



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ**

**ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΪΑΣ ΕΜΠ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ  
ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ  
ΑΝΑΦΟΡΑΣ**



**ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. ΠΛΑΤΗ, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2017**





## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT .....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1. Γενική επισκόπηση.....	7
1.2. Στόχος και μεθοδολογία .....	8
1.3. Δομή διπλωματικής εργασίας.....	8
2. ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	11
2.1. Ορισμός του μέτρου δυσκαμψίας.....	11
2.2. Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας.....	14
2.2.1. Εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας.....	15
2.2.2. Επί τόπου προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας .....	19
2.3. Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας .....	22
3. ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	27
3.1. Ορισμός.....	27
3.2. Αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς .....	29
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	35
4.1. Γενικά στοιχεία.....	35
4.2. Οδικό πείραμα .....	35
4.3. Εργαστηριακό πείραμα.....	38
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	49
5.1. Αναγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας $E^*$ στη συχνότητα καταγραφής του FWD .....	49
5.2. Ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς.....	54
5.3. Αξιολόγηση του νέου αλγορίθμου .....	55
5.4. Εφαρμογή του νέου αλγορίθμου για την αναγωγή του επί τόπου μέτρου δυσκαμψίας .....	59

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	69

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Ολοκληρώνοντάς την, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω την κυρία Χριστίνα Πλατή, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία και τη συνολική καθοδήγησή της από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κυρία Χριστίνα Τσάιμου με την οποία συνεργάστηκα άψογα, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών όσο και κατά τη συγγραφή του κειμένου. Η συνεισφορά της ήταν καθοριστική για την εργασία αυτή, λόγω της καθημερινής της παρουσίας και βοήθειας στο χώρο του Εργαστηρίου.

Επιπλέον, καθοριστική ήταν και η συμβολή της κυρίας Κωνσταντίνας Γεωργούλη, Επιστημονικής Συνεργάτιδας του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, για την προθυμία και την υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Την ευχαριστώ ιδιαίτερα για την ουσιαστική προσφορά της και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου, για τη στήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα. Βέβαια, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι τώρα και για όσα συνεχίζουν να προσφέρουν καθημερινά.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### **«Ανάπτυξη Αλγορίθμου Διόρθωσης του Μέτρου Δυσκαμψίας Οδοστρωμάτων σε Θερμοκρασία Αναφοράς»**

Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος των ασφαλτικών στρώσεων αποτελεί βασική παράμετρο στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Το επί τόπου μέτρο δυσκαμψίας των οδοστρωμάτων ενός εν λειτουργία οδοστρώματος, προσδιορίζεται μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού αξιοποιώντας τις καταγραφές των μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT: Non Destructive Testing). Δεδομένου ότι το μέτρο δυσκαμψίας επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, η τιμή του εξαρτάται από τη θερμοκρασία των ασφαλτικών στρώσεων κατά τη διάρκεια των επιτόπου καταγραφών. Για την αξιοποίηση του μέτρου δυσκαμψίας στις διαδικασίες αξιολόγησης του οδοστρώματος, είναι απαραίτητη η αναγωγή του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας σε μια κοινή θερμοκρασία αναφοράς. Διεθνώς έχει αναπτυχθεί πλήθος αλγορίθμων για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς. Ωστόσο κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου προσαρμοσμένου στα χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων καθώς και των περιβαλλοντικών συνθηκών της χώρας μας. Αυτό αποτέλεσε και το στόχο της παρούσας έρευνας. Για το σκοπό αυτό, αρχικά διεξήχθη οδικό πείραμα βασισμένο σε μια μη καταστρεπτική δοκιμή με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD: Falling Weight Deflectometer), και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε ασφαλτικούς πυρήνες οδοστρώματος που ελήφθησαν από το πεδίο για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας τους. Η χρήση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος αποτελεί τη βασική διαφοροποίηση σε σχέση με συναφείς έρευνες που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος αναγωγής του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε για την αναγωγή των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας στους 20°C. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.





## **ABSTRACT**

### **“Development of an Algorithm for Asphalt Concrete Modulus Correction to a Reference Temperature”**

The Asphalt Concrete (AC) modulus of asphalt layers constitutes a critical parameter in the context of flexible pavement evaluation. The in situ AC modulus of a pavement in operation is determined through backcalculation analysis, utilizing the deflections measured via Non Destructive Testing (NDT) techniques. AC modulus is influenced by temperature variations and thus, its value depends on the temperature of the asphalt layers during in situ measurements. In order to use AC modulus in pavement evaluation, temperature correction of in situ AC modulus to a common reference temperature is required. A number of algorithms have been developed internationally for temperature correction of AC modulus to a reference temperature. However, it is necessary to develop an algorithm adapted to the characteristics of pavements and the environmental conditions of our country. This constitutes the main focus of the current research. For this purpose, an in situ road experiment was firstly conducted, based on a Non Destructive Testing (NDT) technique, using the Falling Weight Deflectometer (FWD) and, afterwards, cores were taken from the field so as to perform laboratory tests in order to determine their AC modulus. The use of the dynamic modulus is the basic differentiation from other relevant research found in the international literature. Thereafter, a new algorithm was developed regarding AC modulus correction to a reference temperature of 20°C, based on the laboratory results. Following that, backcalculated moduli were corrected to 20°C based on the new algorithm. The relevant results and conclusions are included in this dissertation.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενική επισκόπηση

Στο πλαίσιο διαστασιολόγησης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, ο ορθός σχεδιασμός του είναι πολύ μεγάλης σημασίας, καθώς θα πρέπει να εξασφαλίζεται αφενός άνεση και ασφάλεια στο χρήστη της οδού και αφετέρου, δομική επάρκεια του οδοστρώματος για όλη την περίοδο σχεδιασμού του. Η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος καθορίζεται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων του. Ειδικότερα, στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος καθορίζει τη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων αλλά και του συνόλου του οδοστρώματος. Δεδομένου ότι οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας εντοπίζονται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, το ασφαλτόμιγμα πρέπει να έχει επαρκή αντοχή έναντι κόπωσης και παραμενουσών παραμορφώσεων. Θα πρέπει επίσης να έχει επαρκή ικανότητα απομείωσης των τάσεων που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Επομένως, η ορθή μελέτη και ο ακριβής προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ασφαλτομίγματος είναι καθοριστικής σημασίας, στο πλαίσιο της πρόβλεψης της συμπεριφοράς τόσο των ασφαλτικών στρώσεων έναντι κόπωσης του ασφαλτομίγματος, όσο και του συνόλου του οδοστρώματος.

Βασική παράμετρος αξιολόγησης του ασφαλτομίγματος αποτελεί το μέτρο δυσκαμψίας, το οποίο εκφράζει την αντοχή του ασφαλτομίγματος. Ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιείται εργαστηριακά με εξειδικευμένο εξοπλισμό και στην περίπτωση υφιστάμενων οδοστρωμάτων απαιτεί τη λήψη πυρήνων επιτόπου από το οδόστρωμα και τη μεταφορά τους στο εργαστήριο για την πραγματοποίηση των κατάλληλων δοκιμών. Η λήψη πυρήνων είναι μια χρονοβόρα και καταστρεπτική διαδικασία, η εφαρμογή της οποίας έχει περιοριστεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης των συστημάτων μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing – NDT). Η χρήση των συστημάτων αυτών, όπως του Παραμορφωσίμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD), επιτρέπει την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων του οδοστρώματος υπό την επιβολή φορτίου και κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας των στοιχείων συλλογής, την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων αλλά και των υπολοίπων επιμέρους στρώσεων.

Ωστόσο, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος επηρεάζεται έντονα από τις συνθήκες θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα, τιμές μέτρων δυσκαμψίας για το ίδιο οδόστρωμα να ποικίλλουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή. Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη εκτίμησης της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος, σε μια κοινή θερμοκρασία αναφοράς, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων, οι οποίοι ανάγουν το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, σε μια θερμοκρασία αναφοράς.

### 1.2. Στόχος και μεθοδολογία

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας οδοστρωμάτων σε θερμοκρασία αναφοράς. Η χρήση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, το οποίο περιγράφει πληρέστερα την εξάρτηση της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος από το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία, διαφοροποιεί τον υπόψη στόχο σε σχέση με συναφείς έρευνες που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Loizos et al., 2015).

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αφορά αφενός σε ενδεδειγμένη διερεύνηση της διεθνούς εμπειρίας και πρακτικής σε συναφή θέματα, και αφετέρου, την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας συμπεριλαμβανομένων των αναλύσεων και της αξιολόγησης των πειραματικών δεδομένων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου καταγραφές με το σύστημα FWD σε υφιστάμενο οδόστρωμα αυτοκινητοδρόμου, και μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού εκτιμήθηκε το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων στη θερμοκρασία που επικρατούσε περίπου στο μέσον τους, τη στιγμή της δοκιμής. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε λήψη πυρήνων από το οδόστρωμα στις θέσεις καταγραφής του FWD. Οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας τους σε διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11 (2011). Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη νέου αλγορίθμου αναγωγής του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C. Για την αξιολόγηση του νέου αυτού αλγορίθμου, πραγματοποιούνται κατάλληλοι στατιστικοί έλεγχοι και συγκριτική ανάλυση με άλλους αλγορίθμους που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

### 1.3. Δομή διπλωματικής εργασίας

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

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο ορίζεται το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος, δίνονται οι κυριότερες εκφράσεις του, καθώς και οι τρόποι προσδιορισμού του.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, που αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των δεδομένων FWD που συλλέγονται, προκειμένου να προσδιοριστεί το μέτρο δυσκαμψίας του οδοστρώματος. Επιπλέον, αναφέρονται οι λόγοι που οδήγησαν στην ανάγκη για ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας οδοστρωμάτων σε θερμοκρασία αναφοράς. Παράλληλα, παρουσιάζονται συναφείς αλγόριθμοι που δίνονται από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Ακολουθεί το 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, όπου αναλύονται τα δύο στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Το πρώτο στάδιο αναφέρεται στο οδικό πείραμα, το οποίο περιλαμβάνει την επιτόπου δοκιμή με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD και τη διαδικασία της πυρηνοληψίας. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εργαστηριακή δοκιμή, που πραγματοποιείται με χρήση των πυρήνων ασφαλτομίγματος.

Έτσι, στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες της επεξεργασίας των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, μέσω των οποίων υλοποιείται η ανάπτυξη του αλγορίθμου. Εν συνεχεία, διενεργείται αξιολόγηση και επαλήθευση του νέου αλγορίθμου για να διερευνηθεί η καταλληλότητά του.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εμπεριέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συνολική διερεύνηση που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Το 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των επιμέρους εδαφίων.

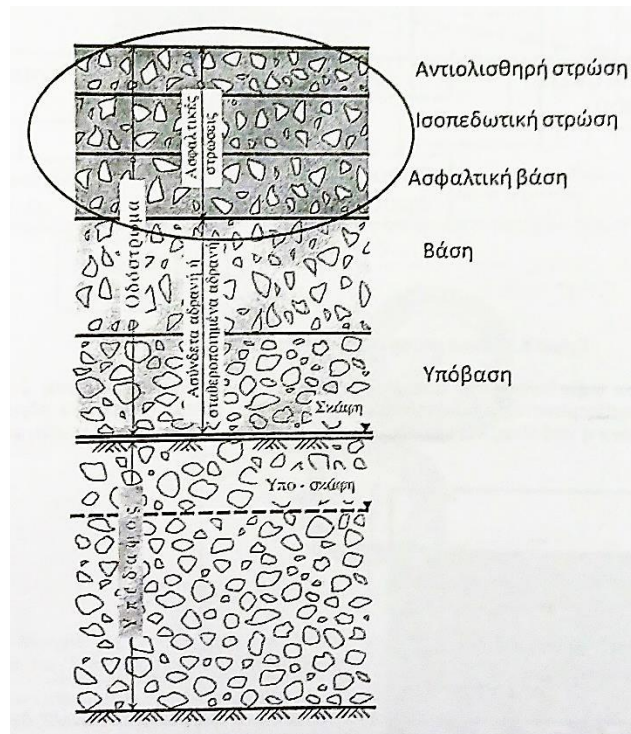
Τέλος, στο Παράρτημα, περιλαμβάνονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα στοιχεία των αναλύσεων.



## 2. ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

### 2.1. Ορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Το ασφαλτόμιγμα χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ανώτερων στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και αποτελείται από μίγμα ασφάλτου και αδρανών. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται ένα κατασκευαστικό σκαρίφημα οδοστρώματος (Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., 2017).



Εικόνα 2.1 Κατασκευαστικό σκαρίφημα οδοστρώματος

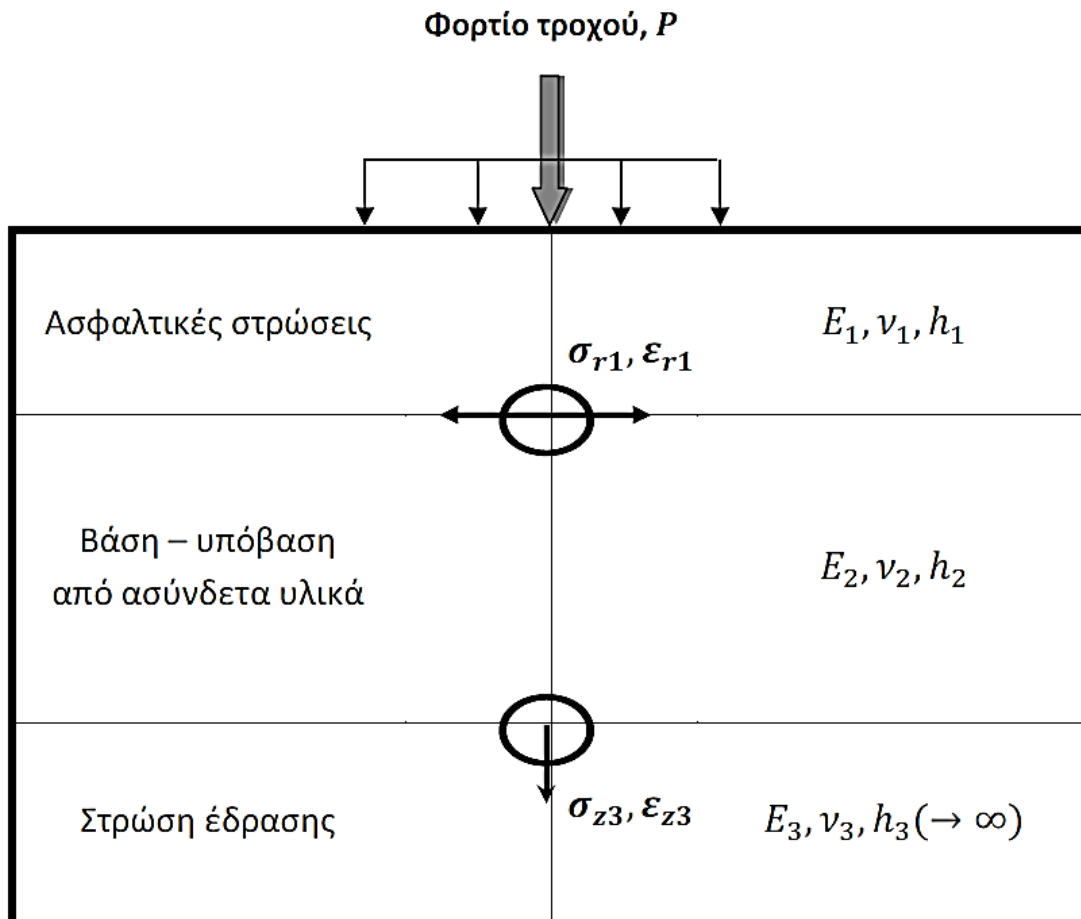
Οι ασφαλτικές στρώσεις του οδοστρώματος έρχονται σε άμεση επαφή με τα φορτία της κυκλοφορίας και αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων, έτσι ώστε αυτές, να μεταβιβάζονται απομειωμένες στις υποκείμενες στρώσεις.

Τα δύο υλικά του ασφαλτομίγματος, άσφαλτος και αδρανή, παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Η άσφαλτος έχει ιξωδοελαστική συμπεριφορά, κάτω από συνήθεις συνθήκες φόρτισης ενώ τα συμπυκνωμένα αδρανή, ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει και επομένως το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται και αυτό ως ιξωδοελαστικό υλικό (Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., 2017). Επομένως, η συμπεριφορά του εξαρτάται από τον χρόνο φόρτισης ( $t$ ) και τη θερμοκρασία ( $T$ ). Ο λόγος της τάσης προς την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση ονομάζεται λόγος δυσκαμψίας ( $S_m$ ) (Van der Poel C.J., 1954):



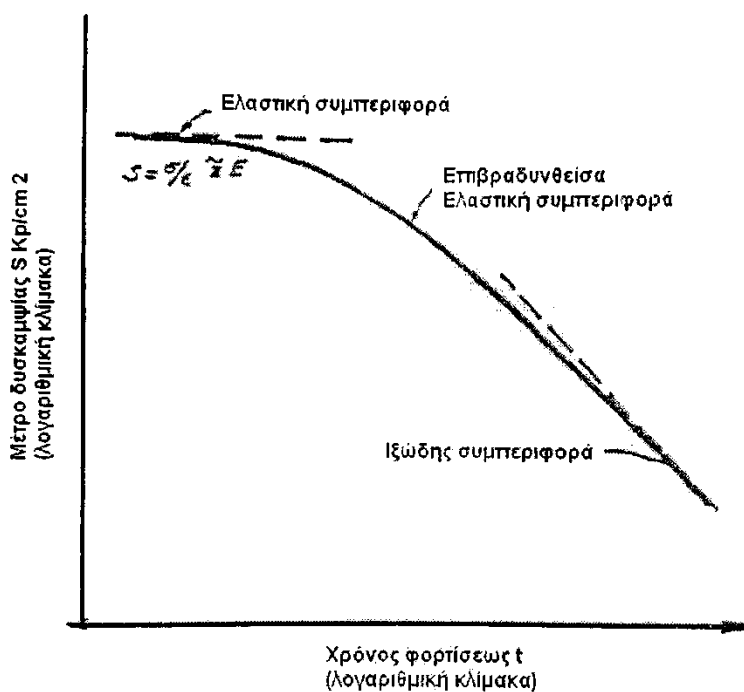
$$S_m = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)_{T,t} \quad (2.1)$$

Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απομείωση των τάσεων που παραλαμβάνουν οι υποκείμενες στρώσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο δυσκαμψίας τόσο μεγαλύτερη είναι η απομείωση των τάσεων. Επομένως, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στο πλαίσιο του σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς η απομείωση των τάσεων θα πρέπει να είναι επαρκής έτσι ώστε να μην επέλθει αστοχία στις δυο κρίσιμες θέσεις οι οποίες είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η κορυφή της στρώσης έδρασης (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

Στην εικόνα 2.3 φαίνεται η επίδραση του χρόνου φόρτισης στη συμπεριφορά του ασφαλτικού υλικού.

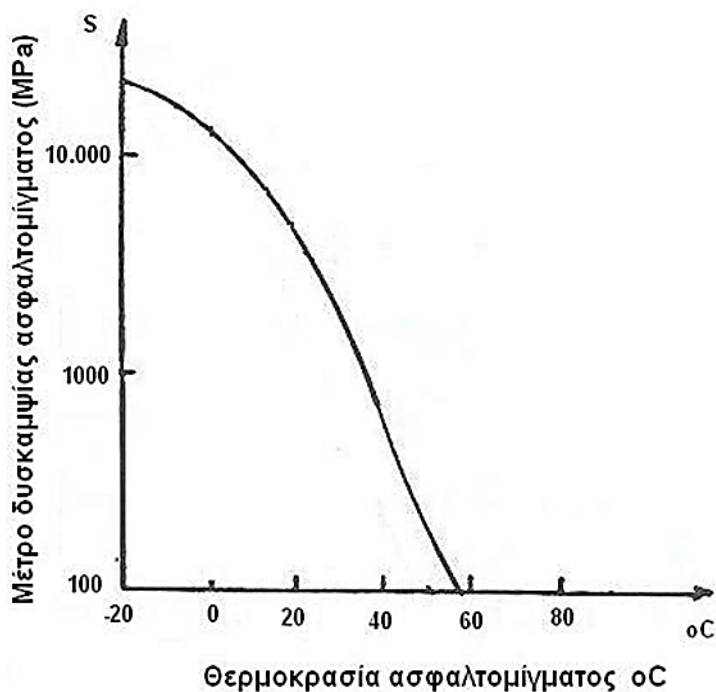


Εικόνα 2.3 Σχηματική παράσταση της επίδρασης του χρόνου φόρτισης επί της συμπεριφοράς του ασφαλτικού υλικού

Συνεπώς, λόγω της σύνδεσης χρόνου – συχνότητας, μέσω της σχέσης 2.2 προκύπτει η εξάρτηση του μέτρου δυσκαμψίας και από τη συχνότητα φόρτισης (όπου για τις μονάδες μέτρησης ισχύει t σε s και f σε Hz):

$$t = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας (T) στο μέτρο δυσκαμψίας, όπως προκύπτει από την εικόνα 2.4, αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Αποτέλεσμα της μείωσης αυτής, είναι η αύξηση της επιπόνησης των στρώσεων που βρίσκονται κάτω από την ασφαλτική στρώση και επομένως και του εδάφους. Η επίδραση αυτή της θερμοκρασίας πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.4 Σχέση μεταξύ μέτρου δυσκαμψίας και θερμοκρασίας

Επομένως, τόσο η αύξηση του χρόνου φόρτισης και αντίστοιχα η μείωση της συχνότητας, όσο και η αύξηση της θερμοκρασίας, επιδρούν αρνητικά στο μέτρο δυσκαμψίας, επιφέροντας μείωση της τιμής του, με συχνά δυσμενείς για το οδόστρωμα επιπτώσεις, αν οι μεταβολές δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

### 2.2. Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, είναι σημαντικός για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος και, ως εκ τούτου για τον προγραμματισμό των στρατηγικών συντήρησης και αποκατάστασης. Ο προσδιορισμός του μπορεί να επιτευχθεί είτε εργαστηριακά με κατάλληλες δοκιμές σε πυρήνες οδοστρώματος, είτε επί τόπου στην περίπτωση υφιστάμενου οδοστρώματος με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών. Το μέτρο δυσκαμψίας μπορεί να εκτιμηθεί μέσω νομογραφημάτων και αλγορίθμων, οι οποίοι περιγράφουν την εξάρτησή του από διάφορους παράγοντες, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και οι ογκομετρικές τους ιδιότητες, κάτι που όμως δεν αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης στην παρούσα εργασία.

### 2.2.1. Εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων έχει αναπτυχθεί πλήθος εργαστηριακών δοκιμών, οδηγώντας στην ύπαρξη διαφορετικών εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας. Ως εκ τούτου, το μέτρο δυσκαμψίας, διαφέρει ως προς τον προσδιορισμό του κυρίως λόγω της διαφορετικής διάταξης των δοκιμών και τον διαφορετικό τρόπο επιβολής των φορτίων. Όσον αφορά στον τρόπο επιβολής των φορτίων μπορεί να είναι παλμικός (θλιπτικό φορτίο για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια ακολουθεί μικρή περίοδος ηρεμίας) ή αρμονικός (ημιτονοειδής φόρτιση όπου επιβάλλεται θλιπτικό και εφελκυστικό φορτίο χωρίς περίοδο ηρεμίας). Ως προς τη διάταξη της δοκιμής οι διαφορές εντοπίζονται στον τρόπο τοποθέτησης των δοκιμών και στους άξονες άσκησης των φορτίων με αποτέλεσμα η επιβολή της φόρτισης να πραγματοποιείται είτε κατά μήκος της κάθετης διαμέτρου του δοκιμίου είτε κατά το οριζόντιο επίπεδο του δοκιμίου. Σε κάθε περίπτωση, το μέτρο δυσκαμψίας προκύπτει από το λόγο της επιβαλλόμενης τάσης προς την προκύπτουσα παραμόρφωση.

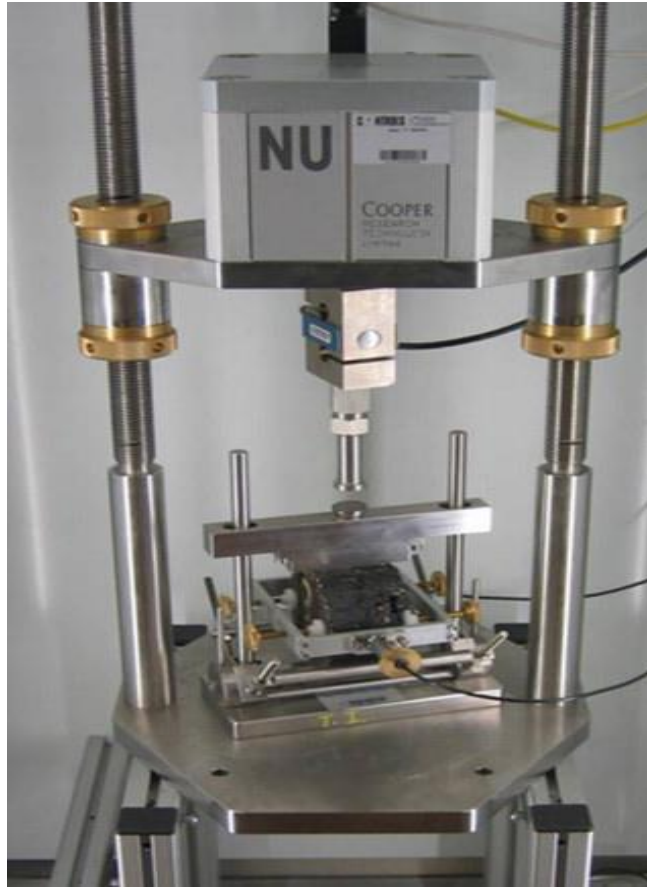
Οι κυριότερες και πιο ευρέως διαδεδομένες εκφράσεις του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος είναι:

- α) Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM)
- β) Το μέτρο επανάταξης (Resilient Modulus:  $M_r$ ) και
- γ) Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Dynamic Modulus:  $E^*$ )

#### **α) Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM)**

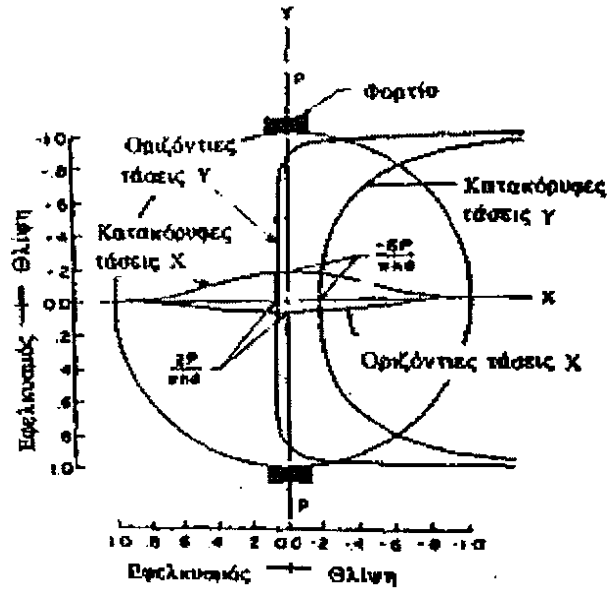
Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM) προκύπτει από τα αποτελέσματα της αντίστοιχης δοκιμής (Indirect Tensile Stiffness Modulus Test). Πρόκειται για μια απλή, εύκολη και γρήγορη εργαστηριακή δοκιμή η οποία εφαρμόζεται για πολλά χρόνια σε διάφορες χώρες της Ευρώπης και περιγράφεται στα πρότυπα του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) (EN 12697-26: 2004, Annex C).

