



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών & Συγκοινωνιακής Υποδομής

Εργαστήριο Οδοποιίας

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟ ΚΕΝΩΝ
ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΕ
ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΕΝΑ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ**

ΜΑΓΚΑΦΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. ΠΛΑΤΗ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΕΜΠ, για την ανάθεση της εργασίας, τη συνεχή καθοδήγησή της, καθώς και την ειλικρινή και άμεση υποστήριξή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξή τους, αλλά κυρίως την οικογένειά μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει έως σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του συσχετισμού των μεγεθών της διηλεκτρικής σταθεράς και του ποσοστού των κενών αέρα στα συμπυκνωμένα ασφαλτομίγματα. Μεθοδολογικά, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικής με τον συσχετισμό των ανωτέρω μεγεθών και τα αντίστοιχα μοντέλα. Αξιοποιώντας μετρήσεις από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που αφορούν σε μετρήσεις σε δοκίμια Marshall, εξετάζεται αν τα υφιστάμενα μοντέλα της βιβλιογραφίας επιβεβαιώνονται από τα δεδομένα και αναπτύσσονται νέα που συσχετίζουν το ποσοστό κενών με τη διηλεκτρική σταθερά. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα πως υπάρχει μεν υψηλή συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών, αλλά τα εν λόγω μοντέλα συσχετισμού -στην πλειονότητα των περιπτώσεων- δεν αρκούν για την αξιόπιστη πρόβλεψη του ποσοστού κενών αέρα βάσει μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς και μόνο. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητο για την ακριβή πρόβλεψη του μεγέθους του ποσοστού κενών αέρα βάσει της διηλεκτρικής σταθεράς να ληφθούν υπόψιν κι άλλες παράμετροι, δίνοντας έμφαση σε όσες επηρεάζουν περισσότερο το μέγεθος της διηλεκτρικής σταθεράς.

ABSTRACT

The objective of the present thesis is the investigation of the correlation of the dielectric constant and air void content of compacted asphalt mixes. An extended review of relevant recent international bibliography is attempted, presenting the developed models for correlating the above mentioned characteristics. The data base of the NTUA's Laboratory of Highway Engineering was utilized, in order to investigate the applicability of international existing models. Also, based on these data new models were developed and tested for their goodness of fit. The statistical analysis of the results indicates high correlation between the two characteristics, but also shows that the models –in most cases– are not adequate; dielectric constant measurements cannot be used reliably as the sole air void content estimator. For a more accurate air void content prediction, it is deemed necessary to take into account other asphalt mix parameters, with an emphasis on the ones that mostly affect the dielectric constant.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων.....	vi
Ευρετήριο Πινάκων	ix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1. Αντικείμενο	1
1.2. Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3. Δομή διπλωματικής εργασίας.....	2
2. Συμπυκνωμένα ασφαλτομίγματα	4
2.1. Γενικά.....	4
2.2. Μελέτη σύνθεσης.....	6
2.2.1. Γενικά	6
2.2.2. Αδρανή υλικά.....	7
2.2.3. Άσφαλτος.....	10
2.2.4. Συμπύκνωση	11
2.3. Ογκομετρικές ιδιότητες.....	12
2.3.1. Γενικά	12
2.3.2. Προσδιορισμός κενών	13
2.3.3. Προσδιορισμός θεωρητικής μέγιστης πυκνότητας.....	16
2.3.4. Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας	16
2.4. Μηχανικές ιδιότητες.....	20
2.5. Τύποι ασφαλτομιγμάτων	25
2.5.1. Γενικά	25
2.5.2. Θερμά ασφαλτομίγματα.....	29
2.5.3. Ψυχρά ασφαλτομίγματα	29
2.5.4. Ζεστά ασφαλτομίγματα	29
2.5.5. Ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομίγματα.....	30

3.	Διηλεκτρικές ιδιότητες ασφαλομιγμάτων	31
3.1.	Ορισμοί	31
3.2.	Διηλεκτρικές σταθερές ασφαλομιγμάτων	32
3.3.	Προσδιορισμός.....	33
3.3.1.	Μετρήσεις στο εργαστήριο.....	33
3.3.2.	Μετρήσεις στο πεδίο.....	35
3.4.	Παράγοντες επίδρασης στον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς	37
3.5.	Συσχέτιση κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς ασφαλομίγματος.....	38
4.	Πειραματική διαδικασία	43
4.1.	Περιγραφή δεδομένων	43
4.1.1.	Χαρακτηριστικά ασφαλομιγμάτων	43
4.1.2.	Τιμές κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς	51
4.1.3.	Περιγραφική ανάλυση δεδομένων	52
4.2.	Διερεύνηση συσχετίσεων κενών αέρα – διηλεκτρικών σταθερών	60
4.2.1.	Μεθοδολογία.....	60
4.2.2.	Διερεύνηση Σχέσης (Saarenketo & Scullion, 1999).....	61
4.2.3.	Διερεύνηση Σχέσης (Λοϊζος & Πλατή, 2011).....	65
4.2.4.	Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2015).....	66
4.2.5.	Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2018).....	70
4.2.6.	Διερεύνηση Σχέσης (Wilson et al., 2019).....	71
4.2.7.	Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2019).....	73
4.3.	Ανάπτυξη μοντέλου συσχέτισης κενών αέρα και διηλεκτρικών σταθερών.....	76
4.3.1.	Γενικά	76
4.3.2.	Προσδιορισμός παραμέτρων γραμμικής παλινδρόμησης.....	77
4.3.3.	Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης	79

5. Συμπεράσματα..... 80

6. Βιβλιογραφικές αναφορές 82

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Δομή οδοστρώματος.....	4
Εικόνα 2.2: Διατομή ημι-άκαμπτου/ημι-εύκαμπτου οδοστρώματος	5
Εικόνα 2.3: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος.....	5
Εικόνα 2.4: Αδρανή και άσφαλτος.....	6
Εικόνα 2.5: Αδρανή υλικά: συλλεκτά (άνω) και θραυστά (κάτω).....	9
Εικόνα 2.6: Γενική μορφή σύστασης ασφαλτομίγματος.....	10
Εικόνα 2.7: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος	13
Εικόνα 2.8: Ρηγμάτωση (α) και τροχοαυλάκωση (β)	15
Εικόνα 2.9: Σχέση μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας και του χρόνου φόρτισης.....	21
Εικόνα 2.10: Σχέση του μέτρου δυσκαμψίας με τη θερμοκρασία	22
Εικόνα 2.11: Νομογράφημα υπολογισμού του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλικού μίγματος	24
Εικόνα 3.1: Ομοαξονικό ηλεκτρόδιο για την μέτρηση της τιμής των διηλεκτρικών ιδιοτήτων	34
Εικόνα 3.2: Διάταξη του Percometer	34
Εικόνα 3.3: Μερικά είδη ανιχνευτών Percometer	35
Εικόνα 3.4: Γεωφυσικό σύστημα GPR.....	36
Εικόνα 3.5: Αρχή λειτουργίας των γεωφυσικών συστημάτων GPR	36
Εικόνα 4.1: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Α της αντιολισθηρής στρώσης. 45	
Εικόνα 4.2: : Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Β της αντιολισθηρής στρώσης	46
Εικόνα 4.3: Σύγκριση κοκκομετρικών αναλύσεων των μιγμάτων Α & Β της αντιολισθηρής στρώσης	47
Εικόνα 4.4: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Α της ισοπεδωτικής στρώσης..	49
Εικόνα 4.5: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Β της ισοπεδωτικής στρώσης .	50
Εικόνα 4.6: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Γ της ισοπεδωτικής στρώσης..	51
Εικόνα 4.7: Σύγκριση κοκκομετρικών αναλύσεων των μιγμάτων Α, Β & Γ της	

ισοπεδωτικής στρώσης	51
Εικόνα 4.8: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ποσοστού κενών αέρα των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης.....	56
Εικόνα 4.9: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης	56
Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ποσοστού κενών αέρα των μιγμάτων της ισοπεδωτικής στρώσης.....	59
Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς των μιγμάτων της ισοπεδωτικής στρώσης	60
Εικόνα 4.12: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για το σύνολο των μιγμάτων	62
Εικόνα 4.13: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης	63
Εικόνα 4.14: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	64
Εικόνα 4.15: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.5) για το σύνολο των μιγμάτων	65
Εικόνα 4.16: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.5) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	66
Εικόνα 4.17: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για το σύνολο των μιγμάτων	67
Εικόνα 4.18: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης	68
Εικόνα 4.19: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	69
Εικόνα 4.20: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.7) για το σύνολο των μιγμάτων	70
Εικόνα 4.21: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.7) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	71

Εικόνα 4.22: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.8) για το σύνολο των μίγμάτων	72
Εικόνα 4.23: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.8) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	73
Εικόνα 4.24: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για το σύνολο των μίγμάτων	74
Εικόνα 4.25: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης	75
Εικόνα 4.26: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης	76
Εικόνα 4.27: Συσχέτιση κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς για το 70% του συνόλου των δοκιμίων	78
Εικόνα 4.28: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (4.3) για το 30% του συνόλου των μίγμάτων	79

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Έντυπο μετρήσεων για τον υπολογισμό του φαινομένου ειδικού βάρους	17
Πίνακας 2.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσοστό κενών και συνιστώμενο πάχος στρώσης αντιολισθηρών ταπήτων πυκνής και ανοιχτής σύνθεσης	26
Πίνακας 2.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσοστό κενών και συνιστώμενο πάχος στρώσης, αντιολισθηρών ταπήτων πορώδους σύνθεσης	27
Πίνακας 2.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση και συνιστώμενο πάχος ισοπεδωτικής στρώσης.....	28
Πίνακας 4.1: Κωδική Ονομασία Δοκιμίων Αντιολισθηρής Στρώσης	44
Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική ανάλυση αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α	44
Πίνακας 4.3: Κοκκομετρική ανάλυση αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Β	45
Πίνακας 4.4: Κωδική Ονομασία Δοκιμίων Ισοπεδωτικής Στρώσης	47
Πίνακας 4.5: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Α	48
Πίνακας 4.6: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Β	49
Πίνακας 4.7: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Γ	50
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Α της αντιολισθηρής στρώσης	53
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Β της αντιολισθηρής στρώσης	54
Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Α της ισοπεδωτικής στρώσης	57
Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Β της ισοπεδωτικής στρώσης	57
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Γ της ισοπεδωτικής στρώσης	58

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο

Το οδόστρωμα είναι ένα από τα σπουδαιότερα πάγια περιουσιακά στοιχεία για τους φορείς διαχείρισης ενός οδικού δικτύου. Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος θα πρέπει να εξασφαλίζει τη διατήρηση (α) της δομικής του επάρκειας και (β) των λειτουργικών χαρακτηριστικών σε αποδεκτά επίπεδα για την περίοδο σχεδιασμού. Η δομική επάρκεια συνδέεται με τη συμπεριφορά του οδοστρώματος υπό την επιβολή επαναλαμβανόμενων φορτίων. Η λειτουργική συμπεριφορά του οδοστρώματος συνδέεται άμεσα με τον χρήστη της οδού καθώς σχετίζεται με την ποιότητα κύλισης, την ασφάλεια, το κόστος συντήρησης του οχήματος, την ταχύτητα των οχημάτων, τους χρόνους μετακίνησης αλλά και με το κόστος που επιβαρύνει τους χρήστες. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τον ορθό σχεδιασμό του οδοστρώματος ζήτημα μείζονος σημασίας. Συγκεκριμένα, καθοριστικής σημασίας είναι ο έλεγχος των παραμέτρων σύνθεσης του μίγματος των επιμέρους στρώσεων του, αλλά και η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του ανά τακτά χρονικά διαστήματα στα πλαίσια της βέλτιστης διαχείρισης της συντήρησης του (Λοΐζος & Πλατή, 2018b).

Το ασφαλτόμιγμα είναι το υλικό οδοστρωσίας, το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ανώτερων στρώσεων ενός οδοστρώματος, γνωστές και ως ασφαλικές στρώσεις (Λοΐζος & Πλατή, 2020). Ασφαλικές στρώσεις συναντώνται κυρίως στα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος οδοστρωμάτων για τον ελλαδικό χώρο. Τα υλικά που συνθέτουν το ασφαλτόμιγμα είναι η άσφαλτος, τα αδρανή υλικά και ο αέρας ή αλλιώς κενά αέρα. Αναλόγως το μίγμα και τις απαιτούμενες μηχανικές τους ιδιότητες (αντοχή, αντιολισθηρότητα, μείωση θορύβου, κλπ.), ορίζεται η σύνθεσή του, τα ποσοστά δηλαδή περιεκτικότητας του εκάστοτε υλικού του (Λοΐζος & Πλατή, 2018a).

Το ποσοστό των κενών αέρα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τη σύνθεση του ασφαλτομίγματος, μιας και επηρεάζει άμεσα την αντοχή του. Οι εργαστηριακές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών προϋποθέτουν κατάλληλη εργαστηριακή διάταξη που ενδεχομένως να μην είναι διαθέσιμη. Ως εκ τούτου προκύπτει η ανάγκη για τη διερεύνηση μιας εναλλακτικής μεθόδου για τον προσδιορισμό του ποσοστού κενών των ασφαλτομιγμάτων (Hoegh et. al., 2015). Η μέθοδος αυτή, όμως, για να καταστεί ευρέως χρησιμοποιούμενη θα πρέπει ταυτοχρόνως να είναι ταχεία, ευκόλως εφαρμόσιμη και να εξασφαλίζει αξιόπιστες μετρήσεις και αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή θα μπορούσε να είναι ο προσδιορισμός των κενών αέρα συμπυκνωμένων ασφαλτομιγμάτων μέσω μετρήσεων των διηλεκτρικών σταθερών τους. Η έρευνα που αφορά στις διηλεκτρικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων, και

πιο συγκεκριμένα του μεγέθους της διηλεκτρικής σταθεράς, έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους ερευνητές του συγκεκριμένου κλάδου τις τελευταίες δεκαετίες (Saarenketo & Scullion, 1999). Σημειώνεται, όμως, πως η εν λόγω έννοια δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στον κλάδο των οδοστρωμάτων, μιας και χρήζει περαιτέρω μελέτης και εξειδικευμένων διερευνήσεων (Pellinen et. al., 2015).

Βάσει των παραπάνω η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο τη διερεύνηση της συσχέτισης του ποσοστού των κενών αέρα και της διηλεκτρικής σταθεράς συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου για την γρήγορη και αξιόπιστη εκτίμηση του ποσοστού των κενών αέρα του ασφαλτομίγματος βάσει των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς.

1.2. Στόχος και μεθοδολογία

Για την επίτευξη του στόχου, αρχικά πραγματοποιείται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για την καταγραφή σχέσεων/μοντέλων που να περιγράφουν τη συσχέτιση του ποσοστού κενών αέρα και της διηλεκτρικής σταθεράς ασφαλτομιγμάτων. Η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας και καλής προσαρμογής των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς, πραγματοποιείται αξιοποιώντας τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.

Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν στοιχεία συλλογής από 60 δοκίμια ασφαλτομίγματος Marshall, στα οποία είχαν πραγματοποιηθεί οι κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές, για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και του ποσοστού των κενών αέρα.

Τα υπόψη στοιχεία συλλογής αξιοποιούνται περαιτέρω για την ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου συσχέτισης των κενών αέρα και των διηλεκτρικών σταθερών, με στόχο την εύκολη, ταχεία και αξιόπιστη εκτίμηση του ποσοστού των κενών αέρα βάσει της μετρημένης τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς. Τέλος, πραγματοποιείται επαλήθευση του μοντέλου ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του για πληθώρα περιπτώσεων δίχως την ανάγκη για βαθμονόμηση.

1.3. Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κύρια κεφάλαια. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος που αποτελεί το πρώτο και εισαγωγικό κεφάλαιο, περιλαμβάνονται τα επόμενα:

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπυκνωμένα ασφαλτομίγματα, αναλύοντας τα κύρια χαρακτηριστικά τους, περιγράφοντας τον υπολογισμό τους βάσει των αμερικάνικων και ευρωπαϊκών προτύπων, τις βασικές ιδιότητες, καθώς και τα είδη τους.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά στις διηλεκτρικές σταθερές, και πιο συγκεκριμένα, στον ορισμό τους, τους τρόπους μέτρησης αυτών και στους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Επιπλέον, παρουσιάζονται σχέσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία που συσχετίζουν τη διηλεκτρική σταθερά με το ποσοστό των κενών.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην πειραματική διαδικασία συσχέτισης των κενών και της διηλεκτρικής σταθεράς. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε στατιστικός έλεγχος επαλήθευσης των μοντέλων της διεθνούς βιβλιογραφίας και στη συνέχεια, αξιοποιώντας δεδομένα από πειράματα που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο συσχέτισης των μεγεθών ενδιαφέροντος.

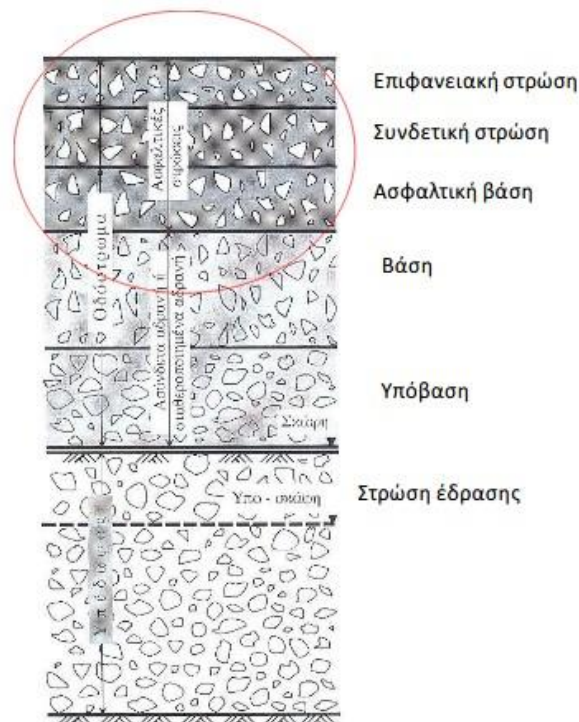
Στο πέμπτο κεφάλαιο, σημειώνονται τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και προτάσεις περαιτέρω μελέτης.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές της παρούσας εργασίας.

2. Συμπυκνωμένα ασφαλτομίγματα

2.1. Γενικά

Το ασφαλτόμιγμα είναι το υλικό οδοστρώσεως, το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ανώτερων στρώσεων ενός οδοστρώματος, γνωστές και ως ασφαλτικές στρώσεις (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Δομή οδοστρώματος

Οι κατασκευαστικές διατομές οδοστρώματων αναλόγως της δομής τους διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα *εύκαμπτα* και τα *δύσκαμπτα* (άκαμπτα) οδοστρώματα (Λοϊζος & Πλατή, 2020). Η εν λόγω κατηγοριοποίηση δεν είναι απόλυτη, καθώς υπάρχουν και ενδιάμεσες κατηγορίες, οι οποίες υφίστανται λόγω της αυξανόμενης χρήσης στρώσεων από υλικά σταθεροποιημένα ή κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες, και ενδιάμεσες κατηγορίες (π.χ. ημι-άκαμπτα / ημι-εύκαμπτα ή και σύνθετα οδοστρώματα, όπως από ανακυκλωμένα υλικά κ.α.). Στο σημείο αυτό, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως στο οδικό δίκτυο της χώρα μας συναντώνται κυρίως εύκαμπτα οδοστρώματα.

Οι ασφαλτικές στρώσεις συναντώνται τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα ημι-άκαμπτα / ημι-εύκαμπτα οδοστρώματα (Εικόνα 2.2 & Εικόνα 2.3) και πιο συγκεκριμένα στην ανώτερη στρώση τους, η οποία ονομάζεται αλλιώς και ασφαλτική επίστρωση. Η ανώτατη αυτή στρώση αποτελείται από επιμέρους στρώσεις ασφαλτομίγματος, που διακρίνονται:

- στην ανώτερη στρώση, που ονομάζεται επιφανειακή στρώση (στην πλειονότητα των περιπτώσεων επιδιώκεται να είναι αντιολισθηρή, εξού και η εναλλακτική ονομασία της),
- στην ενδιάμεση, αλλιώς γνωστή και ως συνδετική στρώση και
- στην υποκείμενη στρώση, με εναλλακτική ονομασία εκείνη της ασφαλτικής βάσης.



Εικόνα 2.2: Διατομή ημι-άκαμπτου/ημι-εύκαμπτου οδοστρώματος



Εικόνα 2.3: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Επιπροσθέτως, αξίζει να επισημανθεί πως το ασφαλτόμιγμα συντίθεται από δύο βασικά υλικά. Το πρώτο εξ αυτών είναι η άσφαλτος και το δεύτερο τα αδρανή υλικά, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.4). Η χρήση αδρανών ακανόνιστης γεωμετρίας, αλλά και η διαδικασία παρασκευής του ασφαλτομίγματος, έχουν ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου του ασφαλτομίγματος να καταλαμβάνεται από αέρα που πληρώνει τα κενά του ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 2.4: Αδρανή και άσφαλτος

Επιπλέον, η παραγωγή των ασφαλτομιγμάτων οφείλει να υλοποιείται σύμφωνα με ορισμένες βασικές απαιτήσεις, ώστε να:

- ανθίστανται στην παραμένουσα παραμόρφωση και στη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης,
- προσφέρουν υδατοστεγανότητα στις υποκείμενες στρώσεις και
- συνεισφέρουν στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

Τα ασφαλτομίγματα της ανώτατης στρώσης (αντιολισθηρή), θα πρέπει εκτός όλων των άλλων να παρέχουν επαρκή αντιολισθητική ικανότητα και ικανοποιητική ποιότητα κύλισης. Εν γένει, η σύνθεση του ασφαλτομίγματος διαφοροποιείται βάσει της στρώσης για την οποία προορίζεται.

