



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

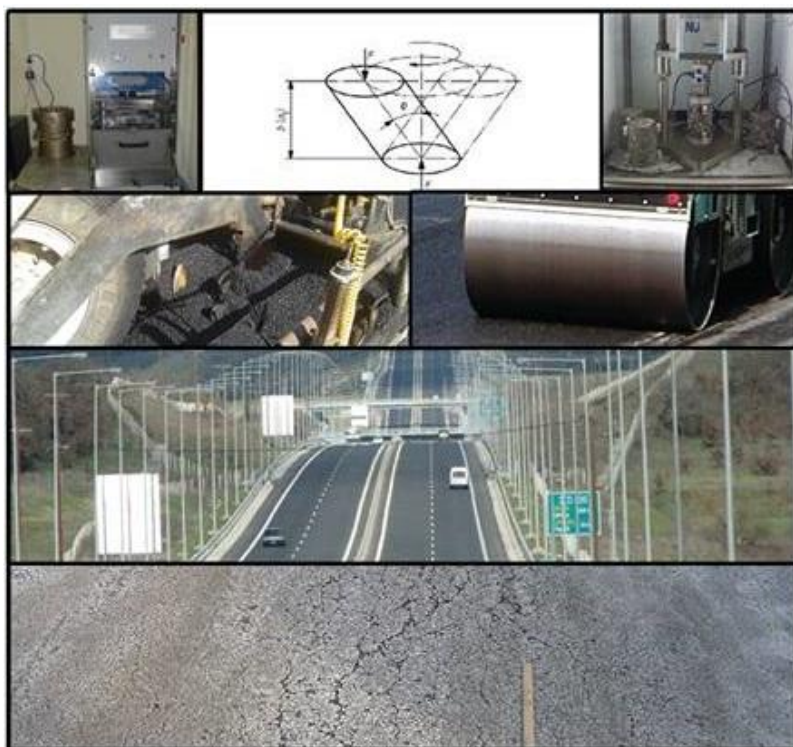
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ ΕΜΠ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

### **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ**



**ΣΚΛΑΒΟΥΝΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. ΠΛΑΤΗ, Λέκτορας ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014**



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

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

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα Κωνσταντίνα Γεωργούλη για την προθυμία και την υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την καθημερινή και στενή συνεργασία μαζί της.

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

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

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, πραγματοποιείται διερεύνηση της επίδρασης των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας (Witczak 1-37A, Witczak 1-40D, Hirsch) στην εκτίμηση της κόπωσης μιγμάτων ισοπεδωτικής στρώσης που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης με τη γυροσκοπική μέθοδο και αφού επιλέχθηκαν τέσσερα αντιπροσωπευτικά αυτών, προσδιορίσθηκε το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας τόσο μέσω εργαστηριακών δοκιμών όσο και με την εφαρμογή των υπόψη αλγορίθμων. Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η κόπωση των ασφαλτομιγμάτων σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική σε συναφή θέματα. Η επεξεργασία και ανάλυση των συλλεχθέντων στοιχείων περιλαμβάνει τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και αυτών που προκύπτουν από την ενεργοποίηση των αλγορίθμων. Επίσης πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των υπόψη αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Τα σχετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

## **ABSTRACT**

In the framework of the present Diploma Thesis, the performance of dynamic modulus prediction algorithms (Witczak 1-37A, Witczak 1-40D, Hirsch) in terms of fatigue of asphalt base course mixes used in Greece, is investigated. For this purpose, specimens of asphalt base course mixes were produced with the gyratory compaction method. After choosing the four most representative specimens according to their percentage of air voids in the mix, the dynamic modulus of these specimens was determined not only through laboratory testing but also through the activation of the above mentioned algorithms. With preference to the results obtained using the laboratory dynamic modulus data, a comprehensive comparative analysis on fatigue was applied.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	- 1 -
1.1 Γενική ανασκόπηση .....	- 1 -
1.2 Στόχος και μεθοδολογία .....	- 2 -
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας .....	- 2 -
Κεφάλαιο 2: Ασφαλτικές στρώσεις .....	- 4 -
2.1 Γενικά στοιχεία .....	- 4 -
2.2 Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος.....	- 5 -
2.2.1 Άσφαλτος.....	- 6 -
2.2.2 Αδρανή.....	- 7 -
2.2.3 Ποσοστό Κενών.....	- 7 -
2.2.4 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος.....	- 8 -
2.2.4.1 Γενικά στοιχεία.....	- 8 -
2.2.4.2 Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος .....	- 10 -
2.3 Κόπωση ασφαλτομίγματος.....	- 12 -
2.3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός της κόπωσης.....	- 14 -
2.3.2 Εξισώσεις πρόβλεψης της κόπωσης.....	- 16 -
Κεφάλαιο 3: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.....	- 20 -
3.1 Γενικά στοιχεία .....	- 20 -
3.2 Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας .....	- 20 -
3.3 Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης.....	- 22 -
3.4 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	- 26 -
3.4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας .....	- 26 -
3.4.2 Αλγόριθμοι εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	- 26 -
3.4.2.1 Αλγόριθμος <i>Witczak 1-37A</i> .....	- 27 -
3.4.2.2 Αλγόριθμος <i>Witczak 1-40D</i> .....	- 29 -
3.4.2.3 Αλγόριθμος του <i>Hirsch</i> .....	- 31 -
Κεφάλαιο 4: Ερευνητική διαδικασία .....	- 33 -

4.1 Γενικά .....	- 33 -
4.2 Παρασκευή ασφαλτομιγμάτων ισοπεδωτικής στρώσης .....	- 33 -
4.3 Διατομή σχεδιασμού .....	- 35 -
4.4 Κυκλοφορία σχεδιασμού .....	- 36 -
4.5 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	- 39 -
4.5.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός.....	- 39 -
4.5.2 Προσδιορισμός μέσω αλγορίθμων .....	- 40 -
4.5.2.1 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου <i>Witczak 1-37A</i> .....	- 40 -
4.5.2.2 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου <i>Witczak 1-40D</i> .....	- 41 -
4.5.2.3 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου <i>Hirsch</i> .....	- 41 -
4.6 Προσδιορισμός κρίσιμων εντατικών μεγεθών .....	- 42 -
4.7 Προσδιορισμός κόπωσης ασφαλτομιγμάτων .....	- 44 -
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση στοιχείων .....	- 46 -
5.1 Γενικά στοιχεία .....	- 46 -
5.2 Αξιολόγηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.....	- 46 -
5.2.1 Κεντρικές καμπύλες (Master curves).....	- 46 -
5.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα αλγορίθμων πρόβλεψης του $E^*$ .....	- 51 -
5.2.2.1 Αλγόριθμος <i>Witczak 1-37A</i> .....	- 52 -
5.2.2.2 Αλγόριθμος <i>Witczak 1-40D</i> .....	- 62 -
5.2.2.3 Αλγόριθμος του <i>Hirsch</i> .....	- 72 -
5.3 Επίδραση του $E^*$ στην εκτίμηση της κόπωσης.....	- 83 -
5.3.1 Συγκριτική αξιολόγηση του $FC_{Bottom}$ για την περίοδο σχεδιασμού .....	- 83 -
5.3.2 Ποσοστιαία σφάλματα στην εκτίμηση του $FC_{Bottom}$ .....	- 96 -
5.3.2.1 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom1-37A}$ .....	- 101 -
5.3.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom1-40D}$ .....	- 107 -
5.3.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom Hirsch}$ .....	- 113 -
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	- 119 -
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία .....	- 123 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	- 127 -

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Γενική ανασκόπηση

Στο πλαίσιο διαστασιολόγησης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος ιδιαίτερης σημασίας είναι ο ορθός σχεδιασμός, καθώς θα πρέπει να εξασφαλίζεται αφενός άνεση και ασφάλεια στο χρήστη της οδού και αφετέρου δομική επάρκεια του οδοστρώματος για όλη την περίοδο σχεδιασμού του. Η δομική συμπεριφορά του οδοστρώματος καθορίζεται κυρίως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων όπως το μέτρο δυσκαμψίας.

Το μέτρο δυσκαμψίας των συμπυκνωμένων ασφαλτικών στρώσεων συνιστά σημαντική παράμετρο καθώς συμβάλλει στην απομείωση των τάσεων οι οποίες μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος. Δεδομένου ότι οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης, η ορθή μελέτη και ο ακριβής προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ασφαλτομίγματος είναι καθοριστικής σημασίας στο πλαίσιο της πρόβλεψης της συμπεριφοράς τόσο των ασφαλτικών στρώσεων έναντι κόπωσης του ασφαλτομίγματος, όσο και του συνόλου του οδοστρώματος.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική, βασική παράμετρος για την εκτίμηση της κόπωσης του ασφαλτομίγματος αποτελεί το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $E^*$ ). Η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και η αντικατάσταση άλλων εκφράσεων του μέτρου δυσκαμψίας από αυτό, βασίστηκε στη θεώρηση ότι περιγράφει πληρέστερα την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος.

Ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας πραγματοποιείται είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών είτε μέσω αλγορίθμων. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας προϋποθέτει ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό και αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι πρόβλεψης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων. Για την ενεργοποίηση των αλγορίθμων αυτών απαραίτητα στοιχεία είναι η ογκομετρική σύσταση του ασφαλτομίγματος και κάποια χαρακτηριστικά της ασφάλτου. Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι αλγόριθμοι πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι ο Witczak 1-37A, ο Witczak 1-40D και ο Hirsch. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν αναπτυχθεί στην Αμερική βασιζόμενοι σε εργαστηριακές δοκιμές τυπικών ασφαλτομιγμάτων. Επομένως, παρουσιάζει ενδιαφέρον η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων αυτών σε διεθνές επίπεδο.

## 1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων για τα ελληνικά ασφαλτομίγματα και η μελέτη της επίδρασης των αποκλίσεων των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, στην εκτίμηση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και αυτών που προκύπτουν από την ενεργοποίηση των υπόψη αλγορίθμων καθώς και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της κόπωσης του ασφαλτομίγματος η οποία προσδιορίζεται με βάση τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας.

Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης. Κατόπιν επιλέχθηκαν τέσσερα αντιπροσωπευτικά δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά κενών αέρος και προσδιορίστηκε το  $E^*$  τόσο μέσω εργαστηριακών δοκιμών όσο και μέσω της ενεργοποίησης των αλγορίθμων πρόβλεψης. Στη συνέχεια θεωρήθηκαν τέσσερις διατομές οδοστρώματος οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το ποσοστό κενών του ασφαλτομίγματος. Το ασφαλτόμιγμα της ισοπεδωτικής στρώσης της κάθε διατομής είναι αντίστοιχης σύνθεσης με εκείνο των ασφατικών δοκιμών. Η κόπωση του ασφαλτομίγματος της κάθε διατομής προσδιορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε από τον εργαστηριακό προσδιορισμό και από τους αλγορίθμους πρόβλεψης. Η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των σφαλμάτων στην εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και κατ'επέκταση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων.

## 1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

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

Στο κεφάλαιο 2 περιλαμβάνονται γενικά στοιχεία όσον αφορά στα ασφαλτομίγματα και στα χαρακτηριστικά τους. Επίσης αναπτύσσεται ο μηχανισμός της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων των ασφατικών στρώσεων.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται αναλυτικά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση επί του θεωρητικού υπόβαθρου του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και περιγράφονται οι τρόποι προσδιορισμού του μέσω εργαστηριακών δοκιμών και αλγορίθμων πρόβλεψης.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η ερευνητική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας όπου παρουσιάζονται τα στοιχεία των διατομών μελέτης, η μεθοδολογία παρασκευής των δοκιμών και η διαδικασία προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας εργαστηριακά και μέσω αλγορίθμων. Επίσης, περιλαμβάνονται στοιχεία για τον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος.



Στο κεφάλαιο 5 περιλαμβάνεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων.

Στο κεφάλαιο 6 αναπτύσσονται εκτενώς τα συμπεράσματα που αφορούν το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνησης.

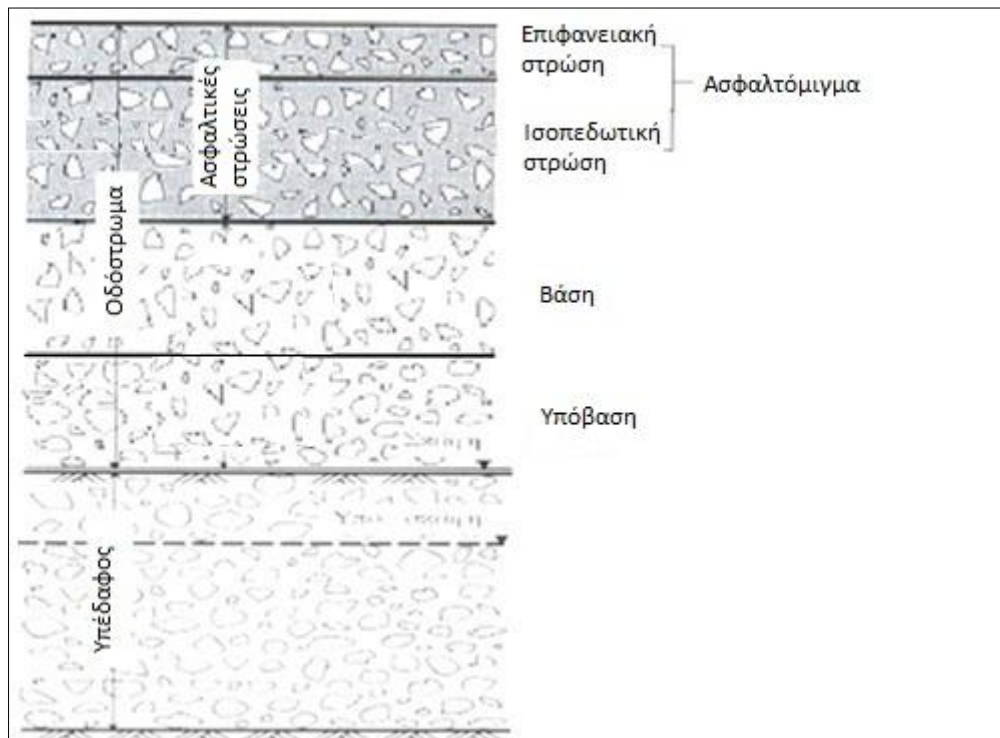
Στο κεφάλαιο 7 περιλαμβάνεται η διεθνής βιβλιογραφία στην οποία στηρίχθηκε η ανάπτυξη των επιμέρους εδαφίων.

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

## Κεφάλαιο 2: Ασφαλτικές στρώσεις

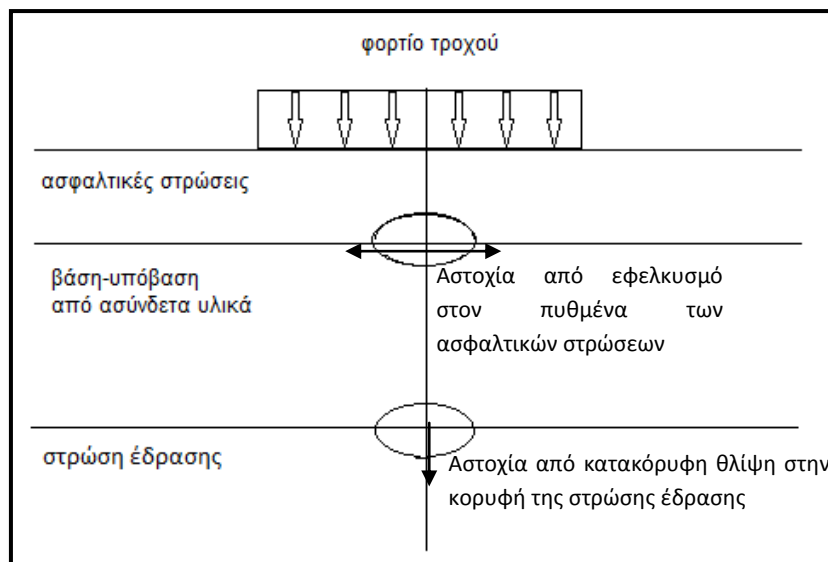
### 2.1 Γενικά στοιχεία

Οι ασφαλτικές στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελούν τις ανώτερες στρώσεις οι οποίες εδράζονται στις στρώσεις από ασύνδετα αμμοχάλικα (βάση και υπόβαση). Οι ασφαλτικές στρώσεις διακρίνονται σε: ισοπεδωτική στρώση και στρώση κυκλοφορίας (Yoder & Witczak 1975).



Εικόνα 2.1 : Δομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Η ισοπεδωτική στρώση εδράζεται στη στρώση βάσης από ασύνδετα υλικά. Είναι αυτή που παρέχει τις επιθυμητές κλίσεις ενώ παράλληλα παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις. Δεδομένου ότι οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος και η κορυφή της στρώσης έδρασης λόγω κατακόρυφων θλιπτικών παραμορφώσεων (εικόνα 2.2), η ισοπεδωτική στρώση θα πρέπει να έχει υψηλή αντοχή σε κόπωση, μεγάλη δυσκαμψία και να ανθίσταται σε παραμορφώσεις.

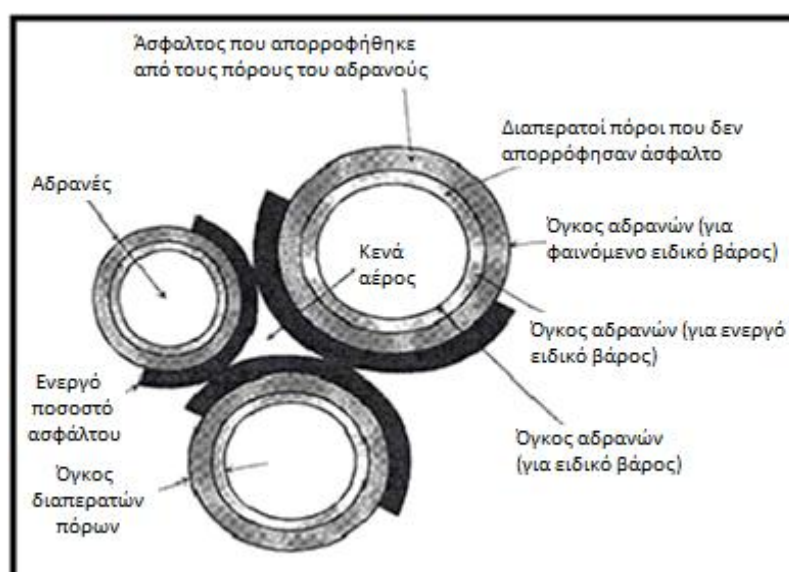


Εικόνα 2.2: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας σε οδόστρωμα

Η στρώση κυκλοφορίας η οποία είναι συνήθως αντιολισθηρή πρέπει να προσφέρει άνεση και ασφάλεια στο χρήστη της οδού. Καθώς έρχεται σε άμεση επαφή με τους τροχούς των οχημάτων θα πρέπει να έχει αντίσταση στις παραμένουσες παραμορφώσεις και ρηγματώσεις και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευστάθεια και υδατοστεγανότητα. Το πάχος αυτής της στρώσης κυμαίνεται από 2 έως 4 εκατοστά ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτομίγματος.

## 2.2 Χαρακτηριστικά ασφαλτομίγματος

Το ασφαλτόμιγμα αποτελείται από δύο υλικά την άσφαλτο και τα αδρανή, με χαρακτηριστικό μέγεθος το ποσοστό του όγκου του μίγματος το οποίο καταλαμβάνεται από αέρα (κενά αέρος).



Εικόνα 2.3: Ανάλυση της σύνθεσης του ασφαλτομίγματος

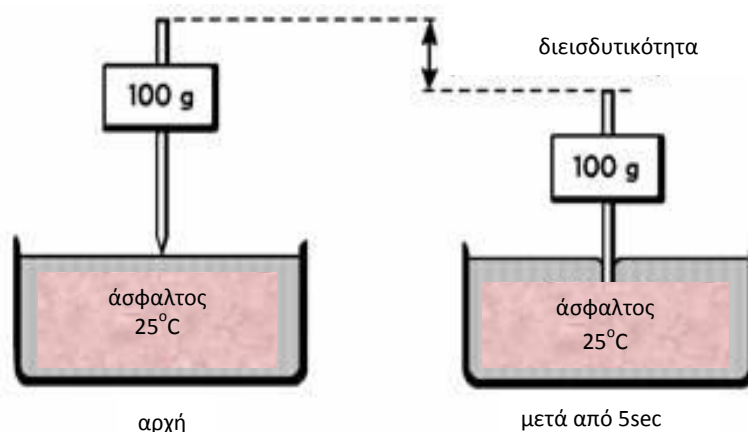
Στη συνέχεια αναφέρονται βασικά στοιχεία σχετικά με τα υλικά σύστασης του ασφαλτομίγματος.

### 2.2.1 Άσφαλτος

Η άσφαλτος αποτελεί το συνδετικό υλικό του ασφαλτομίγματος προσδίδοντας συνοχή ενώ λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης της. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ρευστοποιείται ενώ με τη μείωση της θερμοκρασίας στερεοποιείται. Η αύξηση του χρόνου φόρτισης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραμορφωσιμότητας της και η μείωση του χρόνου φόρτισης επιφέρει μείωση της παραμορφωσιμότητας της. Τελικά το ασφαλτόμικμα το οποίο αποτελείται από δύο υλικά με διαφορετική συμπεριφορά, την άσφαλτο με ιξώδη και τα αδρανή με ελαστική, χαρακτηρίζεται από ιξωδοελαστική συμπεριφορά.

Το ποσοστό της ασφάλτου στο ασφαλτόμικμα είναι σημαντική παράμετρος τόσο κατά την μελέτη σύνθεσης του μίγματος όσο και στο πλαίσιο της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Χαμηλά ποσοστά ασφάλτου οδηγούν σε αποκόλληση των αδρανών και μείωση της συνοχής ενώ υψηλά ποσοστά οδηγούν σε φαινόμενα τροχοαυλάκωσης, ανάδυσης της ασφάλτου και μειωμένα επίπεδα αντιστοιχισμένης ικανότητας.

Η κατηγοριοποίηση της ασφάλτου συνήθως πραγματοποιείται μέσω του δείκτη διείσδυσης (Pen) του οποίου ο προσδιορισμός επιτυγχάνεται με τη χρήση της δοκιμής διεισδυτικότητας (Penetration) (εικόνα 2.4). Μέσω αυτής της δοκιμής μετράται έμμεσα η συνοχή και κατ'έπείταση η σκληρότητα της ασφάλτου. Κατά την δοκιμή μία πρότυπη βελόνη 100gr διεισδύει στο δοκίμιο ασφάλτου για χρόνο 5sec και σε θερμοκρασία 25°C. Το βάθος διείσδυσης μετράται σε μονάδες pen (1pen=0,1mm) και είναι φανερό ότι μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης αντιστοιχεί σε πιο παραμορφώσιμη άσφαλτο.



Εικόνα 2.4: Δοκιμή διεισδυτικότητας

Ορισμένοι τύποι ασφάλτου που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι 50/60 ,60/70 και 80/100. Ο αριθμός 60/70 δηλώνει το άνω και κάτω όριο διείσδυσης σε μονάδες pen οπότε

60/70 σημαίνει 6-7mm παρατηρούμενη διείσδυση κατά την εκτέλεση της δοκιμής διεισδυτικότητας (Λοΐζος και Πλατή 2013).

### **2.2.2 Αδρανή**

Το μεγαλύτερο ποσοστό του ασφαλτομίγματος αποτελείται από αδρανή υλικά τα οποία συγκροτούν το δομικό σκελετό του ασφαλτομίγματος προσδίδοντας αντοχή και συνεκτικότητα. Ανάλογα με την προέλευση τους τα αδρανή υλικά κατηγοριοποιούνται σε θραυστά και συλλεκτά. Τα θραυστά χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση του ασφαλτομίγματος λόγω των πολύ καλών μηχανικών χαρακτηριστικών τους ενώ τα συλλεκτά χρησιμοποιούνται κυρίως για την στρώση της υπόβασης.

Ανάλογα με το μέγεθος τους τα αδρανή χωρίζονται στις εξής κατηγορίες: στα χονδρόκοκκα τα οποία συγκροτούνται από το κόσκινο Νο 10, στα λεπτόκοκκα τα οποία συγκροτούνται από το κόσκινο Νο 200 και στην παιπάλη η οποία διέρχεται από το κόσκινο Νο 200. Το βασικό χαρακτηριστικό όλων των μιγμάτων είναι η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος των αδρανών η οποία μπορεί να είναι συνεχής ή ασυνεχής δηλαδή να υπάρχουν όλα τα κλάσματα των αδρανών σε κάποιο ποσοστό ή αντίστοιχα κάποια κλάσματα αδρανών να λείπουν ή να βρίσκονται σε πολύ μικρή ποσότητα. Αναλόγως της ποσότητας κάθε κλάσματος των αδρανών τα μίγματα χαρακτηρίζονται ως ανοικτού, ημι-ανοικτού ή κλειστού τύπου. Κατ'επέκταση διαθέτουν υψηλά ή χαμηλά ποσοστά κενών αέρα.

### **2.2.3 Ποσοστό Κενών**

Με τον όρο κενά ασφαλτομίγματος ορίζονται οι θύλακες του αέρα που βρίσκονται ανάμεσα στα επικαλυμμένα με άσφαλτο αδρανή ενός συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος. Τα κενά διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: τα κενά μεταξύ των αδρανών (VMA: Voids in the Mineral Aggregate), τα κενά που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο (VFA: Voids Filled with Asphalt) και τα κενά του συμπιεσμένου ασφαλτομίγματος που πληρώνονται με αέρα (PAV: Percentage of Air Voids).

Το ποσοστό των κενών μεταξύ των αδρανών (VMA) εκφράζει το διαθέσιμο χώρο μεταξύ των αδρανών ο οποίος παραλαμβάνει τον ενεργό όγκο της περιεχόμενης ασφάλτου (δηλαδή το συνολικό όγκο της ασφάλτου, μειωμένο κατά τον όγκο που έχει απορροφηθεί από τα αδρανή) και τον όγκο των κενών αέρα που είναι απαραίτητος για το ασφαλτόμιγμα. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του VMA τόσο περισσότερος ο χώρος μεταξύ αδρανών για να παραληφθεί η άσφαλτος.

Μέσω του VFA προσδιορίζεται αν επαρκές ποσοστό κενών πληρώθηκε με άσφαλτο και έμμεσα καθορίζεται η αναγκαία ποσότητα ασφάλτου στο μίγμα. Το κατάλληλο ποσοστό VFA συμβάλλει στην αποφυγή μειωμένης αντοχής του μίγματος που οφείλεται στις λεπτές επικαλύψεις των αδρανών με άσφαλτο.

Το ποσοστό των κενών αέρος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο συμπύκνωσης του ασφαλτικού μίγματος κατά την διάστρωση του και από την κοκκομετρική διαβάθμιση

των αδρανών στο μίγμα. Το τελικό ποσοστό κενών αέρα σχετίζεται με την συμπεριφορά του οδοστρώματος. Χαμηλό ποσοστό κενών αέρα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση τροχοαυλάκωσης καθώς η ασφάλτος δεν μπορεί να εισέλθει και να καλύψει τα αδρανή με αποτέλεσμα κατά την επιβολή των φορτίων κυκλοφορίας να παρατηρούνται υποχωρήσεις στα ίχνη των τροχών. Υψηλότερα ποσοστά κενών αέρα επιτρέπουν την είσοδο του αέρα στο ασφαλτόμιγμα προκαλώντας οξείδωση της ασφάλτου και κατά συνέπεια πρόωρη γήρανση του μίγματος μειώνοντας την αντοχή του σε παραμένουσες παραμορφώσεις.

Η ογκομετρική σύνθεση του ασφαλτομίγματος καθώς και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα καθορίζουν το μέτρο δυσκαμψίας του.

## 2.2.4 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος

### 2.2.4.1 Γενικά στοιχεία

Το ασφαλτόμιγμα όπως αναφέρθηκε αποτελείται από δύο υλικά με διαφορετική συμπεριφορά, την ασφάλτο με ιξωδοελαστική συμπεριφορά κάτω από συνήθεις συνθήκες φόρτισης και τα συμπυκνωμένα αδρανή με ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει και επομένως το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται και αυτό ως ιξωδοελαστικό υλικό (Λοΐζος και Πλατή 2013). Επομένως το ασφαλτόμιγμα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από τη θεμελιώδη χαρακτηριστική ιδιότητα των ελαστικών υλικών που εκφράζεται με το μέτρο ελαστικότητας (E). Στην περίπτωση των ασφαλτομιγμάτων χρησιμοποιείται ο όρος μέτρο δυσκαμψίας. Η χαρακτηριστική και θεμελιώδης αυτή ιδιότητα εξαρτάται, σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας όπου η παραμόρφωση εξαρτάται μόνο από το επιβαλλόμενο φορτίο, και από την θερμοκρασία (T) και το χρόνο φόρτισης (t). Το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος υπολογίζεται από την παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση.

$$S_m=(\sigma/\varepsilon)_{T,t}$$

Όπου

$\sigma$ : επιβαλλόμενη τάση

$\varepsilon$ : ανηγμένη παραμόρφωση

t: χρόνος φόρτισης

T: θερμοκρασία ασφαλτομίγματος

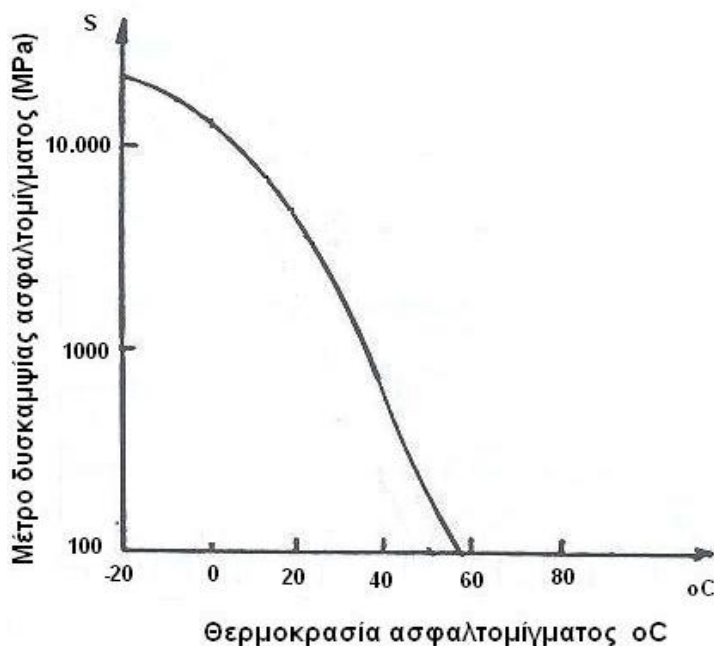
Το μέτρο δυσκαμψίας εκφράζει την αντίσταση του ασφαλτομίγματος σε παραμόρφωση υπό την επιβολή φορτίου. Υψηλή τιμή του μέτρου δυσκαμψίας στις ασφαλτικές στρώσεις οδηγεί σε ανακούφιση των υποκείμενων στρώσεων βάσης και υπόβασης ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται το φαινόμενο της πρόωρης εμφάνισης ρηγματώσεων υπό την επαναλαμβανόμενη φόρτιση τέτοιων ασφαλτομιγμάτων.

Στην εικόνα 2.5 παρουσιάζεται ποιοτικά η επίδραση του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας. Η σχέση των δύο μεγεθών, ακολουθεί φθίνουσα πορεία, με αποτέλεσμα, αύξηση του χρόνου φόρτισης να επιφέρει μείωση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας. Το γεγονός αυτό φανερώνει την αρνητική επίδραση του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας του οδοστρώματος



Εικόνα 2.5: Σχέση μεταξύ μέτρου δυσκαμψίας και χρόνου φόρτισης

Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας (T) στο μέτρο δυσκαμψίας ( $S_m$ ) όπως προκύπτει από την εικόνα 2.6, αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του μέτρου δυσκαμψίας.



Εικόνα 2.6: Σχέση μεταξύ μέτρου δυσκαμψίας και θερμοκρασίας

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

#### **2.2.4.2 Προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος**

Ο προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος μπορεί να επιτευχθεί είτε εργαστηριακά με κατάλληλες δοκιμές επί δοκιμών ή πυρήνων οδοστρώματος, είτε επί τόπου στην περίπτωση υφιστάμενου οδοστρώματος με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT: Non Destructive Test methods), είτε μέσω αλγορίθμων.

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας ενός ασφαλτομίγματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μέσω διαφόρων διατάξεων όπως η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού-θλίψης (direct tension-compression test on cylindrical specimens: DTC-CY), η τριαξονική δοκιμή, η μονοαξονική δοκιμή κ.α .

Το μέτρο δυσκαμψίας που προκύπτει από τις παραπάνω δοκιμές διαφέρει κυρίως λόγω της διαφορετικής διάταξης των δοκιμών και τον διαφορετικό τρόπο επιβολής των φορτίων. Όσον αφορά στον τρόπο επιβολής των φορτίων μπορεί να είναι παλμικός (θλιπτικό φορτίο για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια ακολουθεί μικρή περίοδος ηρεμίας) ή αρμονικός (ημιτονοειδής φόρτιση όπου επιβάλλεται θλιπτικό και εφελκυστικό φορτίο χωρίς περίοδο ηρεμίας). Ως προς τη διάταξη της δοκιμής οι διαφορές εντοπίζονται στον τρόπο τοποθέτησης των δοκιμών και στους άξονες άσκησης των φορτίων με αποτέλεσμα η επιβολή της φόρτισης να πραγματοποιείται είτε κατά μήκος της κάθετης διαμέτρου του δοκιμίου είτε κατά το οριζόντιο επίπεδο του δοκιμίου. Σε κάθε περίπτωση, το μέτρο δυσκαμψίας προκύπτει από το λόγο της επιβαλλόμενης τάσης προς την προκύπτουσα παραμόρφωση.

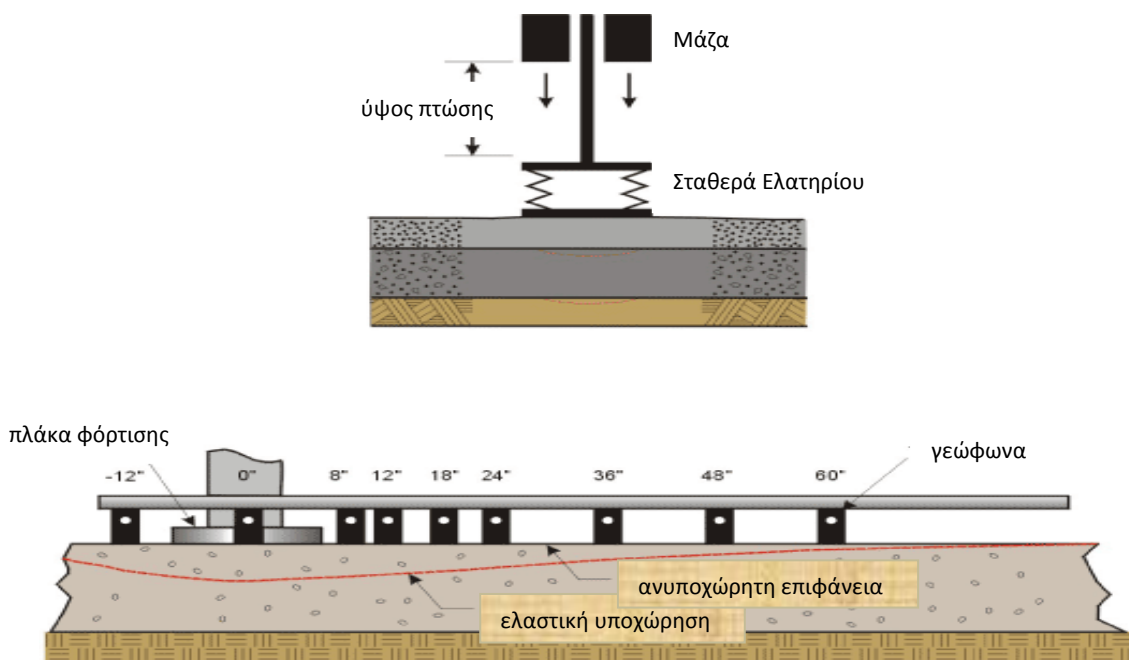
Για τον επί τόπου προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων υφιστάμενων οδοστρωμάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) τα οποία διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου επί του οδοστρώματος και τη μεθοδολογία καταγραφής των μετρήσεων (Marwan et.al 1993).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα, που επιβάλλουν στατικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν τη μέγιστη τυπική υποχώρηση, που επέρχεται στο οδόστρωμα. Οι μετρήσεις των υποχωρήσεων είναι σημειακές και ανά συγκεκριμένες αποστάσεις κατά μήκος της οδού και πραγματοποιούνται με τη βοήθεια μηκυσιομέτρων ή γεωφώνων. Το μέγεθος της ελαστικής υποχώρησης είναι μια ένδειξη της ικανότητας του εδάφους να φέρει την επιβαλλόμενη φόρτιση. Σύστημα αυτής της κατηγορίας αποτελεί η Δοκός Benkelman και η συσκευή Deflectograph.

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν την ελαστική υποχώρηση, που επέρχεται στο οδόστρωμα. Οι μετρήσεις των ελαστικών υποχωρήσεων γίνονται



συνήθως ανά αποστάσεις των 20 έως 40 μέτρων με τη βοήθεια γεωφώνων. Αντιπροσωπευτικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι το Falling Weight Deflectometer (FWD). Το FWD επιβάλλει δυναμικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος παρόμοιας έντασης και διάρκειας με τα πραγματικά φορτία της κυκλοφορίας. Μέσω των ειδικών γεωφώνων τα οποία είναι τοποθετημένα σε καθορισμένες αποστάσεις από το σημείο εφαρμογής του φορτίου, καταγράφονται οι ελαστικές υποχωρήσεις, αμέσως μετά την επιβολή φορτίου. Στη συνέχεια μέσω κατάλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων, υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων με τη μέθοδο του ανάστροφου υπολογισμού (backanalysis) (Λοΐζος 2013). Συστήματα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι επίσης το Dynaflect και το Road Rater.



Εικόνα 2.7: Λειτουργία και διάταξη της συσκευής FWD

Η χρήση του FWD έχει πολλά πλεονεκτήματα καθώς αποτελεί ένα σύστημα μη καταστρεπτικών δοκιμών, η συλλογή των δεδομένων είναι σχετικά γρήγορη, είναι εύκολο στην εφαρμογή, όμως χρειάζεται επιμέλεια ώστε να τηρούνται τα προβλεπόμενα από τον κατασκευαστή, καθώς σε αντίθετη περίπτωση μπορούν να προκύψουν εσφαλμένες μετρήσεις.

Η εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων είναι δυνατόν να επιτευχθεί με χρήση αλγορίθμων ή νομογραφημάτων λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου και την ογκομετρική σύσταση του μίγματος (άσφαλτος και αδρανή). Το νομογράφημα Van der Poel (1954) και το νομογράφημα Shell (Bonnaure et.al 1977) ήταν ευρέως αποδεκτά αλλά πλέον εφαρμόζονται σπάνια. Επίσης υπάρχει πλήθος ερευνών σχετικά με την ανάπτυξη αλγορίθμων όπως των Heukelom και Klomp (1964) οι οποίοι

βασίστηκαν στα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών του Van der Poel (1954) και του Witczak (1975). (βλ. Πίνακα 2.1)

Πίνακας 2.1: Αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας

Model No. E* Predictive Model Year (Published)		
1	Van der Poel Model	1954
2	Bonnaure Model	1977
3	Shook and Kallas' Models	1969
4	Witczak's Early Model,	1972
5	Witczak and Shook's Model	1978
6	Witczak's 1981 Model	1981
7	Witczak, Miller and Uzan's Model	1983
8	Witczak and Akhter's Models	1984
9	Witczak, Leahy, Caves and Uzan's Models	1989
10	Witczak and Fonseca's Model	1996
11	Andrei, Witczak and Mirza's Revised Model	1999
12	Hirsch Model of Christensen, Pellinen and Bonaquist	2003

Παρότι έχει αναπτυχθεί πλήθος αλγορίθμων για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας, η εφαρμογή τους είναι σπάνια επιτυχής καθώς η ανάπτυξη τους έχει βασιστεί σε μίγματα ευρέως χρησιμοποιούμενα σε ορισμένες μόνο περιοχές. Έτσι η εφαρμογή τους σε χώρες όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι ασφαλτομιγμάτων οδηγεί σε λάθος εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας. Συνήθως η εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας μέσω των αλγορίθμων πραγματοποιείται στην περίπτωση που δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

Τα τελευταία χρόνια στο πλαίσιο διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων, το μέτρο δυσκαμψίας που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας μέσω του οποίου προσεγγίζεται ακριβέστερα η ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.

## 2.3 Κόπωση ασφαλτομίγματος

Ως κόπωση ορίζεται το φαινόμενο της θραύσης κάτω από επαναλαμβανόμενη τάση η οποία έχει μέγεθος μικρότερο της εφελκυστικής τάσης που απαιτείται για θραύση του δοκιμίου μετά από μία μόνο φόρτιση (εφελκυστική αντοχή του υλικού).

Υπό την επίδραση των αξονικών φορτίων οι ασφαλτικές στρώσεις των οδοστρωμάτων υπόκεινται σε συνεχή εφελκυσμό. Το μέγεθος της εφελκυστικής ανηγμένης παραμόρφωσης που αναπτύσσεται για συγκεκριμένο φορτίο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την δυσκαμψία των στρώσεων. Η ρηγμάτωση των ασφαλτικών στρώσεων είναι από τις κυριότερες μορφές αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Στην περίπτωση αυτή η ρηγμάτωση ξεκινάει από τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, διαπερνάει τις υπερκείμενες στρώσεις και εμφανίζεται τελικά στην επιφάνεια του οδοστρώματος υπό την μορφή κατά μήκος ρηγματώσεων (bottom up cracking)(εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Ρηγμάτωση τύπου bottom up

Στην εικόνα 2.9α παρουσιάζεται η ρηγμάτωση ενός οδοστρώματος κατά μήκος των ιχνών των τροχών που οφείλεται στην αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Η εξέλιξη ενός τέτοιου τύπου ρηγμάτωσης φαίνεται στην εικόνα 2.9β όπου τελικά δημιουργούνται διακλαδιζόμενες και αλληλοσυνδεόμενες ρωγμές που σχηματίζουν πολυγωνικά τμήματα (αλλιγοτορικές ρηγματώσεις-alligator cracking). Τα κύρια αίτια που προκαλούν και επιταχύνουν την εμφάνιση τέτοιου είδους ρηγματώσεων είναι τα υπέρβαρα φορτία, ανεπαρκές πάχος ασφαλτικών στρώσεων λόγω ελλιπούς σχεδιασμού ή μη ικανοποιητικός έλεγχος ποιότητας κατά την κατασκευή.



(α)

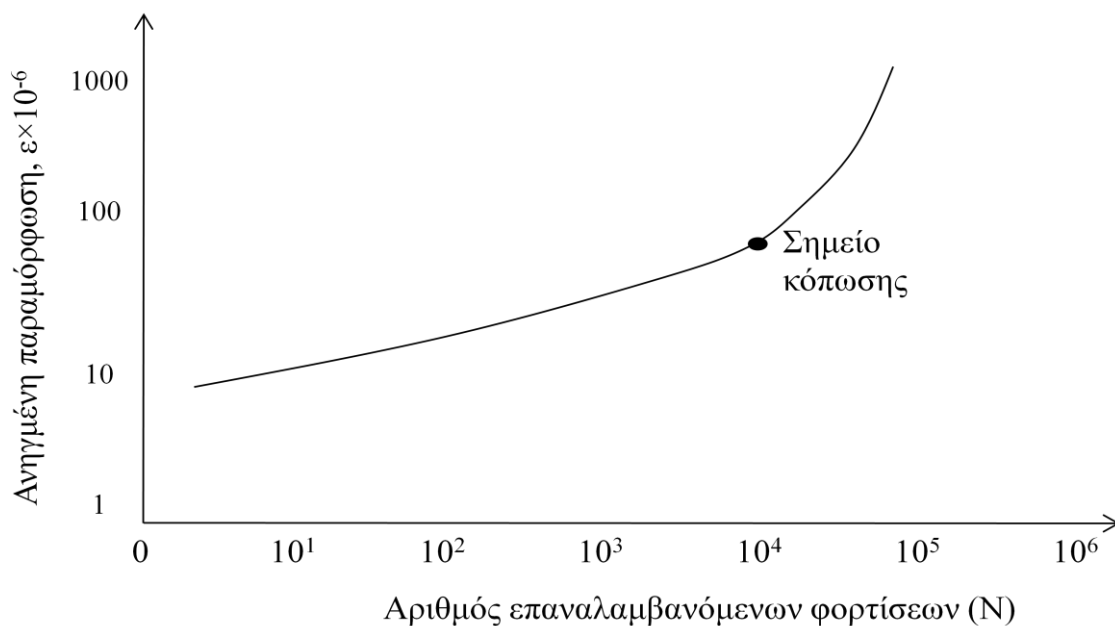


(β)

Εικόνα 2.9: Ρηγμάτωση λόγω κόπωσης  
(α) κατά μήκος ρωγμές, (β) αλλιγοτορικές ρωγμές

### 2.3.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός της κόπωσης

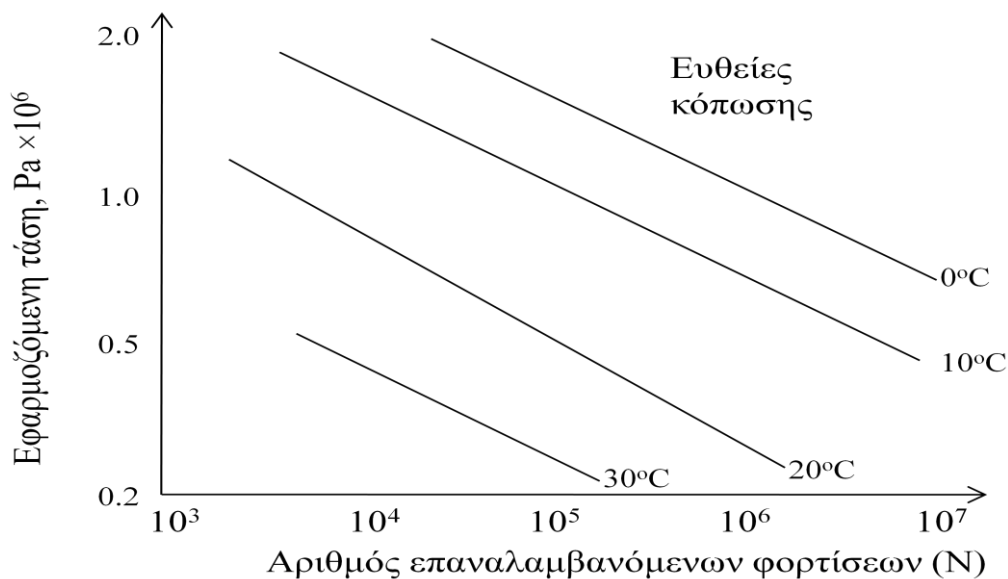
Η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε κόπωση καθορίζεται στο εργαστήριο κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες με πλήθος εργαστηριακών διατάξεων. Οι διατάξεις αυτές έχουν τη δυνατότητα να επιβάλλουν εφελκυστική τάση η οποία προκαλεί, μετά από N-αριθμό επαναλαμβανόμενων φορτίσεων ρηγμάτωση και θραύση του δοκιμίου. Πριν επέλθει η θραύση του δοκιμίου έχει ήδη εμφανισθεί ρηγμάτωση η οποία δεν γίνεται ορατά αντιληπτή. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι η κόπωση του ασφαλτομίγματος έχει επέλθει στο σημείο εκείνο όπου παρατηρείται απότομη και αισθητή αλλαγή της ανηγμένης παραμόρφωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Σχέση μεταξύ ανηγμένης παραμόρφωσης και του αριθμού επαναλαμβανόμενων φορτίσεων

Το σημείο κόπωσης εξαρτάται από τη σύνθεση, τις ιδιότητες του ασφαλτομίγματος καθώς και από το μέγεθος της επιβαλλόμενης τάσης, τη θερμοκρασία ελέγχου και το χρόνο φόρτισης.

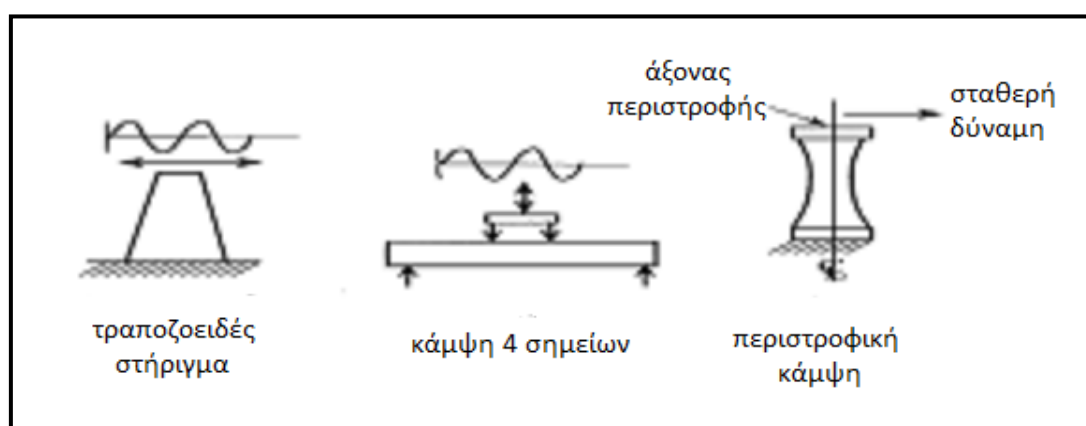
Αλλάζοντας το μέγεθος της επιβαλλόμενης τάσης προκύπτει νέος αριθμός φορτίσεων. Επομένως για σταθερή θερμοκρασία, αν τα αποτελέσματα της εφαρμοζόμενης τάσης και ο αριθμός των φορτίσεων τοποθετηθούν σε άξονες συντεταγμένων λογαριθμικής κλίμακας, η καμπύλη που λαμβάνεται είναι ευθεία η μορφή της οποίας φαίνεται στην εικόνα 2.11. Όσον αφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας στην κόπωση του ασφαλτομίγματος, όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του ασφαλτομίγματος σε κόπωση.



