

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

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ





ΜΑΡΙΑ ΠΟΜΟΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΛΟΪΖΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

i

# εγχαριστιές

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, για την αρχική ανάθεση του θέματος της εργασίας και τη συνολική καθοδήγησή του από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Επιπλέον, καθοριστική ήταν η συμβολή της κυρίας Κωνσταντίνας Γεωργούλη, Επιστημονικής Συνεργάτιδας του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, με την οποία συνεργάστηκα άψογα, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών όσο και κατά τη συγγραφή του κειμένου. Την ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την ουσιαστική πρόσφορά της και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη που μου προσέφεραν. Όμως, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» οφείλω στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου για όλα όσα μου προσφέρουν καθημερινά...

Μαρία Πομόνη Αθήνα, 26/4/2014

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

# «Εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενου οδοστρώματος»

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε επιτόπου πείραμα σε οδικό άξονα, όπου συλλέχθηκαν στοιχεία σε 20 θέσεις με το μη καταστρεπτικό σύστημα μετρήσεων του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD) του Εργαστήριου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα στοιχεία αυτά αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ανάστροφου υπολογισμού που βασίζεται στην ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων καθώς και στην καινοτόμο μεθοδολογία που βασίζεται στη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων. Από τις μεθοδολογίες αυτές εκτιμήθηκε το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων στις υπόψη θέσεις ελέγχου. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία στις ίδιες θέσεις και οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, προκειμένου να προσδιοριστεί εργαστηριακά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας των στοιχείων συλλογής. Πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μέτρων δυσκαμψίας και διερεύνηση της μεταξύ τους συσχέτισης. Παρατηρήθηκαν εν γένει υψηλότερες τιμές στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προσδιορίζεται εργαστηριακά από το μέτρο δυσκαμψίας που εκτιμάται στο πεδίο. Επιπλέον, η συσχέτιση μεταξύ των μέτρων δυσκαμψίας ήταν αρκετά ικανοποιητική.

**Λέξεις κλειδιά:** δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων, επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων, μη καταστρεπτικές δοκιμές, ανάστροφος υπολογισμός

#### ABSTRACT

#### 'Estimation of hot mix asphalt dynamic modulus in existing pavement'

In the present diploma thesis, the estimation of hot mix asphalt dynamic modulus of an existing flexible pavement is investigated. For this purpose, an in-situ experiment took place at a pavement of a highway section, where in-situ data were collected with the non-destructive FWD system of the Laboratory of Pavement Engineering of NTUA at 20 locations. These data were utilized in the framework of the backcalculation process based on the theory of multiple elastic layers and on the theory of genetic algorithms. From this procedure, the in-situ stiffness moduli were estimated for each location. Alongside, cores were taken at the same locations and were transferred to the Laboratory of Pavement Engineering of NTUA, in order to determine the hot mix asphalt dynamic moduli, following the processing of the collected data. A comparative evaluation of the above stiffness moduli was performed as well as an investigation into their correlation. It was observed that the laboratory determined dynamic moduli were generally higher than the stiffness moduli estimated in the field. Furthermore, the achieved correlation was satisfactory.

**Keywords:** hot mix asphalt dynamic modulus, hot mix asphalt in-situ stiffness modulus, non destructive testing, backcalculation

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο – μεθοδολογία διερεύνησης	2
1.3 Δομή της εργασίας	3
2. ΤΥΠΙΚΟ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Εύκαμπτο οδόστρωμα	6
2.3 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος	7
2.4 Ασφαλτόμιγμα	9
2.4.1 Σύσταση ασφαλτομιγμάτων	9
2.4.2 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος ασφαλτικών στρώσεων	11
2.4.2.1 Επιτόπου προσδιορισμός (in-situ)	13
2.4.2.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός (laboratory)	15
3 ΑΥΝΑΝΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΑΥΣΚΑΝΙΙΙΙΑΣ	16
	16
	10
3.2 Δυναμικό μετρο ουσκαμφτας – ορισμός	10
3.3 Μεθοδοί υπολογισμού δυναμικού μετρού δυσκαμψιας	19
$3.3.1 E p \gamma \alpha 0 t (p) \alpha k 0 \gamma (p) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0$	19
3.3.2 Προσδιορισμος μεσω αλγοριθμων προβλεψης	20
3.3.3 Προσδιορισμος μεσω επιφανειακων κυματων	22
3.4 Παράγοντες επίδρασης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	23
3.4.1 Επίδραση αδρανών	23
3.4.2 Επίδραση ασφάλτου	24
3.5 Κεντρικές καμπύλες (master curves)	24
3.5.1 Προσδιορισμός του παράγοντα μετατόπισης	27
3.6 Εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ως δείκτη πρόβλεψης της συμπεριφ του ασφαλτομίγματος	οράς 29
3.6.1 Συσχέτιση με τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος	29
3.6.2 Συσχέτιση με τις παραμένουσες παραμορφώσεις του ασφαλτομίγματος	29

4. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	. 31
4.1 Εισαγωγή	. 31
4.2 Σύστημα μέτρησης FWD	. 32
4.3 Ανάστροφος υπολογισμός	. 37
4.3.1 Ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων	. 39
4.3.1.1 Γενικά στοιχεία	. 40
4.3.1.2 Ελαστική θεωρία Boussinesq	. 41
4.3.1.3 Θεωρία ισοδύναμων στρώσεων κατά Odemark	. 43
4.3.1.4 Μέθοδοι ανάλυσης ελαστικής θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων	. 45
4.3.1.5 Αξιολόγηση ανάλυσης ανάστροφου υπολογισμού	. 46
4.3.2 Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic algorithms)	. 47
4.3.2.1 Γενικά στοιχεία	. 47
4.3.2.2 Ιδιότητες γενετικών αλγορίθμων	. 49
4.3.2.3 Μεθοδολογία ανάστροφου υπολογισμού γενετικών αλγορίθμων	. 52
5. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	. 55
5.1 Γενικά στοιχεία	. 55
5.2 Μετρήσεις FWD	. 57
5.3 Επεξεργασία στοιχείων FWD	. 59
5.3.1 Ανάστροφος υπολογισμός μέσω της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων	. 60
5.3.1.1 Μέθοδος βέλτιστης προσέγγισης (Basin fitting)	. 62
5.3.1.2 Μέθοδος προσαρμογής βάσει της ακτίνας καμπυλότητας (Radius of curvature)	63
5.3.2 Ανάστροφος υπολογισμός με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων	. 63
5.4 Εργαστηριακές μετρήσεις	. 68
6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	. 74
6.1 Επεξεργασία στοιχείων ερευνητικής διαδικασίας	. 74
6.1.1 Προσδιορισμός συχνότητας φόρτισης FWD	. 74
6.1.2 Δημιουργία κεντρικών καμπυλών	. 76
6.1.2.1 Κεντρικές καμπύλες για τα 20 δοκίμια ελέγχου	. 77
6.1.2.2 Ανηγμένες τιμές εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στις επιτόπου	)
συνθήκες	. 88

6.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων δυσκαμψίας ανάστροφου υπολογισμού και		
εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας	113	
6.2.4 Συσχέτιση ανάστροφων και εργαστηριακών τιμών μέτρου δυσκαμψίας	122	
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129	

8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	13	2
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	13	2

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

# 1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος

Στο πλαίσιο διασφάλισης της ποιότητας ενός οδοστρώματος, η λειτουργική και η δομική του επάρκεια είναι ιδιαίτερης σημασίας. Ο έλεγχος της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος είναι απαραίτητος τόσο κατά τη φάση κατασκευής των επιμέρους στρώσεών του, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, προκειμένου να σχεδιαστούν οι στρατηγικές συντήρησής του. Όσον αφορά στη λειτουργική κατάσταση του οδοστρώματος, θα πρέπει να διασφαλίζεται η άνεση και η ασφάλεια του χρήστη της οδού. Συνεπώς, στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης και της κατασκευής ενός οδοστρώματος, είναι απαραίτητος ο ορθός σχεδιασμός των μιγμάτων και ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεών του, ώστε να παρέχεται επάρκεια ως προς τα λειτουργικά

Η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος καθορίζεται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεών 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 έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων. Θα πρέπει επίσης να έχει επαρκή ικανότητα απομείωσης των τάσεων που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις. Επομένως, ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος ενός υφιστάμενου οδοστρώματος είναι πολύ σημαντικός για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του και την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς του.

Τα τελευταία χρόνια το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού, σύμφωνα με τον πρόσφατο μηχανιστικό και εμπειρικό οδηγό διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide - MEPDG) που αναπτύχθηκε από την αμερικάνικη αρχή AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) το 2002. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αναπαριστά πληρέστερα και περισσότερο αντιπροσωπευτικά τη φύση του ασφαλτομίγματος, καθώς σε αντίθεση με άλλα μέτρα, περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, δηλαδή την εξάρτησή της δυσκαμψίας του από το χρόνο φόρτισης και τη θερμοκρασία.

Ο προσδιορισμός του δυναμικού 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 της δοκιμής. 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 της απόκρισης του υφιστάμενου οδοστρώματος και κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας των στοιχείων συλλογής, την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων αλλά και των υπολοίπων επιμέρους στρώσεων.

Ωστόσο, ανακύπτει η ανάγκη διερεύνησης της σχέσης του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει αξιοποιώντας τα στοιχεία συλλογής των μη καταστρεπτικών δοκιμών, με το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές στους πυρήνες ασφαλτομίγματος. Καθώς η διερεύνηση αυτή βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, δεν έχουν εξαχθεί ως τώρα ασφαλή και έγκυρα συμπεράσματα, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη εμπλουτισμού των ερευνητικών στοιχείων. Η ενδεχόμενη συσχέτιση των δύο μέτρων θα καταστήσει εφικτή την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μέσω των επιτόπου μη καταστρεπτικών δοκιμών.

### 1.2 Αντικείμενο - μεθοδολογία διερεύνησης

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση πιθανής συσχέτισης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων (από υφιστάμενο οδόστρωμα) που προσδιορίζεται εργαστηριακά, με το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, που εκτιμάται από τις μεθόδους ανάστροφου υπολογισμού αξιοποιώντας τα επιτόπου στοιχεία των μη καταστρεπτικών δοκιμών. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα κυρίως σε θέματα σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων και διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, αποτελεί πρόκληση για την παρούσα εργασία η δυνατότητα εκτίμησής του σε ένα υφιστάμενο οδόστρωμα.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δοκιμές σε νέο εύκαμπτο οδόστρωμα. Ειδικότερα, επιλέχθηκαν 20 θέσεις ελέγχου στο υπό μελέτη οδόστρωμα, στις οποίες διεξήχθησαν δοκιμές με τη χρήση του μη καταστρεπτικού συστήματος του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD) και του συστήματος γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν με το σύστημα του FWD και του GPR, τροφοδότησαν τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκε η συμβατική μεθοδολογία που βασίζεται στην ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων, από την οποία εκτιμήθηκε το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στις 20 θέσεις ελέγχου. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε για τον ίδιο σκοπό, μία καινοτόμος μεθοδολογία που βασίζεται στη θεωρία και τις ιδιότητες των γενετικών αλγορίθμων. Στη συνέχεια, στις 20 θέσεις ελέγχου έγινε πυρηνοληψία και τα δοκίμια που ελήφθησαν μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Σημειώνεται ότι οι ασφαλτικές στρώσεις του υπόψη οδοστρώματος περιλαμβάνουν την αντιολισθηρή στρώση, την ισοπεδωτική και την ασφαλτική βάση. Επομένως, οι επιτόπου και οι εργαστηριακές δοκιμές καθώς και η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων πραγματοποιούνται για το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων και αφορούν στο σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus). Η συγκριτική αξιολόγηση των επιτόπου εκτιμώμενων μέτρων δυσκαμψίας με τις αντίστοιχες εργαστηριακά προσδιορισμένες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία και γίνεται εκτίμηση της μεταξύ τους συσχέτισης.

# 1.3 Δομή της εργασίας

Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο και επιπλέον επτά κεφάλαια, συνθέτουν την παρούσα διπλωματική εργασία. Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο **2° κεφάλαιο** παρουσιάζεται η τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και δίνονται οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας του. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος και στο μέτρο δυσκαμψίας του.

Στο **3**° **κεφάλαιο** γίνεται αναλυτική περιγραφή το δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Ειδικότερα, αφού παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο και γίνει πλήρης επεξήγηση των παραμέτρων υπολογισμού του, αναφέρονται οι μέθοδοι προσδιορισμού και οι παράγοντες που το επηρεάζουν. Τέλος, παρουσιάζεται η κατασκευή των κεντρικών καμπυλών και η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ως δείκτη πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος.

Στο **4° κεφάλαιο** περιγράφεται το σύστημα μη καταστρεπτικών δοκιμών του FWD. Ειδικότερα, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν για τον ανάστροφο υπολογισμό του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων.

Στο **5<sup>°</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζεται η ερευνητική διαδικασία. Ως εκ τούτου, περιγράφεται η διαδικασία των επιτόπου μετρήσεων στο υφιστάμενο οδόστρωμα στο πεδίο μελέτης και η λειτουργία των μεθοδολογιών που εκτιμούν το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας. Τέλος, περιγράφεται η εργαστηριακή πειραματική διαδικασία επί των πυρήνων για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Στο **6° κεφάλαιο** περιγράφεται η επεξεργασία των στοιχείων που συλλέχθηκαν και εξήχθησαν από τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού και την εργαστηριακή δοκιμή, και εν συνεχεία γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων με παράλληλα σχόλια και παρατηρήσεις. Δίνεται έμφαση στη σύγκριση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με τις τιμές που εκτιμώνται επιτόπου. Στο **7° κεφάλαιο** δίνονται εκτενώς τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **8° κεφάλαιο** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη και επιχειρηματολογία των κεφαλαίων.

# 2. ΤΥΠΙΚΟ ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ

# 2.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός και η μελέτη των εύκαμπτων ασφαλτικών οδοστρωμάτων παρουσιάζει αλματώδη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, με γνώμονα την ανάγκη των χρηστών για μεγαλύτερη άνεση και ασφάλεια. Ως προς το χρήστη της οδού, το οδόστρωμα θα πρέπει να καλύπτει τις παραπάνω απαιτήσεις, οι οποίες συνδέονται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

Η τελική στρώση της επιφάνειας κύλισης θα πρέπει να παρέχει στους χρήστες:

- επαρκή αντίσταση έναντι ολίσθησης,
- επαρκή αποστραγγιστική ικανότητα,
- καλή ποιότητα κύλισης,
- επαρκή αντιθορυβική ικανότητα.

Επιπλέον, όσον αφορά τους υπεύθυνους μηχανικούς του έργου, ιδιαίτερη σημασία έχει η δομική επάρκεια του οδοστρώματος. Έτσι, κατά το στάδιο σχεδιασμού του έργου, προσδιορίζονται τα απαιτούμενα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και των επιμέρους στρώσεων από τις οποίες αποτελείται το οδόστρωμα. Βασική αρχή για την ορθότητα του σχεδιασμού αποτελεί η ικανότητα του οδοστρώματος να παραλαμβάνει τα φορτία από την κυκλοφορία και να τα κατανείμει στο έδαφος. Η αρχή αυτή, εκφράζεται στην πράξη μέσω των κριτηρίων για τη φέρουσα ικανότητα που θα πρέπει να καλύπτουν οι στρώσεις:

- υψηλή αντοχή έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων,
- υψηλή αντοχή όλων των στρώσεων.

Τόσο η λειτουργική όσο και η δομική επάρκεια ενός υπό λειτουργία οδοστρώματος είναι άμεσα συνυφασμένες με την τελική εκτίμηση της συνολικής εξυπηρετικότητας που προσφέρει το υπό μελέτη οδόστρωμα. Κατά συνέπεια, για τη διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου εξυπηρετικότητας θα πρέπει να γίνεται σωστός σχεδιασμός του οδοστρώματος κατά τη φάση μελέτης του, επιπλέον να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στο στάδιο κατασκευής του, όπου προσδιορίζονται τα επιτόπου μηχανικά και στρωματογραφικά χαρακτηριστικά. Τέλος, είναι απαραίτητη η επαρκής και περιοδική παρακολούθηση του οδοστρώματος για τον προσδιορισμό τόσο της λειτουργικής όσο και για της δομικής κατάστασής του, κατά τη φάση λειτουργίας του.

Υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων, η φέρουσα ικανότητα ενός υπό λειτουργία οδοστρώματος φθίνει, με συνέπεια να υποβαθμίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησής του. Τέτοιοι

παράγοντες, πέρα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, είναι η επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου (κυρίως βαρέων οχημάτων) και οι περιβαλλοντικές/κλιματολογικές συνθήκες, στοιχεία που συμβάλλουν στη γήρανση των υλικών. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, η φιλοσοφία σχεδιασμού των οδοστρωμάτων φαίνεται παραστατικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.1: Φιλοσοφία σχεδιασμού οδοστρωμάτων

### 2.2 Εύκαμπτο οδόστρωμα

Το εύκαμπτο οδόστρωμα χαρακτηρίζεται κυρίως από τα ασύνδετα υλικά (αμμοχάλικα) που χρησιμοποιούνται για τη στρώση της βάσης και της υπόβασης, προσδίδοντας έτσι ιδιαίτερα μηχανικά χαρακτηριστικά στο τελικό οδόστρωμα. Ακολουθούν τυπικές διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος.





Όπως φαίνεται στην παραπάνω τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, οι ασφαλτικές στρώσεις διαχωρίζονται σε επιμέρους στρώσεις. Αυτές είναι: η επιφανειακή στρώση (αντιολισθηρή), μία ή περισσότερες ισοπεδωτικές στρώσεις και η ασφαλτική βάση. Οι υποκείμενες στρώσεις είναι η βάση και η υπόβαση από ασύνδετα αμμοχάλικα και τέλος η στρώση έδρασης από γαιώδες υλικό. Είναι σύνηθες οι στρώσεις βάσης και υπόβασης να μην διαχωρίζονται και να θεωρούνται σαν μία ενοποιημένη στρώση, αποτελούμενη από εξολοκλήρου θραυστό υλικό με μηχανική συμπεριφορά υψηλών προδιαγραφών.

### 2.3 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

Κατά το σχεδιασμό του οδοστρώματος θα πρέπει να γίνεται πλήρης προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών που δύναται να φέρει το υπό μελέτη οδόστρωμα. Έτσι, κρίνεται απαραίτητη η διαμόρφωση στατικού προσομοιώματος της κατασκευαστικής του διάταξης που αποτελείται από τρεις στρώσεις πεπερασμένου πάχους και απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια έννοια (εικόνα 2.3). Η επίλυση του συστήματος επάλληλων στρώσεων βασίζεται

στη θεωρία του Burmister (1943), που προϋποθέτει υλικά στρώσεων ελαστικά ομογενή και ισότροπα (Huang 2004, Witzack 2000). Επομένως, για να ορισθεί πλήρως το στατικό πρότυπο, εκτός από τα πάχη των στρώσεων, δίνεται και το μέτρο ελαστικότητάς τους (E) καθώς και ο λόγος Poisson ( $\nu$ ). Το σύστημα επάλληλων στρώσεων χρησιμοποιείται επιπλέον, για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ) σε οποιοδήποτε σημείο του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.3: Στατικό πρότυπο μελέτης οδοστρωμάτων και θέσεις κρίσιμων εντατικών μεγεθών

Στο παραπάνω στατικό πρότυπο, απεικονίζονται και οι κρίσιμες θέσεις του εύκαμπτου οδοστρώματος. Υπό τη θεώρηση ενός φορτίου P στην επιφάνεια κύλισης, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται είναι η οριζόντια εφελκυστική τάση  $\sigma_{r1}$  και παραμόρφωση  $\varepsilon_{r1}$  στο πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς και η κατακόρυφη θλιπτική τάση  $\sigma_{z3}$ , και παραμόρφωση  $\varepsilon_{z3}$  στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

Ο υπολογισμός των παραπάνω εντατικών μεγεθών οδηγεί στη δημιουργία νόμων που διέπουν την εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος έναντι δύο σημαντικών καταστάσεων. Πρόκειται για το νόμο κόπωσης (fatigue cracking), που αφορά την αντοχή του ασφαλτομίγματος έναντι ρηγμάτωσης, και για το νόμο αστοχίας – παραμορφωσιμότητας της στρώσης έδρασης. Οι δύο παραπάνω νόμοι συνδέουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις με τον αριθμό επιτρεπόμενων διελεύσεων, ώστε να μην αστοχήσει το οδόστρωμα λόγω κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης και συγκεκριμένα της ασφαλτικής βάσης όπου αναπτύσσονται τα κρίσιμα μεγέθη, ή/και λόγω αστοχίας της στρώσης έδρασης. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό οι ανώτερες στρώσεις εκτός από την υψηλή αντοχή τους να εξασφαλίζουν την επαρκή απομείωση των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται, καθώς αυτά μεταφέρονται στη στρώση έδρασης και κατ' επέκταση στο υπέδαφος.

Δεδομένου ότι η στρώση που έρχεται σε άμεση επαφή με την κυκλοφορία είναι η ασφαλτική, έχει μεγάλη σημασία τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών από τα οποία αποτελείται να προσδίδουν σε αυτή την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα.

# 2.4 Ασφαλτόμιγμα

Η ανώτερη στρώση ενός ασφαλτικού οδοστρώματος αποτελείται από μίγμα ασφάλτου και αδρανών. Το μίγμα που συνθέτεται ονομάζεται ασφαλτόμιγμα και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών, καθώς και οι αναλογίες τους στο μίγμα έχουν καθοριστική επίδραση στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση στη συμπεριφορά του κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος.

Γενικά τα ασφαλτομίγματα διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα θερμά ασφαλτομίγματα και στα ψυχρά ασφαλτομίγματα. Συγκεκριμένα, τα θερμά ασφαλτομίγματα παράγονται «εν θερμώ» σε μόνιμες εγκαταστάσεις, ενώ για την παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων ψυχρού τύπου, δεν απαιτείται θέρμανση της ασφάλτου και των αδρανών, και η διάστρωση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (10 – 45°C) (Λοΐζος και Πλατή, 2013α).

### 2.4.1 Σύσταση ασφαλτομιγμάτων

Όπως αναφέρθηκε, τα στοιχεία που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα είναι τα αδρανή υλικά, δηλαδή ασύνδετα υλικά με ελαστική (κατά βάση) συμπεριφορά, το συνδετικό υλικό δηλαδή την άσφαλτο, που πρόκειται για ένα ιξώδες ημίρρευστο υλικό που είναι προϊόν αργού πετρελαίου, καθώς και τα κενά αέρος. Κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε επιμέρους χαρακτηριστικά των υλικών τους (Molenaar, 2010).

Συγκεκριμένα στα αδρανή υλικά ελέγχεται:

- 🛠 ο τύπος των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν,
- η κοκκομετρική διαβάθμιση που απαιτείται,
- τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει η τελική στρώση,
- το κατ' όγκον ποσοστό τους στο ασφαλτόμιγμα.

Στην άσφαλτο προσδιορίζονται:

- το κατ' όγκον ποσοστό της στο ασφαλτόμιγμα,
- τα χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της.

Σχετικά με το ποσοστό των κενών αέρος ελέγχεται εάν:

το προσδοκώμενο ποσοστό ικανοποιεί τις εκάστοτε προδιαγραφές.

Μετά την ανάμιξη και τη συμπύκνωση των επιμέρους συστατικών τόσο στο εργαστήριο όσο και επιτόπου, το ασφαλτόμιγμα αποκτά το συνολικό του όγκο (100%). Συνεπώς, ο τελικός όγκος αποτελείται από τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, η άσφαλτος και τα κενά αέρος. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται ποιοτική ογκομετρική απεικόνιση μίας τυπικής σύνθεσης ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.4: Ογκομετρική κατανομή υλικών συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (Λοΐζος και Πλατή, 2013α)

Επιπλέον, σημειώνεται ότι από κατασκευαστικής άποψης, το ασφαλτόμιγμα που πρόκειται να διαστρωθεί θα πρέπει να είναι εργάσιμο (εργασιμότητα) και να έχει υψηλή ικανότητα συμπύκνωσης.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις είναι φυσικό επόμενο να σχετίζονται με τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών κατά το στάδιο λειτουργίας του οδοστρώματος. Συνεπώς, ο τύπος των αδρανών που χρησιμοποιούνται, ιδίως για την ανώτερη στρώση που έρχεται σε άμεση επαφή με την κυκλοφορία (αντιολισθηρή), θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις μικροϋφής και μακροϋφής καθώς και της αποφυγής της ταχείας λείανσής τους. Επιπλέον, τα αδρανή που επιλέγονται θα πρέπει να προσδίδουν στο ασφαλτόμιγμα υψηλή αντοχή έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων, καθώς είναι προφανές πως εκείνα με γωνιώδες σχήμα εμφανίζουν καλύτερη διατμητική συμπεριφορά σε σχέση με τα στρογγυλεμένα, πληρώντας πάντοτε τις απαιτήσεις της κοκκομετρικής διαβάθμισής που ορίζουν οι προδιαγραφές. Η αντοχή όμως του ασφαλτομίγματος έναντι παραμενουσών ασφαλτομίγματος είναι στην ποσότητα της στο μίγμα. Συνεπώς, η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι άμεσα συνυφασμένη με την ιξωδοελαστική συμπεριφορά τος ασφάλτου, με την ελαστική κατά βάση συμπεριφορά των αδρανών καθώς και με τη

συμπύκνωση του μίγματος για την επίτευξη του κατάλληλου ποσοστού κενών σε αυτό (Molenaar, 2010).

#### 2.4.2 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος ασφαλτικών στρώσεων

Η μηχανική συμπεριφορά της ασφάλτου είναι αυτή που υπερισχύει στο ασφαλτόμιγμα, το οποίο παρουσιάζει ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Τα ιξωδοελαστικά υλικά εξαρτώνται άμεσα από το χρόνο φόρτισης (t) και τη θερμοκρασία (T), συνεπώς οι παράγοντες αυτοί δρουν καταλυτικά στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση ονομάζεται λόγος δυσκαμψίας ( $S_m$ ) (Van der Poel) για να διαχωριστεί από το μέτρο ελαστικότητας, από το οποίο διαφέρει μόνο στο ότι εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από την ταχύτητα φόρτισης (Λοΐζος και Πλατή, 2013α). Τα παραπάνω αποτυπώνονται μαθηματικά στην επόμενη σχέση:

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

όπου:

σ: η επιβαλλόμενη τάση, ε: η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση, Τ: θερμοκρασία ασφαλτομίγματος, t: χρόνος φόρτισης.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η επιρροή της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Από το διάγραμμα διαφαίνεται ότι η προοδευτική αύξηση του χρόνου φόρτισης και της θερμοκρασίας οδηγεί σε σταδιακή μείωση του μέτρου δυσκαμψίας (καμπύλη 1). Για υψηλές τιμές των παραπάνω μεγεθών και όταν συντρέχουν επιπλέον προϋποθέσεις, δηλαδή όταν ο συνδυασμός του τύπου αδρανών, της δυσκαμψίας της ασφάλτου, του ποσοστού κενών και της μεθόδου επιτόπου συμπύκνωσης συμβάλλουν στην περαιτέρω μείωση του *S<sub>m</sub>*, τότε η κλίση στην καμπύλη (2) του διαγράμματος γίνεται πιο απότομη.



**Εικόνα 2.5:** Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης (Brown, 1988)

Το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο στον εξελιγμένο αναλυτικό υπολογισμό των οδοστρωμάτων, διότι καθιστά δυνατή τη χρησιμοποίηση των ελαστικών επάλληλων στρώσεων για την ανάλυση των οδοστρωμάτων και υποκαθιστά το μέτρο ελαστικότητας *E*, όταν μία ή περισσότερες στρώσεις αυτών αποτελούνται από ασφαλτομίγματα τα οποία όπως ειπώθηκε είναι υλικά ιξωδοελαστικά (Λοΐζος και Πλατή, 2013α).

Η παραμόρφωση ενός ιξωδοελαστικού υλικού διαφέρει από εκείνη ενός πλήρως ελαστικού υλικού. Η βασική διαφοροποίηση εντοπίζεται κατά την αποφόρτιση του υλικού, όπου δεν ανακτάται πλήρως η προκληθείσα από την φόρτιση του υλικού παραμόρφωση. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος ως προς την παραμόρφωση, υπό την επιβολή φόρτισης, για την περίπτωση που η φόρτιση του οδοστρώματος θεωρηθεί σταθερή για μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ιξωδοελαστικού υλικού (Molenaar, 2010)

Το μη ανακτώμενο τμήμα της παραμόρφωσης του υλικού αποτελεί την παραμένουσα ιξωδοπλαστική παραμόρφωση, η οποία σε ένα υπό λειτουργία οδόστρωμα, οδηγεί (μακροπρόθεσμα) σε δομική αστοχία. Η παραμένουσα παραμόρφωση είναι δυνατό να εντοπιστεί κατά τον εποπτικό έλεγχο του οδοστρώματος και σε περίπτωση έγκαιρης επέμβασης, να μην επηρεάσει έντονα τη δομική επάρκειά του.

#### 2.4.2.1 Επιτόπου προσδιορισμός (in-situ)

Η εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, κρίνεται απαραίτητη πριν το οδόστρωμα τεθεί σε λειτουργία. Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας επιτόπου (in-situ), απαιτείται η συνεκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του οδοστρώματος, όπως είναι τα πάχη των επιμέρους στρώσεων (h) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, δηλαδή τα μέτρα ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson ( $\nu$ ). Για ένα νέο οδόστρωμα οι παραπάνω παράμετροι καταγράφονται και ορίζονται ως δείκτες της αρχικής κατάστασής του. Δηλαδή, ως αρχική κατάσταση ορίζεται η επιτόπου φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, η οποία ενδεχομένως να διαφέρει από εκείνη του σχεδιασμού και της μελέτης σύνθεσης των μιγμάτων. Κατά την περιοδική παρακολούθηση του οδοστρώματος, κάθε νέα καταγραφή που θα πραγματοποιείται, συγκρίνεται με την αρχική κατάσταση και έτσι αξιολογείται η επάρκεια του οδοστρώματος τη δεδομένη χρονική περίοδο.