2.2. Μελέτη σύνθεσης

2.2.1. Γενικά

Κατά τη διαδικασία της μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος, τρία είναι τα βασικά στάδια σχεδιασμού. Το πρώτο, εκ των σταδίων, αφορά στην επιλογή των αδρανών υλικών. Αρχικά, γίνεται αξιολόγηση των πηγών των αδρανών υλικών, όπου ακολουθείται μια σειρά

τυποποιημένων δοκιμών. Επιπλέον, για κάθε σύνθεση μίγματος ελέγχεται αν εξασφαλίζονται οι απαιτήσεις των προδιαγραφών ως προς τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Ο εν λόγω έλεγχος είναι απαραίτητος, διότι υπάρχει η πιθανότητα να απαιτούνται περισσότερες από μία πηγές αδρανών υλικών για να ικανοποιηθούν οι αντίστοιχες απαιτήσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Το δεύτερο στάδιο είναι η επιλογή της ασφάλτου. Η κατάλληλη επιλογή της εξαρτάται από τις απαιτήσεις του κάθε έργου και πραγματοποιούνται δοκιμές ελέγχου για την αξιολόγηση της ποιότητάς της.

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο της μελέτης σύνθεσης αφορά στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Δημιουργία δοκιμαστικών μιγμάτων με ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση αλλά με διαφορετικές περιεκτικότητες σε άσφαλο.
- 2) Συμπύκνωση των δοκιμαστικών μιγμάτων με χρήση εργαστηριακών μεθόδων.
- 3) Εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό βασικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος. Η διαδικασία αυτή είναι το αρχικό στάδιο για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος. Σημειώνεται, όμως, πως δεν είναι εφικτό να θεωρηθεί ότι οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζουν επαρκώς τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε πραγματικές συνθήκες.
- 4) Η κατάλληλη επιλογή της περιεκτικότητας σε άσφαλο, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν πιο πιστά οι στόχοι σχεδιασμού του συγκεκριμένου ασφαλτομίγματος.

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα συνιστώμενο μίγμα αδρανών υλικών και ασφαλικού συνδετικού υλικού. Σημαντικό, σε αυτό το σημείο, είναι να σημειωθεί πως στην Ελλάδα η πιο διαδεδομένη μεθοδολογία είναι η μέθοδος Marshall. Η εν λόγω μέθοδος αποτελείται από τα στάδια που ακολουθούν. Το πρώτο εξ αυτών είναι η επιλογή των αδρανών υλικών, ακολουθεί η επιλογή ασφάλτου και η προετοιμασία δοκιμίων κατά Marshall. Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος των δοκιμίων όσον αφορά την ευστάθεια και την παραμόρφωσή τους, καθώς και τον προσδιορισμό των ογκομετρικών στοιχείων τους. Τέλος, λαμβάνει χώρα ο προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλο.

2.2.2. Αδρανή υλικά

Η χρήση αδρανών υλικών για την κατασκευή των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της εν λόγω διαδικασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως προέρχονται κατά κύριο λόγο από τη θραύση των κατάλληλων πετρωμάτων, αλλά και από φυσικές αποθέσεις

ποταμών, θαλασσών, χειμάρρων (είτε με τη μέθοδο της θραύσης, είτε όχι) (Εικόνα 2.5). Επιπλέον, η παραγωγή των θραυστών αδρανών υλικών λαμβάνει χώρα σε λατομεία με χρήση ποικίλων πετρωμάτων με τις κατάλληλες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες. Σημειώνεται πως τα συλλεκτά και τα θραυστά υλικά χαρακτηρίζονται ως πρωτογενή αδρανή. Επιπροσθέτως, για να αξιοποιηθούν πρέπει να πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις των ανά περίπτωση κατάλληλων / επιθυμητών χαρακτηριστικών. Όσον αφορά τα δευτερογενή αδρανή, πρόκειται για υλικά άλλων κατηγοριών σε σχέση με τις δύο παραπάνω. Τέτοιες κατηγορίες είναι η μεταλλουργική σκωρία, τα ανακυκλωμένα αδρανή ή «recycled aggregates», παραπροϊόντα βωξίτη και άλλα.

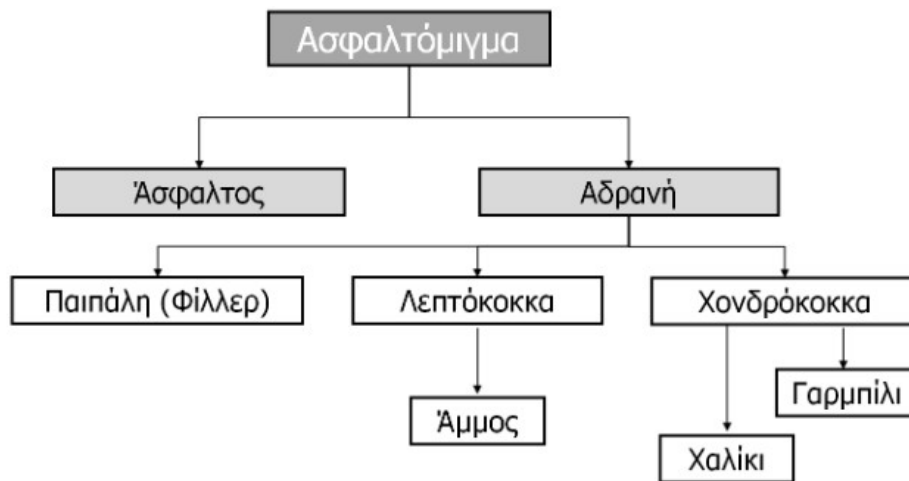
Μια ακόμη διάκριση των αδρανών υλικών αφορά στο μέγεθος των κόκκων τους και συγκεκριμένα διακρίνονται σε: α) χονδρόκοκκα, β) λεπτόκοκκα και γ) παιπάλη. Η εν λόγω διάκριση εκφράζεται ως κλάσμα σε σχέση με το μικρότερο (d) και μεγαλύτερο ανοίγματος (D) οπής κόσκινου όπως παρακάτω (EN 13242:2002, 2002):

- χονδρόκοκκα, μεγέθους d/D , με $D > 2 \text{ mm}$ και $d \geq 1 \text{ mm}$
- λεπτόκοκκα, μεγέθους $0/D$, με $D \leq 6,3 \text{ mm}$
- παιπάλη, υλικό διερχόμενο από το κόσκινο ανοίγματος $0,063 \text{ mm}$



Εικόνα 2.5: Αδρανή υλικά: συλλεκτά (άνω) και θραυστά (κάτω)

Τέλος, τα αδρανή υλικά, πέραν του ότι αποτελούν ένα από τα δύο βασικά υλικά των ασφαλτομιγμάτων (Εικόνα 2.6), αξιοποιούνται και για την κατασκευή των ασύνδετων στρώσεων οδοστρωσίας, δηλαδή της βάσης και της υπόβασης.



Εικόνα 2.6: Γενική μορφή σύστασης ασφαλτομίγματος

Το χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών υλικών χρησιμοποιείται για την κατασκευή της υπόβασης και σημειώνεται πως δύναται να είναι είτε συλλεκτό είτε θραυστό. Για την κατασκευή της βάσης η χρήση θραυστών αδρανών αποτελεί μονόδρομο. Επιπλέον, το λεπτόκοκκο κλάσμα των αδρανών υλικών κατασκευής της βάσης και της υπόβασης είναι συνήθως απαραίτητο να είναι ίδιας προέλευσης. Η βασική προϋπόθεση για τις δύο προαναφερθείσες στρώσεις (βάση και υπόβαση) είναι η μεγιστοποίηση της αντίστασης σε μετακινήσεις κόκκων, αφού κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες μόνιμες παραμορφώσεις (Λοΐζος & Πλατή, 2018a).

Όσον αφορά τα εν λόγω υλικά, είναι απαραίτητο να είναι καθαρά, σκληρά, υγιή, ανθεκτικά. Επίσης, πρέπει να είναι απαλλαγμένα από ξένες προσμίξεις οποιασδήποτε προέλευσης (όπως χώματα κλπ.), και να μην περιέχουν επικαλύψεις ή πλακοειδή, αποσαθρωμένα, εύθρυπτα ή σχιστολιθικά τεμάχια.

2.2.3. Άσφαλτος

Η άσφαλτος αποτελεί υλικό που αναλαμβάνει τη σύνδεση όλων των επιμέρους υλικών. Η άσφαλτος είναι εκείνη που έχει την ικανότητα να προσδίδει στο ασφαλτόμιγμα συνοχή αλλά και ομοιομορφία. Οι φυσικές ιδιότητές της εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία αλλά και από τον χρόνο φόρτισης. Συγκεκριμένα, αύξηση της θερμοκρασίας της συνεπάγεται τη ρευστοποίησή της, ενώ, αντιθέτως, η μείωση της επιφέρει στερεοποίησή της. Όσον αφορά στον χρόνο φόρτισης, η αύξησή του προκαλεί αύξηση της παραμόρφωσης, ενώ η μείωσή του έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές παραμόρφωσης.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη επηρεάζουν άμεσα το ασφαλτόμιγμα και ειδικότερα ευθύνονται για την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του. Κάτι τέτοιο καθιστά σαφή τη σπουδαιότητα του προσδιορισμού του εύρους των εν λόγω μεγεθών, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό του οδοστρώματος και να ελέγχονται βάσει των προκαθορισμένων – αποδεκτών ορίων (Λοΐζος & Πλατή, 2018b).

Στη συνέχεια, όσον αφορά τον χαρακτηρισμό του τύπου ασφάλτων, ο δείκτης PEN αποτελεί το μέγεθος που χαρακτηρίζει τους διάφορους τύπους ασφάλτου. Ο εν λόγω δείκτης αποτελεί το αποτέλεσμα της «δοκιμής διείσδυσης» ή «penetration test» (π.χ. PEN = 20/30, 50/70). Ο τύπος ασφάλτου που θα επιλεγεί, εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες στην περιοχή της οδού που πρόκειται να κατασκευαστεί. Στις πλειονότητα των περιπτώσεων η περιεκτικότητα ασφάλτου του μίγματος λαμβάνει τιμές από 3,8 – 5,3% και εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών.

2.2.4. Συμπύκνωση

Κατά τη φάση μελέτης σύνθεσης

Στη φάση αυτή, σκοπός είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλτο. Για τον λόγο αυτόν, παρασκευάζονται δοκιμαστικά ασφαλτομίγματα και στην πλειονότητα των περιπτώσεων πρόκειται για 4–5 μίγματα, τα οποία έχουν διαφορετική μεταξύ τους περιεκτικότητα σε άσφαλτο. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να παράγεται επαρκής ποσότητα ασφαλτομίγματος, καθώς πρέπει να μπορεί να αξιοποιηθεί για τη συμπύκνωση τριών τουλάχιστον δοκιμών τύπου Marshall μέσω κρουστικής συμπύκνωσης.

Κατά την κατασκευή του οδοστρώματος

Πρώτο βήμα στην παρούσα φάση είναι η εφαρμογή ασφαλικής προεπάλειψης. Έπειτα, ακολουθεί από η διάστρωση του ασφαλτομίγματος της ασφαλικής βάσης και στη συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή συγκολλητικής επάλειψης μεταξύ της διάστρωσης των υπερκείμενων ασφαλικών στρώσεων (της συνδετικής και της αντιολισθηρής στρώσης). Κατά την άφιξη των φορητών με το ασφαλτόμιγμα στο έργο, εκφορτώνεται το ασφαλτόμιγμα εντός του κάδου του διαστρωτήρα, που με τη σειρά του αναλαμβάνει τις διαδικασίες της διάστρωσης και ισοπέδωσης του ασφαλτομίγματος.

Με το πέρας πλέον της διάστρωσης, επέρχεται το επόμενο στάδιο που αφορά στη διαδικασία της συμπύκνωσης του ασφαλτομίγματος. Το εν λόγω στάδιο χαρακτηρίζεται συχνά ως το πιο κρίσιμο στάδιο κατά την κατασκευή του οδοστρώματος. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στο ότι η συμπύκνωση συνδέεται άμεσα με τη μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος. Η διαδικασία αυτή δύναται να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους βάσει των διαφόρων

οδοστρωτήρων, οι οποίοι συνήθως κατηγοριοποιούνται σε: α) τυμπανοφόρους και β) ελαστιχοφόρους.

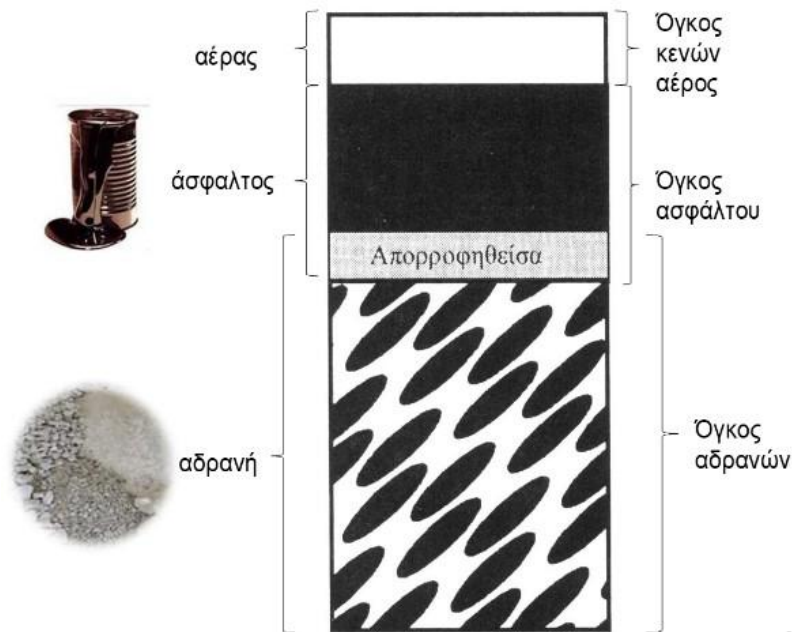
Οι παράγοντες με τη σημαντικότερη επιρροή στη διαδικασία της συμπύκνωσης είναι η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος, το υλοποιούμενο πάχος της στρώσης και οι κλιματολογικές συνθήκες. Λόγω των παραπάνω, είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες διαδικασίες και οι αντίστοιχες πρακτικές, με σκοπό να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος βαθμός συμπύκνωσης και η «καλή συμπεριφορά» των ασφαλτικών στρώσεων.

2.3. Ογκομετρικές ιδιότητες

2.3.1. Γενικά

Έχοντας εξασφαλίσει στο εργαστήριο όλα τα παραπάνω όσον αφορά στις διαδικασίες μελέτης σύνθεσης και συμπύκνωσης, ο συνολικός πλέον όγκος του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος αποτελείται από τον όγκο που καταλαμβάνεται από τα αδρανή υλικά, την άσφαλο και τα κενά αέρα. Χαρακτηριστικά, στην Εικόνα 2.7, παρουσιάζεται το διάγραμμα φάσεων (αντίστοιχα με τις αρχές της εδαφομηχανικής), όπου τα τρία παραπάνω συστατικά σχετίζονται μεταξύ τους ογκομετρικά.

Ο παρακάτω σχεδιασμός έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των ποσοστών κατ' όγκο του ασφαλτικού συνδετικού υλικού και των αδρανών υλικών, τα οποία απαραίτητα για τη δημιουργία μίγματος με τις κατάλληλες ιδιότητες. Βέβαια, οι μετρήσεις βάρους είναι πολύ ευκολότερες από εκείνες του όγκου, οπότε τυπικά λαμβάνονται οι πρώτες και έπειτα γίνεται μετατροπή τους σε όγκο αξιοποιώντας τα ειδικά βάρη των συστατικών με σκοπό την αξιολόγηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων του ασφαλτικού μίγματος.



Εικόνα 2.7: Ογκομετρική απεικόνιση ασφαλτομίγματος

2.3.2. Προσδιορισμός κενών

Κατά τη σύνθεση των ασφαλτομιγμάτων χρησιμοποιούνται τα μεγέθη της πυκνότητας και των κενών αέρα, ώστε να προσδιοριστούν οι κύριες φυσικές ιδιότητες των μιγμάτων. Για την πυκνότητα, λαμβάνονται υπόψιν δύο μέτρα της, εκείνο της φαινόμενης πυκνότητας (ρ_b) και εκείνο της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητα (ρ_{max}) του ασφαλτομίγματος.

Η πρώτη εκ των παραπάνω (ρ_b) προσδιορίζεται βάσει του λόγου του βάρους και του όγκου του συμπυκνωμένου δοκιμίου, ενώ η δεύτερη (ρ_{max}) αναφέρεται στην πυκνότητα του ασφαλτικού μίγματος δίχως την παρουσία κενών αέρα. Έπειτα, τα δύο αυτά μεγέθη αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Όσον αφορά στα ογκομετρικά στοιχεία, σημεία ενδιαφέροντος αποτελούν τα κενά αέρα, τα κενά που καλύφθηκαν με άσφαλτο (*VFA: Voids filled with asphalt*) και τα κενά στο σκελετό των αδρανών ή κενά συμπυκνωμένων αδρανών (*VMA: Voids in the Mineral Aggregate*).

Το ποσοστό των κενών αέρος (V_m) δύναται να υπολογιστεί με τη χρήση της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας του χαλαρού ασφαλτομίγματος και της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμίων Marshall, βάσεις της παρακάτω σχέσης:

$$V_m = \frac{\rho_{max} - \rho_b}{\rho_{max}} * 100(\%) \quad (2.1)$$

όπου:

- ρ_b : η φαινόμενη πυκνότητα
- ρ_{max} : η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα

Κατά αντιστοιχία με τη Σχέση (2.1), το ποσοστό κενών (V_m) στο ασφαλτόμιγμα δύναται να υπολογιστεί κάνοντας χρήση της εξίσωσης:

$$V_m = \frac{G_{max} - G_b}{G_{max}} * 100(\%) \quad (2.2)$$

όπου:

- G_{max} : το θεωρητικό μέγιστο ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος
- G_b : το φαινόμενο ειδικό βάρος του ασφαλτομίγματος

Όπως υποδεικνύει η Σχέση (2.1), για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών απαιτείται ο υπολογισμός της θεωρητικής μέγιστης πυκνότητας και της φαινόμενη πυκνότητας (ή των αντίστοιχων ειδικών βαρών στην περίπτωση χρήσης της Σχέσης (2.2)), ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Στα πλαίσια της μελέτης των ασφαλτομιγμάτων, η διερεύνηση των κενών αέρα αποτελεί στάδιο καθοριστικής σημασίας, με αποτέλεσμα ο λεπτομερής υπολογισμός τους να αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας. Σημειώνεται πως το ποσοστό κενών κατά τον σχεδιασμό του ασφαλτομίγματος λαμβάνει τιμές τέτοιες, ώστε η συμπύκνωση που επέρχεται σε αυτό λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων να αποτελεί μικρό μόνο μέρος της συνολικής του συμπύκνωσης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Βασικό στοιχείο των αδρανών υλικών είναι ότι περιέχουν πόρους, οι οποίοι ευθύνονται για τη μερική απορρόφηση της ασφάλτου. Το φαινόμενο αυτό ευθύνεται για το γεγονός πως τα αδρανή περιβάλλονται από το εναπομένον αυτό ποσοστό της ασφάλτου, το οποίο συμπληρώνει ταυτοχρόνως τα κενά μεταξύ των αδρανών και ευθύνεται για τη συνοχή του μίγματος. Το προαναφερθέν ποσοστό της ασφάλτου ονομάζεται ενεργό ποσοστό ασφάλτου και ποσοτικά είναι μικρότερο από την αρχική ποσότητα ασφάλτου που προστέθηκε στο μίγμα.

Εκτός αυτού, τα κενά στον σκελετό των αδρανών (ή αλλιώς VMA) ορίζονται ως τα κενά ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών σε ένα συμπυκνωμένο μίγμα, το οποίο περιλαμβάνει τα κενά του αέρα και τον όγκο της ασφάλτου. Τα κενά αυτά επιτρέπουν στο διαθέσιμο χώρο μεταξύ των αδρανών να είναι επαρκής για να παραλάβει την ποσότητα της ασφάλτου. Από την άλλη, το VFA διασφαλίζει ότι επαρκής αριθμός κενών έχουν καλυφθεί με άσφαλτο. Η σχέση που περιγράφει την σύνδεση των δυο μεγεθών παρατίθεται παρακάτω:

$$VFA = \frac{VMA - V_m}{VMA} * 100(\%) \quad (2.3)$$

όπου:

- *VFA* : τα κενά που καλύφθηκαν με άσφαλτο
- *VMA* : τα κενά στον σκελετό των αδρανών ή κενά συμπυκνωμένων αδρανών

Ο κατάλληλος σχεδιασμός των άνωθεν ογκομετρικών χαρακτηριστικών του ασφαλτικού μίγματος εξασφαλίζει την ανθεκτικότητα του ασφαλτικού μίγματος. Ωστόσο, υψηλό ποσοστό κενών αέρα, η ύπαρξη δηλαδή αέρα στη δομή του ασφαλτομίγματος, συνεπάγεται την οξειδωση της ασφάλτου, η οποία οξειδωση επιφέρει ταχύτερη γήρανση του ασφαλτομίγματος. Επιπλέον, το ασφαλτόμιγμα καθίσταται πιο ευάλωτο έναντι φαινομένων ρηγμάτωσης (Εικόνα 2.8), καθώς και σε παραμενουσών παραμορφώσεων (Scullion & Saatenketo, 2001).