Η συσκευή εκτέλεσης της δοκιμής (εικόνα 2.5) αποτελείται από: α) μεταλλικό πλαίσιο δοκιμής και σύστημα επιβολής φορτίου με πεπιεσμένο αέρα, β) μονάδα καταγραφής, επεξεργασίας και ελέγχου μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και γ) θάλαμο ελέγχου θερμοκρασίας, μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένα, το μεταλλικό πλαίσιο της δοκιμής και η μονάδα επιβολής του φορτίου, έτσι ώστε η δοκιμή να εκτελείται υπό την επιθυμητή σταθερή θερμοκρασία (Λοΐζος Α., Πλατή Χ., 2016).



*Εικόνα 2.5 Εργαστηριακή διάταξη προσδιορισμού του ITSM*

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής ITSM επιβάλλεται φόρτιση κατά μήκος της κάθετης διαμέτρου κυλινδρικού δοκιμίου, η οποία επιφέρει μια εφελκυστική τάση κατά μήκος της οριζόντιας διαμέτρου (εικόνα 2.6). Μετρώντας την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που ανακτάται κατά τη διάρκεια του χρόνου αποφόρτισης και γνωρίζοντας το αρχικό επιβαλλόμενο φορτίο υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.6 Κατανομή τάσεων κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

Το μέτρο δυσκαμψίας του σφαλτομίγματος προσδιορίζεται από τη σχέση 2.3 (Sri S., 2010):

$$ITSM = \frac{P * (\nu + 0,273)}{\Delta h} \quad (2.3)$$

Όπου:

ITSM = μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (MPa)

P = εφαρμοζόμενο κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο (N)

Δ = μέσο πλάτος της οριζόντιας παραμόρφωσης (mm)

h = μέσο πάχος του δοκιμίου (mm)

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

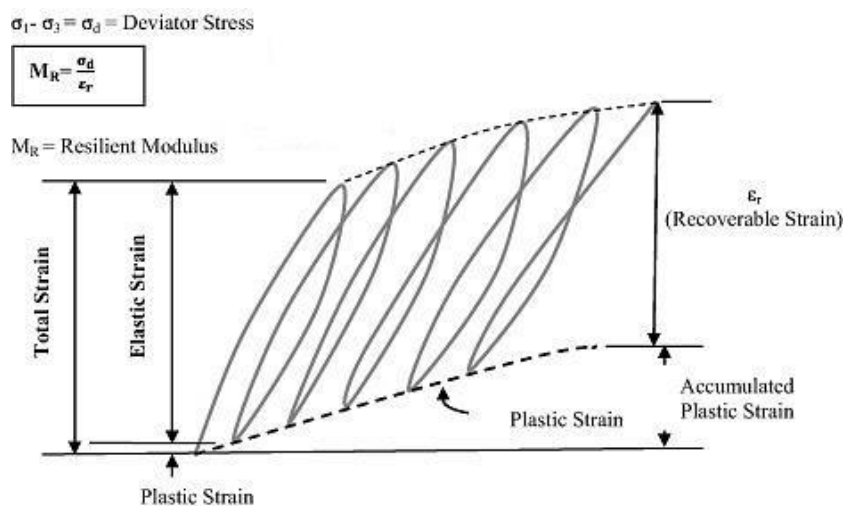
### β) Μέτρο επανάταξης (Resilient Modulus: $M_r$ )

Το μέτρο επανάταξης ( $M_r$ ) προκύπτει από μια δυναμική δοκιμή και ορίζεται ως ο λόγος της επαναλαμβανόμενης αξονικής τάσης  $\sigma_d$  προς την ανακτηθείσα αξονική παραμόρφωση  $\epsilon_r$  (Seed et al., 1962):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.4)$$

Το μέτρο επανάταξης θεωρείται ότι χαρακτηρίζει τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών οδοστρώσις. Χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α για αμμοχάλικα και για ασφαλτικά υλικά. Ο τρόπος προσδιορισμού του για τα αμμοχάλικα γίνεται μέσω της τριαξονικής δοκιμής (Ozel M. R. and Mohejjerani A., 2011). Η δοκιμή εφαρμόζει μια επαναλαμβανόμενη αξονική κυκλική τάση σταθερού μεγέθους και διάρκειας κύκλου φόρτισης σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο. Είναι ουσιαστικά μια δοκιμή, η οποία διεξάγεται σε μια συσκευή κατάλληλη για συνθήκες επαναληπτικής φόρτισης (εικόνα 2.7). Η εφαρμογή επαναληπτικής φόρτισης θεωρείται ότι προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική φόρτιση της κυκλοφορίας.

Η δοκιμή περιγράφεται σε διάφορα πρότυπα όπως του διεθνούς οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials) "D4123: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test" (1995), του SHRP (Strategic Research Highway Program) - "P07: Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device" (2001) και του NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design"(2004).



Εικόνα 2.7 Προσδιορισμός του μέτρου επανάταξης υπό επαναλαμβανόμενη κυκλική τάση

### γ) Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (Dynamic Modulus: $E^*$ )

Τα τελευταία χρόνια στο πλαίσιο διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων, το μέτρο δυσκαμψίας που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $E^*$ ) μέσω του οποίου περιγράφεται η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ποσοτικοποίησης της επίδρασης της θερμοκρασίας και της συχνότητας φόρτισης στη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος υπό δυναμική φόρτιση. Η

διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε διάφορες ταχύτητες κίνησης των οχημάτων και θερμοκρασίες.

Κατά τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου, εφαρμόζεται θλιπτική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής σε δοκίμια ασφαλτομιγμάτων. Στο παρελθόν, τα δοκίμια αυτά ήταν τραπεζοειδούς διατομής και ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας ήταν δυνατός με δύο τρόπους (Bonnaure et al., 1977). Ο πρώτος τρόπος προσδιορισμού, ήταν μέσω της επιβαλλόμενης στο δοκίμιο τάσης και της τελικής μετατόπισής του μετά τη φόρτιση. Κατά τον δεύτερο τρόπο λαμβάνονταν υπόψη η επιβαλλόμενη τάση και η προκύπτουσα παραμόρφωση.

Η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε τα επόμενα έτη οδήγησε στη διαφοροποίηση της γεωμετρίας του δοκιμίου. Πλέον το σχήμα τους είναι κυλινδρικό και σε αυτό εφαρμόζεται ημιτονοειδής θλιπτική τάση. Οι δοκιμές διεξάγονται υπό διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης, ενώ η μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης γίνεται με κατάλληλους αισθητήρες τοποθετημένους περιμετρικά του δοκιμίου. Το δυναμικό μέτρο προκύπτει ως ο λόγος του μεγέθους της επιβαλλόμενης τάσης προς την ανακτώμενη παραμόρφωση, για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας, ενώ καταγράφεται και η γωνία υστέρησης (Robbins 2009, Clyne et al. 2004). Εκτενής αναφορά στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, καθώς και στη μεθοδολογία του εργαστηριακού προσδιορισμού του, γίνεται σε επόμενο εδάφιο. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική αναφορά στους λόγους, οι οποίοι οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου μέτρου δυσκαμψίας για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας αυτής (κεφάλαιο 2.3).

### 2.2.2. Επί τόπου προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας

Για την επί τόπου εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενων οδοστρωμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών NDT (Non Destructive Testing – NDT) τα οποία διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου επί του οδοστρώματος και τη μεθοδολογία καταγραφής των μετρήσεων (Ευαγγελίδης κ.ά.,2004).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα, που επιβάλλουν στατικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν τη μέγιστη ελαστική υποχώρηση, που επέρχεται στο οδόστρωμα. Οι μετρήσεις των υποχωρήσεων είναι σημειακές και ανά συγκεκριμένες αποστάσεις κατά μήκος της οδού και πραγματοποιούνται με τη βοήθεια μηκυσιομέτρων ή γεωφόνων. Το μέγεθος της ελαστικής υποχώρησης είναι μια ένδειξη της ικανότητας του οδοστρώματος να φέρει την επιβαλλόμενη φόρτιση. Αντιπροσωπευτικά συστήματα αυτής της κατηγορίας είναι το Deflectograph (Γαλλία), Dynaflect (ΗΠΑ), Road Rater (ΗΠΑ), η δοκός Benkelman κλπ (εικόνες 2.8 – 2.11).





Εικόνα 2.8 Deflectograph



Εικόνα 2.9 Dynaflect



Εικόνα 2.10 Road Rater



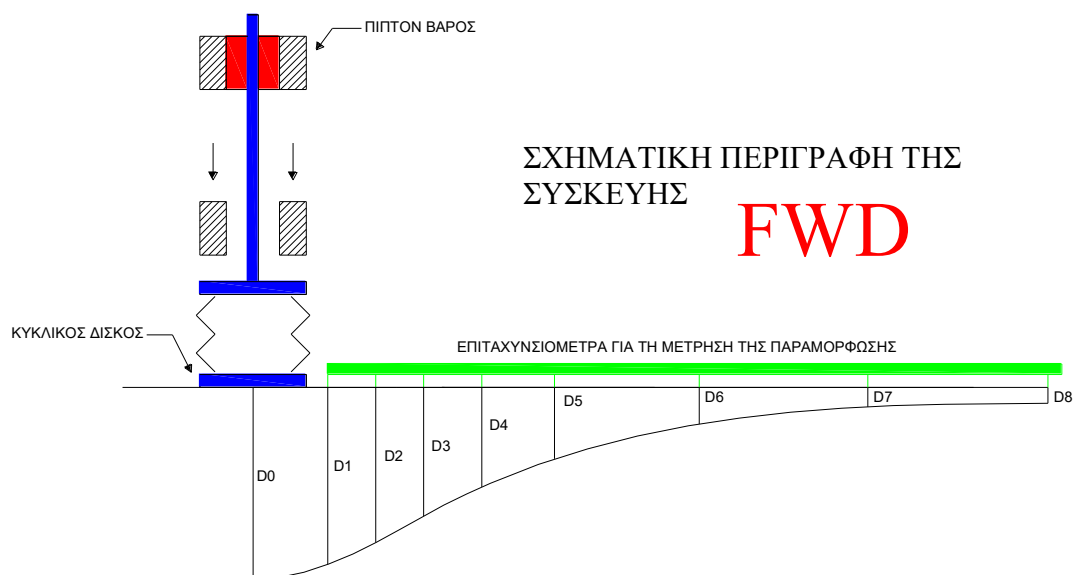
Εικόνα 2.11 Δοκός Benkelman

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν την ελαστική υποχώρηση, που επέρχεται στο οδόστρωμα. Αντιπροσωπευτικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι το Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD), το οποίο χρησιμοποιείται για την καταγραφή των στοιχείων του οδοστρώματος, με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του (εικόνα 2.12).



*Εικόνα 2.12 Σύστημα καταγραφής FWD του ΕΜΠ*

Αναλυτικότερα, η βασική λειτουργία του συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή επιβάλλει στο οδόστρωμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.13. Η φόρτιση αυτή παρουσιάζει μια ψευδοδυναμική μορφή και προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού. Συγκεκριμένα, το προσπίπτον φορτίο που εφαρμόζεται σε κάθε θέση προσεγγίζει την τιμή των 707 kPa, που προσομοιάζει επαρκώς την πραγματική φόρτιση από την κυκλοφορία και αποτελεί το βασικότερο, πλεονέκτημα αυτού του συστήματος (Dynatest 2001).



Εικόνα 2.13 Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Οι ψευδοελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κλπ.) είναι δυνατό να δώσουν μια πλήρη πληροφόρηση για τη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

Οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την υποχώρηση του οδοστρώματος κατά τη χρήση του FWD είναι το πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος, τα χαρακτηριστικά των υλικών στρώσεως, η ποιότητα των υλικών, η υποστήριξη υπεδάφους, αλλά και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες.

Σημειώνεται ότι η συλλογή των δεδομένων με το FWD είναι σχετικά γρήγορη, με τη δοκιμή να είναι εύκολη στην εφαρμογή, όμως χρειάζεται επιμέλεια ώστε να τηρούνται τα προβλεπόμενα από τον κατασκευαστή, καθώς σε αντίθετη περίπτωση μπορούν να προκύψουν εσφαλμένες μετρήσεις.

### 2.3. Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας  $E^*$ , αποτελεί βασική παράμετρο στον Μηχανιστικό – Εμπειρικό Οδηγό Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG, 2008), ο οποίος επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη συσχέτιση των ιδιοτήτων των υλικών, της κυκλοφορίας και των καιρικών συνθηκών με την επιπόνηση που υφίσταται το οδόστρωμα, καθώς και με την μακροπρόθεσμη δομική του επάρκεια (Flintsch et al. 2007).

Η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για τον θεμελιώδες χαρακτηρισμό των ασφαλτομιγμάτων κρίθηκε απαραίτητη στα τέλη της δεκαετίας του '80. Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης ( $M_T$ ) που χρησιμοποιούνταν ως τότε, περιέγραφε κυρίως τη συμπεριφορά των εδαφικών και ασύνδετων υλικών χωρίς να είναι δυνατή η πλήρης περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος (Dougan et al, 2003). Ήδη από το 1962, είχε παρατηρηθεί αυτή η ιδιαιτερότητα του ασφαλτομίγματος σε σχέση με τα εδαφικά υλικά από τον Parazian, ο οποίος εφάρμοσε σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο ημιτονοειδή φόρτιση, με δεδομένη συχνότητα και μέτρησε την παραμόρφωση που προέκυψε. Επιπλέον δοκιμές διεξήχθησαν σε διαφορετικά δοκίμια υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και συχνοτήτων φόρτισης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω ερευνών, ήταν να γίνει αντιληπτή η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου και να λαμβάνεται υπόψη έκτοτε στο πλαίσιο κανονισμών σχεδιασμού ασφαλτικών οδοστρωμάτων καθώς και στα κριτήρια αξιολόγησής τους (Dougan et al, 2003).

Η διαδικασία της αποτύπωσης της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι απαραίτητη για την ακριβέστερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε διάφορες ταχύτητες κίνησης των οχημάτων και θερμοκρασίες, αφού έτσι επιτυγχάνεται μια συνολική εκτίμηση της δυσκαμψίας. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε το δυναμικό μέτρο στην παρούσα εργασία, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες εκφράσεις του μέτρου δυσκαμψίας.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αναπαριστά πληρέστερα τη φύση του ασφαλτομίγματος, δηλαδή την εξάρτηση της δυσκαμψίας του από το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία, και επηρεάζεται άμεσα από την όποια μεταβολή στις δύο αυτές βασικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας καθώς επίσης και η μείωση της συχνότητας φόρτισής του προκαλούν μείωση του δυναμικού μέτρου (Bonnaure et al. 1977, Flintsch et al. 2007, Tashman and Elangovan 2007, Mohammad et al. 2005).

Για τη μονοδιάστατη περίπτωση μιας ημιτονοειδούς φόρτισης, η εξίσωση 2.5 αντιπροσωπεύει την τάση (Maher et al., 2005):

$$\sigma = \sigma_0 * \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

Όπου:

$\sigma_0$  = μέγιστη τάση (kPa)

$t$  = ο χρόνος φόρτισης (s)

$\omega$  = γωνιακή ταχύτητα (rad/s), η οποία σχετίζεται με τη συχνότητα (f) με:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.6)$$

Η παραμόρφωση που προκύπτει μπορεί να γραφτεί ως εξής:

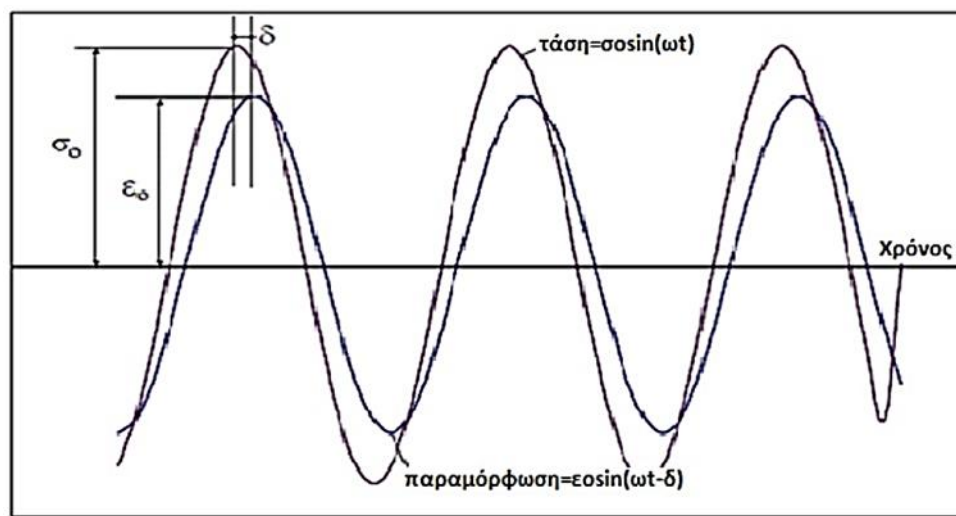
$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \sin(\omega t - \delta) \quad (2.7)$$

Όπου:

$\epsilon_0$  = μέγιστη παραμόρφωση

$\delta$  = γωνία υστέρησης που σχετίζεται με το χρόνο (t)

Η γωνία υστέρησης ( $\delta$ ) εκφράζει τη διαφορά φάσης στην εμφάνιση της μέγιστης παραμόρφωσης από τη στιγμή της επιβολής της μέγιστης τάσης (εικόνα 2.14). Ουσιαστικά, αντιστοιχεί στην χρονική καθυστέρηση της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης η οποία προκύπτει μεταγενέστερα από τη στιγμή επιβολής της μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσης (Huang, 1993). Αυτή η διαφορά φάσης απεικονίζει την χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος και εκφράζει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του. Η γωνία υστέρησης κυμαίνεται από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Για τελείως ελαστικά υλικά η γωνία είναι μηδέν ( $\delta = 0^\circ$ ), δηλαδή δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιβολής της μέγιστης τάσης και της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης. Αντίθετα, για τελείως ιξώδη υλικά η γωνία υστέρησης είναι ενενήντα μοίρες ( $\delta=90^\circ$ ), δηλαδή η παραμόρφωση υστερεί της τάσης κατά  $90^\circ$ .



Εικόνα 2.14 Σχέση τάσης- παραμόρφωσης ασφαλτομίγματος υπό ημιτονοειδείς συνθήκες φόρτισης

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος περιγράφεται από το μιγαδικό μέτρο δυσκαμψίας ( $E^*$ ), το οποίο προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης υπό την επιβολή ημιτονοειδούς φόρτισης. Όπως κάθε μιγαδικός αριθμός, έτσι και το μέτρο  $E^*$  αποτελείται από το πραγματικό μέρος  $E'$ , που αναπαριστά την ελαστική συμπεριφορά των υλικών και το φανταστικό μέρος  $E''$ , που περιγράφει την εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang, 1993).

Πιο αναλυτικά, το μιγαδικό μέτρο δυσκαμψίας είναι εξ ορισμού (Yoder E.J. and Witczak M.W., 1975):

$$E^* = E' + iE'' \quad (2.8)$$

Όπου:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} * \cos \delta \quad (2.9)$$

είναι το πραγματικό μέρος του μιγαδικού μέτρου που αντιστοιχεί στο ανακτώμενο τμήμα της παραμόρφωσης κατά την αποφόρτιση του υλικού και εκφράζει την ελαστικότητα του, και

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \sin \delta \quad (2.10)$$

είναι το φανταστικό μέρος του μιγαδικού μέτρου, που αντιστοιχεί στη μη ανακτήσιμη παραμόρφωση.

Εκφράζοντας την τάση και την παραμόρφωση κατά την επιβολή ημιτονοειδούς φόρτισης ως μιγαδικούς αριθμούς, οι σχέσεις (2.5) και (2.7) λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\sigma^* = \sigma_0 * e^{i\omega t} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 * e^{(i\omega t - \delta)} \quad (2.12)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει το μιγαδικό μέτρο  $E^*(i\omega)$ :

$$E^*(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * e^{i\delta} = E' + iE'' \quad (2.13)$$

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

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \cos \delta\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \sin \delta\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.14)$$



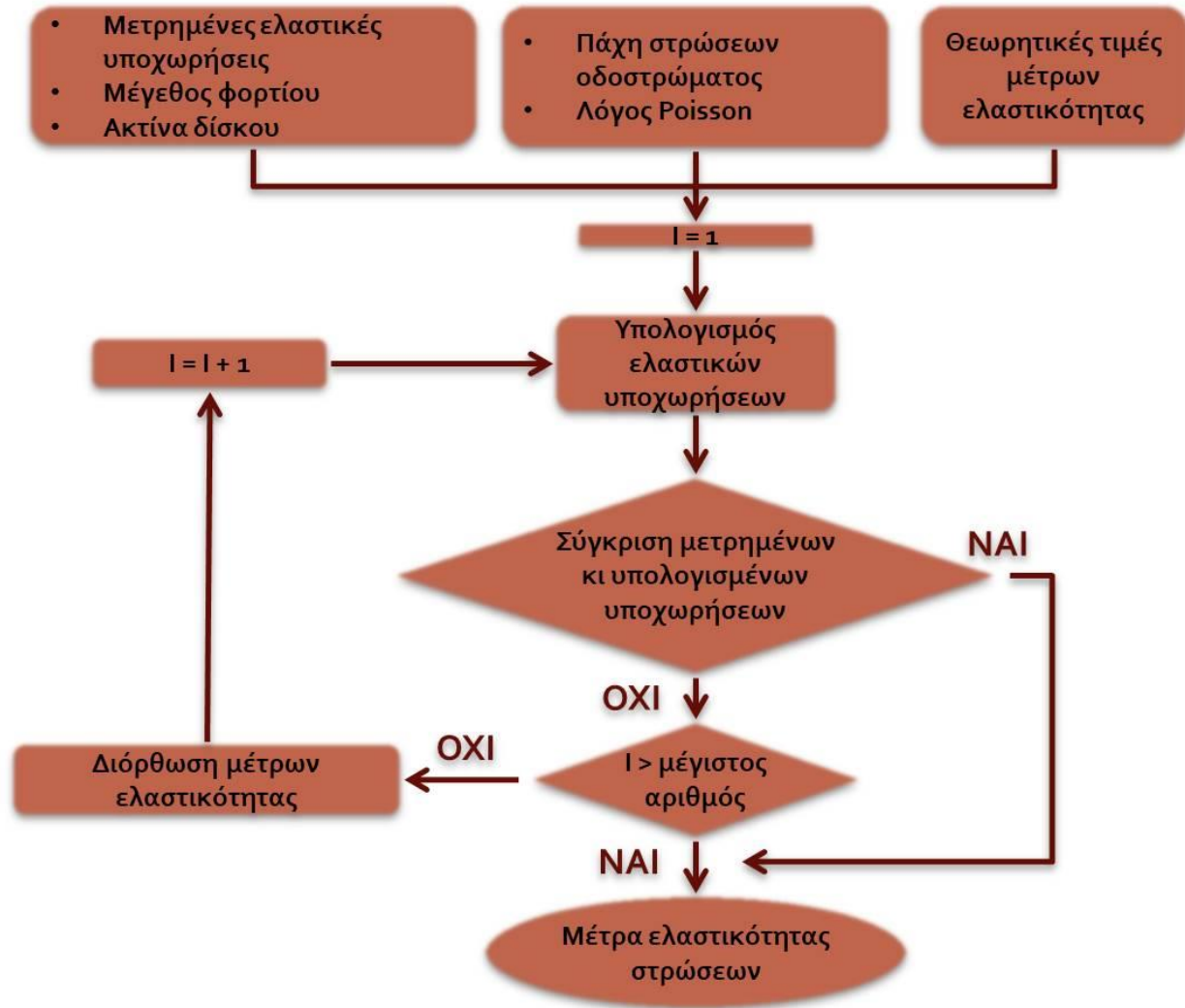
### 3. ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

#### 3.1. Ορισμός

Ως ανάστροφος υπολογισμός ορίζεται η διαδικασία του έμμεσου προσδιορισμού του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των στρώσεων του οδοστρώματος (backcalculation of pavement layer moduli), έχοντας ως αφετηρία τα επιτόπου στοιχεία της ελαστικής υποχώρησής του υπό την επιβολή της φόρτισης με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD). Τα επιτόπου στοιχεία, δηλαδή οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφουν τα γεώφωνα, οι θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής καθώς και τα πάχη των στρώσεων αποτελούν μεταβλητές εισόδου για τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis).

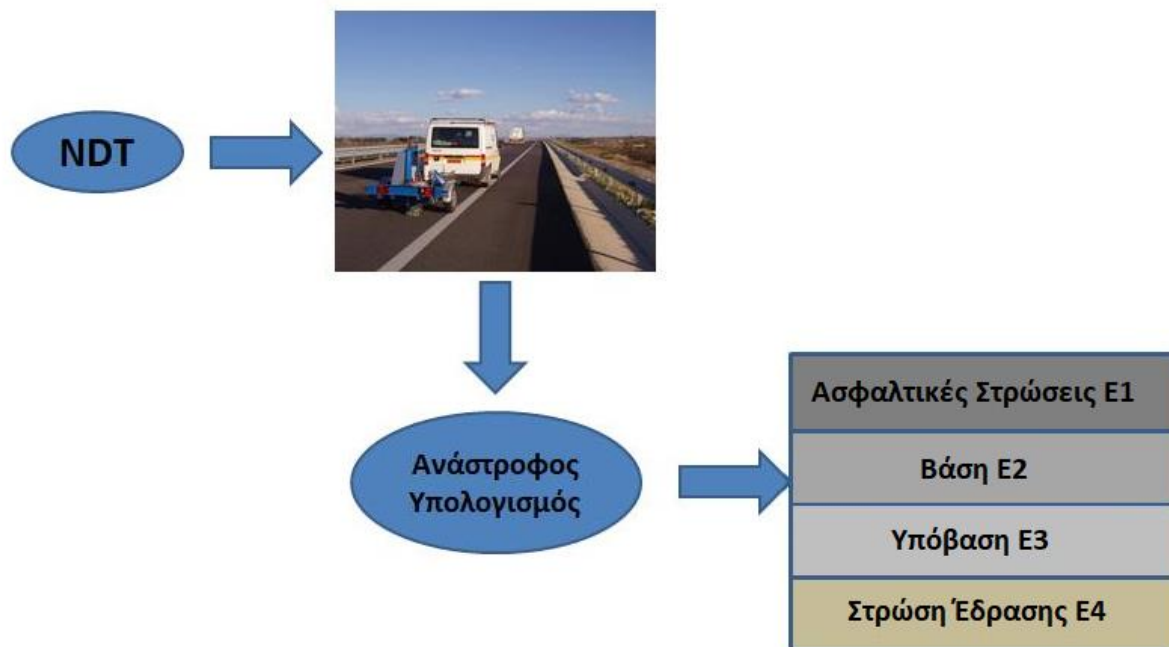
Ουσιαστικά, πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία στην οποία γίνεται σύγκριση των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων (measured deflections) με εκείνες που προέρχονται από την υπολογιστική διαδικασία (calculated deflections) (Appera et al., 2002). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτή, ενεργοποιείται ένας αλγόριθμος, στον οποίο σαν δεδομένα εισόδου, πέραν των προαναφερθέντων, δίνονται και ενδεικτικές αρχικές τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων (Sudhir et al., 2013). Δηλαδή, για τη λειτουργία των αλγόριθμων ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιούνται κατάλληλα προσομοιώματα οδοστρωμάτων που βασίζονται στην αρχή της εδαφομηχανικής εν μέρει και της εδαφοδυναμικής. Έτσι, με αυτές τις τιμές εκκίνησης, γίνεται υπολογισμός των ελαστικών υποχωρήσεων για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η πρώτη σύγκριση με τις μετρημένες υποχωρήσεις. Εάν η σύγκλιση είναι ικανοποιητική, τότε οι τιμές εκκίνησης που δόθηκαν στα μέτρα ελαστικότητας θεωρούνται αποδεκτές, διαφορετικά τα μέτρα ελαστικότητας αναπροσαρμόζονται και υπολογίζονται εκ νέου οι υποχωρήσεις. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων. Ως παράμετρο ελέγχου αυτής της σύγκλισης ορίζεται ένα μέτρο εκτίμησης σφάλματος (που ενδέχεται να διαφέρει από μεθοδολογία σε μεθοδολογία), του οποίου μόλις η τιμή λάβει αποδεκτή τιμή, τότε η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται. Συνεπώς, οι τρέχουσες τιμές των μέτρων ελαστικότητας θεωρείται ότι ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.





