού σκυροδέματος (αντιολισθηρό ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου), το μίγμα είναι πυκνό και αδιαπέρατο. Παρέχει χαμηλό βάθος υφής και η αναμενόμενη αντίσταση σε ολίσθηση είναι χαμηλότερη από τα προαναφερθέντα μίγματα. Η αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση επηρεάζεται από την σκληρότητα του ασφαλτικού υλικού αλλά, σε κάθε περίπτωση, όπως κάθε ασφαλτόμιγμα, τείνει να παραμορφώνεται μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτικού σκυροδέματος κλειστού τύπου.

Πίνακας 2.6. Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης κλειστού τύπου.

Μέγεθος κοσκίνου τετραγωνικής οπής (mm)	Τύπος Ι Πυκνής σύνθεσης	
	Ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου	
	12,5 mm	9,5 mm
	Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος	
19	100	-
12.5	90-100	100
9.5	-	90-100
4.75	44-74	55-85
2.36	28-58	32-67
1.18	-	-
0.3	5-21	7-23
0.075	2-10	2-10
%κενών	3-5	
Συνιστώμενο πάχος στρώσης	3-4 cm	2,5-3 cm

Για την παρασκευή ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης, χρησιμοποιείται ασφαλτικό σκυρόδεμα το οποίο παράγεται εν θερμώ από κοινή ή τροποποιημένη άσφαλτο και σκληρά αδρανή. Η τροποποιημένη άσφαλτος, ως συνδετικό υλικό, προέρχεται από την ανάμιξη κοινής ασφάλτου με πολυμερή (τροποποιητές), ελαστομερή, θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυντικά και πλαστομερή. Χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή, αντίσταση σε παραμένουσες παραμορφώσεις, μεγάλη διάρκεια ζωής και καλύτερη συνοχή με τα αδρανή υλικά.

3 ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

3.1 Γενικά στοιχεία

Προκειμένου να προβλεφθεί η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός ορισμένων μεγεθών του. Τα μεγέθη αυτά σχετίζονται με την αντοχή του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση φορτίου σε μόνιμη παραμόρφωση, ρηγμάτωση λόγω κόπωσης κ.α και καλούνται μηχανικά χαρακτηριστικά. Τα κυριότερα από αυτά είναι η αντοχή του ασφαλτομίγματος σε κάμψη, θλίψη, εφελκυσμό και σε ελαστική παραμόρφωση, το μέτρο δυσκαμψίας του κ.α. Το σημαντικότερο μηχανικό χαρακτηριστικό ενός ασφαλτομίγματος είναι το μέτρο δυσκαμψίας του, το οποίο έχει επίδραση στη συμπεριφορά τόσο των ασφαλικών στρώσεων όσο και του οδοστρώματος.

Το μέτρο δυσκαμψίας, εκφράζει την αντίσταση του ασφαλτομίγματος σε παραμόρφωση υπό την επιβολή φορτίου και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απομείωση των τάσεων, οι οποίες παραλαμβάνονται από τις υποκείμενες στρώσεις. Στην περίπτωση ασφαλτομίγματος με μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας, η καταπόνηση των υποκείμενων στρώσεων είναι μικρότερη σε σχέση με ένα ασφαλτόμιγμα με μικρό μέτρο δυσκαμψίας. Ωστόσο, μεγάλες τιμές του δείκτη δυσκαμψίας μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη εμφάνιση ρηγμάτωσης του ασφαλτομίγματος. Υπό το πρίσμα των παραπάνω και δεδομένου ότι στην περίπτωση εύκαμπτου οδοστρώματος ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας, είναι προφανές ότι το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί σημαντική παράμετρο τόσο στο πλαίσιο διαστασιολόγησης του οδοστρώματος όσο και στην εξέλιξη της συμπεριφοράς του κατά τη διάρκεια ζωής του.

Το ασφαλτόμιγμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω αποτελείται από δύο υλικά με διαφορετική συμπεριφορά: την άσφαλο με ιξωδοελαστική συμπεριφορά και τα συμπυκνωμένα αδρανή, με κατά βάση ελαστική συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει τελικά και όλο το μίγμα συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά (Λοΐζος και Πλατή 2013). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μέτρο δυσκαμψίας να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης και επομένως περιγράφεται από μια σχέση του τύπου:

$$S_m = (\sigma/\epsilon)t, T.$$

Όπου:

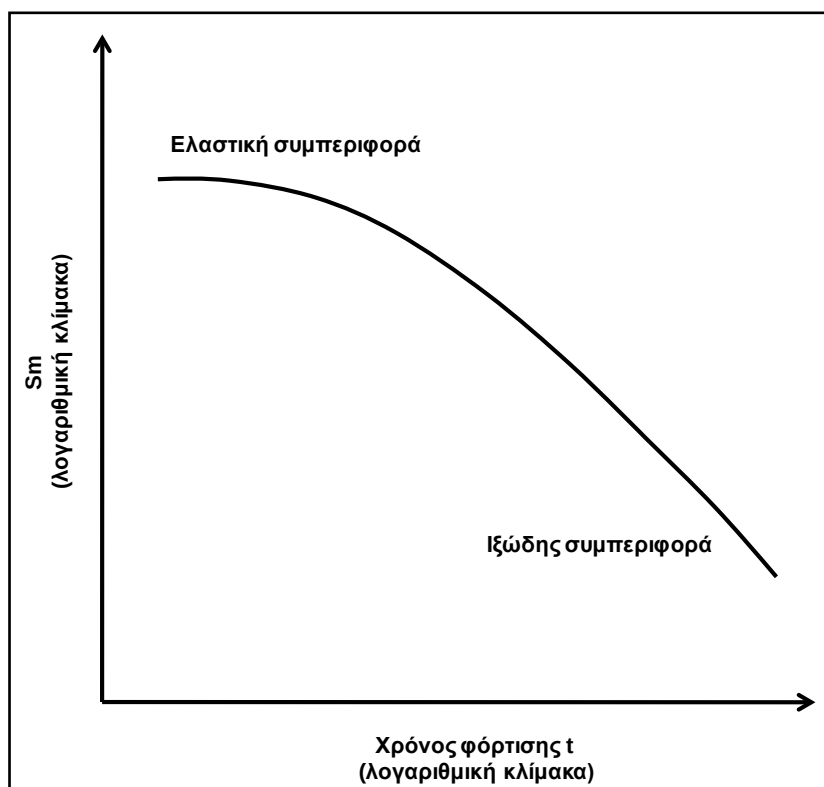
σ : αναπτυσσόμενη τάση

ϵ : παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος

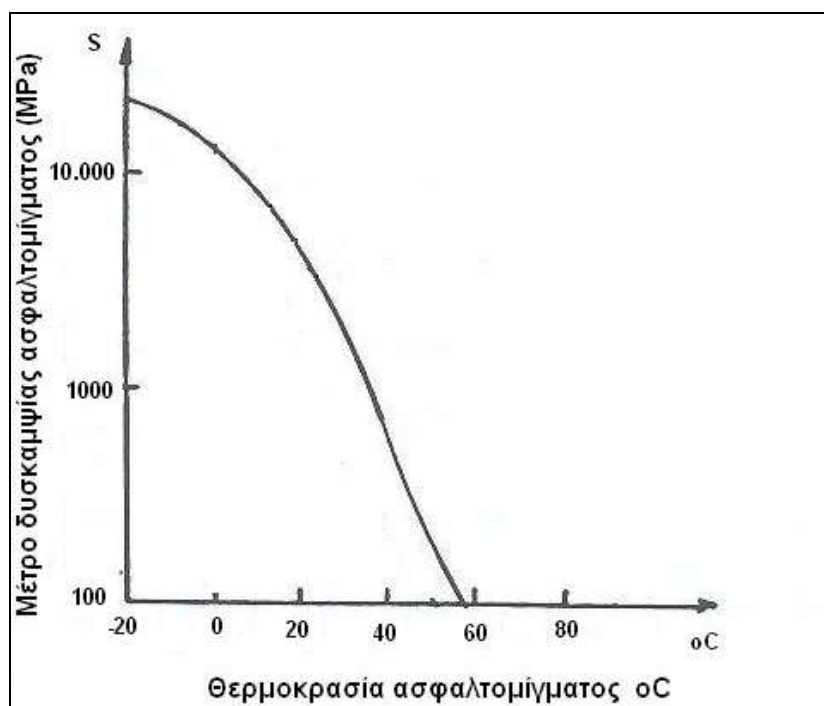
t : χρόνος φόρτισης

T: η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος

Η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος με τη μεταβολή των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήματα 3.1 και 3.2) (Λοΐζος και Πλατή 2013).



Σχήμα 3.1. Σχέση του μέτρου δυσκαμψίας και χρόνου φόρτισης.



Σχήμα 3.2. Σχέση του μέτρου δυσκαμψίας με τη θερμοκρασία.

Στο πρώτο σχήμα, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος φόρτισης, μειώνεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Επίσης, σύμφωνα με το δεύτερο σχήμα, αύξηση της θερμοκρασίας του ασφαλτομίγματος, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας.

Επομένως, από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι τόσο η αύξηση της θερμοκρασίας όσο και η αύξηση του χρόνου φόρτισης, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Οι μεταβολές αυτές θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του οδοστρώματος.

3.2 Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος προσδιορίζεται είτε εργαστηριακά με κατάλληλες δοκιμές επί δοκιμίων ή πυρήνων οδοστρώματος, είτε με την ενεργοποίηση αλγορίθμων. Στην περίπτωση υφιστάμενου οδοστρώματος, προσδιορίζεται επί τόπου με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT: Non Destructive Testing).

3.2.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος πραγματοποιείται με πλήθος πειραματικών διατάξεων, όπως η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (indirect tensile strength test), η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού-θλίψης (direct tension-compression test), η τριαξονική δοκιμή, η μονοαξονική δοκιμή, η δοκιμή κάμψης δοκού τριών σημείων, η δοκιμή προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, κ.α (EN 12697-26 2004).

Το μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από τις παραπάνω δοκιμές, παρουσιάζει αποκλίσεις λόγω της διαφορετικής διάταξης των δοκιμών και του τρόπου φόρτισης του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, η φόρτιση που επιβάλλεται μπορεί να είναι παλμική ή αρμονική (ημιτονοειδής). Κατά την παλμική φόρτιση επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο για σύντομο χρονικό διάστημα και κατόπιν μεσολαβεί μια μικρή περίοδος ηρεμίας. Το στάδιο φόρτισης/αποφόρτισης και ηρεμίας καθορίζουν ένα πλήρη κύκλο φόρτισης. Στην περίπτωση της πλήρους ημιτονοειδούς φόρτισης, επιβάλλεται θλιπτική και εφελκυστική δύναμη χωρίς περίοδο ηρεμίας. Όσον αφορά στη διάταξη της δοκιμής, διαφορές παρατηρούνται στον τρόπο τοποθέτησης του δοκιμίου με αποτέλεσμα σε κάποιες δοκιμές να επιβάλλεται η φόρτιση κατά μήκος της κάθετου διαμέτρου των δοκιμίων, ενώ σε άλλες στο οριζόντιο επίπεδο του κυλινδρικού δοκιμίου.

Σε κάθε περίπτωση, ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας προκύπτει από την επιβαλλόμενη τάση και την προκύπτουσα παραμόρφωση. Τα τελευταία χρόνια, και κυρίως μετά την ανάπτυξη της νέας μεθόδου διαστασιολόγησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων

MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) από την AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), το μέτρο δυσκαμψίας που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Αναλυτική περιγραφή για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, το οποίο αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.2.2 Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων

Το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να προσδιορισθεί μέσω αλγορίθμων ή νομογραφημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκαμψία της ασφάλτου, τις αναλογίες της ασφάλτου και των αδρανών στο μίγμα, το ποσοστό των κενών, κ.α. Το νομογράφημα Van der Poel (1954) και το νομογράφημα Shell (Bonnaure et al. 1977) ήταν ευρέως αποδεκτά και χρησιμοποιούνταν για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας στην κατασκευαστική οδοποιΐα, ωστόσο η χρήση τους σήμερα είναι σπάνια. Μεταγενέστερα, πλήθος ερευνών επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη αλγορίθμων όπως των Heukelom & Klomp (1964), Bonnaure et al. (1977) και άλλων επιστημόνων οι οποίοι βασίστηκαν κυρίως σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών των Van der Poel (1954) και Yoder & Witczak (1975).

Αν και οι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας είναι ευρέως διαδεδομένοι, η εφαρμογή τους δεν είναι πάντα επιτυχής, παρουσιάζοντας πολλές φορές σημαντικές αποκλίσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάπτυξή τους βασίζεται σε συγκεκριμένα μίγματα, τα οποία σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι ίδιας σύστασης με αυτά που χρησιμοποιούνται σε κάθε χώρα. Επομένως, η εφαρμογή τους οδηγεί συχνά σε λάθος εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας. Η χρήση τους κρίνεται αναγκαία, στην περίπτωση που δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

3.2.3 Επιτόπου προσδιορισμός

Για τον επιτόπου προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενων οδοστρωμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών. Το πιο διαδεδομένο σύστημα είναι το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD). Το σύστημα FWD επιβάλλει φορτίο, το οποίο προέρχεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα υπό την επίδραση της βαρύτητας, δημιουργώντας παλμική φόρτιση. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος προσομοιάζει αρκετά την πραγματική φόρτιση κάτω από την επίδραση διέλευσης του τροχού ενός οχήματος. Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις μέσω ειδικών γεοφώνων τα οποία είναι τοποθετημένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις από το σημείο φόρτισης. Στη συνέχεια μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων

συλλογής με το σύστημα FWD και συνυπολογίζοντας άλλες παραμέτρους (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ) προσδιορίζεται το μέτρο δυσκαμψίας των ασφατικών στρώσεων με τη μέθοδο του ανάστροφου υπολογισμού (backanalysis) (Λοΐζος 2012).

4 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

4.1 Γενικά στοιχεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια το μέτρο δυσκαμψίας το οποίο λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (dynamic modulus). Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού σύμφωνα με τον οδηγό MEPDG, για τη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Σύμφωνα με πλήθος μελετών, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας θεωρείται ως η πλέον κατάλληλη παράμετρος για την περιγραφή της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης του ασφαλτομίγματος καθώς περιγράφει ικανοποιητικά την εξάρτηση των μηχανικών του χαρακτηριστικών από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης (Bonnaure et al. 1977; Flintsch et al. 2005; Tashman & Elangovan 2007; Mohammad et al. 2007). Τα πλεονεκτήματα θεώρησης του δυναμικού μέτρου ως παράμετρο σχεδιασμού των οδοστρωμάτων είναι α)ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών του ασφαλτομίγματος για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης, β)η ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος έναντι παραμένουσας παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης (Bonaquist et al. 2003; Witczak et al 2002a; Witczak et al 2002b) και γ)η καλύτερη προσομοίωση των πραγματικών φορτίσεων που δέχεται ένα οδόστρωμα.

4.2 Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, περιγράφεται από το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας που είναι ένας μιγαδικός αριθμός, ο οποίος προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ τάσης- παραμόρφωσης, υπό επαναλαμβανόμενη ημιτονοειδή φόρτιση (Schwartz 2005). Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό μέρος, E' , που αναπαριστά την ελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και το φανταστικό μέρος, E'' , που περιγράφει την εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang 1993). Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά φάσης μεταξύ της επιβαλλόμενης φόρτισης και της προκύπτουσας παραμόρφωσης, γνωστή ως γωνία υστέρησης.

$$E^* = E' + iE'' \quad (4.1)$$

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \cos\delta \quad (4.2)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \sin\delta \quad (4.3)$$

όπου

E^* = σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας

σ_o = μέγιστη τάση

ε_o = μέγιστη παραμόρφωση

δ = γωνία υστέρησης (μοίρες)

i = φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού

Η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας E^* , αποτελεί μαθηματικώς το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, $|E^*|$ (Yoder & Witczak 1975; Witczak et al. 2002c), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης προς τη μέγιστη παραμόρφωση υπό συνθήκες ημιτονοειδούς φόρτισης και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} * \cos\delta\right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} * \sin\delta\right)^2} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (4.4)$$

όπου

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

σ_o = μέγιστη τάση

ε_o = μέγιστη παραμόρφωση

δ = γωνία υστέρησης (μοίρες)

Για λόγους απλοποίησης, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας εΐθισται να συμβολίζεται ως E^* (αντί για $|E^*|$), το οποίο ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η γωνία υστέρησης εκφράζει την καθυστέρηση της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης που προκαλείται σε σχέση με τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση (σχήμα 4.1) (Huang 1993). Η καθυστέρηση φάσης απεικονίζει τη χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος. Λόγω της σχέσης χρόνου- συχνότητας, προκύπτει ότι το ασφαλτόμιγμα εξαρτάται επίσης από τη συχνότητα φόρτισης. Η ημιτονοειδής τάση που ασκείται για ένα δεδομένο χρόνο t και γωνιακή συχνότητα ω , περιγράφεται από τη σχέση $\sigma = \sigma_o * \sin(\omega t)$, ενώ η ημιτονοειδής παραμόρφωση που προκαλείται περιγράφεται από τη σχέση $\varepsilon = \varepsilon_o * \sin(\omega t - \delta)$. Επομένως, η τάση και η παραμόρφωση, είναι συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας, όπου η τελευταία είναι συνάρτηση της συχνότητας φόρτισης.

$$\omega = 2\pi f \quad (4.5)$$

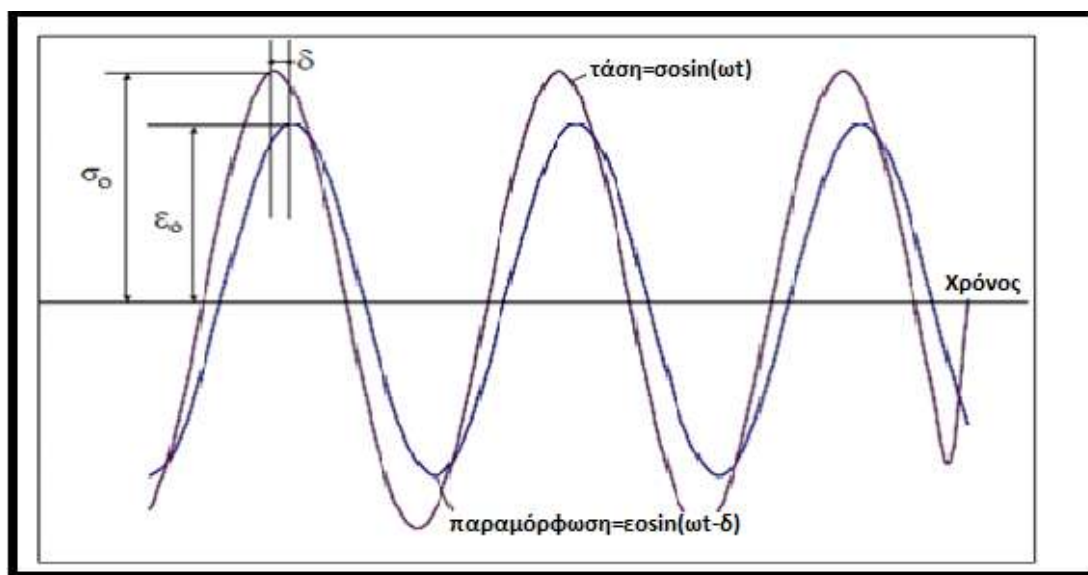
$$t = \frac{1}{f} \quad (4.6)$$

Όπου

ω : γωνιακή συχνότητα (rad/sec)

f: συχνότητα φόρτισης (Hz)

t: χρόνος φόρτισης (sec)



Σχήμα 4.1. Σχέση τάσης- παραμόρφωσης ασφαλτομίγματος υπό ημιτονοειδείς συνθήκες φόρτισης

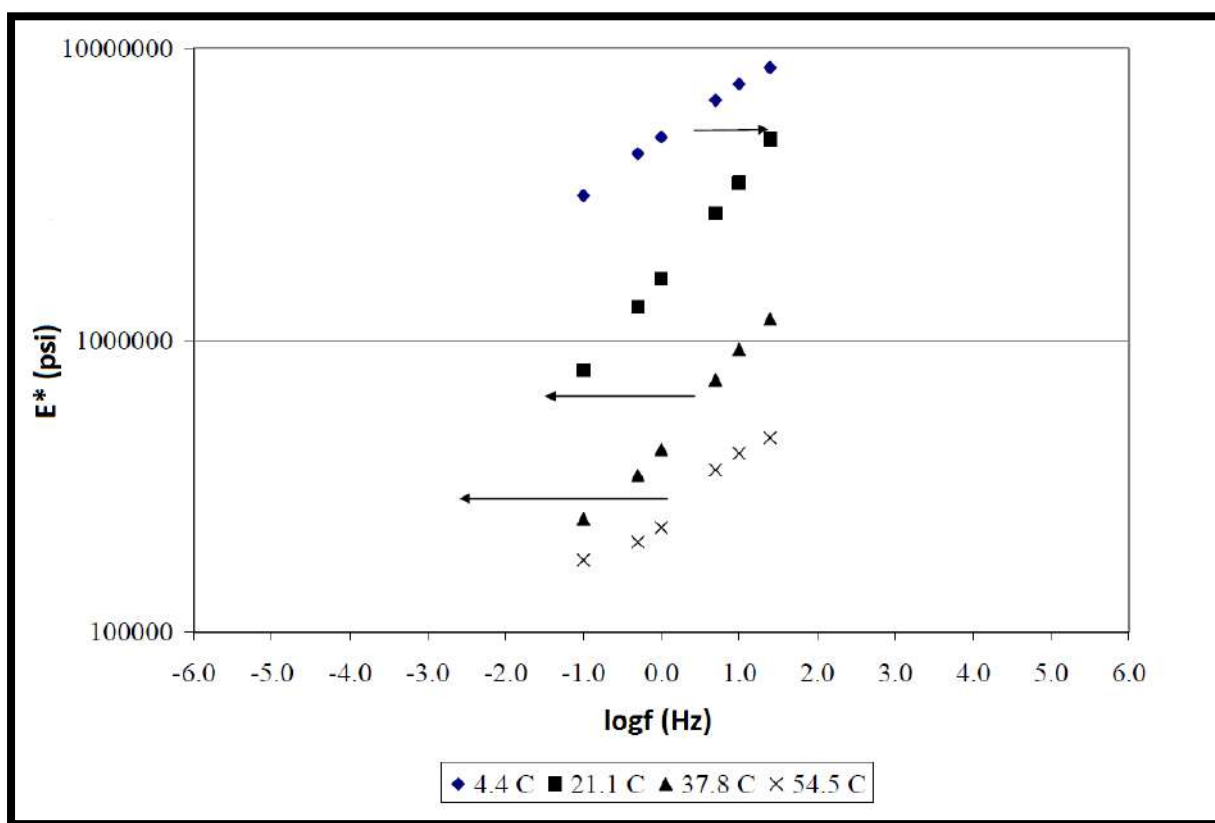
Η γωνία υστέρησης αποτελεί έναν δείκτη της ιξώδους ή της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Για καθαρώς ελαστικά υλικά, η γωνία υστέρησης είναι ίση με μηδέν μοίρες ($\delta=0^\circ$), δηλαδή δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιβολής της μέγιστης τάσης και της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης. Για καθαρώς ιξώδη υλικά, η γωνία υστέρησης είναι ίση με ενεννήντα μοίρες ($\delta=90^\circ$), δηλαδή υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης, όπου η παραμόρφωση υστερεί της τάσης κατά 90° .

4.3 Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης

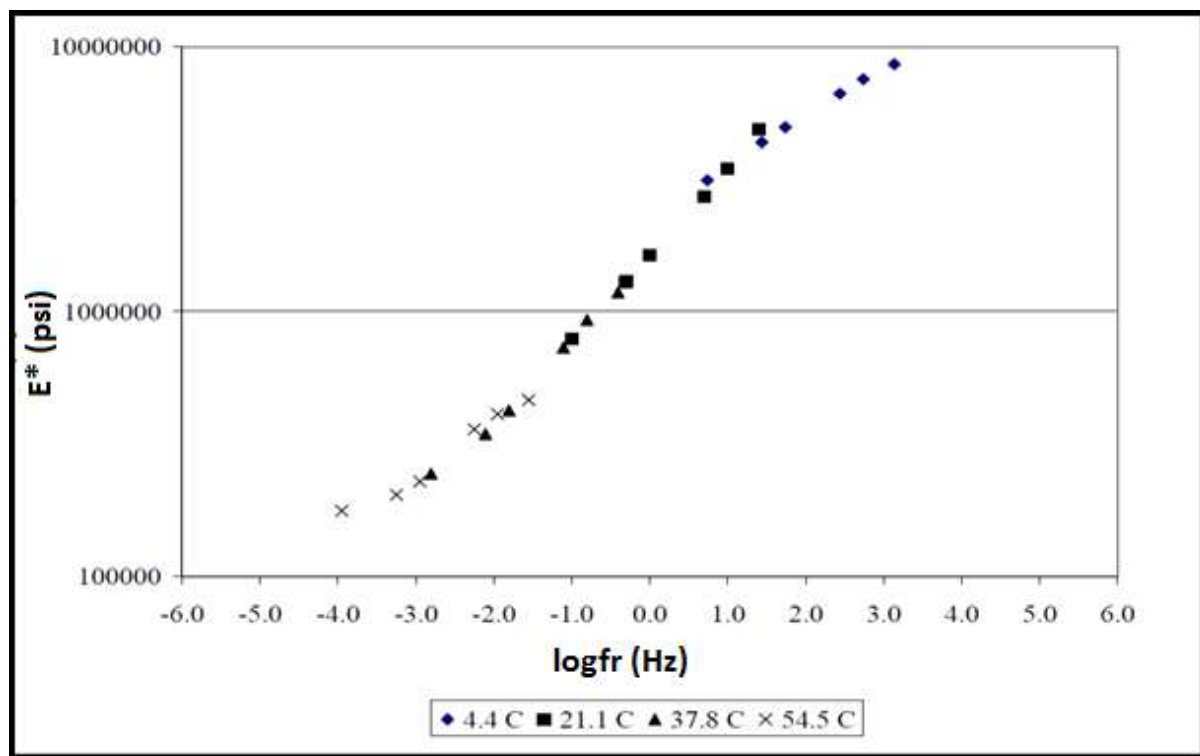
Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, για όλο το φάσμα των θερμοκρασιών και των συχνοτήτων (ή του χρόνου φόρτισης), απεικονίζεται μέσω μιας κεντρικής καμπύλης (master curve), η οποία κατασκευάζεται για μια θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 20°C) (Christensen & Anderson 1992; Bonnaure et al. 1977).

Η κεντρική καμπύλη κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας, η οποία περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων (Pellinen & Witczak 2002). Τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες, μετατοπίζονται ως προς το χρόνο ώστε όλες οι

καμπύλες να συγχωνευτούν σε μια ομαλή ενιαία καμπύλη (κεντρική καμπύλη) (Pellinen & Witczak 2002). Η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, σε συνάρτηση με το χρόνο, εκφράζει τη χρονική εξάρτηση του υλικού. Το μέγεθος της μετατόπισης που απαιτείται σε κάθε θερμοκρασία, προκειμένου να δημιουργηθεί η κεντρική καμπύλη, περιγράφει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του υλικού. Όσο πιο μεγάλο το μέγεθος της μετατόπισης τόσο μεγαλύτερη η εξάρτηση του υλικού από τη θερμοκρασία. Επίσης, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, οι οποίες προκύπτουν για θερμοκρασίες υψηλότερες της θερμοκρασίας αναφοράς μετατοπίζονται οριζόντια κατά τα αριστερά (χαμηλότερες συχνότητες) και οι τιμές που προκύπτουν για θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας αναφοράς μετατοπίζονται προς τα δεξιά (υψηλότερες συχνότητες), ενώ οι τιμές στη θερμοκρασία αναφοράς παραμένουν αμετάβλητες. Στα παρακάτω σχήματα δίνεται ένα παράδειγμα κατασκευής της κεντρικής καμπύλης.



Σχήμα 4.2. Καμπύλες του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για διάφορες θερμοκρασίες



Σχήμα 4.3. Μετατόπιση των δεδομένων για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης

Γενικά, η κεντρική καμπύλη προσομοιώνεται μαθηματικά από μια καμπύλη σιγμοειδούς μορφής και περιγράφεται από την παρακάτω γενική μορφή (Pellinen & Witczak 2002):

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log tr}} \quad (4.7)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

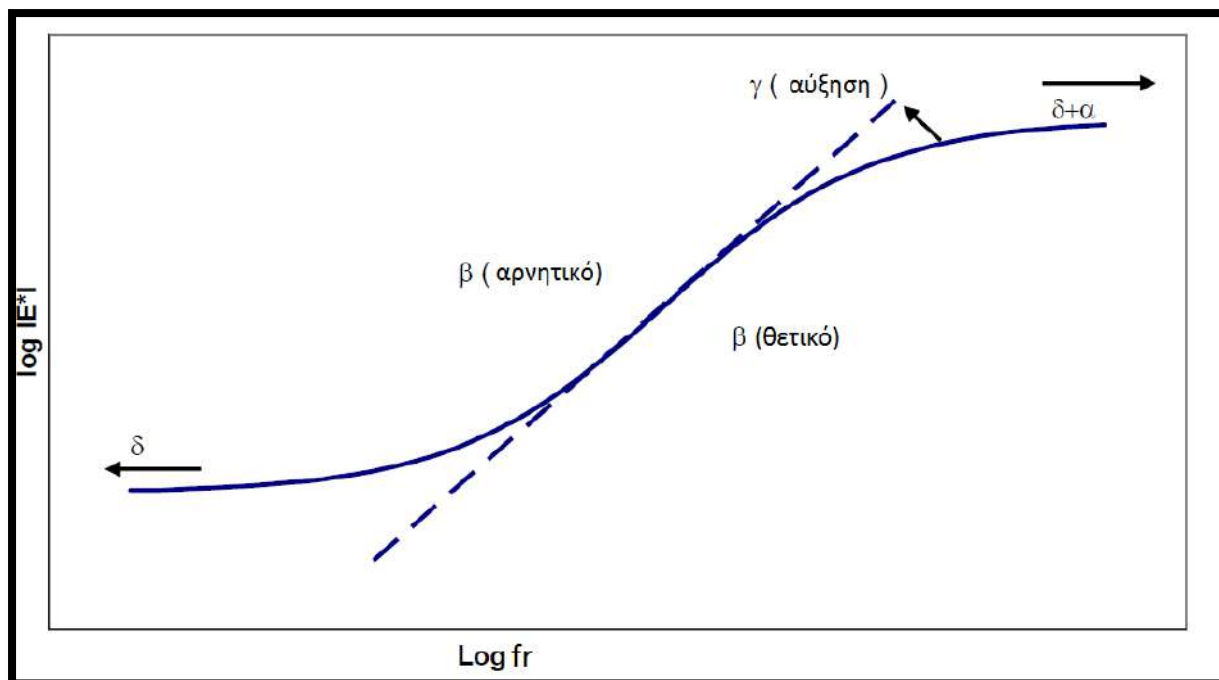
tr : χρόνος φόρτισης στη θερμοκρασία αναφοράς, sec

δ : ελάχιστη τιμή του E^*

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

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

Σε αυτή τη σχέση, η παράμετρος γ επηρεάζει την κλίση της καμπύλης (ρυθμός μεταβολής μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών) και η παράμετρος β , την οριζόντια θέση αλλαγής του καμπυλωτού σημείου. Επιπρόσθετα, οι παράμετροι δ και α εξαρτώνται από την κοκκομετρία των αδρανών, το ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα και το ποσοστό των κενών. Από την άλλη, οι παράμετροι β και γ , εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου και το μέγεθος των δ, α . Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η τυπική μορφή μιας σιγμοειδούς καμπύλης.



Σχήμα 4.4. Μορφή σιγμοειδούς καμπύλης (Pellinen & Witczak 2002)

Η επιλογή της σιγμοειδούς μορφής για την περιγραφή της κεντρικής καμπύλης, βασίζεται στις παρατηρήσεις που αφορούν στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Η ανώτερη περιοχή της σιγμοειδούς καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά τη μέγιστη δυσκαμψία του μίγματος και εξαρτάται από τη δυσκαμψία της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες (Masad & Bahia 2002). Σε υψηλές θερμοκρασίες, η ελαστική συμπεριφορά των αδρανών επηρεάζει περισσότερο τη δυσκαμψία του μίγματος (Birgisson & Roque 2005). Επομένως, η σιγμοειδής καμπύλη αναπαριστά τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων όταν αυτά υπόκεινται σε δοκιμές θλίψης, κυκλικής φόρτισης, για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (Pellinen & Witczak 2002).

Ο παράγοντας μετατόπισης δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha(T) = \frac{t}{t_r} \leftrightarrow \log \alpha(T) = \log t - \log t_r \quad (4.8)$$

Ο παράγοντας μετατόπισης μπορεί επίσης να προκύψει συναρτήσει της συχνότητας φόρτισης μέσω της σχέσης χρόνου-συχνότητας (σχέση 4.6), από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha(T) = \frac{f_r}{f} \leftrightarrow \log \alpha(T) = \log f_r - \log f \quad (4.9)$$

Όπου:

$\alpha(T)$: παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας

t: χρόνος φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία, sec

tr: μειωμένος χρόνος φόρτισης στη θερμοκρασία αναφοράς, sec

f: συχνότητα φόρτισης, Hz

fr: μειωμένη συχνότητα φόρτισης, Hz

T: επιθυμητή θερμοκρασία

Για λόγους ακρίβειας, χρησιμοποιείται μια δευτεροβάθμια εξίσωση, η οποία συνδέει το λογάριθμο του παράγοντα μετατόπισης με τη θερμοκρασία. Η σχέση αυτή περιγράφεται παρακάτω:

$$\log a(T_i) = aT_i^2 + bT_i + c \quad (4.10)$$

Όπου:

a(T_i): παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας T_i

T_i: επιθυμητή θερμοκρασία, Fahrenheit

a,b,c: συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης

4.4 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

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

4.4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιείται μέσω μιας δοκιμής κατά την οποία επιβάλλεται τάση ημιτονοειδούς μορφής σε κυλινδρικό δοκίμιο συγκεκριμένων διαστάσεων, σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Η προκύπτουσα παραμόρφωση του δοκιμίου μετράται μέσω ειδικών αισθητήρων (LVDTs) και στη συνέχεια προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης, για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και χρόνου φόρτισης. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, αναπτύχθηκε αρχικά από τους Coffman & Pagen κατά τη δεκαετία του '60 (Dougan et al. 2003). Έκτοτε, πλήθος μελετών έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με τον εργαστηριακό προσδιορισμό του E* (Papazian 1962; Yeager & Wood 1975; Francken & Partl 1996). Σύμφωνα με αυτές, η καταπόνηση μπορεί να είναι μονοαξονική ή τριαξονική θλιπτικής ή εφελκυστικής μορφής και τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και τη γωνία υστέρησης του ασφαλομίγματος. Συνήθως, έχει επικρατήσει η τάση που επιβάλλεται να είναι θλιπτική

ημιτονοειδούς μορφής, δεδομένου ότι προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος (Witczak & Root 1974).

4.4.2 Αλγόριθμοι προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι αρκετά χρονοβόρος και απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό. Ωστόσο, η εισαγωγή του σαν παράμετρο σχεδιασμού στο MEPDG είναι απαραίτητη στα πλαίσια του σχεδιασμού ενός οδοστρώματος. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι εμπειρικοί ή ημι- εμπειρικοί και βασίζονται κυρίως στη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στις ογκομετρικές ιδιότητες του μίγματος. Οι τρεις πιο πρόσφατοι και ευρέως διαδεδομένοι αλγόριθμοι για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι η εξίσωση Witczak 1-37A, η εξίσωση Witczak 1-40D και το μοντέλο του Hirsch, οι οποίοι αποτελούν μέρος διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.4.2.1 Εξίσωση Witczak 1-37A

Η εξίσωση Witczak 1-37A είναι ένας αλγόριθμος προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το ιξώδες της ασφάλτου, την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και την ογκομετρική σύσταση του ασφαλτομίγματος. Η εξίσωση αυτή προέκυψε με βάση δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε 171 ασφαλτομίγματα με κοινή άσφαλτο και σε 34 ασφαλτομίγματα με τροποποιημένη άσφαλτο (Andrei et al. 1999).

Μέσω της εξίσωσης αυτής δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων για διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Η εξίσωση που περιγράφει τον αλγόριθμο Witczak 1-37A δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\log E^* = 3,750063 + 0,02932 p_{200} - 0,001767 (p_{200})^2 - 0,002841 p_4 - 0,058097 V_a - 0,802208 * \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,871977 - 0,0021 p_4 + 0,003958 p_{38} - 0,000017 (p_{38})^2 + 0,005470 p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 * \log f - 0,393532 * \log \eta)}} \quad (4.11)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

η : ιξώδες της 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, %

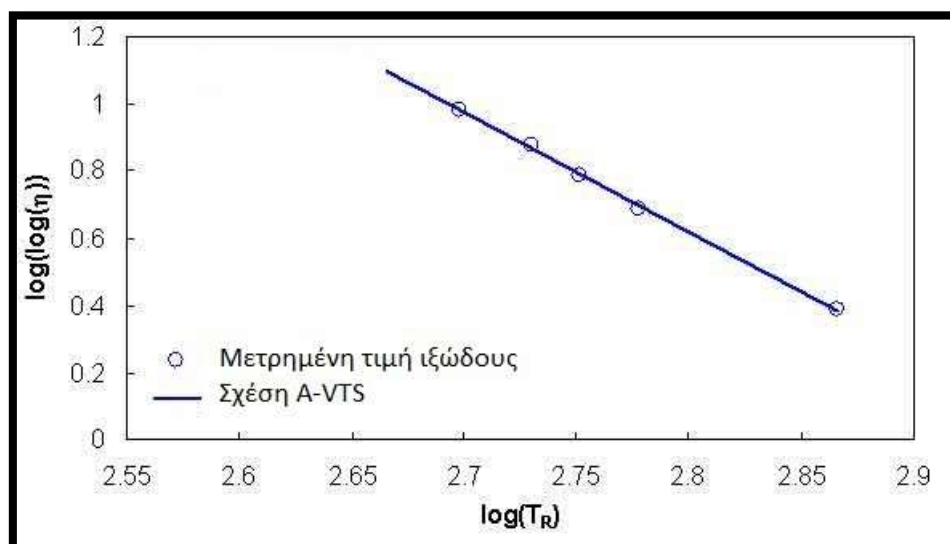
p34: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19mm, %

p38: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 9,5mm, %

p4: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 4,75mm, %

p200: το ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από κόσκινο οπής 0,075mm, %

Το ιξώδες της ασφάλτου, το οποίο υπεισέρχεται στην παραπάνω εξίσωση, περιγράφει την επίδραση της θερμοκρασίας, προσδιορίζεται από μια γραμμική σχέση μεταξύ του διπλού λογαρίθμου του ιξώδους και του λογαρίθμου της θερμοκρασίας (Bari & Witczak 2006). Παρόλο που η σχέση μεταξύ ιξώδους και θερμοκρασίας είναι μη-γραμμική, έχει διαπιστωθεί ότι όταν γίνονται κατάλληλοι μετασχηματισμοί, μπορεί να υπάρξει γραμμική σχέση μεταξύ τους. Αυτή η γραμμική σχέση είναι ευρέως γνωστή ως 'Σχέση A- VTS' και επιτρέπει την εκτίμηση του ιξώδους της ασφάλτου για ένα εύρος θερμοκρασιών. Δίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα και εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση 4.12.