Εικόνα 2.11: Σχέση μεταξύ του αριθμού επαναλαμβανόμενων φορτίσεων και της εφαρμοζόμενης τάσης για διαφορετικές θερμοκρασίες

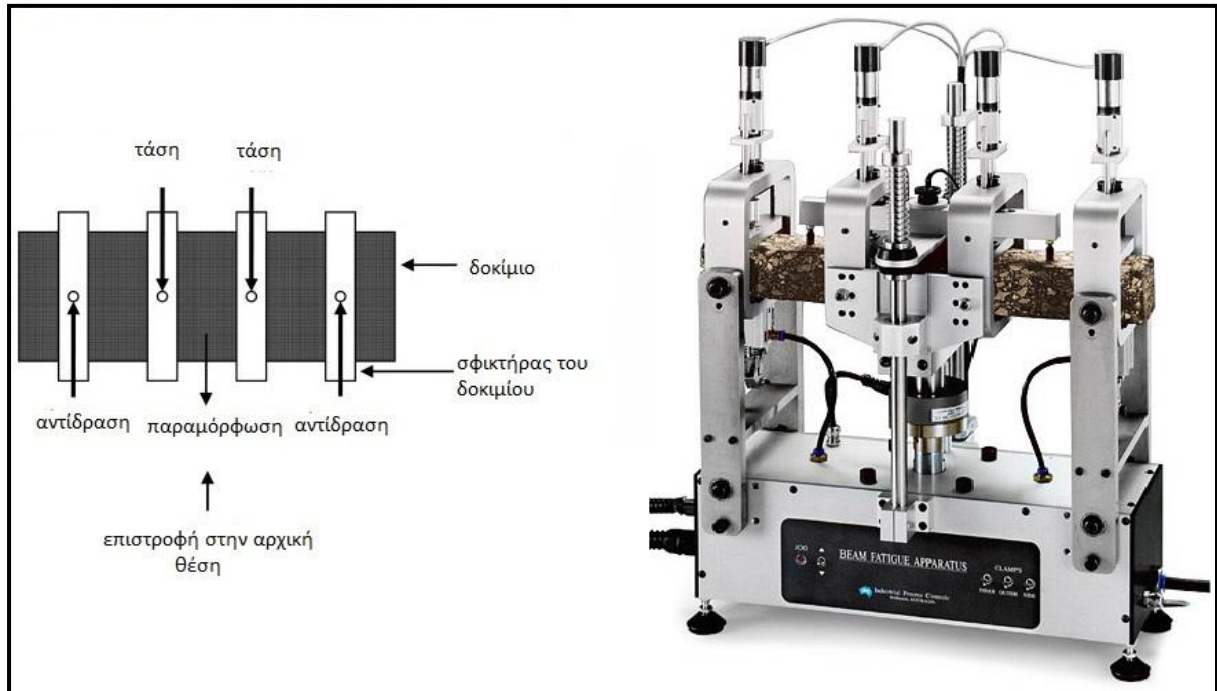
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η κόπωση του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο προσδιορίζεται από πλήθος διατάξεων και δοκιμών οι οποίες πραγματοποιούνται σε ένα εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται έχει επίδραση στα αποτελέσματα της κόπωσης καθώς η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος εξαρτάται από το αν κρίσιμο μέγεθος είναι η επιβαλλόμενη τάση ή η προκαλούμενη παραμόρφωση.

Διάφορες μορφές επιβολής της φόρτισης όπως ημιτονοειδής, τετραγωνική και τριγωνική έχουν χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσουν την φόρτιση από την κυκλοφορία. Για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας προσδιορισμού της κόπωσης του ασφαλτομίγματος η φόρτιση μπορεί να είναι συνεχόμενη ή με περιόδους ανάπαυσης (Horman et.al 1992). Οι δοκιμές που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι η δοκιμή κάμψης δύο σημείων με τραπεζοειδές δοκίμιο, η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκό και η δοκιμή περιστροφικής κάμψης.



Εικόνα 2.12: Δοκιμές κόπωσης

Στην εικόνα 2.13 απεικονίζεται η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται στην δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής επιβάλλεται ημιτονοειδής μετακίνηση στο δοκίμιο, η οποία επιτυγχάνεται μέσω υδραυλικών συστημάτων και εφαρμόζεται από τους δύο μεσαίους σφικτήρες.



Εικόνα 2.13: Διάταξη δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση προκαλεί τη παραμόρφωση της βάσης του δοκιμίου. Καθώς η δοκιμή εξελίσσεται καταγράφεται η αντίσταση του δοκιμίου στη μετακίνηση και όπως είναι αναμενόμενο, η δυσκαμψία και η αντίσταση του δοκιμίου μειώνονται καθώς αυτό αστοχεί. Η εξέλιξη της δυσκαμψίας καταγράφεται και μέσω αυτής ορίζεται το σημείο κόπωσης του δοκιμίου.

### 2.3.2 Εξισώσεις πρόβλεψης της κόπωσης

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του σημείου κόπωσης είναι μία καταστρεπτική και χρονοβόρα μέθοδος όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός δοκιμών προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα. Προς τούτο έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα πρόβλεψης τα οποία χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: αυτά που βασίζονται στην παραμόρφωση και αυτά που βασίζονται στην παραμόρφωση και το μέτρο δυσκαμψίας. Ο δεύτερος τύπος μοντέλων ονομάζονται φαινομενικά μοντέλα καθώς αναπτύχθηκαν με βάση παρατηρούμενες σχέσεις από εργαστηριακά αποτελέσματα και επί τόπου παρατηρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε από τις εργαστηριακές δοκιμές έχει παρατηρηθεί πως υπάρχει μία σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης στην εξωτερική ίνα σε καμπτική δοκιμή δοκού και της κόπωσης. Σύμφωνα με τον Pell (1987) η σχέση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση:



$$N_f = K_1(1/\varepsilon_o)^{K_2} \quad (2.1)$$

Όπου

$N_f$ : αριθμός των επιβαλλόμενων φορτίσεων μέχρι την θραύση

$\varepsilon_o$ : παραμόρφωση στην θραύση

$K_1, K_2$ : σταθερές προσαρμοζόμενες στα δεδομένα

Σύμφωνα με άλλες έρευνες (Bonnaure et.al 1980, Finn et.al 1977) ο αριθμός των επιβαλλόμενων φορτίσεων μέχρι τη θραύση είναι συνάρτηση και του μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, οι τιμές των συντελεστών  $K_1, K_2$  διαφοροποιούνται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η κόπωση του ασφαλτομίγματος περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N_f = K_1 \left( 1/\varepsilon_o \right) K_2 (E^*)^b \quad (2.2)$$

Όπου

$N_f$ : ο αριθμός των επιβαλλόμενων φορτίσεων μέχρι την θραύση

$K_1, K_2, b$ : προσαρμοζόμενοι συντελεστές στα δεδομένα

$E^*$ : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

$\varepsilon_o$ : παραμόρφωση στην θραύση

Τα  $K_1, K_2$  στην παραπάνω εξίσωση προσδιορίζονται από εργαστηριακά δεδομένα για διαφορετικές θερμοκρασίες. Για τον συντελεστή  $b$  προτείνονται διάφορες τιμές στην βιβλιογραφία και μπορεί να ισούται ή με -0.854 (Finn et.al 1977) ή με -1.4 ή -1.8 αναλόγως τον τρόπο φόρτισης του δοκιμίου (Bonnaure et.al 1980).

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τη Shell (1978) βασίζεται επίσης στην παραμόρφωση και το μέτρο δυσκαμψίας:

$$N = A \times 10^{-13} (B * V_b + C)^5 (1/\varepsilon)^5 (1/S_{mix})^{1.8} \quad (2.3)$$

Όπου

$N$ : αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία

$V_b$ : ποσοστό ασφάλτου στο μίγμα

$S_{mix}$ : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (ksi)

$A, B, C$ : προσαρμοζόμενοι συντελεστές στα δεδομένα

$\varepsilon_o$ : παραμόρφωση στην θραύση

Το μοντέλο κόπωσης το οποίο αναπτύχθηκε από το Asphalt Institute βάσει εργαστηριακών δεδομένων κόπωσης από επιλεγμένα τμήματα του πειράματος AASHO το 1982 δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_f = A(C)(B \times 10^{-3})(\varepsilon_t)^{-b} | E^* |^c \quad (2.4)$$

Όπου

$N_f$ : αριθμός των ισοδύναμων τυπικών αξόνων

$\epsilon_t$ : ανηγμένη παραμόρφωση στις ασφαλτικές στρώσεις

$|E^*|$ : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (psi)

A, B, b, c: προσαρμοζόμενοι συντελεστές στα δεδομένα

C: συνάρτηση του ποσοστού της ασφάλτου και των κενών αέρα στο ασφαλτόμιγμα

$$C = 10^M$$

$$\text{Όπου } M = 4,84 \left( \frac{V_b}{V_b + V_v} - 0,69 \right) \quad (2.5)$$

$V_b$ : ποσοστό ασφάλτου

$V_v$ : ποσοστό κενών

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του NCHRP 1-37A περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_f = \beta_{f1} K_1 (\epsilon_t)^{-\beta_{f2} K_2} (E)^{-\beta_{f3} K_3} \quad (2.6)$$

Όπου

$N_f$ : αριθμός των φορτίσεων μέχρι την αστοχία

$\epsilon_t$ : η παραμόρφωση στην κρίσιμη θέση

$K_1, K_2, K_3$ : εργαστηριακοί συντελεστές

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ : παράμετροι προσαρμογής

E: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

Οι εκθέτες  $K_1, K_2, K_3$  είναι σταθεροί ενώ οι παράμετροι προσαρμογής  $\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$  εκφράζουν την διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα οδοστρώματα ανάλογα με το πάχος τους όταν αναλύονται με το τυπικό φαινομενικό μοντέλο, αλλάζοντας από σταθερή παραμόρφωση σε λεπτό οδόστρωμα σε σταθερή τάση σε παχύ οδόστρωμα.

Αυτό το μοντέλο περιέχει σημαντικές τροποποιήσεις από τη βασική μορφή της εξίσωσης κόπωσης ωστόσο εκφράζει τη σχέση παραμόρφωσης-μέτρου δυσκαμψίας. Η τελική μορφή του μοντέλου (El-Basouneh & Witzcak 2005) αποτελεί μια εξέλιξη του παραπάνω μοντέλου του Asphalt Institute.

Μία άλλη κατηγορία μοντέλων εξετάζει την κόπωση του μίγματος λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες που την προκαλούν. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι αυτό που ανέπτυξε ο Deacon et.al (1994). Καθώς λοιπόν το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία και η εξίσωση κόπωσης που προέκυψε έχει τη μορφή:

$$N_f = 10^{(20.0341 - 0.2261T)} \epsilon^{(-5.9138 + 0.1056T)}$$

Όπου

$N_f$ : η εργαστηριακή διάρκεια ζωής

$\epsilon$ : η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση

T: η θερμοκρασία σε °C



Τέλος μεγάλος αριθμός εξισώσεων έχει αναπτυχθεί προσαρμοσμένος σε υλικά, ασφαλτομίγματα, κλιματολογικές συνθήκες και ιδιαιτερότητες του κυκλοφοριακού φόρτου που εμφανίζονται κατά τόπους. Οι απόπειρες εφαρμογής αυτών των μοντέλων σε περιοχές διαφορετικές από αυτές που έχουν σχεδιαστεί, προκαλεί μεγάλες αποκλίσεις από τα πραγματικά αποτελέσματα και σφάλματα στην εκτίμηση κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος. Συνεπώς, η εφαρμογή των υπόψη μοντέλων προϋποθέτει τη βαθμονόμηση τους βάσει των τοπικών συνθηκών (κλίμα, υλικά, κυκλοφορία κλπ).

## Κεφάλαιο 3: Δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

### 3.1 Γενικά στοιχεία

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (dynamic modulus) αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος των ασφαλτομιγμάτων. Η χρήση του και η σπουδαιότητα του ενισχύθηκε τα τελευταία χρόνια με την εισαγωγή του σαν βασική παράμετρο χαρακτηρισμού των ασφαλτομιγμάτων για το σχεδιασμό/διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων (NCHRP 2004).

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος δηλαδή την εξάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης. Σύμφωνα με έρευνες (Dongré 2005) η χρήση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας 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.

### 3.2 Ορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας εκφράζει την αντίσταση του ασφαλτομίγματος στην παραμόρφωση υπό την ημιτονοειδή άσκηση φορτίου και προσδιορίζεται ως η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου δυσκαμψίας το οποίο αποτελείται από δύο μέρη το πραγματικό, το οποίο αντιπροσωπεύει την ελαστική ακαμψία και το φανταστικό, το οποίο αντιπροσωπεύει την εσωτερική απόσβεση των υλικών (Huang 1993).

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

$$E' = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} * \cos\varphi \quad (3.2)$$

$$E'' = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} * \sin\varphi \quad (3.3)$$

Όπου

$E^*$  = σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας

$\sigma_o$  = μέγιστη τάση

$\varepsilon_o$  = μέγιστη παραμόρφωση

$\varphi$  = γωνία υστέρησης (μοίρες)

$i$  = φανταστικό μέρος του μιγαδικού αριθμού

Μαθηματικά, το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας καθορίζεται από την μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη και την μέγιστη ανακτήσιμη αξονική παραμόρφωση όπως περιγράφεται στην σχέση 3.4 (Yoder & Witczak 1975, Witczak et.al 2002). Πρέπει να σημειωθεί ότι παρότι το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας είναι η απόλυτη τιμή του σύνθετου μέτρου, για λόγους απλοποίησης στην παρούσα διπλωματική θα συμβολίζεται απλώς ως  $E^*$  αντί για  $|E^*|$ .

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} * \cos\varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} * \sin\varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

Όπου

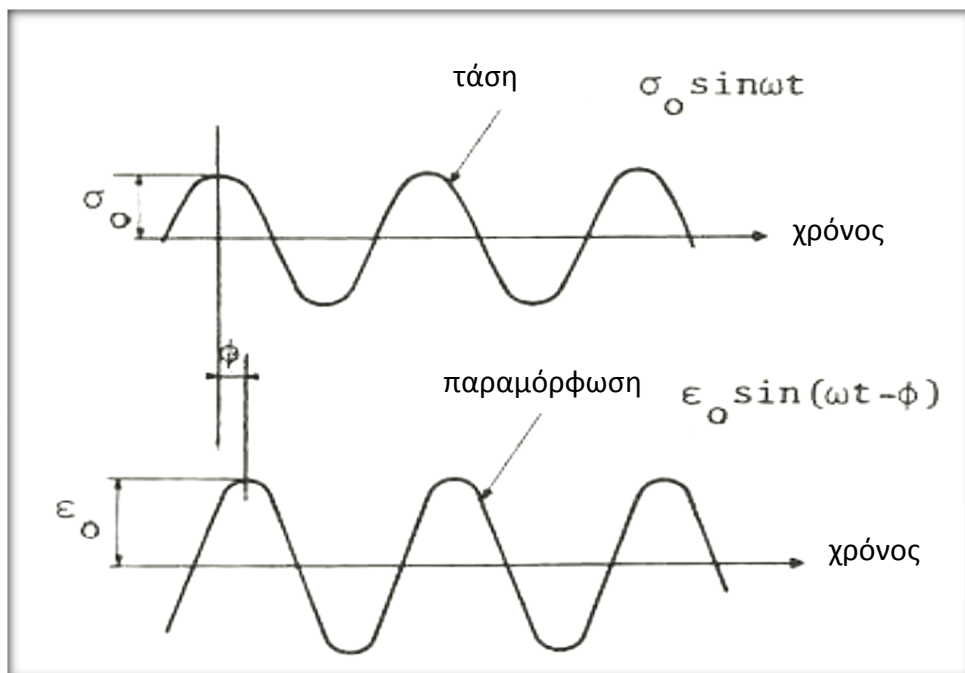
$E^*$ = δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας

$\sigma_0$  = μέγιστη τάση

$\epsilon_0$ = μέγιστη παραμόρφωση

$\varphi$ = γωνία υστέρησης (μοίρες)

Η γωνία υστέρησης ( $\varphi$ ) περιγράφει την καθυστέρηση στη μέγιστη επαγόμενη αξονική παραμόρφωση σε σχέση με τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 (Huang 1993). Αυτή η υστέρηση φάσης απεικονίζει την χρονική εξάρτηση του ασφαλτομίγματος και εκφράζει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του. Για αμιγώς ελαστικά υλικά η γωνία φάσης είναι μηδέν ( $\varphi=0^\circ$ ) δηλαδή δεν υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ της επιβολής της μέγιστης τάσης και της εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης. Αντίθετα στα ιξώδη υλικά η γωνία φάσης είναι ίση με  $90^\circ$  ( $\varphi=90^\circ$ ) δηλαδή η παραμόρφωση υστερεί της τάσης κατά  $90^\circ$ . Για ιξωδοελαστικά υλικά όπως τα ασφαλτομίγματα η γωνία υστέρησης κυμαίνεται μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$ .



Εικόνα 3.1: Χρονική υστέρηση μεταξύ εφαρμοζόμενης τάσης και επαγόμενης παραμόρφωσης

Η ημιτονοειδής τάση και η ημιτονοειδής παραμόρφωση περιγράφονται αντίστοιχα από τις σχέσεις.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin \omega t \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (3.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ χρόνου-συχνότητας ( $t = 1/f$ ) προκύπτει ότι η τάση και η παραμόρφωση είναι συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας η οποία καθορίζεται από τη συχνότητα φόρτισης ( $f$ ). Η παλμική τάση και η προκύπτουσα παλμική παραμόρφωση καθορίζονται από την γωνιακή συχνότητα όπως φαίνεται από την εξίσωση 3.7.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.7)$$

Όπου

$\omega$  = γωνιακή συχνότητα (rad/sec)

$f$  = συχνότητα φόρτισης (Hz)

$t$  = χρόνος φόρτισης (sec)

### 3.3 Κεντρικές καμπύλες και παράγοντες μετατόπισης

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

Η κεντρική καμπύλη απεικονίζει την απόκριση του ασφαλτομίγματος στη συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς για ένα εύρος συχνοτήτων ή χρόνου φόρτισης (Christensen & Anderson 1992). Μέσω της κεντρικής καμπύλης είναι δυνατή η σύγκριση γραμμικών ιξωδοελαστικών υλικών όταν έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές σε διάφορες συχνότητες φόρτισης και θερμοκρασίες (Pellinen 2002).

Η κατασκευή της κεντρικής καμπύλης βασίζεται στην αρχή της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας η οποία περιγράφει την ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου και του μίγματος (Pellinen & Witczak 2002). Τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτουν για διάφορες θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης, μετατοπίζονται οριζόντια ως προς τον χρόνο ώστε όλες οι καμπύλες να συγχωνευθούν σε μία ομαλή ενιαία καμπύλη (κεντρική καμπύλη) (εικόνες 3.2 και 3.3).

Το μέγεθος της μετατόπισης που απαιτείται σε κάθε θερμοκρασία για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης περιγράφει την εξάρτηση του υλικού από την θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος της μετατόπισης τόσο μεγαλύτερη η εξάρτηση του μίγματος από την θερμοκρασία. Ο παράγοντας μετατόπισης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$a(T) = t / t_r \longleftrightarrow \log a(T) = \log t - \log t_r \quad (3.8)$$

Όπου

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

$t$  = χρόνος φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία

$t_r$  = μειωμένος χρόνος φόρτισης στην θερμοκρασία αναφοράς

$T$  = επιθυμητή θερμοκρασία

Ο παράγοντας μετατόπισης μπορεί επίσης να προκύψει και συναρτήσει της συχνότητας φόρτισης μέσω της σχέσης που συνδέει το χρόνο με τη συχνότητα φόρτισης:

$$a(T) = f_r / f \longleftrightarrow \log a(T) = \log f_r - \log f \quad (3.9)$$

Όπου

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

$f$  = συχνότητα φόρτισης στην επιθυμητή θερμοκρασία

$f_r$  = μειωμένη συχνότητα φόρτισης στην θερμοκρασία αναφοράς

$T$  = επιθυμητή θερμοκρασία

Για λόγους ακρίβειας, για τον προσδιορισμό του παράγοντα μετατόπισης χρησιμοποιείται μια δευτεροβάθμια εξίσωση, μεταξύ του λογαρίθμου του παράγοντα μετατόπισης και της θερμοκρασίας. Η σχέση αυτή περιγράφεται παρακάτω:

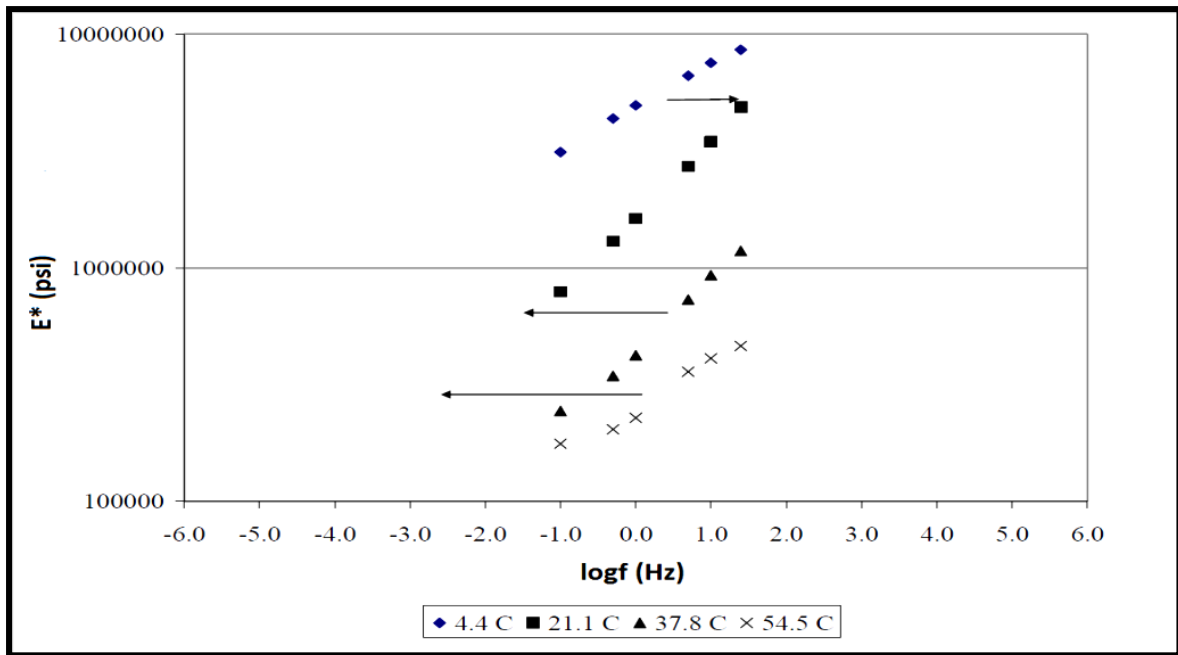
$$\log a(T_i) = aT_i^2 + bT_i + c \quad (3.10)$$

Όπου

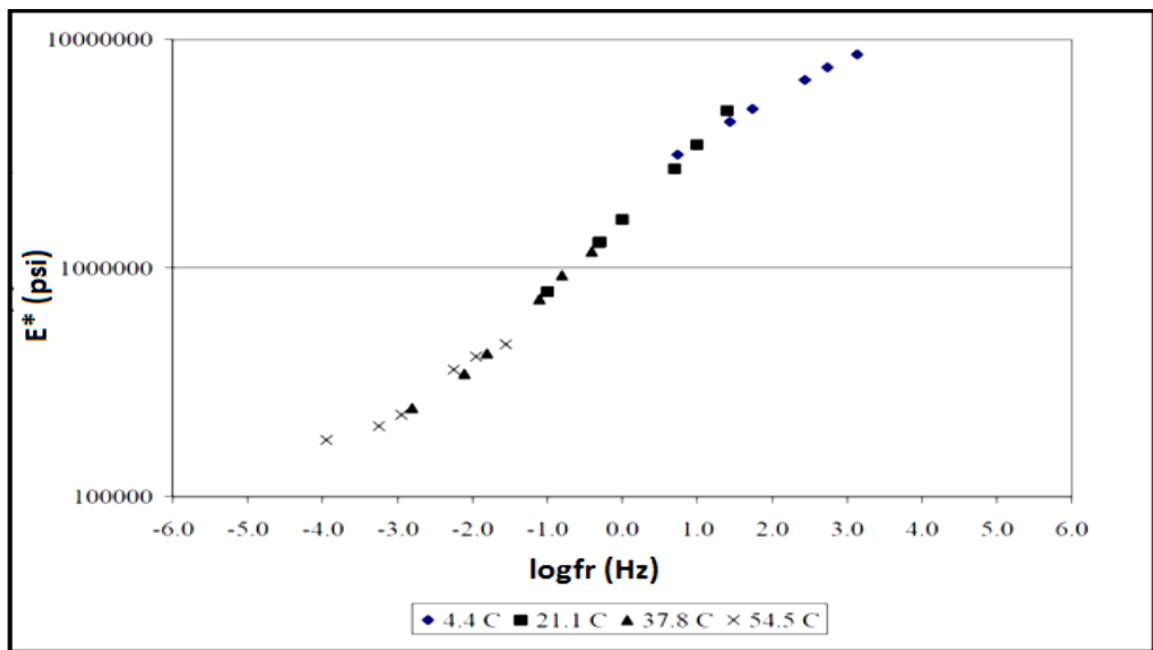
$a(T_i)$ : παράγοντας μετατόπισης συναρτήσει της θερμοκρασίας  $T_i$

$T_i$ : επιθυμητή θερμοκρασία, Fahrenheit

$a, b, c$ : συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης



Εικόνα 3.2: Καμπύλες του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας για διάφορες θερμοκρασίες (Cross 2007)



Εικόνα 3.3: Μετατόπιση των δεδομένων για την κατασκευή της κεντρικής καμπύλης (Cross 2007)

Έχοντας υπολογίσει μέσω των παραγόντων μετατόπισης τον μειωμένο χρόνο φόρτισης στην θερμοκρασία αναφοράς, προκύπτει η κεντρική καμπύλη η οποία γενικά μπορεί να προσομοιωθεί μαθηματικά χρησιμοποιώντας μία σιγμοειδή συνάρτηση που περιγράφεται ως:

$$\text{Log } |E^*| = \delta + \alpha / [1 + e^{\beta + \gamma (\log tr)}] \quad (3.11)$$

Όπου

tr = μειωμένος χρόνος φόρτισης στην θερμοκρασία αναφοράς

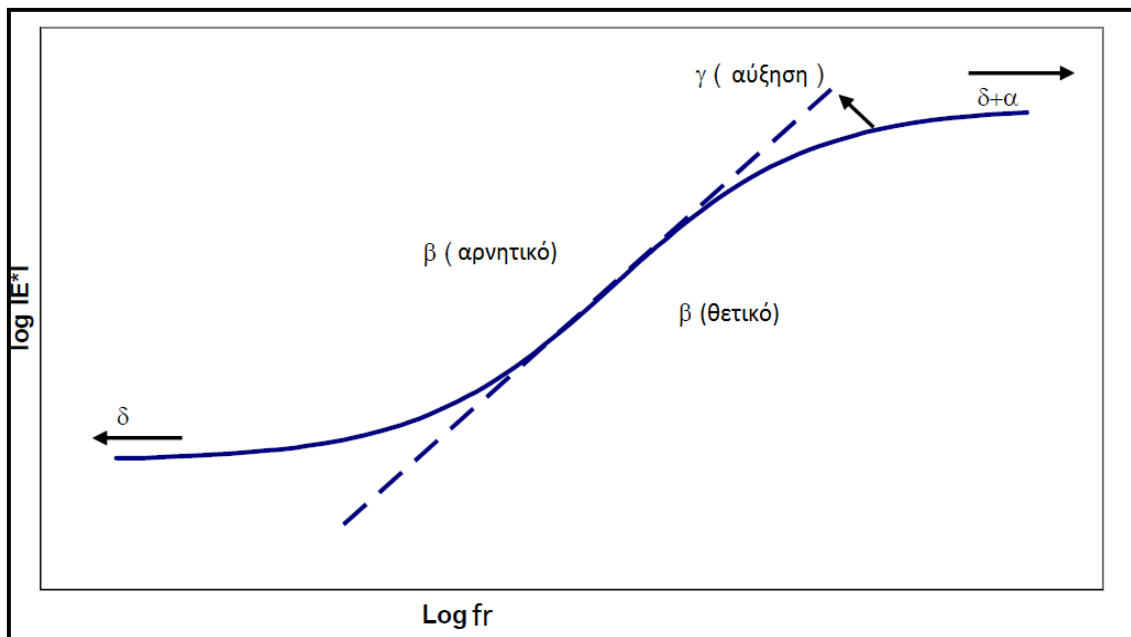
δ = ελάχιστη τιμή του E\*

δ + α = μέγιστη τιμή του E\*

β, γ = παράμετροι που περιγράφουν το σχήμα της σιγμοειδούς συνάρτησης

α = μεταβλητή που είναι συνάρτηση της κλίσης

Στη σχέση (3.11), η παράμετρος γ σχετίζεται με την κλίση της καμπύλης (ρυθμός μεταβολής μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών) και η παράμετρος β με την οριζόντια θέση αλλαγής του καμπυλωτού σημείου. Οι παράμετροι β και γ, εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της ασφάλτου και το μέγεθος των δ, α (Design Guide 2004). Οι παράμετροι δ και α εξαρτώνται από την κοκκομετρία των αδρανών, το ποσοστό της ασφάλτου στο μίγμα και το ποσοστό των κενών. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η τυπική μορφή μιας σιγμοειδούς καμπύλης.



Εικόνα 3.4: Μορφή σιγμοειδούς καμπύλης (Pellinen & Witczak 2002)

Η καταλληλότητα της σιγμοειδούς καμπύλης για την περιγραφή της κεντρικής καμπύλης προέκυψε από παρατηρήσεις της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Το ανώτερο τμήμα της καμπύλης πλησιάζει ασυμπτωτικά την μέγιστη δυσκαμψία του μίγματος η οποία εξαρτάται από την δυσκαμψία της ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες η ελαστική συμπεριφορά υπερισχύει και το μέτρο δυσκαμψίας πλησιάζει μία τιμή ισορροπίας η οποία εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Έτσι η σιγμοειδής συνάρτηση απεικονίζει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος όταν αυτό επιβάλλεται σε συνθήκες περιοδικής φόρτισης για ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (Pellinen & Witczak 2002).

### **3.4 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας**

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

#### **3.4.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας**

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

Μέσω του εμβόλου, επιβάλλεται μια ελεγχόμενη θλιπτική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής. Το έμβολο μπορεί να εφαρμόσει τάση μέχρι 2800kPa για ένα εύρος συχνοτήτων από 0,1 έως 25Hz. Ο θάλαμος ελέγχου της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των δοκιμών, στην οποία θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή. Ο θάλαμος έχει τη δυνατότητα ρύθμισης και ελέγχου της θερμοκρασίας των δοκιμών για ένα εύρος θερμοκρασιών από -4 έως 60°C με ακρίβεια  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Το σύστημα είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε με ειδικό λογισμικό να καταγράφεται το χρονικό ιστορικό των τάσεων και παραμορφώσεων, και στη συνέχεια να υπολογίζεται το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και η γωνία υστέρησης.

Συνήθως, έχει επικρατήσει η τάση που επιβάλλεται να είναι θλιπτική ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5 10, 25 Hz, δεδομένου ότι προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος (Witczak & Root 1974). Η επιβολή της τάσης πρέπει να ελέγχεται πλήρως από υπολογιστή που να διαθέτει λογισμικό μέτρησης και καταγραφής της εφαρμοζόμενης τάσης και της προκαλούμενης παραμόρφωσης. Επίσης, θα πρέπει να μετράται η περίοδος της τάσης και της παραμόρφωσης με ακρίβεια 0.5%.

#### **3.4.2 Αλγόριθμοι εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας**

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι αρκετά χρονοβόρος και απαιτεί ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό. Ωστόσο, η εισαγωγή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σαν παράμετρο σχεδιασμού είναι απαραίτητη στα πλαίσια διαστασιολόγησης ενός οδοστρώματος. Υπό το πρίσμα των παραπάνω, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι εμπειρικοί ή ημι-εμπειρικοί και βασίζονται κυρίως στη κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και στις ογκομετρικές ιδιότητες του μίγματος. Οι πιο πρόσφατοι και ευρέως διαδεδομένοι



αλγόριθμοι για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας είναι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A, ο αλγόριθμος Witczak 1-40D και ο αλγόριθμος του Hirsch.

### 3.4.2.1 Αλγόριθμος Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A εκτιμά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας λαμβάνοντας υπόψη το ιξώδες της ασφάλτου, την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και την ογκομετρική σύσταση του ασφαλτομίγματος. Η ανάπτυξη του αλγορίθμου βασίστηκε σε 2750 μετρήσεις του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας που πραγματοποιήθηκαν σε 171 ασφαλτομίγματα με κοινή άσφαλο και σε 34 ασφαλτομίγματα με τροποποιημένη άσφαλο στα εργαστήρια του Asphalt Institute και του πανεπιστημίου του Maryland (Andrei et.al. 1999).

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

$$\log E^* = 3,750063 + 0,02932 p_{200} - 0,001767 (p_{200})^2 - 0,002841 p_4 - 0,058097 Va - 0,802208 * \frac{V_{beff}}{V_{beff} + Va} + \frac{3,871977 - 0,0021 p_4 + 0,003958 p_{38} - 0,000017 (p_{38})^2 + 0,005470 p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 * \log f - 0,393532 * \log \eta)}} \quad (3.12)$$

Όπου

E\*: το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

η: το ιξώδες της ασφάλτου, 10<sup>6</sup> poise

f: η συχνότητα φόρτισης, Hz

Va: το ποσοστό κενών κατ'όγκο ασφαλτομίγματος, %

Vbeff: το ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ'όγκο ασφαλτομίγματος, %

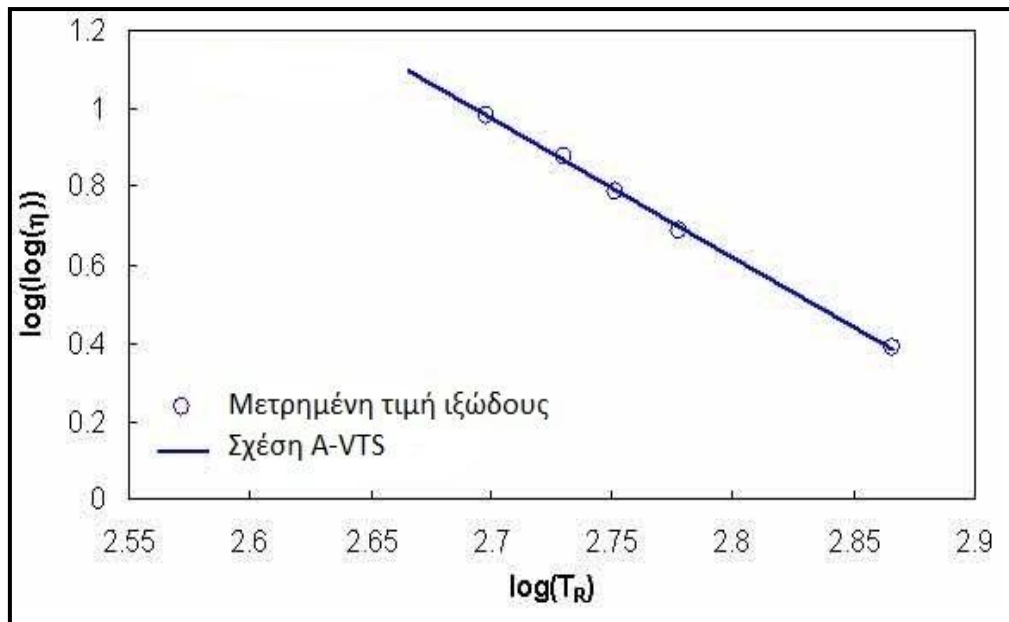
p34: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19mm, %

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

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

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

Για τον υπολογισμό του ιξώδους της ασφάλτου, το οποίο υπεισέρχεται στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται μια γραμμική σχέση μεταξύ του διπλού λογαρίθμου του ιξώδους και του λογαρίθμου της θερμοκρασίας (Bari & Witczak 2006). Παρόλο που η σχέση μεταξύ ιξώδους και θερμοκρασίας είναι μη-γραμμική, έχει διαπιστωθεί ότι όταν γίνονται κατάλληλοι μετασχηματισμοί, μπορεί να υπάρξει γραμμική σχέση μεταξύ τους. Αυτή η γραμμική σχέση είναι ευρέως γνωστή ως 'Σχέση A- VTS' και επιτρέπει την εκτίμηση του ιξώδους της ασφάλτου για διάφορες θερμοκρασίες. Δίνεται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα και εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση 3.13.



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα της σχέσης A- VTS

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

Όπου

η= ιξώδες, cP

T<sub>R</sub>= θερμοκρασία, βαθμοί Rankine

A= σταθερός όρος της εξίσωσης

VTS= κλίση της καμπύλης

Οι παράμετροι A και VTS αποτελούν μοναδικές ιδιότητες του εκάστοτε τύπου ασφάλτου και προσδιορίζονται με γραμμική παλινδρόμηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων του ιξώδους της ασφάλτου σε σχέση με τη θερμοκρασία. Στην εξίσωση ευθείας που προκύπτει το A είναι ο σταθερός όρος ενώ το VTS εκφράζει την κλίση της καμπύλης. Λόγω της γραμμικής σχέσης των A-VTS, αρκούν δύο μόνο τιμές του ιξώδους ώστε να προσδιοριστούν πλήρως οι παράμετροι.

Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η μέτρηση του ιξώδους της ασφάλτου, η σχέση A-VTS προκύπτει σύμφωνα με τους Mirza και Witczak (1995) αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών διεισδυτικότητας και του σημείου μάλθωσης. Η θερμοκρασία μάλθωσης της ασφάλτου αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες της ασφάλτου είναι ίσο με 13000 Poise. Επίσης, η συσχέτιση του ιξώδους με το δείκτη διεισδυτικότητας, ο οποίος προσδιορίζεται στους 25°C, δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\log \eta = 10,5012 - 2,2601 * \log(\text{Pen}) + 0,00389 * (\log (\text{Pen}))^2 \quad (3.14)$$

Όπου

η: ιξώδες, Poise

PEN: δείκτης διεισδυτικότητας σε θερμοκρασία 25°C

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

### 3.4.2.2 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A αναθεωρήθηκε το 2006, εμπλουτίζοντας την βάση δεδομένων με αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμές σε επιπλέον δοκίμια (συνολικά 7400 μετρήσεις σε 346 δοκίμια ασφαλτομίγματος). Έτσι αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, ο οποίος είναι γνωστός σαν αλγόριθμος Witczak 1-40D (Bari & Witczak 2006). Η εξίσωση που περιγράφει τον αλγόριθμο αυτό είναι η ακόλουθη:

$$\log E^* = -0,349 + 0,754 * (|G^*|_b^{-0,0052}) * \left( 6,65 - 0,032p_{200} + 0,0027(p_{200})^2 + 0,011p_4 - 0,0001(p_4)^2 + 0,006p_{38} - 0,00014(p_{38})^2 - 0,08V_a - \frac{1,06V_{beff}}{V_{beff}+V_a} \right) + \frac{2,558+0,032V_a+\frac{0,713V_{beff}}{V_{beff}+V_a}+0,0124p_{38}-0,0001(p_{38})^2-0,0098p_{34}}{1+e^{-0,7814-0,5785\log|G^*|_b+0,8834\log\delta_b}} \quad (3.15)$$

Όπου

E\*: δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας, psi

|G\*|<sub>b</sub>: δυναμικό διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου, psi

δ<sub>b</sub>: η γωνία υστέρησης της ασφάλτου η οποία σχετίζεται με το |G\*|<sub>b</sub>, μοίρες

V<sub>a</sub>: το ποσοστό κενών κατ'όγκο ασφαλτομίγματος, %

V<sub>beff</sub>: το ενεργό ποσοστό της περιεχόμενης ασφάλτου κατ'όγκο ασφαλτομίγματος, %

p<sub>34</sub>: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 19mm, %

p<sub>38</sub>: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 9,5mm, %

p<sub>4</sub>: το αθροιστικό ποσοστό κατά βάρος αδρανών που συγκρατείται από κόσκινο οπής 4,75mm, %

p<sub>200</sub>: το ποσοστό κατά βάρος αδρανών που διέρχεται από κόσκινο οπής 0,075mm, %

Η βασική διαφορά με τον προγενέστερο αλγόριθμο είναι η αντικατάσταση του ιξώδους (η) και της συχνότητας φόρτισης (f) με το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας, G\*<sub>b</sub> και τη γωνία υστέρησης, δ<sub>b</sub>, για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς της ασφάλτου.

Ο λόγος που οδήγησε τους Bari και Witczak (2006) στην αναθεώρηση του προηγούμενου μοντέλου ήταν ο εξής:

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

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

$$|G_b^*| = 0,0051 * f_s * \eta_{fs,T} * (\sin\delta_b)^{7,1542-0,4929f_s+0,0211f_s^2} \quad (3.16)$$

Όπου

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

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

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

$\delta_b$ : γωνία υστέρησης, μοίρες

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

$$\log\log\eta_{fs,T} = A' + VTS' \log T_R \quad (3.17)$$

Όπου

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

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

$T_R$ : θερμοκρασία σε βαθμούς Rankine

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

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

Στην εξίσωση 3.17, αντί των συντελεστών A και VTS, λαμβάνονται υπόψη οι μετασηματισμένοι συντελεστές A' και VTS', ώστε να συμπεριληφθεί η συχνότητα φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τα αρχικά A και VTS με δύο νέους συντελεστές προσαρμογής της συχνότητας, οπότε και προκύπτει η αναλυτική μορφή της παραπάνω εξίσωσης 3.17:

$$\log\log\eta_{fs,T} = 0,9699f_s^{-0,0527} * A + 0,9668f_s^{-0,0575} * VTS * \log(T_R) \quad (3.18)$$

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

$$\delta_b = 90 + (-7,3146 - 2,6162VTS') * \log(f_s * \eta_{f_s,T}) + (0,1124 + 0,2029VTS') * \log(f_s * \eta_{f_s,T})^2 \quad (3.19)$$

Όπου

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

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

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

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

### 3.4.2.3 Αλγόριθμος του Hirsch

Ο αλγόριθμος του Hirsch για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας βασίζεται στο νόμο των μιγμάτων για σύνθετα υλικά (Christensen et.al 2003). Σε αντίθεση με τα παραπάνω δύο μοντέλα, στον αλγόριθμο του Hirsch απαιτούνται δύο μόνο ογκομετρικές παράμετροι: το ποσοστό των κενών μεταξύ των αδρανών (VMA) και το ποσοστό των κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο (VFA).

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

$$E^*_{mix} = P_c * \left( 4200000 * \left( 1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 * |G^*|_b * \frac{VFA * VMA}{10000} \right) + \frac{(1-P_c)}{\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3 * |G^*|_b * VFA}} \quad (3.20)$$

$$P_c = \frac{(20 + 3 * |G^*|_b * \frac{VFA}{VMA})^{0,58}}{650 + (3 * |G^*|_b * \frac{VFA}{VMA})^{0,58}} \quad (3.21)$$

Όπου

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

$P_c$ = συντελεστής επαφής των αδρανών

VMA= ποσοστό κενών μεταξύ των αδρανών, %

VFA= ποσοστό κενών που έχουν πληρωθεί με άσφαλτο, %

Όπως και στον αλγόριθμο 1-40D η εξάρτηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας από τον χρόνο και την θερμοκρασία εκφράζεται μέσω του διατμητικού μέτρου δυσκαμψίας  $G_b^*$  το οποίο πρέπει να είναι υπολογισμένο στην ίδια θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης (Christensen et.al 2003).

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

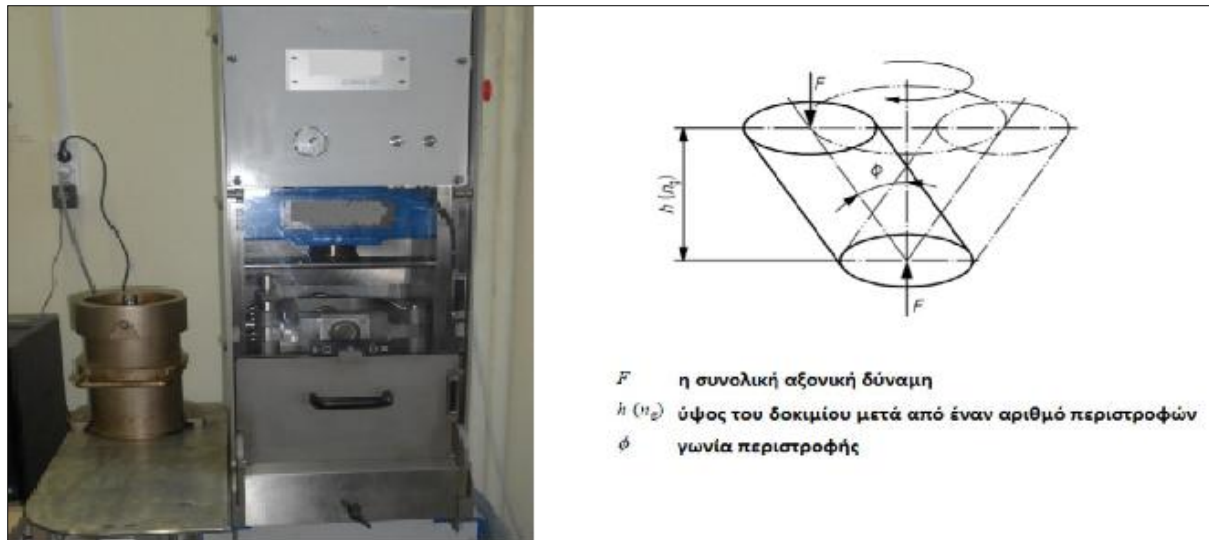
## Κεφάλαιο 4: Ερευνητική διαδικασία

### 4.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του  $E^*$ , σε σχέση με το  $E^*$  που προσδιορίζεται εργαστηριακά, στην εκτίμηση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων. Για την εκτίμηση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων λαμβάνεται υπόψη ο νόμος κόπωσης που προτείνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία και πρακτική κατά NCHRP (2004). Για το σκοπό αυτό, αρχικά παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης. Κατόπιν για λόγους βελτιστοποίησης των δοκιμών επιλέχθηκαν τέσσερα αντιπροσωπευτικά δοκίμια με βάση το ποσοστό των κενών αέρος και προσδιορίστηκε το  $E^*$ , τόσο μέσω εργαστηριακών δοκιμών, όσο και μέσω της ενεργοποίησης των αλγορίθμων πρόβλεψης. Στη συνέχεια έγινε θεώρηση διατομής σχεδιασμού οδοστρώματος για τον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος.

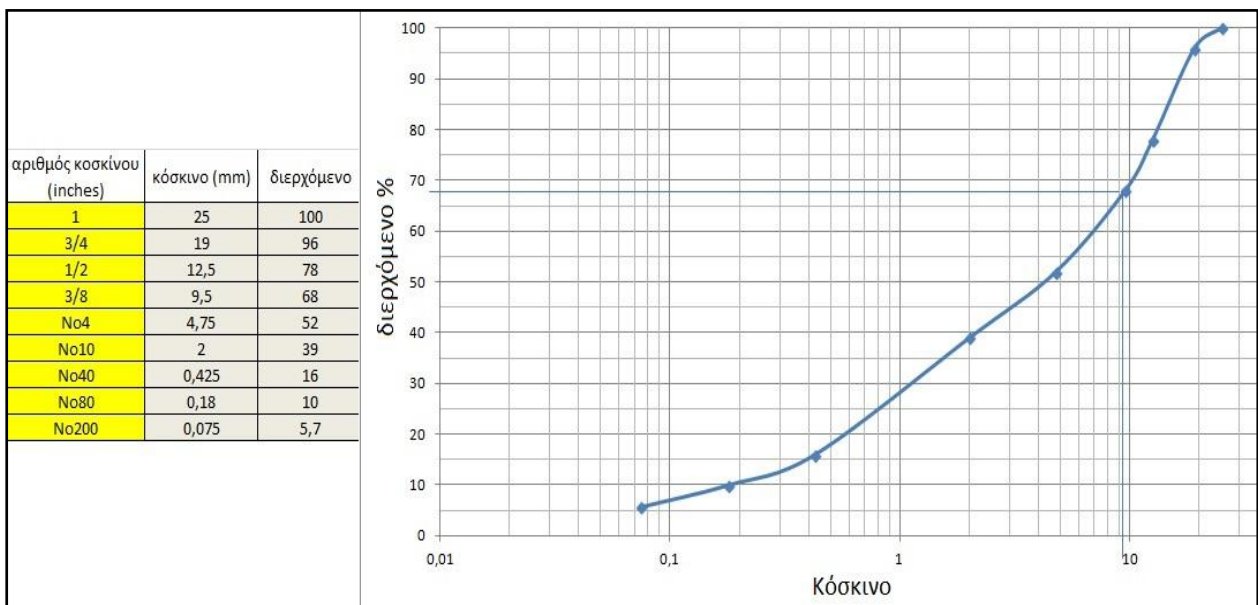
### 4.2 Παρασκευή ασφαλτομιγμάτων ισοπεδωτικής στρώσης

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν διαφορετικά ασφαλτομίγματα ισοπεδωτικής στρώσης. Η συμπύκνωση των υπόψη δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ με τη μέθοδο της γυροσκοπικής συμπύκνωσης (εικόνα 4.1). Κατά τη μέθοδο αυτή εφαρμόστηκε το πρότυπο (EN 12697-31 2007) σύμφωνα με το οποίο η συμπύκνωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας κάθετης δύναμης μέσω μεταλλικών πλακών στο πάνω μέρος γνωστής μάζας ασφαλτομίγματος, η οποία είναι τοποθετημένη μέσα σε ένα καλούπι διαμέτρου 150 mm και ύψους 200 mm. Ο διαμήκης άξονας της μεταλλικής μήτρας περιστρέφεται με σταθερή γωνία ως προς την κατακόρυφο, ενώ οι μεταλλικές πλάκες παραμένουν παράλληλες και οριζόντιες. 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 ποσοστό κενών. Η συμπύκνωση ολοκληρώθηκε όταν επιτεύχθηκε η επιθυμητή πυκνότητα καθώς και το απαιτούμενο ύψος του δοκιμίου (170mm). Το διαφορετικό ποσοστό κενών σε κάθε δοκίμιο, προέκυψε με κατάλληλη προσαρμογή των κύκλων περιστροφής (gyrations).



Εικόνα 4.1: Γυροσκοπικός συμπιεστής (Gyratory Compactor)

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν έχουν την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών (εικόνα 4.2) τύπου A265B η οποία είναι σύμφωνη με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΤΠ).



