



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ**



Νάσης Ευάγγελος

Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα 2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αισθάνομαι έντονα την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους εκείνους που συνέβαλαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την ανάθεση και την επίβλεψη της εργασίας καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία και την ειλικρινή υποστήριξή της.

Παράλληλα επιθυμώ να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Μουζάκη, Επιστημονικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων, για την πολύτιμη βοήθεια σε οποιοδήποτε προβληματισμό μου κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα πολύ κοντινά μου πρόσωπα, τις φίλες και τους φίλους μου για την συνεχή στήριξή τους, κυρίως όμως την οικογένεια μου για τις θυσίες που έχουν καταβάλλει για να υποστηρίξουν την προσπάθειά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διηλεκτρική σταθερά αποτελεί μία θεμελιώδη γεωφυσική ιδιότητα των υλικών και χρησιμοποιείται από τους πολιτικούς μηχανικούς σε γεωτεχνικές εφαρμογές, ελέγχους δομικών υλικών και οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο των οδοστρωμάτων, αξιοποιείται ως χαρακτηριστικό αξιολόγησης των ασφαλτομιγμάτων αλλά και για την καταγραφή παχών των στρώσεων του οδοστρώματος. Η συνεχή χρήση της διηλεκτρικής σταθεράς έχει δημιουργήσει την ανάγκη για διερεύνηση παραγόντων που ενδέχεται να επιδρούν στον καθορισμό της. Μέσα από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψαν αρκετοί παράγοντες επίδρασης, όπως η παρουσία νερού, τα κενά αέρα κ.α. Τα τελευταία χρόνια εισήλθε στο προσκήνιο και η επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτή, με πολλές έρευνες να την εξετάζουν.

Ως εκ τούτου, η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά. Αρχικά, διεξάγεται μια σφαιρική παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων. Κατόπιν, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά για τη διηλεκτρική σταθερά των ασφαλτομιγμάτων, τους τρόπους μέτρησης και τους παράγοντες επίδρασής της, δίνοντας έμφαση στην επίδραση της θερμοκρασίας. Εν συνεχεία, με γνώμονα τα συμπεράσματα προηγούμενων ερευνών, διεξάγεται εργαστηριακό πείραμα για την καλύτερη κατανόηση της διηλεκτρικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων όταν υπόκεινται σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Τέλος, με τη συλλογή δεδομένων από το εργαστηριακό πείραμα, διεξάγεται στατιστική ανάλυση, όπου σε συνδυασμό με έναν έλεγχο πρακτικής σημαντικότητας αξιολογούνται τα αποτελέσματα. Συνοψίζοντας, μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων και η παράθεση προτάσεων για τη σαφέστερη αντίληψη του θέματος.

Λέξεις κλειδιά: Ασφαλτόμιγμα, διηλεκτρική σταθερά, θερμοκρασία, μη καταστρεπτικές μέθοδοι, GPR.

ABSTRACT

The dielectric constant is a fundamental electromagnetic property of materials and is used by civil engineers in geotechnical applications, structural material and pavement testing. In the context of pavements, it is exploited as a characteristic for the evaluation of asphalt mixtures and for the defining of pavement layers thickness. Its continuous use has created the need to investigate factors that may influence its determination. Through investigations carried out, several influencing factors such as the presence of water, air voids, etc. have emerged. In recent years, the effect of temperature on it has entered the spotlight, with many studies examining this fact.

Therefore, this thesis focuses on investigating the effect of temperature on the dielectric constant. Initially, a global presentation of the basic characteristics of asphalt mixtures is carried out. Then, an extensive report on the dielectric constant of bituminous mixtures, the ways of measurement and the influencing factors is carried out, with emphasis on the effect of temperature. Consequently, based on the conclusions of previous studies, a laboratory experiment is conducted to better understand the dielectric behavior of bituminous mixtures when subjected to temperature changes. Finally, by collecting data from the laboratory experiment, a statistical analysis is carried out where, in combination with a practical significance test, the results are evaluated. In summary, after the presentation of the results, conclusions are drawn and suggestions are made for a clearer understanding of the subject.

Key words: Asphalt mixture, dielectric constant, temperature, non-destructive methods, GPR.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία	2
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας	2
2.	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ	4
2.1	Γενικά	4
2.2	Μελέτη σύνθεσης Marshall	7
2.2.1	Γενικά.....	7
2.2.2	Αδρανή υλικά	7
2.2.3	Άσφαλτος.....	9
2.2.4	Παραγωγή δοκιμών.....	12
2.2.5	Ευστάθεια και παραμόρφωση	13
2.3	Ογκομετρικές ιδιότητες	15
2.4	Μηχανικά χαρακτηριστικά	19
2.5	Τύποι ασφαλτομιγμάτων.....	22
2.5.1	Γενικά.....	22
2.5.2	Θερμά ασφαλτομίγματα	23
2.5.3	Ψυχρά ασφαλτομίγματα	24
2.5.4	Μετρίως θερμά ασφαλτομίγματα.....	24
3.	ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	25
3.1	Γενικά	25
3.2	Διηλεκτρικές σταθερές ασφαλτομιγμάτων	27
3.3	Μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς	28
3.3.1	Μετρήσεις στο εργαστήριο	28
3.3.2	Μετρήσεις στο πεδίο.....	30
3.4	Παράγοντες επίδρασης στον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς	35
3.5	Θερμοκρασία και διηλεκτρική σταθερά.....	36
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	47
4.1	Περιγραφή δεδομένων-διαδικασίας.....	47
4.1.1	Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων.....	47
4.1.2	Διαδικασία μετρήσεων.....	51
4.1.3	Αποτελέσματα μετρήσεων	53
4.1.4	Ανάλυση αποτελεσμάτων μέτρησης.....	54

4.2	Ανάλυση δεδομένων	61
4.2.1	Επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά.....	61
4.2.2	Έλεγχος σημαντικότητας διαφορών λόγω θερμοκρασίας.....	64
4.2.3	Έλεγχος πρακτικής σημασίας των παρατηρούμενων μεταβολών.....	73
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Διατομή ημι-άκαμπτου/ημι- εύκαμπτου οδοστρώματος.....	5
Εικόνα 2.2: Αδρανή υλικά και ασφαλτος	6
Εικόνα 2.3: Στρώσεις από ασφαλτόμιγμα.....	6
Εικόνα 2.4: Συλλεκτά αδρανή (άνω) και θραυστά αδρανή (κάτω).....	8
Εικόνα 2.5: φυσική (α, β) και τεχνητή (γ) ασφαλτος	10
Εικόνα 2.6: Δοκιμή Μάλθωσης	11
Εικόνα 2.7: Δοκιμή Διείσδυσης	12
Εικόνα 2.8: Συσκευή κρουστικής συμπίκνωσης.....	13
Εικόνα 2.9: Διαδικασία προσδιορισμού ευστάθειας και παραμόρφωσης με την συσκευή Marshall.....	14
Εικόνα 2.10: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος	15
Εικόνα 2.11: Σχέση μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος-διάρκεια φόρτισης	19
Εικόνα 2.12: Σχέση μέτρου δυσκαμψίας με θερμοκρασία.....	20
Εικόνα 2.13: Νομογράφημα υπολογισμού του S_m	21
Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της μεθόδου του ομοαξονικού ηλεκτροδίου	28
Εικόνα 3.2: Διάταξη συσκευής Percometer και είδη ανιχνευτών	29
Εικόνα 3.3: Σύστημα GPR	30
Εικόνα 3.4: Κύρια στοιχεία ενός συστήματος GPR	31
Εικόνα 3.5: Τυπικές ανακλάσεις κυμάτων GPR από ένα ασφατικό οδόστρωμα.....	34
Εικόνα 3.6 Διαδρομή διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την μέθοδο XCOMP.....	35
Εικόνα 3.7: Πλατφόρμα μέτρησης διηλεκτρικής σταθεράς.....	40
Εικόνα 3.8: Agilent P5001A network analyzer	41
Εικόνα 3.9: Network Analyzer E5071C (Keysight Technologies)	43
Εικόνα 3.10: Εξάρτημα DETA.....	45
Εικόνα 3.11: Μετρητής Agilent LCR E4980A	45
Εικόνα 4.1: Δοκίμια Marshall - Ανδεσίτης.....	47
Εικόνα 4.2: Δοκίμια Marshall – Σκωρία.....	48
Εικόνα 4.3: Γραφική παράσταση κοκκομετρικής διαβάθμισης- Ανδεσίτης	49
Εικόνα 4.4: Γραφική παράσταση κοκκομετρικής διαβάθμισης – Σκωρία	51
Εικόνα 4.5: Διαδικασία μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς	52
Εικόνα 4.6: Ρύθμιση θερμοκρασίας στον κλίβανο	52
Εικόνα 4.7: Θηκόγραμμα για 0°C	55
Εικόνα 4.8: Θηκόγραμμα για 5°C	56
Εικόνα 4.9: Θηκόγραμμα για 10°C	56
Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα για 15°C	57
Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα για 20°C	57
Εικόνα 4.12: Θηκόγραμμα για 25°C	58
Εικόνα 4.13: Θηκόγραμμα για 30°C	58
Εικόνα 4.14: Θηκόγραμμα για 35°C	59
Εικόνα 4.15: Θηκόγραμμα για 40°C	59
Εικόνα 4.16: Θηκόγραμμα για το ασφαλτόμιγμα - Ανδεσίτης	60
Εικόνα 4.17: Θηκόγραμμα για το ασφαλτόμιγμα – Σκωρία	61

Εικόνα 4.18: Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς με τη θερμοκρασία - Ανδεσίτης	62
Εικόνα 4.19: Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς με θερμοκρασία – Σκωρία.....	62
Εικόνα 4.20: Γραμμικές Παλινδρομήσεις – Σκωρία	63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ για τα χαρακτηριστικά ασφαλτικού σκυροδέματος κλειστού τύπου	23
Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ για τα χαρακτηριστικά ασφαλτικού σκυροδέματος ανοιχτού τύπου	23
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα σχεδιασμού σύνθεσης του ασφαλτομίγματος - Ανδεσίτη	48
Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφαλτομίγματος – Ανδεσίτης	49
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα σχεδιασμού σύνθεσης του ασφαλτομίγματος - Σκωρία	50
Πίνακας 4.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφαλτομίγματος – Σκωρία	50
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ασφαλτόμιγμα – Ανδεσίτης	53
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ασφαλτόμιγμα – Σκωρία	54
Πίνακας 4.7: t-test για ζεύγος 0°C-20°C.....	64
Πίνακας 4.8: t-test για ζεύγος 5°C-20°C.....	65
Πίνακας 4.9: t-test για ζεύγος 10°C-20°C.....	65
Πίνακας 4.10: t-test για ζεύγος 15°C-20°C.....	66
Πίνακας 4.11: t-test για ζεύγος 25°C-20°C.....	66
Πίνακας 4.12: t-test για ζεύγος 30°C-20°C.....	67
Πίνακας 4.13: t-test για ζεύγος 35°C-20°C.....	67
Πίνακας 4.14: t-test για ζεύγος 40°C-20°C.....	68
Πίνακας 4.15: t-test για ζεύγος 0°C-20°C.....	68
Πίνακας 4.16: t-test για ζεύγος 5°C-20°C.....	69
Πίνακας 4.17: t-test για ζεύγος 10°C-20°C.....	69
Πίνακας 4.18: t-test για ζεύγος 15°C-20°C.....	70
Πίνακας 4.19: t-test για ζεύγος 25°C-20°C.....	70
Πίνακας 4.20: t-test για ζεύγος 30°C-20°C.....	71
Πίνακας 4.21: t-test για ζεύγος 35°C-20°C.....	71
Πίνακας 4.22: t-test για ζεύγος 40°C-20°C.....	72
Πίνακας 4.23: Εύρος τιμών συντελεστή Cohen (d)	73
Πίνακας 4.24: Συντελεστές του Cohen για όλα τα ζεύγη.....	74
Πίνακας 4.25: Συγκεντρωτικός πίνακας – Ανδεσίτης.....	74
Πίνακας 4.26: Συγκεντρωτικός πίνακας – Σκωρία	74

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Το οδόστρωμα αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία των οδικών υποδομών, σχεδιασμένο ώστε να εξασφαλίζει την ασφαλή και άνετη κυκλοφορία των οχημάτων. Η δομική επάρκειά του διασφαλίζει τη μεταφορά των φορτίων κυκλοφορίας στο υπέδαφος, με ομοιόμορφο τρόπο, ώστε να μην υπάρχει υπερβολική καταπόνηση ή πρόωρη αστοχία του. Επίσης, εκτός από τη δομική κατάσταση του, πρέπει να διατηρεί τη λειτουργική ικανότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της προκαθορισμένης περιόδου σχεδιασμού, με κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά την αντιστοιχιστικότητα και την ομαλότητα. Τα οδοστρώματα διακρίνονται σε ασφαλτικά, όπου οι ανώτερες στρώσεις είναι κατασκευασμένες από ασφαλτόμιγμα και σε δύσκαμπτα, όπου η ανώτερη στρώση είναι από σκυρόδεμα.

Κομβικό ρόλο στην απόδοση ενός ασφαλτικού οδοστρώματος διαδραματίζει το ασφαλτόμιγμα, το οποίο αποτελεί ένα σύνθετο υλικό κατασκευής των ανώτερων στρώσεών του. Η σύσταση του ασφαλτομίγματος περιλαμβάνει την άσφαλτο και τα αδρανή υλικά. Ο σχεδιασμός του ασφαλτομίγματος στοχεύει στη διαμόρφωση ενός τελικού προϊόντος που να διαθέτει τις εξής ιδιότητες: αντοχή, ευστάθεια, αντίσταση σε κόπωση, ανθεκτικότητα, εργασιμότητα και αντίσταση στην επίδραση του νερού. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, κρίσιμες είναι οι ογκομετρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος.

Οι ογκομετρικές ιδιότητες του επηρεάζουν την απόδοση του ασφαλτομίγματος καθώς και τη συμπεριφορά του. Αυτές περιλαμβάνουν το ποσοστό κενών αέρα, την περιεκτικότητα σε άσφαλτο, την πυκνότητα και τα κενά στον σκελετό των αδρανών. Σημαντικότερο ογκομετρικό στοιχείο θεωρείται το ποσοστό κενών αέρα, καθότι εκείνο συμβάλλει στη μηχανική αντοχή και την ανθεκτικότητα του ασφαλτομίγματος. Γενικά, οι ογκομετρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος μπορούν να χαρακτηριστούν ως δείκτης ποιότητας λόγω των πληροφοριών που μπορούν να προσφέρουν για τη σύνθεσή του.

Πέραν όμως των ογκομετρικών ιδιοτήτων, ένα ασφαλτόμιγμα μπορεί να χαρακτηριστεί και από τη διηλεκτρική συμπεριφορά του. Η διηλεκτρική σταθερά συχνά χρησιμοποιείται ως δείκτης ποιότητας για την αξιολόγηση τόσο νέων όσο και υφιστάμενων ασφαλτικών στρώσεων. Η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός

ασφαλτομίγματος επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε άσφαλτο, το ποσοστό κενών αέρα και την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών. Πρόσφατα όμως, αρκετές έρευνες έχουν ασχοληθεί με τη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, προκειμένου να εξετάσουν το μέγεθος της επίδρασης.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά και την επίδραση που ενδέχεται να έχει στην αξιολόγηση των οδοστρωμάτων .

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίτευξη του υπόψη στόχου περιλαμβάνει αφενός τη βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό την καταγραφή της διεθνούς εμπειρίας στο εν λόγω θέμα και αφετέρου, τη διεξαγωγή εργαστηριακού πειράματος. Συγκεκριμένα για το εργαστηριακό πείραμα, υλοποιήθηκαν μετρήσεις για τον καθορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς σε τριάντα έξι (36) ασφαλτικά δοκίμια από δύο (2) διαφορετικά ασφαλτομίγματα σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τέλος, μέσω στατιστικών αναλύσεων και έλεγχο πρακτικής σημαντικότητας, προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα που υποστηρίζουν το ενδεχόμενο της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά των ασφαλτομιγμάτων.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα ασφαλτομίγματα, περιγράφοντας τη διαδικασία σύνθεσης ασφαλτομίγματος κατά Marshall και αναλύοντας γενικά τα χαρακτηριστικά τους, τις βασικές ιδιότητες του καθώς και τα είδη τους.

Το **κεφάλαιο 3** αφορά στη διηλεκτρική σταθερά των ασφαλτομιγμάτων και πιο συγκεκριμένα τους τρόπους μέτρησής της, όπως και τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επιπλέον, παρουσιάζονται μοντέλα από τη διεθνή βιβλιογραφία που συσχετίζουν τη διηλεκτρική σταθερά με τη θερμοκρασία.

Στο **κεφάλαιο 4** περιγράφεται η πειραματική διαδικασία συσχέτισης θερμοκρασίας και διηλεκτρικής σταθεράς, βάσει εργαστηριακών μετρήσεων.

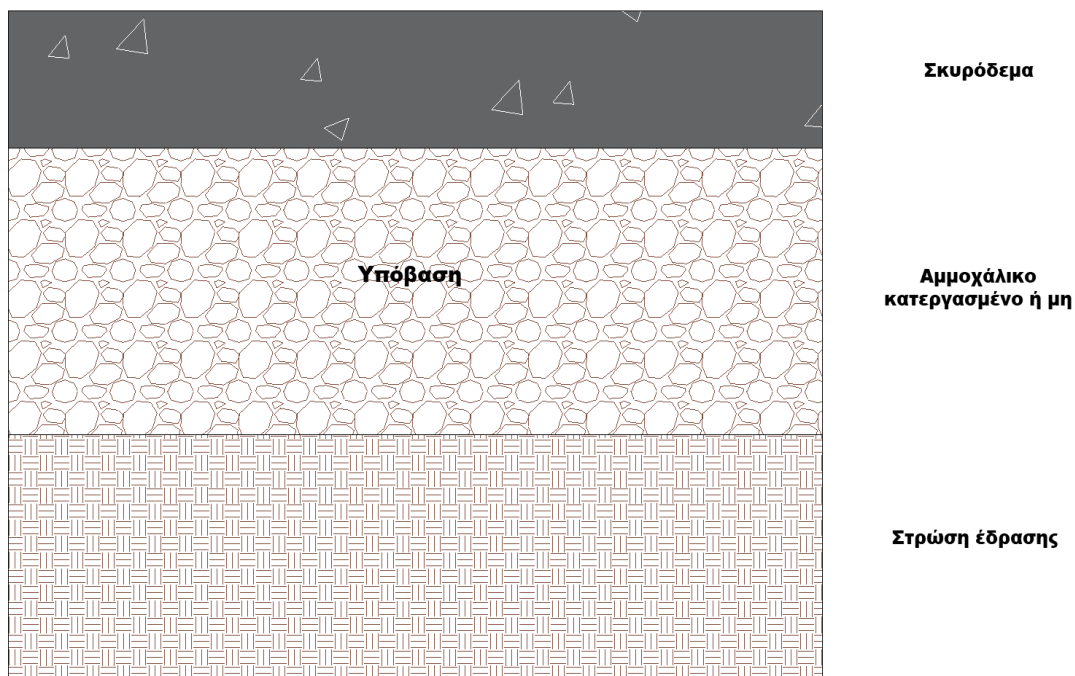
Στο **κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται προτάσεις περαιτέρω έρευνας.

Τέλος, το **κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

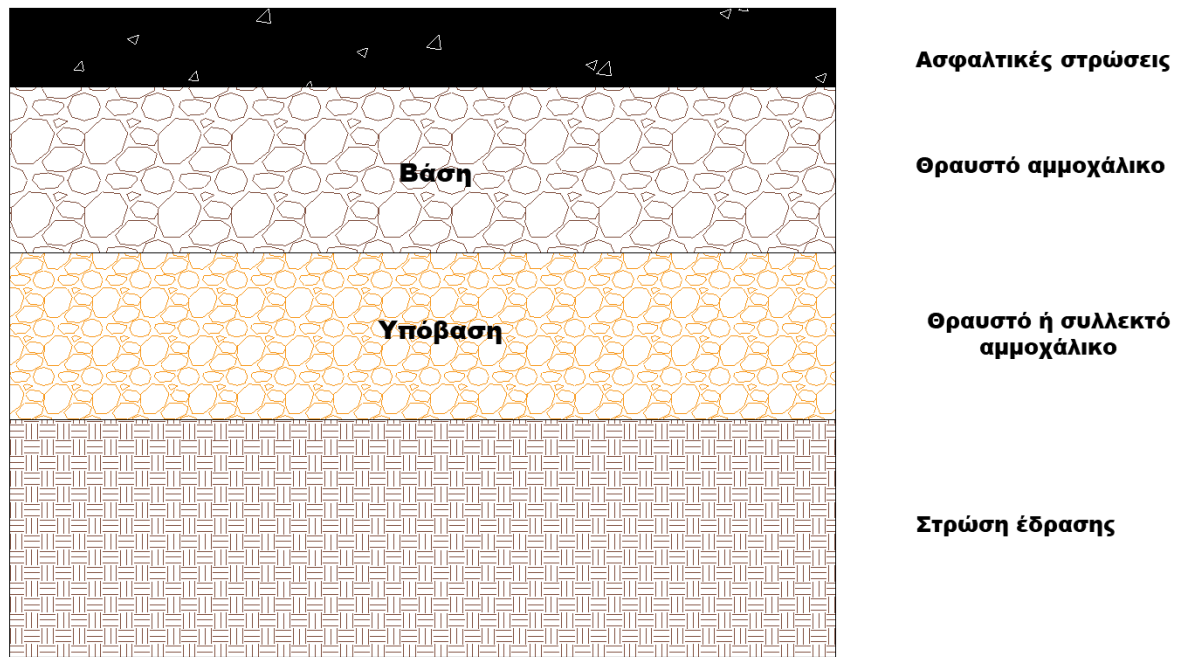
2. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ

2.1 Γενικά

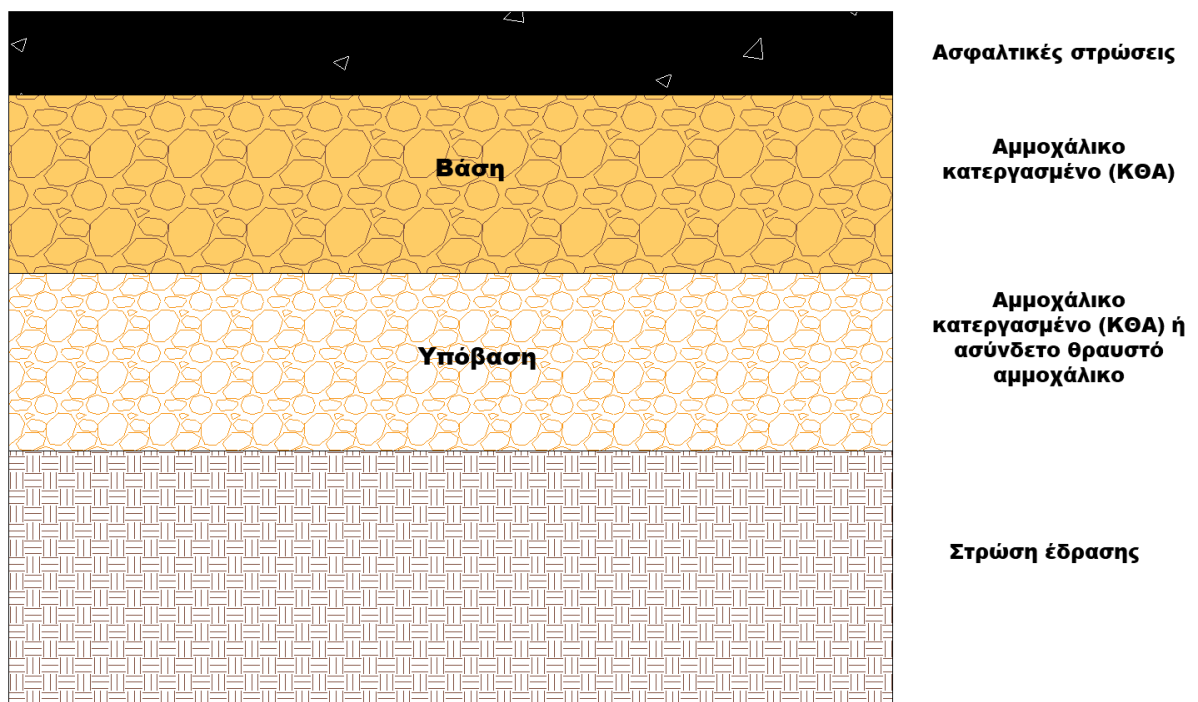
Η κατασκευαστική διατομή οδοστρώματος με βάση τη δομή της και τα υλικά κατασκευής της διαχωρίζεται σε δύο (2) βασικές κατηγορίες : α) ασφαλτικά και β) δύσκαμπτα οδοστρώματα (Εικόνα 2.1). Τα ασφαλτικά οδοστρώματα διακρίνονται σε εύκαμπτα (Εικόνα 2.2) και ημι-εύκαμπτα/ ημι-άκαμπτα (Εικόνα 2.3), ανάλογα με το αν έχει χρησιμοποιηθεί σταθεροποιημένη βάση για την κατασκευή τους. Η σταθεροποιημένη βάση συναντάται στα ημι-εύκαμπτα/ ημι-άκαμπτα οδοστρώματα και συνήθως κατασκευάζεται από αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες (π.χ τσιμέντο). Κατά κύριο λόγο, η πιο συνηθισμένη δομή που χρησιμοποιείται παγκοσμίως είναι εκείνη των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, λόγω της ευκολίας αλλά και του κόστους κατασκευής τους.



Εικόνα 2.1: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος



Εικόνα 2.2: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος



Εικόνα 2.3: Διατομή ημι-άκαμπτου/ημι- εύκαμπτου οδοστρώματος

Το ασφαλτόμιγμα αποτελεί ένα μίγμα υλικών ασφάλτου και αδρανών (Εικόνα 2.4), συναντάται στις ανώτερες στρώσεις του οδοστρώματος (Εικόνα 2.5), οι οποίες είναι διαφορετικού τύπου και εν γένει περιγράφονται για ένα νέας κατασκευής οδόστρωμα ως ακολούθως:

- Την επιφανειακή στρώση που είναι η στρώση κυκλοφορίας (επιδιώκεται να είναι αντισιδηρή ώστε να προσφέρει ομαλή, άνετη και ασφαλή επιφάνεια κύλισης)
- Τη συνδετική στρώση
- Την ασφαλτική βάση



Εικόνα 2.4: Αδρανή υλικά και άσφαλτος



Επιφανειακή στρώση

Συνδετική στρώση

Ασφαλτική βάση

Εικόνα 2.5: Στρώσεις από ασφαλτόμιγμα

Για τον σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος επιλέγονται τα κατάλληλα αδρανή και ο τύπος ασφάλτου, ώστε με το βέλτιστο συνδυασμό τους να προσφέρουν στις στρώσεις των οδοστρωμάτων τα επιθυμητά αποτελέσματα, τα οποία είναι:

- αντίσταση σε παραμένουσες παραμορφώσεις και αντοχή έναντι κόπωσης
- υδατοστεγανότητα στις υποκείμενες στρώσεις

- συνεισφορά στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος

2.2 Μελέτη σύνθεσης Marshall

2.2.1 Γενικά

Η διαδικασία σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων βασίζεται σε τρία (3) βασικά στάδια που χρησιμοποιούν πολλές μελέτες σύνθεσης (π.χ. Marshall, Superpave, Hveem). Αυτές οι τρεις (3) φάσεις είναι οι εξής:

- 1) Επιλογή αδρανών υλικών, όπου γίνεται αξιολόγηση των πηγών τους βάσει τυποποιημένων δοκιμών. Επίσης, για κάθε σύνθεση μίγματος αδρανών πραγματοποιείται και ένας έλεγχος για την κοκκομετρική της διαβάθμιση.
- 2) Επιλογή ασφάλτου, ο τύπος της οποίας βασίζεται στις απαιτήσεις του έργου και στη συνέχεια, η ποιότητά της αξιολογείται μέσω των αντίστοιχων δοκιμών.
- 3) Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου, διαδικασία η οποία περιλαμβάνει προετοιμασία δοκιμών με διαφορετική περιεκτικότητα σε άσφαλτο, συμπύκνωση των μιγμάτων και εν συνεχεία, κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές.