Αντιθέτως, όταν το ποσοστό κενών αέρα είναι χαμηλό, υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθούν φαινόμενα τροχοαυλάκωσης (Εικόνα 2.8). Για την τροχοαυλάκωση ευθύνεται το γεγονός πως δεν είναι διαθέσιμο το απαραίτητο ποσοστό κενών, εκείνο το οποίο συμβάλει στη διαδικασία εισροής του συνδετικού υλικού γύρω από τα αδρανή, ώστε να τα καλύψει. Επιπροσθέτως, υφίσταται και το φαινόμενο μείωσης της ικανότητας πρόσφυσης, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την περίσσεια ασφάλτου γύρω από τα αδρανή και κατά προέκταση την απώλεια της μικροϋφής του ασφαλτικού μίγματος. Επιπλέον, καθίσταται πιθανό να αναδυθεί το συνδετικό υλικό επιφέροντας έτσι και την έλλειψη μακροϋφής.



Εικόνα 2.8: Ρηγμάτωση (α) και τροχοαυλάκωση (β)

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα κατανοητή, η σπουδαιότητα προσδιορισμού του ποσοστού κενών αέρα στο ασφαλτόμιγμα, στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενός οδοστρώματος (Λοΐζος & Πλατή, 2018b).

2.3.3. Προσδιορισμός θεωρητικής μέγιστης πυκνότητας

Ο τρόπος προσδιορισμού της θεωρητικής μέγιστης πυκνότητας (ρ_{max}) γίνεται σύμφωνα με την μεθοδολογία που προδιαγράφει η D2041 (ASTM, 2011β). Η υπόψη μεθοδολογία ονομάζεται «δοκιμή RICE» και αναλύεται παρακάτω με βάση τα αμερικανικά πρότυπα.

Η προαναφερθείσα μέθοδος (RICE) έχει ως στόχο τον προσδιορισμό του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους του χαλαρού ασφαλτομίγματος. Για την εκτέλεση του πειράματος (δοκιμής) για το κάθε δείγμα, πραγματοποιείται χειροκίνητος διαχωρισμός των κόκκων και ακολουθεί η τοποθέτησή τους στη συσκευή του πυκνόμετρου. Έπειτα, διαβρέχονται οι κόκκοι με νερό σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) έως ότου το δείγμα καλυφθεί πλήρως. Η παρακάτω σχέση προσδιορίζει την τιμή της θεωρητικής μέγιστης πυκνότητας (ρ_{max}) σε g/cm³:

$$\rho_{max} = \frac{A}{A + B - E} * \rho_w \quad (2.4)$$

όπου:

- A : Μάζα δείγματος (g)
- B : Μάζα πυκνόμετρου + νερού (g)
- E : Μάζα πυκνόμετρου + νερού + υλικού στον αέρα (g)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (1 g/cm³)

2.3.4. Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας

Όσον αφορά στον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας (ρ_b), τόσο τα αμερικάνικα (ASTM) όσο και τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN) προτείνουν ποικίλες μεθόδους, ανάλογα με τον τύπο του ασφαλτομίγματος (κλειστού ή ανοιχτού τύπου). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι μέθοδοι τόσο των αμερικάνικων όσο και των ευρωπαϊκών προτύπων. Στην πράξη, επιλέγεται η καταλληλότερη μέθοδος βάσει των παραμέτρων του υπό μελέτη έργου και του διαθέσιμου εξοπλισμού, εργαστηριακού ή μη.

Αμερικάνικα πρότυπα (ASTM)

Για τον προσδιορισμό της τιμής του φαινομένου ειδικού βάρους (ASTM, 2011α), τα δοκίμια κατά MARSHALL ζυγίζονται αρχικώς στην ξηρή τους κατάσταση και στη συνέχεια τοποθετούνται σε νερό, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) για τρία έως πέντε λεπτά με σκοπό να προσδιοριστεί το βάρος των μιγμάτων στο νερό. Ακολούθως, τα δοκίμια αφαιρούνται από το νερό και στεγνώνονται (επιφανειακά με χρήση πετσέτας) και ζυγίζονται ξανά. Με τον τρόπο αυτό, ολοκληρώνονται οι απαραίτητες μετρήσεις για τη συμπλήρωση του Πίνακα 2.1, βάσει του οποίου πραγματοποιείται ο υπολογισμός της φαινομένης πυκνότητας (ρ_b).

Πίνακας 2.1: Έντυπο μετρήσεων για τον υπολογισμό του φαινομένου ειδικού βάρους

Κωδ. Δοκιμίου	Μάζα Δοκιμίου στον Αέρα W (g)	Μάζα Δοκιμίου Στο Νερό W _l (g)	Μάζα Κορεσμένου Δοκιμίου στον Αέρα W _{SSD} (g)	Όγκος Δοκιμίου V = W _{SSD} - W _l (cm ³)	Φαινόμενη Πυκνότητα Δοκιμίου Marshall (g/cm ³)	
					ΔΟΚΙΜΙΩΝ	Μ.Ο.
Ex1						

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως αναλόγως του τύπου του ασφαλτομίγματος, κλειστού ή ανοικτού δηλαδή, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος για τον υπολογισμό της φαινομένης πυκνότητας (ρ_b). Ο εν λόγω υπολογισμός, λαμβάνει χώρα σε δοκίμια που έχουν παρασκευαστεί για τον λόγο αυτόν στο εργαστήριο ή σε πυρήνες που έχουν ληφθεί από το οδόστρωμα.

Όσον αφορά τώρα τα δοκίμια με ποσοστό κενών $V_m < 10\%$ (κλειστού τύπου δηλαδή), προτείνεται η μέθοδος D2726 (ASTM, 2011ε), βάσει της οποίας η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b) σε g/cm³ υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (2.5)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- m_2 : η μάζα του δοκιμίου μέσα στο νερό (g)
- m_3 : η μάζα του κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (g)

- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (1 g/cm³)

Επισημαίνεται, πως η παραπάνω μέθοδος αποτελεί κατάλληλη προσέγγιση, υπό την προϋπόθεση όμως πως η απορροφητικότητα νερού του δοκιμίου είναι <2% κατ' όγκο του δοκιμίου. Σύμφωνα με το πρότυπο D3203 (ASTM, 2011γ) η απορροφητικότητα του νερού υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$\text{Απορροφητικότητα νερού κ. ο. (\%)} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} * 100(\%) \quad (2.6)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- m_2 : η μάζα του δοκιμίου μέσα στο νερό (g)
- m_3 : η μάζα του κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (g)

Για δοκίμια με $V_m < 10\%$ (κλειστού τύπου δηλαδή) και όταν η απορροφητικότητα νερού είναι >2% κατ' όγκο του δοκιμίου, η προσέγγιση βάσει D1188 (ASTM, 2011α), υποδεικνύει την επικάλυψη του δοκιμίου με σφραγιστικό υλικό. Επιπλέον, στο στάδιο αυτό σημαντικό παράγοντα αποτελεί η ορθή επικάλυψη του δοκιμίου, γεγονός το οποίο αυξάνει τον βαθμό δυσκολίας, ενώ ταυτοχρόνως καθίσταται αδύνατη η επαναχρησιμοποίηση του δοκιμίου (κατόπιν της επικάλυψής του) σε περαιτέρω πειράματα στο εργαστήριο. Εν τέλει, λόγω των παραπάνω, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου παρατηρείται σπάνια. Ο υπολογισμός, λοιπόν, της φαινομενικής πυκνότητας (ρ_b) σε g/cm³ πραγματοποιείται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\left(\frac{m_4 - m_5}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_4 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad (2.7)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- m_4 : η μάζα του ξηρού επικαλυμμένου δοκιμίου στον αέρα (g)
- m_5 : η μάζα του ξηρού επικαλυμμένου δοκιμίου μέσα στο νερό (g)
- ρ_{sm} : το ειδικό βάρος του υλικού επικάλυψης στους 25 °C (g/cm³)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (1 g/cm³)

Εν τέλει, όσον αφορά τα δοκίμια με ποσοστό κενών $V_m > 10\%$ (ανοιχτού τύπου δηλαδή), ακολουθείται το πρότυπο D3203 (ASTM, 2011γ), ώστε να υπολογιστεί η φαινομενική

πυκνότητα (ρ_b) με βάση της διαστάσεις του δοκιμίου (Σχέση (2.8)). Σημειώνεται πως το πάχος του δοκιμίου προσδιορίζεται βάσει του προτύπου D3549 (ASTM, 2011δ).

$$\rho_b = \frac{m_1}{\left(\frac{\pi * h * d^2}{4}\right)} \quad (2.8)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- h : το πάχος του δοκιμίου (cm)
- d : η διάμετρος του δοκιμίου (cm)

Ευρωπαϊκά πρότυπα (EN)

Όπως συμβαίνει με τα αμερικανικά πρότυπα (ASTM), έτσι και βάσει των ευρωπαϊκών προτύπων (EN) η επιλογή της μεθόδου για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας (ρ_b) σε δοκίμια ασφλατομίγματος, είτε αυτά παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο είτε προέρχονται από τη λήψη πυρήνων (του οδοστρώματος), εξαρτάται από τον τύπο του ασφλατομίγματος (ανοικτός ή κλειστός) και το ποσοστό των κενών (EN 12697-6:2003, 2003).

Όσον αφορά τα δοκίμια με $V_m < 5\%$ (κλειστού τύπου δηλαδή), χρησιμοποιείται η μέθοδος Saturated Surface Dry (SSD). Κατά την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b) υπολογίζεται σε g/cm^3 βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad (2.9)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- m_2 : η μάζα του δοκιμίου μέσα στο νερό (g)
- m_3 : η μάζα του κορεσμένου δοκιμίου στον αέρα (g)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (1 g/cm^3)

Όσον αφορά τα δοκίμια των οποίων η επιφάνεια είναι τραχεία και με εύρος ποσοστού κενών αέρα $5\% < V_m < 15\%$, αξιοποιείται η ίδια μέθοδος με εκείνη των αμερικανικών προτύπων, βάσει της οποίας η φαινόμενη πυκνότητα (ρ_b) υπολογίζεται μετά την επικάλυψη του δοκιμίου με σφραγιστικό υλικό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο προσδιορισμός του ζητούμενου μεγέθους (ρ_b) σε g/cm^3 πραγματοποιείται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\left(\frac{m_4 - m_5}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_4 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad (2.10)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- m_4 : η μάζα του ξηρού επικαλυμμένου δοκιμίου στον αέρα (g)
- m_5 : η μάζα του ξηρού επικαλυμμένου δοκιμίου μέσα στο νερό (g)
- ρ_{sm} : η πυκνότητα του υλικού επικάλυψης στους 25 °C (g/cm³)
- ρ_w : η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία δοκιμής (1 g/cm³)

Εν τέλει, όσον αφορά τα δοκίμια ασφαλτομίγματος με $V_m > 15\%$ (ανοικτού τύπου δηλαδή), γίνεται χρήση της μεθόδου που προϋποθέτει τη μέτρηση των διαστάσεών τους, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα αμερικάνικα πρότυπα. Τέλος, το ζητούμενο μέγεθος (ρ_b) υπολογίζεται σε g/cm³ με βάση τη σχέση:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\left(\frac{\pi * h * d^2}{4}\right)} \quad (2.11)$$

όπου:

- m_1 : η μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)
- h : το πάχος του δοκιμίου (cm)
- d : η διάμετρος του δοκιμίου (cm)

Στο σημείο αυτό, απαραίτητη σημείωση αποτελεί το γεγονός πως η τελευταία μέθοδος, εκείνη που αφορά τη μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων, δύναται να εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών όποια και να είναι η τιμή τους. Για δοκίμια κλειστού τύπου, όμως, είναι πιθανή η υπερεκτίμηση του ποσοστού των κενών.

2.4. Μηχανικές ιδιότητες

Σχετικά, τώρα, με τις μηχανικές ιδιότητες του ασφαλτομίγματος, είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως τα δύο υλικά από τα οποία αποτελείται (άσφαλτος και αδρανή) παρουσιάζουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Το πρώτο υλικό, η άσφαλτος, υπό συνήθεις συνθήκες φόρτισης συμπεριφέρεται ιξωδοελαστικά. Το δεύτερο υλικό, τα αδρανή, συμπεριφέρονται κατά κύριο λόγο ελαστικά. Εν τέλει, η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει έναντι της

ελαστικής των αδρανών, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος να είναι ιξωδοελαστική. Λόγω αυτού, οι μηχανικές του ιδιότητες εξαρτώνται από τα μεγέθη του χρόνου φόρτισης (t) και της θερμοκρασίας (T) (Λοΐζος & Πλατή, 2020).

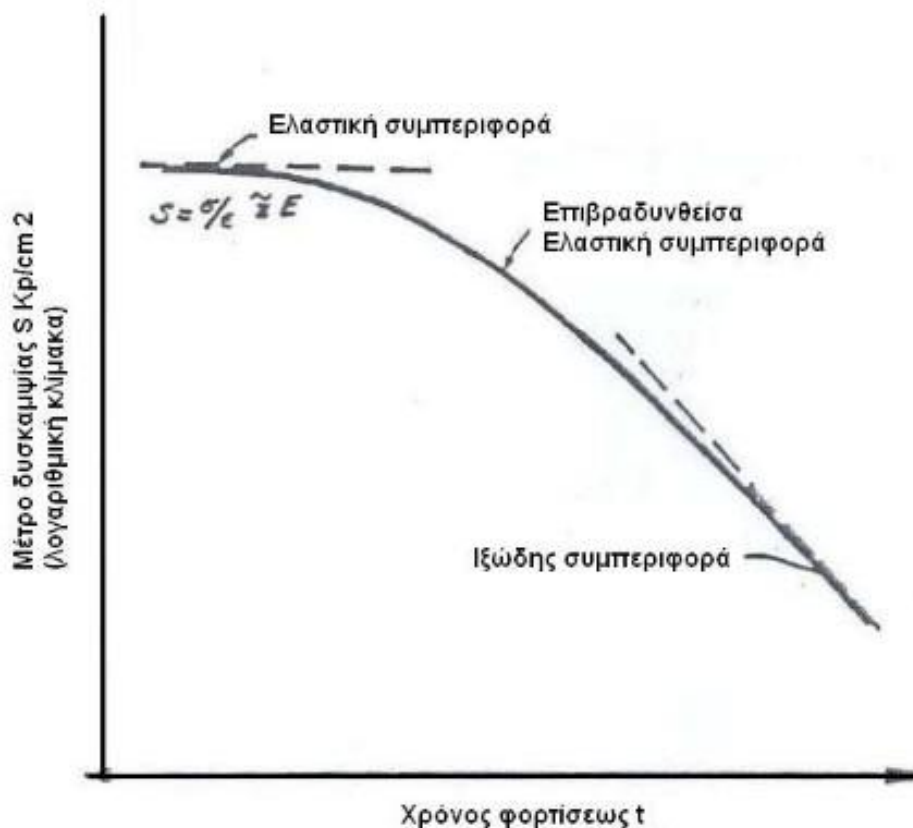
Ο λόγος της τάσης προς την αντίστοιχη παραμόρφωση ονομάζεται λόγος δυσκαμψίας S_m του ασφαλτομίγματος (κατά Van der Poel), το οποίο είναι ένα από τα κύρια μηχανικά του χαρακτηριστικά. Το μόνο πεδίο στο οποίο διαφέρει το παραπάνω μέγεθος (S_m) με το μέτρο ελαστικότητας E , είναι το γεγονός πως το πρώτο εξ αυτών (S_m) εξαρτάται από τα μεγέθη του χρόνου φόρτισης (t) και της θερμοκρασίας (T).

$$S_m = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)_{T,t} \quad (2.12)$$

όπου:

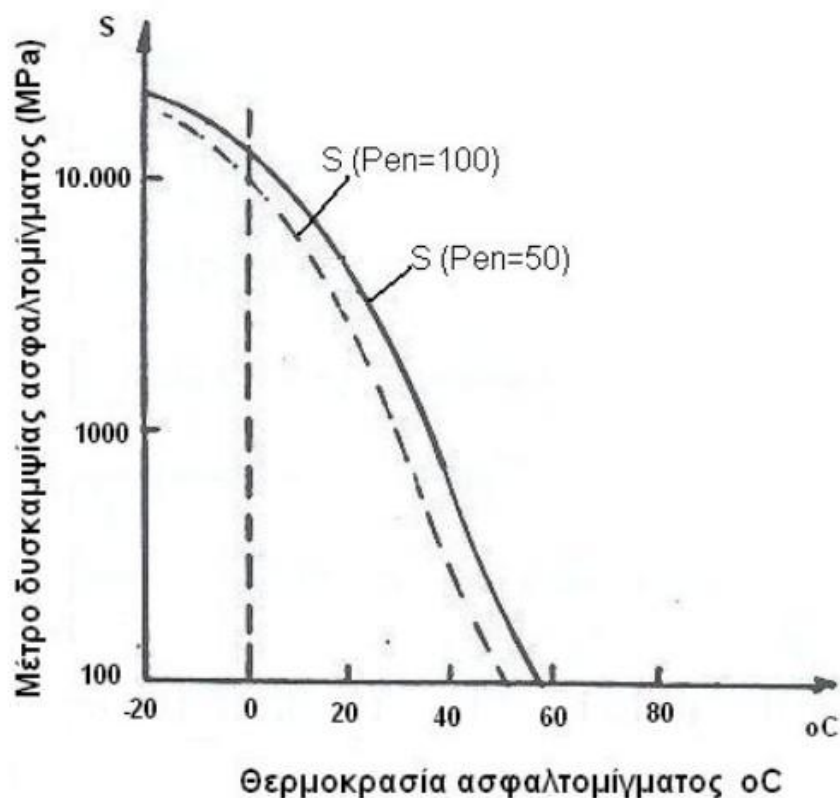
- σ : η επιβαλλόμενη τάση
- ε : η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

Παρακάτω (Εικόνα 2.9 & Εικόνα 2.10) φαίνεται πως επηρεάζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος λόγω των δύο μεγεθών (χρόνος φόρτισης και θερμοκρασία).



Εικόνα 2.9: Σχέση μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας και του χρόνου φόρτισης

Από την Εικόνα 2.9, που παρουσιάζει τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τον χρόνο φόρτισης, παρατηρείται ότι τα δύο αυτά μεγέθη έχουν αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους, με την αύξηση του χρόνου φόρτισης να επιφέρει μείωση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας.



Εικόνα 2.10: Σχέση του μέτρου δυσκαμψίας με τη θερμοκρασία

Από την Εικόνα 2.10, που παρουσιάζει τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας με τη θερμοκρασία, φαίνεται ότι και αυτά είναι αρνητικώς συσχετισμένα. Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, ενώ από τους περίπου 60 °C και άνω το μέτρο δυσκαμψίας μηδενίζεται.

Εν τέλει, οι δύο παραπάνω εικόνες (Εικόνα 2.9 & Εικόνα 2.10) αναδεικνύουν το γεγονός πως η αύξηση του χρόνου φόρτισης ή / και της θερμοκρασίας επιδρούν αρνητικά στο μέτρο δυσκαμψίας, αφού μειώνεται η τιμή του. Στην περίπτωση που οι μεταβολές των τιμών των δύο παραπάνω μεγεθών δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά το στάδιο σχεδιασμού του ασφαλτομίγματος, οι συνέπειες μπορεί να είναι ολέθριες για το οδόστρωμα.