Εικόνα 4.2 : Κοκκομετρική καμπύλη αδρανών

Τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά δοκίμια που επιλέχθηκαν περιέχουν διαφορετικά ποσοστά κενών που πληρώθηκαν με άσφαλτο (VFA), κενών αέρος στο μίγμα των αδρανών (VMA) και κενών αέρος στο ασφαλτόμιγμα (Va). Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά κενών των τεσσάρων δοκιμίων.



Πίνακας 4.1: Ποσοστό κενών

Δοκίμιο	Va (%)	VMA	VFA
T2	7,50	18,013	58,4
T6	2,70	13,763	80,4
T7	4,10	15,002	72,7
T8	6,00	16,702	64,1

Όπου

Va (%): ποσοστό κενών αέρος στο ασφαλτόμιγμα

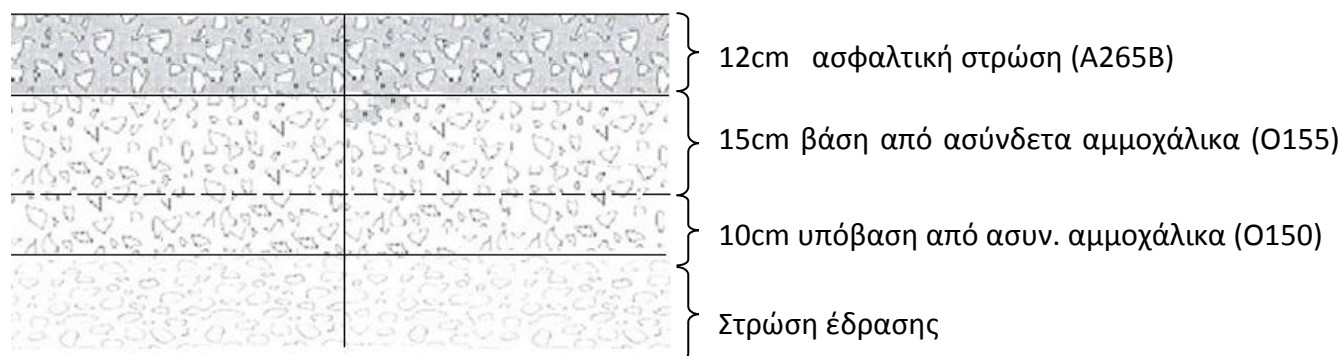
VMA (%): ποσοστό κενών αέρος στο μίγμα των αδρανών

VFA (%): ποσοστό κενών που πληρώθηκε με άσφαλτο

Η άσφαλτος που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων είναι τύπου 50/70 και το περιεχόμενο ποσοστό ασφάλτου όλων των δοκιμίων είναι 4,3%. Σημειώνεται ότι η διαφοροποίηση στο ποσοστό των κενών επιτεύχθηκε μέσω διαφορετικής ενέργειας συμπύκνωσης, δηλαδή αριθμού περιστροφών κατά τη γυροσκοπική συμπύκνωση.

### 4.3 Διατομή σχεδιασμού

Για τον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος έγινε θεώρηση διατομής σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος αυτοκινητοδρόμου με δεδομένη κυκλοφορία και περίοδο σχεδιασμού. Η υπόψη διατομή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3 και αποτελείται από 12εκ. πάχος ασφαλτικών στρώσεων (ισοπεδωτική στρώση), 15εκ. βάση, 10εκ. υπόβαση και εδράζεται σε εδαφικό υλικό κατηγορίας ΦΙΕ3.



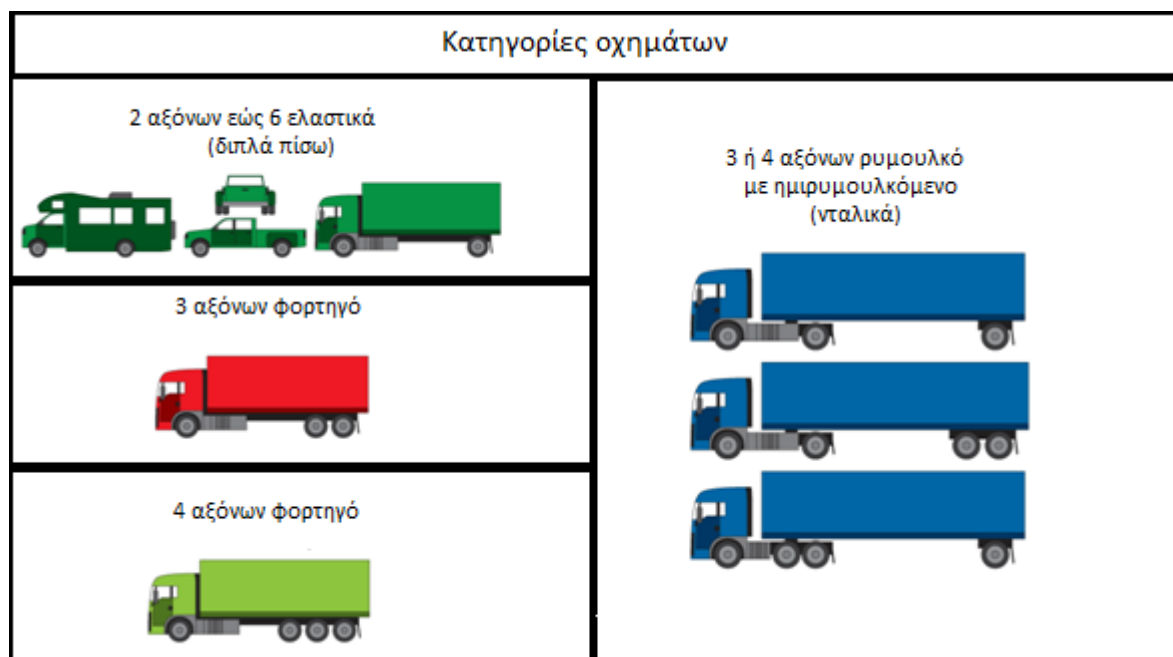
Εικόνα 4.3: Διατομή οδοστρώματος

Για τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων βάσης, υπόβασης και έδρασης οι τιμές είναι 850MPa, 850MPa και 720MPa, αντίστοιχα.

Από τα ασφαλτομίγματα ισοπεδωτικής στρώσης που παρασκευάστηκαν επιλέχθηκαν τέσσερα αντιπροσωπευτικά, τα T2, T6, T7 και T8. Επομένως προκύπτουν οι διατομές μελέτης ΔΤ2, ΔΤ6, ΔΤ7 και ΔΤ8 οι οποίες διαφέρουν ως προς το ποσοστό κενών (βλ. πίνακα 4.1) της ισοπεδωτικής στρώσης, ενώ τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων στρώσεων είναι αντίστοιχα της διατομής του οδοστρώματος της εικόνας 4.3.

## 4.4 Κυκλοφορία σχεδιασμού

Δεδομένου ότι σε μία οδό κυκλοφορούν διάφοροι τύποι οχημάτων, με διαφορετικά φορτία και διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, είναι απαραίτητη η χρήση ενιαίων μονάδων έκφρασης του κυκλοφοριακού φόρτου. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων (ΙΤΑ), κατά τον οποίο οι διελεύσεις των πραγματικών οχημάτων και επομένως και οι διελεύσεις των αξόνων τους μετατρέπονται σε ισοδύναμες διελεύσεις του τυπικού άξονα. Ως τυπικός άξονας ορίζεται ο άξονας με δίδυμους τροχούς και φορτίο 8,16t.



Εικόνα 4.4: Κατηγορίες οχημάτων

Οι ισοδύναμοι τυπικοί άξονες υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος, την κυκλοφοριακή ροή των βαρέων οχημάτων στην αρχή λειτουργίας του οδοστρώματος εκφρασμένη σε ΕΜΗΚ (Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία), το ρυθμό αύξησης της κυκλοφορίας για κάθε κατηγορία οχημάτων, τους συντελεστές ισοδυναμίας και την κατανομή των βαρέων οχημάτων στην λωρίδα σχεδιασμού.

Η περίοδος σχεδιασμού του υπό διερεύνηση οδοστρώματος είναι 20 έτη. Δεδομένου ότι ο θεωρούμενος αυτοκινητόδρομος είναι δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση η κατανομή των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα σχεδιασμού λαμβάνει τιμές από 80% έως 100%. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση (100%), υπέρ της ασφαλείας. Η κυκλοφοριακή ροή των βαρέων οχημάτων στην αρχή λειτουργίας του οδοστρώματος παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2 και συμπεριλαμβάνει την ΕΜΗΚ και για τις δύο κατευθύνσεις τις οδού. Θεωρώντας πως η κυκλοφορία ισοκατανέμεται στις δύο κατευθύνσεις, για τον υπολογισμό της ΕΜΗΚ ανά κατεύθυνση πολλαπλασιάζονται επί 0.5 τα δεδομένα του πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Κυκλοφορικά δεδομένα

Αριθμός αξόνων	ΕΜΗΚ	
2 αξόνων	118	2 ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΩΝ
3 αξόνων φορτηγό	274	
4 αξόνων φορτηγό	72	
3 ή 4 αξόνων νταλικά	167	

Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας κατόπιν σχετικής κυκλοφοριακής μελέτης θεωρήθηκε ίσος με 1,5% για τα οχήματα δύο και τριών αξόνων, ενώ για τα φορτηγά 4 αξόνων και τις νταλικές 3 ή 4 αξόνων ίσος με 3,5%. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η ΕΜΗΚ στο  $v$  έτος κυκλοφορίας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$ΕΜΗΚ_v = ΕΜΗΚ_\alpha * (1+ΡΑ)^{(v-\alpha)} \quad (4.1)$$

Όπου

ΕΜΗΚ<sub>v</sub>= ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία στο  $v$  έτος

ΕΜΗΚ<sub>α</sub>= ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία στο αρχικό ( $\alpha$ ) έτος

ΡΑ= ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας

Ο προσδιορισμός των συντελεστών ισοδυναμίας ( $\Sigma I$ ), οι οποίοι εκφράζουν την καταστρεπτική επίδραση των αξονικών φορτίων με μικρότερο ή μεγαλύτερο φορτίο από το φορτίο ενός τυπικού άξονα, πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη διεθνή πρότυπα (Atkinson, Merrill & Thom, 2006). Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές ισοδυναμίας

Αριθμός αξόνων	$\Sigma I$
2 αξόνων	0.6
3 αξόνων φορτηγό	3.4
4 αξόνων φορτηγό	4.6
3 ή 4 αξόνων νταλικά	2.5

Οι συνολικοί ισοδύναμοι τυπικοί άξονες προκύπτουν από τη σχέση 4.2:

$$ΙΤΑ = \sum (\Sigma I_i \times N_i) \quad (4.2)$$

Όπου

$\Sigma I_i$ = συντελεστής ισοδυναμίας για κάθε κατηγορία οχημάτων

$N_i$ = αριθμός διελεύσεων για κάθε κατηγορία οχημάτων

Οι ισοδύναμες διελεύσεις ανά έτος αλλά και αθροιστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Ισοδύναμοι τυπικοί άξονες

Χρονική περίοδος	Έτος	ΙΤΑ ανά έτος	ΙΤΑ αθροιστικά
		δεξιά λωρίδα	δεξιά λωρίδα
1	2012	178.138	1,78E+05
2	2013	197.972	3,76E+05
3	2014	230.476	6,07E+05
4	2015	266.632	8,73E+05
5	2016	303.198	1,18E+06
6	2017	340.050	1,52E+06
7	2018	353.157	1,87E+06
8	2019	361.927	2,23E+06
9	2020	370.697	2,60E+06
10	2021	379.467	2,98E+06
11	2022	388.237	3,37E+06
12	2023	396.319	3,77E+06
13	2024	404.276	4,17E+06
14	2025	412.233	4,58E+06
15	2026	420.190	5,00E+06
16	2027	428.147	5,43E+06
17	2028	435.910	5,87E+06
18	2029	443.757	6,31E+06
19	2030	451.744	6,76E+06
20	2031	459.876	7,22E+06

## 4.5 Προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

### 4.5.1 Εργαστηριακός προσδιορισμός

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο T342-11 (AASHTO 2011) χρησιμοποιώντας τη συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester). Το σύστημα της δοκιμής αποτελείται από ένα έμβολο επιβολής του φορτίου, ένα θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας και ένα σύστημα μέτρησης και εξαγωγής των αποτελεσμάτων μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στο στάδιο προετοιμασίας του δοκιμίου, προσαρτήθηκαν σε αντιδιαμετρικές θέσεις τέσσερις μεταλλικές βάσεις σε προκαθορισμένες αποστάσεις. Η πάνω και κάτω πλευρά του δοκιμίου δεν πρέπει να παρουσιάζουν ανωμαλίες και θα πρέπει να είναι κάθετες στον κατακόρυφο άξονα του δοκιμίου. Οποιαδήποτε ανωμαλία δεν πρέπει να ξεπερνά τα όρια ανοχής  $\pm 0.05\text{mm}$ .

Η δοκιμή διεξήχθη σε πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C, σε συχνότητες φόρτισης 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz για κάθε θερμοκρασία. Επομένως κάθε δοκίμιο ελέγχθηκε για τους τριάντα συνδυασμούς θερμοκρασίας-συχνότητας φόρτισης. Η δοκιμή σε μια δεδομένη θερμοκρασία, πραγματοποιήθηκε ξεκινώντας από τη χαμηλότερη προς την υψηλότερη συχνότητα φόρτισης.

Μετά την προσάρτηση των μεταλλικών βάσεων, το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στο θάλαμο ελέγχου της θερμοκρασίας, όπου και παρέμεινε μέχρι η θερμοκρασία του να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ).

Όταν το δοκίμιο απέκτησε την επιθυμητή θερμοκρασία, τοποθετήθηκαν στο πάνω και στο κάτω μέρος του κυλινδρικές πλάκες από ανοξείδωτο αλουμίνιο υψηλής αντοχής, διαστάσεων  $104,5 \pm 5\text{mm}$ . Μεταξύ των πλακών φόρτισης και των άκρων του δοκιμίου, προστέθηκαν επίσης ειδικές μεμβράνες, ώστε να μειωθούν οι τριβές και να αποφευχθεί η εμφάνιση διατμητικών τάσεων στην οριζόντια διαμετρική επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια το σύστημα δοκιμίου- πλακών- μεμβρανών, τοποθετήθηκε και ευθυγραμμίστηκε ως προς το έμβολο εφαρμογής του φορτίου, ώστε να αποφευχθεί η έκκεντρη φόρτιση. Επιπλέον, τοποθετούνται, μεταξύ των μεταλλικών προσαρτημένων στο δοκίμιο βάσεων, ειδικοί αισθητήρες (LVDTs), οι οποίοι καταγράφουν τις μονοαξονικές παραμορφώσεις κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής.



Εικόνα 4.5: Πειραματική διάταξη δοκιμής E\*

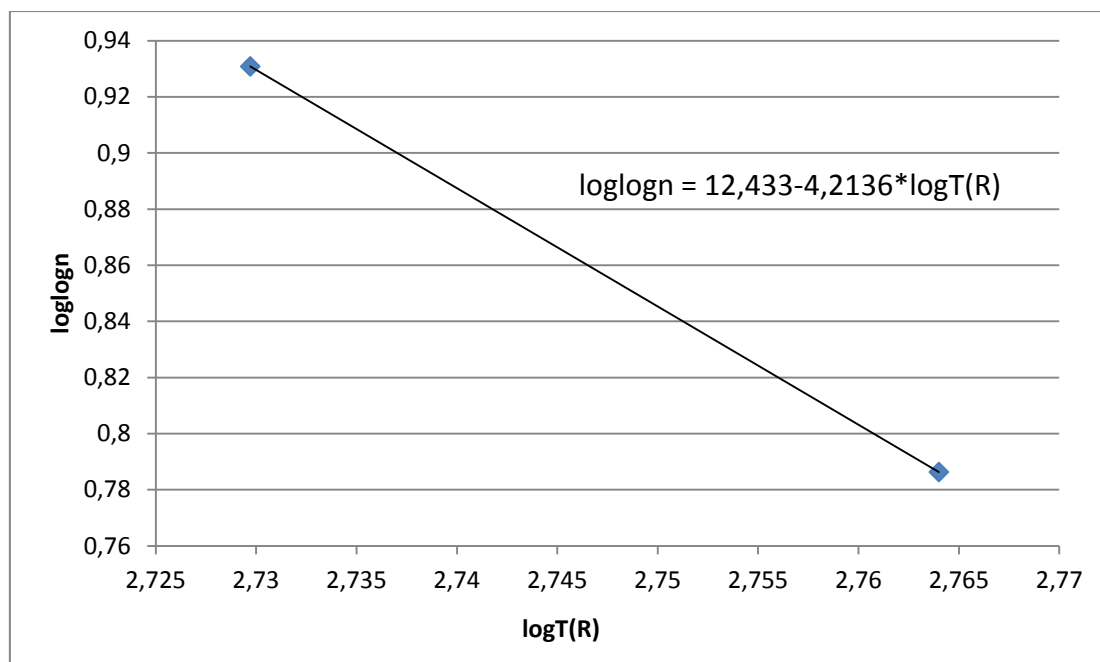
Στη συνέχεια, ασκείται στο δοκίμιο ημιτονοειδής φόρτιση με κυκλικό τρόπο. Το δυναμικό φορτίο προσαρμόστηκε ώστε οι μονοαξονικές παραμορφώσεις να κυμαίνονται μεταξύ 50 και 150 microstrain και οι παραμένουσες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από 1500 microstrains.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής το ειδικό λογισμικό αποθηκεύει τα στοιχεία των πέντε τελευταίων κύκλων φόρτισης για κάθε συχνότητα και κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας προκύπτει το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

## 4.5.2 Προσδιορισμός μέσω αλγορίθμων

### 4.5.2.1 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου Witczak 1-37A

Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A, χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των τεσσάρων δοκιμίων, για πέντε θερμοκρασίες (4, 15, 20, 25, 37°C) και για έξι συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz). Όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την ενεργοποίηση του αλγορίθμου προσδιορίστηκαν εργαστηριακά μέσω κατάλληλων πειραματικών διατάξεων. Το ιζώδες της ασφάλτου, εκτιμήθηκε μέσω των αποτελεσμάτων της δοκιμής διείδυσης και της δοκιμής μάλθωσης (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα υπολογισμού του ιξώδους

Το ιξώδες της ασφάλτου εκτιμήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης, δηλαδή το δείκτη PEN στους 25°C, όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.14. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η θερμοκρασία μάλθωσης της ασφάλτου, αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες της ασφάλτου είναι ίσο με 1300000cP. Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων A, VTS προσδιορίστηκαν με γραμμική παλινδρόμηση και είναι: A= 12,433 και VTS= -4,2136.

#### 4.5.2.2 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου Witczak 1-40D

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμίων, για θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C και συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz. Όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την ενεργοποίηση του αλγορίθμου προσδιορίστηκαν εργαστηριακά μέσω κατάλληλων πειραματικών διατάξεων, με εξαίρεση το διατμητικό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας και τη γωνία υστέρησης της ασφάλτου. Τα υπόψη μεγέθη εκτιμήθηκαν μέσω των σχέσεων 3.15-3.19 για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και συχνότητας φόρτισης.

#### 4.5.2.3 Προσδιορισμός μέσω του αλγορίθμου Hirsch

Για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μέσω του αλγορίθμου του Hirsch, απαραίτητα στοιχεία ήταν: το ποσοστό κενών των αδρανών VMA, το ποσοστό των κενών που έχουν πληρωθεί με ασφαλτο VFA, ο συντελεστής επαφής των αδρανών, P<sub>c</sub> και το διατμητικό μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου. Μέσω των σχέσεων 3.20 και 3.21 και αξιοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα 4.1 προέκυψαν οι τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, για θερμοκρασίες 4, 15, 20, 25 και 37°C και συχνότητες 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz.

## 4.6 Προσδιορισμός κρίσιμων εντατικών μεγεθών

Ο προσδιορισμός των κρίσιμων εντατικών μεγεθών έναντι κόπωσης, δηλαδή της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος BISAR το οποίο έχει αναπτυχθεί από τη Shell για τον υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων συστήματος πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Για τον ορισμό του συστήματος γίνονται οι εξής παραδοχές: το σύστημα αποτελείται από οριζόντιες ομοιόμορφες στρώσεις οι οποίες εδράζονται σε εδαφικό υλικό με άπειρο πάχος, τα στρώματα εκτείνονται οριζόντια στο άπειρο, το υλικό κάθε στρώσης είναι ομογενές και ισότροπο και τα υλικά παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά η οποία περιγράφεται από γραμμική σχέση μεταξύ τάσης-παραμόρφωσης.

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση του προγράμματος είναι ο αριθμός των στρώσεων, ο λόγος Poisson ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 0,35 για όλες τις στρώσεις, τα πάχη των επιμέρους στρώσεων και τα μέτρα ελαστικότητας τους, ο αριθμός των επιβαλλόμενων κυκλικών φορτίων στην επιφανειακή στρώση, οι συντεταγμένες του σημείου εφαρμογής του φορτίου και ένας τρόπος προσδιορισμού του φορτίου που μπορεί να είναι: τάση-φορτίο, φορτίο-ακτίνα επιβολής, τάση-ακτίνα επιβολής. Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου που αφορούν στα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος ενώ στον πίνακα 4.6 φαίνονται τα χαρακτηριστικά φόρτισης του τυπικού αξονικού φορτίου.

Πίνακας 4.5: Δεδομένα εισόδου για τις στρώσεις του οδοστρώματος

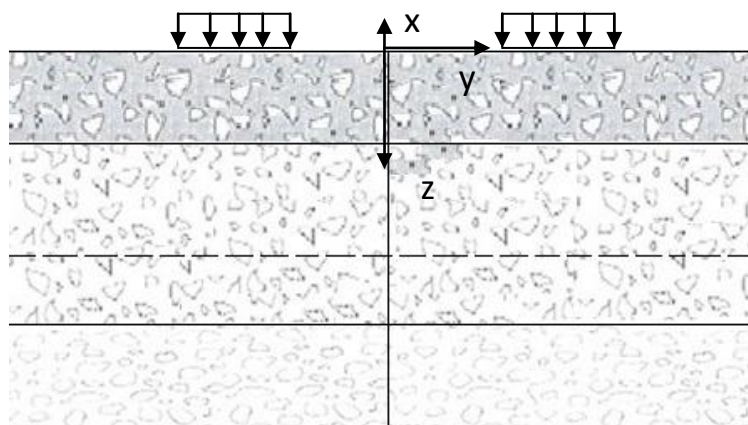
Αριθμός στρώσης	Πάχος (m)	Μέτρο ελαστικότητας (Mpa)	Poisson's Ratio
1	0,12	μεταβλητό	0,35
2	0,15	8,50E+02	0,35
3	0,1	8,50E+02	0,35
4		7,20E+02	0,35

Πίνακας 4.6: Δεδομένα εισόδου για το τυπικό αξονικό φορτίο

	Κάθετα	Κάθετα	οριζόντια (διάτμηση)	οριζόντια (διάτμηση)				οριζόντια
Φορτίο	Φορτίο	Τάση	Φορτίο	Τάση	Ακτίνα	X-συντεταγ.	Y-συντεταγ.	γωνία
Αριθμός	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(m)	(m)	(m)	(Degrees)
1	2,00E+01	5,77E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,05E-01	0,00E+00	-1,58E-01	0,00E+00
2	2,00E+01	5,77E-01	0,00E+00	0,00E+00	1,05E-01	0,00E+00	1,58E-01	0,00E+00



Τα σημεία επιβολής της φόρτισης και υπολογισμού των παραμορφώσεων εισέρχονται στο πρόγραμμα με την μορφή συντεταγμένων σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων σε τρεις διαστάσεις. Ο άξονας z περιγράφει το βάθος, ο x την κατά μήκος διεύθυνση και ο y το πλάτος της οδού(εικόνα 4.7). Το σημείο με συντεταγμένες (0,0,0) βρίσκεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, και ισαπέχει από τα άκρα της λωρίδας κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.7: Σύστημα συντεταγμένων και επιβολής φορτίων

Ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων βασίζεται στην αρχή της επαλληλίας, έτσι το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης επίδρασης φορτίων αναλύεται ως το άθροισμα των επιδράσεων που έχει το κάθε φορτίο χωριστά. Η άθροιση γίνεται έπειτα από μετατροπή των αποτελεσμάτων λαμβάνοντας υπόψη το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εμφανίζονται στην μορφή του πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα εντατικών μεγεθών

Θέση	Στρώση	X-συντ.	Y-συντ.	βάθος	παραμόρφωση (μstrain)		
Αριθμός	Αριθμός	(m)	(m)	(m)	XX	YY	ZZ
1	1	0,00E+00	0,00E+00	1,20E-01	5,95E+01	-2,04E+00	-3,93E+01
2	1	0,00E+00	-1,58E-01	1,20E-01	6,25E+01	4,12E+01	-6,64E+01
3	2	0,00E+00	0,00E+00	2,70E-01	4,08E+01	2,35E+01	-9,55E+01
4	2	0,00E+00	-1,58E-01	2,70E-01	3,76E+01	2,33E+01	-8,97E+01
5	3	0,00E+00	0,00E+00	3,70E-01	3,36E+01	2,41E+01	-7,55E+01
6	3	0,00E+00	-1,58E-01	3,70E-01	3,10E+01	2,07E+01	-6,82E+01
7	4	0,00E+00	0,00E+00	4,70E-01	2,52E+01	2,01E+01	-6,39E+01
8	4	0,00E+00	-1,58E-01	4,70E-01	2,35E+01	1,70E+01	-5,79E+01

Καθώς για τον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος κρίσιμο μέγεθος είναι η εφελκυστική παραμόρφωση που εμφανίζεται στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων, από τα μεγέθη που εμφανίζονται στον πίνακα κρίσιμα θεωρούνται η παραμόρφωση στον άξονα x (μπλε φόντο) και η παραμόρφωση στον άξονα y (πράσινο φόντο). Η παραμόρφωση στον άξονα z συμβολίζει την καθίζηση η οποία δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό της κόπωσης.

Από την παραμόρφωση στους άξονες x και y κρισιμότερη θεωρείται αυτή που έχει την μεγαλύτερη τιμή ανά περίπτωση.

Ο υπολογισμός των κρίσιμων εντατικών μεγεθών πραγματοποιήθηκε για όλες τις διατομές, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του  $E^*$  που προσδιορίστηκαν εργαστηριακά αλλά και αυτές που προέκυψαν από τους αλγόριθμους πρόβλεψης, για τις συχνότητες των 5 και 10Hz και για τις θερμοκρασίες των 4, 15, 20, 25 και 37°C.

#### 4.7 Προσδιορισμός κόπωσης ασφαλτομιγμάτων

Ο υπολογισμός του επιτρεπόμενου αριθμού αξονικών φορτίων έως ότου επέλθει η κόπωση του ασφαλτομίγματος πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης (NCHRP 2004):

$$N_f = \beta_{f1} K_1 (\varepsilon_t)^{-\beta_{f2} K_2} (E_{HMA})^{-\beta_{f3} K_3} \quad (4.3)$$

Όπου:

$N_f$ : αριθμός επιτρεπόμενων αξονικών φορτίων έναντι κόπωσης

$\varepsilon_t$ : η παραμόρφωση στην κρίσιμη θέση (βάση ασφαλτικών στρώσεων)

$E_{HMA}$ : δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας (psi)

$K_1, K_2, K_3$ : παράμετροι παγκόσμιας προσαρμογής (επαναπροσδιορισμένοι από το NCHRP 1-40D)

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ : σταθερές προσαρμοζόμενες στο μίγμα (για παγκόσμια προσαρμογή λαμβάνονται ίσες με μονάδα)

Λαμβάνοντας υπόψη τις ισοδύναμες και τις επιτρεπόμενες διελεύσεις προσδιορίστηκε δείκτης φθοράς ( $\Delta DI$ ) κάθε έτους της περιόδου σχεδιασμού του οδοστρώματος ο οποίος σχετίζεται με τη ρηγμάτωση που οφείλεται στα επιβαλλόμενα φορτία. Η συνολική φθορά στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού του οδοστρώματος ( $DI$ ) προέκυψε από το άθροισμα των επιμέρους φθορών κάθε έτους.

$$DI = \sum (\Delta DI)_j = \sum \left( \frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_j \quad (4.4)$$

Όπου:

$n$ = αριθμός ισοδύναμων διελεύσεων ανά έτος της περιόδου σχεδιασμού

$j$ = έτος

Ο δείκτης φθοράς σχετίζεται με το ποσοστό της επιφάνειας του οδοστρώματος που εμφανίζονται ρηγματώσεις λόγω κόπωσης τύπου “bottom up” μέσω της εξίσωσης 4.5.

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60}\right) \left(\frac{C_4}{1+e^{(C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \text{Log}(DI_{Bottom} * 100))}}\right) \quad (4.5)$$

Όπου

$FC_{Bottom}$  = ποσοστό (%) της επιφάνειας του οδοστρώματος που εμφανίζονται ρηγματώσεις λόγω κόπωσης

$DI_{Bottom}$  = φθορά (σύμφωνα με τη σχέση 4.4)

$C_{1,2,4}$ =σταθερές παλινδρόμησης της συνάρτησης μετατροπής  $C_4=6.00$ ,  $C_1=1.00$ ,  $C_2=1.00$

$C_1^*=-2C_2^*$

$C_2^*=-2.40874-39.748(1+H_{HMA})-2.856$

$H_{HMA}$ =συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων (inches)

Το  $FC_{bottom}$  υπολογίστηκε για κάθε διατομή λαμβάνοντας υπόψη το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ( $E^*$ ) που προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές και τους αλγορίθμους πρόβλεψης στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20, 25 και 37 °C και σε συχνότητες φόρτισης 5 και 10Hz. Η επιλογή των υπόψη συχνοτήτων φόρτισης έγινε με γνώμονα τη διεθνή εμπειρία και πρακτική σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων και πιο συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη αφενός την ταχύτητα κίνησης των βαρέων οχημάτων και αφετέρου τις συνθήκες φόρτισης υπό τις οποίες πραγματοποιούνται οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων (Neifar et.al 2003).

## Κεφάλαιο 5: Ανάλυση στοιχείων

### 5.1 Γενικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των στοιχείων που προέκυψαν βάσει του μεθοδολογικού πλαισίου που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των εργαστηριακών δεδομένων με αυτά που προέκυψαν από τους αλγορίθμους πρόβλεψης. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά προσδιορίστηκαν τα σφάλματα των τριών αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Κατόπιν, διερευνήθηκε η επίδραση των σφαλμάτων αυτών στον προσδιορισμό της κόπωσης των ασφαλομιγμάτων η οποία εκφράζεται με το ποσοστό της επιφάνειας του οδοστρώματος της λωρίδας σχεδιασμού που εμφανίζονται ρηγματώσεις τύπου “bottom up”.

### 5.2 Αξιολόγηση αλγορίθμων πρόβλεψης δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας

Όσον αφορά στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των αλγορίθμων πρόβλεψης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, αρχικά πραγματοποιήθηκε μέσω των κεντρικών καμπυλών (master curves). Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα ποσοστιαία σφάλματα που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης, σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, για όλο το φάσμα θερμοκρασιών (4, 15, 20, 25 και 37 °C) και συχνοτήτων φόρτισης (0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz).

#### 5.2.1 Κεντρικές καμπύλες (Master curves)

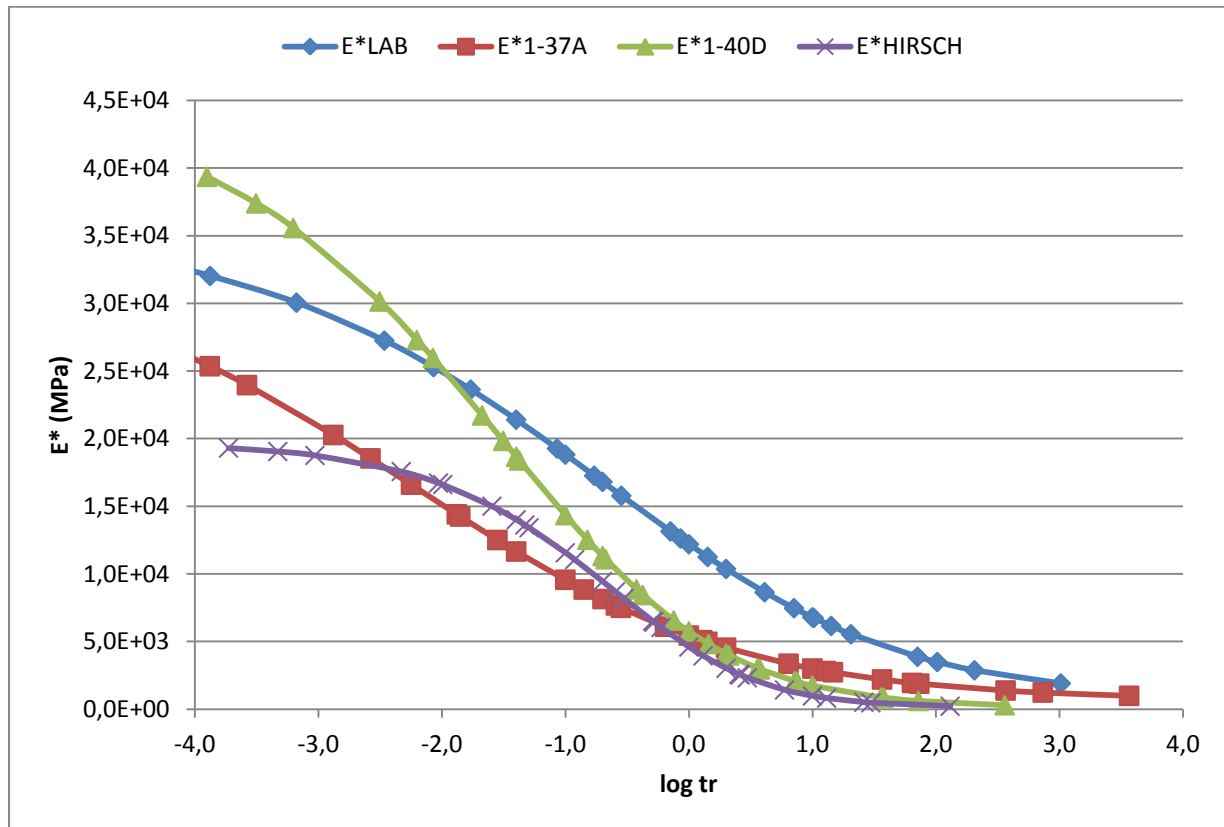
Όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.4 ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας ( $E^*$ ) για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε μέσω εργαστηριακών δοκιμών και των αλγορίθμων πρόβλεψης Witczak 1-37A, Witczak 1-40D και Hirsch. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που προέκυψαν κατασκευάστηκαν οι κεντρικές καμπύλες για κάθε δοκίμιο χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας χρόνου-θερμοκρασίας, με θερμοκρασία αναφοράς τους 20 °C.

Όσον αφορά στους παράγοντες μετατόπισης, όπως ήταν αναμενόμενο, για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας αναφοράς (20°C), οι τιμές των παραγόντων μετατόπισης είναι αρνητικές (μετατόπιση προς τα αριστερά), ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας αναφοράς, οι τιμές τους είναι θετικές (μετατόπιση προς τα δεξιά). Τέλος, η μετατόπιση στη θερμοκρασία αναφοράς είναι μηδενική.

Οι κεντρικές καμπύλες προέκυψαν μέσω της ταυτόχρονης επίλυσης των εξισώσεων 3.10 και 3.11, δηλαδή του προσδιορισμού των συντελεστών της σιγμοειδούς καμπύλης ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ) και των συντελεστών του πολυωνύμου ( $a, b, c$ ) των παραγόντων μετατόπισης. Η ταυτόχρονη

επίλυση των παραπάνω επτά παραμέτρων έγινε με την εφαρμογή Solver του Excel. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες που προκύπτουν από τα εργαστηριακά αποτελέσματα του  $E^*$  ( $E^*_{LAB}$ ), από τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Witczak 1-37A ( $E^*_{1-37A}$ ), από τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Witczak 1-40D ( $E^*_{1-40D}$ ) και από τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Hirsch ( $E^*_{HIRSCH}$ ), για κάθε δοκίμιο.

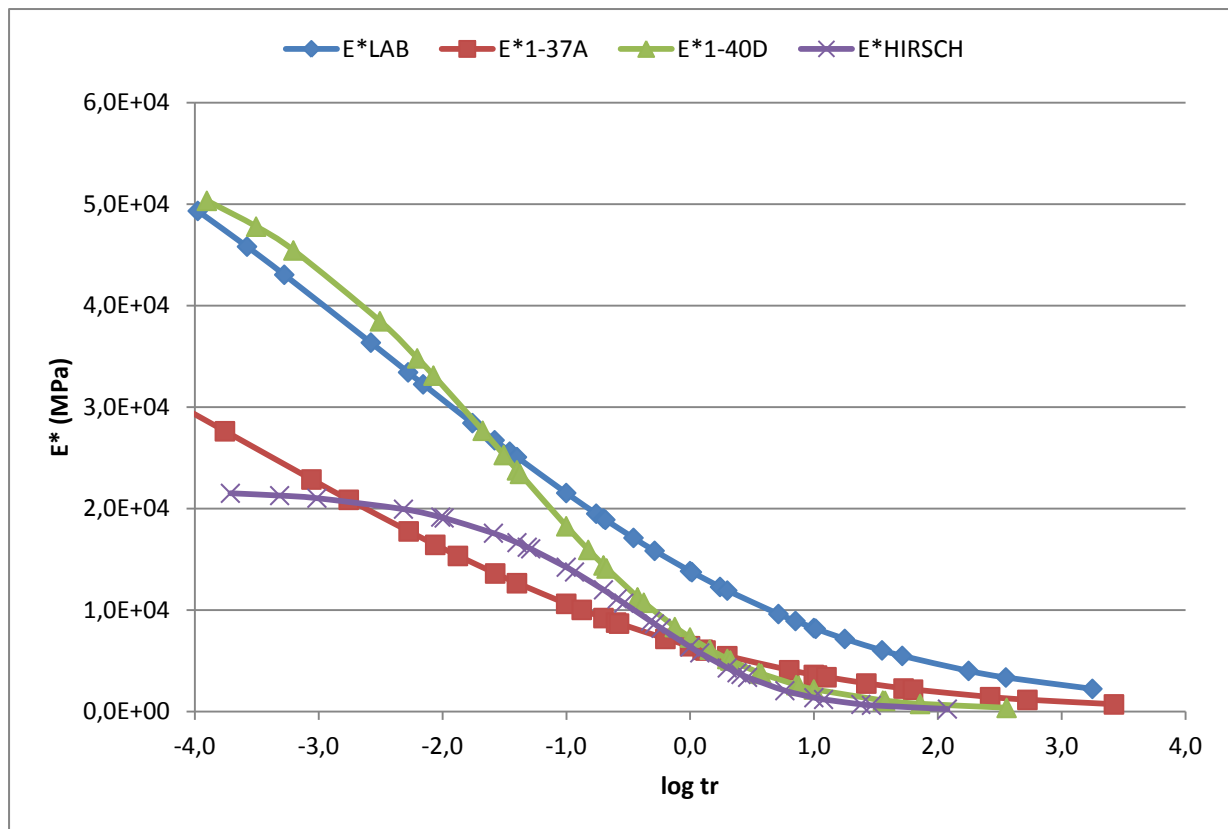
Στο σχήμα 5.1 απεικονίζονται οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.1: Κεντρικές καμπύλες  $E^*$  για το δοκίμιο T2

Οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch υποεκτιμούν την τιμή του  $E^*$ , σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για όλες τις συνθήκες φόρτισης. Αντιθέτως, η συμπεριφορά του αλγόριθμου Witczak 1-40D δεν παρουσιάζει ενιαία τάση και εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, για τιμές του  $\log t_r$  μικρότερες του -1.8 ο υπόψη αλγόριθμος υπερεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά, ενώ για τιμές του  $\log t_r$  μεγαλύτερες του -1.8 την υποεκτιμά. Η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{1-37A}$  έχει την ίδια μορφή και είναι σχεδόν παράλληλη με την κεντρική καμπύλη των εργαστηριακών αποτελεσμάτων για τιμές  $\log t_r$  από -3.0 έως 0.8. Επίσης για θετικές τιμές του  $\log t_r$  (θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 20°C) όλες οι κεντρικές καμπύλες παρουσιάζουν την ίδια μορφή.

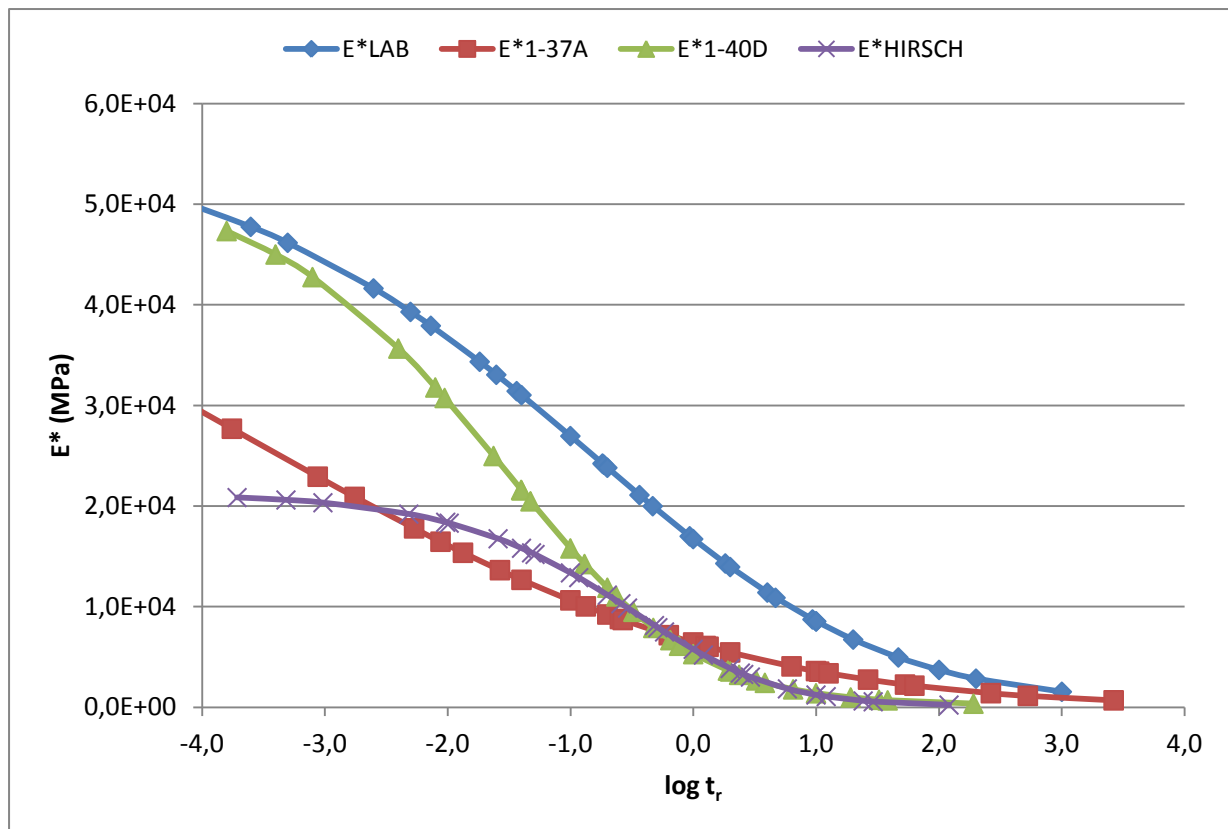
Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.2: Κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T6

Οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch υποεκτιμούν την τιμή του  $E^*$ , σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για όλες τις συνθήκες φόρτισης. Αντίθετα ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υπερεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για τιμές του  $\log t_r$  που κυμαίνονται από -4.0 έως -1.5. Για τιμές του  $\log t_r$  μεγαλύτερες από -1,5 ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υποεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{1-37A}$  έχει την ίδια μορφή με την κεντρική καμπύλη του  $E^*_{Lab}$  και για θετικές τιμές του  $\log t_r$  (θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 20°C) το ίδιο ισχύει μεταξύ των κεντρικών καμπυλών του  $E^*_{Hirsch}$  και του  $E^*_{1-40D}$ .

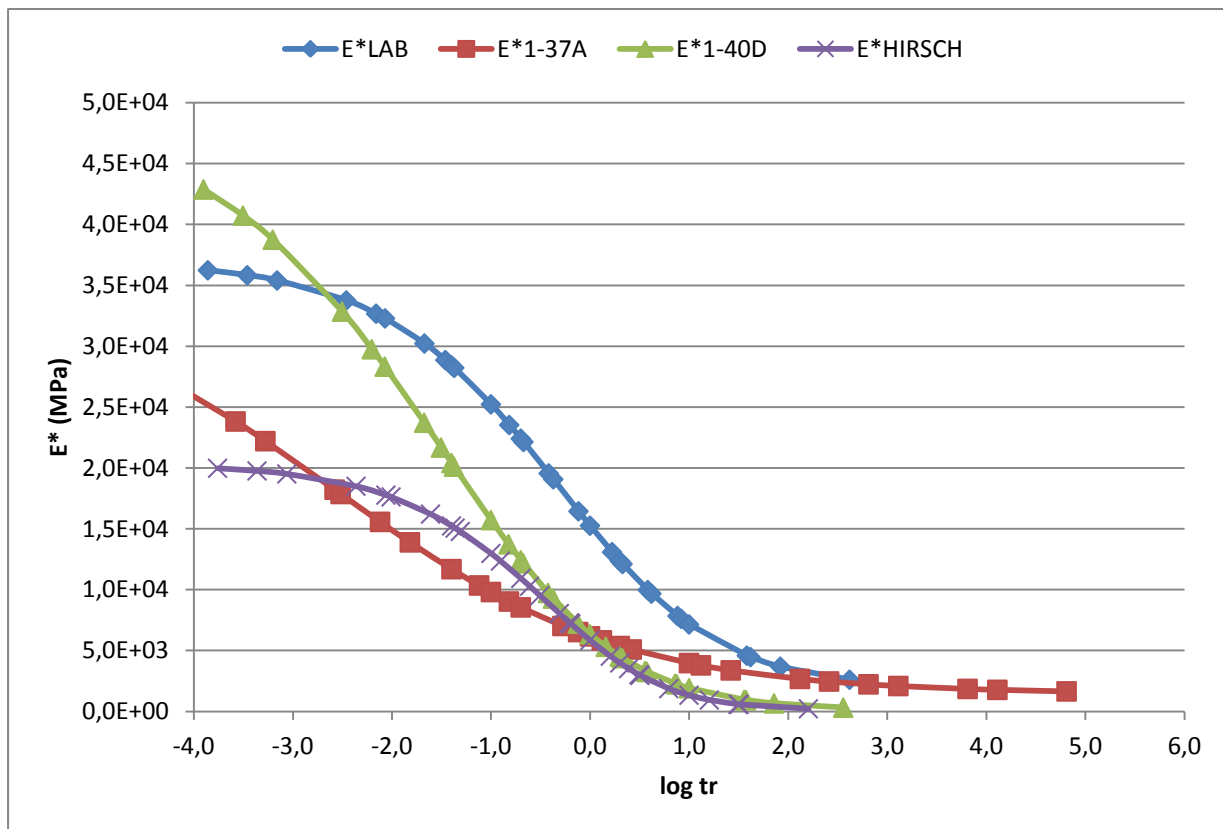
Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.3: Κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T7

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι όλοι οι αλγόριθμοι υποεκτιμούν την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για όλες τις συνθήκες φόρτισης. Για τιμές του  $\log t_r$  μεγαλύτερες του  $-0.5$ , η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{1-37A}$  έχει την ίδια μορφή με την κεντρική καμπύλη του  $E^*_{Lab}$  και η κεντρική καμπύλη  $E^*_{Hirsch}$  έχει την ίδια μορφή με την κεντρική καμπύλη του  $E^*_{1-40D}$ . Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για τιμές του  $\log t_r$  μικρότερες από  $-2.5$ . Για θετικές τιμές του  $\log t_r$  (θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $20^\circ\text{C}$ ) η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{Hirsch}$  και του  $E^*_{1-40D}$  σχεδόν ταυτίζονται.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζονται οι κεντρικές καμπύλες που προέκυψαν για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 5.4: Κεντρικές καμπύλες για το δοκίμιο T8

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch υποεκτιμούν την τιμή του  $E^*$ , σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για όλες τις συνθήκες φόρτισης. Για θετικές τιμές του  $\log t_r$  (θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $20^\circ\text{C}$ ) η κεντρική καμπύλη του  $E^*_{\text{Hirsch}}$  έχει την ίδια μορφή και σχεδόν ταυτίζεται με την κεντρική καμπύλη του  $E^*_{1-40D}$ . Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D παρουσιάζει απότομη κλίση για αρνητικές τιμές του  $\log t_r$  και υπερεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για τιμές του  $\log t_r$  μικρότερες από  $-2.5$ , ενώ το υποεκτιμά για μικρότερες τιμές του  $\log t_r$ .

Συνοψίζοντας, από τη συγκριτική αξιολόγηση των κεντρικών καμπυλών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Σε κάθε περίπτωση, οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του Witczak 1-37A και του Hirsch υποεκτιμούν τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, για όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι περισσότερο αισθητές για θετικές τιμές του λογαρίθμου του μειωμένου χρόνου φόρτισης, δηλαδή για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $20^\circ\text{C}$ . Όσον αφορά στον αλγόριθμο Witczak 1-40D, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η συμπεριφορά του δεν παρουσιάζει ενιαία τάση, με αποτέλεσμα είτε να υποεκτιμά είτε να υπερεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης. Σε γενικές γραμμές για τιμές του  $\log t_r$



μεγαλύτερες από -1,5 (δηλαδή για θερμοκρασία ίση ή μεγαλύτερη της θερμοκρασίας αναφοράς των 20 °C), ο υπόψη αλγόριθμος υποεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Αντιθέτως, για μικρότερες τιμές του  $\log t_r$  (και επομένως για θερμοκρασία μικρότερη των 20 °C) ο αλγόριθμος Witczak 1-40D τείνει να υπερεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Εξαιρεση αποτελεί το δοκίμιο T7 όπου ο αλγόριθμος Witczak 1-40D, όπως και οι άλλοι, υποεκτιμά την τιμή του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα για όλες τις συνθήκες φόρτισης. Τέλος, για θετικές τιμές του  $\log t_r$  (θερμοκρασία μεγαλύτερη των 20 °C) όλες οι κεντρικές καμπύλες έχουν την ίδια μορφή.