Η μελέτη σύνθεσης Marshall αποτελεί την πιο διαδεδομένη μεθοδολογία σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων στην Ελλάδα και για αυτό τον λόγο θα πραγματοποιηθεί αναφορά σε αυτήν. Η διαδικασία της μελέτης σύνθεσης Marshall απαρτίζεται από 6 διαφορετικά στάδια (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024), τα οποία είναι : α) επιλογή αδρανών υλικών, β) επιλογή ασφάλτου, γ) προετοιμασία δοκιμών Marshall, δ) έλεγχος δοκιμών σε ευστάθεια και παραμόρφωση, ε) προσδιορισμός ογκομετρικών στοιχείων, ζ) προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο

2.2.2 Αδρανή υλικά

Η επιλογή αδρανών υλικών για το ασφαλτόμιγμα αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια της διαδικασίας. Τα αδρανή προέρχονται κυρίως από τη θραύση ενδεδειγμένων πετρωμάτων ή συλλέγονται από τις φυσικές αποθέσεις ποταμών, θαλασσών, χειμάρρων με ή χωρίς θραύση. Τα συλλεκτά και θραυστά αδρανή υπάγονται στην κατηγορία των πρωτογενών αδρανών (Εικόνα 2.6). Επίσης, υπάρχει και άλλη μια κατηγορία, εκείνη των δευτερογενών αδρανών υλικών που προέρχονται από άλλες κατηγορίες υλικών (π.χ. ανακυκλωμένα αδρανή, παραπροϊόντα βωξίτη,

μεταλλουργική σκωρία κ.α.), εφόσον βέβαια πληρούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά.

Διάκριση επιπλέον μπορεί να γίνει μεταξύ των αδρανών και ανάλογα με τη μορφή των κόκκων τους. Έτσι χωρίζονται σε : α) χονδρόκοκα, β) λεπτόκοκα και γ) παιπάλη. Η διάκριση αυτή εκφράζεται ως κλάσμα σε σχέση με το μικρότερο (d) και μεγαλύτερο ανοίγματος (D) οπής κόσκινο (EN 13242, 2002). Παρακάτω φαίνεται ο διαχωρισμός :

- χονδρόκοκα, μεγέθους d/D , με $D > 2 \text{ mm}$ και $d \geq 1 \text{ mm}$
- λεπτόκοκα, μεγέθους $0/D$, με $D \leq 6,3 \text{ mm}$
- παιπάλη, υλικό διερχόμενο από κόσκινο ανοίγματος 0.063 mm



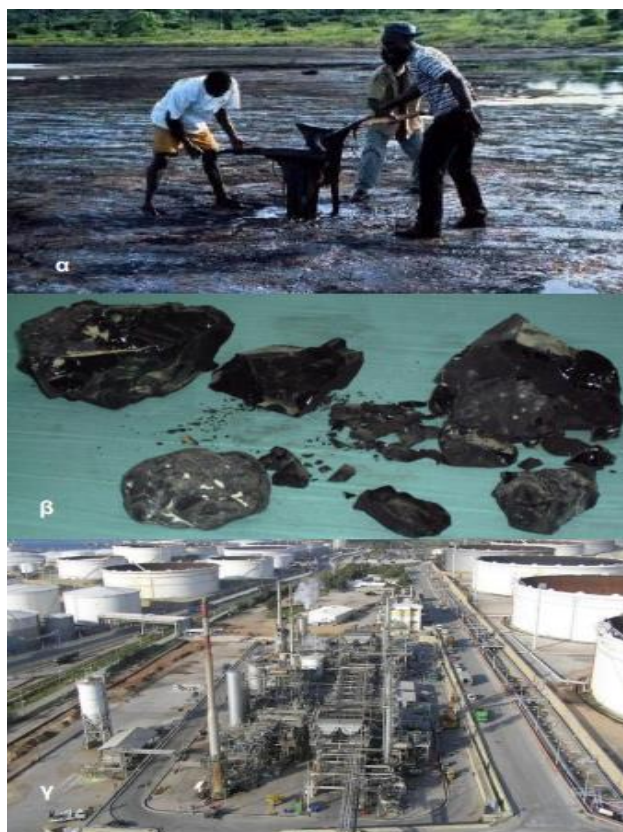
Εικόνα 2.6: Συλλεκτά αδρανή (άνω) και θραυστά αδρανή (κάτω)

Εκτός από τη χρήση τους για ασφαλτομίγματα, τα ασύνδετα αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή στρώσεων οδοστρώσις, δηλαδή βάσης και υπόβασης. Η βασική απαίτηση των στρώσεων αυτών είναι η μεγιστοποίηση αντίστασης των κόκκων σε μετακινήσεις, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των μόνιμων παραμορφώσεων (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024). Αναφορικά με τα εν λόγω υλικά, θα πρέπει να είναι καθαρά, σκληρά, υγιή και ανθεκτικά. Επίσης, πρέπει να είναι

απαλλαγμένα από ξένες προσμίξεις (π.χ. χώματα) και να μην περιέχουν επικαλύψεις ή πλακοειδή και αποσαθρωμένα, εύθρυπτα ή σχιστολιθικά τεμάχια.

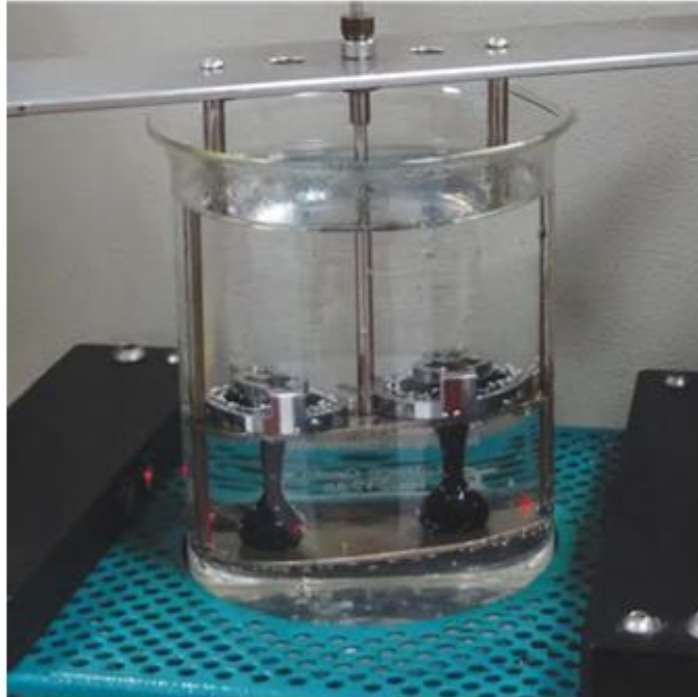
2.2.3 Ασφαλτος

Η ασφαλτος είναι ένα δομικό υλικό, γνωστό κυρίως για τη χρήση του στα οδοστρώματα, αλλά έχει επίσης ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως σε κτιριακές κατασκευές και υδραυλικά έργα. Μπορεί να διακριθεί σε α) φυσική και β) τεχνητή ασφαλτο (Εικόνα 2.7). Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η σύνδεση που προσφέρει στα επιμέρους υλικά του ασφαλτομίγματος, αποδίδοντάς του συνοχή και ομοιομορφία. Για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών της ασφάλτου πραγματοποιούνται αρκετές εργαστηριακές δοκιμές, δεδομένου ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν σε σημαντικότερο βαθμό, λόγω της ιξωδοελαστικής της συμπεριφοράς, είναι η θερμοκρασία και η διάρκεια φόρτισης που δέχεται. Ειδικότερα, η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει ως αποτέλεσμα τη ρευστοποίηση της ασφάλτου που την καθιστά πιο εργάσιμη, ενώ αντίθετα, η μείωση της θερμοκρασίας της προκαλεί στερεοποίηση. Όσον αφορά στη διάρκεια φόρτισης, η αύξησή της οδηγεί σε αύξηση της καταπόνησης της ασφάλτου και προκαλεί την αύξηση της παραμόρφωσης, ενώ η μείωσή της οδηγεί σε μικρότερες τιμές παραμόρφωσης. Συνεπώς, ο καθορισμός της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης μέσω της ταχύτητας αναφοράς είναι μείζονος σημασίας τόσο κατά τον σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος, όσο και κατ' επέκταση του οδοστρώματος (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024).



Εικόνα 2.7: φυσική (α, β) και τεχνητή (γ) ασφάλτος

Για τον χαρακτηρισμό της ασφάλτου, πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές με δύο (2) από αυτές να είναι βασικές: η «δοκιμή μάλθωσης» και η «δοκιμή διείσδυσης». Η «δοκιμή μάλθωσης» (Εικόνα 2.8) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας της ασφάλτου, που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εργασιμότητά της και η μεθοδολογία της δοκιμής πρέπει να ακολουθείται με ακρίβεια, σύμφωνα με τις πρότυπες προδιαγραφές. Το αποτέλεσμα της είναι το σημείο μάλθωσης (softening point) και ορίζεται ως η θερμοκρασία κατά τη στιγμή που ο ασφαλτικός υμένας ακουμπήσει την κάτω επιφάνεια του στελέχους συγκράτησης, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 25mm κάτω από την επιφάνεια του δακτυλίου.



Εικόνα 2.8: Δοκιμή Μάλθωσης

Η «δοκιμή διείσδυσης» (Εικόνα 2.9) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας κάθε ασφάλτου. Το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι ο δείκτης PEN, που εκφράζει την απόσταση που διανύει η πρότυπη βελόνα στο δοκίμιο ασφάλτου σε τυποποιημένες συνθήκες ελέγχου. Η ονομασία της ασφάλτου προκύπτει με βάση τη δοκιμή διείσδυσης (π.χ. ασφαλτος τύπου 40/60, 50/70). Η μονάδα PEN αντιστοιχεί σε 0.1mm διείσδυσης, για παράδειγμα μια τυπική ασφαλτος 40/60 PEN εμφανίζει βάθος διείσδυσης 4mm με 6mm. Η επιλογή του τύπου ασφάλτου εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και τα κυκλοφοριακά δεδομένα που παρουσιάζονται στην περιοχή του έργου.



Εικόνα 2.9: Δοκιμή Διείσδυσης

Στην Ελλάδα ο πιο διαδεδομένος τύπος ασφάλτου είναι 50/70 (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024). Αναφορικά με την περιεκτικότητα του ασφαλτομίγματος σε άσφαλτο, προκύπτει ότι κατέχει σπουδαίο ρόλο στη μελέτη σύνθεσής του και οι τιμές που κυμαίνεται είναι συνήθως 3,8% – 5,3% κατά βάρος και εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών.

2.2.4 Παραγωγή δοκιμίων

Κατά τη διάρκεια της μελέτης σύνθεσης, είναι μείζονος σημασίας ο προσδιορισμός της βέλτιστης περιεκτικότητας της ασφάλτου. Έτσι, παρασκευάζονται δοκιμαστικά ασφαλτομίγματα από την ανάμιξη διάφορων κλασμάτων αδρανών υλικών (συνήθως κυμαίνονται από 4–5), τα οποία έχουν διαφορετική περιεκτικότητα σε άσφαλτο. Στη συνέχεια, αφού έχει παρασκευαστεί αρκετή ποσότητα ασφαλτομιγμάτων, το επόμενο βήμα είναι η συμπύκνωσή τους σε δοκίμια Marshall, που επιτυγχάνεται μέσω κρουστικής συμπύκνωσης (Εικόνα 2.10) και το σύνολο αυτών των δοκιμίων πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία. Η διαδικασία της συμπύκνωσης πραγματοποιείται αρχικά με την τοποθέτηση τους σε κυλινδρικές μεταλλικές μήτρες και υποβολή του

ασφαλτομίγματος σε προ-συμπύκνωση με σπάτουλα περιμετρικά και στο κέντρο. Έπειτα, η μήτρα προσαρμόζεται στη συσκευή συμπύκνωσης και μέσω του σφυριού της συσκευής πραγματοποιούνται 75 κρουστικά φορτία και από τις δύο πλευρές του δοκιμίου.



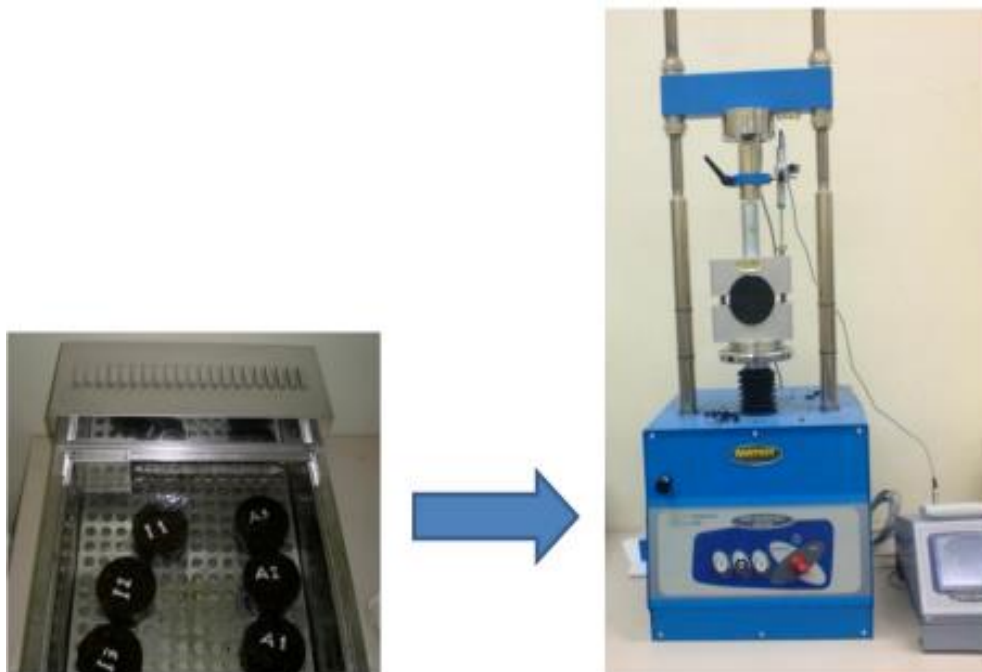
Εικόνα 2.10: Συσκευή κρουστικής συμπύκνωσης

Οι παράγοντες οι οποίοι επιδρούν στη διαδικασία της συμπύκνωσης, όχι μόνο κατά τη φάση μελέτης-σύνθεσης αλλά και κατά τη φάση κατασκευής, είναι η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος, το πάχος της στρώσης το οποίο πρέπει να υλοποιηθεί και οι κλιματολογικές συνθήκες.

2.2.5 Ευστάθεια και παραμόρφωση

Η ευστάθεια και η παραμόρφωση αποτελούν τις βασικές μηχανικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος που καθορίζουν τη συμπεριφορά του. Παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο στην επιλογή του ασφαλτομίγματος που θα χρησιμοποιηθεί για το εκάστοτε έργο κατασκευής οδοστρώματος. Για τον προσδιορισμό των δύο αυτών μεγεθών

πραγματοποιείται κατάλληλη δοκιμή χρησιμοποιώντας την ειδική συσκευή Marshall (Εικόνα 2.11).

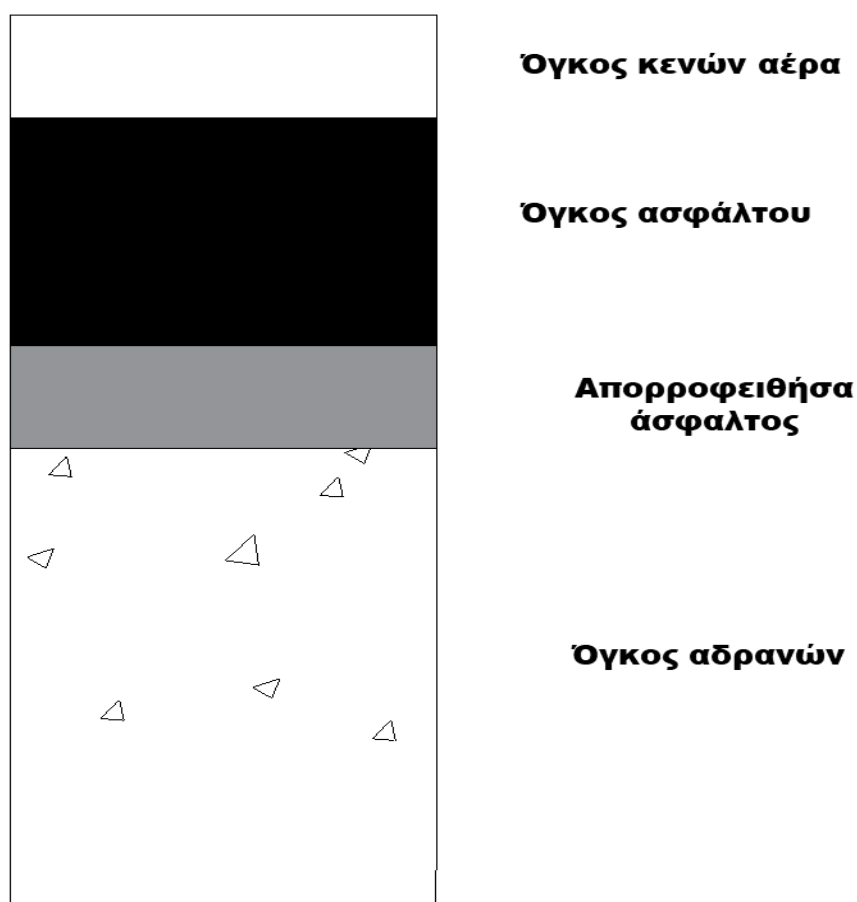


Εικόνα 2.11: Διαδικασία προσδιορισμού ευστάθειας και παραμόρφωσης με την συσκευή Marshall

Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την τοποθέτηση των δοκιμίων που προέκυψαν κατά την συμπύκνωση σε λουτρό ύδατος για 40min σε θερμοκρασία 60°C. Έπειτα, τοποθετούνται στην συσκευή Marshall και συμπιέζονται διαμετρικά με σταθερό ρυθμό (50.8mm/min) μέχρι να επέλθει η τελική θραύση. Το φορτίο αυξάνεται μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά με τη φόρτιση να ολοκληρώνεται ενώ το δοκίμιο έχει παραμορφωθεί πλήρως. Η μέγιστη τιμή του φορτίου που θα καταγραφεί είναι το μέτρο ευστάθειας του μίγματος μετρούμενο σε N ή lb και η αντίστοιχη παραμόρφωση που παρουσιάζεται καταγράφεται ως παραμόρφωση Marshall και μετριέται σε mm ή inches.

2.3 Ογκομετρικές ιδιότητες

Έπειτα από τη διαδικασία ανάμειξης και συμπύκνωσης των υλικών του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο, ο συνολικός όγκος του ασφαλτομίγματος αποτελείται από τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, η άσφαλτος αλλά και τον όγκο των κενών του αέρα. Οι ογκομετρικές παράμετροι που αξιολογούνται για το αν το ασφαλτόμιγμα έχει τις κατάλληλες ιδιότητες είναι οι εξής: α) το ποσοστό κενών αέρα, β) το ποσοστό κενών στον σκελετό των αδρανών και γ) το ποσοστό των κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο (Εικόνα 2.12).



Εικόνα 2.12: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος
Πηγή: (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024)

Αρχικά, επειδή είναι απλούστερες οι μετρήσεις του βάρους από αυτές του όγκου, πραγματοποιούνται πρώτα μετρήσεις βάρους και με την βοήθεια των ειδικών βαρών των υλικών μετατρέπονται σε όγκους και αξιολογούνται. Για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών αέρα, χρησιμοποιούνται τα μεγέθη της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας του ασφαλτομίγματος (ρ_m) και της φαινόμενης πυκνότητας του

ασφαλτομίγματος (ρ_b). Το μέγεθος της φαινόμενης πυκνότητας (ρ_b) καθορίζεται από το βάρος του συμπυκνωμένου δοκιμίου προς τον όγκο αυτού ενώ της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας (ρ_m) καταγράφεται ως η πυκνότητα του ασφαλτομίγματος δίχως την παρουσία κενών αέρα.

Για τον καθορισμό της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας (ρ_m) του χαλαρού ασφαλτομίγματος χρησιμοποιείται η δοκιμή Rice, όπου το δείγμα προετοιμάζεται και πραγματοποιείται διαχωρισμός των κόκκων με τα χέρια. Έπειτα, το δείγμα τοποθετείται στο πυκνόμετρο και προστίθεται νερό θερμοκρασίας 25°C μέχρι την πλήρη κάλυψη του υλικού. Στη συνέχεια, με τη χρήση συσκευής δόνησης εφαρμόζεται υποπίεση για να αφαιρεθεί ο τυχόν εγκλωβισμένος αέρας μεταξύ των κόκκων. Έτσι, με τη χρήση της παρακάτω σχέσης και ζυγίζοντας μεταξύ άλλων το πυκνόμετρο με το μίγμα τοποθετημένο στο νερό, προκύπτει η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα (ρ_m).

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (2.1)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του πυκνόμετρου (kg)
- m_2 : η μάζα του πυκνόμετρου και του δείγματος ασφαλτομίγματος (kg)
- m_3 : η συνολική μάζα του πυκνόμετρου, δείγματος ασφαλτομίγματος (kg) και νερού στους 25° C
- V_p : ο όγκος του πυκνόμετρου (m³)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου (kg/m³)

Για τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας καθορίζεται το βάρος του συμπυκνωμένου δοκιμίου και ο όγκος αυτού. Η διαδικασία του προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας, διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτομίγματος. Υπάρχουν δύο τύποι ασφαλτομίγματος α) κλειστού τύπου και β) ανοιχτού τύπου (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2023). Για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας στα ασφαλτομίγματα κλειστού τύπου ακολουθείται η διαδικασία της εξαγωγής των συμπυκνωμένων δοκιμίων από τις μήτρες και ζύγισής τους σε ξηρή κατάσταση. Έπειτα, τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε νερό θερμοκρασίας 25° C για 30 λεπτά, ώστε να υπολογιστεί το βάρος τους μέσα στο νερό. Στο τέλος, τα δοκίμια απομακρύνονται από το νερό, σκουπίζονται επιφανειακά και ζυγίζονται και με τη χρήση της σχέσης :

$$\rho_b = \frac{m_1 \cdot \rho_w}{m_3 - m_2} \quad (2.2)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου στον αέρα (kg)
- m_2 : η μάζα του δοκιμίου στο νερό (kg)
- m_3 : η μάζα του κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (kg)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία ελέγχου (kg/m³)

Με αυτή τη σχέση προκύπτει η φαινόμενη πυκνότητα των ασφαλτομιγμάτων κλειστού τύπου.

Για τα μίγματα ανοιχτού τύπου, τα δοκίμια Marshall εξάγονται από τις μήτρες με χρήση ειδικού εξολκέα, όπως αυτά του κλειστού τύπου και ζυγίζονται σε ξηρή κατάσταση και ο όγκος τους υπολογίζεται με τη μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου. Έτσι, με την ακόλουθη σχέση υπολογίζεται η φαινόμενη πυκνότητα για ασφαλτομίγματα ανοιχτού τύπου.

$$\rho_b = \frac{m_1 \cdot 10^9}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \quad (2.3)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου στον αέρα (kg)
- h : το ύψος του δοκιμίου (mm)
- d : η διάμετρος του δοκιμίου (mm)

Δεδομένων των ανωτέρω, το ποσοστό κενών αέρα (V_m) υπολογίζεται με τη χρήση των μεγεθών της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμίων Marshall και της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας του χαλαρού ασφαλτομίγματος με την ακόλουθη σχέση:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 \quad (2.4)$$

όπου:

- ρ_m : η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα ασφαλτομίγματος
- ρ_b : η φαινόμενη πυκνότητα ασφαλτομίγματος

Ο προσδιορισμός των κενών αέρα αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο κάθε μελέτης ασφαλτομίγματος και συνεπώς, ο ενδεδειγμένος υπολογισμός του αποτελεί ζήτημα μεγάλης βαρύτητας. Άξιο αναφοράς είναι ότι το ποσοστό κενών αέρα οφείλει να

είναι τόσο, ώστε τα φορτία που δέχεται το ασφαλτόμικγμα κατά τη διάρκεια ζωής του, να του επιφέρουν μικρό ποσοστό συμπίκνωσης.

Επίσης, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ασφαλτομιγμάτων αποτελεί το ενεργό ποσοστό ασφάλτου. Τα αδρανή υλικά στην εξωτερική τους επιφάνεια περιέχουν πόρους, οι οποίοι απορροφούν μερικώς την ασφαλτο του μίγματος. Έτσι, η εναπομένουσα ποσότητα της ασφάλτου που δεν απορροφήθηκε από τα αδρανή, γεμίζει τα κενά μεταξύ τους και προσφέρει συνοχή στο μίγμα. Αυτή η ποσότητα χαρακτηρίζεται ως ενεργό ποσοστό ασφάλτου και είναι σαφώς μικρότερη της συνολικής ασφάλτου που προστέθηκε αρχικά στο μίγμα.

Πέρα από αυτό, τα κενά στον σκελετό των αδρανών (VMA) ορίζονται ως τα κενά των αδρανών σε ένα συμπτυκνωμένο μίγμα, το οποίο περιλαμβάνει τα κενά του αέρα και τον όγκο της ασφάλτου. Τα κενά αυτά διασφαλίζουν ότι ο διαθέσιμος χώρος μεταξύ των αδρανών είναι επαρκής για να παραλάβει την ποσότητα της ασφάλτου. Το VFA διασφαλίζει ότι επαρκής αριθμός κενών έχουν καλυφθεί με ασφαλτο. Για το VMA η σχέση παρατίθεται παρακάτω:

$$VMA = 100 - \left(\frac{\rho_b \cdot P_s}{\rho_{ba}} \right) \quad (2.5)$$

όπου:

- ρ_b : η φαινόμενη πυκνότητα του δοκιμίου (kg/m^3)
- ρ_{ba} : η φαινόμενη πυκνότητα των αδρανών (kg/m^3)
- P_s : το ποσοστό των αδρανών στην συνολική μάζα του δοκιμίου

Ενώ για το VFA ακολουθεί η παρακάτω σχέση:

$$VFA = \frac{VMA - V_m}{VMA} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

όπου:

- VMA: τα κενά στον σκελετό των αδρανών
- V_m : το ποσοστό κενών αέρα
- VFA: τα κενά που καλύφθηκαν με ασφαλτο

Συνοψίζοντας, οι ογκομετρικές παράμετροι των ασφαλτομιγμάτων αποτελούν κρίσιμους δείκτες της ποιότητάς τους, επηρεάζοντας την αντοχή, τη συμπίκνωση και τη συνοχή τους. Ο ακριβής υπολογισμός των κενών αέρα, του VMA και του VFA εξασφαλίζει τη βέλτιστη απόδοση και τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα του ασφαλτομίγματος.

