



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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ  
ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

ΓΕΩΡΓΟΥΛΗ Γ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2016

Εξέταση Διδακτορικής Διατριβής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 15 Ιουλίου 2016.

## **Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Α. Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Δ. Θεοδωρακόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Χ. Πλατή, Επίκ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Γ. Γιαννής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Κουρκουλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Β. Ψαριανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. Μπαδογιάννης, Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

## **Ευχαριστίες**

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ανδρέα Λοΐζο για την ανάθεση της Διδακτορικής Διατριβής, την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές κατά τη διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, ευχαριστώ την κα Χ. Πλατή, Επίκ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, η οποία υποστήριξε θερμά την προσπάθειά μου, για την αμέριστη συμπαράστασή της και τον κ. Δ. Θεοδωρακόπουλο, Ομότιμο Καθηγητή Πανεπιστημίου Πατρών, για την πολύτιμη συμβολή του.

Θα ήθελα επίσης να απευθύνω ένα ευχαριστώ στον κ. Α. Στεργίου, συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας, για την υποστήριξή του στο πειραματικό σκέλος.

Τέλος, μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, σε αυτούς τους υπέροχους ανθρώπους...

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>- 1 -</b>
1.1	ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	- 1 -
1.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	- 4 -
1.3	ΔΟΜΗ .....	- 5 -
<b>2</b>	<b>ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>- 8 -</b>
2.1	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ .....	- 8 -
2.2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ .....	- 12 -
2.3	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ .....	- 15 -
2.3.1	<i>Γενικά στοιχεία</i> .....	- 15 -
2.3.2	<i>Μέτρο επανάκτησης <math>M_r</math> (Resilient modulus)</i> .....	- 16 -
2.3.2.1	Ορισμός.....	- 16 -
2.3.2.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού .....	- 18 -
2.3.3	<i>Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) ....</i>	<i>- 21 -</i>
2.3.3.1	Ορισμός.....	- 21 -
2.3.3.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού .....	- 21 -
2.3.4	<i>Διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας <math>G^*</math> (Shear dynamic modulus)</i> .....	<i>- 23 -</i>
2.3.4.1	Ορισμός.....	- 23 -
2.3.4.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής διάτμησης.....	- 23 -
2.3.5	<i>Σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (Complex modulus)</i> .....	<i>- 24 -</i>
2.3.5.1	Ορισμός.....	- 24 -
2.3.5.2	Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής κάμψης.....	- 25 -
2.3.5.3	Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	- 27 -
2.4	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ .....	- 28 -
2.5	ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	- 30 -
<b>3</b>	<b>ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>- 37 -</b>
3.1	ΟΡΙΣΜΟΣ.....	- 37 -
3.2	ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (MASTER CURVE).....	- 39 -
3.2.1	<i>Παράγοντες μετατόπισης</i> .....	<i>- 39 -</i>
3.2.2	<i>Σιγμοειδής συνάρτηση</i> .....	<i>- 41 -</i>
3.3	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ $E^*$ .....	- 43 -
3.3.1	<i>Εργαστηριακή συσκευή</i> .....	<i>- 43 -</i>
3.3.2	<i>Προετοιμασία δοκιμίων</i> .....	<i>- 44 -</i>

3.3.3	<i>Εργαστηριακή διαδικασία</i> .....	- 45 -
<b>4</b>	<b>ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E*</b> .....	<b>- 47 -</b>
4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	- 47 -
4.2	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ WITCZAK & FONSECA (1996).....	- 54 -
4.3	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ANDREI, WITCZAK & MIRZA (1999) (WITCZAK 1-37A).....	- 56 -
4.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ HIRSCH .....	- 57 -
4.5	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ AL-ΚΗΑΤΕΕΒ.....	- 59 -
4.6	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ BARI & WITCZAK (2006).....	- 60 -
4.7	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ WITCZAK 1-40D.....	- 62 -
<b>5</b>	<b>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ</b> .....	<b>- 64 -</b>
5.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ .....	- 64 -
5.1.1	<i>Ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου</i> .....	- 64 -
5.1.1.1	Μίγμα A (DG_A) .....	- 64 -
5.1.1.2	Μίγμα B (DG_B) .....	- 65 -
5.1.1.3	Μίγμα C (DG_C).....	- 66 -
5.1.2	<i>Ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου</i> .....	- 66 -
5.1.2.1	Μίγμα A (OG_A).....	- 66 -
5.1.2.2	Μίγμα B (OG_B).....	- 67 -
5.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ .....	- 68 -
5.3	ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ .....	- 69 -
5.4	ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	- 72 -
5.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΙΔΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ .....	- 73 -
5.5.1	<i>Μέθοδος Saturated Surface Dry (SSD)</i> .....	- 73 -
5.5.2	<i>Μέθοδος διαστάσεων</i> .....	- 74 -
5.6	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΕΝΩΝ ΑΕΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ .....	- 74 -
5.7	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ E* ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ.....	- 76 -
<b>6</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>- 78 -</b>
6.1	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ E* .....	- 78 -
6.2	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ E* ΜΕΣΩ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ .....	- 81 -
<b>7</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E*</b> .....	<b>- 84 -</b>
7.1	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 84 -
7.2	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 87 -
<b>8</b>	<b>ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E*</b> .....	<b>- 90 -</b>
8.1	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 90 -

8.2	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 92 -
8.3	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ .....	- 95 -
<b>9</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΕ ΕΤΕΡΟΕΙΔΗ ΜΙΓΜΑΤΑ .....</b>	<b>- 99 -</b>
9.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	- 99 -
9.2	ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN .....	- 99 -
9.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ Ε* ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN .....	- 102 -
9.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ Ε* ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG.....	- 103 -
9.5	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	- 105 -
9.6	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG_UPD .....	- 106 -
9.7	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG_UPD.....	- 109 -
<b>10</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>- 111 -</b>
10.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	- 111 -
10.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	- 112 -
10.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	- 114 -
10.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	- 116 -
10.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	- 117 -
<b>11</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>- 122 -</b>
11.1	ΤΟ Ε* ΩΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΣΤΙΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	- 122 -
11.2	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ Ε* ΣΕ ΝΕΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	- 124 -
11.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	- 125 -
11.3.1	<i>Πειραματικά οδικά τμήματα - ασφαλτομίγματα.....</i>	<i>- 125 -</i>
11.3.2	<i>Επιτόπου πειραματικές διαδικασίες.....</i>	<i>- 127 -</i>
11.3.2.1	<i>Επιτόπου καταγραφές με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών .....</i>	<i>- 127 -</i>
11.3.2.2	<i>Ανάστροφος υπολογισμός μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων .....</i>	<i>- 129 -</i>
11.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	- 137 -
11.4.1	<i>Συγκριτική αξιολόγηση κεντρικών καμπυλών και αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.....</i>	<i>- 137 -</i>
11.4.2	<i>Συγκριτική αξιολόγηση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας .....</i>	<i>- 150 -</i>
11.5	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΓΙΑ ΝΕΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ .....	- 154 -
<b>12</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>- 158 -</b>
12.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	- 158 -
12.2	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΟΥ Ε* ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	- 159 -
12.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	- 160 -

12.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	- 162 -
<b>13</b>	<b>ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>- 167 -</b>
13.1	ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 167 -
13.1.1	Διερεύνηση για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας.....	- 167 -
13.1.2	Διερεύνηση της προσαρμογής διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ των υπό διερεύνηση μιγμάτων .....	- 167 -
13.1.3	Ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ των υπό διερεύνηση μιγμάτων.....	- 168 -
13.1.4	Αξιολόγηση του νέου αλγόριθμου μιγμάτων κλειστού τύπου σε μίγματα που δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων .....	- 169 -
13.1.5	Διερεύνηση της εισαγωγής των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στην κόπωση των ασφαλτομιγμάτων.....	- 170 -
13.1.6	Διερεύνηση εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στις διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας νέων οδοστρωμάτων.....	- 170 -
13.1.7	Διερεύνηση εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εν λειτουργία εύκαμπτων οδοστρωμάτων .....	- 171 -
13.2	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	- 171 -
13.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	- 173 -
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ .....</b>	<b>- 175 -</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>- 188 -</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ .....	16 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	46 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΚΥΚΛΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ.....	46 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ E* (1967-1989) (WITCZAK & FONSECA 1996).....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ.....	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E* .....	52 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΛΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ WITCZAK & FONSECA (1996).....	55 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Α ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	65 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Β ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	65 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ C ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	66 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Α ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 4%.....	66 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Α ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 4.5%.....	67 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Α ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 5%.....	67 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ Β ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	68 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8 ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	72 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9 ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	72 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	75 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	76 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12 ΕΥΡΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	77 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΩΝ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E* ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	85 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ WITCZAK 1-37A ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	88 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	91 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	91 -
-	
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.3 ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ OG_A .....	93 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ OG_A.....	94 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.5 ΔΟΚΙΜΙΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ.....	95 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 8.6 ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	96 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ AS12.5_AR.....	99 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ AS20_AR.....	100 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.3 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ AS12.5_ATH.....	100 -



ΠΙΝΑΚΑΣ 9.4 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΜΙΓΜΑΤΟΣ AS20_ΑΤΗ.....	- 101 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.5 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΟ 30-45 PEN.....	- 101 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.6 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	- 101 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.7 ΕΥΡΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	- 102 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.8 ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ Α ΚΑΙ VTS.....	- 105 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΟΥ ALG_DG ΓΙΑ ΜΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΤΥΠΟ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN.- 106 -	
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.10 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG_UPD.....	- 107 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG_UPD- 108 -	
ΠΙΝΑΚΑΣ 9.12 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΤΥΠΟ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ALG_DG_UPD.....	- 109 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	- 113 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2 DI ΚΑΙ FC <sub>ΒΟΤΤΟΜ</sub> .....	- 121 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ, ΤΜΗΜΑ Α.....	- 126 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ, ΤΜΗΜΑ Β.....	- 126 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN, ΤΜΗΜΑ Α.....	- 126 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΟΥ 30-45PEN, ΤΜΗΜΑ Β.....	- 126 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.5 ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	- 127 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.6 RMSE (%) ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ E*.....	- 148 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.7 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΕΣΟ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ.....	- 152 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 11.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ T-TEST.....	- 154 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 12.1 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ.....	- 161 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 12.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	- 161 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 12.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΟΥ.....	- 162 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 12.4 ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	- 162 -
ΠΙΝΑΚΑΣ 12.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ T-TEST.....	- 165 -

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ .....	- 8 -
ΣΧΗΜΑ 2.2 ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ .....	- 9 -
ΣΧΗΜΑ 2.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΥ .....	- 9 -
ΣΧΗΜΑ 2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΤΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....	- 13 -
ΣΧΗΜΑ 2.5 ΤΥΠΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΜΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ.....	- 14 -
ΣΧΗΜΑ 2.6 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (HUANG 2004) .....	- 17 -
ΣΧΗΜΑ 2.7 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ LVTDs ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ MR ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	- 19 -
ΣΧΗΜΑ 2.8 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ -	19 -
ΣΧΗΜΑ 2.9 ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (NCHRP 1-28A 2004).....	- 20 -
ΣΧΗΜΑ 2.10 ΓΡΑΦΗΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	- 20 -
ΣΧΗΜΑ 2.11 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ LVTDs ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ITSM ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	- 22 -
ΣΧΗΜΑ 2.12 ΔΟΚΙΜΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ (Α) ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (Β) ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	- 24 -
ΣΧΗΜΑ 2.13 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ 2 ΣΗΜΕΙΩΝ .....	- 26 -
ΣΧΗΜΑ 2.14 ΦΟΡΤΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ 4 ΣΗΜΕΙΩΝ .....	- 27 -
ΣΧΗΜΑ 2.15 ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	- 27 -
ΣΧΗΜΑ 2.16 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ .....	- 29 -
ΣΧΗΜΑ 3.1 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ....	- 38 -
ΣΧΗΜΑ 3.2 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (MASTER CURVE) ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ .....	- 39 -
ΣΧΗΜΑ 3.3 ΜΟΡΦΗ ΣΙΓΜΟΕΙΔΟΥΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ .....	- 43 -
ΣΧΗΜΑ 3.4 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (DOUGAN ET AL. 2003).....	- 44 -
ΣΧΗΜΑ 4.1 ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑ SHELL .....	- 48 -
ΣΧΗΜΑ 5.1 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ .....	- 70 -
ΣΧΗΜΑ 5.2 ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΜΕΣΩΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ .....	- 70 -
ΣΧΗΜΑ 5.3 ΠΥΡΗΝΟΛΗΨΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	- 71 -
ΣΧΗΜΑ 5.4 ΔΟΚΙΜΙΟ (Α) ΑΜΕΣΩΣ ΜΕΤΑ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ, (Β) ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΗΝΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ (Γ) ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΟΠΗ ΚΑΘ' ΥΨΟΣ .....	- 71 -
ΣΧΗΜΑ 5.5 ΠΡΟΣΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΒΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ LVDTs .....	- 77 -
ΣΧΗΜΑ 6.1 E* <sub>LAB</sub> ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 78 -

ΣΧΗΜΑ 6.2 E* <sub>LAB</sub> ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 79 -
ΣΧΗΜΑ 6.3 V <sub>A</sub> (%) ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 80 -
ΣΧΗΜΑ 6.4 V <sub>A</sub> (%) ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 80 -
ΣΧΗΜΑ 6.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ A ΚΑΙ VTS ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΥΠΩΝ ΑΣΦΑΛΤΩΝ.....	- 82 -
ΣΧΗΜΑ 6.6 ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ G* <sub>B</sub> ΚΑΙ E* ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ WITCZAK 1-40D.....	- 83 -
ΣΧΗΜΑ 7.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΕΘΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ E* (ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ)..	- 84 -
ΣΧΗΜΑ 7.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ WITCZAK 1-37A, ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 86 -
ΣΧΗΜΑ 7.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ BARI & WITCZAK, ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 86 -
ΣΧΗΜΑ 7.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ HIRSCH, ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 86 -
ΣΧΗΜΑ 7.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ WITCZAK 1-37A (ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ A) .....	- 87 -
ΣΧΗΜΑ 7.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ WITCZAK 1-37A (ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ B) .....	- 88 -
ΣΧΗΜΑ 7.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ WITCZAK 1-37A, ΜΙΓΜΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ OG_A.....	- 89 -
ΣΧΗΜΑ 7.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ WITCZAK 1-37A, ΜΙΓΜΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ OG_B.....	- 89 -
ΣΧΗΜΑ 8.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG</sub> .....	- 91 -
ΣΧΗΜΑ 8.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ, ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 92 -
ΣΧΗΜΑ 8.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_OG_A</sub> .....	- 93 -
ΣΧΗΜΑ 8.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΝΕΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ, ΜΙΓΜΑΤΑ OG_A.....	- 94 -
ΣΧΗΜΑ 8.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG</sub> , ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 96 -
ΣΧΗΜΑ 8.6 ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG</sub> , ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ.....	- 97 -
ΣΧΗΜΑ 8.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_OG_A</sub> , ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 98 -
ΣΧΗΜΑ 8.8 ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_OG_A</sub> , ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΤΥΠΟΥ .....	- 98 -
ΣΧΗΜΑ 9.1 E* <sub>LAB</sub> ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΟ 30-45 PEN .....	- 102 -
ΣΧΗΜΑ 9.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ A ΚΑΙ VTS, AS12.5_AR .....	- 103 -
ΣΧΗΜΑ 9.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ A ΚΑΙ VTS, AS20_AR .....	- 104 -
ΣΧΗΜΑ 9.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ A ΚΑΙ VTS, AS12.5_ATH .....	- 104 -
ΣΧΗΜΑ 9.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ A ΚΑΙ VTS, AS20_ATH .....	- 104 -
ΣΧΗΜΑ 9.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG</sub> .....	- 105 -
ΣΧΗΜΑ 9.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG_UPD</sub> .....	- 107 -
ΣΧΗΜΑ 9.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΛΟΙΠΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ALG_DG_UPD.....	- 108 -
ΣΧΗΜΑ 9.9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG_UPD</sub> .....	- 110 -
ΣΧΗΜΑ 9.10 ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>LAB</sub> ΚΑΙ E* <sub>ALG_DG_UPD</sub> .....	- 110 -
ΣΧΗΜΑ 10.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	- 113 -
ΣΧΗΜΑ 10.2 ΤΥΠΙΚΟ ΑΞΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	- 114 -
ΣΧΗΜΑ 10.3 ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.....	- 115 -

ΣΧΗΜΑ 10.4 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ E* (MASTER CURVES).....	- 118 -
ΣΧΗΜΑ 10.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΩΝ ΤΙΜΩΝ E* .....	- 118 -
ΣΧΗΜΑ 10.6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ( $\gamma=0.150M$ )...-	119 -
ΣΧΗΜΑ 10.7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΡΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ( $\gamma=0.210M$ )....-	120 -
ΣΧΗΜΑ 10.8 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟ ΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ ( $\gamma=0.2625M$ ).....-	120 -
ΣΧΗΜΑ 11.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΝΕΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ .....	- 125 -
ΣΧΗΜΑ 11.2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FWD.....	- 128 -
ΣΧΗΜΑ 11.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ FWD .....	- 129 -
ΣΧΗΜΑ 11.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	- 130 -
ΣΧΗΜΑ 11.5 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΘΕΜΕΛΙΩΔΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ (REDDY ET AL. 2004) .....	- 131 -
ΣΧΗΜΑ 11.6 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (ALKASAWNEH 2007) .....	- 132 -
ΣΧΗΜΑ 11.7 ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΧΡΩΜΟΣΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΝΕΩΝ –CROSSOVER (TUTUMLUER ET AL. 2009).....	- 132 -
ΣΧΗΜΑ 11.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΝΟΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (RAICH 1999) .....	- 133 -
ΣΧΗΜΑ 11.9 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ ΓΟΝΩΝ – MUTATION (TUTUMLUER ET AL. 2009).....	- 134 -
ΣΧΗΜΑ 11.10 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ A1 .....	- 138 -
ΣΧΗΜΑ 11.11 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ A1 .....	- 138 -
ΣΧΗΜΑ 11.12 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ A2 .....	- 139 -
ΣΧΗΜΑ 11.13 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ A2 .....	- 139 -
ΣΧΗΜΑ 11.14 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ A3 .....	- 140 -
ΣΧΗΜΑ 11.15 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ A3 .....	- 140 -
ΣΧΗΜΑ 11.16 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ A4 .....	- 141 -
ΣΧΗΜΑ 11.17 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ A4 .....	- 141 -
ΣΧΗΜΑ 11.18 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ A5 .....	- 142 -
ΣΧΗΜΑ 11.19 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ A5 .....	- 142 -
ΣΧΗΜΑ 11.20 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ B1 .....	- 143 -
ΣΧΗΜΑ 11.21 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ B1 .....	- 143 -
ΣΧΗΜΑ 11.22 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ B2 .....	- 144 -
ΣΧΗΜΑ 11.23 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ B2 .....	- 144 -
ΣΧΗΜΑ 11.24 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ B3 .....	- 145 -
ΣΧΗΜΑ 11.25 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ B3 .....	- 145 -
ΣΧΗΜΑ 11.26 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ B4 .....	- 146 -
ΣΧΗΜΑ 11.27 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ B4 .....	- 146 -

ΣΧΗΜΑ 11.28 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ, ΘΕΣΗ Β5 .....	- 147 -
ΣΧΗΜΑ 11.29 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΣΗ Β5 .....	- 147 -
ΣΧΗΜΑ 11.30 DI ΚΑΙ FC <sub>ΒΟΤΤΟΜ</sub> , ΤΜΗΜΑ Α.....	- 149 -
ΣΧΗΜΑ 11.31 DI ΚΑΙ FC <sub>ΒΟΤΤΟΜ</sub> , ΤΜΗΜΑ Β.....	- 150 -
ΣΧΗΜΑ 11.32 ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ FWD .....	- 152 -
ΣΧΗΜΑ 11.33 ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>CORE</sub> ΚΑΙ ΕΙΝ-SITU .....	- 153 -
ΣΧΗΜΑ 11.34 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΙΜΩΝ E* <sub>CORE</sub> ΚΑΙ ΕΙΝ-SITU .....	- 153 -
ΣΧΗΜΑ 11.35 ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΓΙΑ ΝΕΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	- 155 -
ΣΧΗΜΑ 12.1 ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ E* <sub>UNDAMAGED</sub> .....	- 163 -
ΣΧΗΜΑ 12.12.2 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ E* <sub>UNDAMAGED</sub> ΚΑΙ E* <sub>DAMAGED</sub> .....	- 164 -
ΣΧΗΜΑ 12.3 ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ E* <sub>UNDAMAGED</sub> , E* <sub>DAMAGED</sub> ΚΑΙ E* <sub>DAMAGED_LAB</sub> .....	- 165 -

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μέτρο δυσκαμψίας ενός ασφαλτομίγματος, μέσω του οποίου εκφράζεται η μηχανική συμπεριφορά του, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των μιγμάτων, την κατηγοριοποίησή τους, το σχεδιασμό τους, τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και κατά επέκταση την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους, τις διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων και εκτίμηση της δομικής κατάστασης εν λειτουργία οδοστρωμάτων. Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $E^*$ ) του ασφαλτομίγματος αποτελεί θεμελιώδες μηχανικό χαρακτηριστικό και ως εκ τούτου περιγράφει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί ποικίλες πειραματικές διατάξεις. Σύμφωνα με τις νεότερες εξελίξεις και έρευνες διαφαίνεται ότι η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης δημιουργεί ισχυρές προϋποθέσεις πρόκρισης των υπολοίπων μεθόδων.

Δεδομένης της ανάγκης ύπαρξης ειδικού εργαστηριακού εξοπλισμού για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο καθώς και της χρονοβόρας διαδικασίας, έχουν αναπτυχθεί διεθνώς αλγόριθμοι με στόχο την υποκατάσταση των πειραματικών διατάξεων. Οι νεότεροι σε περιορισμένη κλίμακα διεθνείς αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο των διαδικασιών για τη διαμόρφωση της νέας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου διαστασιολόγησης AASHTO (MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) και βασίζονται στα αποτελέσματα της εργαστηριακής δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης. Πλην όμως, η δυνατότητα εφαρμογής των αλγορίθμων αυτών σε ποικίλους τύπους μιγμάτων δεν ορίζεται σαφώς και ως εκ τούτου αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου προβληματισμού και κατ' επέκταση διερεύνησης και εμβάθυνσης της παρούσας έρευνας.

Πιο συγκεκριμένα, η διερεύνηση βασίζεται στην αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων μέσω του ελέγχου της προσαρμογής τους σε πειραματικά μίγματα, η σύνθεση των οποίων είναι σύμφωνη με εθνικές και διεθνείς προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση ενός μεθοδολογικού πλαισίου όσον αφορά στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων με στόχο την υποκατάσταση του προσδιορισμού του  $E^*$  στο εργαστήριο, από μία γρήγορη αλλά και αξιόπιστη διαδικασία εκτίμησης του  $E^*$ . Στην όλη διερεύνηση πολύτιμο εργαλείο αποτέλεσε η επιστήμη της στατιστικής, η οποία εφαρμόστηκε για την ανάλυση των πολυπληθών στοιχείων της βάσης δεδομένων που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας.

Επιστέγασμα της διερεύνησης αποτελεί η πρόταση για την εισαγωγή του  $E^*$  που προκύπτει από τους νέους αλγόριθμους σαν δείκτη συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος (performance indicator). Ο δείκτης αυτός δύναται να αξιοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών που σχετίζονται αφενός με το σχεδιασμό του μίγματος και αφετέρου με τις διαδικασίες ανάλυσης της συμπεριφοράς σε κόπωση του ασφαλτομίγματος στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού και τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η πρόταση αυτή είναι άμεσα υλοποιήσιμη, υπό προϋποθέσεις, σε έργα Συστημάτων Παραχώρησης (PPP), όπου η διαχείριση της συντήρησης είναι αναπόσπαστο σκέλος και μπορεί να επεκταθεί και να αποτελέσει οδηγό και σε άλλα συστήματα έργων οδοστρωμάτων.

## **ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η μηχανική συμπεριφορά ενός ασφαλτομίγματος εκφράζεται μέσω του μέτρου δυσκαμψίας το οποίο λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου (ή της συχνότητας) φόρτισης. Το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των μιγμάτων, την κατηγοριοποίησή τους, το σχεδιασμό τους, τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και κατά επέκταση την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους, τις διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων και εκτίμηση της δομικής κατάστασης εν λειτουργία οδοστρωμάτων.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες που βασίζονται σε ποικίλες εργαστηριακές πειραματικές διατάξεις. Οι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, όπως συχνότητα φόρτισης, μέγεθος, διάρκεια και σύστημα μέτρησης καθώς και η γεωμετρία των δοκιμίων, οδηγούν στην ύπαρξη διαφορετικών εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας ή ακόμα και διαφορετικών τιμών του ίδιου μέτρου δυσκαμψίας για το ίδιο υλικό.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε αναδείχθηκε η σπουδαιότητα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ( $E^*$ ) του ασφαλτομίγματος, καθώς περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Ως εκ τούτου αποτελεί βασική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση των μιγμάτων, τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση του συνόλου του οδοστρώματος. Δεδομένων των παραπάνω αποτελεί απαραίτητη και βασική παράμετρο σχεδιασμού για τη διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων ιδιαίτερα στο πλαίσιο της νέας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου AASHTO (MEPDG), η οποία αποτελεί σήμερα την προμετωπίδα διεθνώς του εξελιγμένου αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων.

Για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί ποικίλες πειραματικές διατάξεις. Σύμφωνα με τις νεότερες εξελίξεις και έρευνες διαφαίνεται ότι η εργαστηριακή δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης δημιουργεί ισχυρές προϋποθέσεις πρόκρισης των υπολοίπων μεθόδων. Δεδομένης της ανάγκης ύπαρξης ειδικού εργαστηριακού εξοπλισμού για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο καθώς και της χρονοβόρας διαδικασίας, έχουν αναπτυχθεί διεθνώς αλγόριθμοι με στόχο την υποκατάσταση των πειραματικών διατάξεων. Οι νεότεροι σε



περιορισμένη κλίμακα διεθνείς αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο των διαδικασιών για τη διαμόρφωση της νέας εμπειρικής-μηχανιστικής μεθόδου διαστασιολόγησης AASHTO και βασίζονται στα αποτελέσματα της εργαστηριακής δοκιμής της μονοαξονικής θλίψης. Ωστόσο, η δυνατότητα εφαρμογής των αλγορίθμων αυτών σε ποικίλους τύπους μιγμάτων δεν ορίζεται σαφώς και ως εκ τούτου αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και κατ' επέκταση διερεύνησης και εμβάθυνσης της παρούσας έρευνας.

Πιο συγκεκριμένα, η διερεύνηση βασίζεται στην αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων μέσω του ελέγχου της προσαρμογής τους σε πειραματικά μίγματα, η σύνθεση των οποίων είναι σύμφωνη με εθνικές και διεθνείς προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση ενός μεθοδολογικού πλαισίου όσον αφορά στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων με στόχο την υποκατάσταση του προσδιορισμού του  $E^*$  στο εργαστήριο, από μία γρήγορη αλλά και αξιόπιστη διαδικασία εκτίμησης του  $E^*$ . Στην όλη διερεύνηση πολύτιμο εργαλείο αποτέλεσε η επιστήμη της στατιστικής, η οποία εφαρμόστηκε για την ανάλυση των πολυπληθών στοιχείων της βάσης δεδομένων που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας διερευνήθηκε περαιτέρω η εισαγωγή των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  σε θέματα αξιολόγησης μιγμάτων, διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων και αξιολόγησης της δομικής κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων νέων και εν λειτουργία οδοστρωμάτων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση, τόσο σε επίπεδο χρόνου όσο και σε επίπεδο οικονομικών πόρων, των παραπάνω διαδικασιών.

Όσον αφορά στη διαστασιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος, από τη μελέτη ανάλυσης ευαισθησίας μεταξύ των μετρημένων και εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ , προέκυψε ότι οι νέοι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς για την πρόβλεψη του ποσοστού των ρηγματώσεων λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος της ασφαλικής βάσης.

Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με σκοπό τη διαμόρφωση πρότασης για την εισαγωγή των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στις διαδικασίες ελέγχου και διασφάλισης της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης οδοστρώματος στο πλαίσιο κατασκευής ασφαλικών οδοστρωμάτων.

Παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της δομικής κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων εν λειτουργία οδοστρωμάτων, σύμφωνα με την οποία οι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  σε συνδυασμό με στοιχεία συλλογής επιτόπου καταγραφών με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών, αξιοποιούνται για την εκτίμηση του  $E^*$  των ασφαλικών στρώσεων.

Επιστέγασμα της διερεύνησης αποτελεί η πρόταση για την εισαγωγή του  $E^*$  που προκύπτει από τους νέους αλγόριθμους σαν δείκτη συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος (performance indicator). Ο δείκτης αυτός δύναται να αξιοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών με στόχο τη βελτιστοποίηση αφενός μεν της μελέτης σύνθεσης των μιγμάτων και αφετέρου της ανάλυσης της συμπεριφοράς σε κόπωση του ασφαλτομίγματος στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού οδοστρώματος. Η ύπαρξη ενός δείκτη συμπεριφοράς, ο οποίος αποτελεί μηχανικό χαρακτηριστικό του ασφαλτομίγματος, προσδίδει περαιτέρω οφέλη στο πλαίσιο της διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων λόγω της δυνατότητας πρόβλεψης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου. Η πρόταση αυτή είναι άμεσα υλοποιήσιμη, υπό προϋποθέσεις, σε έργα Συστημάτων Παραχώρησης (PPP), όπου η διαχείριση της συντήρησης είναι αναπόσπαστο σκέλος και μπορεί να επεκταθεί και να αποτελέσει οδηγό και σε άλλα συστήματα έργων οδοστρωμάτων.

## **EXTENDED ABSTRACT**

---

The mechanical characterization of an asphalt mix is expressed through the stiffness modulus, which due to the viscoelastic nature of the asphalt mix, is affected by temperature and loading time (or frequency). Stiffness modulus is a key parameter in characterization, ranking and design of mixes as well as in pavement design and therefore in the prediction of pavement performance, quality assurance procedures of new pavements and estimation of the structural condition of in service pavements.

Several methodologies have been developed for the determination of stiffness modulus, based on various laboratory experimental setup. Differences on loading conditions, such as loading frequency, load magnitude, duration and measuring systems as well as specimen geometry, lead to the existence of different expressions of stiffness modulus or even in different values of the same stiffness modulus for the same material.

According to the state of the art, the importance of the dynamic modulus ( $E^*$ ) emerged, since it captures the viscoelastic behavior of the asphalt mix for a wide range of temperature and loading frequencies. Hence, it is a significant parameter in aspects related with asphalt mix characterization and evaluation, pavement design and the estimation of asphalt mix performance and consequently of the entire pavement. Given the above, it is considered as a requisite and key design parameter, especially in the frame of the newly developed mechanical-empirical AASHTO method (MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), which is nowadays in the frontispiece of the advanced analytical pavement design on international level.

$E^*$  can be determined in the lab under various laboratory experimental setup. According to recent developments and researches the experimental setup widely used is the uniaxial compression test. The need of specialized equipment on the one hand, and its time consuming determination on the other, led to the development of international prediction algorithms for the estimation of  $E^*$ , with the aim to substitute the laboratory experimental setup. Most recent, on a limited scale, international algorithms were developed in the frame of the new AASHTO method (MEPDG) configuration and are based on experimental determined values of  $E^*$  through uniaxial compression setup. However, the applicability of these algorithms on various types of asphalt mixes is nor plainly defined and therefore, is investigated in the present thesis.

More specifically, the investigation is based on the evaluation of international existing prediction algorithms on experimental mixes, whose composition is in accordance with national and international standards. The evaluation results are exploited for the configuration of a methodological framework for the development of new algorithms, with the aim to substitute the  $E^*$  determination in the lab, with a quick but reliable procedure for the estimation of the  $E^*$ . Valuable tool in the present investigation was the science of statistics, which was utilized for the analysis of numerous data included in the data base that was developed for the research needs of the present study.

In the frame of the present study, the introduction of  $E^*$  prediction algorithms in aspects concerning asphalt mix evaluation, pavement design and evaluation of asphalt layers structural condition of newly constructed and in service pavements, was further investigated. The aim was to optimize, both in terms of time and financial recourses, the above mentioned procedures.

As far as pavement design is concerned, sensitivity analysis of the measured and estimated  $E^*$  values showed that new prediction algorithms that were developed can be used successfully for the estimation of cracking percentage due to fatigue of the asphalt base.

Further investigation was performed with the aim to formulate a proposal for the introduction of  $E^*$  prediction algorithms in the procedures of quality assurance and control of asphalt mix design as well as pavement design in the construction process of asphalt pavements.

The methodology for the determination of the structural condition of in service pavements asphalt layers was presented, according to which  $E^*$  prediction algorithms along with collected in situ data through non destructive testing, are used for the estimation of the asphalt layers  $E^*$  values.

The capping stone of the present research is the introduction of the estimated through prediction algorithms  $E^*$  as an asphalt mix performance indicator. This indicator can be widely implemented aiming to the optimization not only of the asphalt mix design, but also of the asphalt mix behavior analysis due to fatigue, in the frame of analytical design procedures. An asphalt mix performance indicator that is a mechanical characteristic of the asphalt mix, attaches further benefits in the procedures in the frame of pavement maintenance management, since it is possible to estimate pavement behavior in the long term. This proposal is directly applicable, under certain conditions, to pavement concession systems, like PPP (Public Private

Partnership), in which pavement maintenance and preservation is an integral part, and can be extended to serve as a guide to every pavement system.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Γενική θεώρηση του προβλήματος και αντικείμενο της έρευνας

Το ασφαλτόμιγμα είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από κλάσματα αδρανών με συνδετικό υλικό την άσφαλτο. Μέρος του όγκου του ασφαλτομίγματος καταλαμβάνει ο αέρας. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος διέπονται από τα χαρακτηριστικά των αδρανών (σχήμα, διαβάθμιση, δομικός σκελετός, μέτρο ελαστικότητας κ.α.), τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου (τύπος ασφάλτου, μέτρο δυσκαμψίας, συνοχή, κ.α.), καθώς και από την αλληλεπίδραση της ασφάλτου με τα αδρανή (προσκόλληση, απορροφητικότητα, χημική αλληλεπίδραση κ.α.). Συνεπώς, η δομή ενός ασφαλτομίγματος είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, γεγονός που καθιστά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος μια πολυπαραμετρική διαδικασία, στο πλαίσιο του σχεδιασμού του μίγματος και της πρόβλεψης της συμπεριφοράς του.

Η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος είναι σύνθετη κυρίως λόγω της ιξώδους φύσης της ασφάλτου. Σε υψηλές θερμοκρασίες ή/και χαμηλές συχνότητες φόρτισης συμπεριφέρεται σαν ιξώδες υλικό, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες ή/και υψηλές συχνότητες φόρτισης σαν ελαστικό υλικό. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης συμπεριφέρεται τόσο σαν ιξώδες όσο και σαν ελαστικό υλικό. Τέλος, όπως και τα περισσότερα υλικά, η συμπεριφορά του εξαρτάται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης.

Η μηχανική συμπεριφορά ενός ασφαλτομίγματος εκφράζεται μέσω του μέτρου δυσκαμψίας το οποίο λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης του ασφαλτομίγματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου (ή της συχνότητας) φόρτισης. Το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό των μιγμάτων, την κατηγοριοποίησή τους, το σχεδιασμό τους, τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και κατά επέκταση, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους, τις διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων ή εκτίμησης της δομικής κατάστασης εν λειτουργία οδοστρωμάτων.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες που βασίζονται σε ποικίλες εργαστηριακές πειραματικές διατάξεις. Ενδεικτικά αναφέρονται η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού, η αξονική θλιπτική, η αξονική

εφελκυστική, η διατμητική και η δοκιμή κάμψης (Vande Loo 1976, Monismith & Taybali 1988, Waldhoff et al. 2000, Witczak et al. 2000, Witczak & Bonaquist 1999, Pellinen & Witczak 2002b). Οι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, όπως συχνότητα φόρτισης, μέγεθος, διάρκεια και σύστημα μέτρησης καθώς και η γεωμετρία των δοκιμών, οδηγούν στην ύπαρξη διαφορετικών εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας ή ακόμα και διαφορετικών τιμών του ίδιου μέτρου δυσκαμψίας για το ίδιο υλικό. Επομένως, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένο υπό την έννοια ότι υπάρχει πλήθος εκφράσεων, οι οποίες αποτελούν στην ουσία παραλλαγές του ίδιου θέματος. Σε κάθε περίπτωση η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας προκύπτει από το λόγο της εφαρμοζόμενης τάσης προς την παραμόρφωση. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες εκφράσεις του μέτρου δυσκαμψίας είναι αυτή του μέτρου επανάκτησης ( $M_r$ ), του μέτρου δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (ITSM), του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας ( $G^*$ ) και του σύνθετου (δυναμικού) μέτρου δυσκαμψίας ( $E^*$ ) (Witczak et al. 2000, Chehab et al. 2000, AASHTO T320-03 2003, Kim et al. 2003, Deacon 1965).

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι το  $E^*$  αποτελεί θεμελιώδη μηχανική ιδιότητα του μίγματος καθώς μέσω αυτού είναι δυνατή η αποτύπωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Ως εκ τούτου αποτελεί βασική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση των μιγμάτων, τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση του συνόλου του οδοστρώματος (Bonnaure et al. 1977, Flintsch et al. 2005, Tashman & Elangovan 2007, Mohammad et al. 2007, Baus & Stires 2010). Η σπουδαιότητα του  $E^*$  ενισχύεται περαιτέρω και από το γεγονός ότι αποτελεί βασική και απαραίτητη παράμετρο στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, ελέγχου και διασφάλισης της ποιότητας, καθώς και στις διαδικασίες που αφορούν στη διαχείριση της συντήρησης εν λειτουργία οδοστρωμάτων, σύμφωνα με τον επικαιροποιημένο οδηγό διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της νέας μεθόδου AASHTO (MEPDG) (Flintsch et al. 2008, Mohammad 2010, Clyne et al. 2003, Flintsch et al. 2005, Birgisson et al. 2005).

Η πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του  $E^*$  έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών. Η πρώτη εργαστηριακή πειραματική διάταξη που προτάθηκε για την περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος ήταν αυτή της τριαξονικής δοκιμής, όπου σε κυλινδρικό δοκίμιο επιβάλλεται φορτίο ημιτονοειδούς μορφής συγκεκριμένης συχνότητας και καταγράφεται η ημιτονοειδής τάση (Parazian 1962). Η υπόψη έρευνα καταλήγει στην πρόταση θεώρησης των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Έκτοτε, για τον προσδιορισμό του

δυναμικού μέτρου έχει αναπτυχθεί πλήθος πειραματικών διατάξεων. Ωστόσο, η δοκιμή που διαφαίνεται να δημιουργεί ισχυρές προϋποθέσεις πρόκρισης των υπολοίπων, είναι αυτή της μονοαξονικής θλίψης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υπόψη πειραματική διάταξη παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης με την παρατηρούμενη συμπεριφορά του οδοστρώματος επιτόπου και ως εκ τούτου αξιοποιούνται στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος, αλλά και του οδοστρώματος, στο πλαίσιο μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων (Witczak 2005, Goh et al. 2011, Loulizi et al. 2006, Bonaquist 2003, Pellinen & Witczak 2002a, Shenoy & Romero 2002, Witczak et al. 2002). Επιπλέον, το  $E^*$  που προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, προτείνεται να χρησιμοποιείται ως βασική παράμετρος στα πλαίσια απλών ελέγχων συμπεριφοράς (Simple Performance Tests) για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς μιγμάτων (Witczak & Pellinen 2000). Επίσης, αξιοποιείται σαν παράμετρος ελέγχου στο πλαίσιο της διασφάλισης της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων (Bonaquist 2003).

Διεθνώς έχει αναπτυχθεί πλήθος αλγορίθμων για την εκτίμηση του  $E^*$ , οι οποίοι χρονολογούνται από το 1977 (Bonnaure et al 1977) μέχρι και το πρόσφατο παρελθόν (Witczak & Fonseca 1996, Andrei et al. 1999, Christensen et al. 2003, Al-Khateeb et al. 2006, Bari & Witczak 2006, Witczak et al. 2007, Awed et al. 2011). Οι πρώτοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν βασίστηκαν στα αποτελέσματα του εργαστηριακού προσδιορισμού του  $E^*$  που προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων, ενώ οι πλέον πρόσφατοι βασίζονται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εργαστηριακή δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Οι τελευταίοι αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο διαμόρφωσης της νέας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου AASHTO, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος, τον αναλυτικό υπολογισμό των εντατικών μεγεθών και την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε κόπωση του ασφαλτομίγματος, και κατ' επέκταση του οδοστρώματος.

Η δυνατότητα εφαρμογής των προαναφερόμενων αλγορίθμων σε μίγματα που δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξή τους, δεν ορίζεται σαφώς και ως εκ τούτου έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνών (Andrei et al. 1999, Dongre et al. 2005, Mohammad et al. 2007, Flintsch et al. 2008, Ping & Xiao 2007, Christensen et al. 2003, Azari et al. 2007, Awed et al. 2011, Khattab et al. 2014). Στην πλειοψηφία των παραπάνω ερευνών είναι σαφές ότι απαιτείται κατάλληλη προσαρμογή των αλγορίθμων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για την αξιόπιστη εκτίμηση των τιμών του  $E^*$ .



Υπό το πρίσμα των παραπάνω, η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στη μηχανική συμπεριφορά των μιγμάτων, η οποία εκφράζεται μέσω του  $E^*$  που προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο διεθνές πρότυπο AASHTO (2011). Βασικό αντικείμενο της έρευνας αποτελεί η αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων σε μίγματα η σύνθεση των οποίων είναι σύμφωνη τόσο με εθνικές όσο και διεθνείς προδιαγραφές, καθώς και η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου υποκατάστασης του προσδιορισμού του  $E^*$  μέσω εργαστηριακής δοκιμής, με νέους αλγόριθμους εκτίμησης, ώστε να καταστεί δυνατή η γρήγορη αλλά και αξιόπιστη εκτίμηση του  $E^*$ . Στόχος είναι η εισαγωγή των αλγορίθμων σε θέματα που σχετίζονται αφενός με το χαρακτηρισμό των μιγμάτων και αφετέρου με τον αναλυτικό υπολογισμό των οδοστρωμάτων. Κατ' επέκταση μπορούν να αξιοποιηθούν στην εφαρμοσμένη έρευνα για την ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων τεχνολογιών ασφαλτομιγμάτων. Οι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  πιστεύεται ότι αποτελούν πολύτιμο εργαλείο συνιστώντας μια αξιόπιστη και παράλληλα απλή διαδικασία, από την οποία απορρέουν οφέλη που σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης χρόνου αλλά και οικονομικών πόρων.

## 1.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο

Αρχικά, για την επίτευξη του στόχου της παρούσας έρευνας πραγματοποιείται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση (state of the art) για την καταγραφή του διεθνούς γίνεσθαι όσον αφορά σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος μέσω του μέτρου δυσκαμψίας.

Εν συνεχεία δημιουργείται μια πολυπληθής βάση δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει στοιχεία ποικίλων τύπων μιγμάτων, η σύνθεση των οποίων είναι σύμφωνη με εθνικές και διεθνείς προδιαγραφές. Μέσω εκτενούς στατιστικής ανάλυσης των υπόψη στοιχείων πραγματοποιείται αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ , καθώς και ανάπτυξη νέων για τη γρήγορη αλλά και αξιόπιστη εκτίμηση του  $E^*$ , μέσω απλών πειραματικών διαδικασιών που αποτελούν μέρος της μελέτης σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων, όπως είναι η ογκομετρική σύσταση του μίγματος, η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου (βαθμός διείδυσης και θερμοκρασία μάλθωσης).

Το μεθοδολογικό πλαίσιο ολοκληρώνεται με το πειραματικό σκέλος, το οποίο περιλαμβάνει συστηματικές εργαστηριακές δοκιμές αλλά και επιτόπου συλλογή στοιχείων οδοστρωμάτων. Μέσω της πειραματικής διαδικασίας γίνεται η εισαγωγή των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$

στις διαδικασίες αφενός διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων, και αφετέρου αξιολόγησης νέων και εν λειτουργία οδοστρωμάτων.

### 1.3 Δομή

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας εργασίας, συνθέτονται πέραν του παρόντος (**Κεφάλαιο 1**) τα εξής εδάφια:

Στο **Κεφάλαιο 2**, δίνονται κάποια γενικά στοιχεία περί των ασφαλτομιγμάτων και ορίζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπου αναπτύσσονται οι βασικές εκφράσεις του μέτρου δυσκαμψίας καθώς και οι συνοδές εργαστηριακές διαδικασίες για τον προσδιορισμό του. Αναπτύσσεται σχολιασμός επί του διεθνούς γίνεσθαι σε θέματα που αφορούν στη θεώρηση του μέτρου δυσκαμψίας σαν κριτήριο για το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και στην εισαγωγή του σαν βασική παράμετρο στη διαδικασία διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων. Βάσει των παραπάνω, αναδεικνύεται η σπουδαιότητα του  $E^*$ .

Στο **Κεφάλαιο 3**, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο  $E^*$ . Περιλαμβάνει τις βασικές αρχές του  $E^*$  καθώς και τη μεθοδολογία για την κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων του  $E^*$  για την ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης (master curve) η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Επίσης, περιγράφεται η εργαστηριακή πειραματική διάταξη, η προετοιμασία των δοκιμών καθώς και η εργαστηριακή διαδικασία για τον προσδιορισμό του  $E^*$  με τη μονοαξονική δοκιμή θλίψης.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται οι διεθνείς αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$ . Καταγράφεται η ιστορική εξέλιξη των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  και περιγράφονται οι πλέον σύγχρονοι, διεθνώς αποδεκτοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι για την εκτίμηση των τιμών του  $E^*$ .

Στο **Κεφάλαιο 5**, περιγράφεται η εκτενής πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, για την επίτευξη του στόχου της παρούσας έρευνας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει δοκιμές επί χαλαρών ασφαλτομιγμάτων, τη συμπύκνωση δοκιμών ασφαλτομίγματος, τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών των δοκιμών ασφαλτομίγματος καθώς και του  $E^*$ . Τα στοιχεία συλλογής των χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων καθώς και του  $E^*$  αξιοποιήθηκαν για τη δημιουργία πολυπληθούς βάσης δεδομένων, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  των υπό διερεύνηση μιγμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 6**, παρουσιάζεται η ανάλυση και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, η οποία πραγματοποιείται με γνώμονα τη διεθνή πρακτική σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων και περιλαμβάνει την εκτίμηση του  $E^*$  μέσω διεθνών αλγορίθμων.

Στο **Κεφάλαιο 7**, ακολουθεί η αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων, η οποία πραγματοποιείται στο πλαίσιο της καλής προσαρμογής τους στα υπό διερεύνηση μίγματα, δηλαδή της δυνατότητας ακριβούς εκτίμησης του  $E^*$  των μιγμάτων. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των διεθνών αλγορίθμων οδήγησαν στην ανάγκη ανάπτυξης νέων αλγορίθμων για την εκτίμηση των τιμών του  $E^*$  των μιγμάτων που θεωρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας

Στο **Κεφάλαιο 8**, περιγράφεται η μεθοδολογία για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης. Μέσω των ελέγχων καλής προσαρμογής των νέων αλγορίθμων αλλά και της επαλήθευσής τους με νέα πειραματικά δεδομένα, διαπιστώνεται ότι οι νέοι αλγόριθμοι δύναται να χρησιμοποιηθούν για την ακριβή εκτίμηση του  $E^*$  των υπό διερεύνηση μιγμάτων. Σημειώνεται δε ότι αναπτύχθηκαν δύο αλγόριθμοι που αφορούν σε μίγματα κλειστού και ανοικτού τύπου.

Στο **Κεφάλαιο 9**, παρουσιάζεται η δυνατότητα εφαρμογής των νέων αλγορίθμων σε μίγματα τα οποία δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τα μίγματα κλειστού τύπου δεν παρουσιάζει καλή εφαρμογή στα νέα μίγματα. Επομένως, δημιουργήθηκε μια επικαιροποιημένη βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει επιπλέον και τα στοιχεία των νέων μιγμάτων. Η νέα βάση δεδομένων αξιοποιείται για την ανάπτυξη ενός νέου αλγόριθμου ικανού να περιγράψει τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, αναφορικά με το  $E^*$ , όλων των υπό διερεύνηση μιγμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 10**, παρουσιάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω μιας μηχανιστικής-εμπειρικής βασισμένης μεθοδολογίας.

Στο **Κεφάλαιο 11**, διερευνάται η εισαγωγή του  $E^*$  σαν κριτήριο στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας των νέων οδοστρωμάτων, καθώς και η εφαρμοσιμότητα των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στις υπόψη διαδικασίες. Επίσης, αναπτύσσεται πρόταση για τη διαμόρφωση πρωτοκόλλου για τη διασφάλιση της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων, όπου η εκτίμηση του  $E^*$  μέσω των αλγορίθμων αποτελεί πολύτιμο εργαλείο.

Στο **Κεφάλαιο 12**, προτείνεται η μεθοδολογία για την εισαγωγή των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στις διαδικασίες της δομικής αξιολόγησης εν λειτουργία οδοστρωμάτων.

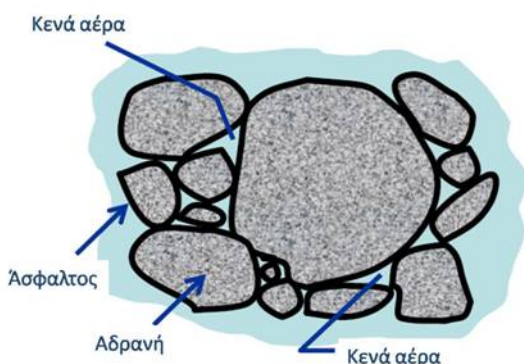
Στο **Κεφάλαιο 13**, τα συμπεράσματα που αφορούν στα επιμέρους εδάφια της έρευνας, όπως αυτά περιγράφονται στα ανωτέρω, αναπτύσσονται εκτενώς, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας. Επίσης, διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Η ανάπτυξη των εδαφίων υποστηρίζεται από σχετική διεθνή βιβλιογραφία (**Κεφάλαιο 14**), ενώ τα στοιχεία ανάλυσης περιλαμβάνονται στο **Παράρτημα** της παρούσας εργασίας.

## 2 ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

### 2.1 Ασφαλτόμιγμα

Το ασφαλτόμιγμα αποτελεί ένα υλικό οδοστρωσίας, από το οποίο κατασκευάζονται οι ανώτερες στρώσεις ενός οδοστρώματος (ασφαλτικές στρώσεις) και αποτελείται από άσφαλτο και αδρανή, ενώ ένα μέρος του όγκου τους καταλαμβάνεται από τον αέρα (Σχήμα 2.1).

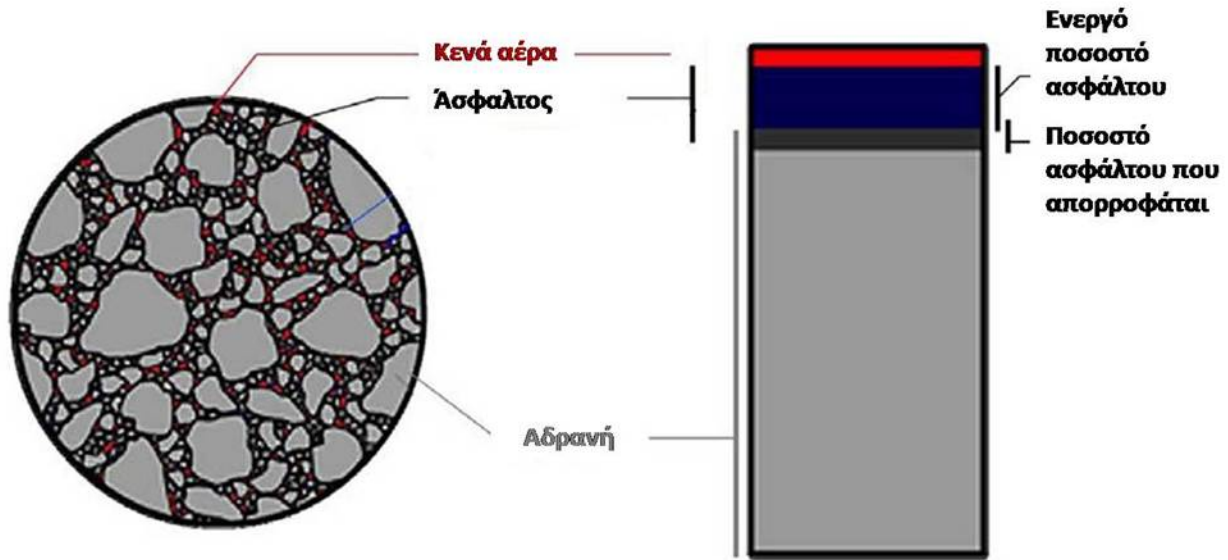


**Σχήμα 2.1** Συστατικά ασφαλτομίγματος

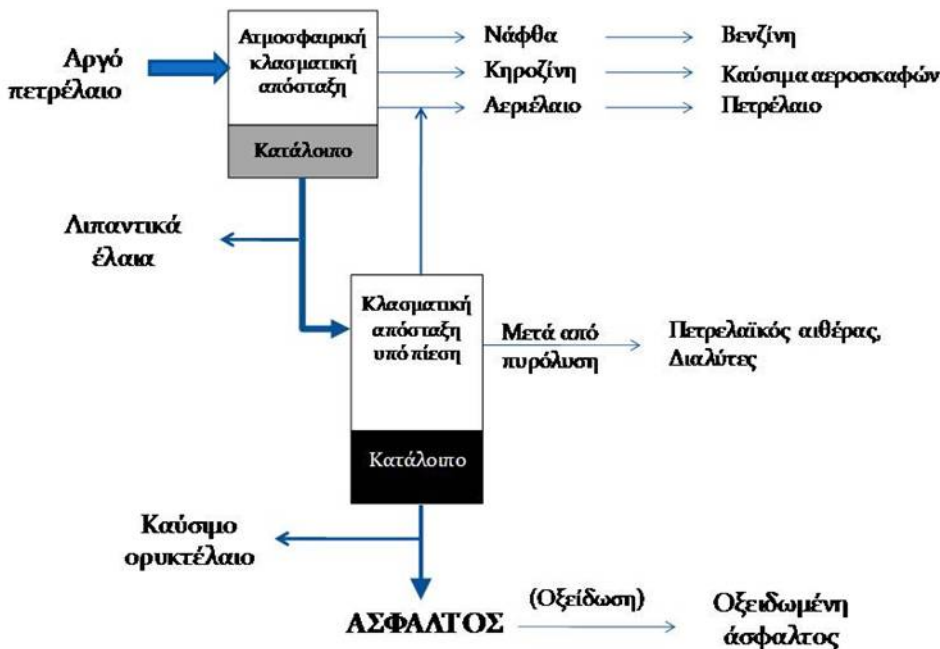
Τα αδρανή καταλαμβάνουν περίπου το 95% του ασφαλτομίγματος κατά βάρος, ενώ η άσφαλτος το υπόλοιπο 5%. Σε ένα τυπικό ασφαλτόμιγμα, τα αδρανή καταλαμβάνουν το 83% κατά όγκο (κ.ο.), η άσφαλτος το 10% κ.ο. και τα κενά αέρα το 5% κ.ο. (Σχήμα 2.2). Τα αδρανή λόγω των πόρων που έχουν απορροφούν ένα μέρος της ασφάλτου, με αποτέλεσμα η εναπομένουσα άσφαλτος να είναι αυτή που περιβάλλει τα αδρανή, γεμίζει τα κενά μεταξύ των αδρανών και προσδίδει τη συνοχή στο μίγμα. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ενεργό ποσοστό της ασφάλτου.

Η άσφαλτος αποτελεί το συνδετικό υλικό, το οποίο προσδίδει στο ασφαλτόμιγμα συνοχή και ομοιομορφία. Προέρχεται από το υπόλειμμα της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου και αποτελεί σύμπλοκες υδρογονανθρακούχες ενώσεις με λίγο οξυγόνο, άζωτο και συχνά με θείο που περιέχουν αναμεμιγμένες γαιώδεις ουσίες (Σχήμα 2.3). Τα φυσικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου, λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της, ποικίλουν εξαιρετικά με τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Σε υψηλές θερμοκρασίες η άσφαλτος είναι ρευστή, σε θερμοκρασία δωματίου η συνοχή της είναι παρόμοια με αυτή ενός μαλακού ελαστικού, ενώ σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός η άσφαλτος μπορεί να γίνει πολύ εύθραυστη. Όσον αφορά στο χρόνο φόρτισης, με την αύξηση αυτού τόσο περισσότερο παραμορφώνεται το υλικό. Κάποιες

άσφαλοι περιέχουν μικρές ποσότητες πολυμερών με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους και ονομάζονται τροποποιημένες άσφαλοι.



Σχήμα 2.2 Ογκομετρική σύσταση ασφαλτομίγματος



Σχήμα 2.3 Παραγωγή ασφάλτου

Καθώς το ασφαλτόμιγμα αποτελείται κατά το μεγαλύτερο μέρος του από αδρανή, τα τελευταία θα πρέπει να είναι καλής ποιότητας ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συμπεριφορά του μίγματος.

Τα αδρανή αποτελούν το δομικό σκελετό του ασφαλτομίγματος, προσδίδοντάς του αντοχή και ανθεκτικότητα. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του ασφαλτομίγματος προέρχονται είτε από θρυμματισμένη πέτρα είτε από θρυμματισμένο χαλίκι. Και στις δύο περιπτώσεις τα αδρανή θα πρέπει να είναι προσεκτικά θρυμματισμένα και τα κλάσματα που προκύπτουν να είναι κυβικής μορφής παρά επίπεδα και επιμήκη. Επίσης, θα πρέπει να είναι απαλλαγμένα από σκόνη, βρομιά, άργιλο και άλλα επιβλαβή υλικά. Λόγω του ότι τα αδρανή αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από σκληρότητα και αντίσταση σε λείανση.

Όλα τα ασφαλτομίγματα περιέχουν ένα ποσοστό κενών αέρα ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτομίγματος. Με τον όρο κενά ασφαλτομίγματος ορίζονται οι θύλακες αέρα που βρίσκονται ανάμεσα στα επικαλυμμένα με άσφαλτο αδρανή ενός συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος. Η ανθεκτικότητα των μιγμάτων, εξασφαλίζεται με κατάλληλο σχεδιασμό των παραπάνω ογκομετρικών στοιχείων του ασφαλτομίγματος. Σε περίπτωση που το ασφαλτόμιγμα περιέχει υψηλό ποσοστό κενών αέρα, όχι μόνο ο αέρας εισέρχεται στο σώμα του ασφαλτομίγματος προκαλώντας οξειδωση της ασφάλτου και επομένως γρηγορότερη γήρανση του ασφαλτομίγματος, αλλά το μίγμα είναι και πιο επιρρεπές σε ρηγμάτωση και σε παραμένουσες παραμορφώσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, χαμηλές τιμές του ποσοστού των κενών αέρα ενδέχεται να οδηγήσουν σε τροχοαυλάκωση, καθώς δεν θα υπάρχει το απαιτούμενο ποσοστό κενών, ώστε το συνδετικό υλικό να εισέλθει και να καλύψει τα αδρανή.

Τα ασφαλτομίγματα κατηγοριοποιούνται με διάφορους τρόπους. Ίσως ο πιο γενικός τύπος κατηγοριοποίησης είναι ανάλογα με το αν θα πρέπει το ασφαλτόμιγμα να θερμανθεί ή όχι πριν τη μεταφορά, τοποθέτηση και συμπύκνωσή του. Το θερμό ασφαλτόμιγμα (Hot Mix Asphalt - HMA) πρέπει απαραίτητως να θερμανθεί κατά την ανάμιξη, μεταφορά, διάστρωση και συμπύκνωση. Η άσφαλτος που χρησιμοποιείται στα υπόψη ασφαλτομίγματα είναι αρκετά δύσκαμπτη σε συνήθεις θερμοκρασίες (θερμοκρασία δωματίου), έτσι ώστε μόλις το θερμό ασφαλτόμιγμα κρυώσει να γίνεται δύσκαμπτο και ισχυρό ώστε να αναλάβει τα φορτία της κυκλοφορίας.

Αντιθέτως, το ψυχρό ασφαλτόμιγμα (Cold Mix Asphalt) αναμιγνύεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται χωρίς την πρότερη θέρμανσή του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται υγρή άσφαλτος με τη μορφή γαλακτώματος η οποία είναι ρευστή σε θερμοκρασία δωματίου. Τα ασφατικά γαλακτώματα είναι μίγμα ασφάλτου, νερού και ειδικών χημικών πρόσθετων που επιτρέπουν στην άσφαλτο και το νερό να αναμιγνύονται και να

παράγεται ένα σταθερό ρευστό. Όταν το ασφατικό γαλάκτωμα αναμιχθεί με τα αδρανή, το γαλάκτωμα διαχωρίζεται, δηλαδή η άσφαλτος διαχωρίζεται από νερό και καλύπτει τα αδρανή. Το ψυχρό ασφαλτόμιγμα είναι πιο οικονομικό καθώς δεν απαιτούνται υψηλά ποσοστά ενέργειας για τη θέρμανση του μίγματος κατά την παρασκευή και διάστρωση. Ωστόσο, παρουσιάζει δυσκολίες ως προς την συμπίκνωση και υστερεί ως προς την ανθεκτικότητά του συγκριτικά με το θερμό ασφαλτόμιγμα.

Ένας νέος τύπος ασφαλτομίγματος, το ζεστό ασφαλτόμιγμα (Warm Mix Asphalt - WMA), τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ολοένα και πιο συχνά. Σε αυτό τον τύπο ασφαλτομίγματος χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για τη σημαντική μείωση της θερμοκρασίας παραγωγής του ασφαλτομίγματος κατά 40 °C. Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν (1) τη χρήση χημικών πρόσθετων για τη μείωση του υψηλού θερμοκρασίας ιξώδους της ασφάλτου, (2) τεχνικές που σχετίζονται με την προσθήκη νερού στην άσφαλτο με αποτέλεσμα να γίνεται αφρώδης και (3) η προσθήκη σκληρής και μαλακής ασφάλτου σε διάφορα στάδια κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος. Η χρήση του ζεστού ασφαλτομίγματος συνοδεύεται από πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερο κόστος που συνεπάγεται από τη μείωση της θερμοκρασίας στην οποία θερμαίνεται, λιγότερες εκπομπές και επομένως ηπιότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και ενδεχομένως ικανοποιητική συμπεριφορά. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι το ζεστό ασφαλτόμιγμα σε κάποιες περιπτώσεις είναι πιο επιρρεπές σε αστοχίες λόγω υγρασίας.

Ο πιο διαδεδομένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος ασφαλτομίγματος είναι το θερμό. Το θερμό ασφαλτόμιγμα διακρίνεται σε τρεις κύριες κατηγορίες: κοκκομετρική διαβάθμιση κλειστή (κλειστού τύπου), κοκκομετρική διαβάθμιση ασυνεχής και κοκκομετρική διαβάθμιση για υψηλό ποσοστό κενών (ανοικτού τύπου). Τα μίγματα κλειστού τύπου αναφέρονται στα μίγματα εκείνα όπου η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών είναι τέτοια που επιτρέπει πολύ μικρό κενό χώρο μεταξύ των αδρανών.

Η χρήση μιγμάτων ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης (Stone Matrix Asphalt- SMA) έχει επεκταθεί τα τελευταία είκοσι χρόνια σε Αμερική και Ευρώπη. Το SMA είναι ένας ειδικός τύπος ασφαλτομίγματος που έχει σχεδιαστεί για οδοστρώματα με υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους βαρέων οχημάτων. Αποτελείται από υψηλής ποιότητας και αντοχής χονδρόκοκκων αδρανών σε συνδυασμό με υψηλό ποσοστό χυτής ασφάλτου (mastic asphalt) η σύσταση της οποίας είναι άσφαλτος υψηλής απόδοσης, ορυκτή παιπάλη και μια μικρή ποσότητα ινών. Τα ασφαλτομίγματα SMA περιέχουν σε μεγάλη ποσότητα χονδρόκοκκα αδρανή και παιπάλη, ενώ



τα λεπτόκοκκα κλάσματα είτε απουσιάζουν είτε βρίσκονται σε πολύ μικρές ποσότητες. Αυτός είναι και ο λόγος άλλωστε που τα μίγματα αυτά ονομάζονται ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης. Μια καλά σχεδιασμένη δομή χονδρόκοκκου υλικού σε συνδυασμό με τη χρήση ασφάλτου υψηλής απόδοσης εξασφαλίζει ότι η συμπεριφορά του SMA θα είναι εξαιρετική. Προς τούτο χρησιμοποιείται συνήθως μόνο σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων που αναμένεται υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος βαρέων οχημάτων, όπου η εξαιρετική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος το καθιστά οικονομικά αποδοτικό παρά το αρχικό υψηλό κόστος παρασκευής του.

Τα ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου περιλαμβάνουν υψηλό ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών και αρκετά μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων και παιπάλης. Το ποσοστό κενών αέρα είναι αρκετά πιο υψηλό σε σχέση με του κλειστού τύπου μίγματα και συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 20%. Μεγάλη ποσότητα υψηλής απόδοσης ασφάλτου είναι απαραίτητη προκειμένου για τη σταθερότητα του μίγματος. Τα ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως σαν επιφανειακές στρώσεις μικρού πάχους με στόχο την επίτευξη ενός ικανοποιητικού επιπέδου αντιολισθητικής ικανότητας.

Στο πλαίσιο σχεδιασμού ενός ασφαλτομίγματος και διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων, είναι απαραίτητη η γνώση θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων και γενικότερα της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών. Μια από τις βασικότερες θεμελιώδης μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων είναι το μέτρο δυσκαμψίας.

## **2.2 Ορισμός μέτρου δυσκαμψίας**

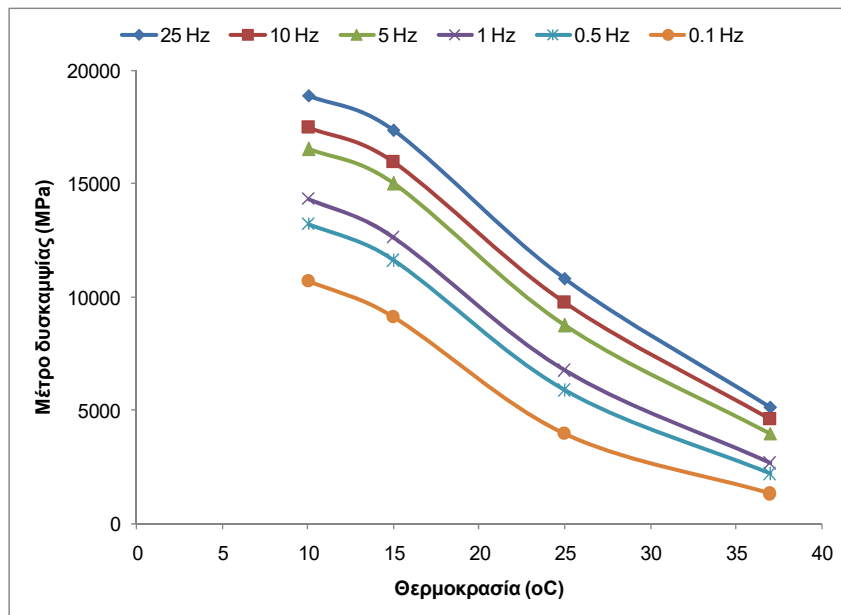
Το μέτρο δυσκαμψίας είναι απαραίτητη παράμετρος για τον καθορισμό της συμπεριφοράς ενός ασφαλτομίγματος ασφαλικής στρώσης ενός οδοστρώματος καθώς απαιτείται τόσο για τον προσδιορισμό της απόκρισης του οδοστρώματος (τάσεις, παραμορφώσεις και ελαστικές υποχωρήσεις), όσο και για την πρόβλεψη των φθορών του οδοστρώματος υπό την επίδραση των φορτίων της κυκλοφορίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών (Tayebali et al. 1994). Ως μέτρο δυσκαμψίας ορίζεται η σχέση τάσης-παραμόρφωσης υπό την επίδραση φορτίου. Το μέτρο δυσκαμψίας διαφοροποιείται από το μέτρο ελαστικότητας που χαρακτηρίζει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης των ελαστικών υλικών και όπου η παραμόρφωση εξαρτάται μόνο από την επιβαλλόμενη τάση. Στην περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων τα δύο υλικά που εμπεριέχονται, η άσφαλτος και τα αδρανή, έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Τα αδρανή έχουν κατά βάση ελαστική συμπεριφορά ενώ η άσφαλτος συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά κάτω από

συνήθεις συνθήκες φόρτισης. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει με αποτέλεσμα η παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος να μην εξαρτάται μόνο από την επιβαλλόμενη τάση αλλά να είναι και συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης (ή της συχνότητας). Το μέτρο δυσκαμψίας (S) του ασφαλτομίγματος υπολογίζεται από την παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση:

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

όπου  $\sigma$  η επιβαλλόμενη τάση,  $\epsilon$  η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση,  $T$  η θερμοκρασία και  $t$  ο χρόνος φόρτισης.