Εικόνα 3.1 Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού είναι σύνθετη και απαιτεί σχετική εξειδίκευση ώστε να αποτελεί αντικείμενο ειδικής μελέτης. Με την παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται η εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, υπό την μορφή των μέτρων ελαστικότητας (E) που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης (εικόνα 3.2) (Λοΐζος Α. και Πλατή Χ., 2016).



Εικόνα 3.2 Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρεται η διαδικασία που ακολουθείται κατόπιν της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, για τη μετατροπή του μέτρου δυσκαμψίας που υπολογίστηκε, σε θερμοκρασία αναφοράς.

### 3.2. Αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς

Η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος ως ιξωδοελαστικό υλικό, έχει ως άμεση συνέπεια την εξάρτησή του από τον χρόνο φόρτισης ( $t$ ) και τη θερμοκρασία ( $T$ ). Ειδικότερα, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και η εξάρτηση αυτή εξηγεί το γεγονός ότι τα μέτρα δυσκαμψίας για το ίδιο οδόστρωμα ποικίλλουν ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Άλλωστε η αξιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος επιτυγχάνεται μέσω της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, η οποία εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, διαφέρει ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή. Γι αυτό το λόγο αυτό η δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος δεν μπορεί να συγκριθεί χωρίς αναγωγή σε θερμοκρασία αναφοράς (Marshall et al. 2001). Επομένως, απαιτείται αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των ασφαλτικών στρώσεων και του οδοστρώματος.

Η διαδικασία αναγωγής του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς έχει μελετηθεί εντατικά από τους ερευνητές διαχρονικά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλαπλών αλγορίθμων

(Fernando et al., 2001). Ιδανικά, έχει αναφερθεί ότι δοκιμές με FWD θα έπρεπε να διεξάγονται σε διάφορες θερμοκρασίες, με σκοπό την ανάπτυξη ενός κατάλληλου αλγορίθμου (Hakim et al., 2002). Ωστόσο, αυτό δεν είναι εφικτό, τις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω του ότι δεν υπάρχει κανένας έλεγχος στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της έρευνας, αλλά και εξαιτίας των δυσκολιών που επιφέρει η δοκιμή λόγω διακοπής της κυκλοφορίας στο τμήμα του οδοστρώματος που αυτή εκτελείται. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διάφοροι αλγόριθμοι με σκοπό την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς, για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος.

Οι υφιστάμενοι αλγόριθμοι για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς, χρονολογούνται κυρίως από τη δεκαετία του '90 και τις αρχές της δεκαετίας του 2000. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν ευρεία εφαρμογή σε έρευνες και ελέγχους που γίνονται κατά καιρούς, για την αξιολόγηση της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Για ορισμένους από αυτούς τους αλγόριθμους υπάρχει περιορισμός σχετικά με τη θερμοκρασία αναφοράς, ενώ άλλοι επιτρέπουν τη θεώρηση οποιασδήποτε θερμοκρασίας, η οποία καθορίζεται από το μελετητή. Οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες θερμοκρασίες αναφοράς είναι εκείνες των 20, 21.1 και 25°C. Στη συνέχεια δίνονται οι εκφράσεις των αλγορίθμων αναγωγής σε θερμοκρασία αναφοράς, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

❖ *Ullidtz (1987)*

$$\frac{E_{T_0}}{E_T} = \frac{1}{3,177 - 1,673 * (\log T)} \quad (3.1)$$

Όπου:

$E_T$  = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία  $T$  (°C) για  $T > 1$  °C

$E_{T_0}$  = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$

❖ *Jung (1990)*

$$ES = EA * e^{kx(TA-TS)} \quad (3.2)$$

Όπου:

$ES$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στην θερμοκρασία αναφοράς (MPa)

$EA$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία δοκιμής (MPa)

$TA$  = μέση θερμοκρασία οδοστρώματος (°C)

$TS$  = θερμοκρασία αναφοράς (°C)

$k$  = συντελεστής εξίσωσης

❖ *Johnson and Baus (1992)*

$$\frac{E_{std}}{E_{field}} = 10^{-0.0002175(70^{1.886} - T^{1.886})} \quad (3.3)$$

Όπου:

$E_{std}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς

$E_{field}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος

T = μετρούμενη θερμοκρασία σε °F

Θερμοκρασία αναφοράς = 70 °F (21.1°C).

❖ *Baltzer and Jansen (1994)*

$$E_{ref} = \frac{E_{ac}}{1 - 2 * \log\left(\frac{T_{ac}}{T_{ref}}\right)} \quad (3.4)$$

Όπου:

$T_{ref}$  = θερμοκρασία αναφοράς

$E_{ref}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς

$T_{ac}$  = θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος η οποία μετρείται κατά τη δοκιμή FWD σε βάθος 40 mm κάτω από την επιφάνεια

$E_{ac}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος όπως προέκυψε από την ανάλυση των στοιχείων καταγραφής του FWD.

❖ *Kim et al. (1995)*

$$\frac{E_{68}}{E_T} = 10^{-0.0153(68-T)} \quad (3.5)$$

Όπου:

$E_{68}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς 68°F (20 °C)

$E_T$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία T

T = θερμοκρασία στο μέσον του ασφαλτομίγματος (°F)

❖ *Ali and Lopez (1996)*

$$\frac{E_{\text{ref}}}{E_1} = e^{(0.03608145 \cdot T - 0.75771)} \quad (3.6)$$

Όπου:

$E_{\text{ref}}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς (21 °C)

$E_1$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία T

T = θερμοκρασία οδοστρώματος σε σημείο 25 χιλιοστών κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος,

$T_{\text{ref}} = 21$  °C.

❖ *Braun Intertec (Lukanen, 1996)*

$$\frac{E_1}{E_2} = 10^{0.01 \cdot (T_2 - T_1)} \quad (3.7)$$

Όπου:

$E_1$  = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς  $T_1$  (°F)

$E_2$  = το μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία δοκιμής  $T_2$  (°F)

❖ *Chen et al. (2000)*

$$E_{Tr} = \frac{E_T}{(1.8 \cdot T_r + 32)^{2.4462} \cdot (1.8 \cdot T + 32)^{-2.4462}} \quad (3.8)$$

Όπου:

$E_{Tr}$  = μέτρο δυσκαμψίας σε μια θερμοκρασία αναφοράς  $T_r$  (°C)

$E_T$  = μέτρο δυσκαμψίας που καθορίζεται από τη δοκιμή σε θερμοκρασία T (°C).

Χρησιμοποιείται για κάθε θερμοκρασία αναφοράς η οποία καθορίζεται από το μελετητή.

❖ *Lukanen et al. (2000)*

$$E_{Tr} = ATAF * E_{Tm} \quad (3.9)$$

$$ATAF = 10^{\text{slope}(T_r - T_m)} \quad (3.10)$$

$$\text{Slope} = \log_{10}(M_r) = \text{intercept} + \text{slope } T \quad (3.11)$$

Όπου:

$E_{Tr}$  = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς (°C)

$E_{Tm}$  = θερμοκρασία στο μέσον του οδοστρώματος (°C)

ATAF = συντελεστής προσαρμογής της θερμοκρασίας ασφαλτομίγματος

Οι κλίσεις (slopes) είναι αρνητικές, αφού το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, σε ημιλογαριθμική βάση (συντελεστής log). Οι κλίσεις αυτές, ποικίλλουν ανάλογα με τις ιδιότητες του συνδετικού υλικού και τα χαρακτηριστικά των αδρανών. Το εύρος των κλίσεων που ορίζει το ερευνητικό πρόγραμμα Long Term Pavement Performance : Seasonal Monitoring Program (LTPP: SMP) είναι κατά προσέγγιση από -0,015 έως -0,030. Μια τυπική προεπιλεγμένη τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι -0,021 αν δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα δεδομένα.

❖ *Noureldin et al. (2005)*

$$\text{Temperature corrected } E = \frac{E_{\text{back}}}{\text{Correction Factor}} \quad (3.12)$$

$$\text{Correction Factor} = 1.0000008^{(314432 - T^3)} \quad (3.13)$$

Όπου:

T = μέση θερμοκρασία της ασφαλτικής στρώσης (°F) που μετράται στο μέσον της στρώσης ή υπολογίζεται με βάση τα στοιχεία του αέρα και της επιφάνειας.

$E_{\text{back}}$  = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος όπως προέκυψε από την ανάλυση των στοιχείων καταγραφής του FWD.

Temperature corrected E = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς (°F).

❖ *English Highways Agency (2008)*

$$E_{20} = E_T * 10^{(0.0003 * (20 - T)^2 - 0.022 * (20 - T))} \quad (3.14)$$

Όπου:

$E_{20}$  = μέτρο δυσκαμψίας στους 20 °C

$E_T$  = μέτρο δυσκαμψίας σε θερμοκρασία T

T = θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος κατά τη στιγμή της δοκιμής (μετρούμενη σε βάθος 100 mm), 15 έως 25 °C.

❖ *ELMOD (Dynatest 2006)*

$$E = e^{(-0.04663*(t-t_{ref}))} E_{ref} \quad (3.15)$$

Όπου:

E = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία t

E<sub>ref</sub> = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς t<sub>ref</sub>

Από τους παραπάνω αλγορίθμους παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς, πολλαπλασιάζεται συνήθως με ένα συντελεστή (Park S.W. and Kim Y. R., 1997). Δηλαδή:

$$\lambda = \frac{E_{T_0}}{E_T} \quad (3.16)$$

Όπου:

E<sub>T<sub>0</sub></sub> = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς T<sub>0</sub>

E<sub>T</sub> = μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία T

Οι περισσότεροι από τους προαναφερθέντες αλγόριθμους απαιτούν μόνο δεδομένα για το μέτρο δυσκαμψίας και τη θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος που μελετάται κάθε φορά, αλλά η εφαρμογή τους ενδεχομένως να είναι αμφίβολη για άλλα ασφαλτομίγματα. Άλλωστε, προηγούμενη έρευνα (Plati et al. 2014) έδειξε ότι η εφαρμογή των υφιστάμενων αλγορίθμων μπορεί να οδηγήσει σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα και αβεβαιότητες.

Δεδομένων των παραπάνω, στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται διερεύνηση ανάπτυξης ενός νέου αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C, λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες στην Ελλάδα συνθήκες, με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα προσδιορισμού του E\*.

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1. Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκαν μια σειρά από διαδικασίες με στόχο την ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς. Για το σκοπό αυτό, οργανώθηκε πείραμα, το οποίο πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Σε πρώτο στάδιο, διεξήχθη οδικό πείραμα, για την επιτόπου συλλογή στοιχείων οδοστρώματος, ενώ σε δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές.

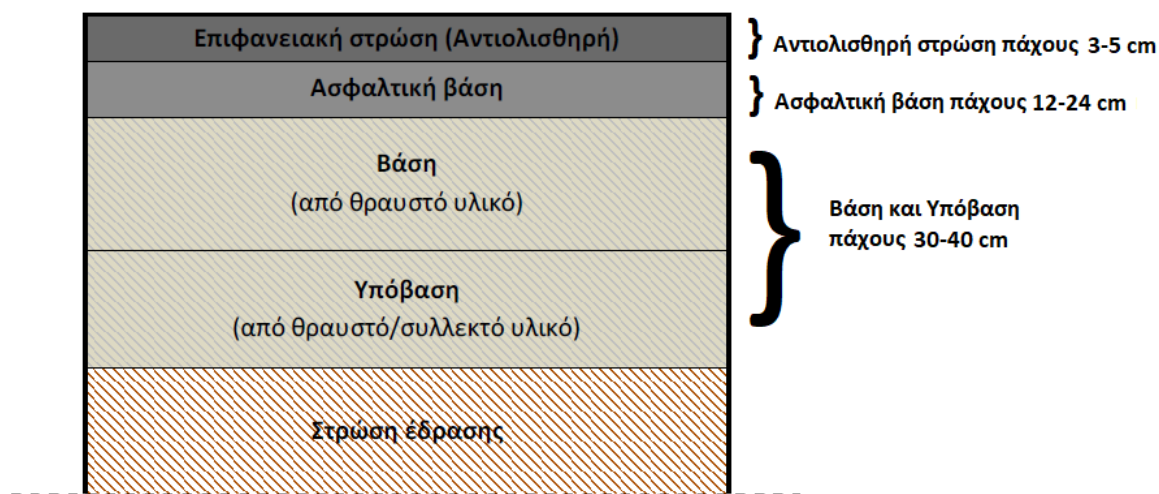
Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια του οδικού πειράματος, πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων με το μη καταστρεπτικό σύστημα του Παραμορφωσίμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD), σε τμήμα υφιστάμενου οδοστρώματος. Παράλληλα, έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας περίπου στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς πολλοί ερευνητές θεωρούν τη θερμοκρασία στο μέσον του οδοστρώματος ως αντιπροσωπευτική θερμοκρασία για τη διαδικασία της αναγωγής του μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία αναφοράς (Salem and Bayomi 2004, Marshall et al. 2001, Park D.Y. et al. 2001 και Kim et al. 1995). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε λήψη πυρήνων από το οδόστρωμα, στις θέσεις καταγραφής του FWD. Οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, προκειμένου για να προσδιοριστεί το  $E^*$  μέσω κατάλληλης πειραματικής διάταξης, σε διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης.

Αξιοποιώντας, τα αποτελέσματα από τα δύο αυτά στάδια, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, με στόχο την ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς. Αναλυτικά οι διαδικασίες αυτές παρουσιάζονται στο παρόν και στο επόμενο κεφάλαιο.

### 4.2. Οδικό πείραμα

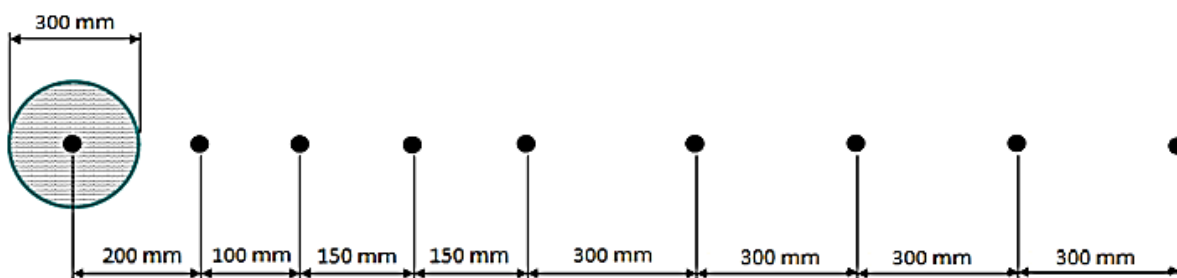
Η παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε σε οδικό τμήμα ελληνικού αυτοκινητοδρόμου, με τυπική διατομή οδοστρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1:





Εικόνα 4.1 Τυπική διατομή υφιστάμενου οδοστρώματος

Στο υφιστάμενο οδόστρωμα διεξήχθη δοκιμή με το σύστημα FWD σε συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις κατά μήκος του οδοστρώματος, σε μήκος 5,5 χιλιομέτρων. Οι καταγραφές με το FWD πραγματοποιήθηκαν σε συνολικά 29 σημεία, σε μεταξύ τους αποστάσεις των 20 μέτρων. Οι αποστάσεις των γεωφώνων καταγραφής των ελαστικών υποχωρήσεων παρουσιάζονται στην εικόνα 4.2. Το προσπίπτον φορτίο της συσκευής που εφαρμόστηκε σε όλες τις θέσεις, εμφανίζει ως μέση τιμή αυτή των 707 kPa (εικόνα 4.2). Παράλληλα, έγινε μέτρηση της θερμοκρασίας των ασφαλτικών στρώσεων σε όλες τις θέσεις καταγραφής.



Εικόνα 4.2 Θέσεις καταγραφής ελαστικών υποχωρήσεων

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των μέτρων δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων, στα σημεία καταγραφής, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού. Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής FWD:

Πίνακας 4.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής FWD

Χιλιομετρικές Θέσεις	Μέτρο Δυσκαμψίας (MPa)	Θερμοκρασία (°C)	Χιλιομετρικές Θέσεις	Μέτρο Δυσκαμψίας (MPa)	Θερμοκρασία (°C)
110	6592	19.5	170.4	10523	19.0
110.2	7257	19.6	170.6	10649	19.1
110.4	7464	19.7	170.8	11070	19.3
110.6	9130	19.8	171	9651	19.5
110.8	8116	19.9	171.2	7829	19.7
111	8720	20.0	171.6	8534	20.0
111.2	7921	20.0	171.8	8260	20.2
111.4	8363	20.2	172	7295	20.5
111.6	8092	20.2	172.2	6966	20.7
111.8	7476	20.3	172.3	4140	20.8
112	5204	20.4			
112.2	9643	20.6			
112.4	2434	20.7			
112.6	4175	20.8			
112.8	5003	20.8			
113	5625	20.9			
113.2	9541	20.9			
113.4	9504	21.0			
113.6	8230	21.0			

Μετά το πέρας της δοκιμής FWD, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της πυρηνοληψίας στον υπόψη τμήμα οδοστρώματος (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Διαδικασία Πυρηνοληψίας

Η πυρηνοληψία αποτελεί μία ιδιαιτέρως αξιόπιστη και άμεση μέθοδο ποιοτικού ελέγχου, η οποία βασίζεται στην διάτρηση και αποκοπή κυλινδρικού δοκιμίου. Όμως γενικά λόγω του καταστρεπτικού χαρακτήρα της, στόχος είναι η λήψη των πυρήνων σε μία έρευνα να είναι περιορισμένη.

### 4.3. Εργαστηριακό πείραμα

Το δεύτερο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, περιλαμβάνει τις εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων. Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11 (2011), χρησιμοποιώντας τη συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester (NAT)).

Από την πυρηνοληψία που διεξήχθη, ελήφθησαν 29 πυρήνες, όσες και οι θέσεις καταγραφής με το FWD. Πολλοί πυρήνες περιελάμβαναν στρώσεις από κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο (ΚΘΑ), ενώ άλλοι εμφάνιζαν σοβαρές φθορές, οι οποίες προκλήθηκαν από την επίδραση της κυκλοφορίας και των κλιματολογικών συνθηκών με την πάροδο του χρόνου. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι σε κάποιους πυρήνες, υπήρχαν μεγάλες διαφορές στα πάχη των επιμέρους στρώσεων, κάτι που σημαίνει ότι έχει προηγηθεί ενίσχυση σε ορισμένα τμήματα του οδοστρώματος. Οι πυρήνες αυτοί κρίθηκαν ακατάλληλοι για περαιτέρω επεξεργασία.

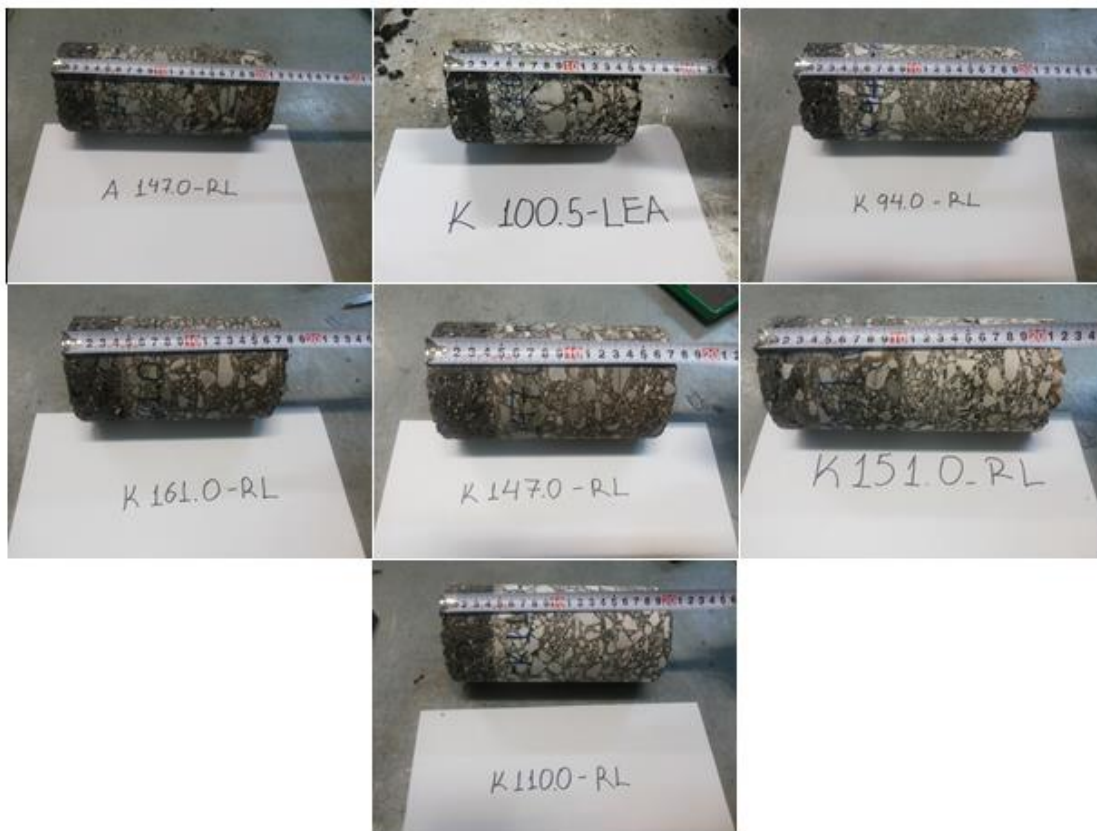
Στον πίνακα 1 του Παραρτήματος παρουσιάζονται αναλυτικά οι πυρήνες με τις διαστάσεις τους, όπως προέκυψαν κατόπιν μέτρησής τους στο χώρο του εργαστηρίου. Από τη μέτρηση προέκυψε ότι ο μέσος όρος της διαμέτρου των πυρήνων είναι 95,5mm.

Αρχικά, οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο ειδικό μηχάνημα κοπής, ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται για την κοπή των πυρήνων, προκειμένου αυτά να αποκτήσουν το επιθυμητό ύψος για την εργαστηριακή διαδικασία προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.4.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η επιλογή των πυρήνων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή. Από τους 29 αρχικά πυρήνες, επιλέχθηκαν μόλις οι επτά με βάση τη μορφή τους, καθώς πολλοί από αυτούς λόγω αρχικής κόπωσης υπέστησαν σοβαρές ρωγμές και αποσπάσεις κατά τη διάρκεια της κοπής, που τους κατέστησε ακατάλληλους για τη χρήση τους στην πειραματική διαδικασία (εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.4 Μηχάνημα κοπής πυρήνων



Εικόνα 4.5 Πυρήνες οδοστρώματος

Η συσκευή NAT, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή του E\*, σύμφωνα με το πρότυπο, απαρτίζεται από δύο μέρη, τον θάλαμο όπου διεξάγεται η πειραματική διαδικασία, καθώς και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο έχει εγκατασταθεί κατάλληλο λογισμικό, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Η δοκιμή βασίζεται στην επιβολή ελεγχόμενης θλιπτικής φόρτισης ημιτονοειδούς μορφής μέσω ενός εμβόλου, με άνω όριο τα 2800 kPa (400psi) για διάφορες τιμές θερμοκρασίας και συχνότητας. Συγκεκριμένα, η συχνότητα φόρτισης μπορεί να ποικίλει εντός των ορίων 0,1Hz και 25Hz. Για ημιτονοειδείς φορτίσεις, το τυπικό σφάλμα του επιβαλλόμενου φορτίου πρέπει να είναι μικρότερο από 5%.

Η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας του θαλάμου διεξαγωγής των δοκιμών, επέρχεται σταδιακά έπειτα από ρύθμιση μέσω συγκεκριμένης λειτουργίας του συστήματος. Οι θερμοκρασίες που δύναται να επικρατούν στο θάλαμο κυμαίνονται από -10 °C έως 60°C. Στις πειραματικές δοκιμές που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι συχνότητες που μελετήθηκαν ήταν από 0,1Hz έως 25Hz, για θερμοκρασίες από 10 °C έως 37 °C.

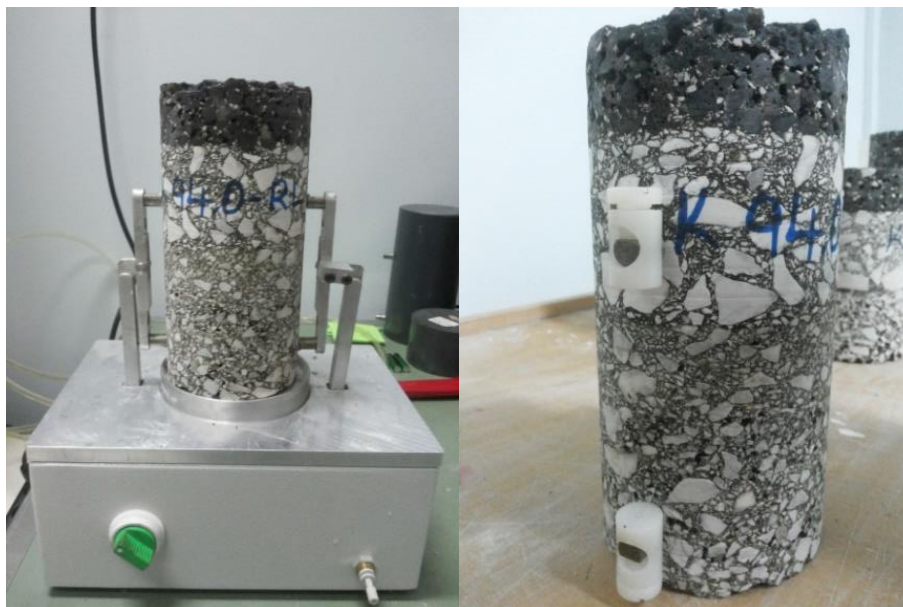
Το σύστημα μετρήσεων ελέγχεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και έχει την ικανότητα να μετράει και να καταγράφει τη χρονική ιστορία του εφαρμοζόμενου φορτίου και των αξονικών παραμορφώσεων. Ακόμα, έχει τη δυνατότητα μέτρησης της περιόδου του εφαρμοζόμενου ημιτονοειδούς φορτίου και των παραμορφώσεων που θα προκύψουν με ακρίβεια 0,5%. Το φορτίο μετράται με μια ηλεκτρονική κυψέλη που είναι σε επαφή με το δοκίμιο. Οι αξονικές παραμορφώσεις μετρούνται με γραμμικούς μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές (LVDT's) που τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία. Δηλαδή, οι παραμορφώσεις μετριοούνται είτε σε δυο σημεία με διαφορά 180 μοιρών, είτε σε τρία σημεία με διαφορά 120 μοιρών ή σε τέσσερα σημεία με διαφορά 90 μοιρών. Στην εργαστηριακή δοκιμή που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκαν δυο LVDT's, τοποθετημένα με διαφορά 180 μοιρών.