Σχήμα 4.5. Διάγραμμα της σχέσης A- VTS

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS * \log(T_R) \quad (4.12)$$

Όπου:

η = ιξώδες, c P

T_R = θερμοκρασία, βαθμοί Rankine

A= σταθερός όρος της εξίσωσης

VTS= κλίση της καμπύλης

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. Λόγω της γραμμικής σχέσης των A-

VTS, αρκούν δύο μόνο τιμές του ιξώδους ώστε να προσδιοριστούν πλήρως οι παράμετροι. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω εξίσωση δεν περιέχει καθόλου τον παράγοντα συχνότητας, f .

Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατός ο εργαστηριακός προσδιορισμός του ιξώδους της ασφάλτου σε διαφορετικές θερμοκρασίες, η εκτίμησή του μπορεί να γίνει μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής διείσδυσης και της δοκιμής μάλθωσης.

Σύμφωνα με τους Mirza & Witczak (1995), η θερμοκρασία μάλθωσης της ασφάλτου αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες της ασφάλτου είναι ίσο με 13000 Poise. Επίσης, η συσχέτιση του ιξώδους με το δείκτη διεισδυτικότητας, ο οποίος προσδιορίζεται στους 25°C, δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\log \eta = 10,5012 - 2,2601 * \log(\text{Pen}) + 0,00389 * (\log(\text{Pen}))^2 \quad (4.13)$$

Όπου:

η : ιξώδες, Poise

PEN: δείκτης διεισδυτικότητας σε δεδομένη θερμοκρασία, 25°C

Επομένως έχοντας δύο ζεύγη τιμών ιξώδους- θερμοκρασίας, μπορούν να προσδιορισθούν οι συντελεστές A, VTS με γραμμική παλινδρόμηση.

4.4.2.2 Εξίσωση Witczak 1-40D

Με βάση τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αλγορίθμου Witczak 1-37A, αλλά και με αυτά που προέκυψαν από δοκιμές σε επιπλέον δοκίμια (συνολικά 7400 μετρήσεις σε 346 δοκίμια ασφαλομίγματος), αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ο οποίος είναι γνωστός σαν αλγόριθμος Witczak 1-40D (Bari & Witczak 2006). Η εξίσωση που περιγράφει τον αλγόριθμο αυτό είναι η ακόλουθη:

$$\log E^* = -0,349 + 0,754 * (|G^*|_b^{-0,0052}) * \left(6,65 - 0,032p_{200} + 0,0027(p_{200})^2 + 0,011p_4 - 0,0001(p_4)^2 + 0,006p_{38} - 0,00014(p_{38})^2 - 0,08V_a - \frac{1,06V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{2,558 + 0,032V_a + \frac{0,713V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + 0,0124p_{38} - 0,0001(p_{38})^2 - 0,0098p_{34}}{1 + e^{-0,7814 - 0,5785 \log |G^*|_b + 0,8834 \log \delta_b}} \quad (4.14)$$

Όπου:

E^* : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

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

δ_b : γωνία υστέρησης της ασφάλτου το οποίο σχετίζεται με το $|G^*|_b$, μοίρες

V_a : ποσοστό κενών κατ'όγκο ασφαλτομίγματος, %

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

p34: αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19mm, %

p38: αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 9,5mm, %

p4: αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 4,75mm, %

p200: ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από κόσκινο οπής 0,075mm, %

Η βασική διαφορά με τον προγενέστερο αλγόριθμο είναι η εισαγωγή του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας, G^*_b και της γωνίας υστέρησης, δ_b , για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της ασφάλτου, αντί του ιξώδους (η).

Οι λόγοι που οδήγησαν τους Bari και Witczak (2006) στην αναθεώρηση του προηγούμενου μοντέλου ήταν οι ακόλουθοι:

Η εκτίμηση του ιξώδους της ασφάλτου μέσω της σχέσης A-VTS, έχει το μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η επίδραση της συχνότητας (ή χρόνου) φόρτισης στη συμπεριφορά της ασφάλτου. Αντιθέτως, το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης, την περιγράφουν ικανοποιητικά.

Το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου, μπορεί να προσδιορισθεί είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων. Η εξίσωση εκτίμησης του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας, η οποία αναπτύχθηκε από τους Bari & Witczak (2007), δίνεται παρακάτω:

$$|G_b^*| = 0,0051 * f_s * \eta_{fs,T} * (\sin \delta_b)^{7,1542 - 0,4929 f_s + 0,0211 f_s^2} \quad (4.15)$$

Όπου:

$|G^*|_b$: διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας, Pa (όταν $|G^*|_b > 1 \text{ GPa}$, λαμβάνεται $|G^*|_b = 1 \text{ GPa}$)

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

$\eta_{fs,T}$: ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP

δ_b : γωνία υστέρησης, μοίρες

Στην παραπάνω εξίσωση, υπεισέρχεται το ιξώδες της ασφάλτου το οποίο προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\log \log \eta_{fs,T} = A' + VTS' \log T_R \quad (4.16)$$

Όπου:

$\eta_{fs,T}$: Ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP (όταν $\eta_{fs,T} > 3 \cdot 10^{12}$ cP, λαμβάνεται $\eta_{fs,T} = 3 \cdot 10^{12}$ cP)

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

T_R : θερμοκρασία σε βαθμούς Rankine

$$A' = 0,9699 f_s^{-0,0527} \cdot A$$

$$VTS' = 0,9668 f_s^{-0,0575} \cdot VTS$$

Στην εξίσωση 4.16, αντί των συντελεστών A και VTS, λαμβάνονται υπόψη οι μετασχηματισμένοι συντελεστές A' και VTS', ώστε να συμπεριληφθεί η συχνότητα φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τα αρχικά A και VTS με δύο νέους συντελεστές προσαρμογής της συχνότητας, οπότε και προκύπτει η αναλυτική μορφή της εξίσωσης 4.16:

$$\log \log \eta_{fs,T} = 0,9699 f_s^{-0,0527} \cdot A + 0,9668 f_s^{-0,0575} \cdot VTS \cdot \log \left(\frac{T}{T_R} \right) \quad (4.17)$$

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δοκιμές ταλάντωσης (περιστροφική διάτμηση), για τον χαρακτηρισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του ασφαλομίγματος (όπως το G^*_b), ο χρόνος φόρτισης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$t = 1/\omega = 1/2\pi f_s \quad (4.18)$$

Όπου:

ω = γωνιακή συχνότητα, rad/sec

f_s = συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή $|G^*|_b$, Hz

Ο αλγόριθμος για την εκτίμηση της γωνίας υστέρησης, προέκυψε από μη γραμμική βελτιστοποίηση και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta_b = 90 + (-7,3146 - 2,6162 VTS') \cdot \log(f_s \cdot \eta_{fs,T}) + (0,1124 + 0,2029 VTS') \cdot \log \left(\frac{T}{T_R} \right) \cdot \log(f_s \cdot \eta_{fs,T})^2 \quad (4.19)$$

Όπου:

δ_b = γωνία υστέρησης, μοίρες (όταν $\delta_b > 90^\circ$, λαμβάνεται η τιμή $\delta_b = 90^\circ$)

$$VTS' = 0,9668 f_s^{-0,0575}$$

f_s = συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή $|G^*|_b$, Hz

$\eta_{fs,T}$ = ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, cP

4.4.2.3 Αλγόριθμος του Hirsch

Ο αλγόριθμος του Hirsch για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας βασίζεται στο νόμο των μιγμάτων για σύνθετα υλικά (Christensen et al. 2003). Σε αντίθεση με τα παραπάνω δύο μοντέλα, στον αλγόριθμο του Hirsch υπεισέρχονται λιγότερες παράμετροι. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, E^* , προσδιορίζεται απευθείας μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας, $|G^*|_b$, των κενών μεταξύ των αδρανών (VMA) και των κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο (VFA).

Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε κυρίως λόγω της ανάγκης ανάλυσης της επίδρασης των κενών αέρα, των κενών μεταξύ των αδρανών και άλλων ογκομετρικών ιδιοτήτων στις ιδιότητες του E^* (Christensen et al. 2003). Παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα στην πιο απλή μορφή, και παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$E^*_{mix} = P_c * \left(4200000 * \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 * |G^*|_b * \frac{VFA * VMA}{10000} \right) + \frac{(1-P_c)}{\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3 * |G^*|_b * VFA}} \quad (4.20)$$

$$P_c = \frac{(20 + 3 * |G^*|_b * \frac{VFA}{VMA})^{0.58}}{650 + (3 * |G^*|_b * \frac{VFA}{VMA})^{0.58}} \quad (4.21)$$

Όπου:

E^*_{mix} = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

P_c = συντελεστής επαφής των αδρανών

VMA= ποσοστό κενών μεταξύ των αδρανών, %

VFA= ποσοστό κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο, %

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του ασφαλτομίγματος, εκπροσωπείται μερικώς από τον συντελεστή επαφής των αδρανών, P_c . Υψηλές τιμές του P_c σχετίζονται με υψηλή δυσκαμψία και αντοχή του ασφαλτομίγματος (σε χαμηλές θερμοκρασίες), ενώ χαμηλές τιμές του P_c χαρακτηρίζει ασφαλτομίγματα με χαμηλή αντοχή και δυσκαμψία (σε υψηλές θερμοκρασίες) (Christensen et al. 2003).

5 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.1 Γενικά

Στο πλαίσιο διερεύνησης της εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο οκτώ συνολικά κυλινδρικά δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης A265 τύπου B σύμφωνα με τις Π.Τ.Π. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μίγματα ασφαλτομίγματος (το κάθε μίγμα χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή τεσσάρων δοκιμίων), τα οποία διέφεραν κυρίως ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου. Τα δοκίμια του ίδιου μίγματος διαφοροποιούνταν επιπλέον ως προς το περιεχόμενο ποσοστό κενών αέρα. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω κατάλληλης συμπύκνωσης. Η συμπύκνωση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη γυροσκοπική μέθοδο. Τα δοκίμια 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. Επίσης, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, εκτιμήθηκε μέσω της εφαρμογής αλγορίθμων.

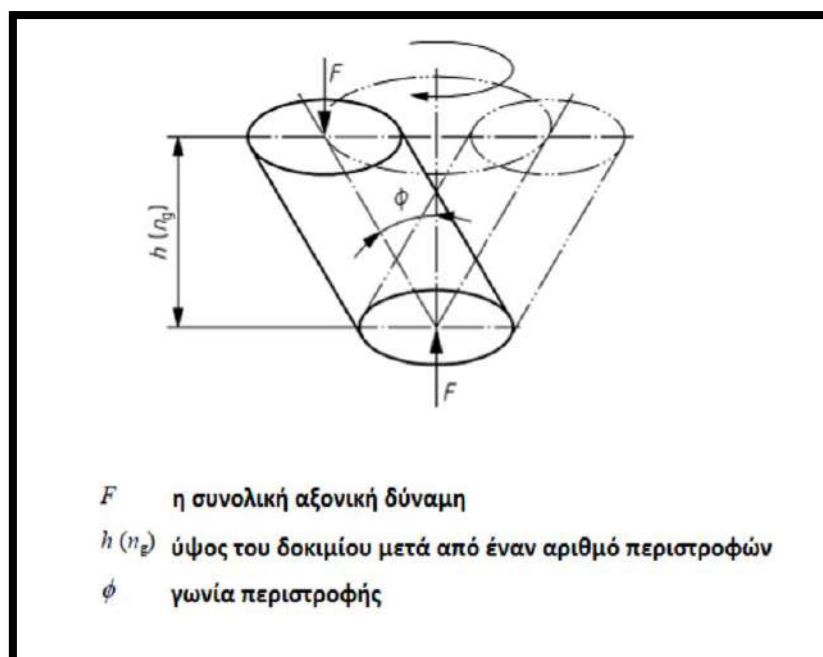
5.2 Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο

Η παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε μέσω της συμπύκνωσης του ασφαλτομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο. Η γυροσκοπική μέθοδος είναι διεθνώς η πλέον ενδεδειγμένη για τη συμπύκνωση δοκιμίων, τα οποία πρόκειται να υποβληθούν σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Η παρασκευή δοκιμίων με την υπόψη μέθοδο έγινε σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 12697-31 2007), χρησιμοποιώντας το γυροσκοπικό συμπίεστή (εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1. Γυροσκοπικός συμπιεστής (Gyratory Compactor)

Η συμπίκνωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας κάθετης δύναμης (συνήθως 600kPa) μέσω μεταλλικών πλακών στο πάνω μέρος γνωστής μάζας ασφαλτομίγματος, η οποία είναι τοποθετημένη μέσα σε ένα καλούπι (μεταλλική μήτρα) διαμέτρου 100 ή 150 ή 160mm. Ο διαμήκης άξονας της μεταλλικής μήτρας περιστρέφεται με σταθερή γωνία ως προς την κατακόρυφο, ενώ οι μεταλλικές πλάκες παραμένουν παράλληλες και οριζόντιες. Κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, τόσο το ύψος του δοκιμίου, όσο και η πυκνότητα και το ποσοστό κενών του δείγματος, υπολογίζονται αυτόματα. Μέσω κατάλληλου λογισμικού, δίνεται η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου συμπίκνωσης, η οποία πραγματοποιείται είτε για προκαθορισμένο αριθμό περιστροφών είτε για προκαθορισμένη πυκνότητα μίγματος, και κατ' επέκταση ποσοστού κενών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σχηματικά η βασική αρχή λειτουργίας της συμπίκνωσης με τη γυροσκοπική μέθοδο.



Σχήμα 5.1. Διάγραμμα περιστροφής του δοκιμίου με τη γυροσκοπική μέθοδο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τη γυροσκοπική μέθοδο παρασκευάστηκαν δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων και πυκνότητας. Αρχικά, το ασφαλτόμιγμα καθώς επίσης οι μεταλλικές πλάκες και η μεταλλική μήτρα, τοποθετήθηκαν για τουλάχιστον δύο ώρες μέσα σε φούρνο, σε θερμοκρασία 130°C . Κατ' αυτό το τρόπο, το ασφαλτόμιγμα έγινε εργάσιμο και επιπλέον απέκτησε περίπου ίδια θερμοκρασία με τη μήτρα, ώστε να ελαττωθεί η απώλεια θερμότητας κατά τη μετέπειτα εισαγωγή του σε αυτή. Μετά την εξαγωγή τους από το φούρνο, το εσωτερικό της μήτρας και οι πλάκες λιπάνθηκαν με μια επικάλυψη γράσου σιλικόνης. Στη συνέχεια, ασφαλτόμιγμα μάζας περίπου 7- 7,5kg, τοποθετήθηκε μέσα στη μήτρα διαμέτρου 150mm και ύψους 200mm.

Κατόπιν, η μήτρα με το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε στο γυροσκοπικό συμπιεστή για την έναρξη της συμπίκνωσης. Η συμπίκνωση ολοκληρώθηκε όταν επιτεύχθηκε η επιθυμητή πυκνότητα καθώς και το απαιτούμενο ύψος του δοκιμίου (170mm). Το διαφορετικό ποσοστό κενών σε κάθε δοκίμιο, προέκυψε με κατάλληλη προσαρμογή των κύκλων περιστροφής (gyrations).

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη συμπίκνωση των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο, το ποσοστό των κενών δεν είναι ομοιόμορφο. Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς που επιβάλλουν τα τοιχώματα της μήτρας και οι μεταλλικές πλάκες. Επομένως, σύμφωνα με τα πρότυπα για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία με ειδικό μηχάνημα (καροταρία) από το κέντρο του δοκιμίου και στη συνέχεια κόπηκαν καθ' ύψος με ειδικό τροχό. Στις παρακάτω εικόνες, δίνεται η μορφή του δοκιμίου που προκύπτει από τη γυροσκοπική μέθοδο και εκείνο από την απόσπαση καρότου από το εσωτερικό του.



Εικόνα 5.2. Μορφή δοκιμίου από τη γυροσκοπική μέθοδο και μορφή δοκιμίου μετά την απόσπαση καρδίου από το εσωτερικό του.

Τα δοκίμια που τελικά προέκυψαν είχαν διάμετρο 100mm και ύψος 150mm. Οι διαστάσεις αυτές είναι οι πρότυπες διαστάσεις που θα πρέπει να έχουν τα δοκίμια τα οποία υποβάλλονται σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (AASHTO 2011). Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.3 Δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης A265B- Μίγμα Α

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Α, έγινε σύμφωνα με τη Π.Τ.Π. Α265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, ενώ η ασφαλτος που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου 50/70. Τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά ασφάλτου 50/70 μίγματος Α

Δοκιμή	Αποτελέσματα	Μονάδες	Μεθοδολογία
Εισδυτικότητα στους 25°C	58	Pen	ASTM D5
Σημείο μάλθωσης	49,5	C	ASTM D36

Το ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου ήταν 4,3% κατά βάρος ασφαλτομίγματος.

Παρασκευάστηκαν συνολικά τέσσερα δοκίμια τύπου A265B μίγματος Α, τα οποία περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα. Η κωδικοποίηση των δοκιμών καθώς και το ποσοστό των κενών παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

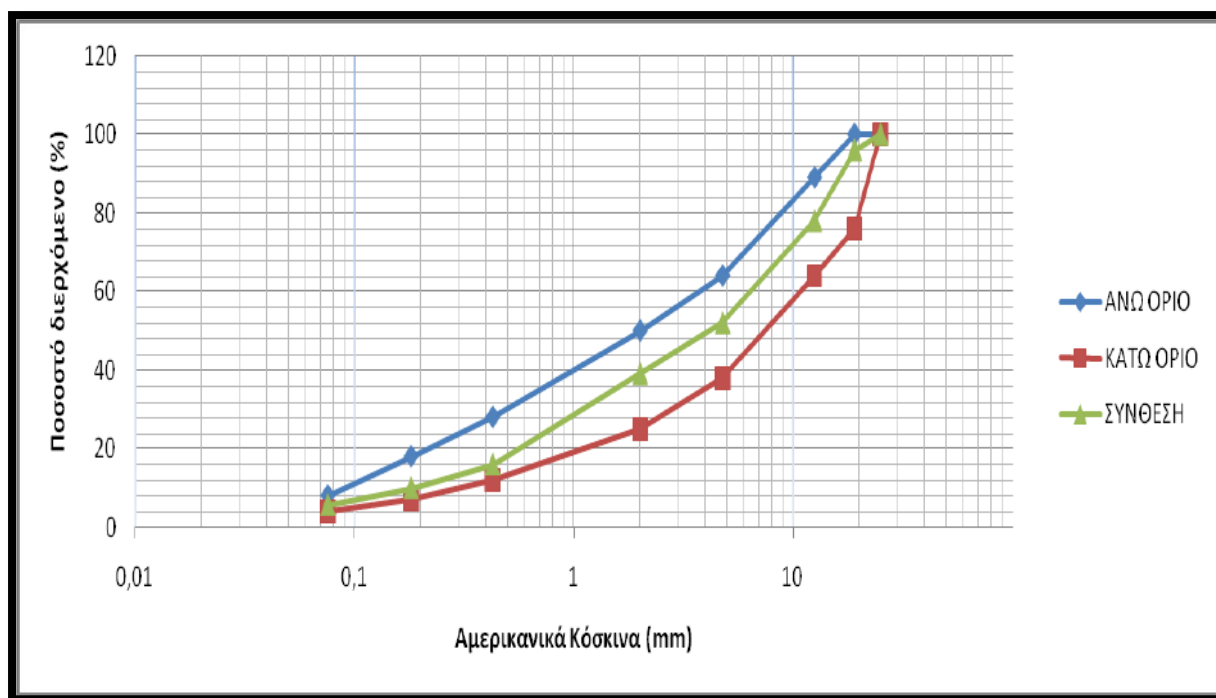
Πίνακας 5.2. Κωδικοποίηση δοκιμών
και ποσοστό κενών αέρα μίγματος Α

Κωδικός δοκιμίου Μίγμα Α	Ποσοστό κενών αέρα, %
T2	7,5
T6	2,7
T7	4,1
T8	6

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του υπόψη μίγματος και στο σχήμα η αντίστοιχη καμπύλη με τα όρια των προδιαγραφών.

Πίνακας 5.3. Κοκκομετρική ανάλυση
ασφαλτομίγματος A265B μίγματος Α

Κόσκινα (mm)	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
	Διερχόμενο %		
25	100	100	100
19	76	96	100
12.5	64	78	89
4.75	38	52	64
2	25	39	50
0.425	12	16	28
0.18	7	10	18
0.075	4	5.7	8



Σχήμα 5.2. Κοκκομετρική καμπύλη Π.Τ.Π. A265B μίγματος Α

5.4 Δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης A265B- Μίγμα Β

Η μελέτη σύνθεσης των δοκιμίων της ισοπεδωτικής στρώσης του μίγματος Β, πραγματοποιήθηκε επίσης σύμφωνα με τη Π.Τ.Π. A265. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, ενώ η ασφάλτος που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου 50/70. Τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.4. Χαρακτηριστικά ασφάλτου 50/70 μίγματος Β

Δοκιμή	Αποτελέσματα	Μονάδες	Μεθοδολογία
Εισδυτικότητα στους 25°C	62	Pen	ASTM D5
Σημείο μάλθωσης	46,7	C	ASTM D36

Το ποσοστό της ασφάλτου κατά βάρος ασφαλτομίγματος ήταν 4,3%.

Παρασκευάστηκαν συνολικά τέσσερα δοκίμια τύπου A265B μίγματος Β, τα οποία περιείχαν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα. Η κωδικοποίηση των δοκιμίων καθώς και το ποσοστό των κενών παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

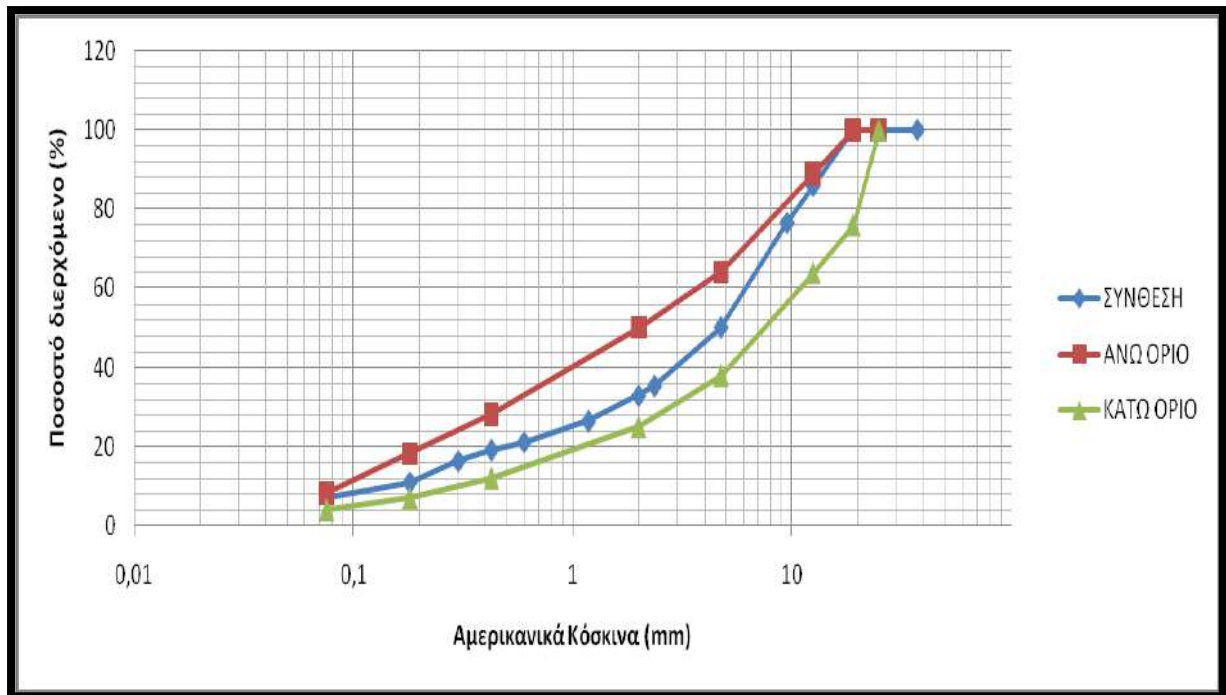
Πίνακας 5.5. Κωδικοποίηση δοκιμών
και ποσοστό κενών αέρα μίγματος Β

Κωδικός δοκιμίου Μίγμα Β	Ποσοστό κενών αέρα, %
Λ2	4,55
Λ3	2,12
Λ4	1,34
Λ5	5,45

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του υπόψη μίγματος και στο σχήμα η αντίστοιχη καμπύλη με τα όρια των προδιαγραφών.

Πίνακας 5.6. Κοκκομετρική ανάλυση ασφαλτομίγματος
Α265Β μίγματος Β

Κόσκινα		Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
		Διερχόμενο %		
No	mm			
1.5	37		100	
1	25	100	100	100
3/4	19	76	100	100
1/2	12.5	64	85.8	89
3/8	9.5		76.5	
No4	4.75	38	50.1	64
No8	2.36		35.3	
No10	2	25	32.8	50
No16	1.18		26.4	
No30	0.6		21.1	
No40	0.425	12	19.1	28
No50	0.3		16.3	
No70	0.212			
No80	0.18	7	10.9	18
No100	0.15			
No200	0.075	4	7	8



Σχήμα 5.3. Κοκκομετρική καμπύλη Π.Τ.Π. Α265Β μίγματος Β

6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

6.1 Γενικά

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ με κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, ήταν σύμφωνες με τα ευρωπαϊκά και αμερικανικά πρότυπα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών αέρα και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, εφαρμόζοντας τους αλγορίθμους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4, εκτιμήθηκαν τα αντίστοιχα δυναμικά μέτρα δυσκαμψίας.

6.2 Προσδιορισμός κενών

Για το προσδιορισμό του ποσοστού των κενών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο, απαραίτητα στοιχεία ήταν το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος και το φαινόμενο ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος. Για το προσδιορισμό του πρώτου πραγματοποιήθηκε η δοκιμή Rice, ενώ για το προσδιορισμό του δεύτερου εφαρμόστηκαν οι σχετικές μεθοδολογίες που αναφέρονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα.

6.2.1 Προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους

Ο προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους ενός μη συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (χαλαρό ασφαλτόμιγμα), πραγματοποιήθηκε με τη δοκιμή Rice, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 12697-05+A1 2007). Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, ποσότητα δείγματος από το ασφαλτόμιγμα μεγαλύτερη των 1500gr, η οποία είχε προηγουμένως θερμανθεί ώστε να αποβληθεί η υγρασία, διαχωρίστηκε με τα χέρια έτσι ώστε το μέγιστο μέγεθος κόκκου να είναι μικρότερο από 6mm. Στη συνέχεια, αφέθηκε να κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου και τοποθετήθηκε σε πυκνόμετρο γνωστής μάζας όπου προσδιορίστηκε το βάρος του μίγματος (A) και αφού προστέθηκε στο πυκνόμετρο νερό θερμοκρασίας 25°C μέχρι να καλυφθεί όλο το υλικό, σφραγίστηκε με το ειδικό καπάκι της συσκευής και τέθηκε σε λειτουργία για 15 περίπου λεπτά. Η συσκευή αφαιρεί τον αέρα από το πυκνόμετρο και συγχρόνως δονείται με αποτέλεσμα το νερό να εισχωρεί στα κενά του μίγματος παίρνοντας τη θέση του αέρα, ο οποίος με τη μορφή φυσαλίδων βγαίνει από το νερό και αφαιρείται από το χώρο του δοχείου λόγω του κενού που έχει εφαρμοστεί στο πυκνόμετρο, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται μια υπολειμματική πίεση μικρότερη των 4kPa. Μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας της συσκευής αφαιρέθηκε από αυτή το δοχείο, στο οποίο προστέθηκε νερό θερμοκρασίας 25°C μέχρι να γεμίσει. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη προσθήκη του νερού ώστε να μην δημιουργηθούν φυσαλίδες αέρα. Το πυκνόμετρο σφραγίστηκε με ένα ειδικό καπάκι προσέχοντας να μην παγιδευτεί αέρας μέσα στο δοχείο.

Σκουπίστηκε εξωτερικά για να αφαιρεθεί κάθε ίχνος νερού και τοποθετήθηκε στη ζυγαριά, όπου καταγράφηκε το βάρος του πυκνομέτρου, μίγματος και νερού (Ε). Τέλος, καθαρίστηκε το πυκνόμετρο και αφού πληρώθηκε με νερό θερμοκρασίας 25°C, σφραγίστηκε όπως αναφέρθηκε παραπάνω και ζυγίστηκε καταγράφοντας το βάρος του πυκνομέτρου και νερού (Β). Το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος υπολογίστηκε από τον παρακάτω τύπο:

$$G_{mm} = A / (A + B - E) \quad (6.1)$$

Όπου:

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

A: βάρος δείγματος στον αέρα, g

B: βάρος πυκνομέτρου και νερού, g

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

6.2.2 Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 12697-6+A1 2007). Αρχικά, τα δοκίμια καθαρίστηκαν επιφανειακά από ξένες ουσίες και στη συνέχεια αφέθηκαν να ξηρανθούν σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 25°C). Έπειτα ζυγίστηκαν στον αέρα, με κατάλληλη ζυγαριά επαρκούς δυνατότητας και ακρίβειας τουλάχιστον 0,1g, για να προσδιορισθεί η μάζα τους (m_1).

Στη συνέχεια, κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε σε ένα διχτυωτό καλάθι, έτσι ώστε να επιτρέπεται ελεύθερα η κυκλοφορία του νερού γύρω από το δοκίμιο και ύστερα βυθίστηκε σε λουτρό νερού, θερμοκρασίας 25°C. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού πραγματοποιείται με ειδικό θερμόμετρο. Ο όγκος του λουτρού πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσιος του όγκου του δοκιμίου, για τη πλήρη κάλυψή του, όπως προτείνεται από τα πρότυπα. Η πειραματική διάταξη του υδρόλουτρου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.1. Πειραματική διάταξη υδρόλουτρου

Το δοκίμιο παρέμεινε μέσα στο λουτρό ώστε να κορεσθεί για περίπου μισή ώρα. Με το πέρας των τριάντα λεπτών, και προσέχοντας να μην υπάρχουν φυσαλίδες στην επιφάνεια του δοκιμίου, καταγράφηκε η ένδειξη του βάρους της ζυγαριάς, η οποία χαρακτηρίζεται ως βάρος δοκιμίου στο νερό (m_2).

Κατόπιν, το δοκίμιο απομακρύνθηκε από το νερό, σκουπίστηκε γρήγορα επιφανειακά με υγρή απορροφητική πετσέτα και ζυγίστηκε. Το βάρος αυτό χαρακτηρίζεται ως βάρος κορεσμένου δοκιμίου στο νερό (m_3). Από τη διαφορά του ($m_3 - m_2$) προκύπτει ο όγκος του δοκιμίου, οπότε το φαινόμενο ειδικό βάρος προσδιορίστηκε από τη παρακάτω σχέση.

$$G_{mb} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (6.2)$$

Όπου:

G_{mb} : 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), $997,1 \text{ kg/m}^3$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους και του φαινόμενου ειδικού βάρους των δοκιμών φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.1. Μέγιστο θεωρητικό ειδικό
βάρος και Φ.Ε.Β. ασφαλτομίγματος

Κωδικός δοκιμίου	G _{mb} , kg/m ³	G _{mm} , kg/m ³
T2	2315	2503
T6	2435	2503
T7	2400	2503
T8	2353	2503
Λ2	2351	2463
Λ3	2411	2463
Λ4	2430	2463
Λ5	2329	2463

Τα παραπάνω στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για περαιτέρω υπολογισμούς.

6.2.3 Υπολογισμός κενών

Κατόπιν του προσδιορισμού των δύο παραπάνω μεγεθών, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός των κενών.

Το ποσοστό κενών αέρος του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (EN 12697-8 2003):

$$PAV = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (6.3)$$

Όπου

PAV: ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, %

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

G_{mb}: φαινόμενο ειδικό βάρος συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, kg/m³

Τα κενά στο σκελετό των αδρανών VMA, τα οποία ορίζονται ως ο όγκος που καταλαμβάνουν τα κενά αέρος και ο όγκος που καταλαμβάνει η άσφαλτος, υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$VMA = PAV + V_{eff} = 100 - \frac{(G_{mb} * P_s)}{G_{sb}} \quad (6.4)$$

Όπου

PAV: ποσοστό κενών αέρα ασφαλτομίγματος, %

V_{eff} : όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου στο δοκίμιο, που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του φαινόμενου ειδικού βάρους των δοκιμών με το ποσοστό περιεκτικότητας ασφάλτου κατά βάρος ασφαλτομίγματος διαιρούμενο με το ειδικό βάρος της ασφάλτου, %

G_{mb} : το φαινόμενο ειδικό βάρος του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, kg/m^3

P_s : το ποσοστό των περιεχόμενων αδρανών κατά βάρος ασφαλτομίγματος, %

G_{sb} : το φαινόμενο μικτό ειδικό βάρος των αδρανών, kg/m^3

Το ποσοστό κενών που πληρώθηκαν με άσφαλτο, VFA, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$VFA = 100 * \frac{V_{eff}}{VMA} = \frac{VMA - PAV}{VMA} * 100 = VMA - PAV \quad (6.5)$$

Όπου

VFA: ποσοστό των κενών που πληρώθηκαν με άσφαλτο, %

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

VMA: ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών, %

PAV: ποσοστό κενών αέρα στο ασφαλτόμιγμα, %

Το ποσοστό των κενών για κάθε δοκίμιο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.2. Ποσοστό κενών δοκιμών

Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος	Κωδικός δοκιμίου							
	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	T2	T6	T7	T8
PAV, %	4,55	2,12	1,34	5,45	7,5	2,7	4,1	6
VMA, %	14,54	12,38	11,67	15,35	17,30	13,01	14,26	15,96
VFA, %	68,75	82,84	88,54	64,52	56,65	79,25	71,25	62,41

6.3 Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

6.3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας όλων των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο T3 42-11 (AASHTO 2011) χρησιμοποιώντας τη συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester). Το σύστημα της δοκιμής αποτελείται από το ένα έμβολο επιβολής του φορτίου, ένα θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας και ένα σύστημα μέτρησης και εξαγωγής των αποτελεσμάτων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Μέσω του εμβόλου, επιβάλλεται μια ελεγχόμενη θλιπτική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής. Το έμβολο μπορεί να εφαρμόσει τάση μέχρι 2800kPa για ένα εύρος συχνοτήτων από 0,1 έως 25Hz. Ο θάλαμος ελέγχου της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των δοκιμών, στην οποία θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή, έτσι ώστε η

διαφορά μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας του δοκιμίου και της θερμοκρασίας του θαλάμου να μην είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη των $0,4^{\circ}\text{C}$. Ο θάλαμος έχει τη δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου της θερμοκρασίας των δοκιμίων για ένα εύρος θερμοκρασιών από -10 έως 60°C . Το σύστημα είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε με ειδικό λογισμικό να καταγράφεται το χρονικό ιστορικό των τάσεων και παραμορφώσεων, και στη συνέχεια να υπολογίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης.

Η δοκιμή διεξήχθη σε πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες $4, 15, 20, 25$ και 37°C , σε συχνότητες φόρτισης $0.1, 0.5, 1, 5, 10$ και 25 Hz για κάθε θερμοκρασία. Επομένως κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε για τους τριάντα συνδυασμούς θερμοκρασίας- συχνότητας φόρτισης, ξεκινώντας από τις χαμηλότερες προς τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Η δοκιμή σε μια δεδομένη θερμοκρασία, πραγματοποιήθηκε ξεκινώντας από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη συχνότητα φόρτισης. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στη θερμοκρασία των -10°C (η οποία ορίζεται στο πρότυπο) δεν πραγματοποιήθηκε, εξαιτίας της συγκέντρωσης υγρασίας μέσα στο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας και τη δημιουργία πάγου (Bonaquist 2008). Επίσης, ούτε στη θερμοκρασία των 54°C πραγματοποιήθηκε η δοκιμή λόγω σημαντικής απώλειας της θερμοκρασίας των δοκιμίων κατά τη προετοιμασία τους για τη διεξαγωγή της δοκιμής.

Στο στάδιο προετοιμασίας του δοκιμίου, προσαρτήθηκαν τέσσερις μεταλλικές βάσεις σε προκαθορισμένες αποστάσεις. Οι βάσεις αυτές αρχικά τοποθετήθηκαν σε ειδική συσκευή, η οποία τις συγκρατούσε με μαγνήτη. Στη συνέχεια, απαλείφθηκαν με ειδική κόλλα και τοποθετήθηκε το δοκίμιο πάνω στη συσκευή, η οποία συγκρατούσε τις μεταλλικές βάσεις σε επαφή με το δοκίμιο. Στις μεταλλικές αυτές βάσεις θα τοποθετηθούν αισθητήρες καταγραφής των παραμορφώσεων. Στη παρακάτω εικόνα φαίνεται η ειδική συσκευή προσάρτησης των μεταλλικών βάσεων στο δοκίμιο.