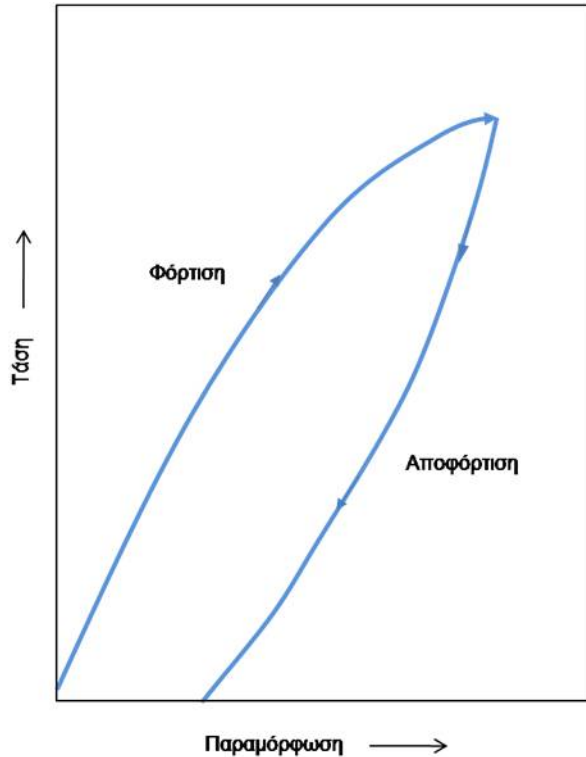
Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της συχνότητας φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας ενός ασφαλτομίγματος.



**Σχήμα 2.4 Επίδραση της συχνότητας φόρτισης και της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος**

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι η προοδευτική μείωση της συχνότητας (και αντίστοιχα αύξηση του χρόνου φόρτισης) οδηγεί σε σταδιακή μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Το γεγονός αυτό φανερώνει την αρνητική επίδραση του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μειώνεται με την αύξηση της.

Ένα τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ενός δοκιμίου ασφαλτομίγματος το οποίο φορτίζεται και αποφορτίζεται μονοτονικά (στατικά) κατά τη διάρκεια δοκιμής μη περιορισμένης συμπίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 (Mamlouk & Sarofim 1988).



**Σχήμα 2.5** Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ασφαλτομίγματος υπό μη περιορισμένης συμπίεσης

Από το παραπάνω σχήμα διαπιστώνεται ότι το ασφαλτόμιγμα είναι ένα μη γραμμικό ανελαστικό υλικό. Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης εξαρτάται από το ρυθμό επιβολής του φορτίου και από τη θερμοκρασία. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις και κάτω από ειδικές συνθήκες, η απόκριση του ασφαλτομίγματος μπορεί να θεωρηθεί ελαστική και αποδεκτές θεωρίες για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις μπορούν να εφαρμοστούν. Είναι επομένως βάσιμη η υιοθέτηση της θεωρίας της ελαστικότητας αναγνωρίζοντας όμως και τους περιορισμούς που αυτή επιβάλλει. Σε άλλες περιπτώσεις, η θεωρία της ιξωδοελαστικότητας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την περιγραφή της χρονικά εξαρτώμενης απόκρισης του ασφαλτομίγματος.

Πληθώρα μεθοδολογιών και θεωριών έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας. Οι διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, όπως συχνότητα φόρτισης, μέγεθος, διάρκεια και σύστημα μέτρησης, έχουν σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη διαφορετικών εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας ή ακόμα και διαφορετικών τιμών του ίδιου μέτρου δυσκαμψίας για το ίδιο υλικό. Η γεωμετρία του δοκιμίου είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς καθορίζει εάν το μέτρο

δυσκαμψίας μετράται απευθείας με κατάλληλα όργανα προσαρτημένα στο δοκίμιο ή συνεπάγεται από την ανάλυση της απόκρισης του δοκιμίου στο επιβαλλόμενο φορτίο.

Ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μπορεί να επιτευχθεί είτε εργαστηριακά με κατάλληλες δοκιμές επί δοκιμίων ή πυρήνων οδοστρώματος, είτε μέσω αλγορίθμων.

## **2.3 Εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας**

### **2.3.1 Γενικά στοιχεία**

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος πραγματοποιείται με πλήθος πειραματικών διατάξεων, όπως ενδεικτικά αναφέρονται η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Indirect tensile), η τριαξονική δοκιμή με επαναλαμβανόμενο φορτίο (triaxial), η μονοαξονική δοκιμή (uniaxial), δοκιμή κάμψης δοκού 2, 3 ή 4 σημείων, δοκιμή κάμψης τραπεζοειδούς προβόλου και η δοκιμή επιβολής θλιπτικής τάσης. Το μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από τις παραπάνω δοκιμές, παρουσιάζει αποκλίσεις λόγω της διαφορετικής διάταξης των δοκιμών και του τρόπου φόρτισης του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, η φόρτιση που επιβάλλεται μπορεί να είναι παλμική ή αρμονική (ημιτονοειδής). Κατά την παλμική φόρτιση επιβάλλεται θλιπτικό φορτίο για σύντομο χρονικό διάστημα και κατόπιν μεσολαβεί μια μικρή περίοδος ηρεμίας. Το στάδιο φόρτισης/ αποφόρτισης και ηρεμίας καθορίζουν ένα πλήρη κύκλο φόρτισης. Στην περίπτωση της πλήρους ημιτονοειδούς φόρτισης, επιβάλλεται θλιπτική και εφελκυστική δύναμη χωρίς περίοδο ηρεμίας. Όσον αφορά στη διάταξη της δοκιμής, διαφορές παρατηρούνται στον τρόπο τοποθέτησης του δοκιμίου με αποτέλεσμα σε κάποιες δοκιμές να επιβάλλεται η φόρτιση κατά μήκος της κάθετου διαμέτρου των δοκιμίων, ενώ σε άλλες στο οριζόντιο επίπεδο του κυλινδρικού δοκιμίου. Σε κάθε περίπτωση, ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας προκύπτει από την επιβαλλόμενη τάση και την προκύπτουσα παραμόρφωση.

Στον Πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες έχουν προταθεί για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (Witczak et al. 2000, Chehab et al. 2000, AASHTO T320-03 2003, Kim et al. 2003, Deacon 1965). Όπως προκύπτει από τον Πίνακα τα μέτρα δυσκαμψίας που προσδιορίζονται από τις διάφορες δοκιμές είναι το μέτρο επανάκτησης (resilient modulus) και το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (dynamic modulus). Οι δύο αυτές παράμετροι θεωρούνται ως οι πιο κατάλληλες για την αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης ενός δοκιμίου ασφαλτομίγματος.

**Πίνακας 2.1 Εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων**

Τύπος φόρτισης	Τύπος επιβαλλόμενου φορτίου	Μέτρο δυσκαμψίας
Αξονική (κατακόρυφη τάση): θλίψη	Δυναμικό	Σύνθετο (δυναμικό) μέτρο (dynamic)
	Επαναλαμβανόμενο	Μέτρο επανάκτησης (resilient)
Αξονική (κατακόρυφη τάση): εφελκυσμός	Δυναμικό	Σύνθετο (δυναμικό) μέτρο (dynamic)
	Επαναλαμβανόμενο	Μέτρο επανάκτησης (resilient)
Διατμητική (διατμητική τάση)	Δυναμικό	Σύνθετο (δυναμικό) μέτρο (dynamic)
	Επαναλαμβανόμενο	Μέτρο επανάκτησης (resilient)
Διαμετρική (τάση έμμεσου εφελκυσμού) - Indirect Tensile Stress	Δυναμικό	Σύνθετο (δυναμικό) μέτρο (dynamic)
	Επαναλαμβανόμενο	Μέτρο επανάκτησης (resilient) Μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect tensile stiffness modulus - ITSM)
Κάμψη	Δυναμικό	Σύνθετο (δυναμικό) μέτρο (dynamic)
	Επαναλαμβανόμενο	Μέτρο επανάκτησης (resilient)

Οι βασικές πειραματικές διατάξεις οι οποίες είναι γενικώς αποδεκτές και έχουν καθιερωθεί στην επιστημονική κοινότητα είναι η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stress) από όπου προσδιορίζεται το μέτρο επανάκτησης, η δοκιμή αξονικής φόρτισης σε θλίψη από όπου προσδιορίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η δοκιμή επιβολής διατμητικής τάσης από όπου προσδιορίζεται το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας (Vande Loo 1976, Monismith & Taybali 1988, Waldhoff et al. 2000, Witczak et al. 2000, Pellinen & Witczak 2002a). Επίσης, η δοκιμή κάμψης (τριών ή τεσσάρων σημείων) χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

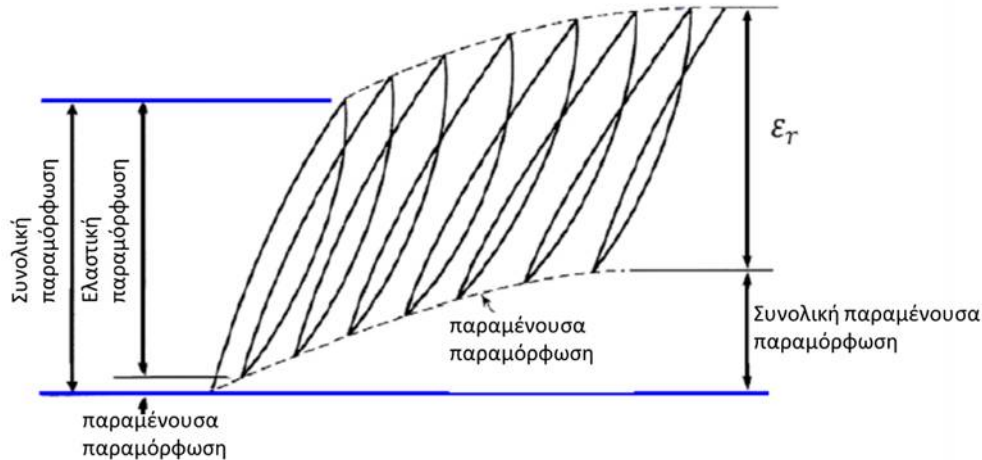
Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα μέτρα δυσκαμψίας καθώς και στις πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες εργαστηριακές διατάξεις για τον προσδιορισμό τους.

### **2.3.2 Μέτρο επανάκτησης $M_r$ (Resilient modulus)**

#### **2.3.2.1 Ορισμός**

Το μέτρο επανάκτησης  $M_r$  (resilient modulus) είναι το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται στη θεωρία επάλληλων ελαστικών στρώσεων για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Το ασφαλτόμιγμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ιξωδοελαστικό υλικό και επομένως μετά από κάθε επιβολή φορτίου προκύπτει μια παραμένουσα παραμόρφωση. Ωστόσο, όταν το

επιβαλλόμενο φορτίο είναι μικρό συγκριτικά με την αντοχή του υλικού και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι σχετικά μεγάλος (100 έως 200 κύκλους φόρτισης), η παραμόρφωση μετά την επιβολή του φορτίου ανακτάται σχεδόν πλήρως (Σχήμα 2.6).



**Σχήμα 2.6 Ελαστική και παραμένουσα παραμόρφωση υπό την επίδραση επαναλαμβανόμενου φορτίου (Huang 2004)**

Η παραμόρφωση είναι ανάλογη του επιβαλλόμενου φορτίου και εφόσον ανακτάται πλήρως μπορεί να θεωρηθεί ως ελαστική (Rahim 2005). Το  $M_r$  βασίζεται στην ανακτώμενη παραμόρφωση υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση και προσδιορίζεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση (2.2):

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.2)$$

όπου  $\sigma_d$  η επιβαλλόμενη τάση και  $\epsilon_r$  η ανακτώμενη παραμόρφωση.

Για τον προσδιορισμό του  $M_r$  έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές διατάξεις, όπως αυτή του μονοαξονικού εφελκυσμού, της μονοαξονικής θλίψης, της καμπτικής δοκού και του έμμεσου εφελκυσμού. Η πειραματική διάταξη του έμμεσου εφελκυσμού (indirect tensile stress) πλεονεκτεί ως προς τις υπόλοιπες λόγω της ικανότητας να προσομοιώνει με μεγάλη ακρίβεια την εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων στο κέντρο του άξονα επιβολής του φορτίου (πίεση των ελαστικών των οχημάτων), όπου αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας. Άλλα πλεονεκτήματα της διάταξης έμμεσου εφελκυσμού, είναι η σχετική ευκολία στην πραγματοποίηση της δοκιμής και το γεγονός ότι είναι πολλά υποσχόμενη ως προς

την επαναληψιμότητα. Εν κατακλείδι, η πειραματική διάταξη του έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του  $M_r$  είναι αυτή που προτιμάται από πλήθος ερευνητών (Brown & Foo 1989).

### 2.3.2.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού

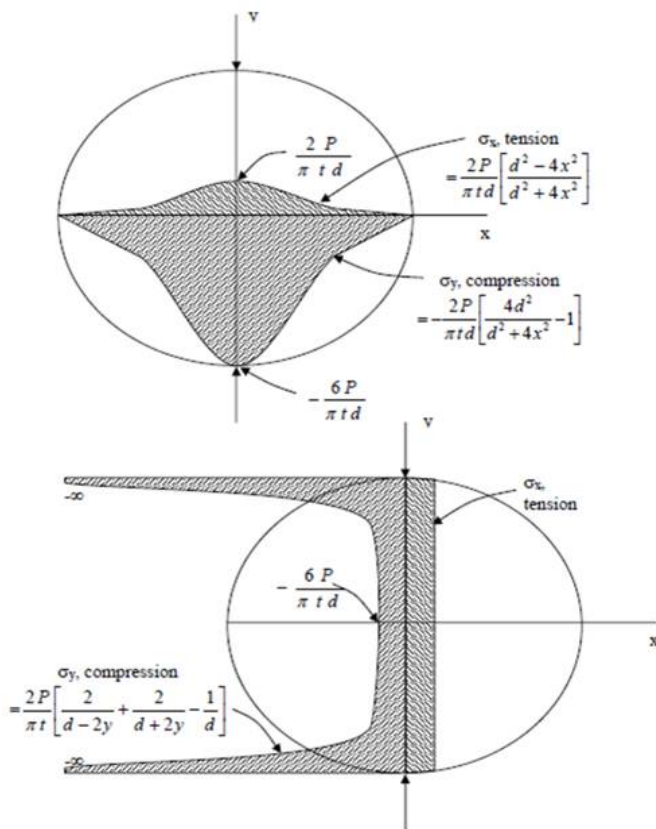
Αρχικά η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της επιμήκυνσης κατά τη θραύση του σκυροδέματος (Blakey & Beresford 1955) και στη συνέχεια υιοθετήθηκε για τον προσδιορισμό των ελαστικών παραμέτρων (μέτρο ελαστικότητας και λόγος του Poisson) του σκυροδέματος (Wright 1955, Hondros 1959). Ο Schmidt (1972) πρότεινε την υπόψη πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό του  $M_r$  των ασφαλτομιγμάτων. Έκτοτε, έχει καθιερωθεί ως η βασική δοκιμή για την αξιολόγηση του  $M_r$  (Brown & Foo 1989).

Κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού επιβάλλεται επαναλαμβανόμενη θλιπτική φόρτιση κατά την κατακόρυφη διάμετρο ενός κυλινδρικού δοκιμίου. Μέσω της υπόψη διάταξης φόρτισης αναπτύσσονται σχετικά ομοιόμορφες θλιπτικές τάσεις κατά μήκος της διεύθυνσης του επιβαλλόμενου φορτίου, καθώς και κάθετα της διεύθυνσης του επιβαλλόμενου φορτίου (Almudaiheem & Al-Sugair 1991, Brown & Foo 1989). Η δοκιμή περιγράφεται σε διάφορα πρότυπα όπως του διεθνούς οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials) "D4123: Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test", του SHRP (Strategic Research Highway Program) "P07: Test Method for Determining the Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using the Indirect Tensile Test Device" και του NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) "Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design". Παρόλο που τα παραπάνω πρότυπα παρουσιάζουν κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τον τρόπο εκτέλεσης των επιμέρους σταδίων της δοκιμής, η βασική αρχή παραμένει ίδια.

Για τον προσδιορισμό του  $M_r$  μέσω της διάταξης έμμεσου εφελκυσμού είναι απαραίτητο να προηγηθεί ο προσδιορισμός της αντοχής του δοκιμίου ασφαλτομίγματος σε έμμεσο εφελκυσμό με σκοπό τον καθορισμό του μεγέθους του φορτίου που θα εφαρμοστεί στη συνέχεια. Κατόπιν, οι αισθητήρες καταγραφής των παραμορφώσεων (Linear Variable Differential Transformers - LVDTs) προσαρτώνται στη μέση του δοκιμίου (Σχήμα 2.7). Η διάταξη αυτή των αισθητήρων επιτρέπει την ακριβέστερη καταγραφή των παραμορφώσεων. Κατά μήκος της διαμέτρου του δοκιμίου, η κατανομή των κάθετων και οριζόντιων τάσεων είναι μη ομοιόμορφη (Σχήμα 2.8).



**Σχήμα 2.7 Τοποθέτηση αισθητήρων LVDTs σε δοκίμιο ασφαλτομίγματος για τον προσδιορισμό του  $M_r$  με τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού**

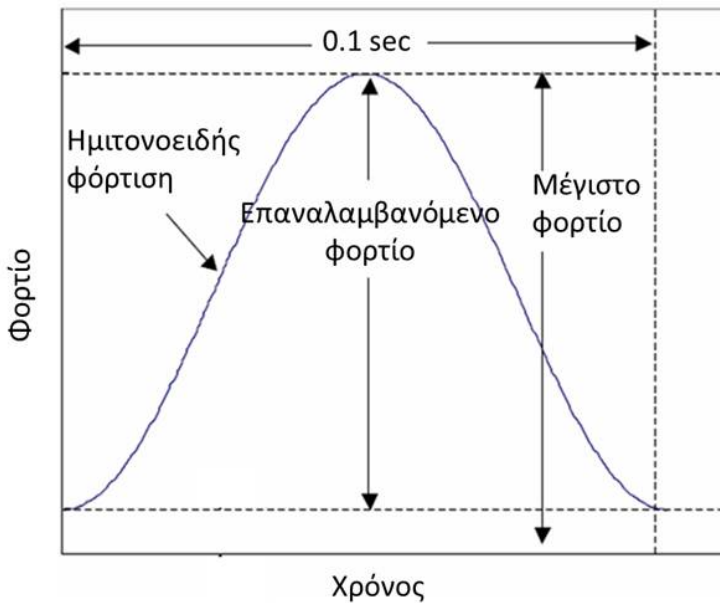


**Σχήμα 2.8 Κατανομή ελαστικών τάσεων σε δοκίμιο που υπόκειται σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού**

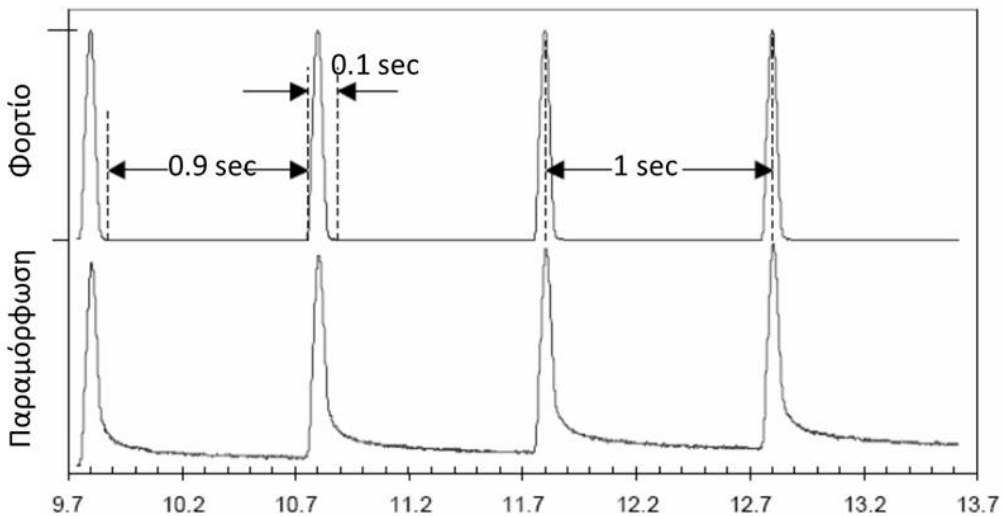
Ωστόσο, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κοντά στο κέντρο μπορούν προσεγγιστικά να χαρακτηριστούν ως ομοιόμορφες. Επομένως, η τοποθέτηση των LVDTs στο κέντρο του δοκιμίου έχει σαν αποτέλεσμα την πιο ακριβή καταγραφή των παραμορφώσεων και κατά συνέπεια τον πιο ακριβή προσδιορισμό του  $M_r$ .



Κατά τη δοκιμή έμμεσο εφελκυσμού κυλινδρικό δοκίμιο ασφαλτομίγματος υπόκειται σε διαμετρικά επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Το μέγεθος των τάσεων που εφαρμόζονται κυμαίνεται σε ένα εύρος 10 έως 50% της αντοχής του δοκιμίου σε έμμεσο εφελκυσμό. Θλιπτικό φορτίο ημιτονοειδούς μορφής εφαρμόζεται κάθετα στη διάμετρο του δοκιμίου και καταγράφεται η προκύπτουσα ανακτώμενη παραμόρφωση. Ο συνήθης χρόνος φόρτισης του δοκιμίου είναι 0.1 sec και ακολουθείται από 0.9 sec χρόνου ηρεμίας (Σχήμα 2.9, 2.10). Μετά από 100 κύκλους φόρτισης, εφαρμόζονται άλλοι 5 και ο μέσος όρος των τιμών αυτών των κύκλων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $M_r$ .



Σχήμα 2.9 Ημιτονοειδής φόρτιση δοκιμής έμμεσο εφελκυσμού (NCHRP 1-28A 2004)



Σχήμα 2.10 Γράφημα φορτίου και παραμόρφωσης δοκιμής έμμεσο εφελκυσμού

Στη συνέχεια το δοκίμιο περιστρέφεται κατά 90° και ακολουθείται η ίδια διαδικασία φόρτισης. Η τιμή του  $M_r$  προκύπτει από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των δύο διαμέτρων.

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

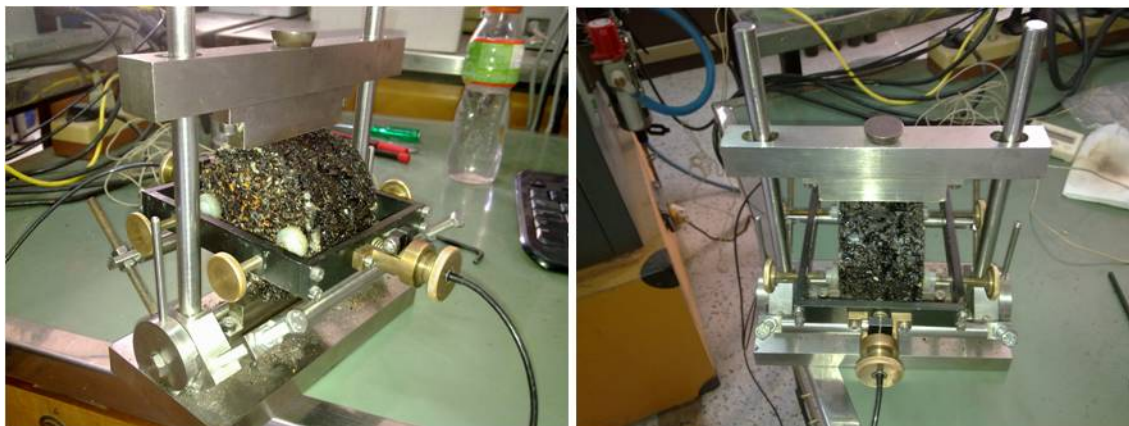
#### **2.3.3.1 Ορισμός**

Το μέτρο δυσκαμψίας έμμεσου εφελκυσμού (Indirect Tensile Stiffness Modulus – ITSM) συνδέεται με τη δοκιμή που περιγράφεται στα ευρωπαϊκά πρότυπα EN (EN 12697-26: Bituminous Mixtures - Test-methods for Hot Mix Asphalt – Part 26: Stiffness – Annex C). Πρόκειται για μια έκφραση του μέτρου δυσκαμψίας ενός δοκιμίου ασφαλτομίγματος που προκύπτει από τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Παρόλο που χρησιμοποιείται η ίδια δοκιμή όπως και στον προσδιορισμό του  $M_r$  κάποιες διαφοροποιήσεις στα επιμέρους στάδια της δοκιμής καθιστούν τα δύο αυτά μέτρα δυσκαμψίας διαφορετικά. Το ITSM είναι πολύ διαδεδομένο κυρίως σε ευρωπαϊκές χώρες. Βασική διαφορά με το  $M_r$  αποτελεί το γεγονός ότι ενώ το  $M_r$  υπολογίζεται με λαμβάνοντας υπόψη την ανακτώμενη παραμόρφωση, το ITSM προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη προκαλούμενη παραμόρφωση υπό την επίδραση του φορτίου (Nunn 1996). Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του ITSM περιγράφεται ακολούθως.

#### **2.3.3.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού**

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

Συγκεκριμένος αριθμός κύκλων φόρτισης εφαρμόζεται κατά την κάθετη διάμετρο του δοκιμίου έτσι ώστε η μέγιστη παροδική οριζόντια παραμόρφωση που θα προκύψει να είναι ίση με 50με. Η φόρτιση είναι ημιτονοειδούς μορφής με διαστήματα ηρεμίας. Ο χρόνος ανόδου (rise time), ο οποίος είναι ο χρόνος από την έναρξη επιβολής του φορτίου μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή, είναι συνήθως 124ms. Η καταγραφή των οριζόντιων παραμορφώσεων πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων LVDTs οι οποίοι προσαρτώνται σε κατάλληλο πλαίσιο που τοποθετείται στην οριζόντια διάμετρο του δοκιμίου (Σχήμα 2.11).



**Σχήμα 2.11 Τοποθέτηση αισθητήρων LVTDs σε δοκίμιο ασφαλτομίγματος για τον προσδιορισμό του ITSM με τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού**

Η δοκιμή περιλαμβάνει αρχικά 10 κύκλους δοκιμαστικής φόρτισης έτσι ώστε να γίνουν οι κατάλληλες προσαρμογές στα χαρακτηριστικά της φόρτισης (rise time, οριζόντια παραμόρφωση). Ακολουθούν 5 κύκλοι φόρτισης από τους οποίους προσδιορίζεται τελικά η τιμή του ITSM. Στη συνέχεια το δοκίμιο περιστρέφεται κατά 90° και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Η τελική τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ITSM προκύπτει από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των μετρήσεων κατά μήκος των δύο αυτών διαμέτρων.

Στην περίπτωση της δοκιμής για τον προσδιορισμό του ITSM η παραμόρφωση είναι ελεγχόμενη υπό την έννοια ότι το μέγεθος του φορτίου προσαρμόζεται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη παραμόρφωση, ενώ στον προσδιορισμό του  $M_r$  το ελεγχόμενο μέγεθος είναι η τάση. Οι διαφοροποιήσεις και οι ομοιότητες στον τρόπο προσδιορισμού των δύο αυτών μέτρων δυσκαμψίας έχουν καταγραφεί από τους Brown & Cooper (1993) οι οποίοι είναι ανάμεσα στους πρώτους ερευνητές που συνέβαλαν στην ανάπτυξη των προδιαγραφών της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού με ελεγχόμενη παραμόρφωση. Το δε μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από την υπόψη πειραματική διάταξη θεωρείται ότι είναι το ελαστικό μέτρο δυσκαμψίας (Santagata & Bassani 1999). Η θεώρηση αυτή μπορεί να υποστηριχθεί δεδομένου ότι κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του ITSM δε λαμβάνεται υπόψη η ανακτώμενη παραμόρφωση αλλά η μέγιστη. Επομένως, δεν θα ήταν εννοιολογικά σωστό το μέτρο αυτό δυσκαμψίας να θεωρηθεί ως μέτρο επανατακτικότητας (resilient). Ωστόσο, το μέγεθος της ελεγχόμενης παραμόρφωσης είναι μικρό και ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου είναι μικρότερος από 150 $\mu$ s και επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί βάσιμη η υπόθεση ότι το μέγεθος της παραμένουσας παραμόρφωσης είναι αμελητέο, ειδικά στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία ελέγχου είναι μικρότερη από 20°C. Επομένως, η μέγιστη παραμόρφωση εκφράζει την ανακτώμενη παραμόρφωση. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, το μέτρο δυσκαμψίας ITSM όπως

αυτό περιγράφεται στα ευρωπαϊκά πρότυπα μπορεί κατά προσέγγιση να ερμηνευτεί σαν ένας τύπος μέτρου επανατακτικότητας υπό διαμετρική θλίψη, ενώ παράλληλα τονίζεται ότι η διαδικασία της ελεγχόμενης τάσης (τυπική στην περίπτωση προσδιορισμού του  $M_f$ ), είναι αυτή που χρησιμοποιείται ευρύτερα.

### **2.3.4 Διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας $G^*$ (Shear dynamic modulus)**

#### **2.3.4.1 Ορισμός**

Το διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος ορίζεται ως η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας σε διάτμηση:

$$|G^*| = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \quad (2.3)$$

Όπου  $|G^*|$  το διατμητικό δυναμικό μέτρο,  $\tau_o$  η μέγιστη διατμητική τάση και  $\gamma_o$  η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Το  $|G^*|$  αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό και το φανταστικό. Το πραγματικό μέρος  $G'$  εκφράζει τη συνιστώσα του ελαστικού μέτρου ενώ το φανταστικό  $G''$  τη συνιστώσα του ιξώδους μέτρου.

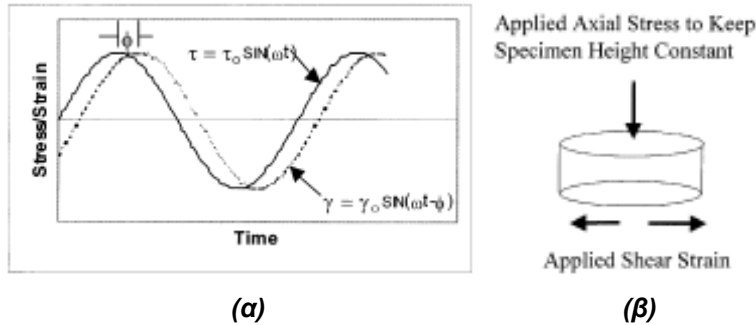
Η πειραματική διάταξη για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του  $|G^*|$  αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ελέγχου κάποιων χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής για τον προσδιορισμό του  $|G^*|$  συνδέονται κυρίως με τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε παραμένουσες παραμορφώσεις.

#### **2.3.4.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής διάτμησης**

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $|G^*|$  περιγράφεται στο πρότυπο AASHTO TP7-94 (Standard Test Method for Determining the Permanent Deformation and Fatigue Cracking Characteristics of Hot Mix Asphalt [HMA] Using the Simple Shear Test [SST] Device) και συνοψίζεται στα παρακάτω.

Η δοκιμή διάτμησης σταθερού ύψους είναι μια δοκιμή ελεγχόμενης παραμόρφωσης καθώς η μέγιστη τιμή της διατμητικής παραμόρφωσης περιορίζεται στα 100 microstrains. Κατά τη δοκιμή, επιβάλλεται οριζόντια διατμητική παραμόρφωση με συχνότητα από 10 έως 0.01 Hz μέσω μιας

ημιτονοειδούς μορφής καταπόνησης. Παράλληλα, το ύψος του δοκιμίου παραμένει σταθερό συμπιέζοντας ή έλκοντας το δοκίμιο αξονικά ανάλογα με τις ενδείξεις των αισθητήρων LVDT που είναι προσκολλημένοι στο δοκίμιο. Το δοκίμιο φορτίζεται διατμητικά από τη βάση του (Σχήμα 2.12). Το κυλινδρικό δοκίμιο ελέγχου με διαστάσεις 150mm διάμετρο και 50mm ύψος προσκολλάται σε δύο πλάκες αλουμινίου.



**Σχήμα 2.12 Δοκιμή δυναμικού μέτρου σε διάτμηση (α) σχηματική απεικόνιση της μορφής της φόρτισης (β) φόρτιση του δοκιμίου**

Σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO TP7-94 η δοκιμή πραγματοποιείται στους 4, 20 και 40 °C. Η λειτουργία της ελεγχόμενης παραμόρφωσης καθιστά δύσκολη την πραγματοποίηση της δοκιμής σε υψηλές θερμοκρασίες ιδιαίτερα στην περίπτωση πολύ μαλακών μιγμάτων.

### 2.3.5 Σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας (Complex modulus)

#### 2.3.5.1 Ορισμός

Όσον αφορά στα ιξωδοελαστικά υλικά, όπως είναι το ασφαλτόμιγμα, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης υπό την επίδραση συνεχούς ημιτονοειδούς φόρτισης καθορίζεται από το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας,  $E^*$  (complex stiffness) (Pellinen & Witczak 2002b). Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας ορίζεται ως ο λόγος του εύρους της ημιτονοειδούς τάσης που επιβάλλεται  $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$  προς το εύρος της ημιτονοειδούς παραμόρφωσης  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi)$ :

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}} \quad (2.4)$$

Μαθηματικά η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας ορίζεται ως το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $|E^*|$ ) σύμφωνα με τη Σχέση 2.5 όπου  $\sigma_0$  είναι η μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης τάσης και  $\varepsilon_0$  η μέγιστη τιμή της προκαλούμενης ανακτώμενης παραμόρφωσης.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

Η γωνία υστέρησης εκφράζει τη διαφορά φάσης στην εμφάνιση της μέγιστης παραμόρφωσης από τη στιγμή επιβολής της μέγιστης τάσης και αποτελεί μια ένδειξη των ιξώδων (ή ελαστικών ιδιοτήτων) του υλικού. Μαθηματικά η γωνία υστέρησης εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\phi = \omega t \quad (2.6)$$

όπου  $t$  το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ ενός κύκλου τάσης και παραμόρφωσης και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα (rad/s).

Χάριν συντομίας και απλοποίησης το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας εΐθισται να συμβολΐζεται με  $E^*$ , το οποίο υιοθετείται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Προκειμένου για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο, το δοκΐμιο ασφαλτομίγματος ελέγχεται σε πλήθος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης με σκοπό την ανάπτυξη μιας κεντρικής καμπύλης (master curve), η οποία αναπαριστά τη δυσκαμψΐας του ασφαλτομίγματος για οποιοδήποτε θερμοκρασία και χρόνο φόρτισης. Επομένως, το  $E^*$  περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος δηλαδή την εξάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Σύμφωνα με έρευνες (Dongré et al. 2005) η χρήση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψΐας στο πλαίσιο του σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη και ακριβέστερη προσαρμογή των μοντέλων πρόβλεψης της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης καθώς και των μοντέλων πρόβλεψης των παραμενουσών παραμορφώσεων (τροχοαυλάκωση) για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Εκτενής αναφορά για το δυναμικό μέτρο δυσκαμψΐας παραγματοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

Οι εργαστηριακές διατάξεις για τον προσδιορισμό του  $E^*$  ποικΐλουν και σαν αποτέλεσμα διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία και το μέγεθος του δοκΐμιου, τον τρόπο επιβολής του φορτίου και τη διάταξη της δοκΐμης. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικότερες πειραματικές διατάξεις οι οποίες αξιοποιούνται στο πλαίσιο του προσδιορισμού του  $E^*$  στο εργαστήριο.

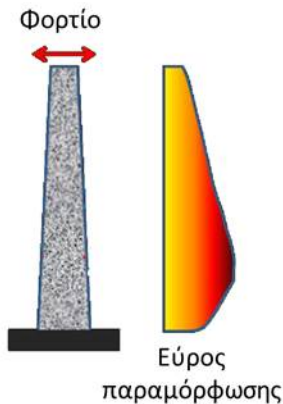
#### 2.3.5.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκΐμης κάμψης

Οι δοκΐμες κάμψης αποτελούν τις πιο ευρέως διαδεδομένες και χρησιμοποιούμενες πειραματικές διατάξεις για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψΐας του ασφαλτομίγματος (Maggiore et al. 2012). Η πρώτη πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε είναι της κάμψης δύο σημείων (2 point bending test) σε τραπεζοειδή δοκΐμια, ενώ εξέλιξη αυτής αποτελεί η δοκΐμη

κάμψης τριών σημείων (3 point bending) και τεσσάρων σημείων (4 point bending) (Di Benedetto et al. 2001).

Η δοκιμή κάμψης 2 σημείων σε τραπεζοειδές δοκίμιο η οποία περιγράφεται στα Ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 12697-26:2004) περιλαμβάνει την επιβολή ημιτονοειδούς φορτίου σε δοκίμιο το οποίο τοποθετείται σαν κάθετη πρόβολος (Molenaar 2007). Η βάση είναι σταθερή και η κορυφή κινείται με ημιτονοειδή μορφή με ένα σταθερό εύρος μετατόπισης. Το τραπεζοειδές σχήμα του δοκιμίου εξασφαλίζει ότι οι μέγιστες τιμές της καμπτικής τάσης και παραμόρφωσης αναπτύσσονται σε απόσταση από τα άκρα του δοκιμίου όπου αναμένεται συγκέντρωση τάσεων (Σχήμα 2.13).

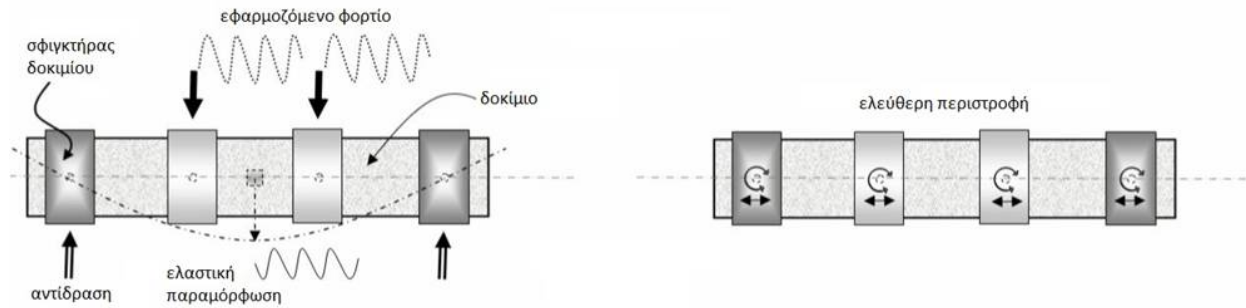
Το μέγεθος του φορτίου που εφαρμόζεται είναι τέτοιο ώστε η προκαλούμενη παραμόρφωση να είναι μικρότερη ή ίση από 50 microns στο σημείο εκείνο όπου αναπτύσσεται η μεγαλύτερη καταπόνηση, ώστε να αντιστοιχεί στο εύρος των ελαστικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος. Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα (EN 12697-26:2004) η δοκιμή πραγματοποιείται σε τουλάχιστον τέσσερις θερμοκρασίες και για κάθε θερμοκρασία σε τρεις τουλάχιστον συχνότητες, προκειμένου για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης. Σε αντίθετη περίπτωση το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας μπορεί να προσδιοριστεί στην επιθυμητή θερμοκρασία και συχνότητα.



**Σχήμα 2.13 Δοκιμή κάμψης 2 σημείων**

Οι δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων (3 point bending και 4 point bending) (Myre 1992, Pronk 1996) είναι μεταγενέστερες και χρησιμοποιούνται επίσης για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (Σχήμα 2.14). Δοκίμιο πρισματικής γεωμετρίας υπόκειται σε κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων με ελεύθερη περιστροφή σε όλα τα σημεία φόρτισης και αντίδρασης. Η κάμψη πραγματοποιείται μέσω της κίνησης του κεντρικού (ή των κεντρικών)

σημείου εφαρμογής του φορτίου σε κατακόρυφη διεύθυνση κάθετα στο διαμήκη άξονα του δοκιμίου. Οι κάθετες θέσεις των δύο ακραίων σημείων παραμένουν σταθερές. Η εφαρμοζόμενη περιοδική μετατόπιση είναι συμμετρική γύρω από το μηδέν, ημιτονοειδούς μορφής και το εύρος της μετατόπισης είναι σταθερό συναρτήσει του χρόνου.

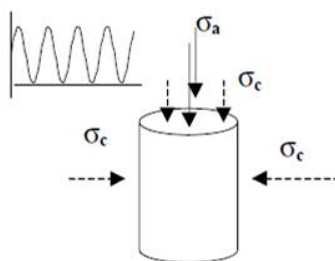


**Σχήμα 2.14 Φόρτιση δοκιμίου κατά τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων**

Κατά τη δοκιμή καταγράφεται η δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου καθώς επίσης και η γωνία υστέρησης μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

### 2.3.5.3 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέσω δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Η εξέλιξη των εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό του  $E^*$  οδήγησε στην ανάπτυξη νέων προδιαγραφών όπως αυτή του ASTM D3497-79 (2003) "Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures". Σύμφωνα με την υπόψη προδιαγραφή επιβάλλεται θλιπτική τάση ημιτονοειδούς μορφής σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο ασφαλτομίγματος (Σχήμα 2.15) σε τρεις θερμοκρασίες (5, 25 και 40°C) και τρεις συχνότητες (1, 4, 16 Hz). Ο χρόνος επιβολής του ημιτονοειδούς φορτίου κυμαίνεται από 30 έως 45 δευτερόλεπτα. Το  $E^*$  προκύπτει από το λόγο της αξονικής τάσης προς την ανακτώμενη αξονική παραμόρφωση.



**Σχήμα 2.15 Αξονική θλιπτική φόρτιση**

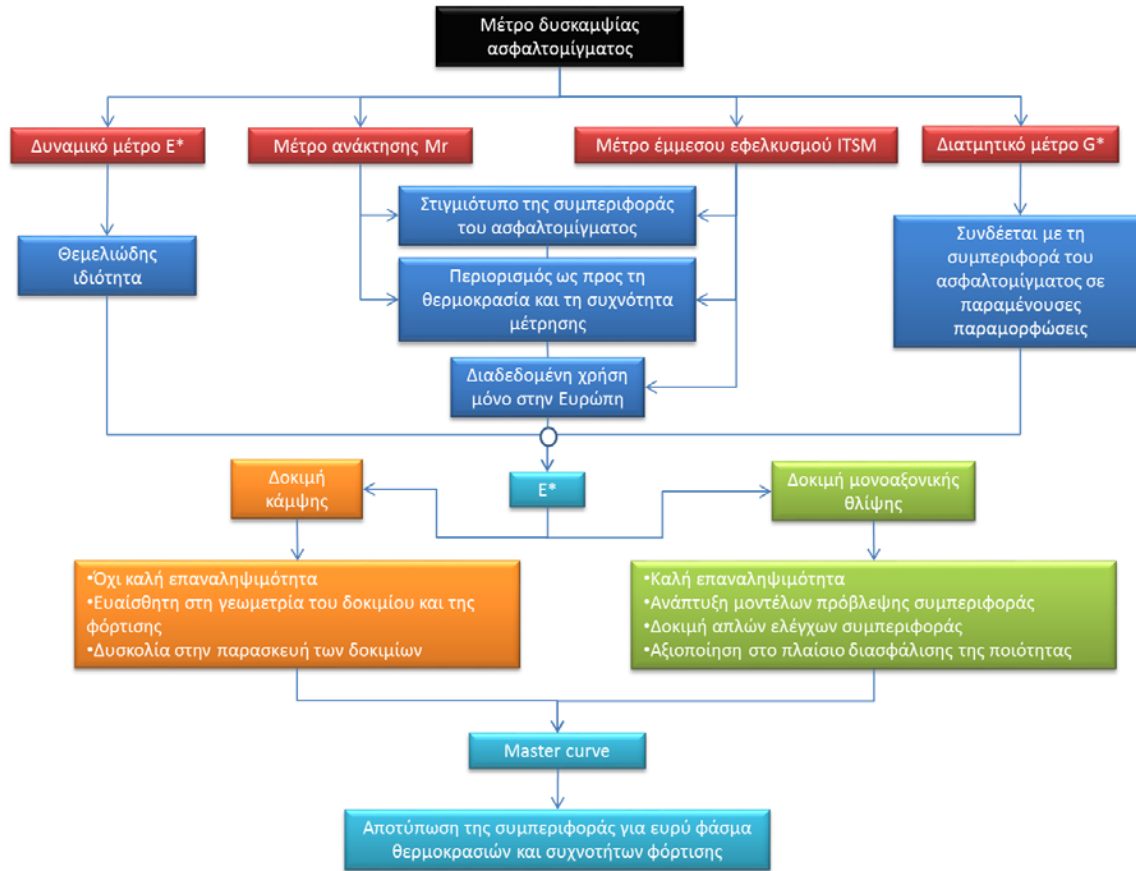


Η πλέον ευρέως διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό του  $E^*$  προδιαγράφεται στο πρότυπο AASHTO T 342-11 "Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)". Σε κυλινδρικό δοκίμιο επιβάλλεται θλιπτική τάση ημιτονοειδούς μορφής σε δεδομένες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Πέντε θερμοκρασίες (-10, 4, 21, 37 και 54°C) και έξι συχνότητες (25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz) προδιαγράφονται για τη δοκιμή. Αισθητήρες καταγραφής των παραμορφώσεων (LVDT) προσαρτώνται στο δοκίμιο κατ' ελάχιστο σε δύο θέσεις και καταγράφουν την αξονική παραμόρφωση από την οποία υπολογίζεται η ανακτώμενη παραμόρφωση. Το  $E^*$  μέσω της παραπάνω διάταξης προσδιορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης προς τη μέγιστη τιμή της ανακτώμενης παραμόρφωσης. Παράλληλα, προσδιορίζεται και η γωνία υστέρησης.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό η δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*$  είναι ελεγχόμενης τάσης όπου το μέγεθος του επιβαλλόμενου ημιτονοειδούς μορφής φορτίο προσαρμόζεται έτσι ώστε η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου να είναι μεταξύ 50 και 150 microstrain ( $\mu\epsilon$ ). Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει την εκτέλεση της δοκιμής μέσα στα πλαίσια της γραμμικής ιξωδοελαστικής ζώνης (Underwood et al. 2011).

## **2.4 Διερεύνηση για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας**

Στον Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται μια σύνοψη των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω. Το  $M_r$  είναι ένα μέτρο δυσκαμψίας ιδιαίτερα διαδεδομένο στην Αμερική, ενώ μια παραλλαγή αυτού που είναι το ITSM χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη. Το κοινό των δύο αυτών μέτρων δυσκαμψίας είναι ότι η δυνατότητα αξιοποίησή τους για τον χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος, ο οποίος ορίζεται ως το σύνολο των διαδικασιών για τον προσδιορισμό και την ανάλυση της απόκρισης του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση φορτίου σε πλήθος συχνοτήτων και θερμοκρασιών, είναι περιορισμένη. Μέσω των σχετικών εργαστηριακών δοκιμών αποτυπώνεται μόνο ένα στιγμιότυπο της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος, που αντιστοιχεί σε περιορισμένο εύρος συνθηκών φόρτισης.



**Σχήμα 2.16** Διερεύνηση για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας

Το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας,  $G^*$ , περιγράφει την απόκριση του ασφαλτομίγματος υπό την επίδραση φορτίου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και επομένως παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της δοκιμής για τον προσδιορισμό του  $G^*$  συνδέονται κυρίως με την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων.

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας,  $E^*$ , αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του ασφαλτομίγματος καθώς μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης των στοιχείων του  $E^*$  σε διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης, είναι δυνατή η περιγραφή της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος.

Οι πιο διαδεδομένες εργαστηριακές πειραματικές διατάξεις για τον προσδιορισμό του  $E^*$  είναι η δοκιμή κάμψης (2, 3 ή 4 σημείων) και η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, τα αποτελέσματα των οποίων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα. Η δοκιμή κάμψης, παρόλο που χρησιμοποιείται ευρέως, παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα που σχετίζονται με την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων, την ευαισθησία αυτών στη γεωμετρία των δοκιμίων και τη φόρτιση και τη

δυσκολία παρασκευής των δοκιμίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ερευνών (NCHRP 2005, NCHRP 2003, NCHRP 2002), αντικείμενο των οποίων ήταν η ανάπτυξη νέων προδιαγραφών για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο συμπεριλαμβανομένης και της παρασκευής των δοκιμίων, προτάθηκε η δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης. Επίσης, συστήνεται τα δοκίμια ελέγχου να προέρχονται από δοκίμια διαμέτρου 150mm, συμπυκνωμένα με τη γυροσκοπική μέθοδο, από τα οποία αποσπάται ο κεντρικός πυρήνας διαμέτρου 100mm και στη συνέχεια κόβονται οι άκρες των δοκιμίων για την επίτευξη του τελικού ύψους των 150mm. Από πολυάριθμες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του  $E^*$  προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ελάχιστη τιμή του λόγου του ύψους προς τη διάμετρο του δοκιμίου συστήνεται να είναι 1.5 ώστε να εξασφαλίζεται ότι η απόκριση του δοκιμίου αντιπροσωπεύει μια θεμελιώδη μηχανική ιδιότητα
- Ελάχιστη διάμετρος 100 mm συστήνεται για όλα τα δοκίμια ασφαλτομίγματος με μέγιστο κόκκο αδρανών 37.5 mm
- Λείες και παράλληλες βάσεις του δοκιμίου συστήνονται για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της κάμψης και της τριβής στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή.
- Η διακύμανση στις τιμές του  $E^*$  είναι μικρότερη όταν τα δοκίμια ελέγχου είναι διαμέτρου 100 mm συγκριτικά με αυτά που έχουν διάμετρο 150 mm. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο βαθμό ανομοιογένειας των κενών αέρα των μεγαλύτερων σε διάμετρο δοκιμίων.

Τα συμπερασματικά σχόλια καθιστούν το  $E^*$  που προσδιορίζεται με βάση την υπόψη πειραματική διάταξη, απαραίτητη και βασική παράμετρο για την ανάλυση στο πλαίσιο μηχανιστικών μεθόδων διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στο χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος μέσω του  $E^*$ .

## **2.5 Το μέτρο δυσκαμψίας στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων**

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος αποτελεί κυρίαρχο θέμα που απασχολεί τον ενασχολούμενο με τα οδοστρώματα οδοποιό μηχανικό.

Όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα η διαστασιολόγηση είναι άμεσα συνυφασμένη με τον προσδιορισμό των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και τη σύνθεση των μιγμάτων της κάθε στρώσης. Οι μέθοδοι διαστασιολόγησης κατηγοριοποιούνται σε εμπειρικές και μηχανιστικές. Συνήθως οι μηχανιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν και κάποιες εμπειρικές θεωρήσεις και επομένως ονομάζονται μηχανιστικές-εμπειρικές μέθοδοι.

Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται στα αποτελέσματα πειραμάτων ή εμπειρικών παρατηρήσεων. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού (όπως τα αξονικά φορτία, τα υλικά και οι περιβαλλοντικές συνθήκες) και της αστοχίας του οδοστρώματος, προέρχεται μέσω εμπειρίας, πειραμάτων ή συνδυασμό και των δύο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει ο οδηγός διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων *Guide for the Design of Pavement Structures* που αναπτύχθηκε το 1993 από τον οργανισμό AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Σε αυτό τον οδηγό, λαμβάνεται σαν παράμετρος σχεδιασμού το  $M_r$  (AASHTO 1993). Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D4123 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures". Το  $M_r$  σχετίζεται με το δομικό συντελεστή των ασφαλικών στρώσεων μέσω του οποίου προσδιορίζεται τελικά το πάχος τους. Σύμφωνα με έρευνες (Coree & White 1990) η προσέγγιση αυτή δεν είναι κατάλληλη για τις διαδικασίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων. Οι συντελεστές αυτοί δεν εξαρτώνται μόνο από το μέτρο ελαστικότητας της κάθε στρώσης, αλλά από το πάχος και τα μηχανικά χαρακτηριστικά όλων των στρώσεων (Baladi & Thomas 1994). Κατά το Οδικό Πείραμα AASHTO ο δομικός συντελεστής των ασφαλικών στρώσεων θεωρήθηκε ίσος με 0.44 που αντιστοιχεί σε τιμή του  $M_r$  ίση με 3100 MPa.

Βασικό μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι η μειωμένη αξιοπιστία τους όταν πρόκειται να εφαρμοστούν σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές που θεωρήθηκαν κατά την ανάπτυξή τους. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στη μέθοδο AASHTO 1993 η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη και ακολουθείται μέχρι και σήμερα, οι περιορισμοί που τίθενται αφορούν στα υλικά, στις κλιματολογικές συνθήκες και στα φορτία της κυκλοφορίας (Bayomi et al. 2012). Επιπλέον, το οδικό πείραμα στο οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη της μεθόδου διήρκησε μόλις δύο χρόνια, ενώ η περίοδος υπολογισμού ενός οδοστρώματος είναι συνήθως πάνω από δέκα χρόνια. Οι περιορισμοί αυτοί αποτέλεσαν το κίνητρο για την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων μεθόδων διαστασιολόγησης που να βασίζονται σε μηχανιστικές αρχές.

Με τον όρο μηχανιστικές αναφέρονται εκείνες οι μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στην ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα υπό την επίδραση της κυκλοφορίας και των περιβαλλοντικών συνθηκών, μέσω της θεωρίας των επάλληλων ελαστικών στρώσεων. Οι τάσεις και παραμορφώσεις αποτελούν παράμετρο σε μια συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), όπως αυτή της κόπωσης του ασφαλτομίγματος, που επιτρέπει τον υπολογισμό του αριθμού των επαναλήψεων που μπορεί να εφαρμοστεί μια εφελκυστική τάση προτού επέλθει η αστοχία. Αυτό το μέρος αποτελεί το εμπειρικό σκέλος υπό την έννοια ότι παρόλο που αυτές οι συναρτήσεις συνήθως βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές, οι περισσότερες από αυτές προσδιορίζουν τις ιδιότητες του δοκιμίου και όχι του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά του υλικού που προσδιορίζονται από τις εργαστηριακές δοκιμές είναι άμεσα εξαρτώμενα από τη γεωμετρία του δοκιμίου καθώς και από τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Λόγω αυτού καθώς και του ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των συνθηκών φόρτισης που επιβάλλονται στο εργαστήριο και που επικρατούν επιτόπου στο οδόστρωμα, η συνάρτηση μεταφοράς όπως προσδιορίζεται στο εργαστήριο δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας για τον υπολογισμό των επαναλήψεων του φορτίου μέχρι την αστοχία σε ένα πραγματικό οδόστρωμα. Επομένως, θα πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλοι συντελεστές (shift factors) οι οποίοι συνήθως βασίζονται στη σχέση της προβλεπόμενης συμπεριφοράς και της παρατηρούμενης. Οι συντελεστές αυτοί δεν έχουν καθολική εφαρμογή και εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες και τον τύπο του οδοστρώματος. Η εμπειρική γνώση είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της τιμής των συντελεστών και την επιτυχή χρήση αυτών. Τα παραπάνω, συνθέτουν την έννοια των μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων.

Στην κατηγορία αυτή ανήκει ο οδηγός διαστασιολόγησης της Shell ο οποίος συνοδεύεται από το αντίστοιχο λογισμικό πρόγραμμα SPDM. Απαραίτητη παράμετρο για τον υπολογισμό των τάσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας αποτελεί το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Ο προσδιορισμός του βασίζεται σε αποτελέσματα ερευνών των Bonnaure et al. (1977), οι οποίοι ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο εκτίμησης του μέτρου δυσκαμψίας μέσω των ογκομετρικών χαρακτηριστικών του μίγματος και της δυσκαμψίας της ασφάλτου. Για την ανάπτυξη του υπόψη αλγόριθμου, περισσότερες πληροφορίες για τον οποίο δίνονται σε επόμενο εδάφιο, αξιοποιήθηκαν εργαστηριακά δεδομένα τα οποία αφορούσαν στο δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος όπως αυτό προσδιορίζεται από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων. Δίνεται επίσης η δυνατότητα εισαγωγής της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Σε κάθε περίπτωση η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας που εισάγεται αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς (η οποία υπολογίζεται με βάση τις

εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες) και σε συγκεκριμένη συχνότητα φόρτισης (ανάλογα με τη θεωρούμενη ταχύτητα κίνησης των οχημάτων). Ο προσδιορισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας γίνεται μέσω της θεωρίας πολλαπλών επάλληλων ελαστικών στρώσεων. Ο προσδιορισμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων γίνεται μέσω του νόμου κόπωσης του ασφαλτομίγματος η μαθηματική έκφραση του οποίου παρουσιάζεται στη Σχέση 2.7.

$$N_f = A_f (0.0252PI - 0.00126PI(V_b) + 0.00673V_b - 0.0167)^5 \varepsilon_t^{-5} E^{-1.4} \quad (2.7)$$

όπου  $A_f$  ο συντελεστής προσαρμογής μεταξύ εργαστηρίου και επιτόπου (shift factor),  $PI$  ο δείκτης διεισδυτικότητας της ασφάλτου,  $V_b$  το ποσοστό της ασφάλτου,  $\varepsilon_t$  η εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και  $E$  το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

Παρόμοιος μεθοδολογικά είναι ο οδηγός διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων French Design Manual for Pavement Structures (SETRA 1995) που αναπτύχθηκε από το LCPC. Ο χαρακτηρισμός του ασφαλτομίγματος γίνεται μέσω του  $E^*$  που προκύπτει από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων. Ο νόμος κόπωσης που αναπτύχθηκε βασίζεται σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων (Σχέση 2.8), ενώ μέσω κατάλληλου συντελεστή πραγματοποιείται προσαρμογή των αποτελεσμάτων για να είναι σύμφωνα με την παρατηρούμενη συμπεριφορά πειραματικών οδοστρωμάτων (Accelerated Pavement Testing).

$$N_f = \varepsilon_6 \times \left( \frac{E_{10^\circ C, 10Hz}}{E_{\theta_{eq}^\circ C, 10Hz}} \right)^{0.5} \times k_r \times k_c \times k_s \times \frac{1}{\varepsilon_r} \quad (2.8)$$

Όπου  $\varepsilon_6$  το μέγεθος της τάσης που εφαρμόστηκε κατά τη δοκιμή κόπωσης έτσι ώστε να προκύψουν  $10^6$  επαναλήψεις φορτίσεων σε θερμοκρασία  $10^\circ C$  και συχνότητα  $25Hz$  (με βάση τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων τραπεζοειδούς δοκιμίου),  $E_{10^\circ C, 10Hz}$  το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος σε θερμοκρασία  $10^\circ C$  και συχνότητα όπως προκύπτει από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων,  $E_{\theta_{eq}^\circ C, 10Hz}$  το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στη θερμοκρασία σχεδιασμού και συχνότητα  $10Hz$  όπως προκύπτει από τη δοκιμή κάμψης δύο σημείων,  $k_r$  συντελεστής που σχετίζεται με το επίπεδο αξιοπιστίας,  $k_c$  συντελεστής προσαρμογής των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου με την παρατηρούμενη συμπεριφορά επιτόπου,  $k_s$  μειωτικός συντελεστής ώστε να ληφθούν υπόψη τυχόν ανομοιογενής περιοχές ως προς τη

φέρουσα ικανότητα των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα και  $\epsilon_r$  η εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων.

Στις προαναφερθείσες μεθόδους, τα στοιχεία της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος δεν αξιοποιούνται πλήρως, υπό την έννοια ότι στο σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη μόνο μία τιμή του  $E^*$  που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη θερμοκρασία αναφοράς και συχνότητα.

Αντιθέτως, σύμφωνα με το νέο οδηγό διαστασιολόγησης AASHTO (MEPDG), απαραίτητη παράμετρο σχεδιασμού δεν αποτελεί μόνο μια τιμή του  $E^*$  αλλά η κεντρική καμπύλη (master curve) του  $E^*$ , μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος (AASHTO 2008). Δεδομένου, αφενός μεν ότι κατά την αναλυτική διαδικασία η απόκριση του οδοστρώματος υπολογίζεται σε μηνιαία βάση λαμβάνοντας υπόψη λεπτομερή κλιματολογικά στοιχεία και αφετέρου δε, ότι η φόρτιση λόγω κυκλοφορίας θεωρείται δυναμική, δηλαδή ο χρόνος φόρτισης είναι συναρτήσεως του βάθους, διαφαίνεται η ανάγκη προσδιορισμού του  $E^*$  για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Ο νόμος κόπωσης του ασφαλτομίγματος, βασίζεται σε πλήθος εργαστηριακών πειραματικών δεδομένων και έχει βαθμονομηθεί σύμφωνα με την παρατηρούμενη συμπεριφορά ενός μεγάλου δικτύου οδοστρωμάτων μακράς διάρκειας (Long Term Pavement Performance: LTPP).

$$N_{f-HMA} = 0.00432k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_r)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA}^*)^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (2.9)$$

όπου  $N_{f-HMA}$  ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων αξόνων,  $\epsilon_r$  η εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (in./in.),  $E_{HMA}^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (psi) που προκύπτει από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης,  $k_{f1}$ ,  $k_{f2}$ ,  $k_{f3}$  παγκόσμιοι παράμετροι βαθμονόμησης πεδίου ( $k_{f1}=1$ ,  $k_{f2}=-3.9492$ ,  $k_{f3}=-1.281$ ),  $\beta_{f1}$ ,  $\beta_{f2}$ ,  $\beta_{f3}$  συντελεστές βαθμονόμησης εκάστοτε μίγματος ή τοπικών συνθηκών (για παγκόσμια προσαρμογή λαμβάνεται τιμή ίση με τη μονάδα),  $C$  συντελεστής προσαρμογής πάχους και  $C_H$  συντελεστής προσαρμογής ασφαλτομίγματος.

Βασική καινοτομία της υπόψη μεθόδου είναι η συσχέτιση του δείκτη φθοράς, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο των αναμενόμενων διελεύσεων προς τις επιτρεπόμενες, με την παρατηρούμενη στο οδόστρωμα φθορά μέσω του δείκτη συμπεριφοράς (performance index). Επομένως, ο δείκτης φθοράς παύει να λειτουργεί σαν μια αριθμητική τιμή, η οποία θα πρέπει να διατηρείται μικρότερη της μονάδας για να μην επέλθει αστοχία στο οδόστρωμα, και συνδέεται μέσω

συναρτήσεων μεταφοράς με την εμφάνιση και το επίπεδο της πραγματικής φθοράς που αναμένεται να εμφανιστεί στο οδόστρωμα. Όσον αφορά στις ασφαλτικές στρώσεις, ο δείκτης φθοράς συνδέεται, εκτός άλλων, με το ποσοστό της επιφάνειας της λωρίδας σχεδιασμού όπου εμφανίζονται ρηγματώσεις λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος το οποίο και αποτελεί το δείκτη συμπεριφοράς.

Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι το  $E^*$  που προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σχετίζεται ικανοποιητικά με την παρατηρούμενη συμπεριφορά του οδοστρώματος επιτόπου και ως εκ τούτου αξιοποιείται στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος αλλά και του οδοστρώματος (Witczak 2005). Επίσης, κατά την υπόψη δοκιμή η τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης συνιστάται να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα έτσι ώστε το  $E^*$  που προσδιορίζεται να είναι εντός του εύρους της γραμμικής ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Κατά συνέπεια, το  $E^*$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν παράμετρος σε υπολογιστικά προγράμματα επάλληλων ελαστικών στρώσεων για τον υπολογισμό της απόκρισης του οδοστρώματος (NCHRP 2002, Baus & Stires 2010).

Σημείο σύγκλισης των παραπάνω μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων αποτελεί η εισαγωγή του  $E^*$  του ασφαλτομίγματος σαν βασική παράμετρο στον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στο οδόστρωμα, καθώς και στους νόμους κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων. Στη νέα μέθοδο διαστασιολόγησης AASHTO (MEPDG) το  $E^*$  αξιοποιείται περαιτέρω, καθώς σχετίζεται και με το δείκτη συμπεριφοράς της κόπωσης του ασφαλτομίγματος.

Οι νόμοι κόπωσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την πειραματική διάταξη που αξιοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του  $E^*$ . Επομένως κατόπιν της επιλογής της εκάστοτε μεθόδου, προκειμένου για την ανάλυση της κόπωσης (fatigue analysis) θα πρέπει να ακολουθούνται οι βασικές αρχές και διαδικασίες στις οποίες βασίζεται.

Η νέα μέθοδος AASHTO αποτελεί σήμερα διεθνώς την προμετωπίδα του εξελιγμένου αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων. Αναγνωρίζοντας την υπεροχή της, οι αρμόδιες υπηρεσίες έχουν στρέψει την προσοχή τους στην ολοκλήρωση των απαραίτητων ενεργειών για την υιοθέτηση και εφαρμογή της (Bayomi et al. 2012, Mohammad et al. 2014, Baus & Stires 2010, Jamrah 2013, Darter et al. 2009).



Δεδομένων των παραπάνω, διαφαίνεται ότι το  $E^*$  και πιο συγκεκριμένα, η κεντρική καμπύλη (master curve) των τιμών του  $E^*$ , αποτελεί απαραίτητη παράμετρο για τον αναλυτικό υπολογισμό οδοστρωμάτων μέσω της εκτίμησης της συμπεριφοράς σε κόπωση του ασφαλτομίγματος της ασφατικής βάσης και κατ' επέκταση ως προς τη διακύβευση της αστοχίας σε ρηγμάτωση του οδοστρώματος.

### 3 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

#### 3.1 Ορισμός

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, περιγράφεται από το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας που είναι ένας μιγαδικός αριθμός, ο οποίος προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης, υπό επαναλαμβανόμενη ημιτονοειδή φόρτιση (Schwartz 2005). Το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας αποτελείται από δύο μέρη, το πραγματικό μέρος,  $E'$ , που αναπαριστά την ελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και το φανταστικό μέρος,  $E''$ , που περιγράφει την εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang 2004). Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά φάσης μεταξύ της επιβαλλόμενης φόρτισης και της προκύπτουσας παραμόρφωσης, γνωστή ως γωνία υστέρησης.

$$E^* = E' + iE'' \quad (3.1)$$

$$E' = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \times \cos \phi \quad (3.2)$$

$$E'' = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \times \sin \phi \quad (3.3)$$

όπου  $E^*$  το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας,  $\sigma_o$  η μέγιστη τάση,  $\epsilon_o$  η μέγιστη παραμόρφωση,  $\phi$  η γωνία υστέρησης (μοίρες),  $i$  το φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού.

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

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \times \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \times \sin \phi\right)^2} = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \quad (3.4)$$

όπου  $|E^*|$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας,  $\sigma_o$  η μέγιστη τάση,  $\epsilon_o$  η μέγιστη παραμόρφωση,  $\phi$  η γωνία υστέρησης (μοίρες).