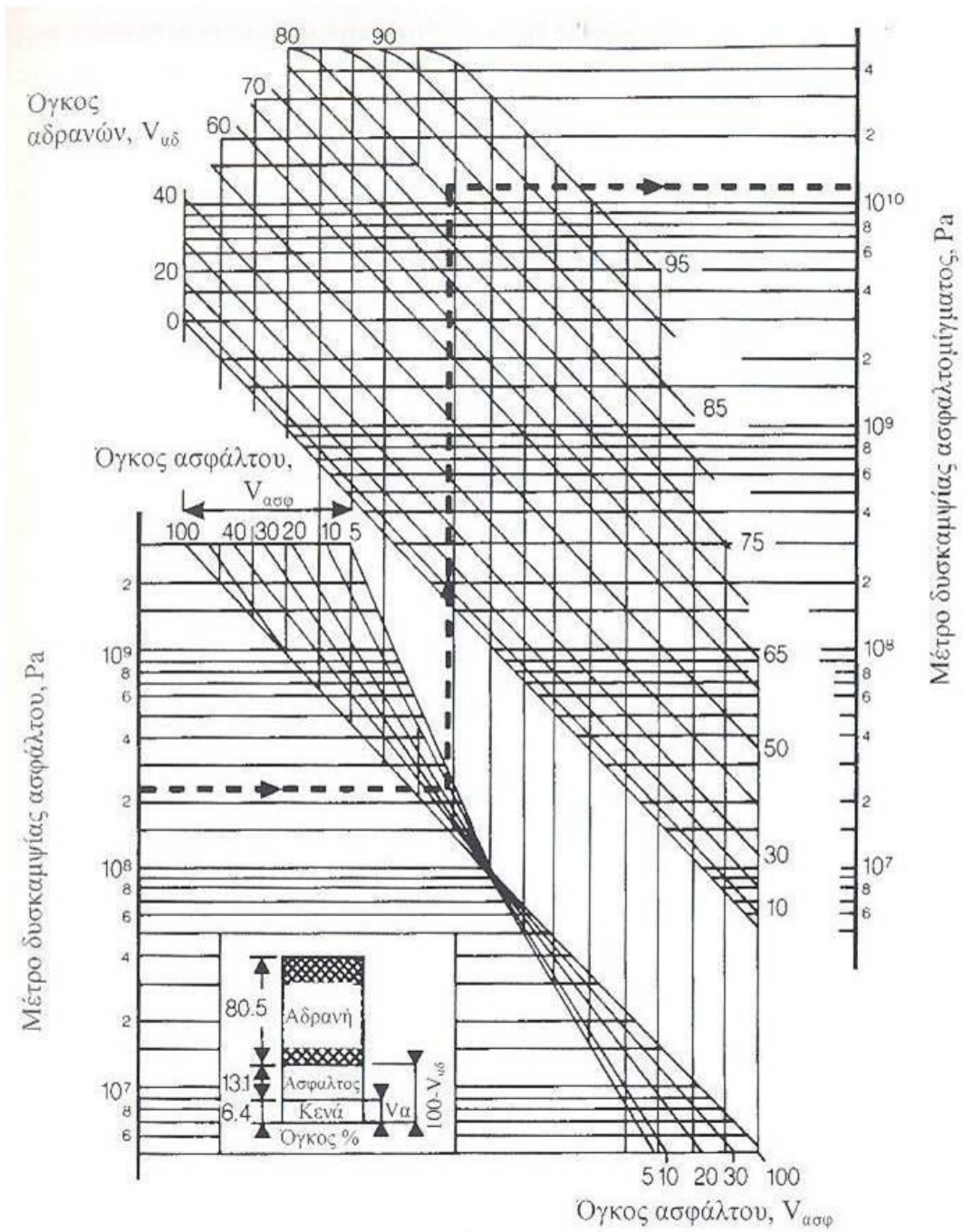
Πέραν των παραπάνω, το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί καθοριστικό μέγεθος στον σύγχρονο και εξελιγμένο αναλυτικό υπολογισμό των οδοστρωμάτων, καθώς δύναται να γίνει χρήση ελαστικών επαλλήλων στρώσεων για την ανάλυση των οδοστρωμάτων (πρακτικά υποκαθιστά

το E). Κάτι τέτοιο, είναι δυνατό στην περίπτωση που υπάρχουν στρώσεις (μία ή περισσότερες) ασφαλτομίγματος, το οποίο ουσιαστικά είναι ιξωδοελαστικό υλικό.

Ο τρόπος εκτίμησης του μέτρου δυσκαμψίας (S_m) του ασφαλτομίγματος μπορεί να είναι είτε άμεσος είτε έμμεσος. Ο άμεσος τρόπος αφορά κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές, ενώ ο έμμεσος πραγματοποιείται με τη χρήση νομογραφημάτων ή αλγορίθμων. Όταν δεν είναι διαθέσιμος ο απαραίτητος εργαστηριακός εξοπλισμός για τον προσδιορισμό του S_m , υπάρχει η δυνατότητα να γίνει εκτίμησή του γνωρίζοντας μόνο το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου και τα ποσοστά περιεκτικότητας των συστατικών του ασφαλτικού μίγματος, ανεξαρτήτως των μεγεθών της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης. Η εν λόγω προσέγγιση αφορά τον έμμεσο προσδιορισμό του S_m και πραγματοποιείται βάσει του ακόλουθου νομογραφήματος (Εικόνα 2.11).

Πρακτικά, η εκτίμηση του S_m είναι δυνατή γνωρίζοντας τα εξής:

- Το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου (S_m) (κατά Van der Poel)
- Το ποσοστό της ασφάλτου κατ' όγκο (V_b)
- Το ποσοστό των αδρανών κατ' όγκο (V_a)
- Το ποσοστό των κενών κατ' όγκο (V_v)



Εικόνα 2.11: Νομογράφημα υπολογισμού του μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικού μίγματος

2.5. Τύποι ασφαλτομιγμάτων

2.5.1. Γενικά

Η κατηγοριοποίηση των ασφαλτομιγμάτων σε διαφορετικούς τύπους μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ο γενικότερος και συνηθέστερος τρόπος να κατηγοριοποιηθούν είναι με βάση την ανάγκη του ασφαλτομίγματος για θέρμανσή του ή μη για τη μεταφορά, την τοποθέτηση και την συμπύκνωσή του. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν τα:

- θερμά ασφαλτομίγματα, για τα οποία είναι απαραίτητη η θέρμανση και η διατήρησή τους σε υψηλές θερμοκρασίες σε όλα τα στάδια της κατασκευής, και αποτελούν τον συνηθέστερο τύπο ασφαλτομιγμάτων,
- ψυχρά ασφαλτομίγματα, τα οποία -σε αντίθεση με τα θερμά- δεν απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες κατά την κατασκευή αλλά παραμένουν σε θερμοκρασία δωματίου σε όλα τα στάδια,
- ζεστά ασφαλτομίγματα, τα οποία αποτελούν κατηγορία ενδιάμεση εκείνων των θερμών και των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων,
- ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομίγματα, τα οποία είναι ένας ειδικός τύπος ασφαλτομιγμάτων, ο οποίος προορίζεται κυρίως για οδοστρώματα τα οποία αναμένεται να δεχθούν υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο βαρέων οχημάτων.

Η επί μέρους κατηγοριοποίηση των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με τη χρήση τους. Ανάλογα με την ασφαλική στρώση για την οποία προορίζεται το ασφαλτόμιγμα εξαρτώνται η σύνθεση του ασφαλτομίγματος, καθώς και οι απαιτήσεις των μηχανικών, και όχι μόνο, χαρακτηριστικών του. Εν τέλει, τα ασφαλτομίγματα χωρίζονται περαιτέρω ως εξής: α) αντιολισθηρή στρώση (ανώτερη στρώση), β) συνδετική στρώση (μεσαία στρώση), και γ) ισοπεδωτική στρώση (κατώτερη στρώση).

Αντιολισθηρή στρώση

Η αντιολισθηρή στρώση αποτελεί τη στρώση κυκλοφορίας, η οποία θα πρέπει να εξασφαλίζει στον χρήστη, ικανοποιητικά επιφανειακά χαρακτηριστικά ομαλότητας, ομοιομορφίας, αντίστασης σε ολίσθηση και επιφανειακής τραχύτητας (ΕΛΟΤ, 2009α).

Επιπλέον, όσον αφορά συγκεκριμένα τα ασφαλτομίγματα της ανώτερης στρώσης (αντιολισθηρή στρώση), ανάλογα ογκομετρικές τους ιδιότητες τα ασφαλτομίγματα αυτά χωρίζονται σε κλειστού τύπου (πυκνής σύνθεσης), ανοιχτού τύπου (ανοιχτής σύνθεσης) και πορώδη (πορώδους σύνθεσης).

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 2.2 και Πίνακας 2.3) παρατίθενται τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών, το ποσοστό κενών και το συνιστώμενο πάχος για την παραπάνω κατηγοριοποίηση. Όσον αφορά τα ασφαλτομίγματα αντιολισθηρής στρώσης με πυκνή σύνθεση, αναφέρεται πως προσδίδουν πολύ ικανοποιητική στεγανότητα, σε αντίθεση με τη μη επαρκή αποστραγγιστική τους ικανότητα. Από την άλλη, εκείνα με ανοικτή σύνθεση, παρέχουν πολύ ικανοποιητική αποστραγγιστική ικανότητα αλλά και επιφανειακή υφή, ενώ μειονέκτημά τους αποτελεί η μειωμένη διάρκεια ζωής τους. Τέλος, τα ασφαλτομίγματα αντιολισθηρής στρώσης με πορώδη σύνθεση, προσδίδουν και αυτά πολύ ικανοποιητική αποστραγγιστική ικανότητα και επιφανειακή υφή, ενώ ταυτοχρόνως παρέχουν και μειωμένα επίπεδα θορύβου, αλλά μειονέκτημά τους αποτελεί η διάρκεια ζωής τους.

Πίνακας 2.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσοστό κενών και συνιστώμενο πάχος στρώσης αντιολισθηρών ταπήτων πυκνής και ανοιχτής σύνθεσης

Μέγεθος Κόσκινου Τετραγωνικής Οπής	Τύπος 1 (Πυκνής Σύνθεσης)		Τύπος 2 (Ανοιχτής Σύνθεσης)	
	Ονομαστικό Μέγεθος Μέγιστου Κόκκου			
	12,5 mm	9,5 mm	12,5 mm	9,5 mm
(ASTM)	Ποσοστό Διερχόμενων από τα Αντίστοιχα Κόσκινα			
19,00 mm (3/4")	100	-	100	-
12,50 mm (1/2")	90 - 100	100	85 - 100	100
9,50 mm (3/8")	-	90 - 100	60 - 90	85 - 100
4,75 mm (No 4)	44 - 74	55 - 85	20 - 50	40 - 70
2,36 mm (No 8)	28 - 58	32 - 67	5 - 25	10 - 35
1,18 mm (No 16)	-	-	3 - 19	5 - 25
0,30 mm (No 50)	5 - 21	7 - 23	0 - 10	0 - 12
0,07 mm (No 200)	2 - 10	2 - 10	-	-
Ποσοστό Κενών %	3 - 5		5 - 15	
Συνιστώμενο Πάχος Στρώσης	3 - 4 cm	2,5 - 3 cm	3 - 4 cm	2,5 - 3 cm

Πίνακας 2.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση, ποσοστό κενών και συνιστώμενο πάχος στρώσης, αντιολισθηρών ταπήτων πορώδους σύνθεσης

Μέγεθος Κόσκινου Τετραγωνικής Οπής (ASTM)	Ονομαστικό Μέγεθος Μέγιστου Κόκκου	
	12,5 mm	9,5 mm
	Ποσοστό Διερχόμενο από τα Αντίστοιχα Κόσκινα	
19,00 mm (3/4")	100	100
12,50 mm (1/2")	90 – 100	100
9,50 mm (3/8")	60 - 100	90 - 100
4,75 mm (No 4)	15 - 40	30 - 50
2,36 mm (No 8)	4 - 12	5 - 15
1,18 mm (No 16)	-	-
0,30 mm (No 50)	-	-
0,07 mm (No 200)	2 - 5	2 - 5
Ποσοστό Κενών %	15 - 25	15 - 25
Συνιστώμενο Πάχος Στρώσης	4 - 5 cm	3 - 4 cm

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά μιας αντιολισθηρής στρώσης είναι τρεις: Η επιλογή κατάλληλου αδρανούς, το οποίο θα πρέπει να είναι αρκετά σκληρό και ανθεκτικό, ώστε να αντέχει και να μη χάνει την επιφανειακή του τραχύτητα, η κοκκομετρία του μίγματος και το ποσοστό της ασφάλτου.

Ισοπεδωτική στρώση

Σχετικά τώρα με την ισοπεδωτική στρώση, αποτελεί ασφαλτική στρώση μεταβλητού πάχους και χρησιμοποιείται με σκοπό είτε να επιτευχθεί η απαιτούμενη επίκλιση στο οδόστρωμα, είτε να εξαλειφθούν τυχόν ανωμαλίες του. Η ισοπεδωτική στρώση εκείνη επί της οποίας πραγματοποιείται η διάστρωση των προβλεπόμενων επικείμενων στρώσεων (ΕΛΟΤ, 2009β). Λόγω του γεγονότος πως δεν υπάρχει άμεση επαφή της στρώσης αυτής με τα ελαστικά των τροχών (όπως συμβαίνει με τη στρώση κυκλοφορίας), δύναται να χρησιμοποιηθούν μαλακότερα αδρανή και μικρότερο ποσοστό ασφάλτου για την κατασκευή της εν λόγω στρώσης. Ωστόσο, απαιτείται ορθός υπολογισμός, αποσκοπώντας να μην ξεπεραστούν τα όρια αντοχής της στρώσης αυτής κατά την καταπόνησής της λόγω επιβολής φορτίων. Ο λόγος

που καθιστά απαραίτητο τον παραπάνω ισχυρισμό, είναι ότι η ισοπεδωτική στρώση αποτελεί κρίσιμη θέση αστοχίας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων εξαιτίας της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα της στρώσης. Τέλος, στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται η συνιστώμενη κοκκομετρική διαβάθμιση για τέτοιες στρώσεις, σύμφωνα με τις ΠΤΠ Α 265 (Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές, 1966).

Πίνακας 2.4: Κοκκομετρική διαβάθμιση και συνιστώμενο πάχος ισοπεδωτικής στρώσης

Μέγεθος Κόσκινου Τετραγωνικής Οπής AASHO : M-92	Κατηγορία και Τύπος Μίγματος			
	Τύπος Α	Τύπος Β	Τύπος Γ	Τύπος Δ
Άνοιγμα Οπής	Διερχόμενο Ποσοστό % (κατά Βάρος) από τα Αντίστοιχα Κόσκινα			
mm (inch)	Διερχόμενο Ποσοστό % (κατά Βάρος) από τα Αντίστοιχα Κόσκινα			
38.1 mm (1 1/2)	100	-	-	-
25,4 mm (1)	78 - 100	100	-	-
19,1 mm (3/4")	-	76 - 100	100	-
12,7 mm (1/2")	56 - 80	64 - 89	74 - 100	100
9,52 mm (3/8")	-	-	60 - 88	74 - 100
4,76 mm (No 4)	35 - 58	38 - 64	42 - 70	50 - 80
2,00 mm (No 10)	23 - 46	25 - 50	28 - 54	32 - 62
0,42 mm (No 40)	11 - 25	12 - 28	14 - 30	16 - 34
0,177 mm (No 80)	6 - 16	7 - 18	8 - 20	10 - 22
0,074 mm (No 200)	3 - 7	4 - 8	4 - 9	4 - 9
Άσφαλτος % του Βάρους των Αδρανών	4,0 - 6,0	4,0 - 6,5	4,5 - 7,0	4,5 - 7,0
Ποσοστό κενών %	3 - 5	5 - 7	7 - 8	7 - 8
Συνιστώμενο Πάχος Στρώσης	7,5 - 10,0 cm	3,75 - 7,5 cm	2,5 - 5,0 cm	-

Σχετικά με το συνιστώμενο πάχος της ισοπεδωτικής στρώσης, αυτό εξαρτάται από τον τύπο του ασφαλτομίγματος και κυμαίνεται από 2,5 cm (Τύπος Γ) έως 10 cm (τύπος Α), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4.

2.5.2. Θερμά ασφαλτομίγματα

Όσον αφορά τα θερμά ασφαλτομίγματα ή αλλιώς «Hot Mix Asphalt» (HMA) είναι απαραίτητο να προηγηθεί θέρμανσή τους για τις διαδικασίες της ανάμιξης, τη μεταφοράς, τη διάστρωσης και της συμπίκνωσής τους. Σημειώνεται πως η άσφαλτος της παρούσας κατηγορίας ασφαλτομιγμάτων είναι δύσκαμπτη υπό συνήθεις θερμοκρασίες (θερμοκρασία δωματίου = 25°C). Λόγω του παραπάνω, όταν μειωθεί η θερμοκρασία του θερμού ασφαλτομίγματος, αυτό αυξάνει τη δυσκαμψία του και είναι ικανό να ανταπεξέλθει στην καταπόνηση λόγω των φορτίων κυκλοφορίας. Επιπλέον, γεγονός αποτελεί ότι ο εν λόγω τύπος ασφαλτομίγματος είναι εκείνος που χρησιμοποιείται συνηθέστερα.

2.5.3. Ψυχρά ασφαλτομίγματα

Από την άλλη πλευρά, τα ψυχρά ασφαλτομίγματα ή αλλιώς «Cold Mix Asphalt» (CMA) έχουν την ιδιότητα να αναμιγνύονται, να διαστρώνονται και να συμπτκνώνονται χωρίς να απαιτείται προηγουμένως να έχουν θερμανθεί. Η ιδιότητα αυτή των ψυχρών ασφαλτομιγμάτων υφίσταται λόγω της χρήσης υγρής ασφάλτου υπό τη μορφή γαλακτώματος, που είναι ρευστή σε θερμοκρασία δωματίου (25°C). Τα γαλακτώματα αυτά είναι μίγματα ασφάλτου, νερού και ειδικών χημικών πρόσθετων, τα οποία επιτρέπουν στην άσφαλτο και το νερό να αναμιγνύονται κατάλληλα με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός σταθερού ρευστού. Στην περίπτωση ανάμιξης του με τα αδρανή, το γαλάκτωμα διαχωρίζεται, πιο συγκεκριμένα η άσφαλτος διαχωρίζεται από το νερό και καλύπτει τα αδρανή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το εν λόγω είδος ασφαλτομιγμάτων είναι πιο οικονομικό από τα θερμά ασφαλτομίγματα, μιας και δεν απαιτείται πολλή ενέργεια για τη θέρμανση του μίγματος κατά την παρασκευή αλλά και τη διάστρωσή του. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν αρκετές δυσκολίες που αφορούν την διαδικασία συμπίκνωσής του και σε σχέση με τα θερμά ασφαλτομίγματα διαθέτει χαμηλότερη ανθεκτικότητα.

2.5.4. Ζεστά ασφαλτομίγματα

Ένας νέος τύπος ασφαλτομίγματος είναι τα ζεστά ασφαλτομίγματα ή «Warm Mix Asphalt» (WMA) και τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται συχνότερα από ό,τι παλιότερα. Στην παρούσα περίπτωση γίνεται χρήση διάφορων μεθόδων με στόχο να μειωθεί σημαντικά η θερμοκρασία παραγωγής του ασφαλτομίγματος κατά 40°C. Οι εν λόγω μέθοδοι αφορούν αρχικά τη χρήση χημικών πρόσθετων για τη μείωση του υψηλού θερμοκρασίας ιξώδους της ασφάλτου, αλλά και τεχνικές σχετικά με την προσθήκη νερού στην άσφαλτο, ώστε αυτή να γίνεται αφρώδης. Επιπλέον, οι ίδιες αφορούν την προσθήκη σκληρής αλλά και μαλακής ασφάλτου σε διάφορα στάδια κατά την παραγωγή του ασφαλτομίγματος.

Η χρήση ζεστών ασφαλτομιγμάτων παρέχει αρκετά και ποικίλα πλεονεκτήματα. Ένα εξ αυτών είναι το χαμηλότερο κόστος, που οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας που θερμαίνεται. Δύο επιπλέον πλεονεκτήματα αποτελούν οι λιγότερες εκπομπές οι οποίες ευθύνονται για τις ηπιότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και η δυνητικώς ικανοποιητική τους συμπεριφορά. Παρ' όλα αυτά, σημαντική σημείωση είναι πως τα ζεστά ασφαλτομίγματα μπορεί να είναι πιο επιρρεπή σε αστοχίες λόγω της υγρασίας.

2.5.5. Ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομίγματα

Τα μίγματα ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης χρησιμοποιούνται ευρέως την τελευταία εικοσαετία στην Ευρώπη αλλά και στην Αμερική. Τα μίγματα της κατηγορίας αυτής είναι ένας ειδικός τύπος ασφαλτομιγμάτων που έχει σχεδιαστεί συγκεκριμένα για οδοστρώματα με υψηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους βαρέων οχημάτων.

Όσον αφορά την κοκκομετρία των εν λόγω μιγμάτων, περιέχονται χονδρόκοκκα ανθεκτικά αδρανή υψηλής ποιότητας μαζί με μεγάλες ποσότητες χυτής ασφάλτου ή «mastic asphalt», που η σύσταση αυτής είναι άσφαλτος υψηλής απόδοσης με ορυκτή παιπάλη και μικρή ποσότητα ινών. Τα ασφαλτομίγματα αυτά, δηλαδή, περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό τους χονδρόκοκκα αδρανή και παιπάλη, αλλά δεν περιέχουν ή περιέχουν πολύ λιγότερα λεπτόκοκκα κλάσματα, εξού και η ονομασία του συγκεκριμένου τύπου ασφαλτομιγμάτων (ασυνεχούς κοκκομετρικής διαβάθμισης). Εν τέλει, η καλά σχεδιασμένη δομή χονδρόκοκκου υλικού σε συνδυασμό με τη χρήση ασφάλτου υψηλής απόδοσης εξασφαλίζει ότι η δομική και λειτουργική συμπεριφορά του τύπου αυτού θα είναι εξαιρετική. Λόγω του παραπάνω, συνηθίζεται να γίνεται χρήση του εν λόγω τύπου μόνο σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων για τις οποίες προβλέπεται υψηλός κυκλοφοριακός φόρτος βαρέων οχημάτων, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η εξαιρετική συμπεριφορά του ασφαλτομιγματος το καθιστά οικονομικά συμφέρουσα τη χρήση του παρά το αρχικό υψηλό κόστος παρασκευής του.

3. Διηλεκτρικές ιδιότητες ασφαλτομιγμάτων

3.1. Ορισμοί

Τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητές του. Το ασφαλτόμιγμα θεωρείται ένα σύνθετο υλικό, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του οποίου επηρεάζονται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των επιμέρους υλικών που συνθέτουν το μίγμα, την αναλογία αυτών των υλικών στο μίγμα και τις μεταξύ τους ηλεκτροχημικές αλληλεπιδράσεις. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες αυτές αφορούν τη διηλεκτρική διαπερατότητα (ϵ), τη μαγνητική διαπερατότητα (μ) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ).

Την τελευταία εικοσαετία, πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη διερεύνηση των παραπάνω ηλεκτρικών ιδιοτήτων και ειδικότερα της διηλεκτρικής διαπερατότητας ή αλλιώς διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης ποιότητας του ασφαλτομίγματος (Al-Qadi et. al., 2011). Επιπλέον, με την ανάλυση των διακυμάνσεων της διηλεκτρικής σταθεράς του εκάστοτε υλικού υπό διερεύνηση, δύναται να εντοπιστούν περιοχές στις οποίες υφίσταται αποκόλληση ή διαχωρισμός του ασφαλτομίγματος.