Είναι σαφές ότι ο προσδιορισμός των επιτόπου χαρακτηριστικών του οδοστρώματος ( $E_{in-situ}$  και  $h_{in-situ}$ ), έχει μεγάλη σημασία για τη συμπεριφορά του, τόσο για τη δεδομένη στιγμή όσο και για κάποια μεταγενέστερη. Συνεπώς, έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing – NDT), για την εκτίμηση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών. Το σύστημα γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar – GPR) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της στρωματογραφίας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος (εικόνα 2.7) και το σύστημα του παραμοφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD) για την εκτίμηση των μέτρων δυσκαμψίας των στρώσεων (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.7: Σύστημα γεωραντάρ (GPR)



Εικόνα 2.8: Τυπική διάταξη επιτόπου δομικού ελέγχου με το σύστημα FWD

Το γεωραντάρ (GPR) καταγράφει συνεχόμενα και με συνήθεις ταχύτητες κυκλοφορίας, τη στρωματογραφία ενός οδοστρώματος που πρακτικά οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων με σημαντική ακρίβεια. Η γνώση των παχών των στρώσεων είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της συμβολής των στρώσεων στη δομική αντοχή του οδοστρώματος (Λοΐζος και Πλατή, 2013γ). Η λειτουργία του συστήματος GPR βασίζεται στην επιστήμη της γεωφυσικής και στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD), καταγράφει τις ελαστικές υποχωρήσεις, μέσω αισθητήρων τοποθετημένων σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, που προκύπτουν από την πτώση σταθερού φορτίου υπό συγκεκριμένη συχνότητα. Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης που επιβάλλεται στο οδόστρωμα από την κυκλοφορία.

#### 2.4.2.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός (laboratory)

Ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτικών στρώσεων ενός υφιστάμενου οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε πυρήνες που λαμβάνονται επιτόπου. Ο εργαστηριακός έλεγχος απαιτεί τη λήψη πυρήνων επιτόπου στο οδόστρωμα, οι οποίοι στη συνέχεια μεταφέρονται στο εργαστήριο, όπου υποβάλλονται σε κατάλληλες δοκιμές (εικόνα 2.9). Από τους πυρήνες προσδιορίζεται ακριβώς το πάχος των επιμέρους ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος καθώς και το μέτρο δυσκαμψίας τους. Ωστόσο, οι πληροφορίες που λαμβάνονται για τη δομική κατάσταση του οδόστρωμα, η μέθοδος κρίνεται δύσχρηστη και χρονοβόρα. Συνεπώς, θα πρέπει οι εργαστηριακοί έλεγχοι να συνδυάζονται κατάλληλα με τις επιτόπου μετρήσεις από τα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT).



Εικόνα 2.9: Πυρηνοληψία και πυρήνες ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο

Με στόχο τον περιορισμό του αριθμού των πυρήνων που λαμβάνονται από το οδόστρωμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων που προσδιορίζεται επιτόπου από τα συστήματα NDT, με αυτό που προσδιορίζεται μέσω των εργαστηριακών δοκιμών. Η ανάγκη εύρεσης της σχέσης των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών έχει γίνει ακόμα πιο επιτακτική λόγω της εισαγωγής του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (Dynamic Modulus –  $|E^*|$ ) σαν παράμετρο αξιολόγησης του ασφαλτομίγματος αλλά και της συμπεριφοράς του.

Το δυναμικό μέτρο  $|E^*|$ , εισήχθη από τον Μηχανιστικό – Εμπειρικό οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, MEPDG) και 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. 2008, Hall 2010, Shen et al. 2012).

# 3. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

# 3.1 Εισαγωγή

Η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ως θεμελιώδες χαρακτηριστικό των ασφαλτομιγμάτων κρίθηκε απαραίτητη στα τέλη της δεκαετίας του '80. Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης ( $M_r$ ) 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, 2003). Ήδη από το 1962, είχε παρατηρηθεί αυτή η ιδιαιτερότητα του ασφαλτομίγματος σε σχέση με τα εδαφικά υλικά από τον Papazian, ο οποίος εφάρμοσε σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο ημιτονοειδής 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, 2003).

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος εκφράζεται από το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (*E*\*), το οποίο περιγράφει την επίδραση της συχνότητας φόρτισης και της θερμοκρασίας στη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος. Παρακάτω αναφέρονται οι μέθοδοι υπολογισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται, καθώς και τα πλεονεκτήματα χρήσης του.

### 3.2 Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας – ορισμός

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, 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). Παρακάτω αναπτύσσονται οι θεμελιώδεις έννοιες της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας (Ferry, 1980).

Για την περίπτωση μονοαξονικής φόρτισης ημιτονοειδούς μορφής, η τάση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = \sigma_o \cdot \sin(\omega \cdot t) \tag{3.1}$$

όπου:

 $\sigma_o$ : η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση (kPa), και

 $\omega$ : η γωνιακή ταχύτητα (rad/s), η οποία συνδέεται με την συχνότητα φόρτισης f (Hz) ως εξής:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{3.2}$$

Ενώ η προκύπτουσα παραμόρφωση δίνεται παρακάτω:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \tag{3.3}$$

όπου:

 $\varepsilon_o$ : η μέγιστη παραμόρφωση κατά την εφαρμογή της τάσης  $\sigma_o$ , και  $\delta$ : η γωνία υστέρησης.

Η γωνία υστέρησης εκφράζει τη διαφορά φάσης στην εμφάνιση της μέγιστης παραμόρφωσης από τη στιγμή της επιβολής της μέγιστης τάσης (εικόνα 3.1). Ουσιαστικά, αντιστοιχεί στην χρονική καθυστέρηση της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης η οποία προκύπτει μεταγενέστερα από τη στιγμή επιβολής της μέγιστης εφαρμοζόμενης τάσης (Huang, 1993). Η ύπαρξη της διαφοράς φάσης στα δύο αυτά μεγέθη εκφράζει την εξάρτηση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος από το χρόνο. Συνεπώς, λόγω της σύνδεσης χρόνου – συχνότητας μέσω της παρακάτω σχέσης (όπου για τις μονάδες μέτρησης ισχύει: t σε s και f σε Hz), προκύπτει η εξάρτηση του ασφαλτομίγματος από τη συχνότητα φόρτισης.



Εικόνα 3.1: Διαφορά φάσης τάσης – παραμόρφωσης στην ημιτονοειδή φόρτιση (Huang, 1993)

Παράλληλα, η γωνία υστέρησης αποτελεί δείκτη που εκφράζει τις ιδιότητες του υλικού. Συγκεκριμένα, για υλικά με ιξωδοελαστική συμπεριφορά, το εύρος της γωνίας υστέρησης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0° και 90°. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά φάσης μεταξύ των μεγίστων  $\sigma_o$  και  $\varepsilon_o$  βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο του ημιτονοειδούς κύκλου. Στις ακραίες περιπτώσεις, η γωνία  $\delta = 0^\circ$  αντιστοιχεί σε ένα καθαρώς ελαστικό υλικό και η γωνία  $\delta = 90^\circ$  αντιστοιχεί σε ένα καθαρώς ελαστικό υλικό και η γωνία  $\delta = 90^\circ$  αντιστοιχεί σε ένα καθαρώς ιξώδες υλικό.

Ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης προς την προκύπτουσα παραμόρφωση, κατά απόλυτη τιμή, ορίζει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Πιο αναλυτικά, τα επιμέρους μέρη του μιγαδικού αριθμού είναι:

το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο ανακτώμενο τμήμα της παραμόρφωσης κατά την αποφόρτιση του υλικού και εκφράζει την ελαστικότητα του:

$$E' = \frac{\sigma_o \cdot \cos\left(\delta\right)}{\varepsilon_o} \tag{3.5}$$

το μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στη μη ανακτήσιμη παραμόρφωση, αποτελεί το φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E'' = \frac{\sigma_o \cdot \sin(\delta)}{\varepsilon_o} \tag{3.6}$$

Εκφράζοντας την τάση και την παραμόρφωση κατά την επιβολή ημιτονοειδούς φόρτισης ως μιγαδικούς αριθμούς, οι σχέσεις (3.5) και (3.6) λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\sigma^* = \sigma_o \cdot e^{i\omega t} \tag{3.7}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \delta)} \tag{3.8}$$

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

$$E^*(i\omega) = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot e^{i\delta} = E' + i \cdot E''$$
(3.9)

Όπως ήδη αναφέρθηκε το πραγματικό μέλος του μιγαδικού αριθμού που αναπαριστά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, εκφράζει την ανακτήσιμη παραμόρφωση κατά την αποφόρτιση του υλικού, ενώ το φανταστικό τμήμα την μη ανακτήσιμη (παραμένουσα) παραμόρφωση. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι ουσιαστικά το μέτρο του μιγαδικού αριθμού.

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \tag{3.10}$$

Επομένως, κατά την εκτέλεση μίας δοκιμής προσδιορισμού του  $E^*$ , οι βασικές μεταβλητές εξόδου είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας  $|E^*|$  και η γωνία υστέρησης δ, η οποία είναι

ένας άμεσος δείκτης της ελαστικής – ιξώδους συμπεριφοράς τόσο του συνδετικού υλικού, όσο και του ασφαλτομίγματος. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι πως το δυναμικό μέτρο  $|E^*|$ εμφανίζει ομοιότητες με το σύνθετο μέτρο διατμήσεως  $G^*$  του συνδετικού υλικού. Σύμφωνα με πλήθος ερευνών (μεταξύ των οποίων το πρόγραμμα Strategic Highway Research Program – SHRP και Superpave System στο πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, στο Berkeley και στο πανεπιστήμιο Penn State), οι δύο συντελεστές  $E^*$  και  $G^*$  μπορούν θεωρητικά να συσχετιστούν με την παρακάτω σχέση της Μηχανικής (Dougan et al., 2003):

$$E^* = 2 \cdot (1+\nu) \cdot G^*$$
 (3.11)

όπου  $\nu$  ο λόγος του Poisson.

#### 3.3 Μέθοδοι υπολογισμού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών, ενώ υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησής του μέσω αλγορίθμων, οι οποίοι περιγράφουν την εξάρτηση του *E*<sup>\*</sup> από το χρόνο φόρτισης. Επιπλέον, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες με σκοπό τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου *E*<sup>\*</sup> των ασφαλτομιγμάτων μέσω επιφανειακών κυμάτων τύπου Rayleigh.

#### 3.3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Κατά τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου *E*\*, 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 (LVDTs). Το δυναμικό μέτρο προκύπτει ως ο λόγος του μεγέθους της επιβαλλόμενης τάσης προς τη μέση τιμή των ανακτήσιμων παραμορφώσεων, ενώ καταγράφεται και η γωνία υστέρησης (Robbins 2009, Clyne et al. 2003).

Περισσότερες πληροφορίες για την ακριβή μεθοδολογία του εργαστηριακού προσδιορισμού δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο, όπου περιγράφεται πλήρως η πειραματική διαδικασία.

#### 3.3.2 Προσδιορισμός μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης

Παρά την ακρίβεια που εξασφαλίζει η υπό μελέτη εργαστηριακή μέθοδος, η χρήση της δεν είναι πάντα εφικτή, λόγω του εξειδικευμένου εξοπλισμού που χρειάζεται, καθώς και του αυξημένου χρόνου που απαιτείται για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας. Ήδη από τη δεκαετία του 1950, είχαν αναπτυχθεί αλγόριθμοι πρόβλεψης της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μέσω των χαρακτηριστικών και της ογκομετρικής σύστασής του.

Ορισμένα από τα αρχικά μοντέλα πρόβλεψης του μέτρου *E*\* που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ο αλγόριθμος Van der Paul (1954) και το μοντέλο Bonnaure (1977), βάσει του οποίου προέκυψε το νομογράφημα Shell. Ακολούθησαν επιπλέον μοντέλα πρόβλεψης, τα οποία είχαν σαν στόχο την υποστήριξη πειραματικών δοκιμών. Καθένας από αυτούς τους αλγορίθμους πρόβλεψης εξελίχθηκε και διαφοροποιήθηκε από τον άλλον, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συντελεστές για την εκτίμηση του μέτρου *E*\*, και κατ' επέκταση προσδίδοντας διαφορετική ακρίβεια στα αποτελέσματά τους (Robbins, 2009). Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται διάφοροι αλγόριθμοι πρόβλεψης.

α/α	Αλγόριθμοι πρόβλεψης	Έτος έκδοσης
1	1 Van der Poel Model	
2	Bonnaure Model	1977
3	Shook and Kallas' Models	1969
4	Witczak's Early Model	1972
5	Witczak and Shook's Model	1978
6	Witczak's 1981 Model	1981
7	Witczak, Miller and Uzan's Model	1983
8	Witczak and Akhter's Models	1984
9	Witczak, Leahy, Caves and Uzan's Models	1989
10	Witczak and Fonseca's Model	1996
11	Andrei, Witczak and Mirza's Revised Model	1999
12	Hirsch Model of Christensen, Pellinen and Bonaquist	2003

**Πίνακας 3.1:** Αλγόριθμοι πρόβλεψης  $E^*$  (Bari and Witczak, 2006)

Από τους παραπάνω αλγόριθμους πρόβλεψης, οι πιο διαδεδομένοι είναι: ο αλγόριθμος του αναθεωρημένου μοντέλου των Andrei, Witczak, Mirza (1999) γνωστού και ως Witczak 1-37A Model, του Hirsch (2003) και του επίσης αναθεωρημένου Witczak 1-40D Model (2006).

Ο αλγόριθμος του Witczak 1-37Α, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\log E^{*} = -1,25 + 0,029 \cdot \rho_{200} - 0,0018 \cdot (\rho_{200})^{2} - 0,0028 \cdot \rho_{4} - 0,058 \cdot V_{a} - 0,00822 \cdot \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_{a}} + \frac{3,872 - 0,0021 \cdot \rho_{4} + 0,004 \cdot \rho_{38} - 0,000017 \cdot (\rho_{38})^{2} + 0,0055 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{[-0,603313 - 0,313351 \cdot \log(f) - 0,393532 \cdot \log(\eta)]}}$$
(3.12)

όπου:

 $E^*$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος ( $10^5$  psi),

 $\eta$ : το ιξώδες της ασφάλτου ( $10^6$  poise),

f: η συχνότητα φόρτισης (Hz),

 $ho_{200}$ : το διερχόμενο ποσοστό (%) κατά βάρος αδρανών από το κόσκινο Νο 200

 $ho_4$ ,  $ho_{34}$ ,  $ho_{38}$ : το αθροιστικό συγκρατούμενο ποσοστό (%) κατά βάρος αδρανών από τα κόσκινα N<sub>o</sub> 4, 3/4" και 3/8" αντίστοιχα,

 $V_a$ : το ποσοστό (%) κενών αέρος κατ' όγκο ασφαλτομίγματος,

 $V_{eff}$ : το ενεργό ποσοστό (%) της ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος.

Το ιξώδες της ασφάλτου προσδιορίζεται είτε εργαστηριακά (σχέση 3.13), είτε μέσω της σχέσης (3.14) που συνδέει το δυναμικό διατμητικό μέτρο της ασφάλτου με την αντίστοιχη γωνία υστέρησης (Robbins, 2009).

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS \cdot \log(T_R)$$
(3.13)

όπου:

η: το ιξώδες της ασφάλτου (centipoises, cP),

 $T_R$ : θερμοκρασία (Rankine),

Α, VTS: παράμετροι γραμμικής παλινδρόμησης

$$\eta = \frac{|G_b^*|}{10} \cdot (\frac{1}{\sin \delta_b})^{4,8628}$$
(3.14)

όπου:

 $|G_b^*|$ : το δυναμικό διατμητικό μέτρο της ασφάλτου (psi),  $\delta_b$ : η γωνία υστέρησης της διάτμησης (μοίρες).

Ο αλγόριθμος του Hirsch, περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$|E^*|_{mix} = P_c \cdot [4200000 \cdot \left(1 - \frac{VMA}{100}\right) + 3 \cdot |G^*_{\ b}|) \cdot \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000}\right)] + (1 - P_c)$$

$$\cdot \left(\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3 \cdot VFA \cdot |G^*_{\ b}|}\right)^{-1}$$
(3.15)

όπου:

 $|E^*|_{mix}$ : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (psi),

VMA: το ποσοστό (%) των κενών μεταξύ των αδρανών,

VFA: το ποσοστό (%) των κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο.

Η ποσότητα  $P_C$  ορίζεται σαν συντελεστής επαφής αδρανών και λαμβάνεται ως εξής:

$$P_{c} = \frac{(20 + \frac{VFA \cdot 3 \cdot |G_{b}^{*}|}{VMA})^{0,58}}{650 + (\frac{VFA \cdot 3 \cdot |G_{b}^{*}|}{VMA})^{0,58}}$$
(3.16)

Τέλος, ο αλγόριθμος του Witczak 1-40D, περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{split} \log E^* &= -0.349 + 0.754 \cdot (|G^*_{\ b}|)^{-0.0052} \cdot [6.65 - 0.032 \cdot \rho_{200} + 0.0027 \cdot (\rho_{200})^2 \\ &+ 0.011 \cdot \rho_4 \\ -0.0001 \cdot (\rho_4)^2 + 0.006 \cdot \rho_{38} - 0.00014 \cdot (\rho_{38})^2 - 0.08 \cdot V_a - 1.06 \cdot \frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}}] \\ &+ \frac{2.56 + 0.03 \cdot V_a + 0.71 \cdot \frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} + 0.012 \cdot \rho_{38} - 0.0001 \cdot (\rho_{38})^2 - 0.01 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{[-0.7814 - 0.5785 \cdot \log |G^*_{\ b}| + 0.8834 \cdot \log \delta_b)]} \end{split}$$
(3.17)

όπου:

 $E^*$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (psi),

δ<sub>b</sub>: η διατμητική γωνία υστέρησης της ασφάλτου (μοίρες),

 $ho_4$ ,  $ho_{34}$ ,  $ho_{38}$ : το αθροιστικό συγκρατούμενο ποσοστό (%) κατά βάρος αδρανών από τα κόσκινα N<sub>o</sub> 4, 3/4'' και 3/8'' αντίστοιχα,

 $V_a$ : το ποσοστό (%) κενών αέρος κατ' όγκο ασφαλτομίγματος,

 $V_{eff}$ : το ενεργό ποσοστό (%) της ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος.

#### 3.3.3 Προσδιορισμός μέσω επιφανειακών κυμάτων

Τα επιφανειακά κύματα τύπου Rayleigh αποτελούν μία μέθοδο εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας *E*\*, μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών. Η διαδικασία που ακολούθησαν oι Blaine και Burlot (1970) περιλαμβάνει αρχικά την πραγματοποίηση δοκιμών με μία δονούμενη ράβδο (light Goodman vibrator) σε ένα εύρος συχνοτήτων (20Hz – 20000Hz) και θερμοκρασιών (0°C – 40°C). Στη συνέχεια, μέσω των καμπυλών διασποράς ως προς την ταχύτητα (velocity) των κυμάτων και το μήκος τους (wavelength), καθώς και τις προεκτάσεις αυτών έως το σημείο μηδενισμού του μήκους κύματος, κατέστη δυνατή η σύνδεση των κυμάτων τύπου Rayleigh με το μιγαδικό μέτρο δυσκαμψίας. Σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό ήταν ο λόγος του Poisson. Σε παρόμοια έρευνα (Hochuli et al., 2001) επισημαίνεται η ανάγκη χρήσης κυμάτων σε διάφορα μήκη και συχνότητες λόγω της ανομοιομορφίας και της άμεσης επιρροής του ασφαλτομίγματος από τη θερμοκρασία (Clyne et al., 2003).

Μία τροποποιημένη εκδοχή της μετάδοσης κυμάτων με σκοπό την εκτίμηση του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτικού σκυροδέματος αλλά και των χαρακτηριστικών του, προτάθηκε από τους Dos Reis et al (1999). Με τη χρήση των αρχών της ανάλυσης των στατιστικών ενέργειας, αναπτύχθηκε μία μέθοδος βασισμένη σε μία συνάρτηση απόσβεσης ενέργειας – πυκνότητας ενός διάχυτου πεδίου κύματος με στόχο τον καθορισμό της «βέλτιστης μικροδομής» του ασφαλτικού σκυροδέματος (Dos-Reis et al. 1999, Clyne et al. 2003).

# 3.4 Παράγοντες επίδρασης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζεται άμεσα από την όποια μεταβολή στις δύο βασικές παραμέτρους, τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισής του. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας καθώς επίσης και η μείωση της συχνότητας προκαλούν μείωση του δυναμικού μέτρου (Bonnaure et al. 1977, Flintsch et al. 2007, Tashman and Elangovan 2007, Mohammad et al. 2007). Λόγω της σύστασης του ασφαλτομίγματος (άσφαλτος και αδρανή υλικά) είναι προφανές ότι οι ιδιότητες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που το συνθέτουν, επιδρούν στη δυσκαμψία του.

# 3.4.1 Επίδραση αδρανών

Πλήθος ερευνών έχει πραγματοποιηθεί με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των αδρανών που έχουν άμεση επίδραση στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Σύμφωνα με αυτές, η περιεκτικότητα των αδρανών στο ασφαλτόμιγμα αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιρροής. Συγκεκριμένα, τόσο η κατ' όγκο περιεκτικότητα των αδρανών στο μίγμα, όσο και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα κενά αέρος (εκφρασμένος σε ποσοστό %) σε αυτό, επηρεάζουν το δυναμικό μέτρο (Bonnaure et al., 1977). Επιπλέον, η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος, επιδρά καθοριστικά στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του (Mohammad et al., 2007). Αναλυτικότερα, τα ασφαλτομίγματα που αποτελούνται από αδρανή με μέγιστη ονομαστική διάμετρο 25 mm έχουν υψηλότερες τιμές του δυναμικού μέτρου 12,5 mm έως 19 mm. Αυτό οφείλεται στην καλύτερη αλληλοεμπλοκή μεταξύ των αδρανών μεγαλύτερης ονομαστικής διαμέτρου (Mohammad et al., 2007).

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα (Tashman and Elangovan, 2007), όπου παρασκευάστηκαν επτά μίγματα τα οποία διέφεραν ως προς τον τύπο και την προέλευση των αδρανών, παρατηρήθηκαν διαφορές στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας υπό τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης.

Επομένως, ο τύπος των αδρανών έχει επίσης σημαντική επίδραση στο δυναμικό μέτρο των ασφαλτομιγμάτων. Δοκιμές σε ασφαλτομίγματα όπου διέφερε μόνο ο τύπος του αδρανούς που είχε χρησιμοποιηθεί, παρουσίασαν διαφορές ως προς το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

Συγκεκριμένα, τα ασφαλτομίγματα που περιείχαν γρανίτη ή ανακυκλωμένη άσφαλτο ως αδρανή, εμφάνισαν μεγαλύτερες τιμές του δυναμικού μέτρου σε σχέση με τα μίγματα που περιείχαν ασβεστολιθικά αδρανή (Ping and Xiao, 2007).

### 3.4.2 Επίδραση ασφάλτου

Το ποσοστό της ασφάλτου που περιέχεται στο ασφαλτόμιγμα επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας του (Huang et al., 2007). Ειδικότερα, δοκιμές σε διάφορα ασφαλτομίγματα με τον ίδιο τύπο και κοκκομετρία αδρανών, αλλά με διαφοροποίηση στο ποσοστό της περιεκτικότητας ασφάλτου, είχαν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (Huang et al. 2007, Flintsch et al. 2007). Η αύξηση της περιεκτικότητας του συνδετικού υλικού στο ασφαλτόμιγμα οδηγεί σε μείωση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Αξίζει να αναφερθεί πώς η επιρροή του ποσοστού της ασφάλτου στη δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος είχε ήδη αναφερθεί προ πολλών ετών (Bonnaure et al., 1977).

Σε αρκετές χώρες, με στόχο τη μείωση του κόστους παραγωγής ασφαλτομίγματος από εξολοκλήρου νέα άσφαλτο, ως αδρανές υλικό, χρησιμοποιείται ανακυκλωμένη άσφαλτος (Recycled Asphalt Pavement – RAP). Η χρήση της ανακυκλωμένης ασφάλτου συμβάλλει τόσο στην εξοικονόμηση υλικού, αφού μειώνεται κατά πολύ η χρήση νέας ασφάλτου στο μίγμα, όσο και στην αύξηση της αντοχής του τελικού μίγματος. Η αύξηση της αντοχής του παραγόμενου με την χρήση ανακυκλωμένης ασφάλτου μίγματος, οφείλεται στην αυξημένη δυσκαμψία της συγκριτικά με τη νέα άσφαλτο (Mohammad et al., 2007).

# 3.5 Κεντρικές καμπύλες (master curves)

Οι κεντρικές καμπύλες περιγράφουν τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Πρόκειται για καμπύλες σιγμοειδούς μορφής που προκύπτουν από μία μη γραμμική συνάρτηση (Pellinen et al., 2002). Ο Witczak και οι συνεργάτες του ανέπτυξαν τη σιγμοειδή συνάρτηση με σκοπό να εκφράσουν τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε συνδυασμό με την πρόβλεψη της δυσκαμψίας του, μέσω των ογκομετρικών του χαρακτηριστικών αλλά και των ιδιοτήτων των υλικών που το συνθέτουν (Witczak and Fonseca, 1996).

Η κεντρική καμπύλη για ένα δεδομένο συνδυασμό στοιχείων, αναπτύσσεται με τη μετατόπιση των σημείων που απεικονίζουν τις τιμές του δυναμικού μέτρου προς τα δεξιά ή αριστερά, ανάλογα με το αν η θερμοκρασία δοκιμής είναι χαμηλότερη ή υψηλότερη από την επιλεγείσα θερμοκρασία αναφοράς. Αναλυτικότερα, κατά την κατασκευή μιας κεντρικής καμπύλης, τα σημεία που αναπαριστούν τις τιμές που προκύπτουν για θερμοκρασίες ελέγχου υψηλότερες από τη θερμοκρασία αναφοράς, μετατοπίζονται προς τα αριστερά (χαμηλότερες συχνότητες) και τα σημεία που απεικονίζουν τις τιμές εκείνες, που προκύπτουν για θερμοκρασίες ελέγχου χαμηλότερες από τη θερμοκρασία αναφοράς, μετατοπίζονται προς τα δεξιά (υψηλότερες συχνότητες). Τέλος, τα σημεία που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία αναφοράς παραμένουν αμετάβλητα (Clyne et al., 2004). Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται:

- i τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου  $E^*$  για διάφορες θερμοκρασίες,
- ii η κεντρική καμπύλη για θερμοκρασία αναφοράς 21,1 °C ( $T_{ref}$  = 21,1 °C)







**Εικόνα 3.2:** Τυπικές μορφές καμπυλών δυναμικού μέτρου (i) πριν την ενσωμάτωση και (ii) μετά την ενσωμάτωση σε μια ενιαία κεντρική καμπύλη (Lundy et al., 2005)

Μέσω της κεντρικής καμπύλης, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης. Επίσης, μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα από διαφορετικές δοκιμές, με διαφορετικές συνθήκες διεξαγωγής της δοκιμής (θερμοκρασία και συχνότητα).

Η μετατόπιση της καμπύλης που περιγράφηκε παραπάνω, μαθηματικά προσδιορίζεται με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ της μετρημένης και της προβλεπόμενης τιμής του δυναμικού μέτρου *E*\*. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων της σιγμοειδούς συνάρτησης. Για την ανάπτυξη της ζητούμενης σιγμοειδούς καμπύλης, η μορφή της συνάρτησης παρουσιάζεται στην επόμενη σχέση.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{\left[1 + e^{\beta - \gamma(\log f_r)}\right]}$$
(3.19)

όπου:

 $|E^*|$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (ksi),

 $\delta$ : η ελάχιστη τιμή του λογάριθμου του  $|E^*|$ ,

 $\delta$  + α: η μέγιστη τιμή του λογάριθμου του  $|E^*|$ ,

 $\beta$ ,  $\gamma$ : παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της σιγμοειδούς καμπύλης,

 $f_r$ : η μειωμένη συχνότητα (Hz).

Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς συνάρτησης για την ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας επιβεβαιώνεται από φυσικές παρατηρήσεις στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Το άνω άκρο της καμπύλης προσεγγίζει ασυμπτωτικά τη μέγιστη τιμή του δυναμικού μέτρου, όπου η δυσκαμψία του μίγματος δεσμεύεται από τα όρια της δυσκαμψίας του συνδετικού υλικού στις χαμηλές θερμοκρασίες. Στο κατώτερο άκρο της καμπύλης, για τις υψηλότερες θερμοκρασίες, η δυσκαμψία των αδρανών αποτελεί δείκτη της δυσκαμψίας του συνολικού μίγματος. Η παράμετρος γ επηρεάζει την κλίση της συνάρτησης (δηλαδή τον ρυθμό μεταβολής μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων τιμών), και η παράμετρος β επηρεάζει την οριζόντια θέση του σημείου καμπής (Lundy et al., 2005). Γραφικά, η λειτουργία των παραμέτρων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.3: Μορφή σιγμοειδούς καμπύλης (Pellinen et al., 2002)

Συμπερασματικά, ένα βασικό πλεονέκτημα της αναπαράστασης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω της κεντρικής καμπύλης, είναι η δυνατότητα προσδιορισμού της τιμής του για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Επομένως, κατά το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος καθίσταται δυνατή η θεώρηση του παράγοντα της ταχύτητας των οχημάτων (μέσω της συχνότητας φόρτισης). Επειδή ο χρόνος φόρτισης και η θερμοκρασία κατά τη φόρτιση ενδέχεται να εναλλάσσονται, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το δυναμικό μέτρο για οποιοδήποτε συνδυασμό συχνότητας και θερμοκρασίας που λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού του οδοστρώματος (Lundy et al., 2005).

#### 3.5.1 Προσδιορισμός του παράγοντα μετατόπισης

Η μετατόπιση που υφίστανται οι καμπύλες για θερμοκρασίες διαφορετικές της θερμοκρασίας αναφοράς ποσοτικοποιείται, προκειμένου να υπολογιστεί η μειωμένη συχνότητα ( $f_r$ ), που υπεισέρχεται στην εξίσωση της σιγμοειδούς καμπύλης. Η μειωμένη συχνότητα και ο παράγοντας μετατόπισης συνδέονται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$f_r = a(T) \cdot f \iff \log f_r = \log a(T) + \log f$$
 (3.20)

Από τη σχέση 3.4, προκύπτει επίσης:

$$t = a(T) \cdot t_r \tag{3.21}$$

Τα μεγέθη των παραπάνω σχέσεων είναι τα εξής:

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

*t*, *f*: χρόνος και συχνότητα φόρτισης για δεδομένη θερμοκρασία (s, Hz)

t<sub>r</sub>, f<sub>r</sub>: μειωμένος χρόνος και μειωμένη συχνότητα φόρτισης για δεδομένη θερμοκρασία (s, Hz)
 T: πειραματική θερμοκρασία (σε βαθμούς Fahrenheit).