### 5.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα αλγορίθμων πρόβλεψης του $E^*$

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του  $E^*$ , προσδιορίστηκαν τα ποσοστιαία σχετικά σφάλματα για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες φόρτισης λαμβάνοντας ως αναφορά το εργαστηριακό δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας.

Το ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς  $\Delta E$  προς τη τιμή του εργαστηριακού δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\% = \frac{\Delta E}{E^*_{lab}} * 100 = \frac{E^*_{lab} - E^*_{αλγοριθμου}}{E^*_{lab}} * 100$$

Όπου:

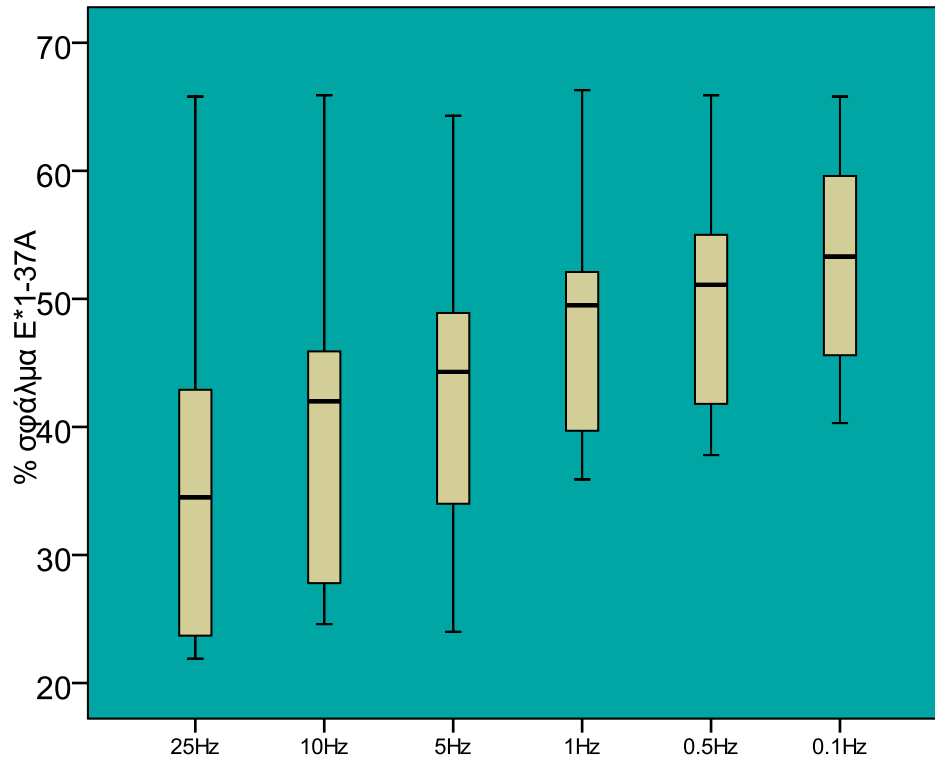
$E^*_{lab}$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές

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

Η απεικόνιση των ποσοστιαίων σφαλμάτων πραγματοποιείται μέσω θηκογραμμάτων (boxplots). Το ορθογώνιο (θήκη) παριστάνει το ενδιάμεσο 50% των τιμών. Η ανώτερη γραμμή της θήκης υποδεικνύει το 75% των τιμών ενώ η κατώτερη το 25% των τιμών. Το εύρος των δύο μεσαίων τεταρτημορίων ορίζει το ενδοτεταρτημοριακό εύρος. Η γραμμή στο εσωτερικό της θήκης υποδεικνύει την τιμή της διαμέσου. Δύο ευθύγραμμα τμήματα συνδέουν τη θήκη με τη μέγιστη (μορφή κανονικού T) και με την ελάχιστη τιμή (μορφή ανεστραμμένου T). Στην περίπτωση εμφάνισης ακραίων τιμών (μικροί μαύροι κύκλοι) τότε τα ευθύγραμμα αυτά τμήματα εκτείνονται το μέγιστο μέχρι 1,5 φορές το ενδοτεταρτημοριακό εύρος.

### 5.2.2.1 Αλγόριθμος Witczak 1-37A

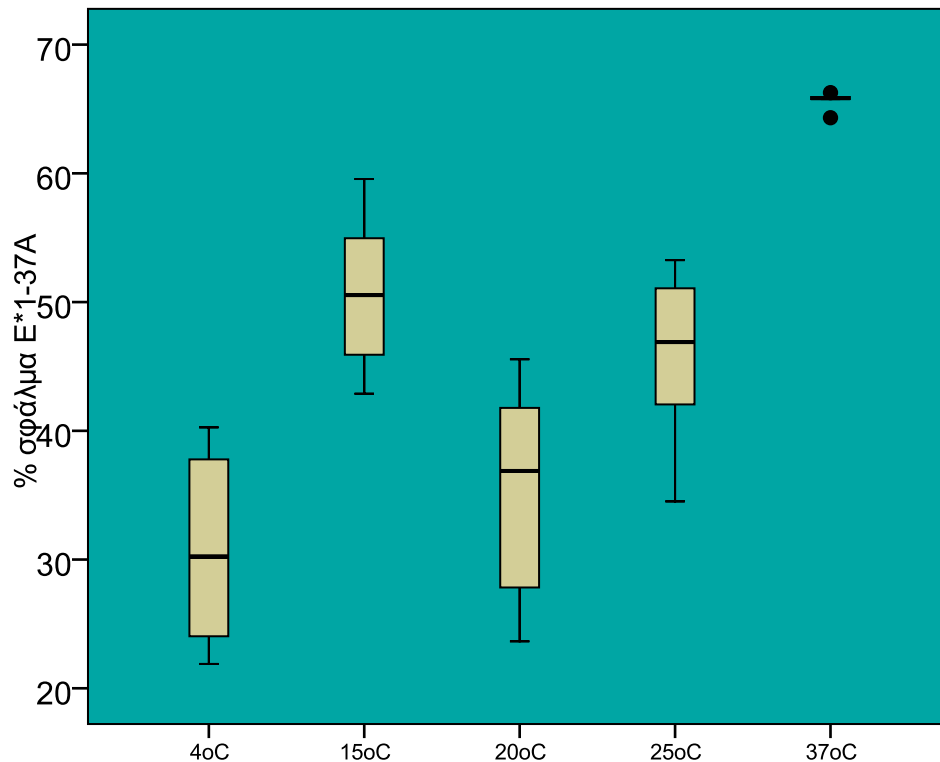
Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.5: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά συχνότητα, δοκίμιο T2

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα το εύρος των σφαλμάτων στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με τις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz. Πιο συγκεκριμένα στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz οι τιμές των σφαλμάτων κυμαίνονται από 20-70% περίπου (δηλαδή το εύρος των τιμών είναι της τάξης του 50%), ενώ στις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι της τάξεως του 30%. Η θέση της διαμέσου στις συχνότητες των 10, 5, 1 και 0.5 Hz υποδεικνύει την ασυμμετρία των δεδομένων καθώς και τη συγκέντρωση τους προς τις ανώτερες τιμές. Αντιθέτως, στις συχνότητες των 25 και 0.1 Hz η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση και την τιμή της διαμέσου διαφαίνεται ότι όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα φόρτισης τόσο μεγαλύτερα είναι τα ποσοστιαία σφάλματα που παρατηρούνται.

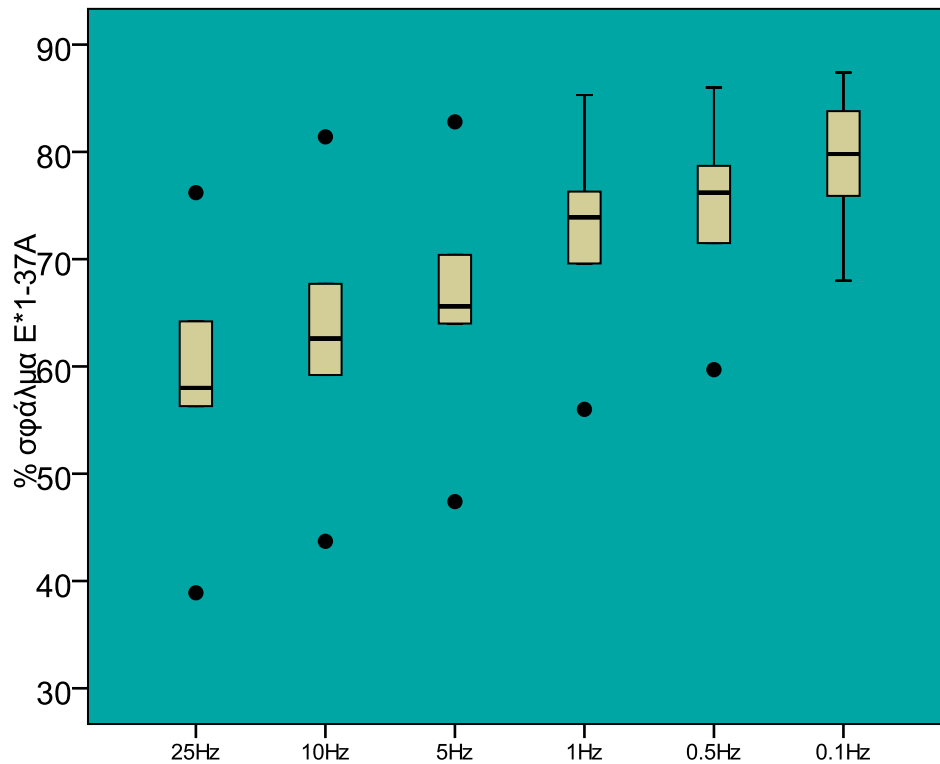
Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witzak 1-37A σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.6: Ποσοστιαία σφάλματα του Witzak 1-37A ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T2

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα στη θερμοκρασία των 37°C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι συγκεντρωμένα στο 65%. Τα μικρότερα σφάλματα αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες των 4 και 20 °C και κυμαίνονται από 20% έως 45% περίπου. Το μεγαλύτερο εύρος σφαλμάτων παρατηρείται στη θερμοκρασία των 20 °C. Τα δεδομένα θεωρούνται συμμετρικά στις θερμοκρασίες των 15 και 25 °C. Η θέση της διαμέσου στους 4 °C υποδεικνύει την ασυμμετρία των στοιχείων και τη συγκέντρωση των τιμών σε χαμηλότερα ποσοστά ενώ στους 20 °C τη συγκέντρωση των τιμών σε υψηλότερα ποσοστά.

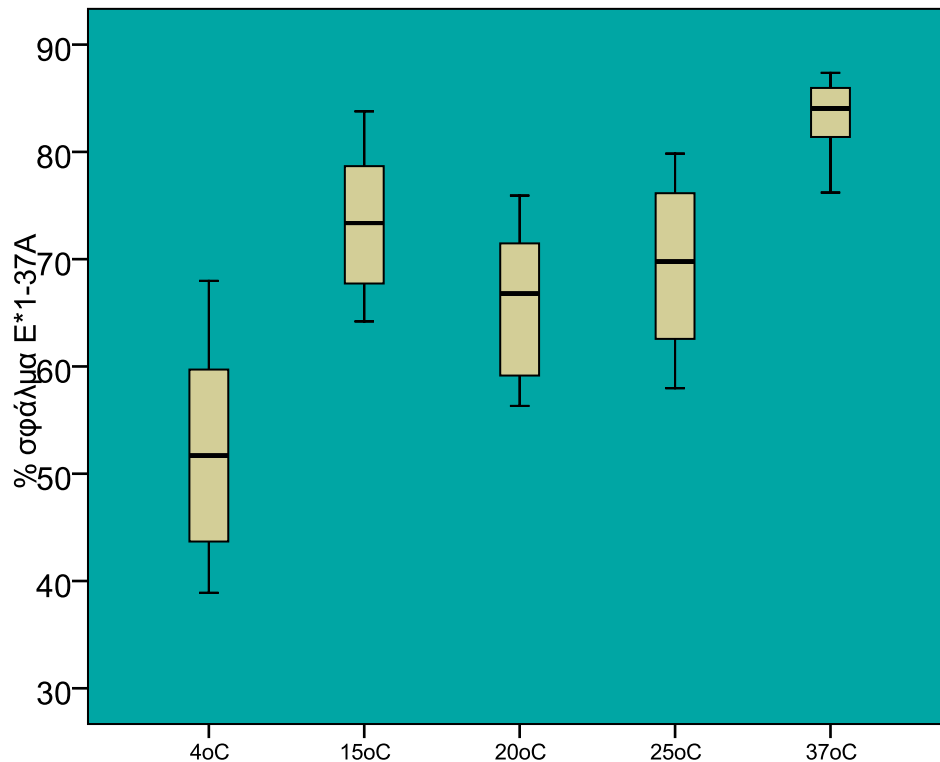
Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.7: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά συχνότητα, δοκίμιο T6

Στις συχνότητες των 0.1, 0.5 και 1 Hz τα ποσοστιαία σφάλματα συγκεντρώνονται σε τιμές της τάξης του 70% και άνω. Καθώς η συχνότητα φόρτισης αυξάνεται, παρατηρείται μείωση του σφάλματος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 55% και 70%. Σε όλες τις συχνότητες φόρτισης το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων παραμένει σχετικά σταθερό ενώ παρατηρείται μία σταδιακή κλιμάκωση των άνω και κάτω ακραίων τιμών όσο μειώνεται η συχνότητα φόρτισης. Στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz παρατηρούνται ακραίες άνω και κάτω τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα ενώ στις συχνότητες 1 και 0.5 Hz παρατηρούνται μόνο κατώτατες ακραίες τιμές. Η θέση της διαμέσου στη συχνότητα 0.1 Hz υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συχνότητες.

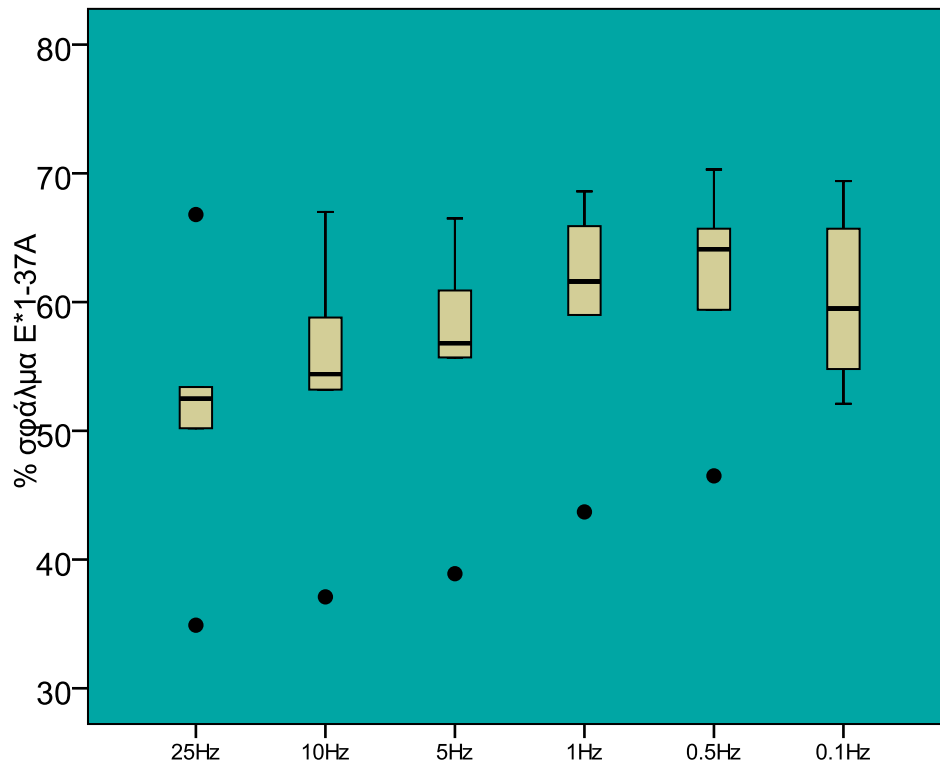
Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witzak 1-37A σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.8: Ποσοστιαία σφάλματα του Witzak 1-37A ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T6

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα συγκεντρώνονται σε τιμές μεγαλύτερες από 75%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) τα ποσοστιαία σφάλματα κυμαίνονται από 55% έως 85%, ενώ στους 4 °C κυμαίνονται μεταξύ 40% και 70%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται παρατηρείται τάση μείωσης του εύρους των ποσοστιαίων σφαλμάτων, ενώ παράλληλα παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές σφαλμάτων. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες, με εξαίρεση αυτή των 20 °C.

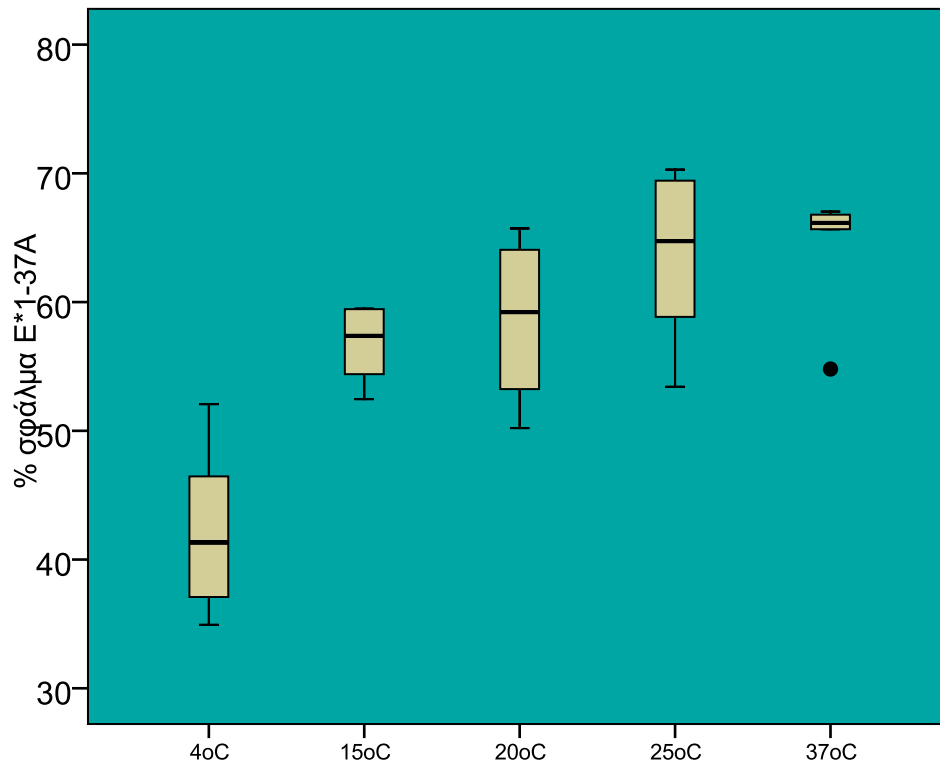
Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.9: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά συχνότητα, δοκίμιο T7

Στις συχνότητες των 25, 10, 5, 1 και 0.5 Hz παρατηρούνται ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Τα ποσοστιαία σφάλματα σε όλες τις συχνότητες κυμαίνονται από 50% έως 70%. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, καθώς η συχνότητα μειώνεται τα σφάλματα βαθμιαία αυξάνονται με εξαίρεση τη συχνότητα των 0.1Hz. Γενικά η τιμή της διαμέσου κυμαίνεται από 55% έως 65%, με τη μικρότερη να αντιστοιχεί στη συχνότητα των 25Hz και τη μεγαλύτερη στη συχνότητα των 0.5Hz. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

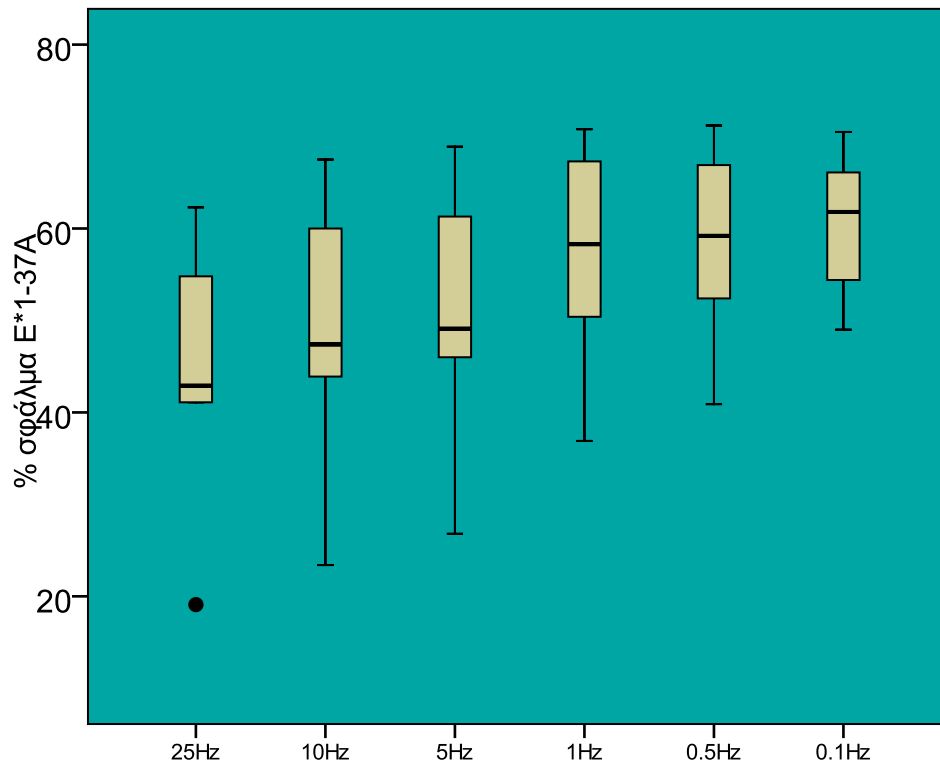
Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.10: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T7

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα συγκεντρώνονται γύρω από το 65%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες 15, 20 και 25 °C τα ποσοστιαία σφάλματα κυμαίνονται από 50% έως 70%, ενώ στους 4 °C κυμαίνονται από 35 έως 55%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το εύρος των ποσοσטיών σφαλμάτων μειώνεται αρχικά από 20 (4 °C) σε 8 ποσοστιαίες μονάδες στη θερμοκρασία των 15 °C ενώ στη συνέχεια αυξάνεται πάλι έως τις 20 μονάδες (25 °C). Επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση των ποσοσטיών σφαλμάτων. Σε όλες τις θερμοκρασίες η διάμεσος βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και επομένως τα δεδομένα θεωρούνται συμμετρικά.

Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T8.

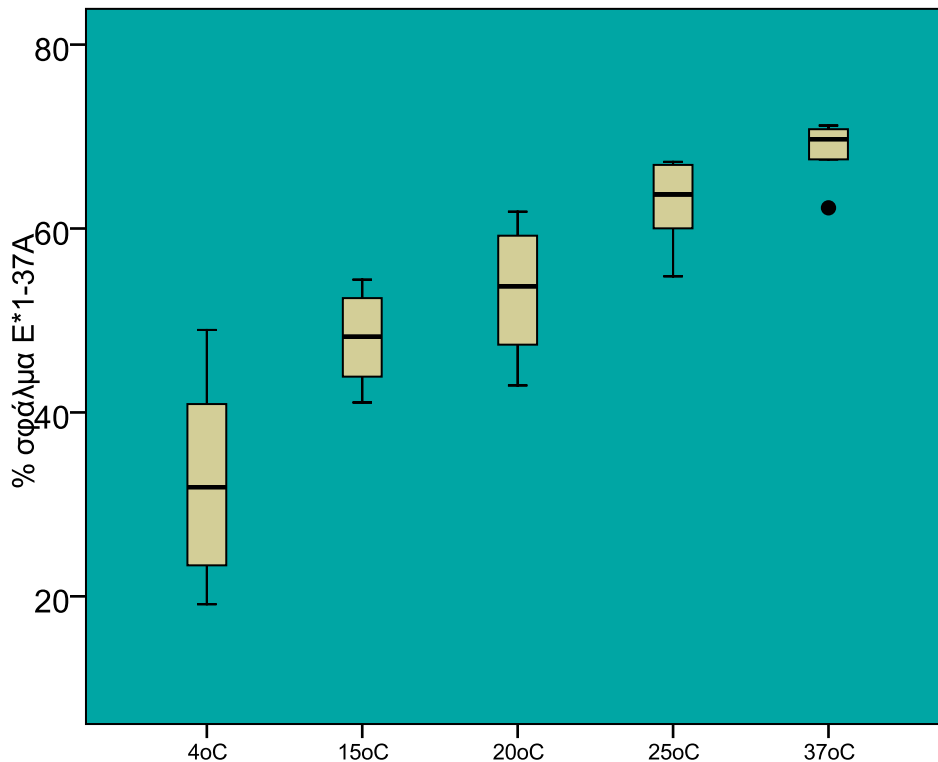


Σχήμα 5.11: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά συχνότητα, δοκίμιο T8

Στις συχνότητες των 10 και 5 Hz το εύρος των σφαλμάτων είναι της τάξεως των 40 ποσοστιαίων μονάδων. Στις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz παρατηρείται μικρότερο εύρος της τάξεως του 20% με 25%. Η θέση της διαμέσου στις συχνότητες των 25, 10, και 5 Hz είναι αισθητά μετατοπισμένη προς το κάτω μέρος του ενδοτεταρτημοριακού εύρους το οποίο υποδεικνύει την ασυμμετρία των δεδομένων και τη συγκέντρωσή τους προς μικρότερες τιμές. Αντιθέτως, στη συχνότητα των 0.1 Hz υποδεικνύει την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων, ενώ στις συχνότητες των 1 και 0.5 Hz η θέση της διαμέσου στο κέντρο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων.



Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T8.

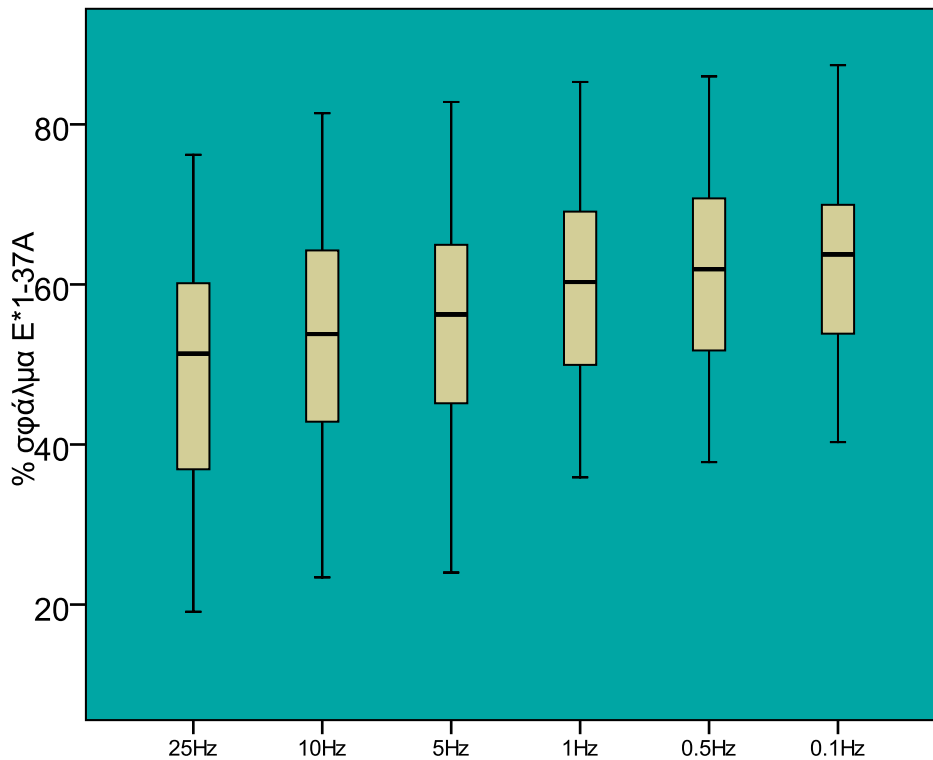


Σχήμα 5.12: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T8

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα συγκεντρώνονται γύρω από το 70%. Το μεγαλύτερο εύρος σφαλμάτων αντιστοιχεί στη θερμοκρασία των 4 °C. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση τόσο των ελάχιστων και μέγιστων τιμών όσο και της διαμέσου των ποσοστιαίων σφαλμάτων. Σε όλες τις θερμοκρασίες η διάμεσος βρίσκεται κατά προσέγγιση στο κέντρο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους υποδεικνύοντας τη συμμετρία των δεδομένων. Εξαιρέση αποτελεί η θερμοκρασία των 37 °C όπου η διάμεσος είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα πάνω.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι όσον αφορά στα δοκίμια T6 και T7 (τα οποία έχουν το χαμηλότερο ποσοστό κενών, 2.70% και 4.10% αντίστοιχα) παρατηρούνται μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα με παράλληλα μικρότερο εύρος τιμών συγκριτικά με τα δοκίμια T2 και T8, για όλο το εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

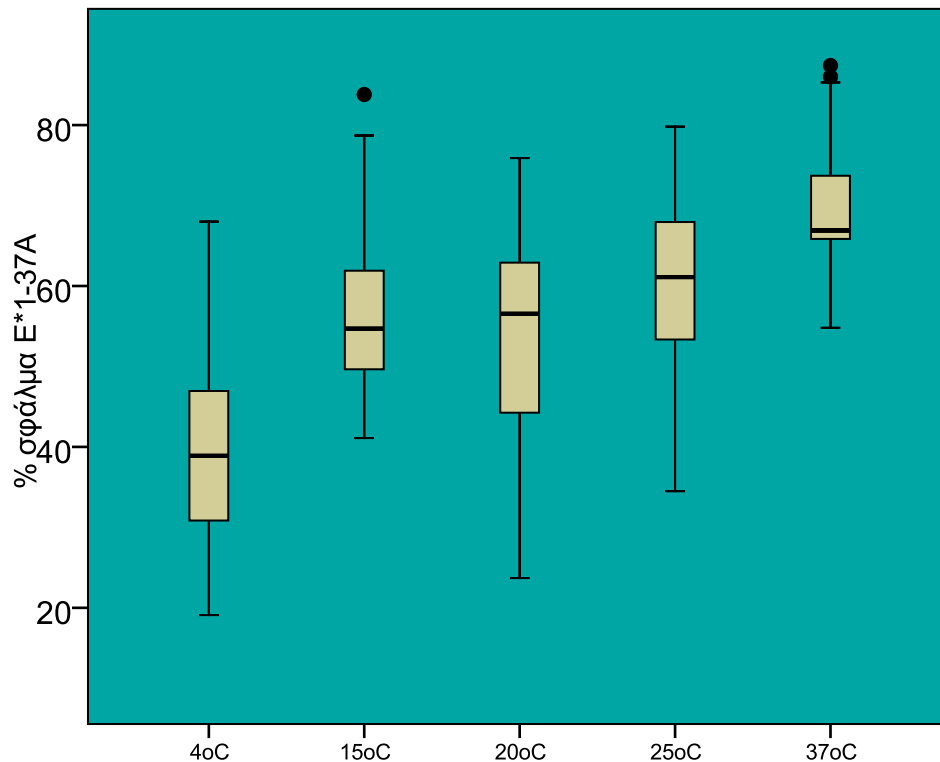
Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



Σχήμα 5.13: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά συχνότητα, σύνολο δοκιμών

Στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με εκείνο στις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz. Πιο συγκεκριμένα στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz το εύρος είναι της τάξεως των 60 ποσοστιαίων μονάδων ενώ στις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz το εύρος είναι της τάξεως του 50%. Η θέση της διαμέσου σε όλες τις συχνότητες βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Τέλος, μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου, καθώς η συχνότητα φόρτισης μειώνεται.

Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-37A σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

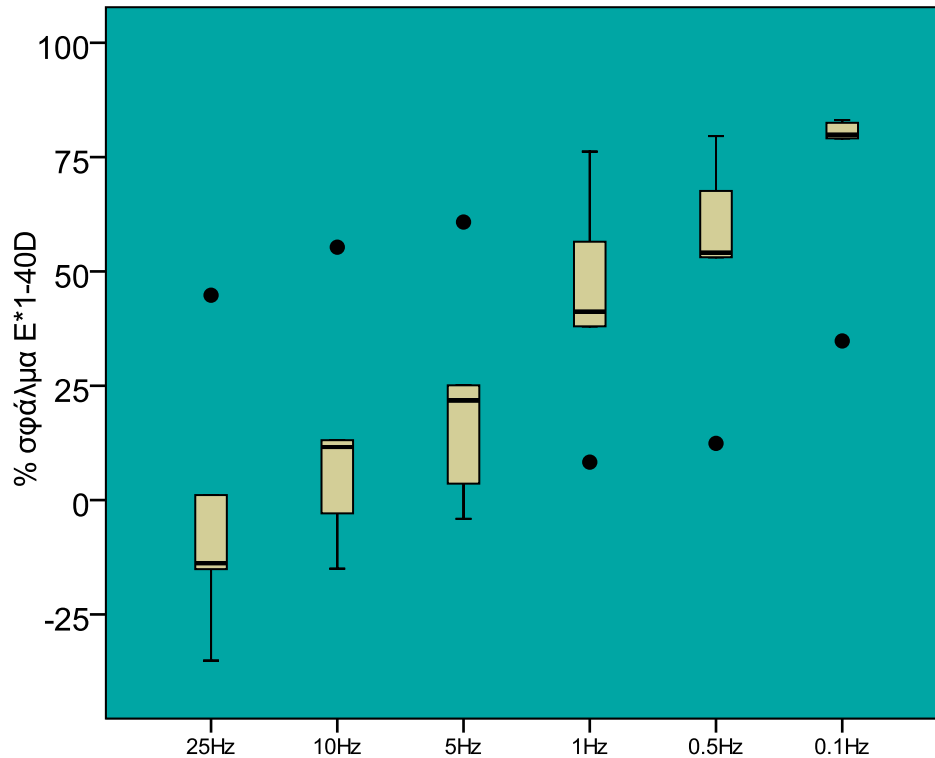


Σχήμα 5.14: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-37A ανά θερμοκρασία, σύνολο δοκιμών

Στη θερμοκρασία των 37 °C το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι μικρότερο συγκριτικά με τις άλλες θερμοκρασίες (περίπου 30 ποσοστιαίες μονάδες), ενώ παράλληλα οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των σφαλμάτων είναι μεγαλύτερες. Επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοστιαίων σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου. Στις θερμοκρασίες των 4 και 25 °C η θέση της διαμέσου βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους υποδεικνύοντας τη συμμετρία των δεδομένων. Στους 15 °C είναι ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα κάτω, ενώ στους 20 °C ελαφρώς μετατοπισμένη προς τα πάνω. Στους 37 °C η θετική ασυμμετρία των δεδομένων εκφράζεται από την έντονη μετατόπιση της θέσης της διαμέσου προς τα κάτω.

### 5.2.2.2 Αλγόριθμος Witczak 1-40D

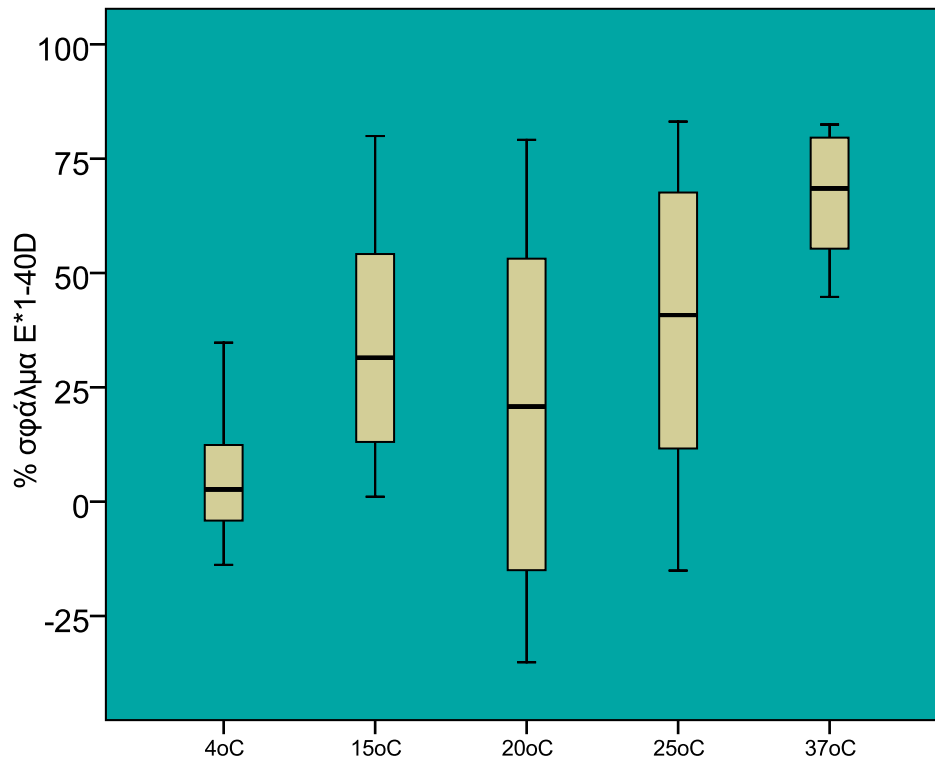
Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.15: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά συχνότητα, δοκίμιο T2

Στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz παρατηρούνται άνω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Αντίθετα στις συχνότητες των 1, 0.5 και 0.1 Hz παρατηρούνται κάτω ακραίες τιμές. Το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων με εξαίρεση τη συχνότητα των 0.1 Hz κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 ποσοστιαίων μονάδων. Στη συχνότητα των 0.1 Hz το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος είναι της τάξεως του 4%. Το σφάλμα αυξάνεται για τιμές της συχνότητας φόρτισης μικρότερες των 5 Hz ενώ στις συχνότητες των 25 και 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα κυμαίνεται από το -30% έως το 25%. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα του 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25 Hz. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

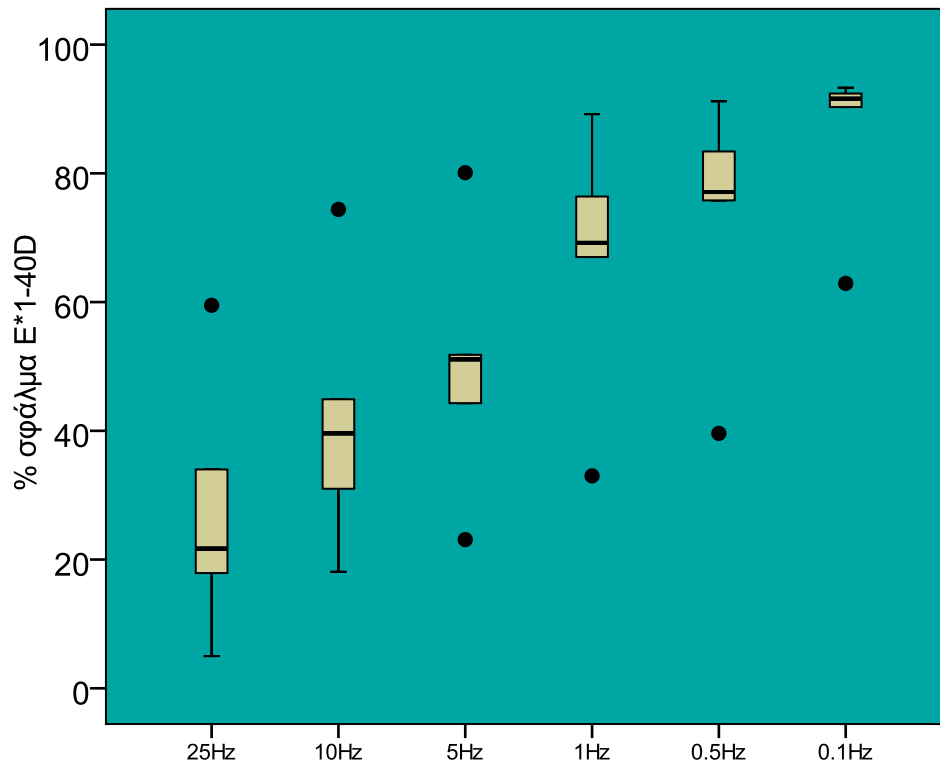
Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.16: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T2

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 50%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται πολύ μεγάλο εύρος ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 100 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C η διαφορά κυμαίνεται μεταξύ -10% και 35%. Από τα αρνητικά ποσοστά σφαλμάτων συνεπάγεται ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υπερεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Το μέγιστο εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος παρατηρείται στους 20 °C ενώ στους 4 και 37 °C είναι αρκετά μικρότερο. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

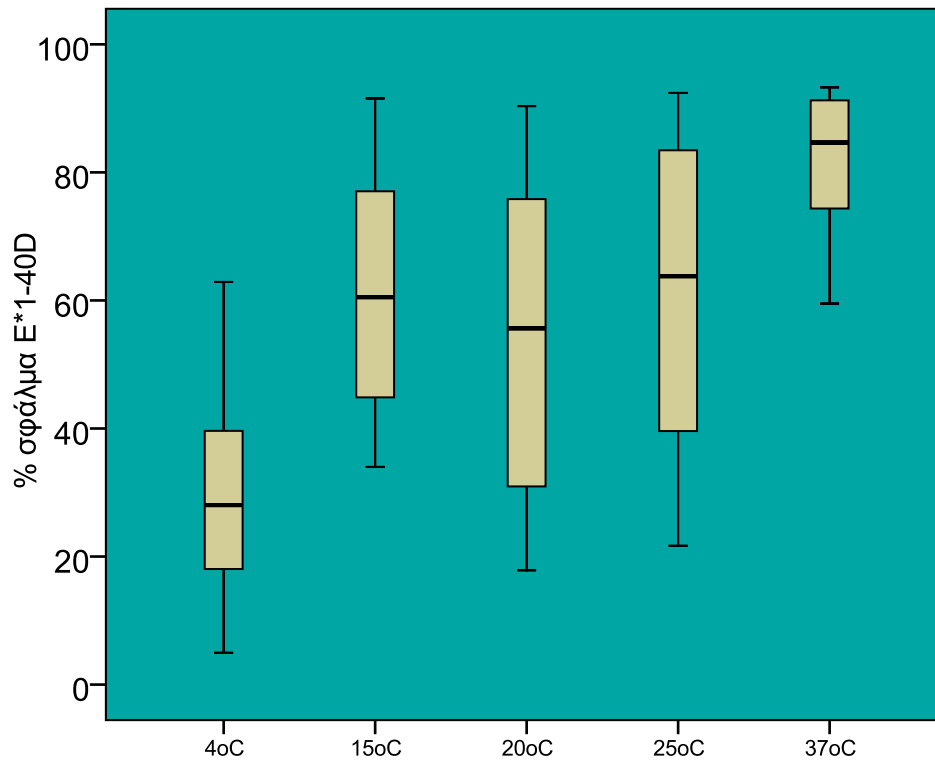
Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.17: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά συχνότητα, δοκίμιο T6

Στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz παρατηρούνται άνω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Αντίθετα στις συχνότητες των 5, 1, 0.5 και 0.1 Hz παρατηρούνται κάτω ακραίες τιμές. Το μεγαλύτερο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων παρατηρείται στις συχνότητες των 25 και 10 Hz και ισούται με 30 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, καθώς η συχνότητα μειώνεται τα σφάλματα βαθμιαία αυξάνονται από 20% σε 90%. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα των 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25Hz. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

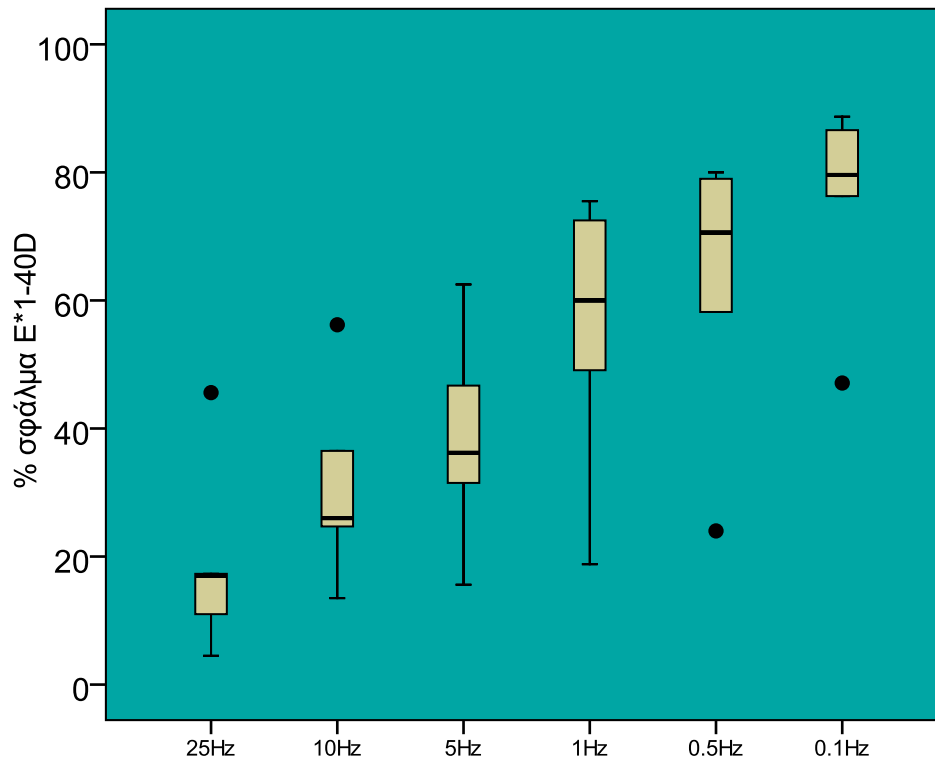
Στο σχήμα 5.18 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.18: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T6

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 60%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται πολύ μεγάλο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 70 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 και 25 °C. Στους 4 °C η διαφορά κυμαίνεται μεταξύ 10% και 60%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων αυξάνεται αρχικά από 50 σε 70 ποσοστιαίες μονάδες στη θερμοκρασία των 25 °C ενώ στη θερμοκρασία των 37°C μειώνεται σε 20 μονάδες. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T7.

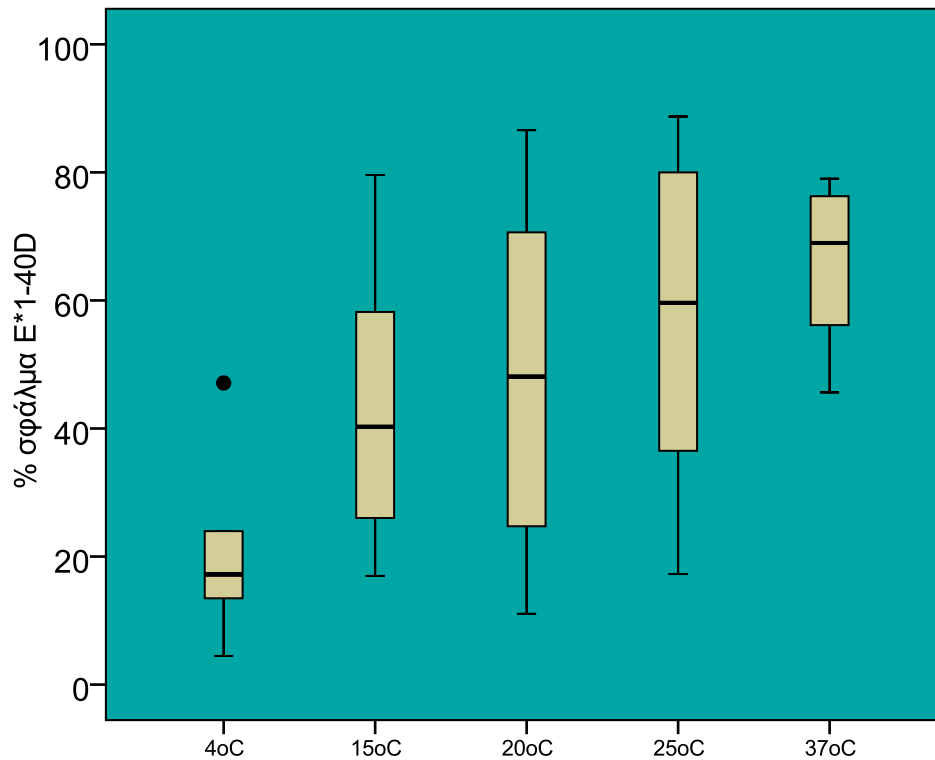


Σχήμα 5.19: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά συχνότητα, δοκίμιο T7

Στις συχνότητες των 25 και 10 Hz παρατηρούνται άνω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Αντίθετα στις συχνότητες των 0.5 και 0.1 Hz παρατηρούνται κάτω ακραίες τιμές. Το μεγαλύτερο εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος παρατηρείται στη συχνότητα του 1 Hz και ισούται με 40 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, καθώς η συχνότητα μειώνεται τα σφάλματα βαθμιαία αυξάνονται από 20% σε 80%. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα του 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25Hz. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.