Η συσκευή περιλαμβάνει ακόμα πλάκες φόρτισης, μεγέθους  $104,5 \pm 0,5\text{mm}$ , οι οποίες μεταφέρουν το φορτίο από το μηχάνημα στο δοκίμιο και συνήθως, είναι κατασκευασμένες από σκληρυμένο χάλυβα ή αλουμίνιο υψηλής αντοχής. Για τη μείωση των τριβών, καθώς και την αποφυγή εμφάνισης διατμητικών τάσεων στην οριζόντια διαμετρική επιφάνεια του δοκιμίου, ειδικές μεμβράνες τοποθετούνται μεταξύ των άκρων του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η διάταξη της δοκιμής προσδιορισμού του E\*.



*Εικόνα 4.6 Διάταξη δοκιμής προσδιορισμού του  $E^*$*

Πριν την έναρξη των πειραματικών δοκιμών, οι πυρήνες προετοιμάστηκαν κατάλληλα. Αρχικά, το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά τοποθετήθηκε σε μία ειδικά διαμορφωμένη συσκευή με σκοπό την τοποθέτηση μεταλλικών βάσεων αντιδιαμετρικά στους πυρήνες. Η συσκευή αυτή συγκρατεί τις βάσεις με μαγνήτη από τη μία πλευρά, ενώ από την άλλη τοποθετείται ειδική κόλλα υψηλής αντοχής. Η κατακόρυφη απόσταση των μεταλλικών βάσεων είναι συγκεκριμένη, έτσι ώστε να προσαρμόζονται κατάλληλα οι διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDT's) στον πυρήνα. Τέλος, όταν ολοκληρωθεί η προσάρτηση των βάσεων, εφαρμόζονται σε αυτές κατάλληλα πλαστικά στηρίγματα, ώστε να παραμένουν σταθεροί οι αισθητήρες καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της δοκιμής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε και για τους 7 πυρήνες. Στις εικόνες 4.7 και 4.8 που ακολουθούν, φαίνεται η παραπάνω διαδικασία με την ειδική συσκευή προσαρμογής των μεταλλικών βάσεων στους πυρήνες.



Εικόνα 4.7 Συσκευή τοποθέτησης μεταλλικών βάσεων / Τελική μορφή πυρήνα



Εικόνα 4.8 Τελική μορφή των επτά πυρήνων

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία, όλοι οι πυρήνες εισήχθησαν στο θάλαμο όπου και παρέμειναν μέχρι να αποκτήσουν την επιθυμητή θερμοκρασία ( $\pm 0.3$  °C). Η θερμοκρασία των πυρήνων ελεγχόταν από ένα δοκίμιο, το οποίο τοποθετήθηκε στο θάλαμο και στο εσωτερικό του είχε προσαρμοστεί ειδικό θερμόμετρο, με σκοπό να γίνεται ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας περίπου στο μέσον των στρώσεων του δοκιμίου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9 Δοκίμιο ελέγχου θερμοκρασίας

Στον πίνακα 4.2, εμφανίζεται ο χρόνος που συνιστάται να παραμένουν οι πυρήνες στο θάλαμο, μέχρι να αποκτήσουν τη συγκεκριμένη θερμοκρασία που απαιτεί η εκάστοτε δοκιμή.

Πίνακας 4.2 Συνιστώμενοι χρόνοι παραμονής δοκιμίου στο θάλαμο της δοκιμής

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

Οι θερμοκρασίες στις οποίες προσδιορίστηκε το  $E^*$  είναι 10, 15, 20, 25, 30, και 37 °C. Δοκιμές για τις επιπλέον θερμοκρασίες που ορίζονται από το πρότυπο (-10°C, 54 °C) δεν έγιναν διότι δεν ήταν εύκολο να τις συγκρατήσει ο θάλαμος, δεδομένου ότι η θερμοκρασία δωματίου απείχε πολύ από αυτές και θα υπήρχαν σημαντικά σφάλματα.



#### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

---

Πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής, είναι απαραίτητη η πλήρης ευθυγράμμιση του συστήματος δοκιμίου – πλακών με το έμβολο φόρτισης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η έκκεντρη φόρτιση. Οι ειδικοί αισθητήρες (LVDT's) τοποθετούνται παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης και αντιδιαμετρικά του δοκιμίου, επάνω στις κατάλληλα προσαρμοσμένες μεταλλικές βάσεις με τα πλαστικά στηρίγματα. Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν τις μονοαξονικές παραμορφώσεις πλευρικά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισής του.

Όταν πλέον ο πυρήνας έχει προσαρμοστεί πλήρως στη συσκευή, εισάγονται στο σύστημα καταγραφής των δεδομένων του προγράμματος του ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του (ονομασία και διάμετρος), η θερμοκρασία διεξαγωγής της δοκιμής καθώς και το μέγεθος του δυναμικού φορτίου.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και τη μείωση της συχνότητας στους πυρήνες, μειώνεται η τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας τους. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί τα υλικά του ασφαλτομίγματος επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης, όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Το μέγεθος του δυναμικού φορτίου μεταβάλλεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας διεξαγωγής της δοκιμής και συγκεκριμένα, μειώνεται με την αύξησή της, που σημαίνει ότι όσο αυτή αυξάνεται δημιουργείται μεγαλύτερη κόπωση στο δοκίμιο. Το γεγονός αυτό, ενδέχεται να δημιουργήσει μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες θα το καταστήσουν ακατάλληλο για περαιτέρω χρήση του. Επομένως, για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε υψηλές θερμοκρασίες, επιβάλλονται μικρότερα φορτία για τον έλεγχο των παραμορφώσεων εντός των επιτρεπόμενων ορίων (Κόλιας κ.ά., 2005). Στον πίνακα 4.3, παρουσιάζεται το εύρος των τιμών του δυναμικού φορτίου (σε όρους τάσης), σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11, οι οποίες κυμαίνονται από 15 έως 2800 kPa (2 έως 400 psi).

Πίνακας 4.3 Εύρος των τιμών του δυναμικού φορτίου, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11

Θερμοκρασία δοκιμίου (°C)	Εύρος τιμών φορτίου (kPa)	Εύρος τιμής φορτίου (psi)
-10	1400 έως 2800	200 έως 400
4	700 έως 1400	100 έως 200
21	350 έως 700	50 έως 100
37	140 έως 250	20 έως 50
54	35 έως 70	5 έως 10

Οι πυρήνες υποβάλλονται στη δοκιμή φόρτισης από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή σταδιακά από τους 10 °C στους 37 °C. Σε κάθε θερμοκρασία η φόρτιση εφαρμόστηκε από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη συχνότητα, δηλαδή από 25Hz σε 0,1Hz.

#### 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

---

Επιπλέον, σε αυτές τις θερμοκρασίες έγινε προφόρτιση των πυρήνων με συχνότητα 25Hz και 200 κύκλους φόρτισης. Οι κύκλοι φόρτισης για κάθε συχνότητα ορίζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4 Κύκλοι φόρτισης για κάθε συχνότητα

Συχνότητα φόρτισης (Hz)	Κύκλοι φόρτισης (N)
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής πολύ σημαντικός είναι ο έλεγχος των αξονικών παραμορφώσεων, καθώς πρέπει να κυμαίνονται από 50-150 microstrains και οι παραμένουσες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από 1500 microstrains.

Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής, καταγράφεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή το χρονικό ιστορικό των τάσεων και των παραμορφώσεων απ' όπου προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθώς και η γωνία υστέρησης. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής το ειδικό λογισμικό αποθηκεύει τα στοιχεία των πέντε τελευταίων κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα και κατόπιν κατάλληλων υπολογισμών προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

Με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των αποτελεσμάτων όπως προέκυψαν από τη δοκιμή. Συγκεκριμένα, για κάθε πυρήνα δίνονται οι τιμές του δυναμικού φορτίου (σε όρους τάσης) που εισήχθησαν στο σύστημα για κάθε θερμοκρασία, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε τελικά για κάθε φόρτιση, καθώς και τη μέση τιμή των μονοαξονικών παραμορφώσεων των LVDT's. Στο Παράρτημα παρουσιάζονται οι πίνακες καταγραφής των αποτελεσμάτων της μεθόδου, για κάθε πυρήνα (πίνακες 2 - 8).

Στους πίνακες 4.5 έως 4.11 παρουσιάζονται οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ανά θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης, για κάθε πυρήνα:

Πίνακας 4.5 E\* - A147.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		12278	10634	9960	7603	6476	4229
15		8832	8703	7796	5801	4909	3021
20		7605	5737	5092	3583	2845	1693
25		4589	3382	2822	1880	1476	948
30		3012	2466	1806	1178	990	664
37		1546	1073	874	567	477	300

Πίνακας 4.6 E\* - K100.5-LEA

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		428	13064	12102	10850	9875	7823
15		14050	12964	10937	9474	8483	6225
20		10562	9084	8310	6264	5289	3431
25		8696	6365	5791	4263	3455	2259
30		2366	4574	3890	2573	2045	1417
37		3746	2485	2050	1335	1161	765

Πίνακας 4.7 E\* - K94.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		10723	9047	8961	8070	7405	6212
15		5540	8606	8167	7218	6528	5237
20		4579	7415	6869	5551	4990	3533
25		5104	5936	5575	4299	3720	2541
30		2096	4830	3810	2879	2422	1714
37		3271	2563	2329	1503	1240	780

Πίνακας 4.8 E\* - K161.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		8104	7525	7011	5968	5427	4350
15		7993	6488	6020	4942	4408	3316
20		5994	5172	4407	3436	3053	2198
25		4806	4666	4038	3081	2541	1771
30		3359	3203	2608	1892	1579	1113
37		2374	1724	1471	1050	953	649

Πίνακας 4.9 E\* - K147.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		10597	9211	8627	7109	6152	4533
15		8636	7612	7015	5644	5056	3606
20		7705	5993	5276	4117	3651	2496
25		6225	4673	3893	2918	2535	1705
30		3638	3341	2787	1978	1606	1084
37		2738	1896	1543	1069	956	620

Πίνακας 4.10 E\* - K151.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)		Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
		25	10	5	1	0,5	0,1
10		7229	6724	6131	5517	5164	4156
15		6410	6571	6050	5292	4818	3715
20		5435	5008	4517	3886	3508	2572
25		4966	3870	3626	2988	2592	1973
30		3846	3313	2875	2387	1924	1362
37		2813	2106	1963	1529	1235	865

Πίνακας 4.11 E\* - K110.0-RL

Συχνότητα (Hz) Θερμοκρασία (°C)	Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E*(MPa)					
	25	10	5	1	0,5	0,1
10	12081	12465	10912	9089	8009	5848
15	10719	9592	8973	7009	6064	4157
20	7375	5984	5203	3741	3172	2146
25	5552	4043	3448	2483	2091	1390
30	3622	2624	2192	1561	1252	903
37	1772	1173	996	701	534	361

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί η επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων του εργαστηριακού πειράματος, με σκοπό την ανάπτυξη του αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς.

## 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 5.1. Αναγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας $E^*$ στη συχνότητα καταγραφής του FWD

Η χρονική διάρκεια του φορτίου του συστήματος FWD μπορεί να εκφραστεί ως εξής για ένα σύνολο φορτίσεων (CROW, 1998):

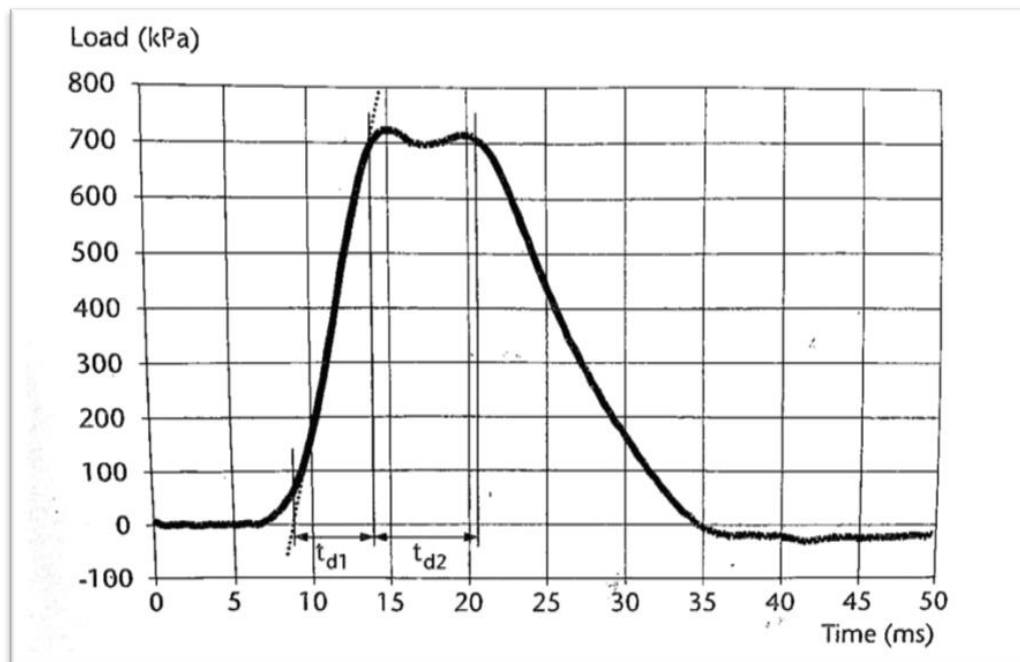
$$t_b = \frac{1}{2\pi f} \quad (5.1)$$

Όπου:

$t_b$  = η χρονική διάρκεια του φορτίου για ένα σύνολο φορτίσεων (sec)

$f$  = η συχνότητα (Hz)

Τα ατελή ημιτονοειδή παλμικά φορτία μπορούν να προσεγγιστούν από τραπεζοειδή παλμικά σχήματα, από το σύνολο του χρόνου της παλμικής διάρκειας που μπορεί να προκύψει. Κυρίως πρέπει να ληφθεί υπόψη η άνοδος του παλμικού φορτίου. Η εικόνα 5.1 δείχνει ένα τέτοιο τραπεζοειδές σχήμα. Η συνολική χρονική διάρκεια του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από τη διάρκεια του φορτίου του ανοδικού τμήματος ( $t_{d1}$ ) και τη διάρκεια του φορτίου στο άνω μέρος ( $t_{d2}$ ). Οι χρονικές αυτές διάρκειες υπολογίζονται με τη βοήθεια των σχέσεων 5.2 έως 5.4.



Εικόνα 5.1 Χρονική διάρκεια παλμικής φόρτισης με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

$$t_{b1} = \frac{2t_{d1}}{\pi} \quad (5.2)$$

$$t_{b2} = t_{d2} \quad (5.3)$$

$$t_b = t_{b1} + t_{b2} \quad (5.4)$$

Το σύνολο του χρόνου της παλμικής διάρκειας που λαμβάνεται, μπορεί να μετατραπεί σε ισοδύναμη συχνότητα για ένα αρμονικό φορτίο χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση 5.1. Λαμβάνοντας υπόψη τις χρονικές διάρκειες φόρτισης από τη δοκιμή με το σύστημα FWD που διεξήχθη για την εν λόγω έρευνα, προέκυψε συχνότητα καταγραφής 20 Hz.

Για την ανάπτυξη και αξιοποίηση του αλγορίθμου στην αναγωγή του ανάστροφα υπολογισμένου μέτρου δυσκαμψίας στη θερμοκρασία αναφοράς, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της τιμής του  $E^*$  που αντιστοιχεί στις επιτόπου συνθήκες μέτρησης, και συγκεκριμένα στη συχνότητα φόρτισης του FWD, 20 Hz. Ωστόσο, το  $E^*$  δεν έχει προσδιοριστεί εργαστηριακά για αυτή τη συχνότητα.

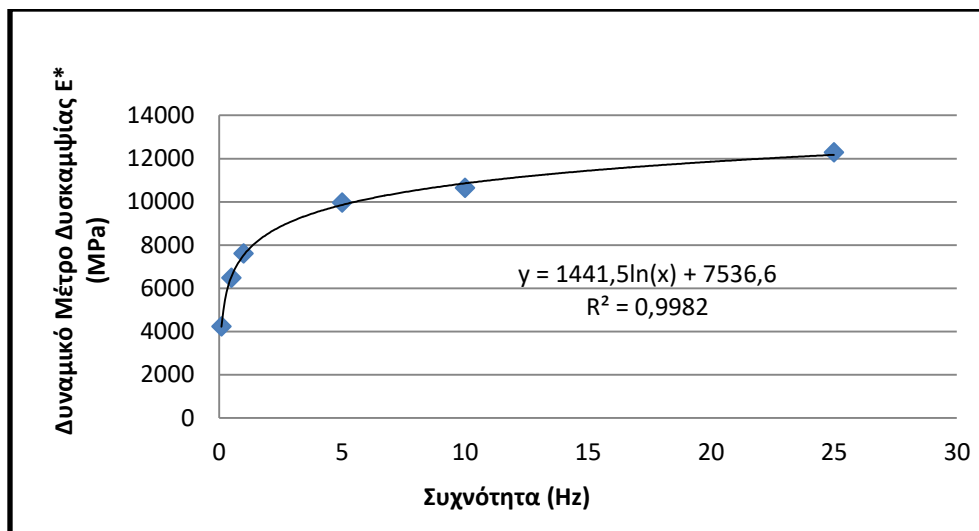
Για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στη συχνότητα των 20 Hz, δημιουργήθηκε για κάθε πυρήνα διάγραμμα Δυναμικού Μέτρου Δυσκαμψίας (MPa) – Συχνότητας (Hz) για τις 6 διαφορετικές θερμοκρασίες. Η μορφή της σχέσης μεταξύ του  $E^*$  και της συχνότητας είναι άλλοτε λογαριθμική και άλλοτε εκθετική. Η επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης βασίζεται στην τιμή του συντελεστή  $R^2$ . Σε κάθε περίπτωση, από την εκάστοτε εξίσωση, υπολογίζεται το ζητούμενο μέτρο δυσκαμψίας για τη συχνότητα των 20 Hz.

Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ , είναι ένας αριθμός που δείχνει το ποσοστό της διακύμανσης στην εξαρτημένη μεταβλητή, που είναι προβλέψιμη, από την ανεξάρτητη μεταβλητή. Είναι ένα στατιστικό στοιχείο που παρέχει ένα μέτρο του πόσο καλά αναπαράγεται το μοντέλο, με βάση την αναλογία της συνολικής διακύμανσης των αποτελεσμάτων που εξηγείται από αυτό.

Το  $R^2$  κυμαίνεται από 0 έως 1: 0 υποδεικνύει ότι το μοντέλο δεν εξηγεί καμία από τη μεταβλητότητα των δεδομένων απόκρισης γύρω από το μέσον της και 1 υποδεικνύει ότι το μοντέλο εξηγεί όλη τη μεταβλητότητα των δεδομένων απόκρισης γύρω από την μέση τιμή, δηλαδή εξηγεί όλες τις διακυμάνσεις.

Σε γενικές γραμμές, όσο το  $R^2$  προσεγγίζει τη μονάδα, τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο και ταιριάζει στα δεδομένα.

Στην εικόνα 5.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα Δυναμικού Μέτρου Δυσκαμψίας  $E^*$  (MPa) – Συχνότητας (Hz) για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 10°C. Τα διαγράμματα για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες του πυρήνα αυτού, καθώς και των υπολοίπων πυρήνων παρουσιάζονται στο Παράρτημα (εικόνες 1-41).



Εικόνα 5.2 Διάγραμμα διασποράς  $E^* - f$  για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν οι τιμές του  $E^*$  κάθε πυρήνα για τις 6 διαφορετικές θερμοκρασίες στη συχνότητα των 20 Hz, οι οποίες παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 έως 5.7:

Πίνακας 5.1  $E^*$  του πυρήνα A147.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz

Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας $E^*$ (MPa)	
Θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )	Συχνότητα (20 Hz)
10	11855
15	9095
20	7238
25	4221
30	2813
37	1361



*Πίνακας 5.2 E\* του πυρήνα K100.5-LEA για τη συχνότητα των 20 Hz*

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E* (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	13836
<b>15</b>	13583
<b>20</b>	10111
<b>25</b>	8017
<b>30</b>	5501
<b>37</b>	3185

*Πίνακας 5.3 E\* του πυρήνα K94.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz*

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E* (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	10188
<b>15</b>	9197
<b>20</b>	8033
<b>25</b>	6531
<b>30</b>	5420
<b>37</b>	3164

*Πίνακας 5.4 E\* του πυρήνα K161.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz*

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας E* (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	7972
<b>15</b>	7521
<b>20</b>	5788
<b>25</b>	4841
<b>30</b>	3451
<b>37</b>	2105

Πίνακας 5.5  $E^*$  του πυρήνα K147.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας <math>E^*</math> (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	10170
<b>15</b>	8321
<b>20</b>	7132
<b>25</b>	5624
<b>30</b>	3723
<b>37</b>	2366

Πίνακας 5.6  $E^*$  του πυρήνα K151.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας <math>E^*</math> (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	7062
<b>15</b>	6670
<b>20</b>	5326
<b>25</b>	4586
<b>30</b>	3635
<b>37</b>	2605

Πίνακας 5.7  $E^*$  του πυρήνα K110.0-RL για τη συχνότητα των 20 Hz

<b>Δυναμικό Μέτρο Δυσκαμψίας <math>E^*</math> (MPa)</b>	
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Συχνότητα (20 Hz)</b>
<b>10</b>	12552
<b>15</b>	10496
<b>20</b>	7057
<b>25</b>	4998
<b>30</b>	3219
<b>37</b>	1531

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν, παρατηρείται ότι για τη συχνότητα των 20 Hz, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C συνεπάγεται μείωση της δυσκαμψίας που κυμαίνεται, κατά μέσο όρο, σε ένα εύρος της τάξης των 1000-2000 MPa περίπου. Το στοιχείο αυτό αποτελεί και μία ενδεικτική ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

## 5.2. Ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας ασφατομίγματος σε θερμοκρασία αναφοράς

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα, έγινε στατιστική προσαρμογή για την εύρεση κατάλληλου αλγόριθμου, ο οποίος συνδέει το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατομίγματος στη θερμοκρασία μέτρησης με το μέτρο δυσκαμψίας στη θερμοκρασία αναφοράς των 20°C. Ο πίνακας 5.8 παρουσιάζει όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αλγορίθμου.

Πίνακας 5.8 E\* για τη συχνότητα των 20 Hz όλων των πυρήνων

E* (20Hz) (MPa)	Θερμοκρασία (°C)					
	10	15	25	30	37	20
<b>A147.0-RL</b>	11855	9095	4221	2813	1361	<b>7238</b>
<b>K100.5-LEA</b>	13836	13583	8017	5501	3185	<b>10111</b>
<b>K94.0-RL</b>	10188	9197	6531	5420	3164	<b>8033</b>
<b>K161.0-RL</b>	7972	7521	4842	3451	2105	<b>5788</b>
<b>K147.0-RL</b>	10170	8321	5624	3724	2366	<b>7132</b>
<b>K151.0-RL</b>	7062	6670	4586	3635	2605	<b>5326</b>
<b>K110.0-RL</b>	12552	10496	4998	3219	1531	<b>7057</b>

Αρχικά, διερευνήθηκε η δυνατότητα έκφρασης του αλγορίθμου μέσω του μοντέλου της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ωστόσο διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος μπορούσε να εκφραστεί αποκλειστικά με μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης. Έτσι λοιπόν, η μαθηματική έκφραση του νέου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία δίνεται από τη σχέση 5.5:

$$\frac{E^*}{E^*_{20^{\circ}\text{C}}} = e^{(-1.65316 \cdot \log(\frac{T}{T_{\text{ref}}}))} \quad (5.5)$$

Όπου:

E\* = μέτρο δυσκαμψίας ασφατομίγματος που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία της δοκιμής (MPa)

E\*<sub>20°C</sub> = μέτρο δυσκαμψίας ασφατομίγματος στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C (MPa)

T = θερμοκρασία του ασφατομίγματος η οποία μετριέται κατά τη δοκιμή (°C)

T<sub>ref</sub> = θερμοκρασία αναφοράς 20°C

Η επιλογή της υπόψη μαθηματικής έκφρασης του αλγορίθμου καθώς και οι τιμές των συντελεστών των ανεξάρτητων μεταβλητών βασίστηκε στις τιμές του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE: Sum Square Error) και του τυπικού σφάλματος ( $s$ : standard error of the estimate), όπως αυτές προέκυψαν από τις σχέσεις 5.6 και 5.7, αντίστοιχα.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.6)$$

Όπου  $y_i$  οι πραγματικές τιμές και  $\hat{y}_i$  οι εκτιμώμενες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας.

$$s = \sqrt{\frac{1}{v-2} * \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{SSE}{v-2}} \quad (5.7)$$

Όπου  $v = 35$ , όσες οι τιμές δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των επτά πυρήνων για 5 διαφορετικές θερμοκρασίες (10, 15, 25, 30, 37 °C).

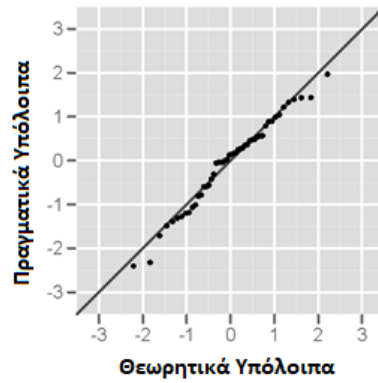
Το SSE εκφράζει τη μεταβλητότητα που δεν εξηγείται από το μοντέλο, ενώ το  $s$  τη μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης τιμής. Όσο μικρότερες είναι οι τιμές των δύο αυτών δεικτών τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του μοντέλου.

Ειδικά στην περίπτωση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, προέκυψαν οι τιμές:  $SSE = 1.7508$  και  $s = 0,226923$ , οι οποίες ήταν οι χαμηλότερες μεταξύ των υπολοίπων μοντέλων που αξιολογήθηκαν. Ωστόσο, οι παραπάνω έλεγχοι δεν εγγυώνται την καταλληλότητα του αλγορίθμου και ως εκ τούτου πραγματοποιούνται περαιτέρω έλεγχοι για την αξιολόγηση του ακολούθως.

### 5.3. Αξιολόγηση του νέου αλγορίθμου

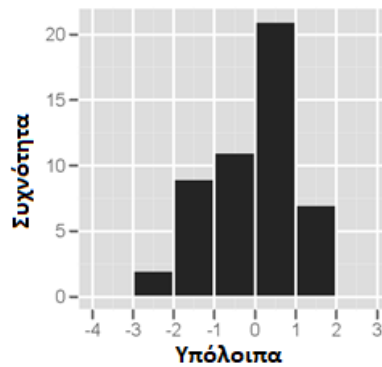
Ο έλεγχος για την αξιολόγηση του αλγορίθμου προκύπτει μέσα από μια σειρά στατιστικών ελέγχων. Έτσι, λοιπόν, διερευνήθηκε, η κανονικότητα της κατανομής, καθώς και η τυχαιότητα των σφαλμάτων για διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Στην κανονικότητα της κατανομής τα ταξινομημένα δεδομένα θέλουμε να απεικονίζονται κοντά σε μια ευθεία γραμμή, εάν αντιπροσωπεύουν μια περίπου κανονική κατανομή. Αποκλίσεις από την ευθεία δείχνουν αποκλίσεις από την κανονικότητα. Στις εικόνες 5.3 και 5.4 εμφανίζεται η έννοια της κανονικότητας με τη χρήση διαγράμματος και ιστογράμματος.