Η διηλεκτρική διαπερατότητα περιγράφει την αλληλεπίδραση του υλικού με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφει την ικανότητα του υπό διερεύνηση υλικού να αποθηκεύει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και εν συνεχεία να επιτρέψει τη διέλευσή της σε περίπτωση που βρίσκεται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η ιδιότητα αυτή πολλές φορές παρουσιάζεται σε συνάρτηση με τη διηλεκτρική διαπερατότητα του αέρα και τότε ονομάζεται σχετική διηλεκτρική διαπερατότητα. Η διηλεκτρική διαπερατότητα είναι μέγεθος μιγαδικό, με αποτέλεσμα να συνηθίζεται ο όρος σχετική μιγαδική διηλεκτρική διαπερατότητα. Το μέγεθος αυτό ισούται με τη μιγαδική διηλεκτρική διαπερατότητα του υλικού όταν αυτή διαιρεθεί με τη μιγαδική διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού, όπως διαφαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 = \epsilon_r' - j * \epsilon_r'' \quad (3.1)$$

όπου:

- ϵ : η διηλεκτρική διαπερατότητα του εξεταζόμενου υλικού
- ϵ_0 : η διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού που ισούται περίπου με $8,854 \times 10^{-12} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$

- ϵ_r' : το πραγματικό μέρος του μεγέθους, πρόκειται για ένδειξη του ποσού της ενέργειας που δύναται να αποθηκεύσει το υλικό από το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Στο κενό το ϵ_r' ισούται με την μονάδα ($\epsilon_r' = 1$). Για τα περισσότερα στερεά και υγρά λαμβάνει τιμές από 1 έως 10 ($1 < \epsilon_r' < 10$). Το πραγματικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής διαπερατότητας ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά ή διηλεκτρική σταθερά.
- ϵ_r'' : το φανταστικό μέρος του μεγέθους, περιγράφει τις απώλειες ενέργειας του υλικού και πρόκειται για ένδειξη του πόσο πολικά χαλαρό θα είναι το υλικό ως προς την μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Οι απώλειες αυτές είναι αποτέλεσμα αλλαγής της πολικότητας των στοιχειωδών τμημάτων του διηλεκτρικού υλικού, οι οποίες οφείλονται στην αλλαγή της φοράς του πεδίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ταλαντώσεων, οι οποίες λόγω τριβής παράγουν θερμότητα που εν τέλει χάνεται. Με τον όρο χαλαρό, σε μία συχνότητα, αποκαλείται ένα υλικό που ο βασικός μηχανισμός πόλωσης μπορεί να ακολουθεί τις μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου.

Επιπρόσθετα, οι απώλειες ενέργειας είναι αμελητέες όταν η αγωγιμότητα του υλικού είναι πολύ χαμηλή. Κάτι τέτοιο συμβαίνει στα περισσότερα αδρανή, με αποτέλεσμα το φανταστικό μέρος της Σχέσης (3.1) αποτελεί ποσότητα πολύ μικρή σε πρακτικό επίπεδο. Λόγω του παραπάνω, η διηλεκτρική σταθερά (το πραγματικό μέρος δηλαδή της Σχέσης (3.1) αποτελεί τον κύριο παράγοντα και εν τέλει ισχύει προσεγγιστικά η παρακάτω σχέση:

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

Η μετρούμενη τιμή της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής διαπερατότητας θα ισούται με το πραγματικό μέρος του μιγαδικού μεγέθους, δηλαδή τη διηλεκτρική σταθερά, εφόσον παραλείπεται το φανταστικό μέρος.

3.2. Διηλεκτρικές σταθερές ασφαλτομιγμάτων

Το ασφαλτόμιγμα, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2. , αποτελείται κυρίως από τρία συστατικά, τα οποία είναι η άσφαλτος, τα αδρανή και ο αέρας. Υπάρχει, επίσης, η πιθανότητα το μίγμα να περιέχει και νερό, πάγο, κολλοειδή σωματίδια αργίλου, άλατα και άλλα οργανικά συστατικά. Καθένα από τα παραπάνω υλικά έχει διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες και συνεπώς διαφορετική διηλεκτρική σταθερά. Έτσι, η διηλεκτρική σταθερά του ξηρού μίγματος εξαρτάται από τις επιμέρους τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς του κάθε υλικού, αλλά και από

τις επιμέρους περιεκτικότητες κατ' όγκο και τη γεωμετρία κάθε συστατικού του μίγματος. Σημειώνεται πως η έκθεσή του σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζει την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς, λόγω των προσμίξεων αυτού και κυρίως του νερού.

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς της ασφάλτου κυμαίνεται συνήθως από 2.6 έως 2.8, παρατήρηση που προέκυψε βάσει μετρήσεων των οποίων η ανάλυση έδειξε οι διαφορές στις διηλεκτρικές τιμές διαφορετικών τύπων ασφάλτου ή για ασφάλτους διαφορετικού ιξώδους δεν είναι σημαντικές. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί πως κατά τη γήρανση της ασφάλτου δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η διηλεκτρική της σταθερά (Pellinen et al., 2015).

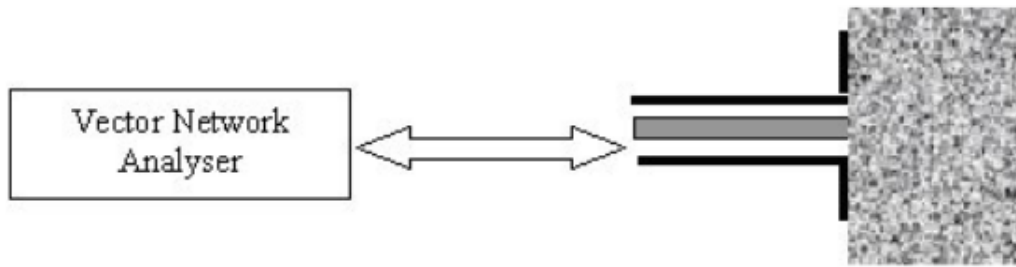
Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για το έτερο υλικό των ασφαλτομιγμάτων, τα αδρανή, εξαρτάται από την προέλευσή τους και σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, μπορεί να κυμαίνεται από 4,5 έως 6,5 για ξηρά αδρανή (Evans et al., 2006), ή να φτάνει κοντά στο 9 για αδρανή με αυξημένη περιεκτικότητα άνθρακα (το οποίο είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού), όπως τα ασβεστολιθικά.

Συνεπώς, εφόσον η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα ισούται με την μονάδα ($\epsilon_r = 1$), για το ασφαλτόμιγμα θα ισχύει πως η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του εξαρτάται από τις κατ' όγκο περιεκτικότητες των συστατικών του (άσφαλτος, αδρανή, αέρας), οπότε και θα είναι μια συνάρτηση των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς των επιμέρους υλικών του. Βάσει σχετικών παρατηρήσεων, το ασφαλτόμιγμα λαμβάνει συνήθως τιμές μεταξύ 3.5 και 5.5 (Saarenketo, 2006).

3.3. Προσδιορισμός

3.3.1. Μετρήσεις στο εργαστήριο

Στο εργαστήριο η τιμή διηλεκτρικής σταθεράς μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορους τρόπους. Έναν εξ αυτών αποτελεί η μέθοδος του ομοαξονικού ηλεκτροδίου ή «Open - Ended Coaxial Probe» (Εικόνα 3.1), η οποία είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος (Λοϊζος & Πλατή, 2011).



Εικόνα 3.1: Ομοαξονικό ηλεκτρόδιο για την μέτρηση της τιμής των διηλεκτρικών ιδιοτήτων

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε πολλές συσκευές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Percometer, το οποίο αποτελεί μία ευέλικτη εύχρηστη, ακριβή και μη καταστρεπτική συσκευή μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας αλλά και της θερμοκρασίας. Παρέχει τη δυνατότητα μετρήσεων σε ποικιλία επιφανειών με χρήση ειδικών πρόσθετων εξαρτημάτων – ανιχνευτών ή «probe». Η χρήση των ανιχνευτών βασίζεται στο κατάλληλο σχήμα τους, ώστε να μπορούν να εφάπτονται ικανοποιητικά στη ζητούμενη επιφάνεια. Σημειώνεται πως κάθε ανιχνευτής (probe) είναι αυτορρυθμιζόμενος, αλλά μετά τη σύνδεσή του με το Percometer απαιτείται βαθμονόμηση πριν την έναρξη των μετρήσεων. Η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μέτρηση σε ανοιχτό κύκλωμα, δηλαδή στον αέρα, ή σε κλειστό κύκλωμα, δηλαδή σε μεταλλικό υλικό ή σε απιονισμένο νερό. Παρακάτω (Εικόνα 3.2 & Εικόνα 3.3) φαίνεται η διάταξη του Percometer και μερικοί τύποι ανιχνευτών.



Εικόνα 3.2: Διάταξη του Percometer



Εικόνα 3.3: Μερικά είδη ανιχνευτών Percometer

Οι προαναφερόμενοι ανιχνευτές έχουν την ιδιότητα να διοχετεύουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο υπό εξέταση δοκίμιο. Μετρίεται η μεταβολή χωρητικότητας (ΔC) του υλικού μέσω της συσχέτισης του συντελεστή σύνθετης ανάκλασης, και έπειτα προσδιορίζεται η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς για το εκάστοτε δοκίμιο. Η διείσδυση της διοχετευόμενης ενέργειας, αλλά και το βάθος μέτρησης, περιορίζονται κοντά στην επιφάνεια (Λοϊζος & Πλατή, 2007). Σημειώνεται πως η συχνότητα λειτουργίας του Percometer είναι συνήθως τα 50MHz.

Επιπλέον, η συσκευή Percometer παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων μέτρησης στην κεντρική μονάδα του, και εν συνεχεία τη μεταφορά τους σε συνδεδεμένο ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω χρήση και ανάλυση, π.χ. σε περιβάλλον λογιστικών φύλλων, βάσεων δεδομένων, ή στατιστικών πακέτων.

Το συγκεκριμένο όργανο, παρά τα πλεονεκτήματά του, παρουσιάζει δύο προβλήματα που επηρεάζουν την ακρίβεια των εκτελούμενων μετρήσεων: α) έχει μικρό βάθος διείσδυσης της τάξεως των 3 – 5 cm και β) υποεκτιμά το μέτρο της διηλεκτρικής σταθεράς σε δοκίμια τραχείας επιφάνειας, καθώς εισέρχεται αέρας στα επιφανειακά κενά του δοκιμίου.

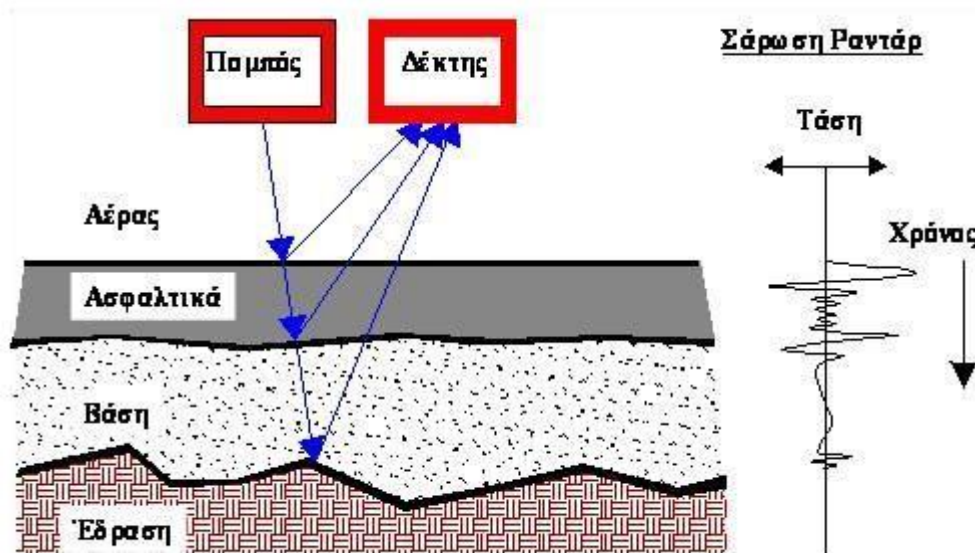
3.3.2. Μετρήσεις στο πεδίο

Εκτός από τον εργαστηριακό προσδιορισμό είναι δυνατός και ο επί τόπου προσδιορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς, ο οποίος πραγματοποιείται με τη χρήση γεωφυσικών συστημάτων, όπως το GPR ή “Ground Penetrating Radar” (Εικόνα 3.4). Οι δοκιμές είναι μη καταστρεπτικές (όπως και του Percometer) και βάσει αυτών πραγματοποιείται διερεύνηση του υπεδάφους και της δομής του οδοστρώματος αποτυπώνοντας τις στρωματογραφίες του (Saarenketo & Scullion, 1999). Η εφαρμογή του GPR στον συγκεκριμένο κλάδο άρχισε κατά τη δεκαετία του 1970 με την ακρίβεια του εν λόγω οργάνου να βελτιώνεται αισθητά έως και σήμερα (Pellinen et al., 2016).



Εικόνα 3.4: Γεωφυσικό σύστημα GPR

Η συσκευή λειτουργεί όπως τα συνηθισμένα ραντάρ (μετεωρολογίας, στρατιωτικά, πλοήγησης) εκπέμποντας σειρά παλμών ραδιοκυμάτων εξαιρετικά υψηλής συχνότητας, μέσω ενός κυματοδηγού ή μιας κεραίας (Εικόνα 3.5). Τα εκπεμπόμενα ραδιοκύματα ανακλώνται στις διαχωριστικές επιφάνειες του ασφαλτομίγματος ή των στρωμάτων του οδοστρώματος από διαφορετικά υλικά, λόγω των διαφορετικών ηλεκτρικοφυσικών τους χαρακτηριστικών (Martinez & Byrnes, 2002).



Εικόνα 3.5: Αρχή λειτουργίας των γεωφυσικών συστημάτων GPR

Η κεραία συλλαμβάνει τα ανακλώμενα σήματα που επιστρέφουν και τα αποθηκεύει στην μονάδα ψηφιακού ελέγχου, όπου συσχετίζονται με τα εκπεμπόμενα σήματα. Το βάθος της εκάστοτε στρώσης καθορίζεται βάσει του χρόνου που χρειάζεται για να επιστρέψει το

ανακλώμενο σήμα στην κεραία. Ο χρόνος αυτός, όμως, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του κάθε υλικού, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι συνάρτηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς. Όσο μεγαλύτερη είναι τιμή της, τόσο λιγότερο χρόνο χρειάζεται το σήμα να για επιστρέψει στην κεραία. Η παρακάτω σχέση προσδιορίζει τη σχετική διηλεκτρική σταθεράς ενός υλικού:

$$\varepsilon = \left(\frac{C}{v}\right)^2 \quad (3.3)$$

όπου:

- ε : η σχετική διηλεκτρική σταθερά
- C : η ταχύτητα του φωτός (m/sec)
- v : η ταχύτητα του μεταδιδόμενου στο υλικό ηλεκτρομαγνητικού κύματος (m/sec)

Η παρούσα μέθοδος χρησιμοποιεί συνήθως εύρος συχνοτήτων μεταξύ 10 MHz και 2.5 GHz (Porubiaková & Komačka, 2015). Οι υψηλές συχνότητες χρησιμοποιούνται, διότι με την αύξηση της συχνότητας προκύπτουν καλύτερες αναλύσεις των μετρήσεων (Baltusaitis et al., 2020). Βέβαια, το μειονέκτημα των υψηλών συχνοτήτων είναι ότι δεν είναι αρκετά διεισδυτικές (το ίδιο πρόβλημα έχουν και οι κεραίες της κινητής τηλεφωνίας στα 5GHz που το σήμα τους δεν διεισδύει τόσο εύκολα στα κτήρια, όσο από κεραίες στα 700 MHz), άρα για μετρήσεις σε μεγαλύτερο βάθος χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες με τα αποτελέσματα που προκύπτουν να έχουν μικρότερη ανάλυση (Mara Nord Project, 2011).

3.4. Παράγοντες επίδρασης στον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς

Τον προσδιορισμό της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς επηρεάζουν ορισμένοι εξωγενείς παράγοντες, στους οποίους πρέπει να δοθεί προσοχή. Η μεταβολή της συχνότητας ή/και της θερμοκρασίας, καθώς και η παρουσία νερού αποτελούν μερικούς τέτοιους παράγοντες.

Η επίδραση του νερού δε θα μπορούσε να παραλειφθεί, μιας που αποτελεί έναν αστάθμητο παράγοντα, αφού αυτό έχει την ικανότητα να διεισδύει στα εκάστοτε κενά αέρα και να μεταφέρει μαζί του πολλά και ποικίλα συστατικά. Λόγω του παραπάνω, δύναται να επηρεαστεί αρκετά η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς (Berthalot et al., 2010). Το νερό με την είσοδό του στο ασφατόμιγμα εισέρχεται σε θέσεις των κενών που προηγουμένως καταλαμβάνονταν από αέρα. Συνέπεια του παραπάνω αποτελεί η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του μίγματος, καθώς η διηλεκτρική σταθερά του νερού είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη του αέρα. Εν

τέλει, στην περίπτωση ύπαρξης νερού, η μετρούμενη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς θα μπορούσε να μην αποδώσει ακριβές ή το ακριβέστερο αποτέλεσμα.

Η ανάλυση πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί διεθνώς σε δοκίμια ασφαλτομίγματος, έδειξε πως τυχόν μεταβολές της θερμοκρασίας επιφέρουν και μεταβολή στην διηλεκτρική σταθερά του ασφαλτομίγματος. Η εν λόγω μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς, όμως, ήταν σημαντικού μεγέθους μόνο για μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, που δε συνηθίζεται να παρατηρούνται ανάλογές τους λόγω των καιρικών συνθηκών. Εξαιτίας αυτού, η επιρροή της θερμοκρασίας στο μέγεθος της διηλεκτρικής σταθεράς δε λαμβάνεται υπόψιν στην παρούσα εργασία. Όσον αφορά τώρα τη συχνότητα, από δοκιμές που έγιναν προέκυψε ότι οι μεταβολές για να επιφέρουν αξιοσημείωτες διαφορές στην διηλεκτρική σταθερά θα έπρεπε να είναι πολύ μεγάλες. Η διαφοροποίηση της διηλεκτρικής σταθεράς λόγω μεταβολής της συχνότητας είναι πιο έντονη από εκείνη που προκαλεί η μεταβολή της θερμοκρασίας, αλλά και πάλι η διαφοροποίηση αυτή παραμένει μικρή και εν τέλει δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς σε συνήθεις συνθήκες. Βέβαια, σε ειδικές περιπτώσεις με τη δυνατότητα εκτενούς διερεύνησης, ο παράγοντας της συχνότητας θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν (Wallia et al., 2015). Τελικά η επίδραση τόσο της συχνότητας όσο και της θερμοκρασίας στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς δεν θα ληφθούν υπόψιν στην παρούσα εργασία.

3.5. Συσχέτιση κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς ασφαλτομίγματος

Η διηλεκτρική σταθερά των υλικών των θερμών ασφαλτομιγμάτων (HMA) έχει αποδειχθεί από έρευνες πως συνδέεται άμεσα με διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη του ασφαλτομίγματος και μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση αυτών των μεγεθών (π.χ. του ποσοστού κενών αέρα, του μέτρου δυσκαμψίας, τους πάχους, κλπ.) (Chen et al., 2014). Η ανάπτυξη των μη καταστρεπτικών μεθόδων (NDT) έχει καταστήσει τις μετρήσεις διηλεκτρικών σταθερών, τόσο επί τόπου όσο και στο εργαστήριο, πολύ σημαντικές για τον σχεδιασμό αλλά και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων, καθώς είναι ικανές να μας παράσχουν πλήθος αξιόπιστων δεδομένων (Λοϊζος & Πλατή, 2013). Αποτέλεσμα αυτού, είναι όλο και περισσότεροι ερευνητές ανά τον κόσμο να στρέφουν την προσοχή τους στη διερεύνηση σχέσεων συσχέτισης μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών και άλλων χαρακτηριστικών του οδοστρώματος –με έμφαση όμως στη συσχέτιση των διηλεκτρικών σταθερών με τα κενά αέρα-.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε σχέσεις συσχέτισης κενών και διηλεκτρικής σταθεράς από τη διεθνή βιβλιογραφία βάσει αντίστοιχων ερευνών/μελετών. Οι εν λόγω σχέσεις

παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά, από την παλαιότερη προς τη νεότερη. Στοιχεία ενδιαφέροντος της κάθε μελέτης αποτελούν:

- η σχέση συσχέτισης,
- ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ,
- το εύρος τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r),
- το εύρος τιμών ποσοστού κενών (V_m),
- το πλήθος των μιγμάτων,
- ο τρόπος μέτρησης της διηλεκτρικής σταθεράς και
- τα συμπεράσματα.

Οι Saarenketo & Scullion το 1999, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με GPR σε 85 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 272.93 * e^{(-1.301 * \epsilon_r)} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.722 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 2.9 – 5.0, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.4 – 6.2 (Saarenketo & Scullion, 1999).