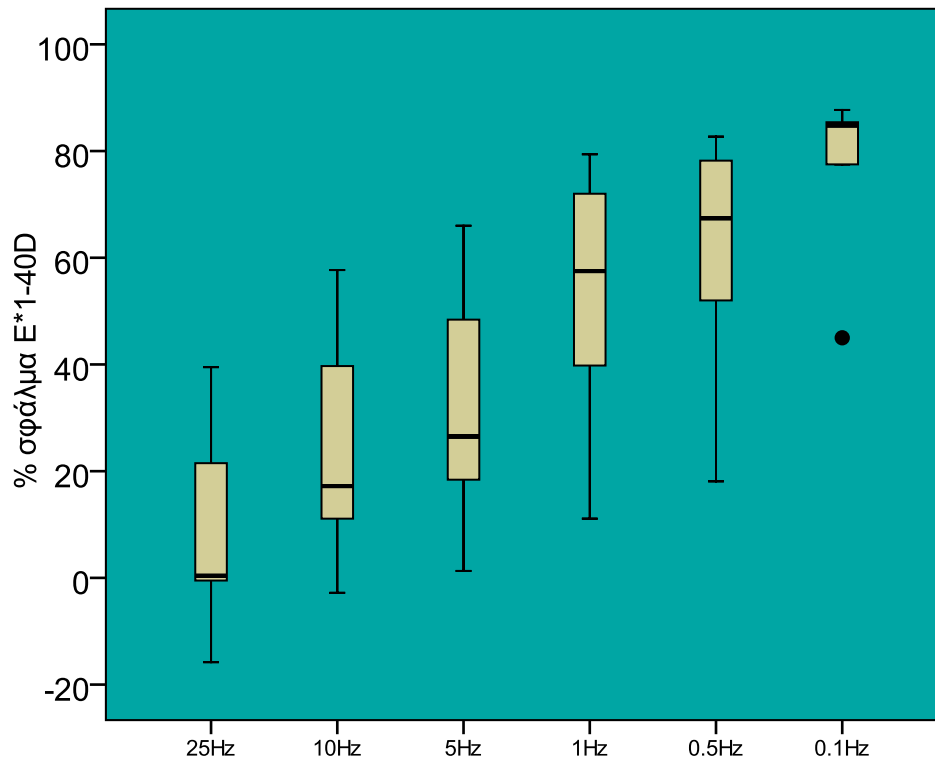
Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.20: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T7

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 50%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται πολύ μεγάλο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 70 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C η διαφορά κυμαίνεται από 10% έως 25%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων αυξάνεται αρχικά από 15 σε 70 μονάδες στη θερμοκρασία των 20 °C ενώ στη θερμοκρασία των 37°C μειώνεται σε 30 μονάδες. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες σχεδόν τις θερμοκρασίες και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

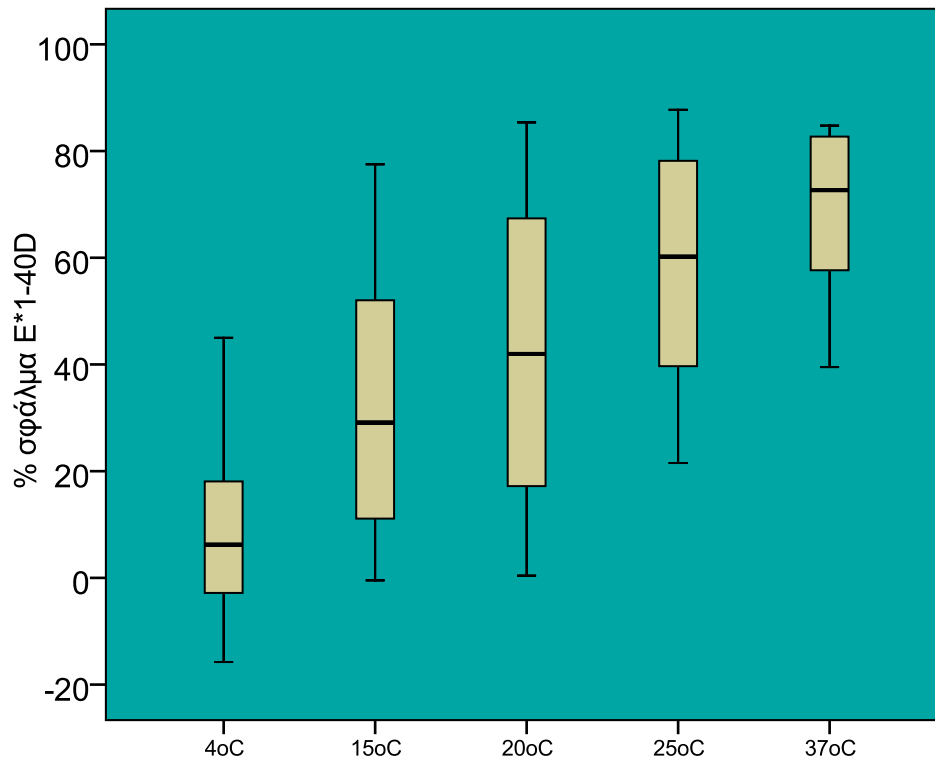
Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 5.21: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά συχνότητα, δοκίμιο T8

Στις συχνότητες των 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι της τάξεως των 60 ποσοστιαίων μονάδων ενώ για τη συχνότητα φόρτισης 0.1 Hz το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος είναι 10%. Λαμβάνοντας υπόψη την θέση της διαμέσου καθώς η συχνότητα φόρτισης αυξάνεται, παρατηρείται μείωση του σφάλματος η οποία από το 80% φτάνει στο 0% για συχνότητα φόρτισης 25Hz. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα του 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25Hz. Στη συχνότητα των 0.1 Hz παρατηρούνται κατώτατες ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T8.

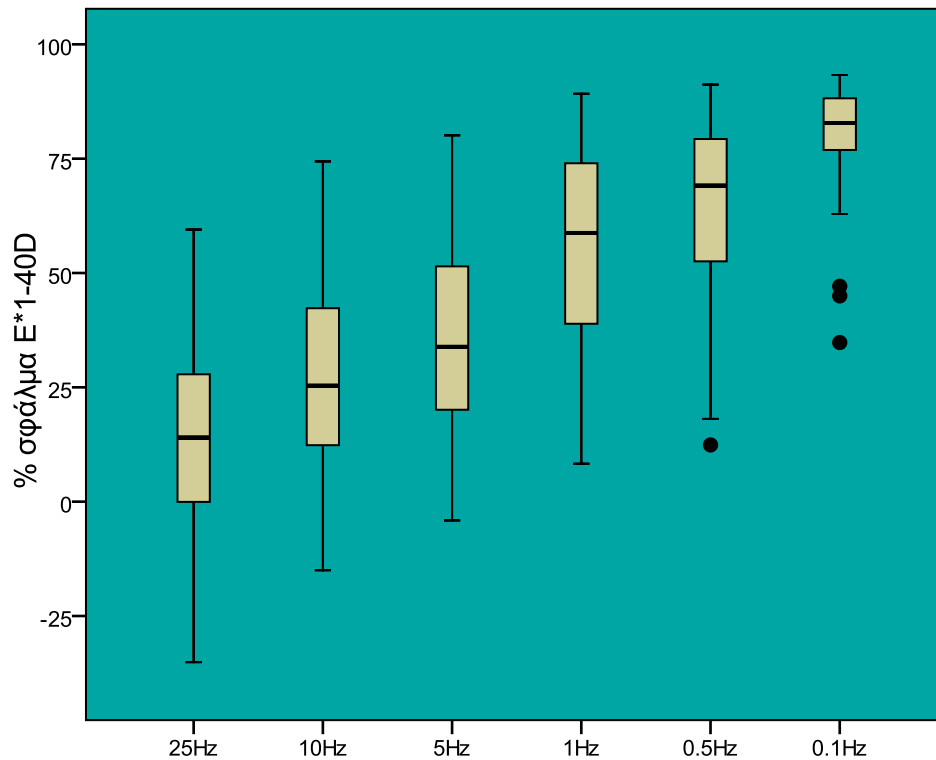


Σχήμα 5.22: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T8

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 40%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται μεγάλο εύρος ποσοσטיών σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 80 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C η διαφορά κυμαίνεται από -20% έως 40% ενώ στη θερμοκρασία των 37°C το εύρος μειώνεται σε 30 μονάδες. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες και την αύξηση του ποσοστιού σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι όσον αφορά στα δοκίμια T6 και T7 (τα οποία έχουν το χαμηλότερο ποσοστό κενών, 2.70% και 4.10% αντίστοιχα) παρατηρούνται μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα με παράλληλα μικρότερο εύρος τιμών συγκριτικά με τα δοκίμια T2 και T8, για όλο το εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

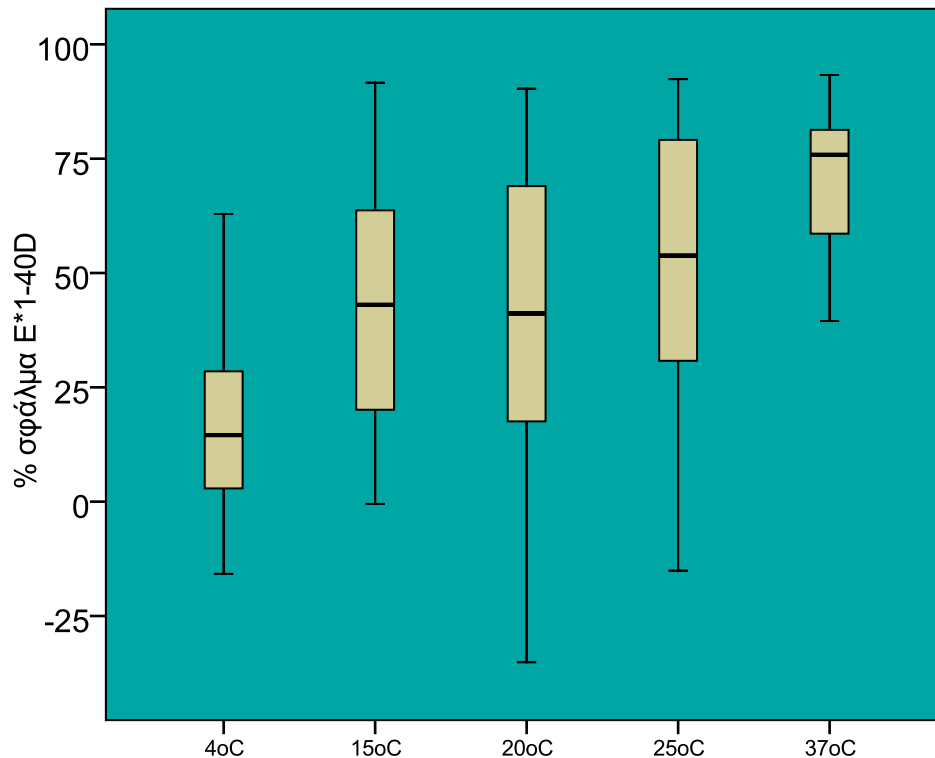
Στο σχήμα 5.23 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



Σχήμα 5.23: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά συχνότητα, σύνολο δοκιμών

Στις συχνότητες των 0.5, 1, 5, 10 και 25 Hz το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι της τάξεως των 75 ποσοστιαίων μονάδων ενώ στα 0.1 Hz μειώνεται σημαντικά σε 25 μονάδες. Η θέση της διαμέσου σε όλες τις συχνότητες βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Τέλος λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου, μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται καθώς η συχνότητα φόρτισης μειώνεται.

Στο σχήμα 5.24 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Witczak 1-40D σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

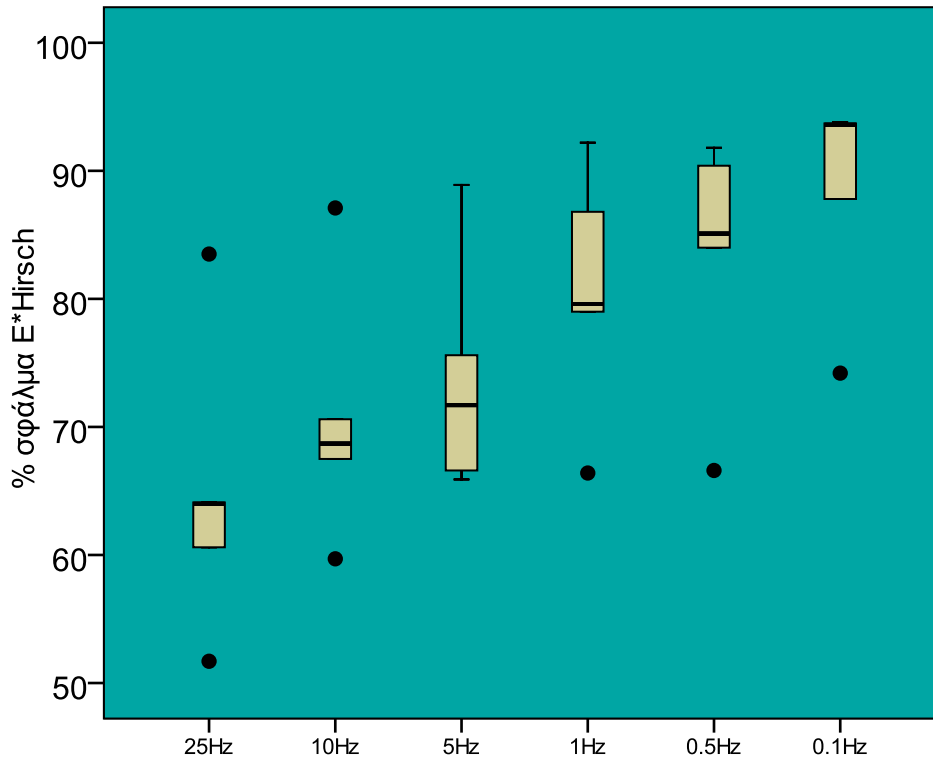


Σχήμα 5.24: Ποσοστιαία σφάλματα του Witczak 1-40D ανά θερμοκρασία, σύνολο δοκιμών

Στη θερμοκρασία των 37 °C το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων είναι μικρότερο συγκριτικά με τις άλλες θερμοκρασίες (περίπου 30 ποσοστιαίες μονάδες), ενώ παράλληλα οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των σφαλμάτων είναι μεγαλύτερες. Στους 4 °C το ποσοστιαίο σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ -15% και 65% το οποίο συνεπάγεται πως ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υπερεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Επίσης, αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των ποσοστιαίων σφαλμάτων, σύμφωνα με την τιμή της διαμέσου. Το μέγιστο εύρος παρατηρείται στους 20 °C και πλησιάζει τις 120 ποσοστιαίες μονάδες. Σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 37 °C η θέση της διαμέσου βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους υποδεικνύοντας τη συμμετρία των δεδομένων. Στους 37 °C είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών μικρότερο της διαμέσου.

### 5.2.2.3 Αλγόριθμος του Hirsch

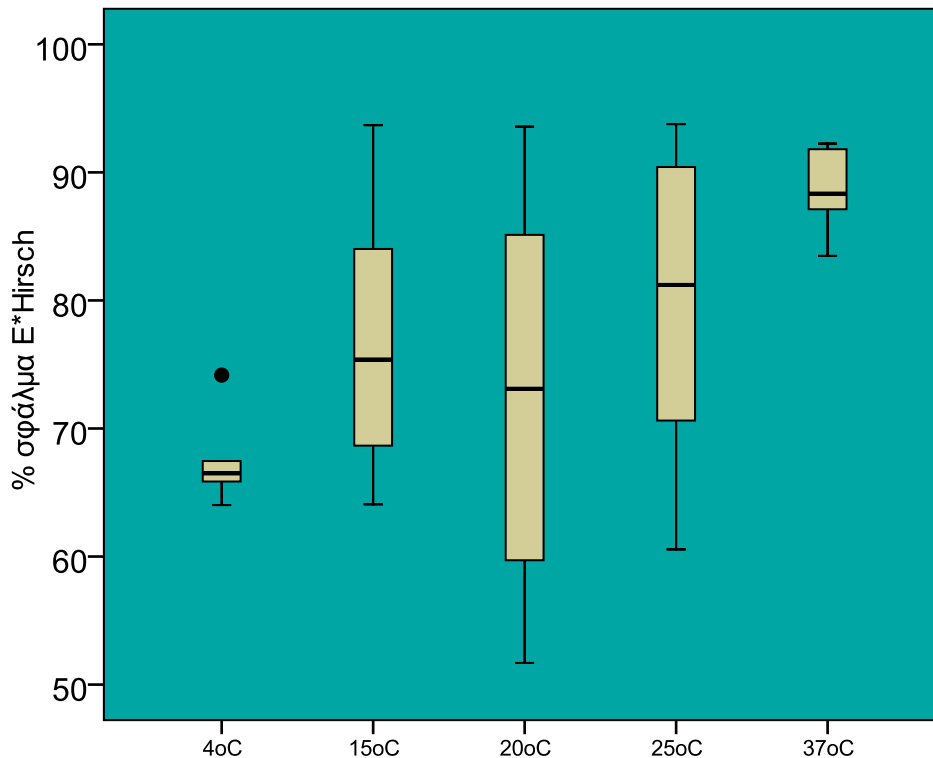
Στο σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.25: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά συχνότητα, δοκίμιο T2

Στις συχνότητες των 25, 10, 1, 0.5, 0.1 Hz παρατηρούνται κάτω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα ενώ στις συχνότητες των 25 και 10 Hz παρατηρούνται και άνω ακραίες τιμές. Το μεγαλύτερο εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος παρατηρείται στη συχνότητα των 5 Hz και ισούται με 30 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, καθώς η συχνότητα μειώνεται τα σφάλματα βαθμιαία αυξάνονται από 65% σε 95%. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα του 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25Hz. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

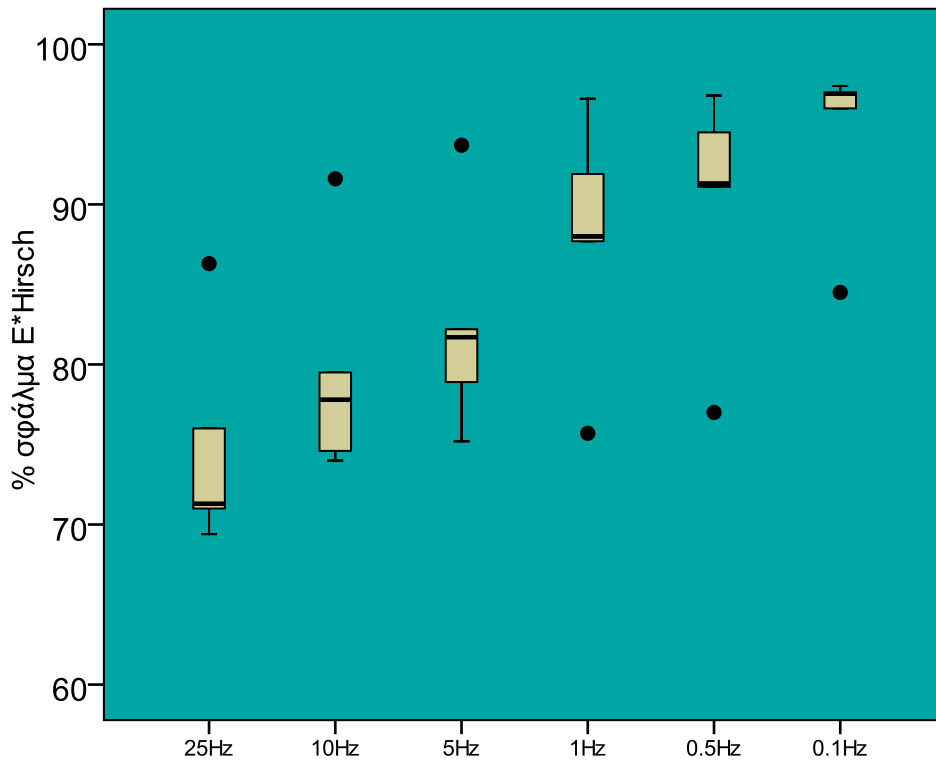
Στο σχήμα 5.26 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T2.



Σχήμα 5.26: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T2

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 85%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται μεγάλο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 40 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C το ποσοστιαίο σφάλμα είναι συγκεντρωμένο στο 65%. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 37 °C. Στους 37 °C η διάμεσος είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω το οποίο συνεπάγεται ασυμμετρία στην κατανομή των τιμών. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος.

Στο σχήμα 5.27 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T6.

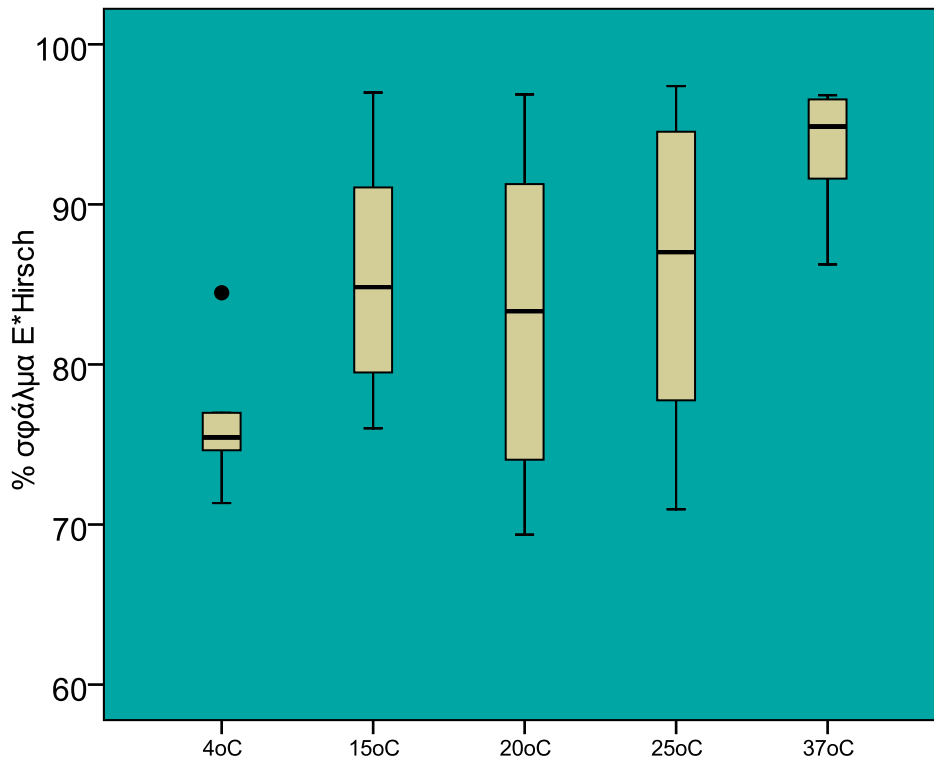


Σχήμα 5.27: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά συχνότητα, δοκίμιο T6

Στις συχνότητες των 1, 0.5, 0.1 Hz παρατηρούνται κάτω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα ενώ στις συχνότητες των 25, 10 και 5 Hz παρατηρούνται άνω ακραίες τιμές. Το μεγαλύτερο εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος παρατηρείται στις συχνότητες των 5 και 1 Hz και ισούται με 10 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, καθώς η συχνότητα μειώνεται τα σφάλματα βαθμιαία αυξάνονται από 70% σε 95%. Η μεγαλύτερη τιμή της διαμέσου παρατηρείται στη συχνότητα του 0.1 Hz ενώ η μικρότερη εμφανίζεται στα 25Hz. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.



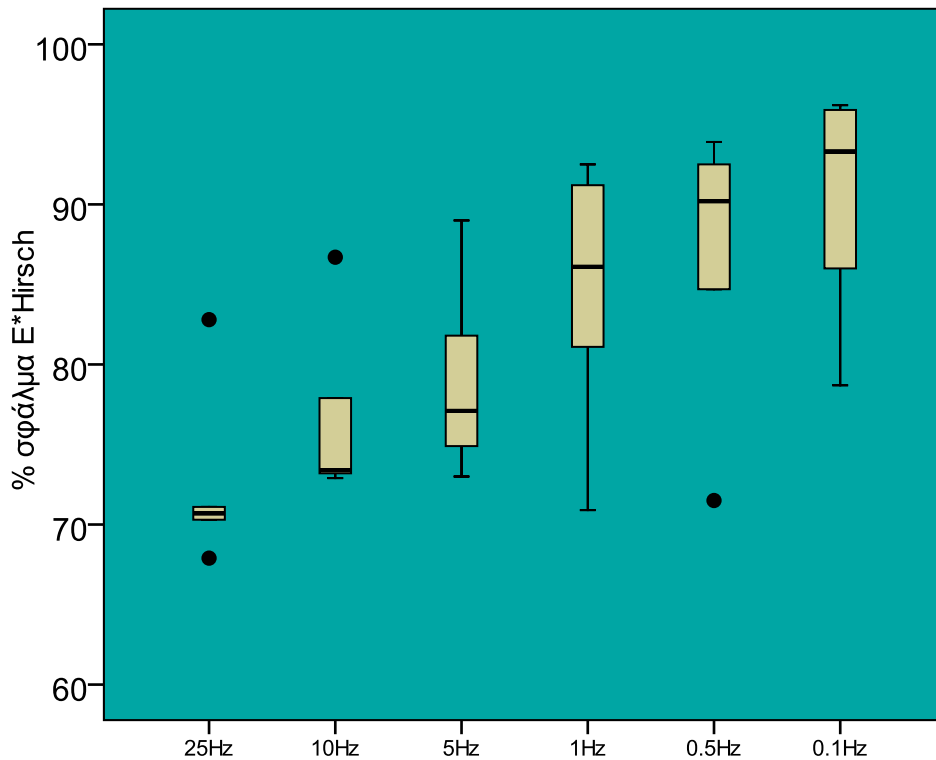
Στο σχήμα 5.28 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T6.



Σχήμα 5.28: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T6

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 85%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται συγκριτικά μεγαλύτερο εύρος ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 25 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C το ποσοστιαίο σφάλμα είναι συγκεντρωμένο στο 75% και υπάρχουν άνω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας.

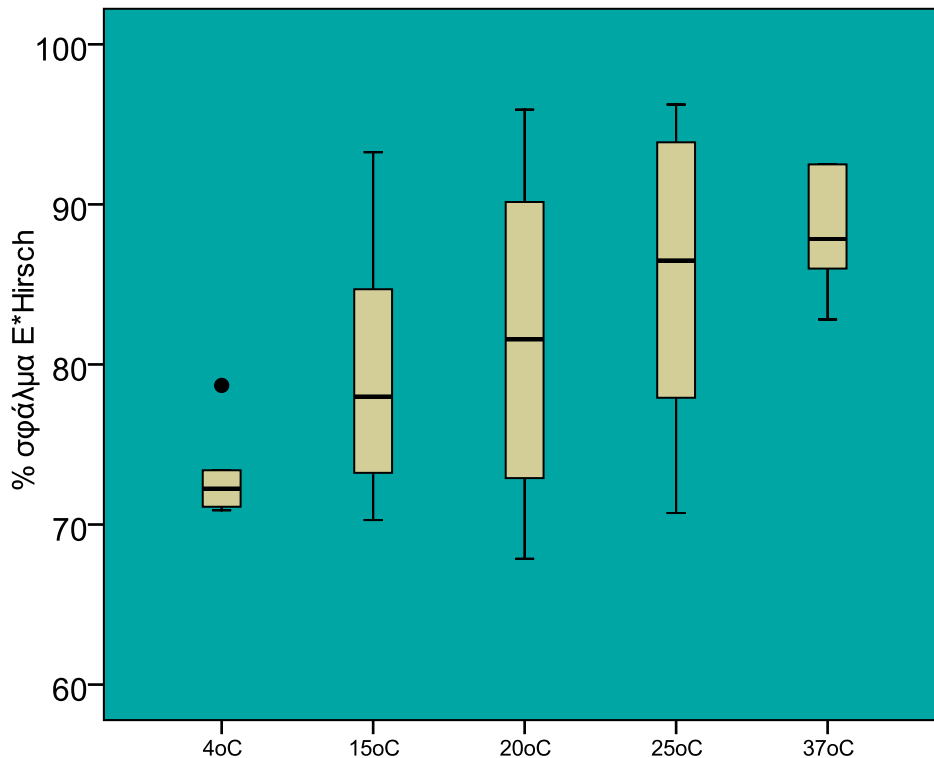
Στο σχήμα 5.29 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.29: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά συχνότητα, δοκίμιο T7

Καθώς η συχνότητα φόρτισης μειώνεται, αυξάνονται οι τιμές των ποσοστιαίων σφαλμάτων οι οποίες από 70% στη συχνότητα των 25 Hz προσεγγίζουν το 90% στα 0.1 Hz. Επίσης με την μείωση της συχνότητας φόρτισης παρατηρείται και αύξηση του εύρους των τιμών από 3 μονάδες (25 Hz) σε 15 μονάδες (0.1 Hz). Στις συχνότητες των 25 και 10 Hz εμφανίζονται ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

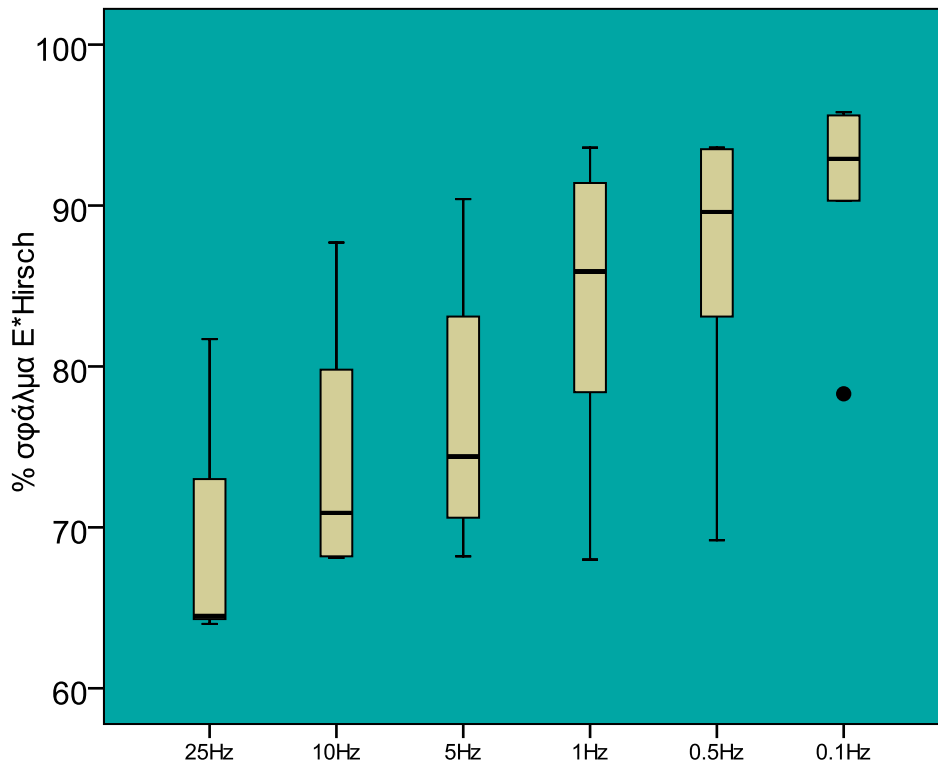
Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T7.



Σχήμα 5.30: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T7

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 85%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 30 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C το ποσοστιαίο σφάλμα είναι συγκεντρωμένο στο 75% και υπάρχουν άνω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 37 °C και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στους 37 °C η διάμεσος είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω το οποίο υποδεικνύει τη θετική ασυμμετρία στην κατανομή των δεδομένων.

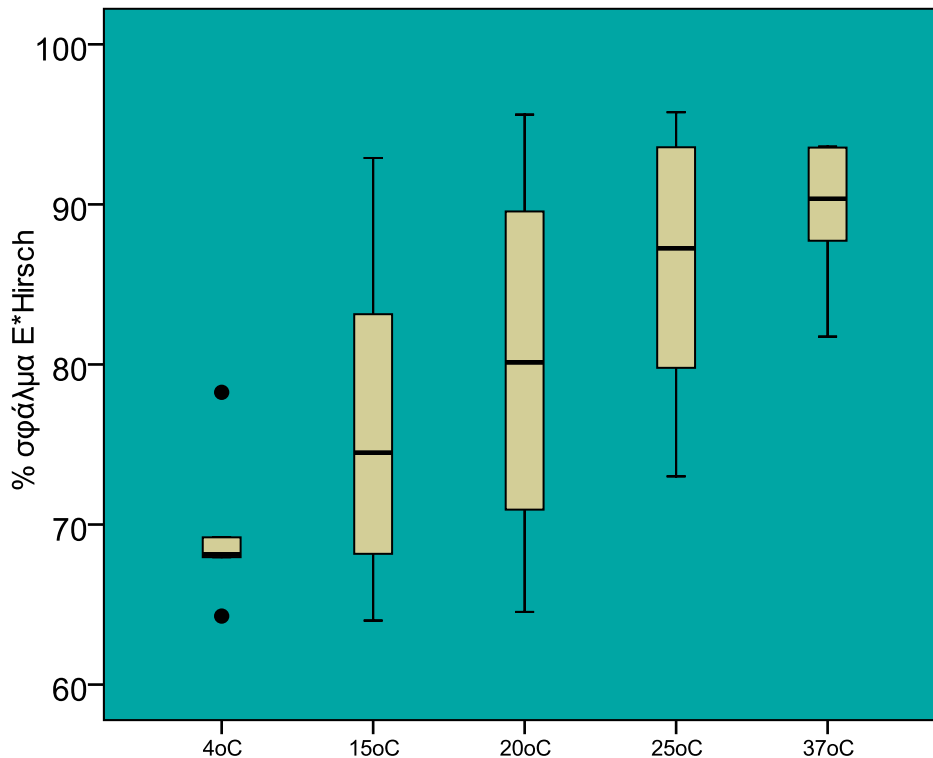
Στο σχήμα 5.31 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη συχνότητα για το δοκίμιο T8.



Σχήμα 5.31: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά συχνότητα, δοκίμιο T8

Καθώς η συχνότητα φόρτισης μειώνεται, αυξάνονται οι τιμές των ποσοστιαίων σφαλμάτων οι οποίες από 65% στη συχνότητα των 25 Hz προσεγγίζουν το 95% στα 0.1 Hz. Το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος σε όλες τις συχνότητες, με εξαίρεση τα 0.1 Hz, είναι της τάξεως των 30 μονάδων. Στη συχνότητα των 0.1 Hz το εύρος είναι 5 ποσοστιαίες μονάδες και εμφανίζονται κάτω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου αλλάζει σε κάθε συχνότητα και υποδεικνύει είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.32 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το δοκίμιο T8.

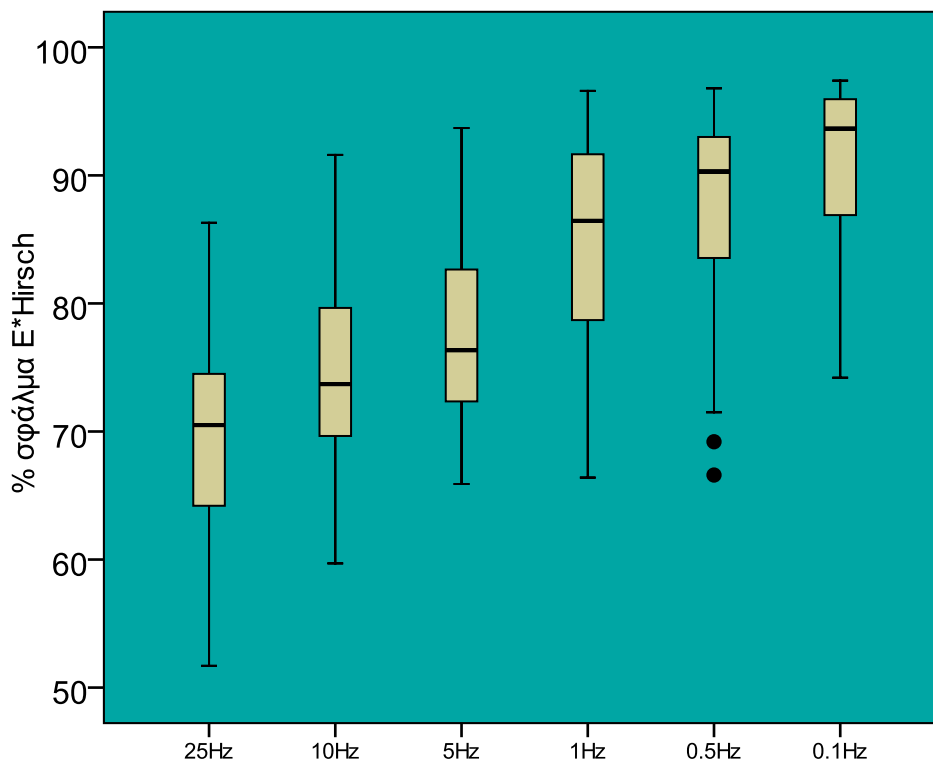


Σχήμα 5.32: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά θερμοκρασία, δοκίμιο T8

Στη θερμοκρασία των 37 °C τα ποσοστιαία σφάλματα είναι μεγαλύτερα του 85%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25 °C) παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων το οποίο φτάνει τις 30 ποσοστιαίες μονάδες στην θερμοκρασία των 20 °C. Στους 4 °C το ποσοστιαίο σφάλμα είναι συγκεντρωμένο στο 70% και υπάρχουν άνω και κάτω ακραίες τιμές οι οποίες θεωρητικά δεν ανήκουν στο δείγμα. Η θέση της διαμέσου υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 4 °C και την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στους 4 °C η διάμεσος είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω το οποίο υποδεικνύει τη θετική ασυμμετρία των δεδομένων.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι όσον αφορά στα δοκίμια T6 και T7 (τα οποία έχουν το χαμηλότερο ποσοστό κενών, 2.70% και 4.10% αντίστοιχα) παρατηρούνται μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα με παράλληλα μικρότερο εύρος τιμών συγκριτικά με τα δοκίμια T2 και T8, για όλο το εύρος θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

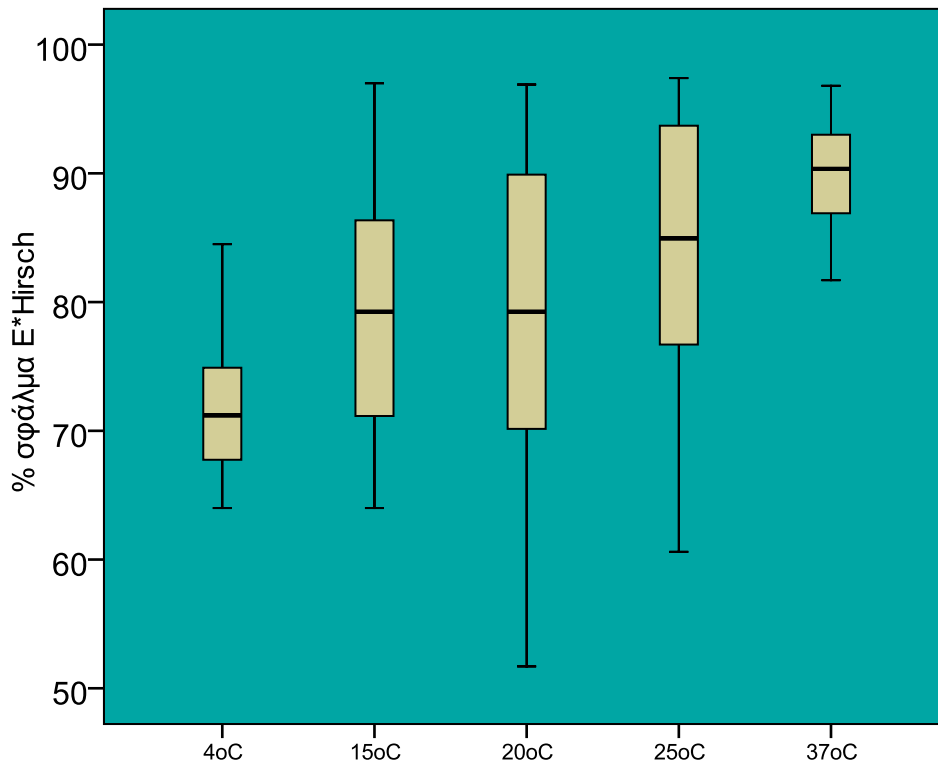
Στο σχήμα 5.33 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



Σχήμα 5.33: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά συχνότητα, σύνολο δοκιμών

Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου συνεπάγεται ότι, καθώς η συχνότητα φόρτισης μειώνεται, αυξάνονται οι τιμές των ποσοστιαίων σφαλμάτων οι οποίες από 70% στη συχνότητα των 25 Hz φθάνουν κοντά στο 95% στα 0.1 Hz. Το εύρος των ποσοστιαίων σφαλμάτων σε όλες τις συχνότητες κυμαίνεται στο 30% με 35%. Η θέση της διαμέσου στις συχνότητες των 25 και 1 Hz βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Στις υπόλοιπες συχνότητες αλλάζει υποδεικνύοντας είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα δοκίμια τα ποσοστιαία σφάλματα του αλγορίθμου Hirsch σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 5.34: Ποσοστιαία σφάλματα του Hirsch ανά θερμοκρασία, σύνολο δοκιμίων

Στη θερμοκρασία των 37°C τα ποσοστιαία σφάλματα κυμαίνονται στο 90% για όλα τα δοκίμια και έχουν εύρος της τάξεως του 10%. Στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (15, 20 και 25°C) τα ποσοστιαία σφάλματα κυμαίνονται από 50% έως 95% με το μεγαλύτερο εύρος τιμών να παρατηρείται στην θερμοκρασία των 20 °C (40 ποσοστιαίες μονάδες). Στην θερμοκρασία των 4 °C παρουσιάζονται τα μικρότερα σφάλματα τα οποία κυμαίνονται από 65 έως 85%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται παρατηρείται και αύξηση των ποσοστιαίων σφαλμάτων. Σε όλες τις θερμοκρασίες η θέση της διαμέσου βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους υποδεικνύοντας τη συμμετρία των δεδομένων.

Σύμφωνα με έρευνες (Robbins & Timm 2011) ο αλγόριθμος Witczak 1-37A εκτιμά με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές του E\* που προκύπτουν από τις εργαστηριακές δοκιμές. Ο αλγόριθμος Hirsch υποεκτιμά τις τιμές του E\* σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα στους 4 και 37 °C, ενώ στους 20 °C τις υπερεκτιμά. Αντίθετα ο αλγόριθμος Witczak 1-40D υπερεκτιμά τις τιμές του E\* σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα κατά περίπου 61%. Σημειώνεται όμως ότι τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε ασφαλτομίγματα με τροποποιημένη άσφαλτο. Η έρευνα (Singh et al. 2010) που πραγματοποιήθηκε με χρήση ασφαλτομιγμάτων τα οποία περιείχαν 6, 8, 10 και 12% ποσοστό κενών κατέληξε ότι η επιτυχία προσδιορισμού του E\* μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό των κενών στο

ασφαλτόμιγμα. Οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsh παρουσιάζουν πολύ καλή προσέγγιση σε ασφαλτομίγματα με χαμηλότερα ποσοστά κενών ενώ καθώς αυξάνεται το ποσοστό των κενών η απόκλιση αυξάνεται. Η πρόβλεψη του  $E^*_{lab}$  μέσω του 1-40D είναι πολύ καλή σε υψηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες. Ο αλγόριθμος Hirsh υποεκτιμά τις τιμές του  $E^*$  σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα σε χαμηλές θερμοκρασίες ενώ ο αλγόριθμος Witczak 1-37A το προσδιορίζει ικανοποιητικά σε μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες ενώ τις υπερεκτιμά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Mohammad et.al 2005). Τα αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν σύμφωνα με τους Clyne et.al (2003) όπου οι τιμές του  $E^*$  που προκύπτουν από τα εργαστηριακά αποτελέσματα συγκλίνουν με το  $E^*_{lab}$  για μεσαίες και χαμηλές θερμοκρασίες ενώ αποκλίνουν για υψηλές θερμοκρασίες. Τα συμπεράσματα των παραπάνω ερευνών συμβαδίζουν εν μέρει με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όσον αφορά τον αλγόριθμο Witczak 1-37A, τα σχετικά μικρά σφάλματα σε χαμηλές θερμοκρασίες έχουν παρατηρηθεί και σε διεθνείς έρευνες. Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν από τη σύγκριση του  $E^*_{lab}$  και του  $E^*_{1-40D}$  καθώς η εκτίμηση του  $E^*$  μέσω του αλγορίθμου Witczak 1-40D είναι καλή σε χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες και παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συμπεριφορά του αλγορίθμου Hirsch συμβαδίζει με τις διεθνείς έρευνες ως προς το μεγαλύτερο εύρος τιμών που παρατηρείται αλλά οι εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  αποκλίνουν σημαντικά από αυτές του  $E^*_{lab}$ . Τέλος, σύμφωνα με διεθνείς έρευνες σε συναφή θέματα, μικρότερα ποσοστά κενών αέρα ασφαλτομίγματος οδηγούν σε μικρότερα σφάλματα κατά την εκτίμηση των τιμών του  $E^*$  μέσω των αλγορίθμων. Ωστόσο σύμφωνα με την παρούσα έρευνα παρατηρείται το αντίστροφο, δηλαδή τα ποσοστιαία σφάλματα στην εκτίμηση του  $E^*$  μέσω των αλγορίθμων είναι μεγαλύτερα στα δοκίμια T6 και T7 στα οποία αντιστοιχούν τα μικρότερα ποσοστά κενών αέρα ασφαλτομίγματος.



### 5.3 Επίδραση του $E^*$ στην εκτίμηση της κόπωσης

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των αποκλίσεων του  $E^*$  στο νόμο κόπωσης ασφαλτομιγμάτων, προσδιορίστηκε το ποσοστό των ρηγματώσεων με αφετηρία τον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος ( $FC_{Bottom}$ ) (Εικόνα 4.3), σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.3, 4.4 και 4.5. Ο προσδιορισμός του  $FC_{Bottom}$  πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις μετρημένες όσο και τις εκτιμώμενες τιμές του  $E^*$  σε κάθε θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης.

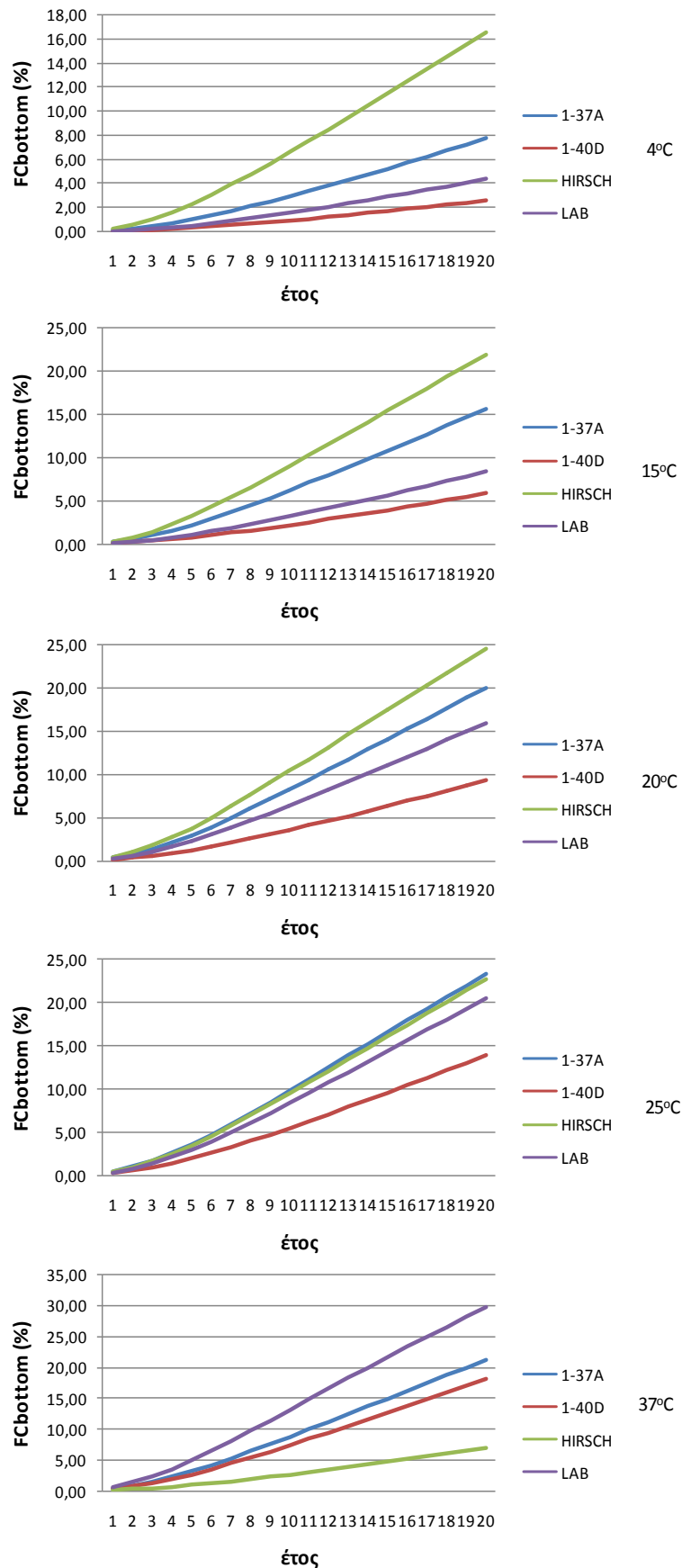
Υπενθυμίζεται ότι οι τέσσερις διατομές ( $\Delta T2$ ,  $\Delta T6$ ,  $\Delta T7$  και  $\Delta T8$ ) διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς την ογκομετρική σύσταση του ασφαλτομίγματος των ασφαλτικών στρώσεων. Τα ασφαλτομίγματα των διατομών  $\Delta T2$ ,  $\Delta T6$ ,  $\Delta T7$  και  $\Delta T8$  θεωρείται ότι αντιστοιχούν στα ασφαλτικά δοκίμια T2, T6, T7 και T8. Το  $FC_{Bottom}$  προσδιορίστηκε για τις θερμοκρασίες των 4, 15, 20, 25 και 37 °C και για συχνότητες φόρτισης 5 και 10 Hz.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4.4 η επιλογή των υπόψη συχνοτήτων φόρτισης έγινε με γνώμονα τη διεθνή εμπειρία και πρακτική σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα ελήφθησαν υπόψη, αφενός η ταχύτητα κίνησης των βαρέων οχημάτων και αφετέρου οι συνθήκες φόρτισης υπό τις οποίες πραγματοποιούνται οι εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων.

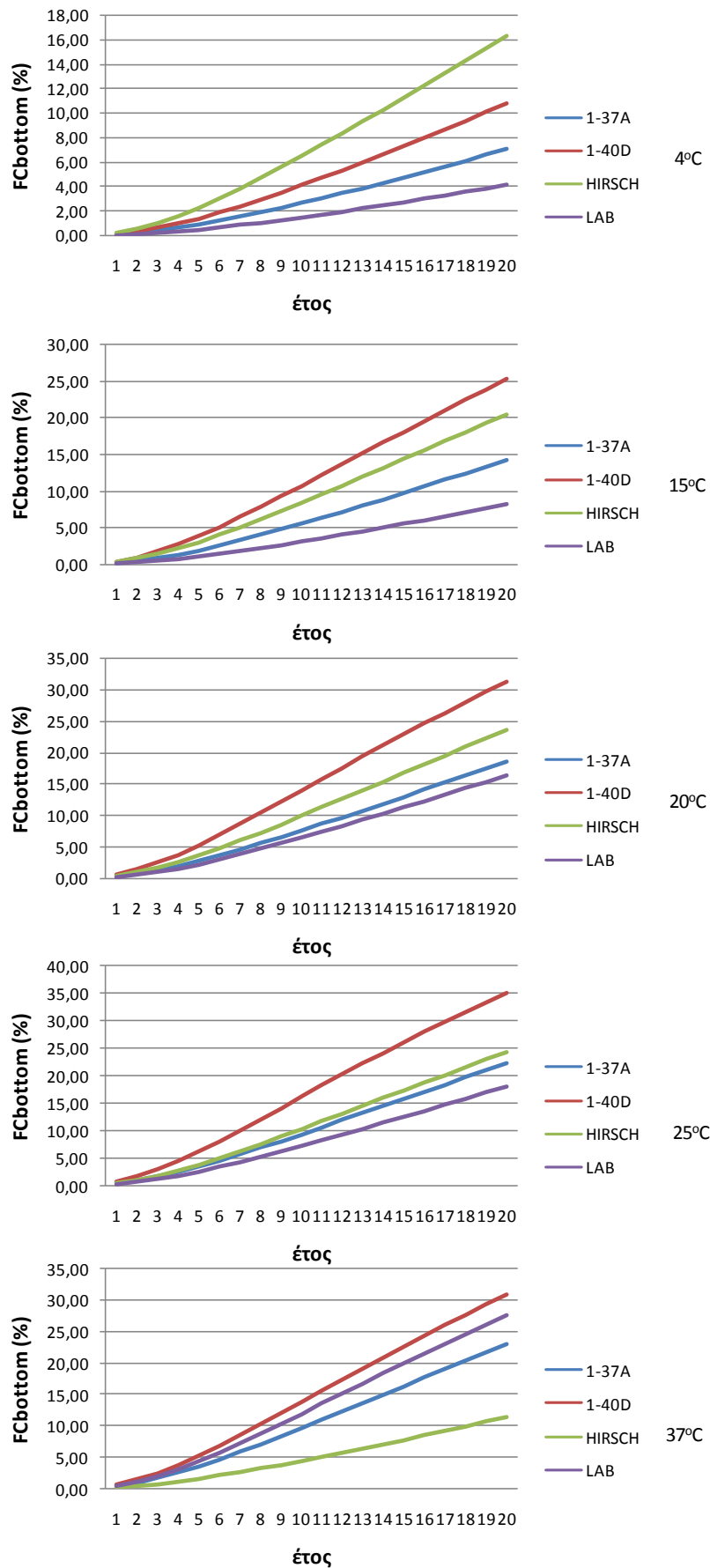
#### 5.3.1 Συγκριτική αξιολόγηση του $FC_{Bottom}$ για την περίοδο σχεδιασμού

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα της κόπωσης του ασφαλτομίγματος στις συχνότητες 5 και 10Hz, για όλες τις θερμοκρασίες και ανά διατομή. Οι ομάδες δεδομένων οι οποίες συμβολίζονται ως LAB, 1-37A, 1-40D και HIRSCH, σχετίζονται με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του  $E^*$ , οι τιμές του οποίου υπεισέρχονται σαν παράμετροι για τον υπολογισμό του  $FC_{Bottom}$ .