Εικόνα 5.3 Κανονική κατανομή υπολοίπων

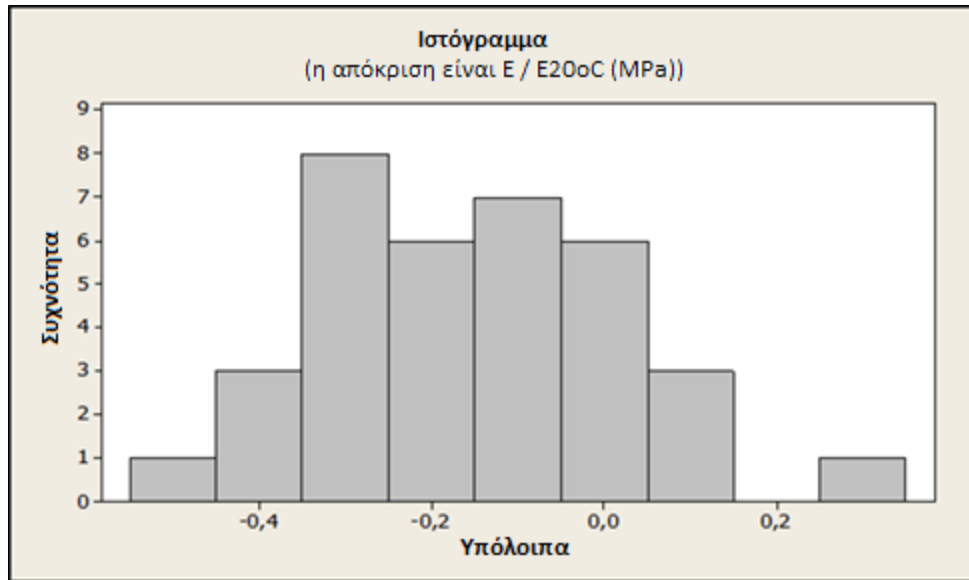
Σύμφωνα με την εικόνα 5.3 τα δεδομένα στο διάγραμμα πραγματικών και θεωρητικών υπολοίπων ακολουθούν την ευθεία γραμμή, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις.



Εικόνα 5.4 Ιστόγραμμα ενός δείγματος από μια κανονική κατανομή

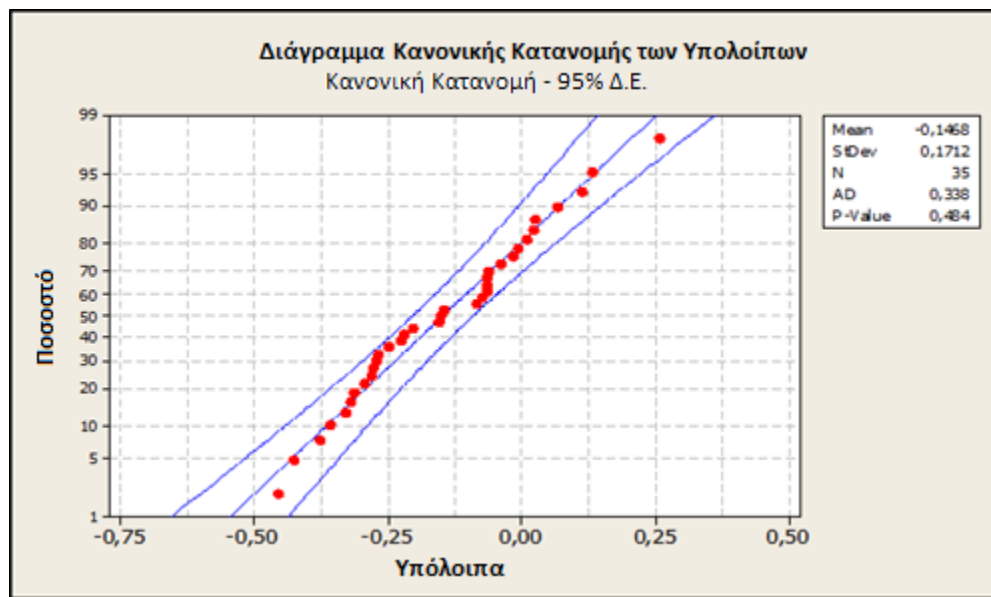
Σύμφωνα με την εικόνα 5.4 το δείγμα φαίνεται να είναι συμμετρικό και μονότροπο, ενώ παράλληλα προσεγγίζει την ημιτονοειδή μορφή.

Με βάση αυτές τις πληροφορίες μπορούμε να αξιολογήσουμε τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν για τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε.



Εικόνα 5.5 Ιστόγραμμα του δείγματος

Σύμφωνα με την εικόνα 5.5, το δείγμα φαίνεται να προσεγγίζει την ημιτονοειδή μορφή της κανονικής κατανομής, αν και μια τιμή λείπει. Γι αυτό το λόγο θα ελέγξουμε και τη μορφή του διαγράμματος της κανονικής κατανομής των υπολοίπων (εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6 Έλεγχος κανονικής κατανομής για διάστημα εμπιστοσύνης 95%

Διαπιστώνεται, ότι όλες οι τιμές των υπολοίπων είναι εντός των επιτρεπτών ορίων της κατανομής για διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Επιπλέον, σύμφωνα με την εικόνα 5.7 τα υπόλοιπα εμφανίζουν τυχαία κατανομή γύρω από το μηδέν.



Εικόνα 5.7 Διάγραμμα Τυχειότητας των Υπολοίπων

Επομένως θεωρείται ότι δεν παραβιάζεται η αρχή της κανονικότητας και της τυχειότητας των σφαλμάτων, και ως εκ τούτου ο αλγόριθμος κρίνεται αποδεκτός.

#### 5.4. Εφαρμογή του νέου αλγορίθμου για την αναγωγή του επί τύπου μέτρου δυσκαμψίας

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, που υπολογίστηκε από τη δοκιμή FWD, στη θερμοκρασία αναφοράς (20°C). Επιπλέον αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας διεξήχθη και με την αξιοποίηση τριών υφιστάμενων αλγορίθμων.

Οι τρεις υφιστάμενοι αλγόριθμοι που επιλέχθηκαν για το σκοπό αυτό, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από πολλούς μελετητές, και δίνουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα:

i. *Chen et al.*

$$E_{Tr} = \frac{E_T}{(1.8 * T_r + 32)^{2.4462} * (1.8 * T + 32)^{-2.4462}} \quad (5.8)$$

ii. *Ullidtz*

$$\frac{E_{T0}}{E_T} = \frac{1}{3,177 - 1,673 * (\log T)} \quad (5.9)$$

iii. *ELMOD*

$$E = e^{(-0.04663 * (t - t_{ref})) * E_{ref}} \quad (5.10)$$

Η επιλογή των τριών αυτών αλγορίθμων έγινε με βάση τις παραμέτρους, από τις οποίες εξαρτάται ο καθένας από αυτούς. Καταρχάς ο κάθε αλγόριθμος, είναι σημαντικό να βασίζεται μόνο στις παραμέτρους των θερμοκρασιών και των μέτρων δυσκαμψίας και όχι σε συντελεστές ή ιδιότητες του ασφαλτομίγματος. Επιπλέον, στην παρούσα έρευνα, γίνεται αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία των 20°C. Επομένως οι αλγόριθμοι οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να βασίζονται είτε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία είτε σε οποιαδήποτε θερμοκρασία θα καθοριστεί από το μελετητή. Τέλος, για την επιλογή του αλγορίθμου, πολύ βασικό ρόλο διαδραματίζει και το βάθος, το οποίο επιλέχθηκε για να γίνει η μέτρηση της θερμοκρασίας τόσο κατά τη δοκιμή με το FWD, όσο και κατά την εργαστηριακή δοκιμή, που στην παρούσα έρευνα ήταν κατά προσέγγιση στο μέσον των ασφαλτικών στρώσεων. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι για να μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος, πρέπει να μη βασίζεται σε μέτρα δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων, τα οποία έχουν προκύψει κατόπιν μέτρησης της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα βάθη, αλλά να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης σε οποιοδήποτε σημείο των ασφαλτικών στρώσεων.

Στη συνέχεια μέσω του δείκτη RMSPE (Root Mean Square Percentage Error - ρίζα του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος), διερευνώνται οι αποκλίσεις μεταξύ του νέου και των υφισταμένων αλγορίθμων με σκοπό την αξιολόγησή τους. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του RMSPE, τόσο πιο μικρές είναι οι αποκλίσεις. Ο δείκτης RMSPE προσδιορίζεται από την εξίσωση 5.11:



$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(100 * \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right)^2} \quad (5.11)$$

Όπου:

$y_i$  και  $\hat{y}_i$  = οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας οι οποίες προέκυψαν από την επιτόπου δοκιμή με το σύστημα FWD, κατόπιν αναγωγής τους σε θερμοκρασία αναφοράς μέσω του νέου αλγόριθμου και των τριών υφισταμένων αντίστοιχα.

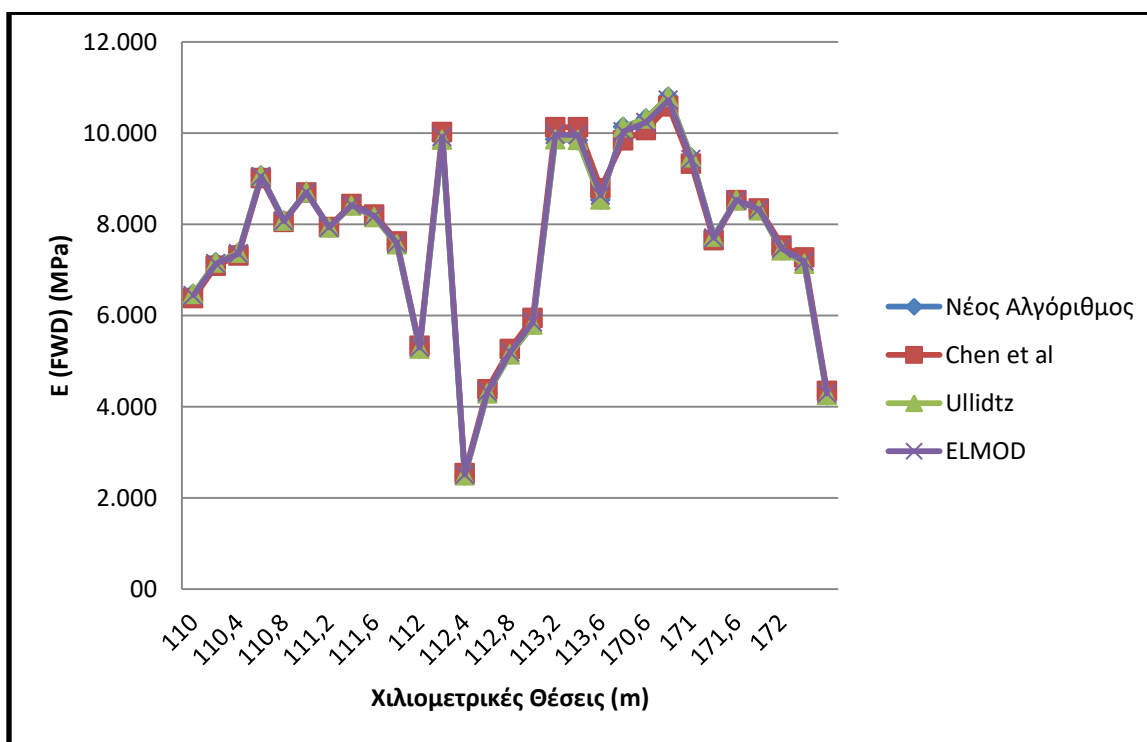
Ο πίνακας 5.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα αναγωγής των μέτρων δυσκαμψίας που προέκυψαν από τη δοκιμή με FWD σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C, με χρήση των τριών υφιστάμενων αλγορίθμων, αλλά και του νέου που αναπτύχθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 5.9 Τιμές μέτρων δυσκαμψίας αναγόμενοι στη θερμοκρασία αναφοράς (20°C)

Χιλιομετρικές Θέσεις (m)	$E_{\text{FWD}}$ (MPa)	Θερμοκρασία (°C)	Chen et al. (MPa)	Ullidtz (MPa)	ELMOD (MPa)	Νέος Αλγόριθμος (MPa)
110	6592	19.5	6378	6469	6438	6472
110,2	7257	19.6	7092	7161	7138	7164
110,4	7464	19.7	7313	7376	7355	7380
110,6	9130	19.8	9014	9061	9046	9065
110,8	8116	19.9	8053	8078	8071	8081
111	8720	19.9	8696	8703	8703	8707
111,2	7921	20.1	7939	7928	7934	7931
111,4	8363	20.2	8445	8406	8422	8408
111,6	8092	20.2	8212	8156	8178	8158
111,8	7476	20.3	7625	7556	7583	7558
112	5204	20.4	5334	5275	5298	5275
112,2	9643	20.6	10021	9850	9916	9849
112,4	2434	20.7	2540	2493	2511	2492
112,6	4175	20.8	4385	4290	4327	4289
112,8	5003	20.8	5266	5148	5193	5146
113	5625	20.9	5945	5801	5856	5798
113,2	9541	20.9	10127	9864	9965	9858
113,4	9504	21.0	10129	9848	9956	9842
113,6	8230	21.0	8790	8538	8635	8532
170,4	10523	19.0	9836	10130	10030	10132
170,6	10649	19.1	10067	10317	10232	10319
170,8	11070	19.3	10583	10791	10720	10795
171	9651	19.5	9330	9467	9420	9471

Χιλιομετρικές Θέσεις (m)	$E_{FWD}$ (MPa)	Θερμοκρασία (°C)	Chen et al. (MPa)	Ullidtz (MPa)	ELMOD (MPa)	Νέος Αλγόριθμος (MPa)
171,2	7829	19.7	7653	7727	7703	7731
171,6	8534	20.1	8528	8528	8530	8531
171,8	8260	20.2	8346	8305	8322	8307
172	7295	20.5	7534	7426	7467	7426
172,2	6966	20.7	7272	7134	7187	7132
172,3	4140	20.8	4345	4253	4288	4251

Στην εικόνα 5.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των αλγορίθμων στη θερμοκρασία αναφοράς:



Εικόνα 5.8 Διάγραμμα μέτρων δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος κατόπιν αναγωγής τους σε θερμοκρασία αναφοράς μέσω των τεσσάρων αλγορίθμων

Παρατηρούμε, ότι υπάρχει μεγάλη σύγκλιση ανάμεσα στις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας. Η υπόψη παρατήρηση, επιβεβαιώνεται από τις τιμές του δείκτη RMSPE, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10, και είναι αρκετά χαμηλές (<<10%).

*Πίνακας 5.10 RMSPE για το νέο αλγόριθμο σε σχέση με τους τρεις υφιστάμενους*

	<b>RMSPE</b>
<b>Chen et al. (MPa)</b>	<b>1.75</b>
<b>Ullidtz (MPa)</b>	<b>0.04</b>
<b>ELMOD (MPa)</b>	<b>0.67</b>

Η σύγκλιση των τιμών που δίνει ο νέος αλγόριθμος με αυτές των διεθνών αλγορίθμων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση λογισμικών ανάστροφου υπολογισμού που περιέχουν τους υπόψη αλγόριθμους για την αναγωγή των μέτρων δυσκαμψίας στην θερμοκρασία αναφοράς 20°C, μπορεί να γίνει με ασφάλεια ως προς το αποτέλεσμα για τις ελληνικές συνθήκες.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη αλγορίθμου για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας οδοστρωμάτων σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C. Αφορμή για την έρευνα αυτή ήταν η ανάγκη για αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, μέσω εκτίμησης της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων, σε μια σταθερή θερμοκρασία αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων. Η βασική διαφοροποίηση ως προς άλλες διεθνείς έρευνες έγκειται στη χρησιμοποίηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E^*$ , το οποίο περιγράφει πληρέστερα την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία παρουσιάζονται ακολούθως:

- ❖ Η σχέση του  $E^*$  (MPa) και της συχνότητας (Hz) περιγράφεται από εξίσωση είτε λογαριθμικής είτε εκθετικής μορφής, παρουσιάζοντας πολύ μικρές διαφορές ως προς τον συντελεστή  $R^2$ . Σε κάθε περίπτωση, η σχέση των δύο αυτών παραμέτρων δεν είναι ανάλογη.
- ❖ Στη συχνότητα των 20 Hz, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C συνεπάγεται μείωση της δυσκαμψίας που κυμαίνεται, κατά μέσο όρο, σε ένα εύρος της τάξης των 1000-2000 MPa περίπου, στοιχείο που αποτελεί και μία ενδεικτική ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.
- ❖ Ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε κατόπιν στατιστικής προσαρμογής των πειραματικών δεδομένων για την αναγωγή του μέτρου δυσκαμψίας στους 20°C, περιγράφεται μαθηματικά από εξίσωση εκθετικής μορφής, με το μέτρο δυσκαμψίας ( $E$ ) και τη θερμοκρασία ( $T$ ) να αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές.
- ❖ Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν έχουμε μια καλή περιγραφή της σχέσης του αλγορίθμου, γίνεται χρήση του αθροίσματος τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE), καθώς και του τυπικού σφάλματος της εκτίμησης ( $s$ ). Όσο μικρότερες είναι οι τιμές, τόσο πιο ακριβής είναι η τοποθέτηση του μοντέλου, γεγονός που επαληθεύεται.
- ❖ Η αξιολόγηση του υπόψη αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκε από μια σειρά στατιστικών ελέγχων, στους οποίους περιλαμβάνονται η κανονικότητα για διάστημα εμπιστοσύνης 95%, καθώς και η τυχαιότητα των σφαλμάτων. Προέκυψε τελικώς, ότι δεν παραβιάζεται η υπόθεση της κανονικότητας και της τυχαιότητας των σφαλμάτων.
- ❖ Από το συγκριτικό διάγραμμα των τιμών του ανηγμένου μέτρου δυσκαμψίας στους 20°C, που προέκυψαν κατόπιν εφαρμογής τόσο του νέου όσο και των υφισταμένων αλγορίθμων, δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις. Για την ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης RMSPE. Οι τιμές του υπόψη δείκτη είναι αρκετά χαμηλές (<<10%), γεγονός που υποδεικνύει τη σύγκλιση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τους αλγορίθμους.
- ❖ Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε με βάση το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, λαμβάνοντας υπόψη τις ελληνικές συνθήκες, κρίνεται ότι δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, φαίνεται ότι τα υπόψη αποτελέσματα συγκλίνουν με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από διεθνείς αλγορίθμους, οι οποίοι διερευνήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Το

στοιχείο αυτό πιστοποιεί κατά κάποιο τρόπο, τη χρήση λογισμικών/εργαλείων ανάλυσης, που ενδεχομένως εμπεριέχουν στον κώδικά τους, τους υπόψη αλγόριθμους για τον ανάστροφο υπολογισμό των μέτρων δυσκαμψίας οδοστρωμάτων και στις ελληνικές συνθήκες.

Λόγω της σημαντικής επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, ως περαιτέρω έρευνα προτείνεται η διεξαγωγή της δοκιμής με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD, να γίνει σε διαφορετικές εποχές του χρόνου, ώστε να μελετηθεί η εποχιακή διακύμανση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Επίσης, προτείνεται, η διεξαγωγή της δοκιμής FWD, σε άλλους τύπους ασφαλτομιγμάτων οδοστρώματος, καθώς και σε διαφορετικούς κυκλοφοριακούς φόρτους και χρόνους λειτουργίας οδοστρώματος. Κάτι τέτοιο, θα είχε σαν αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων και τελικά τη βαθμονόμηση των συντελεστών του αλγόριθμου που αναπτύχθηκε.

## 7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

**Ευαγγελίδης Δ., Κρακαϊδού Ι. και Καραδήμος Κ. (2004):** «Οδηγίες Συντήρησης Αυτοκινητοδρόμων, Κύρια Συντήρηση Οδοστρωμάτων, Μέρος 1<sup>ο</sup> : Χαρακτηριστικά της Λειτουργικής και Δομικής Κατάστασης των Οδοστρωμάτων», Αθήνα.

**Κόλιας Σ., Μαχαίρας Ε. και Κατσάκου Μ. (2005):** «Επίδραση της Θερμοκρασίας του Δοκιμίου στα Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ανακυκλωμένων με Τσιμέντο Μιγμάτων Θραυστού Αμμοχάλικου και Φρεζαρισμένου Ασφαλτομίγματος», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.

**Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2016):** Σημειώσεις για το μάθημα «Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2017):** Σημειώσεις για το μάθημα «Οδοστρώματα», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**Λοΐζος Α. και Πλατή Χ. (2016):** Σημειώσεις για το μάθημα «Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων», Τεύχος Β' Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**American Association of State Highway and Transportation (AASHTO) Officials Executive Committee (2008):** Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A manual of Practice.

**AASHTO T342-11 (2011):** Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

**Ali H. A. and Lopez A. (1996):** Statistical Analyses of Temperature and Moisture Effects on Pavement Structural Properties Based on Seasonal Monitoring Data, Transportation Research Board 1540, National Research Council, Washington, D. C., pp. 48-55.

**Appea A., Flintsch G. W. and Al-Qadi I. L. (2002):** Backcalculation Validation Through Field Instrumentation, Proceeding of Pavement Evaluation Conference, 2002, Roanoke, Virginia, USA.

**ASTM (American Society for Testing and Materials) D4123-82 (1995):** Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003), ASTM International, West Conshohocken, PA.

**Baltzer S. and Jansen J. M. (1994):** Temperature Correction of Asphalt-Moduli for FWD Measurements, Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Minneapolis, Minnesota, USA., pp. 753-768.

**Bonnaure F., Gest G., Gravois A. and Uge P. (1977):** A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, University of Minnesota, Minneapolis, Vol. 46, pp. 64-104.

**Chen D., Bilyeu J., Lin H. H. and Murphy M. (2000):** Temperature Correction on Falling Weight Deflectometer Measurements, Transportation Research Record Board 1716, Washington, D. C., pp. 30-39.

**Clyne T. R., Marasteanu M. O., Li X., Chadbourn B., Engstrom G. and Worel B. (2004):** Determination of HMA Modulus Values for Use in Mechanistic Empirical Pavement Design, Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minnesota, USA.

**CROW (1998):** Deflection Profile - Not a Pitfall Anymore : Survey and Interpretation Methodology Falling Weight Deflection Measurements, Netherlands.

**Dougan C. E., Stephens J. E., Mahoney J. and Hansen G. (2003):** Dynamic Modulus Test Protocol – Problems and Solutions, Report No. CT-SPR-0003084-F-03-3, University of Connecticut, Storrs, CT, USA.

**Dynatest (2001):** Evaluation of Layer Modulus and Overlay Design (ELMOD) – User Manual.

**Dynatest (2006):** ELMOD 4 Training Course Manual

**English Highways Agency (2008):** Data for Pavement Assessment, Design Manual for Roads and Bridges, Volume 7, Section 3, Part 2, No HD 29/08.

**European Standard (2004):** Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness (EN 12697-26), European Committee for Standardization, Brussels.

**Fernando G. E., Liu W. and Ryu D. (2001):** Development of a Procedure for Temperature Correction of Backcalculated AC Modulus, Research Report 1863-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station.

**Flintsch G., Loulizi A., Diefenderfer S., Galal K. and Diefenderfer B. (2007):** Asphalt Materials Characterization in Support of Implementation of the Proposed Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Final contract Report No.: VTRC 07-CR10, Charlottesville, VA: Virginia Transportation Research Council.

**Hakim B. A., Brown S. F. and Armitage R. J. (2002):** Pavement Evaluation and Strengthening Design : Sixteen Years' Experience, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Vol. 1, pp. 1-15, Copenhagen, Denmark.

**Huang Y.H. (1993):** Pavement Analysis and Design, University of Kentucky, 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, ISBN-10: 0131424734.

**Johnson A. M. and Baus R. L. (1992):** Alternative Method for Temperature Correction of Backcalculated Equivalent Pavement Moduli, Transportation Research Board 1355, Washington, D.C., pp. 75-81.

**Jung F. W. (1990):** Interpretation of Deflection Basin for Real-World Materials in Flexible Pavements, Technical Report RR-242, Ministry of Transportation, Research and Development Branch, Ontario, Canada.

**Kim Y. R., Hibbs B. O. and Lee Y. C. (1995):** Temperature Correction of Deflections and Backcalculated Moduli, Transportation Research Board 1473, Washington, D.C., pp. 55-62.

**Loizos A., Papavasiliou V., Plati C. and Tsaimou C. (2015):** Temperature correction of HMA moduli based on in situ pavement data, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference 'Bituminous Mixtures and Pavements', pp. 671-677, Thessaloniki, Greece.

**Lukanen E. (1996):** Temperature Adjustment for Backcalculated Asphalt Moduli, Facsimile Memorandum received from Braun Intertec Corporation.

**Lukanen E. O., Stubstad R. N. and Briggs R. (2000):** Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement, Report No. FHWA-RD-98-085, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA.

**Maher A., Gucunski N. and Bennert T. (2005):** Implementation of Mechanistic Pavement Design: Field and Laboratory Implementation, Final Report – Center for Advanced Infrastructure & Transportation.

**Marshall C., Meier R., and Welch M. (2001):** Seasonal temperature effects on flexible pavements in Tennessee, Transportation Research Board 1764, Washington, DC, pp. 89–96.

**Mohammad L.N., Wu Z., Myers L., Coope, S. and Abadie C. (2005):** A Practical Look at Simple Performance Tests: Louisiana's Experience, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.74, pp. 557-600, Long Beach CA, United States.

**NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) (2004):** Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Project 1-28A, Transportation Research Board of National Academies, Washington, DC.

**Noureldin S., Zhu K., Harris D. A. and Li S. (2005):** Non-Destructive Estimation of Pavement Thickness, Structural Number and Subgrade Resilience along INDOT Highways, Publication HWHA./IN/JTRP/2004-35, West Lafayette, Indiana: Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University.

**Ozel M. R. and Mohajerani A. (2011):** Prediction of Subgrade Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Scientific Research and Essays, pp. 4567-4576.

**Park D.Y., Buch N. and Chatti K. (2001):** Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections, Transportation Research Board 1764, Washington, DC, pp. 97-112.

**Park S.W. and Kim Y. R. (1997):** Temperature Correction of Backcalculated Moduli and Deflections Using Linear Viscoelasticity and Time-Temperature Superposition, Transportation Research Board 1570, Washington, DC, pp. 108-117.



**Plati C., Papavasiliou V, Loizos A. and Tsaimou C. (2014):** Implementation of Algorithms for Asphalt Moduli Temperature Correction, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 439-448, North Carolina, USA.

**Robbins M.M. (2009):** An Investigation into Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt and its Contributing Factors, Thesis, Auburn University, Auburn, Alabama.

**Salem H.M. and Bayomy F.M. (2004):** Prediction of seasonal variation of the asphalt concrete modulus using LTPP data, Transportation Research Board 1896, Washington, DC, pp. 119–128.

**Seed H. B., Chan C. K. and Lee C. E. (1962):** Resilient characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures, Proceedings of an International Conference: Structural Design of Asphaltic Pavements, Ann Arbor, pp. 611-636.

**SHRP (Strategic Research Highway Program - Protocol P07 (2001):** Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA.

**Sri S. (2010):** Laboratory Stiffness Characterization of Foamed Cold Mix Asphalt Using Indirect Tensile Stiffness Modulus Test, Study Program of Master of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University Muhammadiyah Surakarta.

**Sudhir V., Kutay M. E. and Chatti K. (2013):** Data Requirements from Falling Weight Deflectometer Tests for Accurate Backcalculation of Dynamic Modulus Master Curve of Asphalt Pavements, Proceedings of Airfield and Highway Pavement Conference : Sustainable and Efficient Pavements, Los Angeles, California, United States, pp. 445-455.

**Tashman L. and Elangovan M. (2007):** Dynamic Modulus Test - Laboratory Investigation and Future Implementation in the State of Washington, Final Research Report WA-RD 704.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA.

**Ullidtz P. (1987):** Pavement Analysis, Elsevier Inc., ISBN-10: 0444428178, Amsterdam, The Netherlands.

**Van der Poel C.J. (1954):** A General System Describing the Visco-elastic Properties of Bitumen and its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221-236.