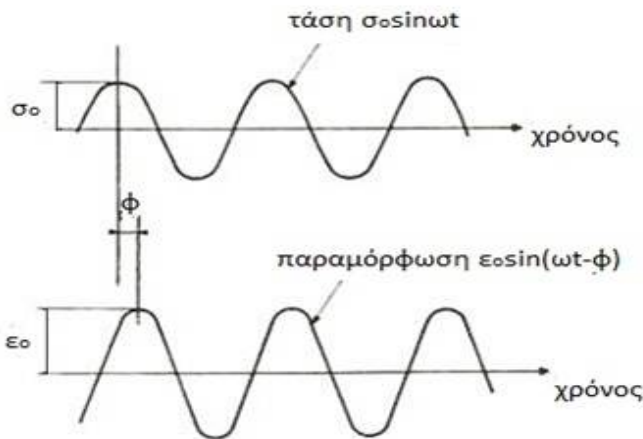
Για λόγους απλοποίησης, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είθισται να συμβολίζεται ως  $E^*$  (αντί για  $|E^*|$ ).

Η γωνία υστέρησης εκφράζει την καθυστέρηση της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης που προκαλείται σε σχέση με τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση (Σχήμα 3.1) (Huang 2004). Η καθυστέρηση φάσης απεικονίζει τη χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος. Λόγω της σχέσης χρόνου- συχνότητας, προκύπτει ότι το ασφαλτόμιγμα εξαρτάται επίσης από τη συχνότητα φόρτισης. Η ημιτονοειδής τάση που ασκείται για ένα δεδομένο χρόνο  $t$  και γωνιακή συχνότητα  $\omega$ , περιγράφεται από τη σχέση  $\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$ , ενώ η ημιτονοειδής παραμόρφωση που προκαλείται περιγράφεται από τη σχέση  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi)$ . Επομένως, η τάση και η παραμόρφωση, είναι συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας, όπου η τελευταία είναι συνάρτηση της συχνότητας φόρτισης.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.5)$$

$$t = \frac{1}{f} \quad (3.6)$$

όπου  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα (rad/sec),  $f$  η συχνότητα φόρτισης (Hz),  $t$  ο χρόνος φόρτισης (sec).



**Σχήμα 3.1 Σχέση τάσης-παραμόρφωσης ασφαλτομίγματος υπό ημιτονοειδείς συνθήκες φόρτισης**

Η γωνία υστέρησης αποτελεί δείκτη της ιξώδους ή της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Για καθαρώς ελαστικά υλικά, η γωνία υστέρησης είναι ίση με μηδέν μοίρες ( $\phi = 0^\circ$ ), δηλαδή δεν

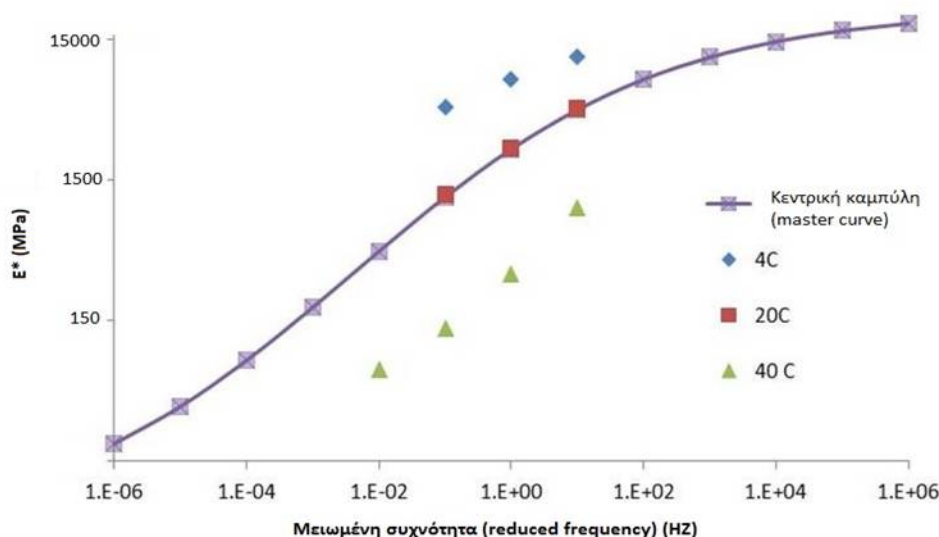
υπάρχει διαφορά μεταξύ της επιβολής της μέγιστης τάσης και της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης. Για καθαρώς ιξώδη υλικά, η γωνία υστέρησης είναι ίση με ενενήντα μοίρες ( $\varphi=90^\circ$ ), δηλαδή υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης, όπου η παραμόρφωση υστερεί της τάσης κατά  $90^\circ$ .

### 3.2 Κεντρική καμπύλη (Master curve)

Προκειμένου για τον πλήρη χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος είναι απαραίτητη η κατασκευή μιας κεντρικής καμπύλης (master curve), η οποία περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του υλικού συναρτήσει τόσο της θερμοκρασίας όσο και της συχνότητας.

#### 3.2.1 Παράγοντες μετατόπισης

Τα δεδομένα των δοκιμών που έχουν προκύψει για διάφορες θερμοκρασίες "μετατοπίζονται" σε σχέση με το χρόνο φόρτισης ή τη συχνότητα, έτσι ώστε οι διάφορες καμπύλες να ευθυγραμμιστούν για να σχηματιστεί μια ενιαία καμπύλη (Σχήμα 3.2), η κεντρική καμπύλη (Pellinen & Witczak 2002a).



**Σχήμα 3.2 Κεντρική καμπύλη (master curve) δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας**

Ο παράγοντας μετατόπισης  $a(T)$  καθορίζει την απαιτούμενη μετατόπιση σε δεδομένη θερμοκρασία, δηλαδή μια σταθερά με την οποία θα πρέπει να διαιρεθεί ο χρόνος φόρτισης ώστε να προκύψει ο μειωμένος χρόνος (reduced time) της κεντρικής καμπύλης (Σχέση 3.7). Αντίστοιχα, στο πεδίο συχνοτήτων η συχνότητα θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον

παράγοντα μετατόπισης  $a(T)$  για να προκύψει η μειωμένη συχνότητα (reduced frequency) (Σχέση 3.8).

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \quad (3.7)$$

$$f_r = a(T) \times f \quad (3.8)$$

όπου  $t_r$  ο μειωμένος χρόνος,  $t$  ο χρόνος φόρτισης,  $f_r$  η μειωμένη συχνότητα,  $f$  η συχνότητα φόρτισης και  $a(T)$  ο παράγοντας μετατόπισης.

Η κεντρική καμπύλη κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας μια θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$  η οποία επιλέγεται αυθαίρετα και στην οποία μετατοπίζονται όλα τα δεδομένα συλλογής. 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. 2003).

Το πλεονέκτημα της παραπάνω διαδικασίας είναι ότι εφόσον έχει κατασκευαστεί η κεντρική καμπύλη, είναι δυνατή η άντληση τιμών από παρεμβολή του  $E^*$  για οποιοδήποτε συνδυασμό θερμοκρασίας και συχνότητας (ή χρόνου) φόρτισης στο εύρος των τιμών που καλύπτεται από τις μετρήσεις. Επιπλέον, καθίσταται εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από διαφορετικά εργαστήρια με διαφορετικές συνθήκες φόρτισης όσον αφορά στη θερμοκρασία και στη συχνότητα.

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 (Witczak & Bari 2004):

$$\log a(T) = aT_i^2 + bT_i + c \quad (3.9)$$

όπου  $a(T_i)$  ο παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T_i$ ,  $T_i$  η εκάστοτε θερμοκρασία (σε βαθμούς Fahrenheit),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  οι συντελεστές δευτεροβάθμιας εξίσωσης.

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 μηδενίζεται στη θερμοκρασία αναφοράς.

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

- από την εξίσωση του Arrhenius (Medani & Huurman, 2003):

$$\log a(T) = C \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (3.10)$$

όπου  $T$  η πειραματική θερμοκρασία (K),  $T_{ref}$ : η θερμοκρασία αναφοράς,  $C$  σταθερά (K).

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες ενδεικτικές τιμές της σταθεράς  $C$

- $C = 10920$  K (Francken & Clauwaert 1988)
- $C = 13060$  K (Lytton et al. 1993)
- $C = 7680$  K (Jacobs 1995)
- από την εξίσωση των Williams–Landel–Ferry, ή εν συντομία WLF εξίσωση (Σχέση 3.11) (Williams et al. 1995):

$$\log a(T) = - \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (3.11)$$

όπου  $T$  η πειραματική θερμοκρασία (K),  $T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς (K),  $C_1$ ,  $C_2$ : αδιάστατες εμπειρικές σταθερές, με ενδεικτικές τιμές όπως στον παρακάτω πίνακα.

Σύμφωνα με τον Sayegh (1967) η τιμές των σταθερών είναι  $C_1 = 9.5$  και  $C_2 = 95$ , ενώ οι Lytton et al. (1993) προτείνουν τιμές ίσες με  $C_1 = 19$  και  $C_2 = 92$ .

### 3.2.2 Σιγμοειδής συνάρτηση

Σύμφωνα με αποτέλεσμα ερευνών (Pellinen et al. 2002, Pellinen 2001, Pellinen & Witczak 2002a, Witczak & Fonseca 1996) αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης μέσω μιας πειραματικής τεχνικής μετατόπισης χρησιμοποιώντας τη

σιγμοειδή συνάρτηση. Μέσω της πειραματικής μετατόπισης επιλύονται ταυτόχρονα οι συντελεστές μετατόπισης και οι συντελεστές της σιγμοειδούς συνάρτησης.

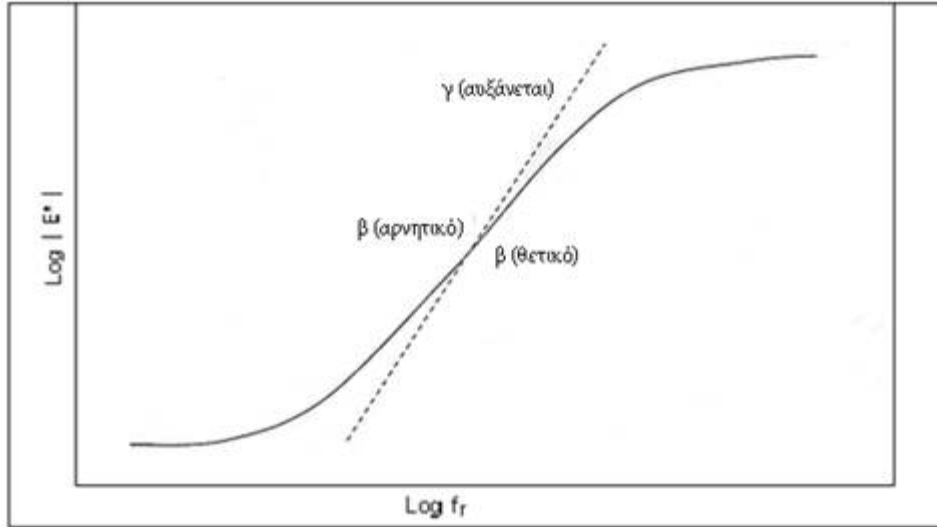
Σύμφωνα με προγενέστερες έρευνες, πολυωνυμικές συναρτήσεις είχαν αξιοποιηθεί για τη μετατόπιση των στοιχείων συλλογής του  $E^*$  χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της τμηματικής προσαρμογής των δεδομένων. Ωστόσο, μία μοναδική πολυωνυμική συνάρτηση δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή όλης της κεντρικής καμπύλης καθώς σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες προκύπτουν ανορθολογικές τιμές του μέτρου δυσκαμψίας όταν γίνεται προέκταση εκτός του εύρους των μετρημένων τιμών. Προς αποφυγή αυτής της περιοριστικής συνθήκης επιλέχθηκε η σιγμοειδής συνάρτηση (Σχέση 3.12) για την προσαρμογή των μετρημένων τιμών του  $E^*$  σε μια ενιαία καμπύλη.

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(f_r)}} \quad (3.12)$$

όπου  $E^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας,  $\delta$  η ελάχιστη τιμή του λογάριθμου του  $E^*$ ,  $\delta + \alpha$  η μέγιστη τιμή του λογάριθμου του  $E^*$ ,  $\beta, \gamma$  παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της σιγμοειδούς καμπύλης,  $f_r$  η μειωμένη συχνότητα.

Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς συνάρτησης για την ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας βασίζεται σε φυσικές παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Το άνω άκρο της καμπύλης προσεγγίζει ασυμπτωτικά τη μέγιστη τιμή του  $E^*$  του ασφαλτομίγματος, η οποία εξαρτάται από το άνω όριο της δυσκαμψίας της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες (glassy modulus). Σε υψηλές θερμοκρασίες, υπό τη θλιπτική φόρτιση η επίδραση των αδρανών είναι κυρίαρχη σε σχέση με αυτή της ασφάλτου με αποτέλεσμα το μέτρο δυσκαμψίας να πλησιάζει μια οριακή τιμή ισορροπίας (equilibrium value), η οποία εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Επομένως, η σιγμοειδής συνάρτηση περιγράφει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος που παρατηρείται κατά τη δοκιμή υποβολής του σε θλιπτική φόρτιση για όλο το εύρος των θερμοκρασιών.

Η παράμετρος  $\gamma$  επηρεάζει την κλίση της συνάρτησης (δηλαδή τον ρυθμό μεταβολής μεταξύ ελάχιστων και μέγιστων τιμών), και η παράμετρος  $\beta$  επηρεάζει την οριζόντια θέση του σημείου καμπής (Lundy et al. 2005). Γραφικά, η λειτουργία των παραμέτρων φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



**Σχήμα 3.3** Μορφή σιγμοειδούς καμπύλης

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. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων της σιγμοειδούς συνάρτησης. Οι συντελεστές της Σχέσης 3.9 επιλύονται ταυτόχρονα με τις παραμέτρους της σιγμοειδούς καμπύλης (Σχέση 3.12) κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

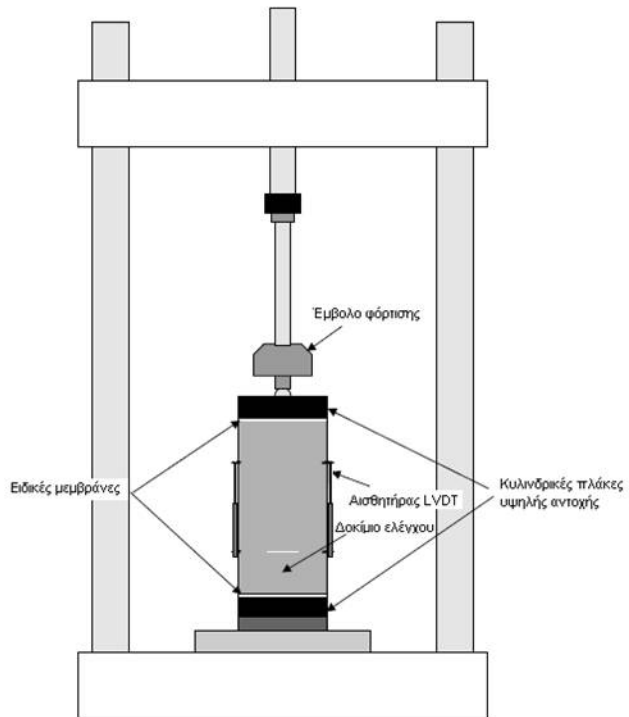
### 3.3 Εργαστηριακός προσδιορισμός $E^*$

#### 3.3.1 Εργαστηριακή συσκευή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η πιο διαδεδομένη εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*$  είναι αυτή της δοκιμής θλίψης όπως προδιαγράφεται στο πρότυπο AASHTO T342-11 "Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)". Η δοκιμή βασίζεται στην επιβολή ελεγχόμενης θλιπτικής φόρτισης ημιτονοειδούς μορφής, με εύρος συχνοτήτων από 0.1 έως 25 Hz και επίπεδα τάσης μέχρι 2800 kPa. Απαιτείται ένας περιβαλλοντικός θάλαμος για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του δοκιμίου, ο οποίος θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ελέγχει και να κρατάει σταθερή τη θερμοκρασία του δοκιμίου για ένα εύρος τιμών θερμοκρασίας από -10 έως 60°C με ακρίβεια  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Το σύστημα μέτρησης είναι πλήρως ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή και ικανό να μετράει και να καταγράφει το ιστορικό επιβολής του φορτίου και των αξονικών παραμορφώσεων. Οι αξονικές παραμορφώσεις μετρώνται από κατάλληλους αισθητήρες (LVDT) οι οποίοι προσαρτώνται σε ειδικά μεταλλικά στηρίγματα που είναι κολλημένα στο δοκίμιο (Σχήμα 3.4). Οι παραμορφώσεις



μετρώνται σε δύο θέσεις με 180 μοίρες απόσταση, σε τρεις θέσεις με 120 μοίρες απόσταση ή σε τέσσερις θέσεις με 90 μοίρες απόσταση. Η διάταξη με τη μέτρηση των παραμορφώσεων σε τέσσερα σημεία πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων διατάξεων καθώς σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου LVDT, αυτό και το απέναντι μπορούν να εξαιρεθούν και να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα των άλλων δύο αντιδιαμετρικών LVDT.



**Σχήμα 3.4 Σκαριφηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης (Dougan et al. 2003)**

Πλάκες φόρτισης είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν πάνω και κάτω από το δοκίμιο για τη μεταφορά του φορτίου από τη συσκευή στο δοκίμιο. Επίσης, μεταξύ των πλακών φόρτισης και του δοκιμίου τοποθετούνται ειδικές μεμβράνες για την ελαχιστοποίηση της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής (Σχήμα 3.4).

### **3.3.2 Προετοιμασία δοκιμών**

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*$  πραγματοποιείται σε δοκίμια τα οποία έχουν συμπυκνωθεί με τη μέθοδο της γυροσκοπικής συμπίκνωσης (gyratory compactor). Οι διαστάσεις των δοκιμών που προκύπτουν από τη γυροσκοπική συμπίκνωση είναι διαμέτρου 150 mm και ύψους 170 mm και πρέπει να περιέχουν το επιθυμητό ποσοστό κενών. Ωστόσο, για τη δοκιμή του  $E^*$  το απαιτούμενο ύψος του δοκιμίου είναι 150 mm και η διάμετρος 100 mm. Επομένως, κατόπιν της συμπίκνωσης του δοκιμίου πραγματοποιείται πυρηνοληψία από το

μέσο του δοκιμίου της γυροσκοπικής συμπύκνωσης και στη συνέχεια κοπή των άκρων του ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις. Στη συνέχεια προσδιορίζεται το ποσοστό κενών του δοκιμίου το οποίο δεν θα πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 0.5% από το επιθυμητό ποσοστό κενών.

Το πλήθος των δοκιμών του εκάστοτε μίγματος που θα πρέπει να παρασκευαστούν εξαρτάται από τον αριθμό των LVDTs και από την επιθυμητή ακρίβεια του μέσου όρου του  $E^*$ . Συστήνεται ο έλεγχος τριών δοκιμών, ανεξάρτητα από τον αριθμό των LVDTs, προκειμένου να επιτευχθεί το όριο ακρίβειας (μικρότερο από  $\pm 15\%$  της πραγματικής τιμής του  $E^*$ ).

### **3.3.3 Εργαστηριακή διαδικασία**

Για την ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ , πραγματοποιούνται μετρήσεις σε θερμοκρασίες 14, 40, 70, 100 και 130°F (-10, 4, 20, 37 και 54°C) και σε συχνότητες φόρτισης 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz για κάθε θερμοκρασία. Για κάθε δοκίμιο προσδιορίζεται το  $E^*$  για τους παραπάνω 30 συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης ξεκινώντας από τη χαμηλότερη θερμοκρασία προς τη μεγαλύτερη. Για δεδομένη θερμοκρασία η δοκιμή ξεκινάει από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη συχνότητα.

Το δοκίμιο τοποθετείται στον περιβαλλοντικό θάλαμο και παραμένει μέχρι να αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας του δοκιμίου πραγματοποιείται μέσω ενός δοκιμίου ελέγχου που βρίσκεται στο θάλαμο και στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται ειδικό θερμομόμετρο με σκοπό την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας στο μέσο του δοκιμίου.

Στη συνέχεια τοποθετείται η κάτω μεταλλική πλάκα, η ειδική μεμβράνη, το δοκίμιο, η ειδική μεμβράνη στο πάνω μέρος του δοκιμίου και η πάνω μεταλλική πλάκα. Προσαρτώνται τα LVDTs τα οποία βαθμονομούνται κατάλληλα προκειμένου να επιτρέπεται η καταγραφή του εύρους της παραμόρφωσης. Το δοκίμιο με τις μεταλλικές βάσεις, τις μεμβράνες και τα LVDTs ευθυγραμμίζεται έτσι ώστε το έμβολο που επιβάλλει το φορτίο να βρίσκεται στο κέντρο του δοκιμίου.

Το μέγεθος επιβολής του φορτίου προσαρμόζεται ανάλογα με τη θερμοκρασία ελέγχου ικανοποιώντας την απαίτηση το εύρος της αξονικής παραμόρφωσης να είναι από 50 έως 150 microstrain. Το μέγεθος του επιβαλλόμενου δυναμικού φορτίου εξαρτάται από τη δυσκαμψία του δοκιμίου και γενικά κυμαίνεται από 15 έως 2800 kPa. Μεγαλύτερο φορτίο απαιτείται σε

χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τυπικές τιμές του φορτίου ανάλογα με τη θερμοκρασία.

**Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές επιβαλλόμενου φορτίου**

Θερμοκρασία (°C)	Εύρος φορτίου (kPa)
-10	1400 - 2800
4	700 - 1400
20	350 - 700
37	140 - 250
54	35 - 70

Κατά την έναρξη της δοκιμής σε κάθε θερμοκρασία πραγματοποιείται προφόρτιση του δοκιμίου με συχνότητα 25 Hz και 200 κύκλους φόρτισης. Ακολουθεί η φόρτιση του δοκιμίου στις προκαθορισμένες συχνότητες σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2 Κύκλοι φόρτισης ανά συχνότητα**

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

Το χρονικό ιστορικό των τάσεων και των παραμορφώσεων καταγράφεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή απ' όπου προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθώς και η γωνία υστέρησης. Η τιμή του  $E^*$  προκύπτει από το μέσο όρο των πέντε τελευταίων κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα.

## 4 Διεθνείς αλγόριθμοι εκτίμησης του $E^*$

### 4.1 Γενικά

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας αποτελεί αρκετά χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό. Παράλληλα, η αναγνώριση της σπουδαιότητας του  $E^*$  καθώς αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του ασφαλτομίγματος και χρησιμοποιείται σαν βασική παράμετρος στο πλαίσιο σχεδιασμού και αξιολόγησης των μιγμάτων, διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων και ανάπτυξης προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και του οδοστρώματος, οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ .

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την Shell Oil Company για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας ενός ασφαλτομίγματος βασίζεται σε εργαστηριακές δοκιμές είκοσι ετών. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το νομογράφημα Shell (Van der Poel 1954) για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας ( $S_m$ ) των ασφαλτομιγμάτων (Bonnaure et al. 1977).

Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στο νομογράφημα είναι η δυσκαμψία της ασφάλτου ( $S_b$ ), το ποσοστό της ασφάλτου κατά όγκο ( $V_b$ ) και το ποσοστό των αδρανών κατά όγκο ( $V_g$ ).

Κατά τη αρχική ανάπτυξη του νομογραφήματος χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή κάμψης 2 σημείων για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Επομένως, το μέτρο δυσκαμψίας το οποίο προκύπτει από το νομογράφημα Shell είναι εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Οι Heukelom & Klomp (1964) ανέπτυξαν την ακόλουθη εξίσωση για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των ερευνών του Van Der Poel.

$$E = S_b \times \left[ (1 + 2,5/n) \times C_v' / (1 - C_v) \right]^n \quad (4.1)$$

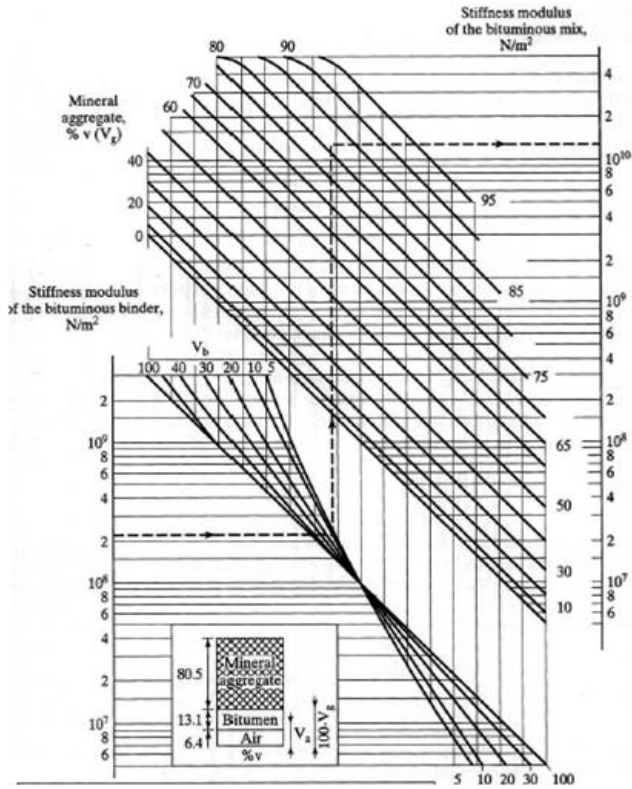
Στην παραπάνω εξίσωση το  $C_v'$  εκφράζει τη συγκέντρωση του όγκου των αδρανών η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$C_v' = C_v / \left[ 0,97 + 0,01(100 - (V_g - V_b)) \right] \quad (4.2)$$

όπου

$$C_v = V_g / (V_g + V_b) \quad (4.3)$$

$$n = 0,83 \times \log(40000 / S_b) \quad (4.4)$$



**Σχήμα 4.1 Νομογράφημα Shell**

Οι Bonnaure et al. (1977) ανέπτυξαν μια σειρά εξισώσεων για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων ( $S_m$ ) λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου ( $S_b$ ), το ποσοστό των αδρανών ( $V_g$ ) και το ποσοστό της ασφάλτου ( $V_b$ ).

$$\log S_m = \frac{\beta_1 + \beta_3}{2} (\log S_b - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} |\log S_b - 8| + \beta_2 \quad (4.5)$$

Για  $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 < S_b < 10^9 \text{ N/m}^2$

$$\log S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2,0959 (\beta_1 - \beta_2 - \beta_4) \log (S_b - 9) \quad (4.6)$$

Για  $10^9 \text{ N/m}^2 < S_b < 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

όπου

$$\beta_1 = 10,82 - \frac{1,342(100 - V_g)}{V_g + V_b} \quad (4.7)$$

$$\beta_2 = 8 + 0,0568V_g + 0,0002135V_g^2 \quad (4.8)$$

$$\beta_3 = 0,6 \log \left( \frac{1,37V_b^2 - 1}{1,33V_b - 1} \right) \quad (4.9)$$

$$\beta_4 = 0,7582(\beta_1 - \beta_2) \quad (4.10)$$

Στηριζόμενοι στην έρευνα και τα αποτελέσματα του Van der Poel ανέπτυξαν επίσης εξισώσεις για την εκτίμηση της γωνίας υστέρησης.

Μεταγενέστερα αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας στους οποίους υπεισέρχονται σαν μεταβλητές η συχνότητα και η θερμοκρασία.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από το 1967 και μετά (Witczak & Fonseca 1996). Στον Πίνακα 4.2 περιλαμβάνονται οι συντελεστές της παλινδρόμησης της κάθε μαθηματικής σχέσης που περιγράφει τον αλγόριθμο, κάποια στατιστικά σχετικά με τη βάση δεδομένων ( $n_m$  είναι ο αριθμός των διαφορετικών ασφαλτομιγμάτων και  $n_t$  ο συνολικός αριθμός των σημείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αλγόριθμου), το  $R^2$  και το τυπικό σφάλμα κάθε αλγόριθμου, τη χρονική περίοδο κατά την οποία αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι και οι ερευνητές οι οποίοι είχαν εμπλοκή στην αντίστοιχη μελέτη. Στον Πίνακα 4.3 δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον ορισμό των μεταβλητών που υπεισέρχονται σε κάθε αλγόριθμο.

**Πίνακας 4.1 Αλγόριθμοι εκτίμησης E\* (1967-1989) (Witczak & Fonseca 1996)**

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

**Πίνακας 4.2 Συντελεστές παλινδρόμησης των εξισώσεων των αλγορίθμων εκτίμησης**

Σταθεροί όροι παλινδρό- μησης	Εξισώσεις αλγορίθμων πρόβλεψης									
	1A α <sub>i</sub>	1B b <sub>i</sub>	1C c <sub>i</sub>	2A d <sub>i</sub>	2B e <sub>i</sub>	3 g <sub>i</sub>	4A h <sub>i</sub>	4B k <sub>i</sub>	5A l <sub>i</sub>	5B m <sub>i</sub>
K <sub>0</sub>	1.5436	2.13197	3.8E+06	0.553833	1.52531	0.553833	1.45716	2.468	2.250053	1.457061
K <sub>1</sub>	0.02108	0.0248722	1.0046	0.028829	-0.03476	0.0288229	-0.0256272	-0.1155	-0.091756	-0.02481
K <sub>2</sub>	-0.031861	-0.034587	-1.45	-0.17033	0.070377	-0.17033	0.0127921	-0.0299	-0.027949	0.012597
K <sub>3</sub>	0.068142	-9.02594		-0.03476	-0.0001	-0.03476	0.0627099	-0.0975	-0.096881	0.060764
K <sub>4</sub>	-0.00127	0.19		0.070377	1.79825	0.070377	-0.0083735	-0.00963	0.250094	-0.0081771
K <sub>5</sub>	0.4	-0.9		0.000005	0.5	0.931757	0.147306	0.359	-0.006447	0.146439
K <sub>6</sub>	1.4			1.3		-0.02774	0.00001932	-0.00815	0.060612	0.00001844
K <sub>7</sub>				0.49825		0.000005	-0.00002541	0.066	-0.00007404	-0.00002559
K <sub>8</sub>				0.5		1.3	8	-0.0000618	0.00191539	8
K <sub>9</sub>				-0.00189		0.49825	0.5	0.0025	0.0082813	0.5
K <sub>10</sub>				-1.1		-0.00189	-0.0001492	0.0083	-0.0010225	-0.0001522
K <sub>11</sub>				0.931757		-1.1	0.005918	-0.00164	0.0001909	0.005006
K <sub>12</sub>				-0.2774		4		0.000308	-0.0801155	
K <sub>13</sub>						0.5		0.000204	0.0148592	
K <sub>14</sub>								-0.105	-0.0024159	
K <sub>15</sub>								0.0171	0.00094015	
K <sub>16</sub>								-0.00268	0.00084534	
K <sub>17</sub>								0.00167	0.0004965	
K <sub>18</sub>								0.000709	-0.00034328	
K <sub>19</sub>								0.000937	-0.00316297	
K <sub>20</sub>								-0.00069		
K <sub>21</sub>								-0.0031		
n <sub>m</sub>	29	29	29	41	41	131	131	131	149	149
n <sub>t</sub>	87	87	87	369	369	1179	1179	1179	1429	1429
R <sup>2</sup>	0.968	0.971		0.969	0.939	0.877	0.934	0.95	0.949	0.937
S <sub>e</sub>	0.0889	0.0849		0.0887	0.1525	0.15	0.122	0.103	0.107	0.118
Χρονική περίοδος	1967/69	1967/69	1970/72	1977/78	1979/80	1982/83	1983/84	1983/84	1985/89	1985/89
Ερευνητές	Shook Kallas	Shook Kallas	Witczak	Witczak Shook	Witczak	Witczak Miller Uzan	Witczak Akhter	Witczak Akhter	Witczak Leahy Caves Uzan	Witczak Leahy Caves Uzan



**Πίνακας 4.3 Ορισμοί των μεταβλητών των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$**

Μεταβλητή	Ορισμός
$\eta_{70:10}^6$	Ιξώδες της ασφάλτου στους 70°F (21°C) σε 10 <sup>6</sup> poise
$\eta_t$	Ιξώδες της ασφάλτου σε θερμοκρασία t σε poise
$t_p$	Θερμοκρασία δοκιμής σε βαθμούς Fahrenheit
f	Συχνότητα φόρτισης σε Hz
$V_a$	Ποσοστό κενών αέρα του μίγματος
$V_{beff}$	Ενεργό ποσοστό ασφάλτου κατά όγκο
$V_{beffopt}$	Ενεργό βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου, κατά όγκο
$\rho_{abs}$	Ποσοστό απορρόφησης της ασφάλτου
$\rho_{ac}$	Ποσοστό ασφάλτου (κατά βάρος του μίγματος)
$\rho_{opt}$	Βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου (κατά βάρος του μίγματος)
$\rho_{3/4}$	Ποσοστό αδρανών (του συνολικού βάρους των αδρανών) που συγκρατείται στο κόσκινο 3/8"
$\rho_{3/8}$	Ποσοστό αδρανών (του συνολικού βάρους των αδρανών) που συγκρατείται στο κόσκινο 3/4"
$\rho_4$	Ποσοστό αδρανών (του συνολικού βάρους των αδρανών) που συγκρατείται στο κόσκινο No.4
$\rho_{200}$	Ποσοστό αδρανών (του συνολικού βάρους των αδρανών) που διέρχεται από κόσκινο No.200

Κατά τη χρονική περίοδο 1967-1972 αναπτύχθηκαν οι πρώτοι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  (1A, 1B, 1C) από τους Shook & Kallas (1967). Για την ανάπτυξή τους χρησιμοποιήθηκαν 29 διαφορετικά μίγματα και μία συχνότητα φόρτισης (4 Hz). Αρκετά χρόνια αργότερα, ο Witzczak επεξεργάστηκε ξανά τα δεδομένα και εισήγαγε τον παράγοντα της συχνότητας.

Κατά την περίοδο 1977-1980, η βάση δεδομένων επεκτάθηκε και περιελάμβανε 41 μίγματα, σε καθένα από τα οποία προσδιορίστηκε το  $E^*$  για συγκεκριμένη θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι 2A και 2B. Βασικές διαφορές από τους αρχικούς αλγορίθμους αποτελούν η εισαγωγή του ιξώδους για τον χαρακτηρισμό της δυσκαμψίας της ασφάλτου και η επιλογή του ενεργού ποσοστού της περιεχόμενης ασφάλτου αντί του ποσοστού ασφάλτου.

Κατά την περίοδο 1982-1983, η βάση δεδομένων επεκτάθηκε από 41 σε 131 μίγματα. Τα μίγματα προήλθαν από μία έρευνα του πανεπιστημίου του Maryland και αποτελούνταν από αδρανή υλικά που περιείχαν χαλίκια, σκωρία και άμμο. Με βάση τα αρχικά αποτελέσματα η εξίσωση 2A είχε εξαιρετική προσαρμογή για τα μίγματα από θρυμματισμένη πέτρα, σε αντίθεση

με τα υπόλοιπα μίγματα. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης και ανάπτυξης του αλγορίθμου 3.

Κατά την περίοδο 1983-1984, πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς στατιστικές μελέτες με την υπάρχουσα βάση δεδομένων με σκοπό να βελτιωθεί η ακρίβεια του αλγορίθμου εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, μείζονος σημασίας και σπουδαιότητας ήταν η ενσωμάτωση μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφαλτομίγματος, όπως φαίνεται στους αλγορίθμους 4A και 4B.

Κατά την περίοδο 1985-1989, προστέθηκαν ακόμα περισσότερα μίγματα από τη συνεχή έρευνα του πανεπιστημίου του Maryland, δημιουργώντας μια βάση δεδομένων 149 μιγμάτων και 1429 σημείων. Από τη νέα στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αναπτύχθηκαν οι αλγόριθμοι 5A και 5B.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος παρόλο που έχουν καλή στατιστική εφαρμογή περιέχουν αρκετούς περιορισμούς. Ο πρώτος περιορισμός έγκειται στο γεγονός ότι η βάση δεδομένων περιορίζεται σε ασφαλτομίγματα με κοινή άσφαλο. Η απόκριση των τροποποιημένων ασφαλικών υλικών δεν περιλαμβάνεται στα όρια της υπάρχουσας βάσης δεδομένων και ως εκ τούτου θα πρέπει να αποφεύγεται η άνευ διακρίσεων εφαρμογή των υπόψη αλγορίθμων σε μίγματα που περιέχουν τροποποιημένη άσφαλο.

Ο δεύτερος περιορισμός των παραπάνω αλγορίθμων αφορά στο ότι η πρόβλεψη του  $E^*$  είναι εφικτή για μίγματα που υποθέεται ότι η συμπεριφορά του εργαστηριακά συμπυκνωμένου δοκιμίου προσεγγίζει αυτή κατά τη διάστρωση του ασφαλτομίγματος (συνθήκες βραχυπρόθεσμης γήρανσης). Όλα τα παραπάνω μοντέλα βασίζονται είτε στο δείκτη εισόδου στους 25 °C είτε στο ιξώδες στους 20 °C της αρχικής ασφάλτου με σκοπό να περιγράψουν τη σκληρότητά της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην είναι έγκυρη η διαδικασία εισαγωγής των αποτελεσμάτων των δοκιμών της εισόδου και του ιξώδους στους αλγορίθμους για πυρήνες οδοστρώματος όπου η άσφαλος έχει κάποιο βαθμό γήρανσης. Κατά συνέπεια οι παραπάνω αλγόριθμοι δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόβλεψη του  $E^*$  μιγμάτων στα οποία έχει επιδράσει ο παράγοντας της γήρανσης.

Τέλος, ο τρίτος περιορισμός αφορά στις κλασσικές στατιστικές αρχές σχετικά με την προέκταση των παραμέτρων εκτός του εύρους τιμών που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου. Όλα τα μοντέλα περιγράφονται από συνάρτηση πολυωνυμικής μορφής η οποία

αναπτύχθηκε από συμβατική πολυπαραμετρική ανάλυση παλινδρόμησης. Επιπλέον, όλα τα στοιχεία συλλογής έχουν προκύψει από δοκιμές σε ένα εύρος θερμοκρασίας από 5 έως 40°C. Σαν συνέπεια, όταν πραγματοποιείται πρόβλεψη του  $E^*$  για θερμοκρασίες αρκετά μεγαλύτερες ή μικρότερες από το εύρος αυτό, προκύπτουν μη ρεαλιστικές μεγάλες ή μικρές τιμές λόγω της μορφής της πολυωνυμικής συνάρτησης.

Οι περιορισμοί που επιβάλλουν οι παραπάνω αλγόριθμοι οδήγησαν στη συνέχιση των ερευνών προς την ανάπτυξη πιο αντιπροσωπευτικών μοντέλων για την εκτίμηση του  $E^*$ . Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  που αναπτύχθηκαν ως προϊόν των περαιτέρω ερευνών και οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται διεθνώς.

#### 4.2 Αλγόριθμος Witczak & Fonseca (1996)

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 ξεκίνησε έρευνα στο Πανεπιστήμιο του Maryland με σκοπό να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που επέβαλλαν οι προγενέστεροι αλγόριθμοι. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην αξιολόγηση της επίδρασης της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης γήρανσης της αρχικής ασφάλτου στο ιξώδες της ασφάλτου. Βασιζόμενοι σε επιτόπου στοιχεία και λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου οι Witczak & Mirza (1992a, 1992b, 1992c) και Mirza (1993) ανέπτυξαν μοντέλα για την περιγραφή της επίδρασης της γήρανσης. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται στο γεγονός ότι για τις περισσότερες ασφάλτους η σχέση μεταξύ του διπλού λογαρίθμου του ιξώδους ( $\log \log \eta$ ), σε μονάδες centipoise, και του λογάριθμου της θερμοκρασίας ( $\log T_R$ ), σε μονάδες Rankine, είναι γραμμικής μορφής και περιγράφεται από τη Σχέση 4.11.

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (4.11)$$

Στη σχέση αυτή, το A και VTS είναι οι σταθερές της παλινδρόμησης οι οποίες αντανακλούν τον συγκεκριμένο τύπο της κάθε ασφάλτου και το επίπεδο γήρανσης.

Αρχικά οι Witczak & Fonseca (1996) διερεύνησαν τη δυνατότητα ανάπτυξης βελτιωμένων μοντέλων πρόβλεψης του  $E^*$  μέσω της κλασσικής γραμμικής πολυπαραμετρικής παλινδρόμησης. Ωστόσο κατέληξαν στη θεώρηση της μη γραμμικής παλινδρόμησης και πιο συγκεκριμένα σε αυτή της σιγμοειδούς καμπύλης ως καταλληλότερη για την περιγραφή της διακύμανσης του  $E^*$  σε σχέση με το ιξώδες της ασφάλτου και τη συχνότητα φόρτισης. Ο αλγόριθμος που τελικά αναπτύχθηκε κατόπιν στατιστικής ανάλυσης περιγράφεται από τη Σχέση 4.12.

$$\log E^* = -0.261 + 0.008225 p_{200} - 0.00000101 (p_{200})^2 + 0.00196 p_4 - 0.03157 V_a - 0.415 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{(1.87 + 0.002808 p_4 + 0.0000404 p_{38} - 0.0001786 (p_{38})^2 + 0.0164 p_{34})}{1 + \exp(-0.716 \log f - 0.7415 \log \eta)} \quad (4.12)$$

όπου  $E^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $10^5$  psi),  $\eta$  το ιξώδες της ασφάλτου ( $10^6$  poise),  $f$  η συχνότητα φόρτισης (Hz),  $V_a$  το ποσοστό των κενών (κατά όγκο),  $V_{beff}$  το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου (κατά όγκο),  $p_{34}$  το ποσοστό των αδρανών που συγκρατείται στο κόσκινο  $\frac{3}{4}$  in,  $p_{38}$  το ποσοστό των αδρανών που συγκρατείται στο κόσκινο  $\frac{3}{8}$  in,  $p_4$  το ποσοστό των αδρανών που συγκρατείται στο κόσκινο No 4,  $p_{200}$  το ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο No 200.

Τα στατιστικά στοιχεία για τον έλεγχο καλής προσαρμογής του αλγορίθμου δίνονται στον Πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4 Στατιστικά ελέγχου καλής προσαρμογής του αλγορίθμου Witczak & Fonseca (1996)**

	Λογαριθμική κλίμακα	Αριθμητική κλίμακα
$R^2$	0.930	0.872
Se	0.12	1552 MPa = $2.25 \times 10^5$ psi
Sy	0.47	4372 MPa = $6.34 \times 10^5$ psi
Se/Sy	0.255	0.355
Μέσο σφάλμα	-0.00	-55 MPa = $-0.08 \times 10^5$ psi

Σαφώς το επιλεγμένο μη γραμμικό μοντέλο παρουσιάζει καλή προσαρμογή. Παρά το γεγονός ότι σε αριθμητική κλίμακα οι τιμές των τυπικών σφαλμάτων είναι σχετικά υψηλές, από την ανάλυση των υπολοίπων προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στις υψηλές μετρημένες τιμές του  $E^*$ , για τις οποίες το μέγεθος του τυπικού σφάλματος μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό. Τέλος, η κατανομή των σφαλμάτων σε λογαριθμική κλίμακα προσεγγίζει ικανοποιητικά την κανονική κατανομή ικανοποιώντας μια βασική υπόθεση της ανάλυσης παλινδρόμησης.

Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος εκτίμησης του  $E^*$  των Witczak & Fonseca (1996) μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης είναι ικανός να παράγει ρεαλιστικές τιμές του  $E^*$  που προκύπτουν για ακραίες τιμές της θερμοκρασίας. Επίσης, η παράμετρος της θερμοκρασίας που υπεισέρχεται στους προγενέστερους αλγορίθμους εκτίμησης του  $E^*$  αντικαταστάθηκε από το ιξώδες της ασφάλτου. Το γεγονός αυτό είναι μείζονος σημασίας καθώς επιτρέπει την εκτίμηση του  $E^*$  των μιγμάτων που έχουν υποστεί οποιοδήποτε επίπεδο γήρανσης της ασφάλτου. Ο υπόψη αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους του τύπους ασφαλτομιγμάτων με κοινή (μη τροποποιημένη) άσφαλο.

### 4.3 Αλγόριθμος Andrei, Witczak & Mirza (1999) (Witczak 1-37A)

Ο αλγόριθμος των Andrei, Witczak & Mirza (1999) (ο οποίος εφεξής θα αναφέρεται ως αλγόριθμος Witczak 1-37A), αναπτύχθηκε το 1999 και αποτελεί επικαιροποίηση του αλγορίθμου των Witczak & Fonseca (1996). Εργαστηριακά δεδομένα του  $E^*$  χρησιμοποιήθηκαν για την επαναβαθμονόμηση του προγενέστερου αλγορίθμου με την προσθήκη διαφόρων χαρακτηριστικών του μίγματος. Επομένως, δημιουργήθηκε μια νέα βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει 56 επιπλέον μίγματα, 34 από τα οποία αποτελούνται από τροποποιημένη άσφαλτο, και ένα σύνολο 1320 νέων σημείων δεδομένων. Παρόλο που η νέα βάση δεδομένων περιλαμβάνει εργαστηριακές τιμές του  $E^*$  μόνο για 5 διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των αδρανών, έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος τιμών του ιξώδους της ασφάλτου, καθώς πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε 20 τύπους ασφάλτου για 5 θερμοκρασίες. Συνδυάζοντας τα στοιχεία της νέας βάσης δεδομένων και αυτής που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του προγενέστερου αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση αυτού. Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A περιγράφεται από τη μαθηματική Σχέση 4.14.

$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + \exp(-0.603313 - 0.313351\log f - 0.393532\log \eta)} \quad (4.13)$$

όπου  $E^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi),  $\eta$  το ιξώδες της ασφάλτου ( $10^6$  poise),  $f$  η συχνότητα φόρτισης (Hz),  $V_a$  το ποσοστό των κενών κατ' όγκο ασφαλτομίγματος (%),  $V_{beff}$  το ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος (%),  $\rho_{34}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 19 mm (%),  $\rho_{38}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 9.5 mm (%),  $\rho_4$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 4.75 mm (%),  $\rho_{200}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο οπής 0.075mm (%).

Το ιξώδες της ασφάλτου προσδιορίζεται από τη Σχέση 4.11, ενώ όπως και στο προγενέστερο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου ώστε να συνεκτιμηθεί η ικανότητα των αδρανών να απορροφούν την άσφαλτο.

Σύμφωνα με τους Andrei et al. (1999) ο αλγόριθμος Witczak 1-37A μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη ακρίβεια για ένα ευρύ φάσμα μιγμάτων κλειστού τύπου και τύπων ασφάλτου

(συμπεριλαμβανομένων των τροποποιημένων). Το ποσοστό των κενών αέρα των μιγμάτων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων κυμαίνονται κατά προσέγγιση από 1.5 έως 16%. Η πλειοψηφία των δοκιμών συμπυκνώθηκε με τη γυροσκοπική μέθοδο.

Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι ίσος με 0.941 και 0.886 σε λογαριθμική και αριθμητική κλίμακα, αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια τις τιμές του  $E^*$  που βρίσκονται στο εύρος τιμών της βάσης δεδομένων, είναι απαραίτητο να καθοριστεί η ικανότητα του να εκτιμά με ακρίβεια το  $E^*$  για μίγματα άλλης κοκκομετρικής διαβάθμισης και τύπου ασφάλτου που δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων, προτού χρησιμοποιηθεί ευρέως. Πλήθος μελετών έχει πραγματοποιηθεί με σκοπό τη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας του αλγορίθμου, με ποικίλα και μερικές φορές αντικρουόμενα αποτελέσματα.

Σύμφωνα με τους Dongre et al. (2005) ο αλγόριθμος Witczak 1-37A υπερεκτιμά το  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων με τιμές δυσκαμψίας μικρότερες από 125.000 psi (860 MPa). Η υπερεκτίμηση των τιμών του  $E^*$  αποδόθηκε σε θέματα που σχετίζονται με της παραμέτρους  $A$  και  $VTS$ . Μεταγενέστερες έρευνες επιβεβαίωσαν την τάση υπερεκτίμησης των τιμών του  $E^*$ . Από τα αποτελέσματα της συγκριτικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για μίγματα της Λουϊζιάνα (Mohammad et al. 2007) προέκυψε ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A γενικά υποεκτιμά τις τιμές του  $E^*$ , με εξαίρεση αυτές που αντιστοιχούν σε υψηλές θερμοκρασίες και/ή χαμηλές συχνότητες. Οι υπόψη τιμές του  $E^*$  οι οποίες είναι χαμηλές, υπερεκτιμούνται και για τα 13 μίγματα που ελέγχθηκαν. Σύμφωνα με τους Azari et al. (2007) η υπερεκτίμηση των τιμών του  $E^*$  παρατηρείται σε όλο το φάσμα τιμών αλλά είναι πιο αισθητή για τιμές του  $E^*$  ίσες ή χαμηλότερες από 3450 MPa. Σε κάποιες περιπτώσεις οι τιμές του  $E^*$  που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A είναι διπλάσιες των μετρημένων ενώ το εύρος του λόγου των εκτιμώμενων προς τις μετρημένες τιμές του  $E^*$  κυμαίνεται από 0.45 έως 1.90 (Flintsch et al. 2008). Για μίγματα τα αδρανή των οποίων είναι γρανιτικά υλικά, ο αλγόριθμος πρόβλεψης είναι συντηρητικός, καθώς οι τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται ελαφρώς (Ping & Xiao 2007). Επίσης, οι προβλεπόμενες τιμές του  $E^*$  για μίγματα με ασβεστολιθικά αδρανή είναι κατά ένα μικρό ποσοστό μεγαλύτερες από τις μετρημένες (Ping & Xiao 2007).

#### 4.4 Αλγόριθμος Hirsch

Ο αλγόριθμος του Hirsch για την εκτίμηση του  $E^*$  βασίζεται στο νόμο των μιγμάτων για σύνθετα υλικά (Christensen et al. 2003). Ο νόμος των μιγμάτων, ο οποίος καλείται μοντέλο Hirsch,

αναπτύχθηκε από τον T.J. Hirsch το 1960 και συνδυάζει τις φάσεις ενός υλικού μέσω της διάταξης των στοιχείων του. Τα στοιχεία ενός υλικού μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι σε σειρά ή εν παραλλήλω. Το μοντέλο του Hirsch επιτρέπει την εκτίμηση ενός χαρακτηριστικού (στην προκειμένη περίπτωση της δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος) ενός σύνθετου υλικού μέσω του αθροίσματος του ίδιου χαρακτηριστικού δύο διαφορετικών φάσεων του υλικού, όπως φαίνεται στις Σχέσεις 4.14-4.15.

$$E_c = v_1 E_1 + v_2 E_2 \quad (4.14)$$

$$1/E_c = v_1 / E_1 + v_2 / E_2 \quad (4.15)$$

όπου  $E_c$  το μέτρο δυσκαμψίας του σύνθετου υλικού,  $v_1$ ,  $v_2$  ο κλασματικός όγκος για δεδομένη φάση,  $E_1$ ,  $E_2$  τα μέτρα δυσκαμψίας σε κάθε φάση.

Εφαρμόζοντας το μοντέλο του Hirsch στο ασφαλτόμιγμα, οι Christensen et al. (2003) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για την εκτίμηση του  $E^*$  μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου ( $G^*$ ) και της ογκομετρικής σύστασης του ασφαλτομίγματος. Η επιλογή του μοντέλου του Hirsch βασίζεται στο γεγονός ότι το ασφαλτόμιγμα σε υψηλές θερμοκρασίες τείνει να συμπεριφέρεται σαν ένα σύνθετο υλικό με τα στοιχεία του σε σειρά, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες σαν ένα σύνθετο υλικό με τα στοιχεία του εν παραλλήλω. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε αφορά σε ένα απλό τριφασικό σύστημα αδρανών, ασφάλτου και ποσοστού κενών αέρα. Η φάση των αδρανών στο εν παραλλήλω τμήμα του αλγορίθμου αντιπροσωπεύει το μέρος των αδρανών που βρίσκονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους και ονομάζεται όγκος επαφής των αδρανών (aggregate contact volume,  $P_c$ ). Η επιρροή της θερμοκρασίας στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος αντιπροσωπεύεται εν μέρει από το συντελεστή  $P_c$ , καθώς υψηλές τιμές του  $P_c$  συνδέονται με μίγματα μεγάλης δυσκαμψίας και αντοχής (περίπτωση χαμηλής θερμοκρασίας), ενώ μικρές τιμές του  $P_c$  συνδέονται με μίγματα χαμηλής δυσκαμψίας και αντοχής (περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας).

Η βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε στο πλαίσιο ανάπτυξης του υπόψη αλγορίθμου αποτελείται από 18 διαφορετικά μίγματα, με 8 τύπους ασφάλτου και 5 διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τον αλγόριθμο του Hirsch για την εκτίμηση του  $E^*$  δίνεται στη Σχέση 4.16 (Christensen et al. 2003).

$$|E^*|_m = P_c \left( 4200000 \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G^*|_b \left( \frac{VMA \times VFA}{10000} \right) \right) + \frac{1 - P_c}{\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3 |G^*|_b VFA}} \quad (4.16)$$

$$P_c = \frac{\left( 20 + \frac{3 |G^*|_b VFA}{VMA} \right)^{0.58}}{650 + \left( \frac{3 |G^*|_b VFA}{VMA} \right)^{0.58}} \quad (4.17)$$

Όπου  $|E^*|_m$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi), VMA τα κενά των αδρανών (%), VFA τα κενά που έχουν πληρωθεί με ασφαλτο (%),  $|G^*|_b$  το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (psi).

Συγκριτικά με τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A καθώς και τους προγενέστερους, η έκφραση του αλγόριθμου του Hirsch είναι πολύ απλή και απαιτούνται μόνο τρεις παράμετροι ( $|G^*|_b$ , VFA, VMA). Οι παράγοντες της θερμοκρασίας και της συχνότητας υπεισέρχονται έμμεσα στον αλγόριθμο μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου.

Η βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου περιέχει ευρύ φάσμα μετρημένων τιμών του  $E^*$  (από 183 έως 20900 MPa), σε θερμοκρασίες -9, 4, 21, 38 και 54°C και μόνο σε δύο συχνότητες 0.1 και 5 Hz. Ο συντελεστής  $R^2$  είναι ίσος με 0.982 σε λογαριθμική κλίμακα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης του αλγορίθμου Witczak 1-37A και του Hirsch, το τυπικό σφάλμα στην περίπτωση του Hirsch είναι της τάξεως του 41% το οποίο αποτελεί μικρή βελτίωση έναντι του 45% του Witczak 1-37A (Christensen et al. 2003). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται από την έρευνα των Dongre et al. (2005) στην οποία οι μετρημένες τιμές του  $E^*$  παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις από αυτές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Hirsch σε σχέση με τον Witczak 1-37A.

#### 4.5 Αλγόριθμος Al-Khateeb

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα των ερευνών για την ανάπτυξη του αλγορίθμου του Hirsch, οι Al-Khateeb et al. (2006) πρότειναν τον αλγόριθμο που περιγράφεται στη Σχέση 4.18 για την εκτίμηση του  $E^*$ .



$$|E^*|_m = 3 \left( \frac{100 - VMA}{100} \right) \left( \frac{\left( 90 + 10000 \left( |G^*|_b / VMA \right)^{0.66} \right)}{1100 + \left( 900 \left( |G^*|_b / VMA \right)^{0.66} \right)} \right) |G^*|_g \quad (4.18)$$

Όπου  $|G^*|_b$  το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου σε υαλώδη κατάσταση (glassy state) (θεωρείται ίσο με 145000 psi). Όλες οι άλλες μεταβλητές όπως έχουν οριστεί παραπάνω.

Όπως και το μοντέλο του Hirsch, η διατύπωση του αλγορίθμου βασίζεται στο νόμο των μιγμάτων για σύνθετα υλικά. Οι διαφορετικές φάσεις του υλικού (αδρανή, άσφαλτος και κενά αέρα) θεωρείται ότι βρίσκονται εν παραλλήλω. Επομένως, αυτός ο αλγόριθμος είναι μια πιο απλοϊκή ερμηνεία του μοντέλου του Hirsch. Οι ερευνητές τονίζουν ότι ο υπόψη αλγόριθμος αντιμετωπίζει μια από τις κύριες αδυναμίες του αλγορίθμου του Hirsch, την αδυναμία του να εκτιμά με ακρίβεια τις τιμές του  $E^*$  για χαμηλές συχνότητες και υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, μειονέκτημα του υπόψη αλγορίθμου είναι η έλλειψη επαλήθευσης του μοντέλου καθώς και το γεγονός ότι βασίστηκε σε στοιχεία του  $E^*$  τα οποία προέκυψαν από δοκιμές όπου το εύρος των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερο από το προτεινόμενο (200 με έναντι του προτεινόμενου 75-150 με).

#### 4.6 Αλγόριθμος Bari & Witczak (2006)

Οι Bari & Witczak (2006) αναθεώρησαν τον αλγόριθμο του Witczak 1-37A, εμπλουτίζοντας τη βάση δεδομένων. Στον αναθεωρημένο αλγόριθμο (Σχέση 4.19) λαμβάνεται υπόψη το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης της ασφάλτου.

$$\log E^* = -0.349 + 0.754 \left( |G_b^*|^{-0.0052} \right) \times \left( \begin{array}{l} 6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 \\ + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.6 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \end{array} \right) + \quad (4.19)$$

$$+ \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.0012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + \exp(-0.7814 - 0.5785 \log |G_b^*| + 0.8834 \log \delta_b)}$$

όπου  $E^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi),  $|G_b^*|$  το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (psi),  $\delta_b$  η γωνία υστέρησης της ασφάλτου (μοίρες),  $V_a$  το ποσοστό κενών κατ' όγκο ασφαλτομίγματος (%),  $V_{beff}$  το ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ' όγκο

ασφαλτομίγματος (%),  $\rho_{34}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19 mm (%),  $\rho_{38}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 9,5 mm (%),  $\rho_4$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 4,75 mm (%),  $\rho_{200}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο οπής 0,075mm (%).

Στην εμπλουτισμένη βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου των Bari & Witczak περιέχονται μίγματα με διάφορα επίπεδα γήρανσης, το οποίο αποτελεί εξέλιξη σε σχέση με την αρχική βάση δεδομένων. Η σημαντικότερη όμως διαφορά του αλγορίθμου των Bari & Witczak σε σχέση με αυτόν τον Witczak 1-37A είναι ότι δεν περιλαμβάνεται η παράμετρος του ιξώδους της ασφάλτου η οποία έχει αντικατασταθεί από το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου. Η αντικατάσταση αυτή κρίθηκε αναγκαία καθώς ο παράγοντας της συχνότητας (ή του χρόνου) φόρτισης δε λαμβανόταν άμεσα υπόψη στη δυσκαμψία της ασφάλτου.

Το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου μπορεί να προσδιοριστεί είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων. Σύμφωνα με τους Bari & Witczak (2007) η εκτίμηση του δυναμικού διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας και της γωνίας υστέρησης της ασφάλτου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των Σχέσεων 4.20-4.21.

$$|G_b^*| = 0.0051 f_s \eta_{f_s, T} (\sin \delta_b)^{7.1542 - 0.4929 f_s + 0.0211 f_s^2} \quad (4.20)$$

$$\delta_b = 90 + (b_1 + b_2 VTS') \log(f_s \times \eta_{f_s, T}) + (b_3 + b_4 VTS') \log(f_s \times \eta_{f_s, T})^2 \quad (4.21)$$

όπου  $|G_b^*|$  το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (Pa (όταν  $|G_b^*| > 1$  GPa, λαμβάνεται  $|G_b^*| = 1$  GPa)),  $f_s$  η συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή  $|G_b^*|$  (Hz),  $\eta_{f_s, T}$  το ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία T και τη συχνότητα φόρτισης f (cP),  $\delta_b$  η γωνία υστέρησης της ασφάλτου η οποία σχετίζεται με το  $|G_b^*|$  (μοίρες), VTS' η προσαρμοσμένη παράμετρος VTS,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  παράμετροι προσαρμογής (-7.3146, -2.6262, 0.1124, 0.2029, αντίστοιχα).

Το ιξώδες της ασφάλτου  $\eta_{f_s, T}$ , προκύπτει από το αναθεωρημένο μοντέλο Ai-VTSi (Bari & Witczak 2007) μέσω των Σχέσεων 4.22-4.24.

$$\log \log \eta_{f_s, T} = A' + VTS' \log T_R \quad (4.22)$$

$$A' = 0.9699 f_s^{-0.0527} \times A \quad (4.23)$$

$$VTS' = 0.9668 f_s^{-0.0575} \times VTS \quad (4.24)$$

όπου  $\eta_{fs,T}$  το ιξώδες της ασφάλτου εξαρτώμενο από τη θερμοκρασία  $T$  και τη συχνότητα φόρτισης  $f$  (cP),  $f_s$  η συχνότητα φόρτισης κατά τη διατμητική δοκιμή  $|G_b^*|$  (Hz),  $T_R$  η θερμοκρασία (Rankine),  $A'$ ,  $VTS'$  οι μετασχηματισμένοι συντελεστές, ώστε να συμπεριληφθεί η συχνότητα.

Σημειώνεται ότι η συχνότητα της διατμητικής φόρτισης δεν είναι ισοδύναμη με τη συχνότητα της δυναμικής θλιπτικής φόρτισης αλλά σχετίζονται σύμφωνα με τη Σχέση 4.25.

$$f_c = 2\pi f_s \quad (4.25)$$

όπου  $f_c$  η συχνότητα της δυναμικής θλιπτικής φόρτισης (Hz) και  $f_s$  η συχνότητα της διατμητικής φόρτισης (Hz).

Η βάση δεδομένων η οποία αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου περιλαμβάνει 7400 σημεία δεδομένων από 346 μίγματα. Ο συντελεστής  $R^2$  προσδιορίστηκε ίσος με 0.90 και 0.80, σε λογαριθμική και αριθμητική κλίμακα, αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος των Bari & Witczak φαίνεται να προσφέρει μια βελτίωση μικρής κλίμακας στην εκτίμηση του  $E^*$  συγκριτικά με τον αλγόριθμο Witczak 1-37A. Ωστόσο, η υπερεκτίμηση των χαμηλών τιμών του  $E^*$  δε βελτιώθηκε (Azari et al. 2007).

#### 4.7 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος των Bari & Witczak (2006) αναθεωρήθηκε το 2007 οπότε και αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος Witczak 1-40D (Witczak et al. 2007, Awed et al. 2011). Ο υπόψη αλγόριθμος (Σχέση 4.26) έχει την ίδια μαθηματική δομή (σιγμοειδής συνάρτηση) με τον προγενέστερο, αλλά καλύτερη προσαρμογή, μικρότερα σφάλματα και μεγαλύτερη ακρίβεια.

$$\log E^* = 0.02 + 0.758 \left( |G_b^*|^{-0.0009} \right) \times \left( \begin{array}{l} 6.8232 - 0.03274 \rho_{200} + 0.00431 (\rho_{200})^2 + 0.0104 \rho_4 - 0.00012 (\rho_4)^2 + \\ 0.00678 \rho_{38} - 0.00016 (\rho_{38})^2 - 0.0796 V_a - 1.1689 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \end{array} \right) \quad (4.26)$$

$$+ \frac{1.437 + 0.03313 V_a + 0.6926 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.00891 \rho_{38} - 0.00007 (\rho_{38})^2 - 0.0081 \rho_{34}}{1 + \exp(-4.5868 - 0.8176 \log(|G_b^*|) + 3.2738 \log \delta_b)}$$

όπου όλες οι παράμετροι όπως έχουν οριστεί στον προγενέστερο αλγόριθμο.

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου Witczak 1-40D βασίστηκε σε εκτιμώμενες παρά μετρημένες τιμές του  $G_b^*$  και  $\delta_b$  (Awed et al. 2011). Οι τιμές των  $G_b^*$  και  $\delta_b$  εκτιμώνται μέσω των Σχέσεων 4.27-4.28.

$$|G_b^*| = 1.469 \times 10^{-9} \times \log(\eta_{f_s, T})^{12.0056} \times f_s^{0.7418} \times (\sin \delta)^{0.6806} \quad (4.27)$$

$$\delta_b = 90 - 0.1785 \times \log(\eta_{f_s, T})^{2.3814} \times f_s^{(0.3507 + 0.0782 \times VTS')} \quad (4.28)$$

Σύμφωνα με έρευνες (Awed et al. 2011) η καλύτερη προσαρμογή του αλγορίθμου επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα ασφαλτομιγμάτων με κοινή άσφαλο. Ωστόσο, στις υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες οι εκτιμώμενες τιμές του αλγορίθμου παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Επίσης, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της ασφάλτου (ιξώδες, διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας) η συμπεριφορά του αλγορίθμου διαφέρει. Σε κάποιες περιπτώσεις ο αλγόριθμος υπερεκτιμά ελαφρώς τις τιμές του  $E^*$  σε χαμηλές θερμοκρασίες και υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του  $E^*$  σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντιθέτως, σε άλλες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος υπερεκτιμά σημαντικά τις μετρημένες τιμές του  $E^*$  σε όλες τις θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τους Khattab et al. (2014) οι εκτιμώμενες τιμές του αλγορίθμου παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με τις μετρημένες για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι και διεθνώς διαδεδομένοι και αποδεκτοί αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  είναι ο Witczak 1-37A, Bari & Witczak, Hirsch και Witczak 1-40D, οι οποίοι και αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

## **5 Εργαστηριακό πείραμα**

---

### **5.1 Πειραματικά ασφαλτομίγματα**

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ δοκίμια ασφαλτομίγματος διαφόρων τύπων. Η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει μίγματα με ποικίλες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών, μεγάλο εύρος ποσοστού κενών και δύο τύπους ασφάλτου (κοινή άσφαλτος και τροποποιημένη) σε διάφορα ποσοστά. Τα ασφαλτομίγματα κατηγοριοποιούνται σε κλειστού τύπου και ανοικτού τύπου ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και το ποσοστό κενών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν. Στα ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου περιλαμβάνονται τρεις τύποι μιγμάτων (Α, Β και C) οι οποίοι διαφοροποιούνται ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών τα οποία είναι ασβεστολιθικής προέλευσης. Επιπλέον, ο κάθε τύπος μίγματος παρασκευάστηκε με τρία διαφορετικά ποσοστά κοινής ασφάλτου. Στα ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου περιλαμβάνονται δύο τύποι μίγματος (Α και Β) με αδρανή σκωρία και τροποποιημένη άσφαλτο σε τρία διαφορετικά ποσοστά.

Κατόπιν του προσδιορισμού του μέγιστου θεωρητικού βάρους των ασφαλτομιγμάτων, πραγματοποιήθηκε συμπύκνωση των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο, προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους, των κενών αέρα και του  $E^*$ .

#### **5.1.1 Ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου**

##### **5.1.1.1 Μίγμα Α (DG\_A)**

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα Α (DG\_A), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 5.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α κλειστού τύπου**

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

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκαν τρία ασφαλτομίγματα τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό της ασφάλτου το οποίο είναι 4%, 4.5% και 5%. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης και ο τύπος της ασφάλτου είναι PEN 50/70.

#### 5.1.1.2 Μίγμα Β (DG\_B)

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα Β (DG\_B), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 5.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Β κλειστού τύπου**

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

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκαν τρία ασφαλτομίγματα τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό της ασφάλτου το οποίο είναι 4%, 4.5% και 5%. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης και ο τύπος της ασφάλτου είναι PEN 50/70.

### 5.1.1.3 Μίγμα C (DG\_C)

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα C (DG\_C), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 5.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος C κλειστού τύπου**

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

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκαν τρία ασφαλτομίγματα τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό της ασφάλτου το οποίο είναι 4%, 4.5% και 5%. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης και ο τύπος της ασφάλτου είναι PEN 50/70.

### 5.1.2 Ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου

#### 5.1.2.1 Μίγμα A (OG\_A)

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου μίγμα A (OG\_A), με ποσοστό ασφάλτου 4% όπως προέκυψε από τη διαδικασία της εκχύλισης, η οποία πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

**Πίνακας 5.4 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος A ανοικτού τύπου με ποσοστό ασφάλτου 4%**

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

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου μίγμα Α (OG\_A), με ποσοστό ασφάλτου 4.5% όπως προέκυψε από τη διαδικασία της εκχύλισης, η οποία πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

**Πίνακας 5.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α ανοικτού τύπου με ποσοστό ασφάλτου 4.5%**

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

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου μίγμα Α (OG\_A), με ποσοστό ασφάλτου 5% όπως προέκυψε από τη διαδικασία της εκχύλισης, η οποία πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

**Πίνακας 5.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α ανοικτού τύπου με ποσοστό ασφάλτου 5%**

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

Σε κάθε περίπτωση τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης με βάση τη σκωρία και η άσφαλτος είναι τύπου PEN 80/100 τροποποιημένη.