Στα σχήματα 5.35 και 5.36 παρουσιάζεται το  $FC_{Bottom}$  κατά την περίοδο σχεδιασμού της διατομής  $\Delta T2$  για συχνότητα φόρτισης 5 και 10 Hz, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.35: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ2 στα 5 Hz



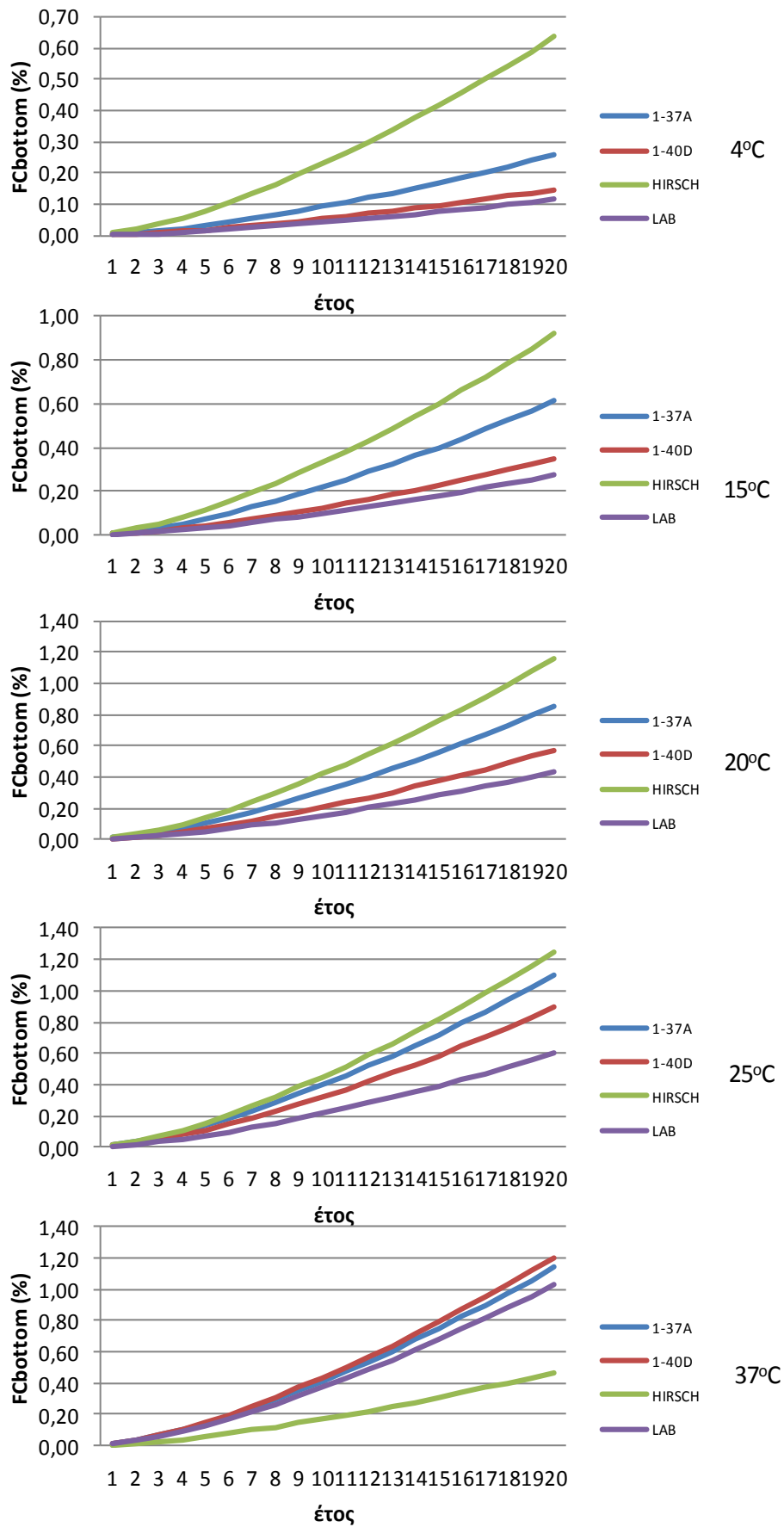
Σχήμα 5.36: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ2 στα 10 Hz

Στη συχνότητα των 5Hz σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{1-40D}$  ( $FC_{Bottom1-40D}$ ) είναι μικρότερο συγκριτικά με το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{Lab}$  ( $FC_{BottomLab}$ ). Στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές, ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνονται και οι αποκλίσεις. Επίσης, το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{Hirsch}$  ( $FC_{BottomHirsch}$ ) είναι μεγαλύτερο από το  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C, ενώ στους 37 °C παρατηρείται το αντίστροφο με αισθητά μικρότερες τιμές του  $FC_{BottomHirsch}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ . Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{1-37A}$  ( $FC_{Bottom1-37A}$ ), ωστόσο οι αποκλίσεις είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτές του  $FC_{BottomHirsch}$ .

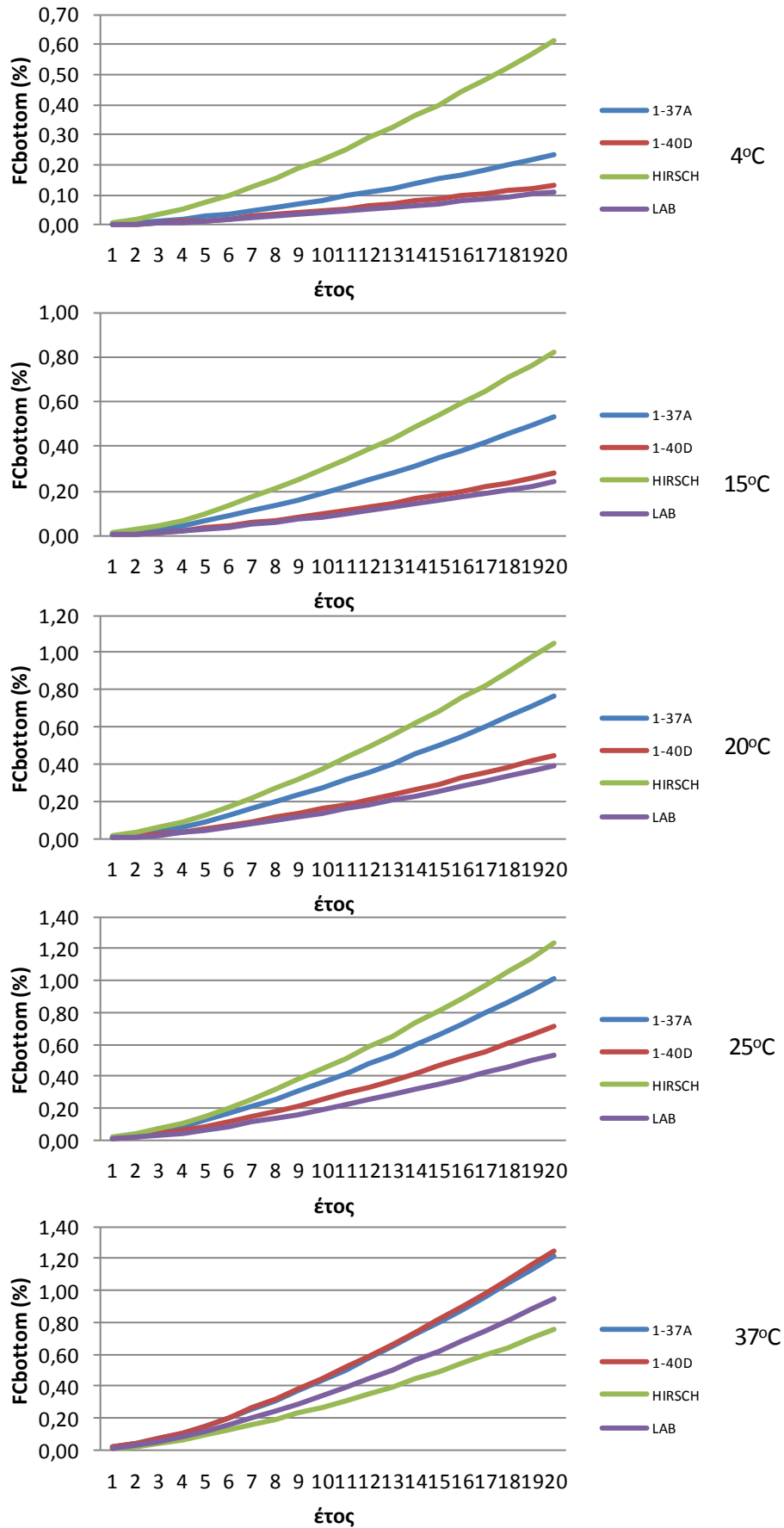
Στη θερμοκρασία των 37 °C, παρόλο που όλοι οι αλγόριθμοι υποεκτιμούν σημαντικά το  $E^*$ , το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας το  $E^*$  των αλγορίθμων είναι παραδόξως αισθητά μικρότερο από το  $FC_{BottomLab}$ . Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ισοπεδωτική στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Στη συχνότητα των 10Hz στις θερμοκρασίες 4, 15, 20 και 25 °C το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{1-40D}$  ( $FC_{Bottom1-40D}$ ) είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{Lab}$  ( $FC_{BottomLab}$ ). Στην θερμοκρασία όμως των 37 °C εμφανίζεται ικανοποιητική προσέγγιση του  $FC_{Bottom}$ . Η χρήση του  $E^*_{1-37A}$  υπερεκτιμά σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom}$  εκτός από τους 20 °C όπου το προσεγγίζει ικανοποιητικά και τους 37 °C όπου το υποεκτιμά παρουσιάζοντας μικρή απόκλιση. Τέλος προκύπτει ότι η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υπερεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C με την απόκλιση να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στους 37 °C αυτό αντιστρέφεται και η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  ( $FC_{BottomHirsch}$ ) δίνει αισθητά μικρότερα αποτελέσματα από το  $FC_{BottomLab}$ .

Στα σχήματα 5.37 και 5.38 παρουσιάζεται το  $FC_{Bottom}$  κατά την περίοδο σχεδιασμού της διατομής ΔΤ6 για συχνότητα φόρτισης 5 και 10 Hz, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.37: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ6 στα 5 Hz



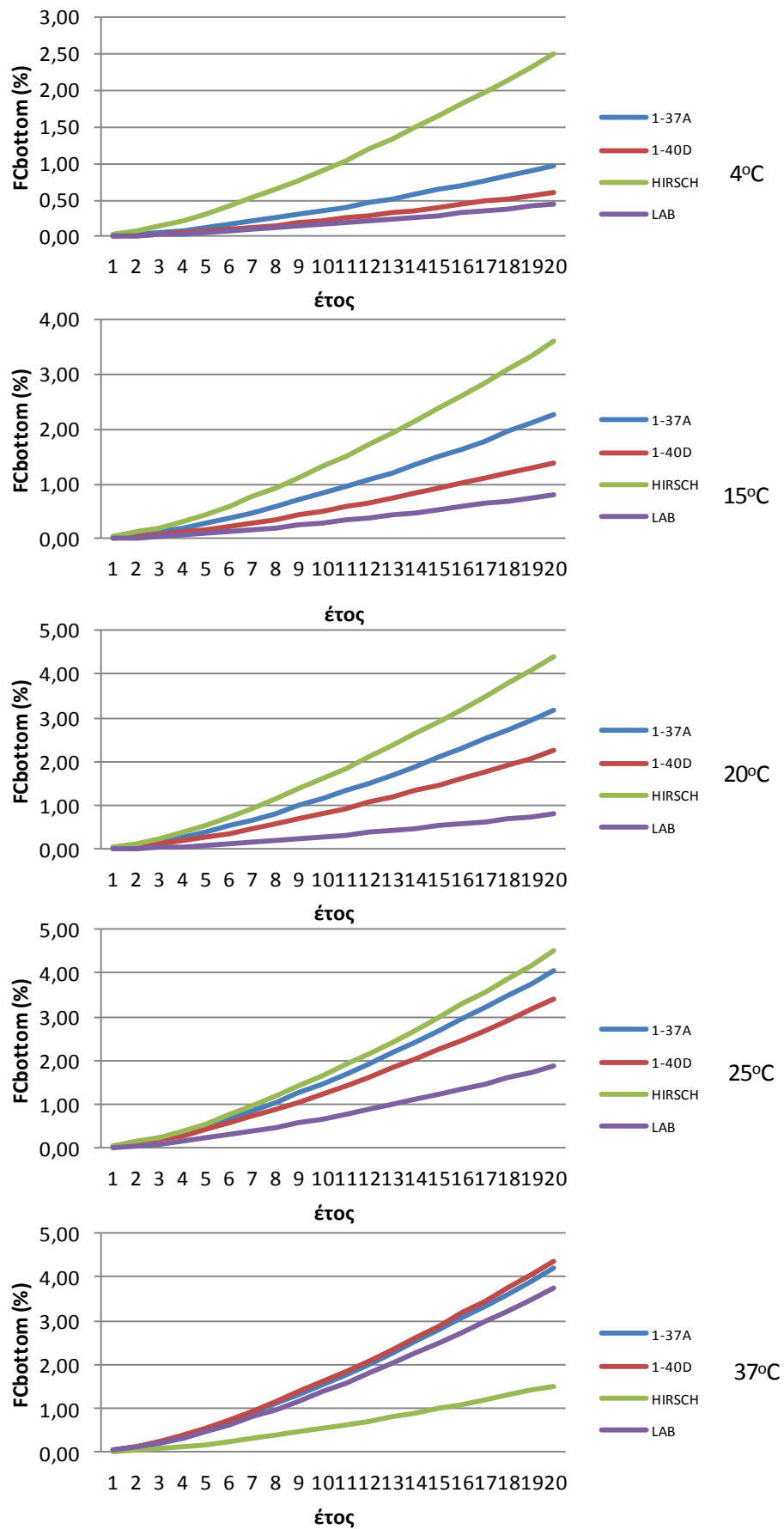
Σχήμα 5.38: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ6 στα 10 Hz

Στη συχνότητα των 5Hz σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{1-40D}$  ( $FC_{Bottom1-40D}$ ) είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{Lab}$  ( $FC_{BottomLab}$ ). Στις θερμοκρασίες των 4, 15 και 20 °C οι αποκλίσεις είναι σχετικά μικρές. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{1-37A}$  ( $FC_{Bottom1-37A}$ ), ωστόσο οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές του  $FC_{Bottom1-40D}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C ενώ στους 37 °C είναι μικρότερες. Επίσης, το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές του  $E^*_{Hirsch}$  ( $FC_{BottomHirsch}$ ) είναι μεγαλύτερο από το  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C, ενώ στους 37 °C παρατηρείται το αντίστροφο με αισθητά μικρότερες τιμές του  $FC_{BottomHirsch}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ .

Στη συχνότητα των 10Hz σε όλες τις θερμοκρασίες πλην αυτής των 25°C, το  $FC_{Bottom}$  το οποίο προκύπτει θεωρώντας τις τιμές  $E^*_{1-40D}$  ( $FC_{Bottom1-40D}$ ) παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από το  $FC_{BottomLab}$ . Ιδιαίτερα στη θερμοκρασία των 4, 15 και 37°C οι καμπύλες του  $FC_{Bottom1-40D}$  και του  $FC_{BottomLab}$  ταυτίζονται ενώ και στις θερμοκρασίες των 20 και 25°C οι αποκλίσεις είναι μικρές. Το  $FC_{Bottom1-37A}$  έχει μεγαλύτερες τιμές από το  $FC_{BottomLab}$  σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τους 37 °C. Στους 37 °C οι τιμές του  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι μικρότερες από αυτές του  $FC_{BottomLab}$ . Επίσης προκύπτει ότι η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υπερεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomHirsch}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C ενώ στους 37 °C αυτό αντιστρέφεται και τα αποτελέσματα του  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μικρότερα από αυτά του  $FC_{BottomLab}$ .

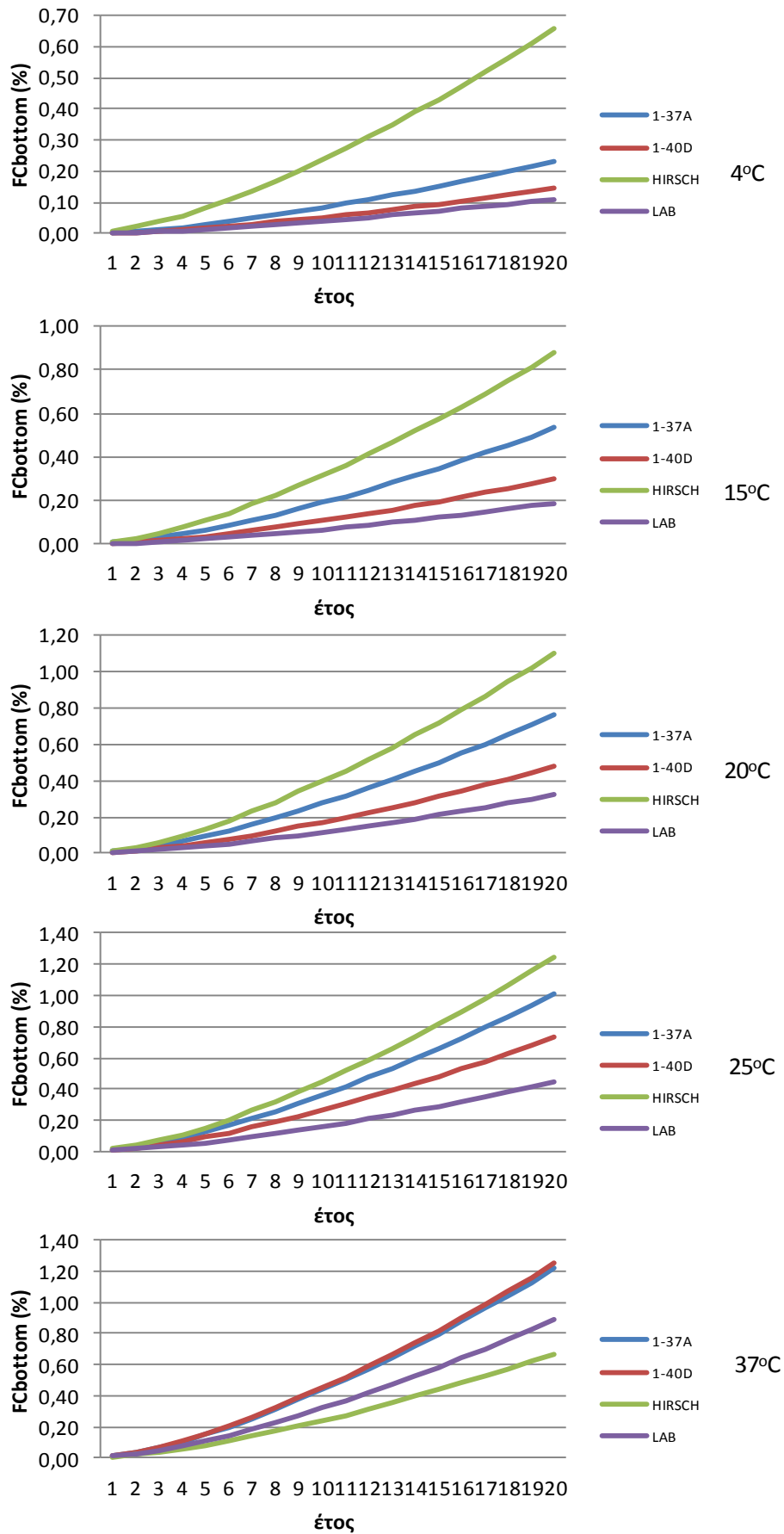
Η αλλαγή της συμπεριφοράς του  $FC_{BottomHirsch}$  στην θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες φόρτισης ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ανώτερη στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Στα σχήματα 5.39 και 5.40 παρουσιάζεται το  $FC_{Bottom}$  κατά την περίοδο σχεδιασμού της διατομής ΔΤ7 για συχνότητα φόρτισης 5 και 10 Hz, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.39: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ7 στα 5 Hz





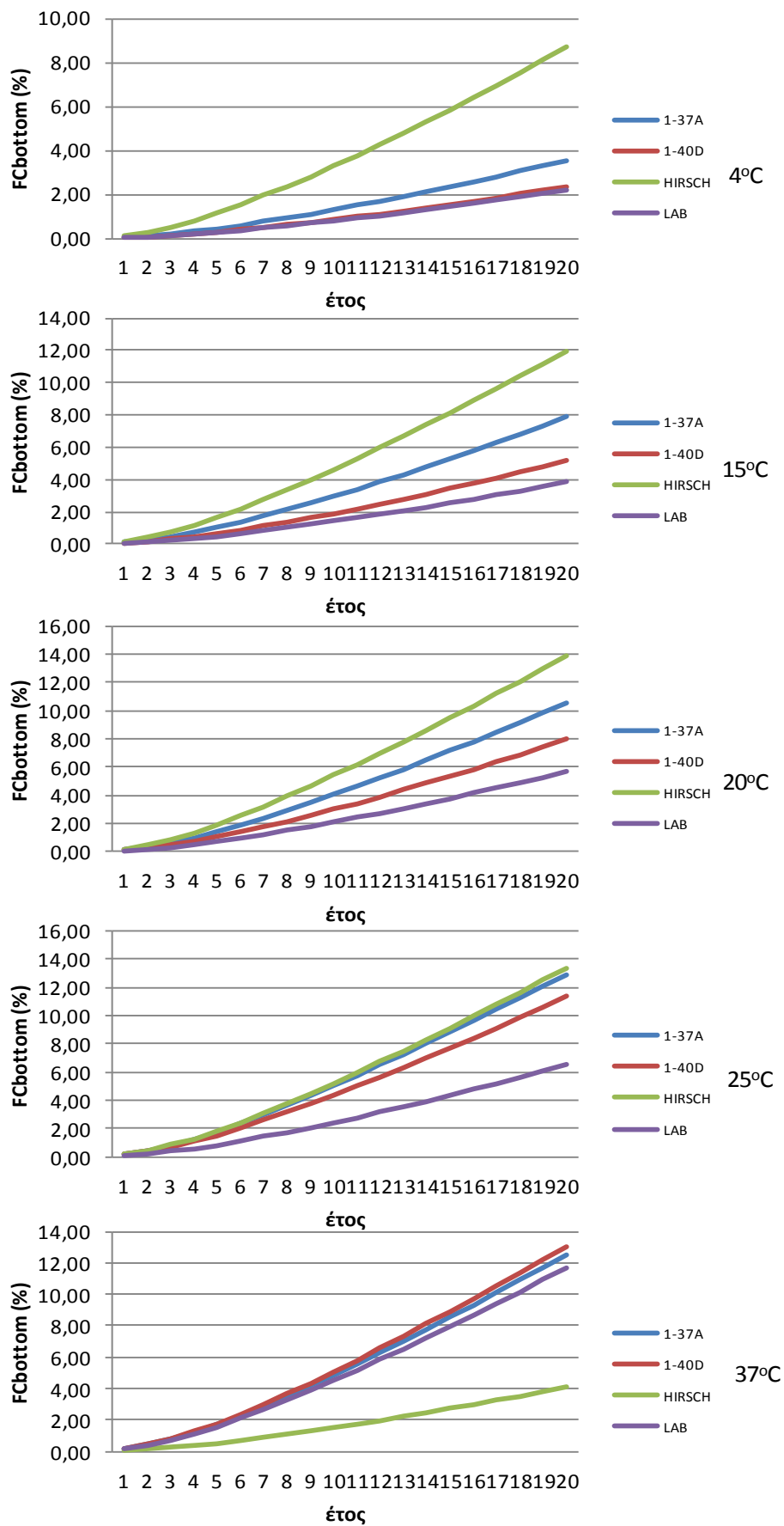
Σχήμα 5.40: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ7 στα 10 Hz

Στη συχνότητα των 5Hz σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ . Ιδιαίτερα στη θερμοκρασία των 4 °C προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια το  $FC_{BottomLab}$ . Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και για το  $FC_{Bottom1-37A}$ , ωστόσο οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές του  $FC_{Bottom1-40D}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C ενώ οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Επίσης, το  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μεγαλύτερο από το  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C, ενώ στους 37 °C παρατηρείται το αντίστροφο με αισθητά μικρότερες τιμές του  $FC_{BottomHirsch}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ .

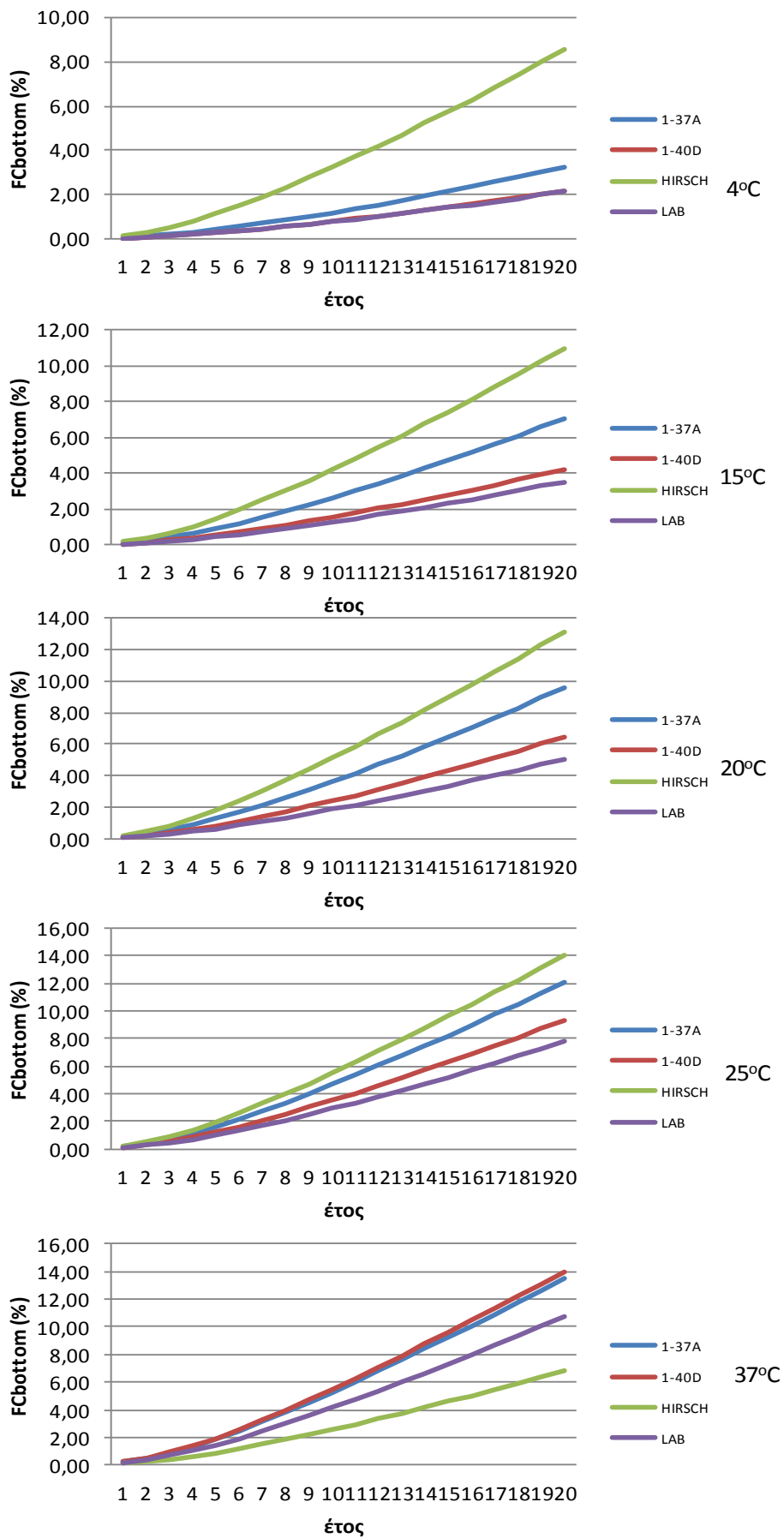
Στη συχνότητα των 10Hz σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom1-40D}$  παρουσιάζει μικρές αποκλίσεις από το  $FC_{BottomLab}$ . Ιδιαίτερα στη θερμοκρασία των 4 και 37°C οι καμπύλες του  $FC_{Bottom1-40D}$  και του  $FC_{BottomLab}$  σχεδόν ταυτίζονται. Το  $FC_{Bottom1-37A}$  έχει μεγαλύτερες τιμές από το  $FC_{BottomLab}$  σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τους 37 °C. Στους 37 °C οι τιμές του  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι αισθητά μικρότερες από αυτές του  $FC_{BottomLab}$ . Επίσης προκύπτει ότι η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υπερεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomHirsch}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C ενώ στους 37 °C αυτό αντιστρέφεται και τα αποτελέσματα του  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μικρότερα από αυτά του  $FC_{BottomLab}$ .

Η αλλαγή της συμπεριφοράς του  $FC_{BottomHirsch}$  στην θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες φόρτισης ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ανώτερη στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Στα σχήματα 5.41 και 5.42 παρουσιάζεται το  $FC_{Bottom}$  κατά την περίοδο σχεδιασμού της διατομής ΔΤ8 για συχνότητα φόρτισης 5 και 10 Hz, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.41: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ8 στα 5 Hz



Σχήμα 5.42: FC<sub>Bottom</sub> διατομής ΔΤ8 στα 10 Hz

Στη συχνότητα των 5Hz σε όλες τις θερμοκρασίες το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ . Ιδιαίτερα στη θερμοκρασία των 4 °C το  $FC_{Bottom1-40D}$  ταυτίζεται με το  $FC_{BottomLab}$  ενώ στους 15 και 37°C οι μεταξύ τους αποκλίσεις είναι μικρές. Το  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι μεγαλύτερο από το  $FC_{BottomLab}$  σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τους 4 και 37 °C όπου το προσεγγίζει ικανοποιητικά.. Επίσης, το  $FC_{BottomHirsch}$  είναι αισθητά μεγαλύτερο από το  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C, ενώ στους 37 °C παρατηρείται το αντίστροφο με αισθητά μικρότερες τιμές του  $FC_{BottomHirsch}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ .

Στη συχνότητα των 10Hz σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 20 και 25 °C όπου παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις, το  $FC_{Bottom1-40D}$  προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια το  $FC_{BottomLab}$ . Ιδιαίτερα στη θερμοκρασία των 4 και 37 °C οι καμπύλες του  $FC_{Bottom1-40D}$  και του  $FC_{BottomLab}$  σχεδόν ταυτίζονται. Το  $FC_{Bottom1-37A}$  έχει μεγαλύτερες τιμές από το  $FC_{BottomLab}$  σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τους 37 °C. Στους 37 °C οι τιμές του  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι αισθητά μικρότερες από αυτές του  $FC_{BottomLab}$ . Επίσης προκύπτει ότι η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υπερεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomHirsch}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C ενώ στους 37 °C αυτό αντιστρέφεται και τα αποτελέσματα του  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μικρότερα από αυτά του  $FC_{BottomLab}$ .

Η αλλαγή της συμπεριφοράς του  $FC_{BottomHirsch}$  στην θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες φόρτισης ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ανώτερη στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Συνοψίζοντας, για την συχνότητα φόρτισης των 5 Hz και για τις θερμοκρασίες των 4, 15, 20, 25 και 37 °C προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Το  $FC_{BottomHirsch}$  παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από αυτές του  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C. Στη θερμοκρασία των 37 °C η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υποεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ . Το  $FC_{Bottom1-37A}$  προσεγγίζει ικανοποιητικά το  $FC_{BottomLab}$  για τις θερμοκρασίες των 5 και 15 °C ενώ στους 20 και 25 °C είναι σημαντικά μικρότερο. Στους 37 °C η χρήση του  $E^*_{1-37A}$  προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια το  $FC_{BottomLab}$ . Πολύ καλή εκτίμηση του  $FC_{BottomLab}$  επιτυγχάνεται με τη χρήση του  $E^*_{1-40D}$  για τις θερμοκρασίες των 4, 15 και 20 °C. Στη θερμοκρασία των 25 και 37 °C το  $FC_{Bottom1-40D}$  δείχνει να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος καθώς για το ασφαλτόμιγμα ΔΤ2 έχει μικρότερες τιμές από αυτές του  $FC_{BottomLab}$  ενώ για τα ασφαλτομίγματα ΔΤ6, ΔΤ7 και ΔΤ8 έχει μεγαλύτερες.

Συνοψίζοντας, για την συχνότητα φόρτισης των 10 Hz και για τις θερμοκρασίες των 4, 15, 20, 25 και 37 °C προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Το  $FC_{BottomHirsch}$  παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από αυτές του  $FC_{BottomLab}$  στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25 °C. Στην θερμοκρασία των 37 °C η χρήση του  $E^*_{Hirsch}$  υποεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  συγκριτικά με το  $FC_{BottomLab}$ . Αντιθέτως η χρήση του  $E^*_{1-37A}$  το προσεγγίζει ικανοποιητικά για τη θερμοκρασία των 5 °C ενώ στους 15, 20 και 25 °C η απόκλιση στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού είναι εμφανώς μεγαλύτερη. Στους 37 °C η χρήση του  $E^*_{1-37A}$  προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια το  $FC_{BottomLab}$ . Πολύ καλή εκτίμηση του  $FC_{BottomLab}$  επιτυγχάνεται σε όλες τις θερμοκρασίες με τη χρήση του  $E^*_{1-40D}$  για τα ασφαλομίγματα ΔΤ6, ΔΤ7 και ΔΤ8. Για το ασφαλομίγμα ΔΤ2 το  $FC_{Bottom}$  με χρήση του  $E^*_{1-40D}$  υπερεκτιμάται σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών.

Η αλλαγή της συμπεριφοράς του  $FC_{BottomHirsch}$  στην θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες φόρτισης ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ανώτερη στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση. Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει επίσης ότι στα ασφαλομίγματα των διατομών ΔΤ6 και ΔΤ7 (τα οποία έχουν το χαμηλότερο ποσοστό κενών, 2.70% και 4.10% αντίστοιχα) αντιστοιχούν μικρότερα ποσοστά ρηγματωμένης επιφάνειας ( $FC_{Bottom}$ ) από ότι στα ασφαλομίγματα ΔΤ2 και ΔΤ8.

### 5.3.2 Ποσοστιαία σφάλματα στην εκτίμηση του $FC_{Bottom}$

Η ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων που παρατηρούνται στην εκτίμηση του  $FC_{Bottom}$  ως αποτέλεσμα των διαφορών του  $E^*$ , πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού των ποσοστιαίων σχετικών σφαλμάτων του  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας το  $E^*$  των αλγορίθμων, λαμβάνοντας ως αναφορά το  $FC_{BottomLab}$ . Το ποσοστιαίο σφάλμα ορίστηκε ως το πηλίκο της διαφοράς  $\Delta FC_{Bottom}$  προς τη τιμή του  $FC_{BottomLab}$  και υπολογίστηκε από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta\% = \frac{\Delta FC_{Bottom}}{FC^*_{Bottomlab}} * 100 = \frac{FC_{Bottomlab} - FC_{Bottomαλγοριθμου}}{FC_{Bottomlab}} * 100$$

Όπου

$FC_{Bottomlab}$ : το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας το  $E^*_{lab}$

$FC_{Bottomαλγοριθμου}$ : το  $FC_{Bottom}$  που προκύπτει θεωρώντας το  $E^*_{αλγοριθμου}$

Στους Πίνακες 5.1-5.3 παρουσιάζονται ο μέσος όρος (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) και η απόλυτη τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας (CV) των ποσοστιαίων σφαλμάτων του  $FC_{Bottom}$  για την περίοδο σχεδιασμού. Αρνητικές τιμές των σφαλμάτων δηλώνουν ότι το  $FC_{Bottom}$  υπερεκτιμάται, ενώ θετικές τιμές δηλώνουν ότι υποεκτιμάται.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά στοιχεία ποσοστιαίων σφαλμάτων του FC<sub>Bottom1-37A</sub>

	5 Hz					10 Hz					Διατομή
	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	
M.O	-78,73	-92,86	-29,18	-16,70	32,38	-73,39	-79,87	-14,33	-27,55	19,26	ΔΤ2
T.A	2,00	4,99	2,05	1,40	2,43	1,71	3,90	0,93	2,19	1,58	
CV (%)	2,54	5,38	7,04	8,37	7,52	2,33	4,88	6,46	7,94	8,21	
M.O	-123,13	-123,90	-98,11	-84,38	-10,64	-112,23	-121,63	-95,75	-88,42	-28,61	ΔΤ6
T.A	0,10	0,24	0,27	0,30	0,04	0,08	0,21	0,23	0,28	0,11	
CV (%)	0,08	0,19	0,27	0,35	0,36	0,07	0,17	0,24	0,32	0,39	
M.O	-119,53	-182,25	-145,01	-118,67	-12,22	-109,80	-181,84	-138,55	-127,04	-37,01	ΔΤ7
T.A	0,37	1,33	1,48	1,55	0,17	0,08	0,31	0,34	0,41	0,14	
CV (%)	0,31	0,73	1,02	1,30	1,36	0,07	0,17	0,24	0,32	0,39	
M.O	-61,84	-109,16	-91,18	-106,28	-7,74	-52,63	-104,68	-93,85	-59,17	-27,13	ΔΤ8
T.A	0,71	2,83	3,21	4,64	0,33	0,55	2,42	2,98	2,40	1,24	
CV (%)	1,15	2,59	3,52	4,36	4,22	1,04	2,31	3,17	4,06	4,56	



Πίνακας 5.2: Στατιστικά στοιχεία ποσοστιαίων σφαλμάτων του FC<sub>Bottom1-40D</sub>

	5 Hz					10 Hz					Διατομή
	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	
M.O	42,77	31,82	43,66	34,60	43,43	-170,73	-243,34	-111,79	-120,33	-14,81	ΔΤ2
T.A	0,35	0,61	1,35	1,64	2,74	6,19	22,38	13,19	16,28	1,72	
CV (%)	0,82	1,92	3,10	4,73	6,31	3,62	9,20	11,80	13,53	11,60	
M.O	-27,16	-27,75	-32,36	-49,46	-16,78	-21,17	-15,57	-15,00	-31,99	-31,89	ΔΤ6
T.A	0,01	0,03	0,06	0,14	0,06	0,01	0,01	0,02	0,07	0,13	
CV (%)	0,05	0,11	0,18	0,28	0,38	0,04	0,09	0,14	0,22	0,40	
M.O	-36,29	-72,35	-72,44	-83,44	-16,54	-31,29	-58,35	-48,61	-64,66	-40,86	ΔΤ7
T.A	0,07	0,32	0,52	0,91	0,23	0,01	0,06	0,07	0,15	0,16	
CV (%)	0,19	0,44	0,72	1,10	1,41	0,05	0,10	0,15	0,23	0,40	
M.O	-61,84	-109,16	-91,18	-106,28	-7,74	-0,89	-20,29	-28,74	-20,74	-32,65	ΔΤ8
T.A	0,71	2,83	3,21	4,64	0,33	0,01	0,28	0,61	0,64	1,55	
CV (%)	1,15	2,59	3,52	4,36	4,22	0,69	1,36	2,11	3,09	4,76	

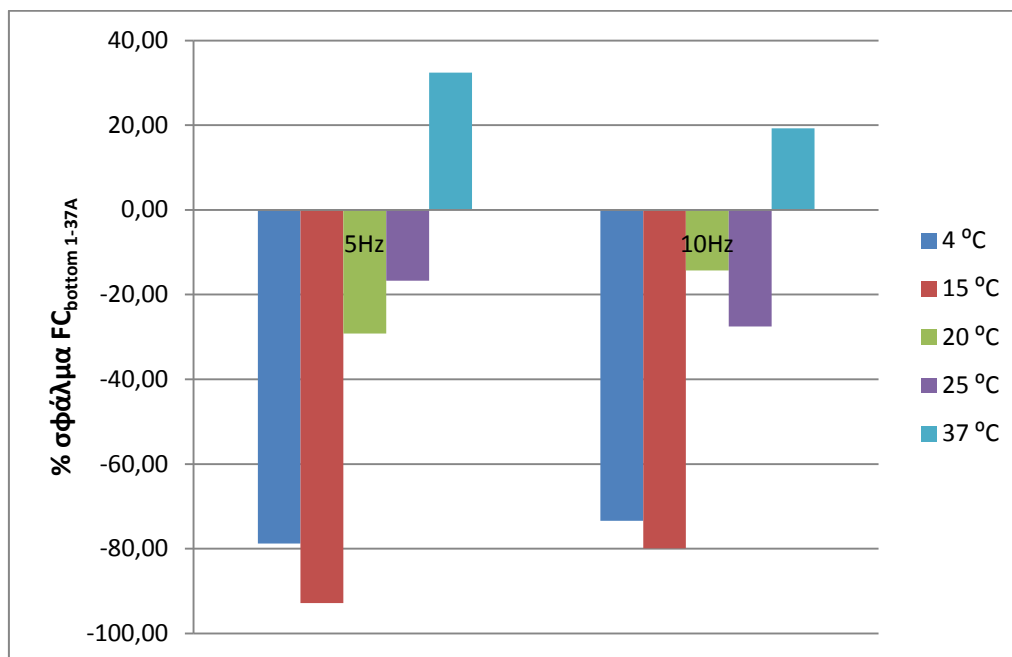
Πίνακας 5.3: Στατιστικά στοιχεία ποσοσטיαίων σφαλμάτων του  $FC_{BottomHirsch}$

	5 Hz					10 Hz					Διατομή
	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	4 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37 °C	
M.O	-305,90	-182,22	-62,39	-12,97	80,08	-322,12	-167,92	-50,63	-40,86	62,91	ΔΤ2
T.A	17,50	14,24	5,49	1,05	1,79	18,08	12,12	4,29	3,58	2,40	
CV (%)	5,72	7,82	8,81	8,11	2,24	5,61	7,22	8,47	8,75	3,81	
M.O	-449,25	-236,20	-168,94	-109,24	54,63	-459,38	-242,87	-168,68	-130,58	20,72	ΔΤ6
T.A	0,91	0,69	0,62	0,43	0,08	0,89	0,64	0,56	0,51	0,05	
CV (%)	0,20	0,29	0,37	0,40	0,15	0,19	0,26	0,33	0,39	0,24	
M.O	-465,00	-350,45	-240,55	-144,12	60,12	-495,04	-365,03	-243,51	-180,83	25,14	ΔΤ7
T.A	3,72	4,06	3,41	2,10	0,29	1,04	1,02	0,85	0,72	0,05	
CV (%)	0,80	1,16	1,42	1,46	0,48	0,21	0,28	0,35	0,40	0,21	
M.O	-308,85	-225,16	-155,91	-113,86	66,35	-316,36	-225,85	-171,87	-87,37	37,78	ΔΤ8
T.A	8,89	9,04	7,32	5,15	0,88	8,94	8,26	7,62	4,16	0,85	
CV (%)	2,88	4,02	4,69	4,52	1,33	2,83	3,66	4,43	4,77	2,25	

Σε κάθε περίπτωση το CV είναι μικρότερο από 10% υποδεικνύοντας ότι η τιμή του μέσου όρου είναι αντιπροσωπευτική του δείγματος. Επομένως, δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές στα ποσοστιαία σφάλματα κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο της συγκριτικής αξιολόγησης η οποία ακολουθεί, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές του μέσου όρου των ποσοστιαίων σφαλμάτων.

### 5.3.2.1 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom1-37A}$

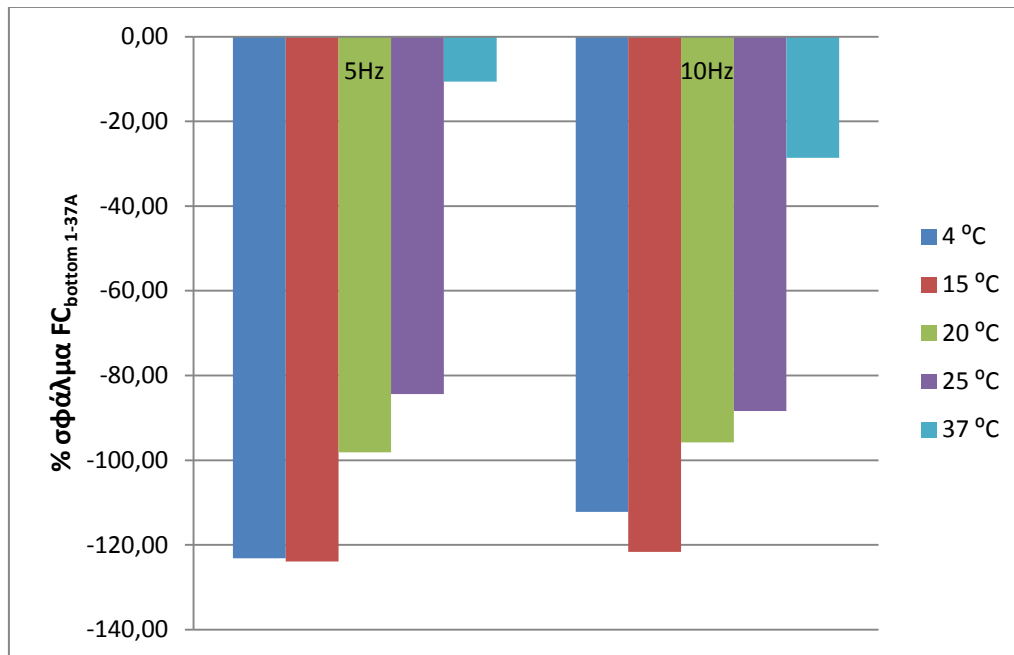
Στο σχήμα 5.43 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  της διατομής ΔΤ2 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.43: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{Bottom1-37A}$  της διατομής ΔΤ2

Τα σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  παρουσιάζουν ομοιόμορφη τάση και στις δύο συχνότητες. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μικρότερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 25 °C όπου παρατηρείται το αντίθετο. Τόσο στη συχνότητα των 5Hz όσο και στη συχνότητα των 10Hz, το μεγαλύτερο ποσοστιαίο σφάλμα εντοπίζεται στις θερμοκρασία των 15 °C, ενώ το μικρότερο στη θερμοκρασία των 25 °C (5Hz) και 20 °C (10Hz). Στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C υπερεκτιμούνται οι τιμές του  $FC_{Bottom}$  σε ποσοστό που ξεπερνά το 70%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται σημαντικά και είναι της τάξης του 20%. Αντίθετα στη θερμοκρασία των 37 °C το  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι μικρότερο του  $FC_{BottomLab}$  σε ποσοστό που κυμαίνεται στο 30% στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα είναι περίπου 20%.

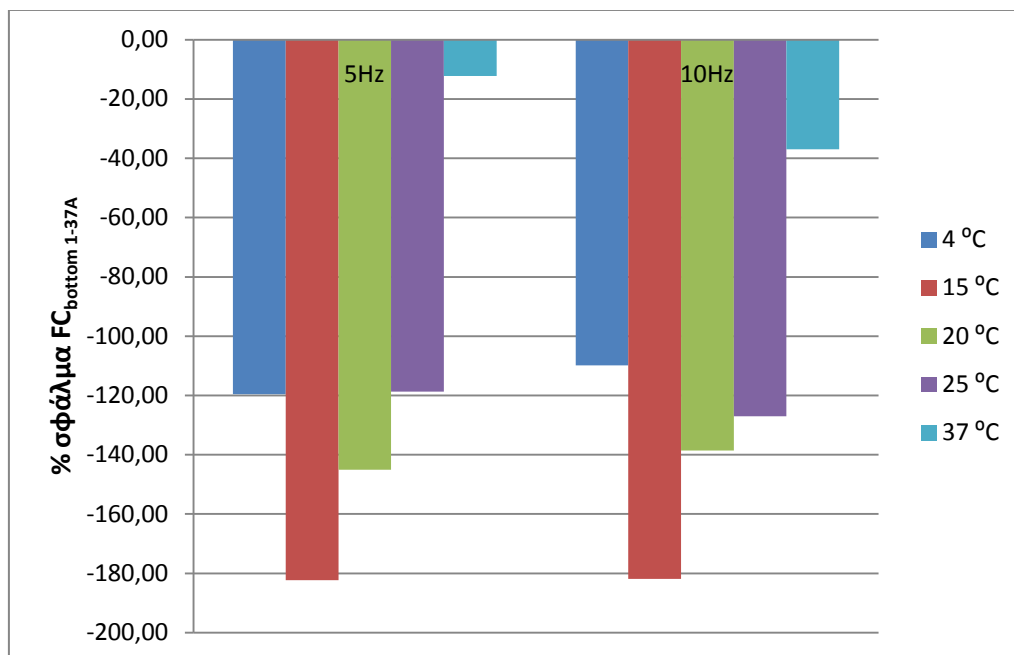
Στο σχήμα 5.44 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ6 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.44: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ6

Τα σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  παρουσιάζουν ομοιόμορφη τάση και στις δύο συχνότητες, με εξαίρεση τους 37 °C. Πιο συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C το  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό που ξεπερνά το 110%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται και βρίσκεται μεταξύ 85% και 95%. Τόσο στη συχνότητα των 5Hz όσο και στη συχνότητα των 10Hz, το μεγαλύτερο ποσοστιαίο σφάλμα εντοπίζεται στις θερμοκρασία των 15 °C, ενώ το μικρότερο στη θερμοκρασία των 37 °C. Στη θερμοκρασία των 37 °C το  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό που κυμαίνεται στο 30% στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα είναι περίπου 20%.