Η αξιοποίηση των μετρήσεων του GPR μπορούν να επιφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν όλο το φάσμα των πιθανών παραμέτρων που επηρεάζουν τις εν λόγω μετρήσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες, παρόλο που αντίστοιχες μελέτες έχουν αποδώσει ικανοποιητικά και κατά περίπτωση αξιοποιήσιμα μοντέλα συσχέτισης διαφόρων ιδιοτήτων του οδοστρώματος, όπως η συσχέτιση διηλεκτρικών σταθερών με τα κενά αέρα, έχουν παρατηρηθεί δυστυχώς πολλαπλές αστοχίες προβλέψεων σε διάφορα μέρη του κόσμου και σε διαφορετικές περιπτώσεις. Για το φαινόμενο αυτό, ευθύνονται εν μέρει οι προσπάθειες των μελετητών να υιοθετήσουν την νέα αυτή πολλά υποσχόμενη μέθοδο (GPR) για την παραγωγή αξιόπιστων μοντέλων, αλλά και η μη επαρκής τεχνογνωσία γύρω από το συγκεκριμένο αντικείμενο. Θα πρέπει να δοθεί βάση στην καλύτερη κατανόηση του φάσματος των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μετρήσεις, όπως η υγρασία, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και οι τεχνικές των μετρήσεων.

Οι Λοϊζος & Πλατή το 2011, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με Percometer σε 18 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 712.230 * e^{(-0.813 * \epsilon_r)} \quad (3.5)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.92 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 3.6 – 5.7, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.7 – 22.4 (Λοϊζος, & Πλατή, 2011).

Σημείο ενδιαφέροντος της εν λόγω μελέτης είναι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των διηλεκτρικών σταθερών των ασφαλτομιγμάτων και των κενών αέρα, αλλά και του μέτρου δυσκαμψίας, τα οποία αποτελούν όλα παράγοντες μείζονος σημασίας για το οδόστρωμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σε μια προσπάθεια για κατάστρωση απλών σχέσεων συσχέτισης, με στόχο την ταχεία και εύκολη αξιοποίησή τους έναντι περίπλοκων ισχυουσών τεχνικών σύμφωνα των συμβατικών προτύπων. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά, αλλά επισημαίνεται πως η αξιοπιστία τους θα μπορούσε να βελτιωθεί αν λαμβανόταν υπόψιν το είδος αδρανών του ασφαλτικού μίγματος. Επιπλέον, προτείνεται η αξιοποίηση μετρήσεων από δοκίμια καταστρεπτικών δοκιμών για τη βαθμονόμηση των μοντέλων.

Οι Hoegh et al.. το 2015, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με GPR σε 3 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 136.01 * e^{-0.536 * \epsilon_r} \quad (3.6)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.992 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.6 – 5.6, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 6.7 – 12.0 (Hoegh et al., 2015).

Επισημαίνεται η σημασία του εύρους κάλυψης των μετρήσεων τόσο στον διαμήκη όσο και στον εγκάρσιο άξονα της οδού. Όσον αφορά τον διαμήκη, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μεγάλο τμήμα της οδού, τέτοιο ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό. Κάτι τέτοιο συνηθίζεται στις περισσότερες σύγχρονες μελέτες, αλλά συνήθως αμελείται η σημασία του εύρους στον εγκάρσιο άξονα. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη αξιοποιήθηκε σύστημα 21 πομπω-δεκτών GPR, συνδεδεμένοι σε σειρά εγκάρσια της οδού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας ψηφιακός δισδιάστατος χάρτης μετρήσεων σε αντίθεση με τις μονοδιάστατες συμβατικές μετρήσεις κατά μήκος της οδού. Η εν λόγω τεχνική επιτρέπει να ανιχνεύονται ταχέως πιθανές

τοπικές αστοχίες των μετρήσεων ή η τοπική διαφοροποίηση σημαντικών παραμέτρων για την αξιοπιστία των μετρήσεων, όπως η ύπαρξη υγρασίας ή η ποικιλία στο ποσοστό συμπίκνωσης του οδοστρώματος. Σημειώνεται για άλλη μία φορά, πόσο σημαντική είναι η λήψη πυρήνων για τη βαθμονόμηση των μοντέλων, με τη διαφορά τώρα ότι με τη βοήθεια του δισδιάστατου χάρτη δύναται να γίνει στρατηγική επιλογή των θέσεων του οδοστρώματος για τη λήψη πυρήνων.

Οι Hoegh et al. το 2018, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με GPR σε 32 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 8.491 * e^{(-0.923 * \epsilon_r)} \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.86 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.9 – 5.7, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 5.6 – 10.2 (Hoegh et al., 2018).

Η εν λόγω μελέτη εστίασε στη βελτιστοποίηση των σύγχρονων μοντέλων, έναντι των συμβατικών/εμπειρικών, όσων αφορά την πρόβλεψη κενών αέρα για μικρές τιμές διηλεκτρικών σταθερών. Τα συμβατικά/εμπειρικά μοντέλα, ενώ αποφέρουν συνήθως αξιόλογες προβλέψεις για τα κενά αέρα στο φάσμα των συνήθων τιμών διηλεκτρικών σταθερών, παρουσιάζουν υψηλά σφάλματα για μικρές τιμές των διηλεκτρικών σταθερών. Για τον λόγο αυτό τα μοντέλα έχουν βαθμονομηθεί με κατάλληλο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα συγκεκριμένα σφάλματα. Για να επιτευχθεί αυτή η βαθμονόμηση λήφθηκαν πολλαπλοί πυρήνες σε διαφορετικές θέσεις του οδοστρώματος και σημειώθηκε για άλλη μια φορά η σημασία της πυρηνοληψίας. Εν τέλει, παρατηρήθηκε ότι το τροποποιημένο και βαθμονομημένο μοντέλο αποδίδει πολύ ικανοποιητικές προβλέψεις για όλο το εύρος του έργου, εφόσον πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις.

Οι Wilson et al. το 2019, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με GPR (και συγκεκριμένα Rolling Density Meter – RDM) σε 10 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 712.230 * e^{(-0.813 * \epsilon_r)} \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.706 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 5.3 – 8.1, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 5.5 – 8.1 (Wilson et al., 2019).

Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ποικίλουν αναλόγως των υλικών του εξεταζόμενου οδικού τμήματος και της ημέρας των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά κατόπιν προσαρμογής τους βάσει δύο λήψεων πυρήνων. Η προσαρμογή των αποτελεσμάτων βάσει ενός πυρήνα αποδείχθηκε εν μέρει ικανοποιητική, αλλά με ισχυρή σύσταση για λήψη δεύτερου πυρήνα για την μείωση των σφαλμάτων λόγω τοπικών ατελειών ή/και διαφοροποιήσεων στο εκάστοτε οδικό κομμάτι της πυρηνοληψίας. Η κατάστρωση των τελικών μοντέλων εξαρτάται άμεσα από τα υλικά της οδοστρώσας, και για αυτό συστήνεται η αξιοποίηση των εν λόγω μοντέλων μόνο σε περιπτώσεις αντίστοιχου εύρους διηλεκτρικών σταθερών. Σε διαφορετικές ημέρες μετρήσεων, αλλά και σε διαφορετικό εξεταζόμενο οδικό τμήμα, η συσχέτιση μεταξύ διηλεκτρικών σταθερών και κενών αέρα ποικίλει λόγω διαφόρων παραγόντων, με κυριότερο αυτών τις τυχόν μικροδιαφορές στο ασφαλτικό μίγμα κατά την οδοστρώσας.

Οι Hoegh et al. το 2019, αναλύοντας τα αποτελέσματα μετρήσεων με GPR σε 8 μίγματα κατέληξαν στη σχέση:

$$V_m = 551.7 * e^{(-1.95 * \epsilon_r)} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε 0.98 και το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.4 – 4.8, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 6.1 – 11.2 (Hoegh et al., 2019).

Πολλές φορές οι συσχετίσεις μεταξύ διηλεκτρικών σταθερών και κενών αέρα βασίζονται στη λήψη πυρήνων, είτε εξ ολοκλήρου -σπανιότερα- είτε για λόγους βαθμονόμησης -συχνότερα-. Δυστυχώς, στην πράξη, οι σημειακές μετρήσεις (από τη λήψη πυρήνων) αφορούν έως το 1% του οδοστρώματος, οπότε δε συστήνεται για τα αποτελέσματά τους να χρησιμοποιούνται αυτούσια για την κατάστρωση μοντέλων, αλλά για τη βαθμονόμηση μεγάλου πλήθους μετρήσεων -συνήθως εκείνες το GPR-. Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να εξαλείψει την ανάγκη για λήψη πυρήνων, μέσω της τεχνητής συμπύκνωσης στο εργαστήριο για την προσομοίωση των συνθηκών στο οδόστρωμα μετά τη φάση της οδοστρώσας και της συμπύκνωσης. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω της συσκευής Supergrave Gyrotory Compactor - SGC. Μίγματα ασφάλτου συμπυκνώνονται εργαστηριακά και αξιοποιούνται σε συνδυασμό με τις μετρήσεις πεδίου -μέσω GPR-, ώστε να παραχθούν σχέσεις συσχέτισης μεταξύ διηλεκτρικών σταθερών και κενών αέρα. Η μέθοδος αυτή αποδείχθηκε πως είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία τροφοδοτούν ελπίδες για την εξάλειψη ή έστω ελαχιστοποίηση της ανάγκης για καταστρεπτικές δοκιμές.

4. Πειραματική διαδικασία

4.1. Περιγραφή δεδομένων

4.1.1. Χαρακτηριστικά ασφαλτομιγμάτων

Στα πλαίσια της διερεύνησης της συσχέτισης των υπό εξέταση χαρακτηριστικών μεγεθών του ασφαλτομίγματος (της διηλεκτρικής σταθεράς και του ποσοστού των κενών), αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα μετρήσεων από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. για 60 δοκίμια Marshall. Συγκεκριμένα, επρόκειτο για 36 δοκίμια ασφαλτομίγματος ισοπεδωτικής στρώσης και 24 δοκίμια ασφαλτομίγματος αντιολισθηρής στρώσης. Υπήρξε ομαδοποίηση με βάση τα διαφορετικά ποσοστά ασφάλτου και των διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων των μιγμάτων. Συγκεκριμένα, τόσο για τα δοκίμια της αντιολισθηρής στρώσης όσο και της ισοπεδωτικής, είχε πραγματοποιηθεί ισόποσος διαχωρισμός σε τρεις ομάδες βάσει του ποσοστού ασφάλτου (I, II & III). Η πρώτη ομάδα περιείχε ποσοστό ασφάλτου ίσο με 4%, η δεύτερη ίσο 4,5% και η τρίτη ίσο με 5%. Όσον αφορά την ομαδοποίηση βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης του μίγματος, η αντιολισθηρή στρώση είχε χωριστεί σε δύο μίγματα (A & B), ενώ η ισοπεδωτική σε τρία (A, B & Γ). Τα δοκίμια αυτά είχαν υποβληθεί σε εργαστηριακές δοκιμές, για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής σταθεράς και του ποσοστού των κενών, με χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού και πειραματικών διατάξεων.

Τα δοκίμια είχαν κωδικοποιηθεί βάσει των παραπάνω ομαδοποιήσεων και πιο συγκεκριμένα η ονομασία τους είχε την εξής μορφή:

$$\text{Στρώση_Μίγμα_Ποσοστό-Ασφάλτου_Αριθμός-Δοκιμίου ή } \alpha_β_γ_δ \quad (4.1)$$

όπου:

- α : είδος στρώσης ανάμεσα σε
 - ANTIO: για αντιολισθηρή
 - ΙΣ: για ισοπεδωτική
- β : μίγμα ανάμεσα σε
 - A ή B για την αντιολισθηρή στρώση
 - A ή B ή Γ για την ισοπεδωτική
- γ : ποσοστό ασφάλτου ανάμεσα σε

- I: για 4%
- II: για 4,5%
- III: για 5%
- δ: αριθμός δοκιμίου ανάμεσα σε
 - (1), (2), (3), (4)

Αντιολισθηρή στρώση

Ακολουθεί η κωδική ονομασία των δοκιμίων της αντιολισθηρής στρώσης βάσει των παραπάνω κανόνων ομαδοποίησης (Πίνακας 4.1), οι κοκκομετρικές αναλύσεις του κάθε μίγματος (Πίνακας 4.2 & Εικόνα 4.1 για το μίγμα Α και Πίνακας 4.3 & Εικόνα 4.2 για το μίγμα Β) και η σύγκριση των κοκκομετρικών αναλύσεων για τα μίγματα Α & Β της αντιολισθηρής στρώσης (Εικόνα 4.3).

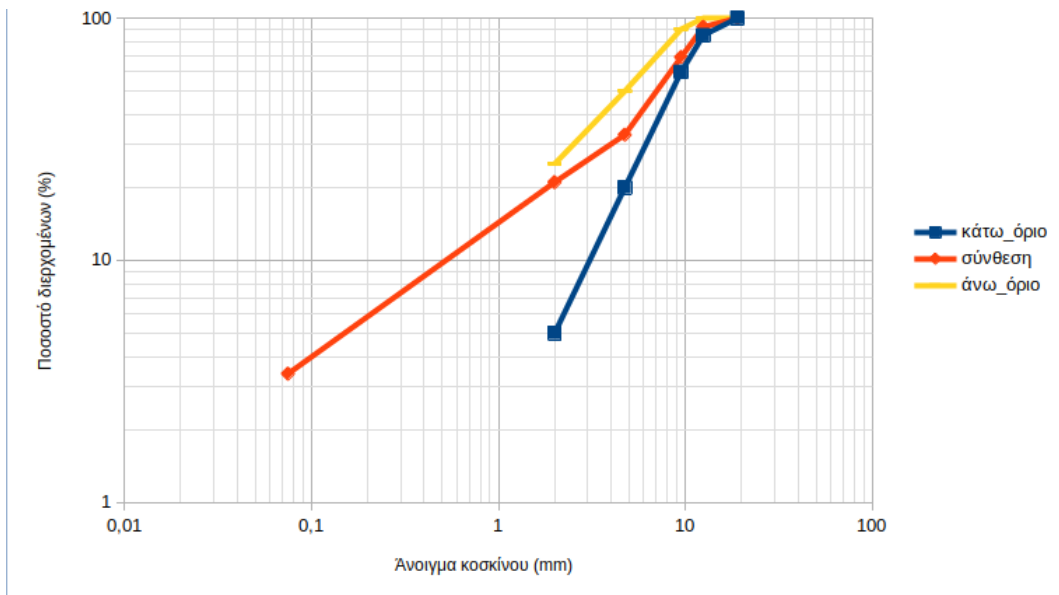
Πίνακας 4.1: Κωδική Ονομασία Δοκιμίων Αντιολισθηρής Στρώσης

Μίγμα	Ποσοστό Ασφάλτου		
	4%	4,5%	5%
Α	ANTIO_A_I(1)	ANTIO_A_II(1)	ANTIO_A_III(1)
	ANTIO_A_I(2)	ANTIO_A_II(2)	ANTIO_A_III(2)
	ANTIO_A_I(3)	ANTIO_A_II(3)	ANTIO_A_III(3)
	ANTIO_A_I(4)	ANTIO_A_II(4)	ANTIO_A_III(4)
Β	ANTIO_B_I(1)	ANTIO_B_II(1)	ANTIO_B_III(1)
	ANTIO_B_I(2)	ANTIO_B_II(2)	ANTIO_B_III(2)
	ANTIO_B_I(3)	ANTIO_B_II(3)	ANTIO_B_III(3)
	ANTIO_B_I(4)	ANTIO_B_II(4)	ANTIO_B_III(4)

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρική ανάλυση αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Α

Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
19	3/4"	100	100	100

Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
12,5	1/2"	85	92	100
9,5	3/8"	60	69	90
4,75	No4	20	33	50
2	No10	5	21	25
0,075	No200		3,4	

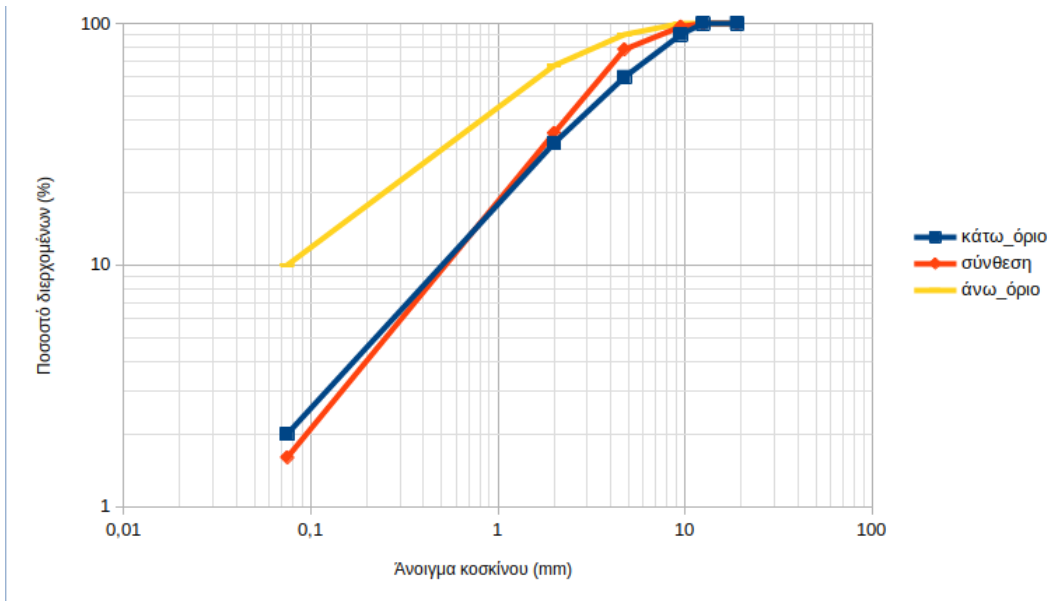


Εικόνα 4.1: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Α της αντιολισθηρής στρώσης

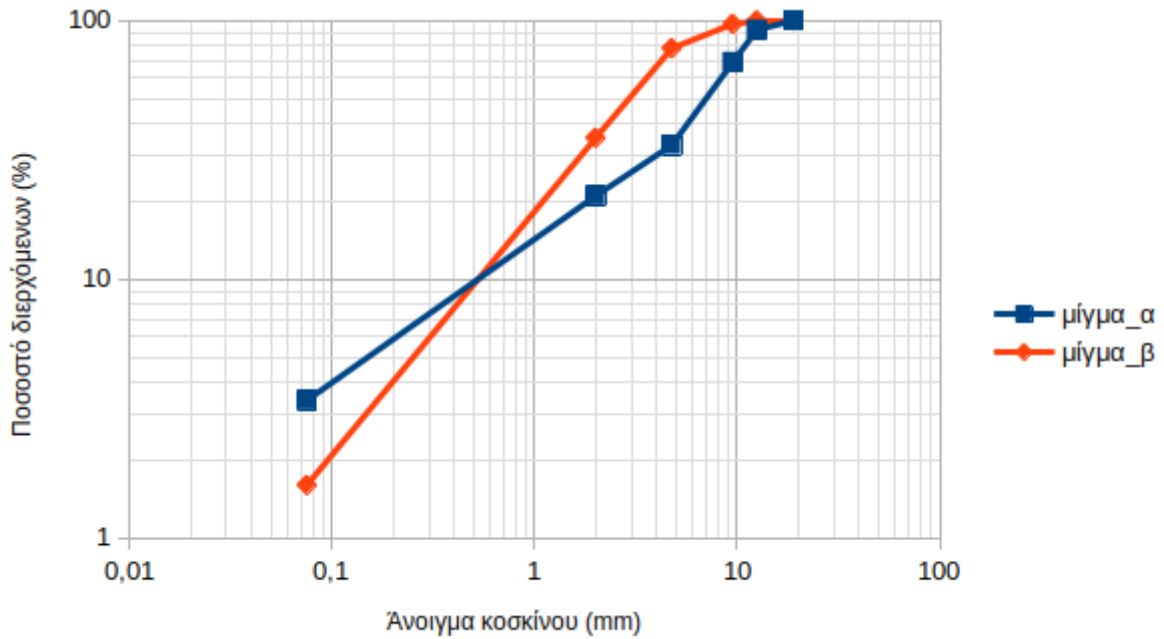
Πίνακας 4.3: Κοκκομετρική ανάλυση αντιολισθηρής στρώσης μίγματος Β

Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
19	3/4"	100	100	100
12,5	1/2"	100	100	100
9,5	3/8"	90	97	100
4,75	No4	60	78,1	90

Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
2	No10	32	35,2	67
0,075	No200	2	1,6	10



Εικόνα 4.2: : Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Β της αντιολισθηρής στρώσης



Εικόνα 4.3: Σύγκριση κοκκομετρικών αναλύσεων των μιγμάτων Α & Β της αντιολισθηρής στρώσης

Ισοπεδωτική στρώση

Ακολουθεί η κωδική ονομασία των δοκιμών της ισοπεδωτικής στρώσης βάσει των παραπάνω κανόνων ομαδοποίησης (Πίνακας 4.4), οι κοκκομετρικές αναλύσεις του κάθε μίγματος (Πίνακας 4.5 & Εικόνα 4.4 για το μίγμα Α, Πίνακας 4.6 & Εικόνα 4.5 για το μίγμα Β και Πίνακας 4.7 & Εικόνα 4.5 για το μίγμα Γ) και η σύγκριση των κοκκομετρικών αναλύσεων των μιγμάτων Α, Β & Γ της ισοπεδωτικής στρώσης (Εικόνα 4.7).