#### 5.1.2.2 Μίγμα Β (OG\_B)

Στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου μίγμα Β (OG\_B), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.



**Πίνακας 5.7 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Β ανοικτού τύπου**

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

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκαν τρία ασφαλτομίγματα τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό της ασφάλτου το οποίο είναι 4%, 4.5% και 5%. Τα αδρανή είναι ασβεστολιθικής προέλευσης με βάση τη σκωρία και η άσφαλτος είναι τύπου PEN 80/100 τροποποιημένη.

## 5.2 Προσδιορισμός μέγιστου θεωρητικού βάρους

Ο προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους του μη συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος πραγματοποιήθηκε με τη δοκιμή Rice, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 12697-05 "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density". Αρχικά, το χαλαρό ασφαλτόμιγμα ποσότητας μεγαλύτερης των 1.500 γραμμαρίων θερμάνθηκε, ώστε να αποβληθεί η υγρασία και να μπορεί να διαχωριστεί εύκολα με τα χέρια, με το μέγιστο μέγεθος κόκκου να είναι μικρότερο από 6 mm.

Στη συνέχεια, το μίγμα αφού κρύωσε σε θερμοκρασία δωματίου (25°C), τοποθετήθηκε σε πυκνόμετρο γνωστής μάζας, όπου μετρήθηκε το βάρος του μίγματος (Α). Μετά, προστέθηκε στο πυκνόμετρο νερό θερμοκρασίας 25°C μέχρις ότου να καλυφθεί όλο το μίγμα, σφραγίστηκε με το καπάκι της συσκευής και τέθηκε σε λειτουργία για 15 λεπτά. Η βασική λειτουργία της συσκευής είναι ότι αφαιρεί τον αέρα από το εσωτερικό του πυκνόμετρου και με τη δόνηση που υφίσταται το νερό εισχωρεί στα κενά του μίγματος παίρνοντας τη θέση του αέρα, ο οποίος με τη μορφή φυσαλίδων βγαίνει από το δοχείο, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται μια πίεση μικρότερη από 4 kPa.

Μετά το πέρας της λειτουργίας της συσκευής το δοχείο αφαιρέθηκε και προστέθηκε σε αυτό νερό θερμοκρασίας 25 °C έως ότου γεμίσει. Το πυκνόμετρο σφραγίστηκε με το ειδικό καπάκι και τοποθετήθηκε στη ζυγαριά για την καταγραφή του βάρους του πυκνόμετρου, του μίγματος και του νερού (Ε). Τέλος, το πυκνόμετρο καθαρίστηκε και αφού πληρώθηκε με νερό θερμοκρασίας

25°C, τοποθετήθηκε το καπάκι και ζυγίστηκε καταγράφοντας το βάρος του πυκνόμετρου και του νερού (B). Το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

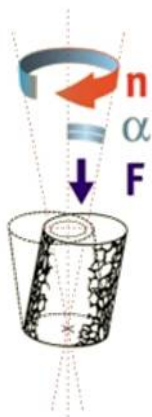
$$G_{\max} = \frac{A}{A + B - E} \quad (5.1)$$

όπου  $G_{\max}$  το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος ( $\text{kg/m}^3$ ), A το βάρος δείγματος στον αέρα (g), B το βάρος πυκνόμετρου και νερού (g), E το βάρος πυκνόμετρου και νερού και υλικού στον αέρα (g).

### 5.3 Συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων με τη γυροσκοπική μέθοδο

Η συμπύκνωση των ασφαλτομιγμάτων για την παρασκευή δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη γυροσκοπική μέθοδο (Σχήμα 5.1), όπως αυτή περιγράφεται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα (EN 12697-31 "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor"). Η συμπύκνωση των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο είναι η απαιτούμενη μέθοδος προκειμένου για την προετοιμασία των δοκιμίων για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στο εργαστήριο (AASHTO T342-11 "Standard Test method for the Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)"). Επίσης, αποτελεί τη βασικότερη μέθοδο με την οποία συμπυκνώθηκαν τα περισσότερα δοκίμια στο πλαίσιο της ανάπτυξης των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ .

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



**Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση περιστροφής του δοκιμίου με τη γυροσκοπική μέθοδο**

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας παρασκευάστηκαν δοκίμια συγκεκριμένων διαστάσεων και πυκνότητας. Αρχικά το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε σε ειδικό φούρνο σε θερμοκρασία 160 °C μαζί με τη μεταλλική μήτρα για περίπου 3 ώρες έως ότου το ασφαλτόμιγμα γίνει εργάσιμο. Στη συνέχεια, το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε στη μεταλλική μήτρα διαμέτρου 150 mm και ύψους 200 mm. Η μήτρα μεταφέρθηκε στο γυροσκοπικό συμπιεστή προκειμένου για την έναρξη της συμπίκνωσης. Η συμπίκνωση των δοκιμίων ολοκληρώθηκε όταν επιτεύχθηκε η επιθυμητή πυκνότητα καθώς και το απαιτούμενο ύψος του δοκιμίου (170 mm) (Σχήμα 5.2). Το διαφορετικό ποσοστό κενών σε κάθε δοκίμιο, προέκυψε με κατάλληλη προσαρμογή των κύκλων περιστροφής (gyrations).



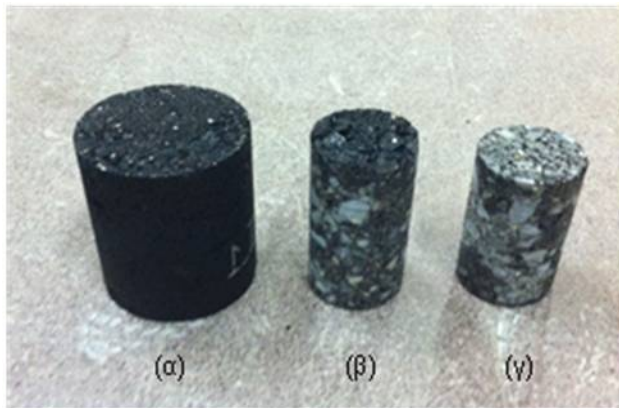
**Σχήμα 5.2 Δοκίμιο ασφαλτομίγματος αμέσως μετά τη συμπίκνωση**

Σύμφωνα με έρευνες, κατά τη συμπίκνωση των δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο το ποσοστό των κενών δεν είναι ομοιόμορφο (Chehab et al. 2000). Αυτό οφείλεται στους

περιορισμούς που επιβάλλουν τα τοιχώματα της μήτρας και οι μεταλλικές πλάκες. Επομένως, σύμφωνα με τα πρότυπα για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία από το κέντρο του δοκιμίου (Σχήμα 5.3) και στη συνέχεια κόπηκαν καθ' ύψος με ειδικό τροχό ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές διαστάσεις (Σχήμα 5.4).



**Σχήμα 5.3** Πυρηνοληψία δοκιμίων



**Σχήμα 5.4** Δοκίμιο (α) αμέσως μετά τη συμπύκνωση, (β) μετά την πυρηνοληψία και (γ) μετά την κοπή καθ' ύψος

Τα δοκίμια που τελικά προέκυψαν είχαν διάμετρο 100mm και ύψος 150mm. Οι διαστάσεις αυτές είναι οι πρότυπες διαστάσεις που θα πρέπει να έχουν τα δοκίμια τα οποία υποβάλλονται σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (AASHTO T342-11 2011).

## 5.4 Δοκίμια ελέγχου

Συνολικά παρασκευάστηκαν 45 δοκίμια εκ των οποίων 27 αντιστοιχούν σε κλειστού τύπου, 18 σε ανοικτού τύπου. Από κάθε μίγμα, για συγκεκριμένο ποσοστό ασφάλτου παρασκευάστηκαν τρία δοκίμια που διαφέρουν ως προς το ποσοστό των κενών. Στους Πίνακες 5.8-5.9 παρουσιάζονται τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με την κωδικοποίησή τους και το ποσοστό της ασφάλτου ( $P_b$ ).

**Πίνακας 5.8 Δοκίμια κλειστού τύπου**

Κωδικοποίηση	$P_b$ (%)	Κωδικοποίηση	$P_b$ (%)
DG_A_I_1	4.0	DG_B_II_3	4.5
DG_A_I_2	4.0	DG_B_III_1	5.0
DG_A_I_3	4.0	DG_B_III_2	5.0
DG_A_II_1	4.5	DG_B_III_3	5.0
DG_A_II_2	4.5	DG_C_I_1	4.0
DG_A_II_3	4.5	DG_C_I_2	4.0
DG_A_III_1	5.0	DG_C_I_3	4.0
DG_A_III_2	5.0	DG_C_II_1	4.5
DG_A_III_3	5.0	DG_C_II_2	4.5
DG_B_I_1	4.0	DG_C_II_3	4.5
DG_B_I_2	4.0	DG_C_III_1	5.0
DG_B_I_3	4.0	DG_C_III_2	5.0
DG_B_II_1	4.5	DG_C_III_3	5.0
DG_B_II_2	4.5		

**Πίνακας 5.9 Δοκίμια ανοικτού τύπου**

Κωδικοποίηση	$P_b$ (%)	Κωδικοποίηση	$P_b$ (%)
OG_A_I_1	4.0	OG_B_I_1	4.0
OG_A_I_2	4.0	OG_B_I_2	4.0
OG_A_I_3	4.0	OG_B_I_3	4.0
OG_A_II_1	4.5	OG_B_II_1	4.5
OG_A_II_2	4.5	OG_B_II_2	4.5
OG_A_II_3	4.5	OG_B_II_3	4.5
OG_A_III_1	5.0	OG_B_III_1	5.0
OG_A_III_2	5.0	OG_B_III_2	5.0
OG_A_III_3	5.0	OG_B_III_3	5.0

Τα δοκίμια κλειστού τύπου συμβολίζονται με DG (Dense Graded), τα γράμματα A, B και C που ακολουθούν δηλώνουν την κοκκομετρική διαβάθμιση, τα I, II και III αναφέρονται στο ποσοστό της ασφάλτου (4.0, 4.5 και 5%, αντίστοιχα) και οι αριθμοί 1, 2 και 3 αφορούν στο πλήθος των δοκιμίων τα οποία περιέχουν διαφορετικό ποσοστό κενών αέρα.

Τα δοκίμια ανοικτού τύπου συμβολίζονται με OG\_A και OG\_B (Open Graded), όπου τα A και B δηλώνουν τη διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Παρομοίως με τα δοκίμια κλειστού τύπου τα I, II, III και οι αριθμοί 1, 2, 3, αφορούν στο ποσοστό της ασφάλτου και το πλήθος των δοκιμίων που διαφοροποιούνται ως προς το ποσοστό των κενών αέρα, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι παρόλο που στην περίπτωση των δοκιμίων OG\_A, το μίγμα παρουσιάζει ελαφρώς διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση ανάλογα με το ποσοστό της ασφάλτου, σε κάθε περίπτωση συμβολίζεται με το γράμμα A, καθώς είναι του ίδιου Ονομαστικού Μέγιστου Μεγέθους Αδρανών (Nominal Maximum Aggregate Size- NMAS).

## 5.5 Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους έγινε σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα (EN 12697-06 "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens"). Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους για τα δοκίμια κλειστού τύπου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο SSD (Saturated Surface Dry), ενώ για τα δοκίμια ανοικτού τύπου με τη μέθοδο των διαστάσεων του δοκιμίου.

### 5.5.1 Μέθοδος Saturated Surface Dry (SSD)

Αρχικά, τα δοκίμια καθαρίστηκαν προσεκτικά από τυχόν ξένες ουσίες και αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου 25 °C μέχρι να ξηρανθούν. Στην συνέχεια, ζυγίστηκαν στον αέρα με τη βοήθεια ειδικής ζυγαριάς ακρίβειας 0.1 g και καταγράφηκε η μάζα τους ( $m_1$ ). Έπειτα, κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε σε λουτρό νερού θερμοκρασίας 25 °C, έτσι ώστε να επιτρέπεται ελεύθερα η κυκλοφορία του νερού γύρω από το δοκίμιο. Η στάθμη του νερού κάλυπτε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου και ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού γινόταν με ειδικό θερμόμετρο. Το δοκίμιο παρέμεινε μέσα στο νερό για τριάντα λεπτά μέχρι να κορεσθεί πλήρως και καταγράφηκε το βάρος του δοκιμίου στο νερό ( $m_2$ ). Τέλος, το δοκίμιο απομακρύνθηκε από το νερό, σκουπίστηκε επιφανειακά με μια απορροφητική πετσέτα και στη συνέχεια ζυγίστηκε ( $m_3$ ).

Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους έγινε σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{bulk} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (5.2)$$

όπου  $G_{bulk}$  το φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος ( $\text{kg/m}^3$ ),  $m_1$  το βάρος ξηρού δοκιμίου στον αέρα (g),  $m_2$  το βάρος κορεσμένου δοκιμίου στο νερό (g),  $m_3$  το βάρος

κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (g),  $\rho_w$  η πυκνότητα νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (25 °C), 997.1 (kg/m<sup>3</sup>).

### 5.5.2 Μέθοδος διαστάσεων

Κάθε δοκίμιο ανοικτού τύπου ζυγίστηκε στον αέρα, αφού πρώτα είχε ξηρανθεί ( $m_1$ ). Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η διάμετρος και το ύψος του κάθε δοκιμίου από το μέσο όρο τεσσάρων μετρήσεων σε διαφορετικά σημεία. Ο προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους με αυτή τη μέθοδο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{bulk} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (5.3)$$

όπου  $G_{bulk}$  το φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος (kg/m<sup>3</sup>),  $m_1$  το βάρος ξηρού δοκιμίου στον αέρα (g),  $h$  το ύψος του δοκιμίου (mm),  $d$  η διάμετρος του δοκιμίου (mm).

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

### 5.6 Προσδιορισμός κενών αέρα δοκιμίων ασφαλτομίγματος

Ο προσδιορισμός των κενών αέρα των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα (EN 12697-08 "Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens") από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_a = 100 \times (G_{max} - G_{bulk}) / G_{max} \quad (5.4)$$

όπου  $V_a$  το ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (%),  $G_{max}$  το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος (kg/m<sup>3</sup>),  $G_{bulk}$  το φαινόμενο ειδικό βάρος συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος (kg/m<sup>3</sup>).

Πλέον του ποσοστού των κενών αέρα προσδιορίστηκαν τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA) και τα κενά που πληρώθηκαν με άσφαλο (VFA) σύμφωνα με τις σχέσεις 5.5 και 5.6, αντίστοιχα.

$$VMA = V_a + V_{eff} \quad (5.5)$$

όπου VMA το ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών (%),  $V_a$  το ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (%),  $V_{eff}$  ο όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου (%).

$$VFA = 100 \times \frac{V_{eff}}{VMA} = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (5.6)$$

όπου VFA το ποσοστό κενών που πληρώθηκαν με άσφαλο (%),  $V_{eff}$  ο όγκος ενεργού ποσοστού ασφάλτου (%), VMA το ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών (%),  $V_a$  το ποσοστό κενών αέρα συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος (%).

Στους Πίνακες 5.10-5.11 παρουσιάζονται τα στοιχεία ογκομετρικής σύστασης των δοκιμίων κλειστού και ανοικτού τύπου, αντίστοιχα.

**Πίνακας 5.10 Στοιχεία ογκομετρικής σύστασης δοκιμίων κλειστού τύπου**

Δοκίμιο	V <sub>a</sub> (SSD)	VMA	VFA	V <sub>eff</sub>
DG_A_I_1	2,87	12,4	76,8	9,49
DG_A_I_2	4,27	13,6	68,6	9,32
DG_A_I_3	4,74	14,0	66,2	9,29
DG_A_II_1	2,83	13,4	78,8	10,55
DG_A_II_2	4,27	14,6	70,8	10,35
DG_A_II_3	5,76	15,9	63,9	10,18
DG_A_III_1	2,58	14,3	82,0	11,74
DG_A_III_2	5,30	16,7	68,2	11,37
DG_A_III_3	6,38	17,6	63,7	11,20
DG_B_I_1	4,13	13,3	69,0	9,21
DG_B_I_2	6,09	15,1	59,7	9,03
DG_B_I_3	6,54	15,5	57,8	8,95
DG_B_II_1	3,59	13,9	74,2	10,31
DG_B_II_2	4,54	14,8	69,3	10,26
DG_B_II_3	5,98	16,1	62,7	10,08
DG_B_III_1	3,45	14,9	76,8	11,41
DG_B_III_2	4,85	16,1	69,8	11,21
DG_B_III_3	6,70	17,7	62,1	10,97
DG_C_I_1	3,55	12,8	72,2	9,234
DG_C_I_2	5,71	14,7	61,2	8,99
DG_C_I_3	6,82	15,7	56,5	8,85
DG_C_II_1	4,63	14,8	68,7	10,17
DG_C_II_2	5,86	15,9	63,2	10,04
DG_C_II_3	6,59	16,5	60,1	9,93
DG_C_III_1	3,24	14,7	77,9	11,42
DG_C_III_2	4,27	15,6	72,6	11,29
DG_C_III_3	5,53	16,6	66,7	11,09



**Πίνακας 5.11 Στοιχεία ογκομετρικής σύστασης δοκιμών ανοικτού τύπου**

Δοκίμιο	Va (%)	VMA	VFA	Veff
OG_A_I_1	19,2	29,0	33,8	9,80
OG_A_I_2	18,5	28,4	34,8	9,88
OG_A_I_3	16,3	26,4	38,4	10,15
OG_A_II_1	20,8	31,7	34,5	10,96
OG_A_II_2	21,7	32,6	33,2	10,83
OG_A_II_3	22,5	33,2	32,3	10,73
OG_A_III_1	18,7	30,9	39,4	12,17
OG_A_III_2	22,7	34,3	33,8	11,57
OG_A_III_3	18,6	30,8	39,5	12,18
OG_B_I_1	10,4	19,8	47,6	9,42
OG_B_I_2	9,7	19,2	49,4	9,49
OG_B_I_3	12,3	21,5	42,8	9,22
OG_B_II_1	9,6	20,1	52,2	10,47
OG_B_II_2	9,8	20,2	51,7	10,45
OG_B_II_3	12,8	22,9	44,1	10,09
OG_B_III_1	8,7	20,0	56,7	11,37
OG_B_III_2	12,6	23,4	46,4	10,89
OG_B_III_3	12,4	23,3	46,8	10,90

Το εύρος του ποσοστού κενών των δοκιμών κλειστού τύπου κυμαίνεται από 2,58 έως 6,82%, των δοκιμών ανοικτού τύπου από 8,7 έως 22,7%.

## 5.7 Προσδιορισμός E\* στο εργαστήριο

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του E\* των δοκιμών στο εργαστήριο είναι σύμφωνη με το Πρότυπο AASHTO T342-11 "Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)", του οποίου οι βασικές αρχές έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο (Κεφ. 3.3).

Θλιπτικό φορτίο ημιτονοειδούς μορφής εφαρμόστηκε σε κάθε δοκίμιο για ένα εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Σύμφωνα με έρευνες (Bennert & Williams 2009), η διενέργεια της δοκιμής στις ακραίες θερμοκρασίες των -10 και 54 °C (οι οποίες προδιαγράφονται στο πρότυπο) οδηγεί σε μη αξιόπιστα αποτελέσματα, λόγω της συσσώρευσης πάγου στον περιβαλλοντικό θάλαμο και στο δοκίμιο (στους -10 °C) και λόγω πολύ μεγάλων παραμορφώσεων ακόμα και με μικρό φορτίο στους 54 °C. Επομένως, οι υπόψη θερμοκρασίες εξαιρέθηκαν και η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε πέντε θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37 °C και έξι συχνότητες 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz.

Κατόπιν κατάλληλης προετοιμασίας των δοκιμών (Σχήμα 5.5), για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή για τους 30 συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας ξεκινώντας από τη μικρότερη θερμοκρασία. Για δεδομένη θερμοκρασία η δοκιμή πραγματοποιήθηκε από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη συχνότητα.



**Σχήμα 5.5 Προσάρτηση μεταλλικών βάσεων στο δοκίμιο και τοποθέτηση LVDTs**

Το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.12, ήταν τέτοιο ώστε το εύρος της ανακτώμενης αξονικής παραμόρφωσης να είναι μεταξύ 50 και 150 microstrain.

**Πίνακας 5.12 Εύρος φορτίου**

	Θερμοκρασία (°C)									
	4		15		20		25		37	
	DG	OG	DG	OG	DG	OG	DG	OG	DG	OG
Φορτίο (kPa)	500-900	400-800	400-800	200-700	300-800	150-600	200-600	100-500	70-200	50-150

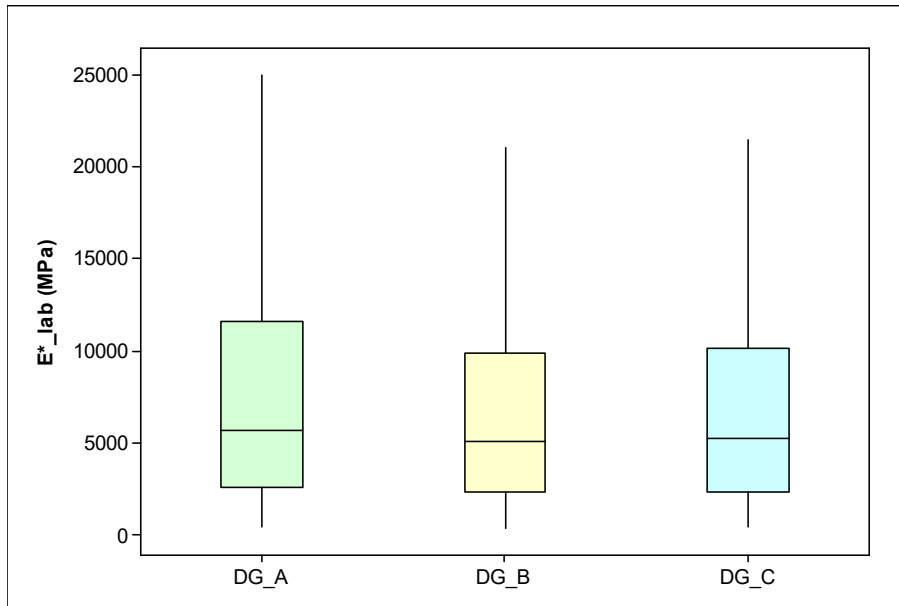
Από την παραπάνω πειραματική διαδικασία προέκυψε ένας συνολικός αριθμός 1350 σημείων δεδομένων, εκ των οποίων 810 αφορούν σε δοκίμια κλειστού τύπου και 540 σε δοκίμια ανοικτού τύπου.

## 6 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, καθώς και η διαδικασία εφαρμογής των τεσσάρων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  (Witczak 1-37A, Bari & Witczak, Hirsch και Witczak 1-40D).

### 6.1 Επεξεργασία και ανάλυση πειραματικών δεδομένων $E^*$

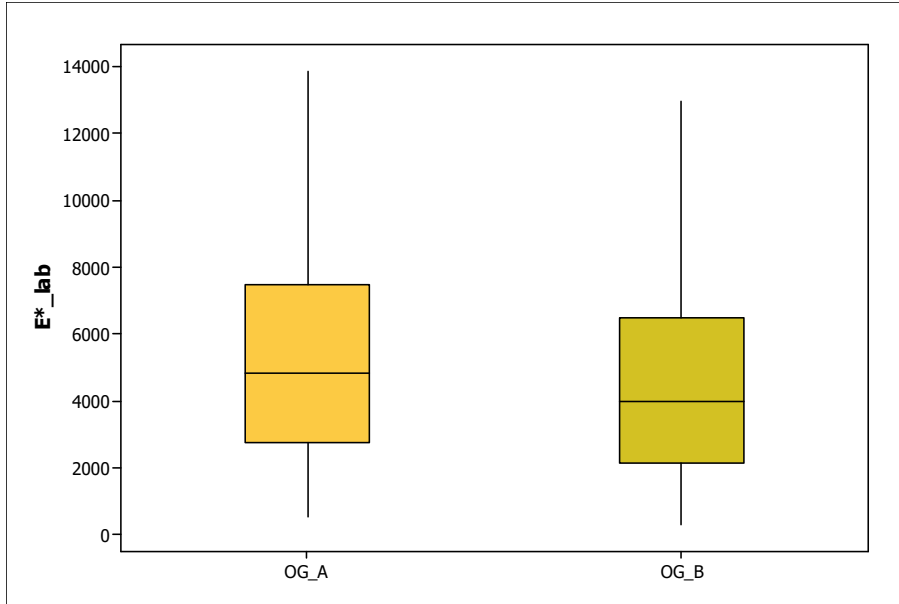
Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι εργαστηριακές τιμές του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) για τα δοκίμια του κάθε ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου.



**Σχήμα 6.1  $E^*_{lab}$  δοκιμών κλειστού τύπου**

Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος DG\_A κυμαίνονται από 450 MPa έως 25000 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 5000 MPa. Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος DG\_B κυμαίνονται από 400 MPa έως 23500 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 4600 MPa. Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος DG\_C κυμαίνονται από 450 MPa έως 23200 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 4600 MPa.

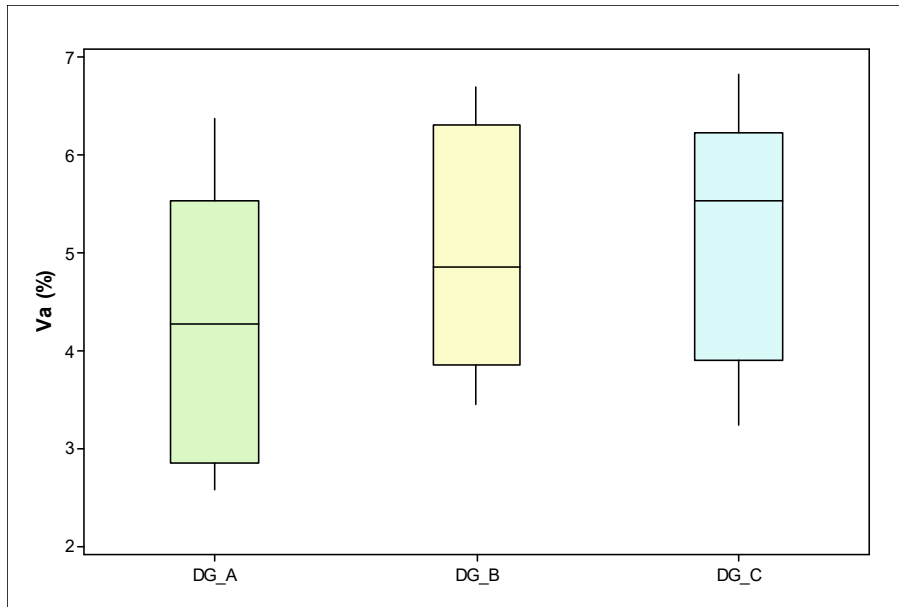
Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται οι εργαστηριακές τιμές του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) για τα δοκίμια του κάθε ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου.



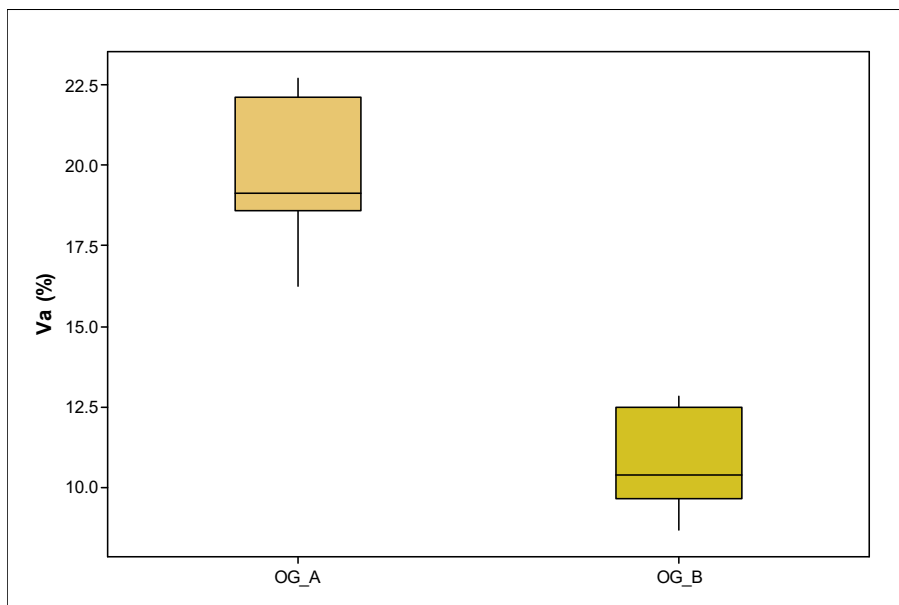
**Σχήμα 6.2 E\*\_lab δοκιμών ανοικτού τύπου**

Οι τιμές του E\*\_lab των δοκιμών του μίγματος OG\_A κυμαίνονται από 550 MPa έως 19000 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 4800 MPa. Οι τιμές του E\*\_lab των δοκιμών του μίγματος OG\_B κυμαίνονται από 300 MPa έως 16000 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 4000 MPa.

Στα Σχήματα 6.3-6.4 παρουσιάζονται τα ποσοστά κενών των δοκιμών κλειστού και ανοικτού τύπου, αντίστοιχα. Το εύρος του ποσοστού κενών των δοκιμών κλειστού τύπου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Το ποσοστό κενών για τα δοκίμια DG\_A κυμαίνεται από 2.58 έως 6.38%, για τα δοκίμια DG\_B από 3.45 έως 6.70% και για τα δοκίμια DG\_C από 3.24 έως 6.82%. Αντιθέτως, το ποσοστό κενών των μιγμάτων ανοικτού τύπου διαφέρει σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό κενών για τα δοκίμια OG\_A κυμαίνεται από 16.3 έως 22.7% και για τα δοκίμια OG\_B από 8.7 έως 12.8%. Οι μεγάλες αυτές διαφοροποιήσεις ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι το μίγμα OG\_A χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο ενώ το μίγμα OG\_B λεπτόκοκκο.



**Σχήμα 6.3 Va (%) δοκιμών κλειστού τύπου**



**Σχήμα 6.4 Va (%) δοκιμών ανοικτού τύπου**

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση τα δοκίμια κλειστού τύπου δύναται να ομαδοποιηθούν ανεξαρτήτως τύπου (A, B, C). Αντιθέτως, όσον αφορά στα δοκίμια ανοικτού τύπου λόγω των ιδιαίτερα μεγάλων διαφορών ως προς το ποσοστό των κενών αλλά και της ίδιας τάξης μεγέθους των τιμών του  $E^*$ , δεν είναι δυνατή η ομαδοποίηση τους και επομένως για την περαιτέρω διερεύνηση θεωρούνται ξεχωριστά.

## 6.2 Εκτίμηση του E\* μέσω διεθνών αλγορίθμων

Το E\* των δοκιμίων εκτιμήθηκε μέσω των αλγορίθμων Witczak 1-37A, Bari & Witczak, Hirsch και Witczak 1-40D, τόσο για τα δοκίμια κλειστού όσο και για τα δοκίμια ανοικτού τύπου, στις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές.

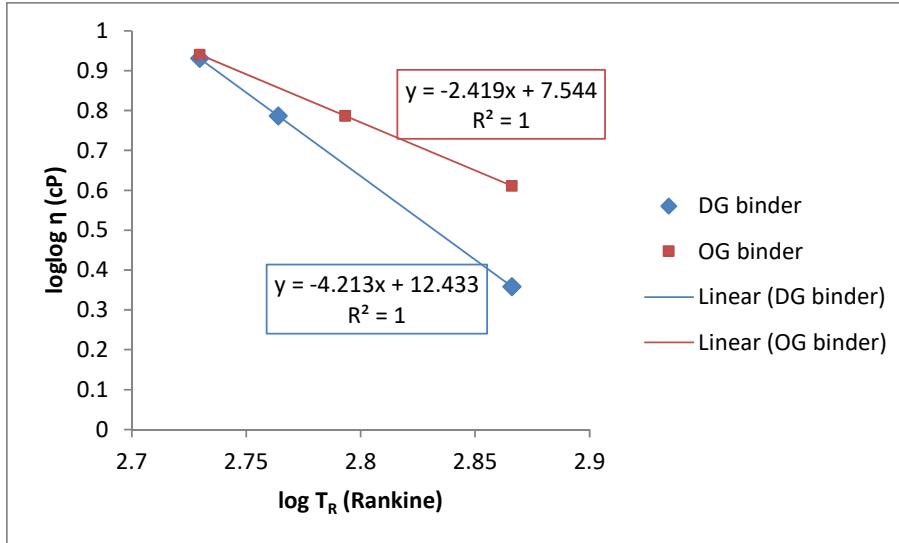
Το ιξώδες της ασφάλτου, απαραίτητη παράμετρος στον αλγόριθμο Witczak 1-37A, προσδιορίστηκε μέσω της Σχέσης 4.11. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων A και VTS για τις δύο ασφάλτους πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών του ιξώδους της ασφάλτου, όπως η δοκιμή εισδυσσης στους 25 °C (σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T49-07 "Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials"), το σημείο μάλθωσης (σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T53-08 "Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)") και το κινηματικό ιξώδες στους 135 °C (σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T201-03 "Standard Method of Test for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)"). Σύμφωνα με τους Mirza & Witczak(1995) η σχέση μεταξύ του ιξώδους της ασφάλτου και του δείκτη διεισδυτικότητας στους 25 °C περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\log \eta = 10.5012 - 2.2601 \log PEN + 0.00389 (\log PEN)^2 \quad (6.1)$$

όπου η το ιξώδες ασφάλτου (poise), PEN ο δείκτης διεισδυτικότητας στους 25 °C.

Η θερμοκρασία μάλθωσης αντιστοιχεί στη θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες της ασφάλτου είναι ίσο με 13000 P (1300 Pas) (Mirza & Witczak 1995). Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με το ιξώδες μέσω της πυκνότητας της ασφάλτου, η οποία είναι ίση με 1.02 g/cm<sup>3</sup>.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το ιξώδες υπολογίστηκε για τρεις θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η γραμμική παλινδρόμηση του ιξώδους με τη θερμοκρασία για τους δύο τύπους ασφάλτων και κατ' επέκταση οι παράμετροι A και VTS.



**Σχήμα 6.5 Προσδιορισμός παραμέτρων A και VTS των δύο τύπων ασφάλτων**

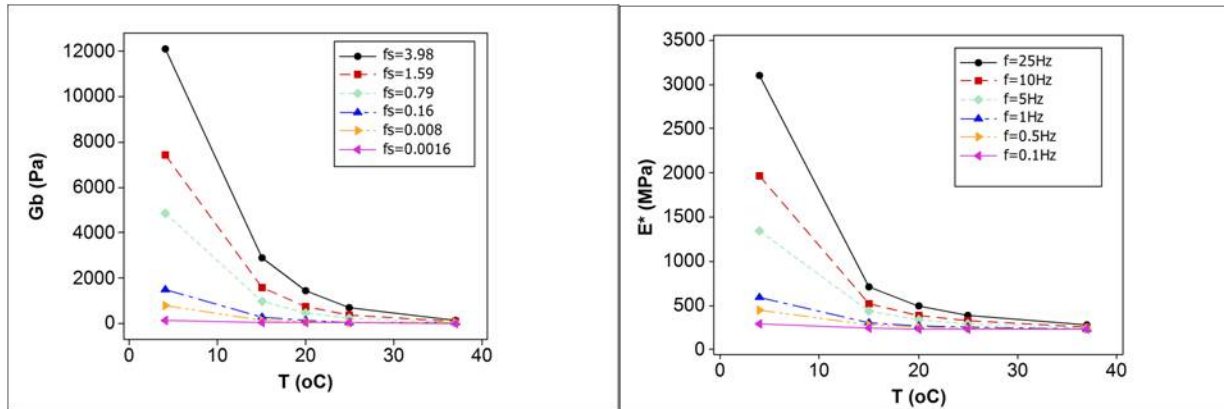
Για την ασφαλτο των μιγμάτων κλειστού τύπου η τιμή των παραμέτρων A και VTS είναι 12.433 και -4.213, αντίστοιχα, ενώ για την ασφαλτο των μιγμάτων ανοικτού τύπου η τιμή των παραμέτρων A και VTS είναι 7.544 και -2.419, αντίστοιχα.

Το δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου ( $G^*_b$ ) και η αντίστοιχη γωνία υστέρησης ( $\delta_b$ ), τα οποία υπεισέρχονται ως παράμετροι στους αλγόριθμους του Hirsch και των Bari & Witczak, εκτιμήθηκαν μέσω των Σχέσεων 4.20-4.24.

Κατά τη διαδικασία εκτίμησης του  $G^*_b$  των δοκιμών ανοικτού τύπου, παρατηρήθηκε μια μη αναμενόμενη τάση των τιμών του. Πιο συγκεκριμένα, ενώ οι τιμές του  $G^*_b$  αναμένεται να μειώνονται με τη μείωση τη συχνότητας φόρτισης, παρατηρήθηκε το αντίθετο. Παρόλο που η βάση δεδομένων που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη των παραπάνω εξισώσεων περιείχε 41 διαφορετικούς τύπους ασφάλτου συμπεριλαμβανομένων και 9 τροποποιημένων (Bari & Witczak 2006), ενδεχομένως, οι εξισώσεις αυτές να μην έχουν καλή προσαρμογή για την περιγραφή της συμπεριφοράς της τροποποιημένης ασφάλτου που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των υπόψη δοκιμών. Επομένως, η εκτίμηση του  $E^*$  μέσω των αλγορίθμων πρόβλεψης του Hirsch και των Bari & Witczak δεν ήταν δυνατόν να υλοποιηθεί για τα δοκίμια ανοικτού τύπου.

Αναφορικά με τον αλγόριθμο Witczak 1-40D το ιξώδες της ασφάλτου υπολογίζεται μέσω των Σχέσεων 4.22-4.24 και η εκτίμηση των  $G^*_b$  και  $\delta_b$  μέσω των Σχέσεων 4.27-4.28. Κατά την εφαρμογή των παραπάνω Σχέσεων παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του  $G^*_b$  και κατά συνέπεια και του  $E^*$  που προκύπτει από τον αλγόριθμο του Witczak 1-40D ( $E^*_1-40D$ ). Στο

Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα ενός δοκιμίου τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά του συνόλου των δοκιμών.



**Σχήμα 6.6 Εκτιμώμενες τιμές  $G_b^*$  και  $E^*$  σύμφωνα με τον αλγόριθμο Witczak 1-40D**

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, δεν κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω αξιολόγηση του αλγορίθμου Witczak 1-40D καθώς το σφάλμα εκτίμησης κατά κύριο λόγο ενδεχομένως να οφείλεται στην αδυναμία των σχέσεων εκτίμησης του  $G_b^*$  και  $\delta_b$  να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά των τύπων ασφάλτου που θεωρήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας πειραματικής διαδικασίας.

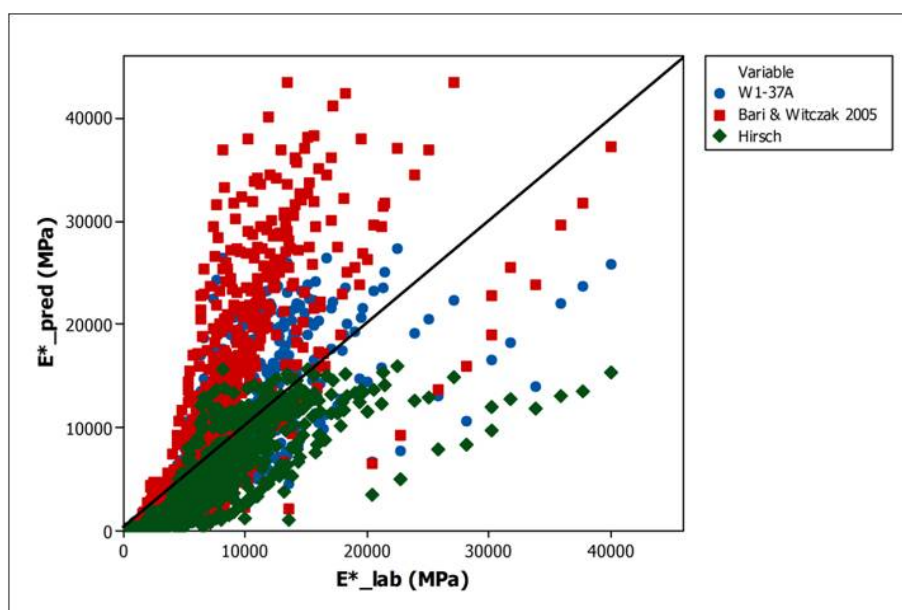


## 7 Αξιολόγηση διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$

Ο έλεγχος προσαρμογής των τριών διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  πραγματοποιήθηκε μέσω διαγραμμάτων διασποράς και στατιστικών ελέγχων. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση των μιγμάτων ανοικτού τύπου χρησιμοποιήθηκε μόνο ο αλγόριθμος Witczak 1-37A για την εκτίμηση των τιμών του  $E^*$ .

### 7.1 Ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων ( $E^*_{pred}$ ) μέσω των τριών αλγορίθμων (Witczak 1-37A, Bari & Witczak και Hirsch). Επίσης, φαίνεται και η γραμμή  $y=x$ .



Σχήμα 7.1 Συγκριτική αξιολόγηση διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  (μίγματα κλειστού τύπου)

Οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Bari & Witczak γενικά συγκεντρώνονται πάνω από τη γραμμή  $y=x$  υποδεικνύοντας ότι οι τιμές του  $E^*$  υπερεκτιμούνται. Όσον αφορά στις τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Hirsch, στην πλειοψηφία τους συγκεντρώνονται κάτω από τη γραμμή  $y=x$  και επομένως οι τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται. Οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A (W1-37A) συσσωρεύονται στην πλειοψηφία τους γύρω από τη γραμμή  $y=x$ .

Η ακρίβεια εκτίμησης του  $E^*$  μέσω των υπό διερεύνηση αλγορίθμων προσδιορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων καλής προσαρμογής, SSE και  $R^2$ , οι τιμές των οποίων υπολογίστηκαν αναφορικά με τη γραμμή  $y=x$ . Το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων (SSE: Sum of Squares due to Error) αποτελεί μέτρηση της απόκλισης της μετρημένης τιμής ( $y_i$ ) από την εκτιμώμενη ( $\hat{y}_i$ ) και προσδιορίζεται από τη Σχέση 7.1. Ο συντελεστής ή δείκτης προσδιορισμού  $R^2$  (coefficient of determination) προσδιορίζεται από τη Σχέση 7.2.

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \hat{y}_i \right)^2 \quad (7.1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{y}_i - \bar{y} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \bar{y} \right)^2} \quad (7.2)$$

όπου  $y_i$ : η μετρημένη τιμή,  $\hat{y}_i$ : η εκτιμώμενη τιμή,  $\bar{y}$  ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών.

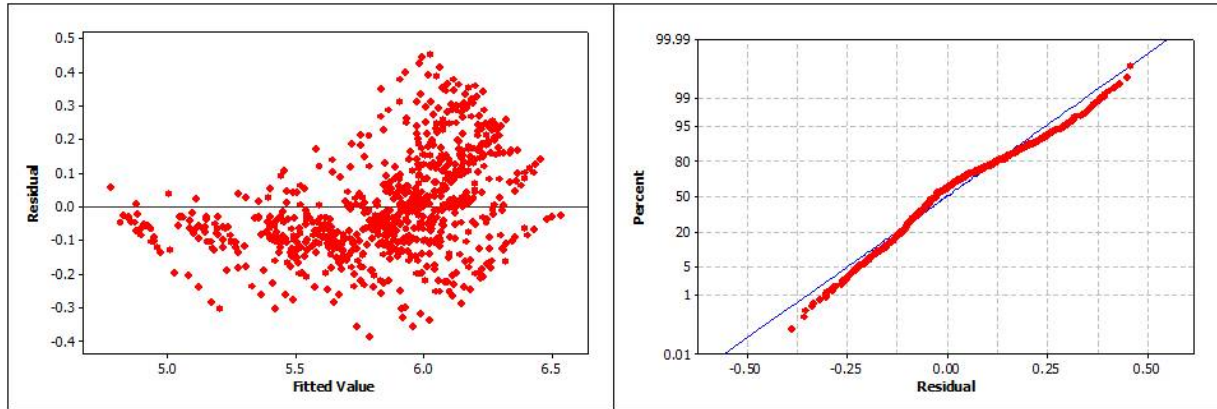
Οι αποκλίσεις των αλγορίθμων αξιολογούνται επίσης μέσω της κλίσης και του σταθερού όρου της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μετρημένων και των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ . Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων. Τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων για τον αλγόριθμο Witczak 1-37A και Bari & Witczak δίνονται τόσο σε λογαριθμική (εφόσον η παράμετρος πρόβλεψης είναι το  $\log E^*$ ) όσο και σε αριθμητική κλίμακα, ενώ για τον αλγόριθμο του Hirsch μόνο σε αριθμητική κλίμακα. Όλες οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε MPa.

**Πίνακας 7.1 Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων των διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  για τα μίγματα κλειστού τύπου**

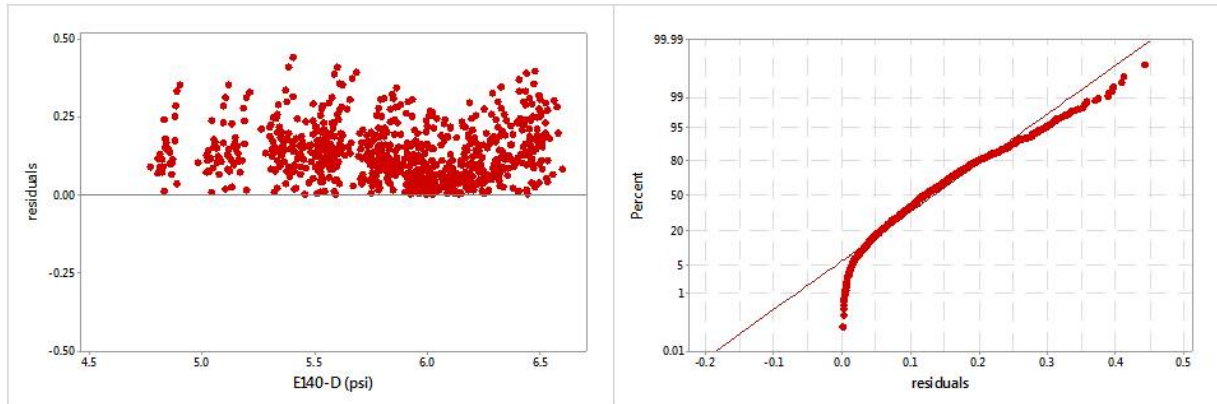
Αλγόριθμος	Witczak 1-37A		Bari & Witczak		Hirsch
	λογαριθμική	αριθμητική	λογαριθμική	αριθμητική	αριθμητική
SSE	19.23	7.63E+09	75	2.37E+10	3.89E+09
$R^2$	0.88	0.73	0.73	0.70	0.74
Κλίση	1.154	1.15	1.558	1.939	0.853
Σταθερός όρος	-0.636	-957.4	-2.082	-2839	-1052

Οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Bari & Witczak αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό (στην αριθμητική κλίμακα) υποδεικνύοντας ότι οι τιμές του  $E^*$  υπερεκτιμούνται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 90%. Ο αλγόριθμος του Hirsch υποεκτιμά τις τιμές του  $E^*$  κατά 15% περίπου. Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A υπερεκτιμά ελάχιστα τις τιμές του  $E^*$ . Η τιμή του  $R^2$  δε διαφέρει σημαντικά μεταξύ των αλγορίθμων και κυμαίνεται από 0.70 έως 0.74 (σε αριθμητική

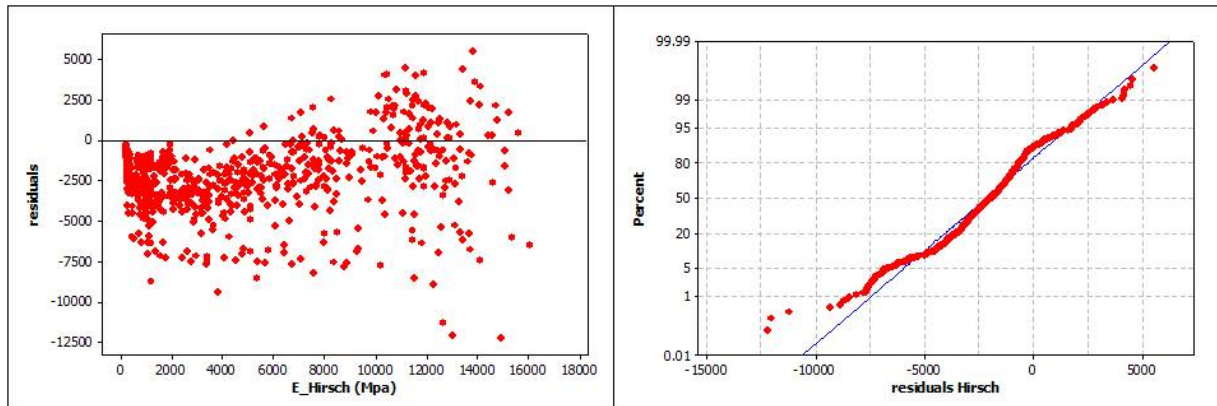
κλίμακα), με τη μεγαλύτερη τιμή να αντιστοιχεί στον αλγόριθμο του Hirsch. Ωστόσο, σε λογαριθμική κλίμακα η τιμή του  $R^2$  είναι μεγαλύτερη για τον αλγόριθμο Witczak 1-37A. Στα Σχήματα 7.2-7.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων (υπόλοιπα σε σχέση με την εκτιμώμενη τιμή του  $E^*$  και το διάγραμμα της κανονικής κατανομής), για τον αλγόριθμο Witczak 1-37A, Bari & Witczak και Hirsch, αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.2 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων Witczak 1-37A, μίγματα κλειστού τύπου**



**Σχήμα 7.3 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων Bari & Witczak, μίγματα κλειστού τύπου**



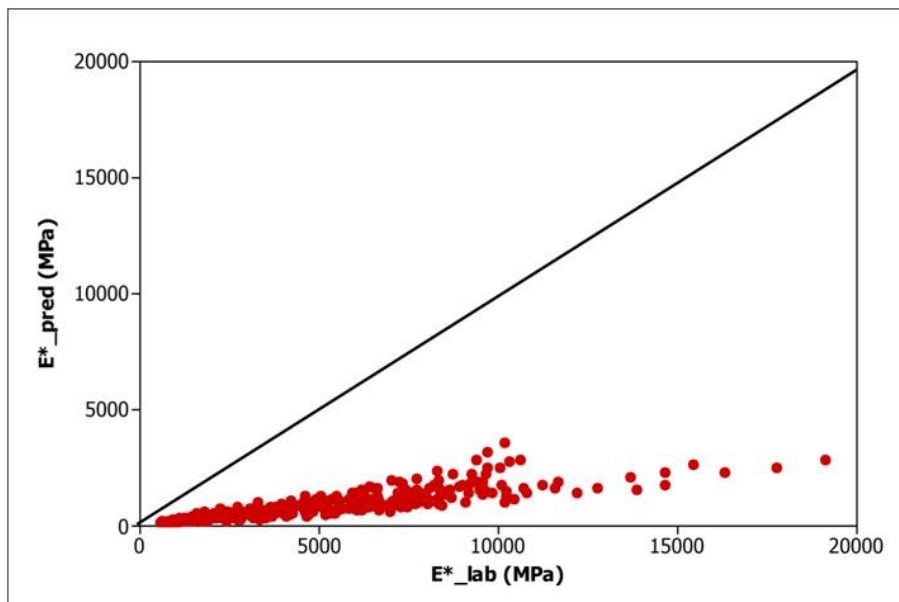
**Σχήμα 7.4 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων Hirsch, μίγματα κλειστού τύπου**

Όσον αφορά στους αλγόριθμους του Witczak 1-37A και Hirsch, η παρατηρούμενη αυξητική τάση της τιμής των υπολοίπων αυξανόμενης της εκτιμώμενης τιμής του  $E^*$  υποδηλώνει ότι η διακύμανση του σφάλματος είναι ευρύτερη για μεγαλύτερες τιμές μέτρου δυσκαμψίας. Επομένως, οι αποκλίσεις στην πλειοψηφία τους αποδίδονται στην εκτίμηση του  $E^*$  σε χαμηλές θερμοκρασίες (άρα υψηλές τιμές του  $E^*$ ). Οι τιμές των υπολοίπων του αλγόριθμου Bari & Witczak βρίσκονται σταθερά πάνω από το μηδέν, υποδεικνύοντας τη μη τυχαιότητα των σφαλμάτων και την παραβίαση της υπόθεσης της σταθερής διακύμανσης των σφαλμάτων.

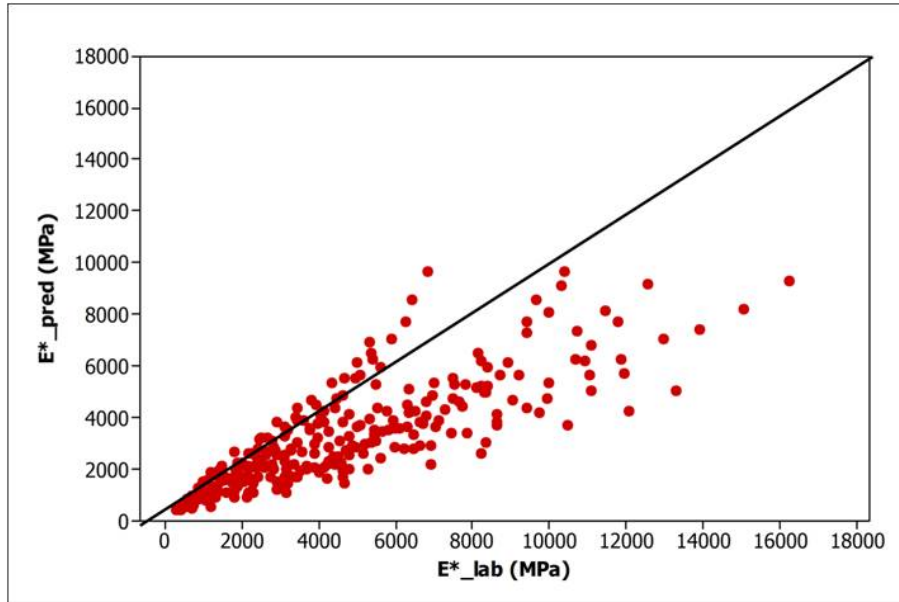
Μέσω του διαγράμματος κανονικής κατανομής ελέγχεται γραφικά η υπόθεση της κανονικότητας των υπολοίπων. Εάν τα σημεία σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή τότε ενισχύεται η υπόθεση ότι τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Τα υπόλοιπα και των τριών αλγορίθμων δεν κατανέμονται κανονικά εφόσον υπάρχουν αρκετά σημεία τα οποία αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή.

## 7.2 Ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου

Στα Σχήματα 7.5-7.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων ( $E^*_{pred}$ ) μέσω του αλγόριθμου εκτίμησης Witczak 1-37A, για τα μίγματα OG\_A και OG\_B, αντίστοιχα. Επίσης, φαίνεται και η γραμμή  $y=x$ .



Σχήμα 7.5 Αξιολόγηση αλγόριθμου Witczak 1-37A (μίγματα ανοικτού τύπου A)



**Σχήμα 7.6 Αξιολόγηση αλγορίθμου Witczak 1-37A (μίγματα ανοικτού τύπου B)**

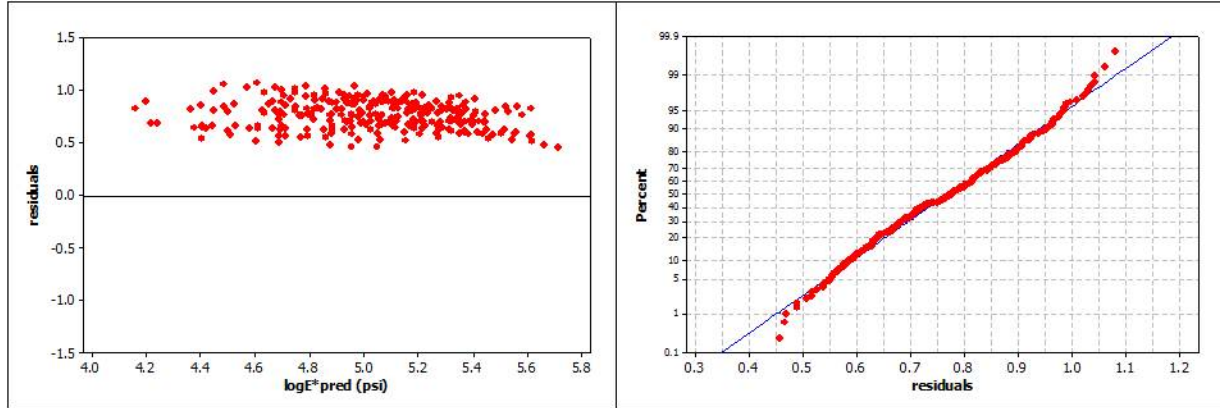
Όσον αφορά στο μίγμα OG\_A, οι τιμές του  $E^*$  που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A συγκεντρώνονται σημαντικά κάτω από τη γραμμή  $y=x$ , υποδεικνύοντας ότι οι τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται σε μεγάλο βαθμό. Οι τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται και για το μίγμα OG\_B αλλά σε χαμηλότερο βαθμό. Ο Πίνακας 7.2 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων καλής προσαρμογής.

**Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων του αλγορίθμου Witczak 1-37A για τα μίγματα ανοικτού τύπου**

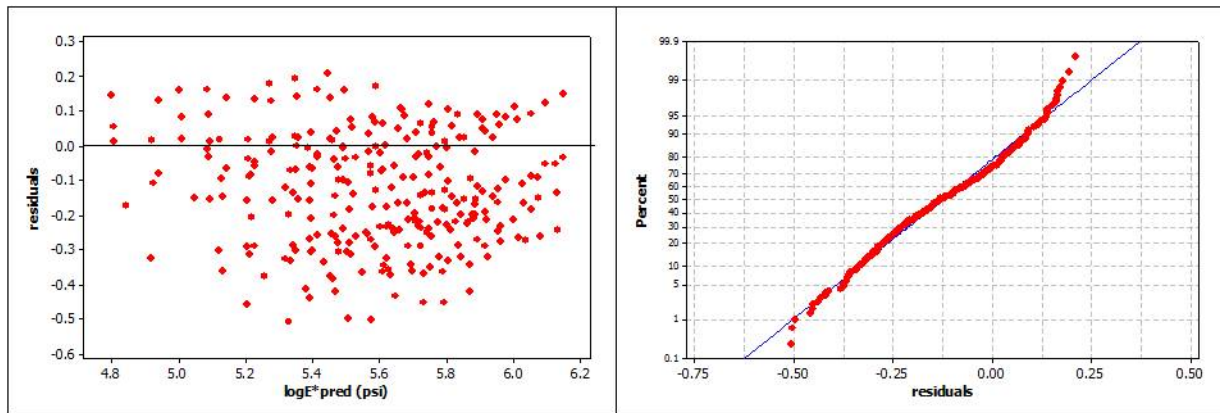
Αλγόριθμος	Witczak 1-37A			
Μίγμα	OG_A		OG_B	
	Λογαριθμική	Αριθμητική	Λογαριθμική	Αριθμητική
SSE	163.64	7.58E+09	11.27	1.49E+09
R <sup>2</sup>	0.83	0.72	0.72	0.636
Κλίση	0.895	0.160	0.751	0.527
Σταθερός όρος	-0.386	67.71	0.756	804.8

Όπως ήταν αναμενόμενο ο αλγόριθμος του Witczak 1-37A παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις στην περίπτωση των μιγμάτων OG\_A. Οι τιμές του  $E^*$  και των δύο μιγμάτων υποεκτιμούνται.

Στα Σχήματα 7.7-7.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων (υπόλοιπα σε σχέση με την εκτιμώμενη τιμή του  $E^*$  και το διάγραμμα της κανονικής κατανομής) του αλγορίθμου Witczak 1-37A, για τα μίγματα OG\_A και OG\_B, αντίστοιχα.



**Σχήμα 7.7 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων Witczak 1-37A, μίγμα ανοικτού τύπου OG\_A**



**Σχήμα 7.8 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων Witczak 1-37A, μίγμα ανοικτού τύπου OG\_B**

Όσον αφορά στο μίγμα OG\_A τα υπόλοιπα συγκεντρώνονται πάνω από το μηδέν και δεν κατανέμονται τυχαία γύρω από αυτό. Ωστόσο, η κατανομή τους μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά κανονική αφού μόνο λίγα σημεία βρίσκονται εκτός της ευθείας γραμμής. Αντιθέτως, όσον αφορά στο μίγμα OG\_B, τα υπόλοιπα κατανέμονται τυχαία γύρω από το μηδέν και παράλληλα οι αποκλίσεις από τη γραμμή της κανονικής κατανομής δεν είναι σημαντικές.

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, διαφαίνεται ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A παρουσιάζει τις μικρότερες αποκλίσεις και σφάλματα στην εκτίμηση του  $E^*$  των μιγμάτων κλειστού τύπου. Αναφορικά με τα μίγματα ανοικτού τύπου παρόλο που οι αποκλίσεις και τα σφάλματα είναι μεγάλα, με βάση το γραφικό έλεγχο των υπολοίπων κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί εάν η προσαρμογή των συντελεστών του αλγορίθμου Witczak 1-37A μπορεί να οδηγήσει σε πιο ακριβή αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, η περαιτέρω διερεύνηση επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων (οι οποίοι βασίζονται σε αυτόν του Witczak 1-37A) για την εκτίμηση του  $E^*$  των μιγμάτων κλειστού και ανοικτού τύπου.

## 8 Ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$

Η διαδικασία ανάπτυξης νέων αλγορίθμων βασίζεται στη μη γραμμική βελτιστοποίηση των παραμέτρων του αλγόριθμου Witczak 1-37A. Κριτήριο σύγκλισης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ των μετρημένων και των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ . Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τον αλγόριθμο εκτίμησης του  $E^*$  δίνεται στη Σχέση 8.1.

$$\log E^* = b_1 + b_2 p_{200} - b_3 (p_{200})^2 - b_4 p_4 - b_5 V_a - b_6 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{b_7 - b_8 p_4 + b_9 p_{38} - b_{10} (p_{38})^2 + b_{11} p_{34}}{1 + \exp(-b_{12} - b_{13} \log(f) - b_{14} \log(\eta))} \quad (8.1)$$

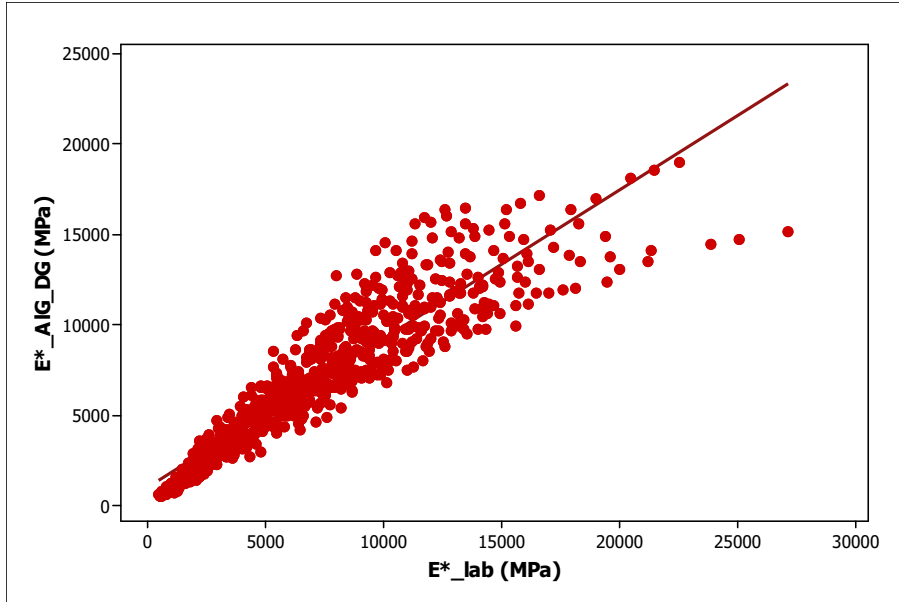
όπου  $E^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi),  $\eta$  το ιξώδες της ασφάλτου ( $10^6$  poise),  $f$  η συχνότητα φόρτισης (Hz),  $V_a$  το ποσοστό των κενών κατ' όγκο ασφαλτομίγματος (%),  $V_{beff}$  το ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ' όγκο ασφαλτομίγματος (%),  $p_{34}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 19 mm (%),  $p_{38}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 9.5 mm (%),  $p_4$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από το κόσκινο οπής 4.75 mm (%),  $p_{200}$  το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο οπής 0.075mm (%).

### 8.1 Ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου

Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων μέσω του νέου αλγόριθμου για τα μίγματα κλειστού τύπου ( $E^*_{AIG\_DG}$ ). Επίσης, στον Πίνακα 8.1 δίνονται οι αρχικές και οι νέες τιμές των συντελεστών  $b$ , ενώ στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων σε λογαριθμική και αριθμητική κλίμακα.

Παρατηρείται ότι η τιμή του SSE είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή του Πίνακα 7.1 και ότι η τιμή του  $R^2$  είναι μεγαλύτερη, υποδεικνύοντας καλύτερη προσαρμογή του νέου αλγόριθμου.

Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων του νέου αλγόριθμου για τα μίγματα κλειστού τύπου.



**Σχήμα 8.1** Διάγραμμα διασποράς  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$

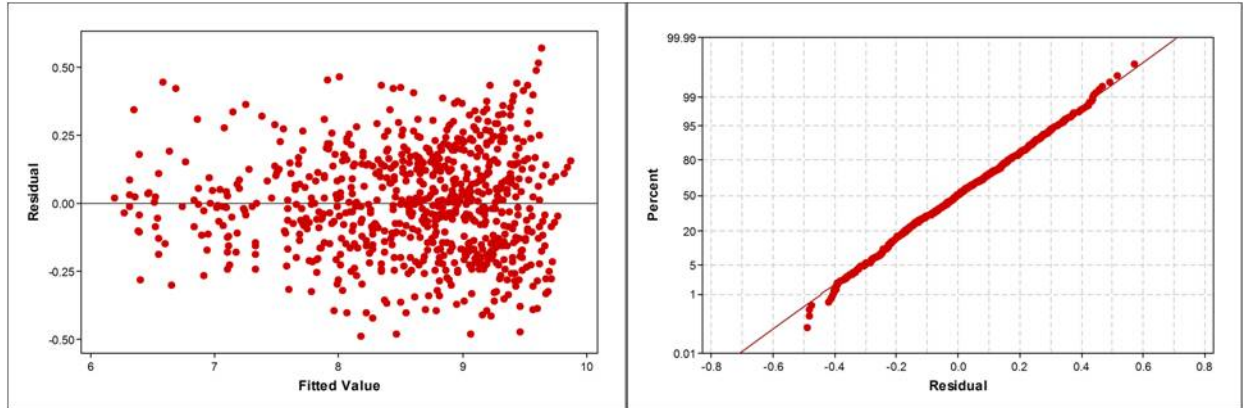
**Πίνακας 8.1** Αρχικές και νέες τιμές των συντελεστών για τα μίγματα κλειστού τύπου

Συντελεστές	Νέες τιμές	Αρχικές τιμές
$b_1$	3.900000	3.750063
$b_2$	0.374370	0.02932
$b_3$	0.029800	0.001767
$b_4$	0.012210	0.002841
$b_5$	0.086860	0.058097
$b_6$	0.942150	0.802208
$b_7$	3.044830	3.871977
$b_8$	0.011240	0.0021
$b_9$	0.002420	0.003958
$b_{10}$	-0.000250	0.000017
$b_{11}$	0.001110	0.00547
$b_{12}$	1.076820	0.603313
$b_{13}$	0.47006	0.31335
$b_{14}$	0.62596	0.393532

**Πίνακας 8.2** Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων του νέου αλγόριθμου για τα μίγματα κλειστού τύπου

Κλίμακα	Λογαριθμική	Αριθμητική
SSE	5.25	2.37E+09
$R^2$	0.94	0.83
Κλίση	0.942	0.822
Σταθερός όρος	0.209	1020





**Σχήμα 8.2 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων νέου αλγόριθμου, μίγματα κλειστού τύπου**

Τα υπόλοιπα θεωρούνται ότι κατανέμονται τυχαία γύρω από το μηδέν και επομένως η υπόθεση της σταθερής διακύμανσης δεν παραβιάζεται. Επίσης, σύμφωνα με το διάγραμμα της κανονικής κατανομής, με εξαίρεση ελάχιστα σημεία, τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή εφόσον είναι πάνω στην ευθεία γραμμή.