Εικόνα 6.2. Ειδική συσκευή προσάρτησης μεταλλικών βάσεων στο δοκίμιο

Μετά τη πάροδο ορισμένου χρόνου (μίας ώρας περίπου), και αφού οι μεταλλικές βάσεις είχαν προσαρτηθεί στο δοκίμιο, τοποθετήθηκε στο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας, όπου και αφέθηκε μέχρι η θερμοκρασία του να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Στον θάλαμο τοποθετήθηκε επίσης ένα δοκίμιο ελέγχου, στο κέντρο του οποίου είναι τοποθετημένο ειδικό θερμόμετρο, έτσι ώστε να ελέγχεται η εσωτερική θερμοκρασία των δοκιμίων. Οι συνιστώμενοι χρόνοι που το δοκίμιο αφήνεται στον θάλαμο ώστε να επέλθει ισορροπία μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής θερμοκρασίας, δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.3. Συνιστώμενοι χρόνοι παραμονής δοκιμίου στον περιβαλλοντικό 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 νύχτα	Όλη νύχτα
4	Όλη νύχτα	4 ώρες ή Όλη νύχτα
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Όταν το δοκίμιο απέκτησε την επιθυμητή θερμοκρασία στην οποία θα πραγματοποιούνταν η δοκιμή, τοποθετήθηκαν στο πάνω και στο κάτω μέρος του κυλινδρικές πλάκες από ανοξείδωτο αλουμίνιο υψηλής αντοχής, διαστάσεων $104,5 \pm 5 \text{ mm}$. Μεταξύ των πλακών φόρτισης και των άκρων του δοκιμίου, προστέθηκαν επίσης ειδικές μεμβράνες επικαλυμμένες με γράσο σιλικόνης, ώστε να μειωθούν οι τριβές και να αποφευχθεί η εμφάνιση διατμητικών τάσεων στην οριζόντια διαμετρική επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια το σύστημα δοκιμίου- πλακών- μεμβρανών, τοποθετήθηκε και ευθυγραμμίστηκε ως προς το έμβολο εφαρμογής του φορτίου, ώστε να αποφευχθεί η έκκεντρη φόρτιση. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν, μεταξύ των μεταλλικών προσαρτημένων στο δοκίμιο βάσεων, ειδικοί αισθητήρες (LVDTs), οι οποίοι καταγράφουν τις μονοαξονικές παραμορφώσεις κατά την εκτέλεση της δοκιμής.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής.



Εικόνα 6.3. Πειραματική διάταξη δοκιμής

Στη συνέχεια, ασκήθηκε στο δοκίμιο ημιτονοειδής φόρτιση με κυκλικό τρόπο. Το δυναμικό φορτίο προσαρμόστηκε ώστε οι μονοαξονικές παραμορφώσεις να κυμαίνονται μεταξύ 50 και 150 microstrain και οι παραμένουσες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από 1500 microstrains. Το μέγεθος του δυναμικού φορτίου εξαρτάται από τη δυσκαμψία του δοκιμίου και κυμαίνεται από 15 έως 2800kPa. Μεγαλύτερο φορτίο είναι απαραίτητο σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τα τυπικά όρια των τιμών της δυναμικής φόρτισης για κάθε θερμοκρασία, καθώς και τις τιμές που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 6.4. Τιμές δυναμικής φόρτισης.

Θερμοκρασία, °C	ΔΟΚΙΜΙΑ								Όρια τιμών
	T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	
4	1000	1300	1000	1300	1200	1200	1200	1200	700-1400
15	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
20	600	600	600	600	600	600	600	600	350-700
25	350	350	350	350	350	350	350	350	
37	200	200	200	200	200	200	200	200	140-250

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε ξεκινώντας από τη χαμηλότερη προς την υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή από τους 4 στους 37°C. Σε κάθε θερμοκρασία, εφαρμόστηκε η φόρτιση από την υψηλότερη στη χαμηλότερη συχνότητα, δηλαδή από 25 σε 0,1Hz. Στην αρχή κάθε δοκιμής, έγινε προφόρτιση του δοκιμίου στα 25 Hz με διακόσιους

κύκλους φόρτισης. Η φόρτιση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα δεδομένα του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.5. Αριθμός κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα.

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

Το ειδικό λογισμικό αποθηκεύει τα στοιχεία των πέντε τελευταίων κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα και κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Στο πίνακα Π1 του παραρτήματος περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για όλα τα δοκίμια.

6.3.2 Εκτίμηση δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων

6.3.2.1 Αλγόριθμος Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A, χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των οκτώ δοκιμίων, για πέντε θερμοκρασίες (4, 15, 20, 25, 37°C) και επτά συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 Hz). Για την ενεργοποίηση του αλγορίθμου απαραίτητα ήταν τα ακόλουθα στοιχεία: η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, το ποσοστό των κενών, το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα και το ιξώδες της ασφάλτου.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση και το ποσοστό των κενών έχουν ήδη προσδιορισθεί, ενώ το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου του ασφαλτομίγματος προσδιορίσθηκε μέσω κατάλληλης σχέσης. Το ιξώδες της ασφάλτου, εκτιμήθηκε μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής διείσδυσης και της δοκιμής μάλθωσης. Το ιξώδες της ασφάλτου εκτιμήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης, δηλαδή το δείκτη PEN στους 25°C, γι' αυτή τη θερμοκρασία από την εξίσωση 4.13. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θερμοκρασία μάλθωσης της ασφάλτου, αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες της ασφάλτου είναι ίσο με 1300000cP. Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων A, VTS της εξίσωσης 4.12 προσδιορίσθηκαν με γραμμική παλινδρόμηση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών των παραμέτρων A, VTS.

Πίνακας 6.6. Παράμετροι A και VTS

Κωδικός δοκιμίου	A	VTS
Λ2, Λ3, Λ4, Λ5	13,55	-4,627
T2, T6, T7, T8	12,43	-4,213

Οι παράμετροι A και VTS αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες της ασφάλτου, επομένως οι τιμές τους και οι αντίστοιχες τιμές του ιξώδους σε κάθε θερμοκρασία είναι ίδιες για κάθε δοκίμιο του ίδιου μίγματος. Τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου του κάθε μίγματος δόθηκαν στους πίνακες 5.1 και 5.4.

Στο πίνακα Π2 του παραρτήματος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξίσωσης του Witczak 1-37A για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης.

6.3.2.2 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμίων, για θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C και συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25Hz. Για την ενεργοποίηση του αλγορίθμου απαραίτητα ήταν τα ακόλουθα στοιχεία: η κοκκομετρική διαβάθμιση των μιγμάτων, το ποσοστό των κενών και το ποσοστό του όγκου ενεργής ασφάλτου στο ασφαλτόμιγμα. Επιπλέον, σε αυτό τον αλγόριθμο εισάγεται το διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης ως αντικατάσταση του ιξώδους. Η εκτίμηση του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας έγινε μέσω της εξίσωσης 4.15, για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης. Προκειμένου να προκύψουν οι τιμές του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας, υπολογίστηκαν οι τιμές του ιξώδους και της γωνίας υστέρησης της ασφάλτου από τις σχέσεις 4.16- 4.19. Τα αποτελέσματα των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το κάθε δοκίμιο, για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας- συχνότητας φόρτισης παρουσιάζονται στο πίνακα Π3 του παραρτήματος.

6.3.2.3 Αλγόριθμος Hirsch

Για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω του αλγορίθμου του Hirsch, απαραίτητα στοιχεία ήταν: το ποσοστό κενών των αδρανών VMA (σχέση 6.4), το ποσοστό των κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλο VFA (σχέση 6.5), ο συντελεστής επαφής των αδρανών, P_c (σχέση 4.21) και του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας όπως προσδιορίστηκε και στον αλγόριθμο Witczak 1-40D. Οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν τελικά από τον αλγόριθμο Hirsch, για θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C και συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25Hz, παρουσιάζονται στον πίνακα Π4 του παραρτήματος.

7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

7.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων που προέκυψαν από τις μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν και περιγράφηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με την εφαρμογή αλγορίθμων. Η υπόψη διερεύνηση επιτεύχθηκε μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και εκείνων που προέκυψαν από τους αλγορίθμους πρόβλεψης.

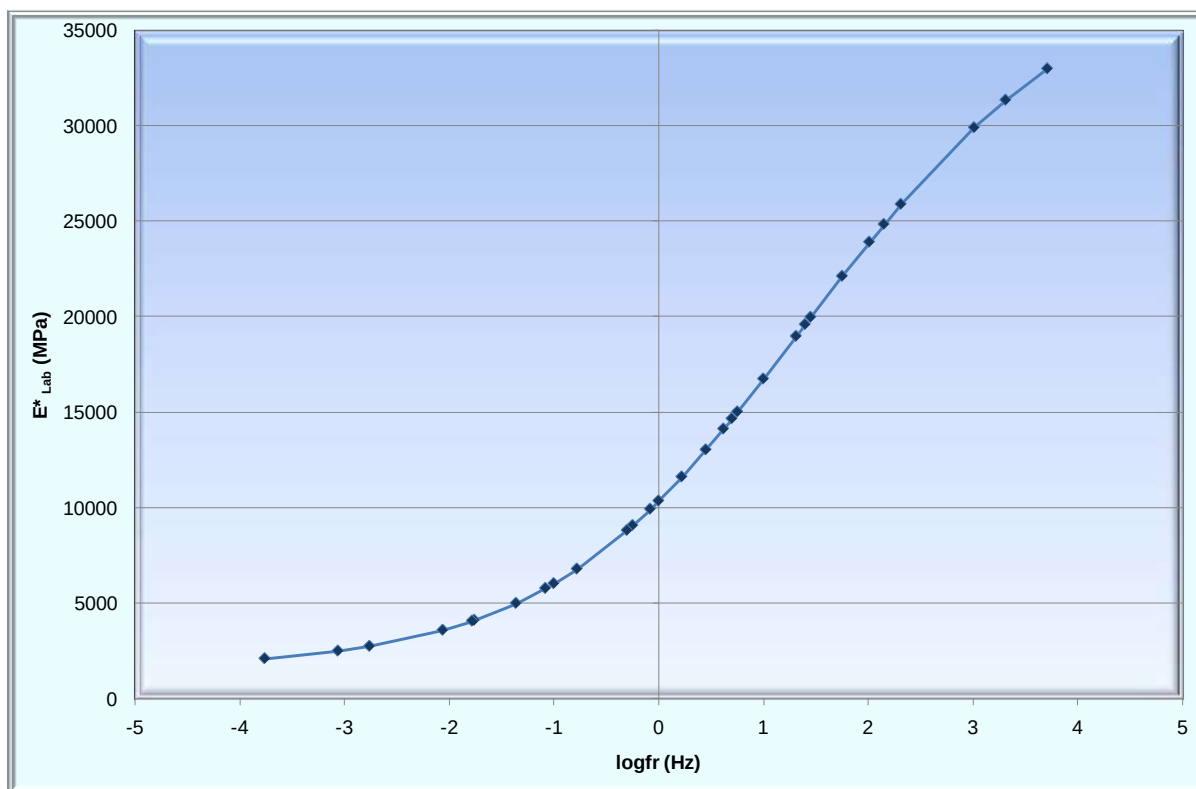
7.2 Κεντρικές καμπύλες (Master Curves)

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας κάθε δοκιμίου, απεικονίστηκε μέσω της κεντρικής καμπύλης, για όλο το φάσμα των θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Οι κεντρικές καμπύλες προέκυψαν χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας χρόνου – θερμοκρασίας, για θερμοκρασία αναφοράς 20°C. Η ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης επιτεύχθηκε προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τους τέσσερις συντελεστές της σιγμοειδούς καμπύλης ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$) όπως περιγράφηκε στην εξίσωση 4.7 και τους τρεις συντελεστές του πολυωνύμου (a, b, c) των παραγόντων μετατόπισης, όπως αυτοί περιγράφηκαν στην εξίσωση 4.10. Για τη ταυτόχρονη επίλυση των παραπάνω επτά παραμέτρων έγινε μη- γραμμική παλινδρόμηση με την εφαρμογή Solver του Excel. Τα αποτελέσματα του Solver δίνονται για κάθε δοκίμιο στους αντίστοιχους πίνακες του παραρτήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για κάθε μέθοδο προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για κάθε δοκίμιο.

7.2.1 Αποτελέσματα εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (E*lab)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, κατασκευάστηκαν για κάθε δοκίμιο οι κεντρικές καμπύλες, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο Λ2.

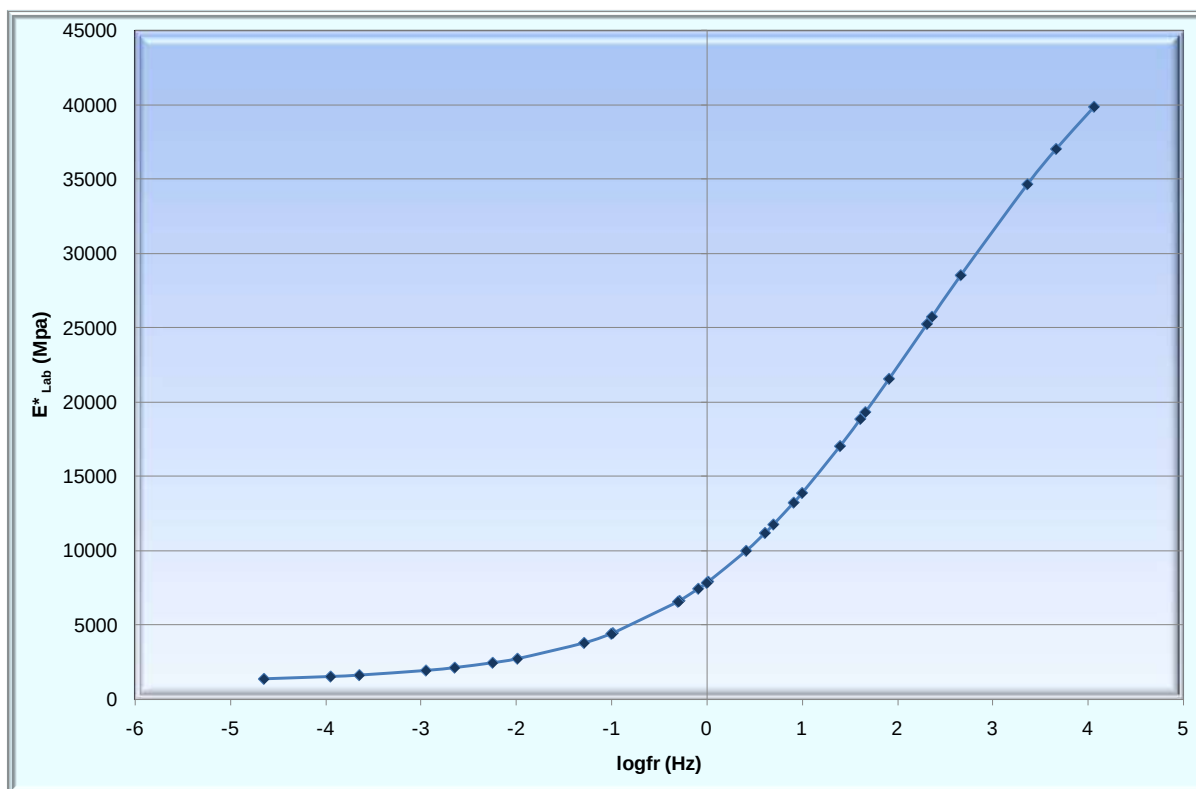


Σχήμα 7.1. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκίμιου Λ2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,332482773 + \frac{1,426228699}{1 + e^{-0,372544869 + 0,664798316 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.1)$$

Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο Λ3.

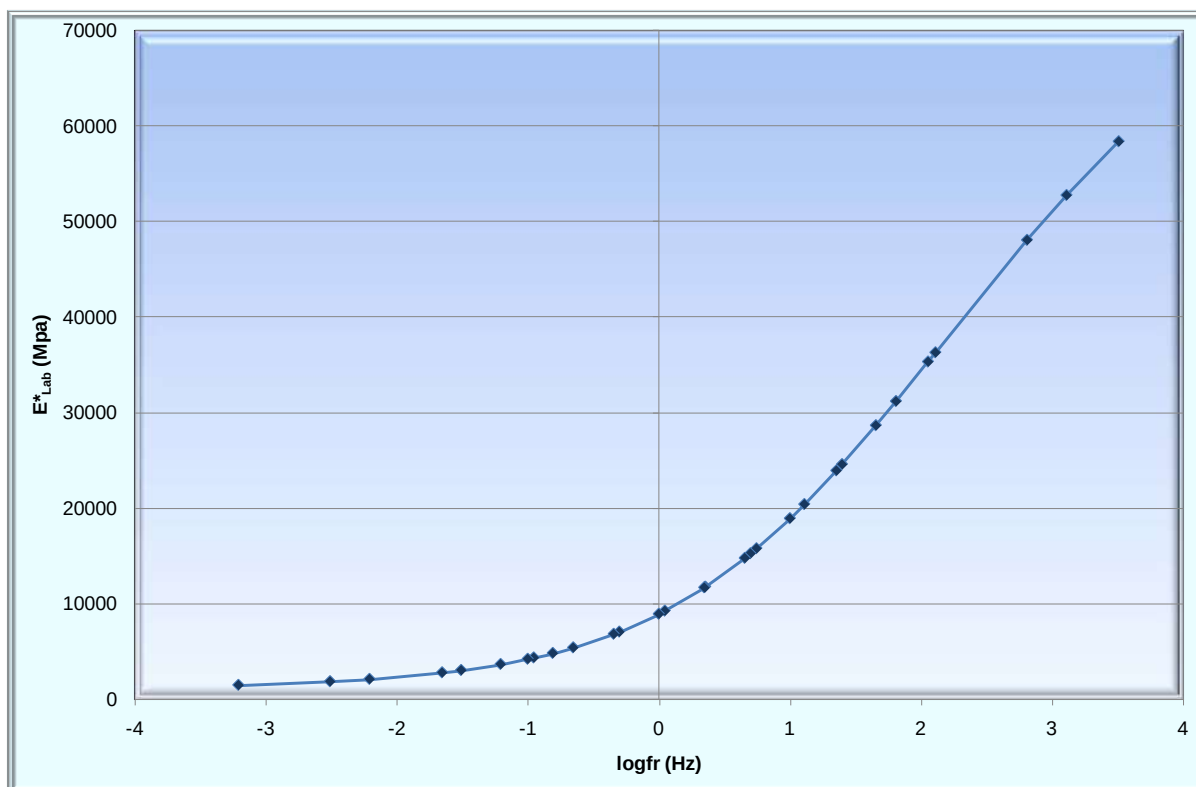


Σχήμα 7.2. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου Λ3

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,200482773 + \frac{1,691322769}{1 + e^{-0,021666946 + 0,607158743 \cdot \log fr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.2)$$

Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο Λ4.

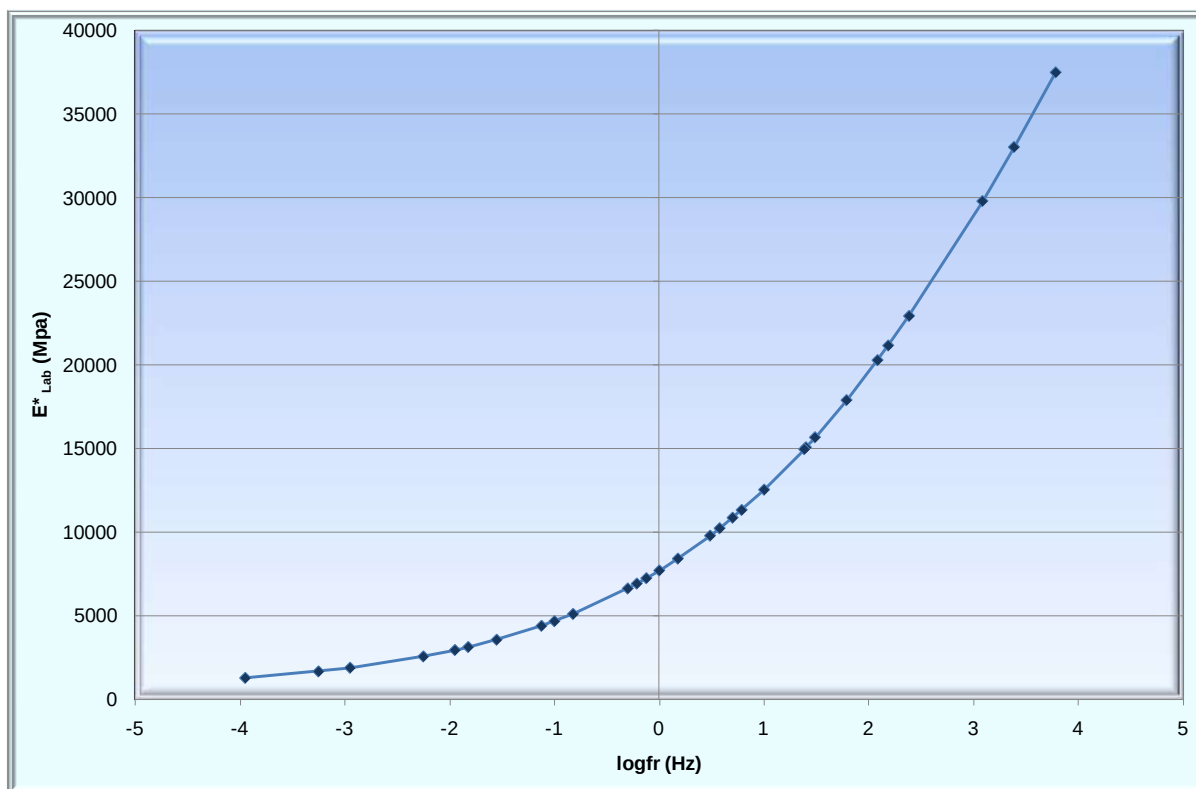


Σχήμα 7.3. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου Λ4

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,134386701 + \frac{1,94567538}{1 + e^{-0,006944281 + 0,701190778 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.3)$$

Στο σχήμα 7.4 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο Λ5.

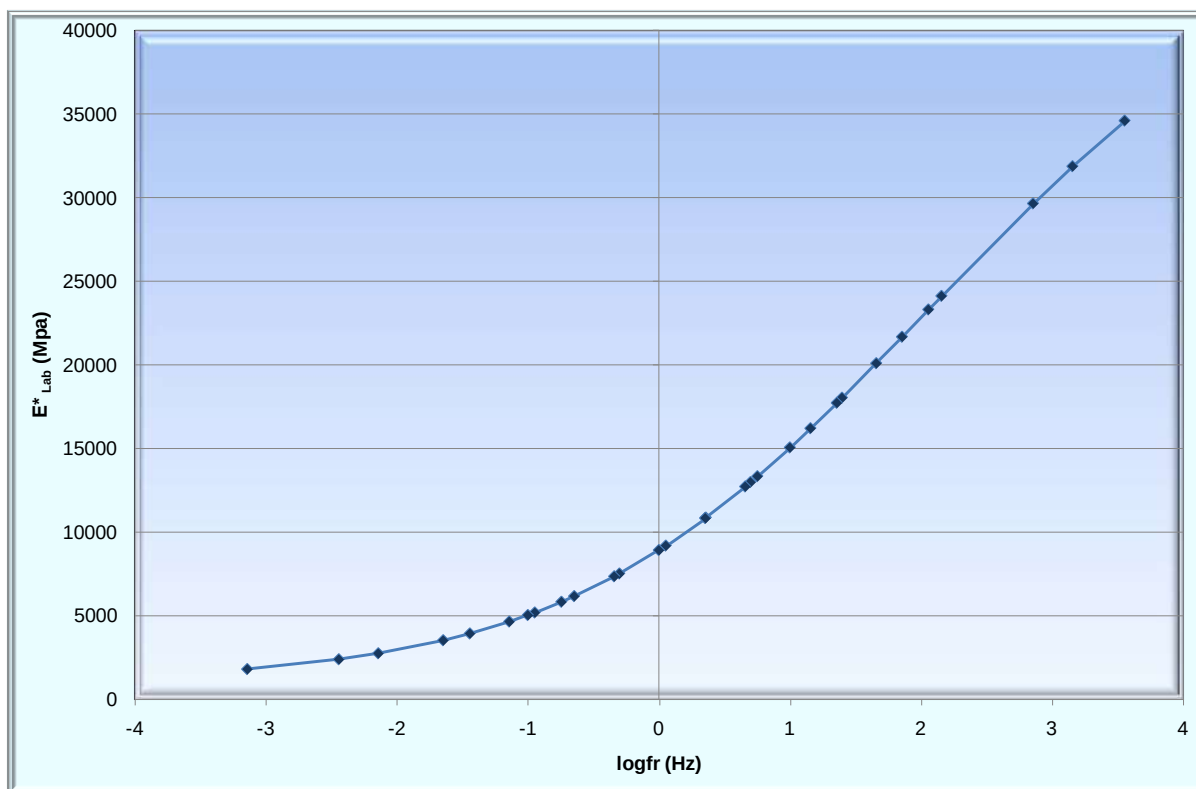


Σχήμα 7.4. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου Λ5

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 4,686635504 + \frac{2,520770992}{1 + e^{-0,160435489 + 0,345744858 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.4)$$

Στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο T2.

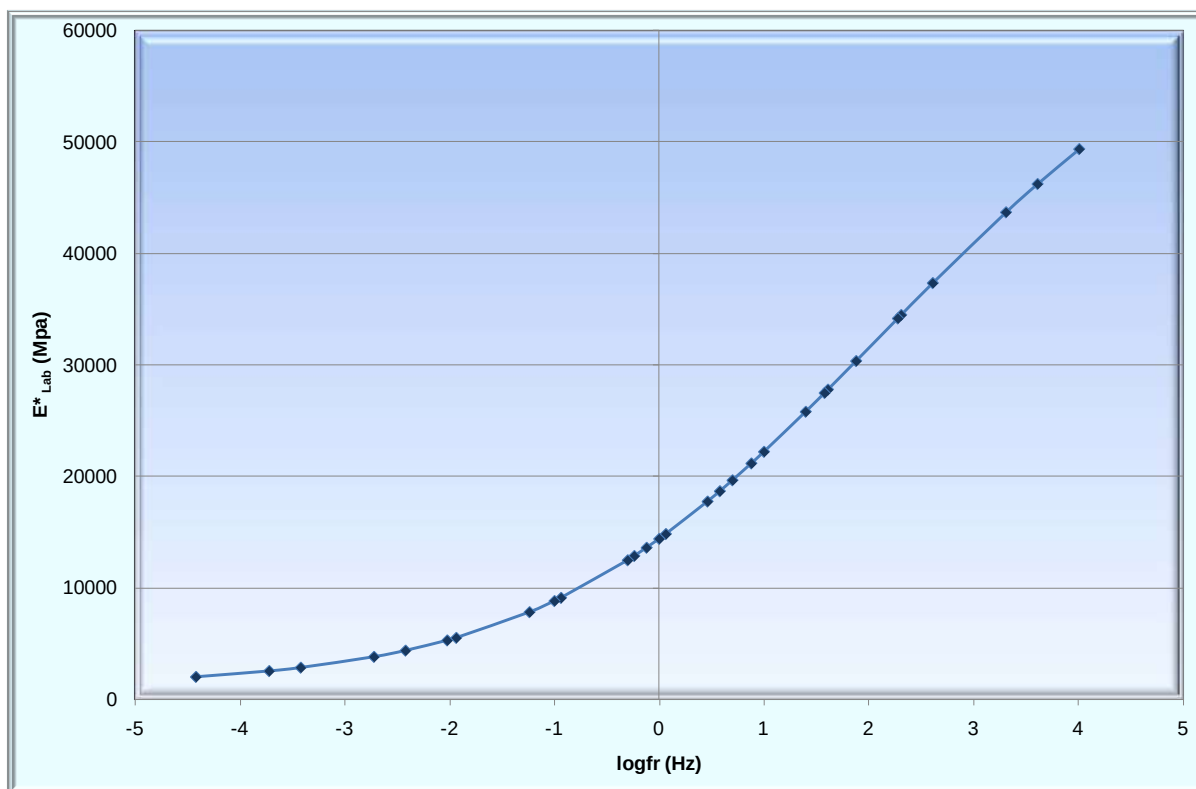


Σχήμα 7.5. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου T2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,071592634 + \frac{1,789503711}{1 + e^{-0,327583476 + 0,559265208 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.5)$$

Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο T6.

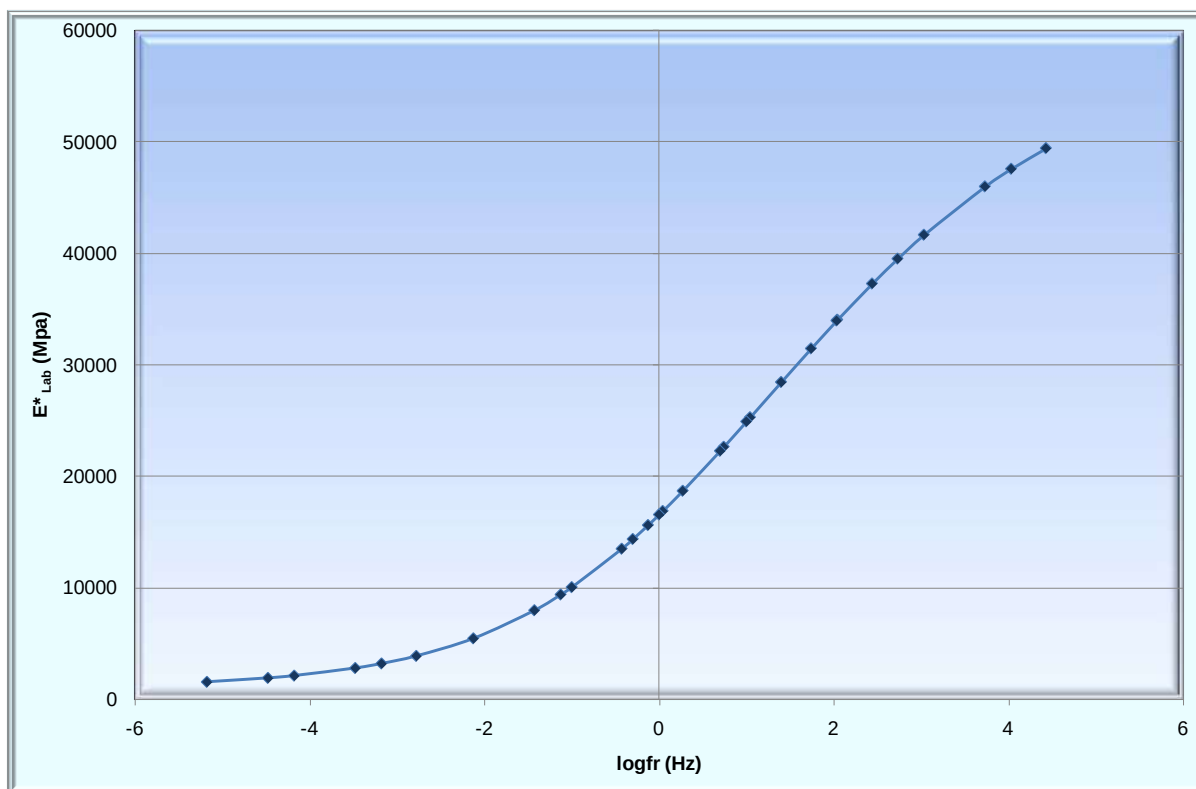


Σχήμα 7.6. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου T6

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,112748022 + \frac{1,897823981}{1 + e^{-0,556884302 + 0,463360118 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.6)$$

Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο T7.

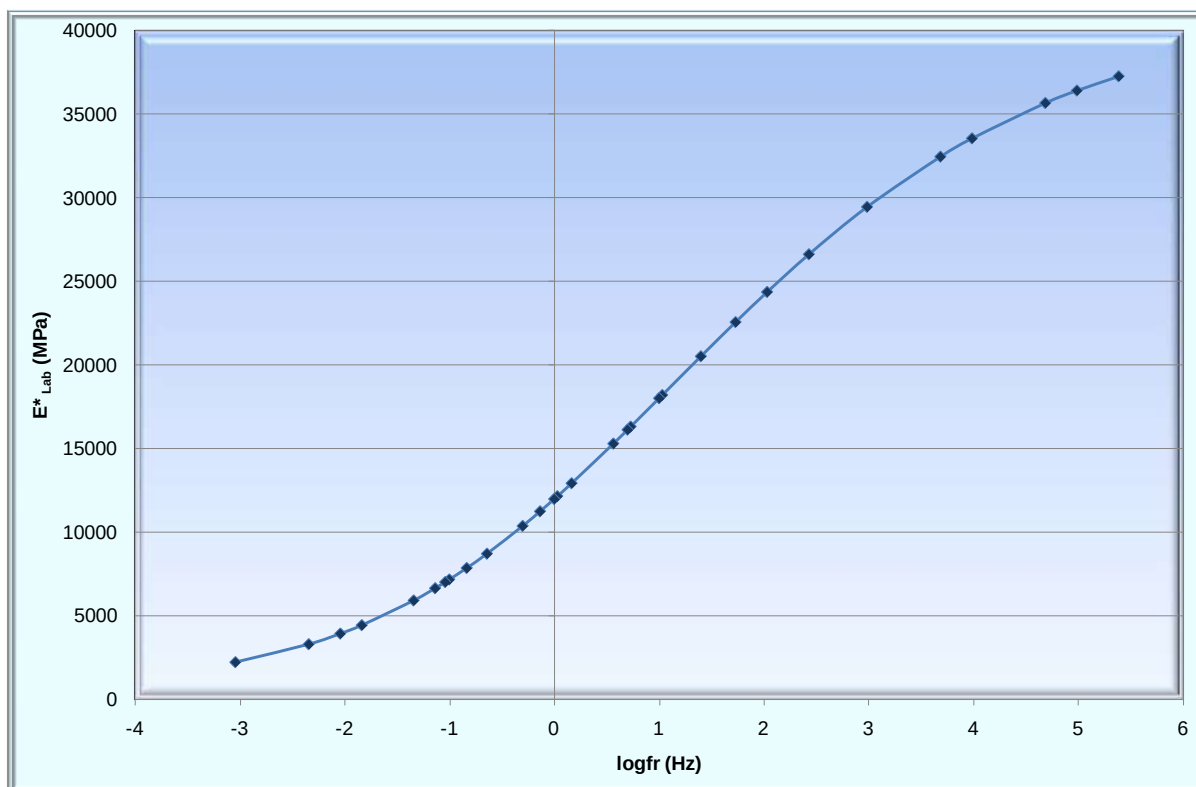


Σχήμα 7.7. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου T7

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{lab} = 5,097205584 + \frac{1,834668194}{1 + e^{-0,845645859 + 0,517994768 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.7)$$

Στο σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 7.8. Κεντρική καμπύλη E^*_{lab} δοκιμίου T8

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

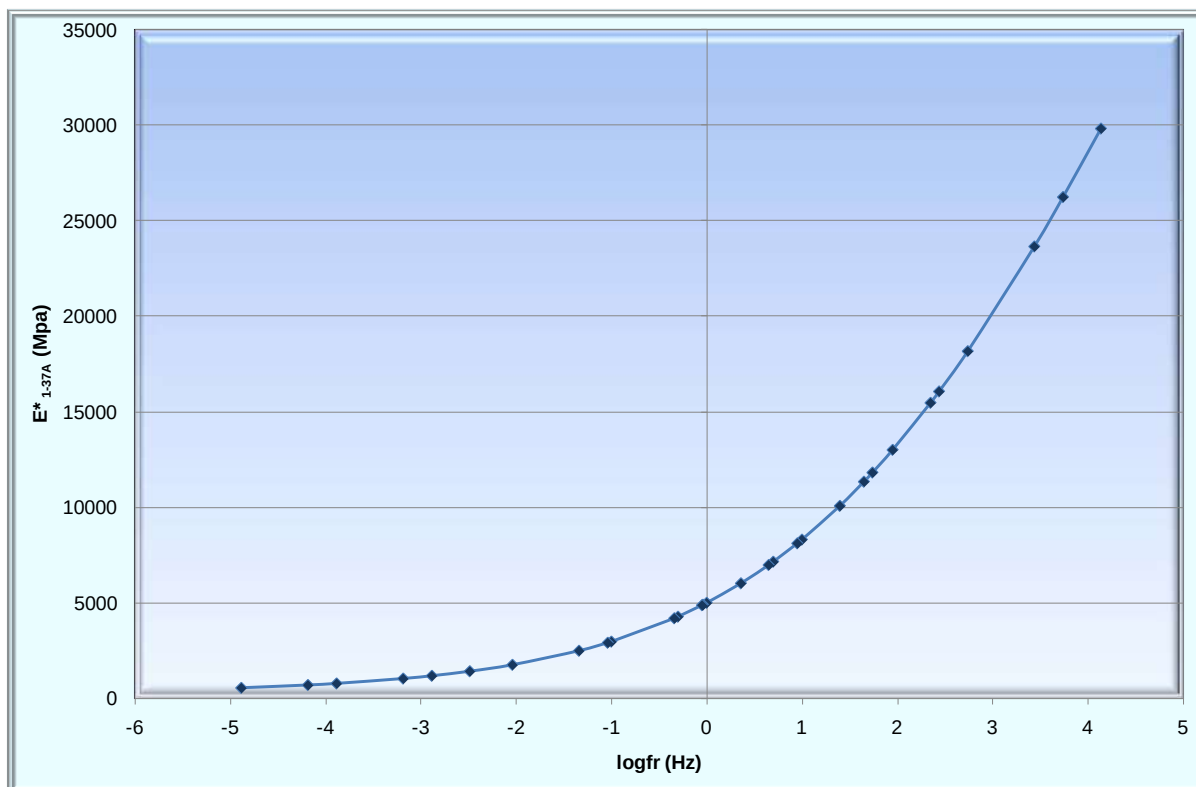
$$\log E^*_{lab} = 4,775563495 + \frac{2,00261498}{1 + e^{-0,999242303 + 0,513312644 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.8)$$

Στον πίνακα Π5 του παραρτήματος, παρατίθενται τα ενδιάμεσα στάδια υπολογισμού της ανάπτυξης των κεντρικών καμπυλών. Όσον αφορά στους παράγοντες μετατόπισης, όπως ήταν αναμενόμενο, για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας αναφοράς (20°C), οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι θετικές (μετατόπιση προς τα δεξιά), ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας αναφοράς, οι τιμές τους είναι αρνητικές (μετατόπιση προς τα αριστερά). Τέλος, η μετατόπιση στη θερμοκρασία αναφοράς είναι μηδενική.

7.2.2 Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Witczak 1-37A (E^*_{1-37A})

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου Witczak 1-37A, κατασκευάστηκαν για κάθε δοκίμιο οι κεντρικές καμπύλες, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο Λ2.