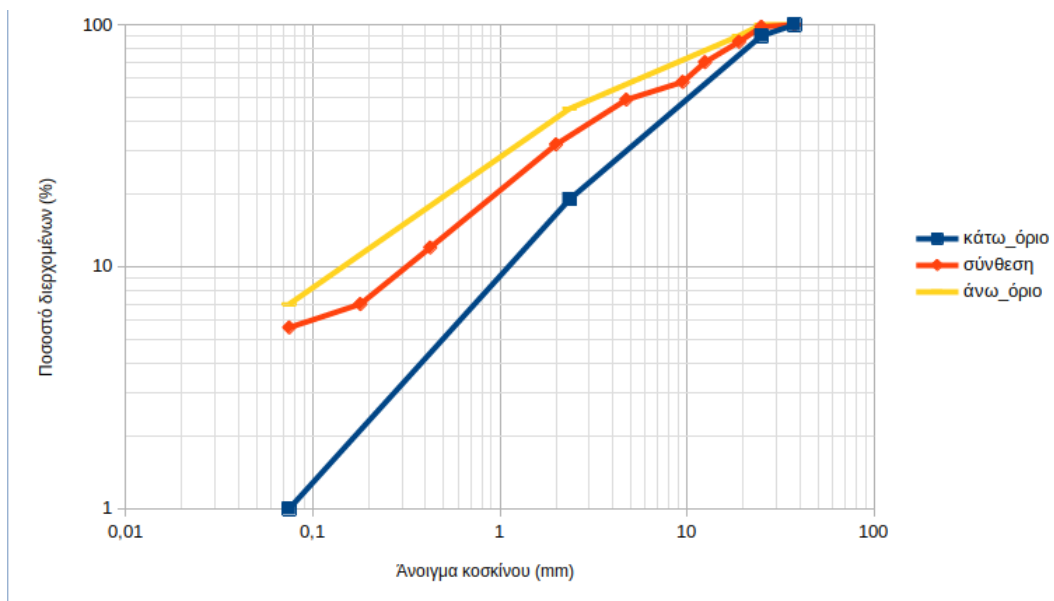
Πίνακας 4.4: Κωδική Ονομασία Δοκιμών Ισοπεδωτικής Στρώσης

Μίγμα	Ποσοστό Ασφάλτου		
	4%	4,5%	5%
Α	ΙΣ_Α_Ι(1)	ΙΣ_Α_ΙΙ(1)	ΙΣ_Α_ΙΙΙ(1)
	ΙΣ_Α_Ι(2)	ΙΣ_Α_ΙΙ(2)	ΙΣ_Α_ΙΙΙ(2)
	ΙΣ_Α_Ι(3)	ΙΣ_Α_ΙΙ(3)	ΙΣ_Α_ΙΙΙ(3)
	ΙΣ_Α_Ι(4)	ΙΣ_Α_ΙΙ(4)	ΙΣ_Α_ΙΙΙ(4)
Β	ΙΣ_Β_Ι(1)	ΙΣ_Β_ΙΙ(1)	ΙΣ_Β_ΙΙΙ(1)
	ΙΣ_Β_Ι(2)	ΙΣ_Β_ΙΙ(2)	ΙΣ_Β_ΙΙΙ(2)

Μίγμα	Ποσοστό Ασφάλτου		
	4%	4,5%	5%
	ΙΣ_Β_Ι(3)	ΙΣ_Β_ΙΙ(3)	ΙΣ_Β_ΙΙΙ(3)
	ΙΣ_Β_Ι(4)	ΙΣ_Β_ΙΙ(4)	ΙΣ_Β_ΙΙΙ(4)
Γ	ΙΣ_Γ_Ι(1)	ΙΣ_Γ_ΙΙ(1)	ΙΣ_Γ_ΙΙΙ(1)
	ΙΣ_Γ_Ι(2)	ΙΣ_Γ_ΙΙ(2)	ΙΣ_Γ_ΙΙΙ(2)
	ΙΣ_Γ_Ι(3)	ΙΣ_Γ_ΙΙ(3)	ΙΣ_Γ_ΙΙΙ(3)
	ΙΣ_Γ_Ι(4)	ΙΣ_Γ_ΙΙ(4)	ΙΣ_Γ_ΙΙΙ(4)

Πίνακας 4.5: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Α

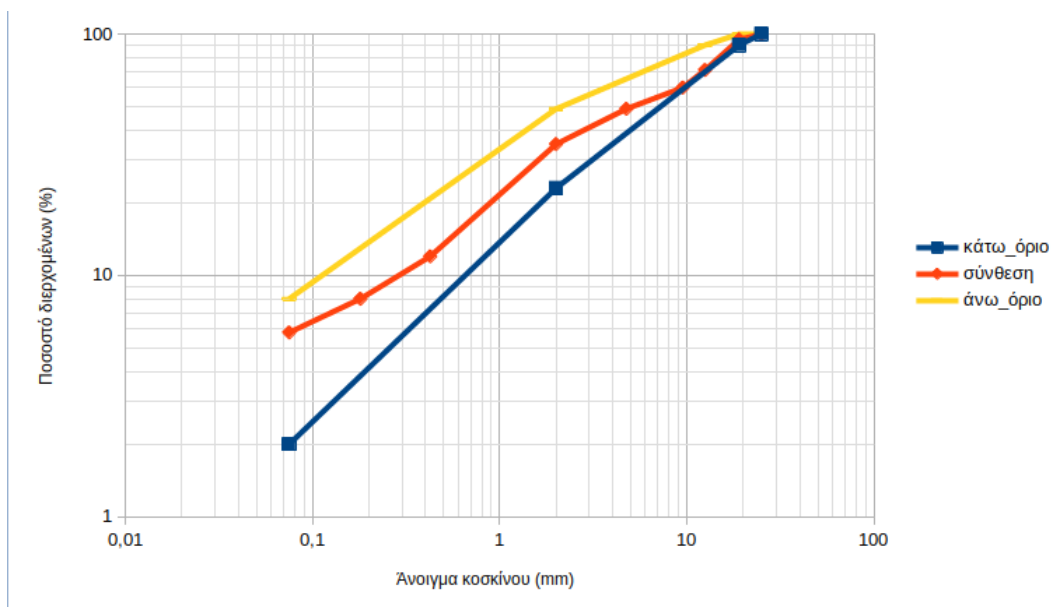
Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
37,5	1 1/2"	100	100	100
25	1"	90	98	100
19	3/4"		85	90
12,5	1/2"		70	
9,5	3/8"		58	
4,75	No4		49	
2,36	No8	19		45
2	No10		32	
0,425			12	
0,18			7	
0,075	No200	1	5,6	7



Εικόνα 4.4: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Α της ισοπεδωτικής στρώσης

Πίνακας 4.6: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Β

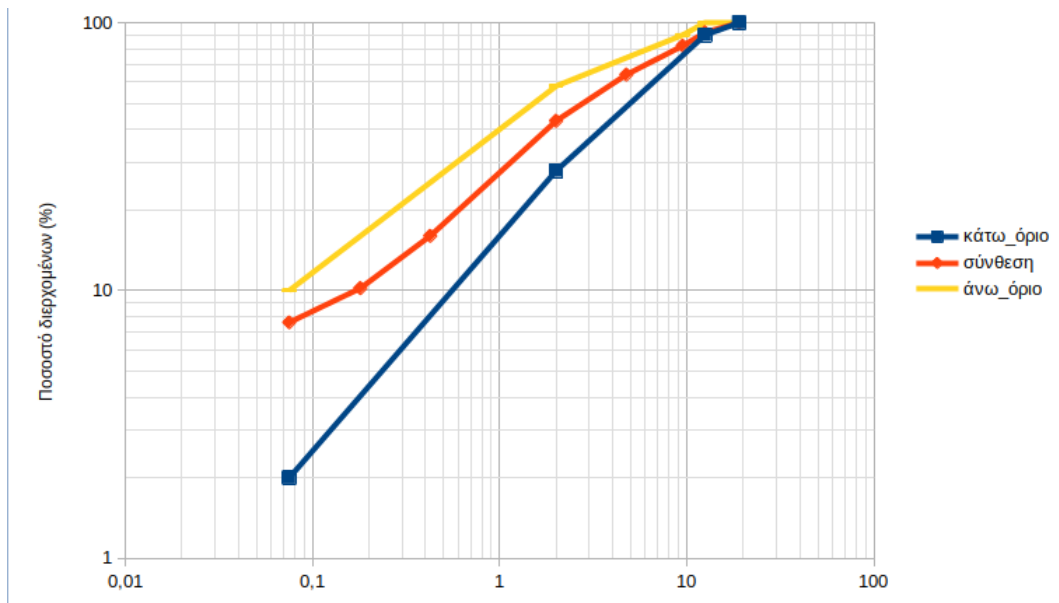
Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
25	1"	100	100	100
19	3/4"	90	95	100
12,5	1/2"		71	90
9,5	3/8"		60	
4,75	No4		49	
2	10	23	35	49
0,425			12	
0,18			8	
0,075	No200	2	5,8	8



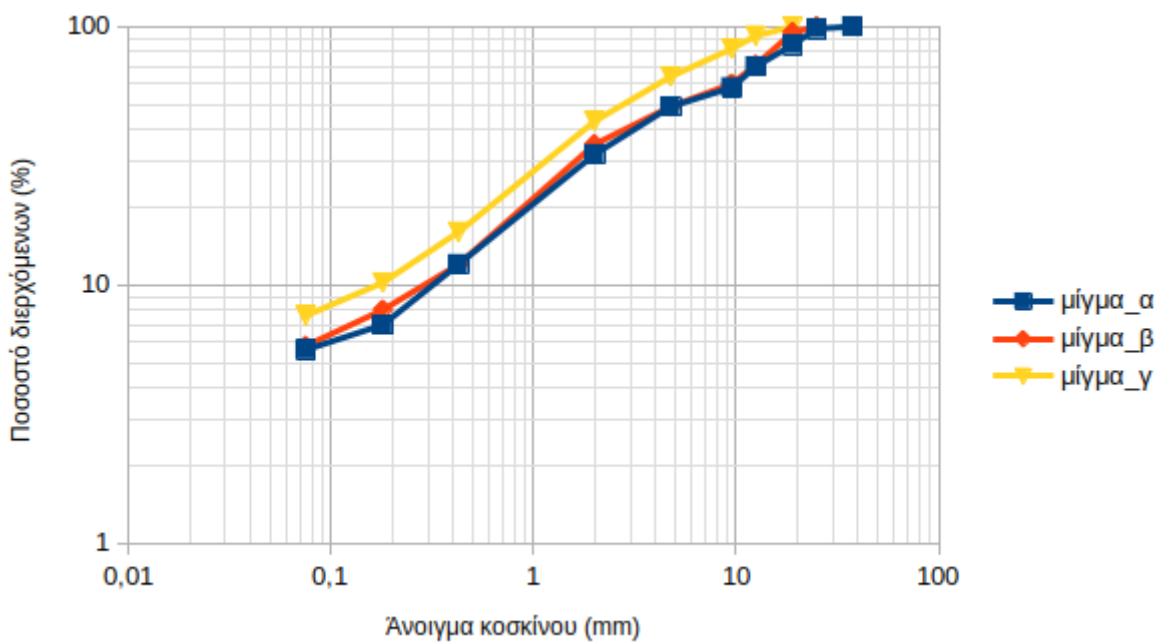
Εικόνα 4.5: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Β της ισοπεδωτικής στρώσης

Πίνακας 4.7: Κοκκομετρική ανάλυση ισοπεδωτικής στρώσης μίγματος Γ

Κόσκινα		Ποσοστό διερχόμενων (%)		
mm	No	Κάτω όριο	Σύνθεση	Άνω όριο
19	3/4"	100	100	100
12,5	1/2"	90	92	100
9,5	3/8"		82	90
4,75	No4		64	
2	10	28	43	58
0,425			16	
0,18			10,2	
0,075	No200	2	7,6	10



Εικόνα 4.6: Κοκκομετρική ανάλυση για το μίγμα Γ της ισοπεδωτικής στρώσης



Εικόνα 4.7: Σύγκριση κοκκομετρικών αναλύσεων των μιγμάτων Α, Β & Γ της ισοπεδωτικής στρώσης

4.1.2. Τιμές κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στο πιστοποιημένο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ, με κατάλληλες πειραματικές διατάξεις και όργανα, ήταν σύμφωνες με τα ευρωπαϊκά πρότυπα και αμερικανικά πρότυπα. Τα δοκίμια Marshall είχαν υποβληθεί σε

εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του ποσοστού των κενών και στη συνέχεια της διηλεκτρικής σταθεράς.

Αρχικά, είχε υπολογιστεί η φαινόμενη πυκνότητα με τη μέθοδο των “διαστάσεων” βάσει της Σχέσης (2.11) για την αντιολισθηρή στρώση και με τη μέθοδο “SSD” βάσει της Σχέσης (2.9) για την ισοπεδωτική στρώση. Στη συνέχεια, είχε υπολογιστεί η θεωρητική μέγιστη πυκνότητα σύμφωνα με τη μέθοδο “RICE” βάσει της Σχέσης (2.4), ώστε εν τέλει να υπολογιστεί το ποσοστό κενών αέρα βάσει της Σχέσης (2.1).

Στη συνέχεια, ο προσδιορισμός της διηλεκτρικής σταθεράς είχε πραγματοποιηθεί με τη συσκευή Percometer, ενώ για την μέτρηση των δοκιμίων είχαν χρησιμοποιηθεί δυο εξαρτήματα (ανιχνευτές). Το ένα εξάρτημα ήταν το “054”, για επίπεδη επιφάνεια και το δεύτερο ήταν το “055”, για κυλινδρική επιφάνεια.

Στο αρχικό στάδιο προετοιμασίας, τα δοκίμια είχαν καθαριστεί από ξένες ουσίες. Εν συνεχεία, είχαν παραμείνει πάνω σε μία επίπεδη επιφάνεια, σε κατάσταση ηρεμίας και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ώστε να ξηραθούν,. Αφού είχε δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δοκίμια να είναι απαλλαγμένα από νερό ή άλλη ουσία η οποία μπορούσε να επηρεάσει τις μετρήσεις, ξεκίνησε η διαδικασία της μέτρησης. Για τη χρήση του Percometer, αρχικά είχε επιλεγεί ο κατάλληλος ανιχνευτής για σκληρό επίπεδο υλικό (τύπος 054) και είχαν πραγματοποιηθεί δύο μετρήσεις, μία στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου και μία στην κάτω, και στη συνέχεια καταγράφηκαν στο έντυπο των μετρήσεων.

Έπειτα, τοποθετήθηκε ο ανιχνευτής 055, για σκληρή κυλινδρική επιφάνεια και αντιστοίχως πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση στην πλαϊνή πλευρά του δοκιμίου, προσέχοντας να εφάπτεται καλά το εξάρτημα, καθώς τυχόν παρουσία αέρα μεταξύ της επιφάνειας του δοκιμίου και αυτής του εξαρτήματος, θα είχε ως συνέπεια την μειωμένη τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς. Η τιμή της μέτρησης καταγράφηκε στο έντυπο μετρήσεων.

Η τελική τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του δοκιμίου ήταν ο Μ.Ο. των μετρήσεων που προέκυψαν με την χρήση των εξαρτημάτων 054 και 055.

4.1.3. Περιγραφική ανάλυση δεδομένων

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μεγεθών του ποσοστού των κενών και της διηλεκτρικής σταθεράς για τα δοκίμια της αντιολισθηρής και της ισοπεδωτικής στρώσης ομαδοποιημένα βάσει του μίγματος.

Συμπληρωματικά, για την παρουσίαση των κυριότερων χαρακτηριστικών των δεικτών, γίνονται περιγραφικά στατιστικά γραφήματα “Box plots” ή “Θηκογράμματα”, που αποτελούν μια μέθοδο για την απεικόνιση ομάδων αριθμητικών δεδομένων μέσω των τεταρτημόριών τους. Για την

κατασκευή τους, αρχικά, επισημαίνονται για τα δεδομένα που έχουμε, η πρώτη και η τρίτη τεταρτητόμος $x_{1/4}$, $x_{3/4}$, η διάμεσος και η μέση τιμή. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα ορθογώνιο με κάτω βάση το $x_{1/4}$ και άνω βάση το $x_{3/4}$. Το μήκος των βάσεων του ορθογωνίου λαμβάνεται αυθαίρετα. Η διάμεσος παριστάνεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα μέσα στο ορθογώνιο, παράλληλο με τις βάσεις και η μέση τιμή με το σύμβολο "+". Από τα μέσα των βάσεων του ορθογωνίου μέχρι τις οριακές τιμές εκτείνονται ευθείες γραμμές, οι οποίες προκύπτουν ως εξής: η άνω τιμή ορίζεται σαν η μεγαλύτερη παρατήρηση, η οποία είναι μικρότερη ή ίση από το $x_{3/4} + 1.5(x_{3/4} - x_{1/4})$, ενώ η κάτω τιμή ορίζεται σαν η μικρότερη παρατήρηση, η οποία είναι μεγαλύτερη ή ίση από το $x_{1/4} + 1.5(x_{3/4} - x_{1/4})$. Εάν υπάρχουν ακόμη παρατηρήσεις που βρίσκονται έξω από το εύρος των δύο οριακών τιμών, τότε αυτές καλούνται εξωτερικές ή υπερβολικές τιμές (outliers), οι οποίες θεωρούνται ως μεμονωμένα σημεία και παριστάνονται με το σύμβολο "ο" και οι ακραίες τιμές παριστάνονται με το σύμβολο "*". Το box plot μας δίνει το κεντρικό διάστημα με το 50% των παρατηρήσεων. Οι ευθείες γραμμές και η θέση της διαμέσου δίνουν μια εικόνα για την συμμετρικότητα της κατανομής των μεταβλητών. Οι αποστάσεις μεταξύ των διαφόρων τμημάτων των "κουτιών" υποδηλώνουν το βαθμό διασποράς και την ασυμμετρία των δεδομένων.

Αντιολισθηρή στρώση:

Ακολουθούν οι πίνακες των μετρήσεων (Πίνακας 4.8 & Πίνακας 4.9) και το θηκόγραμμα (Εικόνα 4.8) για τα μίγματα αντιολισθηρής στρώσης.

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Α της αντιολισθηρής στρώσης

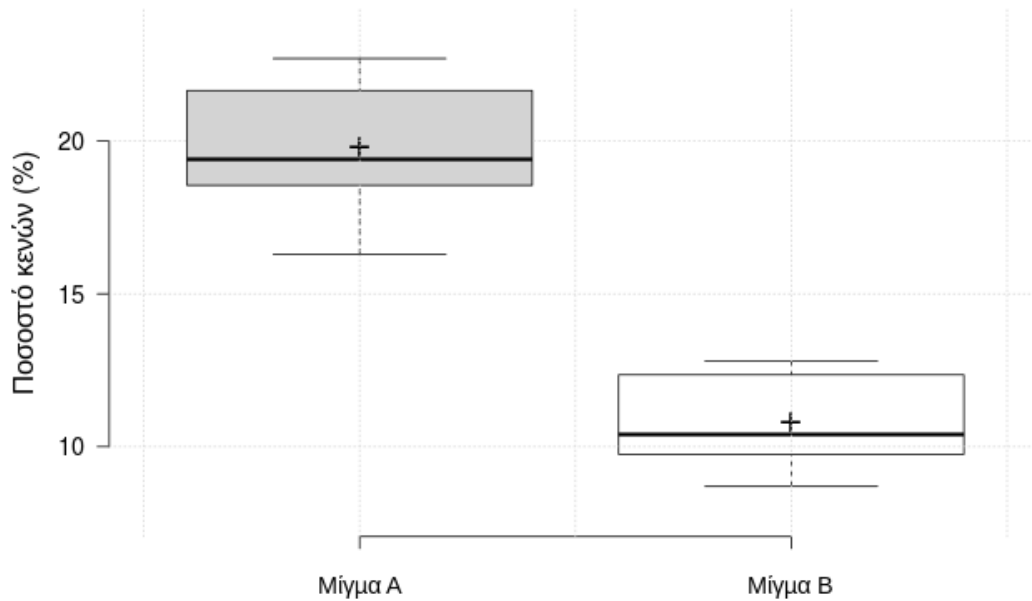
Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος διαστάσεων)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ANTIO_A _I_1	9,5	11,0	10,3	10,1	10,2	19,2
ANTIO_A _I_2	11,4	9,9	10,7	11,4	11,0	18,5
ANTIO_A _I_3	10,9	7,9	9,4	11,8	10,6	17,5
ANTIO_A _I_4	11,3	8,8	10,1	11,9	11,0	16,3
ANTIO_A _II_1	9,9	11,6	10,8	10,7	10,7	20,8

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος διαστάσεων)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ANTIO_A _II_2	10,9	11,4	11,2	10,4	10,8	21,7
ANTIO_A _II_3	10,2	10,9	10,6	10,9	10,7	21,6
ANTIO_A _II_4	11,4	9,5	10,5	11,2	10,8	22,5
ANTIO_A _III_1	11,1	9,8	10,5	10,3	10,4	19,6
ANTIO_A _III_2	10,7	10,0	10,4	10,9	10,6	18,7
ANTIO_A _III_3	7,6	8,9	8,3	10,2	9,2	22,7
ANTIO_A _III_4	10,6	11,5	11,1	12,0	11,5	18,6

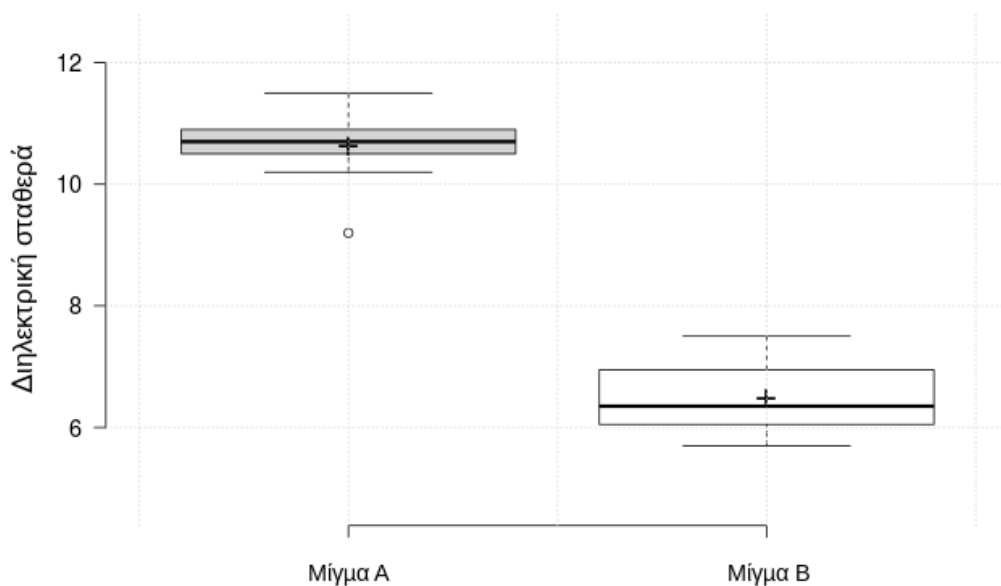
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Β της αντιολισθηρής στρώσης

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος διαστάσεων)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ANTIO_B _I_1	6,8	6,5	6,7	7,6	7,1	10,4
ANTIO_B _I_2	6,7	7,2	7,0	8,0	7,5	9,7
ANTIO_B _I_3	6,3	6,3	6,3	7,9	7,1	10,8
ANTIO_B _I_4	6,2	6,2	6,2	7,2	6,7	12,3

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος διαστάσεων)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ANTIO_B _ II_1	6,3	6,2	6,3	6,6	6,4	9,6
ANTIO_B _ II_2	5,8	6,2	6,0	7,6	6,8	10,4
ANTIO_B _ II_3	5,7	6,1	5,9	6,7	6,3	9,8
ANTIO_B _ II_4	5,6	5,7	5,7	6,2	5,9	12,8
ANTIO_B _ III_1	5,6	6,1	5,9	6,3	6,1	10,3
ANTIO_B _ III_2	5,6	5,6	5,6	6,6	6,1	8,7
ANTIO_B _ III_3	5,8	6,3	6,1	5,9	6,0	12,6
ANTIO_B _ III_4	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	12,4



Εικόνα 4.8: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ποσοστού κενών αέρα των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης



Εικόνα 4.9: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.8) γίνεται αντιληπτό πως για τα 2 μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης, καθένα με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση, οι τιμές του ποσοστού κενών αέρα διαφέρουν πολύ ανά μίγμα. Το ίδιο συμβαίνει και για τις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (Εικόνα 4.9). Το προαναφερθέν γεγονός οφείλεται στο ότι, μεταξύ τους οι κοκκομετρίες (Εικόνα 4.3) διαφέρουν κατά πολύ.