Η μαθηματική έκφραση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για τα μίγματα κλειστού (AIG\_DG) τύπου δίνεται από τη Σχέση 8.2.

$$\log E^* = 3.9 + 0.37437 p_{200} - 0.0298(p_{200})^2 - 0.01221 p_4 - 0.08686 V_a - 0.94215 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.04483 - 0.01124 p_4 + 0.00242 p_{38} + 0.00025 (p_{38})^2 + 0.00111 p_{34}}{1 + \exp(-1.07682 - 0.47006 \log(f) - 0.62596 \log(\eta))} \quad (8.2)$$

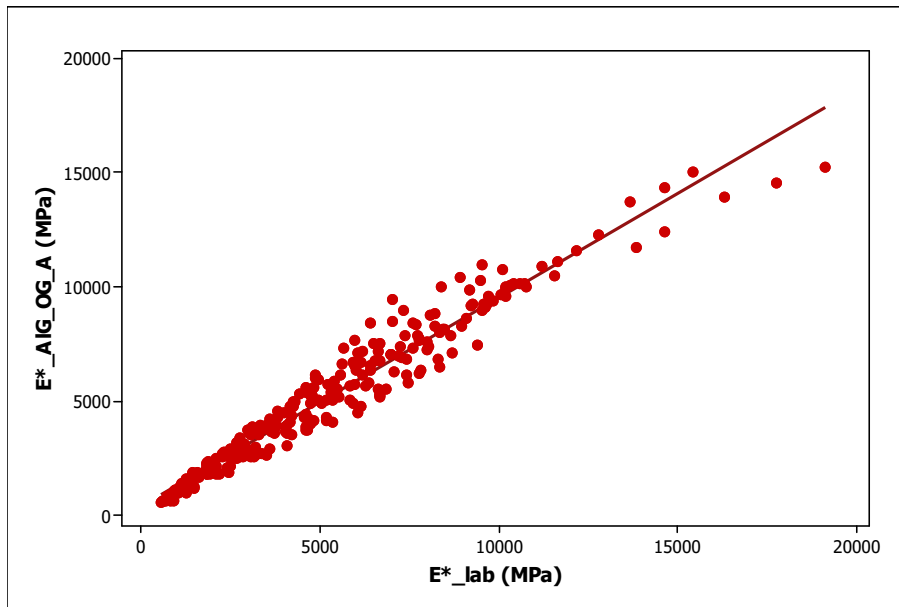
Υπό το πρίσμα των παραπάνω, ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τα μίγματα κλειστού τύπου, είναι ικανός να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια το  $E^*$  των υπόψη μιγμάτων.

## 8.2 Ασφαλτομίγματα ανοικτού τύπου

Όσον αφορά στα μίγματα ανοικτού τύπου διερευνήθηκε η ανάπτυξη δύο αλγορίθμων, ενός για τα μίγματα OG\_A και ενός για τα μίγματα OG\_B. Από την ανάλυση προέκυψε ότι στην περίπτωση των μιγμάτων OG\_B παρόλο που είναι δυνατή η μείωση της τιμής του σφάλματος SSE, οι έλεγχοι των υπολοίπων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ταυτόχρονα παραβιάζονται οι αρχές της σταθερής διακύμανσης και της κανονικότητας των υπολοίπων. Ως εκ τούτου ο αλγόριθμος δε δύναται να βαθμολογηθεί περαιτέρω. Ωστόσο, η τρέχουσα μορφή του αλγορίθμου θεωρείται ότι μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το  $E^*$  των υπόψη μιγμάτων, δεδομένου αφενός ότι η τιμή του SSE είναι σχετικά χαμηλή (Πίνακας 7.2) και αφετέρου ότι από

τα διαγράμματα ελέγχου των σφαλμάτων συνεπάγεται η σταθερή διακύμανση και κανονικότητα των υπολοίπων (Σχήμα 7.8). Επομένως, η ανάπτυξη νέου αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε μόνο για το μίγμα OG\_A.

Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων μέσω του νέου αλγορίθμου για τα μίγματα κλειστού τύπου ( $E^*_{AIG\_OG\_A}$ ). Επίσης, στον Πίνακα 8.3 δίνονται οι αρχικές και οι νέες τιμές των συντελεστών  $b$ , ενώ στον Πίνακα 8.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων σε λογαριθμική και αριθμητική κλίμακα.



Σχήμα 8.3 Διάγραμμα διασποράς  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_OG\_A}$

Πίνακας 8.3 Αρχικές και νέες τιμές των συντελεστών για τα μίγματα OG\_A

Συντελεστές	Νέες τιμές	Αρχικές τιμές
$b_1$	3.5969	3.750063
$b_2$	0.0092	0.02932
$b_3$	0.002	0.001767
$b_4$	0.00272	0.002841
$b_5$	0.03108	0.058097
$b_6$	1.45345	0.802208
$b_7$	3.8837	3.871977
$b_8$	0.0098	0.0021
$b_9$	0.0272	0.003958
$b_{10}$	0.00002	0.000017
$b_{11}$	0.000	0.00547
$b_{12}$	1.06155	0.603313

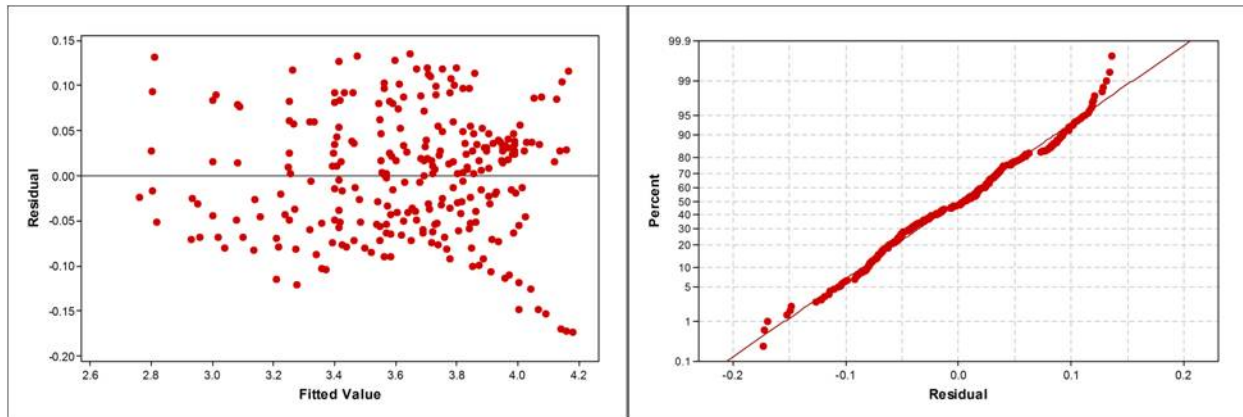
Συντελεστές	Νέες τιμές	Αρχικές τιμές
$b_{13}$	0.33153	0.31335
$b_{14}$	0.70639	0.393532

**Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων του νέου αλγορίθμου για τα μίγματα OG\_A**

Κλίμακα	Λογαριθμική	Αριθμητική
SSE	1.20	3.16E+08
$R^2$	0.96	0.896
Κλίση	0.97	0.95
Σταθερός όρος	0.103	346.5

Παρατηρείται ότι η τιμή του SSE είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή του Πίνακα 7.2 και ότι η τιμή του  $R^2$  είναι μεγαλύτερη, υποδεικνύοντας καλύτερη προσαρμογή του νέου αλγορίθμου.

Στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων του νέου αλγορίθμου για τα μίγματα κλειστού τύπου.



**Σχήμα 8.4 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων νέου αλγορίθμου, μίγματα OG\_A**

Οι αποκλίσεις από την κανονική κατανομή δεν έχουν πλήρως εξαλειφθεί αλλά τα αποκλίνοντα σημεία είναι περιορισμένα και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι η υπόθεση της κανονικότητας δεν παραβιάζεται.

Η μαθηματική έκφραση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για τα μίγματα ανοικτού τύπου (AIG\_OG\_A) δίνεται από τη Σχέση 8.3.

$$\log E^* = 3.5969 + 0.0092 p_{200} - 0.002 (p_{200})^2 - 0.00272 p_4 - 0.03108 V_a - 1.45345 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{3.8837 - 0.0098 p_4 + 0.0272 p_{38} - 0.00002 (p_{38})^2}{1 + \exp(-1.06155 - 0.33153 \log(f) - 0.70639 \log(\eta))} \quad (8.3)$$

Εν κατακλείδι, αναπτύχθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι για την περιγραφή του E\*. Ο ένας αφορά στα μίγματα κλειστού τύπου και ο δεύτερος αφορά στα μίγματα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών αέρα >16%. Η εκτίμηση των τιμών του E\* για τα μίγματα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών αέρα <16% μέσω του αλγόριθμου Witzak 1-37A κρίνεται ικανοποιητική και δύναται να χρησιμοποιηθεί σε θέματα αξιολόγησης, κατηγοριοποίησης, σχεδιασμού μιγμάτων και διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς συνάρτησης για την περιγραφή του E\* των μιγμάτων κλειστού τύπου ήταν αναμενόμενη, καθώς η μορφή των περισσότερων διεθνώς ανεπτυγμένων αλγορίθμων εκτίμησης περιγράφεται μέσω της σιγμοειδούς συνάρτησης και αφορούν σε μίγματα κλειστού τύπου.

Δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι εκτίμησης του E\* που έχουν αναπτυχθεί δεν αφορούν σε μίγματα ανοικτού τύπου, ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι η μορφή της σιγμοειδούς συνάρτησης και οι παράμετροι που θεωρήθηκαν στον νέο αλγόριθμο, είναι κατάλληλα για την εκτίμηση του E\* αυτών των μιγμάτων.

### 8.3 Επαλήθευση νέων αλγορίθμων εκτίμησης

Προκειμένου για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του E\* ακολουθήθηκε η διαδικασία επαλήθευσης αυτών. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ επιπλέον δοκίμια ασφαλτομίγματος, ίδιου τύπου με αυτά που αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο ανάπτυξης της βάσης δεδομένων των νέων αλγορίθμων. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν εννέα δοκίμια ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου και τρία δοκίμια ασφαλτομίγματος ανοικτού τύπου OG\_A. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων καθώς και το ποσοστό της ασφάλτου είναι αντίστοιχη των αρχικών μιγμάτων. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν μέσω της γυροσκοπικής συμπίκνωσης. Το ποσοστό κενών αέρα των δοκιμίων κυμαίνεται εντός του εύρους των κενών των αρχικών δοκιμίων για κάθε κατηγορία μίγματος. Στους Πίνακες 8.5 και 8.6 δίνονται πληροφορίες σχετικά με την ογκομετρική σύσταση των δοκιμίων κλειστού τύπου και ανοικτού τύπου, αντίστοιχα.

**Πίνακας 8.5 Δοκίμια κλειστού τύπου για την επαλήθευση του νέου αλγόριθμου**

Ονομασία	Va	Pb (%)
DG_A_I_4	5.71	4.0
DG_A_II_4	5.40	4.5
DG_A_III_4	4.23	5.0
DG_B_I_4	3.61	4.0

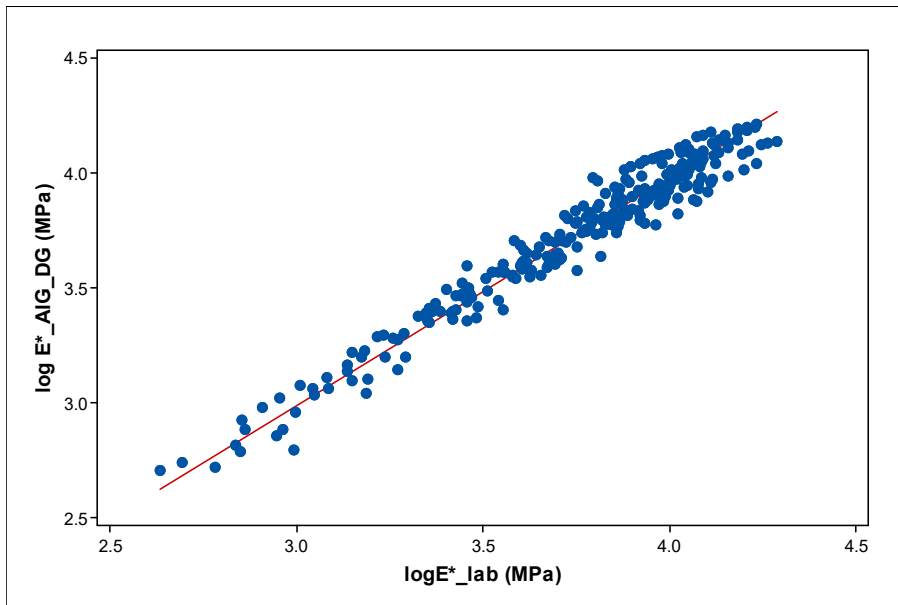
Ονομασία	Va	Pb (%)
DG_B_II_4	6.38	4.5
DG_B_III_4	5.61	5.0
DG_C_I_4	4.93	4.0
DG_C_II_4	3.21	4.5
DG_C_III_4	6.85	5.0

**Πίνακας 8.6 Δοκίμια ανοικτού τύπου για την επαλήθευση του νέου αλγόριθμου**

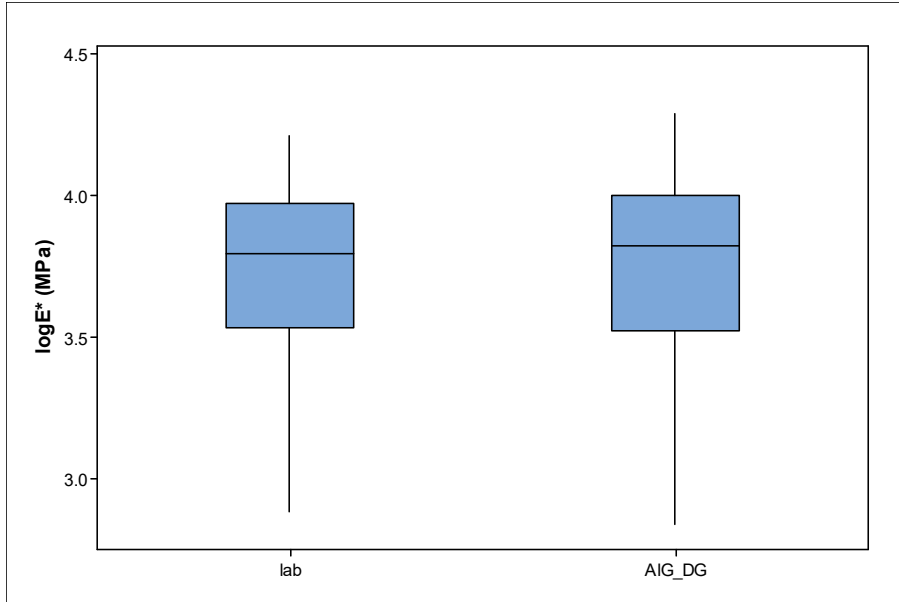
Ονομασία	Va	Pb (%)
OG_A_I_4	17.5	4.0
OG_A_II_4	21.6	4.5
OG_A_III_4	19.6	5.0

Ο προσδιορισμός του  $E^*$  των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ στις ίδιες συνθήκες (θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης) των αρχικών δοκιμίων. Οι ίδιες αυτές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν σαν παράμετροι στους νέους αλγόριθμους.

Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων τιμών ( $E^*_{AIG\_DG}$ ) του  $E^*$  για τα μίγματα κλειστού τύπου, ενώ στο Σχήμα 8.6 το εύρος των μετρημένων και εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ .



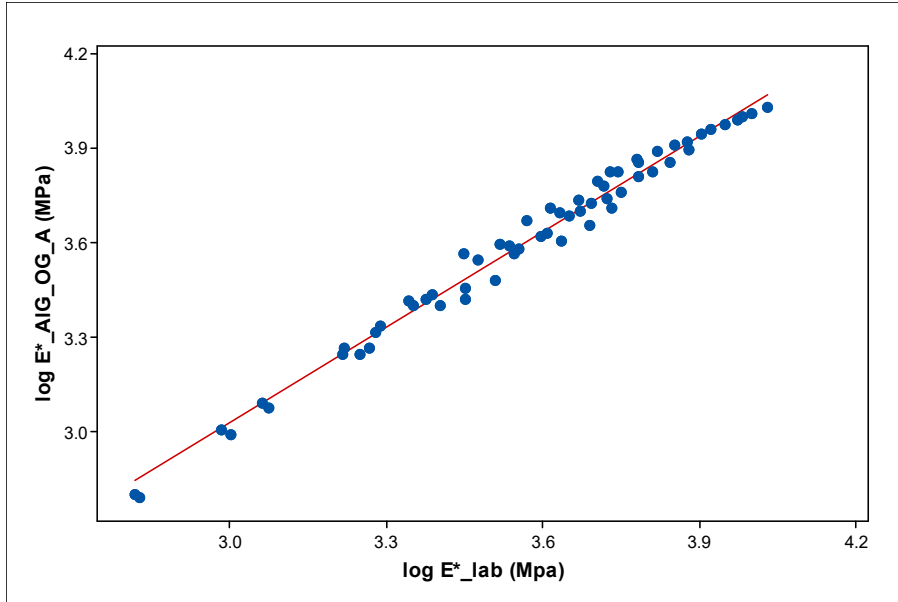
**Σχήμα 8.5 Διάγραμμα διασποράς τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$ , μίγματα κλειστού τύπου**



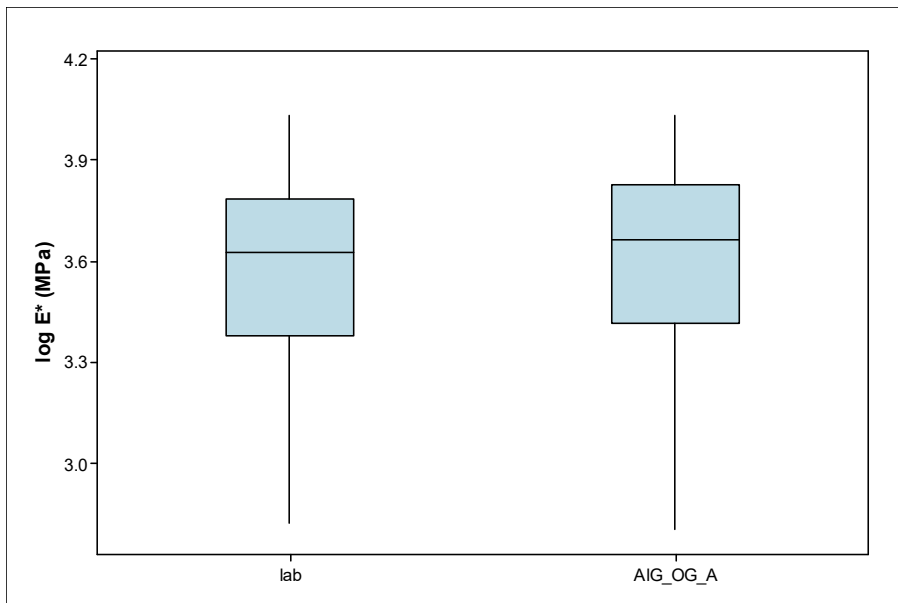
**Σχήμα 8.6** Εύρος τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$ , μίγματα κλειστού τύπου

Θεωρώντας τη γραμμή  $y=x$  η τιμή του σφάλματος SSE είναι 1.52 και του συντελεστή  $R^2$  ίση με 0,95. Η κλίση και ο σταθερός όρος της γραμμικής παλινδρόμησης είναι 0.955 και 0.148, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το Σχήμα 8.6 οι μετρημένες και οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  είναι του ίδιου εύρους και η τιμή της διαμέσου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τα μίγματα κλειστού τύπου πιστεύεται ότι μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια το  $E^*$  των υπόψη μιγμάτων.

Στο Σχήμα 8.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων ( $E^*_{lab}$ ) και εκτιμώμενων ( $E^*_{AIG\_OG\_A}$ ) τιμών του  $E^*$  για τα μίγματα ανοικτού τύπου OG\_A.



**Σχήμα 8.7** Διάγραμμα διασποράς τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_OG\_A}$ , μίγματα ανοικτού τύπου



**Σχήμα 8.8** Εύρος τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_OG\_A}$ , μίγματα ανοικτού τύπου

Η τιμή του SSE και του συντελεστή  $R^2$  είναι 0.14 και 0.99, αντίστοιχα, ενώ η τιμή της κλίσης και του σταθερού όρου διαμορφώνεται στο 1.026 και 0.064, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το Σχήμα 8.8 οι μετρημένες και οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  έχουν το ίδιο εύρος και την ίδια τιμή διαμέσου. Επομένως, πιστεύεται ότι ο νέος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του  $E^*$  των μιγμάτων ανοικτού τύπου (OG\_A) περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των υπόψη μιγμάτων όσον αφορά στο  $E^*$ .

## 9 Αξιολόγηση νέων αλγορίθμων σε ετεροειδή μίγματα

### 9.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση της προσαρμογής των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, σε μίγματα τα οποία δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε. Η σύνθεση των μιγμάτων είναι σύμφωνη με τις ΕΤΕΠ και πιο συγκεκριμένα, τα μίγματα αφορούν σε τέσσερα μίγματα κλειστού τύπου, με κοινή άσφαλο 30-45PEN. Τα υπόψη μίγματα διαφοροποιούνται ως προς το ποσοστό κενών, την κοκκομετρική διαβάθμιση και την προέλευση των αδρανών. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων είναι εντός του εύρους τιμών που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων με εξαίρεση το ποσοστό της παιπάλης, το οποίο είναι μικρότερο της ελάχιστης τιμής. Η παρούσα διερεύνηση αφορά μόνο σε μίγματα κλειστού τύπου, καθώς δεν κατέστη δυνατή η παρασκευή δοκιμίων ανοικτού τύπου διαφορετικής σύνθεσης από τις ήδη θεωρούμενες, λόγω μη διαθεσιμότητας υλικών.

### 9.2 Σύνθεση ασφαλτομιγμάτων και παρασκευή δοκιμίων ασφάλτου 30-45PEN

Στον Πίνακα 9.1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα ΑΣ12.5 με αδρανή Αράξου (ΑΣ12.5\_AR), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 9.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος ΑΣ12.5\_AR**

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %		ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %	
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο	
19	3/4"	100	100	100	0
12,5	1/2"	90	91.8	100	8.2
4,75	No4	42	53.1	74	46.9
2	No10	28	30.5	58	69.5
0,075	No200	2	5.1	10	94.9

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκε ένα ασφαλτόμιγμα με ποσοστό ασφάλτου 4.3% κ.β. ασφαλτομίγματος, το οποίο είναι το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

Στον Πίνακα 9.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα ΑΣ20 με αδρανή Αράξου (ΑΣ20\_AR), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.



**Πίνακας 9.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος AS20\_AR**

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο	
25	1"	100	100	100	0
19	3/4"	90	94.2	100	5.8
9,5	3/8"	56	61.8	80	38.2
4,75	No4	37	43.1	63	56.9
2	No10	23	26.9	49	73.1
0,075	No200	2	4.5	8	95.5

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκε ένα ασφαλτόμιγμα με ποσοστό ασφάλτου 4.2% κ.β. ασφαλτομίγματος, το οποίο είναι το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

Στον Πίνακα 9.3 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα ΑΣ12.5 με αδρανή της περιοχής Αθήκια (AS12.5\_ATH), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 9.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος AS12.5 ATH**

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο	
19	3/4"	100	100	100	0
12.5	1/2"	90	90	100	10
4,75	No4	39	47	70	53
2	No10	25	27	55	73
0,075	No200	1	4	9	96

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκε ένα ασφαλτόμιγμα με ποσοστό ασφάλτου 4.2% κ.β. ασφαλτομίγματος, το οποίο είναι το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

Στον Πίνακα 9.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου μίγμα ΑΣ20 με αδρανή της περιοχής Αθήκια (AS20\_ATH), σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

**Πίνακας 9.4 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος AS20 ATH**

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ %			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ %
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο	
25	1"	100	100	100	0
19	3/4"	90	91	100	0
9.5	3/8"	58	68	81	10
4.75	No4	31	39	61	53
2	No10	21	23	46	73
0.075	No200	1	3.4	7	96

Με βάση την υπόψη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρασκευάστηκε ένα ασφαλτόμιγμα με ποσοστό ασφάλτου 4.0% κ.β. ασφαλτομίγματος, το οποίο είναι το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης.

Ο προσδιορισμός του μέγιστου θεωρητικού φαινόμενου βάρους των χαλαρών ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5.2. Επίσης, για τη συμπύκνωση των δοκιμών ακολουθήθηκε η γυροσκοπική μέθοδος όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.3. Τα δοκίμια ελέγχου που παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.5.

**Πίνακας 9.5 Δοκίμια με άσφαλο 30-45 PEN**

Κωδικοποίηση	P <sub>b</sub> (%)
AS12.5_AR3	4.3
AS12.5_AR4	4.3
AS20_AR4	4.2
AS12.5_ATH_6	4.2
AS20_ATH_5	4.0

Κατόπιν της παρασκευής των δοκιμών προσδιορίστηκε το φαινόμενο ειδικό βάρος ακολουθώντας τη μέθοδο Saturated Surface Dry (SSD) (Κεφάλαιο 5.5.1). Τα κενά αέρα των δοκιμών ασφαλτομίγματος, τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA) και τα κενά που πληρώθηκαν με άσφαλο (VFA) προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τις Σχέσεις 5.4, 5.5 και 5.6, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 9.6 παρουσιάζονται τα στοιχεία ογκομετρικής σύστασης των δοκιμών.

**Πίνακας 9.6 Στοιχεία ογκομετρικής σύστασης δοκιμών**

Δοκίμιο	V <sub>a</sub> (SSD)	VMA	VFA	V <sub>beff</sub>
AS12.5_AR3	3.47	13.6	74.5	10.2
AS12.5_AR4	3.87	14.0	72.4	10.1
AS20_AR4	4.60	14.5	68.3	9.9
AS12.5_ATH_6	4.77	14.7	67.6	10.0
AS20_ATH_5	3.89	13.5	71.2	9.6

### 9.3 Προσδιορισμός $E^*$ στο εργαστήριο δοκιμών ασφάλτου 30-45PEN

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του  $E^*$  των δοκιμών στο εργαστήριο είναι σύμφωνη με το Πρότυπο AASHTO T342-11 "Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)", εκτενής αναφορά στην οποία έχει γίνει στο Κεφάλαιο 3.3. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε πέντε θερμοκρασίες 4, 10, 20, 25 και 37 °C και έξι συχνότητες 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz.

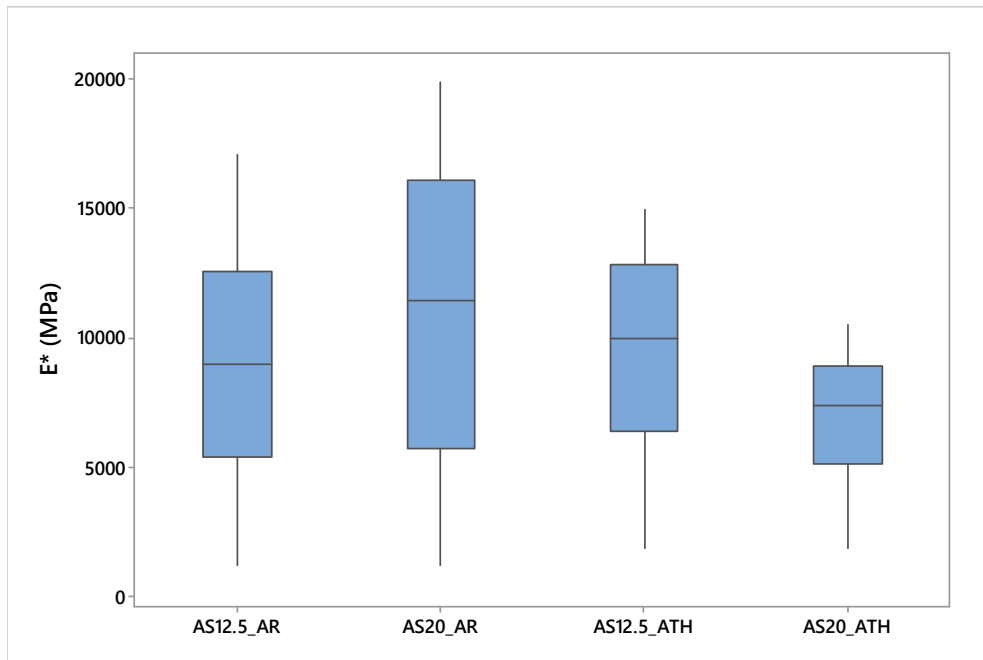
Το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.7, ήταν τέτοιο ώστε το εύρος της ανακτώμενης αξονικής παραμόρφωσης να είναι μεταξύ 50 και 150 microstrain.

**Πίνακας 9.7 Εύρος φορτίου**

	Θερμοκρασία (°C)				
	4	10	20	25	37
Φορτίο (kPa)	800-900	800	500-700	400-650	180-380

Από την παραπάνω πειραματική διαδικασία προέκυψε ένας συνολικός αριθμός 150 σημείων δεδομένων.

Στο Σχήμα 9.1 παρουσιάζονται οι εργαστηριακές τιμές του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) για τα δοκίμια του κάθε ασφαλτομίγματος.



**Σχήμα 9.1  $E^*_{lab}$  δοκιμών με άσφαλο 30-45 PEN**

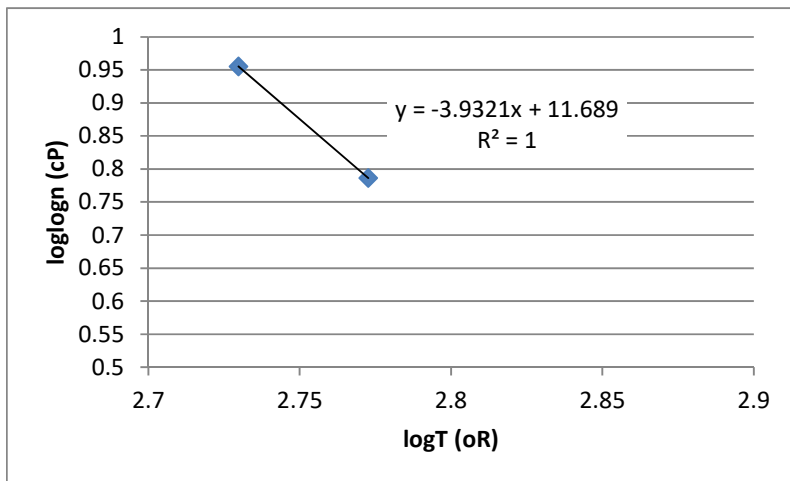
Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος AS12.5\_AR κυμαίνονται από 1216 MPa έως 17125 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 8976 MPa. Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος AS20\_AR κυμαίνονται από 1188 MPa έως 19889 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 11458 MPa. Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος AS12.5\_ATH κυμαίνονται από 1888 MPa έως 14980 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 9991 MPa. Οι τιμές του  $E^*_{lab}$  των δοκιμών του μίγματος AS20\_ATH κυμαίνονται από 1876 MPa έως 10494 MPa και η τιμή της διαμέσου είναι ίση με 7387 MPa.

Γενικά παρατηρείται ότι οι τιμές του  $E^*$  είναι μεγαλύτερες από αυτές των δοκιμών με άσφαλο 50-70PEN που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του νέου αλγόριθμου εκτίμησης των τιμών του  $E^*$  (AIG\_DG). Η μεγαλύτερη δυσκαμψία των υπόψη μιγμάτων ενδεχομένως να οφείλεται στη χρήση της πιο σκληρής ασφάλτου 30-45PEN σαν συνδετικό υλικό.

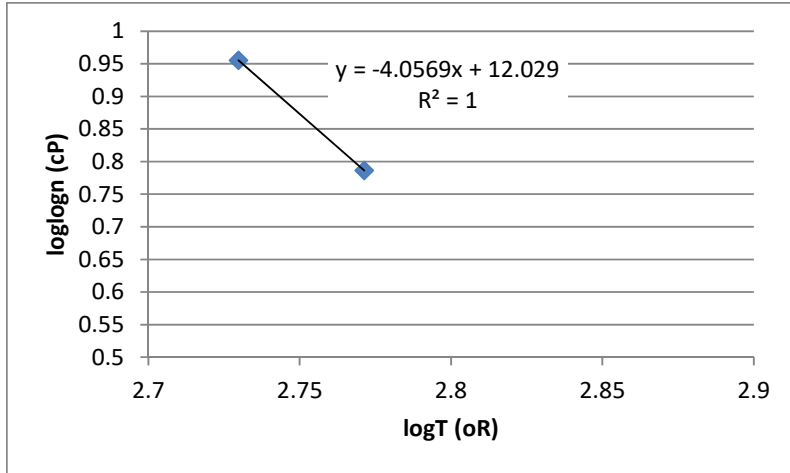
#### 9.4 Εκτίμηση του $E^*$ μέσω του αλγόριθμου AIG\_DG

Η εκτίμηση των τιμών του  $E^*$  πραγματοποιήθηκε μέσω του νέου αλγόριθμου (AIG\_DG) όπως αυτός περιγράφεται στη Σχέση 8.2, για τις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης που πραγματοποιήθηκε η εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού του  $E^*$ .

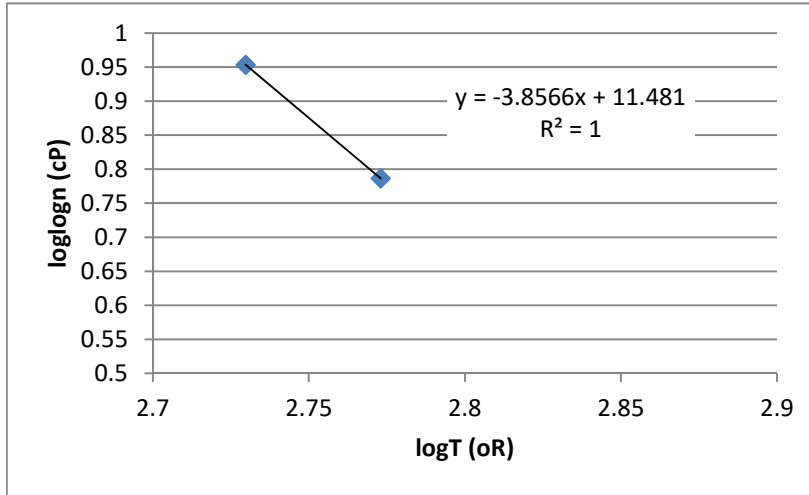
Ο προσδιορισμός των παραμέτρων A και VTS, βασίζεται στα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών της ασφάλτου, όπως η δοκιμή διείσδυσης και η δοκιμή μάλθωσης. Στα Σχήματα 9.2-9.5 παρουσιάζεται η γραμμική παλινδρόμηση του  $\log \log \eta$  με τη θερμοκρασία από όπου προκύπτουν οι παράμετροι A και VTS για κάθε ασφαλτόμιγμα. Στον Πίνακα 9.8 συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων A και VTS.



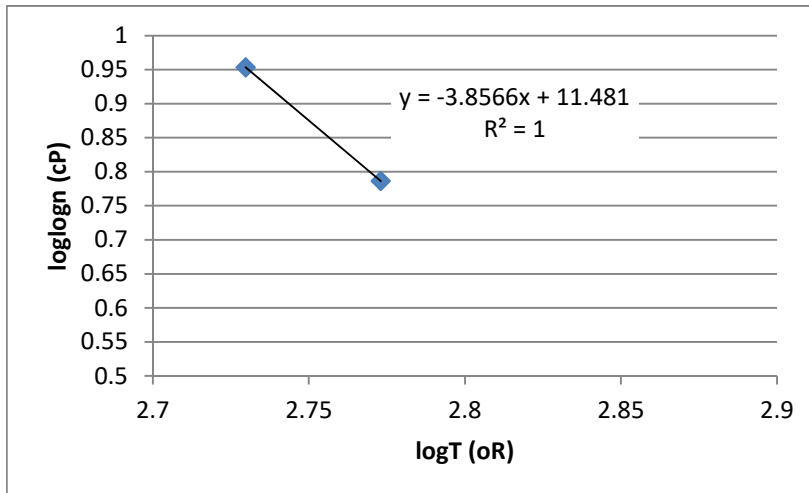
Σχήμα 9.2 Προσδιορισμός παραμέτρων A και VTS, AS12.5\_AR



Σχήμα 9.3 Προσδιορισμός παραμέτρων A και VTS, AS20\_AR



Σχήμα 9.4 Προσδιορισμός παραμέτρων A και VTS, AS12.5\_ATH



Σχήμα 9.5 Προσδιορισμός παραμέτρων A και VTS, AS20\_ATH

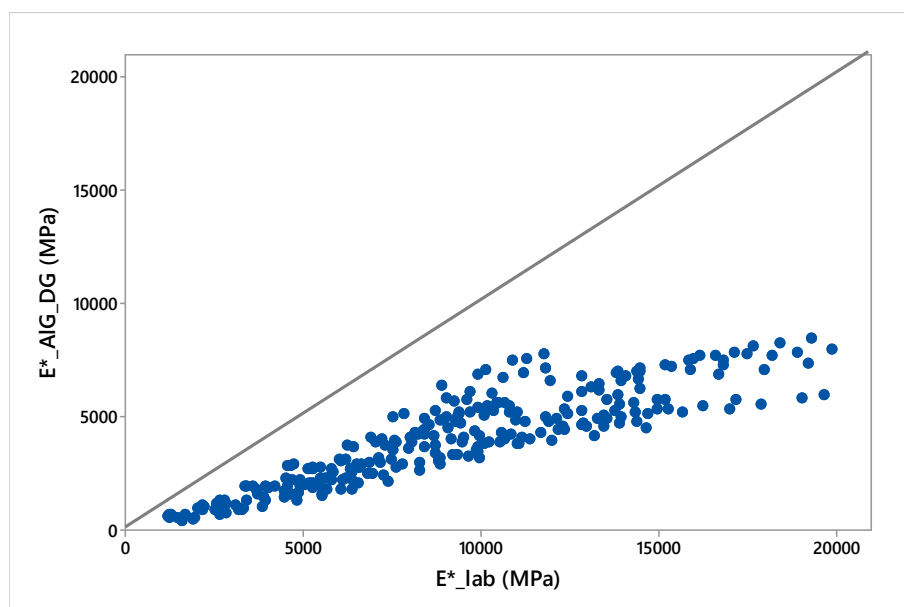
**Πίνακας 9.8 Τιμές παραμέτρων A και VTS**

	AS12.5_AR	AS20_AR	AS12.5_ATH	AS20_ATH
A	11.68	12.02	11.48	11.48
VTS	-3.932	-4.056	-3.856	-3.856

Σημειώνεται ότι παρόλο που πρόκειται για τον ίδιο τύπο ασφάλτου σε όλα τα ασφαλτομίγματα μικρές διαφοροποιήσεις στην τιμή του δείκτη PEN και στη θερμοκρασία μάλθωσης, οδηγούν σε διαφορετικές τιμές των παραμέτρων A και VTS.

## 9.5 Επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων

Ο έλεγχος της προσαρμογής του αλγόριθμου AIG\_DG πραγματοποιήθηκε μέσω διαγραμμάτων διασποράς και στατιστικών ελέγχων. Στο Σχήμα 9.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων ( $E^*_{AIG\_DG}$ ).



**Σχήμα 9.6 Διάγραμμα διασποράς τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$**

Οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο AIG\_DG γενικά συγκεντρώνονται κάτω από τη γραμμή  $y=x$  υποδεικνύοντας ότι οι τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται.

Η ακρίβεια εκτίμησης του  $E^*$  μέσω των υπό διερεύνηση αλγορίθμων προσδιορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων καλής προσαρμογής, SSE και  $R^2$ , οι τιμές των οποίων υπολογίστηκαν αναφορικά με τη γραμμή  $y=x$ . Οι αποκλίσεις των αλγορίθμων αξιολογούνται επίσης μέσω της κλίσης και του σταθερού όρου της γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μετρημένων και των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ . Στον Πίνακα 9.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων, τόσο σε λογαριθμική (εφόσον η παράμετρος

πρόβλεψης είναι το  $\log E^*$ ) όσο και σε αριθμητική κλίμακα. Όλες οι μονάδες είναι εκφρασμένες σε MPa.

**Πίνακας 9.9 Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων του AIG\_DG για μίγματα με τύπο ασφάλτου 30-45PEN**

Κλίμακα	λογαριθμική	αριθμητική
SSE	37.3	9.08E+09
R <sup>2</sup>	0.8784	0.803
Κλίση	1.0068	0.4057
Σταθερός όρος	-0.3905	317.19

Οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο AIG\_DG αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό (στην αριθμητική κλίμακα) υποδεικνύοντας ότι οι μετρημένες τιμές του  $E^*$  υποεκτιμούνται κατά ένα ποσοστό της τάξης του 60%.

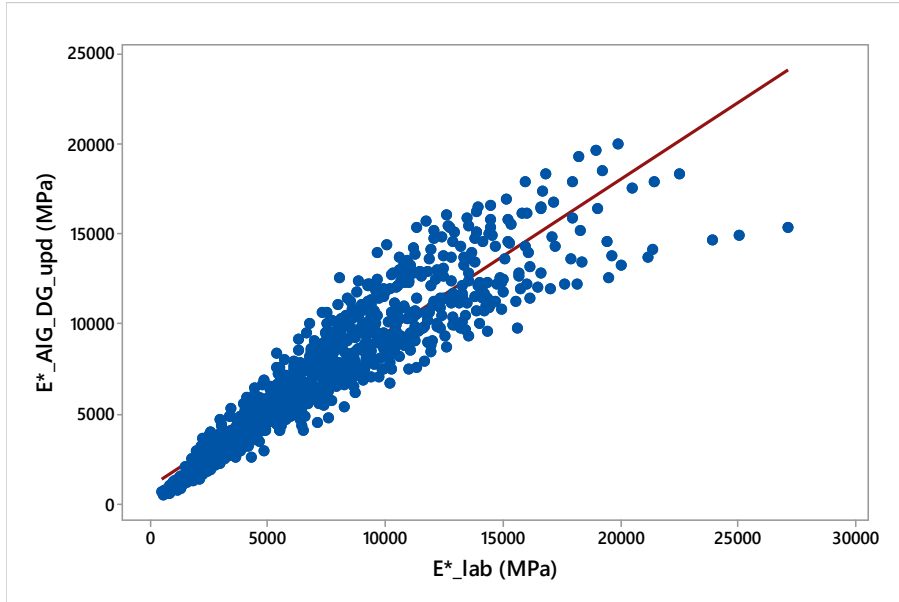
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο αλγόριθμος AIG\_DG δεν μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά των υπό διερεύνηση μιγμάτων όσον αφορά στο  $E^*$ . Υπό το πρίσμα αυτό, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των παραμέτρων εκείνων που συντελούν στη μη καλή προσαρμογή του αλγόριθμου. Σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι παρόλο που ο τύπος της ασφάλτου είναι διαφορετικός μεταξύ των μιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αλγόριθμου AIG\_DG (άσφαλτος 50-70PEN) και των υπό διερεύνηση μιγμάτων (άσφαλτος 30-45PEN), δεν αποτελεί παράμετρο επιρροής της προσαρμογής του αλγόριθμου. Ως παράμετρος επιρροής προσδιορίστηκε το ποσοστό της παιπάλης, το οποίο ήταν εκτός της κατώτερης τιμής που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων ανάπτυξης του AIG\_DG.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω διερεύνηση η οποία αφορά στην επικαιροποίηση της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγόριθμου AIG\_DG, με τα στοιχεία των επιπλέον μιγμάτων με άσφαλο τύπου 30-45PEN. Η επικαιροποιημένη βάση δεδομένων αξιοποιήθηκε στο πλαίσιο της προσαρμογής των παραμέτρων του αλγόριθμου Witczak 1-37A, προκειμένου για την ανάπτυξη νέου αλγόριθμου που να εκτιμά με ικανοποιητικά το  $E^*$  τόσο των αρχικών όσο και των νέων μιγμάτων.

## 9.6 Ανάπτυξη αλγόριθμου AIG\_DG\_upd

Η διαδικασία προσαρμογής των παραμέτρων του αλγόριθμου Witczak 1-37A βασίζεται στη μη γραμμική βελτιστοποίηση των παραμέτρων του. Κριτήριο σύγκλισης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων μεταξύ των μετρημένων και των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ .

Στο Σχήμα 9.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων μέσω του νέου αλγόριθμου ( $E^*_{AIG\_DG\_upd}$ ). Επίσης, στον Πίνακα 9.10 δίνονται οι νέες τιμές των συντελεστών  $b$ , ενώ στον Πίνακα 9.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων σε λογαριθμική και αριθμητική κλίμακα.



**Σχήμα 9.7** Διάγραμμα διασποράς  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG\_upd}$

**Πίνακας 9.10** Τιμές των συντελεστών του βαθμονομημένου αλγορίθμου  $AIG\_DG\_upd$

Συντελεστές	Νέες τιμές
$b_1$	8.103143
$b_2$	-0.830205
$b_3$	-0.057302
$b_4$	0.020984
$b_5$	0.060802
$b_6$	0.477476
$b_7$	6.770358
$b_8$	-0.007630
$b_9$	-0.370509
$b_{10}$	-0.006663
$b_{11}$	-0.034407
$b_{12}$	1.018498
$b_{13}$	0.4966
$b_{14}$	0.648039

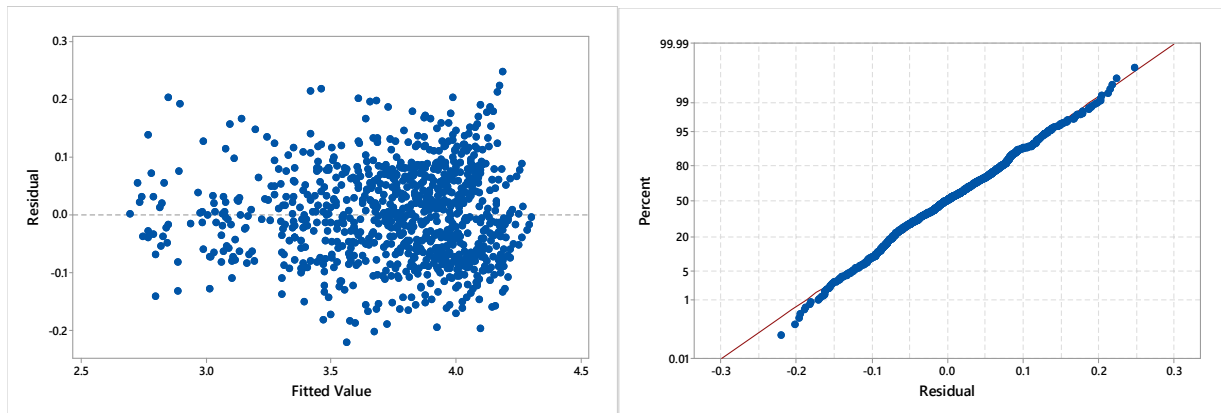


**Πίνακας 9.11 Αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων του βαθμονομημένου αλγορίθμου AIG\_DG\_upd**

Κλίμακα	Λογαριθμική	Αριθμητική
SSE	5.90	2.59E+09
R <sup>2</sup>	0.94	0.85
Κλίση	0.94	0.85
Σταθερός όρος	0.3352	950.52

Παρατηρείται ότι η τιμή του SSE είναι μικρότερη συγκριτικά με αυτή του Πίνακα 9.9 και ότι η τιμή του R<sup>2</sup> είναι μεγαλύτερη, υποδεικνύοντας καλύτερη προσαρμογή του νέου αλγορίθμου.

Στο Σχήμα 9.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων του νέου αλγορίθμου.



**Σχήμα 9.8 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων αλγορίθμου AIG\_DG\_upd**

Τα υπόλοιπα θεωρούνται ότι κατανέμονται τυχαία γύρω από το μηδέν και επομένως η υπόθεση της σταθερής διακύμανσης δεν παραβιάζεται. Επίσης, σύμφωνα με το διάγραμμα της κανονικής κατανομής, με εξαίρεση ελάχιστα σημεία, τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή εφόσον είναι πάνω στην ευθεία γραμμή.

Η μαθηματική έκφραση του βαθμονομημένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε (AIG\_DG\_upd) δίνεται από τη Σχέση 9.1.

$$\log E^* = 8.103 - 0.830 p_{200} + 0.0573 (p_{200})^2 - 0.0209 p_4 - 0.0608 V_a - 0.4774 \left( \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + \frac{6.7703 + 0.00763 p_4 - 0.3705 p_{38} + 0.00663 (p_{38})^2 - 0.0344 p_{34}}{1 + \exp(-1.01849 - 0.4966 \log(f) - 0.6480 \log(\eta))} \quad (9.1)$$

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, διαφαίνεται ότι ο αλγόριθμος AIG\_DG\_upd, είναι ικανός να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια το E\* τόσο των αρχικών μιγμάτων όσο και των νέων με τύπο ασφάλτου 30-45PEN.

## 9.7 Επαλήθευση αλγορίθμου AIG\_DG\_upd

Προκειμένου για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής του αλγορίθμου AIG\_DG\_upd ακολουθήθηκε η διαδικασία επαλήθευσης. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν τα δοκίμια τα οποία είχαν παρασκευαστεί για την επαλήθευση του αλγορίθμου AIG\_DG (Πίνακας 8.5), ενώ παρασκευάστηκαν και νέα δοκίμια ασφαλτομίγματος αντίστοιχης σύνθεσης με αυτά των μιγμάτων με άσφαλτο 30-45PEN (Πίνακας 9.12). Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων καθώς και το ποσοστό της ασφάλτου είναι αντίστοιχη των μιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του βαθμονομημένου αλγορίθμου. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν μέσω της γυροσκοπικής συμπύκνωσης. Το ποσοστό κενών αέρα των δοκιμίων ήταν μεταξύ του εύρους των κενών των αρχικών δοκιμίων για κάθε κατηγορία μίγματος.

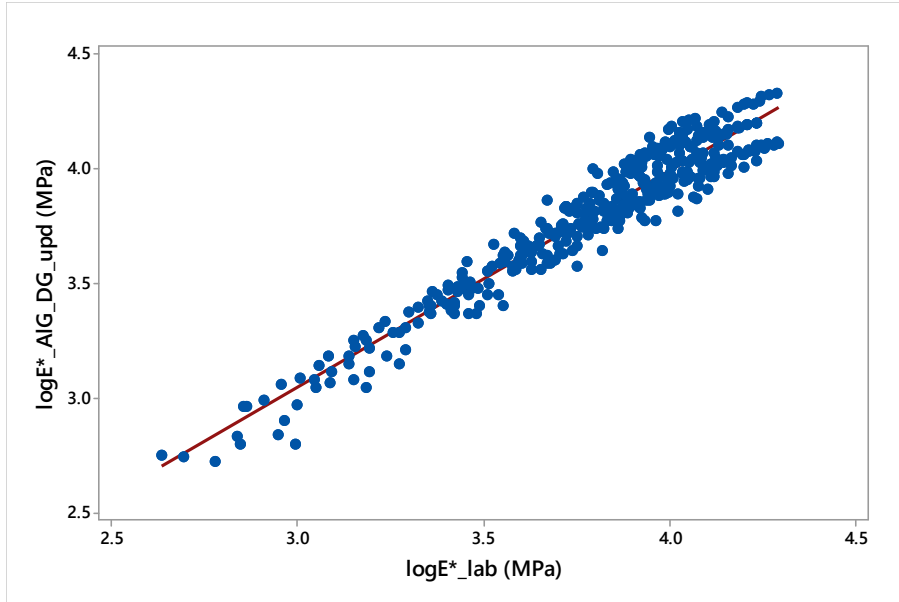
**Πίνακας 9.12 Δοκίμια με τύπο ασφάλτου 30-45PEN για την επαλήθευση του AIG\_DG\_upd**

Όνομασία	Va	Pb (%)
AS12.5_AR5	3.66	4.3
AS20_AR2	3.93	4.2
AS12.5_ATH_5	4.42	4.2
AS20_ATH_4	4.92	4.0

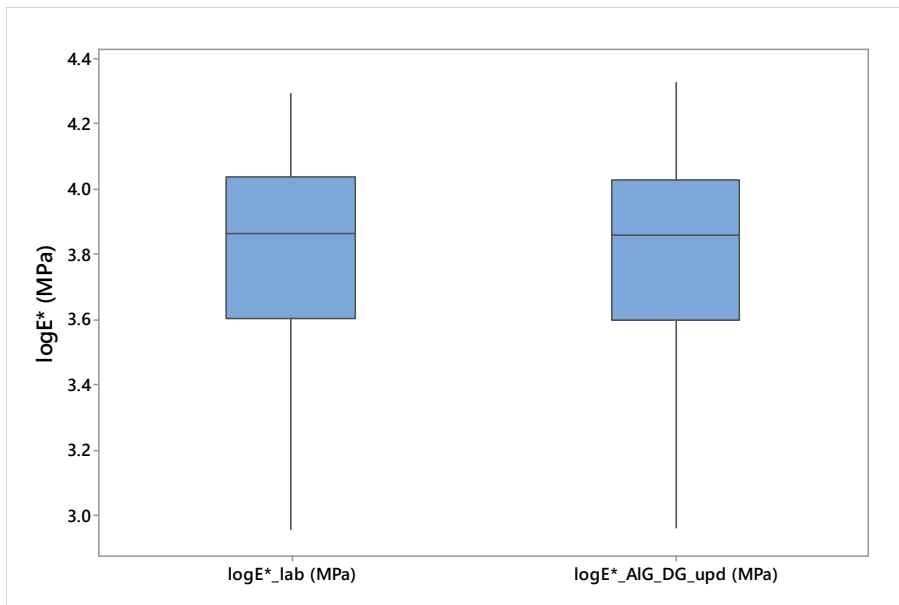
Ο προσδιορισμός του  $E^*$  των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ στις ίδιες συνθήκες (θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης) των αρχικών δοκιμίων.

Στο Σχήμα 9.9 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων τιμών ( $E^*_{AIG\_DG\_upd}$ ) του  $E^*$ , ενώ στο Σχήμα 9.10 το εύρος των μετρημένων και εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ .

Θεωρώντας τη γραμμή  $y=x$  η τιμή του σφάλματος SSE είναι 2.90 και του συντελεστή  $R^2$  ίση με 0.93. Η κλίση και ο σταθερός όρος της γραμμικής παλινδρόμησης είναι 0.943 και 0.21, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το Σχήμα 9.10 οι μετρημένες και οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  είναι του ίδιου εύρους και η τιμή της διαμέσου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.



**Σχήμα 9.9** Διάγραμμα διασποράς τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG\_upd}$



**Σχήμα 9.10** Εύρος τιμών  $E^*_{lab}$  και  $E^*_{AIG\_DG\_upd}$

Συνοπτολογίζοντας όλα τα παραπάνω, ο υπόψη αλγόριθμος που αναπτύχθηκε πιστεύεται ότι μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια το  $E^*$  του συνόλου των υπό διερεύνηση μιγμάτων. Η εκτίμηση των τιμών του  $E^*$  για τα αρχικά μίγματα (με τύπο ασφάλτου 50-70PEN) μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με το νέο αλγόριθμο AIG\_DG όσο και με τον επικαιροποιημένο AIG\_DG\_upd. Ωστόσο, η θεώρηση του αλγορίθμου AIG\_DG ενδεχομένως να οδηγεί σε πιο ακριβή εκτίμηση.

## 10 Εισαγωγή νέων αλγορίθμων στην κόπωση ασφαλτομιγμάτων

### 10.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται διερεύνηση εισαγωγής των νέων αλγορίθμων του  $E^*$  στην εκτίμηση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων που εντάσσεται στις διαδικασίες σχεδιασμού νέου οδοστρώματος, σύμφωνα με μηχανιστικές-εμπειρικές αρχές.

Σύμφωνα με τη νέα μέθοδο AASHTO (MEPDG) (AASHTO 2008), η διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος στηρίζεται σε τρία βασικά στοιχεία: στη θεωρία υπολογισμού των κρίσιμων εντατικών μεγεθών (τάσεις, παραμορφώσεις, ελαστικές υποχωρήσεις), στις διαδικασίες που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και τέλος, στη σχέση μεταξύ της κρίσιμης εντατικής κατάστασης και της παρατηρούμενης φθοράς στο πεδίο.

Το τελικό αποτελέσματα αφορά στην προβλεπόμενη φθορά για ένα καθορισμένο επίπεδο αξιοπιστίας. Επομένως, δεν είναι μια μέθοδος άμεσου υπολογισμού των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος αλλά ένα εργαλείο ανάλυσης που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο μελετητής υπό την έννοια επαναλαμβανόμενων δοκιμών.

Υπό το πρίσμα αυτό, στο πλαίσιο σχεδιασμού ενός εύκαμπτου οδοστρώματος σαν δείκτης συμπεριφοράς (performance indicator) των ασφαλικών στρώσεων ορίζεται το ποσοστό των ρηγματώσεων λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος.

Το επίπεδο αξιοπιστίας ορίζεται ως η πιθανότητα η προβλεπόμενη τιμή του δείκτη συμπεριφοράς (π.χ. το ποσοστό των ρηγματώσεων λόγω κόπωσης) να μην είναι ανώτερη από αυτή που έχει οριστεί σαν όριο για την περίοδο υπολογισμού.

Προκειμένου για την ανάλυση, το  $E^*$  του ασφαλτομίγματος αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτό το ασφαλτόμιγμα δε θεωρείται σαν ένα αμιγώς γραμμικό ελαστικό υλικό. Αντ' αυτού, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της συχνότητας φόρτισης στη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος μέσω του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων και τελικώς το ποσοστό της ρηγματωμένης επιφάνειας του οδοστρώματος (λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος) στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού.

Ανάλογα με το επίπεδο ανάλυσης το  $E^*$  μπορεί είτε να προσδιοριστεί μέσω της εργαστηριακής πειραματικής διάταξης η οποία περιγράφεται στο πρότυπο AASHTO T342-11 "Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)" (και στην οποία έχει γίνει εκτενής αναφορά), είτε μέσω διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης. Παρόλο που πλήθος ερευνών έχει πραγματοποιηθεί με στόχο την αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων και τον προσδιορισμό των αποκλίσεων των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$  και των μετρημένων, η διερεύνηση της επίδρασης των αποκλίσεων αυτών στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων σε διεθνές επίπεδο κρίνεται ανεπαρκής.

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στο παρόν εδάφιο πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  καθώς και αυτού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας έρευνας (AIG\_DG) υπό την έννοια της διερεύνησης της επίδρασης των αποκλίσεων που αυτοί παρουσιάζουν στην εκτίμηση της ρηγγάτωσης λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος σύμφωνα με τη μεθοδολογία του περιγράφεται στον οδηγό MEPDG.

## 10.2 Πειραματική διαδικασία

Προκειμένου για τη διερεύνηση της επίδρασης των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, επιλέχθηκε μια τυπική διατομή ενός νέου εύκαμπτου οδοστρώματος που κατασκευάστηκε στην Ελλάδα (Σχήμα 10.1).

Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα θραυστά αμμοχάλικα σύμφωνα με επιτόπου δοκιμές είναι ίσο με 600 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ίσο με 250 MPa.

Το ασφαλτόμιγμα από το οποίο αποτελούνται οι ασφαλτικές στρώσεις είναι κλειστού τύπου με μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών 19.0 mm. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.1.



Σχήμα 10.1 Διατομή μελέτης οδοστρώματος

**Πίνακας 10.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών ασφαλτομίγματος**

Κόσκινο	Διερχόμενο (%)
5.0 mm (1in)	100
19.0 mm (3/4in.)	90.9
12.5 mm (1/2in.)	71.3
4.75 mm (No. 4)	56.2
2.00 mm (No. 10)	38.5
0.42 mm (No. 40)	17.4
0.18 μm (No. 80)	12.9
75μm (No. 200)	5.5

Για την παραγωγή του ασφαλτομίγματος χρησιμοποιήθηκε κοινή άσφαλτος κατηγορίας 50-70 PEN. Σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης, το ποσοστό της ασφάλτου είναι ίσο με 4.2% κατά βάρος ασφαλτομίγματος, το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου 9.8% κατά όγκο και το ποσοστό κενών αέρα είναι ίσο με 5%.

Από το υπόψη ασφαλτομίγμα παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ τέσσερα δοκίμια ασφαλτομίγματος με γυροσκοπική συμπύκνωση με στόχο κενών αέρα το 5%. Ο προσδιορισμός του  $E^*$  του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11 "Determination of Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)" και οι τιμές του  $E^*$  που θεωρήθηκαν για την περαιτέρω ανάλυση είναι αυτές που προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών του  $E^*$  των τεσσάρων δοκιμών. Η εκτίμηση του  $E^*$  πραγματοποιήθηκε μέσω των αλγορίθμων πρόβλεψης εκτίμησης 1-37A (Σχέση 4.13), Hirsch (Σχέση 4.17), Bari & Witczak (Σχέση 4.19), Witczak 1-40D (Σχέση 4.26) και του νέου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, AIG\_DG (Σχέση 8.2). Ο

προσδιορισμός και η εκτίμηση του  $E^*$  πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37 °C και σε συχνότητες 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz.

Το ιξώδες της ασφάλτου το οποίο αποτελεί παράμετρο των αλγορίθμων Witczak 1-37A και του νέου υπολογίστηκε μέσω της Σχέσης 4.11. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $A$  και  $VTS$  πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών του ιξώδους της ασφάλτου, όπως η δοκιμή εισόδου στους 25 °C, το σημείο μάλθωσης και το κινηματικό ιξώδες στους 135 °C, σύμφωνα με τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο (Κεφ. 6.2). Η τιμή των παραμέτρων  $A$  και  $VTS$  της Σχέσης 4.11 είναι ίση με 12.433 και -4.213, αντίστοιχα. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων  $|G^*_b|$  και  $\delta$  των αλγορίθμων Bari & Witczak και Hirsch πραγματοποιήθηκε μέσω των Σχέσεων 4.20-4.21, ενώ του αλγορίθμου Witczak 1-40D μέσω των Σχέσεων 4.27-4.28.

### 10.3 Παράμετροι σχεδιασμού

Προκειμένου για τη δυναμική ανάλυση της υπό διερεύνηση διατομής οδοστρώματος και την εκτίμηση του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού, καθορίστηκαν επιπλέον οι ακόλουθες παράμετροι σχεδιασμού:

- Το φορτίο σχεδιασμού και η κατανομή της πίεσης
- Κυκλοφοριακός φόρτος
- Η περίοδος σχεδιασμού
- Η ταχύτητα σχεδιασμού
- Η θερμοκρασία σχεδιασμού

Φορτίο σχεδιασμού επιλέχθηκε το τυπικό αξονικό φορτίο που ορίζεται ως το μονοαξονικό φορτίο  $8t$  επί διπλών τροχών (Σχήμα 10.2).

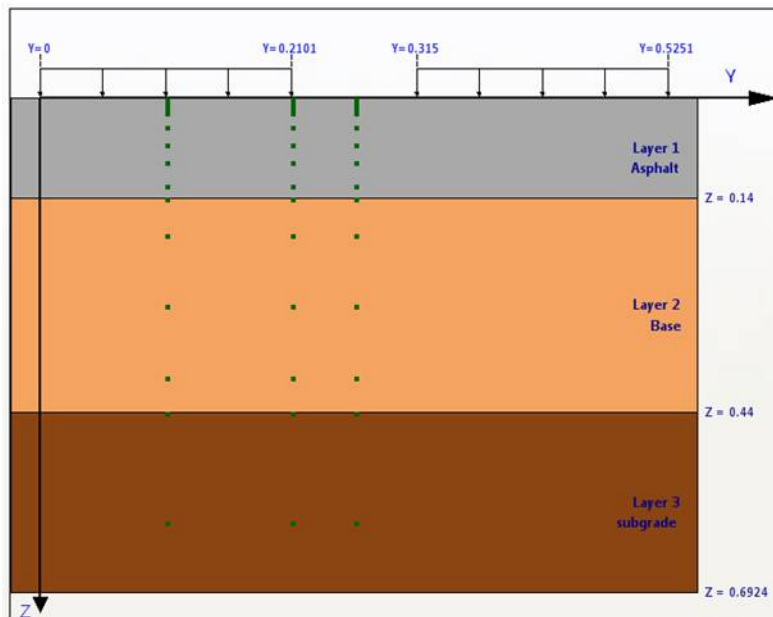


**Σχήμα 10.2** Τυπικό αξονικό φορτίο

Η γεωμετρία της περιοχής φόρτισης θεωρείται κυκλική, με το φορτίο του ενός τροχού ίσο με 20 kN και πίεση ελαστικού 577 kPa. Η ακτίνα του κυκλικού φορτίου είναι ίση με 0.105 m και η απόσταση από το κέντρο του ενός ελαστικού μέχρι το κέντρο του άλλου ελαστικού του ίδιου άξονα είναι ίση με 0.315 m.

Η κυκλοφορία του υπόψη οδικού τμήματος για περίοδο σχεδιασμού τα 20 έτη εκφρασμένη σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ESALs: Equivalent Single Axle Loads) θεωρήθηκε ίση με  $2.5E+07$  διελεύσεις. Η ταχύτητα σχεδιασμού, απαραίτητη για τη δυναμική ανάλυση, θεωρήθηκε ίση με 60 km/h αντιπροσωπευτική της ταχύτητα κίνησης των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού. Η θερμοκρασία σχεδιασμού, η οποία αφορά στη θερμοκρασία αναφοράς της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ , θεωρήθηκε ίση με 25 °C.

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός του οδοστρώματος της υπόψη διατομής πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό 3D-Move το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Νεβάδα (Siddhant et al. 2000). Οι επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος θεωρούνται ως συνεχές μέσο και αξιοποιείται η τεχνική μετασχηματισμού του Fourier. Στο Σχήμα 10.3 παρουσιάζεται γραφική απεικόνιση του στατικού πρότυπου που προέκυψε καθώς και των σημείων όπου υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.



**Σχήμα 10.3 Στατικό πρότυπο και σημεία απόκρισης**

Δεδομένου ότι η παρούσα διερεύνηση επικεντρώνεται στις ασφαλτικές στρώσεις και πιο συγκεκριμένα στις ρωγμές που ξεκινούν από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και εξελίσσονται προς τα πάνω (bottom-up cracking), τα εντατικά μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτά που αναπτύσσονται σε βάθος  $Z=0.14$  m.



## 10.4 Ανάλυση κόπωσης ασφαλτομίγματος

Στο πλαίσιο της ανάλυσης της κόπωσης του ασφαλτομίγματος, ο υπολογισμός του αριθμού των επιτρεπόμενων διελεύσεων αξόνων πραγματοποιείται μέσω της Σχέσης 10.1

$$N_{f-HMA} = 0.00432k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA}^*)^{k_{f3}\beta_{f3}} \quad (10.1)$$

όπου  $N_{f-HMA}$  ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων αξόνων,  $\varepsilon_t$  η εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (in./in.),  $E_{HMA}^*$  το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (psi),  $k_{f1}$ ,  $k_{f2}$ ,  $k_{f3}$  παγκόσμιοι παράμετροι βαθμονόμησης πεδίου ( $k_{f1}=1$ ,  $k_{f2}=-3.9492$ ,  $k_{f3}=-1.281$ ),  $\beta_{f1}$ ,  $\beta_{f2}$ ,  $\beta_{f3}$  συντελεστές βαθμονόμησης εκάστοτε μίγματος ή τοπικών συνθηκών (για παγκόσμια προσαρμογή λαμβάνεται τιμή ίση με τη μονάδα).

$$C = 10^M \quad (10.2)$$

$$M = 4.84 \left( \frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} - 0.69 \right) \quad (10.3)$$

όπου  $V_{beff}$  το ενεργό ποσοστό της ασφάλτου κατά όγκο (%),  $V_a$  το ποσοστό κενών αέρα του ασφαλτομίγματος (%),  $C_H$  διορθωτικός συντελεστής πάχους

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + \exp(11.02 - 3.49H_{HMA})}} \quad (10.4)$$

όπου  $H_{HMA}$  συνολικό πάχος του ασφαλτομίγματος (in).