Ο λογάριθμος του παράγοντα μετατόπισης συνδέεται με τη θερμοκρασία, μέσω ενός πολυωνύμου δευτέρου βαθμού, με σκοπό να εκφραστεί η άμεση επιρροή του μέτρου δυσκαμψίας από τη θερμοκρασία (Witczack and Bari, 2004):

$$\log \alpha(T_i) = a \cdot T_i^2 + b \cdot T_i + c \tag{3.22}$$

όπου:

 $\alpha(T_i)$ : παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T_i$ ,

Τ<sub>i</sub>: η εκάστοτε θερμοκρασία (σε βαθμούς Fahrenheit),

*a*, *b*, *c*: συντελεστές δευτεροβάθμιας εξίσωσης.

Οι συντελεστές της εξίσωσης 3.22 επιλύονται ταυτόχρονα με τις παραμέτρους της σιγμοειδούς καμπύλης (σχέση 3.19) κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στη θερμοκρασία αναφοράς, ο παράγοντας μετατόπισης είναι ίσος με μονάδα, εφόσον δεν απαιτείται

μετατόπιση και η συχνότητα δε χρειάζεται απομείωση. Συνεπώς, ο λογάριθμος της μετατόπισης (σχέση 3.22) μηδενίζεται στη θερμοκρασία αναφοράς.

Εναλλακτικά ο παράγοντας μετατόπισης μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των παρακάτω σχέσεων:

από την εξίσωση του Arrhenius (σχέση 3.23), η οποία χρησιμοποιείται αρκετά συχνά (Medani et al., 2003):

$$\log a_T = C \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right) \tag{3.23}$$

όπου:

Τ: η πειραματική θερμοκρασία (Κ), T<sub>ref</sub>: η θερμοκρασία αναφοράς (Κ), *C*: μια σταθερά (Κ).

Ενδεικτικές τιμές που δύναται να λάβει η σταθερά C, δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Ερευνητές	Τιμή σταθεράς C (K)
Lytton et al. (1993)	13060
Jacobs (1995)	7680
Francken et al. (1998)	10920

Πίνακας 3.2: Βιβλιογραφικές τιμές της σταθεράς C (Medani et al., 2003)

 από την εξίσωση των William – Landel – Ferry (1995), ή εν συντομία WLF εξίσωση (σχέση 3.24):

$$\log a_T = \frac{C_1 \cdot (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}}$$
(3.24)

όπου:

Τ: η πειραματική θερμοκρασία (Κ)

T<sub>ref</sub>: η θερμοκρασία αναφοράς (K)

*C*<sub>1</sub>, *C*<sub>2</sub>: αδιάστατες εμπειρικές σταθερές, με ενδεικτικές τιμές όπως στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.3: Βιβλιογραφικές τιμές των σταθερών C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> (Medani et al., 2003)

Ερευνητές-συγγραφείς	Τιμή σταθεράς C₁	Τιμή σταθεράς C₂
Sayegh (1967)	9,5	95
Lytton et al. (1993)	19	92
Σημειώνεται ότι οι σταθερές των εξισώσεων (3.23) και (3.24) μπορούν να εκτιμηθούν μαζί με τις παραμέτρους της σιγμοειδούς καμπύλης μέσω βελτιστοποίησης, χωρίς απαραίτητα να λάβουν εξαρχής συγκεκριμένη τιμή.

# 3.6 Εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ως δείκτη πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος

Η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης του μέτρου δυσκαμψίας  $E^*$ , για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος αποτελεί αντικείμενο πλήθους ερευνών. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος National Cooperative Highway Research Program – NCHRP (2002) αναπτύχθηκαν απλές δοκιμές ελέγχου του ασφαλτομιγμάτος (Simple Performance Test – SPT). Οι δοκιμές αποτελούνταν από δοκιμές δυσκαμψίας (stiffness tests), δοκιμές ελέγχου παραμόρφωσης (deformability tests) και δοκιμές ρηγμάτωσης (cracking tests). Η δυσκαμψία προσδιορίστηκε μέσω του  $E^*$  υπό την επιβολή θλιπτικής τάσης, μέσω μιας απλής δοκιμής διάτμησης (Simple Shear Test – SST) και μέσω υπερήχων διάδοσης κυμάτων (Clyne et al., 2003).

#### 3.6.1 Συσχέτιση με τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος

Πολυάριθμες δοκιμές σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας (complex modulus) πραγματοποιήθηκαν από τον Witczak και τους συνεργάτες του, με στόχο τη βελτίωση των προδιαγραφών ελέγχου της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης (fatigue cracking) του ασφαλτομίγματος. Για το λόγο αυτό, παρασκευάστηκαν δοκίμια σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές με σκοπό τη δημιουργία ενός μοντέλου κόπωσης, στο οποίο ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων ( $N_f$ ) που οδηγούν σε κόπωση, αποτελεί μία συνάρτηση της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_r$  (%) στον πυθμένα των ασφαλτικών και της απόλυτης τιμής του δυναμικού μέτρου  $E^*$  του ασφαλτομίγματος (Witczak et al. 2002, Clyne et al. 2003). Το μοντέλο ορίζεται ως εξής:

$$N_f = \beta_{f1} \cdot k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_r}\right)^{\beta_{f2} \cdot k_2} \cdot \left(\frac{1}{|E^*|}\right)^{\beta_{f3} \cdot k_3}$$
(3.25)

όπου οι σταθερές β<sub>fn</sub> και k<sub>n</sub> βαθμονομούνται ανάλογα με τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων μιγμάτων.

#### 3.6.2 Συσχέτιση με τις παραμένουσες παραμορφώσεις του ασφαλτομίγματος

Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας παρουσιάζει επίσης καλή συσχέτιση με την εμφάνιση μόνιμης παραμόρφωσης (τροχοαυλάκωσης - rutting) σε ασφαλτομίγματα. Κατόπιν δοκιμών, ο Witczak και οι συνεργάτες του (2006) εξέτασαν πέντε κυλινδρικά δοκίμια σε πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες και έξι διαφορετικές συχνότητες, καθώς και σε διάφορα επίπεδα φόρτισης. Σε

πρώιμο στάδιο εμφανίστηκαν θετικά αποτελέσματα συσχέτισης του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας με τη μόνιμη παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, οι Pellinen και Witczak (2006) πρότειναν τη θεώρηση του  $|E^*|$  για θερμοκρασία 54,4 °C και συχνότητα 5 Hz. Ωστόσο, σημειώνεται πως οι προκύπτουσες τιμές της παραμόρφωσης, θα πρέπει να παραμένουν μικρές, ώστε να διασφαλίζεται η θεωρία της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας στο δοκίμιο (Pellinen et al., 2002, Clyne et al., 2003).

# 4. ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

# 4.1 Εισαγωγή

Ως μη καταστρεπτικές μέθοδοι αναφέρονται εκείνες οι οποίες εφαρμόζονται σε υφιστάμενα οδοστρώματα για τη συλλογή στοιχείων χωρίς να έχουν καταστρεπτική επίδραση σε αυτά. Για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης υφιστάμενων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται εξελιγμένα μη καταστρεπτικά συστήματα (Non Destructive Testing – NDT) με σκοπό την επιτόπου συλλογή πληροφοριών ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υφιστάμενων μιγμάτων ενός οδοστρώματος.

Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των παραδοσιακών καταστρεπτικών δοκιμών, όπως για παράδειγμα η πυρηνοληψία. Η λήψη πυρήνων (που είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών) καταστρέφει τη δομή και την ομοιογένεια του οδοστρώματος και επιπλέον παρέχει σημειακή πληροφόρηση. Αντίθετα, τα συστήματα μη καταστρεπτικών μεθόδων έχουν τη δυνατότητα συνεχούς πληροφόρησης, χωρίς να πραγματοποιείται ιδιαίτερη όχληση της κυκλοφορίας.

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα συλλογής στοιχείων τα οποία διαφέρουν κυρίως ως προς τον τρόπο επιβολής του φορτίου (δυναμικό ή στατικό) επί του οδοστρώματος και της μεθοδολογίας καταγραφής των στοιχείων συλλογής. Ορισμένα από αυτά είναι η δοκός Benkelman (εικόνα 4.1α), το Road Rater (εικόνα 4.1β) και το Deflectograph (εικόνα 4.1γ). Επιπλέον, αρκετά διαδεδομένο σύστημα είναι το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος ελαφρού βάρους (Light Falling Weight Deflectometer – LWD) (εικόνα 4.1δ) το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των εδαφών και των ασύνδετων υλικών κατά τη φάση κατασκευής του οδοστρώματος.



Εικόνα 4.1α: Δοκός Benkelman



Εικόνα 4.1β: Road Rater



**Εικόνα 4.1γ**: Deflectograph



**Εικόνα 4.1δ**: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος ελαφρού βάρους (LWD)

Το πλέον εξελιγμένο σύστημα που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της αξιολόγησης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος είναι το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD) (εικόνα 4.2) το οποίο προσομοιώνει συνθήκες δυναμικής καταπόνησης και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο λόγω της ολοκληρωμένης μεθόδου συλλογής των επιτόπου στοιχείων.



Εικόνα 4.2: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται αναφορά στη διάταξη του συστήματος FWD καθώς και στη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού που εφαρμόζεται για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, μέσω των πληροφοριών που συλλέγονται με το σύστημα.

# 4.2 Σύστημα μέτρησης FWD

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος FWD συνίσταται στην πτώση καθορισμένου βάρους, δηλαδή ενός φορτίου που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος προσκρούει σε μία ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια δημιουργώντας παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Η διάρκεια της φόρτισης αυτής είναι συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec, ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό στο οποίο επιβάλλεται η φόρτιση. Έτσι, προσομοιάζεται σε μεγάλο βαθμό η πραγματική φόρτιση που αναπτύσσεται στο οδόστρωμα από τη διέλευση ενός τροχού. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η φόρτιση από τη διέλευση ενός τροχού. Ενδεικτικά περίπου 20 msec (Λοΐζος και Πλατή, 2013β). Το μέγεθος του φορτίου πρόσκρουσης μπορεί να μεταβληθεί, επιλέγοντας το κατάλληλο πίπτων βάρος ή/και αλλάζοντας το ύψος της πτώσης.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το σημείο επιβολής του φορτίου αλλά και σε προκαθορισμένες αποστάσεις από αυτό, όπου είναι κατάλληλα τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα – γεώφωνα, για την καταγραφή αυτών των ψευδοελαστικών υποχωρήσεων (*D<sub>i</sub>*). Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζεται σχηματική απεικόνιση του πίπτοντος βάρους, των γεωφώνων καθώς και μίας τυπικής κατανομής των υποχωρήσεων.



Εικόνα 4.3α: Σχηματική περιγραφή της συσκευής FWD



**Εικόνα 4.3β**: Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD) (Peckan et al., 2008)

Στην ακόλουθη εικόνα, η διαγραμμισμένη περιοχή αντιστοιχεί στη ζώνη εντός της δομής του οδοστρώματος που επηρεάζεται από την επιφανειακή φόρτιση. Περισσότερα για τη ζώνη επιρροής παρουσιάζονται σε επόμενο εδάφιο.



**Εικόνα 4.4**: Ζώνη επιρροής φορτίου από την εφαρμογή FWD (AASHTO Guide for design of Pavement Structures, 1986)

Η διάρκεια της επιβαλλόμενης φόρτισης, εξαρτάται από το σύστημα μέτρησης και το υλικό στο οποίο ασκείται η φόρτιση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πραγματική μορφή των

παλμών, όπως καταγράφονται από τα επιταχυνσιόμετρα, καθώς και η μορφή των υποχωρήσεων και της επιβαλλόμενης φόρτισης συναρτήσει του χρόνου, σε ενιαίο διάγραμμα με κατάλληλη κλίμακα (εικόνα 4.5). Είναι προφανές ότι στο επιταχυνσιόμετρο που μετρά την υποχώρηση ακριβώς στο σημείο της φόρτισης, αντιστοιχεί η καμπύλη με τη μεγαλύτερη τιμή. Επιπλέον, παρουσιάζεται η εξιδανικευμένη περίπτωση καταγραφής της φόρτισης από τα επιταχυνσιόμετρα (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.5: Πραγματική μορφή παλμικής φόρτισης και υποχωρήσεων με το σύστημα FWD (Turkiyyah, 2005)



Εικόνα 4.6: Ιδεατή παλμική φόρτιση και υποχωρήσεις (Turkiyyah, 2005)

Εκτός όμως από την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων, εξίσου σημαντική είναι και η συνεχής μέτρηση της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή (εικόνα 4.7). Συγκεκριμένα, το σύστημα του FWD καταγράφει τη θερμοκρασία του αέρα (σημείο 1) και της επιφάνειας του οδοστρώματος (σημείο 2), ενώ στο μέσο της ασφαλτικής στρώσης η καταγραφή γίνεται με τη χρήση ειδικού θερμομέτρου, διανοίγοντας μία μικρής διαμέτρου οπή στο οδόστρωμα (σημείο 3). Η μέτρηση της θερμοκρασίας κρίνεται απαραίτητη λόγω της άμεσης εξάρτησης των μηχανικών χαρακτηριστικών του ασφαλτομίγματος από αυτή.



Εικόνα 4.7: Μέτρηση θερμοκρασίας για το σύστημα του FWD

Τα παραπάνω στοιχεία (ελαστικές υποχωρήσεις και θερμοκρασία) αποτελούν (μαζί με άλλα) μεταβλητές εισόδου για όλες τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis), μέσω των οποίων γίνεται εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος και για τα οποία γίνεται εκτενής αναφορά σε επόμενο εδάφιο.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD) είναι τα ακόλουθα (Highways Department, 2009):

- μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου ικανοποιητικά σε όλους τους τύπους οδοστρωμάτων (εύκαμπτα, ημιάκαμπτα, δύσκαμπτα),
- η συχνότητα φόρτισης από το σύστημα, προσομοιώνει την πραγματική συχνότητα φόρτισης του οδοστρώματος από την κυκλοφορία και τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των ελαστικών παραμορφώσεων, των τάσεων και των ελαστικών υποχωρήσεων είναι δυνατόν να παρουσιάσουν μία αρκετά καλή σύγκλιση με τα αντίστοιχα πραγματικά μεγέθη,

- είναι δυνατή εκτίμηση της δυσκαμψίας των υποκείμενων στρώσεων ανεξάρτητα από την επιφάνεια της στρώσης όπου ασκείται η φόρτιση,
- μπορούν να διαφοροποιούνται ορισμένοι παράμετροι κατά την ανάλυση των ελαστικών υποχωρήσεων, ανάλογα με τα κατά τόπους υλικά οδοστρωσίας που χρησιμοποιεί κάθε χώρα,
- τέλος, η διεξαγωγή των δοκιμών, είναι μια απλή διαδικασία τόσο ως προς το περιορισμένο χρόνο περάτωσης της δοκιμής, όσο και ως προς τον τρόπο εκτέλεσής της. Σε περίπτωση οδοστρώματος που είναι σε φάση λειτουργίας, κατά τη διάρκεια της δοκιμής απαιτούνται ρυθμιστικά μέτρα για την ασφάλεια της κυκλοφορίας, εφόσον πρόκειται για μια στατική μέθοδο.

# 4.3 Ανάστροφος υπολογισμός

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 απόκρισής του υπό την επιβολή της φόρτισης. Τα επιτόπου στοιχεία, δηλαδή οι ελαστικές τιμές των υποχωρήσεων 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.

Ουσιαστικά, πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία στην οποία γίνεται σύγκριση των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων (measured deflections) με εκείνες που προέρχονται από την υπολογιστική διαδικασία μέσω προτύπων απόκρισης (calculated deflections). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτή, ενεργοποιείται ένας αλγόριθμος στον οποίο σαν δεδομένα εισόδου, περάν των προαναφερθέντων, δίνονται ενδεικτικές αρχικές τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων. 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 Ε 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. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.



Εικόνα 4.8: Τυπική διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Meier, 1995)



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού (Λοΐζος και Πλατή, 2013β)

Ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού απαιτεί ο έλεγχος της λύσης που προκύπτει, καθώς ενδέχεται να μην είναι μοναδική. Η μείωση του σφάλματος μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων υποχωρήσεων δεν εγγυάται την ορθότητα των μέτρων ελαστικότητας για την υπόψη θέση μελέτης. Εφόσον πρόκειται για την επιτόπου μηχανική συμπεριφορά των υλικών, απαιτείται ορθή κρίση μηχανικού προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητα και η επιστημονική αρτιότητα της λύσης που προκύπτει. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι σύμφωνα με πολλές έρευνες, η σύγκλιση των παραμορφώσεων που προκύπτουν από την υπολογιστική διαδικασία (back–analysis) βασιζόμενες στην ελαστική θεωρία, με τις αντίστοιχες που μετρούνται επιτόπου, είναι ικανοποιητική (Winters, 1993).

Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες προσομοίωσης της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού. Αν και όλες έχουν ως αντικειμενικό σκοπό την καλύτερη σύγκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων, διαφέρει ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αναπροσαρμογή των αποτελεσμάτων σε περίπτωση που η σύγκλιση δεν είναι αποδεκτή. Οι συμβατικές μεθοδολογίες βασίζονται στη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων και στη θεωρία του Boussinesq (1885), με παράλληλη προσομοίωση προτύπων βελτιστοποίησης. Στη νέα γενιά μεθοδολογιών ανάστροφου υπολογισμού αξιοποιείται η θεωρία των τεχνητών νευρωνικών στοιχείων (artificial neural network) και η θεωρία των γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms).

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση μίας συμβατικής μεθοδολογίας ανάστροφου υπολογισμού που βασίζεται στην ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων με τη χρήση της θεωρίας του Boussinesq υπό τους μετασχηματισμούς Odemark. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μία καινοτόμος μεθοδολογία που βασίζεται στη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων.

#### 4.3.1 Ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων

Η ελαστική θεωρία συστήματος πολλαπλών στρώσεων αποτελεί μία διαδεδομένη συμβατική μεθοδολογία βελτιστοποίησης της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού. Χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους υπολογισμού, την μέθοδο "Radius of Curvature" (προσαρμογή βάσει της ακτίνας καμπυλότητας) και την "Basin Fitting" (μέθοδος βέλτιστης προσέγγισης) που αναλύονται παρακάτω, εκτιμώνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος στη θέση μελέτης. Και οι δυο μέθοδοι βασίζονται στη θεωρία του Boussinesq υπό τους μετασχηματισμούς Odemark, προσομοιάζοντας τις στρώσεις του οδοστρώματος ως ημι–πεπερασμένες (η οριζόντια διάσταση απειρίζεται) ενώ η κατώτατη στρώση θεωρείται μη πεπερασμένη προς όλες τις διευθύνσεις.

#### 4.3.1.1 Γενικά στοιχεία

Το μέτρο ελαστικότητας που εκτιμάται από τον ανάστροφο υπολογισμό βάσει της υπόψη μεθοδολογίας, προκύπτει συναρτήσει της θερμοκρασίας των ασφαλτικών στρώσεων, ενώ για τα αδρανή υλικά των υποκείμενων στρώσεων, λαμβάνονται υπόψη οι εποχιακές συνθήκες της περιοχής μελέτης και ιδιαίτερα η υγρασία. Επιπλέον, πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αποτελεί η παραδοχή της μη γραμμικότητας κατά την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υποκείμενων στρώσεων (εδαφικών στρώσεων), καθώς λαμβάνεται υπόψη η πίεση που ασκούν οι υπερκείμενες στρώσεις με την αύξηση του βάθους. Αν και η παραδοχή αυτή δεν είναι απολύτως ορθή, κρίνεται αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη για να μην οδηγείται η υπολογιστική διαδικασία σε λανθασμένες εκτιμήσεις (Dynatest, 2001).

Το επιστημονικό υπόβαθρο που υιοθετήθηκε για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας, βασίζεται τόσο σε εμπειρικές εκτιμήσεις όσο και στον αναλυτικό σχεδιασμό. Οι εμπειρικές εκτιμήσεις προσδίδουν ιδιαίτερη βαρύτητα στον εκάστοτε προσδιορισμό, καθώς προέρχονται από ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρατηρήσεων, εισάγοντας την αποκτηθείσα εμπειρία των επιστημόνων στην αξιολόγηση της διαδικασίας. Ο αναλυτικός προσδιορισμός βασίζεται σε μαθηματικά πρότυπα, δίνοντας τη δυνατότητα αλλαγής των παραμέτρων και τον συνδυασμό αυτών, όταν οι συνθήκες φόρτισης διαφέρουν από δοκιμή σε δοκιμή. Συνδυαστικά, η ευελιξία των υπολογισμών που προέρχεται από τη αναλυτική προσέγγιση και η ορθολογιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μέσω της εμπειρικής μεθόδου, καθιστούν τα αποτελέσματα αρκετά αξιόπιστα (Dynatest, 2001).

Το τεχνικό υπόβαθρο αξιοποίησης των μετρημένων υποχωρήσεων από το σύστημα του FWD, περιγράφεται με τη χρήση ενός απλοποιημένου συστήματος στρώσεων και αριθμού γεωφώνων. Η βασική διαδικασία ανάλυσης της κατανομής των υποχωρήσεων βασίζεται στη θεωρία της ταχείας αύξησης της τάσης κάτω από την περιοχή φόρτισης, αυξανομένου του βάθους από την επιφάνεια. Επομένως, η υποχώρηση  $D_0$  που αντιστοιχεί στο σημείο επιβολής του φορτίου αντιπροσωπεύει τη συνολική κατάσταση του οδοστρώματος, στην οποία συμπεριλαμβάνονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων (ασφαλτικά, βάση/υπόβαση, έδραση) και η σχετική τους δυσκαμψία. Σε οριζόντια απόσταση από το κέντρο φόρτισης περίπου ίση με το πάχος των ασφαλτικών, η μετρημένη υποχώρηση, έστω  $D_1$ , αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση που επικρατεί στις υποκείμενες στρώσεις. Συνεπώς, εάν ληφθεί υπόψη η ποσότητα  $D_1 - D_0$ , τότε αυτή αντιστοιχεί στην υποχώρηση της στρώσης των ασφαλτικών. Άρα, γνωρίζοντας το μέτρο του επιβαλλόμενου φορτίου και της αντίστοιχης υποχώρησης που αυτό προκαλεί στην πρώτη στρώση, μπορεί να υπολογιστεί η ενεργή δυσκαμψία της (effective stiffness). Ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση των παραπάνω (εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Προφίλ υποχωρήσεων υπό την επιβολή φόρτισης από το FWD (Dynatest, 2001)

Αντίστοιχη ανάλυση πραγματοποιείται για να εκτιμηθεί η δυσκαμψία και των υπόλοιπων στρώσεων.

#### 4.3.1.2 Ελαστική θεωρία Boussinesq

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται η δημιουργία της υπόψη μεθοδολογίας, στηρίζεται στις θεωρίες του Boussinesq και του Odemark. Σύμφωνα με τον Boussinesq, θεωρώντας έναν ελαστικό, ομογενές και ισότροπο ημίχωρο που φορτίζεται στην επιφάνεια από ομοιόμορφα κατανεμημένο κυκλικό φορτίο, τα εντατικά μεγέθη σε ένα τυχόν σημείο που βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα z που διέρχεται από το κέντρο της φόρτισης, υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις και παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.11: Αναπτυσσόμενες τάσεις υπό την επιβολή κυκλικού φορτίου (Boussinesq, 1885)

Η κατακόρυφη τάση σ<sub>z</sub> (MPa) σε βάθος z (mm), με α (mm) την ακτίνα του κύκλου επαφής του ομοιόμορφου φορτίου και σ<sub>o</sub> (MPa) την τάση στην επιφάνεια επαφής, προκύπτει ως εξής:

$$\sigma_{z} = \sigma_{o} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\left( \sqrt{1 + \left(\frac{a}{z}\right)^{2}} \right)^{3}} \right)$$
(4.1)

Η ακτινική οριζόντια τάση  $\sigma_r$  (MPa) και η εφαπτομενική οριζόντια τάση  $\sigma_t$  (MPa), όπου  $\nu$  νοείται ο λόγος του Poisson:

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_o \cdot \left[ \frac{1+2\nu}{2} - \frac{1+\nu}{\sqrt{1+\left(\frac{\alpha}{z}\right)^2}} + \frac{1}{2 \cdot \left(\sqrt{1+\left(\frac{a}{z}\right)^2}\right)^3} \right]$$
(4.2)

Η κατακόρυφη παραμόρφωση σε βάθος z (mm), όπου E (MPa) το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του ημίχωρου:

$$\varepsilon_{z} = \frac{(1+\nu)\cdot\sigma_{o}}{E} \cdot \left[\frac{\frac{z}{a}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}}\right)^{3}} - (1-2\cdot\nu)\cdot\left(\frac{\frac{z}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}}} - 1\right)\right]$$
(4.3)

Η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση  $\varepsilon_r$  και η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση  $\varepsilon_t$ :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = \frac{(1+\nu)\cdot\sigma_o}{2\cdot E} \cdot \left[\frac{-\frac{z}{a}}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2}\right)^3} - (1-2\cdot\nu)\left(\frac{\frac{z}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^2}} - 1\right)\right]$$
(4.4)

και d<sub>z</sub> η υποχώρηση σε βάθος z (mm):

$$d_{z} = \frac{(1+\nu)\cdot\sigma_{o}\cdot\alpha}{E} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}}} + (1-2\cdot\nu)\cdot\left(\sqrt{1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}} - \frac{z}{a}\right)\right]$$
(4.5)

Αξίζει να σημειωθεί πως η κατακόρυφη τάση είναι ανεξάρτητη του μέτρου ελαστικότητας του υλικού του ημίχωρου, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις του *Boussinesq*. Επιπλέον, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που υπολογίζονται μειώνονται εκθετικά με την αύξηση του βάθους μελέτης *z*.

#### 4.3.1.3 Θεωρία ισοδύναμων στρώσεων κατά Odemark

Το 1949 η μέθοδος του Boussinesq μετασχηματίζεται υπό την εμπειρική θεώρηση του Odemark. Η μέθοδος μετασχηματισμού αναφέρεται ως μέθοδος ισοδύναμου πάχους κατά Odemark και βασίζεται στην παραδοχή ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κάτω από μία στρώση εξαρτώνται μόνο από τη δυσκαμψία της στρώσης αυτής. Αν το πάχος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson) μίας στρώσης μεταβληθούν αλλά η συνολική δυσκαμψία παραμένει σταθερή, τότε οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις κάτω από τη στρώση αυτή θα παραμείνουν σχεδόν αμετάβλητες.

Η θεωρία ισοδυναμίας συνιστάται για παράδειγμα στην ιδεατή μετατροπή δύο ελαστικών στρώσεων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (E και  $\nu$ ) σε μία ισοδύναμη ελαστική στρώση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υποκείμενης στρώσης. Συνεπώς, αν  $E_1$  το μέτρο ελαστικότητας της πρώτης στρώσης και  $E_2$  της δεύτερης, το πάχος της ισοδύναμης στρώσης με μέτρο ελαστικότητας  $E_2$ , δίνεται παρακάτω:

$$h_e = f \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \tag{4.6}$$

όπου f: διορθωτικός συντελεστής όπου για σύστημα δύο στρώσεων λαμβάνει την τιμή 0,9.

Η παραπάνω σχέση τροποποιείται στην περίπτωση περισσότερων από δύο στρώσεων, με τη βασική προϋπόθεση, η μετατροπή να γίνεται πάντοτε συναρτήσει της τελευταίας στρώσης (υπέδαφος) (Λοΐζος και Πλατή 2013α, Dynatest 2001). Συγκεκριμένα, για σύστημα πολλαπλών στρώσεων, η παραπάνω σχέση γενικεύεται ως εξής:

$$h_{i,n} = f_i \cdot \sum_{i=1}^{i=n-1} \left[ h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right]$$
(4.7)

Για σύστημα πολλαπλών στρώσεων, ο συντελεστής f λαμβάνει την τιμή 0,8, με εξαίρεση την πρώτη διαχωριστική επιφάνεια όπου η τιμή του διορθωτικού συντελεστή είναι 1,0.

Όπως προαναφέρθηκε, ενώ σαν βασική προϋπόθεση της συμβατικής μεθοδολογίας είναι ότι όλα τα υλικά θεωρούνται ομογενή, ισότροπα και γραμμικώς ελαστικά, δεν ισχύει το ίδιο για τη στρώση έδρασης, για την οποία δε διατηρείται η παραδοχή της γραμμικής ελαστικότητας. Το παραπάνω αποτελεί πλεονέκτημα της μεθοδολογίας, καθώς λαμβάνεται υπόψη η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του βάθους επηρεαζόμενο από την πίεση των υπερκείμενων στρώσεων και λαμβάνονται επίσης υπόψη, οι έντονες διαφοροποιήσεις στα επίπεδα υγρασίας των κατώτατων στρώσεων. Αν και δεν αποτελεί μια πλήρως ορθή προσέγγιση, οι υπολογισμένες υποχωρήσεις από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού προσεγγίζουν καλύτερα τις μετρημένες υποχωρήσεις, συγκριτικά με εκείνες που λαμβάνονται χωρίς την παραπάνω παραδοχή (Dynatest, 2001). Συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας της κατώτατης στρώσης δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$E_m = C \cdot \left(\frac{\sigma_1}{p}\right)^n \tag{4.8}$$

όπου:

 $E_m$ : το μέτρο ελαστικότητας στο σημείο μελέτης (*MPa*)  $\sigma_1$ : κύρια κατακόρυφη τάση στο σημείο μελέτης (*MPa*) p: τάση αναφοράς (ατμοσφαιρική πίεση 0,1 *MPa*) C, n: σταθερές (η σταθερά n λαμβάνεται ως αρνητική).

Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί στην περίπτωση δύο στρώσεων και της μη γραμμικής στρώσης υπεδάφους. Για να μπορέσει να γίνει εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας τεσσάρων στρώσεων, θα πρέπει να είναι γνωστός ο λόγος των δύο ενδιάμεσων στρώσεων (2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> στρώσης, *E*<sub>2</sub>/*E*<sub>3</sub>).