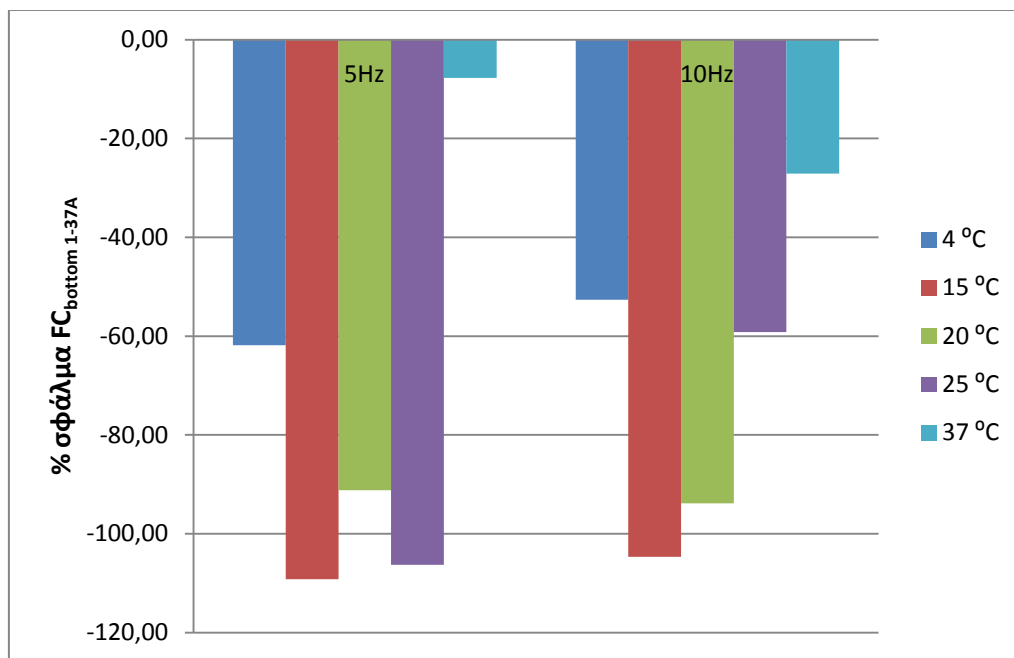
Στο σχήμα 5.45 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ7 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.45: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ7

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μικρότερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz στις θερμοκρασίες των 4 και 20 °C ενώ στους 25 και 37 °C συμβαίνει το αντίθετο. Πιο συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες των 4, 20 και 25 °C το  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  κατά τουλάχιστον 120%. Τόσο στη συχνότητα των 5Hz όσο και στη συχνότητα των 10Hz, στους 15 °C παρατηρείται το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα το οποίο ξεπερνά το 180%. Αντίθετα στη θερμοκρασία των 37 °C εμφανίζεται αισθητή μείωση του ποσοστιαίου σφάλματος το οποίο κυμαίνεται στο 15% στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz είναι περίπου 40%. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και για τις δύο συχνότητες.

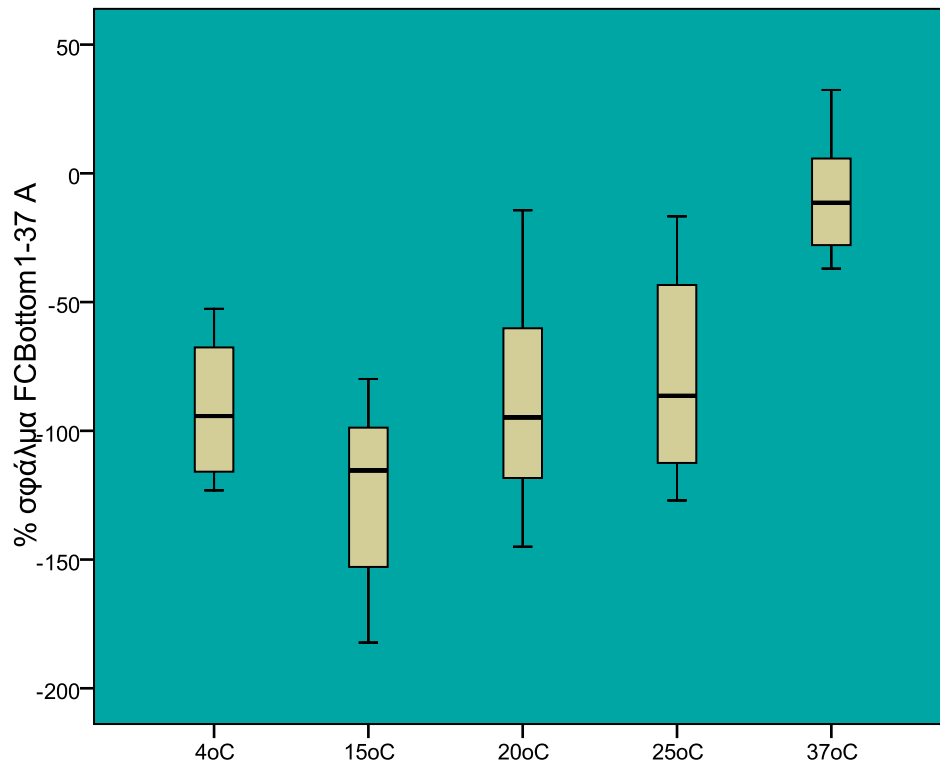
Στο σχήμα 5.46 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ8 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.46: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  της διατομής ΔΤ8

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz τα σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με εξαίρεση τους 25 °C. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μικρότερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 25 και 37 °C. Πιο συγκεκριμένα στους 4 °C το  $FC_{\text{Bottom1-37A}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  κατά 60% περίπου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 15 και 20 °C το ποσοστιαίο σφάλμα αυξάνεται και ξεπερνά το 90%. Στην θερμοκρασία των 37 °C η χρήση του  $E^*_{1-37A}$  υπερεκτιμά τις τιμές του  $FC_{\text{Bottom}}$  κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται στο 8% στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα είναι περίπου 25%. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες. Αισθητή είναι επίσης η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στη θερμοκρασία των 25 °C μεταξύ των ποσοστιαίων σφαλμάτων στις δύο συχνότητες.

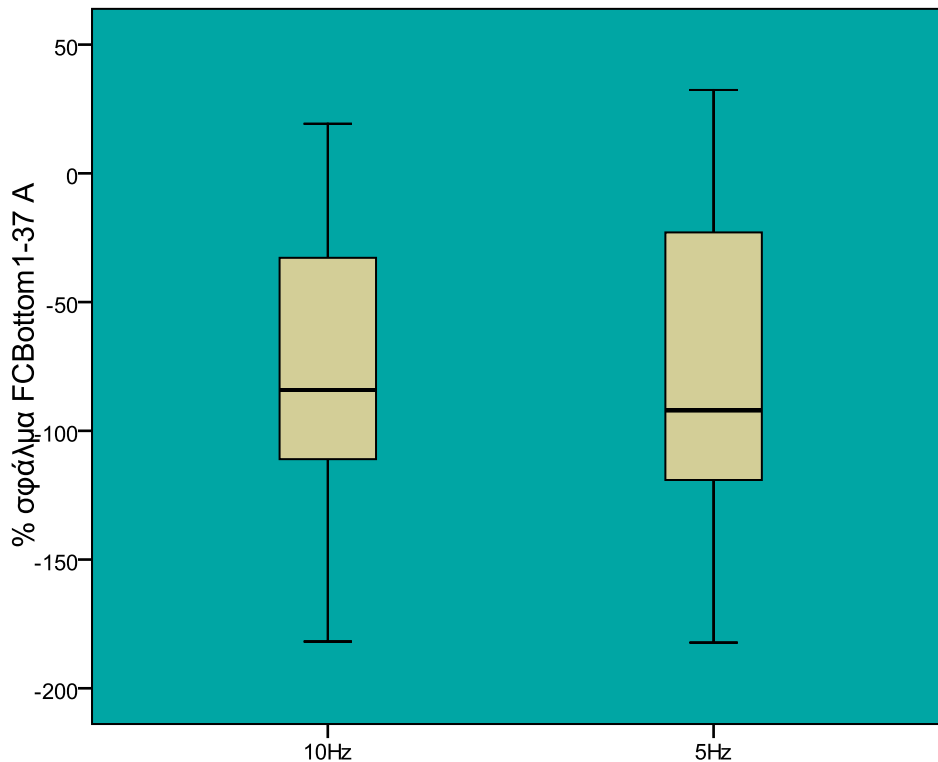
Στο σχήμα 5.47 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 5.47: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  ανά θερμοκρασία, σύνολο διατομών

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου τα μεγαλύτερα σφάλματα εντοπίζονται στη θερμοκρασία των 15 °C όπου το  $FC_{Bottom1-37A}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{BottomLab}$  κατά 180 περίπου ποσοστιαίες μονάδες το μέγιστο και 90 περίπου ποσοστιαίες μονάδες το ελάχιστο. Το μικρότερο εύρος σφαλμάτων παρατηρείται στη θερμοκρασία των 37 °C (της τάξης του 45%), ενώ το μεγαλύτερο στη θερμοκρασία των 20 °C (της τάξης του 115%). Η ελάχιστη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και ισούται με 12%. Πολύ καλή προσέγγιση επιτυγχάνεται επίσης στους 25 °C όπου το ελάχιστο ποσοστιαίο σφάλμα της υπολογισμένης ρηγμάτωσης είναι 16,7%. Η θέση της διαμέσου στις θερμοκρασίες των 4 και 37 °C βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Στις υπόλοιπες θερμοκρασίες αλλάζει υποδεικνύοντας είτε τη θετική είτε την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.48 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



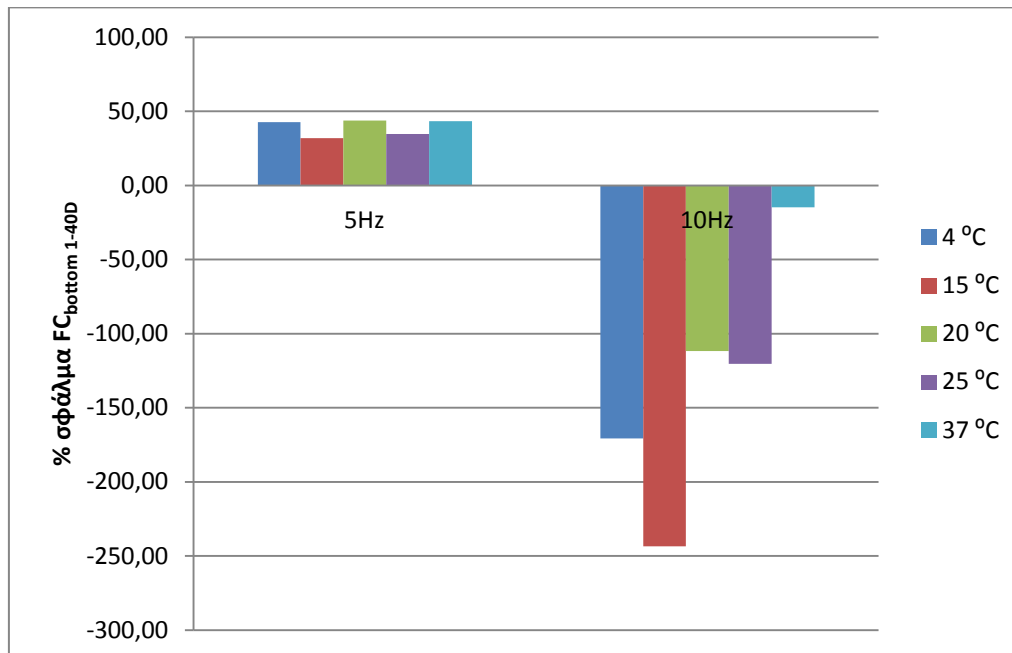
Σχήμα 5.48: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  ανά συχνότητα, σύνολο διατομών

Από το σχήμα 5.48 προκύπτει ότι το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος είναι εξίσου μεγάλο και στις δύο συχνότητες φόρτισης και ισούται με 180 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, το μεγαλύτερο σφάλμα εντοπίζεται στη συχνότητα των 5Hz. Η θέση της διαμέσου και στις δύο συχνότητες είναι μετατοπισμένη προς το κάτω μισό του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει την ασυμμετρία των δεδομένων με το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών του σφάλματος να είναι μεγαλύτερο της τιμής της διαμέσου. Η μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών της διαμέσου στις δύο συχνότητες υποδεικνύει πως το ποσοστιαίο σφάλμα του  $FC_{Bottom1-37A}$  από το  $FC_{BottomLab}$  δεν εξαρτάται από τη συχνότητα φόρτισης.



### 5.3.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom1-40D}$

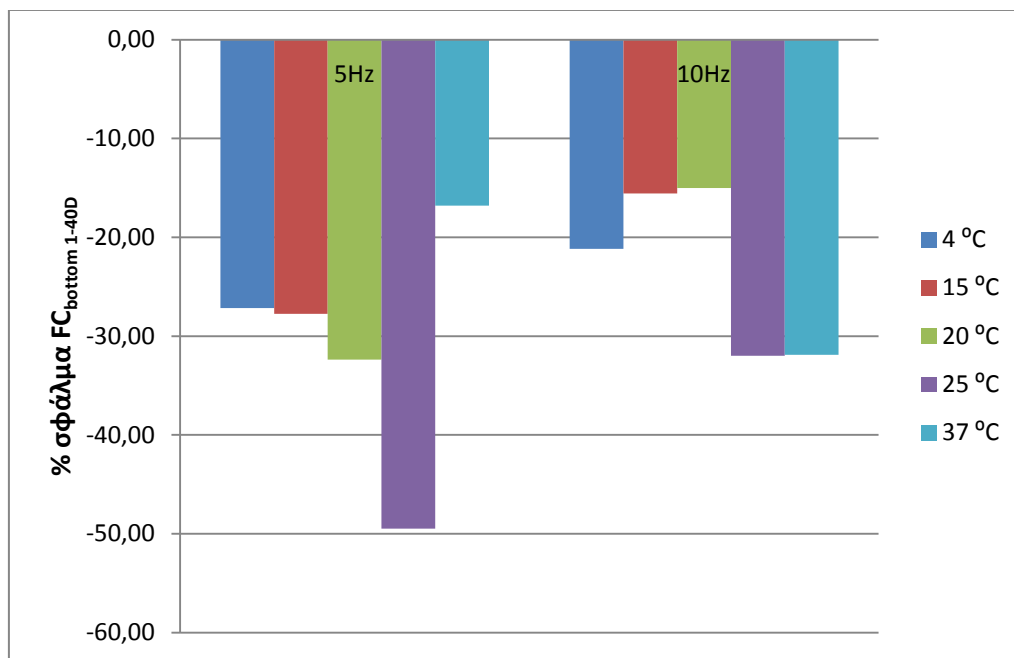
Στο σχήμα 5.49 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-40D}$  της διατομής ΔΤ2 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.49: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{Bottom1-40D}$  της διατομής ΔΤ2

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz το  $FC_{Bottom1-40D}$  παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με το  $FC_{BottomLab}$ . Στη συχνότητα των 5 Hz οι τιμές του  $FC_{Bottom}$  υποεκτιμούνται σε όλες τις θερμοκρασίες σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 30% και 45%. Αντίθετα στη συχνότητα των 10Hz το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{BottomLab}$ . Πιο συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C το ποσοστιαίο σφάλμα ξεπερνά το 160% και 240%, αντίστοιχα. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C, το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται και βρίσκεται κοντά στο 110%. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 15 και 25 °C για τη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz εμφανίζεται στους 37 °C.

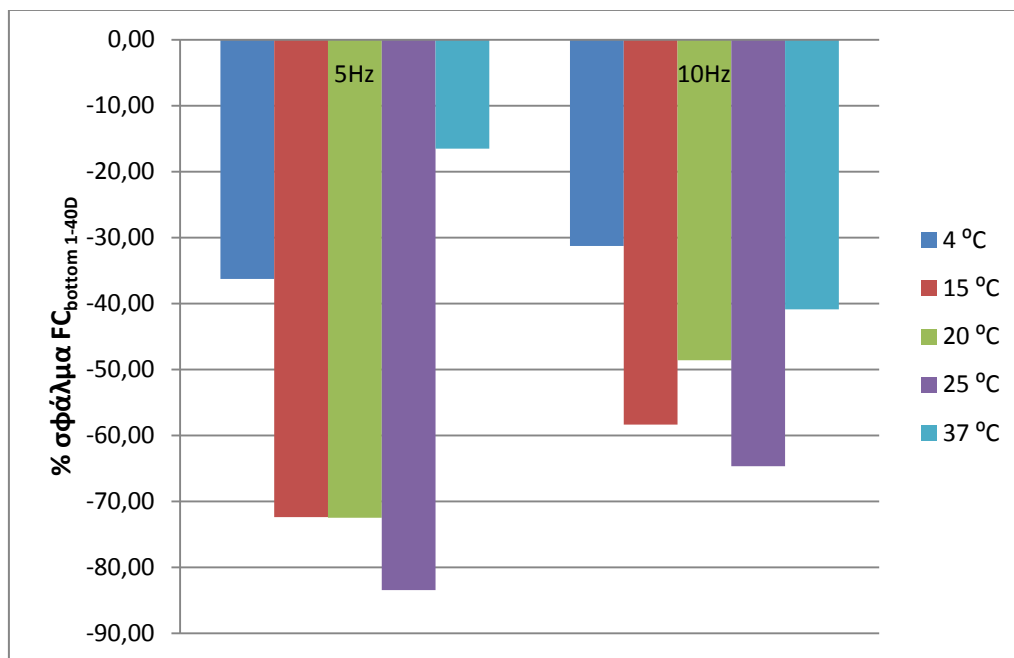
Στο σχήμα 5.50 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ6 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.50: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ6

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ως προς τα ποσοστιαία σφάλματα ανάλογα με την θερμοκρασία. Σε όλες τις θερμοκρασίες για τις συχνότητες των 5 και 10 Hz το  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$ . Πιο συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C το ποσοστιαίο σφάλμα ξεπερνά το 25% (5Hz) και κυμαίνεται μεταξύ 15% και 21% (10Hz). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα αυξάνεται στη συχνότητα των 5 Hz σε ποσοστό 32% (20°C) και 49% (25 °C). Στη συχνότητα των 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται στη θερμοκρασία των 20 °C και παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Στους 25 °C αυξάνεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30%. Στη θερμοκρασία των 37 °C η απόκλιση του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  από το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παίρνει την ελάχιστη τιμή για τη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz το ποσοστιαίο σφάλμα είναι μεγαλύτερο του 30%.

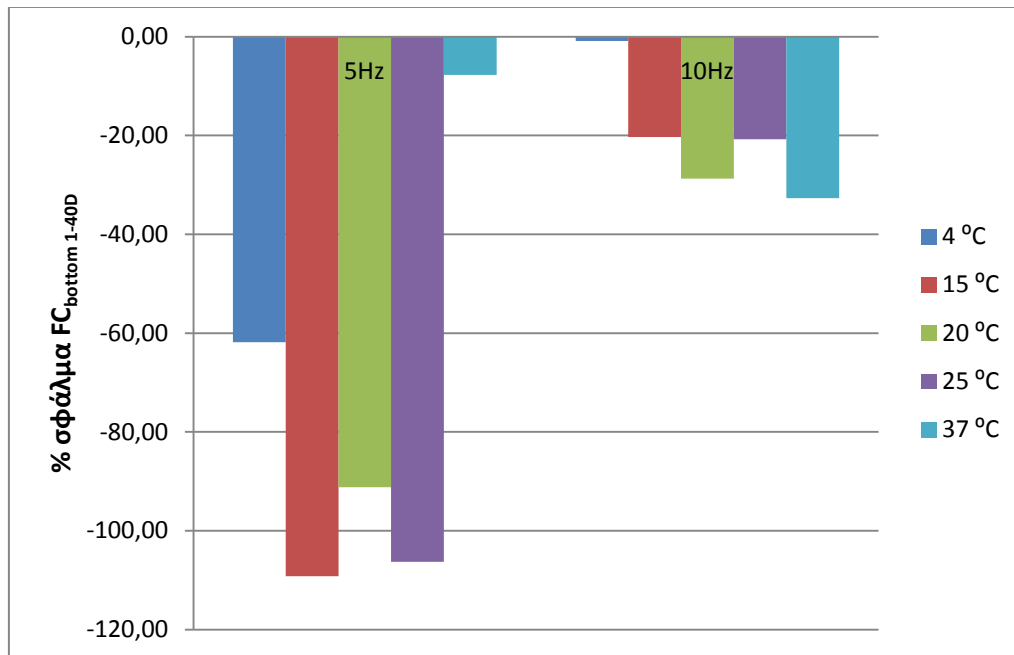
Στο σχήμα 5.51 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ7 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.51: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ7

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, με τα ποσοστιαία σφάλματα της συχνότητας των 10 Hz να είναι ελαφρώς μικρότερα από αυτά της συχνότητας των 5 Hz. Εξαίρεση αποτελούν οι θερμοκρασίες των 15 και 37 °C. Πιο συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C το  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό που ξεπερνά το 30% (4°C) και το 55% (15°C). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα αυξάνεται στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz στους 20 °C μειώνεται και στους 25 °C παίρνει τη μέγιστη τιμή. Στη θερμοκρασία των 37 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται και στις δύο συχνότητες. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C για τη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz εμφανίζεται στους 4 °C.

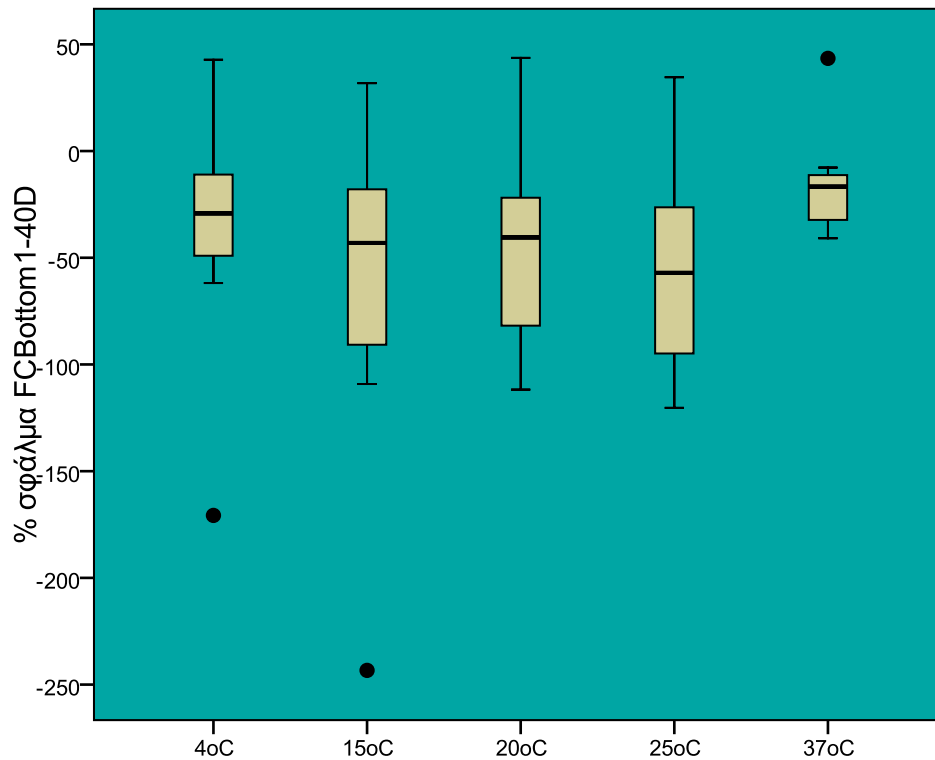
Στο σχήμα 5.52 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ8 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.52: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  της διατομής ΔΤ8

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά, με τα ποσοστιαία σφάλματα της συχνότητας των 10 Hz να είναι κατά πολύ μικρότερα από αυτά της συχνότητας των 5 Hz. Στη συχνότητα των 5 Hz για τις θερμοκρασίες των 4 και 15 °C το  $FC_{\text{Bottom1-40D}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό κοντά στο 60% (4°C) και το 100% (15°C). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα αυξάνεται και στη συχνότητα των 5 Hz είναι 90% και 105% αντίστοιχα ενώ στη συχνότητα των 10 Hz είναι 25% (20°C) και 20% (25°C). Στη θερμοκρασία των 37 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz αυξάνεται. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 4 °C και για τη συχνότητα των 10 Hz και στη θερμοκρασία των 37 °C για τη συχνότητα των 5 Hz.

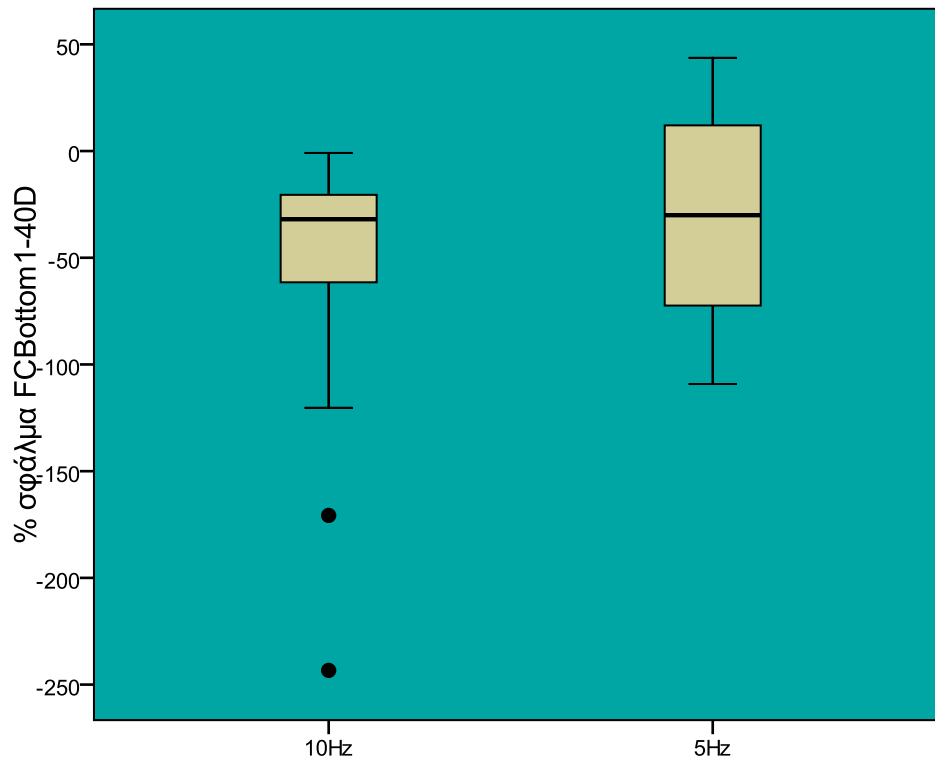
Στο σχήμα 5.53 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-40D}$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 5.53: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-40D}$  ανά θερμοκρασία, σύνολο διατομών

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου τα μεγαλύτερα σφαλμάτων εντοπίζονται στη θερμοκρασία των 25 °C όπου το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{BottomLab}$  κατά 60 περίπου ποσοστιαίες μονάδες. Στις θερμοκρασίες των 4, 15, 20 και 25°C μέρος του άνω τεταρτημορίου παίρνει θετικές τιμές το οποίο συνεπάγεται πως το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μικρότερο του  $FC_{BottomLab}$ . Το μικρότερο εύρος σφαλμάτων παρατηρείται στη θερμοκρασία των 37 °C (της τάξης του 30%), ενώ το μεγαλύτερο στη θερμοκρασία των 20 °C (της τάξης του 160%). Η ελάχιστη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και ισούται με 10%. Η θέση της διαμέσου σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 20 και 37 °C βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Στις υπόλοιπες θερμοκρασίες είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω υποδεικνύοντας την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.54 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-37A}$  σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

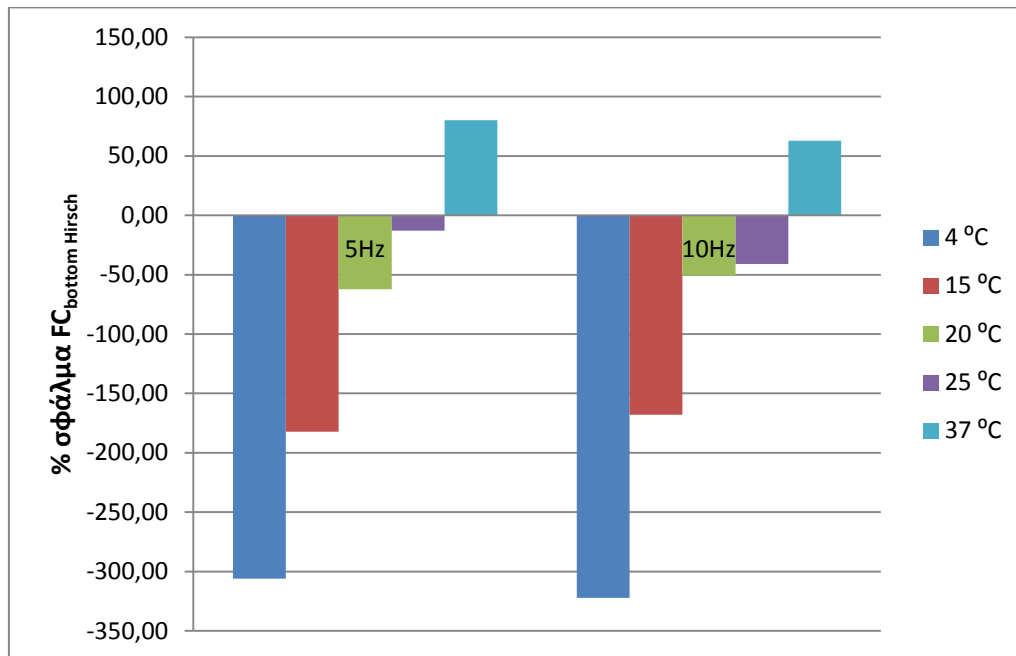


Σχήμα 5.54: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{Bottom1-40D}$  ανά συχνότητα, σύνολο διατομών

Από το σχήμα 5.54 προκύπτει ότι το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος είναι εξίσου μεγάλο και στις δύο συχνότητες φόρτισης και ισούται με 180 ποσοστιαίες μονάδες (5 Hz) και 110 ποσοστιαίες μονάδες (10 Hz). Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, το σφάλμα και στις δύο συχνότητες είναι περίπου ίσο με 50%. Η θέση της διαμέσου στη συχνότητα των 10Hz είναι μετατοπισμένη προς το άνω μισό του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει την ασυμμετρία των δεδομένων με το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών του σφάλματος να είναι μικρότερο αυτής. Η μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών της διαμέσου στις δύο συχνότητες υποδεικνύει πως το ποσοστιαίο σφάλμα του  $FC_{Bottom1-40D}$  από το  $FC_{BottomLab}$  είναι ανεξάρτητο της συχνότητας φόρτισης. Επίσης στη συχνότητα των 5 Hz μέρος του άνω τεταρτημορίου παίρνει θετικές τιμές το οποίο συνεπάγεται πως το  $FC_{Bottom1-40D}$  είναι μικρότερο του  $FC_{BottomLab}$ .

### 5.3.2.2 Ποσοστιαία σφάλματα $FC_{Bottom\ Hirsch}$

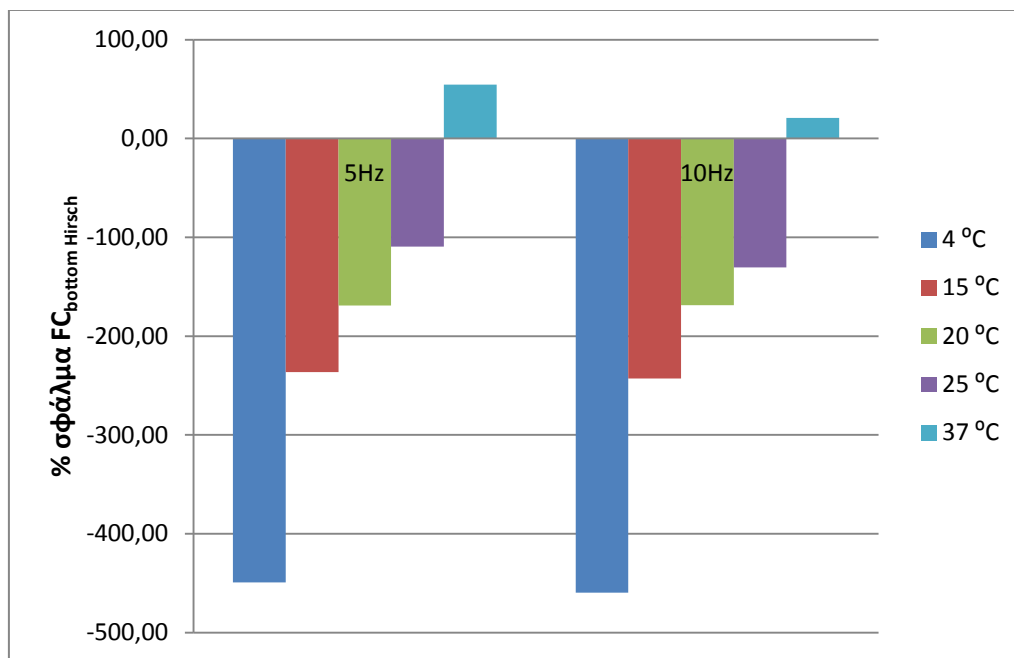
Στο σχήμα 5.55 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{BottomHirsch}$  της διατομής  $\Delta T2$  για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.55: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{BottomHirsch}$  της διατομής  $\Delta T2$

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{BottomHirsch}$  σε σχέση με το  $FC_{BottomLab}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz στις θερμοκρασίες των 4 και 25 °C. Πιο συγκεκριμένα στους 4 °C το  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{BottomLab}$  σε ποσοστό κοντά στο 300%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 15 και 20 °C το ποσοστιαίο σφάλμα περιορίζεται στο 170% (15°C) και 50% (20°C). Στην θερμοκρασία των 37 °C οι αποκλίσεις του  $FC_{BottomHirsch}$  σε σχέση με το  $FC_{BottomLab}$  είναι μεγαλύτερες του 50%. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 25 °C και στις δύο συχνότητες ενώ χαρακτηριστικές είναι οι πολύ μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στους 4 και 15 °C.

Στο σχήμα 5.56 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής ΔΤ6 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.

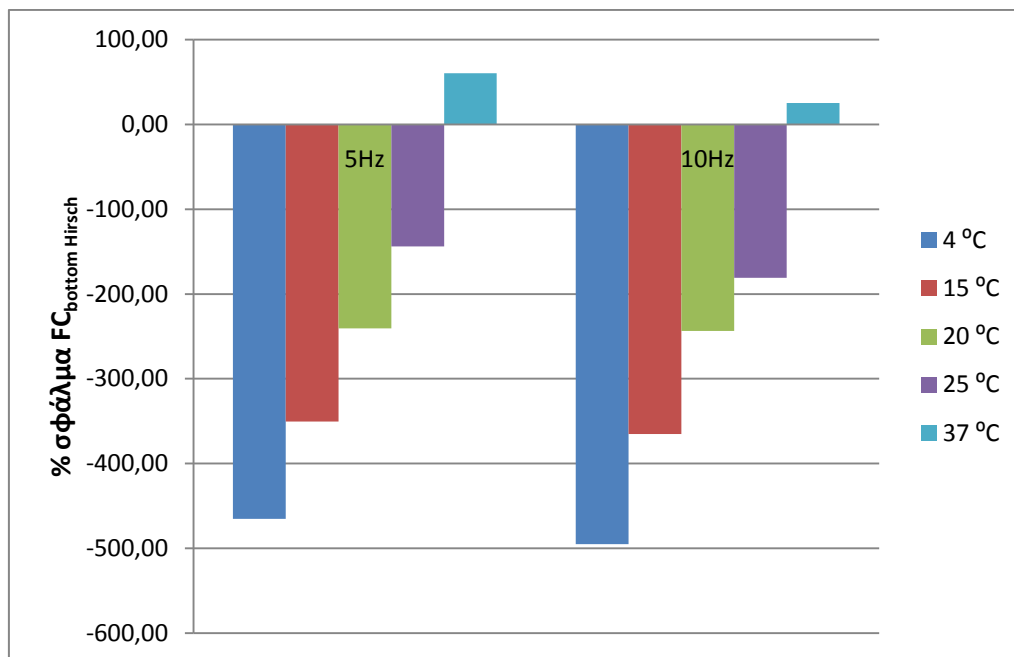


Σχήμα 5.56: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής ΔΤ6

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz στις θερμοκρασίες των 4 και 25 °C. Πιο συγκεκριμένα στους 4 °C το  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό μεγαλύτερο του 450%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται 15, 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα περιορίζεται στο 220% (15 °C), 170% (20 °C) και 100% (25 °C). Στην θερμοκρασία των 37 °C οι τιμές του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  είναι μικρότερες κατά 50% περίπου στη συχνότητα των 5 Hz ενώ στη συχνότητα των 10 Hz το σφάλμα είναι περίπου 15%. Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες ενώ χαρακτηριστικές είναι οι πολύ μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στους 4 και 15 °C.



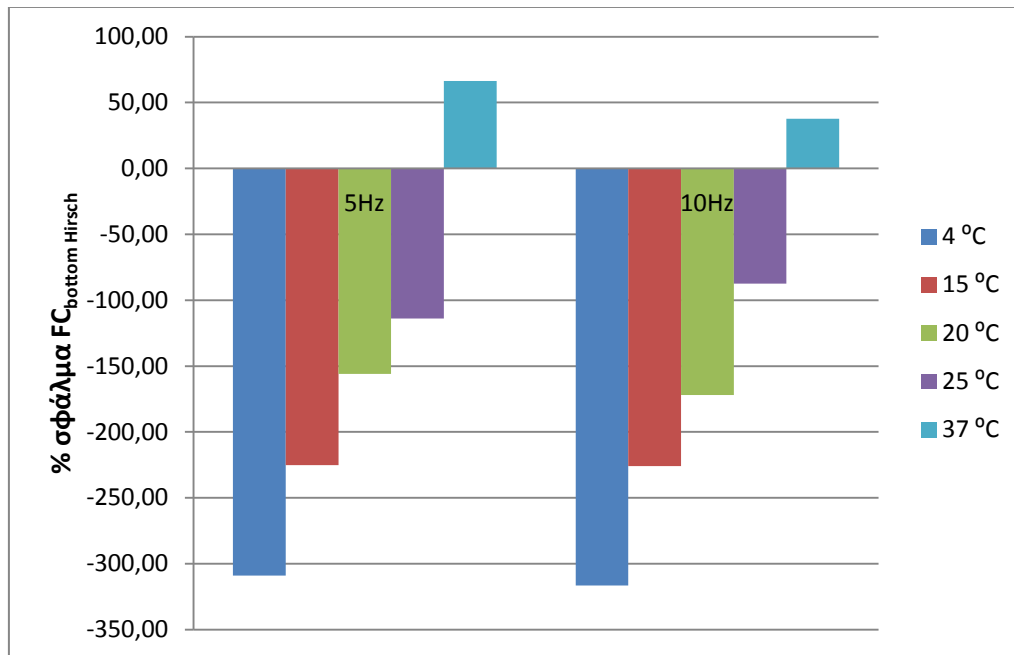
Στο σχήμα 5.57 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής  $\Delta T7$  για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.57: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής  $\Delta T7$

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz στις θερμοκρασίες των 4 και 25°C. Πιο συγκεκριμένα στους 4°C το  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό μεγαλύτερο του 450%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 15, 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται σημαντικά στο 350% (15°C), 220% (20°C) και 150% (25°C). Στην θερμοκρασία των 37 °C η χρήση του  $E^*_{\text{Hirsch}}$  υποεκτιμά το  $FC_{\text{Bottom}}$  σε ποσοστό που κυμαίνεται στο 50% (5Hz) και στο 15% (10Hz). Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες ενώ χαρακτηριστικές είναι οι πολύ μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στους 4 και 15 °C.

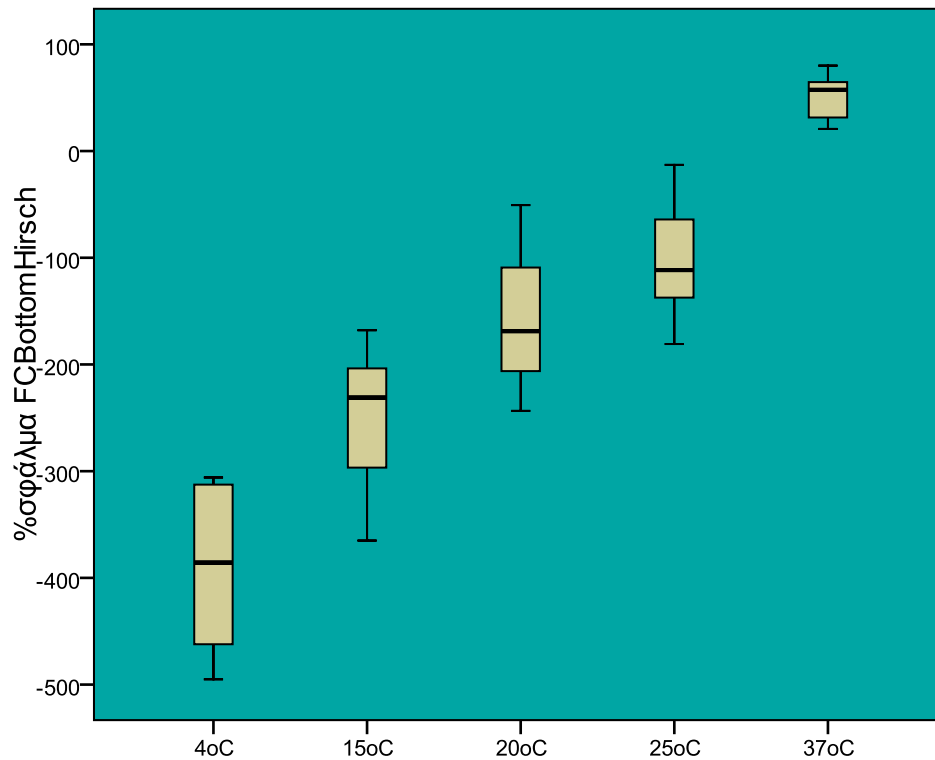
Στο σχήμα 5.58 παρουσιάζονται τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής ΔΤ8 για κάθε θερμοκρασία στη συχνότητα των 5 και 10Hz.



Σχήμα 5.58: Ποσοστιαία σφάλματα  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  της διατομής ΔΤ8

Στις συχνότητες των 5 και 10 Hz οι αποκλίσεις του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά. Τα ποσοστιαία σφάλματα στη συχνότητα των 10 Hz είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά στη συχνότητα των 5 Hz στη θερμοκρασία των 4°C. Πιο συγκεκριμένα στους 4°C το  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  σε ποσοστό μεγαλύτερο του 300%. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται στους 15, 20 και 25 °C το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται στο 250% (15°C), 150% (20°C) και 80% (25°C). Στην θερμοκρασία των 37 °C οι τιμές του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε σχέση με το  $FC_{\text{BottomLab}}$  είναι μικρότερες κατά 60% (5Hz) και 15% (10Hz). Η μικρότερη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες ενώ χαρακτηριστικές είναι οι πολύ μεγάλες αποκλίσεις που παρατηρούνται στους 4 και 15 °C.

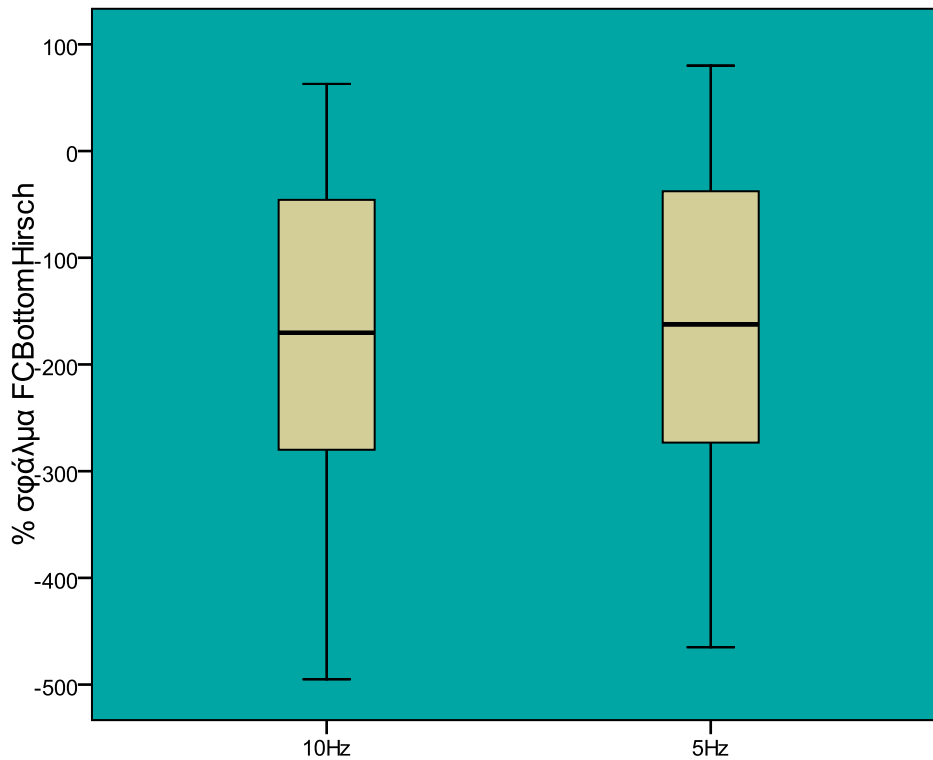
Στο σχήμα 5.59 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 5.59: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  ανά θερμοκρασία, σύνολο διατομών

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου τα μεγαλύτερα σφαλμάτων εντοπίζονται στη θερμοκρασία των 4 °C όπου το  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  είναι μεγαλύτερο του  $FC_{\text{BottomLab}}$  κατά 400 περίπου ποσοστιαίες μονάδες. Η ελάχιστη απόκλιση εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και ισούται με 50%. Στη θερμοκρασία των 37°C τα ποσοστιαία σφάλματα λαμβάνουν μόνο θετικές τιμές το οποίο συνεπάγεται πως οι τιμές του  $FC_{\text{BottomHirsch}}$  είναι μικρότερες από αυτές του  $FC_{\text{BottomLab}}$ . Το μικρότερο εύρος σφαλμάτων παρατηρείται στη θερμοκρασία των 37 °C (της τάξης του 30%), ενώ το μεγαλύτερο στη θερμοκρασία των 4 °C (της τάξης του 200%). Το μικρότερο σφάλμα εμφανίζεται στη θερμοκρασία των 37 °C και ισούται με 50%. Η θέση της διαμέσου σε όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 37 °C βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Στους 37°C είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω υποδεικνύοντας την αρνητική ασυμμετρία των δεδομένων.

Στο σχήμα 5.60 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις διατομές τα ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{BottomHirsch}$  σε συνάρτηση με τη συχνότητα.



Σχήμα 5.60: Ποσοστιαία σφάλματα του  $FC_{BottomHirsch}$  ανά συχνότητα, σύνολο διατομών

Από το σχήμα 5.60 προκύπτει ότι το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος είναι εξίσου μεγάλο και στις δύο συχνότητες φόρτισης και ισούται με 600 ποσοστιαίες μονάδες. Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της διαμέσου, το σφάλμα και στις δύο συχνότητες είναι περίπου ίσο με 180%. Η θέση της διαμέσου και στις δύο συχνότητες βρίσκεται κατά προσέγγιση στο μέσο του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και υποδεικνύει τη συμμετρία των δεδομένων. Η μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών της διαμέσου στις δύο συχνότητες υποδεικνύει πως το ποσοστιαίο σφάλμα του  $FC_{BottomHirsch}$  από το  $FC_{BottomLab}$  είναι ανεξάρτητο της συχνότητα φόρτισης. Επίσης μέρος του άνω τεταρτημορίου παίρνει θετικές τιμές το οποίο συνεπάγεται πως το  $FC_{BottomHirsch}$  είναι μικρότερο του  $FC_{BottomLab}$ .

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του  $E^*$ , στην εκτίμηση της κόπωσης των ασφατομιγμάτων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά παρασκευάστηκαν δοκίμια ασφατομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης και αφού επιλέχθηκαν τέσσερα αντιπροσωπευτικά αυτών, προσδιορίστηκε το  $E^*$  τόσο μέσω εργαστηριακών δοκιμών όσο και μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης. Στη συνέχεια θεωρήθηκαν τέσσερεις διατομές οδοστρώματος των οποίων οι ασφατικές στρώσεις (ισοπεδωτική) αντιστοιχούν στα προαναφερθέντα δοκίμια. Στο πλαίσιο του προσδιορισμού της κόπωσης των ασφατομιγμάτων ενεργοποιήθηκε ο νόμος κόπωσης που προτείνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία (NCHRP 2004). Από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Όσον αφορά στη συμπεριφορά των αλγορίθμων και πιο συγκεκριμένα στη δυνατότητα επιτυχούς εκτίμησης του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Ο αλγόριθμος Witczak 1-37A υποεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος προκύπτει ότι αυτό μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα φόρτισης. Αντίθετα, αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος. Επομένως, μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες ( $37^{\circ}\text{C}$ ) και μικρές συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5 Hz). Το εύρος των τιμών του ποσοστιαίου σφάλματος αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της συχνότητας φόρτισης ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί γενικό συμπέρασμα για την επίδραση της θερμοκρασίας.

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D είτε υπερεκτιμά είτε υποεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $20^{\circ}\text{C}$  τις υποεκτιμά ενώ για θερμοκρασίες μικρότερες των  $20^{\circ}\text{C}$  τις υπερεκτιμά. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος προκύπτει ότι αύξηση της συχνότητας φόρτισης οδηγεί σε μείωση του ποσοστιαίου σφάλματος. Αντίθετα, αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος. Επομένως, μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα παρατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες ( $37^{\circ}\text{C}$ ) και μικρές συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5 Hz). Το εύρος των τιμών παραμένει σχεδόν σταθερό σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων φόρτισης ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί ενιαίο συμπέρασμα για την επίδραση της θερμοκρασίας.