2.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Το ασφαλτόμιγμα περιέχει δύο (2) υλικά με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά το καθένα: α) την άσφαλτο με ιξωδοελαστική συμπεριφορά και β) τα συμπυκνωμένα αδρανή με ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Το υλικό όμως που υπερισχύει είναι η άσφαλτος, με αποτέλεσμα το ασφαλτόμιγμα να συμπεριφέρεται και αυτό ως ιξωδοελαστικό υλικό. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η συμπεριφορά του εξαρτάται από τον χρόνο φόρτισης (t) και τη θερμοκρασία (T°). Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος εκφράζονται μέσω του μέτρου δυσκαμψίας (S_m) και ο λόγος που διαφέρει από το μέτρο ελαστικότητας (E) είναι μόνο στο ότι εξαρτάται από την θερμοκρασία και από τον χρόνο φόρτισης, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$S_m = (\sigma/\varepsilon)_{T,t} \quad (2.7)$$

όπου:

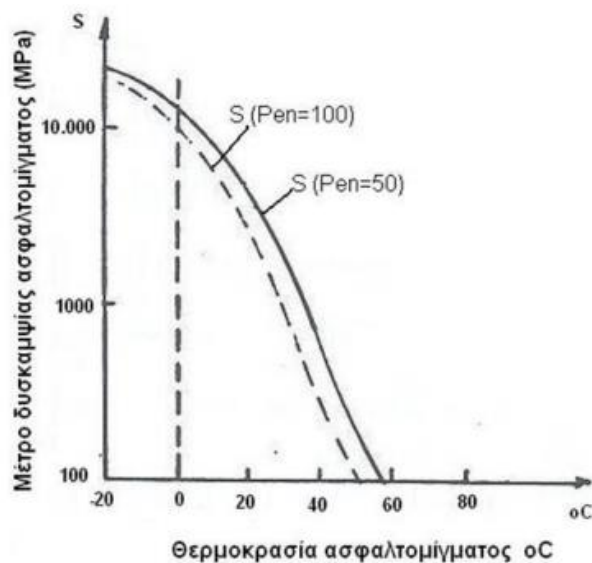
- σ : η επιβαλλόμενη τάση
- ε : η ανηγμένη παραμόρφωση

Στη συνέχεια (Εικόνες 2.13 και 2.14,) παρουσιάζεται η επίδραση που έχει στο μέτρο δυσκαμψίας η διάρκεια φόρτισης και η θερμοκρασία.



Εικόνα 2.13: Σχέση μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος-διάρκεια φόρτισης
Πηγή: (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021b)

Από την Εικόνα 2.13 μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα ότι η αύξηση της διάρκειας φόρτισης (t) προκαλεί μείωση του μέτρου δυσκαμψίας (S_m).

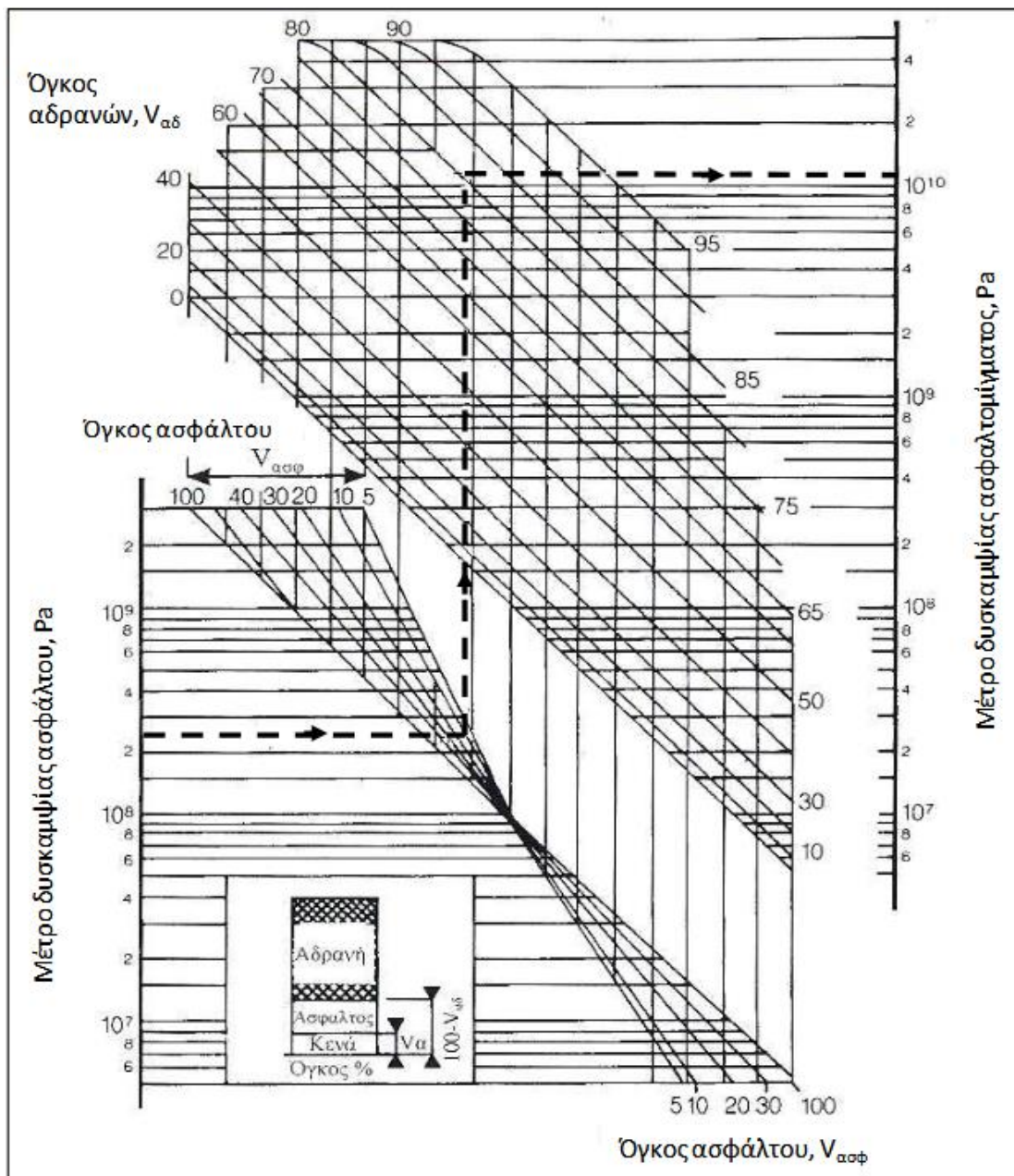


Εικόνα 2.14: Σχέση μέτρου δυσκαμψίας με θερμοκρασία
Πηγή: (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021b)

Με βάση την Εικόνα 2.14, προκύπτει η παρατήρηση ότι η άνοδος της θερμοκρασίας (T°) επιφέρει μείωση στο μέτρο δυσκαμψίας (S_m) μέχρι την θερμοκρασία των 60°C , όπου φτάνει σχεδόν τα 100 MPa και σε παραπάνω τιμές πρακτικά μηδενίζεται.

Το συμπέρασμα είναι ότι η αύξηση της διάρκειας φόρτισης και της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση στο μέτρο δυσκαμψίας. Έτσι, σε περίπτωση που δεν ληφθούν υπόψη τυχόν μεταβολές σε αυτά τα δύο μεγέθη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του ασφαλτομίγματος, μπορεί να υπάρξουν συνέπειες στη λειτουργία του οδοστρώματος.

Για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας (S_m) υπάρχουν δύο τρόποι: α) ο άμεσος ή β) ο έμμεσος. Ο άμεσος τρόπος εκτίμησης αφορά κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές ενώ ο έμμεσος πραγματοποιείται με τη βοήθεια νομογραφημάτων ή αλγόριθμων. Σε περίπτωση που σε εργαστήριο δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός για τον καθορισμό του μέτρου δυσκαμψίας (S_m) του ασφαλτομίγματος, τότε είναι δυνατόν να εκτιμηθεί για οποιαδήποτε θερμοκρασία και χρόνο φόρτισης γνωρίζοντας μόνο το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου και τις ογκομετρικές ποσότητες των συστατικών του ασφαλτομίγματος. Τότε πραγματοποιείται με τη βοήθεια της Εικόνας 2.15.



Εικόνα 2.15: Νομογράφημα υπολογισμού του S_m

Πηγή: (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021b)

Πρακτικά, η εκτίμηση του (S_m) είναι δυνατή γνωρίζοντας :

- Το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (S_b) (Κατά Van der Poel)
- Το ποσοστό της ασφάλτου κ.ο (V_b)
- Το ποσοστό των αδρανών κ.ο (V_a)
- Το ποσοστό των κενών κ.ο (V_v)

2.5 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

2.5.1 Γενικά

Τα ασφαλτομίγματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες και με διάφορους τρόπους. Ο πιο ευρέως γνωστός τρόπος για την κατηγοριοποίηση τους είναι με βάση τη θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος κατά τη μεταφορά, τη διάστρωση ή τη συμπύκνωσή του στο πεδίο. Έτσι, οι κύριες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα ασφαλτομίγματα είναι οι εξής:

- θερμά ασφαλτομίγματα (Hot Mix Asphalt: HMA) τα οποία παράγονται “εν θερμώ” σε ασφαλτική εγκατάσταση
- ψυχρά ασφαλτομίγματα (Cold Mix Asphalt: CMA) τα οποία αντιθέτως με τα θερμά παράγονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος σε τοπικές ή μόνιμες εγκαταστάσεις
- μετρίως θερμά ασφαλτομίγματα (Warm Mix Asphalt: WMA) τα οποία παράγονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τις συνήθεις των θερμών ασφαλτομιγμάτων και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση προσμίκτων και διαδικασιών αφροποίησης

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί η κατηγοριοποίηση των ασφαλτομιγμάτων ανάλογα με τη χρήση τους. Τα ασφαλτομίγματα διαχωρίζονται σε κλειστού και ανοιχτού τύπου. Τα κλειστού τύπου ασφαλτομίγματα χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή της ασφαλτικής βάσης και της συνδετικής στρώσης, λόγω της υψηλής αντοχής τους. Αντίθετα, τα ανοιχτού τύπου ασφαλτομίγματα χρησιμοποιούνται στην αντιολισθηρή στρώση, εξαιτίας του αποστραγγιστικού χαρακτήρα τους αλλά και της αντίστασης σε ολίσθηση που προσφέρουν.

Επιπλέον, τα ανοιχτού τύπου ασφαλτομίγματα διαχωρίζονται σε α) Τύπου Ι και β) Τύπου ΙΙ. Τα Τύπου Ι ασφαλτομίγματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που ενδιαφέρει τον μελετητή, πέρα από την εξασφάλιση της αντιολισθηρότητας, η ενίσχυση και η στεγανότητα του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα σε αστικές οδούς. Με τα Τύπου ΙΙ ασφαλτομίγματα εξασφαλίζεται καλύτερη επιφανειακή τραχύτητα, με αποτέλεσμα την αντίσταση σε ολίσθηση σε υψηλές ταχύτητες που παρουσιάζονται ως επί των πλείστων σε αυτοκινητόδρομους.

Στον Πίνακα 2.1 παρατηρούνται οι απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά του ασφαλτικού σκυροδέματος κλειστού τύπου σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-11-04:2009 και

στον Πίνακα 2.2 σε εκείνα του ασφαλικού σκυροδέματος ανοιχτού τύπου σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-12-01:2009.

Πίνακας 2.1: Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ για τα χαρακτηριστικά ασφαλικού σκυροδέματος κλειστού τύπου
Πηγή: (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-11 04:2009), 2009)

Χαρακτηριστικά κριτήρια	Για όλες τις κατηγορίες οδών			
Βαθμός συμπίκνωσης, κτύποι	2x75			
Ευστάθεια (kN)	> 8,0			
Παραμόρφωση (mm)	2,0 - 4,0			
Κενά αέρος (%)	3,0 - 5,0			
Κενά που γέμισαν με άσφαλτο (%)	65 - 74			
Κενά συμπακνωμένων αδρανών (Κενά στον σκελετό αδρανών) %	Για όλες τις περιπτώσεις			
	Ονομαστικό μέγεθος μίγματος αδρανών (mm)	Για κενά αέρος		
		3%	4%	5%
	40	> 10,0	> 11,0	> 12,0
	31,5	> 11,0	> 12,0	> 13,0
	20	> 12,0	> 13,0	> 14,0
	12,5	> 13,0	> 14,0	> 15,0
	10	> 14,0	> 15,0	> 16,0

Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις ΠΕΤΕΠ για τα χαρακτηριστικά ασφαλικού σκυροδέματος ανοιχτού τύπου
Πηγή: (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-12-01:2009), 2009)

Χαρακτηριστικά	Τύπος 1	Τύπος 2
Συμπύκνωση (αριθμός κτύπων σε κάθε πλευρά του δοκιμίου)	75	75
Ευστάθεια στους 50°C (N)	≤ 8000	≤ 6000
Παραμόρφωση δοκιμίου (mm)	2,0 - 4,0	2,0 - 5,0
Κενά αέρος (% συμπακνωμένου ασφαλτομίγματος)	3,0 - 5,0	5,0 - 15,0
Ελάχιστος λόγος αντοχής στη δοκιμή εμβάπτισης - θλίψης	0,8	0,7

2.5.2 Θερμά ασφαλτομίγματα

Το θερμό ασφαλτόμιγμα ή αλλιώς «Hot Mix Asphalt» (HMA) είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται συνηθέστερα. Για την παρασκευή του είναι απαραίτητη η θέρμανση του μίγματος ασφάλτου και αδρανών για όλες τις διαδικασίες, όπως της ανάμιξης, της μεταφοράς, της διάστρωσης και της συμπίκνωσης. Οι κυριότερες τεχνολογίες θερμών ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι α) το ασφατικό σκυρόδεμα (Asphalt Concrete), β) το ασφαλτόμιγμα πορώδους σύνθεσης (Porous Asphalt) και γ) η ασφατική σκυρομαστίχη (Stone Mastic Asphalt: SMA). Το πιο

σύνηθες σε χρήση όλων αυτών είναι το ασφαλικό σκυρόδεμα λόγω της δυνατότητας να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις ασφαλικές στρώσεις, σε αντίθεση με τους άλλους τύπους που χρησιμοποιούνται μόνο για την στρώση κυκλοφορίας.

2.5.3 Ψυχρά ασφαλομίγματα

Τα ψυχρά ασφαλομίγματα ή αλλιώς «Cold Mix Asphalt» μπορούν να αναμιγνύονται, να μεταφέρονται, να διαστρώνονται και να συμπυκνώνονται χωρίς να χρειάζεται να θερμανθούν. Η δυνατότητα αυτή των ψυχρών ασφαλομιγμάτων οφείλεται στη χρήση ασφαλικών γαλακτωμάτων ή αφρώδους ασφάλτου. Τα ασφαλικά γαλακτώματα είναι μια μίξη ασφάλτου, νερού και κάποιων χημικών πρόσθετων τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα στην άσφαλτο και το νερό να αναμιγνύονται και να παράγεται ένα ρευστό υλικό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25°C). Έτσι, οι εργασίες στα ασφαλικά μπορούν να πραγματοποιηθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες μιας και το μίγμα είναι πιο εργάσιμο. Τα ψυχρά ασφαλομίγματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασφαλικές βάσεις και στρώσεις κυκλοφορίας αλλά επίσης και για τη διόρθωση επιφανειακών φθορών λόγω της ικανότητάς τους να μη χρειάζονται θέρμανση, μειώνοντας παράλληλα και το ενεργειακό κόστος.

2.5.4 Μετρίως θερμά ασφαλομίγματα

Τα μετρίως θερμά ασφαλομίγματα ή εναλλακτικά « Warm Mix Asphalt» (WMA) αποτελούν έναν τύπο ασφαλομίγματος, ο οποίος εφαρμόζεται τις τελευταίες τρεις (3) δεκαετίες. Η διαφορά τους με τα θερμά ασφαλομίγματα είναι ότι επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Υπάρχει μία μείωση στη θερμοκρασία της τάξης των 40° C σε σχέση με τη θέρμανση των θερμών ασφαλομιγμάτων. Ο λόγος που υφίσταται αυτή τη μείωση είναι η προσθήκη προσμίκτων και οι διαδικασίες αφροποίησης. Αυτές οι διαδικασίες συμβάλλουν σε μικρότερου βαθμού σκλήρυνση της ασφάλτου και την καλύτερη συμπύκνωση του ασφαλομίγματος. Ο υπόψιν τύπος ασφαλομίγματος έχει προσφέρει:

- μείωση των εκπομπών του άνθρακα
- ελάττωση του ενεργειακού κόστους
- περιορισμό των αναθυμιάσεων στους εργαζόμενους

3. ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

3.1 Γενικά

Το ασφαλτόμιγμα, όπως και κάθε υλικό, έχει κάποια γεωφυσικά χαρακτηριστικά που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ηλεκτρομαγνητικές του ιδιότητες. Δεδομένου ότι το ασφαλτόμιγμα είναι ένα σύνθετο υλικό, οι ηλεκτρικές ιδιότητές του επηρεάζονται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών που συνθέτουν το μίγμα. Επίσης, η αναλογία των υλικών στο μίγμα αλλά και οι μεταξύ των υλικών ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που μπορούν να υπάρξουν επηρεάζουν τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος αφορούν τη διηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ), τη μαγνητική διαπερατότητα (μ) η οποία είναι πολύ χαμηλή στα ασφαλτομίγματα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ) που και αυτή είναι πολύ χαμηλή, αφού η άσφαλτος και τα αδρανή είναι μη αγώγιμα υλικά.

Από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων έχουν αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητών. Συγκεκριμένα, η πλειοψηφία αυτών ασχολήθηκε με τη διηλεκτρική διαπερατότητα και για το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί στο πλαίσιο του σχεδιασμού και της αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Με βάση έρευνες που έχουν γίνει, η διηλεκτρική σταθερά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ποιότητας των ασφαλτομιγμάτων (Al-Qadi, Larkin and Leng, 2011). Επίσης, μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να εντοπιστεί ενδεχόμενη υγρασία, η οποία μπορεί να είναι καταστρεπτική για το οδόστρωμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς είναι μεγάλες, δεδομένου της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς του νερού (Cao and Al-Qadi, 2021).

Εν γένει, η διηλεκτρική διαπερατότητα συνδέει το υλικό με το ηλεκτρικό του πεδίο. Αποτελεί ένα μέτρο της δυνατότητας του υλικού να αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια όταν είναι εκτεθειμένο σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Απλούστερα, μπορεί να οριστεί ως ένας αριθμός που εκφράζει το πόσο εύκολα μπορεί ένα υλικό να πολωθεί όταν εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η ιδιότητα αυτή των υλικών τις περισσότερες φορές εκφράζεται σε συνάρτηση με τη διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού (αέρα) και σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ_0). Επιπλέον, η διηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ_r) αποτελεί ένα μιγαδικό μέγεθος και για αυτόν τον λόγο, ως επί των πλείστων, αναφέρεται ως σχετική μιγαδική διηλεκτρική

διαπερατότητα. Ορίζεται ως ο λόγος της μιγαδικής διηλεκτρικής διαπερατότητας του υλικού προς τη μιγαδική διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού (σχέση 3.1).

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 = \varepsilon_r' - j * \varepsilon_r'' \quad (3.1)$$

όπου:

- ε : η διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού
- ε_0 : η διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού (αέρα) που ισούται με $8,854 \times 10^{-12}$ F/m
- ε_r' : η πραγματική συνιστώσα της μιγαδικής διηλεκτρικής διαπερατότητας, αντιπροσωπεύει την δυνατότητα του υλικού να αποθηκεύει την ενέργεια όταν αυτό εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Η τιμή για το κενό είναι $\varepsilon_r' = 1$. Επίσης ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά ή διηλεκτρική σταθερά.
- ε_r'' : το φανταστικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής διαπερατότητας ενός υλικού, το οποίο δείχνει τις απώλειες ενέργειας όταν εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Οι πολικές ομάδες του υλικού μπορεί να μετακινούνται όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο με υψηλή συχνότητα, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός πόλωσης να μην προλαβαίνει να επανέλθει, προκαλώντας έτσι απώλειες.

Όπως αναφέρθηκε, τα υλικά από τα οποία αποτελείται το ασφαλτόμιγμα είναι μη αγώγιμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες ενέργειας να είναι σχεδόν μηδενικές. Έτσι, το φανταστικό μέρος της σχέσης (3.1), δηλαδή το (ε_r''), πρακτικά αμελείται. Για αυτόν τον λόγο προκύπτει ότι το πραγματικό κομμάτι της σχέσης (3.1), με άλλα λόγια η διηλεκτρική σταθερά, αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα και η σχέση (3.1) απλοποιείται ως εξής:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' \quad (3.2)$$

Άρα, η τιμή της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής διαπερατότητας ισούται με την πραγματική συνιστώσα (διηλεκτρική σταθερά) εφόσον αγνοείται το φανταστικό μέρος.

3.2 Διηλεκτρικές σταθερές ασφαλτομιγμάτων

Η σύσταση του ασφαλτομίγματος, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθορίζεται από τρία βασικά υλικά, τα οποία είναι η άσφαλτος, τα αδρανή και ο αέρας. Εκτός από αυτά τα υλικά, κάποιες φορές μπορεί να εντοπιστούν στο ασφαλτόμιγμα και συστατικά όπως το νερό, χημικά ή οργανικά υπολείμματα και άλατα. Όλα αυτά τα συστατικά έχουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες άρα και διαφορετική διηλεκτρική σταθερά επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο τη διηλεκτρική σταθερά ολόκληρου του μίγματος. Πέρα από τη φύση του υλικού που επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά, οι περιεκτικότητες κατ' όγκο των συστατικών είναι ακόμη ένας παράγοντας που επιδρά. Θα ήταν απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες, στις οποίες θα βρεθεί το μίγμα, επηρεάζουν τη διηλεκτρική σταθερά, συνήθως εξαιτίας της επαφής του με νερό.

Η άσφαλτος σαν βασικό συστατικό του ασφαλτομίγματος έχει μια τιμή διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία κυμαίνεται από 2.6 μέχρι 3. Οι τιμές αυτές προέκυψαν βάσει μετρήσεων που έγιναν, αποδεικνύοντας έτσι ότι η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς δεν διαφοροποιείται σημαντικά για διάφορους τύπους ασφάλτων ή για ασφάλτους με διαφορετικό ιξώδες (Pellinen et al., 2015).

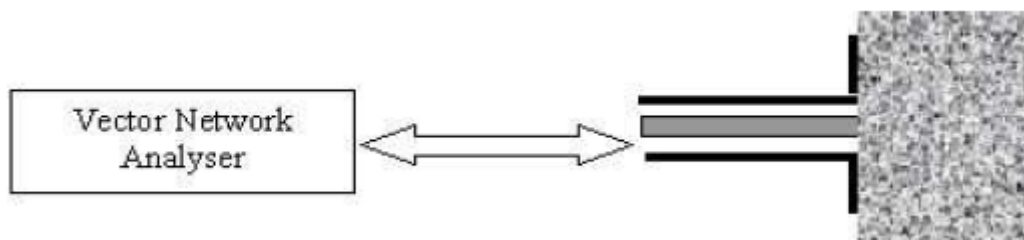
Όσο για τα αδρανή υλικά, η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς τους διαφέρει ανάλογα με την προέλευσή τους. Οι τιμές τους μπορεί να κυμαίνονται από 4.5 έως 6.5 για ξηρά αδρανή (Evans et al., 2007). Ωστόσο, τα αδρανή από άνθρακα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές φτάνοντας κοντά στο 9.

Συμψηφίζοντας τα παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη ότι η διηλεκτρική σταθερά του αέρα ισούται με την μονάδα ($\epsilon_r = 1$), προκύπτει ότι η διηλεκτρική σταθερά των ασφαλτομιγμάτων είναι ένα μέγεθος εξαρτώμενο από τις επιμέρους τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του κάθε υλικού και τις περιεκτικότητες κατ' όγκο του εκάστοτε υλικού. Αυτό έχει αποδειχθεί με έρευνες, οι οποίες έχουν γίνει και έχουν παρατηρήσει τιμές διηλεκτρικής σταθεράς για τα ασφαλτομίγματα να κυμαίνονται από 3.5 έως 10 (Evans et al., 2007).

3.3 Μετρήσεις διηλεκτρικής σταθεράς

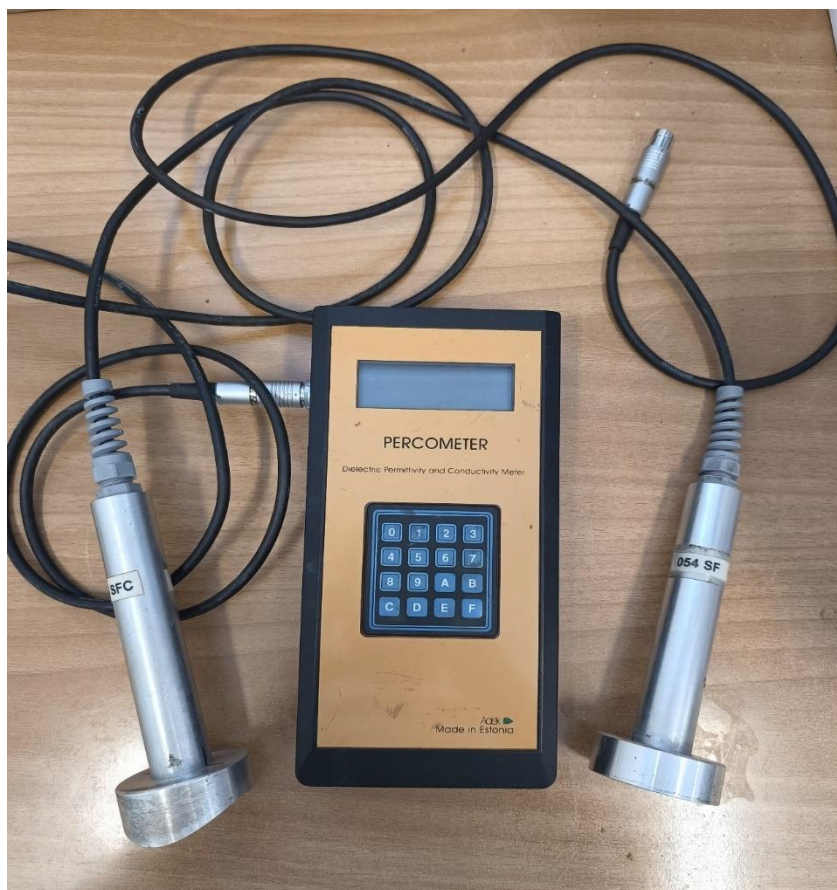
3.3.1 Μετρήσεις στο εργαστήριο

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς στο εργαστήριο. Ένας από αυτούς είναι η μέθοδος του ομοαξονικού ηλεκτροδίου ή «Open – Ended Coaxial Probe». Ουσιαστικά, το ομοαξονικό ηλεκτρόδιο σε συνδυασμό με έναν διανυσματικό αναλυτή δικτύου υπολογίζει την διηλεκτρική σταθερά. Η μέθοδος αυτή υπάγεται στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT) (Loizos and Plati, 2011).