# 4.3.1.4 Μέθοδοι ανάλυσης ελαστικής θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων

Η εκτίμηση των ανάστροφα υπολογισμένων, στην περίπτωση της ελαστικής θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων, ελαστικών υποχωρήσεων πραγματοποιείται με την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων. Η πρώτη βασίζεται στην προσαρμογή των υπολογισμένων υποχωρήσεων στις μετρημένες βάσει της ακτίνας καμπυλότητας της κατανομής των μετρημένων υποχωρήσεων και αναφέρεται ως μέθοδος "*Radius of Curvature*". Η δεύτερη βασίζεται στη βέλτιστη προσέγγιση των μετρημένων υποχωρήσεων και αναφέρεται ως μέθοδος "*Basin Fitting*".

Η μέθοδος της ακτίνας καμπυλότητας (*Radius of Curvature*), αποτελεί την πρωταρχική μέθοδο υπολογισμού των υποχωρήσεων, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η κεντρική υποχώρηση ακριβώς κάτω από το σημείο επιβολής του φορτίου, καθώς και η ακτίνα καμπυλότητας όλων των μετρημένων υποχωρήσεων, για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των στρώσεων. Πιο αναλυτικά, η δυσκαμψία της στρώσης έδρασης υπό την παραδοχή της μη γραμμικότητας που αναφέρθηκε παραπάνω, υπολογίζεται μέσω των υποχωρήσεων που καταγράφονται από τα πιο απομακρυσμένα γεώφωνα. Στη συνέχεια, η ακτίνα καμπυλότητας των κεντρικών υποχωρήσεων αξιοποιείται για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των ανώτερων στρώσεων. Τέλος, η δυσκαμψία των στρώσεων που μεσολαβούν, υπολογίζεται από τη συνολική συμπεριφορά του οδοστρώματος στη θέση μελέτης υπό την επιβολή της φόρτισης (Dynatest, 2001).

Η μέθοδος της βέλτιστης προσέγγισης (Basin Fitting), βασίζεται στη σύγκριση της υπολογισμένης από τον ανάστροφο υπολογισμό κατανομής υποχωρήσεων, με τις αντίστοιχες μετρημένες υποχωρήσεις από το σύστημα του FWD. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία επαναληπτική διαδικασία που στοχεύει στην καλύτερη δυνατή σύγκλιση των δύο ειδών υποχωρήσεων. Συγκεκριμένα, για την έναρξη της διαδικασίας, εισάγεται από τον χειριστή – αναλυτή ένα ενδεικτικό μέτρο ελαστικότητας για τις υπόψη στρώσεις του οδοστρώματος. Στη συνέχεια, υπολογίζεται μία ιδεατή κατανομή υποχωρήσεων η οποία συγκρίνεται με την πραγματική κατανομή και ελέγχεται η τιμή του σφάλματος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα, ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλεται ελαφρώς το μέτρο ελαστικότητας σε ποσοστό 1% από το αρχικά εκτιμώμενο. Ως αποδεκτή, λαμβάνεται η κατανομή με το μικρότερο σφάλμα (Dynatest, 2001).

Το σφάλμα που απαιτείται για τη παραπάνω σύγκριση, προσδιορίζεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης της Ρίζας της Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης (Root Mean Square), που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

45

$$RMS = \sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_{i}^{c} - d_{i}^{m}}{d_{i}^{m}}\right)^{2}\right]}$$
(4.9)

όπου:

n: ο αριθμός των επιταχυνσιομέτρων – γεωφώνων,

 $d_i^c$ : η υπολογισμένη τιμή της υποχώρησης για το i επιταχυνσιόμετρο – γεώφωνο, και

 $d_i^m$ : η μετρημένη τιμή της υποχώρησης για το i επιταχυνσιόμετρο – γεώφωνο.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί πως η παραπάνω συμβατική μεθοδολογία απαιτεί γνώση και εμπειρία από το χρήστη, καθώς διαφορετικοί συνδυασμοί δυσκαμψίας των επιμέρους στρώσεων, μπορεί να οδηγήσουν σε όμοια κατανομή υποχωρήσεων χωρίς να υπάρχει εμφανής διαφοροποίηση. Επομένως, θα πρέπει να εισάγεται μία ρεαλιστική τιμή ελαστικού μέτρου, ως αρχική τιμή για την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας.

#### 4.3.1.5 Αξιολόγηση ανάλυσης ανάστροφου υπολογισμού

Η διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (backcalculation procedure), αποτελεί αντικείμενο ερευνών για περισσότερο από 40 έτη. Αποτέλεσμα αυτών είναι οι πολυάριθμες κλασικές μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού, καθώς και η προσπάθεια αξιολόγησης και εξέλιξής τους. Καταλυτική παράμετρος σε όλες τις μεθοδολογίες αποτελεί η εισαγωγή ενός αρχικού μέτρου ελαστικότητας ως τιμή εκκίνησης της διαδικασίας (seed modulus), που αν και αποτελεί υποθετική παράμετρο (assuming parameter), προϋποθέτει την εμπειρία του χρήστη με σκοπό τη ρεαλιστικότερη προσέγγιση της κατάλληλης τιμής του. Συνεπώς, προκύπτει διαχειριστική δυσκολία στη χρήση των μεθοδολογιών αυτού τύπου και δημιουργούνται προκλήσεις για τους χρήστες μηχανικούς (Alkasawneh, 2007). Τα βασικότερα μειονεκτήματα που εντοπίζονται στη χρήση αυτών των συμβατικών μεθοδολογιών ανάστροφου υπολογισμού αφορούν στη σύγκλιση και στην ακρίβεια της προτεινόμενης λύσης, καθώς και στο πλήθος των στρώσεων του οδοστρώματος που μελετάται.

Η σύγκλιση εκφράζεται με την αντικειμενική συνάρτηση *RMS* (σχέση 4.9) με βάση την οποία ελέγχονται οι τιμές των υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων, σε σχέση με τις επιτόπου μετρημένες. Γι αυτό και η επιλογή του αρχικού – υποθετικού μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων επιδρά άμεσα στην τιμή του RMS. Η ύπαρξη διαφορετικών τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται μη μοναδικότητα της προτεινόμενης λύσης. Η πολυτροπική διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, επηρεάζεται όπως είναι φυσικό από την ύπαρξη τοπικών ακρότατων στο πεδίο μελέτης. Τα τοπικά ακρότατα, είναι δυνατόν να προσεγγίζουν την επιθυμητή τιμή του μέτρου ελαστικότητας, όσο και να απέχουν κατά πολύ από αυτή, δημιουργώντας κατά αυτό τον τρόπο έλλειψη ακρίβειας (Alkasawneh, 2007).

Σχετικά με το πλήθος των στρώσεων του υπό μελέτη οδοστρώματος, δυσκολίες εμφανίζονται κατά τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας σε οδοστρώματα με περισσότερες από πέντε στρώσεις. Την ίδια στιγμή, οι οδηγίες συνιστούν θεώρηση συστημάτων με τρεις το πολύ στρώσεις προκειμένου να ελαχιστοποιείται το σφάλμα που προκύπτει κατά την εκτέλεση του ανάστροφου υπολογισμού (Pan et al., 2012).

Σε μία προσπάθεια υπέρβασης των δυσκολιών που παρουσιάζουν οι συμβατικές μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού, η χρήση των γενετικών αλγορίθμων φαίνεται να ξεπερνά τα συγκεκριμένα εμπόδια.

# 4.3.2 Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic algorithms)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) βασίζονται στη θεωρία του Δαρβίνου όπου διατυπώνεται η μηχανική της γενετικής, καθώς και της φυσικής επιλογής (Holland 1975, Goldberg 1989). Οι γενετικοί αλγόριθμοι αναζητούν την ιδανικότερη λύση ελέγχοντας ολόκληρο το πεδίο αναζήτησης της αντικειμενικής συνάρτησης με τη χρήση ελεγχόμενων τεχνικών τυχαίας αναζήτησης. Η ικανότητα των σωματιδίων της φύσης να αναπροσαρμόζουν τις ιδιότητες τους στο περιβάλλον που βρίσκονται, αξιοποιείται από τους αλγόριθμους αυτούς. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται τυχαία επιλογή της λύσης με βάση τη φυσική επιλογή και των ιδιοτήτων εξέλιξης των δεδομένων μέσω της μετάλλαξης και της διασταύρωσής τους, διαδικασίες που αναλύονται παρακάτω.

# 4.3.2.1 Γενικά στοιχεία

Το θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων (Γ.Α.) έχει τις ρίζες του στη θεωρία της εξέλιξης των σωματιδίων εμπνευσμένη από τον κλάδο της βιολογίας, όπου οι Γ.Α. εμφανίζουν πέντε βασικές ιδιότητες στις οποίες στηρίζεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού: τη δημιουργία του πληθυσμού, την αξιολόγηση, την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Αρχικά, δημιουργούνται πολλαπλοί πληθυσμοί αποτελούμενοι από ανεξάρτητα μεταξύ τους άτομα χρωμοσωμάτων (εικόνα 4.12), καθένα από τα οποία προέρχεται από μία σειρά παραμέτρων (alleles) και μπορεί να αποτελεί τη λύση της διαδικασίας. Συνεπώς, αξιολογείται ο βαθμός καταλληλότητας τους (fitness value), δηλαδή κατά πόσο αυτός ο συνδυασμός ατόμων μπορεί να αναπαραστήσει ιδανικά την επιθυμητή λύση.



**Εικόνα 4.12**: Γραφική απεικόνιση θεμελιωδών εννοιών στους γενετικούς αλγορίθμους (KSCE Journal of Civil Engineering, Reddy et al. 2004)

Για να γίνει όμως δυνατή η σύγκριση των χρωμοσωμάτων, αξιοποιήθηκε η θεωρία του σχήματος (schema theory) κατά την οποία γίνεται μία μαθηματική προσέγγιση της λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων (Holland, 1975). Συγκεκριμένα, κάθε χρωμόσωμα συνθέτεται από την ένωση διαφορετικών σειρών από δυαδικά ψηφία (0 ή 1), προσδίδοντάς του διαφορετικά χαρακτηριστικά, δηλαδή για κάθε αλλαγή ενός και μόνο ψηφίου μπορεί να προκύψει μία νέα συμβολοσειρά και έπειτα να γίνει ένωση με άλλες και να προκύψει ένα νέο χρωμόσωμα. Συνεπώς, το σχήμα είναι ένα πρότυπο ομοιότητας, το οποίο φανερώνει τις διαφορές των χρωμοσωμάτων που προκύπτουν από την ίδια αρχική συμβολοσειρά, εντός του ίδιου πληθυσμού (Holland 1975, Goldberg 1989).



Εικόνα 4.13: Παράδειγμα δημιουργίας σχήματος (Alkasawneh, 2007)

Τα χρωμοσώματα που κρίνονται ως καταλληλότερα αναπαράγονται μέσω διασταύρωσης με άλλα ανεξάρτητα χρωμοσώματα από τον ίδιο πληθυσμό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων χρωμοσωμάτων – γόνων (offsprings) που διατηρούν αρκετά από τα χαρακτηριστικά των αρχικών (parents) (εικόνα 4.14). Τα λιγότερο κατάλληλα χρωμοσώματα έχοντας λιγότερες πιθανότητες διασταύρωσης, απορρίπτονται από τον πληθυσμό.



**Εικόνα 4.14**: Διασταύρωση ιδανικών χρωμοσωμάτων για τη παραγωγή νέων –Crossover (Tutumluer et al., 2009)

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία ενός νέου πληθυσμού με περισσότερες πιθανές λύσεις για το πρόβλημα μελέτης, με τα καλύτερα χαρακτηριστικά του προηγούμενου πληθυσμού αλλά και με την αξιοποίηση των χαρακτηριστικών εκείνων των ατόμων που δεν κατατάσσονταν στις «ιδανικές» λύσεις του συστήματος μελέτης. Έπειτα από αρκετές επαναλήψεις προκύπτει τελικά μία νέα γενιά ατόμων με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

#### 4.3.2.2 Ιδιότητες γενετικών αλγορίθμων

Με τα όσα αναφέρθηκαν ως τώρα, διαφαίνεται ότι ο ορθός σχεδιασμός του αρχικού πληθυσμού είναι πολύ σημαντικός, ώστε η τελική γενιά να συγκλίνει με επιτυχία στη βέλτιστη λύση. Συνεπώς, η επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους έχει βαρύνουσα σημασία στη βελτιστοποίηση της λύσης με τη χρήση της υπόψη μεθοδολογίας. Με την έννοια παράμετροι, ορίζονται οι πιθανότητες και τα όρια που θέτονται για κάθε μία από τις λειτουργίες των γενετικών αλγορίθμων που αναφέρθηκαν παραπάνω και εξαρτώνται από τις επιλογές του χρήστη του συστήματος. Ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας (εικόνα 4.15), καθώς και η επεξήγηση των λειτουργιών.



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγορίθμου (Raich, 1999)

Οι λειτουργίες στις οποίες στηρίζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των γενετικών αλγορίθμων είναι οι παρακάτω (Pekcan et al., 2008):

- Αρχικός πληθυσμός συμβολοσειρών (Initialization): Το μέγεθος του πληθυσμού καθορίζεται από τον χρήστη, χωρίς να υπάρχουν συγκεκριμένες συστάσεις. Η επιλογή ενός αρκετά ευρύ πληθυσμού μπορεί να μετατρέψει σε χρονοβόρα την όλη διαδικασία, ενώ ένα μικρό εύρος ατόμων (συμβολοσειρών) μπορεί να οδηγήσει σε τοπικά ακρότατα ως λύσεις του συστήματος.
- 2. Αξιολόγηση βαθμού καταλληλότητας (Fitness evaluation): Πριν την εκτέλεση της διαδικασίας θα πρέπει να γίνεται σαφής προσδιορισμός της επιθυμητής λύσης καθώς και των κριτηρίων σύγκλισης, ώστε να μπορούν να αξιολογούνται με βάση αυτά, όλα τα άτομα (χρωμοσώματα) του πληθυσμού. Μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια από τον υπάρχον πληθυσμό, παράγεται μία επιπλέον γενιά χρωμοσωμάτων που προσεγγίζει όλο και περισσότερο τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

- 3. Επιλογή (Selection): Αφού γίνει αξιολόγηση των ατόμων, επιλέγονται εκείνα τα χρωμοσώματα με τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά που προσεγγίζουν περισσότερο την «ιδανική» λύση. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στη συνέχεια τη δημιουργία της επόμενης γενιάς αξιοποιώντας τα καλύτερα χαρακτηριστικά της προγενέστερης. Ενδεικτικά κάποια από τα μηχανιστικά μοντέλα επιλογή και η επιλογή με βάση την κατάταξη.
- 4. Διασταύρωση (Crossover) : Σε αυτό το στάδιο δύο ή περισσότερες συμβολοσειρές από αυτές που έχουν επιλεχθεί, συνδυάζονται για τη δημιουργία νέων γόνων (offsprings), που θα αποτελέσουν τα στοιχεία της νέας γενιάς χρωμοσωμάτων. Η νέα γενιά διατηρεί τα καλύτερα από τα χαρακτηριστικά της προηγούμενης αξιοποιώντας τα πιο ιδανικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων χρωμοσωμάτων της προγενέστερης (parents).
- 5. Μετάλλαξη (Mutation): Παράλληλα με τη διαδικασία της διασταύρωσης των στοιχείων που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά, πραγματοποιείται και αναπροσαρμογή των συμβολοσειρών εκείνων που δεν έχουν επιλεχθεί στο βήμα 3, με σκοπό να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τους και να μπορούν να συμμετέχουν και αυτά στη διαδικασία διασταύρωσης.



Εικόνα 4.16: Διαδικασία Μετάλλαξης Γόνων – Mutation (Tutumluer et al., 2009)

Οι παραπάνω λειτουργίες προσδίδουν διαφορετικότητα στους γενετικούς αλγορίθμους σε σχέση με άλλες διαδικασίες βελτιστοποίησης στα ακόλουθα σημεία (Goldberg 1989):

- η επεξεργασία των παραμέτρων γίνεται αφότου αποκωδικοποιηθούν και όχι με τη μορφή που εισάγονται,
- τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αποτελούνται από έναν πληθυσμό λύσεων και όχι από μία μεμονωμένη λύση,
- χρησιμοποιούνται πληροφορίες για τα δεδομένα που προέρχονται από τα ίδια τα δεδομένα, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων πληροφοριών,

οι λειτουργίες των Γ.Α διενεργούνται με βάση πιθανολογικά μοντέλα, και όχι με αυστηρά μοντέλα που προκαθορίζουν τους ρυθμούς διεξαγωγής τους ανεξαρτήτως της φύσης του προβλήματος.

Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ιδιότητες των γενετικών αλγορίθμων, αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες βελτιστοποίησης της διαδικασίας εύρεσης του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων των οδοστρωμάτων.

#### 4.3.2.3 Μεθοδολογία ανάστροφου υπολογισμού γενετικών αλγορίθμων

Η μεθοδολογία που αξιοποιεί τις λειτουργίες των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ένα εύχρηστο καινοτόμο εργαλείο που μπορεί να εκτιμήσει το μέτρο ελαστικότητας πολλαπλών στρώσεων ενός οδοστρώματος, χωρίς περιορισμό στο πλήθος τους, στο μέγεθος της φόρτισης από το σύστημα του FWD και στο πλήθος των γεωφώνων καταγραφής των ελαστικών υποχωρήσεων. Επιπλέον, μπορεί να εκτιμήσει τα πάχη των στρώσεων χωρίς χρονική επιβάρυνση της διαδικασίας, όπως θα συνέβαινε στη περίπτωση των υπολοίπων συμβατικών μεθοδολογιών ανάστροφου υπολογισμού.

Για την εκτέλεση του ανάστροφου υπολογισμού γίνεται συνδυασμός μίας μεθοδολογίας που βασίζεται στην ελαστική θεωρία και τους ανεπτυγμένους γενετικούς αλγόριθμους, που εξελίσσουν τα όσα αναφέρθηκαν ήδη για τους απλούς γενετικούς αλγορίθμους. Έτσι η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού μπορεί να ξεκινήσει δίνοντας κάποιες βασικές παραμέτρους, που είναι ο λόγος του Poisson για κάθε στρώση, οι μετρημένες υποχωρήσεις, οι ακριβείς θέσεις όπου τοποθετήθηκαν τα γεώφωνα, η γεωμετρία του φορτίου που επιβάλλεται, το μέγεθος της φόρτισης και τέλος ένα εύρος τιμών μέτρου ελαστικότητας και πάχους της εκάστοτε στρώσης. Τέλος, πολύ σημαντικός είναι και ο προκαθορισμός των πιθανοτήτων εκτέλεσης των λειτουργιών των γενετικών αλγορίθμων που ενσωματώνει η υπόψη μεθοδολογία (Pan et al., 2012). Ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα των εισερχόμενων παραμέτρων στη συγκεκριμένη μεθοδολογία.



Εικόνα 4.17: Δεδομένα εισόδου γενετικών αλγορίθμων (Pan et al., 2012)

Εκτός όμως από τις παραμέτρους εισαγωγής, είναι πολύ βασικό να οριστεί το κριτήριο σύγκρισης των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων με τις υπολογισμένες από τον ανάστροφο υπολογισμό αυτής της μεθοδολογίας, όπως συμβαίνει άλλωστε και στις συμβατικές μεθοδολογίες. Στην παρούσα όμως μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων εισάγεται μία νέα αντικειμενική συνάρτηση με σκοπό να καλυφθούν οι αδυναμίες των προηγούμενων συναρτήσεων. Συγκεκριμένα, η αντικειμενική συνάρτηση της Ρίζας της Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης *RMS* (σχέση 4.9), παρουσιάζει ευαισθησία στα λάθη που μπορεί να υπάρχουν στις μετρημένες (πραγματικές) υποχωρήσεις (Pan et al., 2012). Ως εκ τούτου, εισάγεται μία νέα αντικειμενική συνάρτηση που διατηρεί την ακρίβεια της, ακόμα και αν υπάρχουν τυχαία και συστηματικά σφάλματα κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών με το FWD (Pan et al., 2012). Η νέα συνάρτηση είναι η *AVCF* (*Area Value with Correction Factor*) και δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν (Pierce, 1999):

$$AVCF = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{A_k^c - A_k^m}{A_k^m} \right)^2 \right\}^{1/2} + \left| \frac{d_1^c - d_1^m}{d_1^m} \right|$$
(4.10)

όπου:

- k: το πλήθος των αισθητήρων (γεωφώνων),
- και d<sup>c</sup><sub>1</sub> και d<sup>m</sup><sub>1</sub>: η υπολογισμένη και η μετρημένη ελαστική υποχώρηση στη θέση του πρώτου αισθητήρα (γεωφώνου), δηλαδή στη θέση επιβολής της φόρτισης, και

A<sup>c</sup><sub>k</sub> και A<sup>m</sup><sub>k</sub>: είναι οι υπολογισμένες και οι μετρημένες περιοχές καταλληλότητας. Η περιοχή καταλληλότητας δίνεται από τη σχέση:

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} (d_i + d_{i+1})(r_{i+1} - r_i)}{2d_i}, \qquad (k \le n)$$
(4.11)

όπου  $d_i$  είναι η ελαστική υποχώρηση που καταγράφει ο αισθητήρας (γεώφωνο) i και  $r_i$  η απόσταση μεταξύ του σημείου επιβολής της φόρτισης από τον αισθητήρα i.

Σημειώνεται ότι η εξίσωση 4.10 περιλαμβάνει δύο όρους με ιδιαίτερη σημασία που καθιστούν δημοφιλή τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης *AVCF*. Ο πρώτος όρος, έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση και αποδυνάμωση των συστηματικών και τυχαίων λαθών που συμβαίνουν κατά τις μετρήσεις και λαμβάνει υπόψη την απόκλιση σε κάθε γεώφωνο. Ο δεύτερος όρος λειτουργεί σαν διορθωτικός συντελεστής που αναπροσαρμόζει την ανάστροφα υπολογισμένη υποχώρηση στο κέντρο φόρτισης με βάση τη μετρημένη (Pan et al., 2012). Όσο πιο μικρή τιμή έχει ο δεύτερος όρος, τόσο πιο ικανοποιητική είναι η λύση. Στην ιδανική περίπτωση που η υπολογισμένη υποχώρηση στο κέντρο της φόρτισης (πρώτο γεώφωνο) είναι ίση με την αντίστοιχη μετρημένη, ο δεύτερος όρος μηδενίζεται.

# 5. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

# 5.1 Γενικά στοιχεία

Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από μετρήσεις που πραγματοποίησε το Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ στο υπό μελέτη οδόστρωμα. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται τα στάδια της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η διαδικασία των επιτόπου μετρήσεων των ελαστικών υποχωρήσεων από το σύστημα του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD), καθώς και τα βασικά σημεία των μεθόδων ανάστροφου υπολογισμού. Στη συνέχεια, περιγράφεται η μεθοδολογία του εργαστηριακού προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με το σύστημα Nottingham Asphalt Tester (NAT) σε πυρήνες από το εν λόγω οδόστρωμα.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών FWD και GPR σε νεοκατασκευασθέν οδόστρωμα οδικού τμήματος.



Εικόνα 5.1: Πρόσφατα κατασκευασμένος οδικός άξονας για συλλογή στοιχείων

Η ενιαία τυπική διατομή που αντιπροσωπεύει όλες τις θέσεις του υπόψη οδοστρώματος που ελέγχθηκαν, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Διατομή μελέτης (εύκαμπτου οδοστρώματος)

Στην υπό μελέτη διατομή, η αντιολισθηρή στρώση στην επιφάνεια είναι ημιανοικτού τύπου (ΤΣΥ), με άσφαλτο διεισδυτικότητας 80/100 Pen και το τροποποιητικό SBS που χρησιμοποιήθηκε είναι σε ποσοστό 4% κατά βάρος ασφαλτομίγματος. Η ισοπεδωτική στρώση και η ασφαλτική βάση είναι ίδιας σύνθεσης τύπου A265 B με άσφαλτο 50/70 Pen (ΠΤΠ).

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επιτόπου στο οδόστρωμα περιλαμβάνουν τη συλλογή των παρακάτω στοιχείων:

- την καταγραφή της στρωματογραφίας, δηλαδή τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος (ασφαλτικής στρώσης, ενιαίας στρώσης βάσης – υπόβασης), τα οποία προσδιορίζονται μέσω του μη καταστρεπτικού συστήματος GPR,
- την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων με τη χρήση της μη καταστρεπτικής διάταξης του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD),
- τη μέτρηση της θερμοκρασίας του μέσου των ασφαλτικών στρώσεων διαμέσου μικρής οπής που διανοίγεται στο οδόστρωμα, παράλληλα με την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία στις ασφαλτικές στρώσεις, στις ίδιες ακριβώς θέσεις ελέγχου που έγιναν οι δοκιμές με το FWD, προκειμένου οι πυρήνες να μεταφερθούν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ για περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση. Η λήψη πυρήνων επιπλέον, επιβεβαιώνει με ακρίβεια το πάχος της ασφαλτικής στρώσης.

Τα στοιχεία των ελαστικών υποχωρήσεων, τα πάχη και η θερμοκρασία αποτελούν μαζί με άλλα, δεδομένα εισόδου για τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας. Κατόπιν ολοκλήρωσης των επιτόπου δοκιμών, οι πυρήνες που ελήφθησαν από την πυρηνοληψία υποβλήθηκαν σε εργαστηριακή δοκιμή, με βάση το πρότυπο T3 42-11 (AASHTO 2011) για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

# 5.2 Μετρήσεις FWD

Στο νέο οδικό άξονα πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δοκιμές σε 20 θέσεις ελέγχου με το σύστημα FWD, σύμφωνα με το ενδεικτικό σκαρίφημα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.3: Σκαρίφημα οδικού άξονα και θέσεων ελέγχου

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Η διάταξη περιλαμβάνει έναν κυκλικό δίσκο διαμέτρου 300cm (11,81 inches) επί του οποίου προσπίπτει συγκεκριμένο βάρος. Πραγματοποιούνται τρεις διαδοχικοί χτύποι, διάρκειας 25ms – 30ms έκαστος. Η μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων πραγματοποιείται από εννέα επιταχυνσιόμετρα – γεώφωνα, τοποθετημένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τον κυκλικό δίσκο, όπως φαίνεται από τη διάταξη που απεικονίζεται παρακάτω. Σημειώνεται πως οι ελαστικές υποχωρήσεις που λαμβάνονται προς επεξεργασία, προέρχονται από τον τελευταίο χτύπο.



Εικόνα 5.4: Διάταξη γεωφώνων FWD (αποστάσεις από το κέντρο φόρτισης)

Ταυτόχρονα καταγράφεται το μέγεθος του προσπίπτοντος φορτίου που εφαρμόζεται σε κάθε θέση, το οποίο επιθυμείται να προσεγγίζει την τιμή των 707 kPa, που προσομοιάζει επαρκώς την πραγματική φόρτιση από την κυκλοφορία (Dynatest, 2001). Στον επόμενο πίνακα, δίνονται οι τιμές της φόρτισης (σε όρους δύναμης και τάσης) που επιβλήθηκε ανά θέση, καθώς και η καταγεγραμμένη από το ειδικό θερμόμετρο θερμοκρασία στο μέσο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων. Να σημειωθεί ότι με δεδομένη τη διάμετρο της κυκλικής πλάκας (*d* = 300*mm*), η τάση και η δύναμη συνδέονται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$p = \frac{F}{A} \tag{5.1}$$

όπου:

p: η τάση/πίεση επαφής σε kPa,

F: το φορτίο σε kN, και

A: η επιφάνεια φόρτισης σε m<sup>2</sup>, με  $A = (\pi \cdot d^2)/4$ 

Θέση ελέγχου	Επιτόπου θερμοκρασία <i>Τ<sub>i</sub></i> (°C)	Δύναμη <i>F</i> (kN)	Τάση <i>p</i> (kPa)	Θέση ελέγχου	Επιτόπου θερμοκρασία <i>Τ<sub>i</sub></i> (°C)	Δύναμη <i>F</i> (kN)	Τάση <i>p</i> (kPa)
A165	9,5	50,38	713,1	K165	19,9	50,43	713,8
A167	9,4	50,60	716,2	K167	9,1	50,43	713,8
A173	9,1	50,24	711,1	K181	22,8	50,15	709,8
A177	8,9	50,28	711,7	K185.5	12,9	50,22	710,8
A181	8,7	50,14	709,7	K187	13,3	50,14	709,7
A185	14,3	50,15	709 <i>,</i> 8	K190	13,9	50,31	712,1
A187	14,1	50,12	709,4	K196	15,2	50,42	713,7
A190	13,7	50,58	715,9	D47	19,4	49,80	704,9
A193	13,4	50,31	712,1	D61	19,3	50,15	709,8
A196	13,0	50,14	709,7	D71	20,1	50,22	710,8

Πίνακας 5.1: Στοιχεία επιτόπου	μετρήσεων ανά θέση ελέγχου	ν (θερμοκρασία, δύναμη, τα	άση)
--------------------------------	----------------------------	----------------------------	------

Τα πάχη των στρώσεων ανά θέση, παραθέτονται στον πίνακα που ακολουθεί. Σημειώνεται ότι η στρώση έδρασης νοείται μη πεπερασμένη και συνεπώς δεν προσδιορίζεται το πάχος της.

Θέση ελέγχου	Πάχος ασφαλτικών h <sub>1</sub> (mm)	Πάχος βάσης - υπόβασης <i>h</i> 2 (mm)	Θέση ελέγχου	Πάχος ασφαλτικών h <sub>1</sub> (mm)	Πάχος βάσης - υπόβασης <i>h</i> 2 (mm)
A165	210	223	K165	156	254
A167	170	231	K167	154	313
A173	196	257	K181	210	206
A177	153	290	K185.5	169	321
A181	185	237	K187	177	238
A185	201	247	K190	174	214
A187	190	273	K196	168	209
A190	189	249	D47	157	230
A193	162	260	D61	161	230
A196	150	254	D71	167	230

Πίνακας 5.2: Πάχη στρώσης ασφαλτικών και βάσης – υπόβασης ανά θέση ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων (αντιολισθηρή, ισοπεδωτικές και ασφαλτική βάση) προσδιορίστηκαν μέσω των πυρήνων για μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ αυτά της ενιαίας στρώσης βάσης/υπόβασης εκτιμήθηκαν μέσω της ανάλυσης των στοιχείων συλλογής του GPR.