**Yoder E.J. and Witczak M.W. (1975):** Principles of Pavement Design, John Wiley and Sons Inc., Second Edition, ISBN: 9780471977803, USA.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1. Διαστάσεις πυρήνων

Πυρήνας	Πάχος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.	Διάμετρος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.
K 88.5 - RL	17,1	17,0	9,552	9,565
	17,1			
	16,9		9,577	
	16,9			
K 89.85 - RL	18,5	18,8	9,562	9,557
	18,9			
	18,8		9,552	
	18,9			
K 94.0 - RL	20,1	20,7	9,539	9,535
	21,0			
	21,0		9,530	
	20,5			
K 100.5 - LEA	16,6	16,7	9,555	9,553
	16,8			
	16,9		9,551	
	16,4			
K 100.58 - RL	24,2	23,6	9,538	9,531
	23,9			
	23,3		9,523	
	23,0			
K 100.6 - RL	25,1	25,1	9,541	9,559
	25,0			
	25,2		9,576	
	25,0			
K 110.0 - RL	20,1	20,2	9,530	9,532
	20,2			
	20,2		9,534	
	20,2			

Πυρήνας	Πάχος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.	Διάμετρος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.
Κ 144.0 - RL	24,9	24,7	9,537	9,556
	24,9			
	24,9		9,575	
	24,2			
Κ 147.0 - RL	17,5	17,7	9,541	9,546
	17,6			
	18,0		9,551	
	17,7			
Κ 151.0 - RL	21,5	21,9	9,550	9,525
	21,6			
	22,5		9,500	
	22,0			
Κ 157.8 - RL	15,1	15,4	9,541	9,540
	15,6			
	15,4		9,538	
	15,4			
Κ 161.0 - RL	17,5	17,4	9,538	9,537
	17,1			
	17,5		9,536	
	17,3			
Α 161.0 - RL	17,3	17,1	9,542	9,540
	17,1			
	17,0		9,538	
	17,1			
Α 159.6 - RL	16,7	16,9	9,549	9,547
	16,9			
	16,8		9,544	
	17,1			
Α 151.0 - RL	23,3	23,2	9,539	9,527
	23,2			
	23,2		9,514	
	23,1			

Πυρήνας	Πάχος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.	Διάμετρος Πυρήνα (cm)	Μ.Ο.
<b>A 147.0 - RL</b>	21,1	21,4	9,552	9,548
	21,6			
	21,4		9,544	
	21,3			
<b>A 145.4 - RL</b>	30,4	30,3	9,556	9,550
	30,4		9,543	
	30,0			
	30,2			
<b>A 112.26 - RL</b>	19,8	19,9	9,556	9,556
	20,0		9,556	
	20,0			
	19,9			
<b>A 104.2,0 - RL - LWP</b>	33,0	33,1	9,557	9,558
	33,4		9,559	
	33,1			
	32,9			
<b>A 104.2,0 - RL - RWP</b>	32,1	32,6	9,558	9,551
	32,8		9,544	
	32,9			
	32,6			
<b>A 94.5 - LEA</b>	24,8	25,1	9,564	9,558
	25,2		9,552	
	25,1			
	25,1			
<b>A 94.0 - RL</b>	23,2	23,9	9,564	9,559
	23,6		9,553	
	24,2			
	24,4			
<b>A 89.2 - RL</b>	19,6	19,7	9,564	9,574
	19,8		9,583	
	19,6			
	19,6			

Πίνακας 2. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα A147.0-RL

Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
A147.0-RL	10	650	25	0,002972	12278
			10	0,006075	10634
			5	0,006428	9960
			1	0,008193	7603
			0,5	0,009605	6476
			0,1	0,014703	4229
	15	500	25	0,003423	8832
			10	0,005698	8704
			5	0,006297	7796
			1	0,008218	5801
			0,5	0,009712	4909
			0,1	0,015721	3021
	20	300	25	0,003464	7605
			10	0,00518	5737
			5	0,005722	5092
			1	0,007971	3583
			0,5	0,009835	2845
			0,1	0,016624	1693
	25	150	25	0,003218	4589
			10	0,004441	3382
			5	0,004992	2822
			1	0,007455	1880
			0,5	0,009507	1476
			0,1	0,016173	948
30	100	25	0,003136	3012	
		10	0,003809	2466	
		5	0,005238	1806	
		1	0,007783	1178	
		0,5	0,00931	990	
		0,1	0,015262	664	
37	50	25	0,002939	1546	
		10	0,004302	1073	
		5	0,004877	874	
		1	0,007183	567	
		0,5	0,010582	477	
		0,1	0,016879	300	

Πίνακας 3. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα K100.5-LEA

Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
K100.5-LEA	10	700	25	0,010812	428
			10	0,00532	13064
			5	0,005714	12102
			1	0,006264	10850
			0,5	0,006773	9875
			0,1	0,008604	7823
	15	600	25	0,002717	14050
			10	0,004597	12964
			5	0,005394	10937
			1	0,006182	9474
			0,5	0,006798	8483
			0,1	0,009293	6225
	20	500	25	0,003292	10562
			10	0,005476	9084
			5	0,005936	8311
			1	0,00766	6264
			0,5	0,009022	5289
			0,1	0,013825	3431
	25	300	25	0,00266	8696
			10	0,004679	6365
			5	0,005041	5791
			1	0,00674	4263
			0,5	0,008259	3455
			0,1	0,012577	2259
	30	200	25	0,008234	2366
			10	0,004359	4574
			5	0,004942	3890
			1	0,007381	2573
			0,5	0,009137	2045
			0,1	0,014071	1417
37	100	25	0,002561	3746	
		10	0,003891	2486	
		5	0,004482	2050	
		1	0,006551	1335	
		0,5	0,008366	1161	
		0,1	0,012856	765	

Πίνακας 4. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα Κ94.0-RL

Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
Κ94.0-RL	10	700	25	0,004794	10723
			10	0,007692	9047
			5	0,007725	8961
			1	0,008308	8070
			0,5	0,009055	7406
			0,1	0,011198	6212
	15	500	25	0,007733	5540
			10	0,005788	8606
			5	0,006042	8168
			1	0,006683	7218
			0,5	0,007331	6528
			0,1	0,009195	5237
	20	350	25	0,007438	4579
			10	0,004663	7415
			5	0,004951	6869
			1	0,005993	5551
			0,5	0,006675	4990
			0,1	0,009326	3533
	25	250	25	0,004515	5104
			10	0,004154	5936
			5	0,004318	5575
			1	0,005426	4299
			0,5	0,006288	3720
			0,1	0,009827	2541
30	200	25	0,009753	2096	
		10	0,004138	4830	
		5	0,005115	3810	
		1	0,006552	2879	
		0,5	0,00775	2422	
		0,1	0,011501	1714	
37	100	25	0,003046	3271	
		10	0,003768	2563	
		5	0,003974	2329	
		1	0,005903	1503	
		0,5	0,007635	1240	
		0,1	0,012823	781	

Πίνακας 5. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα K161.0-RL

Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
K161.0-RL	10	700	25	0,004721	8104
			10	0,009219	7526
			5	0,009892	7011
			1	0,011296	5968
			0,5	0,012306	5427
			0,1	0,015508	4350
	15	500	25	0,00335	7993
			10	0,007651	6488
			5	0,008152	6020
			1	0,009712	4942
			0,5	0,01087	4408
			0,1	0,014219	3316
	20	350	25	0,004458	5994
			10	0,006707	5172
			5	0,007725	4407
			1	0,009745	3436
			0,5	0,010779	3053
			0,1	0,014966	2198
	25	200	25	0,004039	4806
			10	0,004187	4666
			5	0,004778	4038
			1	0,006124	3081
			0,5	0,007487	2541
			0,1	0,01114	1771
	30	150	25	0,004326	3359
			10	0,004581	3203
			5	0,005451	2608
			1	0,007397	1892
			0,5	0,008924	1579
			0,1	0,013677	1113
37	100	25	0,004031	2374	
		10	0,00555	1724	
		5	0,006239	1471	
		1	0,008423	1050	
		0,5	0,010254	954	
		0,1	0,015434	649	



Πίνακας 6. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα K147.0-RL

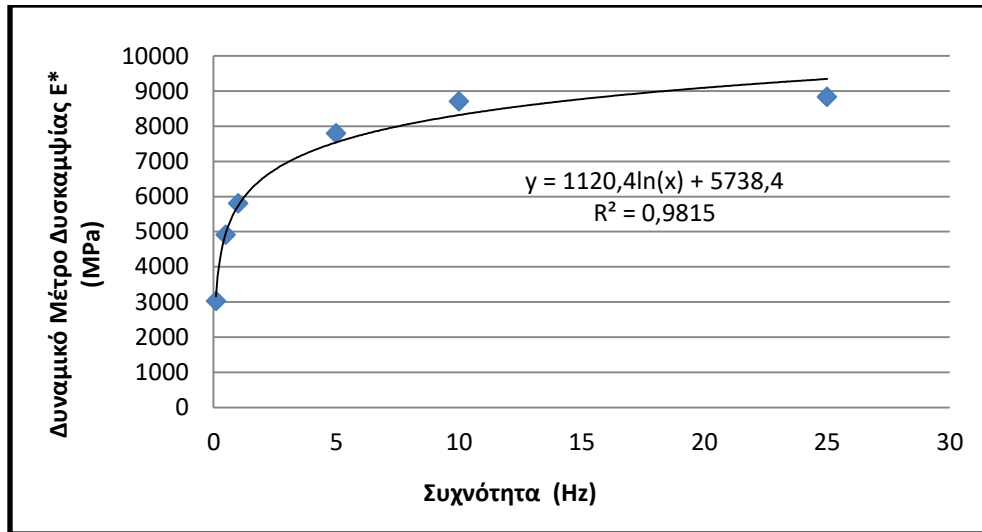
Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
K147.0-RL	10	700	25	0,00399	10597
			10	0,007536	9211
			5	0,008045	8627
			1	0,009548	7109
			0,5	0,010935	6152
			0,1	0,014958	4533
	15	500	25	0,003202	8636
			10	0,006502	7612
			5	0,007003	7015
			1	0,00853	5644
			0,5	0,009482	5056
			0,1	0,013192	3606
	20	400	25	0,003686	7705
			10	0,006609	5993
			5	0,007381	5276
			1	0,009261	4117
			0,5	0,010467	3652
			0,1	0,015311	2496
	25	300	25	0,004146	6225
			10	0,006354	4673
			5	0,007413	3893
			1	0,009638	2918
			0,5	0,011124	2535
			0,1	0,016165	1705
	30	150	25	0,003867	3638
			10	0,004359	3341
			5	0,005156	2787
			1	0,007134	1978
			0,5	0,008776	1606
			0,1	0,013628	1084
37	100	25	0,003522	2738	
		10	0,005082	1896	
		5	0,005952	1543	
		1	0,008276	1069	
		0,5	0,01018	956	
		0,1	0,016	620	

Πίνακας 7. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα K151.0-RL

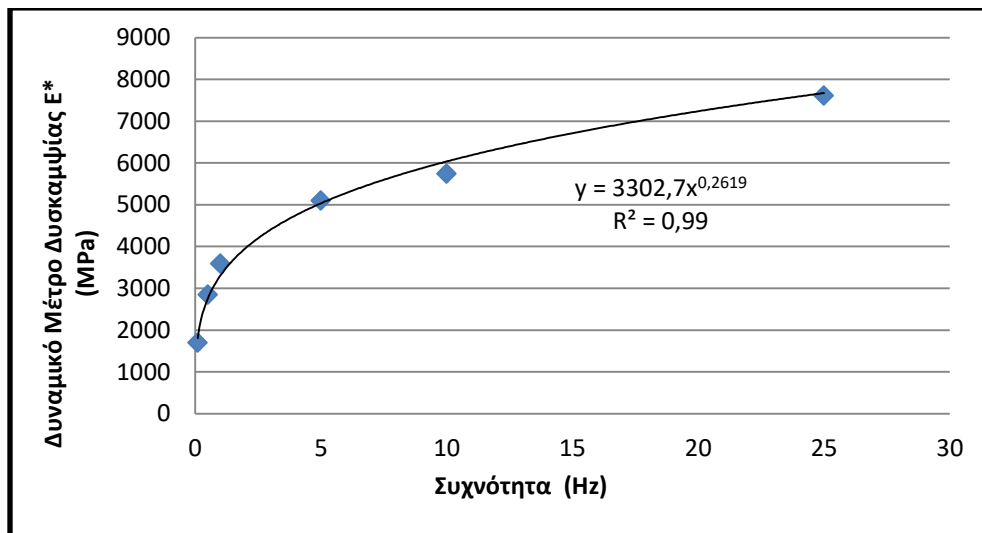
Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
K151.0-RL	10	500	25	0,004105	7229
			10	0,007372	6724
			5	0,007996	6132
			1	0,008858	5517
			0,5	0,009285	5164
			0,1	0,011542	4156
	15	350	25	0,004343	6410
			10	0,00527	6571
			5	0,00564	6050
			1	0,006255	5292
			0,5	0,006781	4818
			0,1	0,008792	3715
	20	300	25	0,00472	5435
			10	0,005977	5008
			5	0,006436	4517
			1	0,007274	3887
			0,5	0,008004	3508
			0,1	0,010829	2572
	25	200	25	0,00399	4966
			10	0,005106	3870
			5	0,005353	3626
			1	0,006403	2988
			0,5	0,007446	2592
			0,1	0,01027	1973
30	150	25	0,003719	3846	
		10	0,004425	3313	
		5	0,005016	2875	
		1	0,005804	2387	
		0,5	0,007265	1924	
		0,1	0,010836	1362	
37	100	25	0,003374	2813	
		10	0,004655	2106	
		5	0,00491	1963	
		1	0,005903	1529	
		0,5	0,007897	1236	
		0,1	0,011477	865	

Πίνακας 8. Πίνακας καταγραφής των αποτελεσμάτων του πυρήνα K110.0-RL

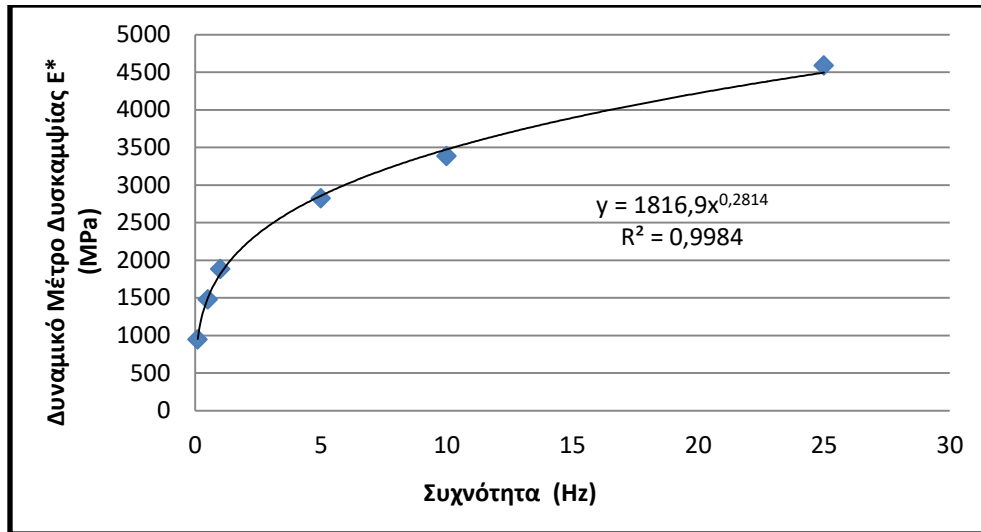
Πυρήνας	Θερμοκρασία (°C)	Επιβαλλόμενο Φορτίο (KPa)	Συχνότητα(Hz)	LVDT Μ.Ο. (mm)	E* (MPa)
K110.0-RL	10	700	25	0,002701	12081
			10	0,005517	12465
			5	0,006338	10913
			1	0,00743	9089
			0,5	0,008448	8009
			0,1	0,011822	5848
	15	500	25	0,002775	10719
			10	0,005156	9592
			5	0,005467	8973
			1	0,006871	7009
			0,5	0,007889	6064
			0,1	0,011436	4157
	20	350	25	0,003637	7375
			10	0,005763	5984
			5	0,006551	5203
			1	0,008899	3741
			0,5	0,010393	3172
			0,1	0,015311	2146
	25	250	25	0,003653	5552
			10	0,0061	4043
			5	0,007003	3448
			1	0,009392	2483
			0,5	0,01119	2091
			0,1	0,017494	1390
	30	150	25	0,003932	3622
			10	0,005681	2624
			5	0,006535	2192
			1	0,008932	1561
			0,5	0,011288	1252
			0,1	0,016534	903
37	50	25	0,002668	1772	
		10	0,003998	1173	
		5	0,004564	996	
		1	0,005607	701	
		0,5	0,009597	534	
		0,1	0,01362	361	



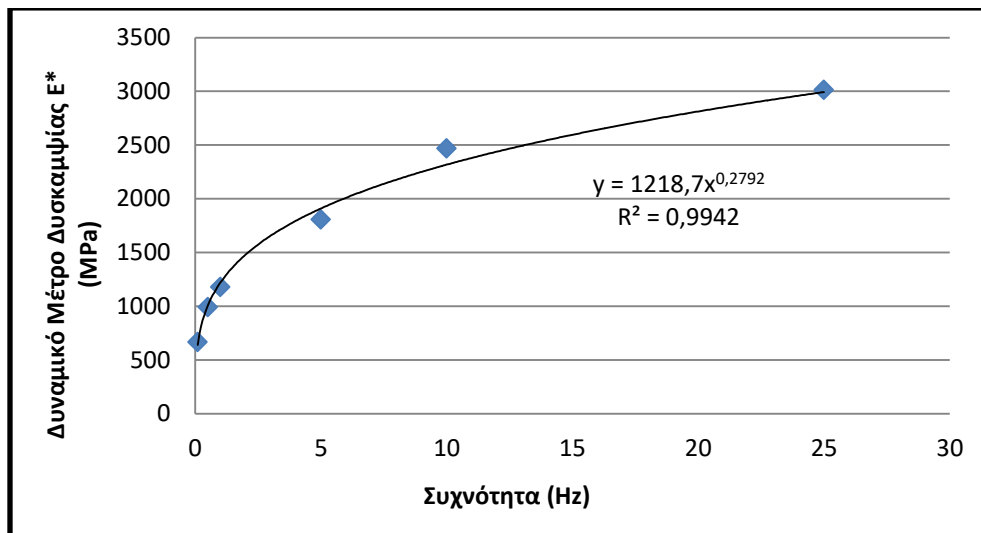
Εικόνα 1 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 15°C.



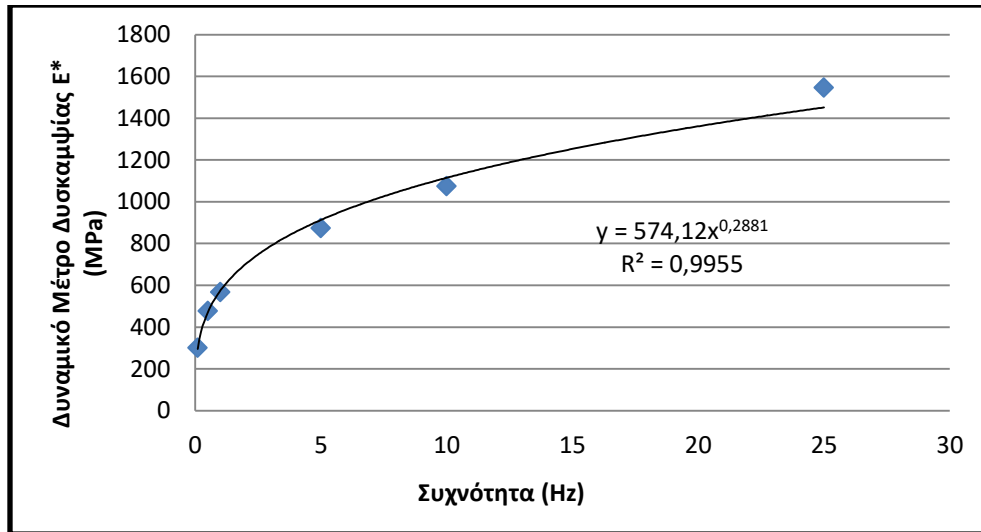
Εικόνα 2 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.



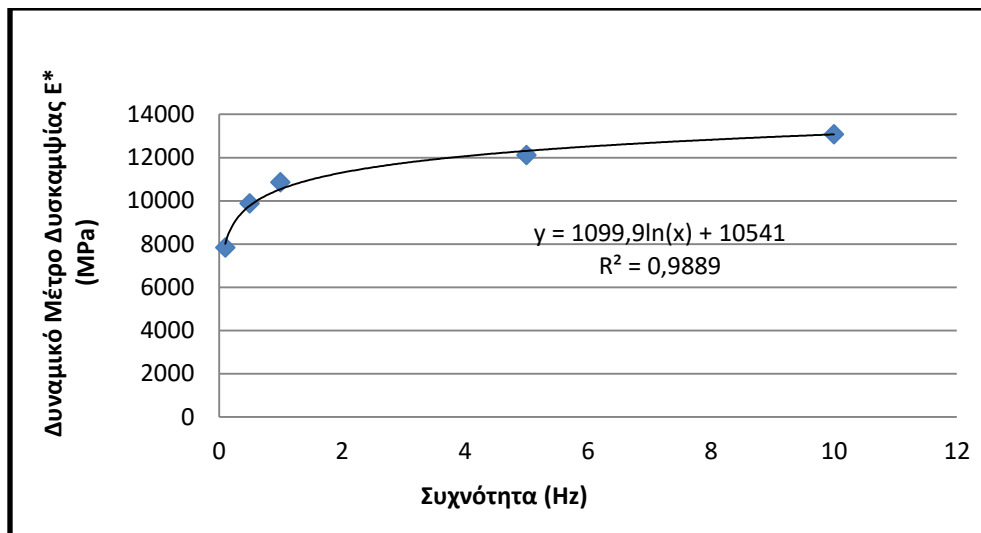
Εικόνα 3 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



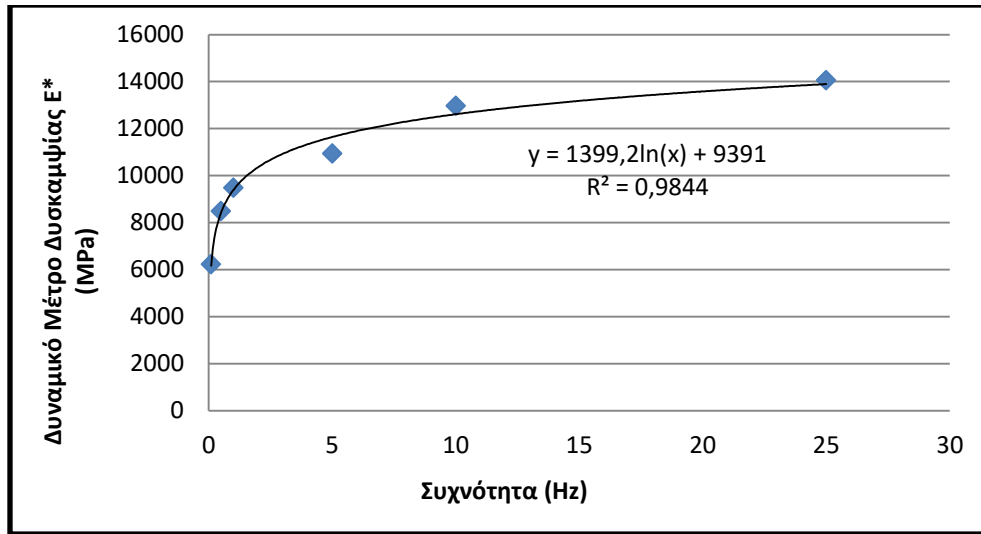
Εικόνα 4 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 30 °C.



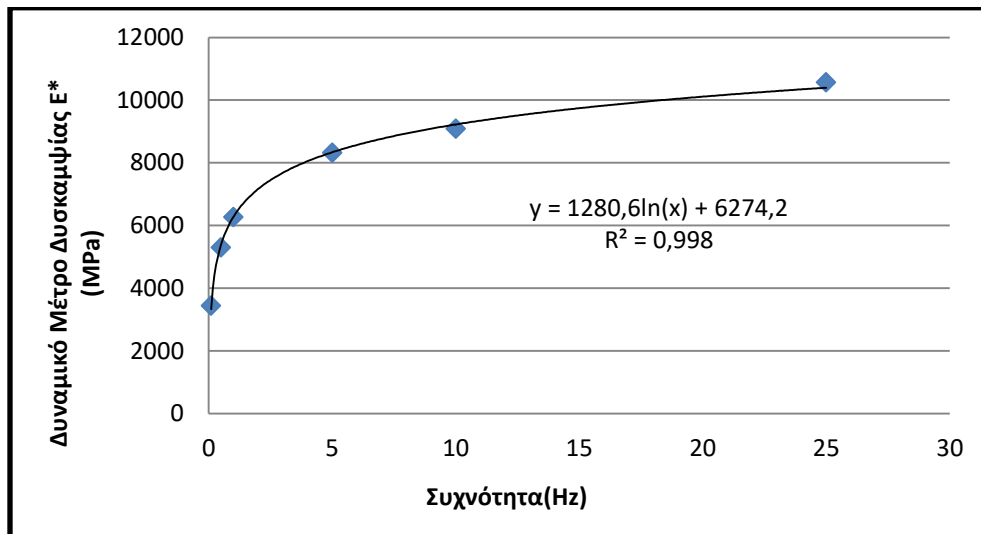
Εικόνα 5 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα A147.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.



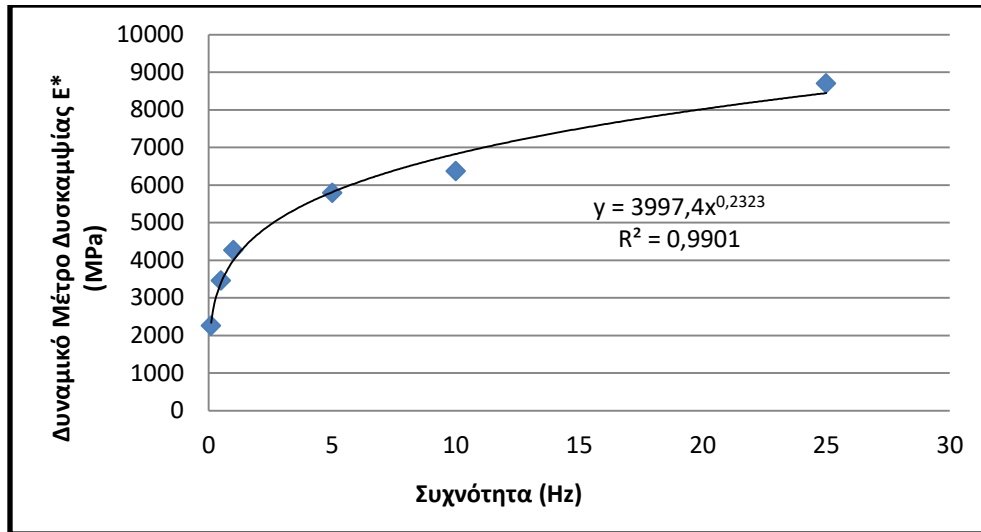
Εικόνα 6 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 10 °C.