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση της μεθόδου του ομοαξονικού ηλεκτροδίου

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού χρησιμοποιείται από πολλές συσκευές. Μία από αυτές τις συσκευές είναι το Percometer, το οποίο είναι μια πολύ εύχρηστη και ακριβής συσκευή μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς, της θερμοκρασίας αλλά και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ένα χαρακτηριστικό της συσκευής, το οποίο είναι πολύ χρήσιμο, είναι η δυνατότητα αλλαγής των ανιχνευτών – εξαρτημάτων (probes), ώστε οι μετρήσεις να μπορούν να γίνουν σε διαφορετικές μεταξύ τους επιφάνειες. Ο λόγος όμως που υπάρχουν οι διαφορετικοί ανιχνευτές είναι για να εφάπτονται ικανοποιητικά στην επιφάνεια όπου πραγματοποιείται η μέτρηση, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της (Loizos and Plati, 2006). Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται η συσκευή Percometer και κάποια από τα είδη των ανιχνευτών (probes).



Εικόνα 3.2: Διάταξη συσκευής Percometer και είδη ανιχνευτών

Ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής είναι ο εξής: διοχετεύονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο δοκίμιο μέσω του ανιχνευτή και υπολογίζεται η μεταβολή της χωρητικότητας (Change in capacitance: ΔC) του εκάστοτε υλικού μέσω του συντελεστή ανάκλασης. Στη συνέχεια, με το Percometer πραγματοποιείται μέτρηση της διαφοράς του δυναμικού, της συχνότητας και του χρόνου επιστροφής λόγω ανάκλασης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και υπολογίζεται μία τιμή διηλεκτρικής σταθεράς ανάλογα με τη μεταβολή του σήματος. Η συχνότητα στην οποία λειτουργεί η συσκευή είναι συνήθως τα 40-50MHz (Loizos and Plati, 2007). Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι το βάθος διείσδυσης των κυμάτων περιορίζεται κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου (Loizos and Plati, 2011). Συνοψίζοντας, το αναφερθέν όργανο μέτρησης έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ο άμεσος υπολογισμός της διηλεκτρικής σταθεράς, η πληθώρα ανιχνευτών και η ευελιξία που προσφέρει αλλά έχει και τα εξής μειονεκτήματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των μετρήσεων όπως :

- 1) το μικρό βάθος διείσδυσης
- 2) την υποεκτίμηση του μέτρου διηλεκτρικής σταθεράς σε δοκίμια με τραχείες επιφάνειες λόγω της εισροής αέρα στα επιφανειακά κενά τους

3.3.2 Μετρήσεις στο πεδίο

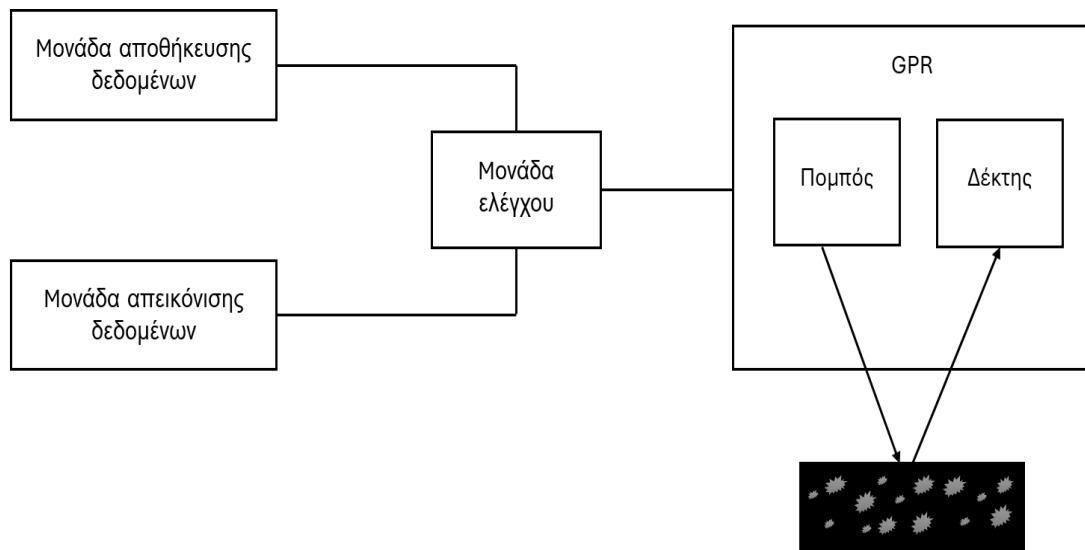
Εκτός από τη δυνατότητα του εργαστηριακού προσδιορισμού, δίνεται και η δυνατότητα του προσδιορισμού της διηλεκτρικής σταθεράς και στο πεδίο. Ο καθορισμός της επιτυγχάνεται με τη χρήση του Percometer ή γεωφυσικών μεθόδων και συγκεκριμένα αυτή η οποία εφαρμόζεται με το σύστημα Ground Penetrating Radar: GPR (Εικόνα 3.3). Με τη χρήση της συσκευής GPR πραγματοποιείται η διερεύνηση του υπεδάφους και ανάλυση της δομής του οδοστρώματος καταγράφοντας την στρωματογραφία του (Saarenketo and Scullion, 2000). Η χρήση του GPR ξεκινάει από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 κατά την διάρκεια του Πολέμου του Βιετνάμ. Συγκεκριμένα, ο στρατός των Η.Π.Α χρησιμοποιούσε το GPR για να βρεθούν τα τούνελ των Βιετκόνγκ. Η χρήση του στη συγκοινωνιακή υποδομή ξεκίνησε την δεκαετία του 1970 (Morey, 1998).



Εικόνα 3.3: Σύστημα GPR

Το GPR αποτελείται από έναν πομπό (κεραία) που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά παλμικά κύματα, έναν δέκτη που συλλέγει τα ανακλώμενα σήματα, μια μονάδα ελέγχου που συγχρονίζει τη διαδικασία, και μια μονάδα αποθήκευσης και απεικόνισης δεδομένων (Εικόνα 3.4). Τα κύματα διαδίδονται στο οδόστρωμα και ανακλώνται όταν συναντούν διαφορές στη διηλεκτρική σταθερά των υλικών (Martinez and Byrnes, 2001). Βάσει πολλών μελετών που έχουν γίνει, το GPR χρησιμοποιεί συχνότητες μεταξύ 10MHz και 2.5GHz (Porubiakoná and Komačka, 2015). Αυτό το εύρος στις συχνότητες έχει να κάνει με την ανάγκη για καλύτερες αναλύσεις των μετρήσεων ή για την ανάγκη διείσδυσης των κυμάτων σε μεγαλύτερα βάθη. Οι υψηλές συχνότητες προσφέρουν καλύτερες αναλύσεις των μετρήσεων (Baltrušaitis, Vaitkus and Smirnovs, 2020), όμως έχουν ως μειονέκτημα τη χαμηλή ανάλυση όταν πρόκειται για αναλύσεις μεγαλύτερων βαθών. Σε αυτήν την

περίπτωση χρησιμοποιούνται μικρότερες συχνότητες παρότι στο τέλος τα αποτελέσματα έχουν μικρότερη ακρίβεια (Saarenketo, 2012). Τα συστήματα GPR μπορεί να είναι αερομεταφερόμενα (air-coupled) για την καταγραφή ασφαλτικών στρώσεων ή να εφάπτονται στην επιφάνεια (ground-coupled) για την καταγραφή ασύνδετων στρώσεων (Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021a). Τα τελευταία χρόνια η ακρίβεια του GPR έχει βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό λόγω και της εξέλιξης της τεχνολογίας αλλά και του συνδυασμού της συσκευής GPR με συσκευές GPS που δίνουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της απόστασης (Ožbolt, Rukavina and Domitrović, 2012).



Εικόνα 3.4: Κύρια στοιχεία ενός συστήματος GPR

Ο καθορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς είναι πολύ σημαντικός για τη λειτουργία του GPR γιατί σχετίζεται με παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την ερμηνεία των δεδομένων του. Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μία τέτοια παράμετρος και εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού (σχέση 3.3) (Κ. R. Maser, 1995).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3.3)$$

όπου:

- ϵ : η σχετική διηλεκτρική σταθερά
- C : η ταχύτητα του φωτός ($\approx 10^8$ m/sec)
- v : η ταχύτητα του μεταδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο σώμα του υλικού (m/sec)

Εκτός από την ταχύτητα διάδοσης, άλλη μια παράμετρος είναι ο χρόνος άφιξης (arrival time) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ο χρόνος άφιξης εκφράζει τον χρόνο που απαιτείται να ταξιδέψει το κύμα από την κεραία στο υλικό και να ανακλαστεί πίσω σε αυτήν. Κατά τη διάρκεια της διάδοσης το κύμα συναντά στρώσεις από διαφορετικά υλικά ανάλογα με το βάθος, τα οποία έχουν διαφορετική διηλεκτρική συμπεριφορά μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κύμα να επιστρέφει στον δέκτη με διαφορετικό χρόνο άφιξης και πλάτος (amplitude). Η διαφορά στον χρόνο άφιξης που συνδυάζεται με το διαφορετικό πλάτος του κύματος σε κάθε διεπιφάνεια (Εικόνα 3.5) προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης του πάχους κάθε στρώσης. Ο υπολογισμός του πάχους μιας στρώσης πραγματοποιείται με συνδυασμό της ταχύτητας διάδοσης και του χρόνου άφιξης του κύματος (σχέση 3.4) (K. R. Maser, 1995).

$$h = v \cdot \frac{t}{2} \quad (3.4)$$

όπου:

- t: ο χρόνος άφιξης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (sec)
- h: το πάχος της στρώσης (m)
- v: η ταχύτητα του μεταδιδόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο σώμα του υλικού (m/sec)

Αντικαθιστώντας στη σχέση 3.4 την ταχύτητα διάδοσης (v) από τη σχέση 3.3, προκύπτει μια σχέση υπολογισμού του πάχους, η οποία έχει ως μεταβλητή τη διηλεκτρική σταθερά (σχέση 3.5) (K. R. Maser, 1995).

$$h = \frac{c \cdot t}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (3.5)$$

όπου:

- ε: η σχετική διηλεκτρική σταθερά
- C: η ταχύτητα του φωτός ($\approx 10^8$ m/sec)
- t: ο χρόνος άφιξης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (sec)
- h: το πάχος της στρώσης (m)

Ο τρόπος που λειτουργεί το GPR για την επί τόπου εκτίμηση της διηλεκτρικής σταθεράς βασίζεται στη μέθοδο της επιφανειακής ανάκλασης (Surface Reflection Method: SRM). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τη διηλεκτρική αντίθεση που υπάρχει

μεταξύ των στρώσεων ώστε να ποσοτικοποιήσει την ανακλαστική ισχύ τους μέσω του συντελεστή ανάκλασης (Plati and Loizos, 2013)(σχέση 3.6).

$$\gamma_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_i} - \sqrt{\varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_{i+1}}} \quad (3.6)$$

όπου:

- ε_i : η διηλεκτρική σταθερά της στρώσης i
- ε_{i+1} : η διηλεκτρική σταθερά της στρώσης i+1
- γ_i : ο συντελεστής ανάκλασης

Ο συντελεστής ανάκλασης έχει άμεση σχέση με το πλάτος του ανακλώμενου κύματος (A_0, A_1, A_2) που παρατηρείται μεταξύ των διεπιφανειών των στρώσεων (αέρας/ασφαλτικά, ασφαλτικά/βάση, βάση/υπέδαφος) (Εικόνα 3.5). Με τον συνδυασμό του συντελεστή ανάκλασης και του πλάτους του ανακλώμενου κύματος προκύπτει η διηλεκτρική σταθερά κάθε στρώσης του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς των ασφαλτικών με βάση τα δεδομένα του GPR (Plati and Loizos, 2013) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

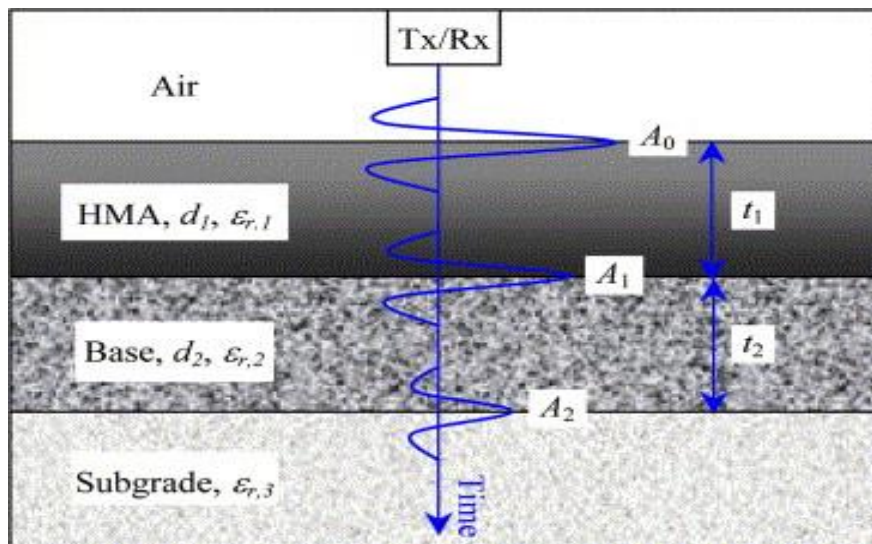
$$\varepsilon_{HMA} = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_p}}{1 - \frac{A_0}{A_p}} \right)^2 \quad (3.7)$$

όπου:

- ε_{HMA} : η διηλεκτρική σταθερά της ασφαλτικής στρώσης
- A_0 : το πλάτος του ανακλώμενου κύματος στη διεπιφάνεια αέρα/ασφαλτικά
- A_p : Το πλάτος του τυχαίου κύματος GPR προσδιορίζεται μέσω της συλλογής δεδομένων GPR πάνω σε επίπεδη μεταλλική πλάκα, η οποία είναι μεγαλύτερη από το αποτύπωμα της κεραίας (συνήθως 1 m × 1 m). Η μεταλλική πλάκα τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια του οδοστρώματος.

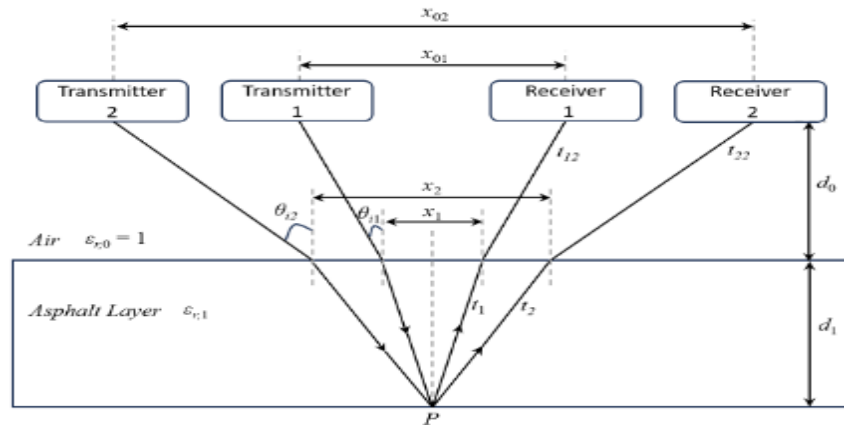
Δεδομένου ότι το μέταλλο είναι καλός αγωγός, μπορεί να θεωρηθεί τέλειος ανακλαστήρας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι, τα ανακλώμενα κύματα της μεταλλικής πλάκας είναι ίσα και αντίστροφα με τα κύματα που εκπέμπει η κεραία του GPR. Συγκρίνοντας τα ανακλώμενα κύματα από την μεταλλική πλάκα με εκείνα του οδοστρώματος πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του συστήματος. Η βαθμονόμηση διεξάγεται στην αρχή των μετρήσεων ή στο τέλος τους και

πραγματοποιείται μία φορά. Με αυτή τη διαδικασία των υπολογισμών των ανακλώμενων κυμάτων (A_0, A_p) μπορεί να καθοριστεί η διηλεκτρική σταθερά της ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 3.5: Τυπικές ανακλάσεις κυμάτων GPR από ένα ασφαλτικό οδόστρωμα
Πηγή: (AL-Qadi and Lahouar, 2005)

Εκτός από την κλασική χρήση του GPR που βασίζεται στη μέθοδο της επιφανειακής ανάκλασης (SRM) ή «Surface Reflection Method», την τελευταία δεκαετία εμφανίστηκε στον επιστημονικό κόσμο και η μέθοδος XCMP ή «Extended Common Mid-Point Method» (AL-Qadi, Larkin and Leng, 2011). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί 2 κεραίες GPR οι οποίες αποτελούνται από έναν πομπό και έναν δέκτη η καθεμία, σε αντίθεση με την SRM η οποία χρησιμοποιεί 1 κεραία GPR, υπολογίζοντας έτσι 2 χρόνους άφιξης (t_{12} και t_{22}) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6 Διαδρομή διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την μέθοδο XCMR
Πηγή:(Wang et al., 2024)

Με αυτόν τον τρόπο προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση παχών και στον καθορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς για στρώσεις πάχους μεγαλύτερες των 10cm (Leng and Al-Qadi, 2014). Βέβαια, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και κυριότερα την δυνατότητα των συστημάτων GPR για μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας αποδείχθηκε ότι η XCMR εκτιμάει τα πάχη με σφάλματα της τάξης του 1,5% ακόμα και σε λεπτές στρώσεις ενώ η SRM παρουσιάζει σφάλματα της τάξης του 6,4% (Wang et al., 2024). Αυτή η βελτίωση οφείλεται στον συνυπολογισμό της μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς ανάλογα με το βάθος, σε αντίθεση με την μέθοδο SRM που θεωρεί ομοιόμορφη τη διηλεκτρική σταθερά σε όλο το πάχος της στρώσης.

3.4 Παράγοντες επίδρασης στον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς

Ο προσδιορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες κυρίως εξωγενείς, αλλά και ενδογενείς. Κάποιοι από τους εξωγενείς παράγοντες είναι η μεταβολή της συχνότητας του διαδιδόμενου κύματος, καθώς και η παρουσία νερού. Όσο για τους ενδογενείς παράγοντες άξιοι αναφοράς είναι τα κενά αέρα, αλλά και ο τύπος υλικού των αδρανών (ορυκτολογική σύνθεση).

Ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση είναι το νερό, αφού μπορεί να εισέρχεται στα κενά αέρα και να επηρεάζει τη διηλεκτρική σταθερά (Berthelot et al., 2010). Έτσι λόγω της αντικατάστασης του αέρα με νερό και τη μεγάλη διαφορά που υπάρχει στις μεταξύ τους διηλεκτρικές σταθερές, αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος. Για αυτό τον λόγο η παρουσία νερού δυσκολεύει τον ακριβή

υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς του ασφατομίγματος (Cao and Al-Qadi, 2021).

Η μεταβολή της συχνότητας των διαδιδόμενων κυμάτων προκαλεί διαφοροποίηση της διηλεκτρικής σταθεράς χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την τιμή της σε τυπικές συνθήκες. Σε συχνότητες 3-7 GHz η διηλεκτρική σταθερά είναι ανεξάρτητη της συχνότητας, όμως σε συχνότητες μικρότερες των 3GHz η αύξηση της συχνότητας των κυμάτων οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς. Το ίδιο παρατηρείται και για συχνότητες κυμάτων μεγαλύτερες των 7 GHz όπου η διηλεκτρική σταθερά μειώνεται ελαφρώς (Chang, Chen and Wu, 2011). Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι σε ειδικές περιπτώσεις όπου υπάρχει δυνατότητα εκτενούς διερεύνησης, η συχνότητα των κυμάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν παρά τη μη μεγάλη επίδραση που έχει στην διηλεκτρική σταθερά (Walia et al., 2021).

Για τους ενδογενείς παράγοντες και ειδικότερα ως προς τα αδρανή, η ορυκτολογική σύνθεση τους προκαλεί διαφορετική απόκριση στο GPR λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων τους όπως η αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχει επίδραση στη διηλεκτρική σταθερά (Saarenketo and Scullion, 2000). Ο επόμενος παράγοντας που αναφέρθηκε είναι τα κενά αέρα, τα οποία επηρεάζουν αρκετά τη διηλεκτρική σταθερά. Πιο συγκεκριμένα, η διηλεκτρική σταθερά είναι χαμηλότερη όταν τα κενά αέρα του μίγματος είναι αυξημένα και αυτό διότι η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος προκύπτει από τις διηλεκτρικές σταθερές όλων των υλικών του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν το ποσοστό κενών αέρα αυξηθεί, (η διηλεκτρική σταθερά ισούται με μονάδα), να παρατηρηθεί μείωση στη συνολική διηλεκτρική σταθερά του μίγματος (Georgouli and Plati, 2024).

3.5 Θερμοκρασία και διηλεκτρική σταθερά

Από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας φαίνεται ότι αρκετά χαρακτηριστικά των ασφατομιγμάτων έχουν συνδεθεί με τη διηλεκτρική σταθερά. Για παράδειγμα, έχουν αναπτυχθεί σχέσεις για τη συσχέτιση της διηλεκτρικής σταθεράς με τα κενά αέρα, την υγρασία κ.α. (Georgouli and Plati, 2024). Όμως, υπάρχουν και έρευνες για τον συσχετισμό της διηλεκτρικής σταθεράς με τη θερμοκρασία (Yu et al., 2021; Zhong et al., 2022). Στις αρχικές έρευνες που είχαν πραγματοποιηθεί είχε προκύψει ότι η επίδραση της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο σημαντική μιας και οι μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς ήταν μικρές (Jaselskis, Grigas and Brilingas, 2003). Κυρίως τα τελευταία χρόνια, αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για τη συσχέτιση της θερμοκρασίας με τη διηλεκτρική σταθερά και

αρκετοί ερευνητές κατέληξαν σε διάφορα μοντέλα (Zhang and Ni, 2022; Wang et al., 2023). Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων στηρίχθηκε σε κοινά διηλεκτρικά μοντέλα ασφατομιγμάτων (π.χ. CRIM, Brown, Rayleigh, Zheng και Zhai), τα οποία προέκυψαν βασιζόμενα στα μεγέθη της διηλεκτρικής σταθεράς, της ογκομετρικής αναλογίας και της γεωμετρίας κάθε συστατικού, που καθορίζουν τις πολικές ιδιότητες ενός ετερογενούς μέσου, όπως το ασφατόμιγμα (Zhai et al., 2019). Τα συγκεκριμένα μοντέλα περιγράφονται ακολούθως:

Μοντέλο CRIM

$$\sqrt{\varepsilon_m} = \sum_i^n v_i \sqrt{\varepsilon_i} \quad (3.4)$$

όπου:

- ε_m : η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος
- ε_i : η διηλεκτρική σταθερά των μεμονωμένων συστατικών
- v_i : το ποσοστό όγκου των μεμονωμένων συστατικών
- n : ο αριθμός των συστατικών

Μοντέλο του Brown

$$\varepsilon_m = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon_i \quad (3.5)$$

όπου:

- ε_m : η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος
- ε_i : η διηλεκτρική σταθερά των μεμονωμένων συστατικών
- v_i : το ποσοστό όγκου των μεμονωμένων συστατικών
- n : ο αριθμός των συστατικών

Μοντέλο του Rayleigh

$$\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_a}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_a} = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_a}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_a} \quad (3.6)$$

όπου:

- ε_m : η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος

- ϵ_i : η διηλεκτρική σταθερά των μεμονωμένων συστατικών
- v_i : το ποσοστό όγκου των μεμονωμένων συστατικών
- n : ο αριθμός των συστατικών
- ϵ_a : η διηλεκτρική σταθερά του αέρα

Μοντέλο του Zheng

$$\epsilon_{t\,dc} = \frac{(\epsilon_{as}-1)f_{as}+(\epsilon_s-1)f_s+f_a\epsilon_a}{\frac{4}{3}-\frac{1}{2\epsilon_{as}}+\frac{1}{6\epsilon_s}} + 1 \quad (3.7)$$

όπου:

- $\epsilon_{t\,dc}$: η θεωρητική διηλεκτρική σταθερά του ασφαλομίγματος
- ϵ_{as} : η διηλεκτρική σταθερά της ασφάλτου
- ϵ_s : η διηλεκτρική σταθερά του αδρανούς υλικού
- ϵ_a : η διηλεκτρική σταθερά του αέρα
- f_{as} : η αναλογία όγκου της ασφάλτου
- f_s : η αναλογία όγκου του αδρανούς υλικού
- f_a : η αναλογία όγκου του αέρα

Μοντέλο του Zhai

$$\frac{\epsilon_{aas}-\epsilon_{as}}{\epsilon_{aas}+2\epsilon_{as}} = \sum_{i=1}^k v_i \frac{2\hat{\epsilon}/r_i+\epsilon_i-\epsilon_{as}}{2\hat{\epsilon}/r_i+\epsilon_i+2\epsilon_{as}} \quad (3.8)$$

και

$$v_{aas} \frac{\epsilon_{aas}-\epsilon_m}{\epsilon_{aas}+2\epsilon_m} + v_{air} \frac{\epsilon_a-\epsilon_m}{\epsilon_a+2\epsilon_m} = 0 \quad (3.9)$$

- ϵ_{aas} : η διηλεκτρική σταθερά της δομής ασφάλτου-αδρανών υλικών
- ϵ_{as} : η διηλεκτρική σταθερά της ασφάλτου
- ϵ_i : η διηλεκτρική σταθερά των μεμονωμένων συστατικών
- ϵ_a : η διηλεκτρική σταθερά του αέρα

- ϵ_m : η διηλεκτρική σταθερά του μίγματος
- $\hat{\epsilon}$: η διηλεκτρική σταθερά της διεπιφάνειας, που προσδιορίζεται πειραματικά
- r_i : η μέση ακτίνα των αδρανών υλικών
- v_{aas} : το ποσοστό όγκου της δομής ασφάλτου-αδρανών υλικών
- v_{air} : το ποσοστό όγκου κενών αέρα
- v_i : το ποσοστό όγκου των αδρανών υλικών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, έχουν προκύψει αντίστοιχα διηλεκτρικά μοντέλα στα οποία λαμβάνεται υπόψη και η θερμοκρασία. Όλες οι έρευνες έχουν κάποια βασικά στοιχεία ενδιαφέροντος, τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Ο συντελεστής συσχέτισης R^2
- 2) Το εύρος τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ')
- 3) Το εύρος τιμών του παράγοντα απωλειών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ'')
- 4) Η επιλογή θερμοκρασιών
- 5) Το πλήθος των μιγμάτων
- 6) Η σύσταση των μιγμάτων
- 7) Ο τρόπος και οι συχνότητες μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς

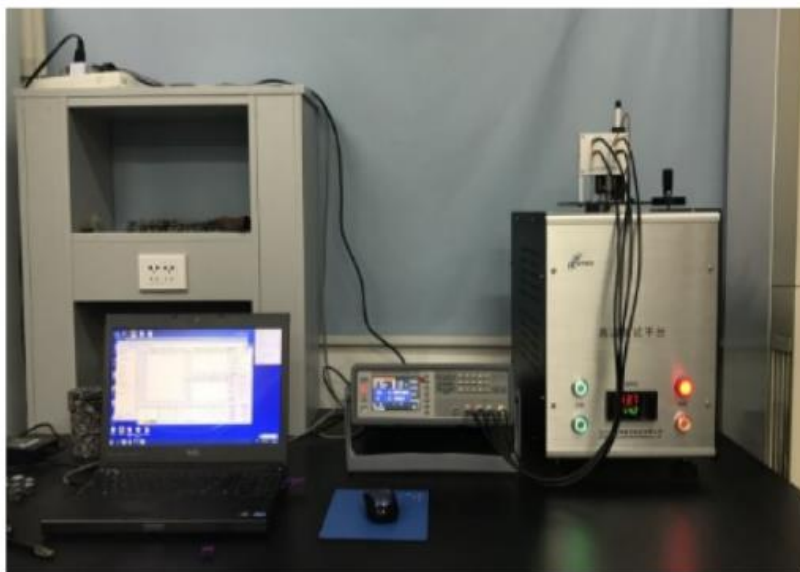
Οι Yu et. al. το 2021 ανέλυσαν τα αποτελέσματα από μετρήσεις που προήλθαν από δείγματα σε υφιστάμενο οδόστρωμα σε μια πλατφόρμα μέτρησης διηλεκτρικής σταθεράς (Εικόνα 3.5) για θερμοκρασίες 30°C – 60°C με βήμα 5°C και στη συνέχεια, συνέκριναν τα αποτελέσματα με αυτά της σχέσης-μοντέλου που ανέπτυξαν, η οποία είναι:

$$\epsilon = \frac{dA \cdot e^{\left(\frac{-E}{KT}\right)}}{2\pi^2 r^2 f \hat{\epsilon} \tan \delta} \quad (3.10)$$

όπου:

- A: σταθερά αγωγιμότητας του υλικού
- E: ενέργεια ενεργοποίησης της αγωγιμότητας του υλικού
- K: σταθερά του Boltzmann
- T: θερμοκρασία σε Kelvin
- r: ακτίνα του δείγματος

- f: συχνότητα



Εικόνα 3.7: Πλατφόρμα μέτρησης διηλεκτρικής σταθεράς
Πηγή:(Yu et al., 2021)

Στην υπόψη έρευνα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις 3 διαφορετικές στρώσεις των ασφατικών, οι οποίες είναι διαφορετικής σύστασης η κάθε μία. Έτσι, προέκυψε ένα εύρος τιμών διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) από 6.4 – 7.54 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ίσος με 0.996 και για τα 3 μίγματα. Από την εν λόγω έρευνα προέκυψαν παρατηρήσεις άξιες αναφοράς. Μία από αυτές είναι ότι υπήρξε αύξηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα όμως, ο ρυθμός μεταβολής της διηλεκτρικής σταθεράς σε σχέση με την θερμοκρασία άρχισε να επιβραδύνεται σταδιακά. Επίσης, άλλη μια παρατήρηση με αρκετό ενδιαφέρον είναι ότι οι διαφορετικές θερμοκρασίες που μετρήθηκαν στις στρώσεις του οδοστρώματος οδηγούν σε εσφαλμένες μετρήσεις της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς, παρότι οι περισσότερες επί τόπου μετρήσεις πραγματοποιούνται το καλοκαίρι σε υψηλές θερμοκρασίες για να αποφευχθεί η ύπαρξη νερού και παγετού. Αυτό συμβαίνει διότι οι θερμοκρασίες των στρώσεων είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες των 30°C, που αποτελεί τη βασική θερμοκρασία μέτρησης στη συγκεκριμένη μελέτη, με αποτέλεσμα κατά τη σύγκριση τους να προκύπτει σφάλμα στη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς που φτάνει ή ξεπερνάει το 10%. Όλα τα παραπάνω ευρήματα μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση και διόρθωση των μετρήσεων με GPR, με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του για την αξιολόγηση και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων (Yu et al., 2021).

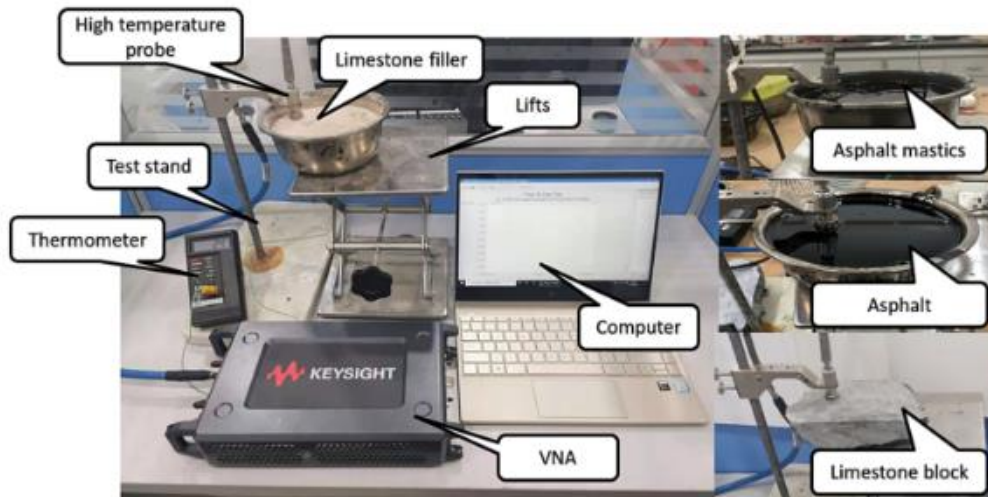
Οι Zhong et. al. το 2022, αφού συνέθεσαν έξι (6) διαφορετικά μίγματα με ίδια αδρανή και τύπο ασφάλτου αλλά με διαφορετικό ποσοστό πλήρωσης το καθένα, πραγματοποίησαν τις μετρήσεις με τη χρήση της συσκευής «Agilent P5001A network analyzer» (Εικόνα 3.6) για θερμοκρασίες από -30°C έως 60°C με βήμα 5°C και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αυτά της σχέσης-μοντέλου που ανέπτυξαν, η οποία είναι:

$$\varepsilon_{eff,T} = \left(\varepsilon_m + \frac{3f\varepsilon_m(\varepsilon_j - \varepsilon_m)}{\varepsilon_j + 2\varepsilon_m - f(\varepsilon_j - \varepsilon_m)} \right)_{20} + (T - 20)\theta_z$$

$$\left(\varepsilon_m + \frac{3f\varepsilon_m(\varepsilon_j - \varepsilon_m)}{\varepsilon_j + 2\varepsilon_m - f(\varepsilon_j - \varepsilon_m)} \right)_{20} = \varepsilon_{m,20} + \frac{3f\varepsilon_{m,20}(\varepsilon_{j,20} - \varepsilon_{m,20})}{\varepsilon_{j,20} + 2\varepsilon_{m,20} - f(\varepsilon_{j,20} - \varepsilon_{m,20})} \quad (3.11)$$

όπου:

- ε_m : η διηλεκτρική σταθερά της ασφάλτου στους 20°C
- ε_j : η διηλεκτρική σταθερά της ασφαλτικής μαστίχης στους 20°C
- T : η θερμοκρασία σε °C
- f : η συχνότητα
- θ_z : ο συντελεστής επίδρασης της θερμοκρασίας στην διηλεκτρική σταθερά ($d\varepsilon/dT$)



Εικόνα 3.8: Agilent P5001A network analyzer
Πηγή:(Zhong et al., 2022)

Από την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων προέκυψε ένα εύρος τιμών για τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ') 1.75 – 4.5 και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ίσος με 0.99 και για τα έξι (6) διαφορετικά μίγματα κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έπειτα, από την επεξεργασία των δεδομένων παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας προκύπτει αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του μίγματος και ειδικότερα, αυξάνεται επιπλέον αν αυξηθεί και το ποσοστό πλήρωσης ασφάλτου. Επειδή η εν λόγω έρευνα εστίασε στη δομή και στα χαρακτηριστικά πόλωσης, χρησιμοποιώντας μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων διαπιστώθηκε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας τα εσωτερικά μόρια, κυρίως των αδρανών, αποκτούν ενέργεια μέσω της θερμότητας. Έτσι, με την κίνησή τους να εντείνεται, η πόλωσή τους γίνεται εμφανής και ως εκ τούτου, παρατηρείται αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς. Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι κατά την παρακολούθηση των μιγμάτων εντοπίστηκε ότι ο αριθμός κενών στην επιφάνεια των μιγμάτων μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας και αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η μικροδομή των μιγμάτων που συνδέεται με τη διηλεκτρική σταθερά εξαρτάται από την θερμοκρασία (Zhong et al., 2022).

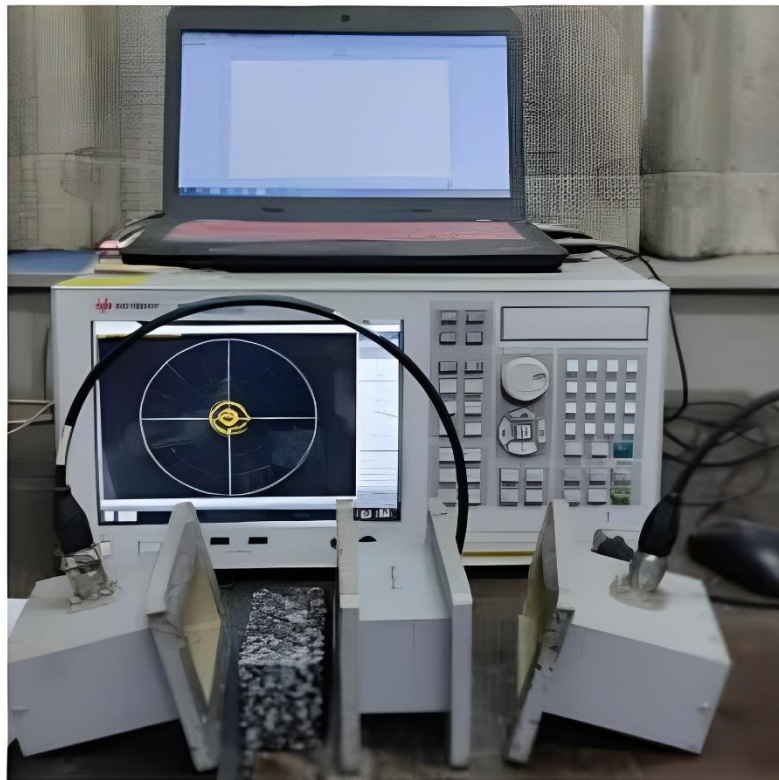
Οι Zhang et. al. το 2022, αφού συνέθεσαν έξι (6) διαφορετικά ασφαλτομίγματα με δύο (2) διαφορετικά είδη ασφάλτου και έναν τύπο αδρανούς, πραγματοποίησαν τις μετρήσεις με τη χρήση της συσκευής : «Network Analyzer E5071C» (Εικόνα 3.7) για θερμοκρασίες από -30°C έως 60°C με βήμα 5°C και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αυτά της σχέσης-μοντέλου που ανέπτυξαν, η οποία είναι:

$$\epsilon_T = a(T - 25) + (-1,8481) \left(\frac{(\epsilon_{as}-1)f_{as} + (\epsilon_s-1)f_s + f_a \epsilon_a}{\frac{4}{3} - \frac{1}{2\epsilon_{as}} + \frac{1}{6\epsilon_s}} \right) + 15,862 \quad (3.12)$$

όπου:

- ϵ_{as} : η διηλεκτρική σταθερά της ασφάλτου
- ϵ_s : η διηλεκτρική σταθερά του αδρανούς
- ϵ_a : η διηλεκτρική σταθερά του αέρα
- T : η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$
- f_{as} : το ποσοστό κατ' όγκου της ασφάλτου
- f_s : το ποσοστό κατ' όγκου των αδρανών
- f_a : το ποσοστό κατ' όγκου του αέρα

- α: ο συντελεστής επίδρασης της θερμοκρασίας στην διηλεκτρική σταθερά ($d\epsilon/dT$)



Εικόνα 3.9: Network Analyzer E5071C (Keysight Technologies)
Πηγή: (Zhang et al., 2022)

Από τις μετρήσεις προέκυψε ένα εύρος τιμών για τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ') από 5 – 6.2 και τον συντελεστή συσχέτισης R^2 ίσο με 0.99 για το όλο το σύνολο των ασφαλτομιγμάτων. Ένα από τα εξαχθέντα συμπεράσματα της έρευνας συνάδει με το βασικό συμπέρασμα των (Yu et al., 2021; Zhong et al., 2022)), δηλαδή ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του ασφαλτομίγματος και ότι είναι ένας σημαντικός παράγοντας επίδρασης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι, λόγω της τριφασικής δομής του ασφαλτομίγματος (κενά αέρα, άσφαλτος και αδρανή), η επίδραση της θερμοκρασίας στις διηλεκτρικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος είναι άθροισμα της επίδρασής της στα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε συστατικού. Ειδικότερα, επειδή τα αδρανή είναι το κύριο συστατικό των ασφαλτομιγμάτων, μιας και το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνουν είναι πάνω από το 70%, είναι και εκείνα που έχουν καθοριστικότερο ρόλο για το μέγεθος της διηλεκτρικής σταθεράς του ασφαλτομίγματος. Συνολικά, η έρευνα ενισχύει την πεποίθηση ότι είναι ζωτικής σημασίας η επίδραση της θερμοκρασίας στον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και ότι θα πρέπει να

λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με GPR ή με οποιαδήποτε άλλη συσκευή (Zhang et. al, 2022).

Οι Wang et. al. το 2023, συνέθεσαν τέσσερα (4) διαφορετικά ασφαλτομίγματα με δύο (2) διαφορετικούς τύπους ασφάλτου και έναν τύπο αδρανούς (Ανδεσίτη). Στη συνέχεια πραγματοποίησαν τις μετρήσεις για θερμοκρασίες από -30°C έως 60°C με βήμα 15°C και συχνότητες από 200Hz–2.000.000Hz με τη χρήση ενός εξαρτήματος για τη θερμική ανάλυση διηλεκτρικών ιδιοτήτων «DETA» (Εικόνα 3.8) σε συνδυασμό με τον μετρητή «Agilent LCR E4980A» (Εικόνα 3.9) και συνέκριναν τα αποτελέσματα με αυτά της σχέσης-μοντέλου που ανέπτυξαν με βάση το μοντέλο του Zhai (Zhai et al., 2019), το οποίο περιγράφεται από τη σχέση 3.13:

$$\varepsilon_T = [k_f(lgf - lg2000000) + k_T](T - 15) + \frac{(\varepsilon_a(2-3v_{air})(1+2c)/1-c+3v_{air}-1)}{4} + \sqrt{\frac{(\varepsilon_a(2-3v_{air})(1+2c)/1-c+3v_{air}-1)^2 + 8(\varepsilon_a(1+2c)/1-c)}{4}} \quad (3.13)$$

όπου:

- k_f : ο συντελεστής συχνότητας
- k_T : ο συντελεστής θερμοκρασίας
- T : η θερμοκρασία σε °C
- c : ο συντελεστής από το μοντέλο του Zhai
- ε_a : η διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος
- v_{air} : το ποσοστό κενών αέρα
- f : η συχνότητα



Εικόνα 3.10: Εξάρτημα DETA
Πηγή: (Wang et al., 2023)



Εικόνα 3.11: Μετρητής Agilent LCR E4980A
Πηγή: (Wang et al., 2023)

Στη συγκεκριμένη έρευνα οι μετρήσεις έδωσαν ένα εύρος τιμών για τη διηλεκτρική σταθερά (ϵ') από 5-35 και τον συντελεστή συσχέτισης R^2 μεγαλύτερο του 0.85 για όλα τα ασφατομίγματα. Αυτό το μεγάλο εύρος τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς οφείλεται εκτός από τις διαφορετικές θερμοκρασίες και στις διαφορετικές συχνότητες των κυμάτων που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Αξιολογώντας τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς, όπως και στις προαναφερόμενες έρευνες. Επιπλέον, ένα σημείο της έρευνας που είναι απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ασφατομιγμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, αλλά και τη συχνότητα των κυμάτων με την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αδρανών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, διότι η αύξηση της αποδυναμώνει τη σύνδεση μεταξύ των ατόμων του υλικού καθιστώντας ευκολότερη την πόλωση. Σε αντίθεση, τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ασφάλτου παρουσιάζουν αρκετά μικρές αυξήσεις με

την αύξηση της θερμοκρασίας και αυτό οφείλεται στους ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων του άνθρακα και του υδρογόνου, που περιορίζουν την ικανότητα πόλωσης του ασφατικού. Συνοψίζοντας, αναδεικνύεται η σημασία της θερμοκρασίας αλλά και της συχνότητας των μεταδιδόμενων κυμάτων στις διηλεκτρικές σταθερές των ασφατομιγμάτων και τονίζονται το πόσο σημαντικό είναι να λαμβάνονται υπόψη στους μη καταστρεπτικούς ελέγχους γεωφυσικού χαρακτήρα για την αξιολόγηση ή τον έλεγχο των ασφατικών οδοστρωμάτων (Wang et al., 2023).

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Περιγραφή δεδομένων-διαδικασίας

4.1.1 Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων

Στο πλαίσιο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις σε τριάντα έξι (36) δοκίμια Marshall του Εργαστηρίου Οδοστρωμάτων του Ε.Μ.Π, για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ διηλεκτρικής σταθεράς και θερμοκρασίας. Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο (2) ασφαλτομίγματα αντιολισθηρής στρώσης (ΤΥΠΟΣ II). Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτών των ασφαλτομιγμάτων είναι ο τύπος αδρανούς υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την σύνθεσή τους. Τα δεκαοκτώ (18) δοκίμια αφορούν σε ασφαλτόμιγμα στο οποίο ως αδρανές υλικό χρησιμοποιήθηκε ανδεσίτης (Εικόνα 4.1) ενώ τα υπόλοιπα αφορούν σε ασφαλτόμιγμα στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές υλικό σκωρία (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.1: Δοκίμια Marshall - Ανδεσίτης



Εικόνα 4.2: Δοκίμια Marshall – Σκωρία

Όπως σε κάθε μελέτη σύνθεσης, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες δοκιμές και για τα δύο (2) μίγματα, με βάση τα διεθνή πρότυπα. Από αυτές τις δοκιμές προέκυψαν στοιχεία για τα χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων και τη κοκκομετρική διαβάθμισή τους, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή πινάκων και εικόνων.

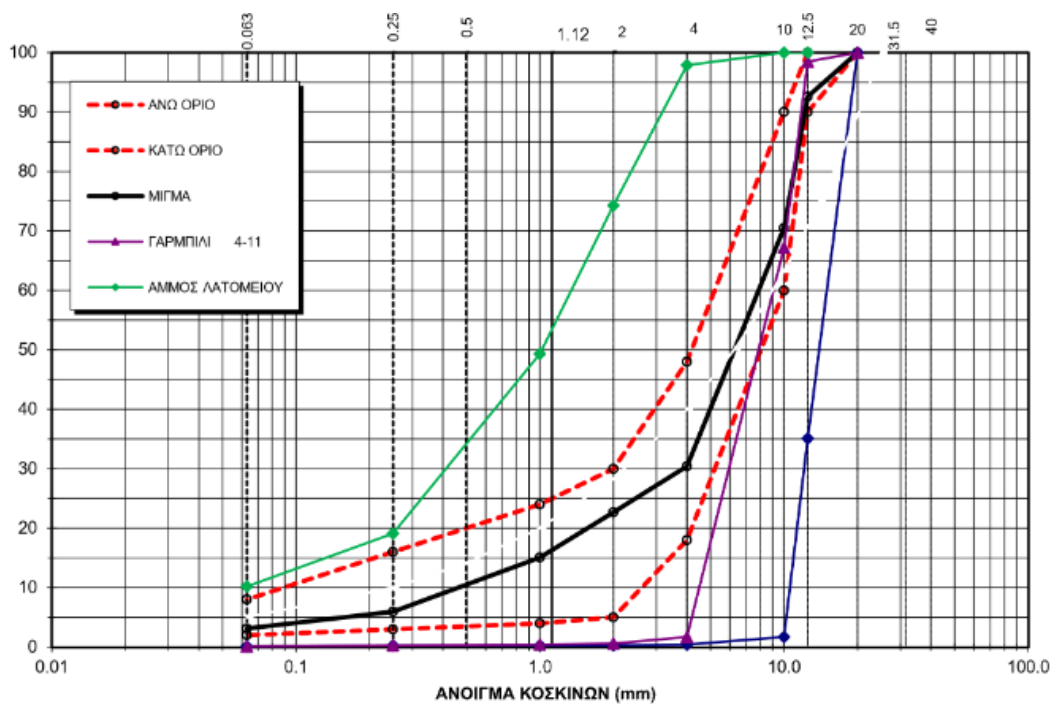
Στον Πίνακα 4.1 περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού σύνθεσης για το ασφαλτόμιγμα με αδρανές τον ανδεσίτη. Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, όπου διακρίνονται το ανώτερο και το κατώτατο όριο ποσοστό διερχομένων σε σύγκριση με το ποσοστό του μίγματος. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση με τη μορφή γραφικής παράστασης.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα σχεδιασμού σύνθεσης του ασφαλτομίγματος - Ανδεσίτη

ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΔΡΑΝΩΝ	%	4.20	4.50	4.80	5.20
ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	4.03	4.31	4.58	4.94
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΥ	%	0.63	0.63	0.63	0.63
ΕΝΕΡΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	3.4	3.7	4.0	4.3
ΕΝΕΡΓΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ	t/m ³	2.876	2.876	2.876	2.876
ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	t/m ³	2.682	2.670	2.658	2.642
Φ. ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	t/m ³	2.364	2.395	2.412	2.428
ΚΕΝΑ ΑΔΡΑΝΩΝ κ.ο. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	18.8	18.0	17.7	17.4
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ κ.ο. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	11.9	10.3	9.2	8.1
ΚΕΝΑ ΠΛΗΡΩΜΕΝΑ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΟ	%	37.0	42.8	47.7	53.6
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ	kN	13.8	14.1	12.0	11.4
ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	mm	3.2	2.8	3.5	3.7
ΑΚΑΜΨΙΑ	kN/mm	4.3	5.0	3.4	3.1

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφαλτομίγματος – Ανδεσίτης

ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΚΟΚΚΟΣ		12.5 mm		ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΤΥΠΟΣ 2		ΠΕΤΕΠ 05-03-12-01:2018			
ΚΟΣΚΙΝΑ				ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ					
	(mm)	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ						
					ΧΑΛΙΚΙ 11-16	ΓΑΡΜΠΙΛΙ 4-11	ΑΜΜΟΣ		ΜΙΓΜΑ
	40	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	31.50	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	20.00	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	12.50	100	90		35.1	98.5	100.0		92.6
	10.00	90	60		1.7	67.2	100.0		70.5
	4.00	48	18		0.4	1.7	97.9		30.4
	2.00	30	5		0.3	0.6	74.3		22.7
	1.00	24	4		0.3	0.4	49.3		15.1
	0.25	16	3		0.3	0.3	19.1		5.9
	0.063	8	2		0.1	0.1	10.2		3.1
ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ					10%	60%	30%		100%



Εικόνα 4.3: Γραφική παράσταση κοκκομετρικής διαβάθμισης- Ανδεσίτης

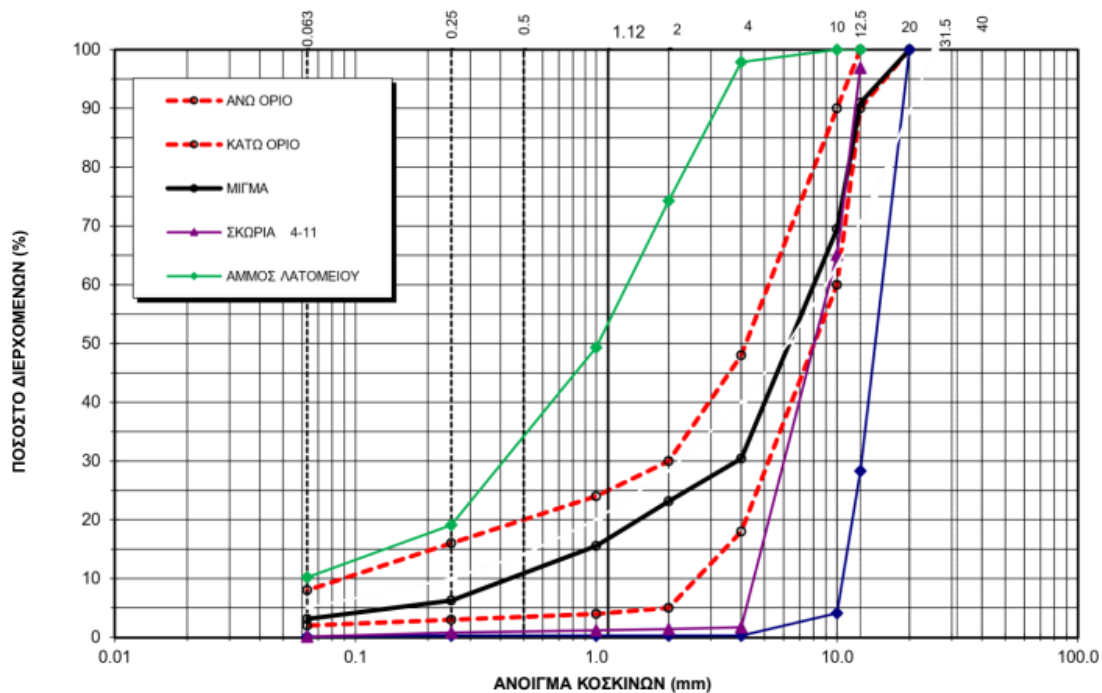
Στον Πίνακα 4.3 παρατηρούνται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού σύνθεσης για το ασφαλτόμικμα με αδρανές τη σκωρία. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος, όπου διακρίνονται το ανώτερο και το κατώτατο όριο ποσοστό διερχομένων σε σύγκριση με το ποσοστό του μίγματος. Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση με τη μορφή γραφικής παράστασης.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα σχεδιασμού σύνθεσης του ασφαλτομίγματος - Σκωρία

ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΔΡΑΝΩΝ	%	4.30	4.60	4.90	5.20
ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	4.12	4.40	4.67	4.94
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΥ	%	1.32	1.32	1.32	1.32
ΕΝΕΡΓΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ κ.β. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	2.9	3.1	3.4	3.7
ΕΝΕΡΓΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΔΡΑΝΩΝ	t/m ³	3195	3195	3195	3195
ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	t/m ³	2940	2924	2909	2894
Φ. ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	t/m ³	2550	2605	2629	2646
ΚΕΝΑ ΑΔΡΑΝΩΝ κ.ο. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	19.0	17.5	17.0	16.7
ΚΕΝΑ ΑΕΡΑ κ.ο. ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	%	13.3	10.9	9.6	8.6
ΚΕΝΑ ΠΛΗΡΩΜΕΝΑ ΜΕ ΑΣΦΑΛΤΟ	%	30.3	37.7	43.3	48.7
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ	kN	13.3	14.5	12.6	11.8
ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ	mm	2.4	2.6	3.1	3.7
ΑΚΑΜΨΙΑ	kN/mm	5.5	5.6	4.1	3.2

Πίνακας 4.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση του ασφαλτομίγματος – Σκωρία

ΜΕΓΙΣΤΟΣ ΚΟΚΚΟΣ		12.5 mm		ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΗ ΤΥΠΟΣ 2		ΠΕΤΕΠ 05-03-12-01:2018			
ΚΟΣΚΙΝΑ				ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ					
	(mm)	ΑΝΩ ΟΡΙΟ	ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ						
					ΣΚΩΡΙΑ 11-16	ΣΚΩΡΙΑ 4-11	ΑΜΜΟΣ		ΜΙΓΜΑ
	40	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	31.50	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	20.00	100	100		100.0	100.0	100.0		100.0
	12.50	100	90		28.3	96.9	100.0		91.0
	10.00	90	60		4.1	65.1	100.0		69.5
	4.00	48	18		0.3	1.7	97.9		30.4
	2.00	30	5		0.3	1.4	74.3		23.2
	1.00	24	4		0.3	1.2	49.3		15.5
	0.25	16	3		0.3	0.8	19.1		6.2
	0.063	8	2		0.1	0.1	10.2		3.1
ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ					0,1	0,6	0,3		1



Εικόνα 4.4: Γραφική παράσταση κοκκομετρικής διαβάθμισης – Σκωρία

4.1.2 Διαδικασία μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του Percometer για τον καθορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και του κλιβάνου για την επίτευξη της θερμοκρασίας στα δοκίμια. Το εύρος των θερμοκρασιών για τη διαδικασία των μετρήσεων αποφασίστηκε να είναι από τους 0°C – 40°C με βήμα 5°C.