#### 5.3 Επεξεργασία στοιχείων FWD

Τα στοιχεία που συλλέγονται επιτόπου επεξεργάζονται μέσω λογισμικών ανάστροφου υπολογισμού. Τα λογισμικά που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού βασίζονται στις θεωρίες που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή στην ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων και στη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων και με βάση αυτά προκύπτει το μέτρο δυσκαμψίας των στρώσεων του υπό μελέτη οδοστρώματος. Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται από το FWD (measured deflections) αποτελούν τη βάση σύγκρισης με τις υπολογισμένες από τη διαδικασία υποχωρήσεις (calculated deflections), με κριτήριο ελέγχου την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που ορίζει καθένα από τα λογισμικά.

Ειδικότερα, γίνεται εκτίμηση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων, μέσω των λογισμικών ELMOD και BackGenetic3D. Το λογισμικό ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) βασίζεται εκτός από την ελαστική θεωρία του Boussinesq (1885), στην εμπειρική θεωρία ισοδύναμων στρώσεων του Odemark (1949) και έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των υποχωρήσεων (calculated deflections) μέσω των δύο μεθόδων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή της μεθόδου βέλτιστης προσέγγισης (Basin fitting) και της μεθόδου προσαρμογής βάσει της ακτίνας καμπυλότητας (Radius of curvature). Το BackGenetic3D αναπτύχθηκε αξιοποιώντας τη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων και των ιδιοτήτων τους σε συνδυασμό με την ελαστική θεωρία που παρείχε το λογισμικό MultiSmart3D στο οποίο και βασίζεται για τον υπολογισμό των ελαστικών υποχωρήσεων.

Ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας των παραπάνω λογισμικών, από τα οποία υπολογίζονται τα εξής μέτρα ελαστικότητας:

- Ε<sub>1</sub> που αναφέρεται στη δυσκαμψία της ενιαίας ασφαλτικής στρώσης,
- Ε<sub>2</sub> που αφορά το μέτρο ελαστικότητας της ενοποιημένης στρώσης της βάσης υπόβασης, και τέλος



Ε<sub>3</sub> που εκφράζει το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Εικόνα 5.5: Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης, και συνεπώς η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$  είναι ο άμεσος στόχος υπολογισμού από τα υπόψη λογισμικά.

# 5.3.1 Ανάστροφος υπολογισμός μέσω της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων

Για τον ανάστροφο υπολογισμό μέσω της ελαστικής θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων αξιοποιήθηκε το λογισμικό *ELMOD* (Εικόνα 5.6). Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από τις επιτόπου μετρήσεις εισάγονται στο λογισμικό.

Single File Batch		
Save Modulii to disk Edit data file		
Exit	Ctrl+E	
	Dynatest International	
	165 S. Chestruit Street, Ventura, CA 93001 Rt. 6 Box 1510, Starke FL 32091 Dvnatest Africa Dynatest United Kingdom Dynatest Denmark	Tel: +1 805 648 2230 Tel: +1 804 564 3777 Tel: +27 11 807 7000 Tel: +44 1246 240 090 Tel: +45 70 25 33 55

Εικόνα 5.6: Παράθυρο έναρξης ELMOD 4 (Highways Department, 2009)

Πριν την εισαγωγή οποιουδήποτε στοιχείου εκτός των μετρημένων υποχωρήσεων που αναφέρθηκαν, έγινε επιλογή του τύπου του οδοστρώματος για το οποίο πραγματοποιήθηκε ο ανάστροφος υπολογισμός. Η αρχική προεπιλογή του λογισμικού αφορά τον εύκαμπτο τύπο οδοστρώματος.

Structural Data - O	C:\ELMOD45\flexible.fwd
Section	from to
Layer Thick (mm)	ness Modulus (MPa)
1	at at
2	
3	E2/E3
4	E3/E4
5	E4/E5
Max depth t	o rigid layer mm
Next	Add OK
Previous	Delete Cancel
Use PCC	Joint ID Numbers

Εικόνα 5.7: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για εύκαμπτο τύπο οδοστρώματος

Στο παραπάνω παράθυρο τέθηκαν τα πάχη των στρώσεων, που δίνονται από τον πίνακα 5.2. Στη θέση 1 εισήχθη το πάχος της ενιαίας ασφαλτικής στρώσης, στη θέση 2 το αντίστοιχο της ενοποιημένης βάσης – υπόβασης, ενώ για τη στρώση έδρασης δεν εισάγεται τιμή πάχους, καθώς θεωρείται άπειρου πάχους. Στη συνέχεια δόθηκε ένα μέτρο ελαστικότητας για κάθε μία από τις αντίστοιχες στρώσεις, ως τιμή εκκίνησης του ανάστροφου υπολογισμού. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές αρχικών μέτρων ελαστικότητας για κάθε στρώση (seed moduli). Έχει ήδη αναφερθεί ότι η τελική επιλογή τους βασίζεται στη κρίση του μηχανικού και αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την ορθή εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας.

Κατηγορία υλικού	Συνιστώμενο εύρος Ε (MPa) από την AASHTO	Ενδεικτική τιμή Ε (MPa)
Θερμό ασφαλτόμιγμα (hot mix asphalt)	1500-3500	3000
Βάση κατεργασμένη με άσφαλτο	500-3000	1000
Βάση κατεργασμένη με τσιμέντο	3500-7000	5000
Κοκκώδης βάση	100-350	200
Κοκκώδες υλικό στρώσης έδρασης	50-150	100
Λεπτόκοκκο υλικό στρώσης έδρασης	20-50	30

Πίνακας 5.3: Προτεινόμενες τιμές μέτρου ελαστικότητας κατά AASHTO (Pan et al., 2012)

Αφού ολοκληρώθηκε η εισαγωγή των παραπάνω στοιχείων, ακολούθησε η επιλογή του χτύπου προκειμένου οι αντίστοιχες μετρημένες υποχωρήσεις να αξιοποιηθούν στη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Πραγματοποιήθηκαν τρεις χτύποι σε κάθε θέση, από τους οποίους ο τρίτος επιλέχθηκε για την υπόψη διερεύνηση. Η εισαγωγή στοιχείων ολοκληρώθηκε με την επιλογή της μεθόδου εκτέλεσης του ανάστροφου υπολογισμού (*Basin fitting* ή *Radius of curvature*).

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας, αποτελεί και η αξιολόγηση των παραπάνω μεθόδων. Συνεπώς, ο ανάστροφος υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση και των δύο μεθόδων του *ELMOD*.

#### 5.3.1.1 Μέθοδος βέλτιστης προσέγγισης (Basin fitting)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη σύγκριση των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων από το σύστημα του FWD, με τις αντίστοιχες υπολογισμένες από τον ανάστροφο υπολογισμό. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία, που περιγράφηκε στο 4° κεφάλαιο, ολοκληρώνεται όταν ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης που έχουν οριστεί. Συγκεκριμένα, θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση RMS (σχέση 4.9) με ενδεικτική τιμή σφάλματος από 2% έως 3%.

Η παραπάνω διαδικασία αν και κατέληγε σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών απαιτούσε αρκετές επαναλήψεις για την κάλυψη των προαναφερθέντων κριτηρίων, γεγονός που την καθιστούσε χρονοβόρα. Σημειώνεται, πως στην περίπτωση που τα αποτελέσματα των μέτρων ελαστικότητας που προέκυπταν μετά την ολοκλήρωση των επαναλήψεων δεν κρίνονταν ικανοποιητικά, υπήρχε η δυνατότητα

διατήρησης των τιμών μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων που είχαν δοθεί για την εκκίνηση της διαδικασίας (seed modulus).

# 5.3.1.2 Μέθοδος προσαρμογής βάσει της ακτίνας καμπυλότητας (Radius of curvature)

Η εν λόγω μέθοδος προτείνεται από το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά. Το μέτρο ελαστικότητας που δόθηκε για την έναρξη της διαδικασίας (seed modulus), ήταν κοινό και για τις δύο καθώς ορίζεται πριν την επιλογή της μεθόδου. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμικότητα της στρώσης έδρασης.

# 5.3.2 Ανάστροφος υπολογισμός με τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων

Οι πολλαπλές ιδιότητες των γενετικών αλγορίθμων αξιοποιούνται από το λογισμικό *BackGenetic3D*, που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Akron, το 2012. Ως εκ τούτου, και οι τρεις στρώσεις του υπό μελέτη οδοστρώματος υφίστανται ως ανεξάρτητες στο λογισμικό, χωρίς να υπάρχει περιορισμός στο πλήθος των στρώσεων όπως συμβαίνει στα συμβατικά λογισμικά ανάστροφου υπολογισμού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, δίνουν μία εκτίμηση του ελαστικού μέτρου των στρώσεων.



Εικόνα 5.8: Παράθυρο έναρξης λογισμικού BackGenetic3D

Το παράθυρο της εικόνας 5.9 δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει το σύστημα μονάδων, τη θεώρηση της ελαστικής θεωρίας και τη θεώρηση της στρώσης έδρασης ως ημι-πεπερασμένης. Σημειώνεται ότι αν και εμφανίζονται επιπλέον επιλογές, δεν είναι διαθέσιμες σε αυτή την έκδοση του λογισμικού.

eneral Information			×
Initial Information			Pressure
Unit	1. US Units	•	Ļ
Case	1. Pure elastic	•	X
Boundary Conditions	1. Halfspace	•	
Thermo Information Surface Thermo Type		•	R <sub>a</sub>
Surface Thermo Value	0	-	<b>z</b> h <sub>n+1</sub>
Bottom Thermo Type Bottom Thermo Value	0	-	ss more Displacement field

Εικόνα 5.9: Παράθυρο με γενικές πληροφορίες για το λογισμικό

Ακολουθεί η εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό. Η εικόνα 5.10 απεικονίζει το παράθυρο στο οποίο εισήχθησαν βασικά στοιχεία για την εκτέλεση της διαδικασίας, για μία τυχαία θέση ελέγχου.

Initial Inf	ormation						X	3
Selec	t method		Input information manually			Input informa	tion from FWD file	
Selec	t pavement typ	)e	Cement Concrete Base Subgrade Bedrock Pirgid	As	bhalt Concrete Base Subgrade Bedrock Flexible		Asphalt Concrete Cement Concrete Base Subgrade Bedrock Composite	
Layer Information			Lay. 1	Lay. 2	Half-space			
Tot	al Layers	02	Poisson's ratio	0.35	0.35	0.4		
(withou	ut half-space)		Seed E min (ksi)	1200	200	200		
Hal	lf-space Poiss	on's ratio	Seed H mix (in)	6.69	9.09	200		
		0.4	Seed H max (in)	6.69	9.09			
Load Ir	nformation		,		Load 1	1		
Tot	al Loads	01	Radius R (in)		5.91			
		1	Load value P (lbf)		11375			
			-					
	< Bac	:k					Next >	

Εικόνα 5.10: Παράθυρο εισαγωγής χαρακτηριστικών των στρώσεων και της φόρτισης
Επιλέχθηκε ο εύκαμπτος τύπος οδοστρώματος (flexible) και δόθηκαν τα παρακάτω δεδομένα για κάθε μία από τις 20 θέσεις ελέγχου:

- Το πλήθος των στρώσεων, χωρίς να προσμετράται σε αυτό η στρώση έδρασης, (συνεπώς δύο στρώσεις).
- Οι λόγοι Poisson για τα υλικά των στρώσεων. Συγκεκριμένα, δόθηκε η τιμή 0,35 για την ασφαλτική στρώση και την ενοποιημένη βάση υπόβαση, ενώ για τη στρώση έδρασης τέθηκε η τιμή 0,4 (χαρακτηριστικές τιμές δίνονται στον πίνακα 5.4).
- Στην συνέχεια εισήχθη ένα εύρος τιμών μέτρου ελαστικότητας (seed moduli), εντός του οποίου αναζητείται η βέλτιστη λύση (χαρακτηριστικές τιμές δίνονται στον πίνακα 5.4). Το εύρος αυτό αντιπροσωπεύει την έννοια του αρχικού πληθυσμού, που αναφέρθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων. Για την επιλογή του κατάλληλου εύρους των μέτρων ελαστικότητας, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από τον ανάστροφο υπολογισμό μέσω του *ELMOD* και συγκεκριμένα της μεθόδου βέλτιστης προσέγγισης. Γενικά, διατηρήθηκε για όλες τις θέσεις ένα εύρος τιμών περίπου 4800 MPa (700 ksi) μεταξύ του κατώτατου πιθανού μέτρου ελαστικότητας και του ανώτατου ορίου.
- ❖ Τέλος, είναι γνωστό ότι το εν λόγω λογισμικό δύναται να εκτιμήσει και τα πάχη των υπερκείμενων από την έδραση στρώσεων, εισάγοντας και για αυτά ένα εύρος τιμών (σε inches). Όμως, στην συγκεκριμένη διερεύνηση τα πάχη ήταν ήδη γνωστά μέσω του συστήματος GPR και της πυρηνοληψίας, επομένως οι τιμές που δόθηκαν για την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του πάχους ταυτίζονταν με την ήδη εκτιμημένη (H<sub>min</sub> = H<sub>max</sub>).

**Πίνακας 5.4:** Προτεινόμενες τιμές μέτρου ελαστικότητας για τους γενετικούς αλγορίθμους και τιμές λόγου Poisson (Pan et al., 2012)

Κατηγορία υλικού	Συνιστώμενο εύρος Ε (MPa) για τους γενετικούς αλγορίθμους	Συνιστώμενο εύρος τιμών του λόγου Poisson v	Ενδεικτική τιμή λόγου Poisson ν
Θερμό ασφαλτόμιγμα (hot mix asphalt)	1000-4000	0,15-0,45	0,35
Βάση κατεργασμένη με άσφαλτο	300-3500	0,15-0,45	0,35
Βάση κατεργασμένη με τσιμέντο	2500-8000	0,15-0,30	0,20
Κοκκώδης βάση	80-450	0,30-0,40	0,35
Κοκκώδες υλικό στρώσης έδρασης	30-250	0,30-0,40	0,35
Λεπτόκοκκο υλικό στρώσης έδρασης	10-100	0,30-0,40	0,35

Σημειώνεται ότι η επιλογή της μεθόδου βέλτιστης προσέγγισης ώστε οι τιμές των μέτρων *Ε* από τη μέθοδο αυτή να λειτουργήσουν ως βάση για τον καθορισμό του εύρους αναζήτησης στο λογισμικό των γενετικών αλγορίθμων, έγινε για τους εξής λόγους:

- Θεωρήθηκε ότι τόσο στο λογισμικό BackGenetic3D, όσο και στη μέθοδο Basin fitting του ELMOD, η συμμετοχή όλων των γεωφώνων στην εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας και των υποχωρήσεων είναι ισότιμη, επομένως καθίστανται περισσότερο συγκρίσιμα τα εκτιμώμενα μέτρα. Η μέθοδος Radius of curvature χρησιμεύει κυρίως για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή μεγάλου βάθους (στρώση έδρασης) γι' αυτό και δίνεται μεγάλη βαρύτητα στα πιο απομακρυσμένα γεώφωνα. Ωστόσο, αντικείμενο διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης.
- Η τιμή του σφάλματος (συνάρτηση RMS) ήταν σημαντικά μικρότερη για όλες τις θέσεις ελέγχου σε σχέση με τη μέθοδο Radius of curvature, επομένως κρίθηκε περισσότερο αξιόπιστη η μέθοδος Basin fitting. Περισσότερα στοιχεία γι' αυτήν την παρατήρηση θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η εισαγωγή των δεδομένων φόρτισης του οδοστρώματος από την πειραματική διάταξη του FWD. Συγκεκριμένα, απαιτούνται οι παρακάτω πληροφορίες:

- Η ακτίνα της πλάκας που έρχεται σε επαφή με το οδόστρωμα (εικόνα 5.10), με τιμή 5,91 inches (150 cm).
- Το μέγεθος του φορτίου που επιβλήθηκε σε κάθε θέση, που δίνεται από τον πίνακα
  5.2, μετατρέποντάς το σε lbf.

Τα δεδομένα εισόδου ολοκληρώθηκαν με τις καταγεγραμμένες ελαστικές υποχωρήσεις από τα εννέα γεώφωνα της διάταξης του FWD. Στο παράθυρο της επόμενης εικόνας, συμπληρώθηκε το πλήθος των γεωφώνων, η σταθερή για όλες τις δοκιμές απόσταση των γεωφώνων από το κέντρο επιβολής της φόρτισης (απόσταση σε inches) και οι μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από κάθε γεώφωνο.

Sen	sor Information									<b>1</b>
	Total Sensors 09									
		Sen. 1	Sen. 2	Sen. 3	Sen. 4	Sen. 5	Sen. 6	Sen. 7	Se	
	Distance from Load Center (in)	0	8 4.76	12	18 3.01	24	35 1.08	47	59 0.0	
		5.10								
	•								Þ	
	Asphalt Concrete					Asr		rete		
	Asphalt Concrete Base Subgrade Bedrock					Asp	ohalt Conv Base Subgrad	crete		
Γ	Asphalt Concrete Base Subgrade Bedrock < Back					Asp	shalt Conv Base Subgrad Bedrocl	crete le xt >		

Εικόνα 5.11: Εισαγωγή δεδομένων σχετικά με τα γεώφωνα

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία υπολογιμού των ελαστικών υποχωρήσεων και κατ' επέκταση των ελαστικών μέτρων των στρώσεων, επιλέχθηκε η αντικειμενική συνάρτηση (objective function) με την οποία γίνεται ο έλεγχος της σύγκλισης των ελαστικών υποχωρήσεων (measured – calculated). Για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκε η συνάρτηση AVCF, που εισάγεται για πρώτη φορά στο συγκεκριμένο λογισμικό και πλεονεκτεί έναντι της συνάρτησης RMS, για λόγους που παρουσιάστηκαν στο 4° κεφάλαιο.



Εικόνα 5.12: Παράθυρο επιλογής αντικειμενικής συνάρτησης

Ωστόσο, αυτόματα μέσω του λογισμικού προσδιορίστηκε και η τιμή της συνάρτησης RMS, παρόλο που δεν είχε προεπιλεγεί. Ως ανώτερο όριο στην τιμή του σφάλματος που εκφράζει η συνάρτηση RMS θεωρήθηκε η τιμή 5%, πέρα από την οποία η δοκιμή επαναλαμβανόταν, αλλάζοντας το εύρος των τιμών του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων, μέχρι να επιτευχθεί κατάλληλη τιμή σφάλματος. Τέλος, μια επιπλέον επανάληψη της διαδικασίας γινόταν και στην περίπτωση που η τιμή του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων προέκυπτε ίση ή σχεδόν ίση (με απόκλιση έως 200 MPa ή 30 ksi) με την ανώτατη τιμή του εύρους που είχε οριστεί για την υπόψη θέση, προκειμένου να μην θεωρηθεί ότι η λύση κατέληγε σε τοπικό ακρότατο. Για το λόγο αυτό, στην εκ νέου επανάληψη το άνω όριο του εύρους λαμβανόταν αυξημένο, εφόσον διαφαινόταν τάση αύξησης της τιμής του *E*.

## 5.4 Εργαστηριακές μετρήσεις

Από την πυρηνοληψία που διεξήχθη στο νέο οδικό άξονα στις 20 θέσεις ελέγχου, προέκυψαν 20 δοκίμια ασφαλτικής στρώσης, κοινής διαμέτρου και μεταβλητού ύψους ανάλογα με το πάχος της στρώσης. Η λήψη πυρήνων πραγματοποιήθηκε στις ίδιες θέσεις όπου είχε προηγηθεί η επιτόπου δοκιμή. Τα δοκίμια – πυρήνες μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, για περαιτέρω διερεύνηση με στόχο τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης (*E*<sup>\*</sup><sub>lab</sub>) σε κάθε μία από τις 20 θέσεις ελέγχου.



Εικόνα 5.13: Πυρηνοληψία από το οδόστρωμα



Εικόνα 5.14: Πυρήνες ασφαλτικής στρώσης στο εργαστήριο

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας όλων των πυρήνων έγινε μέσω της δυναμικής μεθόδου – Dynamic Modulus Testing με τη χρήση της συσκευής NAT (Nottingham Asphalt Tester). Η συσκευή απαρτίζεται από δύο μέρη, τον θάλαμο όπου διεξάγεται η πειραματική διαδικασία, καθώς και από 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 εύρος από 15 kPa έως 2800 kPa για διάφορες τιμές θερμοκρασίας και συχνότητας. Συγκεκριμένα, η συχνότητα φόρτισης μπορεί να ποικίλει εντός των ορίων 0,01Hz και 30Hz και 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 4°C έως 37°C.

Πριν την έναρξη των πειραματικών δοκιμών, οι πυρήνες προετοιμάστηκαν κατάλληλα. Αρχικά, το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά τοποθετήθηκε σε μία ειδικά διαμορφωμένη συσκευή με σκοπό την εφαρμογή μεταλλικών βάσεων σε αντιδιαμετρικά σημεία του. Η συσκευή αυτή συγκρατεί τις βάσεις με μαγνήτη από τη μία πλευρά, ενώ από την άλλη τοποθετείται ειδική κόλλα υψηλής αντοχής. Η επιφάνεια που καλύπτεται με κόλλα έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο, για διάστημα 30 λεπτών περίπου. Η κατακόρυφη απόσταση των μεταλλικών βάσεων είναι συγκεκριμένη, έτσι ώστε να προσαρμόζονται κατάλληλα ειδικοί αισθητήρες, των οποίων η λειτουργία περιγράφεται παρακάτω. 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. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται η ειδική συσκευή προσαρμογής των μεταλλικών βάσεων στο δοκίμιο.



Εικόνα 5.15: Προσάρτηση βάσεων στο δοκίμιο με τη χρήση της ειδικής συσκευής

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία, όλα τα δοκίμια εισήχθησαν στο θάλαμο όπου και παρέμειναν μέχρι να αποκτήσουν την επιθυμητή θερμοκρασία. Η θερμοκρασία των δοκιμίων ελεγχόταν από ένα δοκίμιο ελέγχου, το οποίο τοποθετήθηκε στο θάλαμο και στο εσωτερικό του είχε προσαρμοστεί ειδικό θερμόμετρο με σκοπό να γίνεται ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας εντός του σώματος των δοκιμίων. Στον παρακάτω πίνακα, εμφανίζεται ο χρόνος που συνιστάται να παραμένουν τα δοκίμια στο θάλαμο, μέχρι να αποκτήσουν τη συγκεκριμένη θερμοκρασία που απαιτεί η εκάστοτε δοκιμή.

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

⊓ในละ/ละ	E E .	Sunation				ຸ ອະດຸ 🗛 🏹 ອາ	IO TOUL GUIGT	6110700		20111
πνακαί		2010101	ιενοι χρονι	παραμόνι	ις ουκιμιοι	ι οιο σαλαί	10 100 0001	παιος	IAASHIU.	20111
								1	/	- /

Όταν είχε πλέον επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, το δοκίμιο τοποθετήθηκε ανάμεσα σε κυλινδρικές πλάκες, από ανοξείδωτο αλουμίνιο υψηλής αντοχής με διαστάσεις 104,5±5 mm, εντός του θαλάμου. Επιπλέον, μεταξύ των πλακών φόρτισης και των επιφανειών του δοκιμίου τοποθετήθηκαν ειδικές μεμβράνες (εικόνα 5.16) ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι τριβές μεταξύ πλακών – δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης καθώς και των διατμητικών τάσεων στην οριζόντια διαμετρική επιφάνεια του δοκιμίου.



**Εικόνα 5.16**: Δοκίμιο μετά την τοποθέτηση των πλαστικών στηριγμάτων μαζί με τις μεταλλικές πλάκες και τις ειδικές μεμβράνες

Κατόπιν, έγινε πλήρης ευθυγράμμιση του συστήματος δοκιμίου – πλακών με το έμβολο φόρτισης, έτσι ώστε η φόρτιση να εφαρμόζεται κεντρικά στην επιφάνεια πλάκας – δοκιμίου. Οι ειδικοί αισθητήρες (Linear Variable Differential Transformers – LVDTs) τοποθετήθηκαν παράλληλα με τη διεύθυνση φόρτισης και αντιδιαμετρικά του δοκιμίου, επάνω στις κατάλληλα προσαρμοσμένες μεταλλικές βάσεις με τα πλαστικά στηρίγματα. Οι αισθητήρες αυτοί κατέγραφαν τις μονοαξονικές παραμορφώσεις πλευρικά του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισής του. Οι εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζουν την πειραματική διάταξη της δοκιμής.



Εικόνα 5.17: Δοκίμιο εντός του θαλάμου λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής



Εικόνα 5.18: Σκαριφηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Dougan et al., 2003)

Όταν πλέον το δοκίμιο είχε προσαρμοστεί πλήρως στην πειραματική διάταξη (εικόνα 5.17), εισήχθησαν στο σύστημα καταγραφής των δεδομένων τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του (ονομασία και διάμετρος), η θερμοκρασία διεξαγωγής της δοκιμής καθώς και το μέγεθος του δυναμικού φορτίου. Το μέγεθος του δυναμικού φορτίου μεταβάλλεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας διεξαγωγής της δοκιμής και συγκεκριμένα, μειώνεται με την αύξησή της. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του δυναμικού φορτίου (σε όρους τάσης) που εισήχθησαν στο σύστημα για κάθε θερμοκρασία.

Θερμοκρασία δοκιμίου Τ (°C)	Τιμές δυναμικής φόρτισης <i>p</i> (kPa)	Όρια τιμών <i>p</i> (kPa) (AASHTO 2011)
4	1200	700-1400
15	1000	
20	600	350-700
25	350	
37	200	140-250

Πίνακας 5.6: Τιμές δυναμικής φόρτισης ανά θερμοκρασία

Αμέσως πριν την έναρξη της δοκιμής, το έμβολο φόρτισης ήρθε σε πλήρη επαφή με την ανοξείδωτη πλάκα στο άνω τμήμα του δοκιμίου και ξεκίνησε η εφαρμογή της ημιτονοειδούς φόρτισης. Σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τους 4°C, η φόρτιση εφαρμόστηκε από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη συχνότητα, δηλαδή από 25Hz σε 0,1Hz. Επιπλέον, σε αυτές

τις θερμοκρασίες έγινε προφόρτιση των δοκιμίων με συχνότητα 25Hz και 200 κύκλους φόρτισης. Οι κύκλοι φόρτισης για κάθε συχνότητα ορίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Συχνότητα φόρτισης <i>f</i> (Hz)	Κύκλοι φόρτισης <i>Ν</i>
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Πίνακας 5.7: Αριθμός κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα (AASHTO, 2011)

Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής, καταγράφεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή το χρονικό ιστορικό των τάσεων και των παραμορφώσεων απ' όπου προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθώς και η γωνία υστέρησης. Ωστόσο, αποθηκεύονται μόνο οι πέντε τελευταίοι κύκλοι φόρτισης, ως αντιπροσωπευτικότεροι και τελικά από αυτούς προκύπτουν οι τιμές των μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με βάση αυτές τις τιμές του  $E_{lab}^*$ , θα κατασκευαστούν οι κεντρικές καμπύλες (κεφάλαιο 6°) με στόχο την ανάλυση των στοιχείων.

#### 6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων που προέκυψαν βάσει του μεθοδολογικού πλαισίου που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα επιτόπου στοιχεία και από τους εργαστηριακούς ελέγχους. Πιο συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν τα σφάλματα κατά τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των τριών μεθοδολογιών (ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων: Basin fitting και Radius of curvature, γενετικών αλγορίθμων) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων που προκύπτει μέσω εργαστηριακών στους πυρήνες ασφαλτομίγματος που προκύπτει από τις υπό μελέτη θέσεις.

#### 6.1 Επεξεργασία στοιχείων ερευνητικής διαδικασίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων εξαρτάται από τη συχνότητα φόρτισης και τη θερμοκρασία. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές, είναι απαραίτητη η αναγωγή των αποτελεσμάτων σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και συχνότητα.

#### 6.1.1 Προσδιορισμός συχνότητας φόρτισης FWD

Δεδομένου ότι το  $E_{lab}^*$  προσδιορίστηκε στο εργαστήριο για πλήθος συχνοτήτων και θερμοκρασιών, είναι δυνατή η ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης, μέσω της οποίας προκύπτει η τιμή του  $E_{lab}^*$  για οποιαδήποτε συχνότητα φόρτισης και θερμοκρασία. Επομένως, στόχος ήταν ο προσδιορισμός της συχνότητας φόρτισης του FWD και η αναγωγή των τιμών του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου σε αυτή τη συχνότητα. Για τον προσδιορισμό της συχνότητας του FWD, αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία της χρονοϊστορίας (time history) της ημιτονοειδούς φόρτισης, σε κάθε θέση ελέγχου. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα επιβαλλόμενου φορτίου – χρονικής διάρκειας φόρτισης τα οποία έχουν τραπεζοειδή μορφή. Με βάση τις παρακάτω σχέσεις 6.1 έως 6.4, καθώς και το γραφικό προσδιορισμό των χρονικών τετμημένων που οριοθετούν τα διαστήματα  $t_{d_1}$  (ms) και  $t_{d_2}$ 

Οι επιμέρους χρονικές διάρκειες φόρτισης  $t_{b_1}$  (ms) και  $t_{b_2}$  (ms) ορίζονται από τα διαστήματα  $t_{d_1}$  και  $t_{d_2}$  ως εξής:

$$t_{b_1} = \frac{2 \cdot t_{d_1}}{\pi} \tag{6.1}$$

$$t_{b_2} = t_{d_2} \tag{6.2}$$

Ο συνολικός χρόνος φόρτισης  $t_b$  (ms) είναι:

$$t_b = t_{b_1} + t_{b_2} \tag{6.3}$$

Τελικώς, η συχνότητα  $f_{FWD}$  (Hz) προκύπτει (αφού μετατραπεί ο χρόνος  $t_b$  σε s):



$$f_{FWD} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot t_b} \tag{6.4}$$

Εικόνα 6.1: Διάγραμμα παλμικής φόρτισης του FWD

Ακολουθούν οι τιμές των παραπάνω χρονικών παραμέτρων, όπως αυτές προσδιορίστηκαν γραφικά για την εκάστοτε θέση ελέγχου.