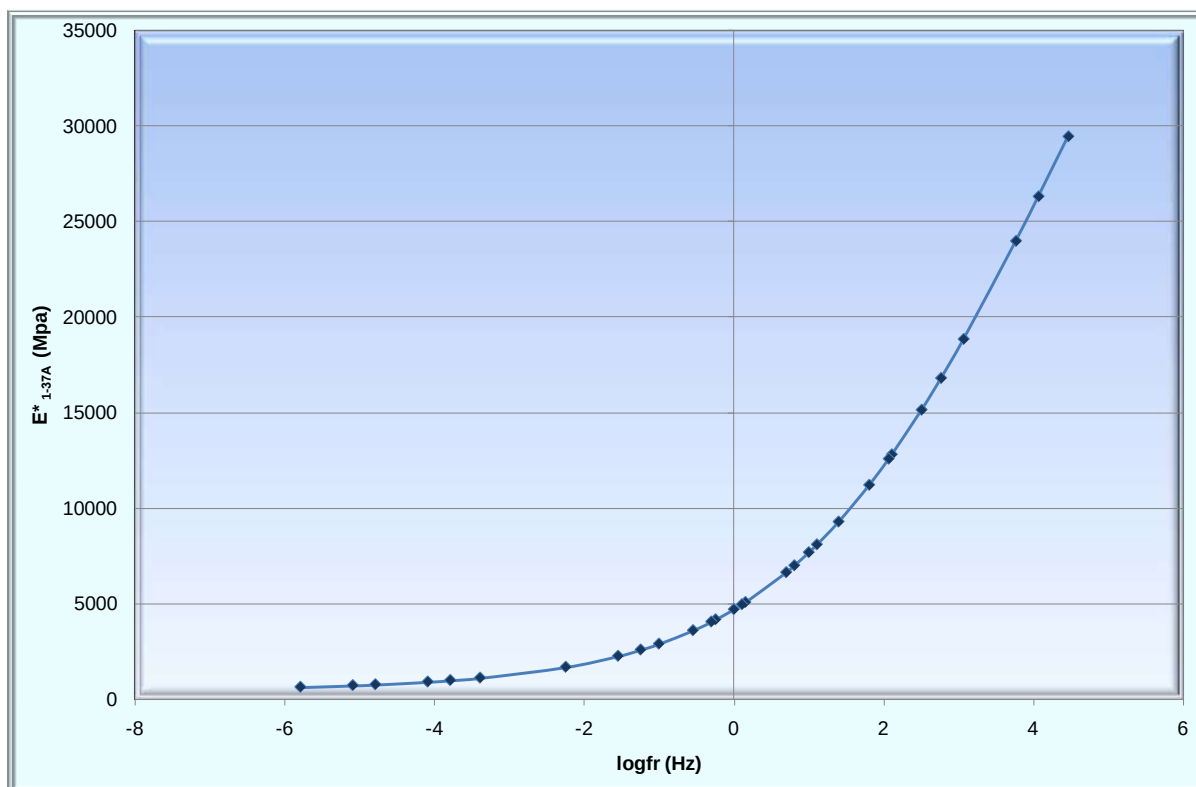


Σχήμα 7.9. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου Λ2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,327274368 + \frac{2,812149552}{1 + e^{-0,178189166 + 0,324826681 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.9)$$

Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο Λ3.

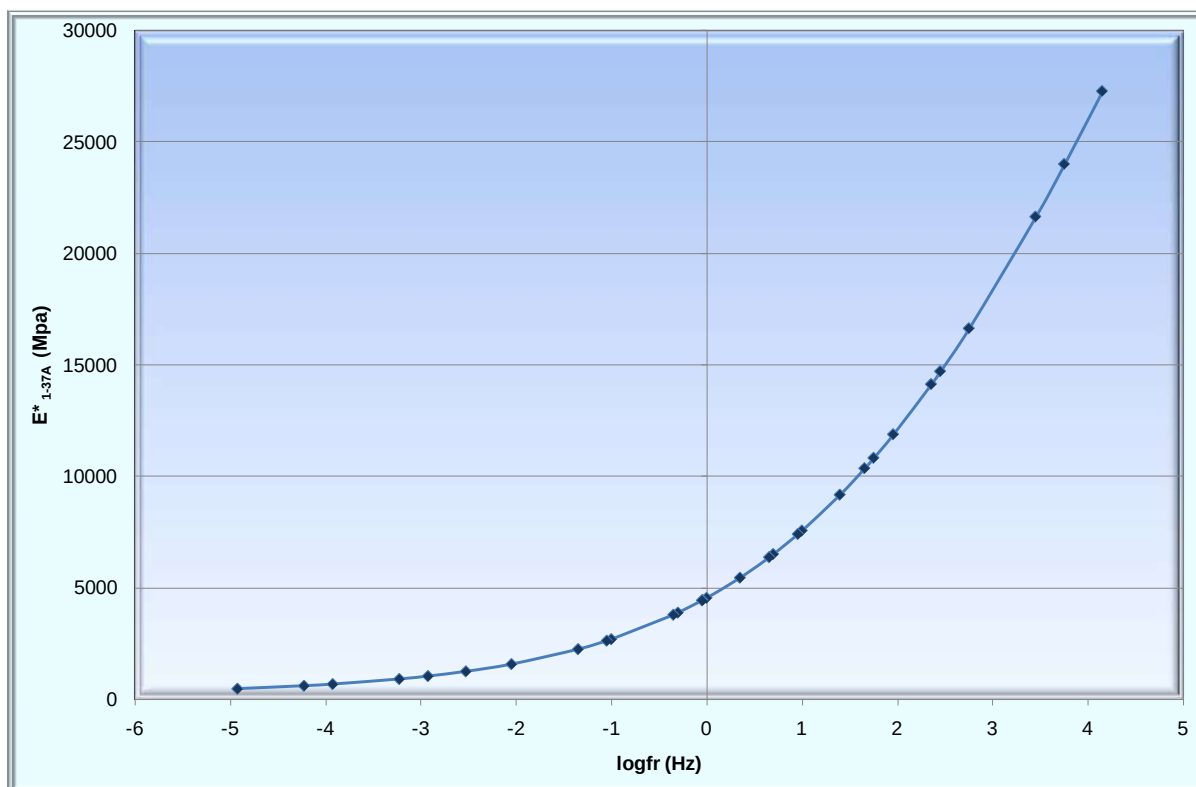


Σχήμα 7.10. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου Λ3

Η εξίσωση προσδιορισμού της παραπάνω σιγμοειδούς καμπύλης, προέκυψε όπως παρακάτω:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,750256201 + \frac{2,245009428}{1 + e^{0,070602434 + 0,383499902 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.10)$$

Στο σχήμα 7.11 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο Λ4.

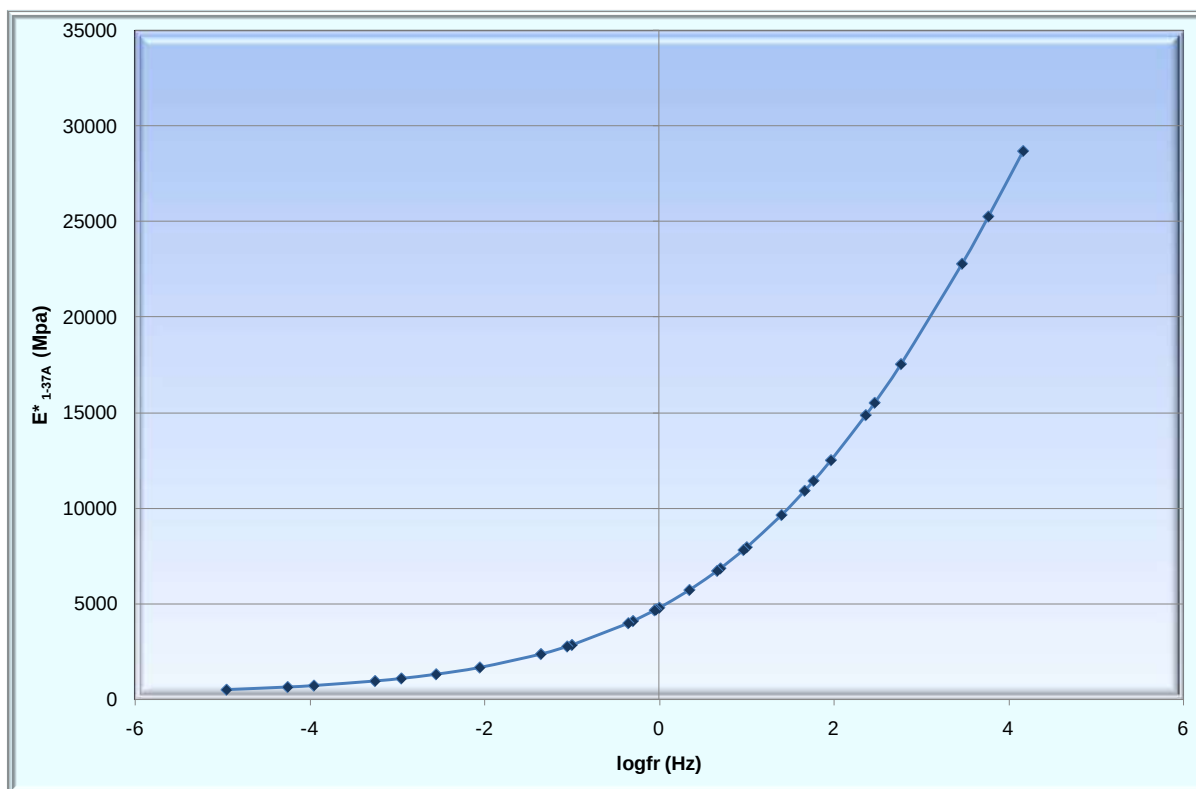


Σχήμα 7.11. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου Λ4

Η εξίσωση προσδιορισμού της παραπάνω σιγμοειδούς καμπύλης, προέκυψε όπως παρακάτω:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,302065044 + \frac{2,796090444}{1 + e^{-0,172033743 + 0,325491606 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.11)$$

Στο σχήμα 7.12 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο Λ5.

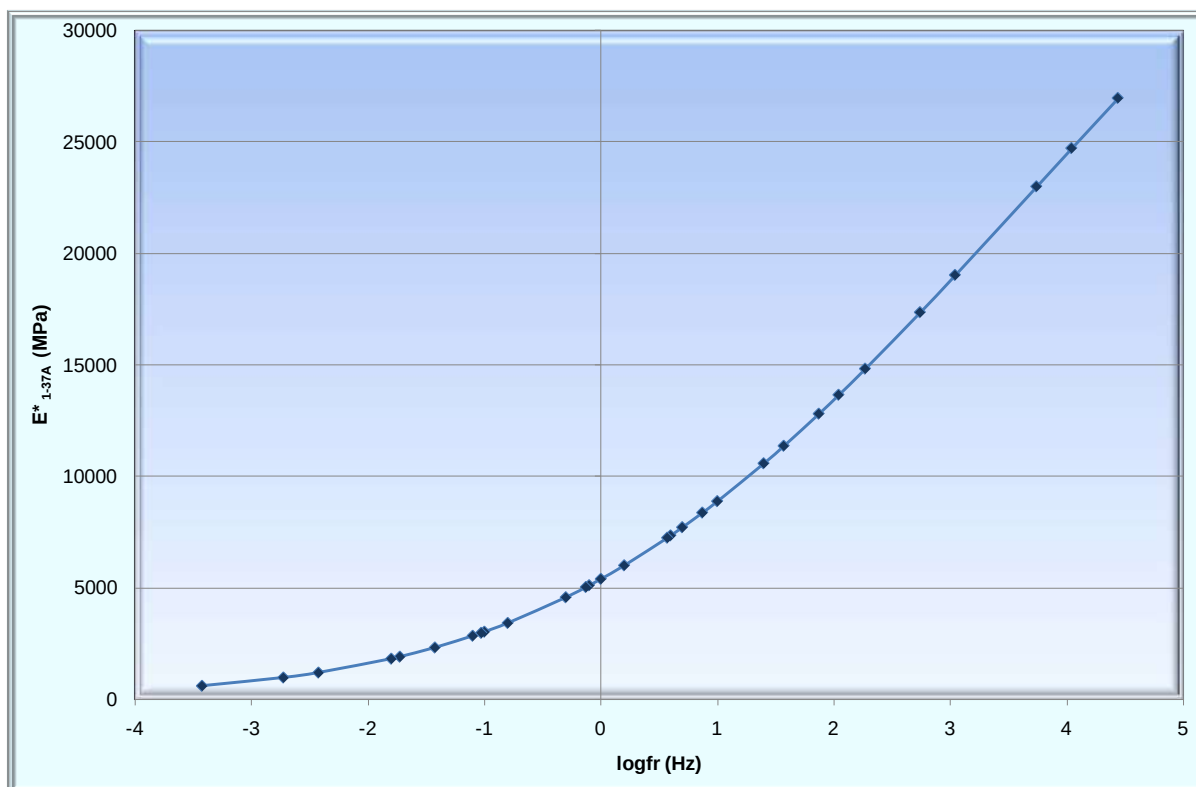


Σχήμα 7.12. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου Λ5

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,332678041 + \frac{2,783552727}{1 + e^{-0,169154159 + 0,0326129619 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.12)$$

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο T2.

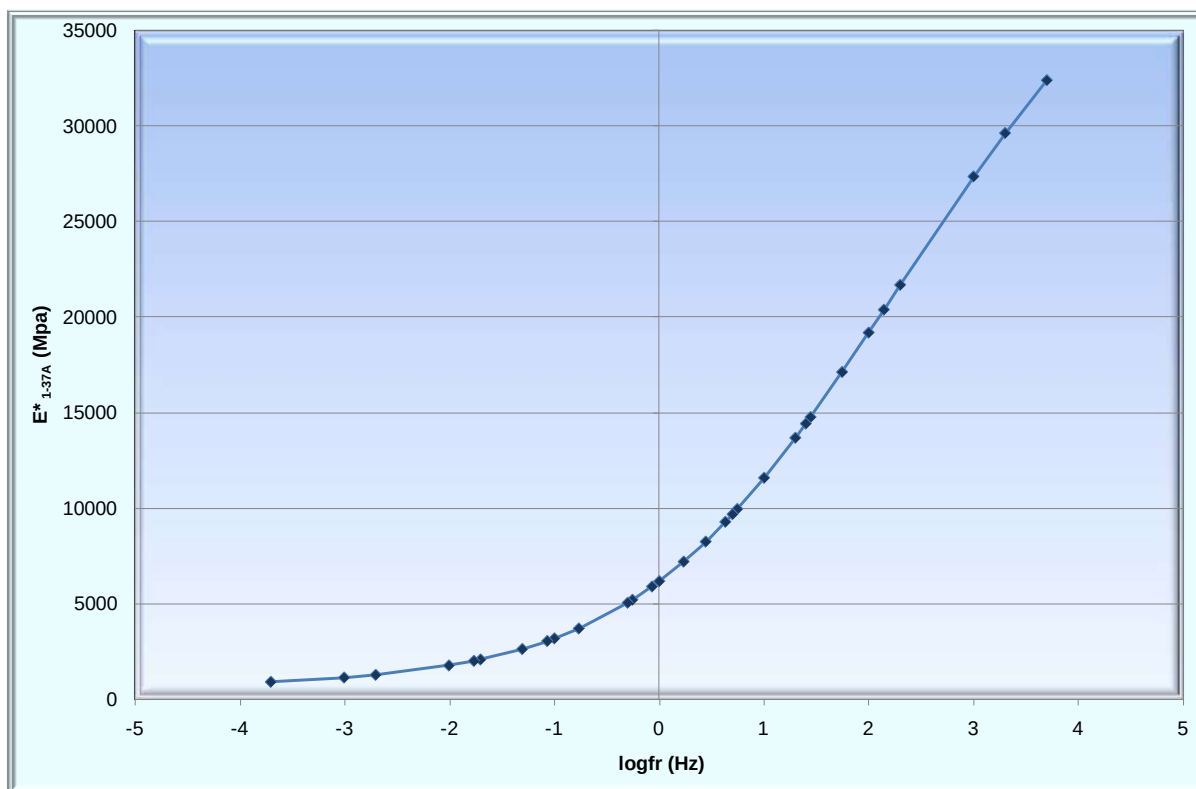


Σχήμα 7.13. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου T2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-37A} = 2,99999936 + \frac{3,905157983}{1 + e^{-1,04979482 + 0,313351007 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.13)$$

Στο σχήμα 7.14 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο T6.

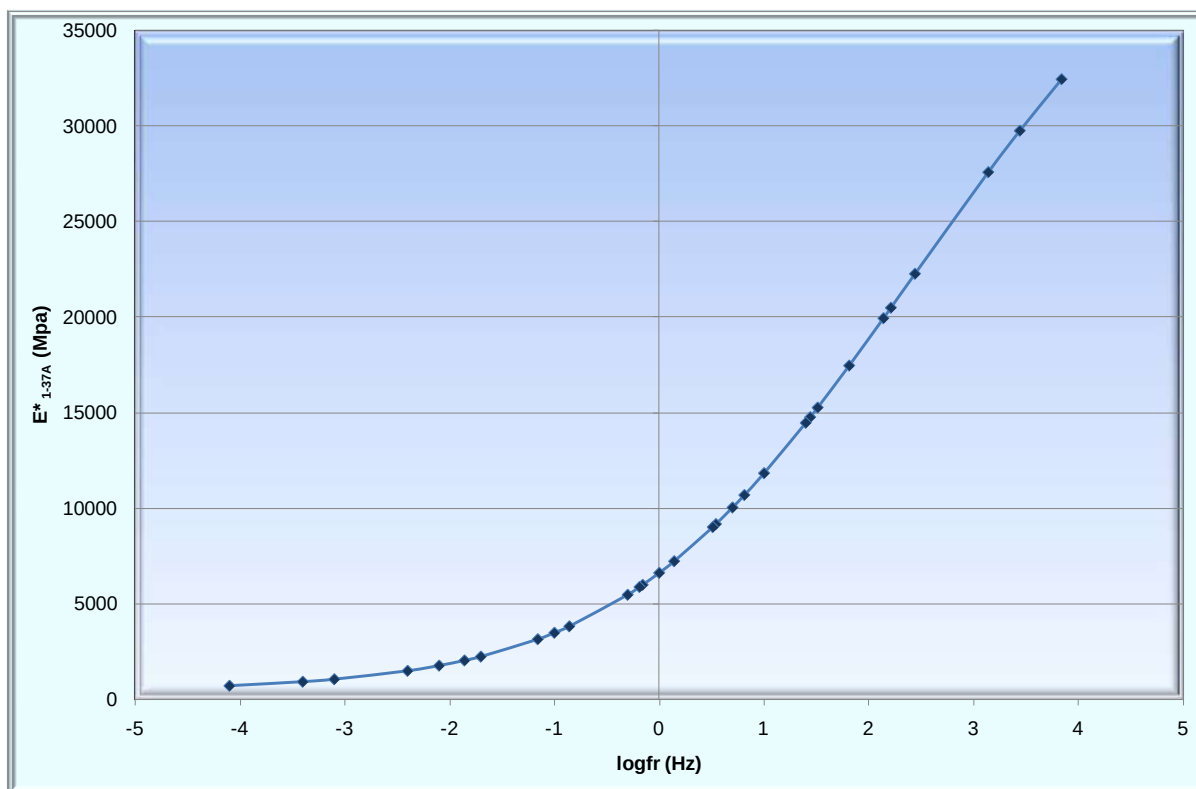


Σχήμα 7.14. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου T6

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,910561261 + \frac{1,919806803}{1 + e^{-0,171998755 + 0,605062444 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.14)$$

Στο σχήμα 7.15 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο T7.

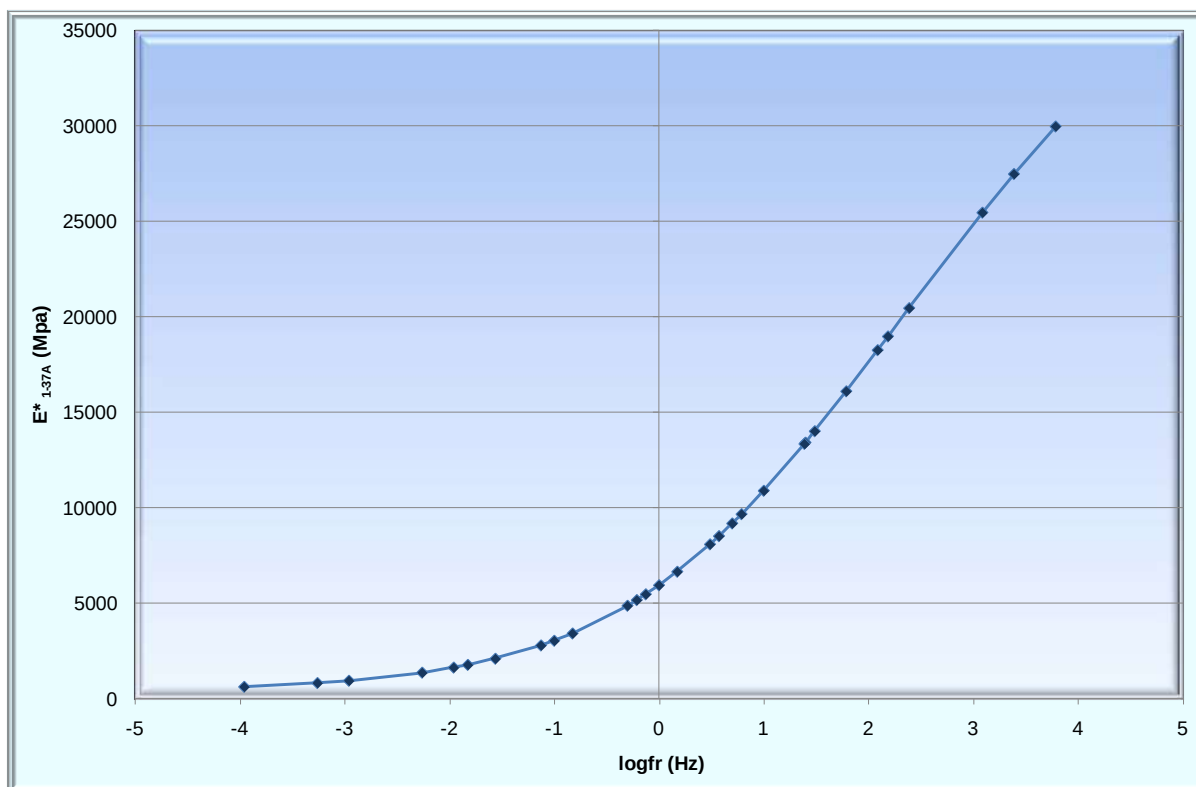


Σχήμα 7.15. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου T7

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-37A} = 4,680519363 + \frac{2,174960169}{1 + e^{-0,398759867 + 0,518845671 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.15)$$

Στο σχήμα 7.16 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 7.16. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-37A} δοκιμίου T8

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

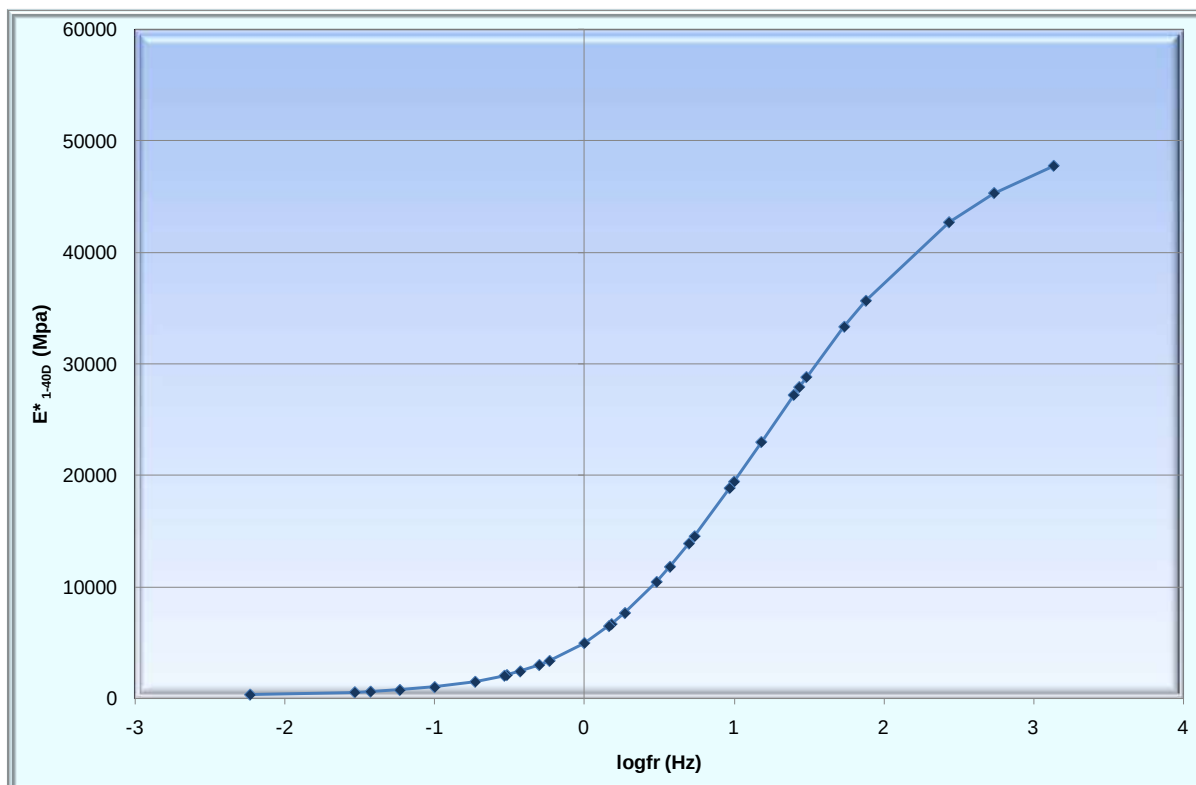
$$\log E^*_{1-37A} = 4,664332498 + \frac{2,146150651}{1 + e^{-0,376048901 + 0,544686725 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.16)$$

Στον πίνακα Π6 του παραρτήματος, δίνονται οι παράμετροι προσαρμογής των τιμών του δυναμικού μέτρου μέτρου δυσκαμψίας, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A, στη κεντρική καμπύλη. Όσον αφορά στους παράγοντες μετατόπισης, προκύπτει ότι για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας αναφοράς των 20°C, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι θετικές (μετατόπιση προς τα δεξιά), ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας αναφοράς, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι αρνητικές (μετατόπιση προς τα αριστερά). Τέλος, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι μηδενικές στη θερμοκρασία αναφοράς.

7.2.3 Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Witczak E* 1-40D (E^*_{1-40D})

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου Witczak 1-40D, κατασκευάστηκαν για κάθε δοκίμιο οι κεντρικές καμπύλες, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο σχήμα 7.17 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο Λ2.

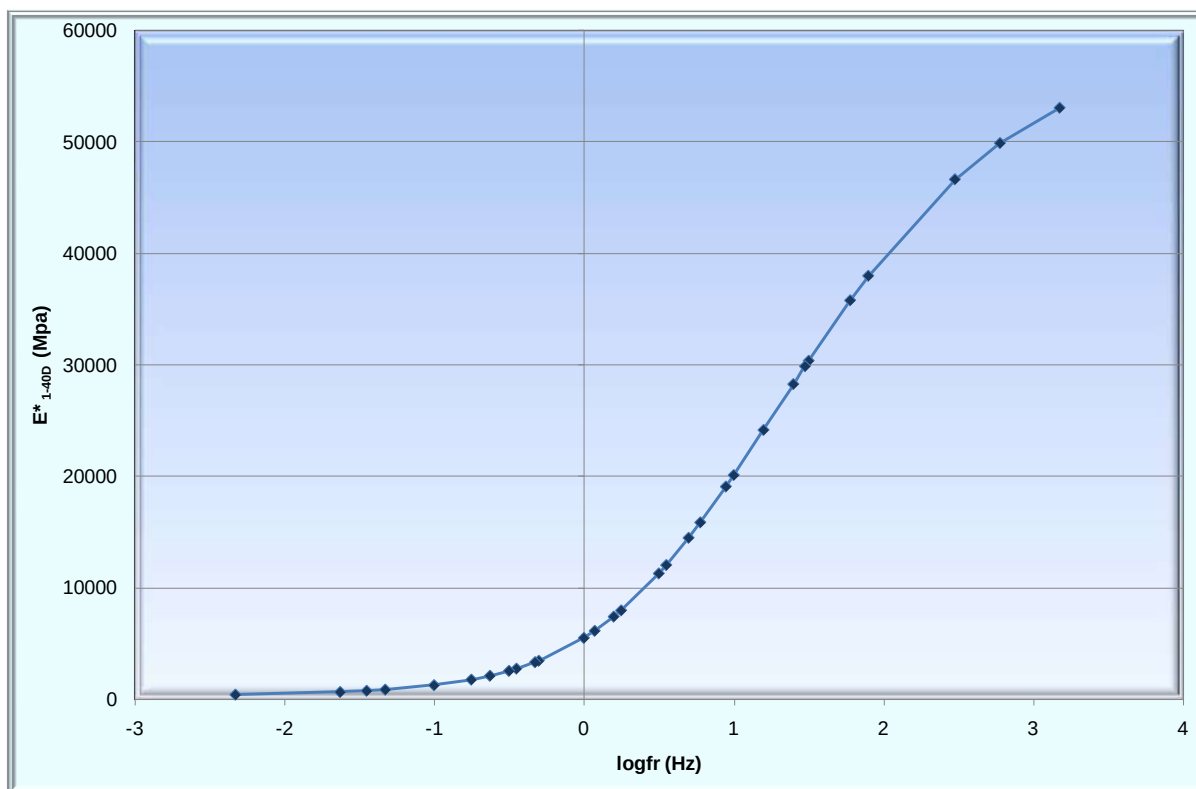


Σχήμα 7.17. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου Λ2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,49624642 + \frac{2,381076471}{1 + e^{-0,286269893 + 1,233110137 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.17)$$

Στο σχήμα 7.18 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο Λ3.

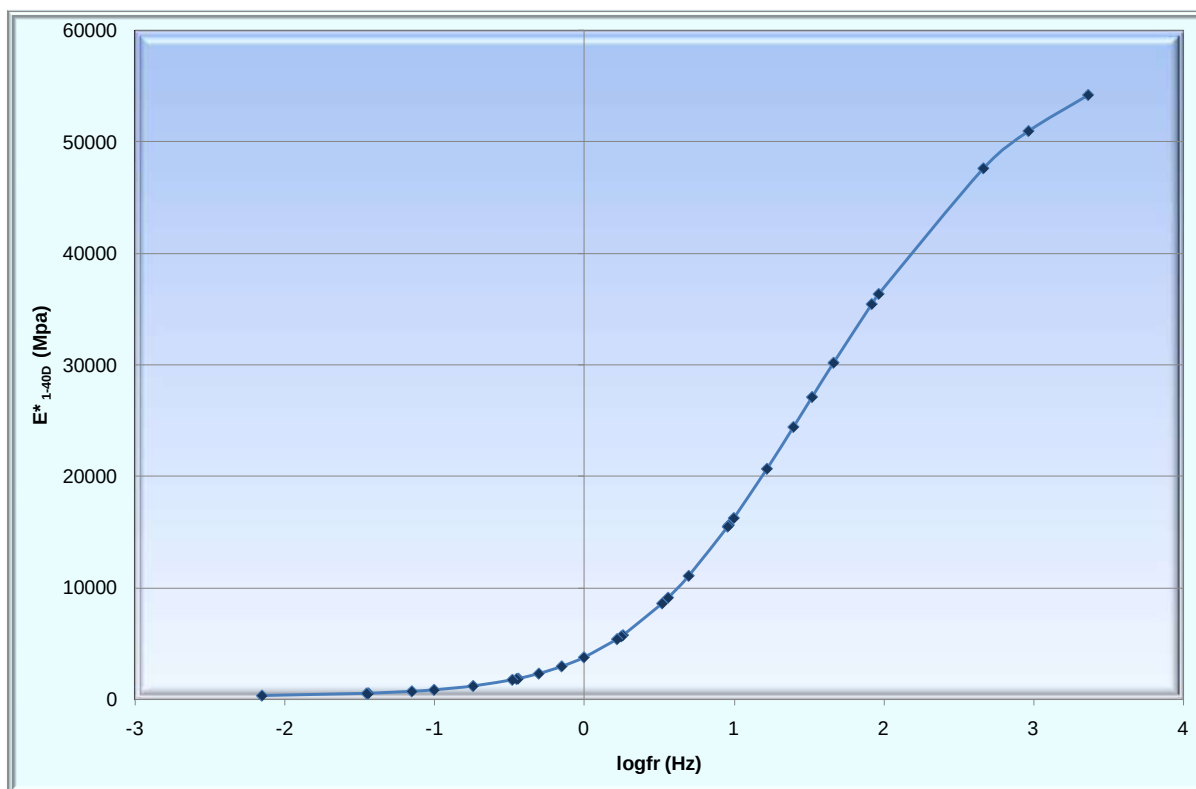


Σχήμα 7.18. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου Λ3

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,553419311 + \frac{2,380701342}{1 + e^{-0,263782861 + 1,139173083 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.18)$$

Στο σχήμα 7.19 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο Λ4.

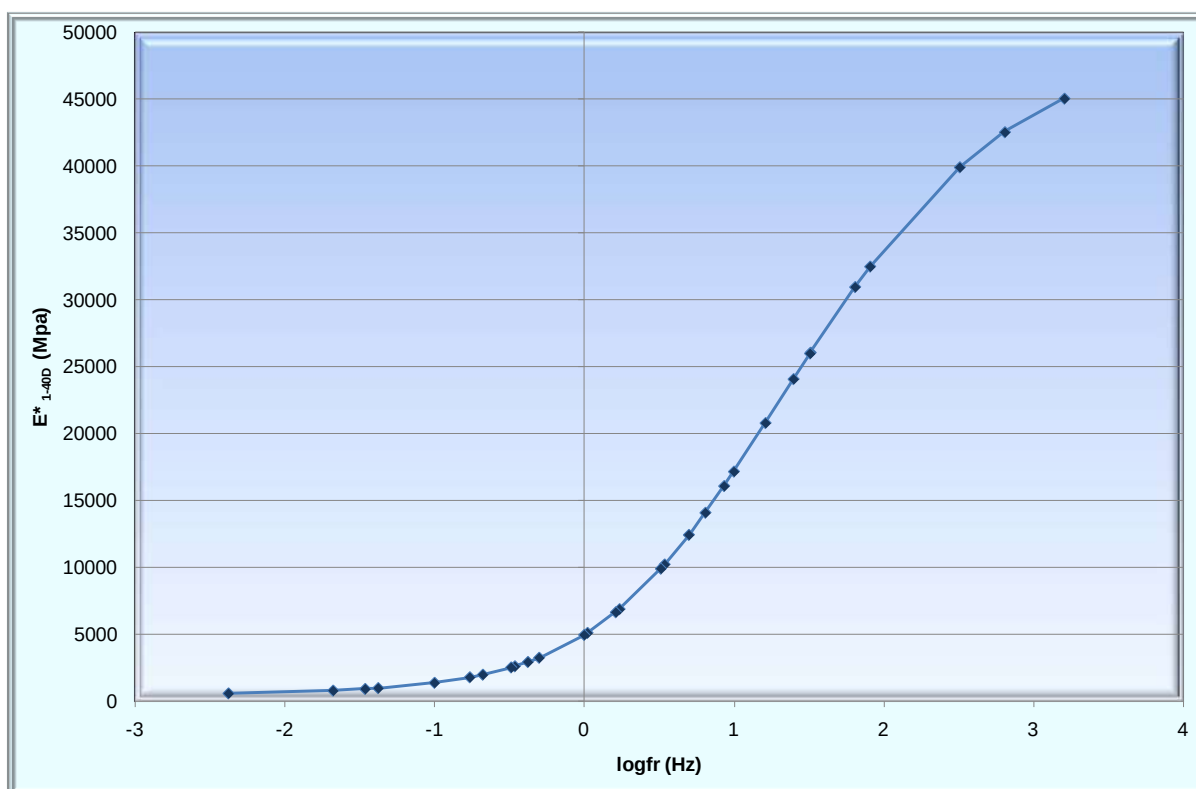


Σχήμα 7.19. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκίμιου Λ4

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,480713906 + \frac{2,461853459}{1 + e^{-0,040669571 + 1,158370298 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.19)$$

Στο σχήμα 7.20 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο Λ5.

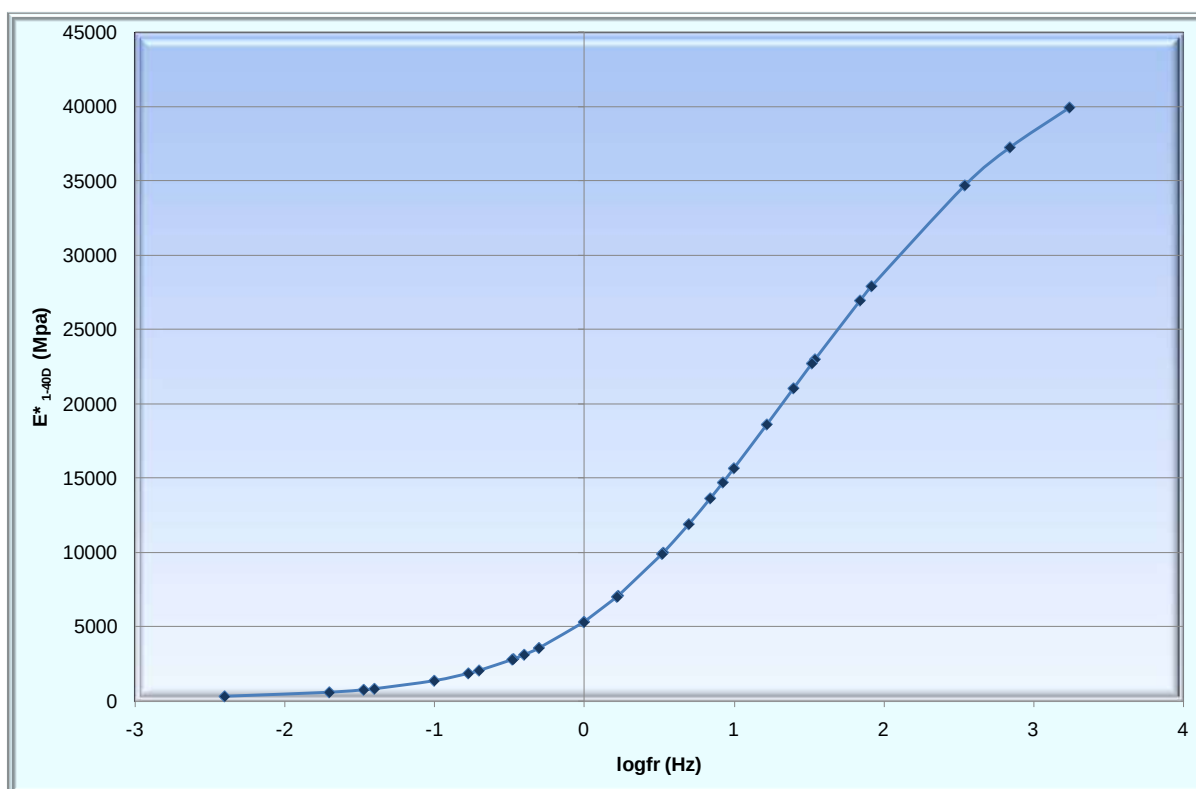


Σχήμα 7.20. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου Λ5

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,758612315 + \frac{2,099717624}{1 + e^{-0,084031776 + 1,179154766 \cdot \log tr}} \text{ (MPa)} \quad (7.20)$$

Στο σχήμα 7.21 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο T2.