Για τη διασφάλιση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας στη διαδικασία των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν για κάθε δοκίμιο πέντε (5) μετρήσεις στην πάνω επιφάνειά του σε κάθε θερμοκρασία με τη χρήση του ανιχνευτή (054 SF) και υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών. Ο μέσος όρος είναι και τελική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του κάθε δοκιμίου. Επίσης, κάτι που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι μετρήθηκε και η διηλεκτρική σταθερά στην πλευρική επιφάνεια με χρήση διαφορετικού ανιχνευτή (055 SFC) αλλά λόγω της μη λειτουργικής επαφής στο δοκίμιο και την παγίδευση αέρα μεταξύ επιφάνειας και ανιχνευτή, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις διότι θα οδηγούσε σε υποτίμηση της διηλεκτρικής σταθεράς του κάθε δοκιμίου. Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται ο τρόπος πραγματοποίησης των μετρήσεων με το Percometer και τον ανιχνευτή.



Εικόνα 4.5: Διαδικασία μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς

Για την επίτευξη της σωστής θερμοκρασίας για όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε κλίβανος, στον οποίο τα δείγματα τοποθετήθηκαν για τουλάχιστον τρεις (3) ώρες ώστε να αποκτήσουν τη ζητούμενη θερμοκρασία. Επίσης, για τη διασφάλιση της θερμοκρασίας των δοκιμών, ο χώρος που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κλιματιζόταν ανάλογα με την θερμοκρασία που είχαν τα δείγματα. Στην Εικόνα 4.6 παρουσιάζεται ο κλίβανος και η ρύθμιση της θερμοκρασίας στους 20°C



Εικόνα 4.6: Ρύθμιση θερμοκρασίας στον κλίβανο

Η διαδικασία που περιεγράφηκε εκτελέστηκε 9 φορές, όσες και οι θερμοκρασίες που αποφασίστηκε να ελεγχθούν. Έτσι, προέκυψε μία χαρακτηριστική τιμή διηλεκτρικής σταθεράς για κάθε δοκίμιο σε κάθε θερμοκρασία. Όλες αυτές οι χαρακτηριστικές τιμές οργανώθηκαν σε δύο (2) διαφορετικούς πίνακες για κάθε ασφαλτόμιγμα με κωδική ονομασία Ai (A: Ανδεσίτης και i: αριθμός δοκιμίου) και Σi (Σ: Σκωρία και i: αριθμός δοκιμίου) να είναι ξεχωριστή για κάθε δοκίμιο.

4.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων περιλαμβάνονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται η τελική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, σε κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Επιπλέον, έχουν υπολογιστεί ο μέσος όρος για το σύνολο των δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία, η τυπική απόκλιση (σ) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (CV).

Ακολουθούν οι πίνακες των μετρήσεων (Πίνακας 4.5 και Πίνακας 4.6)

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ασφαλτόμιγμα – Ανδεσίτης

	Θερμοκρασία									
		0° C	5° C	10° C	15° C	20° C	25° C	30° C	35° C	40° C
Αριθμός δείγματος	A1	5,08	5,02	5,2	5,24	5,18	5,46	5,46	5,56	5,4
	A2	5,04	4,94	4,96	5,1	4,92	5,24	5,3	5,4	5,3
	A3	4,98	4,8	4,96	5,08	4,94	5,1	5,1	5,2	5,24
	A4	4,84	4,8	5,02	5,12	5,04	5,08	5,18	5,28	5,04
	A5	5	4,84	4,92	5,06	5,06	5,16	5,08	5,42	4,94
	A6	4,8	4,86	4,9	5	5,02	5,12	5,06	5,34	5,02
	A7	4,96	4,86	5,04	5,1	5,02	5,16	5,22	5,28	5,22
	A8	4,92	4,82	5,12	5,14	5,14	5,22	5,18	5,46	5,18
	A9	4,82	4,92	4,96	5,06	4,84	5,22	5,18	5,38	5,28
	A10	4,86	4,9	4,96	5,08	4,98	4,98	5,1	5,38	5,04
	A11	4,68	4,66	4,76	4,86	4,92	4,98	4,9	5,06	4,74
	A12	4,68	4,66	4,6	4,52	4,74	4,74	4,74	5,06	4,9
	A13	4,78	4,72	4,9	5,06	5,1	5,12	4,98	5,26	5,04
	A14	4,82	4,88	4,98	4,98	4,9	4,88	4,98	5,14	5,04
	A15	4,86	4,86	5,04	5,16	5,16	5,38	5,36	5,56	5,24
	A16	4,76	4,78	4,78	4,9	4,74	4,98	5,04	5,22	5,28
	A17	4,76	4,86	4,86	4,88	5,04	4,94	5,04	5,32	5,06
	A18	4,94	4,94	5,04	5,1	5,18	5,14	5,12	5,46	5,22
	ΤΥΠ.ΑΠΟΚΛΙΣΗ	0,117	0,095	0,138	0,160	0,136	0,174	0,167	0,149	0,168
	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	4,866	4,840	4,944	5,024	4,996	5,106	5,112	5,321	5,121
	CV	0,024	0,020	0,028	0,032	0,027	0,034	0,033	0,028	0,033

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα μετρήσεων για το ασφαλτόμιγμα – Σκωρία

Πίνακας θερμοκρασιακών μεταβολών για το δοκιμαστικό Σκεύος										
Αριθμός δείγματος	Θερμοκρασία									
		0° C	5° C	10° C	15° C	20° C	25° C	30° C	35° C	40° C
	Σ1	10	9,96	10,44	10,4	10,46	10,98	10,76	11,44	10,66
	Σ2	9,1	9,24	9,22	9,7	9,64	9,92	10,18	10,38	10,12
	Σ3	9,74	9,74	9,6	9,44	9,92	10,1	10,4	10,52	10,52
	Σ4	11,9	11,9	12,2	12,34	12,2	12,76	11,9	10,15	12,1
	Σ5	10,9	10,9	10,48	10,3	9,66	10,72	11,16	11,8	11,9
	Σ6	9,5	9,62	9,24	10,1	8,4	9,92	9,9	10,06	10,18
	Σ7	10,24	10,24	10,42	10	10	11,14	10,74	11,22	10,4
	Σ8	9,18	9,4	8,74	9,2	8,92	9,74	9,78	10,16	9,76
	Σ9	8,88	9,06	8,88	9,06	8,94	9,22	9,5	9,88	9,56
	Σ10	9,48	9,56	9,5	9,34	9,48	9,96	10,38	10,84	10,1
	Σ11	9,08	9,08	8,7	8,66	8,9	9,5	9,84	9,9	9,98
	Σ12	9,9	9,85	9,025	8,3	8,1	9,9	9,425	10,975	10,125
	Σ13	10,18	10,18	10,26	10,9	10,64	11,38	10,42	11,56	11,46
	Σ14	9,7	9,86	9,54	9,28	9,06	9,74	9,86	10,26	9,7
	Σ15	9,36	8,92	9,46	9,76	10,14	9,68	9,68	10,42	9,92
	Σ16	8,86	8,92	9,2	9,1	8,84	9,46	9,56	10,52	9,64
	Σ17	9	9,14	9,96	9,5	9,2	9,92	9,72	9,82	9,96
	Σ18	9,08	9,246	9,56	10,22	9,44	10,36	10	11,18	9,94
ΤΥΠ. ΑΠΟΚΛΙΣΗ	2,266	2,268	2,289	2,324	2,293	2,412	2,340	2,429	2,399	
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	9,166	9,205	9,185	9,247	9,055	9,710	9,646	10,060	9,795	
CV	0,081	0,078	0,087	0,094	0,099	0,085	0,063	0,058	0,073	

Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι η διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος με αδρανές τον ανδεσίτη παρουσιάζει μικρότερες τιμές σε σχέση με το ασφαλτόμιγμα με αδρανές τη σκωρία. Επίσης, με βάση τον συντελεστή μεταβλητότητας (CV) προκύπτει ότι η μεταβλητότητα των δεδομένων και των 2 ασφαλτομιγμάτων είναι χαμηλή αφού είναι κάτω του 10%, που αυτό υποδηλώνει ότι το δείγμα και των δύο (2) ασφαλτομιγμάτων είναι ομοιογενές. Ειδικότερα, για το ασφαλτόμιγμα με τον ανδεσίτη ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνάει το 4% ενώ εκείνο της σκωρίας δεν ξεπερνάει το 10%. Επομένως, μία ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι τα δεδομένα του ανδεσίτη παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια από εκείνα της σκωρίας.

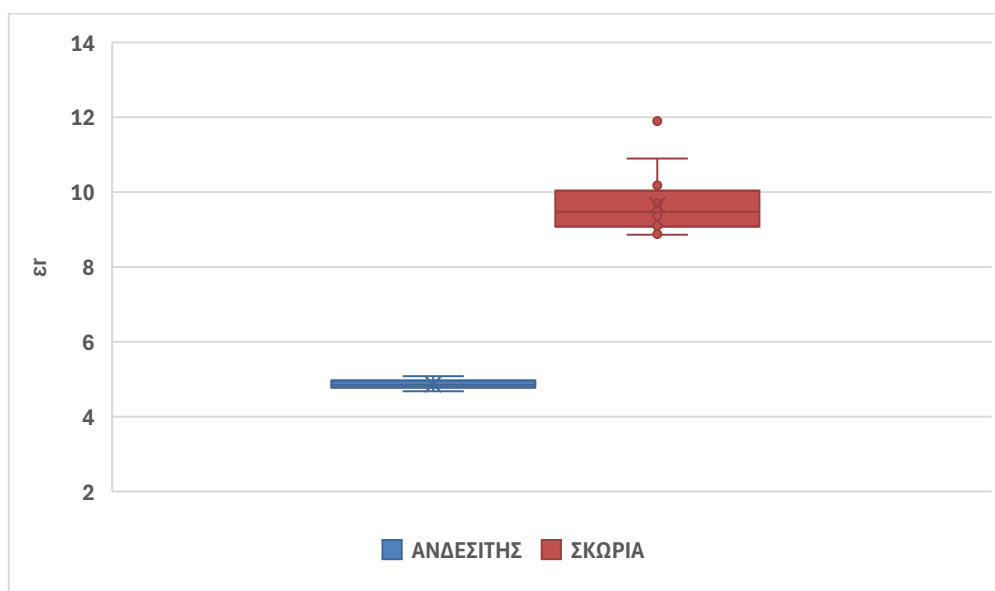
4.1.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων μέτρησης

Με βάση τους πίνακες που προέκυψαν από τις μετρήσεις για την οπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά γραφήματα «Boxplots» ή «Θηκογράμματα». Τα θηκογράμματα είναι μια μέθοδος απεικόνισης ομάδων αριθμητικών δεδομένων μέσω των τεταρτημορίων τους. Αρχικά, για την κατασκευή τους καθορίζονται για τα δεδομένα που δίνονται: το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο $Q_{1/4}$, $Q_{3/4}$, η διάμεσος και η μέση τιμή. Ακολούθως, διαμορφώνεται το ορθογώνιο με κάτω βάση το $Q_{1/4}$ και άνω βάση το $Q_{3/4}$. Το μήκος των βάσεων δεν παρουσιάζει κάτι ουσιαστικό και λαμβάνεται αυθαίρετα. Η διάμεσος παρουσιάζεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο προς τις βάσεις του ορθογωνίου και η μέση τιμή αποδίδεται με το σύμβολο «x». Επίσης, από τα μέσα των βάσεων του

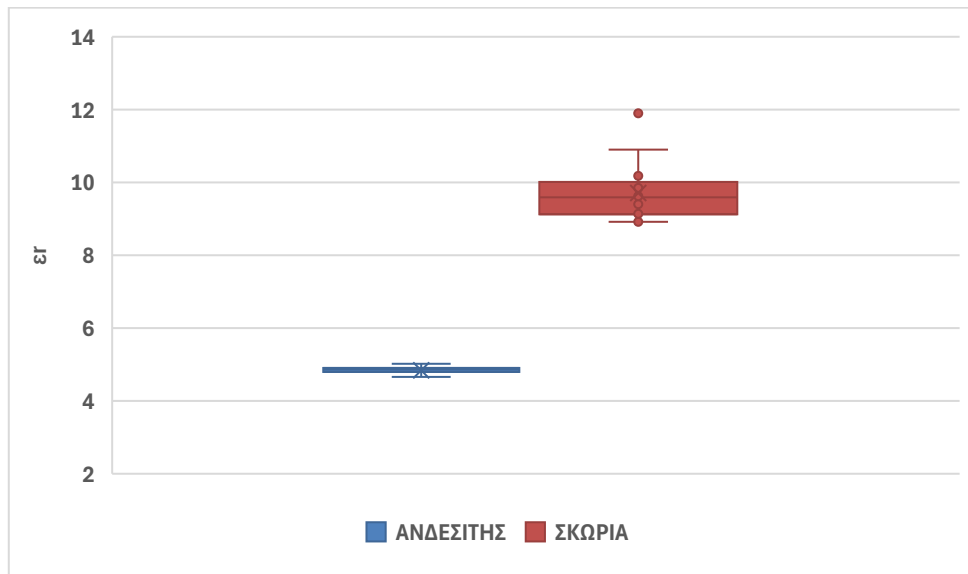
ορθογωνίου εκτείνονται ευθείες γραμμές μέχρι τις οριακές τιμές, οι οποίες εκφράζουν τη μεγαλύτερη και τη μικρότερη παρατήρηση. Η μεγαλύτερη παρατήρηση ορίζεται ως μικρότερη ή ίση της παρακάτω σχέσης $Q_{3/4} + 1.5(Q_{3/4} - Q_{1/4})$ ενώ η μικρότερη παρατήρηση ως μεγαλύτερη ή ίση της $Q_{1/4} + 1.5(Q_{3/4} - Q_{1/4})$. Σε περίπτωση ύπαρξης δεδομένων που βρίσκονται έξω από το εύρος των καθορισμένων ορίων, απεικονίζονται στο διάγραμμα με το σύμβολο «.» και ονομάζονται εξωτερικές ή υπερβολικές τιμές (outliers). Τα θηκογράμματα προσφέρουν μια εικόνα για την συμμετρικότητα των δεδομένων και αυτό παρατηρείται με την βοήθεια της διαμέσου, η οποία αν βρίσκεται στο κέντρο μεταξύ των δύο (2) ορίων, η κατανομή θεωρείται συμμετρική ενώ σε αντίθετη περίπτωση δεν θεωρείται. Επίσης, η μεταξύ απόσταση των δύο (2) ορίων προσφέρει μια αναλυτική εικόνα για τη διασπορά των δεδομένων, δηλαδή σε περίπτωση που είναι μεγάλη η απόσταση, υποδηλώνεται και ότι η διασπορά είναι μεγάλη ενώ αν είναι μικρή ότι η διασπορά είναι συγκεντρωμένη.

Ακολουθούν τα θηκογράμματα τα οποία περιέχουν τα δεδομένα και των 2 ασφατομιγμάτων για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις συγκριτικά μεταξύ τους αλλά και 2 θηκογράμματα τα οποία περιέχουν για κάθε ασφατόμιγμα ξεχωριστά όλες τις μετρήσεις για κάθε θερμοκρασία.

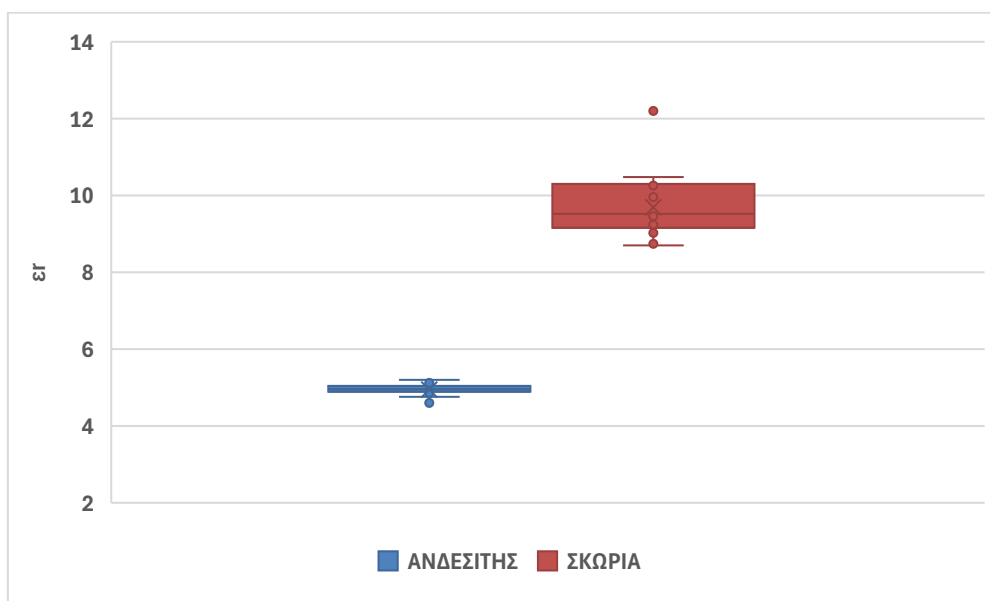
Στις Εικόνες 4.7–4.15 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο (2) ασφατομιγμάτων για θερμοκρασίες από 0°C–40°C



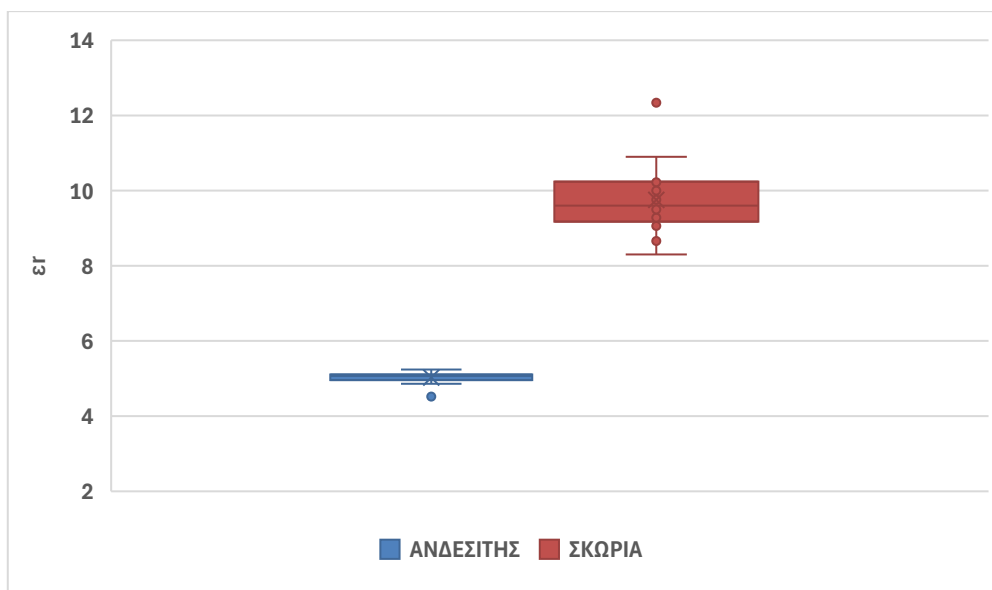
Εικόνα 4.7: Θηκογράμμα για 0°C



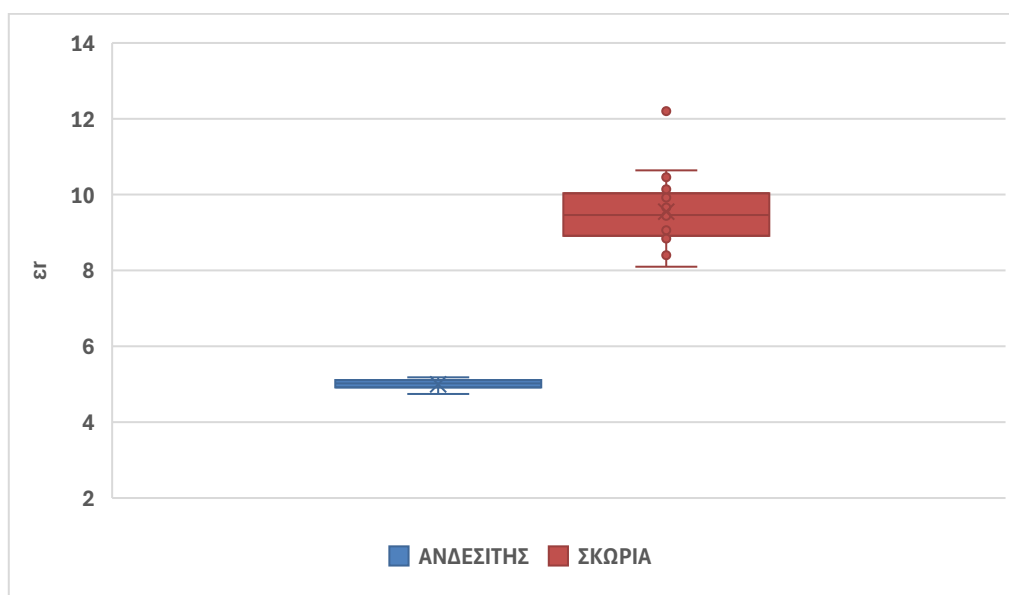
Εικόνα 4.8: Θηκόγραμμα για 5°C



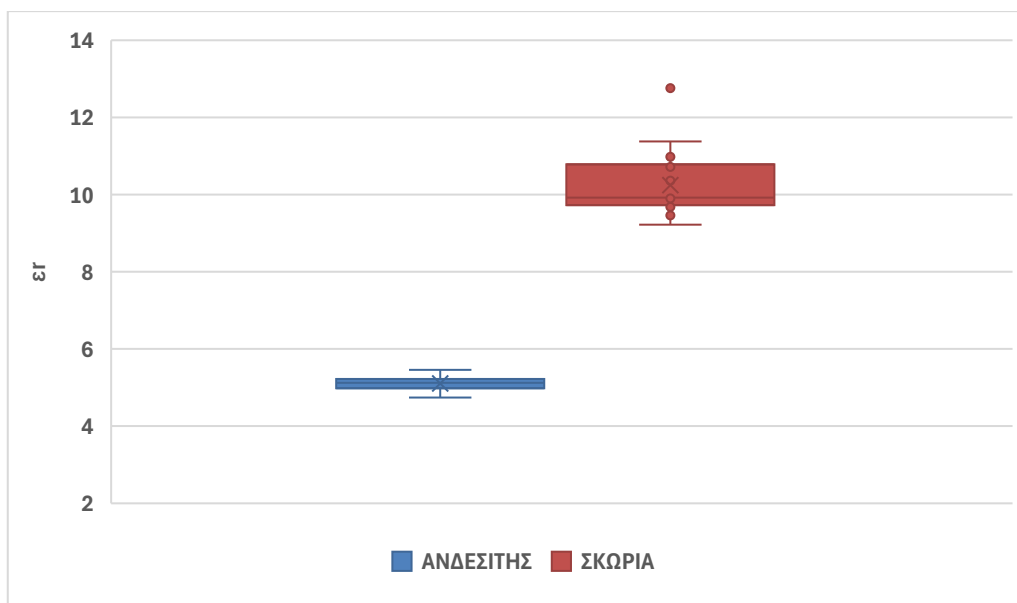
Εικόνα 4.9: Θηκόγραμμα για 10°C



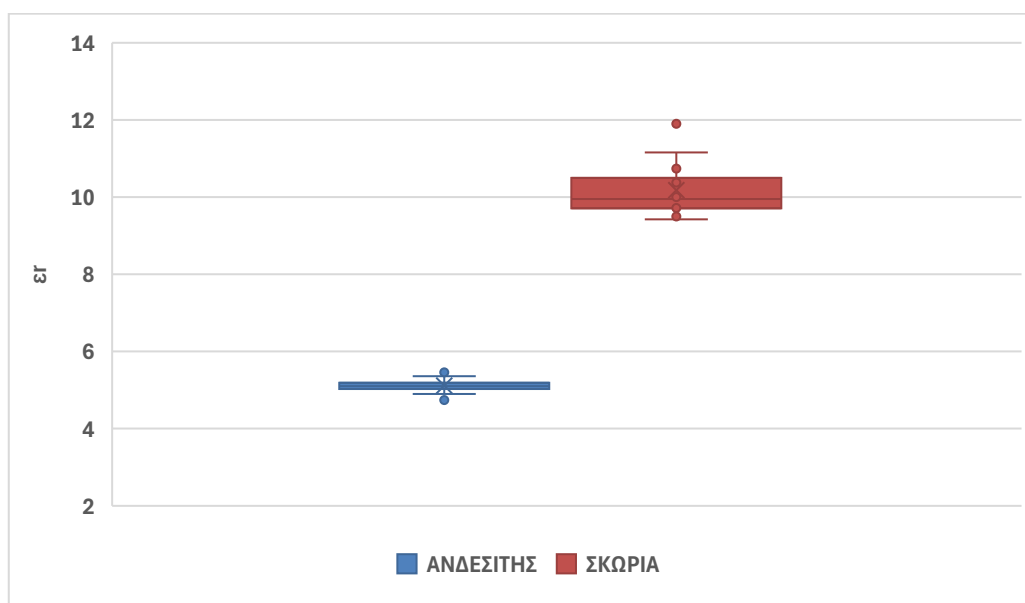
Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα για 15°C