Θέσεις	Γραφικ	ός προσά	διορισμό	ς συχνότι	<b>ητας δο</b> κι	μής FWD	ανά θέσ	η - εύρεσ	<b>τη μέση</b> ς <i>f</i> (Hz)		
ελέγχου	t <sub>0</sub> (ms)	t <sub>1</sub> (ms)	t <sub>2</sub> (ms)	t <sub>d1</sub> (ms)	t <sub>d2</sub> (ms)	t <sub>b1</sub> (ms)	t <sub>b2</sub> (ms)	t <sub>b</sub> (ms)	${f}_{FWD}$ (Hz)		
A165	6,7	9,9	17,5	3,2	7,6	2,0	7,6	9,6	16,5		
A167	6,7	10,3	17,7	3,6	7,4	2,3	7,4	9,7	16,4		
A173	6,5	10,1	17,7	3,6	7,6	2,3	7,6	9,9	16,1		
A177	7,1	10,3	17,9	3,2	7,6	2,0	7,6	9,6	16,5		
A181	7,2	10,4	18	3,2	7,6	2,0	7,6	9,6	16,5		
A185	8	11,5	19,1	3,5	7,6	2,2	7,6	9,8	16,2		
A187	7,2	10,7	17,9	3,5	7,2	2,2	7,2	9,4	16,9		
A190	7,5	11	18,7	3,5	7,7	2,2	7,7	9,9	16,0		
A193	7,2	10,5	18	3,3	7,5	2,1	7,5	9,6	16,6		
A196	6,5	9,9	17,5	3,4	7,6	2,2	7,6	9,8	16,3		
K165	7,3	10,8	18,3	3,5	7,5	2,2	7,5	9,7	16,4		
K167	6,9	10,4	18,1	3,5	7,7	2,2	7,7	9,9	16,0		
K181	7,1	11	18,5	3,9	7,5	2,5	7,5	10,0	15,9		
K185.5	6,8	10,5	17,9	3,7	7,4	2,4	7,4	9,8	16,3		
K187	7,3	10,9	18,4	3,6	7,5	2,3	7,5	9,8	16,3		
K190	7,1	10,7	18,3	3,6	7,6	2,3	7,6	9,9	16,1		
K196	6,8	10,3	17,8	3,5	7,5	2,2	7,5	9,7	16,4		
D47	8,5	12	20	3,5	8,0	2,2	8,0	10,2	15,6		
D61	9,1	12,5	20,4	3,4	7,9	2,2	7,9	10,1	15,8		
D71	9,5	13	20,5	3,5	7,5	2,2	7,5	9,7	16,4		
			Μέ	ση Τιμή					16,3		
Τυπική απόκλιση									0,3		
		Συντελε	εστής Μετ	αβλητότη	ητας <i>CV</i> (%	6)			1,8%		

Πίνακας 6.1: Συχνότητα FWD για κάθε θέση ελέγχου

Από το παραπάνω δείγμα των συχνοτήτων στις 20 θέσεις, φαίνεται ότι υπάρχει στατιστική ομοιογενένεια (CV < 10%), άρα θεωρείται ως αντιπροσωπευτική συχνότητα της δοκιμής FWD, η μέση τιμή των συχνοτήτων, δηλαδή  $f_{FWD} = 16,3Hz$ .

Να σημειωθεί ότι παρόμοιες τιμές συχνότητας FWD έχουν βρεθεί και από άλλες έρευνες όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία. Χαρακτηριστικά, οι Maher et al. (2005) θεωρούν την τιμή 16,7Hz, ενώ κατά την Dynatest (2001) η τιμή της συχνότητας του FWD είναι 16Hz.

#### 6.1.2 Δημιουργία κεντρικών καμπυλών

Αξιοποιώντας τα εργαστηριακά αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E^*_{lab}$ , κατασκευάστηκαν οι κεντρικές καμπύλες για εύρος συχνοτήτων από 0,1Hz έως 25Hz και θερμοκρασιών από 4°C έως 37°C. Όμως, για να γίνει εφικτή η σύγκριση των επιτόπου μέτρων δυσκαμψίας με τα εργαστηριακά, έγινε αναγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων από τα δοκίμια ελέγχου, στα δεδομένα του πεδίου για κάθε θέση ελέγχου. Ειδικότερα, ως

θερμοκρασία αναφοράς (*T<sub>reference</sub>*) για κάθε μία από τις 20 κεντρικές καμπύλες τέθηκε η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος κατά τις επιτόπου δοκιμές με το FWD, η οποία διαφέρει ανά θέση (Πίνακας 5.1) και συχνότητα φόρτισης θεωρήθηκε η μέση συχνότητα 16,3Hz που υπολογίστηκε προηγουμένως. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε από τους Maher et al. (2005) για την αναγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων στις επιτόπου συνθήκες δοκιμών.

Η ανάπτυξη της κάθε κεντρικής καμπύλης επιτεύχθηκε προσδιορίζοντας τους συντελεστές της σιγμοειδούς καμπύλης ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) που περιγράφονται από τη σχέση 3.19 και τους τρεις συντελεστές του παράγοντα μετατόπισης (a, b, c) που δίνονται από τη σχέση 3.22. Για τον ταυτόχρονο υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Solver του Microsoft<sup>™</sup> Excel. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δοκίμιο ελέγχου ο λογάριθμος του παράγοντα μετατόπισης τέθηκε ίσος με μηδέν ( $\log \alpha(T_{ref}) = 0$ ), εφόσον για τη θερμοκρασία αναφοράς ισχύει:  $\alpha(T_{ref}) = 1$ . Κατά συνέπεια από την εξίσωση 3.20 προέκυψε  $f_r = f_{FWD} = 16.3Hz$ . Ο προσδιορισμός των παραπάνω συντελεστών κάθε δοκιμίου, έγινε με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής του  $E_{lab}^*$ , για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας. Παρακάτω, παραθέτονται οι 20 κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν, καθώς και τα τελικά αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{lab}^*$ , ανηγμένου στις επιτόπου συνθήκες (θερμοκρασίας και συχνότητας) της κάθε θέσης.

#### 6.1.2.1 Κεντρικές καμπύλες για τα 20 δοκίμια ελέγχου

Για κάθε μία από τις παρακάτω καμπύλες, δίνεται η θερμοκρασία αναφοράς, καθώς και η εξίσωση 3.19 προσαρμοσμένη με τους συντελεστές που προέκυψαν από την εφαρμογή Solver. Υπενθυμίζεται ότι από την εξίσωση 3.19, οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας προκύπτουν σε ksi, συνεπώς τα αντίστοιχα διαγράμματα των κεντρικών καμπυλών δημιουργήθηκαν κατόπιν μετατροπής των τιμών σε MPa (όπου 1 MPa = 0,1450377 ksi).

 Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A165 σε θερμοκρασία αναφοράς 9,5 °C.



**Σχήμα 6.1**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμο ελέγχου Α165

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{A165}^* = 1,619 + \frac{1,834}{1 + e^{-2,048 - 0,486 \cdot \log f_r}}$$
(6.5)

 Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A167 σε θερμοκρασία αναφοράς 9,4 °C.



**Σχήμα 6.2**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α167

$$\log E_{A167}^* = 1,144 + \frac{2,324}{1 + e^{-1,981 - 0,492 \cdot \log f_r}}$$
(6.6)

 Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A173 σε θερμοκρασία αναφοράς 9,1 °C.



**Σχήμα 6.3**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α173

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{A173}^* = 0.721 + \frac{2.787}{1 + e^{-2.085 - 0.430 \cdot \log f_r}}$$
(6.7)

 Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A177 σε θερμοκρασία αναφοράς 8,9 °C.



**Σχήμα 6.4**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α177

$$\log E_{A177}^* = 1,592 + \frac{1,873}{1 + e^{-1,879 - 0,509 \cdot \log f_r}}$$
(6.8)

5) Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A181 σε θερμοκρασία αναφοράς 8,7 °C.



**Σχήμα 6.5**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α181

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{A181}^* = 0.952 + \frac{2.647}{1 + e^{-1.854 - 0.410 \cdot \log f_r}}$$
(6.9)

6) Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A185 σε θερμοκρασία αναφοράς 14,3°C.



**Σχήμα 6.6**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α185

$$\log E_{A185}^* = 1,588 + \frac{1,859}{1 + e^{-1,928 - 0,666 \cdot \log f_r}}$$
(6.10)

7) Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A187 σε θερμοκρασία αναφοράς 14,1°C.



**Σχήμα 6.7**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α187

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{A187}^* = 1,368 + \frac{2,072}{1 + e^{-1,715 - 0,603 \cdot \log f_r}}$$
(6.11)

 Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A190 σε θερμοκρασία αναφοράς 13,7°C.



**Σχήμα 6.8**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α190

$$\log E_{A190}^* = 0.513 + \frac{3.065}{1 + e^{-1.839 - 0.409 \cdot \log f_r}}$$
(6.12)

9) Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A193 σε θερμοκρασία αναφοράς 13,4°C.



**Σχήμα 6.9**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α193

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{A193}^* = 0,827 + \frac{2,697}{1 + e^{-2,025 - 0,469 \cdot \log f_r}}$$
(6.13)

10) Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου A196 σε θερμοκρασία αναφοράς 13°C.



**Σχήμα 6.10**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου Α196

$$\log E_{A196}^* = 1,142 + \frac{2,365}{1 + e^{-1,914 - 0,478 \cdot \log f_r}}$$
(6.14)

 Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K165 σε θερμοκρασία αναφοράς 19,9°C.



**Σχήμα 6.11**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K*165

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{K165}^* = 1,458 + \frac{2,102}{1 + e^{-1,293 - 0,536 \cdot \log f_r}}$$
(6.15)

12) Στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K167 σε θερμοκρασία αναφοράς 9,1°C.



**Σχήμα 6.12**: Κεντρική καμπύλη  $E_{lab}^{*}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K167* 

$$\log E_{K167}^* = 0,833 + \frac{2,632}{1 + e^{-1,954 - 0,405 \cdot \log f_r}}$$
(6.16)

13) Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K181 σε θερμοκρασία αναφοράς 22,8°C.



**Σχήμα 6.13**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K181* 

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{K181}^* = 1,273 + \frac{2,190}{1 + e^{-1,067 - 0,526 \cdot \log f_r}}$$
(6.17)

14) Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K185.5 σε θερμοκρασία αναφοράς 12,9°C.



**Σχήμα 6.14**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K185.5* 

$$\log E_{K185.5}^* = 0,599 + \frac{3,161}{1 + e^{-1,575 - 0,360 \cdot \log f_r}}$$
(6.18)

15) Στο σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K187 σε θερμοκρασία αναφοράς 13,3°C.



**Σχήμα 6.15**: Κεντρική καμπύλη  $E_{lab}^{*}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K187* 

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{K187}^* = 1,423 + \frac{2,015}{1 + e^{-1,765 - 0,577 \cdot \log f_r}}$$
(6.19)

16) Στο σχήμα 6.16 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K190 σε θερμοκρασία αναφοράς 13,9°C.



**Σχήμα 6.16**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K190* 

$$\log E_{K190}^* = 1,580 + \frac{1,864}{1 + e^{-1,744 - 0,599 \cdot \log f_r}}$$
(6.20)

17) Στο σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου K196 σε θερμοκρασία αναφοράς 15,2°C.



**Σχήμα 6.17**: Κεντρική καμπύλη  $E_{lab}^{*}$  για το δοκίμιο ελέγχου *K196* 

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{K196}^* = 0,422 + \frac{3,124}{1 + e^{-1,911 - 0,403 \cdot \log f_r}}$$
(6.21)

18) Στο σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου D47 σε θερμοκρασία αναφοράς 19,4°C.



**Σχήμα 6.18**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου D47

$$\log E_{D47}^* = 1,202 + \frac{2,134}{1 + e^{-1,258 - 0,517 \cdot \log f_r}}$$
(6.22)

19) Στο σχήμα 6.19 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου D61 σε θερμοκρασία αναφοράς 19,3°C.



**Σχήμα 6.19**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου D61

Η σιγμοειδής καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (όπου  $E^* \rightarrow$  ksi):

$$\log E_{D61}^* = 0,480 + \frac{3,044}{1 + e^{-1,395 - 0,369 \cdot \log f_r}}$$
(6.23)

20) Στο σχήμα 6.20 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη για το δοκίμιο ελέγχου D71 σε θερμοκρασία αναφοράς 20,1°C.



**Σχήμα 6.20**: Κεντρική καμπύλη  $E^*_{lab}$  για το δοκίμιο ελέγχου D71

$$\log E_{D71}^* = 1,347 + \frac{2,017}{1 + e^{-1,204 - 0,504 \cdot \log f_r}}$$
(6.24)

# 6.1.2.2 Ανηγμένες τιμές εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στις επιτόπου συνθήκες

Μέσω των κεντρικών καμπύλων, έχει επιτευχθεί η αναγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων στις επιτόπου συνθήκες θερμοκρασίας. Για μειωμένη συχνότητα  $f_r = f_{FWD} = 16,3Hz$ , προκύπτει η τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για τη συχνότητα φόρτισης του FWD. Συνεπώς, προκύπτει ο τελικός πίνακας των  $E_{lab}^*$  τα οποία αξιοποιούνται στο στάδιο των αναλύσεων που ακολουθεί.

	Επιτόπου	στοιχεία	$E^*_{lab}$ (MPa)		Επιτόπου	ο στοιχεία	$E^*_{lab}$ (MPa)
Δοκιμια	Θερμ. Τ <sub>i</sub> (°C)	Συχν. <i>f<sub>FWD</sub></i> (Hz)	για $I = I_i$ και $f_r = f_{FWD}$	Δοκιμια	Θερμ. Τ <sub>i</sub> (°C)	Συχν. <i>f <sub>FWD</sub></i> (Hz)	για <i>I = I <sub>i</sub></i> και <i>f <sub>r</sub> = f<sub>FWD</sub></i>
A165	9,5	16,3	14766	K165	19,9	16,3	13641
A167	9,4	16,3	13895	K167	9,1	16,3	12397
A173	9,1	16,3	14285	K181	22,8	16,3	9199
A177	8,9	16,3	14508	K185.5	12,9	16,3	16772
A181	8,7	16,3	16109	K187	13,3	16,3	13150
A185	14,3	16,3	14868	K190	13,9	16,3	13692
A187	14,1	16,3	12974	K196	15,2	16,3	13323
A190	13,7	16,3	13967	D47	19,4	16,3	7812
A193	13,4	16,3	14967	D61	19,3	16,3	8835
A196	13,0	16,3	14596	D71	20,1	16,3	8317

**Πίνακας 6.2**: Τελικά  $E^*_{lab}$  ανηγμένα στις επιτόπου συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης

### 6.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει αρχικά τον προσδιορισμό των σφαλμάτων που προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό όσον αφορά τις ελαστικές υποχωρήσεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση μέτρων  $E_{in-situ}$  που προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού μέσω της συμβατικής μεθοδολογίας που αξιοποιεί την ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων και μέσω της μεθοδολογίας των γενετικών αλγορίθμων, τόσο μεταξύ αυτών όσο και με τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{lab}^*$ .

# 6.2.1 Κατανομή ελαστικών υποχωρήσεων και σφάλματα RMS ανάστροφου υπολογισμου

Πρώτο στάδιο στην αξιολόγηση των μεθοδολογιών ανάστροφου υπολογισμού, αποτελεί η σύγκριση των ελαστικών υποχωρήσεων που υπολογίζονται, σε σχέση με τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις από το FWD. Για το σκοπό αυτό, παραθέτονται οι πίνακες όπου

αναγράφονται οι μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις (measured) στην πρώτη σειρά, και ακολουθούν οι υπολογισμένες από τις υπόψη μεθοδολογίες (Genetic algorithms, Basin fitting, Radius of curvature) αντίστοιχα για κάθε θέση ελέγχου. Επιπλέον, δίνεται το ποσοστιαίο σφάλμα RMS όπως υπολογίζεται από τη σχέση 4.9 για κάθε μέθοδο. Τέλος, για κάθε θέση δίνεται και η θερμοκρασία διεξαγωγής της δοκιμής. Υπενθυμίζεται, ότι η μέτρηση των υποχωρήσεων έγινε από εννέα γεώφωνα, των οποίων οι αποστάσεις από το κέντρο φόρτισης σημειώνονται στους ακόλουθους πίνακες.

1) Θέση ελέγχου Α165, για θερμοκρασία δοκιμής 9,5°C:

Υποχωρήσεις	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)									
A165 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	92,9	73,4	71,9	52,1	43,5	29,5	19,2	13,4	11,5	
Genetic	93,0	75,4	65 <i>,</i> 8	53,1	42,9	29,5	20,8	16,0	13,0	5,68%
Basin	90,6	77,5	68,9	55,9	44,6	28,2	18,2	12,5	9,2	8,29%
Radius	91,7	81,0	73,7	62,2	51,5	35,0	24,0	17,2	13,0	17,63%

Πινακας 6.3: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A165)





2) Θέση ελέγχου Α167, για θερμοκρασία δοκιμής 9,4°C:

Υποχωρήσεις	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)										
A167 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)	
Μετρημένες	146,0	120,8	102,3	76,5	55 <i>,</i> 6	27,5	14,2	9,3	7,3		
Genetic	146,1	119,6	101,9	77,0	56 <i>,</i> 6	31,2	17,0	10,7	8,4	3,60%	
Basin	146,0	121,1	102,0	75,6	54,7	28,7	15,1	9,1	5,9	6,80%	
Radius	145,6	119,5	101,6	77,6	58,3	32,9	18,6	11,7	8,0	15,29%	

Πινακας 6.4: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A167)



Σχήμα 6.22: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου A167

3) Θέση ελέγχου Α173, για θερμοκρασία δοκιμής 9,1°C:

Υποχωρήσεις	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)									
A173 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	72,5	58,0	46,4	34,0	23,9	11,9	6,5	4,6	3,6	
Genetic	72,4	56,9	47,5	35,1	25,1	12,2	6,4	4,1	3,3	4,03%
Basin	72,8	57,3	47,3	34,0	24,0	12,2	6,7	4,2	2,8	7,83%
Radius	72,6	56,4	46,9	34,8	25,7	14,4	8,6	5,7	4,1	15,95%

Πινακας 6.5: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A173)



Σχήμα 6.23: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Α173

4) Θέση ελέγχου Α177, για θερμοκρασία δοκιμής 8,9°C:

Υποχωρήσεις		Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)									
A177 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)	
Μετρημένες	84,2	63,3	49,8	33,1	22,2	9,6	5,4	4,1	3,5		
Genetic	84,1	62,5	49,3	33,5	22,9	12,4	8,1	6,4	5,3	5,60%	
Basin	83,9	64,0	49,5	32,5	21,7	10,6	6,1	4,0	2,9	8,35%	
Radius	84,0	64,3	49,8	33,2	22,5	11,7	7,2	4,9	3,7	14,80%	

Πινακας 6.6: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A177)



Σχήμα 6.24: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Α177

5) Θέση ελέγχου Α181, για θερμοκρασία δοκιμής 8,7°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A181 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	103,1	87,9	75,1	59,2	49,4	31,2	21,5	15,7	12,8	
Genetic	103,1	86,6	75,9	61,5	49,5	32,5	22,6	16,8	13,7	3,78%
Basin	103,4	86,9	75,7	60,5	48,2	31,7	21,8	16,1	12,5	1,77%
Radius	101,9	88,3	78,8	65,2	53 <i>,</i> 8	37,6	26,9	20,5	16,2	17,99%

Πινακας 6.7: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A181)



Σχήμα 6.25: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Α181

6) Θέση ελέγχου A185, για θερμοκρασία δοκιμής 14,3°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A185 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	81,0	63,2	53,4	40,3	30,3	15,3	8,0	4,4	4,0	
Genetic	81,0	62,5	52,3	39,6	30,0	18,5	12,2	9,1	7,6	5,07%
Basin	81,0	63,0	53,4	40,6	30,1	15,8	8,1	4,5	2,8	10,35%
Radius	79,9	60,9	52,4	41,3	31,7	17,8	9,8	5,7	3,7	14,02%

Πινακας 6.8: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A185)



Σχήμα 6.26: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Α185

7) Θέση ελέγχου Α187, για θερμοκρασία δοκιμής 14,1°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	άσεις γε	ωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A187 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	117,0	94,7	82,6	63,8	49,3	30,9	22,2	17,5	15,5	
Genetic	117,1	94,7	81,3	64,0	50,0	33,0	22,4	16,8	13,7	1,54%
Basin	116,9	95,6	81,8	63,3	49,4	32,2	23,0	17,6	14,2	3,39%
Radius	116,9	101,0	89,4	72,3	58,2	39,4	28,7	22,3	18,2	19,17%

Πινακας 6.9: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A187)



**Σχήμα 6.27**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου A187

8) Θέση ελέγχου Α190, για θερμοκρασία δοκιμής 13,7°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	εωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A190 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	90,6	70,0	58,3	43,8	33,5	22,8	18,6	16,9	15,7	
Genetic	90,7	69,9	58,4	45,0	34,8	23,4	16,5	12,7	10,4	2,38%
Basin	87,7	66,3	55,9	44,3	36,1	25,5	19,3	15,5	12,8	8,69%
Radius	86,5	71,6	63,1	52,3	43,8	32,0	24,6	19,8	16,5	22,16%

Πινακας 6.10: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A190)



**Σχήμα 6.28**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου A190

9) Θέση ελέγχου Α193, για θερμοκρασία δοκιμής 13,4°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A193 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	104,2	82,4	67,6	49,4	35,9	20,9	15,0	12,9	12,4	
Genetic	104,1	81,3	67,3	50 <i>,</i> 0	37,6	22,6	15,7	12,2	10,2	3,47%
Basin	104,1	83,5	67,8	48,3	35,5	22,2	16,1	12,7	10,6	6,02%
Radius	104,3	88,0	74,4	55,8	42,3	27,1	19,7	15,5	12,9	18,04%

Πινακας 6.11: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A193)



**Σχήμα 6.29**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου A193

10) Θέση ελέγχου Α196, για θερμοκρασία δοκιμής 13°C:

	-				-		-			
Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
A196 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	110,4	87,6	71,8	53,2	39,1	24,1	18,0	15,7	14,3	
Genetic	110,5	87,1	72,1	53 <i>,</i> 8	40,4	24,6	17,3	13,5	11,2	1,79%
Basin	110,6	87,7	71,2	52,3	39,9	25,9	18,8	14,6	11,9	6,73%
Radius	110,4	92,0	77,1	58,6	45,8	30,9	23,1	18,4	15,2	16,36%

Πινακας 6.12: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (A196)



Σχήμα 6.30: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Α196

11) Θέση ελέγχου K165, για θερμοκρασία δοκιμής 19,9°C:

	-				-					
Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	εωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K165 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	165,8	135,7	112,5	82,3	59,1	31,6	20,1	15,8	13,2	
Genetic	165,9	133,9	112,3	83,8	61,7	34,3	21,8	16,3	13,5	3,68%
Basin	165,2	136,3	112,5	81,2	58 <i>,</i> 8	33,1	21,1	14,8	11,2	6,00%
Radius	165,4	139,9	117,9	87,9	65,7	39,6	26,7	19,6	15,3	17,49%

Πινακας 6.13: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K165)



**Σχήμα 6.31**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου K165

12) Θέση ελέγχου K167, για θερμοκρασία δοκιμής 9,1°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	εωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K167 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	139,5	108,4	85,6	58,5	38,5	17,0	8,8	6,5	5,7	
Genetic	139,4	107,7	86,4	59 <i>,</i> 4	39,6	17,5	9,4	6,9	6,1	2,26%
Basin	138,9	108,7	85,6	57,3	38,2	18,1	9,9	6,2	4,2	9,98%
Radius	139,3	107,5	84,6	57,6	39,7	20,3	11,8	7,8	5,5	14,76%

Πινακας 6.14: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K167)



Σχήμα 6.32: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου K167

13) Θέση ελέγχου K181, για θερμοκρασία δοκιμής 22,8°C:

						-				
Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K181 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	99,7	79,2	67,9	51,9	40,0	23,3	14,7	11,9	10,4	
Genetic	99,6	79,0	67,1	52,1	39,9	23,9	15,5	11,2	9,1	1,57%
Basin	99,5	79,6	67,7	51,5	39,1	23,7	15,9	11,6	9,0	5,41%
Radius	98,2	81,6	71,2	56,4	44,3	28,5	19,8	14,8	11,7	17,18%

Πινακας 6.15: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K181)



**Σχήμα 6.33**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου K181

14) Θέση ελέγχου K185.5, για θερμοκρασία δοκιμής 12,9°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K185.5 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	116,1	96,6	78,9	59,0	43,6	21,8	12,1	7,9	6,6	
Genetic	116,1	95,0	80,5	60,7	44,5	22,9	12,4	7,9	6,4	3,85%
Basin	116,2	95,6	80,0	58,8	42,6	22,9	12,5	7,7	5,1	7,77%
Radius	116,8	94,8	79,7	60,4	45,5	26,6	15,4	10,0	6,9	14,83%

Πινακας 6.16: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K185.5)



Σχήμα 6.34: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου K185.5

15) Θέση ελέγχου K187, για θερμοκρασία δοκιμής 13,3°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	εωφώνω	ν από το	ο σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K187 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	101,8	87,2	73,7	58 <i>,</i> 8	47,3	32,4	24,1	19,9	17,4	
Genetic	101,9	85,3	74,9	61,0	49,3	34,3	24,4	18,5	15,0	5,04%
Basin	102,3	85,4	74,0	59,2	47,9	33,0	24,4	19,1	15,6	3,97%
Radius	100,4	87,8	78,6	65,7	55,1	40,3	30,9	24,9	20,7	17,73%

Πινακας 6.17: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K187)



Σχήμα 6.35: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Κ187

16) Θέση ελέγχου Κ190, για θερμοκρασία δοκιμής 13,9°C:

Υποχωρήσεις		Αποστ	τάσεις γε	ωφώνω	ν από το	σημείο	φόρτιση	ις (cm)		RMS
K190 - d <sub>i</sub> (μm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	101,2	84,1	71,0	57,3	44,6	30,3	23,3	16,4	16,5	
Genetic	101,1	82,8	71,9	57,7	46,5	32,5	23,4	18,0	14,5	3,63%
Basin	101,0	82,1	71,5	58,2	47,2	31,5	21,8	16,1	12,6	8,65%
Radius	101,5	85,6	76,5	64,7	54,6	39,0	28,3	21,6	17,2	18,45%

Πινακας 6.18: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K190)



Σχήμα 6.36: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου Κ190

17) Θέση ελέγχου Κ196, για θερμοκρασία δοκιμής 15,2°C :

	,	74 1	. ,				· /			
Υποχωρήσεις K196 - d <sub>i</sub> (μm)	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)									RMS
	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	108,3	87,9	76,4	55,8	44,4	29,4	22,2	16,6	13,8	
Genetic	108,2	87,6	74,7	58,4	45,7	30,7	21,6	16,5	13,5	2,35%
Basin	108,6	87,9	74,4	57,8	45,5	29,9	21,3	16,2	12,9	3,16%
Radius	107,8	92,5	81,3	66,3	54,4	37,8	27,8	21,6	17,5	21,07%

Πινακας 6.19: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (K196)



Σχήμα 6.37: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου K196

18) Θέση ελέγχου D47, για θερμοκρασία δοκιμής 19,4°C:

Υποχωρήσεις D47 - d <sub>i</sub> (μm)	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)									RMS
	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	234,7	189,0	158,0	109,4	75,2	31,6	14,0	10,4	9,0	
Genetic	234,7	187,7	155,2	111,8	78,0	36,3	18,8	12,4	10,4	3,89%
Basin	240,9	197,4	160,5	110,6	74,2	33,9	17,1	10,0	6,5	12,41%
Radius	230,6	184,3	149,0	104,2	72,2	35,7	19,6	12,3	8,4	15,82%

Πινακας 6.20: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (D47)



Σχήμα 6.38: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου D47
19) Θέση ελέγχου D61, για θερμοκρασία δοκιμής 19,3°C:

Υποχωρήσεις	Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)							RMS		
D61 - d <sub>i</sub> (µm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	141,1	104,2	82,0	54,0	35,1	14,5	7,5	5,6	5,2	
Genetic	141,2	104,6	81,3	53,3	34,0	15,2	9,1	7,4	6,6	1,40%
Basin	140,9	106,0	81,6	53,0	34,6	16,1	8,9	5,6	3,9	11,11%
Radius	141,0	103,7	79,3	51,9	35,6	17,2	10,1	6,7	4,8	14,91%

Πινακας 6.21: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (D61)





20) Θέση ελέγχου D71, για θερμοκρασία δοκιμής 20,1°C:

		<i>/</i> <b>·</b> ·			•	•				
Υποχωρήσεις		Αποστάσεις γεωφώνων από το σημείο φόρτισης (cm)							RMS	
D71 - d <sub>i</sub> (µm)	0,0	20,0	30,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	(%)
Μετρημένες	125,2	85,7	63,7	41,3	26,7	11,3	5,9	3,4	3,4	
Genetic	125,2	85,6	63,8	40,1	25,7	12,7	8,6	7,1	6,1	2,66%
Basin	125,3	84,8	64,6	41,9	26,7	10,9	5,1	2,8	1,7	17,70%
Radius	124,8	80,3	63,9	44,9	30,8	14,4	7,4	4,4	2,8	17,82%

Πινακας 6.22: Ελαστικές υποχωρήσεις και ποσοστιαίο σφάλμα RMS (D71)



**Σχήμα 6.40**: Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικών υποχωρήσεων για τη θέση ελέγχου D71

Από τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτή η πολύ καλή προσέγγιση των μετρημένων υποχωρήσεων από τη μέθοδο βέλτιστης προσέγγισης (Basin fitting) της συμβατικής μεθοδολογίας ανάστροφου υπολογισμού σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Για αυτό το λόγο, όπως επισημάνθηκε στο 5° κεφάλαιο το εύρος του μέτρου δυσκαμψίας που δόθηκε για την εκκίνηση του ανάστροφου υπολογισμού με τη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων, ορίστηκε με βάση το μέτρο δυσκαμψίας που εκτίμηθηκε από τη μέθοδο Basin fitting. Επίσης, η επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται από αυτή τη μέθοδο ταυτίζεται με τη διαδικασία που ακολουθείται από τη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων κάτι που επιβεβαιώνεται από τα διαγράμματα, καθώς οι υποχωρήσεις που υπολογίζονται παρουσιάζουν αξιοσήμειωτη σύγκλιση. Παράλληλα, οι ελαστικές υποχωρήσεις που υπολογίζονται από τη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων φαίνεται να προσεγγίζουν σχεδόν εξολοκλήρου τις αντίστοιχες μετρημένες.