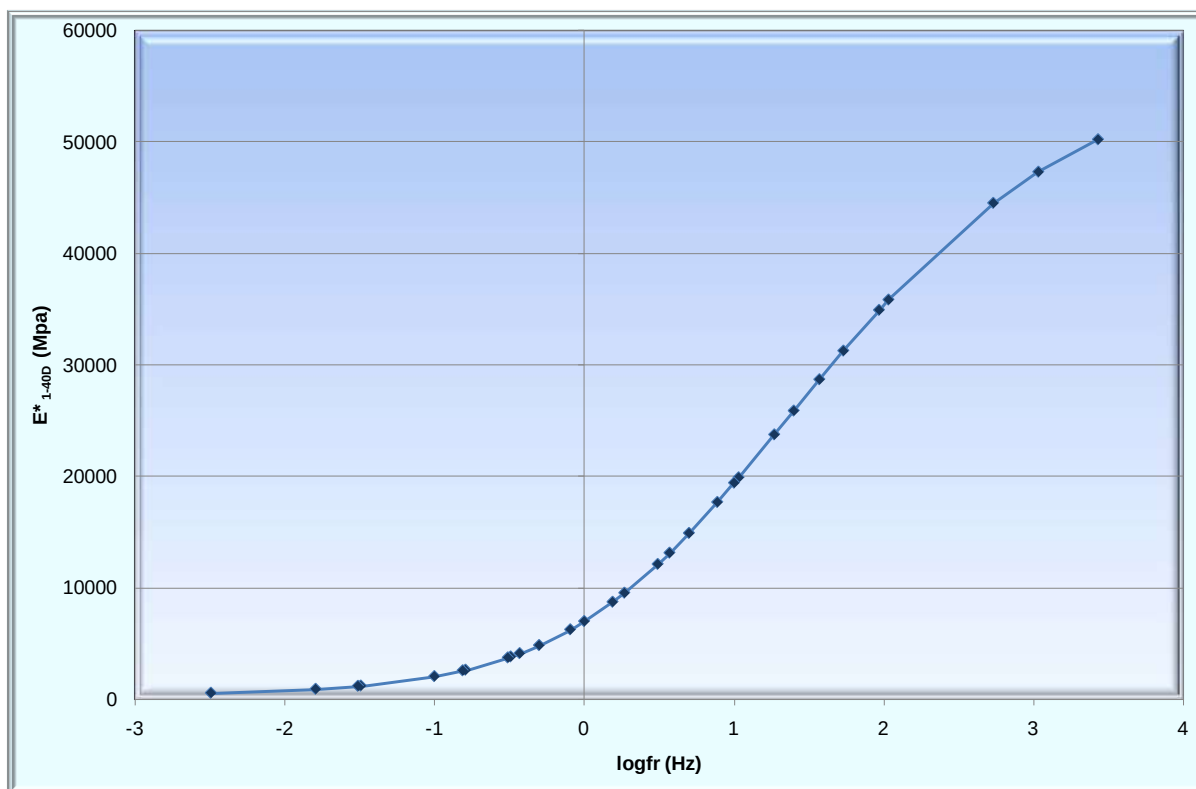


Σχήμα 7.21. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου T2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,260356499 + \frac{2,571726514}{1 + e^{-0,543560179 + 0,938273497 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.21)$$

Στο σχήμα 7.22 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο T6.

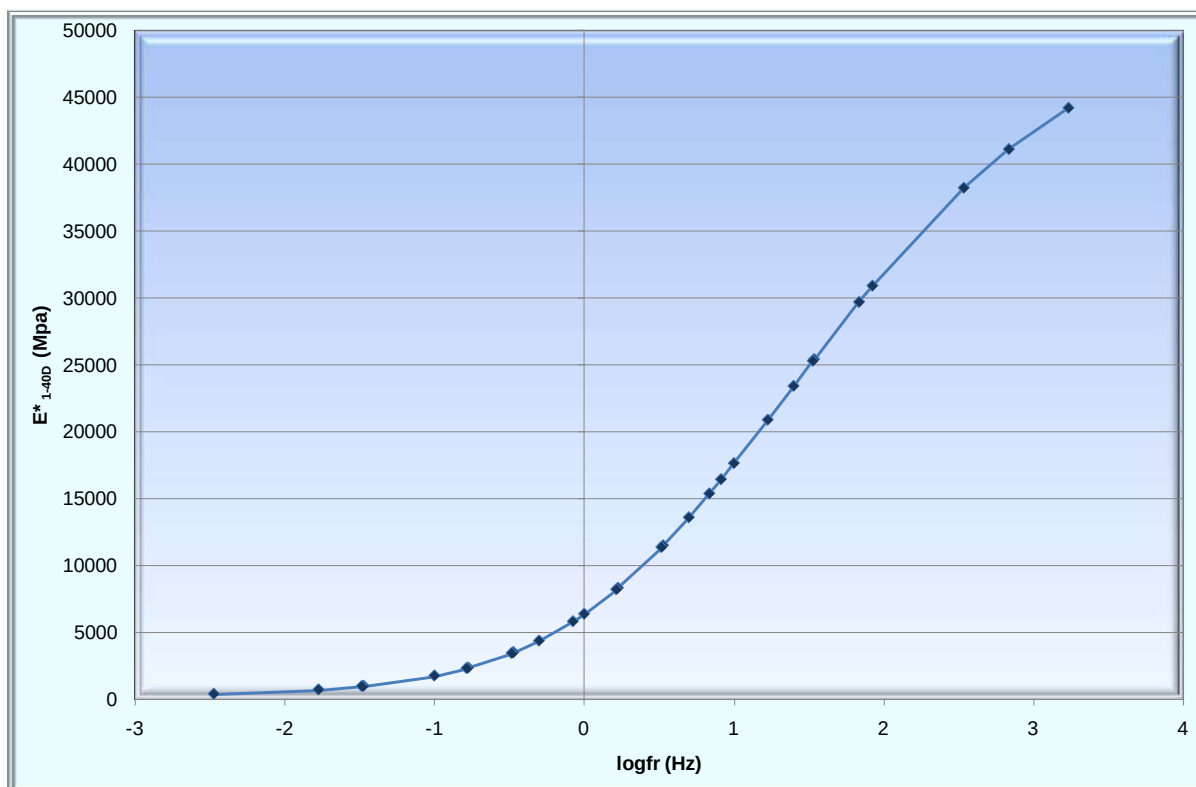


Σχήμα 7.22. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου T6

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,587730033 + \frac{2,334435025}{1 + e^{-0,43518235 + 0,93545575 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.22)$$

Στο σχήμα 7.23 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο T7.

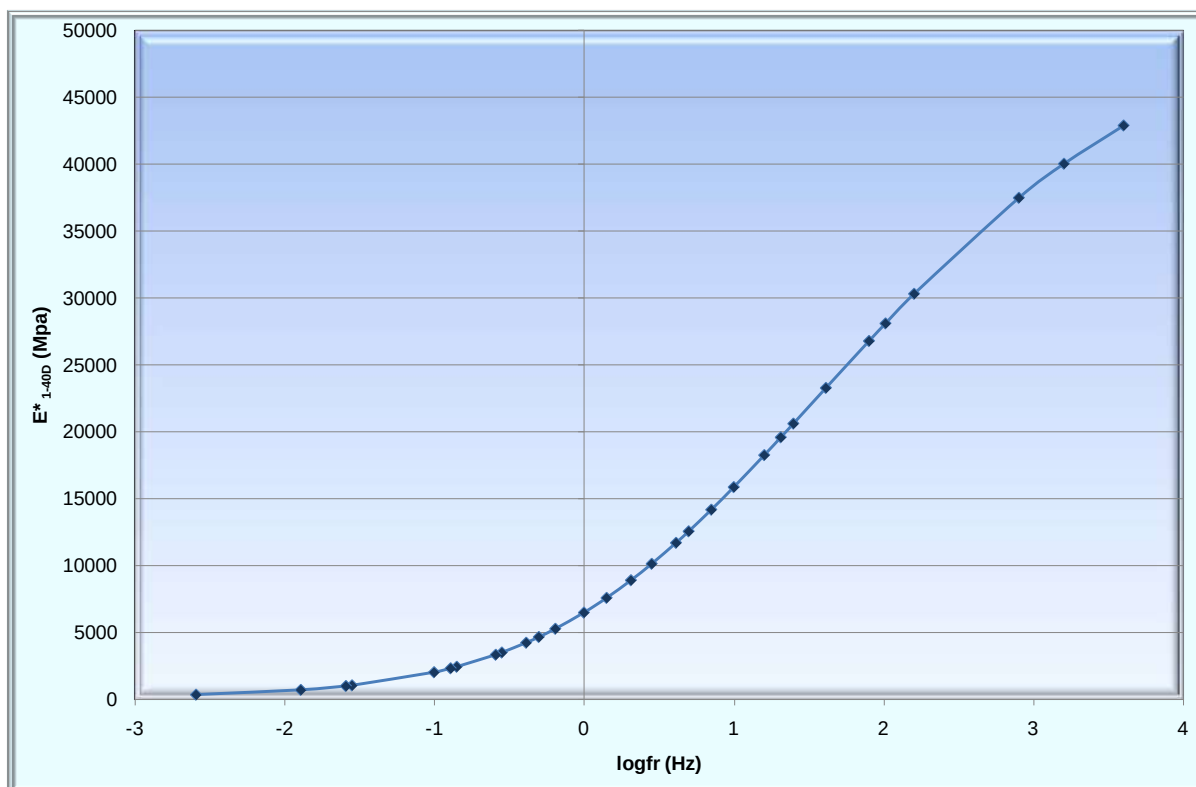


Σχήμα 7.23. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου T7

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{1-40D} = 4,298776994 + \frac{2,585145536}{1 + e^{-0,593413138 + 0,894180577 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.23)$$

Στο σχήμα 7.24 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 7.24. Κεντρική καμπύλη E^*_{1-40D} δοκιμίου T8

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

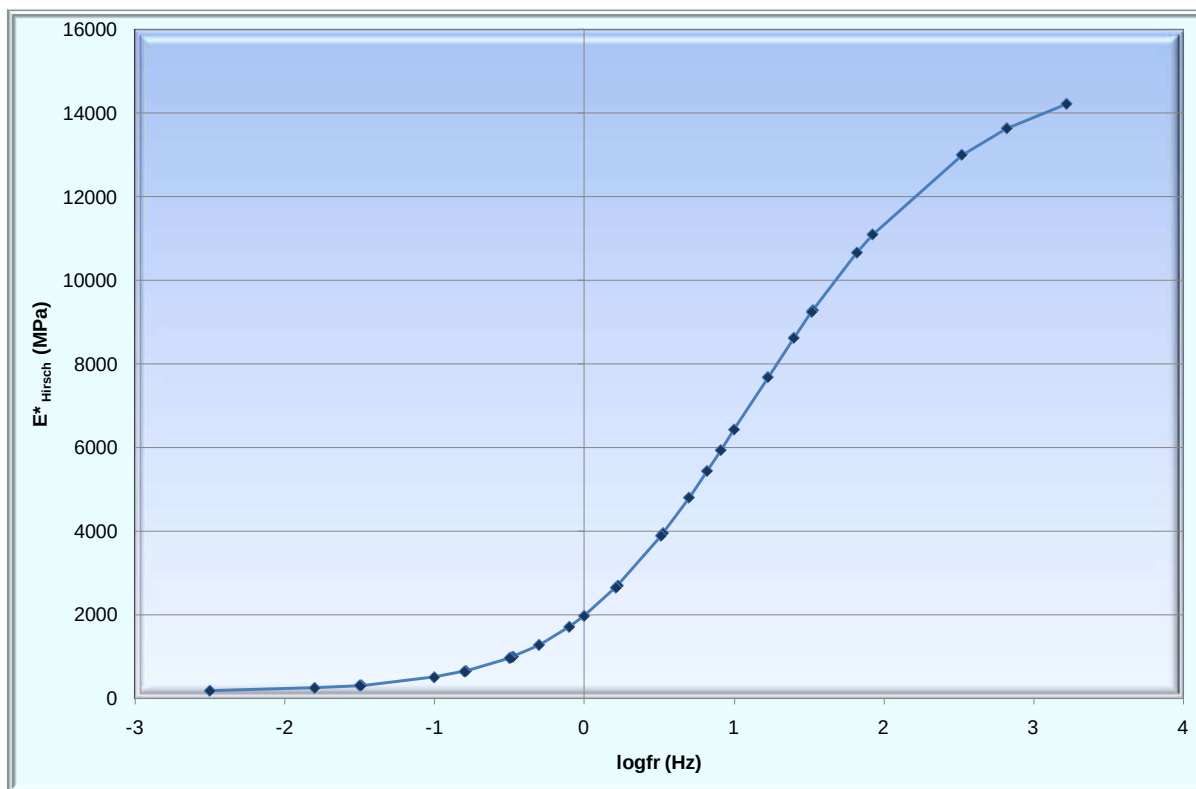
$$\log E^*_{1-40D} = 3,934052737 + \frac{2,952375218}{1 + e^{-0,801326892 + 0,729505277 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.24)$$

Στον πίνακα Π7 του παραρτήματος, δίνονται οι παράμετροι προσαρμογής των τιμών του δυναμικού μέτρου μέτρου δυσκαμψίας, που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D, στη κεντρική καμπύλη. Όσον αφορά στους παράγοντες μετατόπισης, προκύπτει ότι για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας αναφοράς των 20°C, οι τιμές τους είναι θετικές (μετατόπιση προς τα δεξιά), ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας αναφοράς, οι τιμές τους είναι αρνητικές (μετατόπιση προς τα αριστερά). Τέλος, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι μηδενικές στη θερμοκρασία αναφοράς.

7.2.4 Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αλγορίθμου Hirsch (E^*_{Hirsch})

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αλγορίθμου Hirsch, κατασκευάστηκαν για κάθε δοκίμιο οι κεντρικές καμπύλες, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Στο σχήμα 7.25 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο Λ2.

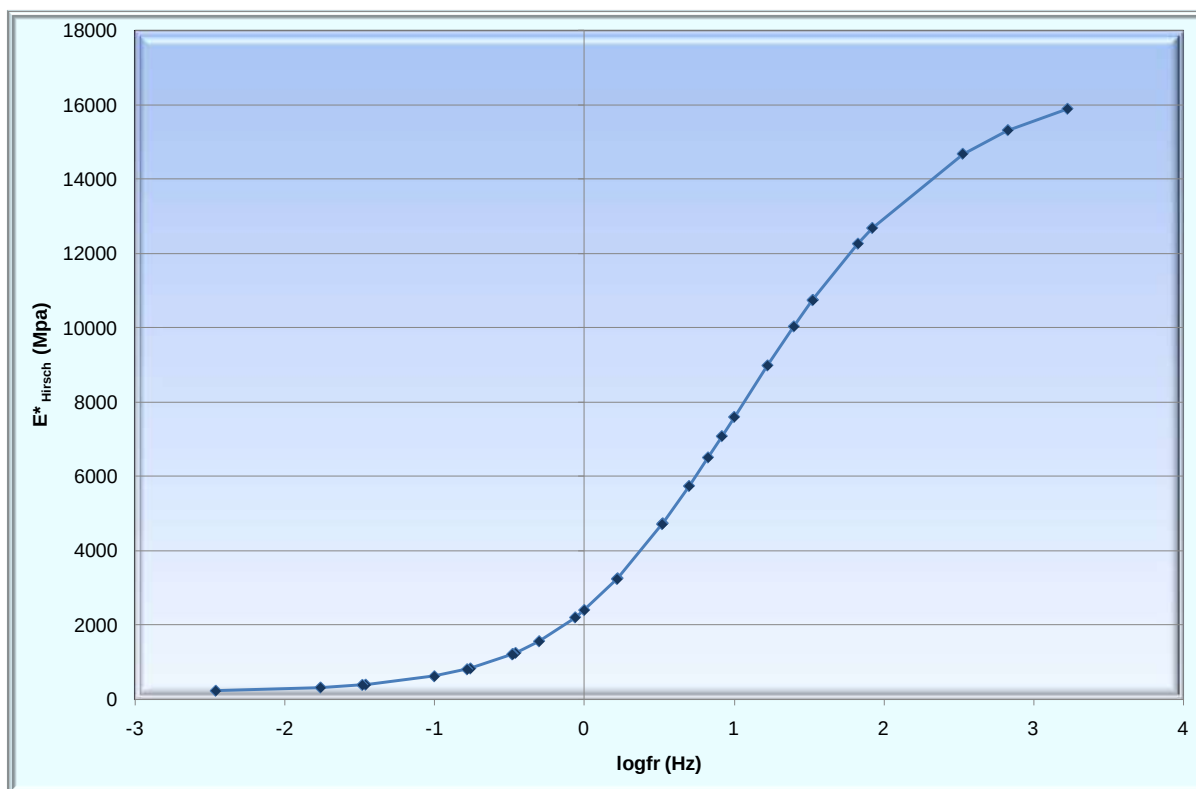


Σχήμα 7.25. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου Λ2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,283033461 + \frac{2,061167042}{1 + e^{-0,27579053 + 1,228673073 * \log tr}} \text{ (MPa)} \quad (7.25)$$

Στο σχήμα 7.26 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο Λ3.

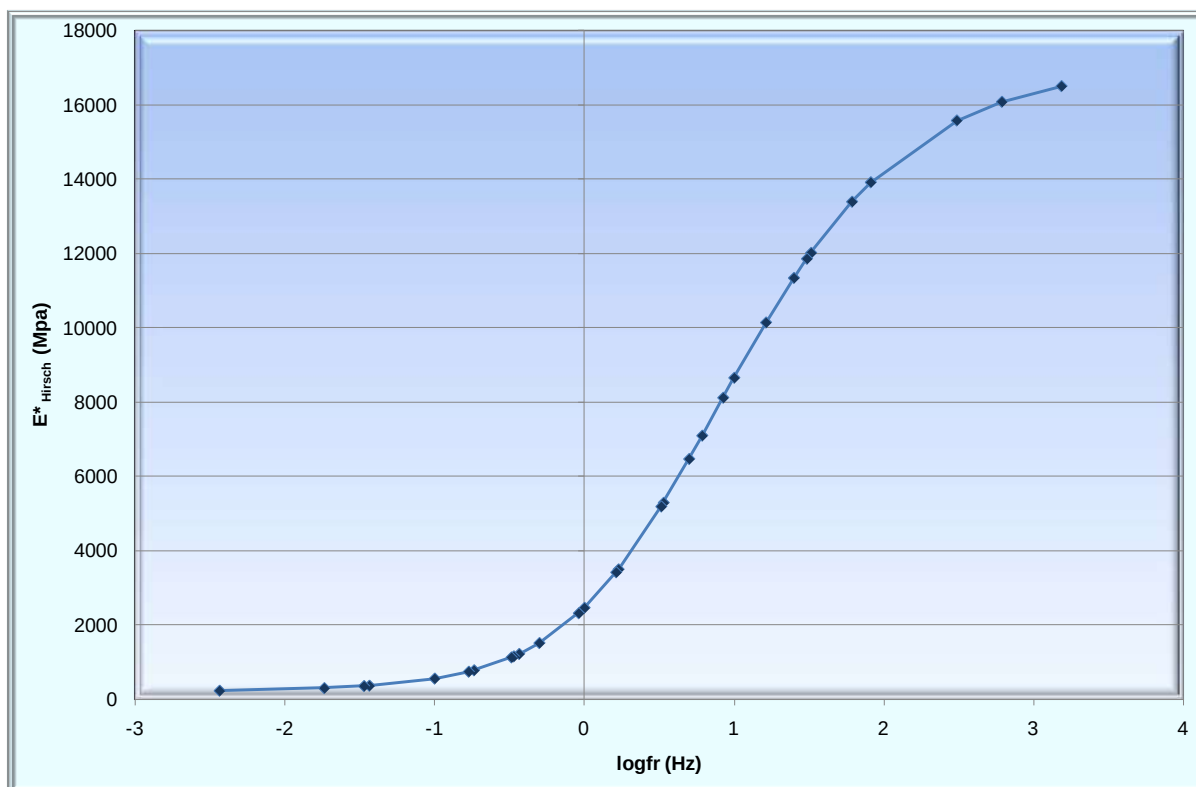


Σχήμα 7.26. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου Λ3

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,393548725 + \frac{1,994513317}{1 + e^{-0,303107891 + 1,258487035 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.26)$$

Στο σχήμα 7.27 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο Λ4.

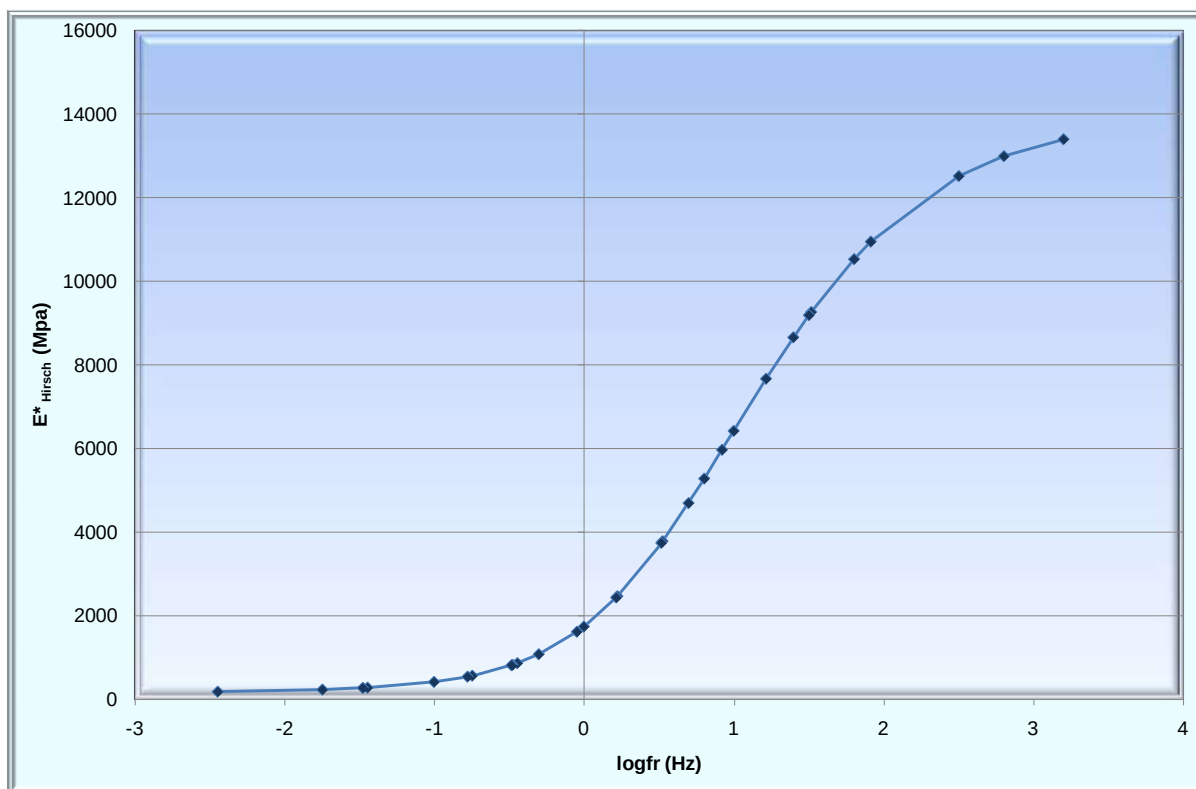


Σχήμα 7.27. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου Λ4

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,439591945 + \frac{1,953816878}{1 + e^{-0,278005315 + 1,448284366 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.27)$$

Στο σχήμα 7.28 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο Λ5.

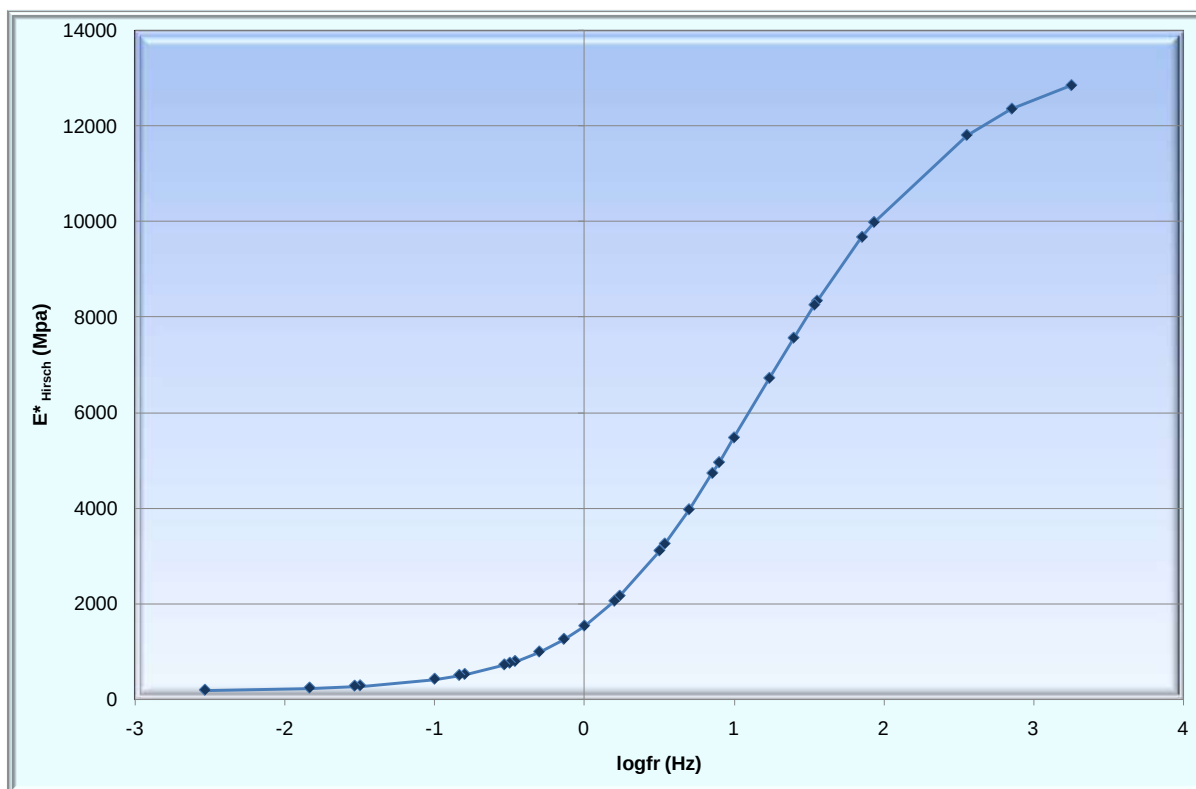


Σχήμα 7.28. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου Λ5

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,3344234 + \frac{1,97195582}{1 + e^{-0,162267214 + 1,41460737 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.28)$$

Στο σχήμα 7.29 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο T2.

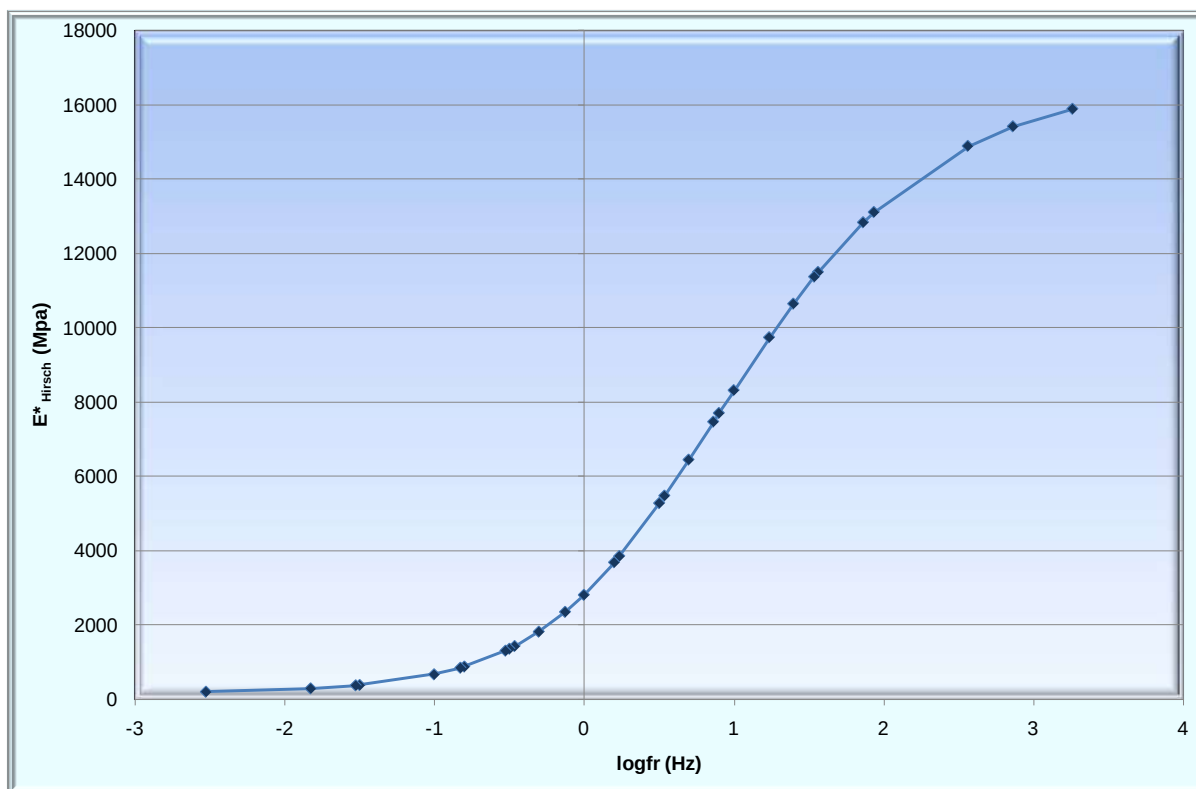


Σχήμα 7.29. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου T2

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,365345336 + \frac{1,930342829}{1 + e^{-0,033309272 + 1,321549318 * \log tr}} \text{ (MPa)} \quad (7.29)$$

Στο σχήμα 7.30 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο T6.

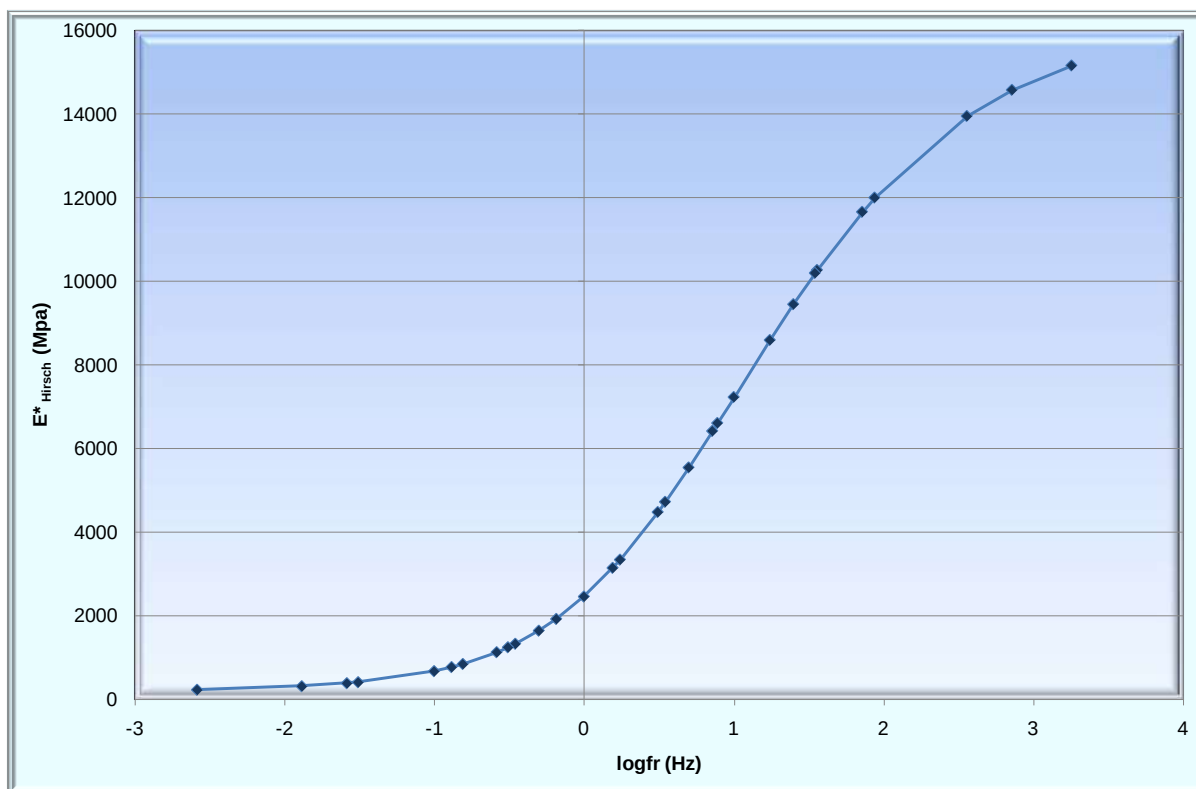


Σχήμα 7.30. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου T6

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,301547122 + \frac{2,081624294}{1 + e^{-0,522766226 + 1,250377053 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.30)$$

Στο σχήμα 7.31 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο T7.

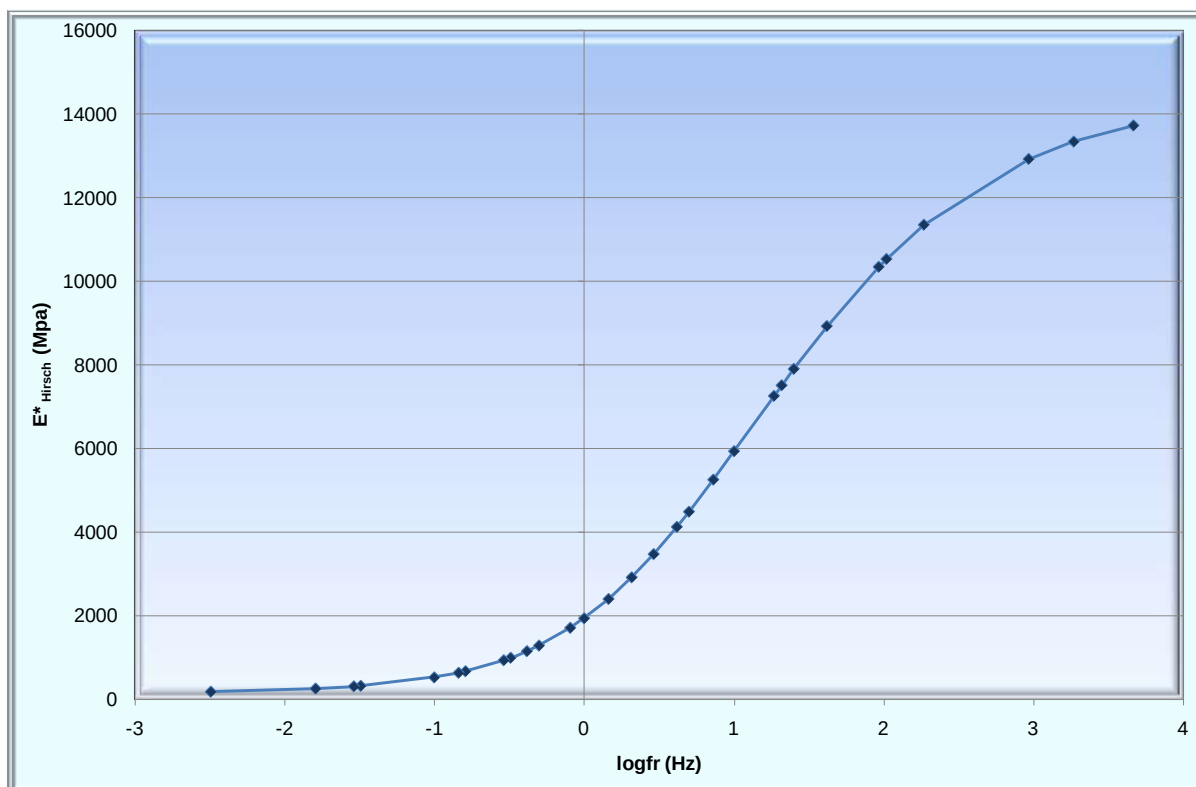


Σχήμα 7.31. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου T7

Η εξίσωση προσδιορισμού της παραπάνω σιγμοειδούς καμπύλης, προέκυψε όπως παρακάτω:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,377217616 + \frac{1,994133775}{1 + e^{-0,357973762 + 1,186103081 \cdot \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.31)$$

Στο σχήμα 7.32 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψε από τον αλγόριθμο Hirsch για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 7.32. Κεντρική καμπύλη E^*_{Hirsch} δοκιμίου T8

Η σιγμοειδής καμπύλη περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\log E^*_{Hirsch} = 4,249822905 + \frac{2,070429902}{1 + e^{-0,314505419 + 1,158877959 * \log tr}} \quad (\text{MPa}) \quad (7.32)$$

Σύμφωνα με τον πίνακα Π8 του παραρτήματος, παρατηρείται ότι για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας αναφοράς των 20°C, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι θετικές (μετατόπιση προς τα δεξιά), ενώ για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας αναφοράς, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι αρνητικές (μετατόπιση προς τα αριστερά). Τέλος, οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι μηδενικές στη θερμοκρασία αναφοράς.