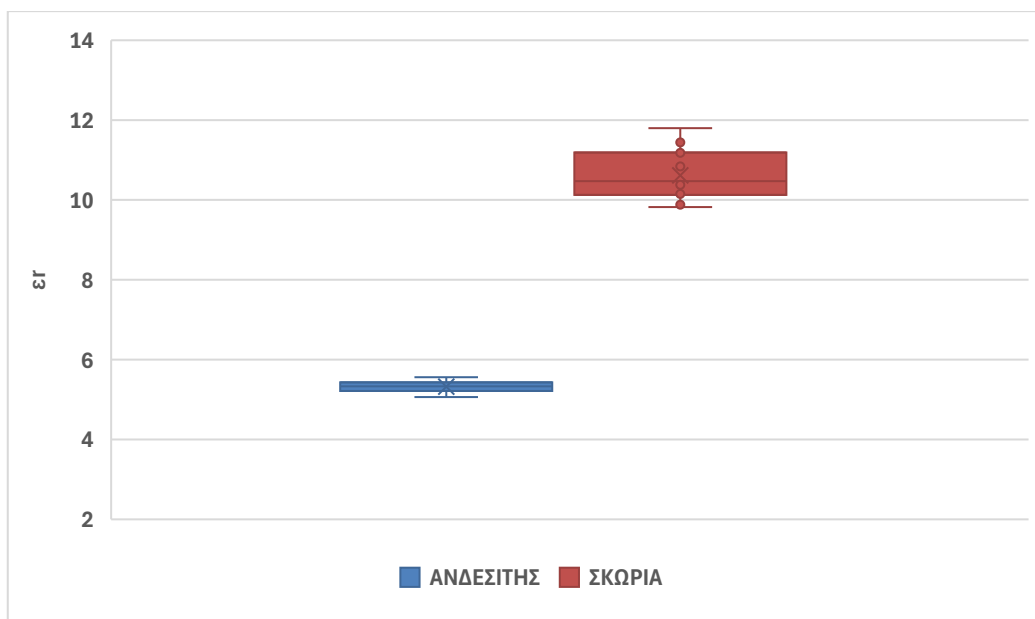
Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα για 20°C



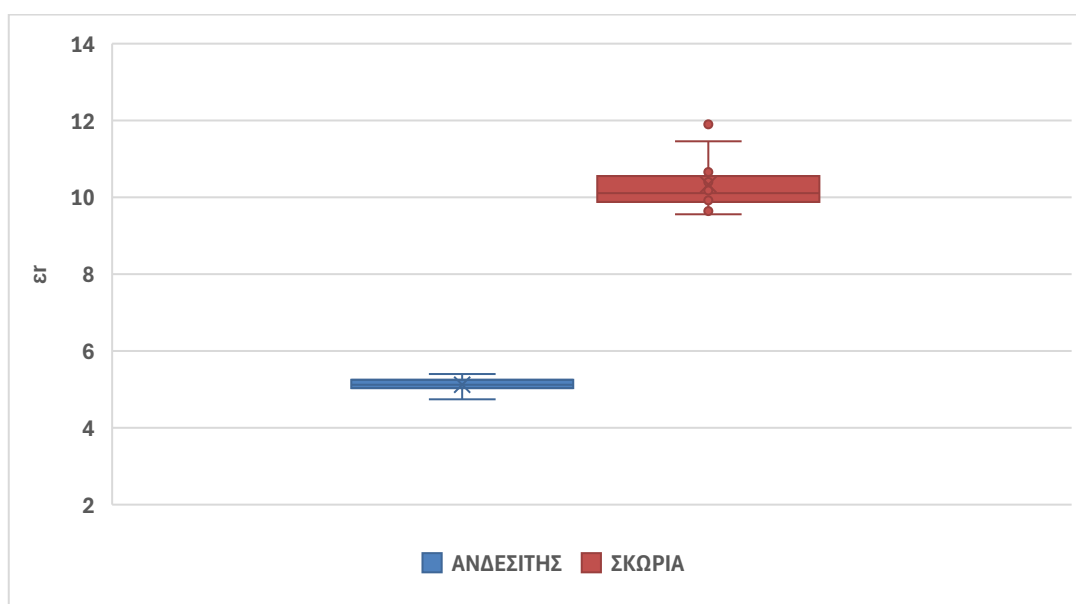
Εικόνα 4.12: Θηκόγραμμα για 25°C



Εικόνα 4.13: Θηκόγραμμα για 30°C



Εικόνα 4.14: Θηκόγραμμα για 35°C

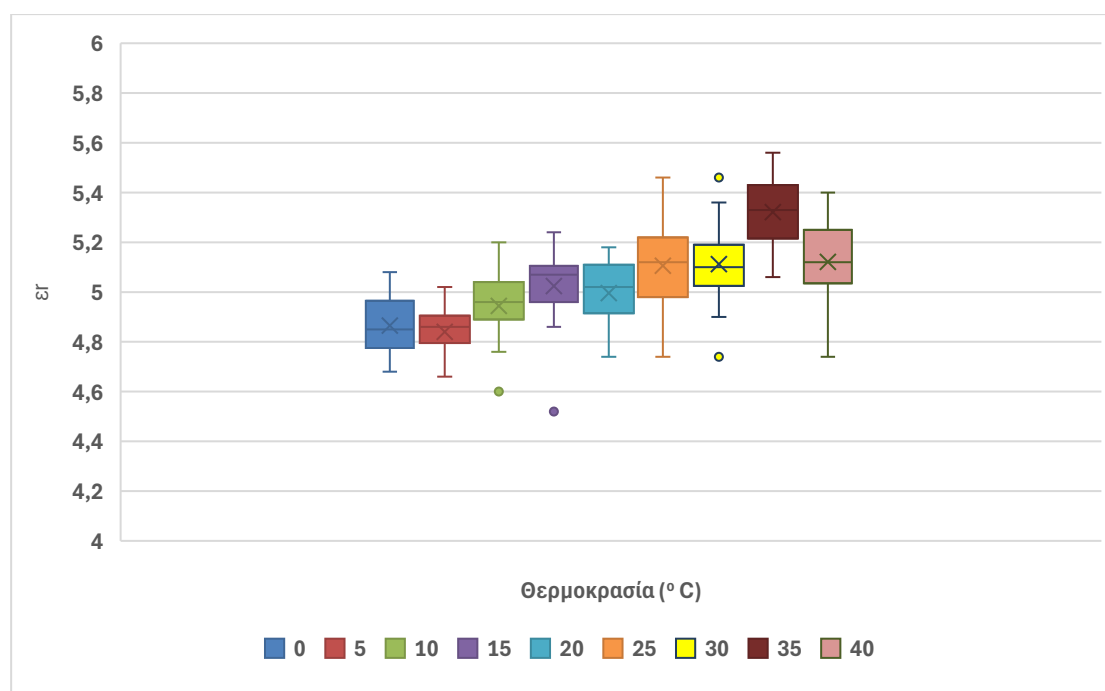


Εικόνα 4.15: Θηκόγραμμα για 40°C

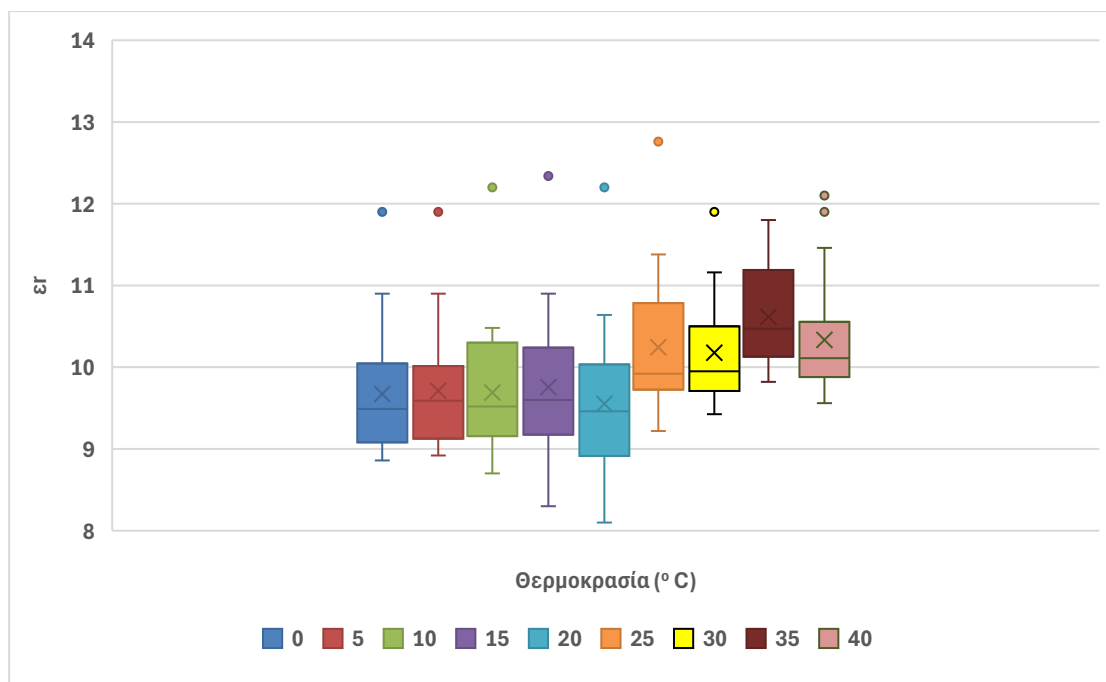
Σε συνέχεια της παρατήρησης ότι η διηλεκτρική σταθερά στο ασφαλτόμιγμα – σκωρίας είναι μεγαλύτερη από αυτή του ασφαλτομίγματος – ανδεσίτη, τα θηκογράμματα αναδεικνύουν ότι πρακτικά η διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος – σκωρία είναι εν γένει διπλάσια από εκείνου του ασφαλτομίγματος – ανδεσίτη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα κύματα που εκπέμπονται από τις συσκευές μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς κινούνται με τη μισή ταχύτητα στο ασφαλτόμιγμα - σκωρία από ότι σε αυτό του

ανδεσίτη, με βάση τον τύπο υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης. Η υπόψη διαφορά οφείλεται κατά κύριο λόγο στη χημική σύσταση των δύο (2) αδρανών. Ειδικότερα, η σκωρία εξαιτίας των μεγάλων ποσοστών από οξείδια του σιδήρου (FeO), του ασβεστίου (CaO) και του μαγνησίου (MgO) που περιέχει, παρουσιάζει αυξημένη διηλεκτρική σταθερά, όπως και οι χημικές ενώσεις που αναφέρθηκαν (Subramanian et al., 1989). Οι αιτίες που τα οξείδια αυτά παρουσιάζουν αυξημένη διηλεκτρική σταθερά έχουν να κάνουν με την ιοντική τους σύσταση και την ισχυρή αλληλεπίδραση που έχουν όταν βρίσκονται σε ηλεκτρικό πεδίο. Αντίθετα, ο ανδεσίτης αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) σε μεγάλο ποσοστό, το οποίο έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά (Guerreiro et al., 2023). Ο λόγος που έχει μικρή διηλεκτρική σταθερά είναι διότι οι ομοιοπολικοί δεσμοί που παρουσιάζει δεν είναι αρκετά ευαίσθητοι σε ηλεκτρικό πεδίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να βρεθούν στη σύσταση του ανδεσίτη τα οξείδια που αναφέρθηκαν προηγουμένως, χωρίς να διαφοροποιούν σε μεγάλο βαθμό τη διηλεκτρική του σταθερά.

Επίσης, στις Εικόνες 4.16 και 4.17 παρουσιάζονται ξεχωριστά για τα δύο (2) ασφαλομίγματα τα αποτελέσματα για όλες τις θερμοκρασίες



Εικόνα 4.16: Θηκόγραμμα για το ασφαλόμιγμα - Ανδεσίτης



Εικόνα 4.17: Θηκόγραμμα για το ασφαλτόμιγμα – Σκωρία

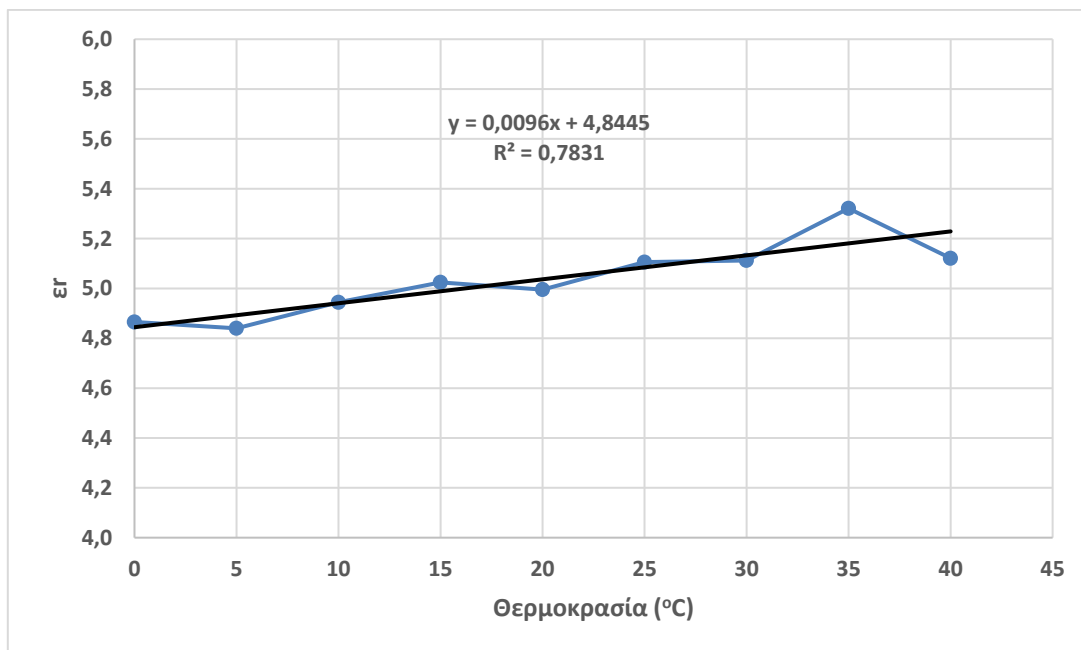
Ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι και τα δύο (2) ασφαλτομίγματα έχουν αρκετά συμμετρική κατανομή, λόγω του ότι η μέση τιμή και η διάμεσος που παρουσιάζεται στα διαγράμματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Βέβαια, στο ασφαλτόμιγμα της σκωρίας διαπιστώνεται η ύπαρξη περισσότερων υπερβολικών τιμών σε σύγκριση με αυτό του ανδεσίτη, κρίνοντας έτσι λιγότερο συμμετρική την κατανομή του. Επίσης, το εύρος των θηκογραμμάτων για το ασφαλτόμιγμα της σκωρίας αποκαλύπτει μεγαλύτερη διακύμανση στα δεδομένα σε αντίθεση με τα θηκογράμματα του ανδεσίτη.

4.2 Ανάλυση δεδομένων

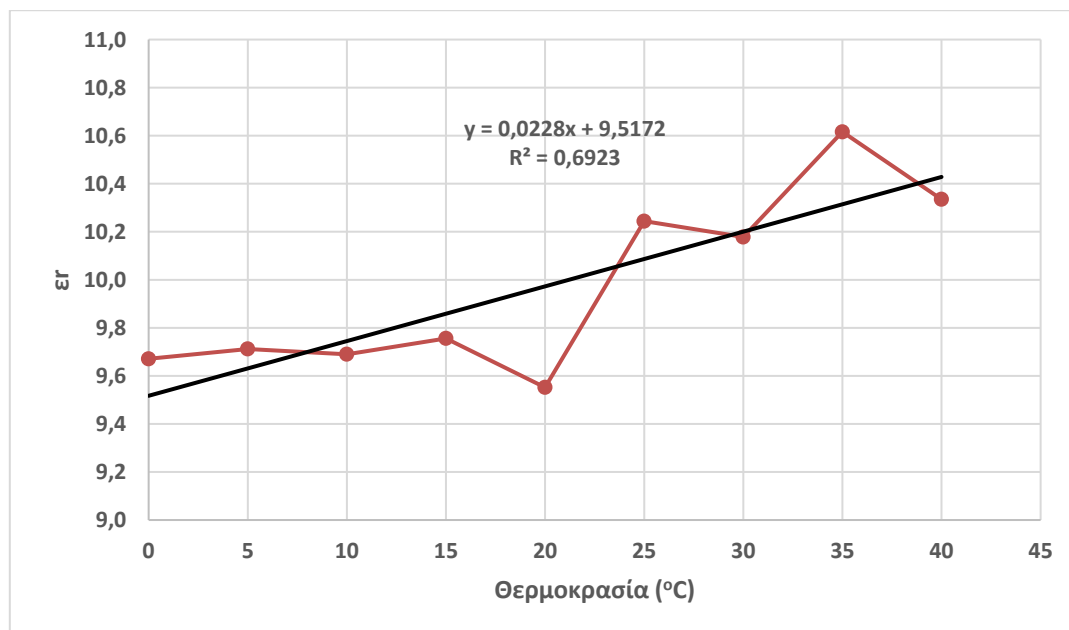
4.2.1 Επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά

Για τη διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς και της θερμοκρασίας εφαρμόστηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συγκεκριμένη υποενότητα θα αναλυθεί η διαδικασία και τα αποτελέσματα των γραμμικών παλινδρομήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο (2) ασφαλτομίγματα ξεχωριστά. Αρχικά, η συσχέτιση των υπό εξέταση μεγεθών (διηλεκτρική σταθερά και θερμοκρασία) θα αξιολογηθεί με βάση τον συντελεστή συσχέτισης R^2 (με $R^2 = 1$ να εκφράζεται απόλυτη συσχέτιση και θεωρώντας πως $R^2 >$

0.7 εκφράζει ικανοποιητική συσχέτιση, $R^2 > 0.85$ εκφράζει καλή συσχέτιση και $R^2 > 0.95$ εκφράζει άριστη συσχέτιση). Στην Εικόνα 4.18 φαίνεται το αποτέλεσμα της γραμμικής παλινδρόμησης για το ασφαλτόμιγμα με αδρανές τον ανδεσίτη και στην Εικόνα 4.19 το αποτέλεσμα της γραμμικής παλινδρόμησης για το ασφαλτόμιγμα με αδρανές τη σκωρία.



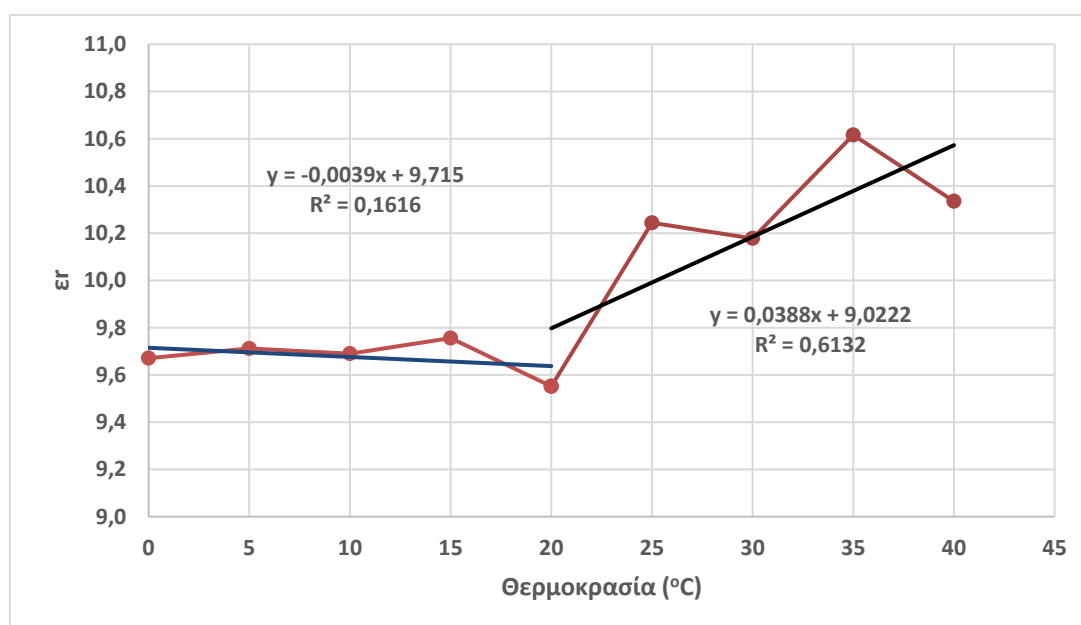
Εικόνα 4.18: Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς με τη θερμοκρασία - Ανδεσίτης



Εικόνα 4.19: Συσχέτιση διηλεκτρικής σταθεράς με θερμοκρασία – Σκωρία

Και για τις δύο γραμμικές σχέσεις-μοντέλα που φαίνονται στις Εικόνες 4.18 - 4.19 ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι σχεδόν ίσος και μεγαλύτερος του 0.7, οπότε η

συσχέτιση χαρακτηρίζεται ικανοποιητική. Επίσης, το εύρος τιμών για την διηλεκτρική σταθερά (ϵ') που προκύπτει από το ασφαλτομίγμα του ανδεσίτη είναι από 4.85 – 5.3 και για την σκωρία από 9.05 – 10.05. Ο ρυθμός μεταβολής του ασφαλτομίγματος με ανδεσίτη ισούται περίπου με 1% και του ασφαλτομίγματος με σκωρία περίπου ίσο με 2,3%. Μια παρατήρηση άξια αναφοράς είναι ότι το διάγραμμα της σκωρίας παρουσιάζει μια σταθερότητα μέχρι τους 20°C και στη συνέχεια διακρίνεται μια απότομη μεταβολή και αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς μέχρι τους 40°C. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή ανάλυση για τις θερμοκρασίες από 0°C έως 20°C και από 20°C έως 40°C με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης. Στην Εικόνα 4.20 εμφανίζονται και οι δύο γραμμικές παλινδρομήσεις στο ίδιο διάγραμμα.



Εικόνα 4.20: Γραμμικές Παλινδρομήσεις – Σκωρία

Από το διάγραμμα της Εικόνας 4.20 διαπιστώνεται ότι μέχρι τους 20°C η γραμμή τάσης αποτυπώνει καθοδική κλίση της τάξης του 0,4% ενώ από τους 20°C μέχρι τους 40°C υποδεικνύει μια αύξουσα κλίση ίση με 3,9%. Αυτή η εναλλαγή στην κλίση θεωρείται σημαντική καθώς υποδηλώνει σαφή μεταβολή στη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της διηλεκτρικής σταθεράς. Ως εκ τούτου, η διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος - σκωρία τείνει να αυξάνεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 20°C ενώ σε μικρότερες παραμένει πρακτικά σταθερή.

4.2.2 Έλεγχος σημαντικότητας διαφορών λόγω θερμοκρασίας

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του ρυθμού μεταβολής όπως επίσης και τον καθορισμό της στατιστικής σημαντικότητας του δείγματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος t-test ζευγαρωτών δειγμάτων. Πρόκειται για μια παραμετρική στατιστική διαδικασία που ελέγχει τη στατιστική σημαντικότητα των μέσω όρων συσχετισμένων (ανά ζεύγη) δειγμάτων. Ως μηδενική υπόθεση αποφασίστηκε ότι οι παρατηρούμενες διαφορές δεν είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Η μηδενική υπόθεση καθίσταται αποδεκτή όταν στο τέλος του ελέγχου η απόλυτη τιμή του t είναι μικρότερη από εκείνη του $t_{\text{κρίσιμο}}$ ή όταν το P- Value είναι μεγαλύτερο του 0.05. Ως θερμοκρασία ελέγχου ορίστηκε εκείνη των 20°C και έτσι προέκυψαν 8 ζεύγη για κάθε μίγμα. Τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου δίνονται στους Πίνακες 4.7 – 4.22. Με πράσινο χρώμα συμβολίζεται ότι η μηδενική υπόθεση είναι αποδεκτή ενώ με κόκκινο ότι είναι μη αποδεκτή. Στην περίπτωση που η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, σημαίνει ότι η διαφορά είναι στατιστικά σημαντική.

Συγκεκριμένα στους Πίνακες 4.7 – 4.14 φαίνονται τα αποτελέσματα του ασφαλτομίγματος – ανδεσίτη, ενώ στους Πίνακες 4.15 – 4.22 φαίνονται τα αποτελέσματα του ασφαλτομίγματος – σκωρία.