Τέλος, ο αλγόριθμος Hirsch υποεκτιμά τις τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα σε όλο το φάσμα θερμοκρασιών και συχνοτήτων. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος προκύπτει ότι αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος. Αντίθετα, αύξηση της συχνότητας φόρτισης οδηγεί σε μείωση του ποσοστιαίου σφάλματος.

Επομένως, μεγαλύτερα σχετικά σφάλματα παρατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες (37°C) και μικρές συχνότητες φόρτισης (0.1, 0.5 Hz). Το εύρος του ποσοστιαίου σφάλματος του αλγορίθμου Hirsch παραμένει σταθερό σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων φόρτισης ενώ δεν ισχύει το ίδιο για το φάσμα των θερμοκρασιών. Η αύξηση του ποσοστιαίου σφάλματος με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα διεθνών ερευνών.

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος κάθε δείγματος προκύπτει ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-40D παρουσιάζει τα μικρότερα σφάλματα, ενώ ακολουθούν κατά σειρά οι αλγόριθμοι Witczak 1-37A και Hirsch. Επίσης παρατηρήθηκαν διαφορές από την εφαρμογή των αλγορίθμων μεταξύ των δοκιμών οι οποίες υπέδειξαν πως σε δοκίμια τα οποία έχουν ποσοστό κενών αέρα μικρότερο από 4.10% αντιστοιχούν μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα με παράλληλα μικρότερο εύρος τιμών. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με διεθνείς συναφείς έρευνες οι οποίες καταλήγουν πως μικρότερο ποσοστό κενών οδηγεί σε μικρότερα σφάλματα. Όσον αφορά τον αλγόριθμο Witczak 1-37A, τα σχετικά μικρά ποσοστιαία σφάλματα σε χαμηλές θερμοκρασίες συμφωνούν με τις διεθνείς έρευνες. Αντίθετα αποτελέσματα προκύπτουν από τη σύγκριση των τιμών του  $E^*_{1-40D}$  με τις τιμές του  $E^*_{lab}$ , καθώς προκύπτει ότι ο αλγόριθμος 1-40D παρουσιάζει μικρά σφάλματα σε χαμηλές και μεσαίες θερμοκρασίες και μεγάλα σφάλματα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συμπεριφορά του αλγορίθμου Hirsch συμβαδίζει εν μέρει με τις διεθνείς έρευνες καθώς παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος τιμών αλλά εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις από το  $E^*_{lab}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη αφενός τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και αφετέρου εκείνα που έχουν προκύψει από διεθνείς έρευνες σε συναφή θέματα οδοστρωμάτων, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει πλήρης συμφωνία μεταξύ αυτών. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε διαφοροποιήσεις που αφορούν στη σύνθεση των μιγμάτων (κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών, ποσοστό κενών κ.α.). Επομένως, η επιλογή του πλέον κατάλληλου αλγορίθμου για την εκτίμηση του  $E^*$  και ακολούθως του  $FC_{Bottom}$  δεν θα πρέπει να βασίζεται μονοσήμαντα στην υιοθέτηση αποτελεσμάτων σχετικών ερευνών. Αντιθέτως, θα πρέπει αυτά να επαναπροσδιορίζονται και να βαθμονομούνται με βάση τα μίγματα που χρησιμοποιεί κάθε χώρα.

Όσον αφορά στην επίδραση των αποκλίσεων που παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης του  $E^*$ , στην εκτίμηση της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Το  $FC_{Bottom1-37A}$  προσεγγίζει ικανοποιητικά το  $FC_{BottomLab}$  στους 37°C ενώ στις υπόλοιπες θερμοκρασίες αποκλίνει σημαντικά. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος προκύπτει ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από τους 15°C, όπου παρατηρείται το μέγιστο σφάλμα (130%), το ποσοστιαίο σφάλμα μειώνεται. Η μικρότερη απόκλιση παρατηρείται σε υψηλές θερμοκρασίες (25 και 37°C) και ισούται περίπου με 12%. Το σφάλμα μεταξύ του  $FC_{Bottom1-37A}$  και του  $FC_{BottomLab}$  είναι ανεξάρτητο της συχνότητας φόρτισης. Η χρήση του  $E^*_{1-40D}$  είτε υπερεκτιμά είτε υποεκτιμά το  $FC_{Bottom}$  σε σχέση με τις τιμές του  $FC_{BottomLab}$  με σχετικά μικρές τιμές σφάλματος σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Πολύ καλή εκτίμηση επιτυγχάνεται στην

πλειοψηφία των περιπτώσεων για υψηλότερες συχνότητες φόρτισης (10Hz) σε όλες τις θερμοκρασίες με τη χρήση του  $E^*_{1-40D}$ , ενώ για χαμηλότερες συχνότητες φόρτισης (5Hz) μικρότερα σφάλματα παρατηρούνται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες (4, 15 και 20 °C). Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της διαμέσου του ποσοστιαίου σφάλματος, το μέγιστο σφάλμα (60%) παρατηρείται στους 25°C, ενώ το ελάχιστο στους 4 και 37 °C.

Τέλος, το  $FC_{BottomHirsch}$  έχει μεγαλύτερες τιμές από αυτές του  $FC_{BottomLab}$  σε όλες τις θερμοκρασίες εκτός από αυτή των 37°C όπου έχει μικρότερες. Το σφάλμα μεταξύ  $FC_{BottomHirsch}$  και  $FC_{BottomLab}$  αποκτά τη μέγιστη τιμή του (400%) για τη θερμοκρασία των 4°C και τη μικρότερη τιμή του (50%) για τη θερμοκρασία των 37°C. Οι τιμές του σφάλματος είναι ανεξάρτητες της συχνότητας φόρτισης και μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η αλλαγή της συμπεριφοράς του  $FC_{BottomHirsch}$  στην θερμοκρασία των 37 °C και στις δύο συχνότητες φόρτισης ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων σχετίζεται με την απομείωση των τάσεων στο οδόστρωμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ των δύο διαδοχικών στρώσεων τόσο μεγαλύτερη είναι και η απομείωση των τάσεων με αποτέλεσμα να καταπονείται περισσότερο η ανώτερη στρώση. Έτσι στους 37 °C η τιμή του  $E^*_{αλγορίθμων}$  είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του  $E^*_{Lab}$  και προσεγγίζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η τιμή του  $E^*$  είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση έδρασης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι ο αλγόριθμος Witczak 1-37A υποεκτιμά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας σε όλο το φάσμα των θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης. Οι αποκλίσεις του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας μεταφέρονται πολλαπλασιαστικά στον προσδιορισμό του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας με τη μέγιστη απόκλιση στον προσδιορισμό της ρηγματώσεως να εμφανίζεται στους 15 °C.

Ο αλγόριθμος Witczak 1-40D είτε υποεκτιμά είτε υπερεκτιμά το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης, ενώ την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και στον προσδιορισμό του ποσοστού της ρηγματωμένης επιφάνειας. Επιπλέον, το εύρος του ποσοστιαίου σχετικού σφάλματος μεταξύ  $FC_{Bottom1-40D}$  και  $FC_{BottomLab}$  είναι το μικρότερο σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών και συχνοτήτων φόρτισης.

Τέλος, ο αλγόριθμος του Hirsch ο οποίος εμφανίζει τα μεγαλύτερα ποσοστιαία σφάλματα στον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας, εμφανίζει και τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ  $FC_{BottomHirsch}$  και  $FC_{BottomLab}$ , η οποία φτάνει το 400% στους 4 °C. Επίσης παρουσιάζει πολύ μεγάλο εύρος τιμών και μεταβολών στη συμπεριφορά του ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η εξέλιξη αυτή θεωρείται συνέπεια της μη ικανοποιητικής πρόβλεψης του  $E^*$ .

Η εφαρμογή των αλγορίθμων για την εκτίμηση της τιμής του  $E^*$  στους 37 °C οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση της τιμής του  $E^*$  συγκριτικά με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Οι

τιμές του  $E^*$  που εκτιμώνται από τους αλγορίθμους είναι τόσο μικρές που προσεγγίζουν ή είναι υποδεέστερες από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης. Επομένως, τα μέτρα ελαστικότητας δε μειώνονται με το βάθος, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και ως εκ τούτου το οδόστρωμα παύει να συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο και ουσιαστικά όλες οι τάσεις μεταφέρονται στη στρώση βάσης καταπονώντας ελάχιστα την ισοπεδωτική στρώση.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει, η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των αλγορίθμων και η επίδραση των αποκλίσεων τους στον προσδιορισμό της κόπωσης του ασφαλτομίγματος, λαμβάνοντας υπόψη μεγαλύτερο στατιστικό δείγμα μέσω της διαφοροποίησης ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως τον τύπο και τα ποσοστά της ασφάλτου, τον τύπο και τις ιδιότητες των αδρανών καθώς και το εύρος του ποσοστού κενών αέρα. Τέλος, προκειμένου η εκτίμηση του  $E^*$  μέσω της εφαρμογής των αλγορίθμων να είναι πιο ακριβής και με σκοπό να πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια η εκτίμηση της κόπωσης του ασφαλτομίγματος, ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον αποτελεί η ανάπτυξη αλγορίθμων προσαρμοσμένων στα τυπικά ελληνικά ασφαλτομίγματα. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, είτε με την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων, είτε μέσω της αναβαθμόνωσης των συντελεστών των ήδη υπάρχοντων αλγορίθμων, είτε με την αναβαθμόνωση των συντελεστών του μοντέλου της κόπωσης.



## Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

- AASHTO TP 8-94, *Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt Subjected to Repeated Flexural Bending*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2002.
- AASHTO T 342-111, *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2011.
- Andrei D., Witczak M.W and Mirza M.W., *Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*, NCHRP 1-37A Interim Team Report, Department of Civil Engineering, University of Maryland, 1999.
- Atkinson V. M., Merrill D. and Thom N., *Pavement Wear Factors*, TRL Report PPR 066, TRL 2006.
- Bari J. and Witczak M.W., *Development of a New Revised Version of the Witczak E\* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists from the Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 75, pp 381-423, Savannah, Ga, 2006.
- Bari J. and Witczak M.W., *New Predictive Models for the Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders for use with the Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 2001, Transportation Research Board of the National Academies, pp 9-19, Washington, D.C., 2007.
- Bonnaure F., Gest G., Gravois A. and Uge P., *A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures*, *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 96, pp. 64-104, 1977.
- Bonnaure, F., Gravois A. and Udron J., *“A New Method for Predicting The Fatigue Life of Bituminous Mixes”*, *Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 49 Proc., Louisville, KY, 1980.
- Christensen D.W and Anderson D.A., *Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cement*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61, pp 67-116, 1992.
- Christensen D.W., Pellinen T. and Bonaquist R., *Hirsch Model for Estimating the Modulus of 5 Asphalt Concrete*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies, Vol. 72, pp. 97- 121, 2003.

- Clyne T.R., Li X., Marastenu M.O. and Skok E.L., *Dynamic and Resilient Modulus of Mn/DOT Asphalt Mixtures*, Final Report MN/RC – 2003-09., University of Minnesota, Minneapolis, MN., 2003.
- Deacon J.A., Coplantz J.S., Tayebali A.A. and Monismith C.L., *Temperature considerations in asphalt aggregate mixture analysis and design*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1454, Transportation Research Board of the National Academies, pp 97-112 ,1994.
- Dongre R., Myers L., D’Angelo J., Paugh C. and Gudimettla J., *Field Evaluation of Witczak and Hirsch Models for Predicting Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists from the Proceedings of the Technical Sessions, Vol. 74, 2005.
- EN 12697-31, *Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 31: Specimen Preparation by Gyrotory Compactor*, European Standard, 2007.
- El-Basyouny and Witczak M., *“Development of the Fatigue Cracking Models for the 2002 Design Guide,”* Presented at the 84<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2005.
- Finn, F., Saraf C.L., Kulkarni K., Nair K., Smith W., and Abdullah A., *Development of Pavement Structural Subsystems*, Final Report, Project 1-10B, 1977.
- Heukelom W. and Klomp A.J.G., *Road Design and Dynamic Loading*, Proceeding Association of Asphalt Paving Technologies, Vol. I, pp. 92-123, 1964.
- Hopman P.C, Pronk A.C, Kunst P.A.J.C, Molenaar A.A.A and Molenaar J.M.M, *Application of the viscoelastic properties of asphalt concrete*, Proceedings Seventh International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham UK ., Vol 1, pp 73-88, 1992
- Huang, Y.H. *Pavement Analysis and Design*. 1<sup>st</sup> Ed., Prentice Hall, Upper River Saddle, N.J., 1993.
- Λοϊζος Α. και Πλατή Χ., *“Οδοστρώματα”*, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- Λοϊζος Α., *“Ειδικά θέματα οδοστρωμάτων”*, Σημειώσεις μαθήματος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2012.
- Marwan F.A, Kenneth H.S and Jose M.R, *Evaluation of Flexible Pavements and Subgrades using the Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) Method*, Research Report 1175-7F, 1993.
- Mirza M.W and Witczak M.W, *Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp 393-430, 1995.

- Mohammad, L.N., Wu, Z., Myers, L., Cooper, S., and Abadie, C. *A Practical Look at Simple Performance Tests: Louisiana's Experience*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, 2005.
- Neifar, M. Di Benedetto, H. and Dongmo B., *Permanent Deformation and Complex Modulus: Two different characteristics from a unique test*. Proc. 6th Int. RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEBM'03, pp. 316 – 323, Zurich, 2003.
- NCHRP, *Design Guide: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, NCHRP Study Report 1-37A, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington D.C., 2004.
- Pellinen T.K and Witczak M.W., *Stress Dependent Master Curve Construction for Dynamic (Complex) Modulus*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 281-309, 2002.
- Pell, P. S., *"Pavement Materials"*, Sixth International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2 Proc., Ann Arbor, MI, 1987.
- Robbins M.M and Timm D.H., *Evaluation of Dynamic Modulus Predictive Equations for NCAT 3 Test Track Asphalt Mixtures*, TRB 90<sup>th</sup> Annual Meeting Compendium of papers, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
- Shell Pavement Design Manual, *Asphalt Pavements and Overlay for Road Traffic*. Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.
- Singh D., Zaman M. and Commuri S., *Evaluation of Predictive Models for Estimating Dynamic Modulus of HMA Mixes used in Oklahoma*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2210/2011, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
- Cross S.A., *Determination of Dynamic Modulus Master Curves for Oklahoma HMA Mixtures*, The Oklahoma Department of Transportation, 2007.
- The Asphalt Institute, *"Research and Development of The Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1) Ninth Edition,"* Research Report No. 82-2, 1982.
- Van der Poel C.A., *A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data*, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221-236, 1954.
- Witczak M.W. and Root R.E., *Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results*, ASTM special technical publication, No 561, American Society for Testing and Materials, pp. 67-94, 1974.
- Witczak M.W., Pellinen T. and El- Bayouny M., *Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt Concrete Fracture/Cracking*, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 767-778, 2002.

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

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

<http://www.pavementinteractive.org>

[www.dotd.louisiana.gov](http://www.dotd.louisiana.gov)

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

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

T \ f	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	34585	32834	30354	29780	27992	22960	T2
15	25811	23531	22118	17361	15955	12326	
20	13819	12269	11653	8915	7815	5526	
25	11236	10376	9183	6776	5814	3880	
37	8648	6748	5299	3493	2806	1710	
4	49348	47263	45686	42083	40366	36811	T6
15	28940	25972	25615	21147	19108	14977	
20	20974	19249	17829	15737	14296	10776	
25	14901	14810	13154	9613	8160	5553	
37	9424	7583	6563	4008	3248	1994	
4	49559	47014	45088	40505	38850	34171	T7
15	37037	33338	30456	24232	21176	14707	
20	25313	22624	21277	16731	15131	10492	
25	18875	17462	15635	13019	11450	7096	
37	10650	8346	6740	4128	3332	1550	
4	37040	35838	34930	33541	32679	29795	T8
15	27738	25150	23201	18585	16747	12127	
20	20499	18651	16738	14296	12369	8738	
25	18046	16675	14663	11583	9535	5931	
37	8689	7853	6748	4473	3681	2197	

Πίνακας Π2: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{1-37A}$  (MPa)

T \ f	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	27015	24773	23058	19090	17417	13714	T2
15	14742	12728	11293	8308	7187	4984	
20	10550	8854	7686	5374	4549	3008	
25	7357	6013	5117	3421	2845	1813	
37	2958	2301	1890	1178	956	585	
4	32369	29683	27629	22874	20869	16432	T6
15	17664	15251	13531	9954	8611	5972	
20	12641	10609	9210	6439	5451	3605	
25	8816	7205	6131	4100	3409	2173	
37	3545	2757	2265	1412	1146	701	
4	32250	29575	27530	22795	20799	16380	T7
15	17607	15203	13490	9926	8588	5957	
20	12603	10579	9184	6423	5438	3597	
25	8791	7186	6116	4091	3402	2169	
37	3537	2752	2261	1410	1144	700	
4	29950	27464	25563	21164	19309	15204	T8
15	16344	14111	12520	9210	7967	5526	
20	11696	9816	8522	5958	5044	3335	
25	8157	6666	5673	3793	3154	2010	
37	3280	2551	2096	1306	1060	649	

Πίνακας Π3: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{1-40D}$  (MPa)

T \ f	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	39366	33797	31611	27317	24524	14977	T2
15	25532	20458	17306	10208	7316	2471	
20	18671	14106	11231	5528	3663	1154	
25	12929	9169	6882	2945	1884	655	
37	4776	3015	2080	831	572	300	
4	50344	43187	40377	34857	31272	19044	T6
15	32567	26063	22026	12951	9264	3109	
20	23774	17933	14259	6988	4619	1445	
25	16428	11627	8712	3710	2366	818	
37	6033	3798	2614	1038	714	373	
4	47343	40675	38051	32891	29538	18073	T7
15	30752	24663	20876	12337	8852	3002	
20	22517	17030	13570	6696	4443	1406	
25	15614	11087	8330	3576	2290	800	
37	5789	3660	2528	1013	699	368	
4	42883	36847	34474	29806	26772	16389	T8
15	27869	22355	18927	11192	8034	2728	
20	20412	15443	12309	6078	4035	1278	
25	14160	10058	7560	3248	2082	728	
37	5256	3325	2297	922	636	335	



Πίνακας Π4: Τιμές του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας  $E_{Hirsch}$  (MPa)

T \ f	25	10	5	1	0,5	0,1	Δοκίμιο
4	12445	10685	10362	10006	9346	5930	T2
15	9271	7374	6253	3643	2550	778	
20	6676	4943	3890	1821	1163	355	
25	4432	3048	2239	894	557	242	
37	1429	869	589	271	230	209	
4	15182	13367	13024	12642	11922	7965	T6
15	11840	9688	8357	5070	3607	1108	
20	8864	6741	5393	2601	1668	469	
25	6092	4281	3181	1279	780	281	
37	2048	1242	828	331	260	221	
4	14320	12508	12169	11793	11087	7283	T7
15	11006	8923	7654	4580	3240	991	
20	8136	6132	4878	2328	1490	428	
25	5527	3855	2853	1143	700	267	
37	1831	1110	743	309	249	217	
4	13232	11443	11112	10746	10064	6478	T8
15	9987	8006	6822	4017	2823	861	
20	7269	5421	4285	2021	1291	384	
25	4871	3369	2482	991	613	252	
37	1587	964	649	286	237	212	

Πίνακας Π5: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 5Hz για τη διατομή ΔΤ2

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	1-40D	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Lab	Hirsch	1-37A	Hirsch	1-40D	1-37A	Lab
1	0,04	0,06	0,11	0,27	0,08	0,12	0,25	0,38	0,14	0,12	0,33	0,43	0,22	0,34	0,39	0,41	0,10	0,30	0,36	0,56
2	0,08	0,15	0,27	0,63	0,20	0,30	0,59	0,89	0,33	0,30	0,80	1,02	0,52	0,81	0,93	0,97	0,23	0,70	0,86	1,33
3	0,15	0,26	0,47	1,10	0,35	0,52	1,03	1,55	0,57	0,52	1,38	1,77	0,90	1,41	1,62	1,67	0,41	1,22	1,48	2,30
4	0,22	0,39	0,71	1,67	0,53	0,79	1,56	2,35	0,87	0,79	2,09	2,68	1,36	2,14	2,45	2,54	0,62	1,86	2,25	3,47
5	0,32	0,55	1,00	2,35	0,75	1,11	2,20	3,29	1,23	1,11	2,94	3,75	1,92	3,01	3,43	3,55	0,88	2,61	3,15	4,84
6	0,42	0,74	1,34	3,13	1,01	1,49	2,93	4,37	1,65	1,49	3,91	4,98	2,56	4,00	4,55	4,72	1,18	3,47	4,19	6,39
7	0,54	0,95	1,71	3,96	1,28	1,89	3,71	5,52	2,09	1,89	4,93	6,27	3,25	5,05	5,74	5,94	1,50	4,39	5,29	8,02
8	0,66	1,16	2,09	4,82	1,57	2,31	4,52	6,69	2,56	2,31	5,99	7,60	3,96	6,13	6,96	7,20	1,84	5,34	6,42	9,68
9	0,79	1,39	2,49	5,71	1,87	2,75	5,36	7,90	3,05	2,75	7,08	8,95	4,70	7,25	8,22	8,49	2,19	6,32	7,59	11,36
10	0,93	1,62	2,91	6,63	2,19	3,21	6,22	9,14	3,55	3,21	8,20	10,33	5,46	8,39	9,49	9,81	2,55	7,33	8,78	13,05
11	1,07	1,87	3,34	7,57	2,51	3,69	7,11	10,39	4,07	3,69	9,34	11,73	6,25	9,55	10,79	11,15	2,93	8,35	9,99	14,76
12	1,21	2,12	3,78	8,53	2,85	4,18	8,01	11,66	4,61	4,18	10,50	13,14	7,05	10,73	12,10	12,49	3,33	9,40	11,21	16,46
13	1,36	2,38	4,24	9,50	3,20	4,68	8,93	12,94	5,16	4,68	11,67	14,56	7,87	11,92	13,42	13,85	3,73	10,46	12,45	18,16
14	1,52	2,65	4,70	10,49	3,56	5,19	9,87	14,23	5,73	5,19	12,85	15,97	8,70	13,13	14,75	15,21	4,14	11,54	13,70	19,85
15	1,68	2,92	5,18	11,49	3,92	5,72	10,81	15,52	6,30	5,72	14,03	17,39	9,55	14,34	16,08	16,58	4,57	12,62	14,95	21,53
16	1,85	3,21	5,67	12,49	4,30	6,26	11,77	16,81	6,89	6,26	15,23	18,81	10,41	15,55	17,41	17,94	5,01	13,71	16,21	23,19
17	2,02	3,50	6,17	13,51	4,69	6,80	12,74	18,11	7,49	6,80	16,43	20,22	11,28	16,77	18,75	19,31	5,45	14,81	17,47	24,82
18	2,19	3,80	6,69	14,53	5,08	7,36	13,71	19,40	8,10	7,36	17,62	21,63	12,16	17,99	20,07	20,66	5,91	15,92	18,73	26,44
19	2,37	4,10	7,21	15,56	5,48	7,93	14,69	20,69	8,72	7,93	18,82	23,02	13,04	19,21	21,40	22,01	6,37	17,02	19,98	28,04
20	2,55	4,42	7,74	16,60	5,89	8,51	15,68	21,98	9,35	8,51	20,02	24,41	13,94	20,42	22,71	23,36	6,84	18,13	21,24	29,61

Πίνακας Π6: Τιμές του  $FC_{\text{Bottom}}$  (%) στα 10Hz για τη διατομή ΔΤ2

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-37A	1-40D	Hirsch	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Lab	1-37A	Hirsch	1-40D	Hirsch	1-37A	Lab	1-40D
1	0,06	0,10	0,16	0,26	0,12	0,22	0,34	0,45	0,29	0,30	0,41	0,61	0,29	0,38	0,43	0,72	0,17	0,40	0,51	0,59
2	0,14	0,24	0,39	0,62	0,29	0,53	0,82	1,08	0,70	0,72	0,98	1,44	0,70	0,91	1,02	1,69	0,41	0,95	1,20	1,41
3	0,24	0,43	0,67	1,08	0,50	0,93	1,42	1,86	1,21	1,26	1,69	2,48	1,21	1,58	1,76	2,92	0,71	1,64	2,08	2,43
4	0,37	0,65	1,03	1,64	0,76	1,41	2,15	2,82	1,84	1,91	2,57	3,75	1,84	2,39	2,67	4,40	1,08	2,48	3,14	3,67
5	0,52	0,92	1,45	2,30	1,08	1,98	3,02	3,94	2,58	2,68	3,59	5,22	2,58	3,35	3,73	6,11	1,53	3,48	4,39	5,12
6	0,70	1,23	1,94	3,07	1,44	2,64	4,01	5,23	3,44	3,56	4,77	6,89	3,44	4,45	4,95	8,04	2,04	4,62	5,81	6,76
7	0,89	1,56	2,46	3,88	1,84	3,35	5,07	6,57	4,35	4,50	6,01	8,63	4,35	5,61	6,23	10,04	2,59	5,82	7,30	8,46
8	1,10	1,91	3,00	4,73	2,25	4,09	6,16	7,96	5,29	5,48	7,29	10,40	5,29	6,81	7,55	12,06	3,16	7,06	8,83	10,20
9	1,31	2,28	3,57	5,60	2,67	4,85	7,27	9,37	6,27	6,48	8,59	12,19	6,27	8,04	8,90	14,09	3,76	8,32	10,38	11,96
10	1,53	2,66	4,16	6,50	3,12	5,63	8,42	10,81	7,26	7,51	9,92	13,99	7,26	9,29	10,27	16,12	4,38	9,62	11,95	13,74
11	1,76	3,05	4,77	7,43	3,58	6,44	9,58	12,26	8,29	8,56	11,27	15,80	8,29	10,56	11,66	18,14	5,01	10,93	13,53	15,52
12	2,00	3,46	5,39	8,37	4,06	7,27	10,77	13,72	9,32	9,63	12,63	17,60	9,32	11,85	13,06	20,15	5,67	12,26	15,12	17,29
13	2,24	3,88	6,03	9,32	4,54	8,11	11,96	15,19	10,38	10,72	14,00	19,39	10,38	13,15	14,47	22,12	6,34	13,59	16,70	19,05
14	2,50	4,31	6,68	10,29	5,05	8,97	13,17	16,66	11,44	11,81	15,38	21,16	11,44	14,45	15,88	24,07	7,02	14,93	18,29	20,81
15	2,76	4,75	7,35	11,28	5,56	9,84	14,38	18,13	12,52	12,92	16,75	22,91	12,52	15,76	17,30	25,99	7,72	16,28	19,86	22,54
16	3,03	5,20	8,02	12,27	6,08	10,72	15,60	19,59	13,61	14,04	18,13	24,65	13,61	17,08	18,71	27,87	8,43	17,62	21,43	24,25
17	3,30	5,66	8,71	13,27	6,62	11,61	16,82	21,05	14,70	15,16	19,50	26,35	14,70	18,39	20,11	29,71	9,15	18,97	22,98	25,94
18	3,59	6,14	9,41	14,28	7,16	12,51	18,04	22,49	15,80	16,28	20,87	28,03	15,80	19,70	21,51	31,52	9,88	20,31	24,52	27,61
19	3,88	6,62	10,12	15,29	7,71	13,42	19,26	23,93	16,90	17,41	22,23	29,69	16,90	21,00	22,90	33,28	10,62	21,64	26,04	29,24
20	4,17	7,11	10,84	16,31	8,28	14,33	20,48	25,35	18,00	18,54	23,59	31,31	18,00	22,30	24,28	35,00	11,37	22,97	27,54	30,86

Πίνακας Π7: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 5Hz για τη διατομή ΔΤ6

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D
1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
2	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04
3	0,01	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03	0,05	0,07	0,03	0,05	0,06	0,07	0,03	0,06	0,06	0,07
4	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02	0,03	0,05	0,08	0,04	0,05	0,07	0,10	0,05	0,08	0,09	0,11	0,04	0,09	0,10	0,10
5	0,01	0,02	0,03	0,08	0,03	0,04	0,07	0,11	0,05	0,07	0,10	0,14	0,07	0,11	0,13	0,15	0,06	0,13	0,14	0,15
6	0,02	0,02	0,04	0,10	0,04	0,06	0,10	0,15	0,07	0,09	0,14	0,19	0,10	0,15	0,18	0,20	0,08	0,17	0,19	0,20
7	0,02	0,03	0,05	0,13	0,06	0,07	0,13	0,19	0,09	0,12	0,18	0,24	0,12	0,19	0,23	0,26	0,10	0,22	0,24	0,25
8	0,03	0,04	0,07	0,16	0,07	0,09	0,16	0,24	0,11	0,15	0,22	0,30	0,15	0,23	0,28	0,32	0,12	0,26	0,29	0,31
9	0,04	0,04	0,08	0,19	0,08	0,11	0,19	0,28	0,13	0,18	0,26	0,36	0,18	0,27	0,34	0,38	0,14	0,32	0,35	0,37
10	0,04	0,05	0,09	0,23	0,10	0,13	0,22	0,33	0,16	0,21	0,31	0,42	0,21	0,32	0,40	0,45	0,17	0,37	0,41	0,43
11	0,05	0,06	0,11	0,26	0,11	0,14	0,25	0,38	0,18	0,24	0,35	0,48	0,25	0,37	0,46	0,52	0,19	0,43	0,47	0,50
12	0,05	0,07	0,12	0,30	0,13	0,16	0,29	0,43	0,20	0,27	0,40	0,55	0,28	0,42	0,52	0,59	0,22	0,49	0,54	0,57
13	0,06	0,08	0,14	0,34	0,14	0,18	0,32	0,49	0,23	0,30	0,45	0,62	0,32	0,47	0,58	0,66	0,25	0,55	0,61	0,64
14	0,07	0,09	0,15	0,38	0,16	0,21	0,36	0,54	0,26	0,34	0,51	0,69	0,35	0,53	0,65	0,74	0,28	0,61	0,67	0,71
15	0,08	0,10	0,17	0,42	0,18	0,23	0,40	0,60	0,28	0,37	0,56	0,76	0,39	0,58	0,72	0,82	0,31	0,68	0,75	0,79
16	0,08	0,11	0,19	0,46	0,20	0,25	0,44	0,66	0,31	0,41	0,62	0,84	0,43	0,64	0,79	0,90	0,34	0,74	0,82	0,87
17	0,09	0,12	0,20	0,50	0,22	0,27	0,48	0,72	0,34	0,45	0,67	0,91	0,47	0,70	0,87	0,98	0,37	0,81	0,90	0,95
18	0,10	0,13	0,22	0,54	0,23	0,30	0,52	0,79	0,37	0,49	0,73	0,99	0,51	0,76	0,94	1,07	0,40	0,88	0,98	1,03
19	0,11	0,14	0,24	0,59	0,25	0,32	0,57	0,85	0,40	0,53	0,79	1,08	0,55	0,83	1,02	1,16	0,44	0,96	1,06	1,12
20	0,12	0,15	0,26	0,64	0,27	0,35	0,61	0,92	0,43	0,57	0,86	1,16	0,60	0,89	1,10	1,25	0,47	1,03	1,14	1,20

Πίνακας Π8: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 10Hz για τη διατομή ΔΤ6

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D
1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
2	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04
3	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03	0,04	0,06	0,03	0,04	0,06	0,07	0,04	0,05	0,07	0,07
4	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02	0,02	0,05	0,07	0,03	0,04	0,07	0,09	0,05	0,06	0,09	0,11	0,06	0,08	0,11	0,11
5	0,01	0,02	0,03	0,07	0,03	0,03	0,06	0,10	0,05	0,05	0,09	0,13	0,07	0,09	0,12	0,15	0,09	0,12	0,15	0,15
6	0,02	0,02	0,04	0,10	0,04	0,05	0,09	0,13	0,06	0,07	0,13	0,17	0,09	0,12	0,17	0,20	0,12	0,16	0,20	0,20
7	0,02	0,03	0,05	0,13	0,05	0,06	0,11	0,17	0,08	0,09	0,16	0,22	0,11	0,15	0,21	0,26	0,16	0,20	0,25	0,26
8	0,03	0,03	0,06	0,16	0,06	0,07	0,14	0,21	0,10	0,12	0,20	0,27	0,14	0,18	0,26	0,32	0,19	0,24	0,31	0,32
9	0,03	0,04	0,07	0,19	0,07	0,08	0,16	0,25	0,12	0,14	0,23	0,32	0,16	0,22	0,31	0,38	0,23	0,29	0,37	0,38
10	0,04	0,05	0,08	0,22	0,09	0,10	0,19	0,30	0,14	0,16	0,27	0,38	0,19	0,25	0,36	0,44	0,27	0,34	0,44	0,45
11	0,05	0,05	0,10	0,25	0,10	0,11	0,22	0,34	0,16	0,19	0,32	0,43	0,22	0,29	0,42	0,51	0,31	0,39	0,50	0,52
12	0,05	0,06	0,11	0,29	0,11	0,13	0,25	0,39	0,18	0,21	0,36	0,49	0,25	0,33	0,47	0,58	0,35	0,45	0,57	0,59
13	0,06	0,07	0,12	0,32	0,13	0,15	0,28	0,44	0,21	0,24	0,41	0,56	0,28	0,37	0,53	0,65	0,40	0,50	0,65	0,66
14	0,06	0,08	0,14	0,36	0,14	0,16	0,31	0,49	0,23	0,27	0,45	0,62	0,32	0,42	0,60	0,73	0,44	0,56	0,72	0,74
15	0,07	0,09	0,15	0,40	0,16	0,18	0,35	0,54	0,26	0,29	0,50	0,69	0,35	0,46	0,66	0,81	0,49	0,62	0,80	0,82
16	0,08	0,10	0,17	0,44	0,17	0,20	0,38	0,59	0,28	0,32	0,55	0,75	0,39	0,51	0,73	0,89	0,54	0,68	0,88	0,90
17	0,09	0,10	0,18	0,48	0,19	0,22	0,42	0,65	0,31	0,35	0,60	0,82	0,42	0,56	0,79	0,97	0,59	0,75	0,96	0,98
18	0,09	0,11	0,20	0,52	0,21	0,24	0,46	0,70	0,33	0,39	0,65	0,90	0,46	0,61	0,86	1,06	0,64	0,81	1,04	1,07
19	0,10	0,12	0,22	0,57	0,22	0,26	0,49	0,76	0,36	0,42	0,71	0,97	0,50	0,66	0,93	1,14	0,70	0,88	1,13	1,16
20	0,11	0,13	0,23	0,61	0,24	0,28	0,53	0,82	0,39	0,45	0,77	1,05	0,54	0,71	1,01	1,23	0,75	0,95	1,22	1,25

Πίνακας Π9: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 5Hz για τη διατομή ΔΤ7

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D
1	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03	0,04	0,06	0,03	0,05	0,06	0,06	0,02	0,05	0,06	0,06
2	0,01	0,02	0,03	0,08	0,03	0,05	0,07	0,12	0,04	0,07	0,10	0,15	0,06	0,11	0,13	0,15	0,05	0,12	0,14	0,15
3	0,03	0,03	0,06	0,14	0,05	0,08	0,13	0,21	0,07	0,13	0,18	0,26	0,11	0,20	0,23	0,26	0,09	0,22	0,24	0,25
4	0,04	0,05	0,08	0,22	0,07	0,12	0,20	0,32	0,11	0,20	0,28	0,39	0,16	0,30	0,36	0,40	0,13	0,33	0,37	0,39
5	0,05	0,07	0,12	0,31	0,10	0,17	0,28	0,45	0,16	0,28	0,40	0,55	0,23	0,42	0,51	0,57	0,19	0,47	0,53	0,55
6	0,07	0,10	0,16	0,41	0,13	0,23	0,38	0,60	0,22	0,37	0,53	0,74	0,31	0,57	0,68	0,76	0,25	0,63	0,71	0,73
7	0,09	0,13	0,20	0,53	0,17	0,29	0,48	0,77	0,27	0,47	0,68	0,94	0,39	0,72	0,87	0,97	0,32	0,80	0,90	0,93
8	0,11	0,16	0,25	0,65	0,21	0,36	0,59	0,94	0,34	0,58	0,83	1,15	0,48	0,89	1,06	1,19	0,39	0,98	1,10	1,15
9	0,14	0,19	0,30	0,77	0,25	0,43	0,70	1,12	0,40	0,70	0,99	1,38	0,58	1,06	1,27	1,41	0,47	1,17	1,32	1,37
10	0,16	0,22	0,35	0,91	0,29	0,50	0,82	1,31	0,47	0,81	1,16	1,61	0,68	1,24	1,48	1,65	0,55	1,37	1,54	1,60
11	0,18	0,25	0,41	1,04	0,34	0,58	0,95	1,51	0,54	0,94	1,33	1,85	0,78	1,43	1,70	1,90	0,63	1,58	1,77	1,84
12	0,21	0,29	0,46	1,19	0,38	0,66	1,08	1,72	0,62	1,07	1,51	2,10	0,89	1,62	1,93	2,16	0,72	1,79	2,01	2,09
13	0,24	0,32	0,52	1,33	0,43	0,74	1,21	1,93	0,70	1,20	1,70	2,36	1,00	1,82	2,17	2,42	0,81	2,01	2,26	2,35
14	0,26	0,36	0,58	1,49	0,48	0,83	1,35	2,15	0,78	1,34	1,90	2,63	1,11	2,03	2,42	2,70	0,90	2,24	2,52	2,61
15	0,29	0,40	0,64	1,64	0,53	0,91	1,49	2,37	0,86	1,48	2,10	2,90	1,23	2,25	2,67	2,98	0,99	2,48	2,78	2,88
16	0,32	0,44	0,70	1,80	0,58	1,00	1,64	2,61	0,94	1,62	2,30	3,19	1,35	2,47	2,93	3,27	1,09	2,72	3,05	3,16
17	0,35	0,48	0,77	1,97	0,64	1,10	1,79	2,85	1,03	1,77	2,51	3,48	1,48	2,69	3,20	3,57	1,19	2,97	3,33	3,45
18	0,38	0,52	0,84	2,14	0,69	1,19	1,95	3,09	1,12	1,93	2,73	3,77	1,60	2,92	3,47	3,87	1,30	3,22	3,61	3,75
19	0,41	0,56	0,91	2,32	0,75	1,29	2,11	3,34	1,22	2,09	2,95	4,08	1,74	3,16	3,75	4,18	1,41	3,48	3,90	4,05
20	0,45	0,61	0,98	2,50	0,81	1,39	2,27	3,60	1,31	2,25	3,18	4,39	1,87	3,40	4,04	4,50	1,52	3,75	4,20	4,36

Πίνακας Π10: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 10Hz για τη διατομή ΔΤ7

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C				
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D	
1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
2	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,04
3	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,03	0,04	0,06	0,02	0,04	0,06	0,07	0,07	0,04	0,05	0,07	0,07
4	0,01	0,01	0,02	0,06	0,02	0,03	0,05	0,08	0,03	0,04	0,07	0,09	0,04	0,06	0,09	0,11	0,11	0,06	0,08	0,11	0,11
5	0,01	0,02	0,03	0,08	0,02	0,04	0,06	0,11	0,04	0,06	0,09	0,13	0,05	0,09	0,12	0,15	0,15	0,08	0,11	0,15	0,15
6	0,02	0,02	0,04	0,11	0,03	0,05	0,09	0,14	0,05	0,08	0,13	0,18	0,07	0,12	0,17	0,20	0,20	0,11	0,15	0,20	0,21
7	0,02	0,03	0,05	0,14	0,04	0,06	0,11	0,18	0,07	0,10	0,16	0,23	0,09	0,15	0,21	0,26	0,26	0,14	0,19	0,25	0,26
8	0,03	0,04	0,06	0,17	0,05	0,08	0,14	0,22	0,08	0,12	0,20	0,28	0,11	0,19	0,26	0,32	0,32	0,17	0,23	0,31	0,32
9	0,03	0,04	0,07	0,20	0,06	0,09	0,16	0,27	0,10	0,15	0,23	0,34	0,14	0,22	0,31	0,38	0,38	0,20	0,27	0,37	0,38
10	0,04	0,05	0,08	0,24	0,07	0,11	0,19	0,31	0,11	0,17	0,27	0,40	0,16	0,26	0,36	0,45	0,45	0,24	0,32	0,44	0,45
11	0,05	0,06	0,10	0,27	0,08	0,12	0,22	0,36	0,13	0,20	0,32	0,46	0,18	0,30	0,42	0,52	0,52	0,28	0,37	0,50	0,52
12	0,05	0,07	0,11	0,31	0,09	0,14	0,25	0,41	0,15	0,22	0,36	0,52	0,21	0,34	0,47	0,59	0,59	0,31	0,42	0,57	0,59
13	0,06	0,08	0,12	0,35	0,10	0,16	0,28	0,46	0,17	0,25	0,41	0,58	0,24	0,39	0,53	0,66	0,66	0,35	0,47	0,65	0,66
14	0,07	0,09	0,14	0,39	0,11	0,18	0,31	0,52	0,19	0,28	0,45	0,65	0,26	0,43	0,60	0,74	0,74	0,39	0,53	0,72	0,74
15	0,07	0,10	0,15	0,43	0,12	0,20	0,35	0,57	0,21	0,31	0,50	0,72	0,29	0,48	0,66	0,82	0,82	0,44	0,58	0,80	0,82
16	0,08	0,10	0,17	0,47	0,14	0,22	0,38	0,63	0,23	0,34	0,55	0,79	0,32	0,53	0,73	0,90	0,90	0,48	0,64	0,88	0,90
17	0,09	0,11	0,18	0,52	0,15	0,24	0,42	0,69	0,25	0,38	0,60	0,87	0,35	0,58	0,79	0,98	0,98	0,52	0,70	0,96	0,98
18	0,09	0,12	0,20	0,56	0,16	0,26	0,46	0,75	0,27	0,41	0,65	0,94	0,38	0,63	0,86	1,07	1,07	0,57	0,76	1,04	1,07
19	0,10	0,14	0,22	0,61	0,18	0,28	0,49	0,81	0,30	0,44	0,71	1,02	0,41	0,68	0,93	1,15	1,15	0,62	0,82	1,13	1,16
20	0,11	0,15	0,23	0,66	0,19	0,30	0,53	0,88	0,32	0,48	0,77	1,10	0,45	0,73	1,01	1,25	1,25	0,67	0,89	1,22	1,25

Πίνακας Π11: Τιμές του  $FC_{\text{Bottom}}$  (%) στα 5Hz για τη διατομή ΔΤ8

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D
1	0,03	0,03	0,05	0,13	0,05	0,07	0,11	0,18	0,08	0,12	0,16	0,21	0,09	0,17	0,20	0,21	0,06	0,18	0,19	0,20
2	0,07	0,08	0,12	0,30	0,13	0,17	0,27	0,43	0,19	0,28	0,38	0,51	0,22	0,41	0,47	0,49	0,14	0,42	0,46	0,48
3	0,13	0,13	0,21	0,53	0,22	0,30	0,48	0,75	0,34	0,48	0,65	0,89	0,39	0,71	0,82	0,85	0,24	0,73	0,79	0,83
4	0,19	0,21	0,31	0,81	0,34	0,46	0,73	1,14	0,51	0,74	1,00	1,35	0,59	1,08	1,25	1,30	0,37	1,12	1,21	1,26
5	0,27	0,29	0,44	1,14	0,48	0,65	1,02	1,61	0,72	1,04	1,40	1,90	0,83	1,52	1,76	1,83	0,52	1,57	1,70	1,78
6	0,37	0,39	0,60	1,53	0,65	0,88	1,37	2,16	0,97	1,39	1,88	2,54	1,12	2,03	2,35	2,44	0,69	2,10	2,27	2,38
7	0,47	0,50	0,76	1,94	0,83	1,12	1,74	2,73	1,23	1,77	2,38	3,22	1,42	2,58	2,98	3,09	0,88	2,67	2,88	3,01
8	0,57	0,61	0,93	2,37	1,01	1,37	2,13	3,34	1,51	2,16	2,91	3,92	1,74	3,15	3,64	3,77	1,08	3,26	3,52	3,68
9	0,69	0,73	1,11	2,82	1,21	1,63	2,54	3,97	1,80	2,57	3,46	4,66	2,08	3,74	4,32	4,48	1,29	3,87	4,18	4,37
10	0,80	0,86	1,30	3,29	1,41	1,91	2,96	4,62	2,10	3,00	4,04	5,41	2,43	4,36	5,02	5,21	1,51	4,51	4,86	5,08
11	0,92	0,99	1,50	3,78	1,63	2,20	3,40	5,29	2,42	3,45	4,63	6,19	2,79	4,99	5,75	5,96	1,74	5,16	5,56	5,81
12	1,05	1,12	1,70	4,28	1,85	2,49	3,85	5,98	2,74	3,91	5,23	6,99	3,16	5,64	6,49	6,73	1,97	5,84	6,28	6,56
13	1,18	1,26	1,91	4,79	2,07	2,80	4,32	6,68	3,08	4,38	5,85	7,80	3,54	6,31	7,25	7,52	2,21	6,52	7,02	7,33
14	1,32	1,40	2,13	5,32	2,31	3,11	4,80	7,40	3,42	4,86	6,49	8,63	3,94	6,99	8,03	8,31	2,47	7,23	7,77	8,11
15	1,46	1,55	2,35	5,86	2,55	3,44	5,28	8,13	3,78	5,35	7,14	9,47	4,35	7,69	8,81	9,13	2,72	7,94	8,54	8,91
16	1,60	1,71	2,58	6,41	2,80	3,77	5,78	8,87	4,14	5,86	7,80	10,32	4,76	8,39	9,61	9,95	2,99	8,67	9,31	9,71
17	1,75	1,86	2,81	6,97	3,06	4,11	6,29	9,62	4,52	6,38	8,47	11,18	5,19	9,11	10,42	10,79	3,26	9,41	10,10	10,53
18	1,90	2,03	3,06	7,54	3,32	4,46	6,81	10,39	4,90	6,90	9,15	12,05	5,62	9,84	11,24	11,63	3,54	10,16	10,90	11,36
19	2,06	2,19	3,30	8,12	3,59	4,81	7,34	11,16	5,28	7,44	9,84	12,93	6,06	10,58	12,07	12,49	3,82	10,92	11,71	12,19
20	2,22	2,36	3,56	8,71	3,86	5,17	7,88	11,95	5,68	7,98	10,54	13,82	6,51	11,32	12,91	13,35	4,12	11,68	12,52	13,04



Πίνακας Π12: Τιμές του  $FC_{Bottom}$  (%) στα 10Hz για τη διατομή ΔΤ8

Έτος	4°C				15°C				20°C				25°C				37°C			
	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Lab	1-40D	1-37A	Hirsch	Hirsch	Lab	1-37A	1-40D
1	0,03	0,03	0,04	0,13	0,05	0,06	0,10	0,16	0,07	0,09	0,14	0,20	0,11	0,14	0,18	0,22	0,10	0,16	0,21	0,22
2	0,07	0,07	0,11	0,30	0,12	0,14	0,24	0,39	0,17	0,22	0,34	0,48	0,27	0,33	0,44	0,52	0,24	0,38	0,50	0,52
3	0,12	0,12	0,19	0,52	0,20	0,24	0,42	0,68	0,30	0,38	0,59	0,84	0,47	0,57	0,76	0,90	0,41	0,67	0,86	0,90
4	0,19	0,19	0,29	0,79	0,31	0,37	0,64	1,04	0,45	0,59	0,89	1,27	0,72	0,87	1,16	1,37	0,63	1,02	1,31	1,37
5	0,26	0,27	0,40	1,12	0,44	0,53	0,91	1,46	0,64	0,83	1,26	1,79	1,01	1,23	1,63	1,93	0,88	1,44	1,84	1,93
6	0,35	0,36	0,54	1,50	0,59	0,71	1,22	1,96	0,86	1,11	1,69	2,39	1,35	1,64	2,18	2,58	1,18	1,92	2,46	2,57
7	0,45	0,45	0,69	1,90	0,75	0,90	1,55	2,48	1,09	1,41	2,14	3,03	1,72	2,08	2,76	3,27	1,50	2,44	3,12	3,26
8	0,55	0,56	0,85	2,33	0,92	1,11	1,89	3,03	1,34	1,73	2,62	3,70	2,10	2,55	3,38	3,99	1,84	2,98	3,81	3,98
9	0,66	0,67	1,01	2,77	1,10	1,32	2,25	3,61	1,60	2,06	3,12	4,39	2,51	3,03	4,01	4,73	2,19	3,54	4,52	4,72
10	0,77	0,78	1,18	3,23	1,28	1,54	2,63	4,20	1,87	2,41	3,63	5,11	2,92	3,53	4,67	5,50	2,56	4,13	5,26	5,49
11	0,89	0,90	1,36	3,71	1,48	1,78	3,02	4,81	2,15	2,77	4,17	5,85	3,36	4,05	5,34	6,29	2,94	4,73	6,01	6,28
12	1,01	1,02	1,54	4,20	1,68	2,02	3,43	5,44	2,44	3,14	4,72	6,60	3,80	4,59	6,04	7,10	3,34	5,35	6,79	7,08
13	1,14	1,15	1,74	4,70	1,88	2,27	3,84	6,09	2,74	3,52	5,28	7,37	4,26	5,14	6,75	7,92	3,74	5,98	7,58	7,90
14	1,27	1,28	1,93	5,22	2,10	2,52	4,27	6,75	3,05	3,91	5,86	8,16	4,73	5,70	7,47	8,76	4,16	6,63	8,39	8,74
15	1,40	1,42	2,14	5,75	2,32	2,79	4,71	7,42	3,36	4,32	6,45	8,95	5,22	6,27	8,21	9,61	4,58	7,29	9,21	9,59
16	1,54	1,56	2,35	6,29	2,55	3,06	5,15	8,10	3,69	4,73	7,05	9,77	5,71	6,86	8,96	10,48	5,02	7,97	10,04	10,45
17	1,68	1,70	2,56	6,84	2,78	3,33	5,61	8,80	4,02	5,15	7,66	10,59	6,21	7,46	9,72	11,35	5,47	8,65	10,88	11,33
18	1,83	1,85	2,78	7,40	3,02	3,62	6,08	9,50	4,36	5,58	8,28	11,42	6,73	8,07	10,49	12,23	5,92	9,35	11,73	12,21
19	1,98	2,00	3,01	7,98	3,26	3,91	6,56	10,22	4,71	6,02	8,92	12,26	7,25	8,68	11,27	13,12	6,39	10,05	12,59	13,10
20	2,14	2,15	3,24	8,56	3,51	4,21	7,04	10,94	5,07	6,47	9,56	13,11	7,78	9,31	12,06	14,02	6,86	10,77	13,46	13,99