7.3 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

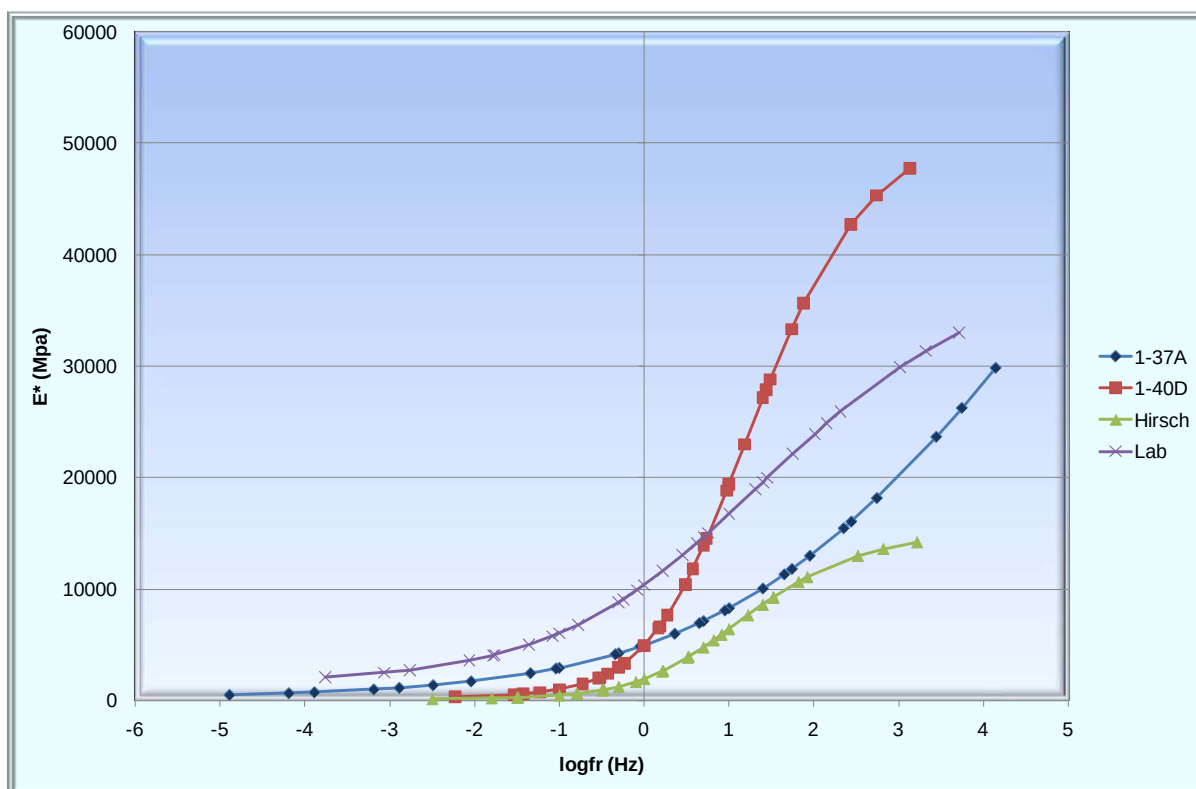
Στα πλαίσια της διερεύνησης της εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω αλγορίθμων, κρίνεται αναγκαία η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή τους και εκείνων που προκύπτουν από τον εργαστηριακό

προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Η αξιολόγηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης των κεντρικών καμπυλών καθώς και μέσω της σύγκρισης των ποσοστιαίων σχετικών σφαλμάτων.

7.3.1 Αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών

Η συγκριτική αξιολόγηση βάσει των κεντρικών καμπυλών, αποτελεί μια ποιοτική έκφραση των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ των μετρημένων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και των εκτιμώμενων τιμών μέσω των αλγορίθμων. Υπενθυμίζεται ότι η ανώτερη περιοχή της σιγμοειδούς καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά τη μέγιστη δυσκαμψία του μίγματος και εξαρτάται από τη δυσκαμψία της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αντίθετα, η κατώτερη περιοχή της σιγμοειδούς καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά την ελάχιστη δυσκαμψία του μίγματος, η οποία εμφανίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των κεντρικών καμπυλών για κάθε δοκίμιο.

Στο σχήμα 7.33 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο Λ2.



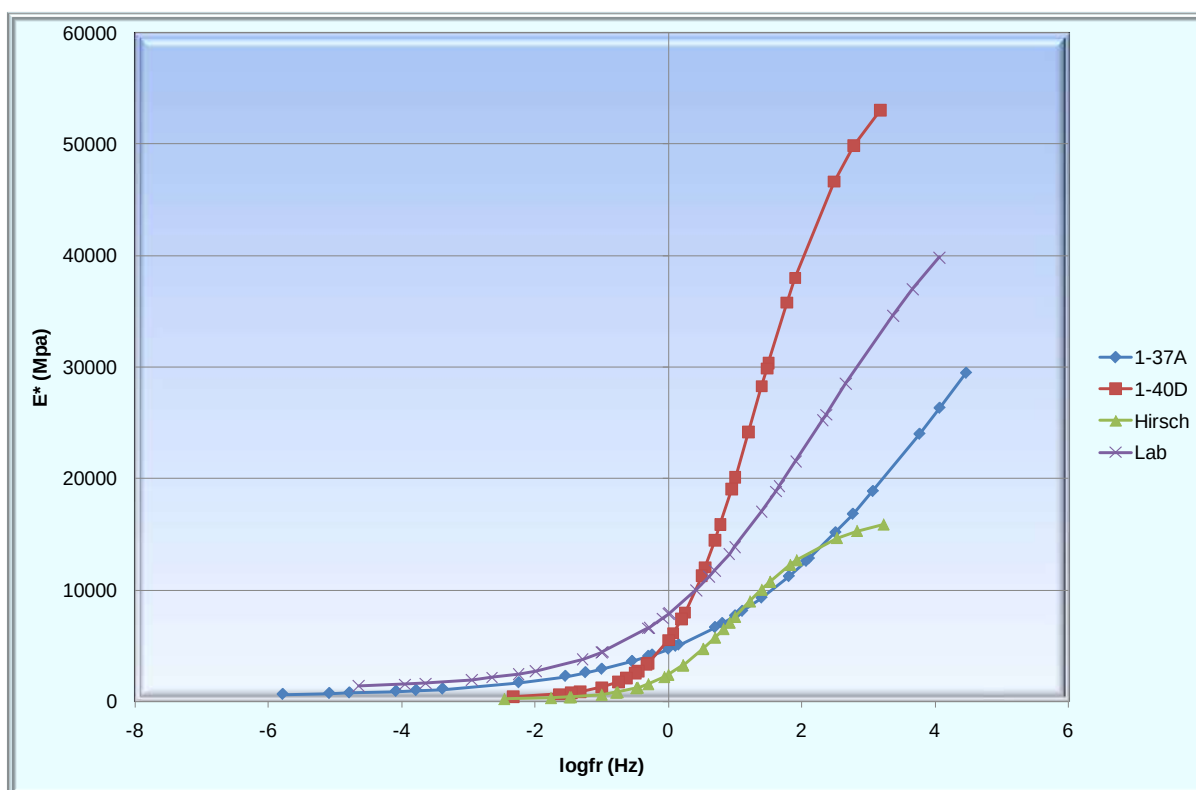
Σχήμα 7.33. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου Λ2

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, για μικρές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, (οι οποίες αντιστοιχούν σε υψηλές θερμοκρασίες), όλες οι κεντρικές καμπύλες έχουν σχεδόν ίδια μορφή. Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, (οι οποίες

αντιστοιχούν σε χαμηλές θερμοκρασίες), οι καμπύλες διαφοροποιούνται ως προς τη μορφή τους και περισσότερο ως προς τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Η κεντρική καμπύλη τόσο του E^*_{1-37A} όσο και του E^*_{Hirsch} , βρίσκεται χαμηλότερα της κεντρικής καμπύλης του E^*_{lab} σε όλο το εύρος μειωμένης συχνότητας (λογαριθμικής κλίμακας). Επομένως, οι παραπάνω αλγόριθμοι υποεκτιμούν τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για το συγκεκριμένο δοκίμιο. Αντίθετα, η κεντρική καμπύλη του E^*_{1-40D} , βρίσκεται ψηλότερα από εκείνη του E^*_{lab} για τιμές της μειωμένης συχνότητας μεγαλύτερες του 1Hz, και χαμηλότερα για τιμές μικρότερες του 1Hz. Επομένως, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υπερεκτιμά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του δοκιμίου στη πρώτη περίπτωση και τις υποεκτιμά στη δεύτερη.

Στο σχήμα 7.34 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο Λ3.



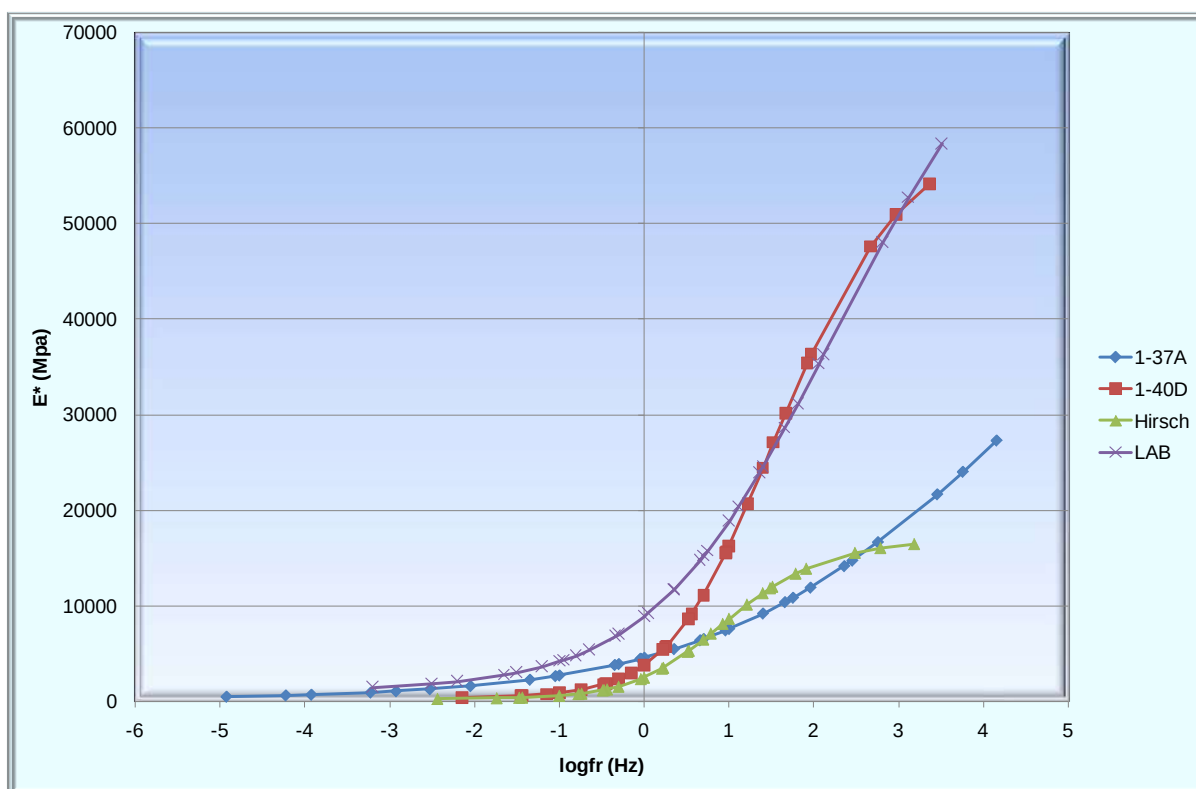
Σχήμα 7.34. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου Λ3

Οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για το δοκίμιο Λ3 (σχήμα 7.34), σχεδόν ταυτίζονται για μικρές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (υψηλές θερμοκρασίες). Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές δυσκαμψίας (χαμηλότερες θερμοκρασίες), αν και είναι σχεδόν ομοιόμορφες, οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ως προς τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Η κεντρική καμπύλη τόσο του E^*_{1-37A} όσο και του E^*_{Hirsch} βρίσκεται χαμηλότερα της κεντρικής καμπύλης του E^*_{lab} . Αρα, οι παραπάνω αλγόριθμοι υποεκτιμούν τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του συγκεκριμένου δοκιμίου. Συγκρίνοντας τη κεντρική

καμπύλη του E^*_{1-40D} με αυτή του E^*_{lab} προκύπτει ότι για τιμές μειωμένης συχνότητας μικρότερες του 1Hz περίπου, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υποεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αντιθέτως, για τιμές μειωμένης συχνότητας μεγαλύτερες του 1Hz οι εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας υπερεκτιμούνται.

Στο σχήμα 7.35 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο Λ4.

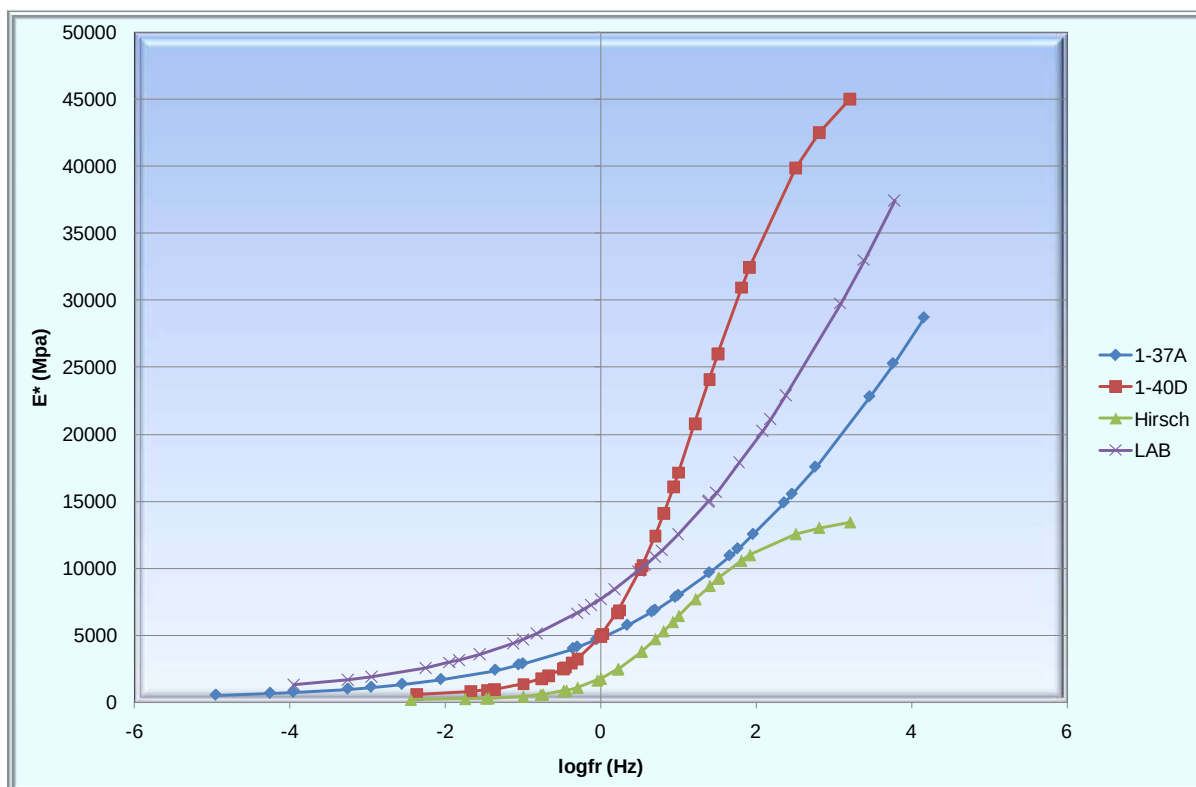


Σχήμα 7.35. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου Λ4

Από το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει ότι οι κεντρικές καμπύλες του δοκιμίου Λ4, σχεδόν ταυτίζονται ως προς τη μορφή και τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, όταν αυτές κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, διαφοροποιούνται για υψηλότερες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, δηλαδή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Η κεντρική καμπύλη του E^*_{1-40D} σχεδόν ταυτίζεται ως προς τη μορφή και τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, με την κεντρική καμπύλη του E^*_{lab} , για όλο το εύρος της μειωμένης συχνότητας fr . Επομένως, ο αλγόριθμος του Witczak 1-40D προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αντίθετα, οι κεντρικές καμπύλες των E^*_{1-37A} και E^*_{Hirsch} βρίσκονται χαμηλότερα εκείνης του E^*_{lab} , και επομένως οι πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας υποεκτιμούνται. Επίσης, οι παραπάνω κεντρικές καμπύλες παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους.

Στο σχήμα 7.36 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο Λ5.

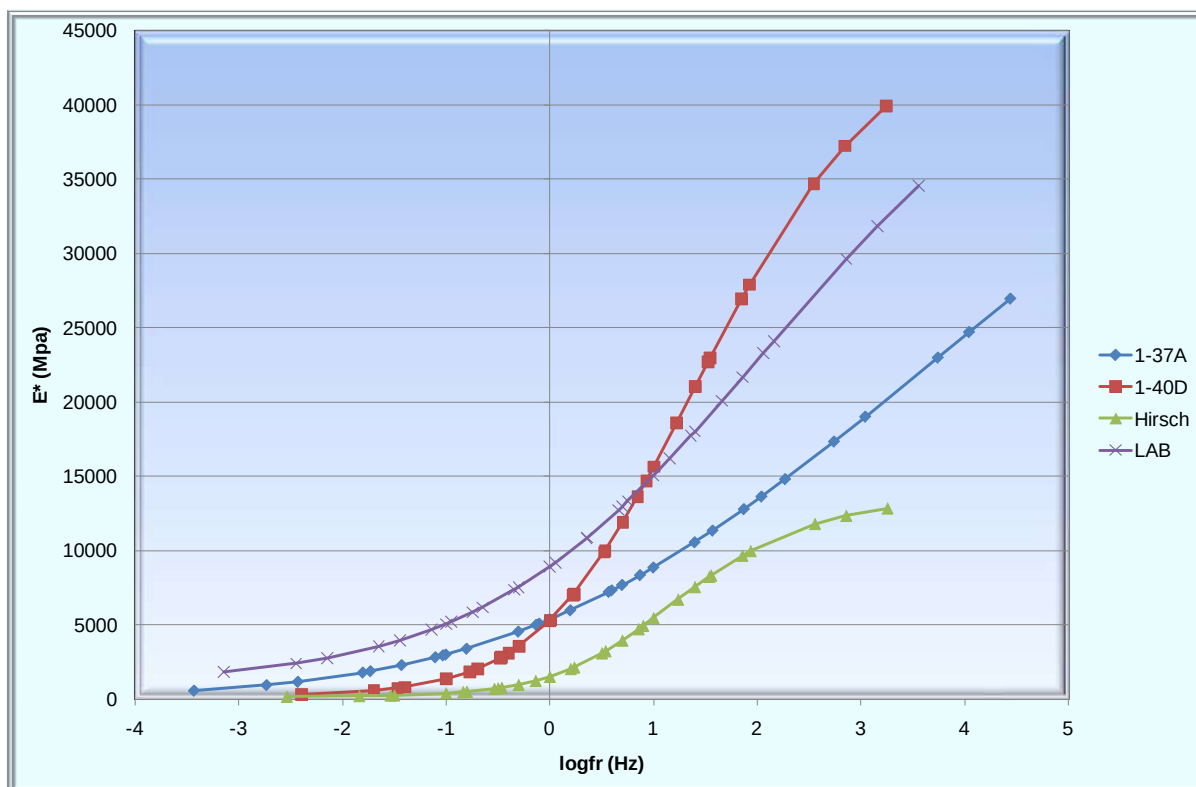


Σχήμα 7.36. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών L5

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι όλες οι κεντρικές καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή στη περιοχή που συγκεντρώνονται οι χαμηλές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, στη περιοχή αυτή οι τιμές της δυσκαμψίας δε διαφέρουν σημαντικά.

Η κεντρική καμπύλη του E^*_{1-37A} φαίνεται να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας κυρίως σε μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, η κεντρική καμπύλη του E^*_{1-40D} βρίσκεται σε γενικές γραμμές ψηλότερα εκείνης του E^*_{lab} και επομένως υπερεκτιμώνται οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας έναντι των πραγματικών. Αντιθέτως, η κεντρική καμπύλη του E^*_{Hirsch} βρίσκεται χαμηλότερα αυτής του E^*_{lab} , αλλά και όλων των υπολοίπων, σε όλο το εύρος των τιμών της μειωμένης συχνότητας υποδεικνύοντας ότι ο υπόψη αλγόριθμος υποεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Στο σχήμα 7.37 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T2.

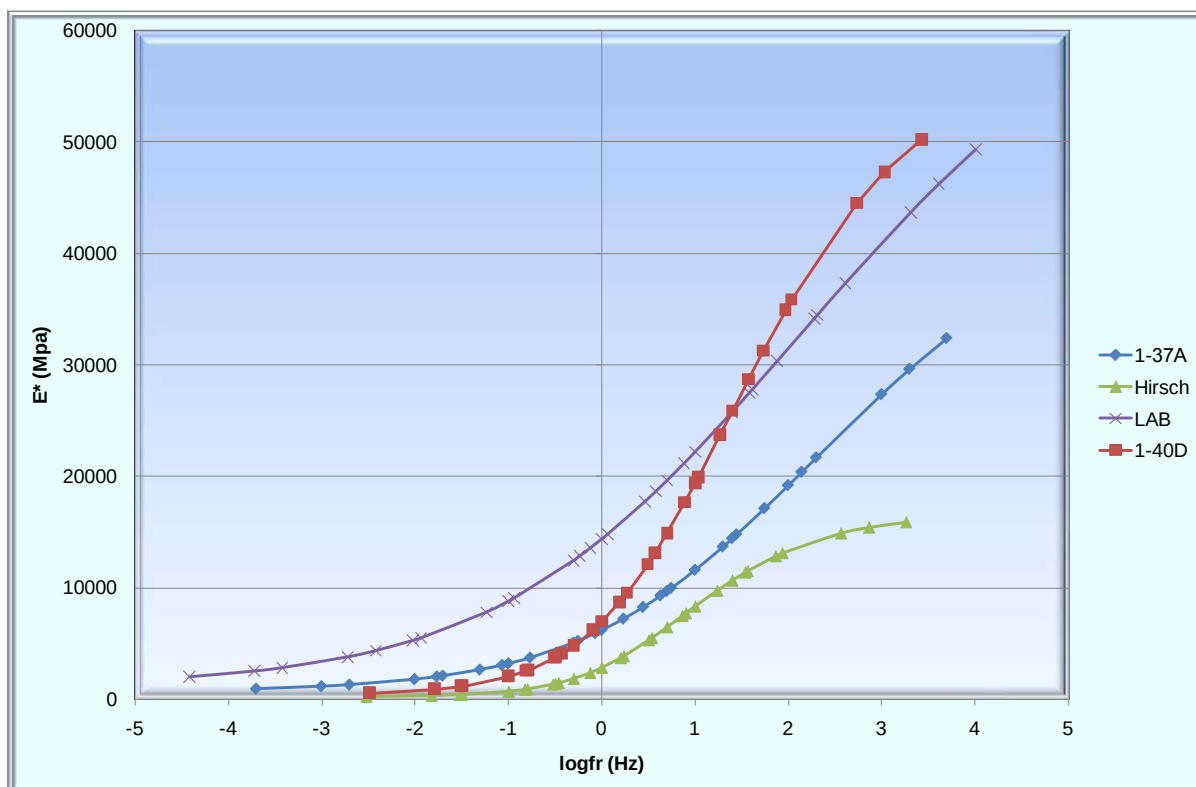


Σχήμα 7.37. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου T2

Από το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει ότι η μορφή των κεντρικών καμπυλών είναι όμοια, ιδιαίτερα στη περιοχή με τις χαμηλές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Από τη σύγκριση της κεντρικής καμπύλης του E^*_{1-40D} με εκείνη του E^*_{lab} προκύπτει ότι για τιμές μειωμένης λογαριθμικής συχνότητας μικρότερες του 1Hz περίπου, ο αλγόριθμος του Witczak 1-40D υποεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αντιθέτως, για τιμές μειωμένης λογαριθμικής συχνότητας μεγαλύτερες του 1Hz, οι εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας υπερεκτιμούνται. Τέλος, οι αλγόριθμοι του Witczak 1-37A και του Hirsch, για όλο το εύρος τιμών της μειωμένης λογαριθμικής συχνότητας, υποεκτιμούν τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

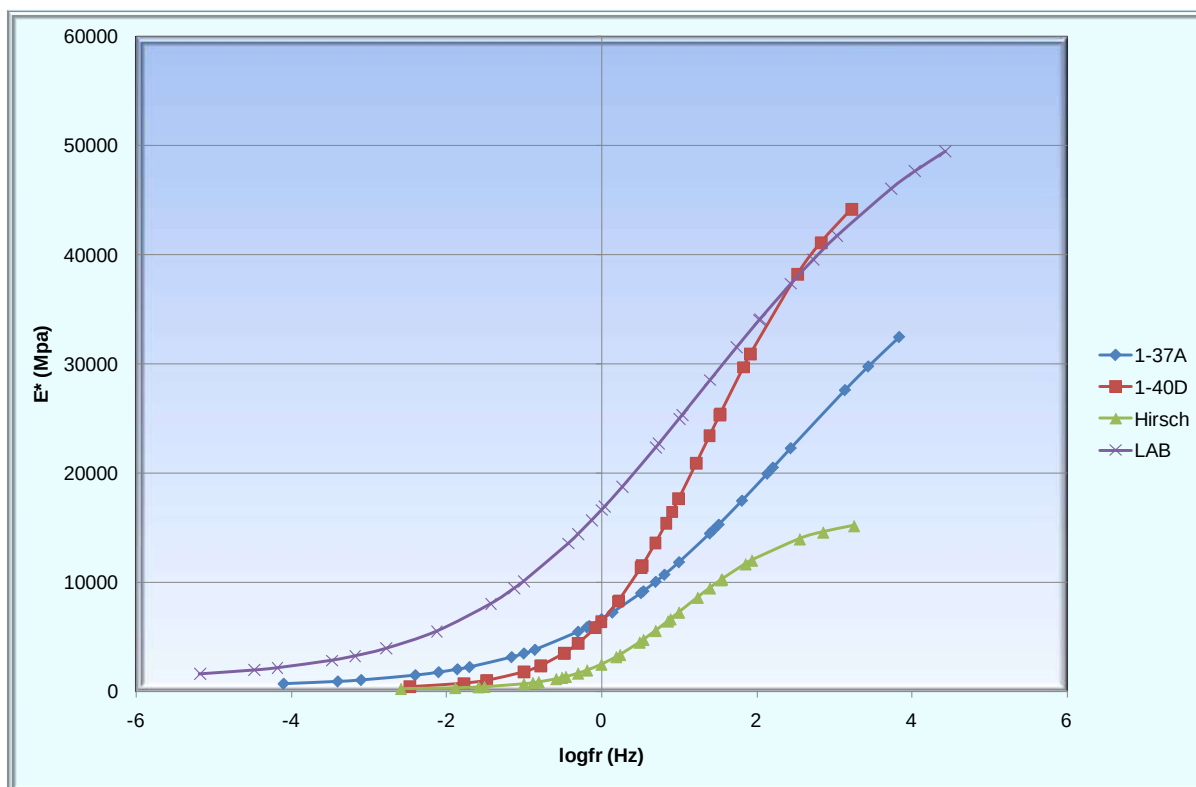
Στο σχήμα 7.38 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 7.38. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου T6

Όσον αφορά στο δοκίμιο T6, οι κεντρικές καμπύλες των E^*_{Hirsch} και E^*_{1-37A} φαίνεται να υποεκτιμούν τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για όλο το εύρος των τιμών της μειωμένης συχνότητας. Από τη σύγκριση της κεντρικής καμπύλης του E^*_{1-40D} με εκείνη του E^*_{lab} προκύπτει ότι για τιμές μειωμένης συχνότητας μικρότερες του 1Hz περίπου, ο αλγόριθμος του Witczak 1-40D υποεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αντιθέτως, για τιμές μειωμένης συχνότητας μεγαλύτερες του 1Hz, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας υπερεκτιμούνται.

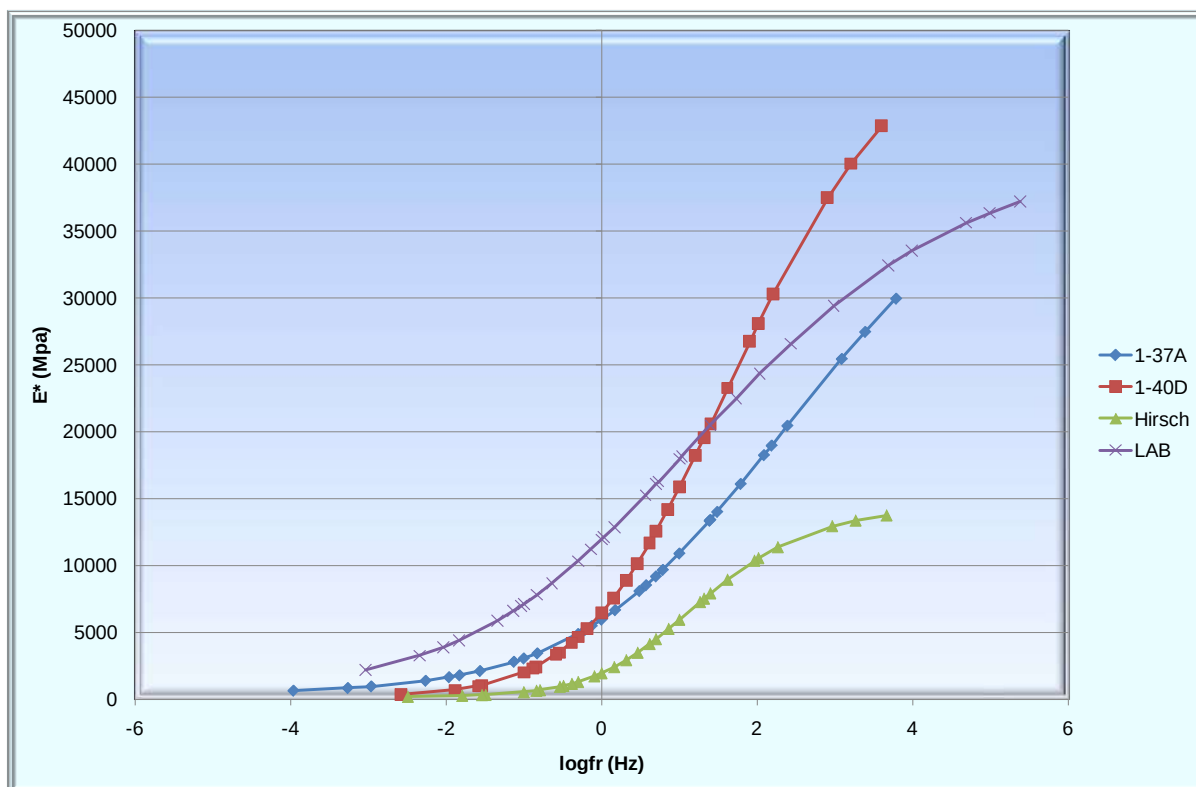
Στο σχήμα 7.39 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 7.39. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου T7

Από το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει ότι οι αλγόριθμοι του Witczak 1-37A και του Hirsch υποεκτιμούν τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με τις διαφορές που παρατηρούνται να είναι αρκετά σημαντικές. Όσον αφορά στον αλγόριθμο του Witczak 1-40D, για τιμές της μειωμένης συχνότητας φόρτισης μέχρι της τάξης των 2Hz, οι εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας υποεκτιμούνται. Για μεγαλύτερες τιμές μειωμένης συχνότητας, οι τιμές του E^*_{1-40D} και E^*_{lab} σχεδόν ταυτίζονται.

Στο σχήμα 7.40 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 7.40. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κεντρικών καμπυλών δοκιμίου T8

Οι κεντρικές καμπύλες που προκύπτουν για το δοκίμιο T8, παρουσιάζονται ομοιόμορφες κυρίως για χαμηλές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (υψηλές θερμοκρασίες). Ωστόσο, διαφορές εντοπίζονται στις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε όλο το εύρος τιμών μειωμένης συχνότητας.

Συγκρίνοντας τις κεντρικές καμπύλες των E^*_{1-37A} και E^*_{Hirsch} , προκύπτει ότι οι υπόψη αλγόριθμοι υποεκτιμούν τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για όλο το εύρος των τιμών της μειωμένης συχνότητας. Όσον αφορά στη κεντρική καμπύλη του E^*_{1-40D} , παρατηρείται ότι για τιμές μειωμένης συχνότητας μικρότερες του 1Hz, βρίσκεται κάτω από τη κεντρική καμπύλη του E^*_{lab} (υποεκτίμηση των πραγματικών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας), και πάνω από τη καμπύλη του E^*_{lab} για τιμές μειωμένης συχνότητας μεγαλύτερες του 1Hz (υπερεκτίμηση των πραγματικών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας). Επομένως, όσον αφορά τον αλγόριθμο Witczak 1-40D, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης, υποεκτιμά ή υπερεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Συνοψίζοντας, από τη συγκριτική αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Σε όλες τις περιπτώσεις, οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του Witczak 1-37A και του Hirsch υποεκτιμούν τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, για όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι περισσότερο αισθητές

στη περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών (μικρότερες των 20°C) και μεγαλύτερων συχνοτήτων. Όσον αφορά στον αλγόριθμο του Witczak 1-40D, παρατηρείται ότι είτε υποεκτιμά είτε υπερεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ανάλογα με τη θερμοκρασία. Σε γενικές γραμμές για ακραία υψηλές θερμοκρασίες (37°C), ο υπόψη αλγόριθμος υποεκτιμά τις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ενώ για ακραία χαμηλές τιμές (4°C) τις υπερεκτιμά. Όσον αφορά στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες δεν προκύπτει κάποιο καθολικό συμπέρασμα καθώς δεν παρατηρείται ενιαία τάση.

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σύμφωνα με αυτά που έχουν προκύψει από πλήθος ερευνών σε συναφή θέματα. Πιο συγκεκριμένα, οι κεντρικές καμπύλες του E^*_{lab} , E^*_{Hirsch} και E^*_{1-37A} παρουσιάζουν μια ομοιομορφία (Christensen et al. 2003). Ως προς τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ο αλγόριθμος Witczak 1-37A φαίνεται να εκτιμά πιο ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες με μεγαλύτερες διαφορές σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Clyne et al. 2003; Christensen et al. 2003; Birgisson et al. 2005; Tran & Hall 2005). Επίσης, ο αλγόριθμος του Hirsch υποεκτιμά σε σημαντικό βαθμό τις πραγματικές τιμές του E^* σε μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασίες (Singh et al. 2010; Robbins & Timm 2011). Ωστόσο, σύμφωνα με άλλες έρευνες οι δύο παραπάνω αλγόριθμοι εκτιμούν αρκετά πιο ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές του E^* σε χαμηλότερες θερμοκρασίες παρά σε υψηλότερες (Kim et al. 2005; Mohammad et al. 2005). Όσον αφορά στον αλγόριθμο Witczak 1-40D, σύμφωνα με τους Robbins & Timm (2011), γενικά υπερεκτιμά τις πραγματικές τιμές του E^* .

7.3.2 Αξιολόγηση σχετικών σφαλμάτων

Προκειμένου να προσδιορισθεί η απόκλιση των εκτιμώμενων από τους αλγορίθμους τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από τις εργαστηριακές τιμές, υπολογίστηκε το ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα. Το ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα, ΣΦ%, ορίστηκε ως το πηλίκο του απόλυτου σφάλματος ΔΕ προς τη τιμή του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Sigma\Phi\% = \frac{\Delta E}{E^*_{lab}} * 100 = \frac{|E^*_{lab} - E^*_{αλγ\ \acute{o}ριθμου}|}{E^*_{lab}} * 100 \quad (7.33)$$

Όπου:

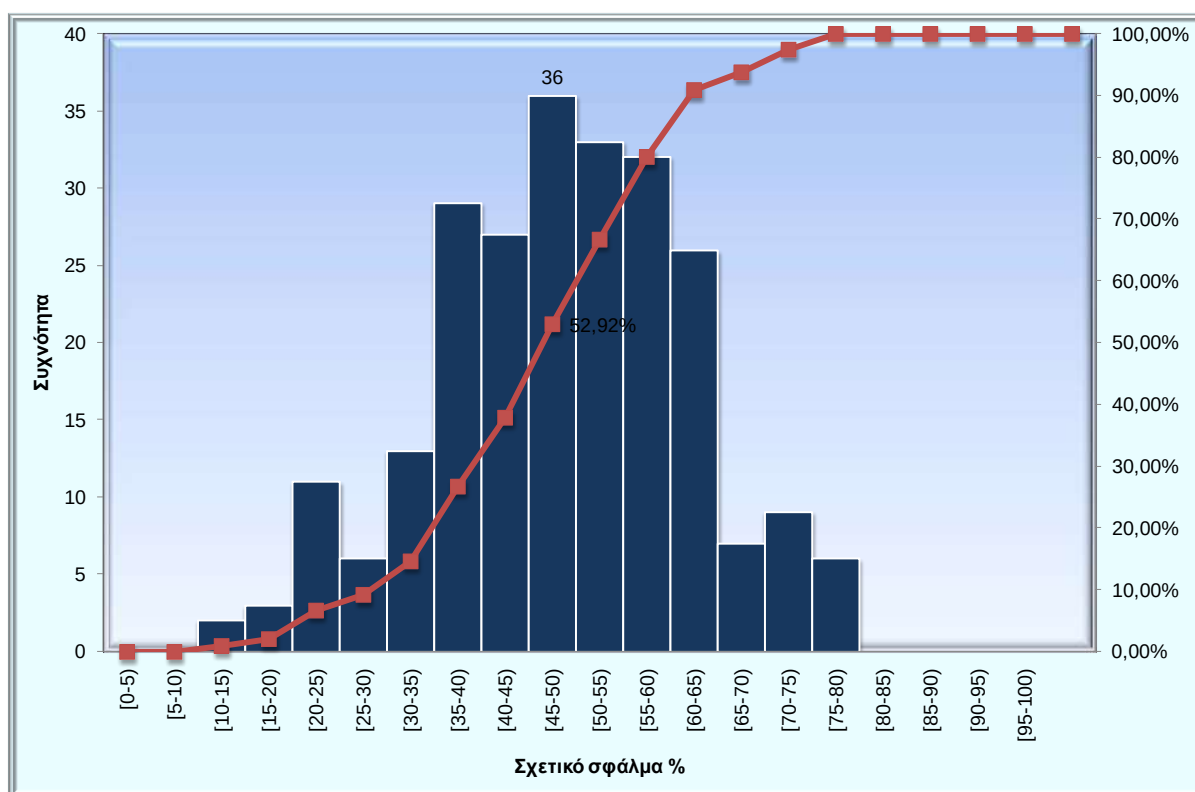
E^*_{lab} : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές

$E^*_{αλγορίθμου}$: το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε από την εφαρμογή του εκάστοτε αλγορίθμου

Στη συνέχεια, με βάση τα υπολογισμένα σχετικά σφάλματα κατασκευάστηκαν τα ιστογράμματα συχνοτήτων και οι αντίστοιχες αθροιστικές καμπύλες, τα οποία αποτελούν ένα τρόπο γραφικής παρουσίασης της κατανομής των σχετικών σφαλμάτων. Το ιστόγραμμα αποτελεί μέτρο της ασυμμετρίας της κατανομής, δηλαδή συμβάλλει στον έλεγχο της κανονικότητας της κατανομής. Μέσω της αθροιστικής καμπύλης προσδιορίζεται το πλήθος των σχετικών σφαλμάτων που έχουν τιμή μικρότερη από μια συγκεκριμένη.

Οι πίνακες της κατανομής των συχνοτήτων των σχετικών σφαλμάτων παρατίθενται στο παράρτημα (πίνακες Π9- Π11). Παρακάτω παρουσιάζονται τα ιστογράμματα.