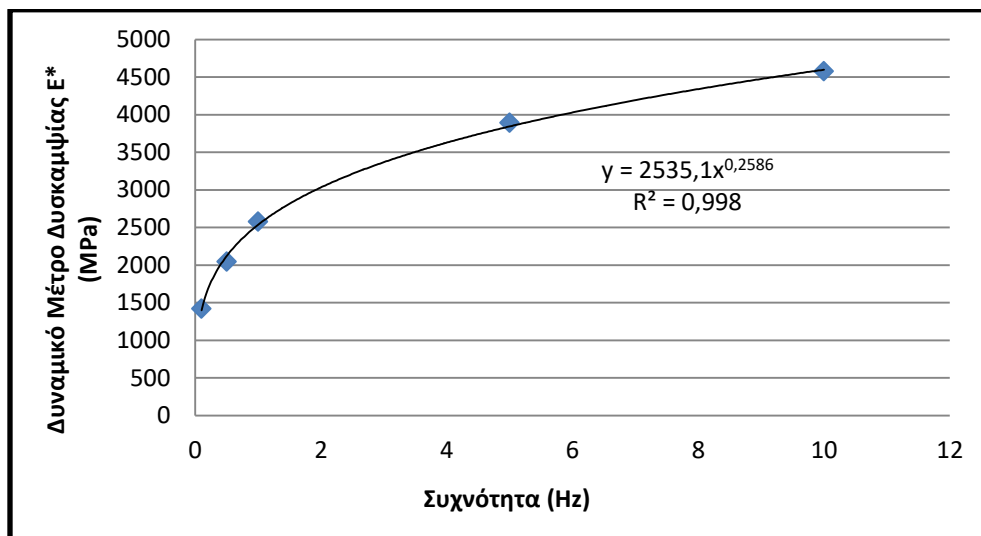
Εικόνα 7 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 15 °C.



Εικόνα 8 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 20 °C.

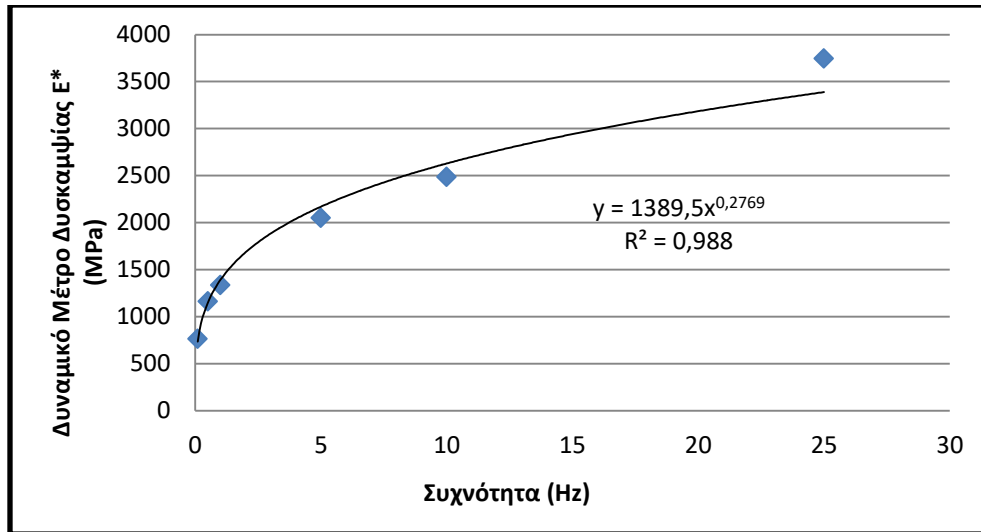


Εικόνα 9 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 25 °C.

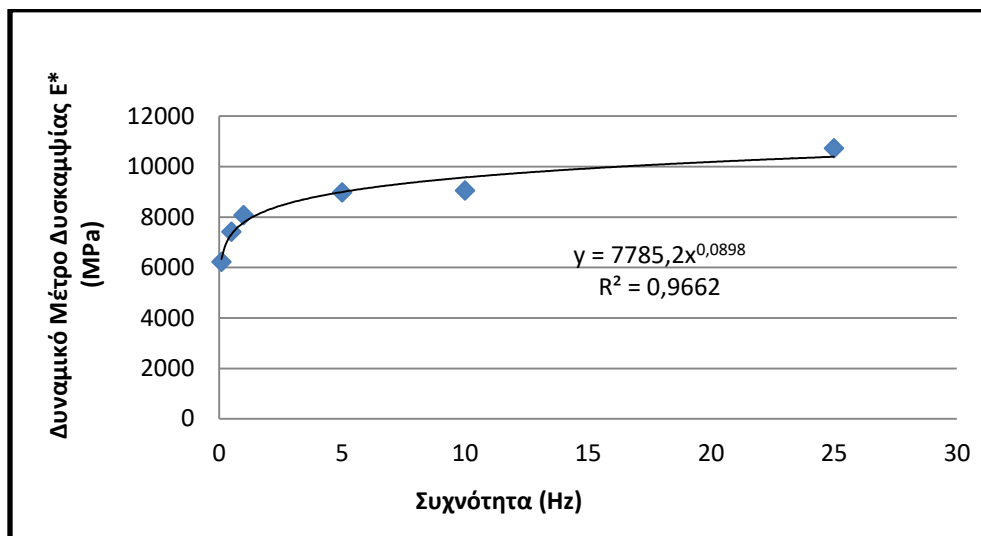


Εικόνα 10 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 30°C.

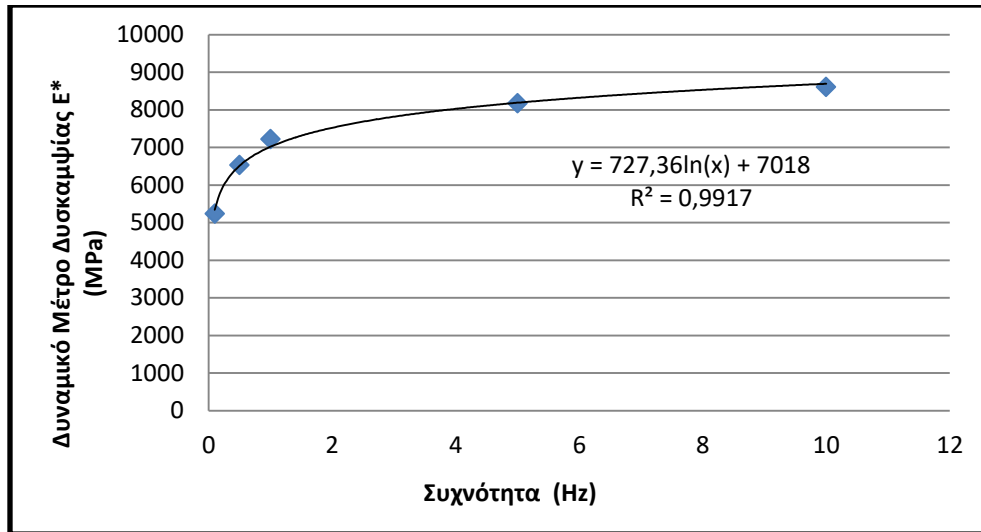




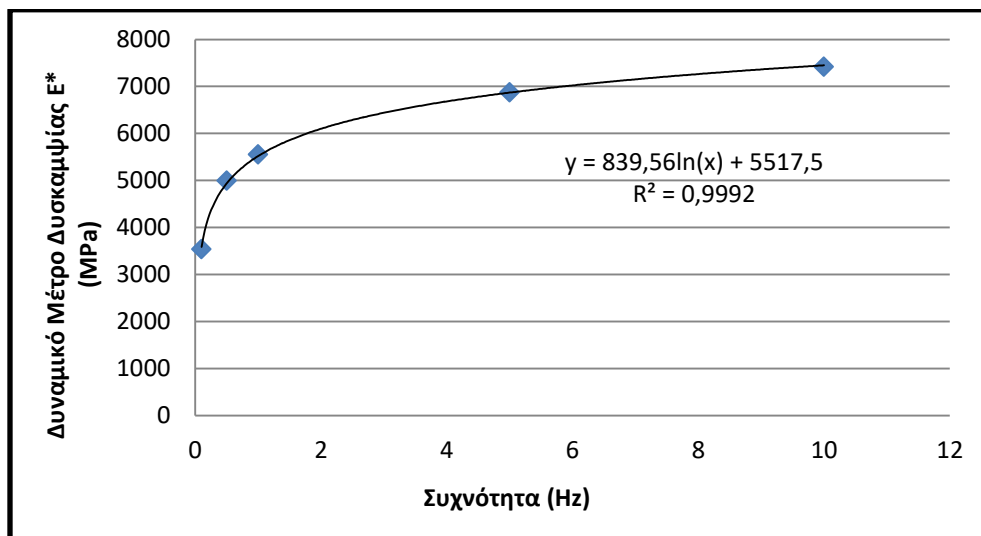
Εικόνα 11 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K100.5-LEA στη θερμοκρασία των 37 °C.



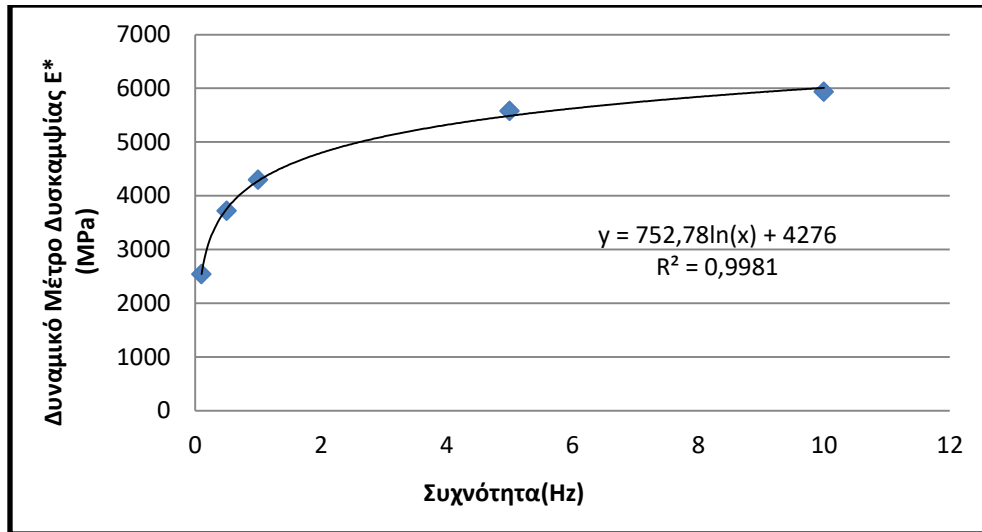
Εικόνα 12 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 10 °C.



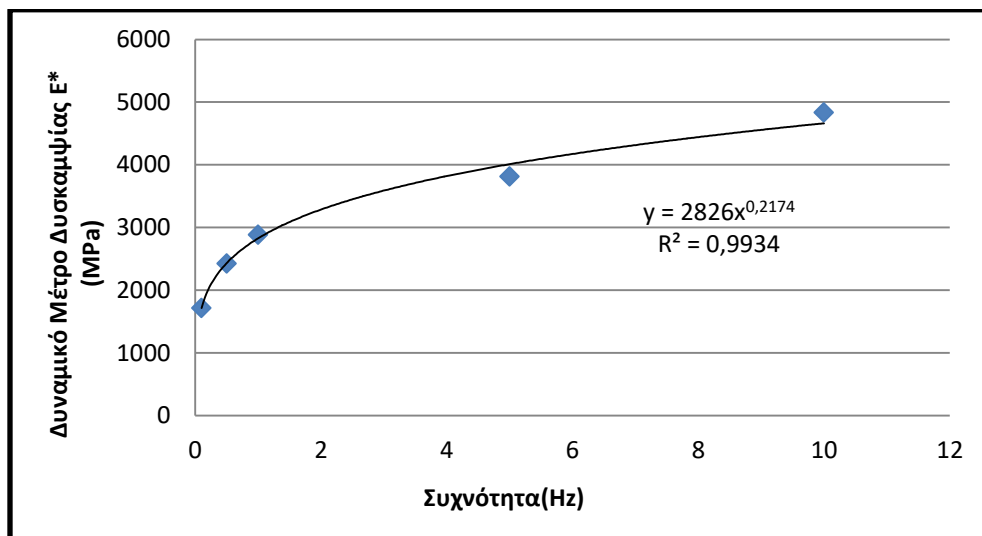
Εικόνα 13 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 15 °C.



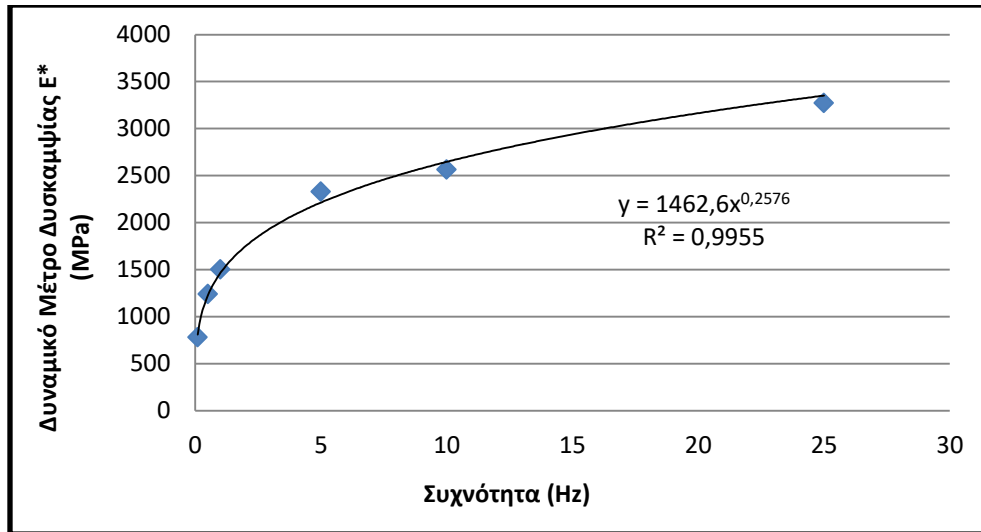
Εικόνα 14 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.



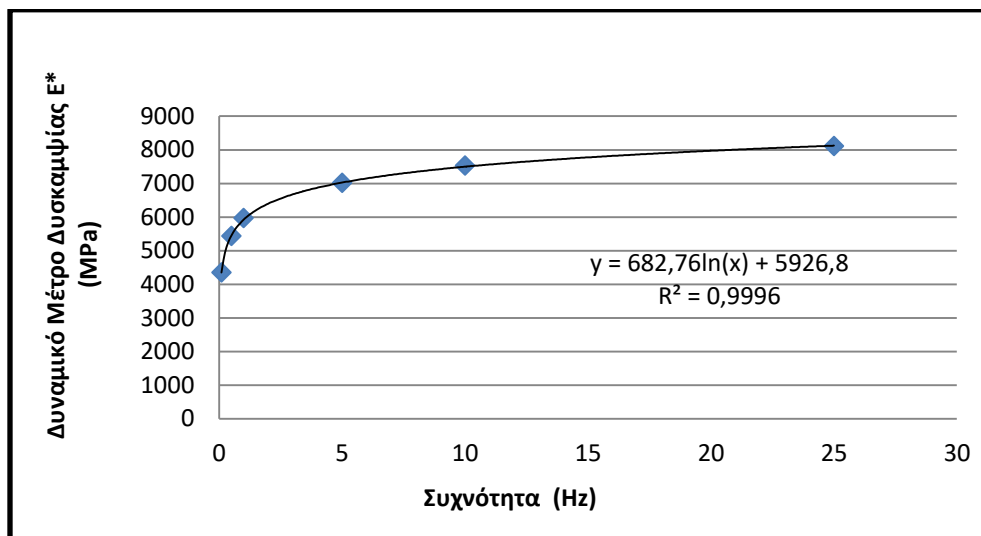
Εικόνα 15 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



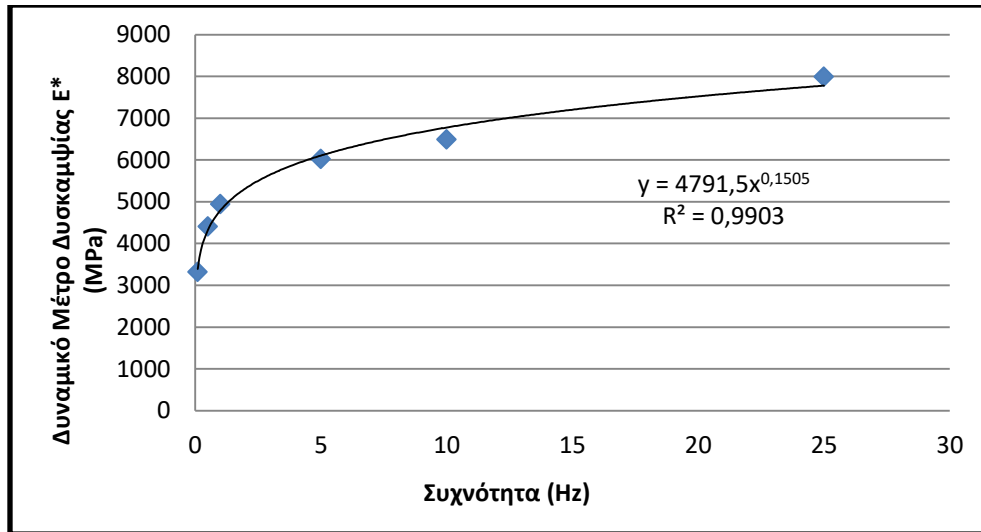
Εικόνα 16 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 30 °C.



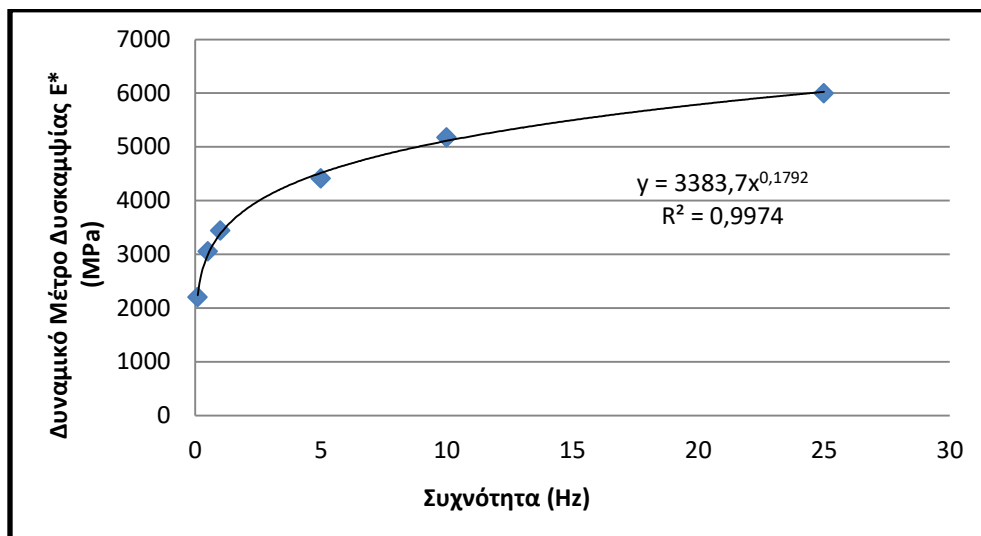
Εικόνα 17 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K94.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.



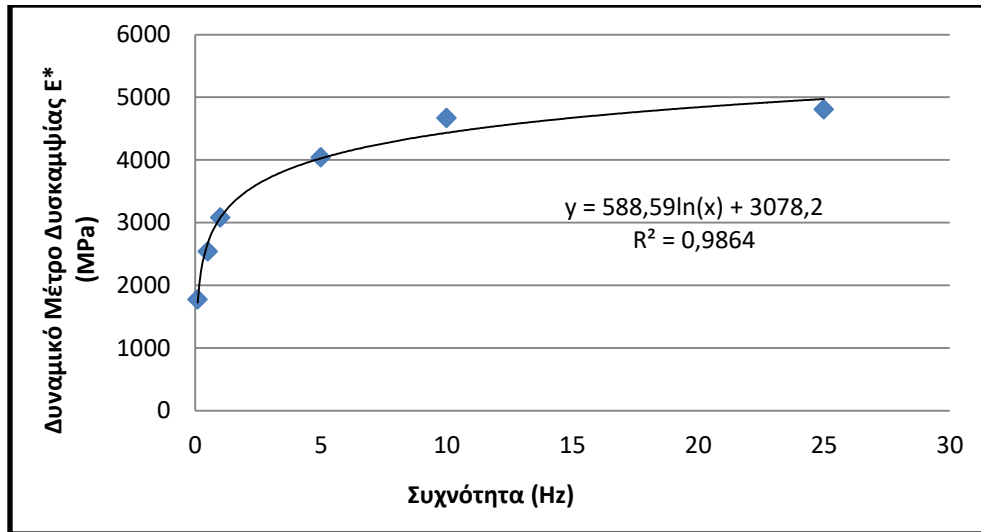
Εικόνα 18 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 10 °C.



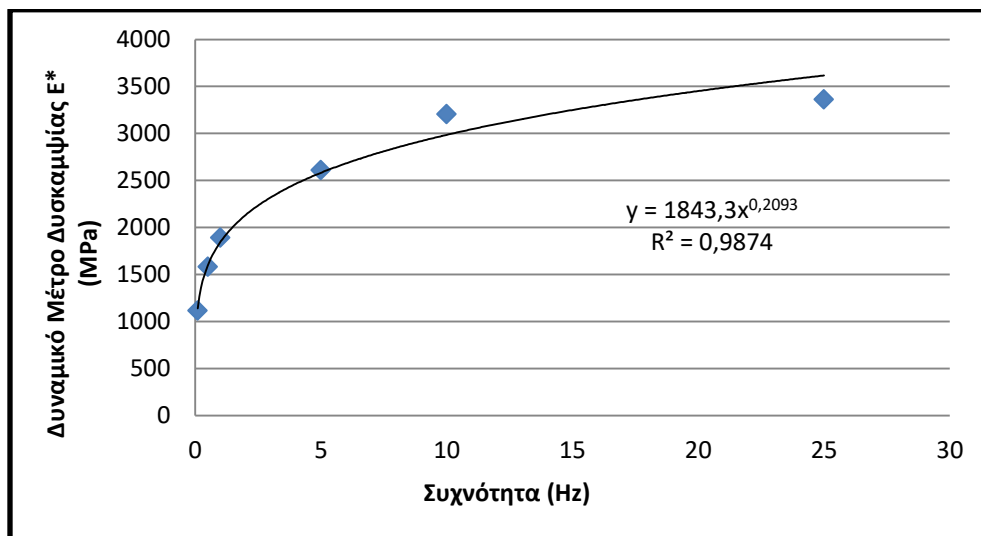
Εικόνα 19 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 15 °C.



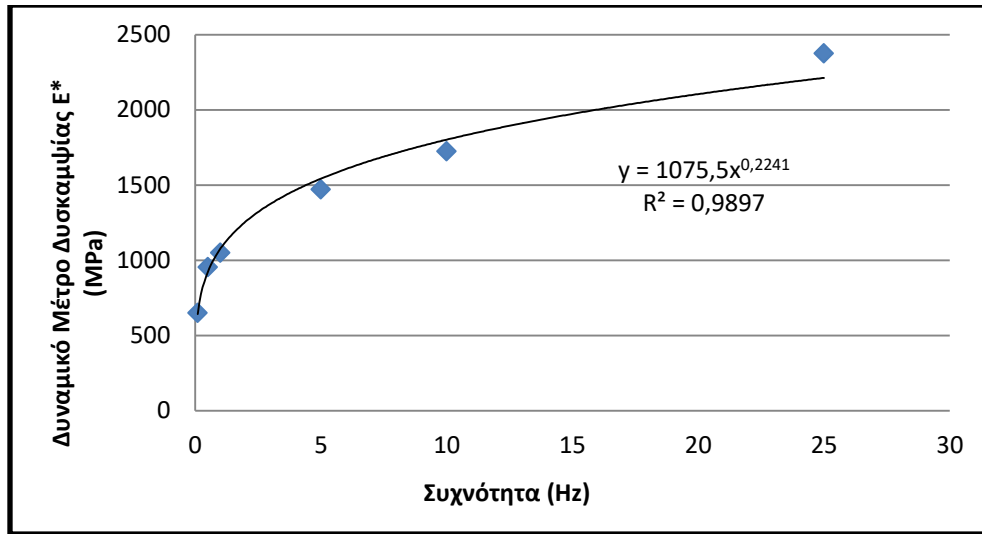
Εικόνα 20 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.



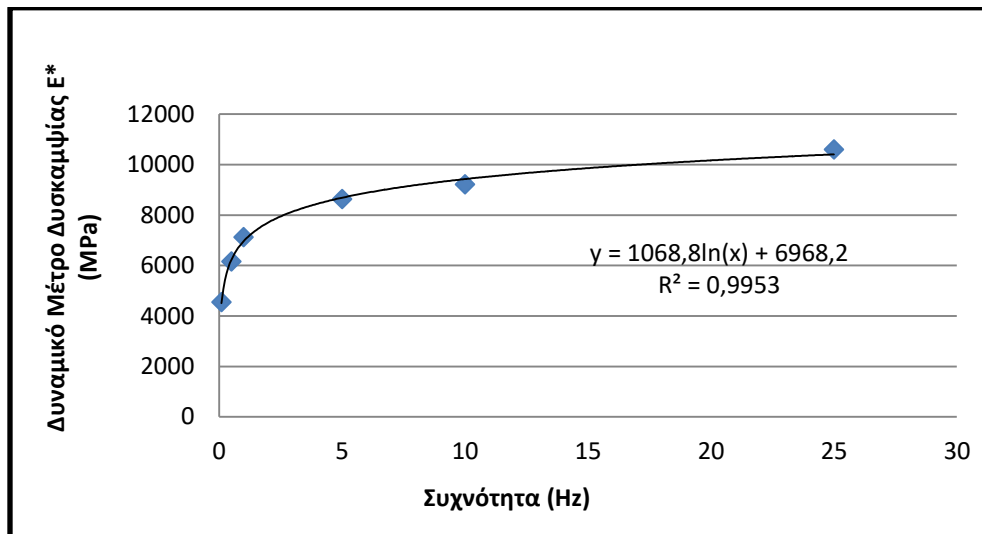
Εικόνα 21 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



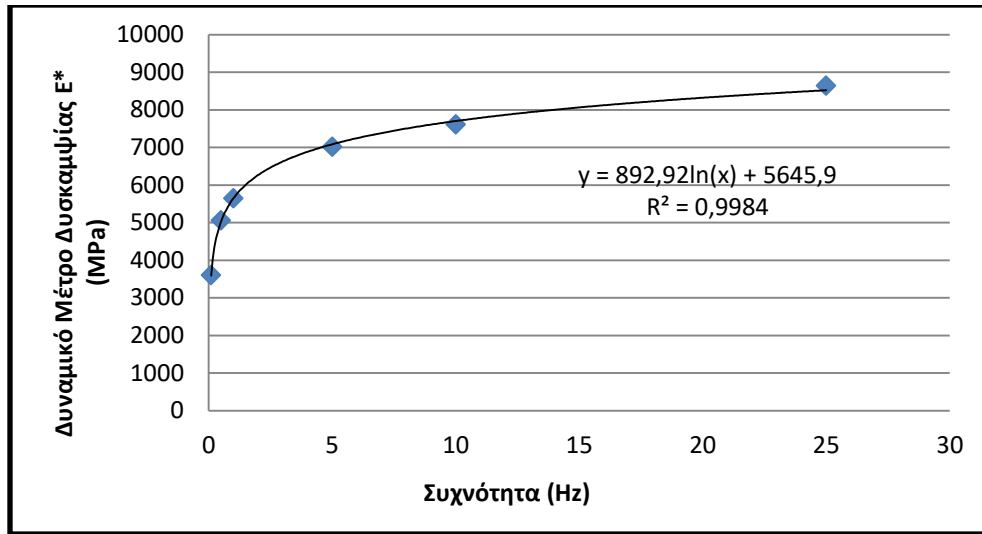
Εικόνα 22 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 30 °C.