Η μέθοδος *Radius of curvature* της συμβατικής μεθοδολογίας πολλαπλών στρώσεων, φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις στις χαμηλότερες θερμοκρασίες διεξαγωγής της δοκιμής (<10°C), δηλαδή στις θέσεις A165, A167, A173, A177, A181, K167. Αντίθετα, για το ενδιάμεσο έυρος θερμοκρασιών (12,9°C – 15,4°C), οι υπολογισμένες υποχωρήσεις φαίνεται να αποκλίνουν από τις μετρημένες σε όλες τις θέσεις των γεωφώνων (θέσεις: A185, A187, A190, A193, A196, K185.5, K187, K190, K196), ενώ για τις πιο υψηλές θερμοκρασίες (19,3°C – 22,8°C) η απόκλιση των υποχωρήσεων σημειώνεται στα πιο απομακρυσμένα από το κέντρο επιβολής της φόρτισης γεώφωνα (θέσεις: K165, K181, D47, D61, D71).

Ακολουθεί σύγκριση μέσω πίνακα και διαγραμμάτων του ποσοστιαίου σφάλματος RMS για τις υπό διερεύνηση μεθόδους ανάστροφου υπολογισμού. Τα διαγράμματα για λόγους ευκρίνειας χωρίζονται σε δύο δεκάδες, η πρώτη αφορά τις θέσεις ελέγχου Α και η δεύτερη τις θέσεις Κ και D.



Σχήμα 6.41: Συγκριτικά διαγράμματα ποσοστιαίου σφάλματος RMS (θέσεις Α)



**Σχήμα 6.42**: Συγκριτικά διαγράμματα ποσοστιαίου σφάλματος RMS (θέσεις K και D)

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη για το σφάλμα RMS ανά μέθοδο. Λόγω της μεγάλης διασποράς της μέσης τιμής του σφάλματος, έχει υπολογιστεί και η τιμή της διαμέσου για κάθε δείγμα, που λαμβάνεται υπόψη στο σχήμα 6.43.

Χαρακτηριστικά μεγέθη RMS	Genetic algorithms	Basin fitting	Radius of curvature
Ελάχιστη τιμή	1,4%	1,8%	14,0%
Μέγιστη Τιμή	5,7%	17,7%	22,2%
Μέση τιμή	3,4%	7,7%	17,1%
Συντ. διασποράς (%)	39,8%	47,0%	12,6%
Διάμεσος	3,6%	7,8%	17,3%

Πίνακας 6.23: Χαρακτηριστικά μεγέθη για τα RMS των μεθοδολογιών ανάστροφου υπολογισμού



Σχήμα 6.43: Διάγραμμα διαμέσου RMS ανά μέθοδο ανάστροφου υπολογισμού

Από το προηγούμενο διάγραμμα διαφαίνεται η αυξημένη τιμή του σφάλματος RMS για τη μέθοδο *Radius of curvature* (διάμεσο σφάλμα: 17,3%) της συμβατικής μεθοδολογίας ανάστροφου υπολογισμού. Αντιθέτως, η μέθοδος *Basin fitting* εμφανίζει πολύ μικρότερα σφάλματα (διάμεσο σφάλμα: 7,8%). Οι διαφορές στις δύο μεθόδους, ενδεχομένως να οφείλονται στη διαφορετική μεθοδολογία αξιοποίησης των καταγεγραμμένων ελαστικών υποχωρήσεων από την καθεμία. Στην περίπτωση της μεθόδου *Basin fitting*, η επαναληπτική διαδικασία στοχεύει στην ελασχιστοποίηση του σφάλματος έπειτα από αρκετές δοκιμές, κάτι που δεν συμβαίνει στη μέθοδο *Radius of curvature*. Κατά συνέπεια, είναι επόμενο να

Η μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων, εμφανίζει σε όλες τις θέσεις τα μικρότερα σφάλματα (διάμεσο σφάλμα: 3,6%). Αυτό προέκυψε έπειτα από αρκετές δοκιμές που στόχευαν στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος, όπως και στην περίπτωση της μεθόδου *Basin fitting*.

# 6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων δυσκαμψίας ανάστροφου υπολογισμού

Στη συνέχεια ακολουθεί συγκριτική αξιολόγηση των επιτόπου μέτρων δυσκαμψίας που προκύπτουν από τις υπόψη μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού: των γενετικών αλγορίθμων ( $E_{gen}$ ), της μεθόδου βέλτιστης προσέγγισης – Basin fitting ( $E_{basin}$ ) και της μεθόδου προσαρμογής βάσει της ακτίνας καμπυλότητας – Radius of curvature ( $E_{radius}$ ).

			Ελαστική θεωρία πολλαπλών			
		Γενετικοί	στρώ	σεων		
Θέσεις ελέγχου	Επιτόπου αλγόριθμοι Τ <sub>i</sub> (°C)		Basin fitting	Radius of curvature		
		$E_{gen}$ (MPa)	$E_{basin}$ (MPa)	<i>E<sub>radius</sub></i> (MPa)		
A165	9,5	11907	13266	16311		
A167	9,4	12548	9563	8106		
A173	9,1	15320	11857	10492		
A177	8,9	14307	11828	11554		
A181	8,7	15789	10851	13148		
A185	14,3	11638	9315	8065		
A187	14,1	10818	7940	10891		
A190	13,7	10321	6984	11699		
A193	13,4	12197	9819	12889		
A196	13,0	13590	9383	12162		
K165	19,9	10804	8438	9400		
K167	9,1	10597	8070	7157		
K181	22,8	10163	8087	9701		
K185.5	12,9	15051	10683	9161		
K187	13,3	16775	10531	14386		
K190	13,9	14327	8997	10647		
K196	15,2	13603	9039	12742		
D47	19,4	7439	6814	5351		
D61	19,3	8708	6565	5714		
D71	20,1	5929	4458	3232		

**Πίνακας 6.24**: Επιτόπου μέτρα δυσκαμψίας ( $E_{in-situ}$ ) από τον ανάστροφο υπολογισμό

Τα παραπάνω απεικονίζονται με τη μορφή ραβδογράμματος στα σχήματα που ακολουθούν. Σημειώνεται ότι γίνεται διαχωρισμός σε δύο δεκάδες για λόγους ευκρίνειας.



**Σχήμα 6.44**: Διάγραμμα  $E_{in-situ}$  για τις θέσεις ελέγχου Α



**Σχήμα 6.45**: Διάγραμμα *E*<sub>in-situ</sub> για τις θέσεις ελέγχου K, D

Από τα στοιχεία του μέτρου δυσκαμψίας του ανάστροφου υπολογισμού ( $E_{in-situ}$ ) για κάθε θέση, διαφαίνεται ότι η μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων δίνει υψηλότερη εκτίμηση των τιμών του σε σχέση με τη συμβατική μεθοδολογία της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων. Όσον αφορά στις μεθόδους της συμβατικής μεθοδολογίας, δεν παρατηρείται ενιαία τάση, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις η μία το υπερεκτιμά σε σχέση με την άλλη και άλλοτε συμβαίνει το αντίστροφο. Για την περαιτέρω διερεύνηση αυτών των ποιοτικών παρατηρήσεων, προσδιορίστηκαν οι λόγοι των μέτρων δυσκαμψίας για τις υπόψη μεθόδους. Ειδικότερα, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι λόγοι:  $E_{Genetic algorithms} / E_{Basin fitting}$ ,  $E_{Genetic algorithms} / E_{Radius of curvature}$ ,  $E_{Basin fitting} / E_{Radius of curvature}$ . Επιπλέον, δίνεται πίνακας 6.25 με τα χαρακτηριστικά στατιστικά τους μεγέθη.

Θέσεις ελέγχου	Επιτόπου θερμοκρασία Τ. (°C)	Λόγος μέτρων δυα αλγορίθμων και πολλαπλώ	Λόγος μέτρων δυσκαμψίας μεθόδων ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων	
		E <sub>gen</sub> /E <sub>basin</sub>	$E_{gen}/E_{basin}$ $E_{gen}/E_{radius}$	
A165	9,5	0,90	0,73	0,81
A167	9,4	1,31	1,55	1,18
A173	9,1	1,29	1,46	1,13
A177	8,9	1,21	1,24	1,02
A181	8,7	1,46	1,20	0,83
A185	14,3	1,25	1,44	1,16
A187	14,1	1,36	0,99	0,73
A190	13,7	1,48	0,88	0,60
A193	13,4	1,24	0,95	0,76
A196	13,0	1,45	1,12	0,77
K165	19,9	1,28	1,15	0,90
K167	9,1	1,31	1,48	1,13
K181	22,8	1,26	1,05	0,83
K185.5	12,9	1,41	1,64	1,17
K187	13,3	1,59	1,17	0,73
K190	13,9	1,59	1,35	0,85
K196	15,2	1,50	1,07	0,71
D47	19,4	1,09	1,39	1,27
D61	19,3	1,33	1,52	1,15
D71	20,1	1,33	1,83	1,38

**Πίνακας 6.24**: Λόγοι μέτρων δυσκαμψίας  $E_{in-situ}$ 

Πίνακας 6.25: Χαρακτηριστικά μεγέθη λόγων E<sub>in-situ</sub>

Χαρακτηριστικά μεγέθη	$E_{gen}/E_{basin}$	$E_{gen}/E_{radius}$	$E_{basin}/E_{radius}$
Ελάχιστη τιμή	0,90	0,73	0,60
Μέγιστη τιμή	1,59	1,83	1,38
Μέση τιμή	1,33	1,26	0,95
Συντελ. διασποράς (%)	12,3%	22,3%	23,4%
Διάμεσος	1,32	1,22	0,87

Από τον προηγούμενο πίνακα παρατηρείται ότι οι μέσες τιμές των λόγων έχουν συντελεστή διασποράς που κυμαίνεται από 12,3% έως 23,4%. Δηλαδή, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει στατιστική ομοιογένεια στα διαθέσιμα δείγματα των  $E_{in-situ}$ , εφόσον ο συντελεστής διασποράς είναι μεγαλύτερος του 10%. Συνεπώς, η διάμεσος του κάθε δείγματος θεωρείται

αντιπροσωπευτικότερη της μέσης τιμής και θα χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση της σύγκρισης. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, οι γενετικοί αλγόριθμοι εκτιμούν υψηλότερα το μέτρο  $E_{in-situ}$  σε σχέση με την ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων, και μάλιστα σε ποσοστό 32% και 22% παραπάνω από τις μεθοδολογίες Basin fitting και Radius of curvature, αντίστοιχα. Όσον αφορά στη σύγκριση των  $E_{in-situ}$  που προκύπτουν από τις μεθόδους της συμβατικής μεθοδολογίας, η μέθοδος Basin fitting εκτιμά χαμηλότερα τις τιμές στο  $E_{in-situ}$  κατά 13% σε σχέση με τη μέθοδο Radius of curvature.

Οι λόγοι των μέτρων δυσκαμψίας του πίνακα 6.24 παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα συναρτήσει της θερμοκρασίας των επιτόπου δοκιμών με το FWD.



**Σχήμα 6.46**: Λόγοι  $E_{in-situ}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας της εκάστοτε δοκιμής

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι τα δεδομένα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις περιοχές θερμοκρασιών, προκειμένου να διερευνηθεί τυχόν επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταβολή των λόγων. Για κάθε περιοχή θερμοκρασιών που κωδικοποιούνται ως χαμηλές, ενδιάμεσες και υψηλές, έχει υπολογιστεί μια μέση αντιπροσωπευτική τιμή θερμοκρασίας (πίνακας 6.26), και αναλόγως έχουν ομαδοποιηθεί οι λόγοι.

ŵv			Θερμοκρασ	τία
Εύρος θερμοκρασι	Θέσεις ελέγχου	Επιτόπου <i>Τ<sub>i</sub></i> (°C)	Μέση Τ <sub>ί</sub> (°C)	Συτ. διασποράς (%)
	A181	8,7		
ς σίες	A177	8,9		
ιρας	A173	9,1	0.1	2.2%
нон (арт	K167	9,1	9,1	5,570
, Өεр	A167	9,4		
	A165	9,5	-	
	K185.5	12,9		
	A196	13,0		
្ល	K187	13,3		
εσες ασίε	A193	13,4		
άμε ακρι	A190	13,7	13,8	5,2%
ενδι	K190	13,9		
θ <sup>Ι</sup>	A187	14,1		
	A185	14,3		
	K196	15,2		
ې د	D61	19,3		
ές ασίε	D47	19,4		
рηλ <sub>і</sub>	K165	19,9	20,3	7,1%
אן אן	D71	20,1		
θ	K181	22,8		

Πίνακας 6.26: Ομαδοποίηση θέσεων ελέγχου σε τρεις περιοχές θερμοκρασιών

Η θεώρηση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας ως αντιπροσωπευτική, υποστηρίζεται από τη χαμηλή τιμή του συντελεστή διασποράς. Στα ακόλουθα σχήματα, έχουν σημειωθεί οι τιμές των μέτρων *E*<sub>in-situ</sub> ανά περιοχή θερμορκασίων.



**Σχήμα 6.47**: Μέτρα  $E_{in-situ}$  στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών



**Σχήμα 6.48**: Μέτρα *E*<sub>in-situ</sub> στην περιοχή των ενδιάμεσων θερμοκρασιών



**Σχήμα 6.49**: Μέτρα  $E_{in-situ}$  στην περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών

Μετά την ομαδοποίηση των θερμοκρασιών, τα μεγέθη του πίνακα 6.25 υπολογίζονται για κάθε περιοχή θερμοκρασιών και προκύπτει ο πίνακας 6.27.

Μενέθη	$E_{gen}/E_{basin}$					
weyeon	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές			
Ελάχιστη τιμή	0,90	1,24	1,09			
Μέγιστη τιμή	1,46	1,59	1,33			
Μέση τιμή	1,25	1,43	1,26			
Συντ. διασποράς	15,1%	9,0%	7,8%			
Διάμεσος	1,30	1,45	1,28			
Μενέθη		E <sub>gen</sub> /E <sub>radius</sub>				
weycoll	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές			
Ελάχιστη τιμή	0,73	0,88	1,05			
Μέγιστη τιμή	1,55	1,64	1,83			
Μέση τιμή	1,28	1,18	1,39			
Συντ. διασποράς	23,6%	21,3%	22,5%			
Διάμεσος	1,35	1,12	1,39			
Μενέθη	$E_{basin}/E_{radius}$					
Μεγεση	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές			
Ελάχιστη τιμή	0,81	0,60	0,83			
Μέγιστη τιμή	1,18	1,17	1,38			
Μέση τιμή	1,02	0,83	1,11			
Συντ. διασποράς	15,8%	23,9%	21,3%			
Διάμεσος	1,08	0,76	1,15			

**Πίνακας 6.27**: Λόγοι  $E_{in-situ}$  ανά περιοχή θερμοκρασιών

Παρατηρείται μεγάλη διασπορά στο δείγμα των λόγων ανά μέθοδο και περιοχή θερμοκρασιών. Η μεταβολή των λόγων (με θεώρηση της διαμέσου τιμής ως αντιπροσωπευτικής) σε σχέση με τη θερμοκρασία φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 6.50**: Λόγοι μέτρων  $E_{in-situ}$  ανά περιοχή θερμοκρασιών

Από το σχήμα δεν προκύπτει κάποια σταθερή τάση και επομένως δεν είναι δυνατό να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταβολή του λόγου των μέτρων δυσκαμψίας. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται:

- στη διαφορετική τάξη μεγέθους στα σφάλματα RMS των τριών μεθόδων, τα οποία καθιστούν δύσκολα συγκρίσιμες τις επιμέρους τιμές των  $E_{in-situ}$ ,
- στη διαφορετική θεωρητική προσέγγιση που βασίζεται η κάθε μέθοδος, η οποία οδηγεί σε διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων.

## 6.2.3 Συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων δυσκαμψίας ανάστροφου υπολογισμού και του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Κατόπιν αναγωγής του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $(E_{lab}^*)$  για κάθε έναν από τους πυρήνες ελέγχου, στις επιτόπου συνθήκες διεξαγωγής των δοκιμών σε κάθε μία από τις αντίστοιχες θέσεις ελέγχου, προκύπτει ο πίνακας 6.28. Με βάση τις παρακάτω τιμές, πραγματοποιείται η συγκριτική αξιολόγηση των μέτρων δυσκαμψίας από τον ανάστροφο υπολογισμό  $(E_{in-situ})$  με τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $(E_{lab}^*)$  που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά.

	Επιτόπου	Γενετικοί	Ελαστική θεωρ στρώ	<i>E</i> <sup>*</sup> <sub>lab</sub> (MPa) που	
Θέσεις ελέγχου	θερμοκρασία <i>Τ</i> <sub>i</sub> (°C)	αλγόριθμοι	Basin fitting	Radius of curvature	αντιστοιχεί στις επιτόπου
		$E_{gen}$ (MPa)	E <sub>basin</sub> (MPa)	<i>E<sub>radius</sub></i> (MPa)	συνθήκες
A165	9,5	11907	13266	16311	14766
A167	9,4	12548	9563	8106	13895
A173	9,1	15320	11857	10492	14285
A177	8,9	14307	11828	11554	14508
A181	8,7	15789	10851	13148	16109
A185	14,3	11638	9315	8065	14868
A187	14,1	10818	7940	10891	12974
A190	13,7	10321	6984	11699	13967
A193	13,4	12197	9819	12889	14967
A196	13,0	13590	9383	12162	14596
K165	19,9	10804	8438	9400	13641
K167	9,1	10597	8070	7157	12397
K181	22,8	10163	8087	9701	9199
K185.5	12,9	15051	10683	9161	16772
K187	13,3	16775	10531	14386	13150
K190	13,9	14327	8997	10647	13692
K196	15,2	13603	9039	12742	13323
D47	19,4	7439	6814	5351	7812
D61	19,3	8708	6565	5714	8835
D71	20,1	5929	4458	3232	8317

**Πίνακας 6.28**: Τιμές μέτρου δυσκαμψίας  $E_{in-situ}$  και δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{lab}^*$ 

Για τις παραπάνω τιμές των μέτρων δυσκαμψίας όλων των μεθόδων, δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα. Αρχικά, για τις θέσεις ελέγχου Α (σχήμα 6.51) και έπειτα για τις θέσεις Κ και D (σχήμα 6.52).



**Σχήμα 6.51**: Διάγραμμα μέτρων  $E_{in-situ} - E^*_{lab}$  για τις θέσεις Α



**Σχήμα 6.52**: Διάγραμμα μέτρων  $E_{in-situ} - E^*_{lab}$  για τις θέσεις K, D

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι το  $E_{lab}^*$  έχει μεγαλύτερη τιμή από τα  $E_{in-situ}$  στην πλειοψηφία των θέσεων ελέγχου. Σε μικρό αριθμό θέσεων, οι τιμές του  $E_{in-situ}$  που προκύπτουν από τη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων υπερβαίνουν τις τιμές του  $E_{lab}^*$ .

Για λόγους ακριβέστερης προσέγγισης παρουσιάζονται στη συνέχεια (πίνακας 6.29) οι λόγοι των μέτρων δυσκαμψίας  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$ .

Θέσεις ελέγχου	Επιτόπου θερμοκρασία	Λόγοι μέτρων $E_{in-situ}/E^*_{lab}$				
	Τ <sub>i</sub> (°C)	$E_{gen}/E_{lab}^*$	$E_{basin}/E_{lab}^*$	$E_{radius}/E_{lab}^*$		
A165	9,5	0,81	0,90	1,10		
A167	9,4	0,90	0,69	0,58		
A173	9,1	1,07	0,83	0,73		
A177	8,9	0,99	0,82	0,80		
A181	8,7	0,98	0,67	0,82		
A185	14,3	0,78 0,63		0,54		
A187	14,1	0,83 0,61		0,84		
A190	13,7	0,74 0,50		0,84		
A193	13,4	0,81	0,66	0,86		
A196	13,0	0,93	0,64	0,83		
K165	19,9	0,79	0,62	0,69		
K167	9,1	0,85	0,65	0,58		
K181	22,8	1,10	0,88	1,05		
K185.5	12,9	0,90	0,64	0,55		
K187	13,3	1,28	0,80	1,09		
K190	13,9	1,05	0,66	0,78		
K196	15,2	1,02	0,68	0,96		
D47	19,4	0,95	0,87	0,68		
D61	19,3	0,99	0,74	0,65		
D71	20,1	0,71	0,54	0,39		

**Πίνακας 6.29**: Λόγοι μέτρων δυσκαμψίας  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$ 

Για τους λόγους που υπολογίστηκαν, δίνονται στον ακόλουθο πίνακα, τα χαρακτηριστικά στατιστικά τους μεγέθη.

Χαρακτηριστικά μεγέθη	$E_{gen}/E_{lab}$	$E_{basin}/E_{lab}$	$E_{radius}/E_{lab}$
Ελάχιστη τιμή	0,71	0,50	0,39
Μέγιστη τιμή	1,28	0,90	1,10
Μέση τιμή	0,92	0,70	0,77
Συντελ. διασποράς (%)	15,1%	16,2%	25,1%
Διάμεσος	0,92	0,67	0,79

**Πίνακας 6.30**: Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη λόγων  $E_{in-situ}$  /  $E_{lab}^*$ 

Θεωρώντας την τιμή του  $E^*_{lab}$  ως τιμή αναφοράς, από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων υποεκτιμά τις τιμές του μέτρου δυσκαμψίας κατά 8%

(θέωρηση διάμεσων λόγων). Οι μεθοδολογίες της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων, Radius of curvature και Basin fitting υποεκτιμούν το μέτρο δυσκαμψίας κατά 21% και 33% αντίστοιχα. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι ακόμη και στην περίπτωση που θεωρούνταν καταχρηστικά αποδεκτές οι μέσες τιμές των λόγων (εξαιτίας της διασποράς που παρουσιάζουν), τα αριθμητικά αποτελέσματα που διατυπώθηκαν παραπάνω διαφοροποιούνται ελάχιστα. Η πειραματική διαδικασία εμπεριέχει τόσο τυχαία σφάλματα που αφορούν την εκτίμηση της επιτόπου θερμοκρασίας, όσο και συστηματικά σφάλματα που αφορούν τη μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων από το FWD. Λαμβάνοντας υπόψη και ενδεχόμενες αδυναμίες στην εκτίμηση των επιτόπου μέτρων δυσκαμψίας από τα λογισμικά, είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί στατιστική ομοιογένεια κατά τη σύγκριση με το εργαστηριακά προσδιορισμένο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας στην παρούσα ανάλυση.

Στη συνέχεια, διερευνάται η επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας. Για το σκοπό αυτό, τα αποτελέσματα των μέτρων δυσκαμψίας όλων των θέσεων, ταξινομήθηκαν σε αύξουσα σειρά θερμοκρασίας, προκειμένου να υπολογιστεί μια αντιπροσωπευτική τιμή ανά μέθοδο και περιοχή θερμοκρασίας. Οι περιοχές θερμοκρασίας είναι αυτές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Στα επόμενα διαγράμματα, παρουσιάζονται οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας για τις θέσεις ελέγχου που ανήκουν στις τρεις περιοχές θερμοκρασίας.



**Σχήμα 6.53**: Μέτρα  $E_{in-situ}$  –  $E_{lab}^*$  στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών



**Σχήμα 6.54**: Μέτρα  $E_{in-situ} - E^*_{lab}$  στην περιοχή των ενδιάμεσων θερμοκρασιών



**Σχήμα 6.55**: Μέτρα  $E_{in-situ} - E^*_{lab}$  στην περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών

Στον πίνακα 6.31, φαίνονται ανά μέθοδο και περιοχή θερμοκρασίας η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή των μέτρων *E* (που καθορίζουν το εύρος των τιμών των *E* που προέκυψαν στην παρούσα ανάλυση), η μέση τιμή του με το συντελεστή διασποράς και η διάμεσος του διαθέσιμου κάθε φορά δείγματος.

Εύρος θερμοκρασιών	Μεγέθη	$E_{gen}$ (MPa)	E <sub>basin</sub> (MPa)	<i>E<sub>radius</sub></i> (MPa)	$E_{lab}$ (MPa)
	ελάχιστη τιμή	10597	8070	7157	12397
	μέγιστη τιμή	15789	13266	16311	16109
Χαμηλές	μέση τιμή	13411	10906	11128	14327
	συντ. διασπ.	15,3%	17,0%	30,2%	8,4%
	διάμεσος	13428	11339	11023	14397
	ελάχιστη τιμή	10321	6984	8065	12974
	μέγιστη τιμή	16775	10683	14386	16772
Ενδιάμεσες	μέση τιμή	13147	9188	11405	14257
	συντ. διασπ.	15,9%	12,7%	17,1%	8,4%
	διάμεσος	13590	9315	11699	13967
	ελάχιστη τιμή	5929	4458	3232	7812
Υψηλές	μέγιστη τιμή	10804	8438	9701	13641
	μέση τιμή	8609	6872	6679	9561
	συντ. διασπ.	23,1%	22,8%	41,8%	24,5%
	διάμεσος	8708	6814	5714	8835

**Πίνακας 6.31**: Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη μέτρων *Ε*, ανά περιοχή θερμοκρασιών

Από την υπόψη ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα:

Οι συντελεστές διασποράς στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών κυμαίνονται γενικά σε χαμηλά επίπεδα (από 8,4% έως 17%) με εξαίρεση τη σχετικά υψηλή τιμή στην περίπτωση του E<sub>radius</sub>. Στην περιοχή των ενδιάμεσων θερμοκρασιών, όλοι οι συντελεστές είναι μικρότεροι του 17,1%, γεγονός που ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι το δείγμα των θέσεων ελέγχου σε αυτήν την περιοχή είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με τα αντίστοιχα δείγματα στις άλλες δύο περιοχές. Στην περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών, οι συντελεστές διασποράς είναι της τάξης του 20-25%, ενώ στην περίπτωση του E<sub>radius</sub> παρουσιάζεται διασπορά 41,8%. Η μεγάλη διασπορά που εμφανίζουν οι τιμές του E<sub>radius</sub>, ενδεχομένως να οφείλεται στις αυξημένες τιμές του σφάλματος RMS κατά τον υπολογισμό των ελαστικών υποχωρήσεων.

Λόγω των παραπάνω, λαμβάνονται ως αντιπροσωπευτικές οι τιμές της διαμέσου σε κάθε δείγμα, και η μεταβολή των μέτρων δυσκαμψίας στις περιοχές θερμοκρασιών φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα.



**Σχήμα 6.56**: Μέτρα  $E_{gen}$ ,  $E_{basin}$ ,  $E_{radius}$ ,  $E_{lab}^*$  ανά περιοχή θερμοκρασιών

Από το παραπάνω διάγραμμα, επιβεβαιώνεται ότι οι εργαστηριακά προσδιορισμένες τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι μεγαλύτερες από τα μέτρα δυσκαμψίας που εκτιμήθηκαν μέσω του ανάστροφου υπολογισμού. Επιπλέον, τα μέτρα δυσκαμψίας που προκύπτουν από τους γενετικούς αλγορίθμους είναι υψηλότερα σε σχέση με αυτά που προκύπτουν από τις μεθόδους της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων. Μεταξύ των δύο μεθόδων της προηγούμενης μεθοδολογίας, δε διαφαίνεται ξεκάθαρα ποια εκτιμά μεγαλύτερο μέτρο δυσκαμψίας (κάτι που είχε επισημανθεί στην προηγούμενη ενότητα από τη μεγάλη διασπορά του λόγου  $E_{basin}/E_{radius}$ ). Συνοψίζοντας, για τις θέσεις που ελέγχθηκαν ισχύει:

$$E_{lab}^* > E_{gen} > E_{radius} \approx E_{basin} \tag{6.25}$$

Επιπλέον, από το διάγραμμα του σχήματος 6.56 διαφαίνεται ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας μειώνονται οι τιμές τόσο των  $E_{in-situ}$  όσο και του  $E_{lab}^*$ . Το παραπάνω είναι σύμφωνο με αυτά που είναι γνωστά για την επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Περαιτέρω διερεύνηση αποτελεί η ενδεχόμενη επίδραση της θερμοκρασίας στη μεταβολή των λόγων των μέτρων δυσκαμψίας. Παρομοίως με το σχήμα 6.46, ακολουθεί το σχήμα 6.57, στο οποίο παριστάνεται η μεταβολή των λόγων  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$ 



**Σχήμα 6.57**: Λόγοι μέτρων δυσκαμψίας ως προς τη θερμοκρασία της εκάστοτε δοκιμής

Ακολουθεί ο πίνακας 6.32 των λόγων  $E_{in-situ}/E^*_{lab}$  ανά περιοχή θερμοκρασιών και το αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 6.58) με θεώρηση τιμής διαμέσου.

Martí	$E_{gen}/E_{lab}$		
Ινιεγεθη	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές
Ελάχιστη τιμή	0,81	0,74	0,71
Μέγιστη τιμή	1,07	1,28	1,10
Μέση τιμή	0,93	0,93	0,91
Συντ. διασπορ.	10,4%	18,0%	17,2%
Διάμεσος	0,94	0,90	0,95
Μεγέθη	$E_{basin}/E_{lab}$		
	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές
Ελάχιστη τιμή	0,65	0,50	0,54
Μέγιστη τιμή	0,90	0,80	0,88
Μέση τιμή	0,76	0,65	0,73
Συντ. διασπορ.	13,4%	12,0%	20,9%
Διάμεσος	0,75	0,64	0,74
Μεγέθη	E <sub>radius</sub> /E <sub>lab</sub>		
	Χαμηλές	Ενδιάμεσες	Υψηλές
Ελάχιστη τιμή	0,58	0,54	0,39
Μέγιστη τιμή	1,10	1,09	1,05
Μέση τιμή	0,77	0,81	0,69
Συντ. διασπορ.	25,2%	21,8%	34,3%
Διάμεσος	0,77	0,84	0,68

Πίνακας 6.32: Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη λόγων μέτρων δυσκαμψίας



**Σχήμα 6.58**: Διάγραμμα λόγων ανά περιοχή θερμοκρασιών

Από το παραπάνω διάγραμμα, ο λόγος  $E_{gen}/E_{lab}^*$  παραμένει πρακτικά σταθερός (με εύρος 0,90 – 0,95) ανεξάρτητα από την περιοχή θερμοκρασίας. Αντίθετα, οι λόγοι  $E_{basin}/E_{lab}^*$  και  $E_{radius}/E_{lab}^*$  μεταβάλλονται ακανόνιστα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στη δυσκολία ποσοτικοποίησης της επίδρασης που έχει η μεταβολή της θερμοκρασίας στο  $E_{in-situ}$  και στο  $E_{lab}^*$ , με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αποσαφηνιστεί εάν ο λόγος  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$  αυξάνεται ή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Όσον αφορά στην τιμή του λόγου  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$ , κυμαίνεται από 0,64 έως 0,95 (με θεώρηση διάμεσων τιμών) για όλο το φάσμα θερμοκρασιών. Σε αντίστοιχη διεθνή έρευνα, ο λόγος του μέτρου δυσκαμψίας που υπολογίστηκε ανάστροφα από παρεμφερές λογισμικό  $(E_{backcalculated})$  προς το εργαστηριακό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας  $(E_{lab}^*)$  κυμαίνεται από 0,34 έως 0,77 με θεώρηση μέσων τιμών (Gefada et al., 2010). Η παρατηρούμενη απόκλιση διαφορετικού ενδεχομένως χρησιμοποιούμενου τροποποιητικού της ασφάλτου, των εκάστοστε περιβαλλοντικών συνθηκών, των διαφορετικών ανάστροφων λογισμικών και της διαφορετικής εργαστηριακής διάταξης που έχει χρησιμοποιομεί.