Στο σχήμα 7.41 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων και η καμπύλη αθροιστικών συχνοτήτων του σχετικού σφάλματος μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού μέτρου δυσκαμψίας (E^*_{lab}) και των τιμών που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A (E^*_{1-37A}).

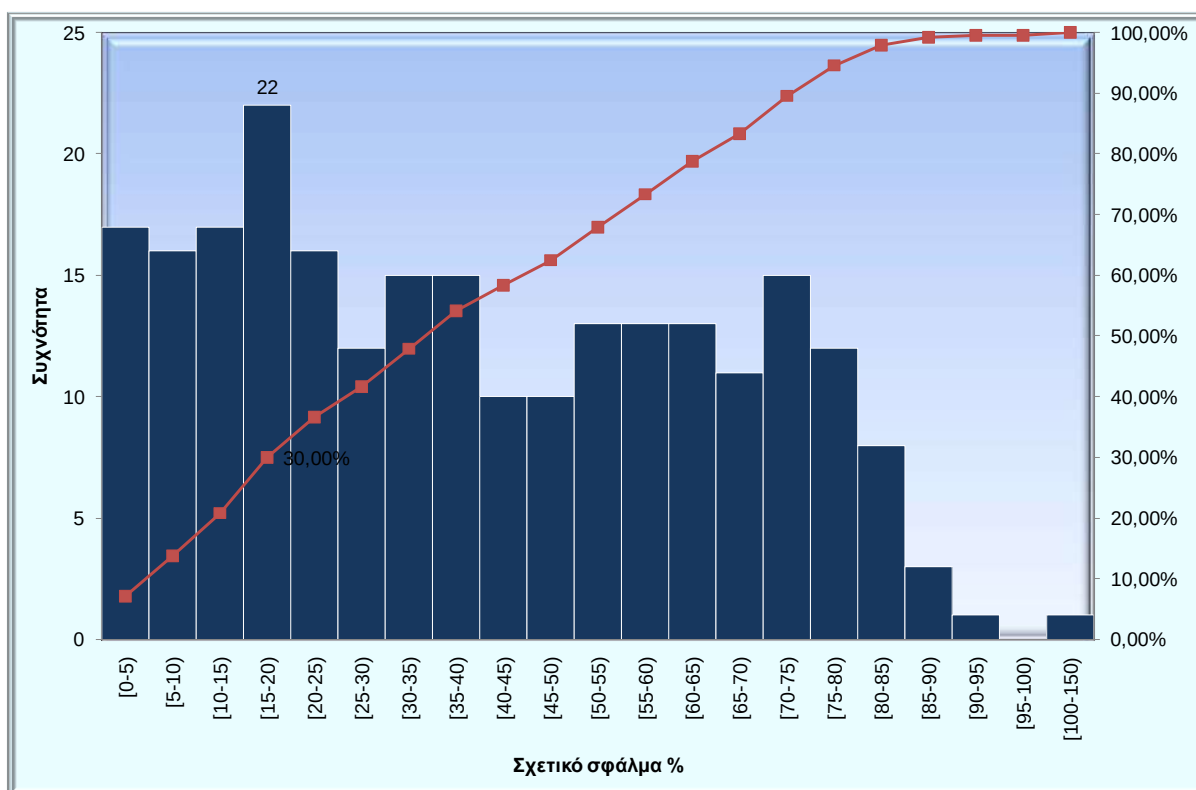


Σχήμα 7.41. Ιστόγραμμα συχνοτήτων και αθροιστικών συχνοτήτων $E^*_{lab}-E^*_{1-37A}$

Από το παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι η κατανομή των σχετικών σφαλμάτων προσεγγίζει την κανονική αλλά δεν είναι, αφού δε διατηρείται κάποια συμμετρία γύρω από τις υψηλότερες συχνότητες των κεντρικών διαστημάτων των τιμών του σχετικού σφάλματος. Επομένως, ο αριθμητικός μέσος δεν αποτελεί αντιπροσωπευτική τιμή του σφάλματος. Ως εκ τούτου, υπολογίστηκε η επικρατούσα τιμή η οποία είναι εκείνη που έχει τη μέγιστη συχνότητα. Στη προκειμένη περίπτωση, η επικρατούσα τιμή είναι 46,37% με συχνότητα 36, δηλαδή η τιμή του σχετικού σφάλματος που εμφανίζεται πιο συχνά στο δείγμα είναι το

46,37%. Ο αριθμητικός μέσος είναι 47,39% περίπου και δε διαφέρει σημαντικά από την επικρατούσα τιμή λόγω του ότι η κατανομή των σχετικών σφαλμάτων δε διαφέρει σημαντικά από τη κανονική. Επίσης, το 52,92% των τιμών του σχετικού σφάλματος είναι μικρότερο από τη τιμή του 46,37%.

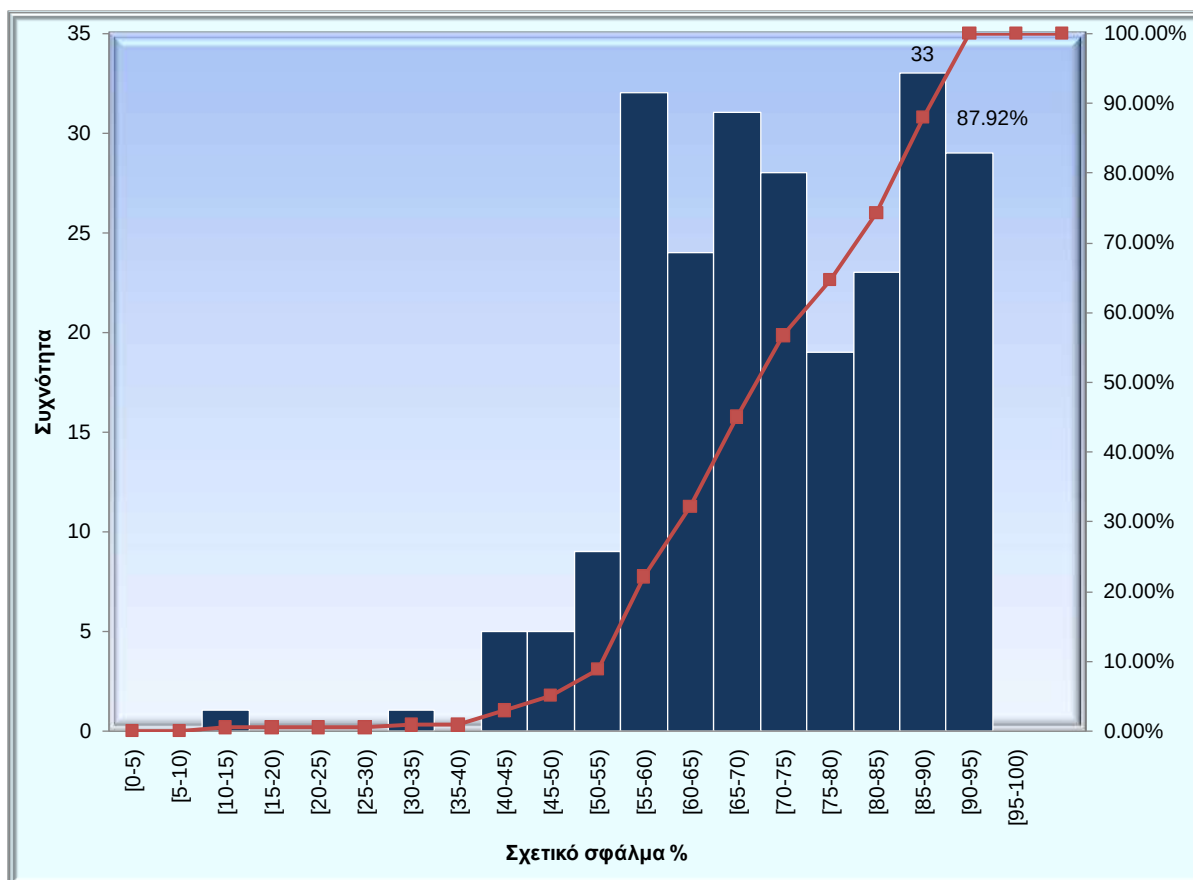
Στο σχήμα 7.42 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων και η καμπύλη αθροιστικών συχνοτήτων του σχετικού σφάλματος μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού μέτρου δυσκαμψίας (E^*_{lab}) και των τιμών που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D (E^*_{1-40D}).



Σχήμα 7.42. Ιστόγραμμα συχνοτήτων και αθροιστικών συχνοτήτων $E^*_{lab}-E^*_{1-40D}$

Από το παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι η κατανομή των σχετικών σφαλμάτων δεν είναι κανονική, αφού δε διατηρείται κάποια συμμετρία γύρω από τις υψηλότερες συχνότητες των κεντρικών διαστημάτων των τιμών του σχετικού σφάλματος. Επομένως, ο αριθμητικός μέσος δεν αποτελεί αντιπροσωπευτική τιμή του σφάλματος. Ως εκ τούτου, υπολογίστηκε η επικρατούσα τιμή η οποία είναι εκείνη που έχει τη μέγιστη συχνότητα. Στη προκειμένη περίπτωση, η επικρατούσα τιμή είναι περίπου 17% με συχνότητα 22, δηλαδή η τιμή του σχετικού σφάλματος που εμφανίζεται πιο συχνά στο δείγμα είναι το 17%. Ο αριθμητικός μέσος είναι 37,8% και διαφέρει σημαντικά από την επικρατούσα τιμή. Επίσης, το 30% των τιμών του σχετικού σφάλματος είναι μικρότερο από τη τιμή του 17%.

Στο σχήμα 7.43 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων και η καμπύλη αθροιστικών συχνοτήτων του σχετικού σφάλματος μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού μέτρου δυσκαμψίας (E^*_{lab}) και των τιμών που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Hirsch (E^*_{Hirsch}).

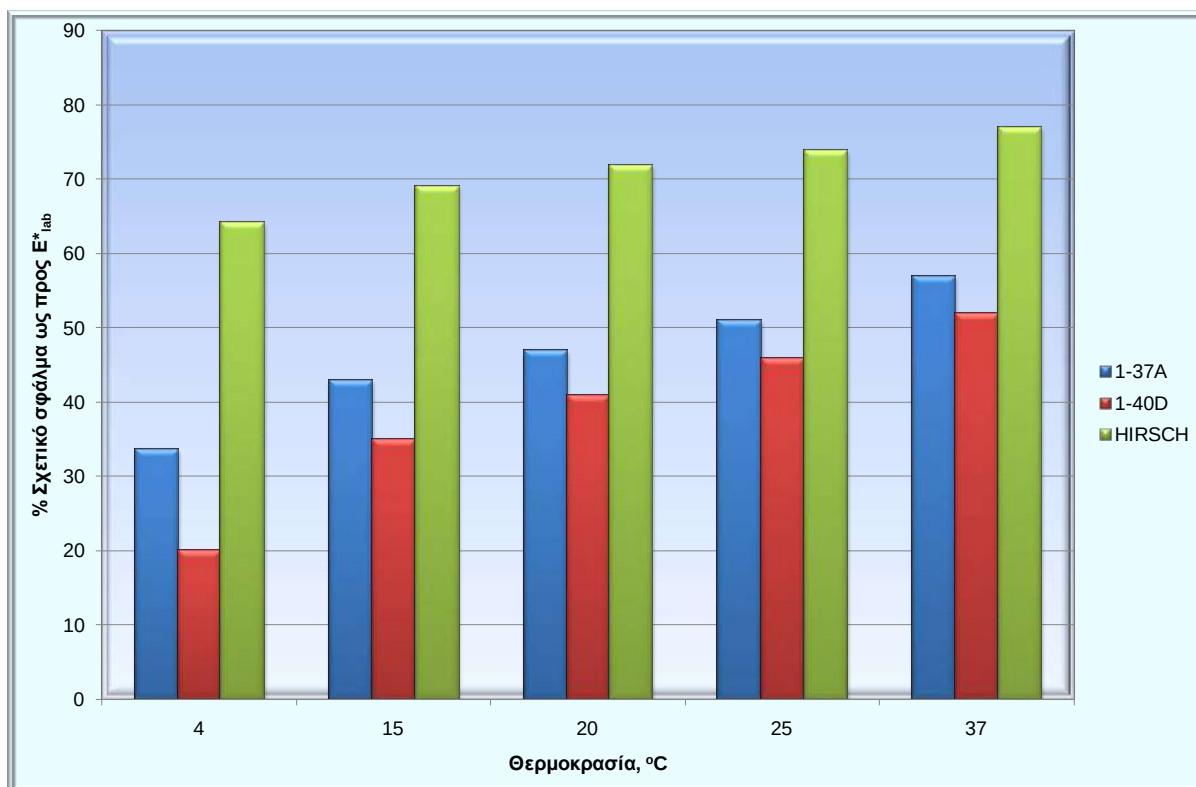


Σχήμα 7.43. Ιστόγραμμα συχνοτήτων και αθροιστικών συχνοτήτων $E^*_{lab}-E^*_{Hirsch}$

Από το παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι η κατανομή των σχετικών σφαλμάτων δεν είναι κανονική, αφού δε διατηρείται κάποια συμμετρία γύρω από τις υψηλότερες συχνότητες των κεντρικών διαστημάτων των τιμών του σχετικού σφάλματος. Επομένως, ο αριθμητικός μέσος δεν αποτελεί αντιπροσωπευτική τιμή του σφάλματος. Ως εκ τούτου, υπολογίστηκε η επικρατούσα τιμή η οποία είναι εκείνη που έχει τη μέγιστη συχνότητα. Στη προκειμένη περίπτωση, η επικρατούσα τιμή είναι 89,2% με συχνότητα 33, δηλαδή η τιμή του σχετικού σφάλματος που εμφανίζεται πιο συχνά στο δείγμα είναι το 89,2%. Ο αριθμητικός μέσος είναι 71,46% και διαφέρει από την επικρατούσα τιμή, λόγω μη κανονικής κατανομής. Επίσης, το 87,92% των τιμών του σχετικού σφάλματος είναι μικρότερο από τη τιμή του 89,2%.

Στα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζεται το ποσοστό των σχετικών σφαλμάτων ως προς τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης, αντίστοιχα.

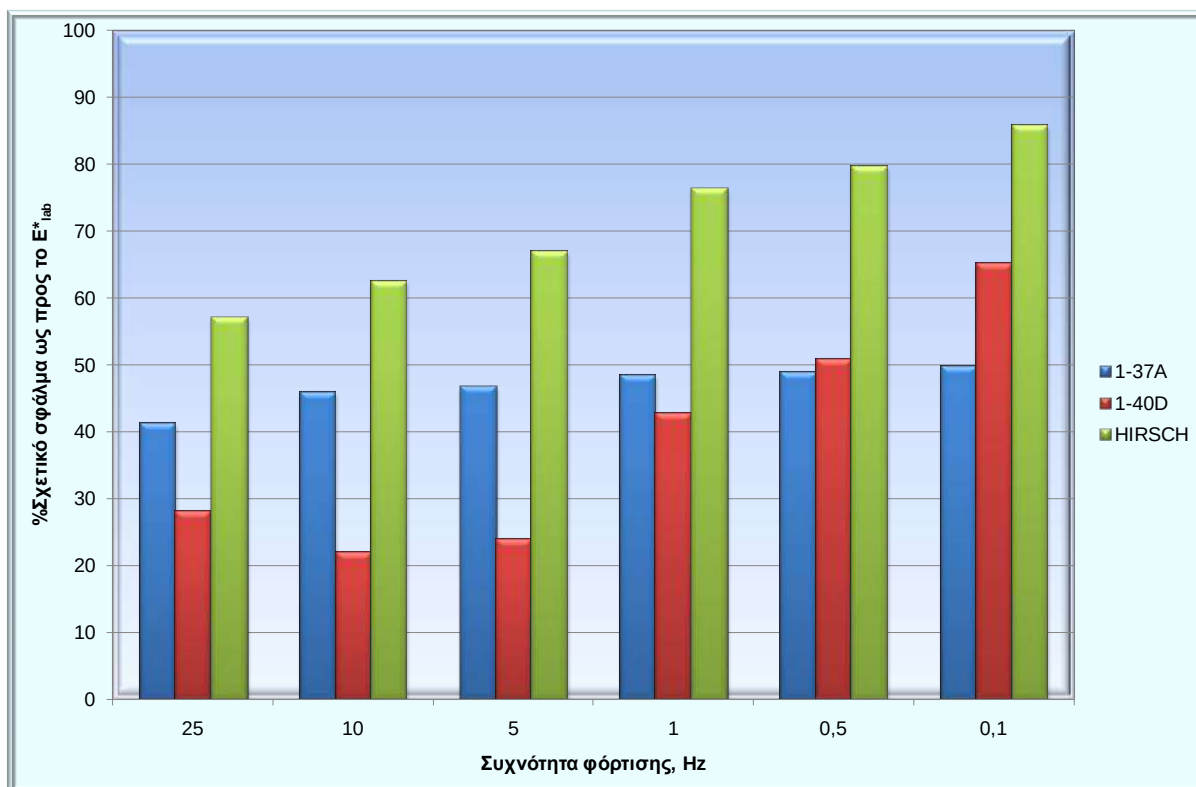
Στο σχήμα 7.44 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα ως προς τη θερμοκρασία, μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού μέτρου δυσκαμψίας και των τιμών που προέκυψαν από τους αλγορίθμους.



Σχήμα 7.44. Σχετικό σφάλμα του $E^*_{lab} - E^*_{αλγορίθμων}$ ως προς τη θερμοκρασία

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το ποσοστό των σχετικών σφαλμάτων, μεταξύ του E^*_{lab} και του $E^*_{αλγορίθμων}$, αυξάνεται για μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Οπότε μεγαλύτερες τιμές σχετικών σφαλμάτων παρατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες (25 και 37°C). Επιπλέον, παρατηρείται ότι μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα προκύπτουν μεταξύ των πραγματικών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και εκείνων που προκύπτουν από τον αλγόριθμο του Hirsch.

Στο σχήμα 7.45 παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα ως προς τη συχνότητα φόρτισης, μεταξύ των τιμών του εργαστηριακού μέτρου δυσκαμψίας και των τιμών που προέκυψαν από τους αλγορίθμους.



Σχήμα 7.45. Σχετικό σφάλμα του $E^*_{lab} - E^*_{αλγορίθμων}$ ως προς τη συχνότητα

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το ποσοστό των σχετικών σφαλμάτων, μεταξύ του E^*_{lab} και του $E^*_{αλγορίθμων}$, αυξάνεται για μικρότερες συχνότητες φόρτισης. Επομένως, οι μεγαλύτερες τιμές σχετικών σφαλμάτων παρατηρούνται στις χαμηλότερες συχνότητες (0.1 και 0.5Hz). Επιπλέον, παρατηρείται ότι μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα προκύπτουν μεταξύ των πραγματικών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και εκείνων που προκύπτουν από τον αλγόριθμο του Hirsch.

Στους πίνακες Π12- Π14 του παραρτήματος δίνονται τα αποτελέσματα του ποσοστού των σχετικών σφαλμάτων μεταξύ του πραγματικού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και εκείνων που προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων.

Σύμφωνα με τους Kim et al. (2005), ο αλγόριθμος Witczak 1-37A παρουσιάζει μεγαλύτερο σχετικό σφάλμα σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ όσον αφορά στον αλγόριθμο Hirsch μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίζονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες

7.4 Συσχέτιση μετρημένων και προβλεπόμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των εργαστηριακών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και των προβλεπόμενων τιμών, που προέκυψαν από την εφαρμογή των

αλγορίθμων, πραγματοποιήθηκε μέσω της εφαρμογής της μεθόδου της απλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Κατά τη διερεύνηση αυτή ελήφθησαν υπόψη όλα τα αποτελέσματα των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ανεξαρτήτως μίγματος και δοκιμίου. Στόχος ήταν η ανάπτυξη σχέσεων της παρακάτω μορφής.

$$y = a + \beta * x \quad (7.34)$$

Όπου:

y: μετρημένη τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

x: προβλεπόμενη τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

a: τεταγμένη του σημείου στο οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα y-y

β: κλίση της ευθείας

Κατ' αυτό το τρόπο και υπό τη προϋπόθεση καλής συσχέτισης των μεγεθών θα είναι δυνατή η μετάβαση από τα εκτιμώμενα μέτρα δυσκαμψίας (E^*_{1-37A} , E^*_{1-40D} , E^*_{Hirsch}) στο εργαστηριακό μέτρο δυσκαμψίας (E^*_{lab}). Η αξιολόγηση της συσχέτισης πραγματοποιήθηκε μέσω του συντελεστή προσδιορισμού R^2 και του λόγου Se/Sy . Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 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. Όσο το R^2 πλησιάζει τη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή η συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Ο λόγος Se/Sy δείχνει αν η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης δίνει μια καλή ή κακή περιγραφή της σχέσης μεταξύ της ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής. Το Se , ονομάζεται τυπικό σφάλμα της εκτίμησης (standard error of estimated values) και εκφράζει τη μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής (μετρημένης) και της εκτιμώμενης τιμής της μεταβλητής (από τη ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης), ενώ το Sy εκφράζει τη τυπική απόκλιση των πραγματικών τιμών γύρω από τη μέση τιμή (standard deviation of measured values). Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους.

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n-1}} \quad (7.35)$$

Όπου

Se : τυπικό σφάλμα των εκτιμώμενων τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Y : μετρημένες (εργαστηριακές) τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$\hat{Y}$: τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης

n: πλήθος των τιμών του δείγματος

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (7.36)$$

Όπου:

S_y: τυπική απόκλιση των μετρημένων τιμών από τη μέση τιμή τους

Y: μετρημένες (εργαστηριακές) τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

$\bar{Y}$: μέση τιμή των μετρημένων (εργαστηριακών) τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

n: πλήθος των τιμών του δείγματος

$$R^2 = 1 - \left(\frac{S_e}{S_y}\right)^2 \quad (7.37)$$

Στο πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα κριτήρια αξιολόγησης των στατιστικών παραμέτρων.

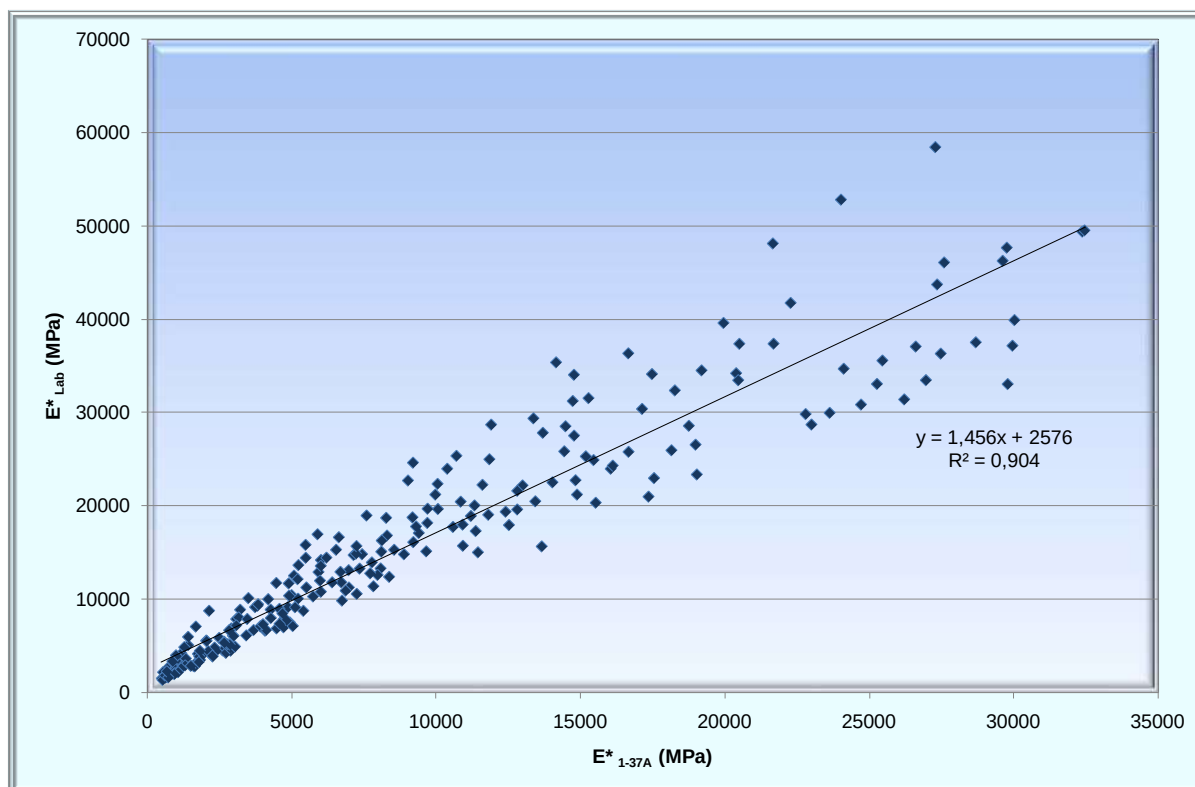
Πίνακας 7.1. Κριτήρια αξιολόγησης για τα R² και το λόγο Se/Sy (Tran & Hall 2005)

Κριτήρια Αξιολόγησης	R ²	Se/Sy
Εξαιρετικό	≥ 0,90	≤ 0,35
Πολύ καλό	0,70- 0,89	0,36- 0,55
Σχετικά καλό	0,40- 0,69	0,56- 0,75
Κακό	0,20- 0,39	0,79- 0,89
Πολύ κακό	≤ 0,19	≥ 0,90

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς καθώς και οι αντίστοιχες ευθείες παλινδρόμησης των μετρημένων (εργαστηριακών) τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ως προς τις τιμές που εκτιμήθηκαν από τους αλγορίθμους.

7.4.1.1 Συσχέτιση E*_{lab} με E*_{1-37A}

Στο σχήμα 7.46 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που εκτιμώνται από τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A με εκείνες που προκύπτουν εργαστηριακά.



Σχήμα 7.46. Συσχέτιση των E^*_{lab} - E^*_{1-37A}

Η συσχέτιση των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν στο εργαστήριο και εκείνων που εκτιμήθηκαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A, περιγράφεται από τη παρακάτω εξίσωση:

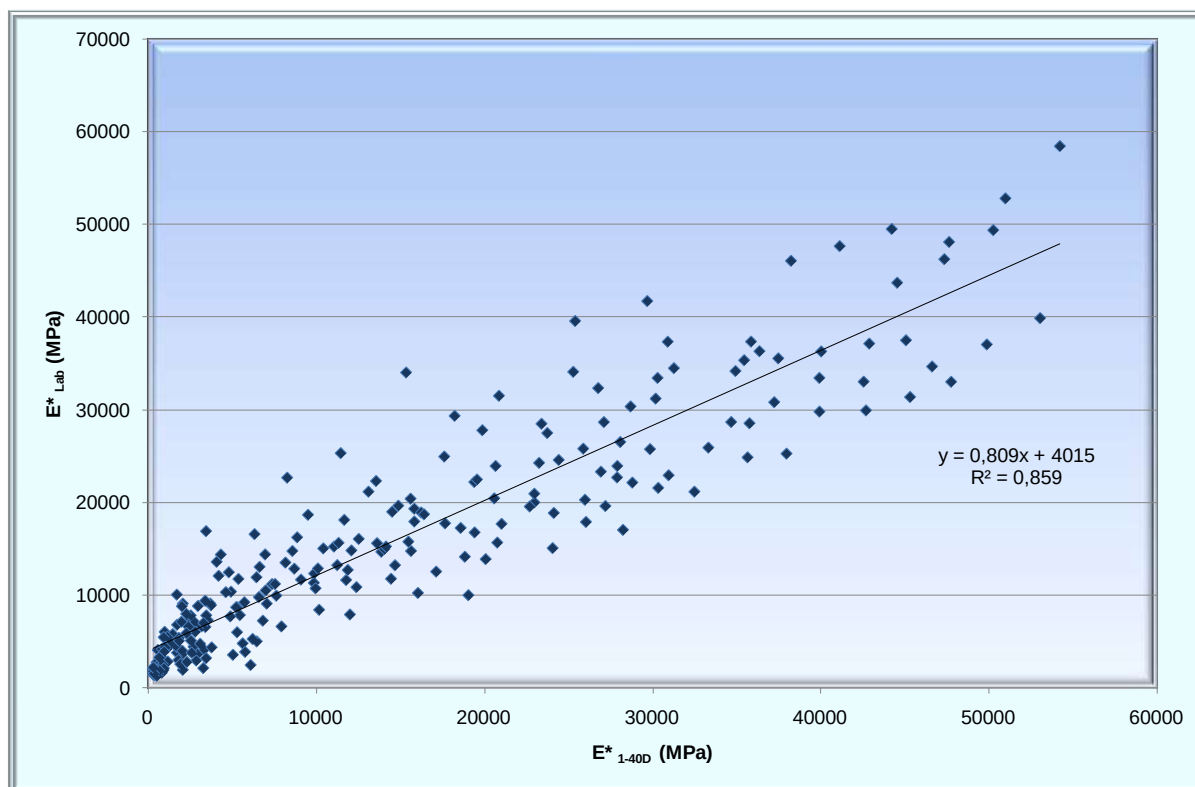
$$E^*_{lab} = 1,456 * E^*_{1-37A} + 2576 \quad (7.38)$$

Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι ίση με 0,904 και υποδεικνύει εξαιρετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Επίσης, ο λόγος Se/Sy είναι ίσος με 0,313 και υποδεικνύει ότι η εξίσωση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης δίνει μια εξαιρετική περιγραφή της σχέσης μεταξύ των δύο μεγεθών.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η διασπορά των σημείων για μικρές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (υψηλότερες θερμοκρασίες) είναι μικρότερη από εκείνη που συναντάται σε μεγαλύτερες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (χαμηλότερες θερμοκρασίες).

7.4.1.2 Συσχέτιση E^*_{lab} με E^* Witczak 1-40D

Στο σχήμα 7.47 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από τον αλγόριθμο του Witczak 1-40D με εκείνες που προκύπτουν εργαστηριακά.



Σχήμα 7.47. Συσχέτιση των E^*_{lab} - E^*_{1-40D}

Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν στο εργαστήριο και εκείνων που εκτιμήθηκαν από τον αλγόριθμο Witczak 1-40D, μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση.

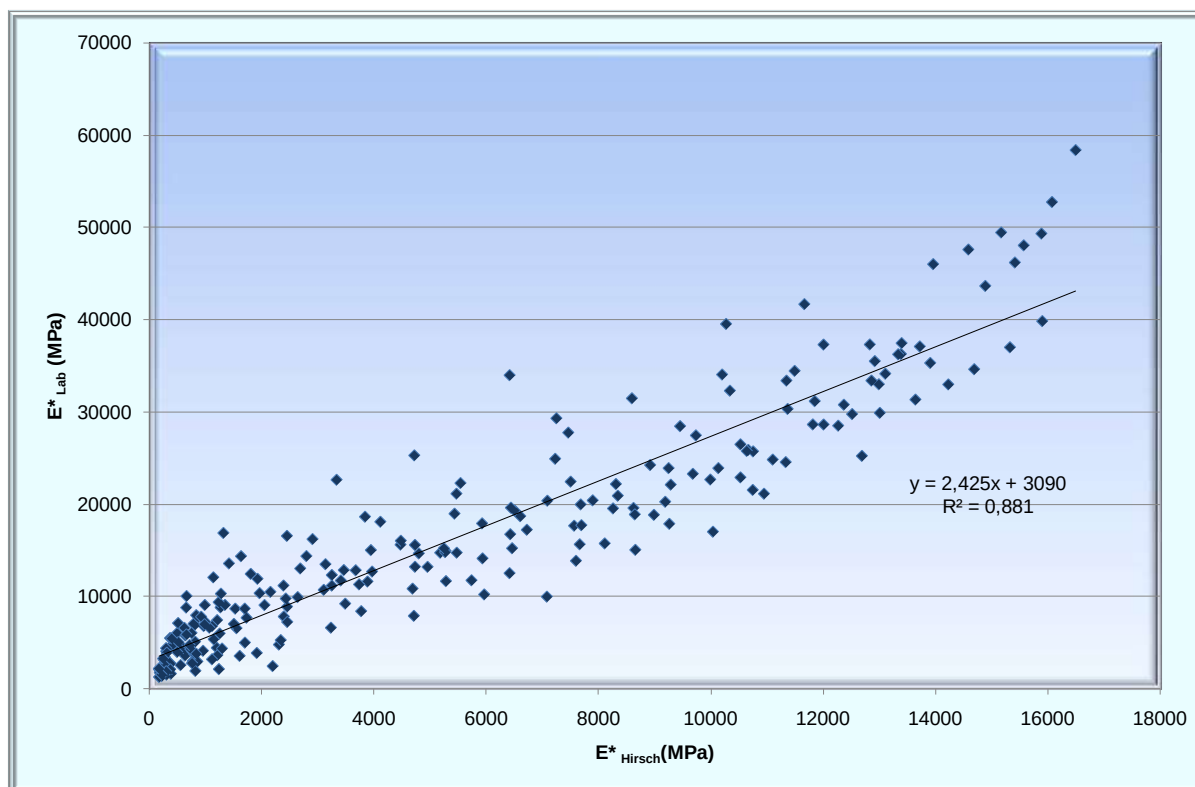
$$E^*_{lab} = 0,809 * E^*_{1-40D} + 4015 \quad (7.39)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίση με 0,859 και υποδεικνύει μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Επιπλέον, ο λόγος Se/Sy είναι ίσος με 0,377, υποδεικνύοντας ότι η εξίσωση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης δίνει μια πολύ καλή περιγραφή της σχέσης μεταξύ των παραπάνω μεγεθών.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η διασπορά των σημείων των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι σχετικά ομοιόμορφη, με ελάχιστα μικρότερη διασπορά σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

7.4.1.3 Συσχέτιση E^*_{lab} με E^*_{Hirsch}

Στο σχήμα 7.48 παρουσιάζεται η συσχέτιση των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από τον αλγόριθμο του Hirsch με εκείνες που προκύπτουν εργαστηριακά.



Σχήμα 7.48. Συσχέτιση των $E^*_{\text{εργαστηριακό}}$ και E^*_{Hirsch}

Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προέκυψαν στο εργαστήριο και εκείνων που εκτιμήθηκαν από τον αλγόριθμο Hirsch, μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση.

$$E^*_{\text{lab}} = 2,425 * E^*_{\text{Hirsch}} + 3090 \quad (7.40)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ίση με 0,881 και υποδεικνύει μια πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Επιπλέον, ο λόγος Se/Sy είναι ίσος με 0,345, από όπου προκύπτει ότι η εξίσωση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης δίνει μια εξαιρετική περιγραφή της σχέσης μεταξύ των παραπάνω μεγεθών.

Παρατηρώντας τη διασπορά των σημείων του παραπάνω διαγράμματος, διαπιστώνεται ότι είναι σχετικά ομοιόμορφη.

Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή έως άριστη συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν εργαστηριακά και εκείνων που προκύπτουν από τους αλγορίθμους του Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch. Επομένως, είναι δυνατή η μετάβαση από τις εκτιμώμενες στις εργαστηριακές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Στο πίνακα 7.2 δίνονται συγκεντρωτικά ο δείκτης προσδιορισμού R^2 και ο λόγος Se/Sy , ενώ στο σχήμα 7.49 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των υπόψη στατιστικών παραμέτρων.

Πίνακας 7.2. Στατιστικές παράμετροι

Παράμετροι	$E^*_{lab}-E^*_{1-37A}$	$E^*_{lab}-E^*_{1-40D}$	$E^*_{lab}-E^*_{Hirsch}$
Se/Sy	0,3131717	0,3767621	0,3453253
R^2	0,9019235	0,8580503	0,8807504



Σχήμα 7.49. Στατιστικές παράμετροι

Από τον πίνακα 7.2 και το σχήμα 7.49 προκύπτει ότι η συσχέτιση του E^*_{lab} με το E^*_{1-37A} είναι ελαφρώς καλύτερη από τις άλλες, καθώς έχει τη μεγαλύτερη τιμή R^2 και τη μικρότερη τιμή Se/Sy.

Σύμφωνα με έρευνες σε συναφή θέματα η συσχέτιση του E^*_{lab} τόσο με το E^*_{1-37A} όσο και με το E^*_{Hirsch} είναι αρκετά καλή και οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτή που προκύπτει από τη συσχέτιση του E_{lab} με το E^*_{1-40D} (Singh et al. 2010). Γενικά, οι αλγόριθμοι του Witczak 1-37A και του Hirsch εκτιμούν αρκετά ικανοποιητικά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και κατά τη συσχέτισή τους εμφανίζεται μεγαλύτερη διασπορά σε μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασίες (Mohammad et al. 2005; Singh et al. 2010; Robbins & Timm 2011). Ο αλγόριθμος του Witczak 1-40D γενικά υπερεκτιμά ή υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας κυρίως στην περίπτωση ακραίων θερμοκρασιών και κατά τη συσχέτιση του E_{lab} με το E^*_{1-40D} μεγαλύτερη διασπορά παρατηρείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Singh et al. 2010; Robbins & Timm 2011).