Κατόπιν του υπολογισμού του αριθμού των επιτρεπόμενων διελεύσεων αξόνων, προσδιορίζεται ο δείκτης φθοράς (DI) μέσω της Σχέσης 10.5.

$$DI = \left( \frac{n}{N_{f-HMA}} \right) \quad (10.5)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των προβλεπόμενων διελεύσεων αξόνων κατά την περίοδο σχεδιασμού (ESALs).

Στη συνέχεια μέσω κατάλληλης εξίσωσης (Σχέση 10.6) τα δεδομένα του δείκτη φθοράς μετατρέπονται και εκφράζονται σε όρους ρηγματώσης λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος.

$$FC_{bottom} = 0.18 \left( \frac{C_3}{1 + \exp(C_1 C_2^* + C_2 C_2^* \log(DI \times 100))} \right) \quad (10.6)$$

όπου  $FC_{bottom}$  η έκταση ρηγματώσεων που ξεκινούν από τον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (% του συνολικού εμβαδού της λωρίδας),  $DI$  ο δείκτης φθοράς στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων,  $C_1, 2, 3$  συντελεστές παλινδρόμησης;  $C_3=6000$ ;  $C_1= 1.00$ ;  $C_2= 1.00$ ,

$$C_1 = -2C_2 \quad (10.7)$$

$$C_2 = -2.40874 - 39.748(1 + 39.370H_{HMA})^{-2.886} \quad (10.8)$$

όπου  $H_{HMA}$  το συνολικό πάχος του ασφαλτομίγματος (in).

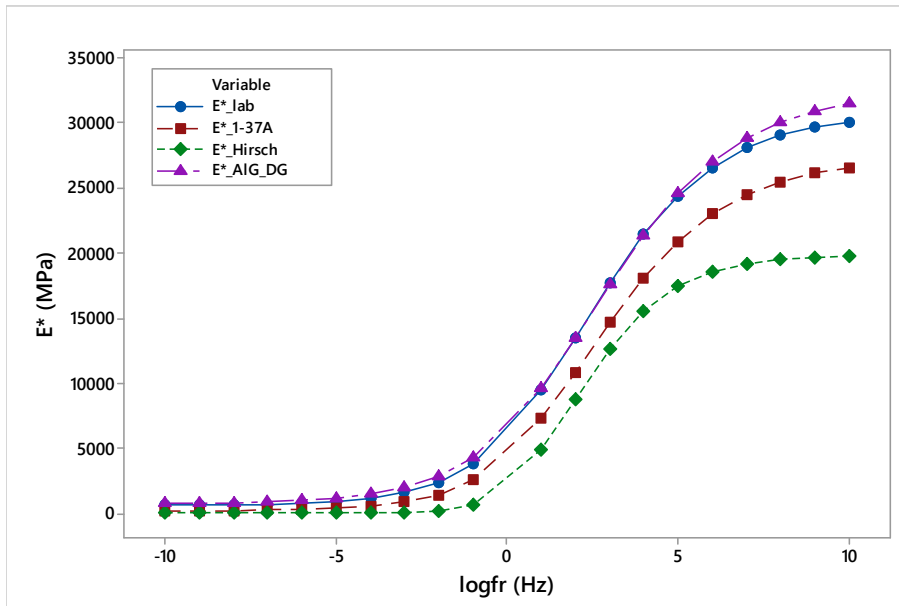
## 10.5 Ανάλυση στοιχείων και συγκριτική αξιολόγηση

Οι τιμές του  $E^*$  που προέκυψαν από τον αλγόριθμο Bari & Witczak (Σχέση 4.19) είναι ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός που οδήγησε στη μη δυνατότητα περαιτέρω θεώρησης αυτών των τιμών στην ανάλυση με το λογισμικό 3-DMove. Από την εκτίμηση των παραμέτρων  $G_b^*$  and  $\delta_b$  του αλγόριθμου Witczak 1-40D μέσω των Σχέσεων 4.27-4.28, προέκυψαν ασυνήθιστα χαμηλές τιμές. Κατά επέκταση και οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  με βάση τον υπόψη αλγόριθμο κυμάνθηκαν σε σημαντικά χαμηλές τιμές. Επομένως, προκειμένου για την περαιτέρω ανάλυση οι αλγόριθμοι που τελικώς θεωρήθηκαν είναι οι Witczak 1-37A, Hirsch και AIG\_DG.

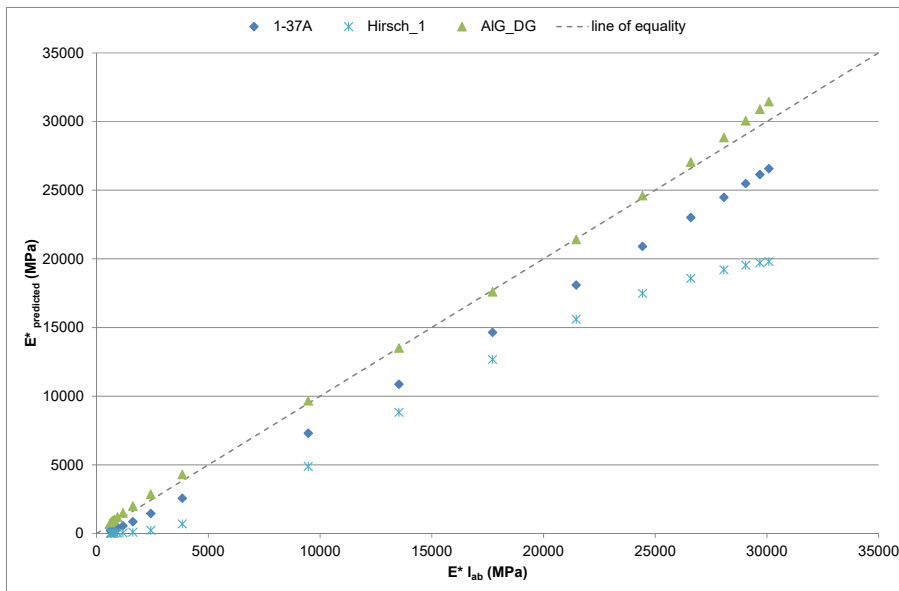
Στο Σχήμα 10.4 παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση των μετρημένων τιμών του  $E^*$  ( $E^*_{lab}$ ) και των εκτιμώμενων ( $E^*_{1-37A}$ ,  $E^*_{Hirsch}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$ ) μέσω των κεντρικών καμπυλών που προέκυψαν.

Οι μετρημένες τιμές  $E^*_{lab}$  υποεκτιμώνται από του αλγόριθμους Witczak 1-37A και Hirsch, καθώς οι τιμές τους ( $E^*_{1-37A}$  και  $E^*_{Hirsch}$ ) είναι μικρότερες των μετρημένων. Αντιθέτως, οι τιμές που προέκυψαν από το νέο αλγόριθμο ( $E^*_{AIG\_DG}$ ) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις μετρημένες.

Στο Σχήμα 10.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων και των εκτιμώμενων τιμών του  $E^*$ . Επίσης, φαίνεται και η γραμμή της εξίσωσης  $y=x$ . Για την ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων που παρατηρούνται, υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error) εκφρασμένη σε ποσοστό.



Σχήμα 10.4 Κεντρικές καμπύλες  $E^*$  (master curves)

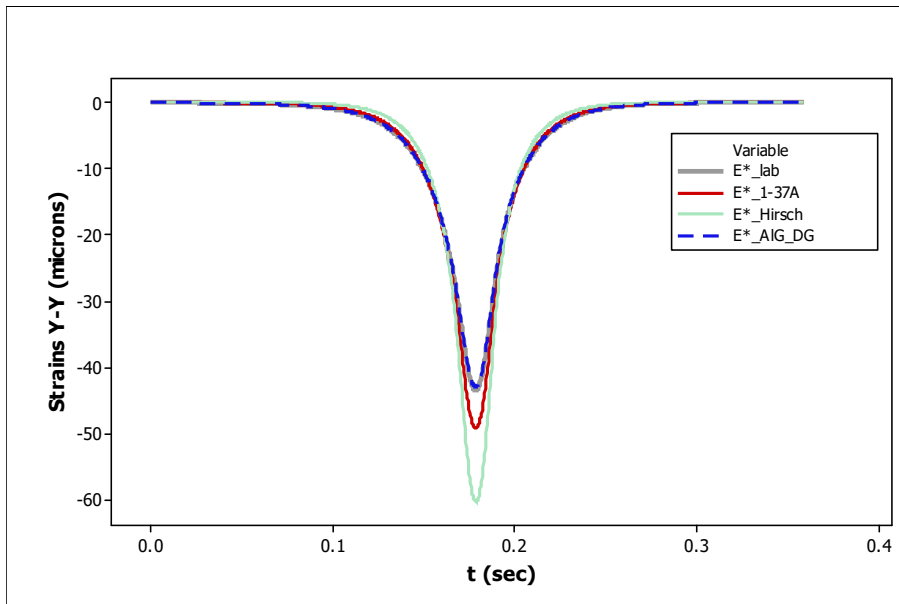


Σχήμα 10.5 Συγκριτική αξιολόγηση μετρημένων και εκτιμώμενων τιμών  $E^*$

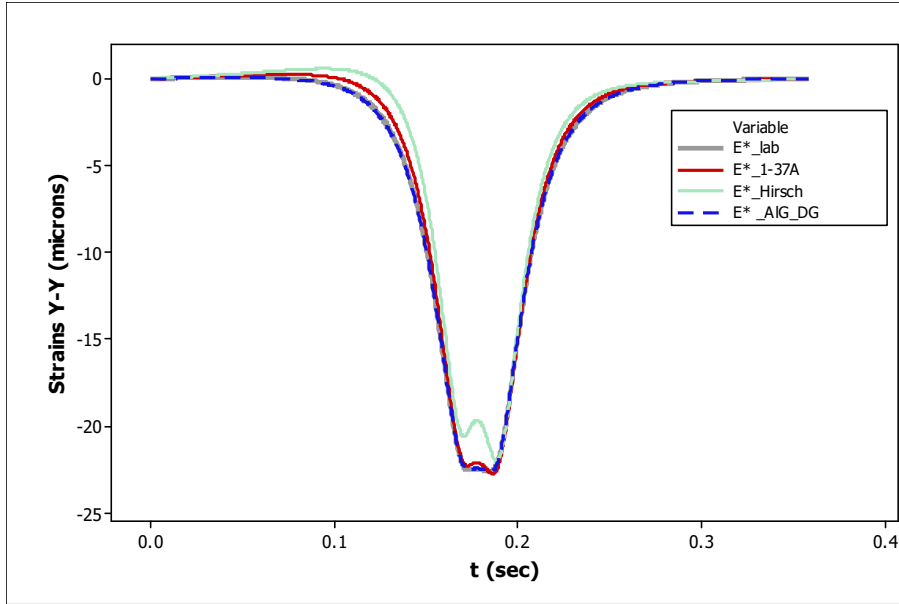
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 10.5 οι τιμές  $E^*_{AIG\_DG}$  αποκλίνουν λιγότερο από τις  $E^*_{lab}$  και η τιμή του RMSE διαμορφώνεται στο 18%. Οι τιμές  $E^*_{1-37A}$  και  $E^*_{Hirsch}$  είναι μικρότερες από τις  $E^*_{lab}$  και η τιμή του RMSE διαμορφώνεται στο 41% και 71%, αντίστοιχα.

Προκειμένου για τη διερεύνηση της επίδρασης των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι του  $E^*$  στο ποσοστό των ρηγματώσεων, αρχικά υπολογίστηκε η κρίσιμη παραμόρφωση (εφελκυστική) στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και η συνέχεια το ποσοστό των ρηγματώσεων μέσω των Σχέσεων 10.1-10.8, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μετρημένες όσο και τις εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$ .

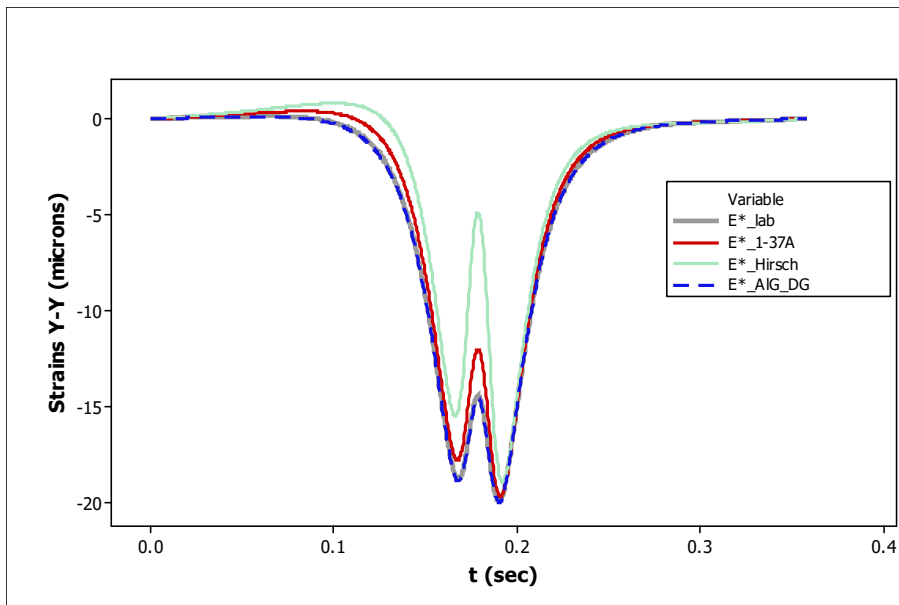
Στα Σχήματα 10.6-10.8 παρουσιάζεται η κατανομή της εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων υπό την επίδραση δυναμικού φορτίου με ταχύτητα κίνησης 60 km/h, στο κέντρο του φορτίου τροχού ( $y=0.150m$ ), στην άκρη του φορτίου τροχού ( $y=0.21m$ ) και στο ενδιάμεσο των τροχών ( $y=0.2625m$ ), αντίστοιχα.



Σχήμα 10.6 Κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο κέντρο του φορτίου τροχού ( $y=0.150m$ )



**Σχήμα 10.7 Κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στην άκρη του φορτίου τροχού ( $\gamma=0.210m$ )**



**Σχήμα 10.8 Κατανομή εφελκυστικής παραμόρφωσης στο ενδιάμεσο των τροχών ( $\gamma=0.2625m$ )**

Σύμφωνα με τα παραπάνω Σχήματα, η δυσμενέστερη φόρτιση όπου οι παραμορφώσεις έχουν τη μεγαλύτερη τιμή, είναι αυτή που αναπτύσσεται στο κέντρο του φορτίου. Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης αναπτύσσεται σε χρόνο 0.17857 sec. Σε εκείνη τη χρονική στιγμή, η τιμή της παραμόρφωσης υπερεκτιμάται κατά 13.4% και 34.5%, με βάση τις τιμές E\*\_1-37A και E\*\_Hirsch. Αντιθέτως, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές E\*\_AIG\_DG η μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης συγκλίνει στη υπολογισμένη καθώς υποεκτιμάται κατά 1%.

Στον Πίνακα 10.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη φθοράς (DI) και του ποσοστού των ρηγματώσεων ( $FC_{bottom}$ ) για επίπεδο αξιοπιστίας 95%, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές  $E^*_{lab}$ ,  $E^*_{1-37A}$  και  $E^*_{AIG\_DG}$ .

**Πίνακας 10.2 DI και  $FC_{bottom}$**

	$E^*_{lab}$	$E^*_{1-37A}$	$E^*_{Hirsch}$	$E^*_{AIG\_DG}$
DI (%)	5.80	6.80	7.18	5.81
$FC_{bottom}$ (%)	18.95	20.45	20.98	18.97

Το  $FC_{bottom}$  υπερεκτιμάται περίπου κατά 8% και 11% λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές  $E^*_{1-37A}$  και  $E^*_{Hirsch}$ , αντίστοιχα, ενώ είναι της ίδιας τάξης μεγέθους στην περίπτωση που η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τις τιμές  $E^*_{AIG\_DG}$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρά τις μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στην εκτίμηση των τιμών του  $E^*$  από τους αλγόριθμους Witczak 1-37A και Hirsch, η επίδραση αυτών στο ποσοστό των ρηγματώσεων δεν αποτυπώνεται σε μεγάλο βαθμό. Παρά ταύτα, το γεγονός ότι το ποσοστό των ρηγματώσεων που εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές  $E^*_{AIG\_DG}$  σχεδόν συμπίπτει με αυτό που εκτιμάται με βάση τις τιμές  $E^*_{lab}$ , υποδηλώνει την ανάγκη εισαγωγής νέων αλγορίθμων προσαρμοσμένων στα εκάστοτε μίγματα.

## **11 Εισαγωγή νέων αλγορίθμων στις διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας νέων οδοστρωμάτων**

---

### **11.1 Το E\* ως κριτήριο στις διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων.**

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση της δυνατότητας εισαγωγής των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του E\* στις διαδικασίες διασφάλισης της ποιότητας νέων εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Για την παράδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία, απαιτείται έλεγχος διασφάλισης της ποιότητας του οδοστρώματος βάσει των προδιαγραφών και των Τευχών Δημοπράτησης του έργου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ποιότητα της κατασκευής κατά την οριστική παραλαβή. Ο έλεγχος της διασφάλισης της ποιότητας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ειδικά στην περίπτωση των έργων Συστημάτων Παραχώρησης (PPP: Public Private Partnership, BOT: Build-Operate-Transfer).

Ο προσδιορισμός της αρχικής κατάστασης του οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς εγείρεται ο προβληματισμός αν το οδόστρωμα που τελικά κατασκευάζεται στην πράξη (in situ) ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της διαστασιολόγησης και της αντίστοιχης μελέτης σύνθεσης στο εργαστήριο. Η συμβολή του προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του συνίσταται στο γεγονός ότι αυτό που τελικά επιτυγχάνεται στην κατασκευή είναι αυτό που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Στο πλαίσιο ελέγχου της ποιότητας του οδοστρώματος, και πιο συγκεκριμένα των ασφαλικών στρώσεων, είναι σύνηθες το χαρακτηριστικό που ελέγχεται να είναι η πυκνότητα του ασφαλτομίγματος. Το μέτρο δυσκαμψίας συνήθως δεν περιλαμβάνεται στις διαδικασίες ελέγχου. Ωστόσο, είναι απαραίτητη παράμετρος για τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος. Η θεώρηση των ίδιων μηχανικών χαρακτηριστικών στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας του οδοστρώματος με αυτά που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του μίγματος και τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, επιτρέπει την πιο ακριβή εκτίμηση της επίδρασης που μπορεί να έχει ένα υλικό υποδεέστερης ή ανώτερης ποιότητας στη συμπεριφορά του οδοστρώματος (NCHRP 2008). Το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων καθορίζει όχι μόνο τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος αλλά, λόγω της συμβολής των ασφαλικών στρώσεων στην απομείωση των τάσεων που μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις, και

ολόκληρου του οδοστρώματος. Επομένως, σύμφωνα με τις νεότερες εξελίξεις σε συναφή θέματα στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας του οδοστρώματος το μέτρο δυσκαμψίας χρησιμοποιείται, πλην άλλων, για το χαρακτηρισμό του ασφαλτομίγματος (NCHRP 2004).

Υπό το πρίσμα αυτό, το  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει βασική παράμετρο (Cominsky et al. 1998, Bonaquist et al. 2003). Η δυνατότητα κατασκευής της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  έχει σαν αποτέλεσμα την πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Κατά τη θεώρηση άλλων μέτρων δυσκαμψίας (όπως το  $M_r$  ή το ITSM) ο έλεγχος της ποιότητας βασίζεται συνήθως μόνο σε μία τιμή του μέτρου δυσκαμψίας. Αυτό πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα, καθώς είναι δυνατό για συγκεκριμένη θερμοκρασία και συχνότητα η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του μίγματος που κατασκευάστηκε στην πράξη να είναι ίση ή μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής του μίγματος που σχεδιάστηκε, αλλά αυτό να μην ισχύει για άλλη θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται λανθασμένα η εντύπωση ότι αυτό που επιτεύχθηκε στην πράξη είναι αποδεκτό ή μη.

Αντιθέτως, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των κεντρικών καμπυλών του  $E^*$  του μίγματος που σχεδιάστηκε με αυτό που τελικά χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των ασφαλικών στρώσεων του νέου οδοστρώματος, μπορούν να εξαχθούν πιο γενικευμένα και ασφαλή συμπεράσματα. Η κλίση των κεντρικών καμπυλών, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του  $E^*$ , η παράλληλη ή μη μεταξύ τους θέση καθώς και το σημείο τομής τους (αν υπάρχει), αποτελούν στοιχεία τα οποία παρέχουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά τη λειτουργία του οδοστρώματος τόσο οι περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων μεταβάλλονται, διαφαίνεται η κρίσιμη σημασία ελέγχου του ασφαλτομίγματος που τελικά κατασκευάστηκε για ευρύ φάσμα συνθηκών. Επομένως, μέσω του  $E^*$  καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων και κατά επέκταση του οδοστρώματος.

Στοιχεία που αφορούν στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, και ειδικότερα στο  $E^*$ , το οποίο αντιστοιχεί στο μίγμα που τελικά θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του οδοστρώματος, συνήθως δεν είναι διαθέσιμα. Η μελέτη σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall αποσκοπεί κυρίως στον καθορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου και του ποσοστού των κενών αέρα. Σε πολλές δε περιπτώσεις τα μίγματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την



κατασκευή των ασφαλικών στρώσεων ενός οδοστρώματος δεν είναι διαθέσιμα κατά το στάδιο σχεδιασμού του οδοστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, διαφαίνεται ότι η ύπαρξη ενός αλγόριθμου εκτίμησης του  $E^*$  του ασφαλτομίγματος μέσω των αποτελεσμάτων των ελέγχων που περιλαμβάνονται σε μια μελέτη σύνθεσης, όπως κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και χαρακτηριστικά ασφάλτου, είναι κρίσιμης σημασίας. Επομένως, σε περίπτωση μη διαθέσιμων στοιχείων δυσκαμψίας του μίγματος που πρόκειται τελικά να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των ασφαλικών στρώσεων ενός οδοστρώματος, η οποία είναι και η συνήθης, μέσω κατάλληλου αλγόριθμου μπορούν να εκτιμηθούν οι τιμές του  $E^*$ .

Οι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό του μίγματος το οποίο τελικά κατασκευάστηκε. Δεδομένου ότι ο προσδιορισμός του  $E^*$  στο εργαστήριο απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό ο οποίος ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμος, για τον έλεγχο της ποιότητας του νέου οδοστρώματος θα πρέπει να προβλέπονται τέτοιες διαδικασίες που να επιτρέπουν την εκτίμηση του  $E^*$  μέσω αλγορίθμων. Οι απαραίτητες παράμετροι που υπεισέρχονται στον αλγόριθμο μπορούν να προκύψουν μέσω της διαδικασίας εκχύλισης πυρήνων οδοστρώματος.

## **11.2 Διερεύνηση εφαρμοσιμότητας αλγορίθμων εκτίμησης $E^*$ σε νέα οδοστρώματα**

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση της εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, στη διαδικασία ελέγχου της ποιότητας και της παραλαβής νέου οδοστρώματος. Για το σκοπό αυτό οργανώθηκε οδικό πείραμα σε δύο νεοκατασκευασθέντα εύκαμπτα οδοστρώματα. Πιο συγκεκριμένα, κατόπιν της μελέτης της διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων και πριν τη διάσθρωση των ασφαλικών στρώσεων, συλλέχθηκε υλικό χαλαρού ασφαλτομίγματος από το οποίο πρόκειται να κατασκευαστούν οι ασφαλικές στρώσεις. Από το υλικό αυτό παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ δοκίμια ασφαλτομίγματος σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης των μιγμάτων, τα οποία στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*$ . Στη συνέχεια το  $E^*$  εκτιμήθηκε μέσω κατάλληλου αλγόριθμου. Κατόπιν της ολοκλήρωσης της κατασκευής των νέων οδοστρωμάτων πραγματοποιήθηκε λήψη πυρήνων, οι οποίοι μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό του  $E^*$ . Ο έλεγχος της ποιότητας των ασφαλικών στρώσεων των νέων οδοστρωμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της

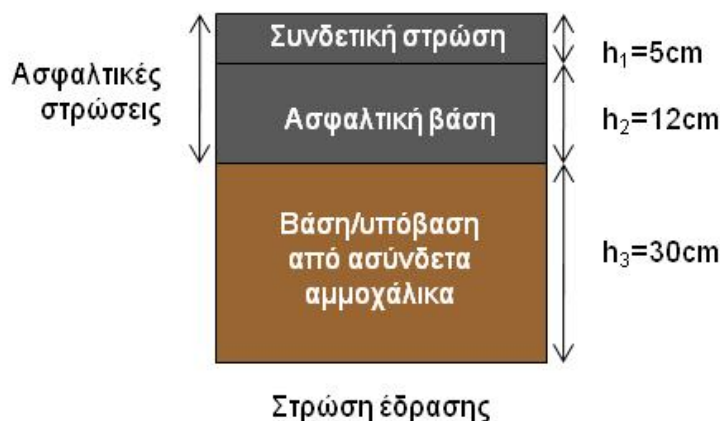
συγκριτικής αξιολόγησης των κεντρικών καμπυλών του  $E^*$  των μιγμάτων σχεδιασμού και των πυρήνων.

Κατά τις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας των νέων οδοστρωμάτων πολύτιμο εργαλείο είναι η καταγραφή με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) για τον προσδιορισμό της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος και των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων του (όπως το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων). Δεδομένου αυτού, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ του  $E^*$  των πυρήνων που προσδιορίζεται εργαστηριακά με το επιτόπου μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων καταγραφής με τα συστήματα NDT. Για το σκοπό αυτό, σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με τα συστήματα NDT Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) και γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar: GPR). Τα στοιχεία συλλογής αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων επί τόπου.

### 11.3 Πειραματική διαδικασία

#### 11.3.1 Πειραματικά οδικά τμήματα - ασφαλτομίγματα

Το οδικό πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο τμήματα του αυτοκινητόδρομου Κόρινθος-Πάτρα, μήκους 890 (Τμήμα Α) και 790 μέτρων (Τμήμα Β). Η διατομή της μελέτης σχεδιασμού, η οποία είναι κοινή και για τα δύο τμήματα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.1.



Σχήμα 11.1 Διατομή μελέτης σχεδιασμού νέου οδοστρώματος

Οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούνται από τη συνδετική στρώση ασφαλτομίγματος ΑΣ12,5 και τη στρώση ασφαλτικής βάσης ασφαλτομίγματος ΑΣ20. Η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε και

στους δύο τύπους ασφαλτομιγμάτων είναι κατηγορίας 30-45PEN. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης/υπόβασης από ασύνδετα θραυστά αμμοχάλικα θεωρείται ίσο με 200 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ίσο με 80 MPa.

Τα ασφαλτομίγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των οδοστρωμάτων διατέθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ πριν τη διάστρωση των ασφαλτικών στρώσεων. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής εκχύλισης. Επίσης, παρασκευάστηκαν δοκίμια ασφαλτομίγματος και προσδιορίστηκε η ογκομετρική σύστασή τους καθώς και το  $E^*$  μέσω πειραματικής διάταξης. Στη συνέχεια το  $E^*$  εκτιμήθηκε μέσω του νέου αλγορίθμου AIG\_DG\_upd (Σχέση 9.1).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων ΑΣ12.5 και ΑΣ20 που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τμήματος Α δίνονται στον Πίνακα 11.1, ενώ αυτών που χρησιμοποιήθηκαν την κατασκευή του Τμήματος Β στον Πίνακα 11.2. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της ασφάλτου, δείκτης διείδυσης και θερμοκρασία μάλθωσης ( $T_{BA}$ ), καθώς και οι παράμετροι A και VTS για το χαρακτηρισμό του ιξώδους της ασφάλτου δίνονται στους Πίνακες 11.3-11.4, για τα ασφαλτομίγματα του Τμήματος Α και Β, αντίστοιχα.

**Πίνακας 11.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών ασφαλτομιγμάτων, Τμήμα Α**

	ΑΣ12.5_A	ΑΣ20_A
Κόσκινο	Διερχόμενο (%)	
19.0 mm (3/4in.)	100	91
9.5 mm (3/8in.)	78	65
4.75 mm (No. 4)	52	44
75μm (No. 200)	4	3.4

**Πίνακας 11.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών ασφαλτομιγμάτων, Τμήμα Β**

	ΑΣ12.5_B	ΑΣ20_B
Κόσκινο	Διερχόμενο (%)	
19.0 mm (3/4in.)	100	100
9.5 mm (3/8in.)	82	61.8
4.75 mm (No. 4)	53.1	43.1
75μm (No. 200)	5.1	4.5

**Πίνακας 11.3 Χαρακτηριστικά ασφάλτου 30-45PEN, Τμήμα Α**

Δοκιμή	ΑΣ12.5_A	ΑΣ20_A
PEN (στους 25°C)	36,3	
$T_{BA}$ (°C)	56,3	

**Πίνακας 11.4 Χαρακτηριστικά ασφάλτου 30-45PEN, Τμήμα Β**

Δοκιμή	ΑΣ12.5_B	ΑΣ20_B
PEN (στους 25°C)	35	35
$T_{BA}$ (°C)	56	55

Από κάθε ασφαλτόμιγμα παρασκευάστηκαν δύο έως τρία δοκίμια, τα κενά αέρα των οποίων ήταν σύμφωνα με αυτά της μελέτης σύνθεσης. Στον Πίνακα 11.5 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του ποσοστού κενών (Va) και του ποσοστού ασφάλτου (Pb) των δοκιμίων κάθε ασφαλτομίγματος.

**Πίνακας 11.5 Ογκομετρική σύσταση δοκιμίων**

Δοκίμια	Va (%)	Pb (%)
AΣ12.5_A	4,6	4,2
AΣ20_A	4,4	4
AΣ12.5_B	3,7	4,3
AΣ20_B	4,3	4,2

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του  $E^*$  των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν είναι σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.3. Ο προσδιορισμός του  $E^*$  πραγματοποιήθηκε σε 5 θερμοκρασίες 4, 10, 20, 25 και 37 °C και έξι συχνότητες 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz. Επίσης, το  $E^*$  εκτιμήθηκε μέσω του νέου αλγορίθμου AIG\_DG\_upd όπως αυτός περιγράφεται στη Σχέση 9.1 για τις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης. Ο αλγόριθμος αυτός επιλέχθηκε δεδομένου ότι τα υπόψη ασφαλτομίγματα περιλαμβάνονται στην επικαιροποιημένη βάση δεδομένων στην οποία στηρίχτηκε η ανάπτυξη του αλγορίθμου AIG\_DG\_upd.

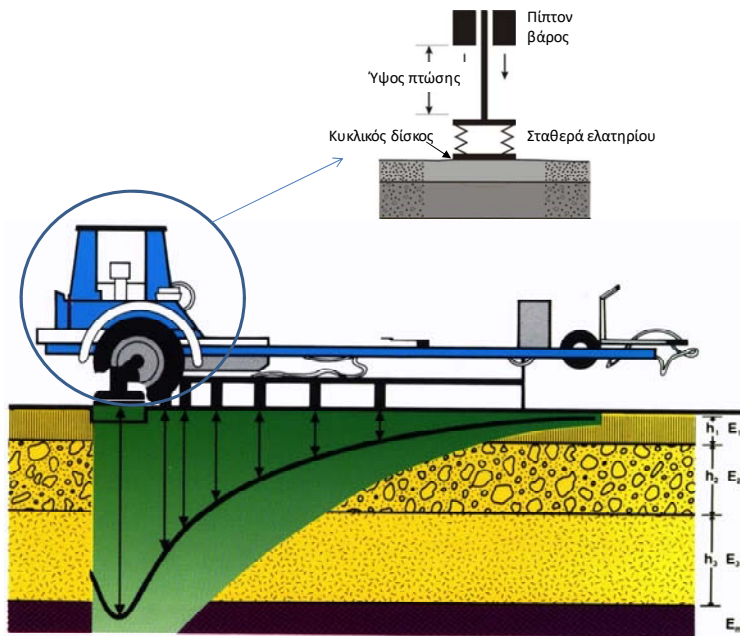
### **11.3.2 Επιτόπου πειραματικές διαδικασίες**

Σε σύντομο διάστημα αμέσως μετά την κατασκευή των οδοστρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με Σύστημα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT), όπως το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD) και το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar: GPR). Κατόπιν της καταγραφής με τα υπόψη Συστήματα πραγματοποιήθηκε λήψη συνολικά δέκα πυρήνων (πέντε στο Τμήμα Α και πέντε στο Τμήμα Β) σε επιλεγμένες θέσεις όπου είχε προηγηθεί καταγραφή με το σύστημα FWD. Οι πυρήνες αυτοί μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ προκειμένου για τον προσδιορισμό του  $E^*$  στις ίδιες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης με αυτές των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο.

#### **11.3.2.1 Επιτόπου καταγραφές με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών**

Η βασική λειτουργία του Συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας (Σχήμα 11.2). Η διάταξη του συστήματος FWD του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ περιλαμβάνει έναν κυκλικό δίσκο διαμέτρου 300cm (11,81 inches) επί του οποίου προσπίπτει συγκεκριμένο βάρος.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαδοχικοί χτύποι, διάρκειας 25ms – 30ms έκαστος. Η μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων πραγματοποιήθηκε από εννέα επιταχυνσιόμετρα – γεώφωνα, τοποθετημένα σε αποστάσεις 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 και 1800 mm από τον κυκλικό δίσκο. Οι ελαστικές υποχωρήσεις που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση, αφορούν στον τελευταίο χτύπο. Το μέγεθος του προσπίπτοντος φορτίου που εφαρμόστηκε σε κάθε θέση, ήταν 707 kPa. Στο Τμήμα Α πραγματοποιήθηκαν καταγραφές σε τρεις θερμοκρασίες, ενώ στο Τμήμα Β σε δύο.

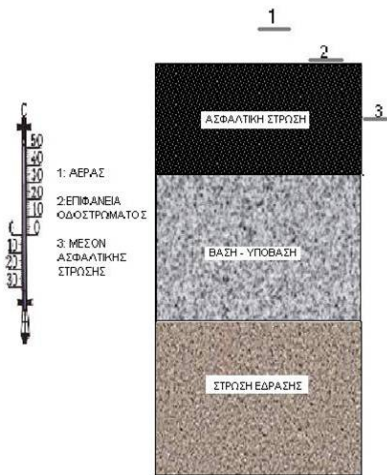


**Σχήμα 11.2 Βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος FWD**

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Από τις ψευδοελαστικές υποχωρήσεις, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων) είναι δυνατό να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων και επομένως και το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων. Η διαδικασία αυτή ορίζεται ως διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back calculation).

Παράλληλα με τις καταγραφές με Συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11.3, πραγματοποιήθηκε καταγραφή της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος με χρήση υπέρυθρων και της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών

στρώσεων. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για την περαιτέρω ανάλυση, δεδομένου ότι το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία.



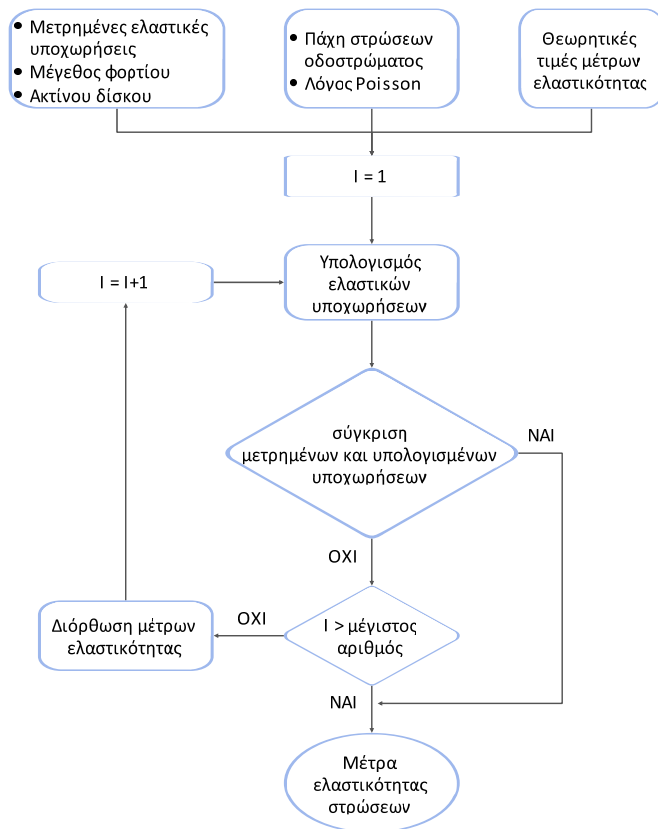
### Σχήμα 11.3 Μέτρηση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια μετρήσεων με το σύστημα FWD

Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος τα οποία αποτελούν απαραίτητη παράμετρο για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού εκτιμήθηκαν μέσω των στοιχείων συλλογής με το Σύστημα GPR. Το Σύστημα GPR καταγράφει συνεχόμενα τη στρωματογραφία του οδοστρώματος, που πρακτικά οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων ανά πολύ μικρές αποστάσεις με σημαντική ακρίβεια. Κατά συνέπεια πλεονεκτεί σε σχέση με τις έως τώρα χρησιμοποιούμενες παραδοσιακές μεθόδους (λήψη πυρήνων) για τον προσδιορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος.

#### 11.3.2.2 Ανάστροφος υπολογισμός μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων

Η διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού περιγράφεται στο Σχήμα 11.4. Ο ανάστροφος υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης για περισσότερο από τέσσερις δεκαετίες με αποτέλεσμα να έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθοδολογιών που διαφέρουν ως προς τις διαδικασίες υπολογισμού (Khazanovich et al. 2001, Irwin 2002, Von Quintus & Simpson 2002, Alkasawneh 2007, Alkasawneh et al. 2007, Pan et al. 2008). Οι μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες, στατικές και δυναμικές ανάλογα με τον τύπο της φόρτισης και τη θεώρηση του μοντέλου απόκρισης του οδοστρώματος. Κατά τη διαδικασία του στατικού ανάστροφου υπολογισμού αξιοποιείται μόνο η μέγιστη τιμή του φορτίου που εφαρμόζεται λόγω της παραδοχής της γραμμικής ελαστικότητας. Επομένως, αυτές οι μέθοδοι είτε αγνοούν την ιξωδοελαστική φύση των ασφαλτικών στρώσεων, είτε δεν έχουν τη δυνατότητα μέσω του

ανάστροφου υπολογισμού να εκτιμήσουν τους παράγοντες μετατόπισης για τη δημιουργία της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ . Αντιθέτως, κατά τη δυναμική ανάλυση ανάστροφου υπολογισμού είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων συναρτήσει του χρόνου  $E(t)$  και μέσω αυτού της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  (Kutay et al. 2011). Η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας τα στοιχεία συλλογής του FWD σε μία θερμοκρασία. Νεότερες έρευνες (Varma et al. 2013) προτείνουν ένα εύρος θερμοκρασιών για το οποίο θα πρέπει να γίνονται καταγραφές με το σύστημα FWD προκειμένου για τη μεγιστοποίηση του τμήματος της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  που μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια μέσω του ανάστροφου υπολογισμού.

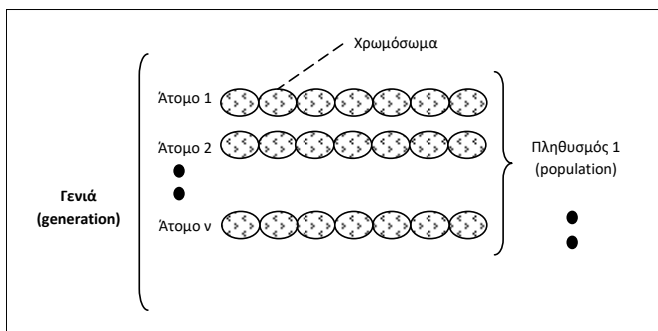


**Σχήμα 11.4 Διάγραμμα ανάστροφου υπολογισμού μέτρων ελαστικότητας**

Η δυναμική ανάλυση ανάστροφου υπολογισμού πέρα από τα πλεονεκτήματα, παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα τα οποία απορρέουν κυρίως από την πολυπλοκότητα και το υπολογιστικό κόστος της δυναμικής ανάλυσης. Επίσης, η συλλογή όλων των απαραίτητων στοιχείων για τη δυναμική ανάλυση είναι χρονοβόρα και σε πολλές περιπτώσεις αρκετά δύσκολη. Επομένως, οι στατικές μέθοδοι προτιμούνται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ανάστροφου υπολογισμού λόγω της απλότητάς τους και του αποδεκτού εύρους σφαλμάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας

έρευνας, ο ανάστροφος υπολογισμός του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων πραγματοποιήθηκε μέσω μιας καινοτόμου μεθοδολογίας στατικής ανάλυσης που βασίζεται στη θεωρία των γενετικών αλγορίθμων.

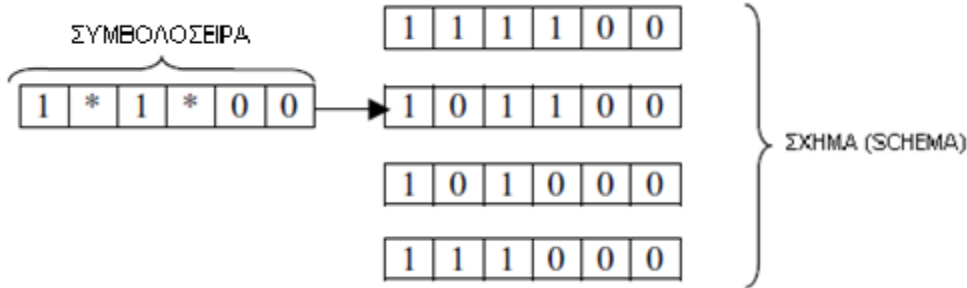
Το θεωρητικό υπόβαθρο των γενετικών αλγορίθμων (Γ.Α.) έχει τις ρίζες του στη θεωρία της εξέλιξης των σωματιδίων εμπνευσμένη από τον κλάδο της βιολογίας, όπου οι Γ.Α. εμφανίζουν πέντε βασικές ιδιότητες στις οποίες στηρίζεται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού: τη δημιουργία του πληθυσμού, την αξιολόγηση, την επιλογή, τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη. Αρχικά, δημιουργούνται πολλαπλοί πληθυσμοί αποτελούμενοι από ανεξάρτητα μεταξύ τους άτομα χρωμοσωμάτων (Σχήμα 11.5), 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.



**Σχήμα 11.5 Γραφική απεικόνιση θεμελιωδών εννοιών στους γενετικούς αλγορίθμους (Reddy et al. 2004)**

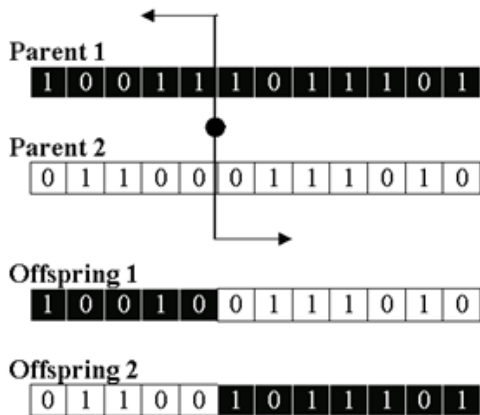
Για να γίνει όμως δυνατή η σύγκριση των χρωμοσωμάτων, αξιοποιήθηκε η θεωρία του σχήματος (schema theory) (Σχήμα 11.6) κατά την οποία γίνεται μία μαθηματική προσέγγιση της λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων (Holland 1975). Συγκεκριμένα, κάθε χρωμόσωμα συνθέτεται από την ένωση διαφορετικών σειρών από 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).





**Σχήμα 11.6 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) (Σχήμα 11.7). Τα λιγότερο κατάλληλα χρωμοσώματα έχοντας λιγότερες πιθανότητες διασταύρωσης, απορρίπτονται από τον πληθυσμό.

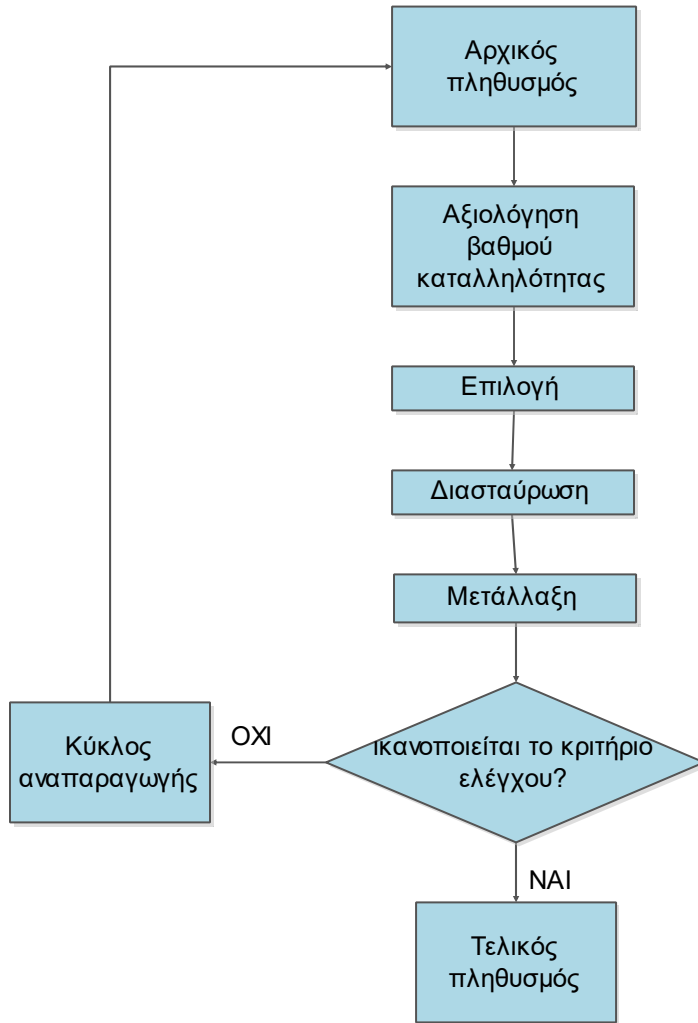


**Σχήμα 11.7 Διασταύρωση ιδανικών χρωμοσωμάτων για τη παραγωγή νέων –Crossover (Tutumluer et al. 2009)**

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.

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 (Σχήμα 11.8), καθώς και η επεξήγηση των λειτουργιών.



**Σχήμα 11.8** 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.

- 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.
- 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 επιλογής που χρησιμοποιούνται είναι η επιλογή ρουλέτα, η στοχαστική καθολική επιλογή και η επιλογή με βάση την κατάταξη.
- Διασταύρωση (Crossover): Σε αυτό το στάδιο δύο ή περισσότερες συμβολοσειρές από αυτές που έχουν επιλεγεί, 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).
- Μετάλλαξη (Mutation): Παράλληλα με τη διαδικασία της διασταύρωσης των στοιχείων που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά, πραγματοποιείται και αναπροσαρμογή των συμβολοσειρών εκείνων που δεν έχουν επιλεγεί στο βήμα 3, με σκοπό να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τους και να μπορούν να συμμετέχουν και αυτά στη διαδικασία διασταύρωσης (Σχήμα 11.9).

Γόνος πριν τη μετάλλαξη

0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Γόνος μετά τη μετάλλαξη

1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

**Σχήμα 11.9 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.

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).

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, 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):

$$AVCF = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left( \frac{A_k^c - A_k^m}{A_k^m} \right)^2 \right]^{1/2} + \left| \frac{d_1^c - d_1^m}{d_1^m} \right| \quad (11.1)$$

Όπου  $k$  το πλήθος των αισθητήρων (γεωφώνων),  $d_1^c$  και  $d_1^m$ : η υπολογισμένη και η μετρημένη ελαστική υποχώρηση στη θέση του πρώτου αισθητήρα (γεωφώνου), δηλαδή στη θέση επιβολής της φόρτισης και  $A_k^c$  και  $A_k^m$ : είναι οι υπολογισμένες και οι μετρημένες περιοχές καταλληλότητας. Η περιοχή καταλληλότητας δίνεται από τη σχέση:

$$A_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} (d_i + d_{i+1})(r_{i+1} - r_i)}{2d_i}, (k \leq n) \quad (11.2)$$

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 Σχέση 11.1 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.

## 11.4 Ανάλυση δεδομένων

### 11.4.1 Συγκριτική αξιολόγηση κεντρικών καμπυλών και αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων

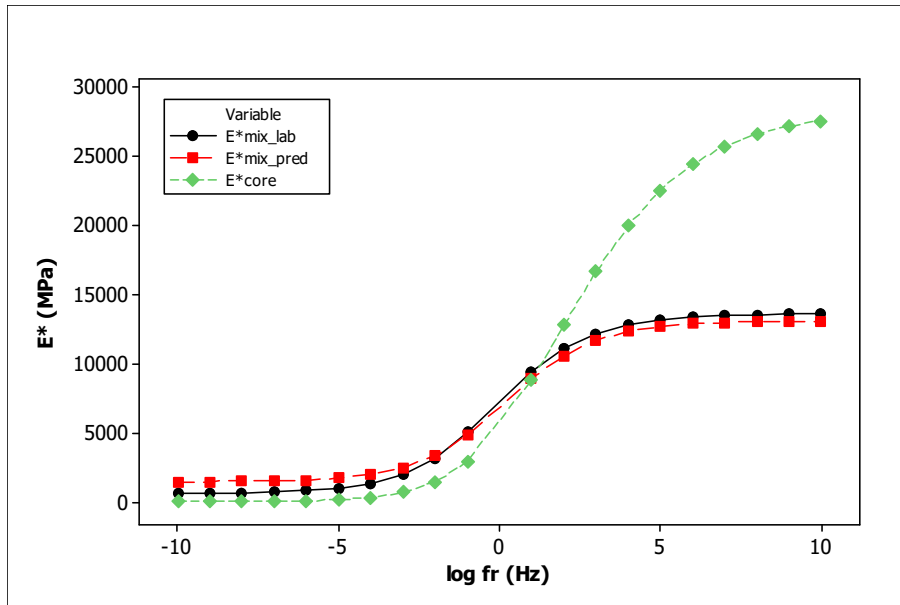
Δεδομένου ότι οι πυρήνες αποτελούνται από δύο ασφαλτικές στρώσεις (ΑΣ12.5 και ΑΣ20) με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, το  $E^*$  που προσδιορίζεται μέσω της εργαστηριακής πειραματικής διάταξης αφορά στο "μικτό" (composite) δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας. Προκειμένου για τη συγκριτική αξιολόγηση των τιμών του  $E^*$  των δοκιμίων ασφαλτομίγματος που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο είναι απαραίτητος ο συνδυασμός των στοιχείων του  $E^*$  των δοκιμίων ΑΣ12.5 και ΑΣ20 και των αντίστοιχων παχών για τον υπολογισμό του  $E^*$  του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων. Το  $E^*$  ενός σύνθετου υλικού (με την έννοια ότι αποτελείται από δύο διαφορετικές στρώσεις) προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών του  $E^*$  της δυσκαμψίας των επιμέρους στρώσεων όπως περιγράφεται στη Σχέση 11.3 (SHRP 1993).

$$E_{comp}^* = \left( \sum \left( \left( h_i / h_{comp} \right) \times E_i^{(1/3)} \right) \right)^3 \quad (11.3)$$

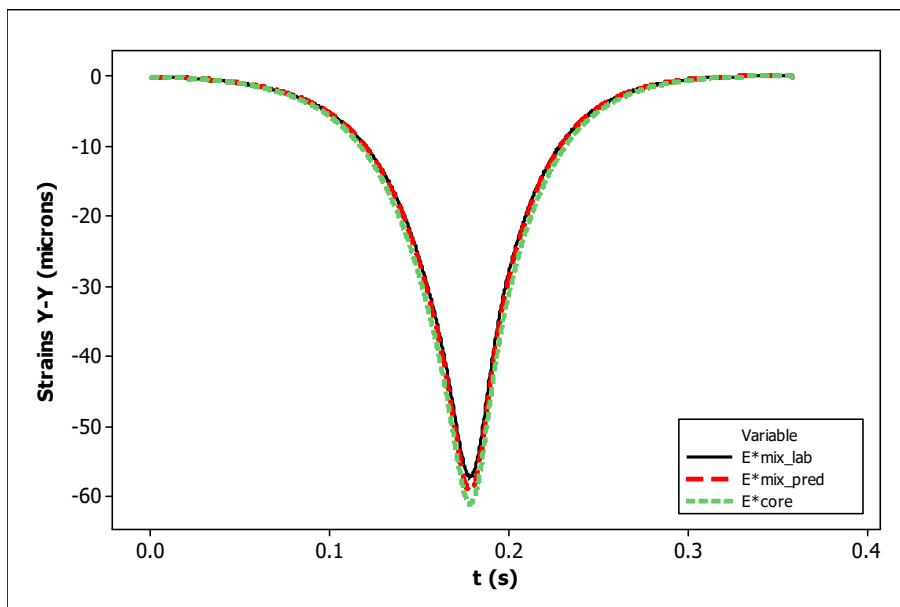
όπου  $E_{comp}^*$ : το  $E^*$  του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων,  $h_i$ : το πάχος της "i"στής στρώσης,  $h_{comp}$ : το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων,  $E_i^*$ : το  $E^*$  της "i"στής στρώσης και  $i = 1$  έως  $n$ , όπου  $n$  ο αριθμός των επιμέρους ασφαλτικών στρώσεων.

Ο υπολογισμός αυτός είναι επίσης απαραίτητος στο πλαίσιο της αξιολόγησης των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων FWD, δεδομένου ότι κατά τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού το μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει αφορά στη δυσκαμψία του συνόλου των ασφαλτικών στρώσεων.

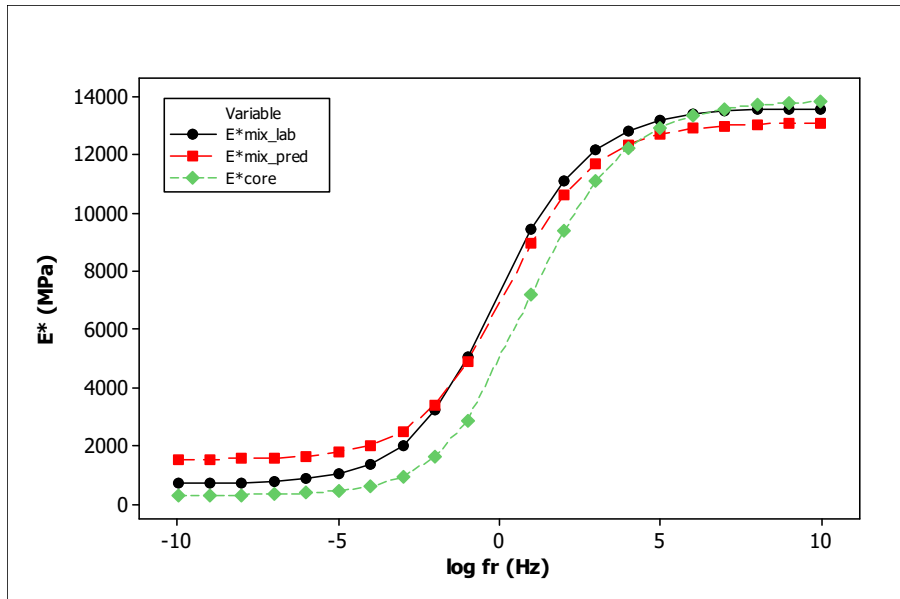
Στα Σχήματα που ακολουθούν (Σχ.11.10-11.29) παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες του  $E^*$  των μιγμάτων που προκύπτουν μέσω εργαστηριακού προσδιορισμού ( $E^*_{mix\_lab}$ ) και μέσω της εκτίμησης των τιμών με τον αλγόριθμο  $AIG\_DG\_upd$  ( $E^*_{mix\_pred}$ ), καθώς και των πυρήνων που προκύπτει μέσω εργαστηριακού προσδιορισμού ( $E^*_{core}$ ). Η θερμοκρασία αναφοράς για την κατασκευή των κεντρικών καμπυλών είναι οι 20 °C. Επίσης, παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων θεωρώντας τις παραπάνω τιμές του  $E^*$  για θερμοκρασία αναφοράς τους 20 °C. Οι κεντρικές καμπύλες και οι παραμορφώσεις έχουν προσδιοριστεί για κάθε θέση πυρήνα.



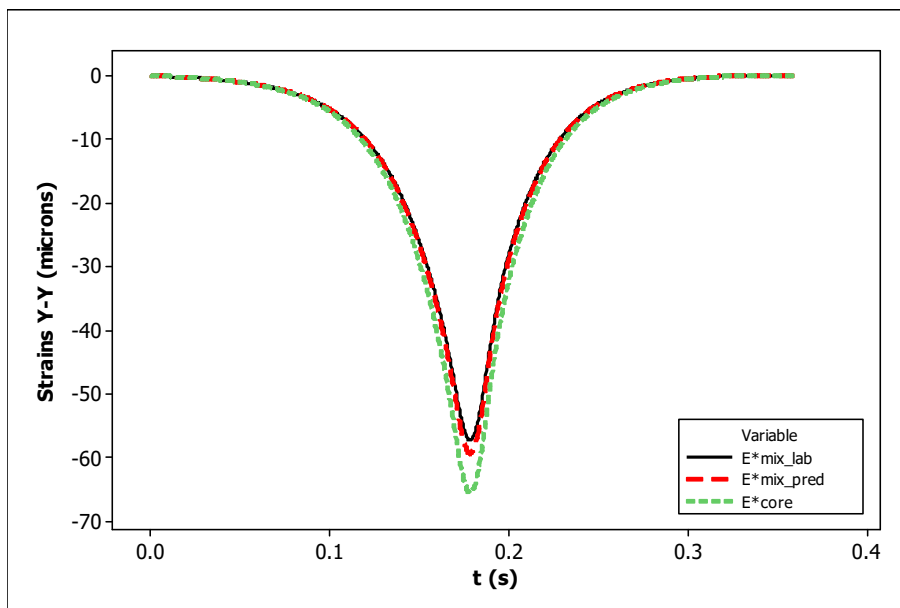
Σχήμα 11.10 Κεντρικές καμπύλες, Θέση Α1



Σχήμα 11.11 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση Α1

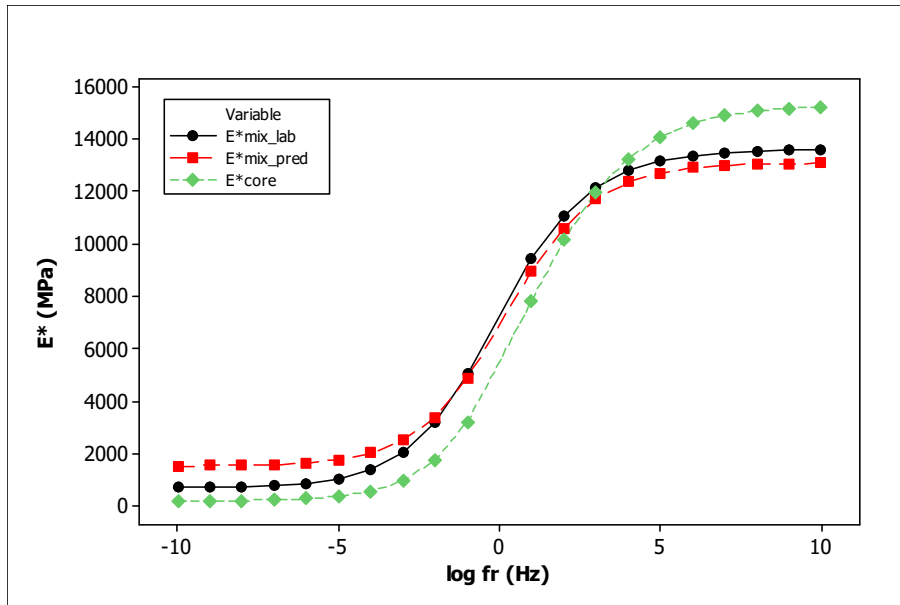


Σχήμα 11.12 Κεντρικές καμπύλες, Θέση A2

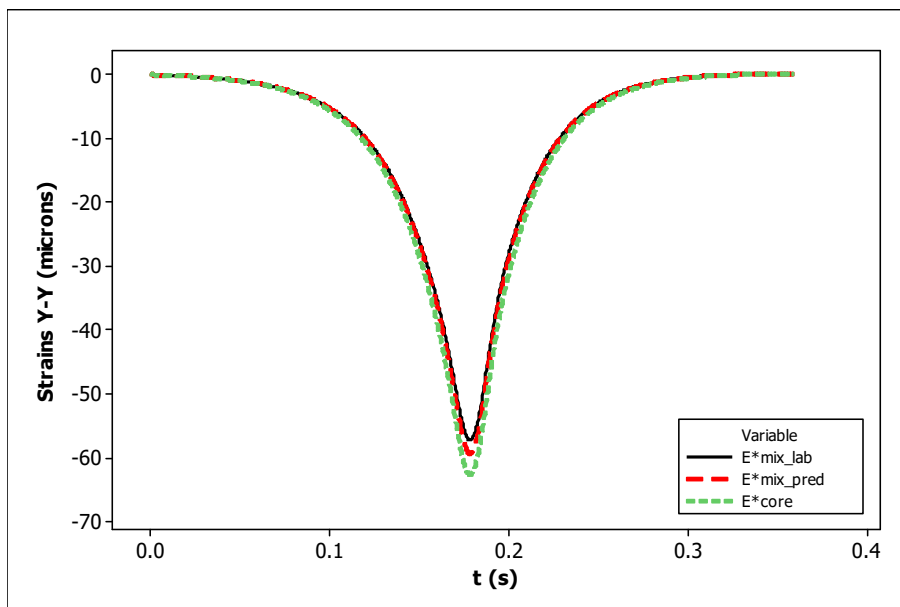


Σχήμα 11.13 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση A2

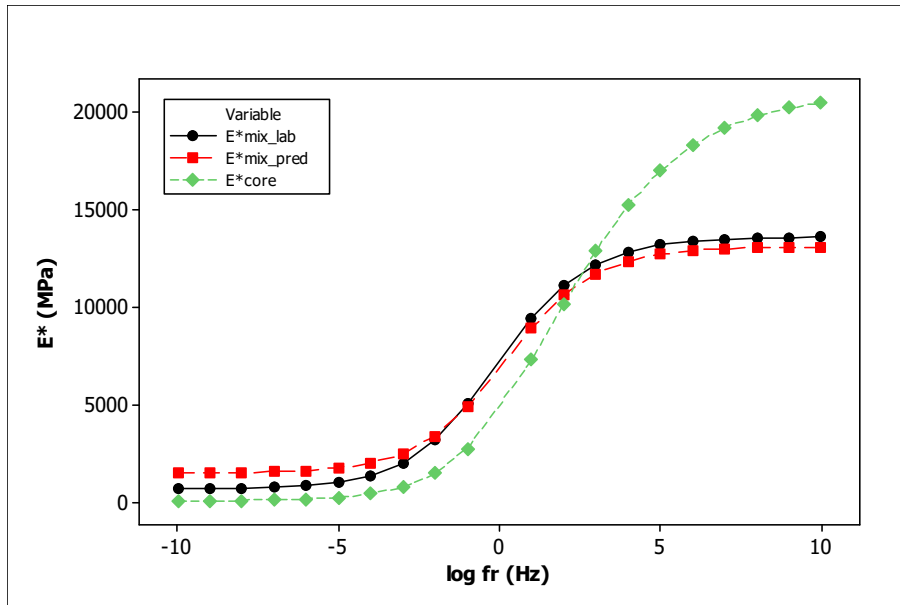




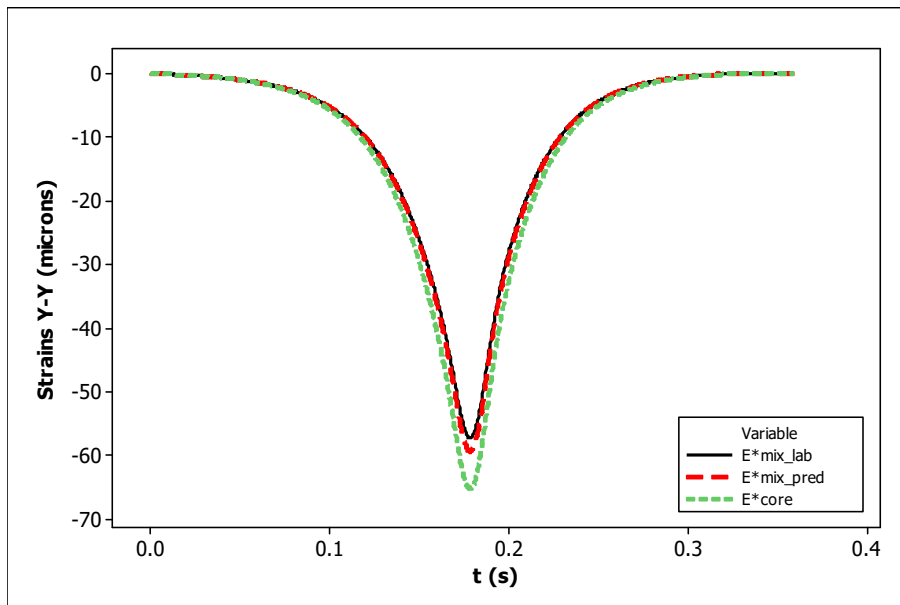
Σχήμα 11.14 Κεντρικές καμπύλες, Θέση A3



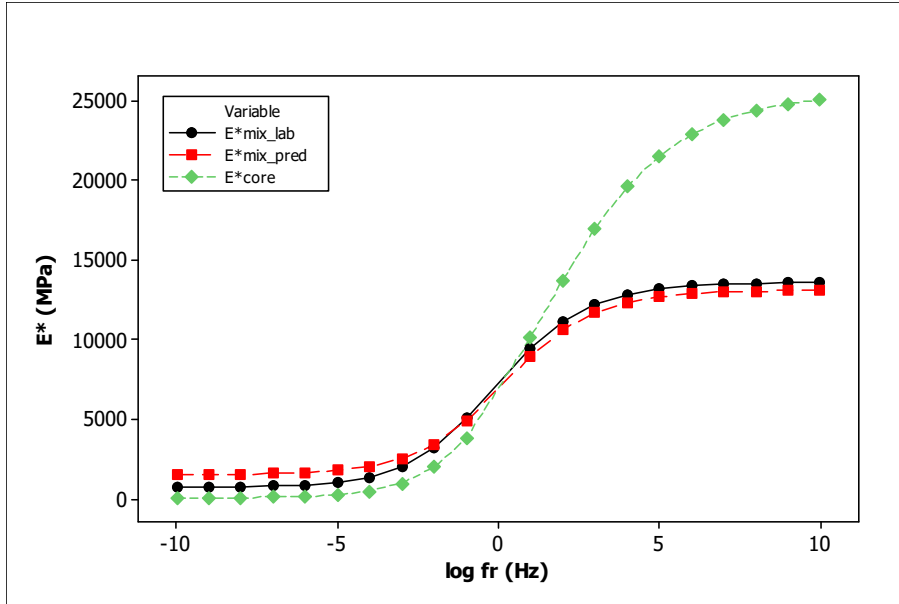
Σχήμα 11.15 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση A3