Πίνακας 4.7: t-test για ζεύγος 0°C-20°C

Θερμοκρασία	0° - 20°	
Μέσος	4,865555556	4,995555556
Διακύμανση	0,013684967	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,499718093	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	-4,320800167	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,000231874	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,000463748	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.8: t-test για ζεύγος 5°C-20°C

Θερμοκρασία	5° - 20°	
Μέσος	4,84	4,995555556
Διακύμανση	0,008941176	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,420550367	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	-5,116493339	
P(T<=t) μονόπλευρη	4,2969E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	8,5938E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.9: t-test για ζεύγος 10°C-20°C

Θερμοκρασία	10° - 20°	
Μέσος	4,944444444	4,995555556
Διακύμανση	0,01899085	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,741346325	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	-2,201219294	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,020912103	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,041824206	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.10: t-test για ζεύγος 15°C-20°C

Θερμοκρασία	15° - 20°	
Μέσος	5,0244444	4,995555556
Διακύμανση	0,0255791	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,7025611	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	1,0542353	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,1532645	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,7396067	
P(T<=t) δίπλευρη	0,306529	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,1098156	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΔΕΚΤΗ	(t < t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.11: t-test για ζεύγος 25°C-20°C

Θερμοκρασία	25° - 20°	
Μέσος	5,105555556	4,995555556
Διακύμανση	0,030155556	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,653252738	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	3,497993004	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,001378006	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,002756011	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t > t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.12: t-test για ζεύγος 30°C-20°C

Θερμοκρασία	30° - 20°	
Μέσος	5,112222222	4,995555556
Διακύμανση	0,028006536	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,567651255	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	3,442759016	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,001553225	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,00310645	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.13: t-test για ζεύγος 35°C-20°

Θερμοκρασία	35° - 20°	
Μέσος	5,321111111	4,995555556
Διακύμανση	0,022186928	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,716441079	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	12,79043489	
P(T<=t) μονόπλευρη	1,88467E-10	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	3,76935E-10	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.14: t-test για ζεύγος 40°C-20°C

Θερμοκρασία	40° - 20°	
Μέσος	5,121111111	4,995555556
Διακύμανση	0,028163399	0,018520261
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,206280065	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	2,759576141	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,006698131	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,013396261	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.15: t-test για ζεύγος 0°C-20°C

Θερμοκρασία	0° - 20°	
Μέσος	9,67111111	9,552222222
Διακύμανση	0,6111634	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,7038251	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	0,7390111	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,2349909	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,7396067	
P(T<=t) δίπλευρη	0,4699818	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,1098156	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΔΕΚΤΗ	(t <t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.16: t-test για ζεύγος 5°C-20°C

Θερμοκρασία	5° - 20°	
Μέσος	9,712	9,552222222
Διακύμανση	0,5749896	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,6606856	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	0,9373914	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,1808424	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,7396067	
P(T<=t) δίπλευρη	0,3616848	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,1098156	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΔΕΚΤΗ	(t < t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.17: t-test για ζεύγος 10°C-20°C

Θερμοκρασία	10° - 20°	
Μέσος	9,6902778	9,552222222
Διακύμανση	0,7175484	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,8602547	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	1,2103167	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,1213588	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,7396067	
P(T<=t) δίπλευρη	0,2427175	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,1098156	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΔΕΚΤΗ	(t < t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.18: t-test για ζεύγος 15°C-20°C

Θερμοκρασία	15° - 20°	
Μέσος	9,7555556	9,552222222
Διακύμανση	0,8354614	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,8630519	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	1,7676464	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,0475315	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,7396067	
P(T<=t) δίπλευρη	0,0950631	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,1098156	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΔΕΚΤΗ	(t < t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.19: t-test για ζεύγος 25°C-20°C

Θερμοκρασία	25° - 20°	
Μέσος	10,24444444	9,552222222
Διακύμανση	0,751932026	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,847897732	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	5,802252961	
P(T<=t) μονόπλευρη	1,06134E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	2,12267E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t > t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.20: t-test για ζεύγος 30°C-20°C

Θερμοκρασία	30° - 20°	
Μέσος	10,17805556	9,552222222
Διακύμανση	0,416585703	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,823976364	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	4,798809927	
P(T<=t) μονόπλευρη	8,364E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,00016728	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.21: t-test για ζεύγος 35°C-20°C

Θερμοκρασία	35° - 20°	
Μέσος	10,61583333	9,552222222
Διακύμανση	0,382083088	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,254988326	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	4,557391003	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,000139659	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	0,000279318	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t >t κρίσιμο, δίπλευρο)

Πίνακας 4.22: t-test για ζεύγος 40°C-20°C

Θερμοκρασία	40° - 20°	
Μέσος	10,33472222	9,552222222
Διακύμανση	0,562124918	0,896853595
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,724836905	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	5,064719372	
P(T<=t) μονόπλευρη	4,7861E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	9,5722E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	
ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ	ΑΠΟΡΡΙΠΤΕΤΑΙ	(t > t κρίσιμο, δίπλευρο)

Παρατηρώντας τους Πίνακες 4.7 – 4.14 του ασφατομίγματος – ανδεσίτη προκύπτει ότι οι μεταβολές στις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς είναι στατιστικά σημαντικές για όλα τα ζεύγη θερμοκρασιών, εκτός από εκείνο του Πίνακα 4.10 (15°C – 20°C). Με βάση αυτή την παρατήρηση, εξάγεται το δεδομένο ότι η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 15°C στους 20°C δεν έχει κάποια επίδραση στο δείγμα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ζεύγη.

Στη συνέχεια, εξετάζοντας τους Πίνακες 4.15 – 4.22 του ασφατομίγματος – σκωρία παρατηρείται ότι για τους Πίνακες 4.15 έως 4.18 η μηδενική υπόθεση είναι αποδεκτή. Το γεγονός αυτό βασίζει την πληροφορία ότι οι παρατηρούμενες μεταβολές δεν παρουσιάζουν κάποια στατιστική σημαντικότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας από τους 0°C έως τους 20°C. Αντίθετα, εξετάζοντας τους Πίνακες 4.19 έως 4.22 προκύπτει ότι οι μεταβολές είναι στατιστικά σημαντικές για αύξηση της θερμοκρασίας από τους 20°C έως τους 40°C.

Συνοψίζοντας, οι παρατηρούμενες διαφορές στις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς για τα περισσότερα ζεύγη θερμοκρασιών είναι στατιστικά σημαντικές και δεν είναι τυχαίες. Αυτό δηλώνει ότι δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα αλλά αντανακλούν μια επίδραση στο δείγμα. Η στατιστική σημαντικότητα δεν παρέχει πληροφορία για το μέγεθος της επίδρασης και τι βαρύτητα έχει στην πραγματικότητα. Σε πολλές περιπτώσεις αποτελέσματα έχουν παρουσιάσει υψηλή στατιστική σημαντικότητα με μηδαμινή επίδραση στην πραγματικότητα. Για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκε και έλεγχος πρακτικής σημασίας των παρατηρούμενων μεταβολών.

4.2.3 Έλεγχος πρακτικής σημασίας των παρατηρούμενων μεταβολών

Ο συντελεστής του Cohen όπου συμβολίζεται με d αποτελεί μία μέθοδο για την εξέταση της πρακτικής σημαντικότητας. Είναι αδιάστατος αριθμός και χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της διαφοράς μεταξύ δύο μεταβλητών σε σχέση με την τυπική απόκλιση των δεδομένων. Απλούστερα, αντιπροσωπεύει το μέγεθος της επίδρασης, υποδεικνύοντας πόσο μεγάλο είναι το αποτέλεσμα σε σχέση με τη μεταβολή των δεδομένων. Ο υπόψη συντελεστής λειτουργεί συμπληρωματικά σε ελέγχους σημαντικότητας t -test, προκειμένου να αξιολογηθούν οι παρατηρούμενες στατιστικά σημαντικές διαφορές ως προς την πρακτική σημασία τους. Ο συνδυασμός των δύο ελέγχων προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα, καθώς αποφεύγονται υπερεκτιμήσεις μικρών αλλά στατιστικά σημαντικών διαφορών που ενδέχεται να μην έχουν πρακτική αξία. Η σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή είναι η ακόλουθη:

$$d = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{SD_1^2 + SD_2^2}{2}}} \quad (4.1)$$

όπου:

- M_i : η μέση τιμή του δείγματος
- SD_i : η τυπική απόκλιση του δείγματος

Η ερμηνεία του συντελεστή d για το μέγεθος της πρακτικής σημαντικότητας φαίνεται στον Πίνακα 4.23.

Πίνακας 4.23: Εύρος τιμών συντελεστή Cohen (d)

Πηγή: (Penn State, 2023)

Cohen's d	Ερμηνεία
0 - 0.2	Μηδενική έως πολύ μικρή πρακτική σημασία
0.2 - 0.5	Μικρή πρακτική σημασία
0.5 - 0.8	Μέτρια πρακτική σημασία
> 0.8	Μεγάλη πρακτική σημασία

Ο Πίνακας 4.24 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του συντελεστή Cohen (d) για κάθε ζεύγος και για τα δύο (2) ασφατομίγματα. Στον Πίνακα 4.25 παρουσιάζονται για το ασφατόμγμα – ανδεσίτη τα αποτελέσματα της μεθόδου t -test, του συντελεστή του Cohen και το μέγεθος της πρακτικής σημαντικότητας για κάθε ζεύγος. Επίσης, στον

Πίνακα 4.26 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως αλλά για το ασφατόμιγμα – σκωρία.

Πίνακας 4.24: Συντελεστές του Cohen για όλα τα ζεύγη

Συντελεστής d του Cohen		
Ζεύγη Θερμοκρασιών	Ανδεσίτης	Σκωρία
0°C-20°C	1,024	0,049
5°C-20°C	1,328	0,066
10°C-20°C	0,373	0,057
15°C-20°C	0,194	0,083
25°C-20°C	0,705	0,278
30°C-20°C	0,765	0,255
35°C-20°C	2,282	0,425
40°C-20°C	0,822	0,315

Πίνακας 4.25: Συγκεντρωτικός πίνακας – Ανδεσίτης

Ανδεσίτης			
Ζεύγη Θερμοκρασιών	t-test	Cohen	Πρακτική Σημασία
0°C-20°C	($ -4,32 > 2,11$)	1,024	Μεγάλη
5°C-20°C	($ -5,11 > 2,11$)	1,328	Μεγάλη
10°C-20°C	($ -2,20 > 2,11$)	0,373	Μικρή
15°C-20°C	($ 1,05 < 2,11$)	0,194	Πολύ Μικρή
25°C-20°C	($ 3,49 > 2,11$)	0,705	Μέτρια
30°C-20°C	($ 3,44 > 2,11$)	0,765	Μέτρια
35°C-20°C	($ 12,79 > 2,11$)	2,282	Μεγάλη
40°C-20°C	($ 2,75 > 2,11$)	0,822	Μεγάλη

Πίνακας 4.26: Συγκεντρωτικός πίνακας – Σκωρία

Σκωρία			
Ζεύγη Θερμοκρασιών	t-test	Cohen	Πρακτική Σημασία
0°C-20°C	($ 0,74 < 2,11$)	0,049	Μηδενική
5°C-20°C	($ 0,93 < 2,11$)	0,066	Μηδενική
10°C-20°C	($ 1,21 < 2,11$)	0,057	Μηδενική
15°C-20°C	($ 1,76 < 2,11$)	0,083	Μηδενική
25°C-20°C	($ 5,80 > 2,11$)	0,278	Μικρή
30°C-20°C	($ 4,79 > 2,11$)	0,255	Μικρή
35°C-20°C	($ 4,55 > 2,11$)	0,425	Μικρή
40°C-20°C	($ 5,06 > 2,11$)	0,315	Μικρή

Με βάση τον συγκεντρωτικό Πίνακα 4.25, εξάγονται πληροφορίες για τη συσχέτιση της θερμοκρασίας με τη διηλεκτρική σταθερά για το ασφαλτόμιγμα - ανδεσίτη. Συγκεκριμένα, για τα ζεύγη 0°C-20°C, 5°C-20°C, 35°C-20°C, 40°C-20°C προκύπτει ότι οι μεταβολές εκτός από στατιστικά σημαντικές έχουν και μεγάλη πρακτική σημασία, με βάση τον συντελεστή του Cohen. Αντίθετα, για τα ζεύγη 10°C-20°C και 15°C-20°C παρατηρείται μικρή και πολύ μικρή πρακτική σημασία αντίστοιχα, με το ζευγάρι 15°C-20°C επίσης να μην παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα. Για τα υπόλοιπα ζεύγη 25°C-20°C και 30°C-20°C οι μεταβολές παρουσιάζουν μέτρια πρακτική σημασία και είναι στατιστικά σημαντικές. Συνοψίζοντας, η πλειοψηφία των ζευγών χαρακτηρίζεται από μέτρια ή μεγάλη πρακτική σημασία, πράγμα που οδηγεί στην παρατήρηση ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας έχουν κάποια επίδραση κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης μετρήσεων διηλεκτρικής σταθεράς.

Στη συνέχεια, παρατηρώντας τον Πίνακα 4.26 προκύπτουν δεδομένα για τη σχέση θερμοκρασίας και διηλεκτρικής σταθεράς για το ασφαλτόμιγμα – σκωρία. Ειδικότερα, για τα ζεύγη 0°C-20°C, 5°C-20°C, 10°C-20°C, 15°C-20°C οι μεταβολές φαίνεται ότι είναι στατιστικά μη σημαντικές με μηδενική πρακτική σημασία, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της θερμοκρασίας δεν έχει κάποια επίδραση. Επιπλέον, για τα ζεύγη 25°C-20°C, 30°C-20°C, 35°C-20°C, 40°C-20°C προκύπτει ότι η μεταβολή στις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να είναι στατιστικά σημαντικές αλλά με μικρή πρακτική σημασία. Καταληκτικά, διαπιστώνεται ότι σε πρακτικό επίπεδο η αύξηση της θερμοκρασίας δεν έχει κάποια αξιόλογη επίδραση στη διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος – σκωρία.

Με τον καθορισμό της πρακτικής σημασίας επιτυγχάνεται η σύνδεση των μεταβολών της διηλεκτρικής σταθεράς με το πρακτικό κομμάτι των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στο πεδίο. Ειδικότερα, ένα κύριο ερώτημα που δημιουργείται είναι η επίδραση που μπορεί να δημιουργήσει η αύξηση της θερμοκρασίας στη σχέση παχών του GPR. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενδέχεται να επηρεάζει τις μετρήσεις παχών του GPR όταν στο οδόστρωμα υπάρχει ασφαλτόμιγμα - ανδεσίτη. Αντιθέτως, για το ασφαλτόμιγμα – σκωρίας διαπιστώνεται η ύπαρξη μιας πολύ μικρής πιθανότητας, για επίδραση της θερμοκρασίας στις μετρήσεις παχών του GPR. Επίσης, από τις αναλύσεις προκύπτει ένα συμπέρασμα για τη θερμοκρασία πραγματοποίησης των μετρήσεων. Η θερμοκρασία των 20°C, που ορίστηκε ως θερμοκρασία ελέγχου, αποτελεί ιδανική επιλογή για μετρήσεις πάχους GPR όταν το οδόστρωμα περιλαμβάνει ασφαλτόμιγμα – σκωρία λόγω της μικρής πρακτικής σημασίας των παρατηρούμενων μεταβολών. Αντίθετα, για το ασφαλτόμιγμα – ανδεσίτη δεν συνιστά ικανοποιητική επιλογή,

εξαιτίας της μεγάλης πρακτικής σημασίας τους. Τελικά, συμψηφίζοντας τα παραπάνω ενισχύεται η ιδέα της επίδρασης της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση ενός ασφατομίγματος υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη, με τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά να αποτελούν τα πιο κοινά. Ειδικότερα, το ποσοστό των κενών αέρα θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά. Όμως, η διηλεκτρική σταθερά είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να προσφέρει πληροφορίες για το ασφατόμιγμα. Για τη μέγιστη αξιοποίησή της, ως δείκτη ποιότητας των ασφατομιγμάτων, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες για τους παράγοντες που την επηρεάζουν, όπως είναι η θερμοκρασία.

Αρχικά, με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πολλές έρευνες καταδεικνύουν την επίδραση της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά. Η ανάπτυξη μοντέλων προσδιορισμού της διηλεκτρικής σταθεράς, σε σχέση με τη θερμοκρασία αποδεικνύει την υπόψη επίδραση. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά των αδρανών υλικών με αποτέλεσμα τη συνολική άνοδο της διηλεκτρικής σταθεράς του ασφατομίγματος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών στοιχειοθετούν την επίδραση της θερμοκρασίας στη διηλεκτρική σταθερά των ασφατομιγμάτων.

Στη συνέχεια, με βάση έρευνες, αποδείχθηκε ότι η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται ανάλογα με το βάθος στις ασφατικές στρώσεις, οδηγεί σε σφάλματα κατά τον καθορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς. Το συμπέρασμα αυτό προσφέρει μία σαφή ένδειξη ότι η θερμοκρασία επιδρά στη διηλεκτρική σταθερά, επηρεάζοντας την ακρίβεια των υπολογισμών και την αξιοπιστία των δεδομένων.

Με γνώμονα τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακό πείραμα με μετρήσεις σε δύο (2) διαφορετικά ασφατομίγματα με σκοπό τη διερεύνηση συσχέτισης μεταξύ θερμοκρασίας και διηλεκτρικής σταθεράς. Τα ασφατομίγματα διέφεραν ως προς τον τύπο αδρανούς (ανδεσίτης – σκωρία) και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε οκτώ (8) διαφορετικές θερμοκρασίες. Έπειτα, υλοποιήθηκε ανάλυση των δεδομένων για τη στατιστική σημαντικότητα και την πρακτική σημασία των μεταβολών τους.

Με το πέρας των μετρήσεων, διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς παρουσίασαν μικρή διακύμανση, γεγονός που επέτρεψε την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων. Δεδομένου αυτού, φαίνεται ότι η διηλεκτρική σταθερά του ασφατομίγματος – σκωρία είναι διπλάσια από εκείνη του ασφατομίγματος – ανδεσίτη. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στην ορυκτολογική και χημική σύνθεση των

αδρανών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Ο ανδεσίτης περιέχει υψηλό ποσοστό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), ενός συστατικού με μικρή διηλεκτρική σταθερά και περιορισμένη πολωσιμότητα εξαιτίας των ομοιοπολικών του δεσμών. Αντιθέτως, η σκωρία αποτελείται κυρίως από οξείδια του σιδήρου (FeO) και του ασβεστίου (CaO), τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή διηλεκτρική σταθερά.

Έπειτα, με την ανάλυση των μετρήσεων αποδεικνύεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σημαντική επίδραση στη διηλεκτρική σταθερά, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τη διεθνή βιβλιογραφία. Όμως, ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι το εύρημα ότι η άνοδος της θερμοκρασίας επιδρά διαφορετικά στη διηλεκτρική σταθερά των δύο ασφαλτομιγμάτων. Στο ασφαλτόμιγμα – ανδεσίτη η διηλεκτρική σταθερά φαίνεται να αυξάνεται σταθερά καθώς αυξάνεται και η θερμοκρασία. Αντιθέτως, στο ασφαλτόμιγμα – σκωρία η διηλεκτρική σταθερά φαίνεται πρακτικά σταθερή μέχρι τους 20°C ενώ μετά αυξάνεται σταθερά μέχρι τους 40°C . Αυτές οι μεταβολές ενδεχομένως να επηρεάζουν την ηλεκτρομαγνητική απόκριση των ασφαλτομιγμάτων και να πρέπει να συνεκτιμηθούν για να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις.

Η διερεύνηση της πρακτικής σημασίας των παρατηρούμενων μεταβολών, πραγματοποιείται με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση της θερμοκρασίας σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πεδίο με το σύστημα GPR. Πιθανός μηχανισμός πίσω από αυτήν την επίδραση είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του υλικού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η μειωμένη ταχύτητα συνεπάγεται με μείωση της κατακόρυφης ανάλυσης, γεγονός που δυσχεραίνει τον εντοπισμό των διεπιφανειών των στρώσεων του οδοστρώματος και συνεπώς το αποτέλεσμα της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, στο ασφαλτόμιγμα – ανδεσίτη, η πρακτική σημασία των μεταβολών της διηλεκτρικής σταθεράς για τις θερμοκρασίες 0°C - 5°C και 25°C - 40°C υποδεικνύει ότι οι επί τόπου μετρήσεις GPR επηρεάζονται από την θερμοκρασία και δεν θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε αυτές τις θερμοκρασίες. Αντίθετα, για θερμοκρασίες 10°C - 20°C , οι μετρήσεις GPR στο πεδίο φαίνεται ότι δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και μπορούν να πραγματοποιηθούν σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών χωρίς κάποιο σφάλμα. Επίσης, για το ασφαλτόμιγμα – σκωρία, η πρακτική σημασία των μεταβολών της διηλεκτρικής σταθεράς για τις θερμοκρασίες 0° - 40°C οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν επιδρά στις επί τόπου μετρήσεις GPR. Συνεπώς, μπορούν να διενεργούνται σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Συμπερασματικά, σημαντική επίδραση παρατηρείται μόνο στο ασφαλτόμιγμα – ανδεσίτη σε συγκεκριμένο εύρος

θερμοκρασιών, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο τύπος του αδρανούς στο ασφατόμιγμα παίζει σημαντικό ρόλο στις μετρήσεις και στα σχετικά αποτελέσματα.

Βάσει όλων των συμπερασμάτων που εξήχθησαν, διαμορφώνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Συγκεκριμένα, προτείνονται:

- Η ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της διηλεκτρικής σταθεράς, όπου θα συνεκτιμάται η επίδραση της θερμοκρασίας, με σκοπό τον ακριβή καθορισμό της σε οποιαδήποτε θερμοκρασία και αν πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.
- Η διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων σε συνδυασμό με επί τόπου μετρήσεις για να διερευνηθεί εάν η θερμοκρασιακή διαφοροποίηση ανάλογα με το βάθος μία ασφατικής στρώσης, μπορεί να επηρεάσει τον καθορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς. Με τα ευρήματα αυτών των πειραμάτων να γίνει έλεγχος στον εάν επιδρά το συγκεκριμένο γεγονός στις μετρήσεις πάχους του GPR και αν θα έπρεπε να συνεκτιμάται κατά την διάρκεια αυτών.
- Η διερεύνηση της μικροδομής των ασφατομιγμάτων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την καλύτερη κατανόηση της σχέσης θερμοκρασίας και διηλεκτρικής σταθεράς.
- Η εκτέλεση εργαστηριακών πειραμάτων σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών και με περισσότερα ασφατομίγματα, προκειμένου να υπάρξει μεγαλύτερο δείγμα για αξιολόγηση και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Με την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων, αναμένεται να επιτευχθεί περαιτέρω πρόοδος στην κατανόηση της σχέσης θερμοκρασίας και διηλεκτρικής σταθεράς, ενώ παράλληλα θα ενισχυθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων διηλεκτρικότητας που αφορούν την αξιολόγηση των ασφατικών στρώσεων των οδοστρωμάτων και την εκτίμηση των παχών τους με γεωφυσικές μεθόδους.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AL-Qadi, I.L. and Lahouar, S., 2005. Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. *Construction and Building Materials*, 19(10), pp.763–772.
- Larkin, A., Al-Qadi, I.L. and Leng, Z., 2011. In-place hot mix asphalt density estimation using ground penetrating radar and 3-D finite element analyses. Technical Report No. 11-096. Urbana, IL: University of Illinois.
- Baltrušaitis, A., Vaitkus, A. and Smirnovs, J., 2020. Asphalt Layer Density and Air Voids Content: GPR and Laboratory Testing Data Reliance. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(3), pp.93–110.
- Berthelot, C., Podborochynski, D., Saarenketo, T., Marjerison, B. and Prang, C., 2010. Ground-Penetrating Radar Evaluation of Moisture and Frost across Typical Saskatchewan Road Soils. *Advances in Civil Engineering*, 2010, pp.1–9.
- Cao, Q. and Al-Qadi, I.L., 2021. Effect of Moisture Content on Calculated Dielectric Properties of Asphalt Concrete Pavements from Ground-Penetrating Radar Measurements. *Remote Sensing*, 14(1), p.34.
- Chang, C.-M., Chen, J.-S. and Wu, T.-B., 2011. Dielectric Modeling of Asphalt Mixtures and Relationship with Density. *Journal Transportation Engineering*, 137(2), pp.104–111.
- EN 13242, 2002. Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. Brussels: European Committee for Standardization.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M. and Dixon, N., 2007. Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials. *Transportation Research Record*: 2037(1), pp.128–135.
- Georgouli, K. and Plati, C., 2024. Dielectric Response of Asphalt Mixtures and Relationship to Air Voids and Stiffness. *Construction Materials*, 4(3), pp.566–580.
- Guerreiro, A.N., Costa, I.B., Vale, A.B. and Braga, M.H., 2023. Distinctive Electric Properties of Group 14 Oxides: SiO₂, SiO, and SnO₂. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), article number 15985.
- Jaselskis, E.J., Grigas, J. and Brilingas, A., 2003. Dielectric Properties of Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), pp.427–434.
- Leng, Z. and Al-Qadi, I.L., 2014. An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems. *NDT & E International*, 66, pp.90–98.
- Loizos, A. and Plati, C., 2006. Field and Laboratory Test for Assigning Dielectric Constants of Asphalt Pavement Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 7(4), pp.513–532.

Loizos, A. and Plati, C., 2007. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT & E International*, 40(2), pp.147–157.

Loizos, A. and Plati, C., 2011. Assessment of HMA Air-Voids and Stiffness Based on Material Dielectric Values. *Road Materials and Pavement Design*, 12(1), pp.217–226.

Martinez, A. and Byrnes, A.P., 2001. Modeling Dielectric-Constant Values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation. *Current Research in Earth Sciences*, pp.1–16.

Maser, K.R., 1994. Ground penetrating radar surveys to characterize pavement layer thickness variations at GPS sites. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council

Morey, R.M., 1998. Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities. Vol. 255. Washington D.C.: Transportation Research Board.

Ožbolt, M., Rukavina, T. and Domitrović, J., 2012. Comparison of the Pavement Layers Thickness Measured by Georadar and Conventional Methods – Examples From Croatia. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7(1), pp.30–35.

Pellinen, T., Eskelinen, P., Huuskonen-Snicker, E. and Hartikainen, A., 2015. Assessment of air void content of asphalt using dielectric constant measurements by GPR and with VNA. Aalto University publication series SCIENCE + TECHNOLOGY, 8/2016. Helsinki: Aalto University.

Penn State, 2023. 6.4 - Practical Significance | STAT 200. [online] Available at:

Plati, C. and Loizos, A., 2013. Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies. *Journal of Applied Geophysics*, 97, pp. 3–10.

Porubiaková, A. and Komačka, J., 2015. A Comparison of Dielectric Constants of Various Asphalts Calculated from Time Intervals and Amplitudes. *Procedia Engineering*, 111, pp.660–665.

Saarenketo, T., 2011. Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement. Mara Nord Project Report. Borlänge, Sweden: Swedish Transport Administration.

Saarenketo, T. and Scullion, T., 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2–4), pp.119–138.

Subramanian, M.A., Shannon, R.D., Chai, B.H.T., Abraham, M.M. and Wintersgill, M.C., 1989. Dielectric constants of BeO, MgO, and CaO using the two-terminal method. *Physics and Chemistry of Minerals*, 16(8), pp.741–746.

Walia, A., Rastogi, R., Kumar, P. and Jain, S.S., 2021. Reviewing methods for determination of Dielectric Constant required to Calibrate GPR Study for Asphalt Layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1075(1), article number 012026.

Wang, D., Ye, C., Lv, H., Meng, L., Tang, F., Ni, Y. and Liu, P., 2023. Dielectric model of asphalt pavement materials towards the future electrified road. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 381(2254), article number 20220164.

Wang, S., Leng, Z., Sui, X., Zhang, W., Ma, T. and Zhu, Z., 2024. Real-Time Asphalt Pavement Layer Thickness Prediction Using Ground-Penetrating Radar Based on a Modified Extended Common Mid-Point (XCMP) Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(7), pp.6848–6860.

Yu, X., Luo, R., Huang, T., Wang, J. and Chen, Y., 2021. Dielectric properties of asphalt pavement materials based on the temperature field. *Construction and Building Materials*, 303, article number 124409.

Zhai, Y., Zhang, B., Wang, F., Zhong, Y. and Li, X., 2019. Composite Dielectric Model of Asphalt Mixtures Considering Mineral Aggregate Gradation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6), article number 04019091.

Zhang, B. and Ni, Y., 2022. Influence of Temperature on the Dielectric Properties of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), article number 04022008.

Zhong, Y., Gao, Y., Zhang, B., Chang, S., Zhong, Y., Li, S. and Wang, Y., 2022. Dielectric properties of asphalt mastics considering temperature effect. *Construction and Building Materials*, 359, article number 129441.

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-11 04:2009), 2009. Ασφαλτικές στρώσεις κλειστού τύπου.

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-12-01:2009), 2009. Αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021a. Σημειώσεις μαθήματος: Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών (Ε.Μ.Π).

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021b. Σημειώσεις μαθήματος: Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών (Ε.Μ.Π).

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2023. Σημειώσεις μαθήματος: Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών (Ε.Μ.Π).

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2024. Σημειώσεις μαθήματος: Κατασκευή Οδών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών (Ε.Μ.Π).