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας και κατ' επέκταση της καταλληλότητας των πιο ευρέως διαδεδομένων αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων σε μίγματα ισοπεδωτικής στρώσης, τα οποία χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν οκτώ δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης, τα οποία υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου να προσδιορισθεί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και στη συνέχεια ενεργοποιώντας τους αλγορίθμους πρόβλεψης προέκυψαν οι αντίστοιχες εκτιμώμενες τιμές. Από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών (master curves) για κάθε δοκίμιο, προέκυψε ότι οι αλγόριθμοι πρόβλεψης Witczak 1-37A και Hirsch, υποεκτιμούν το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από τον εργαστηριακό προσδιορισμό, για όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι μεγαλύτερης κλίμακας στη περίπτωση που οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αντιστοιχούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλες συχνότητες (μειωμένη συχνότητα λογαριθμικής κλίμακας). Αντιθέτως, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D δεν εμφανίζει ενιαία τάση, καθώς ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης (συχνότητα και θερμοκρασία) άλλοτε υποεκτιμά και άλλοτε υπερεκτιμά το εργαστηριακό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα, για υψηλές θερμοκρασίες και για τιμές της μειωμένης συχνότητας μικρότερες από ένα εύρος τιμών του 1-2Hz περίπου, οι τιμές που προκύπτουν από τον υπόψη αλγόριθμο είναι μικρότερες από τις εργαστηριακές, ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλότερες τιμές της μειωμένης συχνότητας είναι μεγαλύτερες. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και από διεθνείς συναφείς έρευνες, όπου αναφέρεται ότι οι αλγόριθμοι πρόβλεψης Witczak 1-37A και Hirsch παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές του μέτρου δυσκαμψίας στην περίπτωση χαμηλών θερμοκρασιών. Ωστόσο, άλλες έρευνες καταλήγουν σε αντίθετα συμπεράσματα όσον αφορά στους προαναφερθέντες αλγόριθμους, ενώ όσον αφορά στον αλγόριθμο του Witczak 1-40D παρατηρείται η τάση υπερεκτίμησης των πραγματικών τιμών του E^* σε όλο το εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

Όσον αφορά στην ποσοτικοποίηση των διαφορών που παρατηρήθηκαν, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη ανάλυση των ποσοστιαίων σχετικών σφαλμάτων. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι για δεδομένη θερμοκρασία το ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα αυξάνεται με τη μείωση της συχνότητας, ενώ για δεδομένη συχνότητα το ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως, μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα παρατηρούνται στις ακραία υψηλές θερμοκρασίες (37°C) και για μικρές συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5 Hz). Επίσης, οι κατανομές των ποσοστιαίων σφαλμάτων δεν ακολουθούν την

κανονική και επομένως η μέση τιμή δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική. Εναλλακτικά, υπολογίστηκε η επικρατούσα τιμή με βάση την οποία προκύπτει ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-40D παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα. Ωστόσο, το εύρος των τιμών των σφαλμάτων είναι μεγάλο συγκριτικά με τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A, δηλαδή τα σφάλματα δεν συγκεντρώνονται γύρω από συγκεκριμένες τιμές. Η αύξηση του ποσοστιαίου σχετικού σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα διεθνών ερευνών, με εξαίρεση τον αλγόριθμο του Hirsch όπου τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Από τη συσχέτιση του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με το εκτιμώμενο από τους αλγορίθμους προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Γενικά, παρατηρείται ότι η συσχέτιση μεταξύ των εργαστηριακών τιμών του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και εκείνων που προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων κυμαίνεται από πολύ καλή έως άριστη. Συγκεκριμένα, τόσο οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 όσο και του λόγου Se/Sy υποδεικνύουν την ισχυρή συσχέτιση των υπόψη μεγεθών σε κάθε περίπτωση. Η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 και ταυτόχρονα η χαμηλότερη τιμή του λόγου Se/Sy παρατηρείται κατά τη συσχέτιση του E^*_{lab} με το E^*_{1-37A} . Στην παρατήρηση αυτή καταλήγουν και άλλοι ερευνητές, επισημαίνοντας ότι η συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών του E^*_{lab} και του E^*_{1-37A} αλλά και του E^*_{Hirsch} είναι αρκετά καλή με τις τιμές του R^2 και του λόγου Se/Sy να κυμαίνονται στα επίπεδα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

Λαμβάνοντας υπόψη αφενός τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και αφετέρου εκείνα που έχουν προκύψει από διεθνείς έρευνες σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει πλήρης συμφωνία μεταξύ αυτών. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε διαφοροποιήσεις που αφορούν στη σύνθεση των μιγμάτων (κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών, ποσοστό κενών κ.α.). Επομένως, η επίλογη του πλέον κατάλληλου αλγορίθμου για την εκτίμηση του E^* καθώς και η μετάβαση από το εκτιμώμενο E^* (μέσω των αλγορίθμων) στο πραγματικό (που προσδιορίζεται εργαστηριακά) μέσω κατάλληλων στατιστικών προσομοιωμάτων, δεν θα πρέπει να βασίζεται μονοσήμαντα στην υιοθέτηση αποτελεσμάτων σχετικών ερευνών. Αντιθέτως, θα πρέπει αυτά να επαναπροσδιορίζονται και να βαθμονομούνται με βάση τα μίγματα που χρησιμοποιεί κάθε χώρα. Με τον τρόπο αυτό η εκτίμηση του E^* θα είναι πιο ακριβής με μικρότερες αποκλίσεις.

Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω, πιστεύεται ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A είναι ο πιο κατάλληλος για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των τυπικών ελληνικών ασφαλομιγμάτων ισοπεδωτικής στρώσης. Αν και ο υπόψη αλγόριθμος υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε όλο το εύρος συχνοτήτων φόρτισης και θερμοκρασίας, η άριστη συσχέτιση μεταξύ των εκτιμώμενων και εργαστηριακών τιμών καθιστά δυνατή τη χρήση της γραμμικής σχέσης που τα συνδέει για τη μετάβαση από το E^*_{1-37A} στο E^*_{lab} .

^{37A} στο E^*_{lab} . Επιπλέον, η κατανομή των ποσοστιαίων σχετικών σφαλμάτων πλησιάζει την κανονική και το εύρος διακύμανσης των τιμών είναι μικρότερο συγκριτικά με τους άλλους αλγορίθμους.

Ο αλγόριθμος του Hirsch δεν πιστεύεται ότι μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των υπόψη μιγμάτων δεδομένου ότι υποεκτιμά σε σημαντικό βαθμό τις πραγματικές τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε όλο το εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Επίσης, το εύρος διακύμανσης των σχετικών σφαλμάτων είναι ιδιαίτερος μεγάλο.

Τέλος, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D, λόγω της ποικιλόμορφης συμπεριφοράς του ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και ανάλογα με το μίγμα, δε θεωρείται κατάλληλος για την εφαρμογή του στα υπόψη μίγματα.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων αυτών λαμβάνοντας υπόψη μεγαλύτερο στατιστικό δείγμα μέσω της διαφοροποίησης διαφόρων χαρακτηριστικών, όπως τον τύπο και τα ποσοστά της ασφάλτου, τον τύπο και τις ιδιότητες των αδρανών καθώς και το εύρος του ποσοστού κενών αέρα. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της καταλληλότητας των αλγορίθμων για ασφαλτομίγματα αντιστοιχισμένης στρώσης (κλειστού τύπου, ανοικτού τύπου και πορώδη). Τέλος, προκειμένου η εκτίμηση του E^* μέσω της εφαρμογής των αλγορίθμων να είναι πιο ακριβής και με σκοπό να μειωθούν οι αποκλίσεις τους με το πραγματικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον αποτελεί η ανάπτυξη αλγορίθμων προσαρμοσμένων στα τυπικά ελληνικά ασφαλτομίγματα. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, είτε με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων, είτε μέσω της αναβαθμονόμησης των συντελεστών των ήδη υπαρχόντων αλγορίθμων.

9 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, vol. 75, pp. 381-424, 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, pp 9-19, Washington, D.C., 2007.
- Birgisson B., Roque R., *Evaluation of the Gradation Effect on the Dynamic Modulus*, 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.
- Bonaquist R., Christensen D.W, Stump W., *Simple Performance Tester for Superpave Mix Design: First Article Development and Evaluation*, NCHRP Report 513, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2003.
- Bonaquist R., *Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice*, NCHRP Report 614, National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board, Washington, D.C., 2008.
- Bonnaure F., Gest G., Gravois A., Uge P., *A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures*, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 96, pp. 64-104, 1977.
- 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.
- Clyne T.R., Li X., Marasteanu M.O., Skok E.L., *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*, Final Report MN/RC – 2003-09., University of Minnesota, Minneapolis, MN., 2003
- Dougan C.E., Stephens J.E., Mahoney J., Hansen G., *E*- Dynamic Modulus Test Protocol- Problems and Solutions*, University of Connecticut, 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 Gyratory 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.
- Flintsch G.W., Al- Qadi I.L., Loulizi A., Mokarem D., *Laboratory Tests for Hot Mix Asphalt Characterization in Virginia*, VTRC 05- CR22, Virginia Tech Transportation Institute, Blacksburg, 2005.
- Francken L., Partl M., *Complex Modulus Testing of Asphaltic Concrete: RILEM Interlaboratory Test Program*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol 1545, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 133- 142, Washington, D.C., 1996.
- Heukelom W., Klomp A.J.G., *Road Design and Dynamic Loading*, Proceeding Association of Asphalt Paving Technologies, vol. I, pp. 92-123, 1964.
- Huang Y.H., *Pavement Analysis and Design*, Pearson Education Inc., 2nd Edition, USA, 2004.
- Λοΐζος Α., *Ειδικά θέματα οδοστρωμάτων*, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.

- Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., *Οδοστρώματα*, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- Masad E., Bahia H., *Effects of Loading Configuration and Material Properties on Non- Linear Response of Asphalt Mixtures*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 71, pp. 535- 558, 2002.
- Mirza M.W., Witczak M.W, *Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 64, pp 393-430, 1995.
- Mohammad L.N., S. Saadeh S., Obulareddy S., Cooper S., *Characterization of Louisiana Asphalt Mixtures Using Simple Performance Tests*. TRB 86th Annual Meeting Compendium of papers CD-ROM, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- Papazian H.S., *The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphaltic Concrete*, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 385- 394, 1962.
- 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.
- ΠΤΠ Α265, Ασφαλικό Σκυρόδεμα, Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές, 1964.
- ΠΤΠ Α200, Ασφαλτος Οδοστρωσίας, Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές, 1964.
- 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, vol. 2210/2011, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
- Tashman L., Elangovan M. A., *Dynamic Modulus Test - Laboratory Investigation and Future Implementation in the State of Washington*, Report No. WA-RD 704.1, Washington State Transportation Center, Washington, 2007.

- Tran N.H., Hall K.D., *Evaluating the Predictive Equation in Determining Dynamic Moduli of Typical Asphalt Mixtures Used in Arkansas*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 74, 2005.
- Van der Poel C.A., *A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data*, Journal of Applied Chemistry, vol. 4, pp. 221-236, 1954.
- Witczak M.W., Kaloush K.E., Pellinen T., El- Basyouny M., Von Quintus H., *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*, NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002a.
- Witczak M.W., Kaloush K.E., Von Quintus H., *Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Mixture Rutting*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol 71, pp 671- 691, 2002b.
- Witczak M.W., Root R.E., *Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results*, ASTM special technical publication, No 561, American Society for Testing and Materials, pp. 67-94, 1974.
- Witczak M.W., Pellinen T., El- Bayouny M., *Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 71, pp. 767-778, 2002c.
- Yeager L.L, Wood L.E, *Recommended Procedure for Determining the Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol 549, Transportation Research Board of the National Academies, pp. 26-38, Washington, D.C., 1975.
- Yoder E.J., Witczak M.W., *Principles of Pavement Design*, John Wiley & Sons, Inc., Second edition, USA, 1975.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

<http://www.pavementinteractive.org>

<http://www.asphaltpavement.org>

<http://www.fhwa.dot.gov>

<http://classes.engr.oregonstate.edu>

<http://docs.lib.purdue.edu/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1. Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας E^*_{Lab} (MPa)

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, C	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ, Hz	ΔΟΚΙΜΙΑ							
		T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5
4	25	34585	49348	49559	37040	32586	39804	57975	37472
4	10	32834	47263	47014	35838	30151	36949	53349	35330
4	5	30354	45686	45088	34930	27571	33441	49849	32513
4	1	29780	42083	40505	33541	24940	31841	41462	31207
4	0,5	27992	40366	38850	32679	22686	27935	38596	29439
4	0,1	22960	36811	34171	29795	17250	21557	29983	23394
15	25	25811	28940	37037	27738	27701	20561	30584	25296
15	10	23531	25972	33338	25150	24758	18829	27678	22626
15	5	22118	25615	30456	23201	22101	16468	25269	20592
15	1	17361	21147	24232	18585	16134	12242	20799	15939
15	0,5	15955	19108	21176	16747	13403	10769	18091	13832
15	0,1	12326	14977	14707	12127	8776	7585	12951	9198
20	25	13819	20974	25313	20499	20347	14960	21787	15059
20	10	12269	19249	22624	18651	16020	13339	19036	13603
20	5	11653	17829	21277	16738	14250	12321	18149	11990
20	1	8915	15737	16731	14296	9810	9413	12695	8247
20	0,5	7815	14296	15131	12369	8161	8231	10948	6897
20	0,1	5526	10776	10492	8738	5251	5557	7203	4668
25	25	11236	14901	18875	16468	11640	17211	16585	11602
25	10	10376	14810	17462	16675	10911	17160	16546	10158
25	5	9183	13154	15635	16180	9303	14244	16490	8856
25	1	6776	9613	13019	11583	6222	10176	11836	6350
25	0,5	5814	8160	11450	9535	5140	8810	9795	5428
25	0,1	3880	5553	7096	5931	3356	5557	5955	3637
37	25	8648	9424	10650	8689	6272	4319	8195	5826
37	10	6748	7583	8346	7853	4391	3398	6056	4161
37	5	5299	6563	6740	6748	3592	2157	4858	3404
37	1	3493	4008	4128	4473	2266	1807	2945	2249
37	0,5	2806	3248	3332	3681	1867	1219	2462	1897
37	0,1	1710	1994	1550	2197	1221	1221	1680	1278

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

Θερμοκρασία, C	Συχνότητα, Hz	Κωδικός δοκιμίου							
		Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	T2	T6	T7	T8
4	25	29802	29301	27295	28697	27033	32390	32466	29969
4	10	27423	26962	25116	26406	24789	29702	29771	27481
4	5	25597	25167	23443	24648	23073	27646	27711	25579
4	1	21346	20987	19550	20554	19102	22888	22942	21177
4	0,5	19543	19214	17898	18818	17429	20883	20931	19321
4	0,1	15522	15261	14216	14946	13723	16443	16481	15214
15	25	15446	15186	14146	14872	14752	17675	17717	16354
15	10	13316	13091	12195	12822	12736	15261	15296	14120
15	5	11801	11603	10808	11363	11300	13540	13571	12528
15	1	8662	8516	7933	8341	8313	9961	9984	9216
15	0,5	7487	7361	6857	7209	7191	8616	8637	7972
15	0,1	5186	5099	4750	4994	4987	5976	5990	5529
20	25	10679	10499	9780	10283	10557	12649	12678	11703
20	10	8930	8779	8178	8598	8860	10616	10641	9822
20	5	7731	7601	7080	7444	7692	9216	9237	8527
20	1	5375	5284	4922	5175	5377	6443	6458	5961
20	0,5	4541	4464	4159	4372	4552	5455	5467	5047
20	0,1	2992	2942	2741	2881	3010	3607	3615	3337
25	25	7173	7052	6569	6907	7362	8821	8842	8162
25	10	5832	5733	5341	5615	6017	7209	7226	6670
25	5	4944	4861	4528	4761	5120	6135	6149	5676
25	1	3283	3227	3006	3161	3424	4102	4112	3795
25	0,5	2723	2678	2494	2622	2847	3411	3419	3156
25	0,1	1730	1701	1585	1666	1815	2174	2179	2012
37	25	2651	2606	2428	2552	2960	3547	3555	3282
37	10	2052	2017	1879	1976	2302	2759	2765	2552
37	5	1682	1653	1540	1619	1892	2267	2272	2097
37	1	1046	1028	958	1007	1179	1413	1416	1307
37	0,5	849	835	778	818	957	1146	1149	1061
37	0,1	523	514	479	504	586	702	703	649

Πίνακας Π3. Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E^*_{1-40D} , (MPa)

Θερμοκρασία, C	Συχνότητα, Hz	Κωδικός δοκιμίου							
		Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	T2	T6	T7	T8
4	25	47769	53028	54203	45581	39360	50336	47335	42876
4	10	41292	45714	46622	39404	33793	43183	40670	36843
4	5	38896	43020	43842	37120	31608	40373	38047	34470
4	1	32431	35759	36351	30954	27314	34852	32887	29803
4	0,5	27646	30393	30821	26390	24520	31267	29534	26767
4	0,1	12904	13985	14015	12322	14973	19038	18067	16384
15	25	32651	36004	36602	31164	25527	32561	30746	27864
15	10	25533	28024	28378	24373	20454	26058	24658	22351
15	5	20833	22778	22993	19889	17302	22021	20872	18923
15	1	10336	11155	11139	9871	10205	12947	12333	11188
15	0,5	6583	7046	6987	6288	7313	9260	8849	8030
15	0,1	1719	1794	1743	1643	2470	3107	3000	2726
20	25	23628	25894	26189	22555	18667	23769	22512	20408
20	10	17095	18621	18738	16321	14103	17928	17026	15439
20	5	12883	13960	13986	12302	11228	14255	13567	12306
20	1	5139	5475	5409	4910	5526	6985	6693	6076
20	0,5	3049	3217	3153	2914	3661	4617	4440	4033
20	0,1	887	915	879	849	1153	1444	1405	1277
25	25	15939	17339	17428	15218	12925	16423	15610	14156
25	10	10626	11473	11460	10148	9166	11623	11083	10055
25	5	7445	7986	7934	7112	6880	8709	8327	7557
25	1	2588	2722	2661	2473	2944	3708	3574	3247
25	0,5	1532	1596	1548	1465	1883	2365	2289	2081
25	0,1	556	568	542	532	655	818	799	727
37	25	5353	5707	5640	5114	4774	6031	5787	5254
37	10	3126	3300	3235	2988	3013	3796	3658	3323
37	5	2026	2121	2066	1937	2079	2613	2527	2296
37	1	757	778	746	724	830	1038	1013	921
37	0,5	539	550	525	516	572	714	699	636
37	0,1	314	316	298	300	300	373	367	334

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

Θερμοκρασία, C	Συχνότητα, Hz	Κωδικός δοκιμίου							
		Λ2	Λ3	Λ4	Λ5	T2	T6	T7	T8
4	25	14227	15900	16494	13660	12859	15864	15169	13719
4	10	12947	14608	15204	12391	11003	13927	13071	11827
4	5	13073	14736	15332	12515	10665	13564	12698	11479
4	1	12666	14321	14917	12113	10292	13160	12287	11095
4	0,5	11326	12937	13525	10795	9602	12401	11526	10380
4	0,1	5435	6506	6922	5102	6063	8260	7521	6652
15	25	12465	14115	14710	11915	9523	12313	11439	10298
15	10	9905	11439	12007	9406	7554	10057	9235	8235
15	5	8185	9582	10109	7738	6397	8669	7909	7008
15	1	3995	4838	5171	3737	3715	5251	4720	4115
15	0,5	2441	2992	3214	2275	2597	3734	3335	2889
15	0,1	527	635	680	496	790	1144	1017	878
20	25	9133	10612	11163	8655	6832	9197	8411	7471
20	10	6563	7785	8253	6179	5048	6987	6326	5561
20	5	4895	5886	6272	4589	3968	5587	5028	4391
20	1	1802	2218	2386	1678	1853	2692	2395	2066
20	0,5	1001	1231	1325	933	1182	1725	1531	1319
20	0,1	282	314	327	272	360	482	438	390
25	25	6001	7151	7594	5642	4523	6313	5699	4994
25	10	3886	4711	5037	3634	3106	4433	3971	3450
25	5	2643	3235	3472	2464	2279	3293	2936	2539
25	1	814	997	1073	760	908	1322	1174	1012
25	0,5	461	550	587	435	565	804	718	625
25	0,1	230	241	246	226	244	286	271	255
37	25	1743	2146	2309	1623	1453	2119	1882	1622
37	10	957	1177	1267	893	883	1284	1140	983
37	5	594	721	773	558	598	854	762	662
37	1	257	279	289	250	274	338	315	290
37	0,5	228	239	243	225	232	263	252	240
37	0,1	217	223	224	215	211	223	219	214

Πίνακας Π5. Παράμετροι προσαρμογής των τιμών του E^*_{LAB} στη κεντρική καμπύλη

Παράμετροι	Κωδικοί δοκιμών							
	T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5
a	8,28806E-05	-0,00035644	-0,000525827	0,001206223	-0,000165924	-0,000447196	1,96589E-05	-0,000230073
b	-0,083790604	-0,052420064	-0,048942704	-0,267583987	-0,062499515	-0,044523094	-0,075387843	-0,058054696
c	5,314521162	5,212743148	5,759529812	12,61813687	5,017199747	5,095402479	5,03547058	5,011575993
α	1,789503711	1,897823981	1,834668194	2,00261498	1,426228699	1,691322769	1,94567538	2,520770992
β	-0,327583476	-0,556884302	-0,845645859	-0,999242303	-0,372544869	-0,021666946	-0,006944281	-0,160435489
γ	0,559265208	0,463360118	0,517994768	0,513312644	0,664798316	0,607158743	0,701190778	0,345744858
δ	5,071592634	5,112748022	5,097205584	4,775563495	5,332482773	5,200482773	5,134386701	4,686635504
logaT(4C)	2,157287127	2,610156598	3,03296838	3,982374792	2,312253259	2,662918669	2,110475785	2,382292825
logaT(15C)	0,659382903	0,879191554	1,041505062	1,029543219	0,752146807	0,911852326	0,656020468	0,785465481
logaT(20C)	0	0	0	0	0	0	0	0
logaT(25C)	-0,645956244	-0,936934842	-1,126689102	-0,834135125	-0,779026501	-0,984298	-0,652835726	-0,822737275
logaT(37C)	-2,14147046	-3,421171079	-4,178293828	-2,038794404	-2,758359255	-3,642191551	-2,206647726	-2,949375656

Πίνακας Π6. Παράμετροι προσαρμογής των τιμών του E^*_{1-37A} στη κεντρική καμπύλη

Παράμετροι	Κωδικοί δοκιμών							
	T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5
a	0,000443667	-0,000144638	-0,000278989	-0,000232464	-0,000534947	-0,000839259	-0,000549809	-0,000558107
b	-0,15316796	-0,06428408	-0,054805268	-0,058001093	-0,037799893	-0,016543227	-0,036625914	-0,036134922
c	8,363904063	5,040123753	5,016803933	5,018985684	5,043986043	5,005674363	5,032880813	5,037861774
α	3,905157983	1,919806803	2,174960169	2,146150651	2,812149552	2,245009428	2,796090444	2,783552727
β	-1,04979482	-0,171998755	-0,398759867	-0,376048901	-0,178189166	0,070602434	-0,172033743	-0,169154159
γ	0,313351007	0,605062444	0,518845671	0,544686725	0,324826681	0,383499902	0,325491606	0,326129619
δ	2,99999936	4,910561261	4,680519363	4,664332498	4,327274368	4,750256201	4,302065044	4,332678041
logaT(4C)	3,041476819	2,297931206	2,439731585	2,388130086	2,740209814	3,06754048	2,752285862	2,763763189
logaT(15C)	0,871400007	0,743878	0,812131983	0,787715654	0,95164306	1,108162405	0,958065366	0,963130676
logaT(20C)	0	0	0	0	0	0	0	0
logaT(25C)	-0,79952592	-0,767309362	-0,857328222	-0,825374746	-1,038304418	-1,244122409	-1,047134487	-1,053544021
logaT(37C)	-2,42514183	-2,704451788	-3,099316607	-2,959923235	-3,883813361	-4,784733007	-3,923659274	-3,950936118

Πίνακας Π7. Παράμετροι προσαρμογής των τιμών του E^*_{1-40D} στην κεντρική καμπύλη

Παράμετροι	Κωδικοί δοκιμών							
	T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5
a	0,000306852	0,000366417	0,000262606	0,000414221	0,000336772	0,000309463	0,000517743	0,000300575
b	-0,096860122	-0,109773377	-0,0918834	-0,120921866	-0,096382054	-0,094881634	-0,123783503	-0,095052261
c	5,167602672	5,770278269	5,033782259	6,307327856	4,996744167	5,020994931	6,023236594	5,073693024
α	2,571726514	2,334435025	2,585145536	2,952375218	2,381076471	2,380701342	2,461853459	2,099717624
β	-0,543560179	-0,43518235	-0,593413138	-0,801326892	-0,286269893	-0,263782861	-0,040669571	-0,084031776
γ	0,938273497	0,93545575	0,894180577	0,729505277	1,233110137	1,139173083	1,158370298	1,179154766
δ	4,260356499	4,587730033	4,298776994	3,934052737	4,49624642	4,553419311	4,480713906	4,758612315
logaT(4C)	1,842207598	2,030212635	1,83548347	2,203699645	1,736065575	1,777167866	1,96650721	1,809520599
logaT(15C)	0,521008771	0,569145972	0,526792243	0,614841914	0,482507655	0,500218681	0,522271779	0,511912648
logaT(20C)	0	0	0	0	0	0	0	0
logaT(25C)	-0,471298677	-0,509786449	-0,484250114	-0,547738073	-0,427950529	-0,450085702	-0,438397484	-0,463219431
logaT(37C)	-1,399598318	-1,491087069	-1,472878501	-1,588525776	-1,23243873	-1,325748829	-1,148344323	-1,376277737

Πίνακας Π8. Παράμετροι προσαρμογής των τιμών του E^*_{Hirsch} στην κεντρική καμπύλη

Παράμετροι	Κωδικοί δοκιμών							
	T2	T6	T7	T8	Λ2	Λ3	Λ4	Λ5
a	0,000240528	0,000251455	0,000214969	0,000504304	0,000239882	0,000264629	0,000254054	0,000259808
b	-0,090214953	-0,091668477	-0,087526046	-0,132729052	-0,08888967	-0,091753152	-0,089254583	-0,090473343
c	5,02241566	5,070727412	4,957753479	6,69367417	4,935284965	5,015567841	4,894567149	4,950836357
α	1,930342829	2,081624294	1,994133775	2,070429902	2,061167042	1,994513317	1,953816878	1,97195582
β	-0,033309272	-0,522766226	-0,357973762	-0,314505419	-0,27579053	-0,303107891	-0,278005315	-0,162267214
γ	1,321549318	1,250377053	1,186103081	1,158877959	1,228673073	1,258487035	1,448284366	1,41460737
δ	4,365345336	4,301547122	4,377217616	4,249822905	4,283033461	4,393548725	4,439591945	4,3344234
logaT(4C)	1,855594345	1,863719293	1,857062775	2,265628924	1,819421583	1,825484461	1,786176636	1,80351227
logaT(15C)	0,537011157	0,537602956	0,542024604	0,618142079	0,52582234	0,52330693	0,512907822	0,517299846
logaT(20C)	0	0	0	0	0	0	0	0
logaT(25C)	-0,498045633	-0,496867207	-0,507199592	-0,536444843	-0,486961517	-0,480436963	-0,471751116	-0,475210993
logaT(37C)	-1,534375816	-1,523146652	-1,582392564	-1,490587745	-1,497117002	-1,45857621	-1,436034436	-1,443994858

Πίνακας Π9. Αποτελέσματα συχνότητας και αθροιστικής καμπύλης του σχετικού σφάλματος

μεταξύ των E^*_{lab} και E^*_{1-37A}

Μεγιστες τιμές καθε κλασης	Συχνότητα	Αθροιστική %
4	0	0,00%
9	0	0,00%
14	2	0,83%
19	3	2,08%
24	11	6,67%
29	6	9,17%
34	13	14,58%
39	29	26,67%
44	27	37,92%
49	36	52,92%
54	33	66,67%
59	32	80,00%
64	26	90,83%
69	7	93,75%
74	9	97,50%
79	6	100,00%
84	0	100,00%
89	0	100,00%
94	0	100,00%
99	0	100,00%
More	0	100,00%

Επικρατούσα τιμή	46,37
Μέση τιμή	47,39

Πίνακας Π10. Αποτελέσματα συχνότητας και αθροιστικής καμπύλης του σχετικού σφάλματος

μεταξύ των E^*_{lab} και E^*_{1-40D}

Μεγιστες τιμές κάθε κλάσης	Frequency	Cumulative %
4	17	7,08%
9	16	13,75%
14	17	20,83%
19	22	30,00%
24	16	36,67%
29	12	41,67%
34	15	47,92%
39	15	54,17%
44	10	58,33%
49	10	62,50%
54	13	67,92%
59	13	73,33%
64	13	78,75%
69	11	83,33%
74	15	89,58%
79	12	94,58%
84	8	97,92%
89	3	99,17%
94	1	99,58%
99	0	99,58%
More	1	100,00%

Επικρατούσα τιμή	17,00
Μέση τιμή	37,80

Πίνακας Π11. Αποτελέσματα συχνότητας και αθροιστικής καμπύλης του σχετικού σφάλματος

μεταξύ των E^*_{lab} και E^*_{Hirsch}

Μεγιστες τιμές κάθε κλασης	Frequency	Cumulative %
4	0	0,00%
9	0	0,00%
14	1	0,42%
19	0	0,42%
24	0	0,42%
29	0	0,42%
34	1	0,83%
39	0	0,83%
44	5	2,92%
49	5	5,00%
54	9	8,75%
59	32	22,08%
64	24	32,08%
69	31	45,00%
74	28	56,67%
79	19	64,58%
84	23	74,17%
89	33	87,92%
94	29	100,00%
99	0	100,00%
More	0	100,00%

Επικρατούσα τιμή	89,20
Μέση τιμή	71,46

Πίνακας Π12. Ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα $E^*_{lab} - E^*_{1-37A}$

Θερμοκρασία , °C	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ
4	25	10	10	16	5	21	1	30	0,5	33	0,1	38	34
4	25	25	10	28	5	30	1	34	0,5	35	0,1	36	
4	25	53	10	54	5	55	1	54	0,5	53	0,1	47	
4	25	23	10	23	5	23	1	23	0,5	23	0,1	24	
4	25	19	10	20	5	20	1	18	0,5	17	0,1	12	
4	25	34	10	36	5	37	1	42	0,5	44	0,1	51	
4	25	34	10	37	5	40	1	47	0,5	50	0,1	57	
4	25	19	10	24	5	28	1	39	0,5	43	0,1	54	
ΜΟ		27		30		32		36		37		40	
15	25	38	10	41	5	43	1	46	0,5	47	0,1	47	43
15	25	40	10	41	5	41	1	39	0,5	38	0,1	34	
15	25	60	10	58	5	57	1	50	0,5	46	0,1	34	
15	25	30	10	30	5	30	1	31	0,5	31	0,1	32	
15	25	35	10	35	5	34	1	32	0,5	31	0,1	29	
15	25	40	10	44	5	46	1	53	0,5	56	0,1	62	
15	25	45	10	49	5	52	1	58	0,5	60	0,1	65	
15	25	28	10	34	5	38	1	47	0,5	50	0,1	57	
ΜΟ		39		41		43		44		45		45	
20	25	49	10	51	5	51	1	52	0,5	52	0,1	51	47
20	25	45	10	44	5	43	1	40	0,5	38	0,1	35	
20	25	63	10	60	5	57	1	49	0,5	45	0,1	35	
20	25	36	10	36	5	37	1	38	0,5	38	0,1	39	
20	25	40	10	40	5	39	1	38	0,5	38	0,1	38	
20	25	44	10	48	5	51	1	57	0,5	59	0,1	64	
20	25	49	10	53	5	55	1	60	0,5	62	0,1	65	
20	25	34	10	39	5	43	1	50	0,5	53	0,1	57	
ΜΟ		45		46		47		48		48		48	
25	25	58	10	58	5	58	1	58	0,5	57	0,1	58	51
25	25	48	10	46	5	45	1	42	0,5	41	0,1	40	
25	25	65	10	62	5	59	1	51	0,5	48	0,1	42	
25	25	44	10	45	5	45	1	46	0,5	46	0,1	47	
25	25	44	10	44	5	44	1	44	0,5	44	0,1	47	
25	25	48	10	51	5	54	1	59	0,5	61	0,1	63	
25	25	51	10	54	5	56	1	59	0,5	61	0,1	63	
25	25	44	10	48	5	51	1	56	0,5	57	0,1	59	
ΜΟ		50		51		51		52		52		52	
37	25	72	10	72	5	72	1	73	0,5	73	0,1	75	59
37	25	56	10	57	5	57	1	59	0,5	60	0,1	62	
37	25	74	10	71	5	69	1	67	0,5	66	0,1	67	
37	25	63	10	63	5	63	1	62	0,5	61	0,1	61	
37	25	50	10	51	5	53	1	57	0,5	60	0,1	67	
37	25	50	10	52	5	53	1	54	0,5	55	0,1	54	
37	25	42	10	45	5	47	1	50	0,5	52	0,1	54	
37	25	76	10	76	5	76	1	75	0,5	74	0,1	70	
ΜΟ		44		61		61		62		63		64	
ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ		41		46		47		48		49		50	

Πίνακας Π13. Ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα $E^*_{lab} - E^*_{1-40D}$

Θερμοκρασία , °C	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ
4	25	45	10	44	5	43	1	29	0,5	17	0,1	23	20
4	25	33	10	35	5	35	1	25	0,5	16	0,1	18	
4	25	7	10	3	5	1	1	0	0,5	3	0,1	23	
4	25	20	10	29	5	34	1	35	0,5	28	0,1	6	
4	25	19	10	21	5	21	1	16	0,5	10	0,1	13	
4	25	2	10	2	5	2	1	4	0,5	9	0,1	28	
4	25	11	10	14	5	17	1	29	0,5	36	0,1	55	
4	25	16	10	10	5	5	1	9	0,5	17	0,1	38	
ΜΟ		19		20		20		18		17		26	
15	25	43	10	30	5	15	1	31	0,5	49	0,1	77	35
15	25	50	10	41	5	28	1	15	0,5	34	0,1	66	
15	25	0	10	5	5	14	1	42	0,5	54	0,1	74	
15	25	54	10	46	5	33	1	13	0,5	32	0,1	64	
15	25	23	10	16	5	8	1	20	0,5	33	0,1	60	
15	25	2	10	5	5	14	1	38	0,5	49	0,1	70	
15	25	17	10	26	5	34	1	55	0,5	63	0,1	79	
15	25	6	10	4	5	13	1	35	0,5	45	0,1	65	
ΜΟ		25		22		20		31		45		70	
20	25	39	10	16	5	5	1	52	0,5	66	0,1	83	41
20	25	66	10	45	5	23	1	30	0,5	48	0,1	72	
20	25	1	10	14	5	27	1	58	0,5	67	0,1	80	
20	25	60	10	37	5	14	1	36	0,5	52	0,1	72	
20	25	19	10	6	5	6	1	39	0,5	51	0,1	72	
20	25	0	10	13	5	24	1	52	0,5	61	0,1	77	
20	25	18	10	29	5	39	1	62	0,5	70	0,1	83	
20	25	1	10	12	5	22	1	46	0,5	55	0,1	72	
ΜΟ		25		21		20		47		59		76	
25	25	33	10	1	5	23	1	65	0,5	74	0,1	85	46
25	25	91	10	52	5	20	1	39	0,5	54	0,1	73	
25	25	2	10	22	5	38	1	66	0,5	73	0,1	81	
25	25	57	10	21	5	6	1	50	0,5	60	0,1	72	
25	25	11	10	7	5	22	1	53	0,5	63	0,1	78	
25	25	0	10	18	5	32	1	59	0,5	67	0,1	79	
25	25	12	10	27	5	39	1	64	0,5	71	0,1	83	
25	25	7	10	21	5	32	1	55	0,5	63	0,1	77	
ΜΟ		27		21		27		56		66		78	
37	25	30	10	19	5	44	1	73	0,5	78	0,1	84	52
37	25	149	10	55	5	8	1	48	0,5	59	0,1	71	
37	25	18	10	19	5	39	1	66	0,5	71	0,1	77	
37	25	42	10	2	5	24	1	51	0,5	55	0,1	58	
37	25	11	10	34	5	49	1	70	0,5	75	0,1	82	
37	25	18	10	13	5	31	1	58	0,5	65	0,1	73	
37	25	49	10	9	5	17	1	54	0,5	64	0,1	76	
37	25	40	10	53	5	61	1	75	0,5	79	0,1	85	
ΜΟ		45		25		34		62		68		76	
ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ		28		22		24		43		51		65	

Πίνακας Π14. Ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα $E^*_{lab} - E^*_{Hirsch}$

Θερμοκρασία °C	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	Συχνότητα, Hz	Σχετικό σφάλμα, %	ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ
4	25	57	10	56	5	57	1	59	0,5	61	0,1	71	64
4	25	60	10	59	5	58	1	57	0,5	58	0,1	66	
4	25	72	10	70	5	68	1	63	0,5	62	0,1	65	
4	25	64	10	61	5	58	1	54	0,5	55	0,1	65	
4	25	62	10	60	5	59	1	58	0,5	60	0,1	70	
4	25	68	10	67	5	66	1	66	0,5	67	0,1	73	
4	25	69	10	69	5	70	1	72	0,5	74	0,1	81	
4	25	63	10	63	5	64	1	66	0,5	68	0,1	75	
ΜΟ		64		63		62		62		63		71	
15	25	55	10	58	5	62	1	74	0,5	79	0,1	89	69
15	25	50	10	50	5	52	1	64	0,5	71	0,1	84	
15	25	61	10	58	5	58	1	65	0,5	71	0,1	84	
15	25	48	10	48	5	51	1	67	0,5	75	0,1	88	
15	25	56	10	58	5	61	1	74	0,5	79	0,1	89	
15	25	62	10	63	5	65	1	74	0,5	79	0,1	90	
15	25	68	10	70	5	73	1	81	0,5	85	0,1	92	
15	25	60	10	63	5	67	1	77	0,5	82	0,1	91	
ΜΟ		57		59		61		72		78		88	
20	25	56	10	62	5	67	1	81	0,5	86	0,1	92	72
20	25	41	10	45	5	51	1	69	0,5	76	0,1	86	
20	25	54	10	54	5	58	1	72	0,5	79	0,1	87	
20	25	43	10	49	5	57	1	77	0,5	84	0,1	91	
20	25	57	10	63	5	69	1	82	0,5	86	0,1	91	
20	25	59	10	63	5	67	1	81	0,5	85	0,1	93	
20	25	67	10	71	5	75	1	85	0,5	89	0,1	93	
20	25	61	10	67	5	72	1	84	0,5	88	0,1	93	
ΜΟ		55		59		65		79		84		91	
25	25	58	10	67	5	73	1	86	0,5	89	0,1	93	74
25	25	29	10	40	5	51	1	73	0,5	79	0,1	86	
25	25	49	10	55	5	62	1	79	0,5	83	0,1	87	
25	25	42	10	55	5	66	1	84	0,5	88	0,1	92	
25	25	62	10	71	5	77	1	88	0,5	90	0,1	92	
25	25	57	10	64	5	71	1	85	0,5	89	0,1	93	
25	25	65	10	71	5	77	1	87	0,5	90	0,1	93	
25	25	66	10	73	5	79	1	88	0,5	91	0,1	93	
ΜΟ		53		62		70		84		87		91	
37	25	66	10	77	5	82	1	89	0,5	90	0,1	92	77
37	25	10	10	42	5	57	1	76	0,5	80	0,1	84	
37	25	52	10	67	5	74	1	83	0,5	84	0,1	84	
37	25	55	10	71	5	78	1	86	0,5	87	0,1	86	
37	25	79	10	85	5	88	1	90	0,5	90	0,1	89	
37	25	56	10	70	5	78	1	87	0,5	89	0,1	90	
37	25	51	10	65	5	73	1	82	0,5	84	0,1	86	
37	25	80	10	86	5	89	1	92	0,5	92	0,1	92	
ΜΟ		56		70		77		86		87		88	
ΜΟ ΣΥΝΟΛΟΥ		57		63		67		76		80		86	