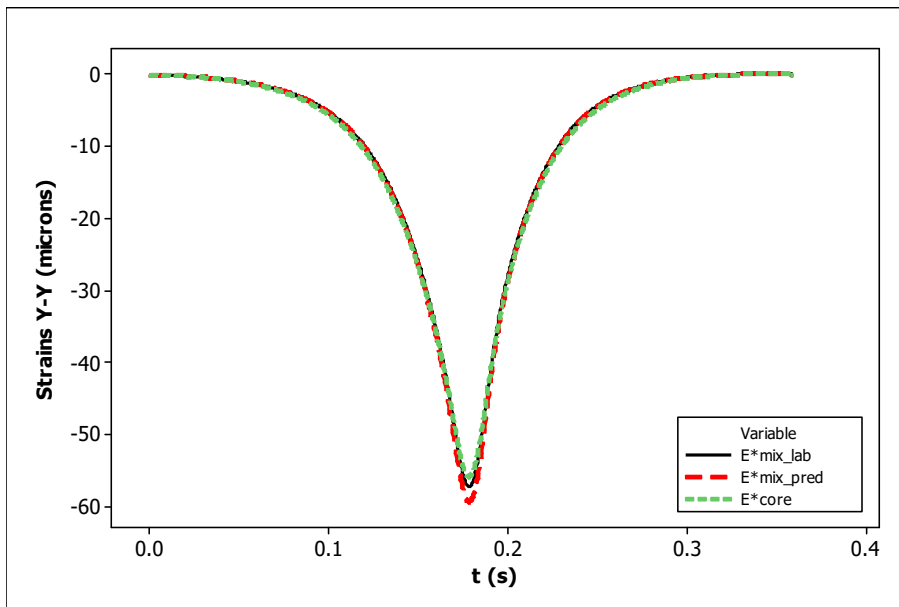
Σχήμα 11.16 Κεντρικές καμπύλες, Θέση A4



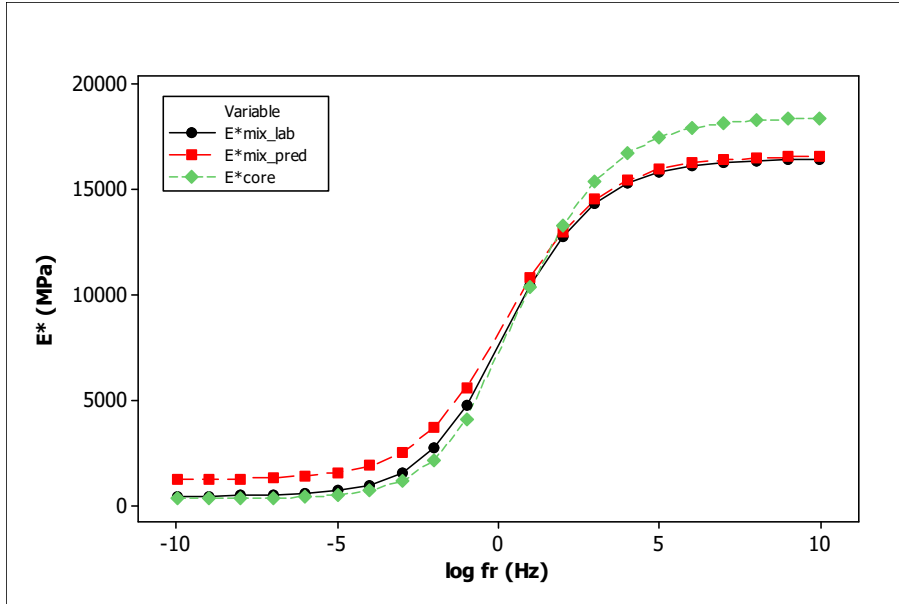
Σχήμα 11.17 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση A4



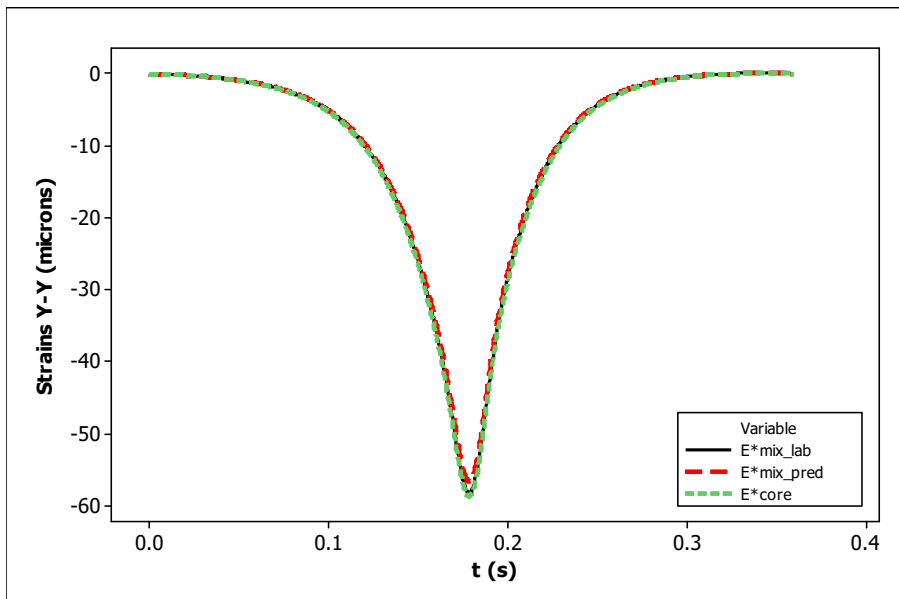
Σχήμα 11.18 Κεντρικές καμπύλες, Θέση Α5



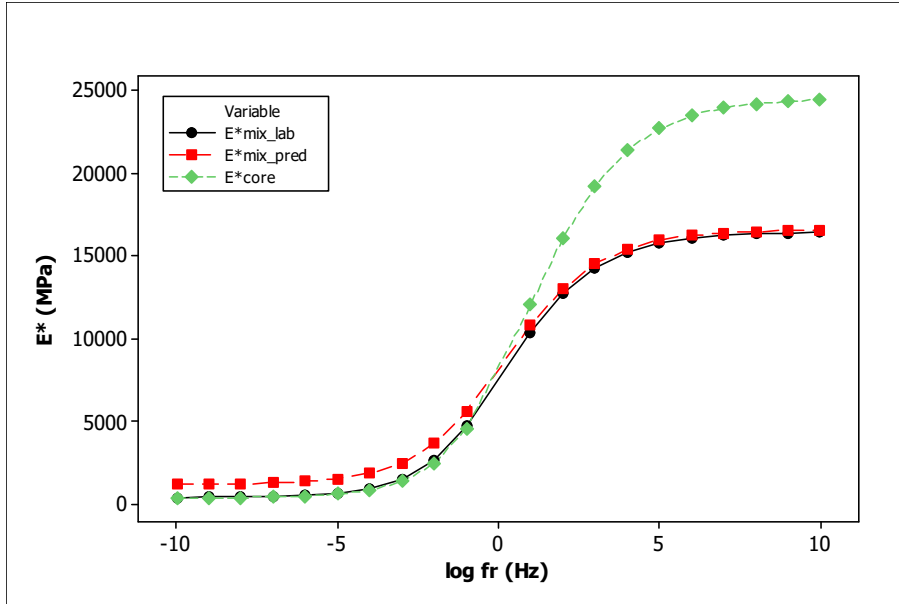
Σχήμα 11.19 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση Α5



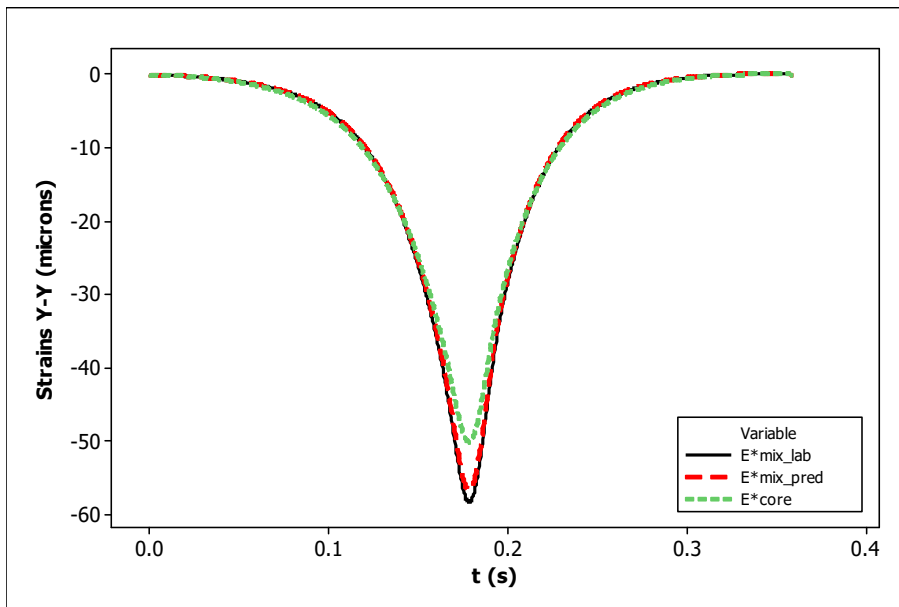
Σχήμα 11.20 Κεντρικές καμπύλες, Θέση B1



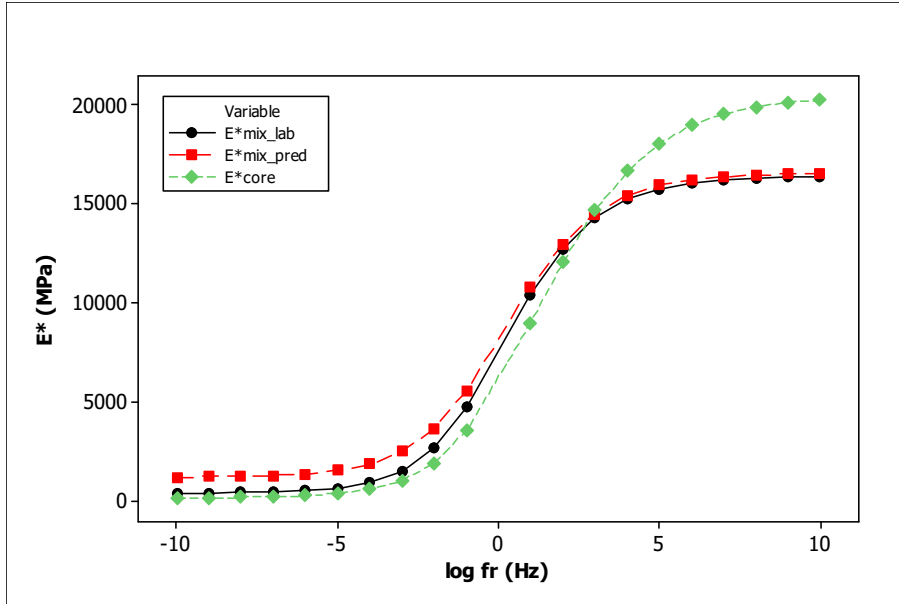
Σχήμα 11.21 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, Θέση B1



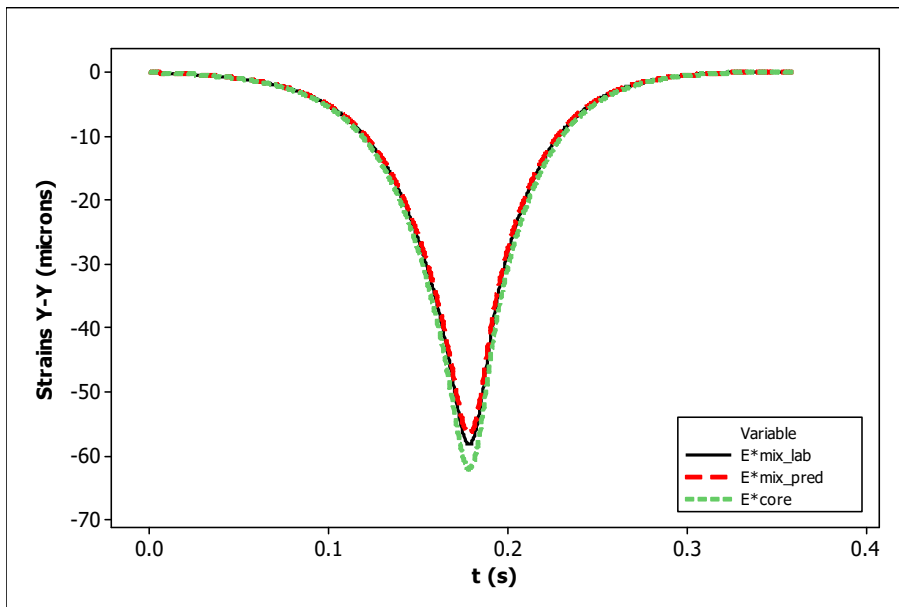
Σχήμα 11.22 Κεντρικές καμπύλες, Θέση B2



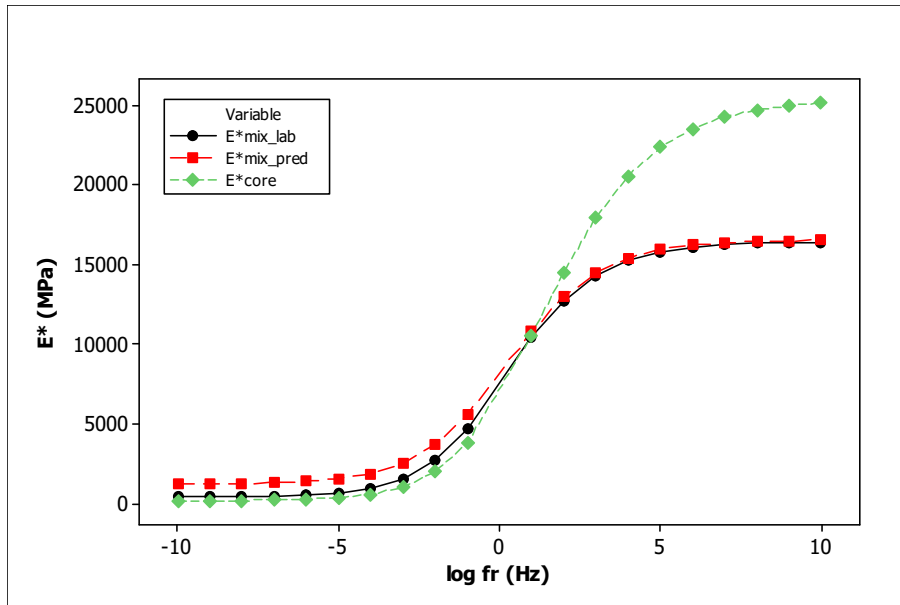
Σχήμα 11.23 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση B2



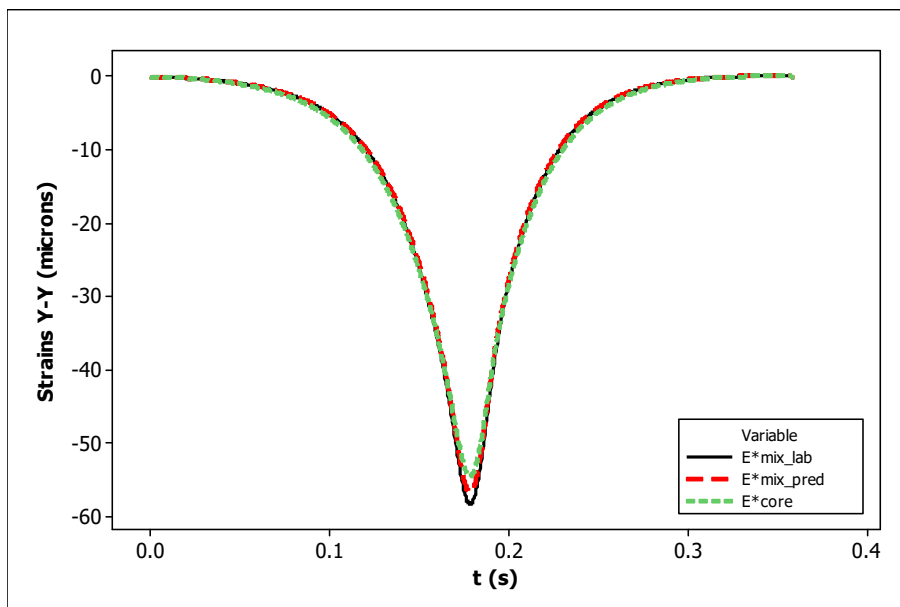
Σχήμα 11.24 Κεντρικές καμπύλες, Θέση Β3



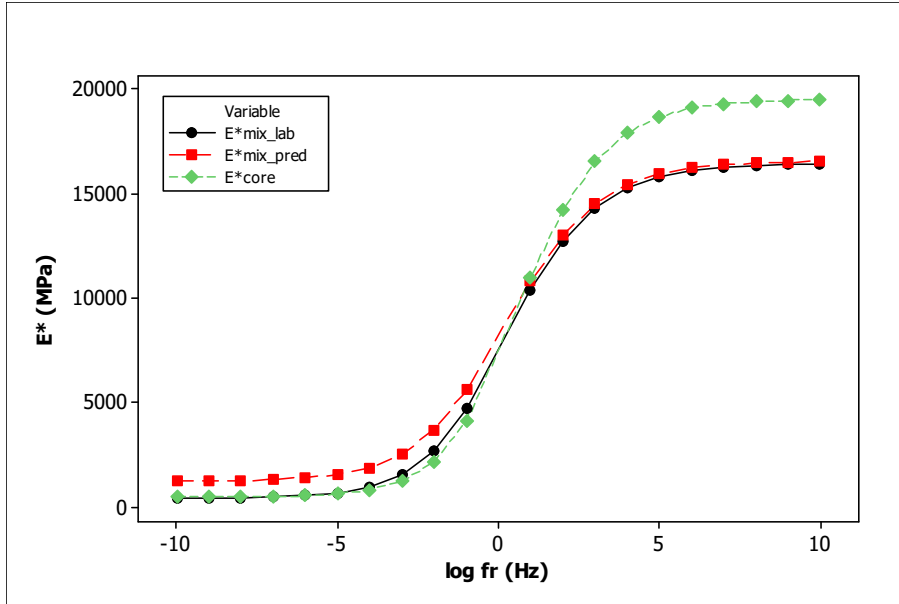
Σχήμα 11.25 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση Β3



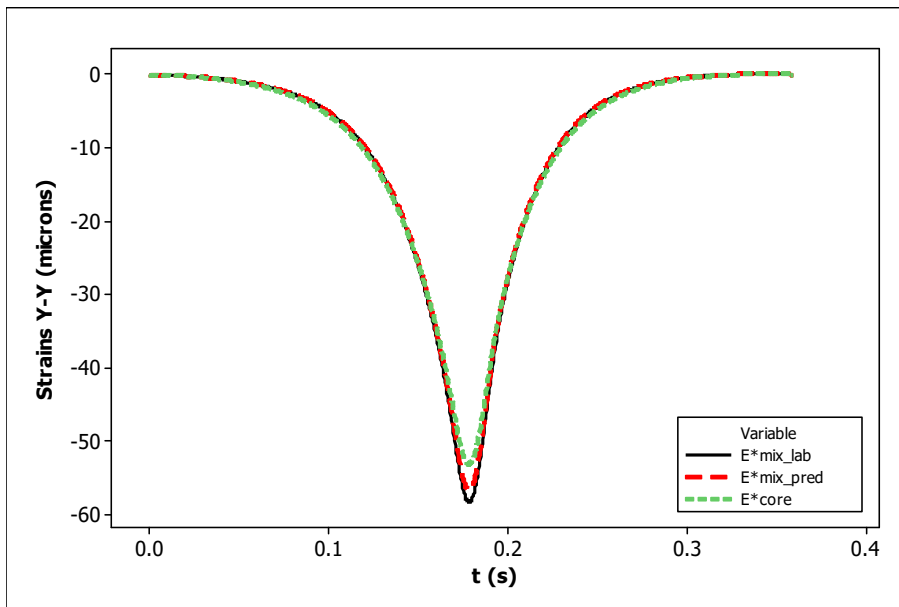
Σχήμα 11.26 Κεντρικές καμπύλες, Θέση Β4



Σχήμα 11.27 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση Β4



**Σχήμα 11.28 Κεντρικές καμπύλες, Θέση B5**



**Σχήμα 11.29 Εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, Θέση B5**

Από τα Σχήματα της συγκριτικής αξιολόγησης των κεντρικών καμπυλών προκύπτει ότι οι τιμές του  $E^*$  που εκτιμώνται μέσω του αλγορίθμου προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις μετρημένες. Οι κεντρικές καμπύλες του  $E^*$  των πυρήνων στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δε βρίσκονται σε παράλληλη θέση με αυτές του μίγματος σχεδιασμού, με αποτέλεσμα για κάποιο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης οι τιμές του  $E^*$  των πυρήνων να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του μίγματος, ενώ για κάποιο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης να είναι μεγαλύτερες. Πιο συγκεκριμένα, για συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή/και



μικρών συχνοτήτων φόρτισης οι τιμές του  $E^*$  των πυρήνων είναι ίσες ή μικρότερες συγκριτικά με αυτές του μίγματος σχεδιασμού. Στην περίπτωση μικρότερων τιμών του  $E^*$  των πυρήνων, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται δεν είναι σημαντικές καθώς οι τιμές του  $E^*$  προσεγγίζουν αυτές του μίγματος σχεδιασμού. Αντιθέτως, σε χαμηλές θερμοκρασίες ή/και μεγάλες συχνότητες φόρτισης οι τιμές του  $E^*$  των πυρήνων είναι μεγαλύτερες από αυτές του μίγματος συνήθως κατά ένα μεγάλο ποσοστό.

Για την ποσοτικοποίηση των παρατηρούμενων αποκλίσεων, στον Πίνακα 11.6 παρουσιάζονται οι τιμές της τετραγωνικής ρίζας του μέσου σφάλματος (RMSE) εκφρασμένες σε ποσοστό, μεταξύ των τιμών του  $E^*_{mix\_lab} - E^*_{mix\_pred}$ ,  $E^*_{mix\_lab} - E^*_{core}$ ,  $E^*_{mix\_pred} - E^*_{core}$ .

**Πίνακας 11.6 RMSE (%) των τιμών του  $E^*$**

	RMSE (%)									
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
$E^*_{mix\_lab} - E^*_{mix\_pred}$	5.1	13.3	13.4	5.4	4.9	9.4	8.2	8.7	8.8	9.5
$E^*_{mix\_lab} - E^*_{core}$	43.7	33.5	27.7	35.5	41.0	14.2	21.7	21.3	26.2	22.7
$E^*_{mix\_pred} - E^*_{core}$	41.6	26.3	20.6	37.0	38.8	17.9	19.8	26.2	27.8	23.1

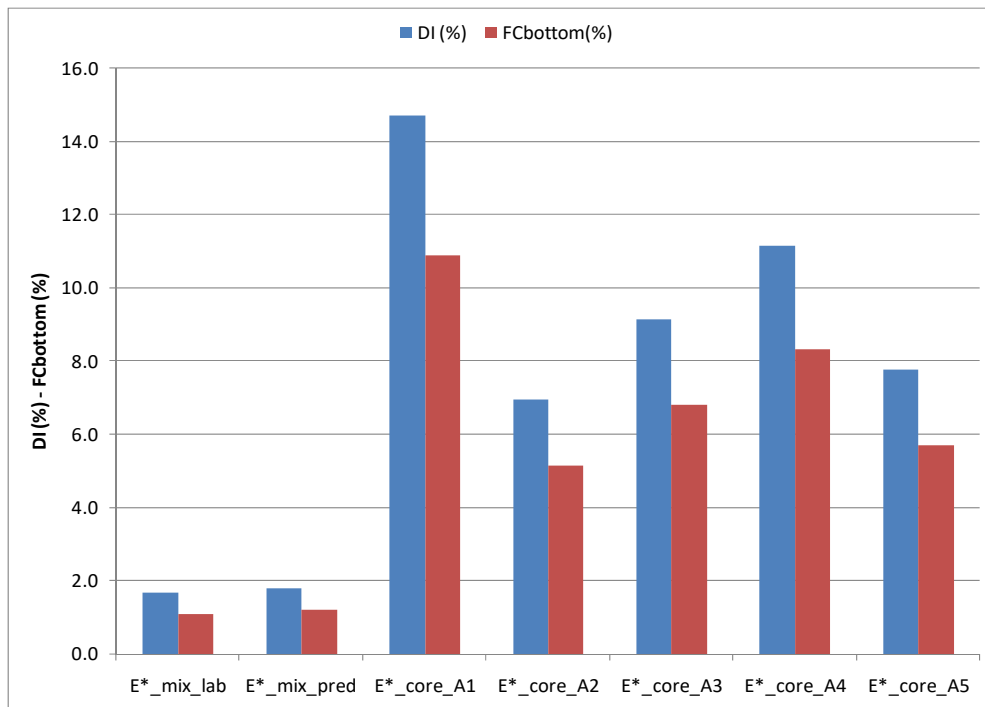
Οι τιμές  $E^*_{mix\_pred}$  παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις μετρημένες ( $E^*_{mix\_lab}$ ) με το εύρος τιμών του RMSE να κυμαίνεται από 4.9 έως 13.4 %. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι τιμές του  $E^*$  των πυρήνων παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις συγκριτικά με αυτές του μίγματος σχεδιασμού.

Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων θεωρώντας τις εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  του μίγματος σχεδιασμού, αποκλίνει κατά ένα εύρος από -2.7 (υποεκτιμώνται) έως 3.6% (υπερεκτιμώνται), αναφορικά με αυτή που προκύπτει θεωρώντας τις μετρημένες τιμές του  $E^*$  του μίγματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρημένες τιμές του  $E^*$  των πυρήνων, το εύρος των αποκλίσεων τιμών των παραμορφώσεων που παρατηρούνται κυμαίνεται από -14.1 έως 14.5%. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων θεωρήθηκε σαν θερμοκρασίας αναφοράς οι 20 °C. Αυτό συνεπάγεται ότι οι αποκλίσεις που παρατηρούνται σχετίζονται με τις αποκλίσεις των τιμών του  $E^*$  για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία και όχι για όλο το εύρος θερμοκρασιών. Επομένως, η θεώρηση άλλης θερμοκρασίας αναφοράς ενδεχομένως να έχει σαν αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των παραπάνω αποκλίσεων, ανάλογα με τις τιμές του  $E^*$ .

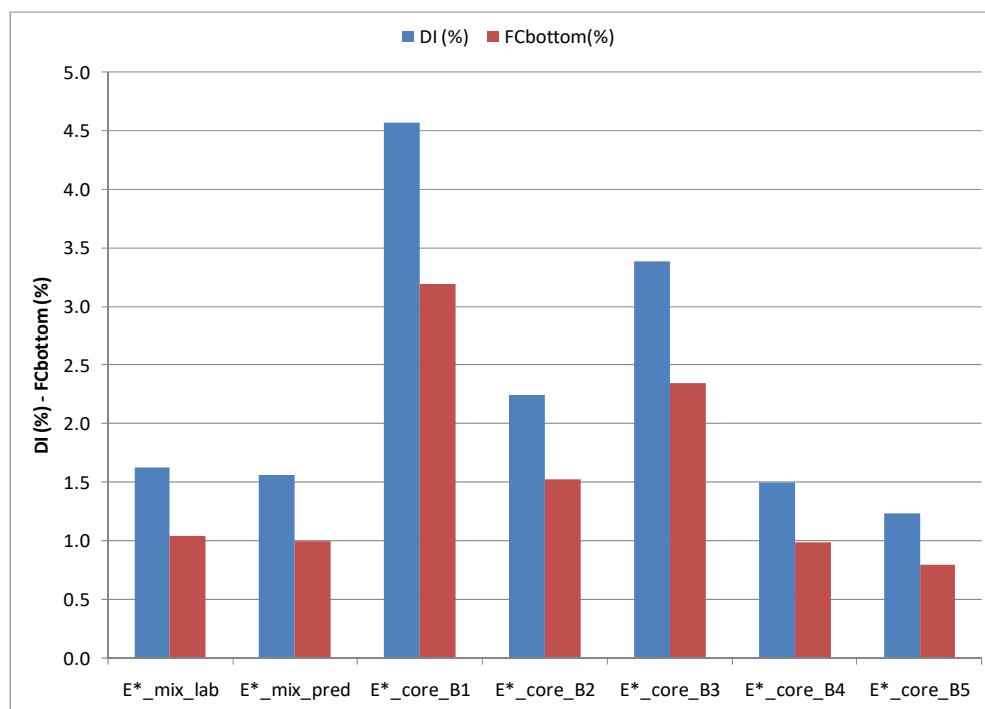
Στα Σχήματα 11.30-11.31 παρουσιάζεται ο δείκτης φθοράς (DI) στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων καθώς και η έκταση ρηγματώσεων που ξεκινούν από τον πυθμένα των ασφαλικών

στρώσεων ( $FC_{bottom}$ ), όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των Σχέσεων 10.1-10.8, για τα τμήματα A και B, αντίστοιχα.

Από τα Σχήματα αυτά προκύπτει ότι οι αποκλίσεις που παρατηρούνται από τη συγκριτική αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών του  $E^*$  του μίγματος σχεδιασμού και του μίγματος που τελικά κατασκευάστηκε, έχουν επίδραση στον τελικό δείκτη συμπεριφοράς που είναι το  $FC_{bottom}$ . Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στο Τμήμα A το  $FC_{bottom}$  που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη το  $E^*$  των μιγμάτων που τελικά κατασκευάστηκαν είναι μεγαλύτερο από αυτό που προέκυψε κατά τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη τα μίγματα σχεδιασμού. Η απόκλιση στο  $FC_{bottom}$  στην περίπτωση του πυρήνα A1 είναι ιδιαίτερα αισθητή. Όσον αφορά στο Τμήμα B οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στο  $FC_{bottom}$  είναι μικρότερης κλίμακας, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (πυρήνες B4 και B5) το  $FC_{bottom}$  είναι ίδιο ή και μικρότερο από αυτό του σχεδιασμού. Η αποδοχή ή μη των μιγμάτων που τελικά κατασκευάστηκαν με βάση τα αποτελέσματα του  $FC_{bottom}$  συνίσταται στην επιθυμητή ανώτατη οριακή τιμή του  $FC_{bottom}$  στο τέλος της διάρκειας υπολογισμού του οδοστρώματος. Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα αυτά είναι δυνατός ο προγραμματισμός ενός σχεδίου για τη συντήρηση των οδοστρωμάτων.



**Σχήμα 11.30 DI και  $FC_{bottom}$ , Τμήμα A**



**Σχήμα 11.31 DI και FC<sub>bottom</sub>, Τμήμα Β**

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι στο πλαίσιο των διαδικασιών ελέγχου της ποιότητας του κατασκευασμένου οδοστρώματος το E\* αποτελεί πολύτιμο εργαλείο, καθώς παρέχει σημαντική πληροφόρηση για τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος η οποία κατά επέκταση θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό και τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Λόγω της κρίσιμης συμβολής του E\* στις υπόψη διαδικασίες, η δυνατότητα εκτίμησης του E\* μέσω αλγορίθμων χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ειδικού εργαστηριακού εξοπλισμού, καθιστά την παραπάνω μεθοδολογία προσιτή και εύκολα εφαρμόσιμη.

#### **11.4.2 Συγκριτική αξιολόγηση του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας**

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής διερεύνησης της σχέσης μεταξύ του E\* που προσδιορίζεται στο εργαστήριο και του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει μέσω του ανάστροφου υπολογισμού αξιοποιώντας τα στοιχεία συλλογής των επιτόπου μετρήσεων (καταγραφή ελαστικών υποχωρήσεων με το σύστημα FWD, καταγραφή παχών επιμέρους στρώσεων οδοστρώματος με το σύστημα GPR, καταγραφή θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων), πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των τιμών του E\* των πυρήνων (E\*<sub>core</sub>) και των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας που εκτιμάται από τις επιτόπου μετρήσεις (Ein-situ).

Προκειμένου για τη σύγκριση των τιμών του Ein-situ με το E\*<sub>cores</sub> στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης, λαμβάνονται υπόψη η συχνότητα φόρτισης του FWD

καθώς και η θερμοκρασία που καταγράφηκε στο μέσω των ασφαλτικών στρώσεων κατά τη διάρκεια των επιτόπου μετρήσεων με το σύστημα FWD.

Για τον προσδιορισμό της συχνότητας του FWD, αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία της ιστορίας (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 11.4 έως 11.7, καθώς και το γραφικό προσδιορισμό των χρονικών τετμημένων που οριοθετούν τα διαστήματα  $t_{d1}$  (ms) και  $t_{d2}$  (ms) (Σχήμα 11.32), υπολογίζεται η συχνότητα φόρτισης ( $f_{FWD}$ ).

Οι επιμέρους χρονικές διάρκειες φόρτισης  $t_{b1}$  (ms) και  $t_{b2}$  (ms) ορίζονται από τα διαστήματα  $t_{d1}$  και  $t_{d2}$  ως εξής:

$$t_{b1} = \frac{2t_{d1}}{\pi} \quad (11.4)$$

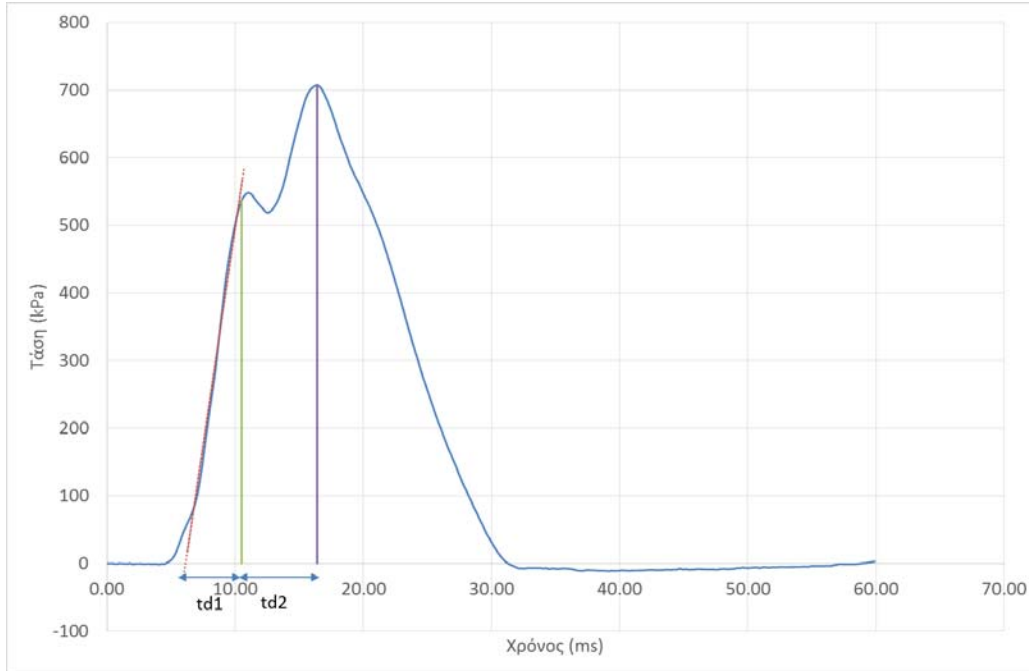
$$t_{b2} = t_{d2} \quad (11.5)$$

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

$$t_b = t_{b1} + t_{b2} \quad (11.6)$$

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

$$f_{FWD} = \frac{1}{2\pi t_b} \quad (11.7)$$



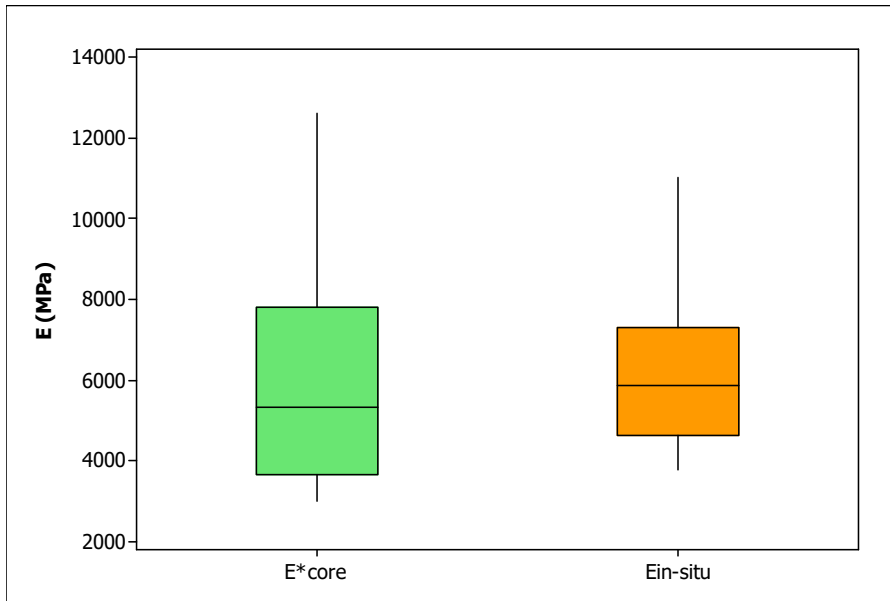
**Σχήμα 11.32 Χρονοϊστορία φόρτισης FWD**

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι η συχνότητα φόρτισης του FWD είναι ίση με 18 Hz. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων σε κάθε θέση ελέγχου (η οποία αντιστοιχεί στους πυρήνες) δίνεται στον Πίνακα 11.7.

Μέσω της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ core προσδιορίστηκε η τιμή του  $E^*$  που αντιστοιχεί στη συχνότητα φόρτισης και στην εκάστοτε θερμοκρασία κατά την καταγραφή με το σύστημα FWD. Στο Σχήμα 11.33 παρουσιάζεται το εύρος τιμών  $E^*$ core και Ein-situ.

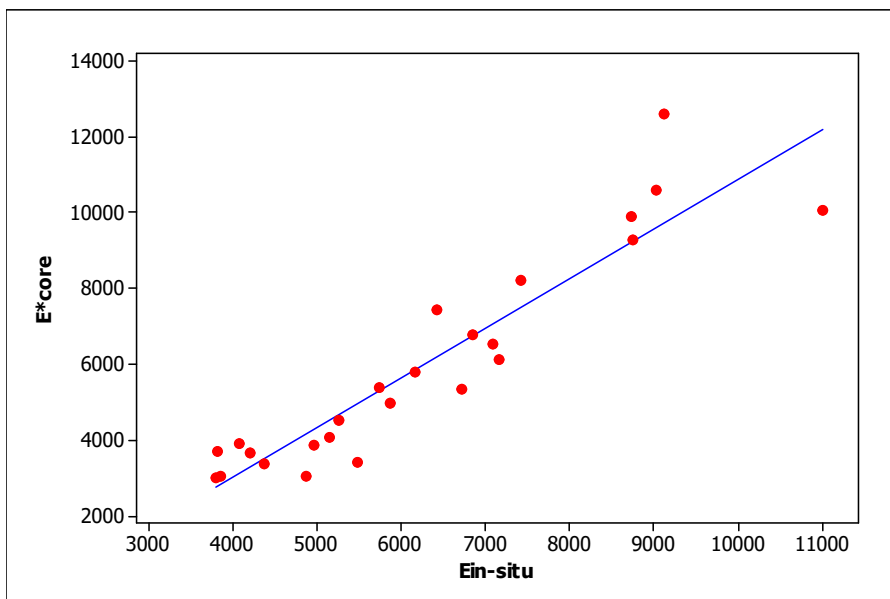
**Πίνακας 11.7 Θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων**

Θέσεις ελέγχου	Θερμοκρασία (°C)	Θέσεις ελέγχου	Θερμοκρασία (°C)
	31	B1	24
A1	35.6		39.7
	26.5	B2	24
A2	31.2		39.6
	35.9	B3	24
	26.8		39.6
A3	31.5	B4	24
	36.2		39.6
	27	B5	24
	31.6		40
A4	36.5		
	27.2		
	31.8		
A5	36.7		
	27.4		



**Σχήμα 11.33** Εύρος τιμών  $E^*_{core}$  και  $E_{in-situ}$

Το εύρος των τιμών  $E^*_{core}$  κυμαίνεται από 3000 έως 12600 MPa και είναι μεγαλύτερο από το εύρος των τιμών  $E_{in-situ}$ , το οποίο κυμαίνεται από 3800 έως 11000 MPa. Η διερεύνηση της συσχέτισης των υπόψη μέτρων δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάλυσης της απλής γραμμικής παλινδρόμησης. Στο Σχήμα 11.34 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των τιμών καθώς και η γραμμή της γραμμικής παλινδρόμησης.



**Σχήμα 11.34** Διάγραμμα διασποράς τιμών  $E^*_{core}$  και  $E_{in-situ}$

Η γραμμική σχέση των δύο μεγεθών περιγράφεται από τη Σχέση 11.8 και η τιμή του συντελεστή  $R^2$  είναι ίση με 0.89.

$$E_{core}^* = 1.311 \times E_{in-situ} - 2249 \quad (11.8)$$

Οι προβλεπόμενες τιμές του  $E^*$  των πυρήνων που προκύπτουν από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης ( $E^*_{core\_pred}$ ) δε διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τις μετρημένες τιμές ( $E^*_{core}$ ), σύμφωνα με τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου t-test (Πίνακας 11.8). Για διάστημα εμπιστοσύνης 95% η τιμή P-value είναι μεγαλύτερη από 0.05, το οποίο υποδηλώνει ότι η υπόθεση της μηδενικής διαφοράς δεν απορρίπτεται.

**Πίνακας 11.8 Αποτελέσματα ελέγχου t-test**

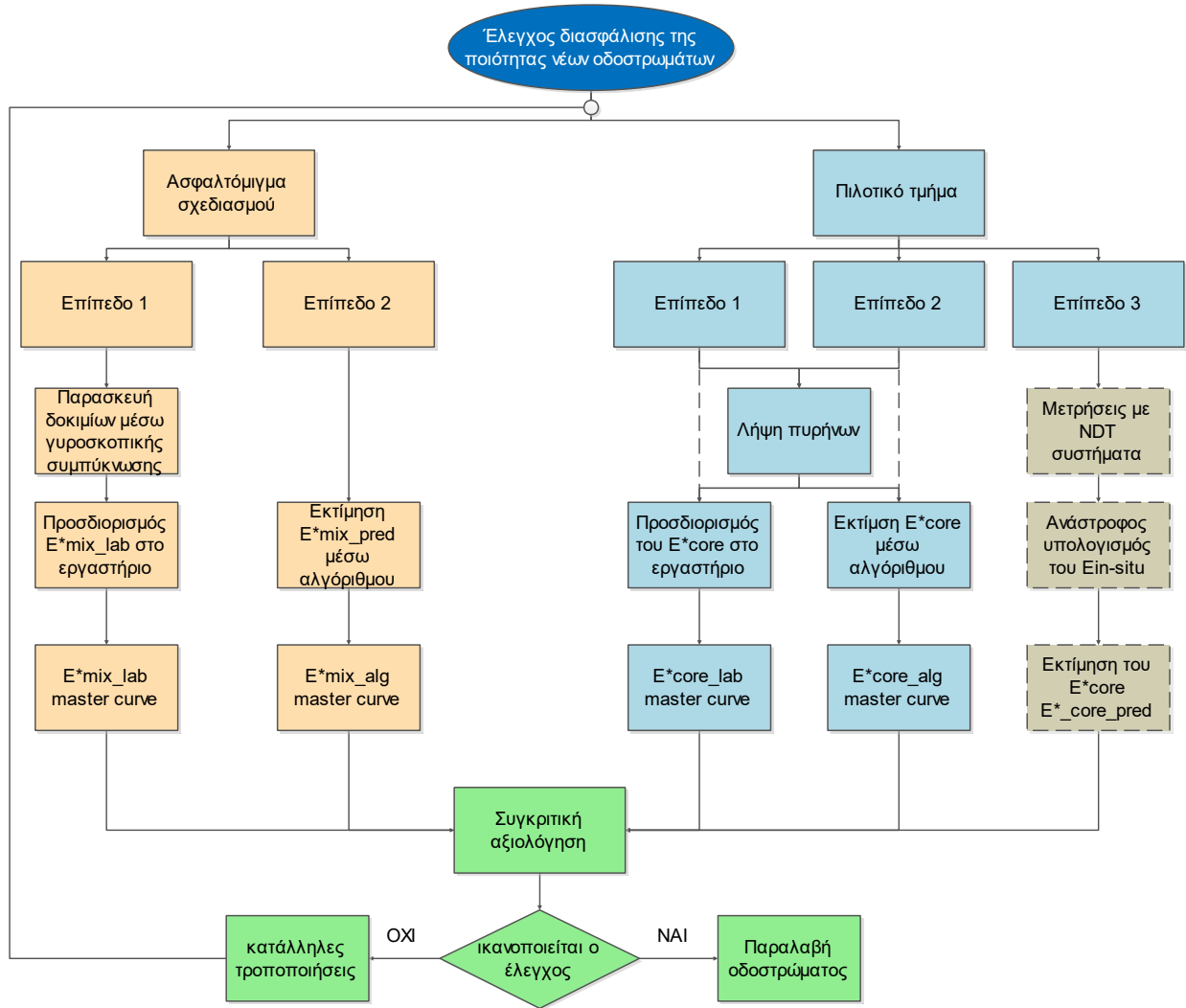
	N	Mean	StDev	SE Mean
$E^*_{core}$	25	5931	2757	551
$E^*_{core\_pred}$	25	5928	2557	511
Difference	25	3	1029	206

95% CI for mean difference: (-421, 428)  
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 0.02 P-Value = 0.987

Από την παραπάνω ανάλυση, παρόλο που η σχέση που αναπτύχθηκε μεταξύ του  $E^*$  των πυρήνων όπως αυτό προσδιορίζεται στο εργαστήριο και του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τις καταγραφές του FWD αφορά στο συγκεκριμένο οδικό τμήμα και μίγματα, προκύπτει ότι είναι δυνατή η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών. Επομένως, το  $E^*$  των πυρήνων μπορεί να εκτιμηθεί μέσω του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τον ανάστροφο υπολογισμό και να συγκριθεί με αυτό του μίγματος σχεδιασμού. Η στατική μέθοδος ανάστροφου υπολογισμού επιβάλλει τον περιορισμό εκτίμησης μίας τιμής του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας για κάθε θερμοκρασία καταγραφής και επομένως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν είναι δυνατή η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ . Η ανάπτυξη μιας μεθόδου δυναμικού ανάστροφου υπολογισμού, η οποία όμως να είναι εύχρηστη για να μπορεί να συμπεριληφθεί στις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων, αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και θεωρείται ότι είναι από μόνο του ένα θεμελιώδες θέμα.

### 11.5 Προτεινόμενο πλαίσιο πρωτοκόλλου εφαρμογής αλγορίθμων για νέα οδοστρώματα

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, προτείνεται η ανάπτυξη πλαισίου πρωτοκόλλου για τις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας και παραλαβής των νέων οδοστρωμάτων που φαίνεται στο Σχήμα 11.35.



**Σχήμα 11.35 Πλαίσιο πρωτοκόλλου εφαρμογής αλγορίθμων για νέα οδοστρώματα**

Όσον αφορά στο μίγμα σχεδιασμού διακρίνονται δύο Επίπεδα ανάλυσης. Σε περίπτωση διαθεσιμότητας του μίγματος σχεδιασμού, παρασκευάζονται δοκίμια ασφαλομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο συμπίκνωσης και στη συνέχεια τα δοκίμια αυτά υποβάλλονται σε εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*$  του μίγματος ( $E^*_{mix\_lab}$ ). Όταν το υλικό του μίγματος δεν είναι διαθέσιμο ή δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό του  $E^*$ , τότε αυτό εκτιμάται μέσω κατάλληλου αλγόριθμου ( $E^*_{mix\_alg}$ ) (Επίπεδο 2). Τα στοιχεία του μίγματος που είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση του αλγόριθμου, λαμβάνονται από τη μελέτη σύνθεσης. Η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης είναι δυνατή και για τα δύο Επίπεδα ανάλυσης.

Για τον προσδιορισμό της κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων που τελικά κατασκευάστηκαν, ως προς το  $E^*$ , προτείνονται τρία Επίπεδα ανάλυσης. Ανεξάρτητα από το



Επίπεδο ανάλυσης προτείνεται η κατασκευή ενός πιλοτικού τμήματος προκειμένου για τον έλεγχο της ποιότητας του νέου οδοστρώματος. Στο Επίπεδο 1 πραγματοποιείται λήψη πυρήνων και προσδιορίζεται το  $E^*$  των πυρήνων μέσω εργαστηριακής πειραματικής διάταξης ( $E^*_{core\_lab}$ ). Από τα στοιχεία αυτά στη συνέχεια κατασκευάζεται η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{core\_lab}$ . Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμος ο εργαστηριακός εξοπλισμός για τον προσδιορισμό του  $E^*$  ή το πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι μικρότερο από 15 εκ (και επομένως δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η δοκιμή σύμφωνα με το πρότυπο), το  $E^*$  εκτιμάται μέσω κατάλληλου αλγόριθμου (Επίπεδο 2). Τα στοιχεία που υπεισέρχονται σαν παράμετροι στον αλγόριθμο εκτίμησης του  $E^*$ , όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος και η ογκομετρική του σύσταση, προσδιορίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών (π.χ. εκχύλιση) επί των πυρήνων. Μέσω της διαδικασίας αυτής καθίσταται δυνατή η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  των πυρήνων ( $E^*_{core\_alg}$ ). Στο Επίπεδο 3, ο χαρακτηρισμός του μίγματος ως προς τη δυσκαμψία του πραγματοποιείται μέσω των καταγραφών με συστήματα NDT. Οι ελαστικές υποχωρήσεις και η στρωματογραφία του οδοστρώματος, που καταγράφονται από τα Συστήματα FWD και GPR, καθώς και άλλα στοιχεία όπως η θερμοκρασία, υπεισέρχονται στη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων (Ein-situ). Μέσω κατάλληλης συσχέτισης των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού και του  $E^*$  των πυρήνων στις αντίστοιχες θέσεις, εκτιμάται το  $E^*$  του πυρήνα ( $E^*_{core\_pred}$ ) για δεδομένη θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης. Δεδομένου ότι ο ανάστροφος υπολογισμός αφορά σε στατικές μεθοδολογίες ανάλυσης, εκτιμάται μια τιμή του  $E^*$  που αντιστοιχεί στις επιτόπου συνθήκες θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης που επικρατούν κατά την καταγραφή με το Σύστημα FWD.

Κατόπιν ολοκλήρωσης της διαδικασίας χαρακτηρισμού των μιγμάτων, του μίγματος σχεδιασμού και αυτού που τελικά κατασκευάστηκε, ως προς το  $E^*$ , ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση. Για τα Επίπεδα ανάλυσης 1 και 2 του μίγματος που κατασκευάστηκε η συγκριτική αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω των κεντρικών καμπυλών του  $E^*$ , ενώ στο Επίπεδο 3 ανάλυσης μέσω μεμονωμένων τιμών.

Από τη συγκριτική αξιολόγηση προσδιορίζονται οι τυχόν αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ του μίγματος σχεδιασμού και αυτού που τελικά κατασκευάστηκε. Στην περίπτωση που οι αποκλίσεις που παρατηρούνται υποδεικνύουν ότι το μίγμα που τελικά σχεδιάστηκε είναι υποδεέστερο ως προς αυτό που θεωρήθηκε κατά το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, είναι απαραίτητο να γίνουν κατάλληλες τροποποιήσεις. Στην περίπτωση που

προβλέπεται η κατασκευή πιλοτικού τμήματος για τον έλεγχο της ποιότητας του οδοστρώματος, οι τροποποιήσεις αυτές περιλαμβάνουν βελτιωτικές ενέργειες έτσι ώστε το μίγμα που παράγεται για να διαστρωθεί να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του μίγματος σχεδιασμού. Μέσω των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  καθίσταται δυνατός ο γρήγορος προσδιορισμός των παραμέτρων που θα πρέπει να αναθεωρηθούν (όπως για παράδειγμα η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του μίγματος), προκειμένου οι παρατηρούμενες αποκλίσεις από το μίγμα σχεδιασμού να ελαχιστοποιηθούν ή ακόμα και να εξαλειφθούν. Στόχος είναι οι τελικές αποκλίσεις να είναι τέτοιου βαθμού ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος. Στην περίπτωση που δεν προβλέπεται η κατασκευή πιλοτικού τμήματος και η διενέργεια των ελέγχων για τη διασφάλιση της ποιότητας γίνονται είτε παράλληλα είτε μετά το πέρας της κατασκευής, ο επανασχεδιασμός του μίγματος διάστρωσης δεν είναι εφικτός. Είναι όμως δυνατή η επαδιαστασιολόγηση του οδοστρώματος με βάση τα στοιχεία του  $E^*$  του μίγματος που τελικά διαστρώθηκε και ο προσδιορισμός της επίπτωσης που επιφέρουν οι παρατηρούμενες αποκλίσεις στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Από τις διαδικασίες ελέγχου της ποιότητας νέων οδοστρωμάτων μπορεί να προκύψει ότι το μίγμα που τελικά κατασκευάστηκε είναι ανώτερο του μίγματος σχεδιασμού ως προς το  $E^*$ . Σε αυτή την περίπτωση η επαναδιαστασιολόγηση του οδοστρώματος ενδεχομένως να οδηγήσει σε μείωση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων το οποίο συνεπάγεται οικονομικά οφέλη για τον κατασκευαστή. Διεθνώς, είναι σύνηθες η υπερκάλυψη των απαιτήσεων του σχεδιασμού να συνοδεύεται από οικονομικά πακέτα επιχορήγησης σαν ανταμοιβή.

Ανεξάρτητα από το αν το μίγμα που τελικά κατασκευάστηκε πληροί ή όχι τις απαιτήσεις του σχεδιασμού, ο προσδιορισμός της αρχικής κατάστασης του οδοστρώματος είναι κρίσιμης σημασίας, δεδομένου ότι η αρχική κατάσταση που επιτυγχάνεται αποτελεί το σημείο αναφοράς (zero point). Με βάση αυτό το σημείο μπορεί να γίνει πρόβλεψη της εξέλιξης της συμπεριφοράς του οδοστρώματος με συμβολή στη διαχείριση της συντήρησης των οδοστρωμάτων.

## **12 Εισαγωγή νέων αλγορίθμων στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εν λειτουργία οδοστρώματος**

### **12.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται διερεύνηση εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης των ασφαλικών στρώσεων εν λειτουργία οδοστρωμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μεγαλύτερο μέρος του οδικού δικτύου είναι ολοκληρωμένο, οι αρμόδιες υπηρεσίες εστιάζουν στην εξασφάλιση της αρχικά προβλεπόμενης διάρκειας ζωής των οδοστρωμάτων μέσω του προγραμματισμού εργασιών συντήρησης ή αποκατάστασης. Ο χρονικός προσδιορισμός της στιγμής της επέμβασης στο οδόστρωμα είναι βαρύνουσα σημασίας καθώς θα πρέπει να συνυπολογιστούν παράγοντες όπως η κατάσταση του οδοστρώματος και το κόστος της συντήρησης. Μια χρονικά καθυστερημένη επέμβαση έχει σαν συνέπεια τη μειωμένη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος με αποτέλεσμα ενέργειες επέμβασης μεγάλης έκτασης και αυξημένα κόστη.

Σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη περί προστασίας των οδοστρωμάτων (pavement preservation), η όποια μορφή επέμβασης στο οδόστρωμα θα πρέπει να γίνεται σε αρχικό στάδιο φθοράς έτσι ώστε να περιορίζεται στις ασφαλικές στρώσεις. Κατά αυτό τον τρόπο επεκτείνεται διαρκώς ο χρόνος ζωής του οδοστρώματος, το οποίο είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς τα οδοστρώματα συνεχίζουν να λειτουργούν ως αναπόσπαστο κομμάτι του συγκοινωνιακού ιστού στην πραγματικότητα αενάως (perpetual pavements). Τα παραπάνω είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την περιοδική παρακολούθηση της κατάστασης του οδοστρώματος.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, το  $E^*$  ενός ασφαλτομίγματος δεν αποτελεί βασική παράμετρο μόνο κατά το σχεδιασμό του μίγματος και τη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, αλλά και κατά τη λειτουργία του οδοστρώματος. Η γνώση του  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων ενός υφιστάμενου οδοστρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της δομικής τους κατάστασης και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, η οποία αντανάκλαται στη δομική κατάσταση και συμπεριφορά του συνόλου του οδοστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω είναι κρίσιμης σημασίας η ύπαρξη μιας μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των εν λειτουργία οδοστρωμάτων. Η μεθοδολογία που προτείνεται από τον

οδηγό διαστασιολόγησης της νέας μεθόδου AASHTO (MEPDG) βασίζεται στο  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων και πιο συγκεκριμένα όπως αυτό προκύπτει από τον αλγόριθμο εκτίμησης. Υπό το πρίσμα αυτό, στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η εφαρμοσιμότητα της υπόψη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των ασφαλικών στρώσεων ενός εν λειτουργία οδοστρώματος με κεντρικό άξονα τον αλγόριθμο εκτίμησης του  $E^*$ . Για το σκοπό αυτό οργανώθηκε οδικό πείραμα, το οποίο περιγράφεται λεπτομερώς στη συνέχεια, προκειμένου για τη συλλογή των απαραίτητων στοιχείων.

## 12.2 Ανάπτυξη κεντρικής καμπύλης του $E^*$ ασφαλικών στρώσεων εν λειτουργία οδοστρώματος

Σύμφωνα με τον οδηγό διαστασιολόγησης της νέας μεθόδου AASHTO (MEPDG) η μεθοδολογία που προτείνεται για τον προσδιορισμό του  $E^*$  των ασφαλικών στρώσεων εν λειτουργία οδοστρωμάτων περιλαμβάνει τα στάδια που περιγράφονται ακολούθως (AASHTO 2008):

- Διεξαγωγή μετρήσεων FWD στο εν λειτουργία οδόστρωμα για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων ( $E_{FWD}$ ) στη θερμοκρασία διεξαγωγής των μετρήσεων  $T_f$ , μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού.
- Λήψη πυρήνων από το οδόστρωμα για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής σύστασης του ασφαλτομίγματος και των απαραίτητων παραμέτρων για την ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης σύμφωνα με το επόμενο βήμα. Εναλλακτικά τα στοιχεία αυτά μπορούν να προκύψουν από διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία.
- Ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  του μίγματος ( $E^*_{undamaged}$ ) από τα στοιχεία των πυρήνων μέσω του αλγορίθμου Witczak 1-37A. Κατόπιν της εκτίμησης του  $E^*$  σε διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης, κατασκευάζεται η κεντρική καμπύλη του  $E^*$  στη θερμοκρασία αναφοράς μέσω της προσαρμογής της σιγμοειδούς συνάρτησης στις εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  (Σχέση 12.1).

$$\log E^* = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log f_r}} \quad (12.1)$$

όπου  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  οι συντελεστές της σιγμοειδούς συνάρτησης και  $f_r$  η μειωμένη συχνότητα.

- Εκτίμηση της φθοράς  $d$  μέσω της παρακάτω σχέσης

$$d = 1 - \frac{E_{FWD}}{E_{undamaged}^*} \quad (12.2)$$

όπου  $E_{undamaged}^*$  η εκτιμώμενη τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε θερμοκρασία  $T_f$  και συχνότητα ισοδύναμη με αυτή της παλμικής φόρτισης που εφαρμόζει το FWD.

- Υπολογισμός του συντελεστή  $\alpha'$  σύμφωνα με τη Σχέση 12.3

$$\alpha' = (1 - d) \times \alpha \quad (12.3)$$

- Προσδιορισμός της κεντρικής καμπύλης του επιτόπου  $E^*$  των ασφαλτικών στρώσεων (field damaged  $E^*$ ) αντικαθιστώντας το συντελεστή  $\alpha$  στην εξίσωση 12.1 με τον  $\alpha'$ .

Στην παραπάνω μεθοδολογία για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  του μίγματος ( $E_{undamaged}^*$ ) είναι απαραίτητη η εφαρμογή του αλγόριθμου Witczak 1-37A. Ωστόσο, σύμφωνα με αποτελέσματα της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, ο υπόψη αλγόριθμος δεν έχει καλή προσαρμογή σε μίγματα που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο. Επομένως, προκειμένου για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας θα πρέπει να ενεργοποιηθεί ο αλγόριθμος εκτίμησης του  $E^*$  ο οποίος όμως είναι κρίσιμης σημασίας να περιγράψει ικανοποιητικά χωρίς μεγάλα σφάλματα τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος ως προς το  $E^*$ . Δεδομένων τούτων, στην υπόψη διερεύνηση αξιοποιήθηκαν οι κατάλληλοι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$ , οι οποίοι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας μπορούν να περιγράψουν με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας το  $E^*$  των υπό θεώρηση μιγμάτων.

### 12.3 Πειραματική διαδικασία

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης οργανώθηκε επιτόπου οδικό πείραμα σε εν λειτουργία οδόστρωμα του οδικού δικτύου Κόρινθος-Τρίπολη. Η διατομή του υπόψη τμήματος περιλαμβάνει τη στρώση έδρασης, την ενοποιημένη στρώση βάσης/υπόβασης από ασύνδετα αμμοχάλικα και τις ασφαλτικές στρώσεις. Οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούνται από την ασφαλτική βάση (ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου) και την αντιολισθηρή (ασφαλτόμιγμα ανοικτού τύπου). Το συνδετικό υλικό του ασφαλτομίγματος της ασφαλτικής βάσης είναι κοινή άσφαλτος τύπου 50-70 PEN, ενώ του ασφαλτομίγματος της αντιολισθηρής στρώσης είναι άσφαλτος 50-70 PEN τροποποιημένη με SBS 4%.

Στο υπό διερεύνηση οδικό τμήμα πραγματοποιήθηκαν καταγραφές με τα NDT συστήματα FWD και GPR. Τα στοιχεία της στρωματογραφίας που προέκυψαν από την επεξεργασία και ανάλυση

των καταγραφών με το σύστημα GPR αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση των παχών των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα, προκειμένου για την εισαγωγή τους στη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Ο ανάστροφος υπολογισμός για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων, καθώς και του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα και της στρώσης έδρασης, πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού (BackGenetic3D) (Alkasawneh 2007), το οποίο βασίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους εκτενής αναφορά στους οποίους έχει πραγματοποιηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των καταγραφών με τα συστήματα NDT, πραγματοποιήθηκε περιορισμένης έκτασης πυρηνοληψία (τρεις πυρήνες) σε θέσεις όπου υπήρχαν καταγραφές με το σύστημα FWD, οι οποίοι μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ προκειμένου για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής σύστασης των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων, της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών και των χαρακτηριστικών της ασφάλτου. Από τις εργαστηριακές δοκιμές προέκυψε ότι οι πυρήνες είναι παρόμοιας σύστασης, όπως ήταν αναμενόμενο εφόσον πρόκειται για ένα οδικό τμήμα με ενιαία διατομή, και επομένως για την περαιτέρω ανάλυση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν σε έναν πυρήνα.

Στους Πίνακες 12.1-12.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των μιγμάτων της ασφαλικής βάσης και αντιολισθηρής στρώσης, αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά των συνδετικών υλικών καθώς και η ογκομετρική σύσταση των μιγμάτων δίνονται στους Πίνακες 12.3-12.4, αντίστοιχα.

**Πίνακας 12.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών ασφαλτομίγματος ασφαλικής βάσης**

Μέγεθος κοσκίνου	Διερχόμενο (%)
25.0 mm (1 in)	100
19.0 mm (3/4 in.)	100
12.5 mm (1/2 in.)	85
4.75 mm (No. 4)	45
2.00 mm (No. 10)	41
0.42 mm (No. 40)	18
0.18 μm (No. 80)	11
75μm (No. 200)	6.5

**Πίνακας 12.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης**

Μέγεθος κοσκίνου	Διερχόμενο (%)
19.0 mm (3/4 in.)	100
12.5 mm (1/2 in.)	92
9.5 mm (3/8 in)	69
4.75 mm (No. 4)	40
2.00 mm (No. 10)	21
1.18 mm (No. 16)	12
0.3 mm (No. 50)	5
75μm (No. 200)	3.4

**Πίνακας 12.3 Χαρακτηριστικά ασφάλτου**

	Ασφαλτική βάση	Αντιολισθηρή στρώση
PEN	58	52
TBA (οC)	49.5	72.8
A	12.43	7.27
VTS	-4.21	-2.32

**Πίνακας 12.4 Ογκομετρική σύσταση μιγμάτων**

	Ασφαλτική βάση	Αντιολισθηρή στρώση
$V_a$ (%)	4.5	11.5
$V_b$ (%)	4.3	4.6
$V_{beff}$ (%)	10.3	11.9

Στον Πίνακα 12.3 δίνονται επίσης οι τιμές των παραμέτρων A και VTS οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση το δείκτη διείδυσης και τη θερμοκρασία μάλθωσης για κάθε τύπο ασφάλτου.

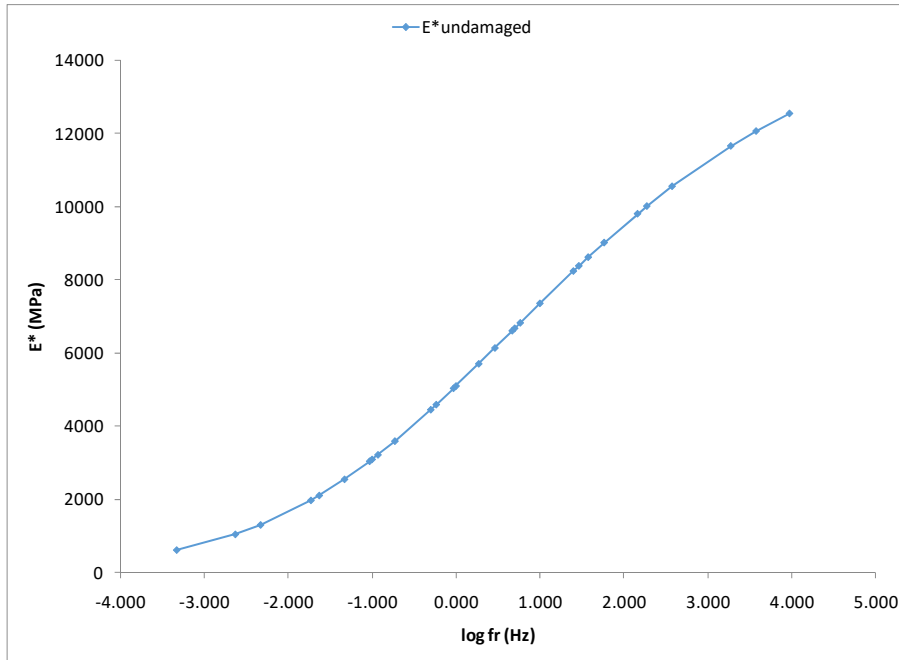
Δεδομένου ότι η διατομή του οδοστρώματος περιλαμβάνει δύο ασφαλτικές στρώσεις διαφορετικής σύστασης, για την εκτίμηση του  $E^*$  χρησιμοποιήθηκαν δύο αλγόριθμοι: ο αλγόριθμος AIG\_DG για το μίγμα της στρώσης ασφαλτικής βάσης (Σχέση 8.2) και ο αλγόριθμος Witczak 1-37A (Σχέση 4.13) για το μίγμα της αντιολισθηρής στρώσης. Για την εκτίμηση του  $E^*$  του μίγματος της αντιολισθηρής στρώσης επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Witczak 1-37A καθώς πρόκειται για μίγμα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών <16%. Επομένως, όπως αναφέρεται σε προηγούμενο εδάφιο, ο αλγόριθμος Witczak 1-37A εκτίμα με σχετικά καλή ακρίβεια την τιμή του  $E^*$  του προαναφερθέντος μίγματος.

Προκειμένου για την εκτίμηση του  $E^*$  του πυρήνα (composite modulus) μέσω των αλγορίθμων, συνδυάστηκαν οι τιμές του  $E^*$  καθώς και τα πάχη των επιμέρους στρώσεων σύμφωνα με τη Σχέση 11.3. Σε αυτή τη διαδικασία κάθε εκτιμώμενη τιμή του  $E^*$ , σε κάθε θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης, συνδυάστηκε με τα πάχος των επιμέρους ασφαλτικών στρώσεων για τον προσδιορισμό του  $E^*$  του πυρήνα ( $E^*_{undamaged}$ ). Αυτές οι τιμές του  $E^*_{undamaged}$  λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$ , χρησιμοποιώντας τη σιγμοειδή συνάρτηση (Σχέση 3.12) και την πολυωνυμική σχέση για το συντελεστή μετατόπισης (Σχέση 3.9).