Τέλος, όσον αφορά στη γενική τάση που επικρατεί (ότι δηλαδή  $E_{lab}^* > E_{in-situ}$ ), τονίζεται ότι αφενός το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται ακριβέστερα στο εργαστήριο, και αφετέρου ελέγχεται μόνο ο πυρήνας της ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος. Αντίθετα, το  $E_{in-situ}$  εκτιμάται ελέγχοντας συνολικά την απόκριση του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των ασφαλτικών με τις υποκείμενες στρώσεις. Επιπλέον, στο πεδίο λαμβάνεται υπόψη η επίδραση κλιματολογικών συνθηκών, οι οποίες δε δύναται να αποτυπωθούν εξ'ολοκλήρου στην εργαστηριακή δοκιμή. Ενδέχεται για παράδειγμα, οι χαμηλές θερμοκρασίες στην περιοχή του έργου να υποδηλώνουν ύπαρξη υγρασίας, η οποία επιδρά αρνητικά στο  $E_{in-situ}$ . Υπό το πρίσμα των παραπάνω, υποστηρίζεται το γεγονός των

υψηλότερων εργαστηριακών τιμών από τις επιτόπου τιμές δυσκαμψίας στα ασφαλτομίγματα που ελέγχθηκαν.

#### 6.2.4 Συσχέτιση ανάστροφων και εργαστηριακών τιμών μέτρου δυσκαμψίας

Σε αυτό το εδάφιο, πραγματοποιείται διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των μέτρων δυσκαμψίας που προέκυψαν από τις επιμέρους μεθόδους που εφαρμόστηκαν, δηλαδή την εργαστηριακή μέθοδο και τις δύο μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού.

Είναι προφανές ότι σε πραγματικής κλίμακας προβλήματα μηχανικού, όπως αυτό που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, στα πειραματικά δεδομένα ενδέχεται να μην επιτευχθεί η απόλυτη συσχέτιση μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου. Η συσχέτιση αυτή εκφράζεται και ελέγχεται ποσοτικά μέσω του συντελεστή συσχέτισης  $R^2$ , ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0 (ανύπαρκτη συσχέτιση) έως 1 (απόλυτη συσχέτιση). Όσο η τιμή του  $R^2$  πλησιάζει τη μονάδα, θεωρείται ότι τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να εκφραστούν ικανοποιητικά από το επιλεγόμενο μοντέλο. Υπάρχουν διάφορα όρια στην τιμή του  $R^2$ , τα οποία διαφοροποιούν το είδος της συσχέτισης από άριστη σε πολύ καλή, καλή, μέτρια ή ανύπαρκτη. Τέτοιες τιμές δεν υιοθετούνται άκριτα σε οποιαδήποτε περίπτωση και μόνο υποδειγματικά να ελέγχει και να αξιολογεί κατά περίπτωση το μοντέλο που επιλέγει για να προσαρμόσει τα πειραματικά στοιχέτιση και τη συσχέτιση του επιτυγχάνεται.

Στην παρούσα ανάλυση, επιχειρείται συσχέτιση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας που υπολογίστηκε ανάστροφα από τη μεθοδολογία που αξιοποιεί τους γενετικούς αλγορίθμους και την ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων, με τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που υπολογίστηκαν μέσω των κεντρικών καμπύλων. Στα επόμενα διαγράμματα, φαίνονται οι εξισώσεις δύο μοντέλων, του γραμμικού και του υπερβολικού, που περιγράφουν τα πειραματικά στοιχεία. Επειδή η τιμή του  $R^2$  για το υπερβολικό μοντέλο (power fit curve) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του γραμμικού μοντέλου, παρουσιάζονται οι εξισώσεις που οδηγούν στην προσαρμογή των πειραματικών στοιχείων στο υπερβολικό μοντέλο, αφού τελικώς αυτό θεωρείται ενδεικτικότερο.

Οι μεταβλητές x και y, των οποίων τα στοιχεία προσαρμόζονται με βάση το υπερβολικό μοντέλο, συνδέονται ως εξής:

$$y = A \cdot x^B \tag{6.26}$$

όπου για τον προσδιορισμό των παραμέτρων A και B, υπολογίζονται πρώτα οι ποσότητες:

$$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln x_i \cdot \ln y_i - \sum_{i=1}^{n} \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^{n} (\ln x_i)^2 - (\sum_{i=1}^{n} \ln x_i)^2}$$
(6.27)

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} \ln y_i - b \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln x_i}{n}$$
(6.28)

και στη συνέχεια ισχύει:

$$B = b \tag{6.29}$$

$$A = e^a \tag{6.30}$$

Στις παραπάνω σχέσεις, n είναι το πλήθος των διαθέσιμων παρατηρήσεων (δηλαδή n = 20 στην ανάλυση αυτή), και  $x_i$  είναι  $y_i$  τα μέτρα E των δύο μεθόδων που συσχετίζονται κάθε φορά. Τέλος, ο συντελεστής συσχέτισης στο υπερβολικό μοντέλο υπολογίζεται ως εξής:

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(\ln x_{i} \cdot \ln y_{i}\right) - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln x_{i} \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln y_{i}\right]^{2}}{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(\ln x_{i}\right)^{2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} \ln x_{i}\right)^{2}}{n}\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\ln y_{i}\right)^{2} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} \ln y_{i}\right)^{2}}{n}\right]}$$
(6.31)

Στα ακόλουθα διαγράμματα, συσχετίζονται τα παρακάτω ζεύγη τιμών:

- <br/>
  <br/
- <br/>
  <br/
- $\clubsuit$   $E_{lab}^*$  και  $E_{basin}$
- $\clubsuit$   $E_{lab}^*$  και  $E_{radius}$

Από τη συσχέτιση των τιμών του  $E_{gen}$  με τις τιμές του  $E_{basin}$  (σχήμα 6.59), προέκυψε ότι:



 $E_{gen} = 2,90 \cdot E_{basin}^{0,9134}$ 

(6.32)

**Σχήμα 6.59:** Συσχέτιση των τιμών του  $E_{gen}$  με τις τιμές του  $E_{basin}$ 

Η συσχέτιση που επιτεύχθηκε ( $R^2 \approx 0,76$ ), είναι αρκετά ικανοποιητική. Υπενθυμίζεται εξάλλου, ότι οι τιμές από τη μέθοδο Basin fitting αποτέλεσαν τη βάση για τον προσδιορισμό του εύρους αναζήτησης στη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων, για αυτό και η συσχέτιση προέκυψε καλύτερη σε σχέση με τη συσχέτιση των τιμών του  $E_{gen}$  με τις τιμές του  $E_{radius}$  (σχήμα 6.60), για την οποία προέκυψε ότι:

$$E_{gen} = 75,40 \cdot E_{radius}^{0,5508} \tag{6.33}$$



**Σχήμα 6.60:** Συσχέτιση των τιμών του  $E_{gen}$  με τις τιμές του  $E_{radius}$ 

Η συσχέτιση ( $R^2 \approx 0,66$ ) είναι ελαφρώς μειωμένη σε σχέση με την προηγούμενη. Όσον αφορά τη συσχέτιση των τιμών του  $E_{basin}$  με τις τιμές του  $E_{radius}$  (σχήμα 6.61) προέκυψε ότι:



$$E_{basin} = 74,16 \cdot E_{radius}^{0,5222} \tag{6.34}$$

**Σχήμα 6.61:** Συσχέτιση των τιμών του  $E_{basin}$  με τις τιμές του  $E_{radius}$ 

Ουσιαστικά στο προηγούμενο διάγραμμα ελέγχεται κατά πόσο συγκλίνουν οι δυο μέθοδοι της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων. Η παρατήρηση της προηγούμενης υποενότητας σχετικά με τους λόγους των μέτρων δυσκαμψίας, που αφορούσε στη σχετικά μεγάλη διασπορά της μέσης τιμής των λόγων ( $E_{basin}/E_{radius}$ ) για τις τρεις περιοχές θερμοκρασίας, επιβεβαιώνεται και εδώ από τη συσχέτιση που επιτεύχθηκε ( $R^2 \approx 0,65$ ), η οποία αναμενόταν να είναι σαφώς βελτιωμένη, εφόσον πρόκειται για επιμέρους μεθόδους της ίδιας μεθοδολογίας. Ενδεχομένως, το αποτέλεσμα αυτό να οφείλεται στη διαφορετική τάξη μεγέθους του σφάλματος RMS των δύο μεθόδων καθώς και στις θεμελιώδεις θεωρητικές τους διαφορές (που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3.1.4) στη μεθοδολογία προσέγγισης της λύσης. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης και αξιολόγησης των μεθόδων της ελαστικής θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων.

Στο επόμενο διάγραμμα, η συσχέτιση των τιμών του  $E^*_{lab}$  με τις τιμές του  $E_{gen}$  περιγράφεται από τη σχέση:



$$E_{lab}^* = 17,85 \cdot E_{gen}^{0,7019} \tag{6.35}$$

**Σχήμα 6.62:** Συσχέτιση των τιμών του  $E_{lab}^*$  με τις τιμές του  $E_{gen}$ 

Η μεταξύ τους συσχέτιση ( $R^2 \approx 0,68$ ) είναι αρκετά καλή. Η συσχέτιση των μέτρων δυσκαμψίας της θεωρίας συστήματος πολλαπλών στρώσεων με τις εργαστηριακές τιμές δυσκαμψίας είναι μειωμένη, και συγκεκριμένα για τη μέθοδο *Basin fitting* (σχήμα 6.63) προέκυψε η επόμενη σχέση με  $R^2 \approx 0,59$ :

$$E_{lab}^* = 24,51 \cdot E_{basin}^{0,6886} \tag{6.36}$$



**Σχήμα 6.63:** Συσχέτιση των τιμών του  $E^*_{lab}$  με τις τιμές του  $E_{basin}$ 

Για τη μέθοδο Radius of curvature της ίδιας μεθοδολογίας, η συσχέτιση με τις εργαστηριακές τιμές (σχήμα 6.64) εκφράζεται μέσω της επόμενης σχέσης για την οποία  $R^2 \approx 0.55$ :



$$E_{lab}^* = 251,57 \cdot E_{radius}^{0,429} \tag{6.37}$$

**Σχήμα 6.64:** Συσχέτιση των τιμών του  $E_{lab}^*$  με τις τιμές του  $E_{radius}$ 

Συγκρίνοντας τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης στα τρία τελευταία διαγράμματα (όπου συσχετίζονται τα επιτόπου με τα εργαστηριακά προσδιορισμένα μέτρα δυσκαμψίας), παρατηρήθηκε ότι για τις υπόψη θέσεις ελέγχου, η καλύτερη προσέγγιση στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (που αντιπροσωπεύει η εργαστηριακή μέθοδος) επιτεύχθηκε με τη μεθοδολογία που αξιοποιεί τη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων. Αυτή η επισήμανση ενισχύει την αντίληψη της διεθνούς βιβλιογραφίας, σύμφωνα με την οποία οι γενετικοί αλγόριθμοι εκτιμούν με περισσότερη ακρίβεια τη δυσκαμψία των στρώσεων του οδοστρώματος σε σχέση με τις συμβατικές μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού (Gopalakrishnan, 2009). Ωστόσο, προκειμένου να ισχυροποιηθεί η συσχέτιση των γενετικών αλγορίθμων μα την επισήμαν με την εργαστηριακή μέθοδο, απαιτούνται πρόσθετες δοκιμές, προκειμένου να υπάρξει μεγαλύτερο και αντιπροσωπευτικότερο δείγμα.

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα των τιμών του συντελεστή συσχέτισης για τα πειραματικά στοιχεία της μελέτης αυτής, φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Μέθοδοι	$R^2$	Είδος συσχέτισης
$E_{gen}$ με $E_{basin}$	0,76	Αρκετά καλή
$E_{gen}$ με $E_{radius}$	0,66	Σχετικά καλή
$E_{basin}$ με $E_{radius}$	0,65	Σχετικά καλή
$E^*_{lab}$ με $E_{gen}$	0,68	Αρκετά καλή
$E^*_{lab}$ με $E_{basin}$	0,59	Μέτρια προς καλή
$E^*_{lab}$ με $E_{radius}$	0,55	Μέτρια προς καλή

**Πίνακας 6.33:** Τιμές  $R^2$  για όλες τις μεθόδους

Επισημαίνεται ότι τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν στις συγκεκριμένες θέσεις ελέγχου και δοκίμια ελέγχου. Η γενίκευση αυτών δε συστήνεται καθώς διαφοροποιούνται παράγοντες όπως τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας και του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Τέλος, προτείνεται η περιοδική συλλογή στοιχείων με σκοπό τον εμπλουτισμό του δείγματος και την περαιτέρω διερεύνηση για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων.

#### 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενου οδοστρώματος. Λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη ερευνητική δραστηριότητα σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων και το γεγονός ότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα κυρίως σε θέματα σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων και διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, κρίνεται ότι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ιδιαίτερου πρακτικού και ερευνητικού ενδιαφέροντος. Για τις ανάγκες της πειραματικής διερεύνησης, πραγματοποιήθηκαν επιτόπου μετρήσεις με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών σε νέο υφιστάμενο οδόστρωμα για την εκτίμηση, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων E<sub>in-situ</sub>. Συγκεκριμένα, στις θέσεις ελέγχου κατά μήκος του οδικού άξονα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τα συστήματα FWD και GPR, ενώ στη συνέχεια έγινε πυρηνοληψία στις ίδιες θέσεις. Οι πυρήνες μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ και υποβλήθηκαν σε εργαστηριακή δοκιμή με σκοπό τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας E<sup>\*</sup><sub>lab</sub>. Τονίζεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνονται υπόψη όλες οι ασφαλτικές στρώσεις (αντιολισθηρή, ισοπεδωτική και ασφαλτική βάση) και θεωρούνται σαν μία ενιαία, η οποία χαρακτηρίζεται από το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (composite modulus). Από την επεξεργασία των στοιχείων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Όσον αφορά στη συγκριτική αξιολόγηση των ανάστροφα υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας και του εργαστηριακά προσδιορισμένου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας παρατηρήθηκαν τα εξής:

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του δείγματος σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προσδιορίζεται εργαστηριακά ( $E_{lab}^{*}$ ) προέκυψε μεγαλύτερο από το μέτρο δυσκαμψίας που εκτιμάται επιτόπου, ανεξαρτήτως της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του  $E_{in-situ}$ . Το παραπάνω είναι σύμφωνο με διεθνείς έρευνες σε συναφή θέματα και οφείλεται στις διαφορετικές πειραματικές διατάξεις. Επίσης, κατά την εκτίμηση του  $E_{in-situ}$  η απόκριση των ασφαλτικών στρώσεων εξαρτάται και από τις υποκείμενες επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος και επομένως τα αποτελέσματα είναι άμεσα συνδεδεμένα με το σύνολο της δομής του οδοστρώματος. Αντίθετα, ο εργαστηριακός προσδιορισμός του  $E_{lab}^{*}$  πραγματοποιείται στον πυρήνα των ασφαλτικών στρώσεων. Επιπλέον, στο εργαστήριο πέραν της θερμοκρασίας δεν λαμβάνονται πλήρως υπόψη οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο.

Όσον αφορά στο λόγο  $E_{in-situ}/E^*_{lab}$ , λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού, η τιμή του κυμαίνεται από 0,64 έως 0,95 για όλο το φάσμα θερμοκρασιών. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφονται και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Ωστόσο, οι ακριβείς ποσοτικές αποκλίσεις στο εύρος του λόγου ενδεχομένως να οφείλονται στη διαφοροποίηση των συνθηκών διεξαγωγής των πειραμάτων μεταξύ διαφορετικών χωρών. Συγκεκριμένα, ενδέχεται να διαφέρουν τα υλικά, οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια των επιτόπου δοκιμών, οι μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού ή η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, τονίζεται ότι τα αποτελέσματα συναφών διεθνών ερευνών επικεντρώνονται μόνο στη στρώση της ασφαλτικής βάσης.

Επιπρόσθετα, διερευνήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή του λόγου  $E_{in-situ}/E_{lab}^*$ . Ωστόσο, δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα ως προς την τάση του παραπάνω λόγου στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Όσον αφορά στα επιτόπου μέτρα δυσκαμψίας που εκτιμήθηκαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, παρατηρήθηκε ότι από τους λόγους των μέτρων δυσκαμψίας των υπόψη μεθοδολογιών δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη μεταβολή τους συναρτήσει της θερμοκρασίας, παρομοίως με την προηγούμενη διερεύνηση.

Η παραπάνω διαπίστωση ενδεχομένως να οφείλεται στη διαφορετική τάξη μεγέθους των σφαλμάτων RMS, μεταξύ των υπολογισμένων από την κάθε μεθοδολογία υποχωρήσεων και των μετρημένων από το σύστημα του FWD. Ειδικότερα, ακολουθώντας τη μέθοδο βέλτιστης προσέγγισης (*Basin fitting*), η τιμή του δείκτη RMS προέκυψε ίση με 7,8% (θεώρηση διαμέσου), με τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μετρημένες υποχωρήσεις σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών. Η μέθοδος προσαρμογής βάσει της ακτίνας καμπυλότητας (*Radius of curvature*) παρουσίασε τιμή του δείκτη RMS ίση με 17,3%, σημειώνοντας αποκλίσεις στον υπολογισμό των υποχωρήσεων κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Τέλος, η τιμή του δείκτη RMS που προέκυψε από τη μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων ήταν μικρότερη συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους και ίση με 3,6%. Επομένως, μεγαλύτερα σφάλματα στον ανάστροφο υπολογισμό των ελαστικών υποχωρήσεων παρατηρήθηκαν στην περίπτωση της μεθόδου *Radius οf curvature*, ενώ σημαντικά μικρότερα στην περίπτωση της μεθοδου *και* αλγορίθμων.

**Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση ως προς τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών δυσκαμψίας** που προέκυψαν επιτόπου ( $E_{in-situ}$ ) και των αντίστοιχων εργαστηριακών ( $E_{lab}^*$ ). Επιλέχθηκε το υπερβολικό μοντέλο συσχέτισης, εφόσον οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης ( $R^2$ ) προέκυψαν μεγαλύτερες από το γραμμικό μοντέλο. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα ακόλουθα.

Η συσχέτιση των επιτόπου μέτρων δυσκαμψίας που προέκυψαν από τις μεθόδους ανάστροφου υπολογισμού ήταν αρκετά καλή, καθώς η τιμή του *R*<sup>2</sup> κυμαινόταν από 0,65 έως 0,76. Ο συντελεστής συσχέτισης του εργαστηριακά προσδιορισμένου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας με το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας κυμαίνεται από 0,55 έως 0,68. Οι εργαστηριακές τιμές συσχετίζονται καλύτερα με αυτές που προκύπτουν από τη μεθοδολογία

των γενετικών αλγορίθμων, και ακολουθεί η μέθοδος βέλτιστης προσέγγισης (Basin fitting) της ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων.

Τα παραπάνω συμπεράσματα βασίζονται στα στοιχεία συλλογής που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες θέσεις και δοκίμια ελέγχου και ως εκ τούτου η γενίκευσή τους θα πρέπει να γίνεται υπό προϋποθέσεις και υπό την κρίση του μηχανικού. Ωστόσο, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας που εκτιμάται από τα επιτόπου στοιχεία και του εργαστηριακά προσδιορισμένου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

#### Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα παρακάτω:

Λόγω της σημαντικής επίδρασης της θερμοκρασίας στη μηχανική αντοχή των ασφαλτομιγμάτων, προτείνεται ο περιοδικός έλεγχος συγκεκριμένων θέσεων ελέγχου σε διαφορετικές εποχές του χρόνου, ώστε να μελετηθεί η εποχιακή διακύμανση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας και των εν γένει περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο. Βεβαίως, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να συνυπολογιστεί η αθροιστική φθορά του οδοστρώματος και κατά συνέπεια και των ασφαλτικών στρώσεων λόγω της επίδρασης της κυκλοφορίας. Από την παραπάνω διαδικασία θα προκύψει πλήθος στοιχείων για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιακών συνθηκών. Επομένως, κατόπιν πυρηνοληψίας στις υπόψη θέσεις (μετά την ολοκλήρωση των περιοδικών επιτόπου μετρήσεων) ενδεχομένως να προκύψουν πιο ασφαλή και σαφή συμπεράσματα ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας στη σχέση του δυναμικού μέτρου και του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας.

Για τη θεμελίωση μιας ισχυρής πειραματικής συσχέτισης μεταξύ του εργαστηριακά προσδιορισμένου δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ( $E^*_{lab}$ ) και του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας (E<sub>in-situ</sub>) που εκτιμάται μέσω του ανάστροφου υπολογισμού, η διαδικασία συλλογής των επιτόπου στοιχείων προτείνεται να γενικευτεί σε πληθώρα θέσεων ελέγχου σε διάφορους οδικούς άξονες της χώρας, ώστε να προκύψει επαρκές στατιστικό δείγμα για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Με αυτόν τον τρόπο, θα ελεγχθούν όσο γίνεται περισσότερα ασφαλτομίγματα υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη ποικίλους παράγοντες, όπως διαφορετική κοκκομετρία αδρανών, διαφορετικό ποσοστό και τύπο ασφάλτου και διαφορετική ογκομετρική σύσταση των ασφαλτομιγμάτων. Μέσω αυτής της διαδικασίας, θα πραγματοποιηθεί εκ νέου βαθμονόμηση της σχέσης μεταξύ των μέτρων δυσκαμψίας και επικαιροποίηση της ποσοτικοποίησης των διαφορών των  $E_{in-situ}$  και  $E_{lab}^*$  για ευρύ φάσμα ασφαλτομιγμάτων. Συνεπώς, θα διαφανεί τελικά εάν η πυρηνοληψία μπορεί να περιοριστεί στο ελάχιστο ή και εντελώς, ώστε να είναι σε θέση ο Μηχανικός Οδοστρωμάτων να εκτιμά με ακρίβεια το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενου οδοστρώματος πραγματοποιώντας επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές.

### 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2013α):** Σημειώσεις για το μάθημα «Οδοστρώματα», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2013β):** Σημειώσεις για το μάθημα «Οδοστρώματα Οδών & Αεροδρομίων», Τεύχος Β΄, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2013γ):** Σημειώσεις για το μάθημα «Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

**AASHTO (1986):** Guide for design of Pavement Structures, Vol. 2, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.

**AASHTO T 342-11 (2001):** Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.

**Alkasawneh W. (2007):** Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms, Dissertation, University of Akron, Ohio.

**Blaine J., Burlot R. (1970):** Non-Destructive Testing of Asphaltic Concrete Using the Light Goodman Vibrator: Study of the Influence of Temperature on the Viscoelastic Properties of the Material, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol 39.

**Bonnaure F., Gest G., Gravois A., Uge P. (1977):** A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists.

**Brown S.F (1988):** Bituminous Pavements: Materials, Design and Evaluation, Residential course at The University of Nottingham.

**Clyne T., Marasteanu M., Li X., Skok E. (2003):** Dynamic and Resilient Modulus of Mn/Dot Asphalt Mixtures, Department of Civil Engineering, The University of Minnesota, Minnesota.

**Clyne T., Marasteanu M., Li X. (2009):** Determination of HMA Modulus Values for Use in Mechanistic-Empirical Pavement Design, Department of Civil Engineering, The University of Minnesota, Minnesota.

**Dougan C., Stephens J., Mahoney J., Hansen G. (2003):** E\* - Dynamic Modulous Test Protocol – Problems and Solutions, The Connecticut Department of Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

**Dos Reis M., Habboub A., Carpenter S. (1992):** Nondestructive Evaluation of Complex Moduli in Asphalt Concrete with an Energy Approach, Journal of the Transportation Research Record, No. 1681, pp. 170-178

**Dynatest (2001):** Evaluation of Layer modulus and overlay design (ELMOD) – User manual.

Ferry J. (1980): Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley, New York.

**Flinstch G., Loulizi A., Diefenderfer S., Galal K., Diefenderfer B. (2007):** Asphalt Materials Characterization in Support of Implementation of the Proposed Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, Virginia Department of Transportation.

**Gedafa D., Hossain M., Romanoschi S., Gisi A. (2010):** Comparison of Moduli of Kansas Superpave Asphalt Mixes, Kansas Department of Transportation, Materials & Research Center, Kansas.

**Goldberg D.E. (1989):** Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison - Wesley, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA.

**Gopalakrishnan K. (2009):** Backcalculation of non-linear Pavement Moduli Using Finite-Element Based Neuro-Genetic Hybrid Optimization, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, Ames, Iowa.

**Highways Department (2009):** Guidance Notes on Backcalculation of Layer Moduli and Estimation of Residual Life Using Falling Weight Deflectometer Test Data, Research & Development Division.

**Hochuli S., Sayir M., Poulikakos L., Partl M. (2001):** Measuring the Complex Modulus of Asphalt Mixtures by Structural Wave Propagation, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, vol 70.

**Holland J. H. (1975):** Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

**Huanan Y., Shen S. (2012):** An Investigation of Dynamic Modulus and Flow Number Properties of Asphalt Mixtures in Washington State, University of Washington in cooperation with U.S Department of Transportation of Federal Highway Administration.

**Huang Y. (1993):** Pavement Analysis and Design. 1st Edition, Prentice Hall, Upper River Saddle, New Jersey.

**Leiva-Villacorta F., Timm H., Randy W., Rod T., Fulton J. (2012):** Advanced Computing Techniques in Structural Evaluation of Flexible Pavements Using the Falling Weight Deflectometer, Auburn University, Alabama.

**Lundy J., Sandoval-Gil J., Brickman A., Patterson B. (2005):** Asphalt Mix Characterization Using Dynamic Modulus and Apa Testing, Oregon Department of Transportation Research Unit and Federal Highway Administration.

**Maher A., Gucunski N., Bennert T. (2005):** Implementation of Mechanistic Pavement Design: Field and Laboratory Implementation, Center for Advanced Infrastructure & Transportation (CAIT) Rutgers, The State University Piscataway.

**Medani T.O., Huurman M. (2003):** Constructing the Stiffness Master Curves for Asphaltic Mixes, Road and Railroad Research Laboratory, Faculty of Civil Engineering and GeoSciences, Delft University of Technology.

**Meier R., Rix G. (1993):** An Initial Study of Surface Wave Inversion Using Artificial Neural Networks, Geotechnical Testing Journal, No. 1570, pp. 126-133.

**Molenaar A. (2010):** Road Paving Materials, Part III – Asphaltic Materials, Delft University of Technology.

**Pan E., Sangghaleh A., Molavi A., Zhao Y., Yi P. (2012):** An Efficient and Accurate Genetic Algorithm for Backcalculation of Flexible Pavement Layer Moduli, Department of Civil Engineering, The University of Akron, Ohio.

**Papazian H. (1962):** The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphaltic Concrete, (1st) International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements pp. 385- 394.

**Park S.W., Park H.M., Hwang J.J. (2010):** Application of Genetic Algorithm and Finite Element Method for Backcalculating Layer Moduli of Flexible Pavements, Journal of Civil Engineering, Korean Society of Civil Engineers (KSCE), vol 14, pp. 183-190.

**Pekcan O., Tutumluer E., Thompson M. (2008):** Nondestructive Pavement Evaluation Using ILLI-PAVE Based Artificial Neural Network Models, Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign.

**Pierce L.M. (1999)**: Development of a Computer Program for the Determination of the Area Value and Subgrade Modulus Using the Dynatest FWD (Help file of FWD area program, Version 2.1), Washington State Department of Transportation.

**Ping W.V., Xiao Y. (2007):** Evaluation of the Dynamic Complex Modulus Test and Indirect Diametral Test for Implementing the AASHTO 2002 Design Guide for Pavement Structures in Florida, Final Report, Florida Department of Transportation, BC-352-12, Tallahassee, FL.

**Raich M. (1999):** An Evolutionary Based Methodology for Representing and Evolving Structural Design Solutions, Thesis (PhD), University of Illinois at Urbana-Champaign.

**Reddy M.A., Reddy K.S., Pandey B.B. (2004):** Selection of Genetic Algorithm Parameters for Backcalculation of Pavement Moduli, International Journal of Pavement Engineering, Indian institute of technology, vol. 5 (2), pp. 81–90.

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

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

**Turkiyyah G. (2005):** Feasibility of Backcalculation Procedures Based on Dynamic FWD Response Data, Project report, University of Washington.

**Tutumluer E., Pekcan O., Ghaboussi J. (2009):** Nondestructive Pavement Evaluation Using Finite Element Analysis Based Soft Computing Models, USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report.

**Winters B.C. (1993):** The PACCAR Pavement Test Section - Instrumentation and Validation, Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington.

**Witczak M., Fonseca O. (1996):** Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures, Transportation Research Record 1540, pp. 15-23.

**Witczak M., Pellinen T., El-Basyouny M. (2002):** Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT) 2002 Annual Meeting, Colorado Springs.

**Witczak M., Bari J. (2004):** Development of a Master Curve (E\*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures, Ira A. Fulton School of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, vol. 75, pp. 381-424.

**Witczak M., Bari J. (2006):** Development of a Revised Predictive Model of the Witczak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures, Journal of Association of Asphalt Paving Technologists.

**Xu Y. (2011):** Investigation of Effects of Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt (WMA) Mixes on Dynamic Modulus and Field Performance, Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, United States.