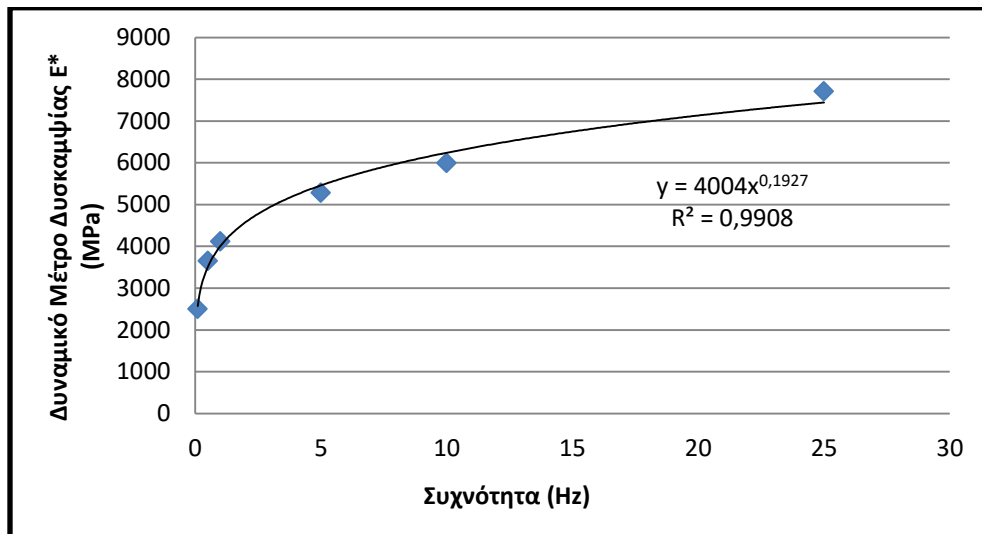
Εικόνα 23 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K161.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.



Εικόνα 24 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 10 °C.

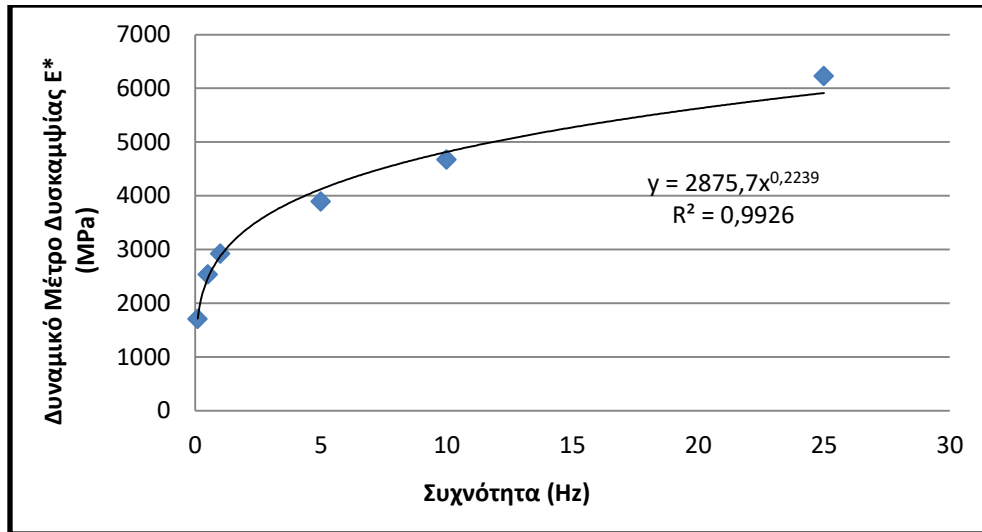


Εικόνα 25 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 15 °C.

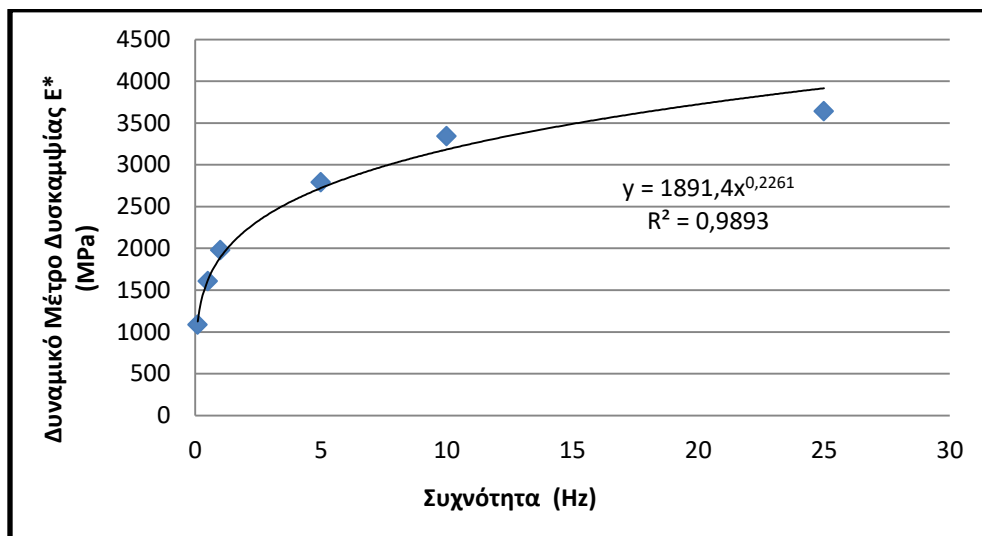


Εικόνα 26 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.

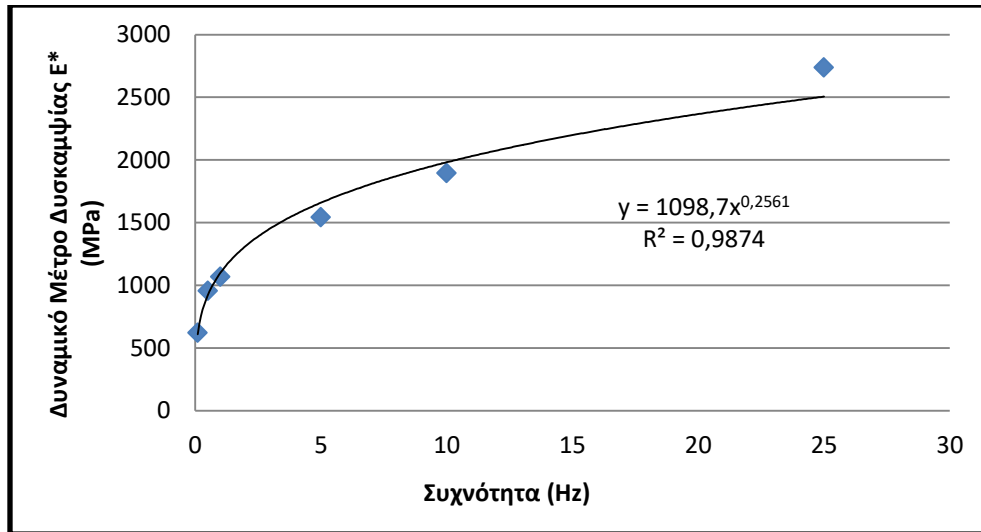




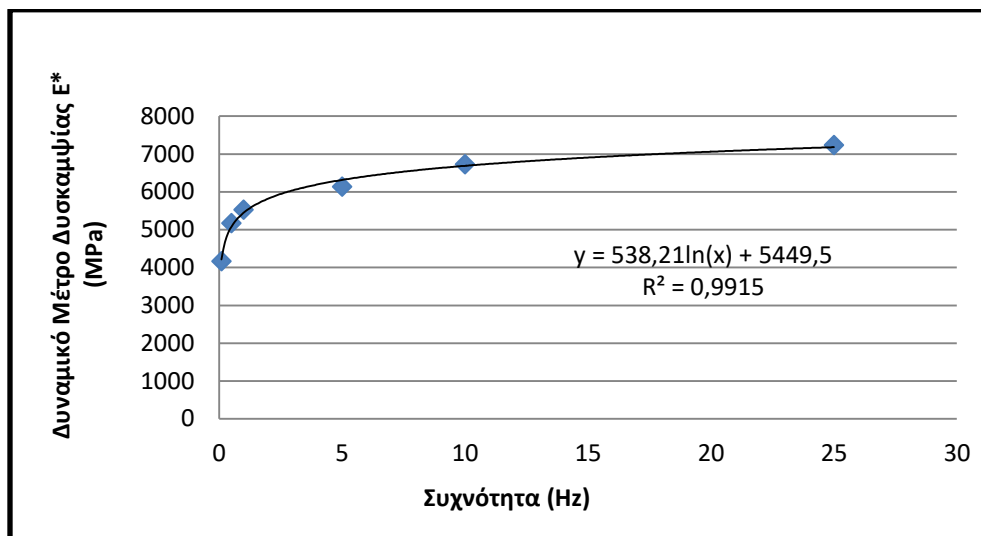
Εικόνα 27 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



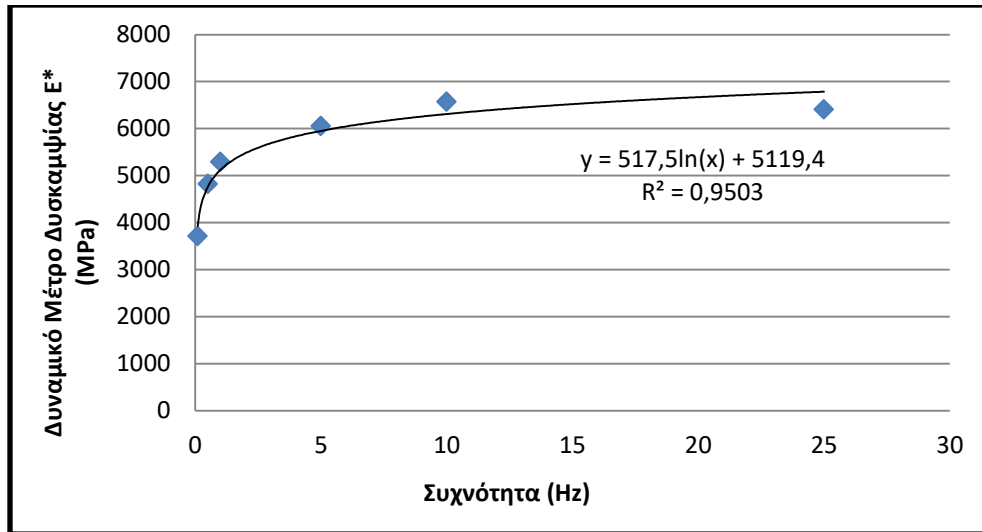
Εικόνα 28 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 30°C.



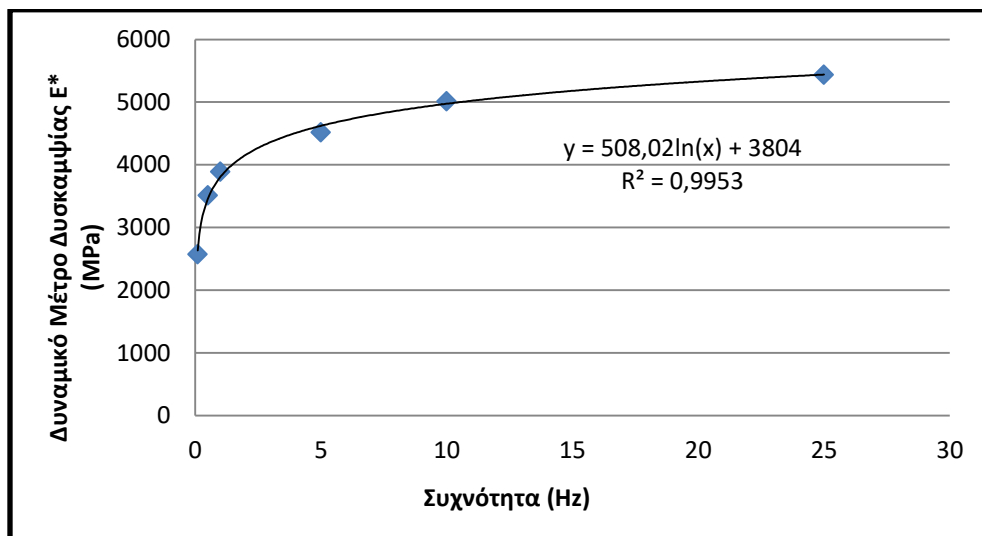
Εικόνα 29 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K147.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.



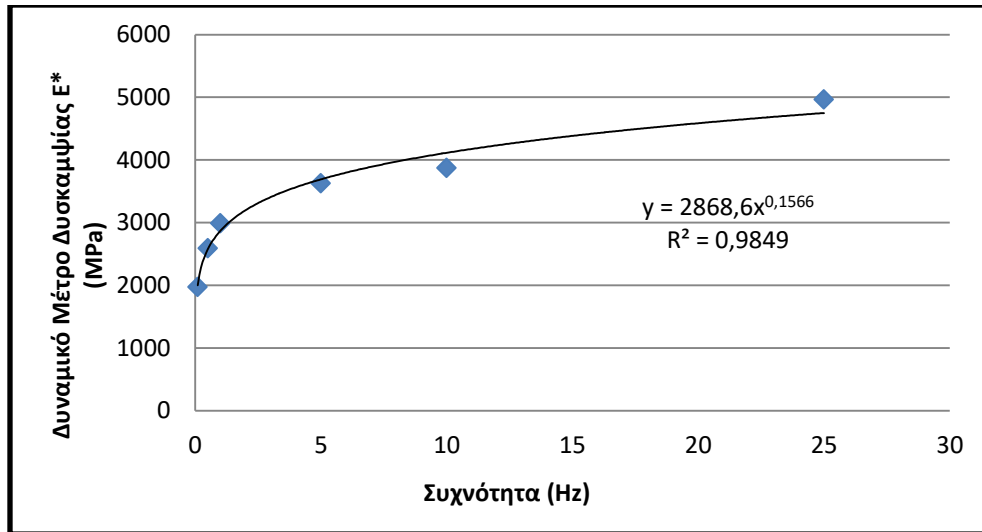
Εικόνα 30 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 10 °C.



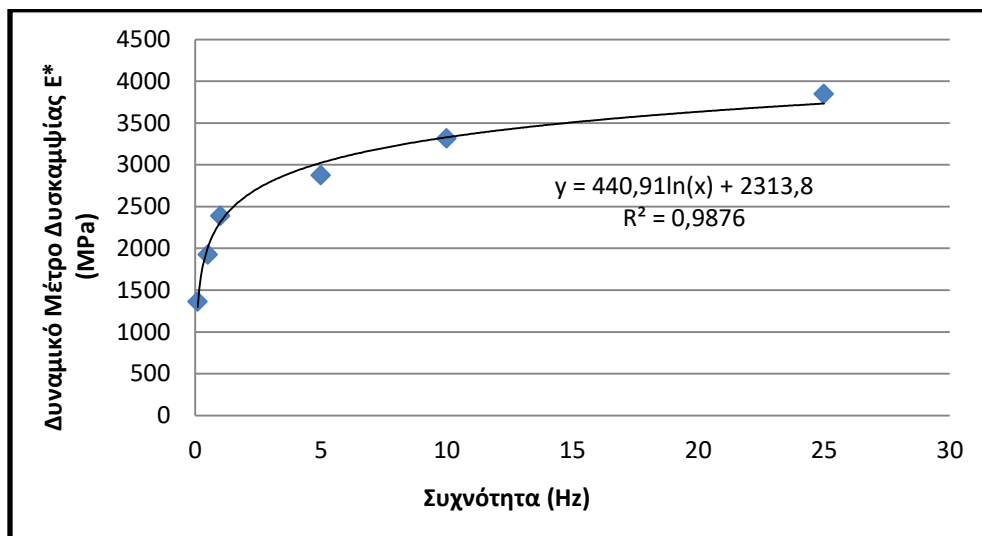
Εικόνα 31 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 15 °C.



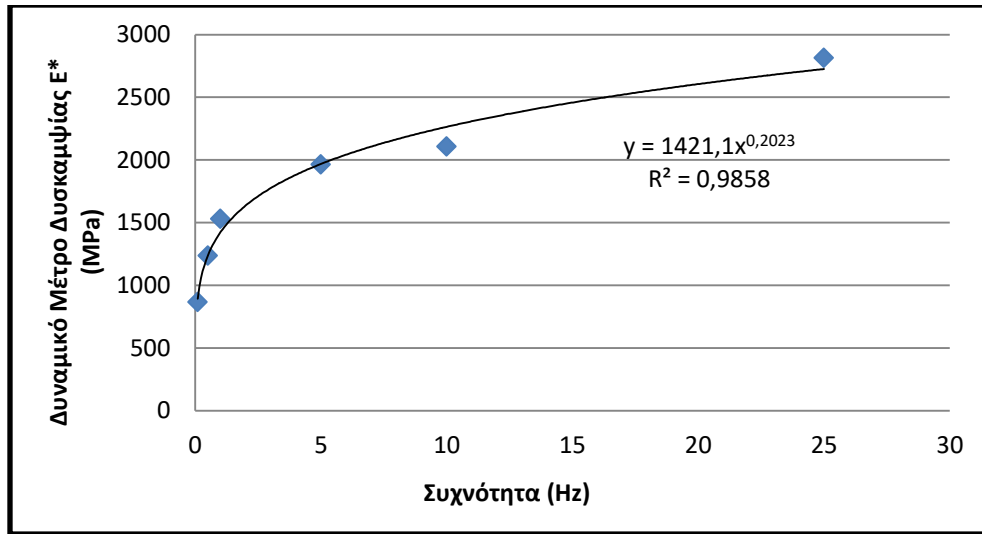
Εικόνα 32 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.



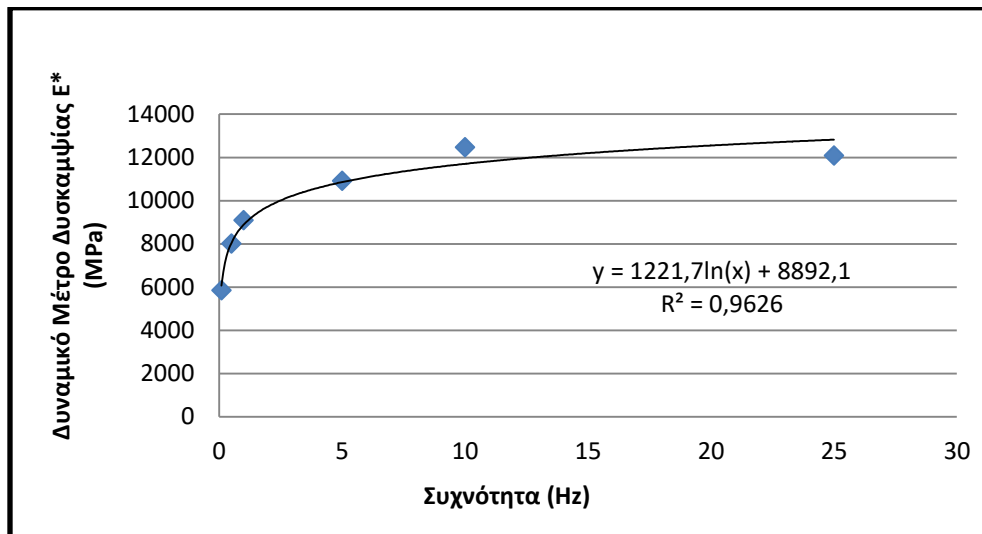
Εικόνα 33 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



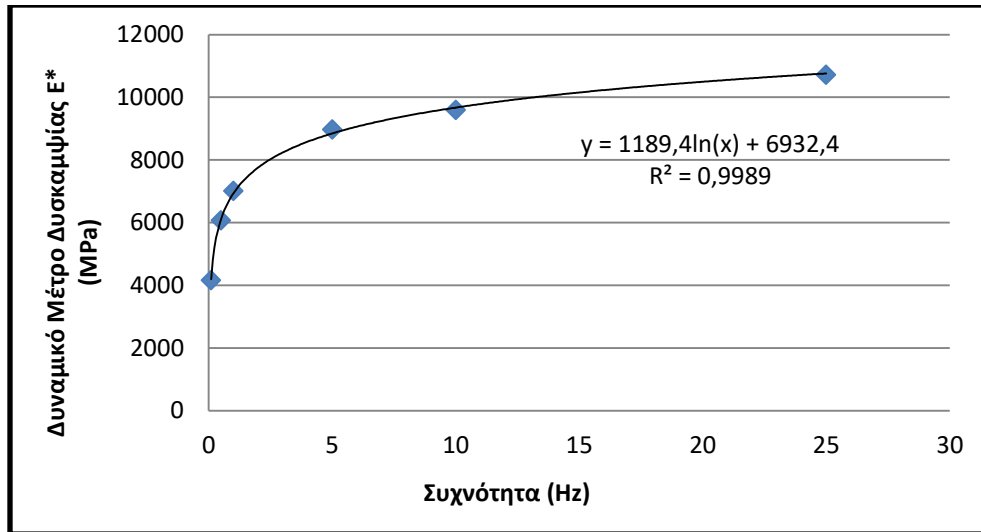
Εικόνα 34 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 30 °C.



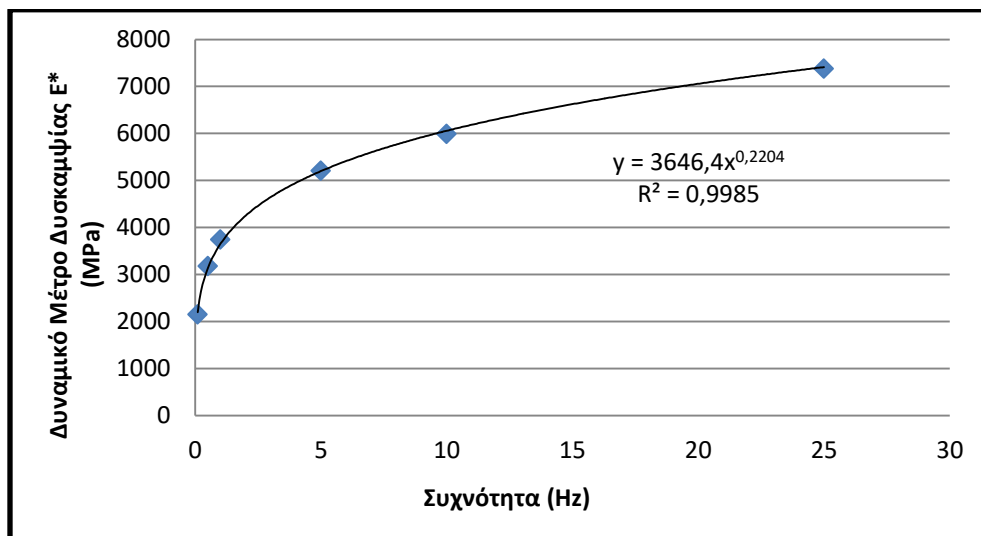
Εικόνα 35 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K151.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.



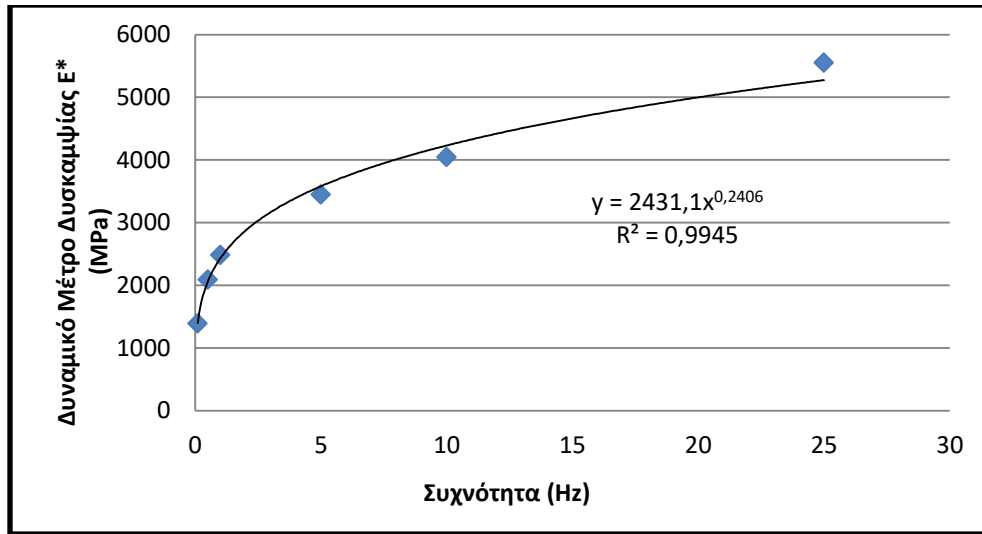
Εικόνα 36 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 10 °C.



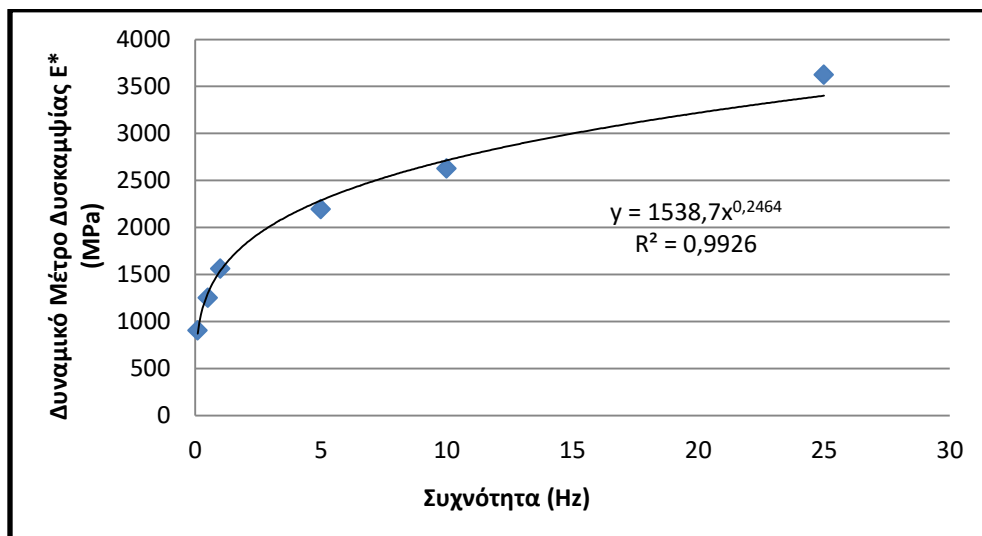
Εικόνα 37 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 15 °C.



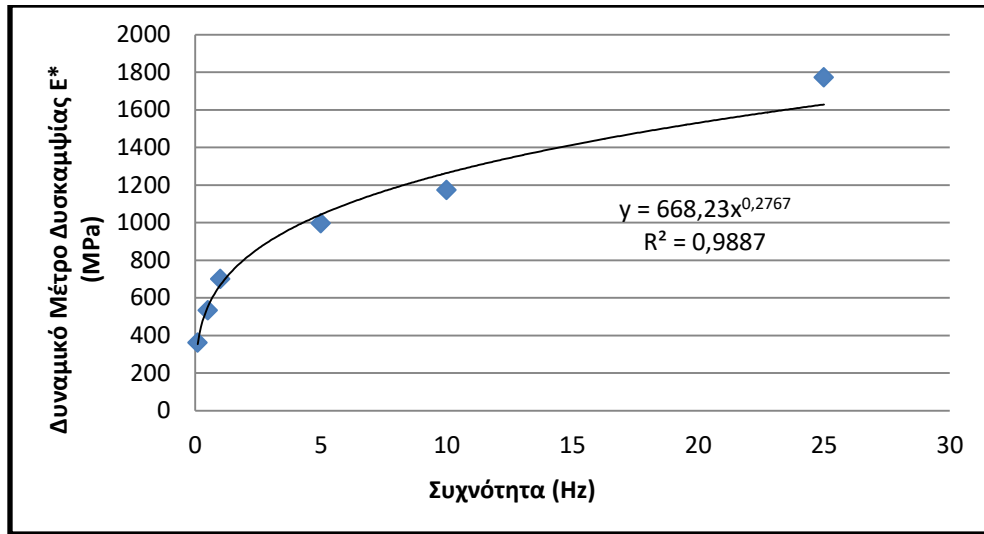
Εικόνα 38 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 20 °C.



Εικόνα 39 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 25 °C.



Εικόνα 40 Διάγραμμα διασποράς E\* -f για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 30 °C.



Εικόνα 41 Διάγραμμα διασποράς  $E^*$  - $f$  για τον πυρήνα K110.0-RL στη θερμοκρασία των 37 °C.