## 12.4 Ανάλυση στοιχείων

Στο Σχήμα 12.1 παρουσιάζεται η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{undamaged}$  για θερμοκρασία αναφοράς 20 °C, η οποία περιγράφεται από τη Σχέση 12.4.

$$\log E^* = 0.521715 + \frac{2.823081}{1 + \exp(-1.595648 - 0.473622 \log fr)} \quad (12.4)$$

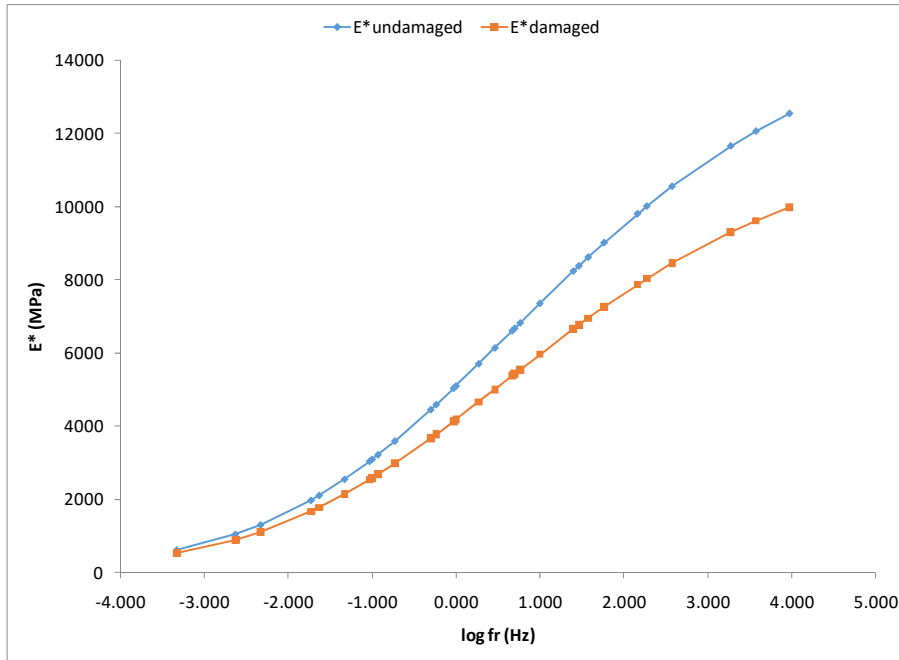


**Σχήμα 12.1** Κεντρική καμπύλη  $E^*_{undamaged}$

Για την εκτίμηση της φθοράς  $d$  μέσω της Σχέσης 12.2 είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της τιμής του  $E^*_{undamaged}$  που αντιστοιχεί στις επιτόπου συνθήκες μέτρησης (θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης) με το σύστημα FWD. Η θερμοκρασία στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων η οποία καταγράφηκε κατά τη διάρκεια των επιτόπου μετρήσεων είναι ίση με 9.5 °C. Όσον αφορά στη συχνότητα η οποία είναι ισοδύναμη με αυτή της παλμικής φόρτισης που επιβάλλει το σύστημα FWD, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 11. Με βάση τα στοιχεία της χρονοϊστορίας (time history) της ημιτονοειδούς φόρτισης, στην αντίστοιχη θέση ελέγχου, προέκυψε ότι η συχνότητα φόρτισης του FWD είναι ίση με 16.3 Hz. Για αυτές τις συνθήκες φόρτισης η τιμή του  $E^*_{undamaged}$  είναι ίση με 11039 MPa. Από τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων προέκυψε ίσο με 10639 MPa. Με βάση τα παραπάνω, οι τιμές της φθοράς  $d$  και του συντελεστή  $\alpha'$ , σύμφωνα με τις Σχέσεις 12.2 και 12.3, αντίστοιχα, είναι 0.036 και 2.72087. Αντικαθιστώντας στη Σχέση 12.4 την τιμή του συντελεστή  $\alpha$  (ίση με 2.823081) με την τιμή του συντελεστή  $\alpha'$  (ίση με 2.72087), προκύπτει η σχέση της σιγμοειδούς συνάρτησης της κεντρικής καμπύλης του  $E^*_{damaged}$  (Σχέση 12.5). Στο Σχήμα 12.2 παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες του  $E^*_{undamaged}$  και  $E^*_{damaged}$ .



$$\log E^* = 0.521715 + \frac{2.72087}{1 + \exp(-1.595648 - 0.473622 \log fr)} \quad (12.5)$$



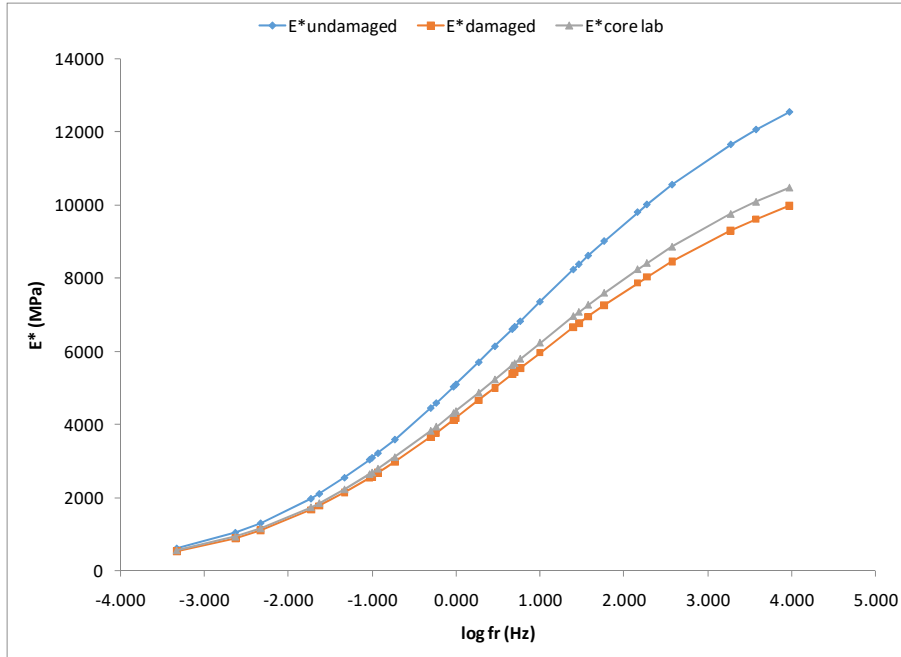
**Σχήμα 12.12.2** Κεντρικές καμπύλες  $E^*_{undamaged}$  και  $E^*_{damaged}$

Η φθορά και κατά συνέπεια η υποβάθμιση της κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων δεν κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο χρόνος λειτουργίας του υπό διερεύνηση οδοστρώματος είναι τρία έτη.

Δεδομένου, αφενός μεν του ότι οι πυρήνες του οδοστρώματος δεν παρουσιάζουν φθορές (πχ ρηγματώσεις) και αφετέρου ότι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι της τάξης των 15 cm, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός του  $E^*$  των πυρήνων ( $E^*_{damaged\_lab}$ ) και μέσω εργαστηριακής πειραματικής διάταξης. Η εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό του  $E^*_{damaged\_lab}$  πραγματοποιήθηκε για θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37 °C και συχνότητες 25, 10, 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz. Η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{damaged\_lab}$  περιγράφεται από τη Σχέση 12.6.

$$\log E^* = 0.521715 + \frac{2.742355}{1 + \exp(-1.595648 - 0.473622 \log fr)} \quad (12.6)$$

Στο Σχήμα 12.3 παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες των  $E^*_{undamaged}$ ,  $E^*_{damaged}$  και  $E^*_{damaged\_lab}$ .



**Σχήμα 12.3** Κεντρικές καμπύλες  $E^*_{undamaged}$ ,  $E^*_{damaged}$  και  $E^*_{damaged\_lab}$

Από το παραπάνω Σχήμα παρατηρείται ότι αποκλίσεις των κεντρικών καμπυλών των  $E^*_{damaged}$  και  $E^*_{damaged\_lab}$  δεν είναι μεγάλες. Επίσης, η τιμή του συντελεστή  $\alpha$  της Σχέσης 12.6 (ίση με 2.742355) δε διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη τιμή της Σχέσης 12.5 (ίση με 2.72087). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου t-test η διαφορά των  $E^*_{damaged}$  και  $E^*_{damaged\_lab}$  μπορεί να θεωρηθεί της τάξης των 200 MPa, καθώς για διάστημα εμπιστοσύνης 95% η τιμή P-value είναι μεγαλύτερη από 0.05 (Πίνακας 12.5).

**Πίνακας 12.5** Αποτελέσματα ελέγχου t-test

	N	Mean	StDev	SE Mean
$E^*_{damaged\_lab}$	30	5145	2880	526
$E^*_{damaged}$	30	4925	2740	500
Difference	30	220	140.1	25.6

95% CI for mean difference: (167.7, 272.3)  
 T-Test of mean difference = 200 (vs not = 0): T-Value = 0.78 P-Value = 0.441

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πλαίσιο της εκτίμησης της δομικής κατάστασης των ασφαλικών στρώσεων ενός εν λειτουργία οδοστρώματος, μπορεί να ακολουθηθεί η μεθοδολογία που προτείνεται από τον οδηγό διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της νέας μεθόδου AASHTO (MEPDG) για την εκτίμηση της κεντρικής καμπύλης του επιτόπου μέτρου δυσκαμψίας. Κρίσιμης σημασίας είναι η ύπαρξη αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ , μέσω των οποίων καθίσταται δυνατός ο χαρακτηρισμός των ασφαλικών στρώσεων. Οι μικρής κλίμακας αποκλίσεις των κεντρικών καμπυλών  $E^*_{damaged}$  και  $E^*_{damaged\_lab}$ , υποδεικνύει την ικανότητα των

αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  που θεωρήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση, να περιγράψουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων ως προς το  $E^*$ .

## **13 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα**

### **13.1 Κύρια συμπεράσματα**

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας ανά ερευνητική ενότητα παρουσιάζονται ακολούθως.

#### **13.1.1 Διερεύνηση για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας**

- Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, καθώς και τη διεθνή εμπειρία σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων, διαφάνηκε η σπουδαιότητα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ( $E^*$ ) του ασφαλτομίγματος, καθώς περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Αποτελεί βασική παράμετρο σε θέματα που σχετίζονται με το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση των μιγμάτων, τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση του συνόλου του οδοστρώματος.
- Για τον προσδιορισμό του  $E^*$  έχουν αναπτυχθεί διάφορες πειραματικές διατάξεις. Ωστόσο, αυτή που επικρατεί και χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτή της μονοαξονικής θλίψης.
- Με στόχο την υποκατάσταση της εργαστηριακής δοκιμής για τον προσδιορισμό του  $E^*$  έχουν αναπτυχθεί διαχρονικά αλγόριθμοι εκτίμησης. Οι πλέον πρόσφατοι διεθνείς αλγόριθμοι, βασίζονται στα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Όμως, η δυνατότητα εφαρμογής τους σε ποικίλους τύπους μιγμάτων δεν ορίζεται σαφώς. Ως εκ τούτου αποτέλεσε αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος και διερεύνησης της παρούσας έρευνας.

#### **13.1.2 Διερεύνηση της προσαρμογής διεθνών αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ των υπό διερεύνηση μιγμάτων**

- Όσον αφορά στα μίγματα κλειστού τύπου με τύπο ασφάλτου 50-70 PEN, οι τιμές που προκύπτουν από τον αλγόριθμο Bari & Witczak αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό και υπερεκτιμούνται με αναφορά τις μετρημένες. Οι τιμές του  $E^*$  του αλγόριθμου Hirsch υποεκτιμούνται, ενώ οι τιμές του  $E^*$  του αλγόριθμου Witczak 1-37A υπερεκτιμούνται σε μικρό βαθμό. Σε κάθε περίπτωση από τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων προέκυψε

ότι παραβιάζονται οι αρχές της τυχαιότητας και κανονικότητας των σφαλμάτων γεγονός που υποδηλώνει τη μη καταλληλότητα των αλγορίθμων.

- Η προσομοίωση της συμπεριφοράς της τροποποιημένης ασφάλτου των μιγμάτων ανοικτού τύπου, σε όρους  $G^*_b$ , που υπεισέρχεται στους αλγόριθμους εκτίμησης του  $E^*$  τόσο των Bari & Witczak όσο και του Hirsch, δεν ήταν δυνατή μέσω διεθνών μοντέλων εκτίμησης. Επομένως, δεν ήταν εφικτή στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας η ενεργοποίηση των υπόψη αλγορίθμων και διερευνήθηκε μόνο ο αλγόριθμος Witczak 1-37A για την προσαρμογή του.
- Οι τιμές του  $E^*$  των μιγμάτων ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών μεγαλύτερο από 16% υποεκτιμούνται σε μεγάλο βαθμό συγκριτικά με τις μετρημένες. Η μη καλή προσαρμογή του αλγόριθμου Witczak 1-37A σε αυτά τα μίγματα ήταν αναμενόμενη καθώς η βάση δεδομένων που υποστηρίζει την ανάπτυξη του υπόψη αλγόριθμου δεν περιλαμβάνει μίγματα με ποσοστό κενών τέτοιου μεγέθους.
- Οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  για τα μίγματα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών μικρότερο από 16%, παρουσιάζουν σχετικά μικρές αποκλίσεις από τις μετρημένες και τα διαγράμματα ελέγχου των σφαλμάτων υποδεικνύουν ότι δεν παραβιάζονται η σταθερή διακύμανση και κανονικότητα των υπολοίπων.
- Από τα παραπάνω κατέστη σαφής η ανάγκη ανάπτυξης νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  των υπό διερεύνηση ασφαλτομιγμάτων.

### **13.1.3 Ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ των υπό διερεύνηση μιγμάτων**

- Αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος για τα μίγματα κλειστού τύπου (AIG\_DG), η μαθηματική έκφραση του οποίου βασίζεται στον αλγόριθμο Witczak 1-37A και περιγράφεται από τη σιγμοειδή συνάρτηση.
- Για τα μίγματα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών αέρα μικρότερο από 16%, δεν ήταν δυνατή η περαιτέρω βελτιστοποίηση των συντελεστών του αλγόριθμου Witczak 1-37A. Ωστόσο, θεωρείται ότι το  $E^*$  εκτιμάται με σχετικά καλή ακρίβεια από τον αλγόριθμο Witczak 1-37A.
- Για τα μίγματα ανοικτού τύπου με ποσοστό κενών αέρα μεγαλύτερο από 16%, αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος (AIG\_OG). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το

γεγονός ότι η θεώρηση της σιγμοειδούς καμπύλης για την περιγραφή της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων με μεγάλο ποσοστό κενών ήταν επιτυχής. Το πεδίο εφαρμογής των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  σε μίγματα ανοικτού τύπου με μεγάλο ποσοστό κενών αποτελεί αντικείμενο περιορισμένης διερεύνησης διεθνώς.

- Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στους νέους αλγόριθμους για την εκτίμηση του  $E^*$  αφορούν σε στοιχεία ογκομετρικής σύστασης του μίγματος (ποσοστό κενών αέρα, βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου), κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών και χαρακτηριστικά της ασφάλτου (βαθμός διείσδυσης και θερμοκρασία μάλθωσης για τον υπολογισμό του ιξώδους συναρτήσεως της θερμοκρασίας). Τα στοιχεία αυτά προσδιορίζονται κατά τη μελέτη σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων και επομένως για την εκτίμηση του  $E^*$  δεν απαιτούνται επιπλέον εργαστηριακοί έλεγχοι. Η εισαγωγή του  $E^*$  στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος πιστεύεται ότι είναι απαραίτητη, στοχεύοντας σε μια πιο ολοκληρωμένη διαδικασία χαρακτηρισμού του ασφαλτομίγματος που μπορεί να αξιοποιηθεί, εκτός άλλων, σε μηχανιστικές-εμπειρικές μεθόδους διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

#### **13.1.4 Αξιολόγηση του νέου αλγόριθμου μιγμάτων κλειστού τύπου σε μίγματα που δεν περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων**

- Ο διαφορετικός τύπος ασφάλτου των νέων μιγμάτων (30-45 PEN) δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιρροής της προσαρμογής του νέου αλγόριθμου.
- Ως σημαντική παράμετρος επιρροής προέκυψε το ποσοστό της παιπάλης, το οποίο ήταν εκτός της κατώτερης τιμής που περιλαμβάνεται στη βάση δεδομένων ανάπτυξης του νέου αλγόριθμου.
- Η εφαρμοσιμότητα του νέου αλγόριθμου οριοθετείται από τα χαρακτηριστικά των μιγμάτων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων.
- Με την επικαιροποίηση και διεύρυνση της βάσης δεδομένων με τα στοιχεία των επιπλέον μιγμάτων, κατέστη δυνατή η ανάπτυξη ενός αναθεωρημένου αλγόριθμου ο οποίος έχει καλή προσαρμογή στο σύνολο των μιγμάτων.

Η μαθηματική έκφραση, η οποία αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη του αναθεωρημένου αλγόριθμου, ήταν του Witczak 1-37A. Η βάση δεδομένων του αναθεωρημένου αλγόριθμου, περιλαμβάνει χαρακτηριστικά μιγμάτων τα οποία είναι εκτός του εύρους της βάσης δεδομένων

που αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου Witczak 1-37A. Πιο συγκεκριμένα, στη βάση δεδομένων του Witczak 1-37A δεν περιλαμβάνονται μίγματα με τέτοιο τύπο ασφάλτου.

#### **13.1.5 Διερεύνηση της εισαγωγής των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στην κόπωση των ασφαλτομιγμάτων**

- Από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε ως προς το ποσοστό των ρηγματώσεων που οφείλεται σε κόπωση των ασφαλικών στρώσεων (FC), προέκυψε ότι μέσω της ανάπτυξης των νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  το ποσοστό αυτό μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια, συγκριτικά με αυτό που προκύπτει θεωρώντας τις μετρημένες τιμές του  $E^*$ .
- Ως συνέπεια, μέσω του αλγορίθμου εκτίμησης του  $E^*$  είναι εφικτή, εφόσον το σύστημα έργου του οδοστρώματος το επιτρέπει, η βελτιστοποίηση της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος της ασφαλικής βάσης ως προς την αντοχή του σε κόπωση.

#### **13.1.6 Διερεύνηση εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στις διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας νέων οδοστρωμάτων**

- Από τη συγκριτική αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών που αναπτύχθηκαν προέκυψε ότι το  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να αποτελέσει βασική παράμετρο ελέγχου στις διαδικασίες ελέγχου και διασφάλισης της ποιότητας στο πλαίσιο κατασκευής ασφαλικών οδοστρωμάτων. Το κύριο πλεονέκτημα που απορρέει από αυτή τη θεώρηση, είναι η πλήρης περιγραφή της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.
- Μέσω του νέου αλγορίθμου εκτίμησης του  $E^*$  που αναπτύχθηκε στην παρούσα έρευνα, είναι δυνατός ο χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς των μιγμάτων που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ασφαλικών στρώσεων. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στους αλγόριθμους, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, η ογκομετρική σύσταση του μίγματος και βασικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου, μπορούν να προκύψουν μέσω απλών εργαστηριακών ελέγχων (π.χ. εκχύλιση) επί πυρήνων που λαμβάνονται από το οδόστρωμα σε σύντομο χρονικό διάστημα από την κατασκευή.
- Αναπτύχθηκε το πλαίσιο ενός προτεινόμενου πρωτοκόλλου για την υποστήριξη των διαδικασιών διασφάλισης της ποιότητας της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος

σχεδιασμού και της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος στο πλαίσιο κατασκευής ασφαλικών οδοστρωμάτων.

### **13.1.7 Διερεύνηση εισαγωγής των αλγορίθμων εκτίμησης του $E^*$ στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εν λειτουργία εύκαμπτων οδοστρωμάτων**

- Η ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης (master curve) του  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλικών στρώσεων εν λειτουργία οδοστρωμάτων, μπορεί να πραγματοποιηθεί συνεκτιμώντας το  $E^*$  των πυρήνων που προκύπτει από αλγόριθμο εκτίμησης και τα στοιχεία επιτόπου καταγραφών με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών.
- Μέσω αυτής της διαδικασίας, είναι δυνατή η ανάπτυξη της κεντρικής καμπύλης του  $E^*$  ακόμα και σε περιπτώσεις όπου το πάχος των ασφαλικών στρώσεων του οδοστρώματος, και επομένως και του πυρήνα, είναι μικρότερο από το απαιτούμενο σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T342-11 (15 cm). Μέσω της εκχύλισης του πυρήνα είναι δυνατός ο καθορισμός των απαραίτητων παραμέτρων για την εκτίμηση του  $E^*$  μέσω του προσαρμοσμένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα έρευνα.

## **13.2 Αξιοποίηση ερευνητικών αποτελεσμάτων**

Πιστεύεται ότι η παρούσα έρευνα, με βάσει τα ερευνητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, μπορεί να συμβάλλει στα ακόλουθα:

- Καθορισμός μεθοδολογίας για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$  στην περίπτωση που οι εκτιμώμενες τιμές μέσω του υφιστάμενου διεθνή αλγόριθμου Witczak παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις.
- Ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων η οποία είναι δυναμική και ως εκ τούτου μέσω της περαιτέρω επικαιροποίησής της με επιπλέον μίγματα είναι δυνατή η αναθεώρηση και προσαρμογή των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ .
- Η αξιοποίηση των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα έρευνα επεκτείνεται σε διεθνές επίπεδο κανονισμών και προδιαγραφών σύνθεσης μιγμάτων, υπό την προϋπόθεση ότι τα ασφαλτομίγματα συμπεριλαμβάνονται στη βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε.
- Αξιοποίηση των προτεινόμενων αλγορίθμων για τα μίγματα κλειστού τύπου στην εκτίμηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος σε βάθος χρόνου.



- Αξιοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου για τα μίγματα ανοικτού τύπου για τον γρήγορο αλλά και αξιόπιστο χαρακτηρισμό τους με συμβολή στην περαιτέρω προώθηση της έρευνας επί των ασφαλτοταπήτων κυκλοφορίας σε διεθνές επίπεδο, η οποία είναι περιορισμένη.
- Οι νέοι αλγόριθμοι μπορούν να αξιοποιηθούν για τη γρήγορη και αξιόπιστη κατάταξη των μιγμάτων (ranking) και κατ' επέκταση στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών της μελέτης σύνθεσης του μίγματος, στην αξιολόγηση νέας τεχνολογίας βιώσιμων ενεργειακών υλικών (όπως warm asphalt mix) καθώς και στην εφαρμοσμένη έρευνα όσον αφορά σε νέας τεχνολογίας ασφαλτομίγματα.
- Συμβολή στις διαδικασίες για την αξιοποίηση των νέων αλγορίθμων στο πλαίσιο του αναλυτικού υπολογισμού οδοστρωμάτων, με έμφαση στη συμπεριφορά κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων (FC), σύμφωνα με τις βασικές αρχές της νέας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων AASHTO.
- Αξιοποίηση των νέων αλγορίθμων για την εισαγωγή του  $E^*$  σε δείκτη συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος (performance indicator) στο πλαίσιο του συμβατικού σχεδιασμού και ελέγχου των μιγμάτων (component analysis), ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του μίγματος καθώς και της μελέτης του οδοστρώματος κατά το στάδιο υλοποίησης του έργου. Τα παραπάνω μπορούν εν δυνάμει να εφαρμοστούν σε όλα τα συστήματα έργων υπό την προϋπόθεση ότι ακολουθούνται οι βασικές αρχές της ανάλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς σε κόπωση όπως αυτή διατυπώθηκε στην παρούσα εργασία.
- Επιπροσθέτως, οι νέοι αλγόριθμοι μπορούν να αξιοποιηθούν στα έργα που περιλαμβάνουν το σχέδιο συντήρησης όπως αυτά των Συστημάτων Παραχώρησης, στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του μίγματος πριν το στάδιο της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος και κατ' επέκταση στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου λειτουργίας του. Τα παραπάνω έχουν δυνατότητα άμεσης εφαρμογής σε Συστήματα Παραχώρησης, PPP, υπό την προϋπόθεση ότι ακολουθούνται οι βασικές αρχές της ανάλυσης της μηχανικής συμπεριφοράς σε κόπωση όπως αυτή διατυπώθηκε στην παρούσα εργασία.
- Οι νέοι αλγόριθμοι εκτίμησης του  $E^*$  μπορούν να αξιοποιηθούν ως προς το σκέλος της αξιολόγησης και αποκατάστασης (rehabilitation design) υφιστάμενων οδοστρωμάτων μέσω

μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων. Η επιστημονική αυτή περιοχή διαφαίνεται να έχει αμεσότερες δυνατότητες εφαρμογής από αυτή του σχεδιασμού νέου οδοστρώματος.

- Τα παραπάνω μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση ασφαλτομιγμάτων ασφαλικών στρώσεων εύκαμπτων, ημι-άκαμπτων και ημι-εύκαμπτων οδοστρωμάτων, καθώς και στο πλαίσιο της ενίσχυσης υφιστάμενων οδοστρωμάτων με ασφαλτομίγματα.
- Δεδομένου ότι σύμφωνα με την επικρατούσα σύγχρονη τάση για την προστασία των στρώσεων κυκλοφορίας των οδοστρωμάτων, η οποία εντάσσεται στην ευρύτερη έννοια της προστασίας (pavement preservation), θα πρέπει οι όποιες εργασίες συντήρησης να περιορίζονται στον ασφαλοτάτητα κυκλοφορίας. Ο νέος αλγόριθμος εκτίμησης του  $E^*$  μιγμάτων ανοικτού τύπου μπορεί να αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της συμβολής για την αξιολόγηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλικών στρώσεων κυκλοφορίας.

### 13.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Περαιτέρω εξέλιξη της έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διεύρυνση της βάσης δεδομένων που δημιουργήθηκε για την ανάπτυξη των αλγορίθμων εκτίμησης του  $E^*$ . Η διεύρυνση αυτή μπορεί να αφορά σε επιπλέον τύπους ασφαλτομιγμάτων, αδρανών και ασφάλτου που χρησιμοποιούνται διεθνώς. Η παρούσα βάση δεδομένων μπορεί να αποτελέσει προπομπό για τη δημιουργία, μέσω της βαθμονόμησης των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα έρευνα, νέων αλγορίθμων αντιπροσωπευτικών ασφαλτομιγμάτων με στόχο των εναρμονισμό τους.

Προς την κατεύθυνση εισαγωγής της εξελιγμένης νέας μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου AASHTO στην Ελλάδα, προτείνεται να ακολουθηθεί η διαδικασία που περιγράφεται στην παρούσα έρευνα για την περαιτέρω προσαρμογή των συντελεστών του νόμου κόπωσης.

Η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάλυση ευαισθησίας του  $E^*$  ως προς το ποσοστό των ρηγματώσεων λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Προτείνεται η επέκταση της υπόψη μεθοδολογίας αναφορικά με το προβλεπόμενο επίπεδο παραμενουσών παραμορφώσεων των ασφαλικών στρώσεων. Στις συμβατικές μεθόδους διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων η αντίσταση των ασφαλικών στρώσεων έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων δε λαμβάνεται υπόψη σαν κριτήριο αστοχίας, σε αντίθεση με τη νέα μέθοδο AASHTO.

Πιστεύεται ότι η πλήρης αποτύπωση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος των υφιστάμενων ασφαλικών στρώσεων, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας τη δυναμική φύση της φόρτισης με το σύστημα FWD μέσω μιας δυναμική διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού. Παρόλη την πληθώρα ερευνών και την ανάπτυξη σχετικών λογισμικών δυναμικού ανάστροφου υπολογισμού, το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την υπόψη ανάλυση, αποτελεί το μεγαλύτερο μειονέκτημα καθιστώντας τα δύσχρηστα και ασύμφορα στο πλαίσιο της συνεχούς περιοδικής παρακολούθησης και αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Το πεδίο αυτό αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και αποτελεί από μόνο του ένα θεμελιώδες θέμα.

## Βιβλιογραφίες

---

- AASHTO T201-03. (2003). *Standard Method of Test for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T320-03. (2003). *Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester (SST)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T342-11 (2011). *Standard Test method for the Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T49-07. (2007). *Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO T53-08. (2008). *Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO TP7-94. (1994). *Standard Test Method for Determining the Permanent Deformation and Fatigue Cracking Characteristics of Hot Mix Asphalt [HMA] Using the Simple Shear Test [SST] Device*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A manual of Practice*. AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alkasawneh W. (2007). *Backcalculation of Pavement Moduli Using Genetic Algorithms*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Akron.
- Alkasawneh W., Pan E. and Green R. (2007). *Effect of the Relative Root-Mean-Square Error on Pavement Response*. ASCE Geotechnical Special Publication “Analysis of Asphalt Pavement Materials and Systems: Emerging Methods”, 117-132.

- Al-Khateeb G., Shenoy A., Gibson N., Harman T. (2006). *A New Simplistic Model for Dynamic Modulus Predictions of Asphalt Paving Mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting. Paper Preprint CD.
- Almudaiheem J. and Al-Sugair F. (1991). *Effect of Loading Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphalt Concrete Mixes*. Transportation Research Record, No.1317, Transportation Research Board, Washington, DC, pp.139-144.
- Andrei D., Witczak M.W., and Mirza W. (1999). *Appendix CC-4: Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final document, NCHRP Project1-37A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, p. 66–204.
- ASTM D3497-79. (2003). *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Material.
- ASTM D4123-82. (1995). *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. American Society for Testing and Material.
- Awed A.M., El-Badawy S.M., Bayomi F.M., Santi M. (2011). *Influence of the MEPDG Binder Characterization Input Level on the Predicted Dynamic modulus for Idaho Asphalt Concrete Mixtures*, TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers DVD, Washington, DC, p. 19.
- Azari H., Al-Khateeb G., Shenoy A., and Gibson N. (2007). *Comparison of Simple Performance Test  $|E^*|$  of Accelerated Loading Facility Mixtures and Prediction  $|E^*|$  use of NCHRP 1-37 A and Witczak's New Equations*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1998 (1), Washington, DC, pp. 1-9.
- Baladi G.Y., and Thomas A. (1994). *Mechanistic Evaluation of AASHTO Flexible Pavement Design Equations*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, No 1449, Washington, DC, pp. 72-78.
- Bari J. and Witczak M.W. (2006). *Development of a New Revised Version of the Witczak  $E^*$  Predictive Model For Hot Mix Asphalt Mixtures*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 381–424.
- Bari J. and Witczak M.W. (2007). *New Predictive Models for the Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders for use with the Mechanistic- Empirical Pavement Design*

- Guide*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2001, Washington, DC, pp. 9-19.
- Baus R.L., Stires N.R. (2010). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Implementation*. Department of Civil and Environmental Engineering University of South Carolina Columbia, South Carolina.
- Bayomi F., El-Badawy S., Awed A. (2012). *Implementation of the MEPDG for Flexible Pavements in Idaho*. National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho.
- Bennert T. and Williams S.G. (2009). *Precision of AASHTO TP62-07 for use in mechanistic-empirical pavement design guide for flexible pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 2127, Washington, DC, pp. 115–126.
- Birgisson B., Sholar G. and Roque R. (2005). *Evaluation of Predicted Dynamic Modulus for Florida Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1929, Washington, DC, pp. 200-207.
- Blakey F.A. and Beresford F.D. (1955). *Tensile Strain in Concrete II*. Division of Building Research, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Report. No. C2. 2-2, p 15.
- Bonaquist R., Christensen D.W. and Stump W. (2003). *NCHRP Report 513. Simple Performance Tester of Superpave Mix Design: First-Article Development and Evaluation*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Bonaquist R.F. (2003). *Simple Performance Tester for Superpave Mix Design*. Quarterly Progress Report. NCHRP Project 9-29. Transportation Research Board of the National Research Council, Washington, DC.
- Bonnaure F., Gest G., Gravois A., Uge P. (1977). *A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 96, pp. 64-104.
- Brown E.R., Foo K.Y. (1989). *Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results*. ASTM D 4123-82. NCAT Report No. 91-6.

- Brown S.F. and Cooper K.E. (1993). *Assessment of the Mechanical Properties of Asphaltic Mixes on a Routine Basis Using Simple Testing Equipment*. Proceedings of the 5th Eurobitume Congress, Stockholm, Sweden.
- Chehab G.R., O Quinn E.N. and Kim Y.R. (2000). *Specimen Geometry Study for Direct Tension Test Based on Mechanical Tests and Air Void Variation in Asphalt Concrete Specimens Compacted by the Superpave Gyratory Compactor*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1723, Washington, DC, pp 125-132.
- Christensen D.W., Pellinen T., and Bonaquist R. F. (2003). *Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72, pp. 97-121.
- Clyne T.R., Li X., Marastenu M.O. and Skok E.L. (2003). *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*. Final Report MN/RC – 2003-09., University of Minnesota, Minneapolis, MN.
- Cominsky R.J., Killingsworth B.M., Anderson R.M., Anderson D.A. and Crockford W.W. (1998). *Quality Control and Acceptance of Superpave Designed Hot Mix Asphalt*. Project D9-7, NCHRP Report No. 409, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Coree B.J. and White T.D. (1990). *AASHTO Flexible Pavement Design Method: Fact or Fiction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1286, Washington, DC, pp 206-216.
- Darter M.I., Titus Glover L., Von Quintus H.L. (2009). *Implementation of The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Utah: Validation, Calibration, and Development of the UDOT MEPDG User's Guide*, Applied Research Associates, Inc.
- Deacon J.A. (1965). *Fatigue of Asphalt Concrete*. Doctoral dissertation, University of California, Berkeley, California.
- Di Benedetto H., Partl M.N., Franchen L., De La Roche C., Saint A. (2001). *Stiffness Testing for Bituminous Mixtures*. *Materials and Structures*, Vol. 34, pp. 66-70.
- Dongre R., Myers L., D'Angelo J., Paugh C. and Gudimettla J. (2005). *Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt*. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists: from the Proceedings of the Technical Sessions*, Vol. 74, pp 381-442.

- Dougan C., Stephens J., Mahoney J., Hansen G. (2003). *E\* - Dynamic Modulus Test Protocol – Problems and Solutions*. The Connecticut Department of Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- EN 12697-05. (2005). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*. European Standard.
- EN 12697-26:2004. (2004). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness*. European Standard.
- EN 12697-31. (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor*. European Standard.
- Farrar M.J., Harnsberger P.M., Thomas K.P., Wiser W. (2006). *Evaluation of Oxidation in Asphalt Pavement Test Sections After Four years of Service*. International Conference on Perpetual Pavement, Columbus, Ohio.
- Flintsch G.W., Al-Qadi I.L., Loulizi A., Mokarem D. (2005). *Laboratory Tests for Hot Mix Asphalt Characterization in Virginia*. VTRC 05- CR22, Virginia Tech Transportation Institute, Blacksburg.
- Flintsch GW, Loulizi A, Diefenderfer SD, Diefenderfer BK, Galal KA. (2008). *Asphalt Material Characterization in Support of Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide Implementation in Virginia*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 2057, Washington, DC, pp 114-125.
- Francken L. and Clauwaert C. (1988). *Characterization and Structural Assessment of Bound Materials for Flexible Road Structures*. Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, pp 130-144.
- Garcia G., Thompson M. (2007). *HMA Dynamic modulus Predictive Models - A review*. Research Report FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation.
- Goh S.W., You Z., Williams R.C. and Li X. (2011). *Preliminary Dynamic Modulus Criteria of HMA for Field Rutting of Asphalt Pavements. Michigan's Experience*. Journal of Transportation Engineering, 137(1), pp 37-45.
- Goldberg D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Boston, MA.



- Heukelom W., Klomp A.J. (1964). *Road Design and Dynamic Loading*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 33, pp.92-123.
- Holland J. H. (1975): *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Hondros G. (1959). *The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete*, Australian Journal of Applied Science, Vol 10, No 3, pp 243-268.
- Huang Y.H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Education, Inc.
- Irwin L.H. (2002). *Backcalculation: an overview and perspective*. Cornell University, Ithaca, NY.
- Jacobs M.M.J. (1995) *Crack Growth in Asphaltic Mixes*. PhD Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Jamrah A. (2013). *Linear Viscoelastic Characteristics of Michigan Asphalt Mixtures and the Effect of Sample Size on Material Properties*. Master of Science thesis, Michigan State University.
- Jones A. (1962). *Tables of Stresses in Three Layer Elastic Systems*. Highway Research Board Bulletin 342. Washington DC.
- Khattab A.M, El-Badawy S.M., Al Hazmi A.A. and Elmwafi M. (2014). *Evaluation of Witczak E\* Predictive Models for the Implementation of AASHTOware-Pavement ME Design in the Kingdom of Saudi Arabia*. Construction and Building Materials, Vol 64, pp 360–369.
- Khazanovich L., Tayabji S.D. and Darter M. (2001). *Backcalculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume I: Slab on Elastic Solid and Slab on Dense-Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements*. Publication No. FHWA-RD-00-086.
- Kim Y.R., Seo Y., King M. and Momen M. (2003). *Dynamic Modulus Testing of Asphalt Concrete in Indirect Tension Mode*. Transportation Research Board 83<sup>rd</sup> Annual Meeting Compendium papers, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Kutay M.E., Chatti K. and Lei L. (2011). *Backcalculation of Dynamic Modulus from FWD Deflection Data*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 2227, Washington, DC, pp 87-96.
- Loulizi A., Flintsch G., Al-Qadi I., and Mokarem D. (2006). *Comparing Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement*

- Design*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1970, Washington, DC, pp 161-170.
- Lundy J., Sandoval-Gil J., Brickman A., Patterson B. (2005). *Asphalt Mix Characterization Using Dynamic Modulus and A<sub>pa</sub> Testing*, Oregon Department of Transportation Research Unit and Federal Highway Administration.
- Lytton R.L., Uzan J., Fernando E.M., Roque R., Hiltunen D. and Stoffels S.M. (1993). *Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes*. SHRP Report A-357, SHRP/NRC, Washington DC, USA.
- Maggiore C., Airey G., Di Mino G., Marsac P., Di Liberto M. (2012). *Fatigue Resistance: Is It Possible Having a Unique Response ?* 3<sup>rd</sup> 4PBB Conference, France. p 11.
- Mamlouk M.S. and Sarofim R.T. (1988). *Modulus of Asphalt Mixtures - An Unresolved Dilemma*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1171, Washington, DC, pp.193-198.
- 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.
- Mirza M.W. (1993). *Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements*. Ph.D. University of Maryland, College Park.
- Mirza M.W. and Witczak M.W. (1995). *Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 64, pp 393–418
- Mohammad L. (2010) *Characterization of Louisiana Asphalt Mixtures for using Simple Performance Tests and M-E PDG, Recent research from Louisiana Department of dissertation*. Transportation and Development.
- Mohammad L.N., Kim M., Raghavendra A., Obulareddy S. (2014). *Characterization of Louisiana Asphalt Mixtures Using Simple Performance Tests and MEPDG*. Louisiana Transportation Research Center Baton Rouge.
- Mohammad, L.N., S. Saadeh, S. Obulareddy, and S. Cooper (2007). *Characterization of Louisiana Asphalt Mixtures Using Simple Performance Tests*. In Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

- Molenaar A.A.A. (2007). *Prediction of Fatigue Cracking in Asphalt Pavements. Do we Follow the Right Approach?* Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No 2001, Washington, DC, pp. 155-162.
- Monismith C.L. and Taybali A.A. (1988). *Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavement Sections*. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, VA, Vol 57, p. 414.
- Myre J. (1992). *Fatigue of Asphalt Materials for Norwegians Conditions*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, Vol 3, pp 238-251.
- NCHRP. (2002). *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Project 9-29, National Cooperative Highway Research Program.
- NCHRP. (2003). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated Pavement Structures*. NCHRP 1-37A Project, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- NCHRP. (2004). *Final Report: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A Project*, Transportation Research Board National Council, Washington D.C.
- NCHRP. (2004). *Final Report: Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, NCHRP 1-28A Project*, Transportation Research Board National Council, Washington D.C.
- NCHRP. (2005). *Superpave Support and Performance Models Management*. Project 9-19, National Cooperative Highway Research Program.
- NCHRP. (2008). *Nondestructive Technology for Quality Control and Acceptance of Flexible Pavement Construction*, Project No. 10-64, National Cooperative Highway Research Program.
- Nunn M.E. (1996). *The Characterisation of Bituminous Macadams by Indirect Tensile Stiffness Modulus*. Thomas Telford.
- Pan E., Chen E. and Alkasawneh W. (2008). *Layered flexible pavement studies: Challenges in Forward and Inverse Problems*. International Journal of Pavement Research and Technology Vol 1, pp 12-16.

- Pan E., Sanghaleh 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. S. (1962). *The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphaltic Concrete*. 1<sup>st</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp 454-463.
- 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.
- Pellinen T. (2001). *Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance*. A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree of Doctor of Philosophy. Submitted to the faculty of Graduate School of the Arizona State University, Tempe, Arizona.
- Pellinen T., Witczak M.W. and Bonaquist R. (2002). *Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-linear Least Squares Optimization Technique*. Proceedings of the 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Division Conference, Columbia University, June, New York.
- Pellinen T.K and Witczak M.W. (2002a). *Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 71, pp. 281-309.
- Pellinen T.K. and Witczak M.W. (2002b). *Use of Stiffness of Hot-Mix Asphalt as a Simple Performance Test*, Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No 1789, Washington, DC, pp 80-90.
- 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.,and 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.

- Pronk A.C. (1996). *Theory of the Four Point Dynamic Bending test*. Research report, DWW, The Netherlands.
- Rahim A.M. (2005). *Subgrade Soil Index Properties to Estimate Resilient Modulus for Pavement Design*. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, No. 3, pp 163–169.
- 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.
- Santagata E. and Bassani M. (1999). *Improved Use of the Repeated Load Indirect Tensile Test*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Symposium on Performance and Durability of Bituminous and Hydraulic Stabilised Composites, Leeds, UK.
- Sayegh G. (1967). *Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures*. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI, USA, University of Michigan, pp. 743-755.
- Schmidt R.J. (1972). *Practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt-Treated Mixes*. Highway Research Record No 404, pp 22-29.
- Schwartz C. (2005). *Evaluation of the Witczak Dynamic Modulus Prediction Model*. CD-ROM. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- SETRA. (1995). *French Design Guide for Pavement Structures*, Guide technique, LCPC.
- Shenoy A. and Romero P. (2002). *Standardized Procedure for Analysis of Dynamic Modulus (E\*) Data to Predict Asphalt Pavement Distresses*. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No. 1789, Washington, DC, pp. 173-182.
- Shook. J. F. and Kallas B. F. (1967). *Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete*. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Los Angeles, California.
- SHRP. (1993). *SHRP's Layer Moduli Backcalculation Procedure*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.
- Siddhartan R, Krishnamenon N, Sebaaly P. (2000). *Pavement Response Evaluation Using Finite-Layer Approach*. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No 1709, Washington, DC, pp 43-49.

- Tashman L., Elangovan M.A. (2007). *Dynamic Modulus Test - Laboratory Investigation and Future Implementation in the State of Washington*. Report No. WA-RD 704.1, Washington State Transportation Center, Washington.
- Tayebali A.A., Deacon J.A., Coplantz J.S., Harvey J.T. Monismith C.L.(1994). *Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures*. Report A404. SHRP.
- 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.
- Underwood B.S., Ashouri M. and Kim R. (2011). *Effect on Dynamic Modulus Measurement Protocol on Predicted Pavement Performance*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 80, pp 65-100.
- Van de Loo P.J. (1976). *Practical Approach to the Prediction of Rutting Asphalt Pavements: The Shell Method*. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No 616, Washington, DC, pp 15-12.
- Van der Poel C. (1954). *A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data*. Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, Part 5, Shell Bitumen reprint 9.
- Varma S., Kutay M.E. and Chatti K. (2013). *Data requirements from Falling Weight Deflectometer tests for accurate backcalculation of dynamic modulus master curve of asphalt pavements*. Proceeding of the Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, ASCE, Los Angeles.
- Von Quintus H.L. and Simpson A.L. (2002). *Backcalculation of layer parameters for LTPP test sections, Volume II: Layered elastic analysis for flexible and rigid pavements*. Publication No. FHWA-RD-01-113.
- Waldhoff A.S., Buttlar W.G. and Kim J. (2000). *Evaluation of Thermal Cracking at Mn/ROAD Using the Superpave IDT*. Proceeding of the Canadian Technical Asphalt Association, 45th Annual Conference, Winnipeg, Manitoba, Polyscience Publications, Inc., Laval, Quebec, Canada, pp. 228-259.
- Williams M.L., Landel R.F. and J.D. Ferry. (1995). *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*. Journal of the American Chemical Society, Vol. 77 (14), pp. 3701-3707.

- 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., El-Basyouny M. and El-Badawy S. (2007). *Incorporation of the New (2005) E\* Predictive Model in the MEPDG*. NCHRP 1-40D Final Report, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Witczak M., Kaloush K., and Von Quintus H. (2002). *Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Mixture Rutting*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies, Vol 71, pp 671-691.
- Witczak M.W. (2005). *NCHRP Report 547: Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Witczak M.W. and Bonaquist R.F. (1999). *G\*-Simple Shear Tests (SST)*. NCHRP Project 9-19, Task C. Team report SPT-MN-2(F) (MnRoad Experiment), Arizona State University, Tempe, AZ.
- Witczak M.W. and Fonseca O.A. (1996). *Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures*. Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, No. 1540, Washington, DC., pp 15-23.
- Witczak M.W. and Mirza M.W. (1992) a. *Development of Master Data Base—Asphalt Cement Aging Study*. Final Report 1, SHRP A-005. University of Maryland, College Park.
- Witczak M.W. and Mirza M.W. (1992) b. *An Assessment of Asphalt Cement Property Changes Between Original and Mix/Laydown Conditions*. Final Report 2, SHRP A-005. University of Maryland, College Park.
- Witczak M.W. and Mirza M.W. (1992) c. *An Assessment of In-Situ Time Dependent Field Aging of Asphalt Cement Mix/Laydown Conditions*. Final Report 3, SHRP A-005. University of Maryland, College Park.
- Witczak M.W. and Pellinen T.K. (2000). *AC Mixture Response comparison to Performance |E\*| and Sm Prediction Equation Methodology Results*. Superpave Support and Performance Models Management, Task C: Simple Performance Test. NCHRP Project 9-19, Team Report SPT-ALF-2(L), Transportation Research Board of the National Research Council.

Witczak M.W., Bonaquist R.F., Von Quintus H. and Kaloush K. (2000). *Specimen Geometry and Aggregate Size Effects in Uniaxial Compression and Constant Height Shear Tests*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 69, pp 457-496.

Witczak M.W., Pellinen T. and El- Bayouny M. (2002). *Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 71, pp 767-778.

Wright P.J.F. (1955). *Comments on an indirect tensile test for concrete*. Magazine of Concrete Reserach, Vol 7 (20), pp 87-96.

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



## Παράρτημα

**Πίνακας Π1 Στοιχεία δοκιμών κλειστού τύπου**

Κωδικός δοκιμίου	$\rho_{200}$	$\rho_4$	$V_a$	$V_{beff}$	$\rho_{38}$	$\rho_{34}$
DG_A_I_1	5.6	51	2.87	9.49	42	15
DG_A_I_2	5.6	51	4.27	9.32	42	15
DG_A_I_3	5.6	51	4.74	9.29	42	15
DG_A_I_4	5.6	51	5.71	9.18	42	15
DG_A_II_1	5.6	51	2.83	10.55	42	15
DG_A_II_2	5.6	51	4.27	10.35	42	15
DG_A_II_3	5.6	51	5.76	10.18	42	15
DG_A_II_4	5.6	51	5.40	10.20	42	15
DG_A_III_1	5.6	51	2.58	11.74	42	15
DG_A_III_2	5.6	51	5.30	11.37	42	15
DG_A_III_3	5.6	51	6.38	11.20	42	15
DG_A_III_4	5.6	51	4.23	11.51	42	15
DG_B_I_1	5.8	51	4.13	9.21	40	5
DG_B_I_2	5.8	51	6.09	9.03	40	5
DG_B_I_3	5.8	51	6.54	8.95	40	5
DG_B_I_4	5.8	51	3.61	9.33	40	5
DG_B_II_1	5.8	51	3.59	10.31	40	5
DG_B_II_2	5.8	51	4.54	10.26	40	5
DG_B_II_3	5.8	51	5.98	10.08	40	5
DG_B_II_4	5.8	51	6.38	9.99	40	5
DG_B_III_1	5.8	51	3.45	11.42	40	5
DG_B_III_2	5.8	51	4.85	11.21	40	5
DG_B_III_3	5.8	51	6.70	10.97	40	5
DG_B_III_4	5.8	51	5.61	11.08	40	5
DG_C_I_1	5.8	36	3.55	9.23	18	0
DG_C_I_2	7.6	36	5.71	8.99	18	0
DG_C_I_3	7.6	36	6.82	8.85	18	0
DG_C_I_4	5.8	36	4.93	9.10	18	0
DG_C_II_1	7.6	36	4.63	10.17	18	0
DG_C_II_2	7.6	36	5.86	10.04	18	0
DG_C_II_3	7.6	36	6.59	9.93	18	0
DG_C_II_4	7.6	36	3.21	10.35	18	0
DG_C_III_1	7.6	36	3.24	11.42	18	0
DG_C_III_2	7.6	36	4.27	11.29	18	0
DG_C_III_3	7.6	36	5.53	11.09	18	0

Κωδικός δοκιμίου	$\rho_{200}$	$\rho_4$	$V_a$	$V_{beff}$	$\rho_{38}$	$\rho_{34}$
DG_C_III_4	7.6	36	6.85	10.97	18	0
AS12.5_AR3	5.1	46.9	3.47	10.2	18	0
AS12.5_AR4	5.1	46.9	3.87	10.1	18	0
AS12.5_AR5	5.1	46.9	3.66	10.1	18	0
AS20_AR2	4.5	56.9	3.93	10	38.2	0
AS20_AR4	4.5	56.9	4.6	9.9	38.2	0
AS12.5_ATH5	4	48	4.42	10	22	0
AS12.5_ATH6	4	48	4.77	10	22	0
AS20_ATH4	3.4	56	4.92	9.5	35	9
AS20_ATH5	3.4	56	3.89	9.6	35	9

**Πίνακας Π2 Στοιχεία δοκιμών ανοικτού τύπου**

Κωδικός δοκιμίου	$\rho_{200}$	$\rho_4$	$V_a$	$V_{beff}$	$\rho_{38}$	$\rho_{34}$
OG_A_I_1	3.1	81.7	19.2	9.8	42.5	0
OG_A_I_2	3.1	81.7	18.5	9.9	42.5	0
OG_A_I_3	3.1	81.7	16.3	10.2	42.5	0
OG_A_I_4	3.1	81.7	17.5	10	42.5	0
OG_A_II_1	1.6	82.1	20.8	11	39.6	0
OG_A_II_2	1.6	82.1	21.7	10.8	39.6	0
OG_A_II_3	1.6	82.1	22.5	10.7	39.6	0
OG_A_II_4	1.6	82.1	21.6	10.9	39.6	0
OG_A_III_1	3.1	67	18.7	12.2	31	0
OG_A_III_2	3.1	67	22.7	11.6	31	0
OG_A_III_3	3.1	67	18.6	12.2	31	0
OG_A_III_4	3.1	67	19.6	12	31	0
OG_B_I_1	1.6	21.9	10.4	9.4	3	0
OG_B_I_2	1.6	21.9	9.7	9.5	3	0
OG_B_I_3	1.6	21.9	12.3	9.2	3	0
OG_B_II_1	1.6	21.9	9.6	10.5	3	0
OG_B_II_2	1.6	21.9	9.8	10.4	3	0
OG_B_II_3	1.6	21.9	12.8	10.1	3	0
OG_B_III_1	1.6	21.9	8.7	11.4	3	0
OG_B_III_2	1.6	21.9	12.6	10.9	3	0
OG_B_III_3	1.6	21.9	12.4	10.9	3	0

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα E\* δοκιμών κλειστού τύπου**

DG_A_I_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	22529	19428	15972	13376	4000
10	21450	17890	14453	11894	3540
5	20493	16596	13277	11009	3192
1	18981	13876	10197	8218	2385
0.5	17924	13168	9059	7097	2037
0.1	15929	9900	6572	4803	1230
DG_A_I_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	16616	16104	14230	12594	4831
10	15811	14734	12891	11282	4170
5	15202	13778	11995	10151	3614
1	13787	11462	9698	7579	2219
0.5	13178	10804	8678	6477	1791
0.1	11763	8048	6400	4292	1138
DG_A_I_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	13448	10700	8661	7178	3323
10	12649	9803	7808	6340	2870
5	12024	8988	7310	5538	2470
1	11172	7496	5752	4270	1546
0.5	10556	6836	5176	3719	1260
0.1	8841	5065	3773	2473	777
DG_A_I_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	12931	11762	11187	8736	3794
10	12286	10851	10018	7754	3480
5	11881	10093	9446	6986	2871
1	11018	8619	7320	5145	1877
0.5	10635	7960	6627	4508	1537
0.1	9327	6199	4705	3039	991

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_A_II_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8170	7125	6103	5900	2163
10	7671	6490	5483	5247	1887
5	7349	6169	5211	4660	1678
1	6565	5091	4001	3445	1118
0.5	6285	4677	3573	2946	911
0.1	5309	3619	2587	1920	574
DG_A_II_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	12564	10887	9508	7342	2569
10	11695	9930	8582	6378	2238
5	11336	9227	7781	5905	2069
1	10047	8031	5999	4372	1329
0.5	9647	7297	5290	3716	1073
0.1	8002	5375	3609	2446	657
DG_A_II_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	21334	14684	10327	9825	3904
10	19616	13371	9399	8653	2939
5	18317	12184	8422	7715	2346
1	15663	9968	6072	5458	1422
0.5	14201	9085	5135	4580	1152
0.1	10770	6441	3190	2923	716
DG_A_II_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25			12236	9694	3867
10			10961	8315	2870
5			9758	7304	2272
1			7379	5091	1376
0.5			6368	4237	1123
0.1			4026	2636	706

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_A_III_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25			16474	11376	3018
10			14393	10177	2667
5			12853	8929	2402
1			9472	6310	1831
0.5			7931	5327	1458
0.1			4977	3267	925
DG_A_III_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14630	11310	9050	7091	3111
10	13637	10210	8066	6316	2296
5	12762	9552	7413	5747	1898
1	11185	7794	5698	4097	1184
0.5	10626	7050	5155	3459	934
0.1	8487	5086	3240	2074	571
DG_A_III_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	12166	8073	6851	5789	2861
10	11499	7472	6358	5114	2198
5	10995	6927	5754	4498	1749
1	9824	5484	4341	3193	1080
0.5	9320	4811	3831	2685	852
0.1	8149	3428	2565	1676	512
DG_A_III_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	17029	13600	11270	9054	3620
10	16094	12340	10007	7927	2691
5	15301	11512	9141	7069	2258
1	13888	9424	6991	5022	1378
0.5	13035	8618	6121	4275	1108
0.1	11333	6300	4012	2598	687

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_B_I_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	18264	13256	9250	7297	3079
10	17078	12031	8072	6201	2418
5	15294	11091	7309	5515	1944
1	13470	9242	5685	3944	1201
0.5	12433	8341	4885	3360	957
0.1	9537	5982	3283	2175	582
DG_B_I_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10253	8426	6846	6460	3065
10	9648	7667	6068	5590	2363
5	9213	7311	5554	5080	1920
1	8361	6097	4488	3785	1204
0.5	7944	5533	4024	3251	981
0.1	6744	4203	2962	2112	595
DG_B_I_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14902	12306	9380	7482	3148
10	14033	11216	8408	6526	2445
5	13268	10365	7637	5877	1998
1	11996	8477	5912	4317	1262
0.5	11305	7892	5165	3618	1016
0.1	9577	5701	3447	2341	603
DG_B_I_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	17066	14352	12035	9974	2864
10	16117	13170	10806	8629	2534
5	15242	12194	9959	7710	2284
1	14171	10140	7596	5657	1732
0.5	13573	9275	6771	4745	1413
0.1	11317	7083	4689	3081	885

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_B_II_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	13491	10964	8585	6920	3183
10	12888	9913	7695	6171	2512
5	12066	9340	7207	5569	2030
1	11220	7590	5498	4108	1268
0.5	10766	6879	4785	3587	1015
0.1	9256	5057	3375	2339	615
DG_B_II_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	17184	12410	9881	8793	3493
10	16078	11257	8858	7669	2683
5	15077	10439	8026	6824	2173
1	13539	8553	6290	4868	1367
0.5	12777	7735	5444	4152	1098
0.1	10388	5624	3736	2592	666
DG_B_II_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	19468	13983	10332	8202	3111
10	18131	12527	9127	7260	2391
5	17011	10910	8389	6182	1943
1	15562	8947	6318	4398	1191
0.5	14915	7794	5420	3712	961
0.1	11610	5576	3654	2261	574
DG_B_II_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	9550	7633	7247	5662	2940
10	9041	7164	6442	5105	2254
5	8572	6757	6010	4480	1876
1	7900	5635	4753	3234	1224
0.5	7574	5368	4158	2761	997
0.1	6423	3983	2902	1810	604

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_B_III_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	27151	17578	11755	9749	2482
10	25051	16136	10308	8632	2184
5	23890	14208	9126	7537	1958
1	21166	11796	6792	5263	1463
0.5	20027	10551	5778	4382	1168
0.1	15747	7347	3737	2695	697
DG_B_III_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	11846	8532	7500	6316	2775
10	11047	7928	6751	5589	2192
5	10562	7422	6133	4933	1747
1	9286	6053	4563	3547	1088
0.5	8763	5427	4016	3016	873
0.1	7317	3922	2670	1948	539
DG_B_III_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14117	11015	8212	7309	2935
10	13132	10160	7375	6419	2225
5	12335	9260	6758	5777	1779
1	10926	7547	5394	4064	1064
0.5	10391	6641	4648	3395	839
0.1	8228	4875	3028	2044	499
DG_B_III_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10751	8437	7322	6669	2857
10	9969	7817	6483	6007	2115
5	9404	7337	6118	5315	1650
1	8354	5882	4642	3795	1022
0.5	7869	5259	4058	3263	811
0.1	6233	3827	2776	1950	497



**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_C I 1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	15109	12432	9986	9059	3312
10	14430	11461	8983	8224	2929
5	13826	10787	8377	7356	2640
1	12747	9362	6832	5681	1989
0.5	12393	8867	6083	4945	1647
0.1	10898	6986	4517	3476	1014
DG_C I 2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10758	9089	8020	7063	3744
10	10243	8313	7262	6364	2824
5	9612	7811	6566	5625	2256
1	8947	6719	5375	4275	1413
0.5	8567	6107	4823	3755	1134
0.1	7302	4731	3434	2494	674
DG_C I 3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	9027	8332	7468	6677	3468
10	8757	7765	6760	5949	2724
5	8116	7523	6341	5443	2345
1	7635	6460	5118	4090	1564
0.5	7347	5983	4601	3677	1307
0.1	6708	4890	3329	2516	811
DG_C I 4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	15191	11488	10432	8514	3601
10	14421	10648	9303	7577	2786
5	13234	9812	8583	6776	2316
1	12281	8235	6637	4929	1501
0.5	11768	7516	5898	4251	1208
0.1	9580	5596	4138	2690	728

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_C_II_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14213	11071	9161	7726	3508
10	13225	10049	8165	6851	2711
5	12798	9386	7417	6143	2182
1	11745	7787	5686	4491	1350
0.5	11047	6917	5016	3870	1068
0.1	9175	5206	3418	2416	626
DG_C_II_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8273	6272	5457	4583	2373
10	7708	5711	4771	4034	1903
5	7507	5322	4408	3656	1562
1	6610	4417	3421	2653	990
0.5	6313	4082	3032	2250	771
0.1	5340	2945	2133	1462	454
DG_C_II_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	15571	11669	8282	7166	3313
10	14325	10210	7468	6498	2563
5	13511	9361	6758	5531	2031
1	11881	7439	5179	4010	1207
0.5	11051	6638	4507	3352	940
0.1	8555	4832	2997	2104	549
DG_C_II_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	19493	17144	13114	11869	3341
10	18359	15778	11919	10492	2937
5	17688	14421	10508	9197	2631
1	16331	12711	8373	6565	1958
0.5	15748	11576	7248	5654	1560
0.1	13297	8603	4925	3584	920

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

DG_C_III_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	15682	12414	9768	8195	2200
10	14840	11231	8578	7126	1939
5	13981	10416	7786	6220	1742
1	12971	8451	5859	4507	1305
0.5	12271	7622	5122	3881	1056
0.1	10395	5485	3499	2462	637
DG_C_III_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14084	10473	8605	6701	3172
10	13221	9569	7557	5921	2533
5	12814	8738	6831	5201	2066
1	11702	7098	5492	3787	1365
0.5	11190	6500	4884	3238	1118
0.1	9536	4721	3340	2072	679
DG_C_III_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	11284	9013	7035	5748	2704
10	10587	8355	6267	5149	2111
5	10120	7447	5723	4590	1741
1	9303	6210	4517	3379	1087
0.5	8692	5547	3906	2911	884
0.1	7379	4226	2721	1864	538
DG_C_III_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	12882	9378	6628	4957	2234
10	11928	8300	5946	4398	1717
5	11171	7385	5428	3986	1416
1	9747	5839	4079	2837	905
0.5	9162	5124	3498	2436	716
0.1	7179	3573	2370	1531	433

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

AS12.5_AR3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	17125	15348	13550	10973	6549
10	16622	14396	12327	9827	5443
5	15974	14092	11829	9131	4886
1	14453	13308	9931	7466	3364
0.5	14493	12446	8682	6538	2727
0.1	13301	10803	6470	4550	1632
AS12.5_AR4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25		13869	10441	9391	5769
10		12845	9389	8379	4867
5		11927	8820	7588	4184
1		10286	7193	6041	2759
0.5		9588	6397	5228	2165
0.1		7489	4633	3349	1216
AS12.5_AR5					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	11746	11828	9229	9274	5167
10	11281	11168	8682	8361	4483
5	10871	10594	8408	7531	3925
1	10110	9696	6903	5993	2630
0.5	9905	9026	6237	5120	2111
0.1	8858	7826	4532	3555	1238
AS20_AR2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	19320	17484	12817	10096	5241
10	18428	16839	10634	9066	4684
5	17674	15197	10341	8008	3981
1	16150	14420	8121	6171	2549
0.5	15851	13117	7036	5260	1984
0.1	13815	10779	4696	3372	1143

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

AS20_AR4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	19889	19221	15195	11899	6369
10	18925	17959	13776	10555	5220
5	18195	16691	12114	9443	4428
1	16826	14473	9486	7147	2794
0.5	15913	13834	8390	5801	2115
0.1	13923	11018	5464	3645	1188
AS12.5 ATH5					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	19668	17905	14669	11072	6063
10	19037	16992	13188	9900	5254
5	17169	15689	12005	8790	4575
1	16235	14379	9627	6928	3056
0.5	15293	13464	8264	5783	2504
0.1	13287	11367	5723	3671	1435
AS12.5 ATH6					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14969	14980	11674	9883	7383
10	14305	14332	10663	9198	6329
5	13919	13436	10099	8804	5485
1	12823	12820	8825	7236	3828
0.5	12434	12156	7787	6402	3152
0.1	11221	10535	6187	4603	1888
AS20 ATH4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	14678	13895	11000	9938	6056
10	13924	12986	9873	8843	5487
5	13563	12348	9327	8262	4778
1	12879	11131	7588	6543	3234
0.5	12287	10217	6779	5659	2599
0.1	10821	8683	4901	3902	1556

**Πίνακας Π3 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών κλειστού τύπου (συνέχεια)**

AS20 ATH5					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10494	9697	8637	7504	5406
10	10185	9338	8045	7092	4841
5	9892	8905	7969	6636	4430
1	9364	8377	6836	5574	3291
0.5	9007	8200	6325	5019	2775
0.1	8524	7271	5168	3879	1876

**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου**

OG_A_I_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2947	1984	1632	1334	808
10	2609	1694	1372	1104	648
5	2361	1491	1192	949	544
1	1823	1076	837	649	353
0.5	1611	923	709	544	291
0.1	1175	629	471	354	182
OG_A_I_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2947	1984	1632	1334	808
10	2609	1694	1372	1104	648
5	2361	1491	1192	949	544
1	1823	1076	837	649	353
0.5	1611	923	709	544	291
0.1	1175	629	471	354	182
OG_A_I_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25		2687	2211	1806	1095
10		2295	1858	1495	877
5		2019	1615	1285	736
1	2469	1457	1133	878	478
0.5	2182	1250	961	737	394
0.1	1591	852	638	479	247

**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου (συνέχεια)**

OG_A_I_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8925	6812	5520	4285	1936
10	8446	5974	4827	3825	1551
5	7990	5626	4421	3391	1329
1	7217	4651	3434	2578	875
0.5	6923	4209	3034	2233	726
0.1	5692	3087	2071	1479	468
OG_A_II_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2348		1301	1063	644
10	2079		1093	880	516
5	1881		950	756	433
1	1452	857	666	517	281
0.5	1284	735	565	434	232
0.1	936	501	376	282	145
OG_A_II_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2129	1433	1179	964	584
10	1885	1224	991	798	468
5	1706	1077	861	685	393
1	1317	777	604	469	255
0.5	1164	667	512	393	210
0.1	849	455	340	256	132
OG_A_II_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	1948	1312	1079	882	534
10	1725	1120	907	730	428
5	1561	986	789	627	359
1	1205	711	553	429	234
0.5	1065	610	469	360	192
0.1	777	416	312	234	121

**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου (συνέχεια)**

OG_A_II_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10780	7614	6098	5415	2376
10	10036	6995	5630	4889	1948
5	9397	6481	4927	4327	1660
1	8013	5299	3967	3234	1156
0.5	7541	4704	3512	2845	969
0.1	6096	3433	2447	1857	661
OG_A_III_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2839	1912	1573	1285	779
10	2514	1633	1322	1064	624
5	2275	1436	1149	914	524
1	1756	1036	806	625	340
0.5	1552	889	684	524	280
0.1	1132	606	454	341	176
OG_A_III_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	1846	1243	1023	836	506
10	1635	1062	860	692	406
5	1479	934	747	594	341
1	1142	674	524	406	221
0.5	1009	578	444	341	182
0.1	736	394	295	222	114
OG_A_III_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	2870	1932	1590	1299	787
10	2541	1650	1336	1075	631
5	2299	1452	1161	924	529
1	1775	1048	815	632	344
0.5	1569	899	691	530	283
0.1	1144	613	459	345	178



**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου (συνέχεια)**

OG_A_III_4					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	9644	6045	5205	4478	2258
10	8932	5542	4663	4065	1907
5	8394	5075	4288	3600	1655
1	7143	4137	3300	2839	1190
0.5	6604	3706	2997	2529	1005
0.1	5354	2823	2214	1776	675
OG_B_I_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10562	7111	5850	4780	2896
10	9351	6072	4917	3957	2321
5	8463	5342	4273	3400	1947
1	6533	3855	2997	2324	1266
0.5	5774	3307	2542	1950	1042
0.1	4210	2254	1689	1267	653
OG_B_I_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	11194	7536	6200	5066	3069
10	9911	6435	5211	4193	2459
5	8969	5662	4529	3603	2064
1	6924	4085	3177	2463	1341
0.5	6119	3505	2694	2066	1104
0.1	4461	2389	1789	1343	692
OG_B_I_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8932	6013	4947	4042	2449
10	7908	5135	4158	3346	1963
5	7157	4518	3614	2875	1647
1	5525	3260	2535	1965	1070
0.5	4883	2797	2150	1649	881
0.1	3560	1906	1428	1072	552

**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου (συνέχεια)**

OG_B_II_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10790	7264	5976	4883	2958
10	9553	6203	5023	4042	2371
5	8645	5457	4365	3473	1989
1	6674	3938	3062	2374	1293
0.5	5898	3379	2597	1992	1064
0.1	4300	2303	1725	1295	667
OG_B_II_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	10615	7146	5879	4804	2910
10	9398	6102	4941	3976	2332
5	8505	5369	4294	3416	1957
1	6566	3874	3012	2335	1272
0.5	5802	3324	2554	1960	1047
0.1	4231	2265	1697	1274	656
OG_B_II_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8166	5497	4523	3696	2239
10	7230	4694	3801	3059	1794
5	6543	4130	3304	2628	1505
1	5051	2980	2317	1796	978
0.5	4464	2557	1965	1507	805
0.1	3255	1743	1305	980	505
OG_B_III_1					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	11203	7542	6205	5070	3071
10	9918	6440	5215	4196	2461
5	8976	5666	4532	3606	2065
1	6929	4088	3179	2464	1342
0.5	6124	3508	2696	2068	1105
0.1	4465	2391	1791	1344	693

**Πίνακας Π4 Εργαστηριακά αποτελέσματα Ε\* δοκιμών ανοικτού τύπου (συνέχεια)**

OG_B_III_2					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8041	5414	4454	3639	2205
10	7119	4623	3743	3012	1767
5	6443	4067	3253	2588	1483
1	4974	2935	2282	1769	963
0.5	4396	2518	1935	1484	793
0.1	3205	1716	1286	965	497
OG_B_III_3					
f (Hz)	T (°C)				
	4	15	20	25	37
25	8195	5517	4539	3709	2247
10	7256	4711	3815	3070	1801
5	6567	4145	3316	2638	1511
1	5069	2991	2326	1803	982
0.5	4480	2566	1972	1513	808
0.1	3266	1749	1310	983	507