Ισοπεδωτική στρώση:

Ακολουθούν οι πίνακες των μετρήσεων (Πίνακας 4.10, Πίνακας 4.11 & Πίνακας 4.12) και το θηκόγραμμα (Εικόνα 4.10) για τα μίγματα ισοπεδωτικής στρώσης.

Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Α της ισοπεδωτικής στρώσης

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος SSD)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ΙΣ_Α_Ι_1	5,6	5,4	5,5	6,1	5,8	2,9
ΙΣ_Α_Ι_2	5,4	5,4	5,4	5,7	5,6	4,3
ΙΣ_Α_Ι_3	5,5	5,3	5,4	5,7	5,6	4,7
ΙΣ_Α_Ι_4	5,1	5,3	5,2	5,5	5,4	5,7
ΙΣ_Α_ΙΙ_1	5,2	5,7	5,5	5,9	5,7	2,8
ΙΣ_Α_ΙΙ_2	5,1	5,3	5,2	5,8	5,5	4,3
ΙΣ_Α_ΙΙ_3	5,4	5,3	5,4	5,6	5,5	5,4
ΙΣ_Α_ΙΙ_4	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,8
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_1	5,5	5,5	5,5	5,7	5,6	2,6
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_2	5,0	5,2	5,1	5,5	5,3	4,2
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_3	5,1	5,2	5,2	5,8	5,5	5,3
ΙΣ_Α_ΙΙΙ_4	5,1	5,0	5,1	5,2	5,1	6,4

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Β της ισοπεδωτικής στρώσης

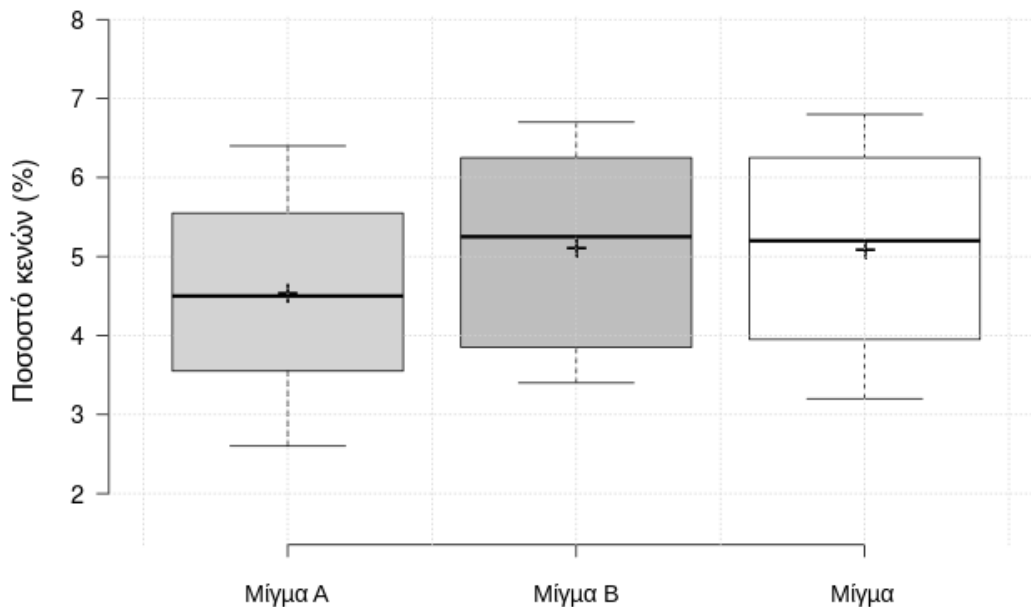
Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος SSD)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ΙΣ_Β_Ι_1	5,4	5,4	5,4	6,0	5,7	3,6
ΙΣ_Β_Ι_2	5,3	5,3	5,3	5,8	5,6	4,1

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος SSD)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ΙΣ_Β_Ι_3	5,0	5,4	5,2	5,6	5,4	6,1
ΙΣ_Β_Ι_4	4,9	5,2	5,1	5,5	5,3	6,5
ΙΣ_Β_ΙΙ_1	5,3	5,3	5,3	5,7	5,5	3,6
ΙΣ_Β_ΙΙ_2	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	4,5
ΙΣ_Β_ΙΙ_3	5,2	5,1	5,2	5,6	5,4	6,0
ΙΣ_Β_ΙΙ_4	4,8	5,1	5,0	5,3	5,1	6,4
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_1	5,5	5,3	5,4	5,7	5,6	3,4
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_2	5,2	5,4	5,3	5,7	5,5	4,9
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_3	5,0	4,9	5,0	5,5	5,2	5,6
ΙΣ_Β_ΙΙΙ_4	4,9	5,2	5,1	5,4	5,2	6,7

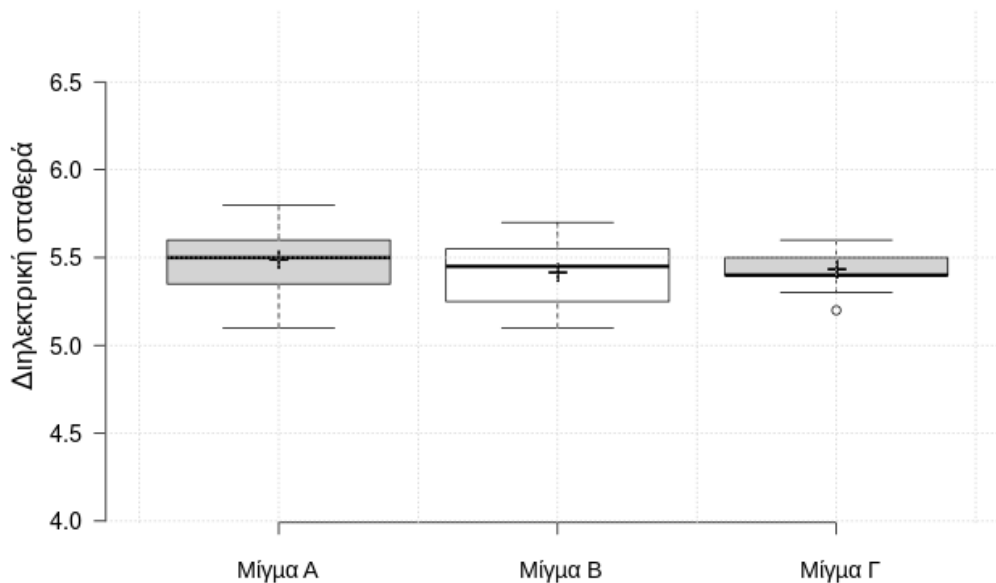
Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα μετρήσεων μίγματος Γ της ισοπεδωτικής στρώσης

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική ή σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος SSD)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ΙΣ_Γ_Ι_1	5,3	5,5	5,4	5,7	5,6	3,6
ΙΣ_Γ_Ι_2	5,3	5,2	5,3	5,5	5,4	4,9
ΙΣ_Γ_Ι_3	5,2	5,0	5,1	5,7	5,4	5,7
ΙΣ_Γ_Ι_4	5,2	5,1	5,2	5,7	5,4	6,8
ΙΣ_Γ_ΙΙ_1	5,4	5,4	5,4	5,6	5,5	3,2
ΙΣ_Γ_ΙΙ_2	5,2	5,3	5,3	5,7	5,5	4,6
ΙΣ_Γ_ΙΙ_3	5,2	5,2	5,2	5,6	5,4	5,9

Κωδικός Δοκιμίου	Διηλεκτρική σταθερά 054			Διηλεκτρική σταθερά 055	Μ.Ο. Διηλεκτρικών σταθερών 054 & 055	% Κενά αέρα (μέθοδος SSD)
	Πάνω	Κάτω	Μ.Ο.			
ΙΣ_Γ_II_4	5,2	5,1	5,2	5,3	5,2	6,6
ΙΣ_Γ_III_1	5,4	5,5	5,5	5,7	5,6	3,2
ΙΣ_Γ_III_2	5,1	5,4	5,3	5,8	5,5	4,3
ΙΣ_Γ_III_3	5,1	5,3	5,2	5,5	5,4	5,5
ΙΣ_Γ_III_4	5,1	5,2	5,2	5,4	5,3	6,8



Εικόνα 4.10: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ποσοστού κενών αέρα των μιγμάτων της ισοπεδωτικής στρώσης



Εικόνα 4.11: Θηκόγραμμα για τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς των μιγμάτων της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.10) γίνεται αντιληπτό πως για τα τρία μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης, καθένα με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση, οι τιμές του ποσοστού κενών αέρα δε διαφέρουν πολύ ανά μίγμα. Το ίδιο συμβαίνει και για τις τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς (Εικόνα 4.11). Το προαναφερθέν γεγονός οφείλεται στο ότι, ενώ η κοκκομετρική διαβάθμιση του κάθε μίγματος διαφοροποιείται από τις άλλες, μεταξύ τους οι κοκκομετρίες (Εικόνα 4.7) δε διαφέρουν κατά πολύ.

4.2. Διερεύνηση συσχετίσεων κενών αέρα – διηλεκτρικών σταθερών

4.2.1. Μεθοδολογία

Στα πλαίσια ελέγχου της ικανότητας των μοντέλων της διεθνούς βιβλιογραφίας να προβλέψουν τα κενά αέρα βάσει των διηλεκτρικών σταθερών για τα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μετρημένων δεδομένων και εκείνων που παράγουν τα προαναφερόμενα μοντέλα πρόβλεψης. Τα μετρημένα δεδομένα προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., βάσει όσων έχουν αναφερθεί παραπάνω στο υποκεφάλαιο 4.1. . Για τα μοντέλα πρόβλεψης των κενών αέρα βάσει των διηλεκτρικών σταθερών σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω στο υποκεφάλαιο 3.5. .

Για να πραγματοποιηθεί η εν λόγω σύγκριση, γίνεται χρήση του δείκτη RMSPE (Root Mean Square Percent of Error %) όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Vm_{\text{προβλεπόμενο}} - Vm_{\text{μετρημένο}}}{Vm_{\text{μετρημένο}}} \right)^2} * 100 \quad (4.2)$$

Ο παραπάνω δείκτης (Σχέση (4.2)), αποτελεί έναν δείκτη ποιότητας προσαρμογής που παρέχει απευθείας πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των σφαλμάτων των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με τις τιμές των μετρήσεων. Όσο η τιμή του «RMSPE» πλησιάζει προς το μηδέν τόσο πιο αντιπροσωπευτικές είναι οι τιμές που προέρχονται από το υπό εξέταση μοντέλο.

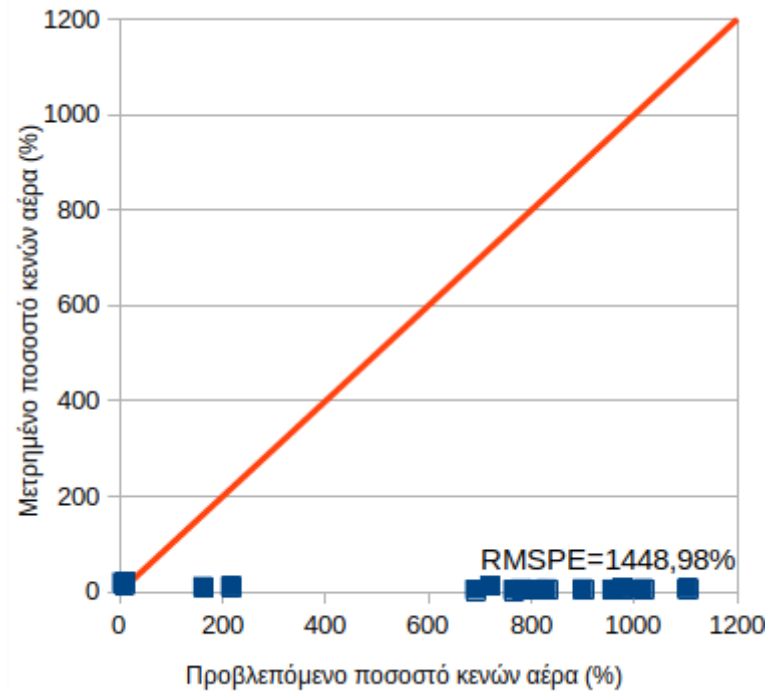
Για λόγους καλύτερης και ευκολότερης εμποπτείας, σημειώνεται για τα μίγματα μετρήσεων:

- της αντιολισθηρής στρώσης το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) είναι 5.7 – 11.5, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 8.7 – 22.7,
- της ισοπεδωτικής στρώσης το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) είναι 5.1 – 5.8, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.6 – 6.8,
- του συνόλου το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) είναι 5.1 – 11.5, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.6 – 22.7.

Η επαλήθευση για το αν τα εξεταζόμενα μοντέλα μπορούν να αντιπροσωπεύσουν τις συνθήκες του πειράματος της παρούσας διπλωματικής, φαίνονται στη συνέχεια.

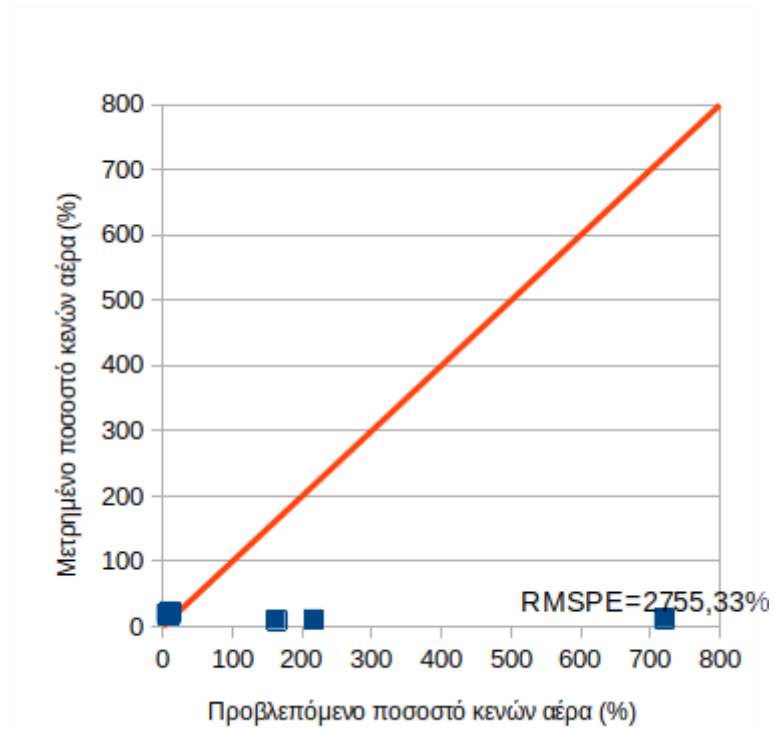
4.2.2. Διερεύνηση Σχέσης (Saarenketo & Scullion, 1999)

Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.4) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 5.3 – 8.1, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 5.5 – 8.1. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς και με μικρή πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής ή της αντιολισθηρής στρώσης.



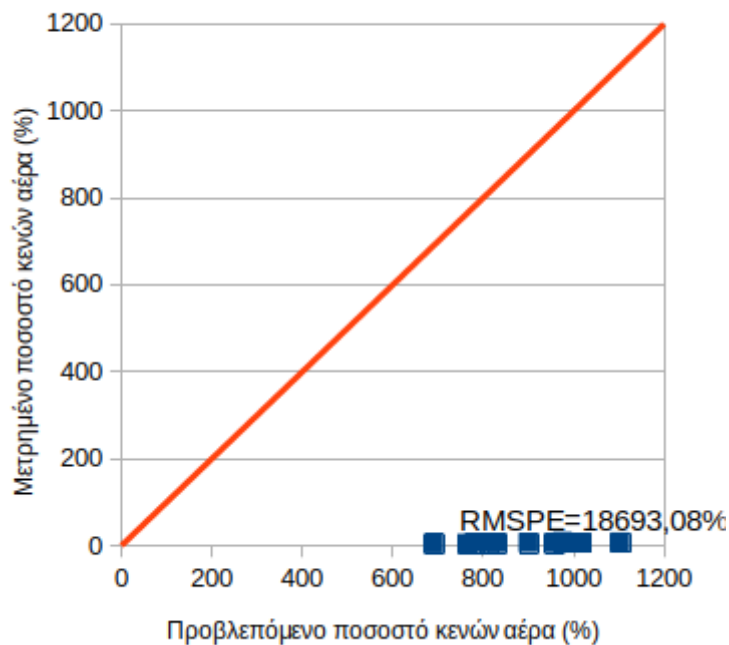
Εικόνα 4.12: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για το σύνολο των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.12) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.4) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς η τιμή 1448,98% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς η Σχέση (3.4) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Εν τέλει, φαίνεται όντως να μην είναι εμφανώς ευνοϊκότερα τα αποτελέσματα για τα δεδομένα μίας μόνο εκ των δύο στρώσεων, αλλά για λόγους εποπτείας παρατίθενται παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα για την ισοπεδωτική μόνο στρώση και για την αντιολισθηρή μόνο στρώση (Εικόνα 4.13 & Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.13: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.13) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.4) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης. Η τιμή 2755,33% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.4) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης.

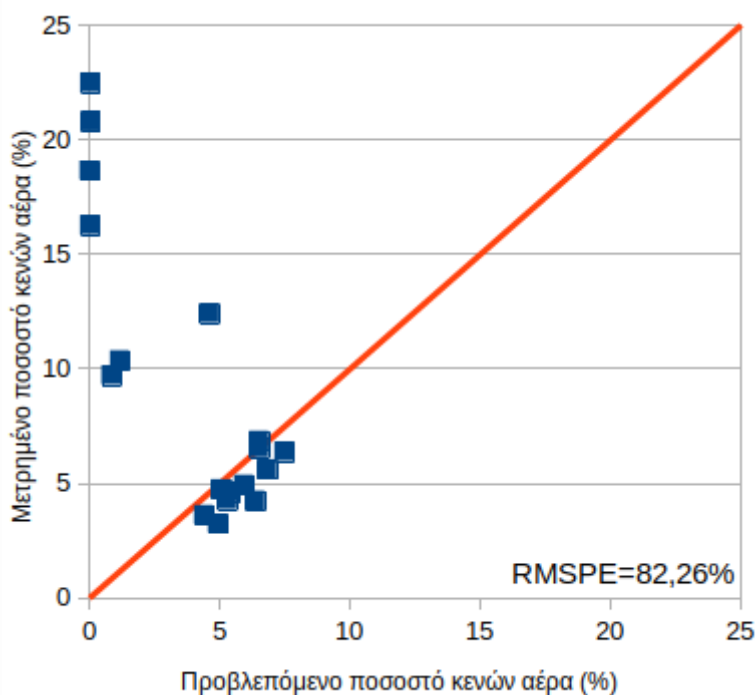


Εικόνα 4.14: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.4) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.14) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.4) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Η τιμή 18693,08% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.4) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.

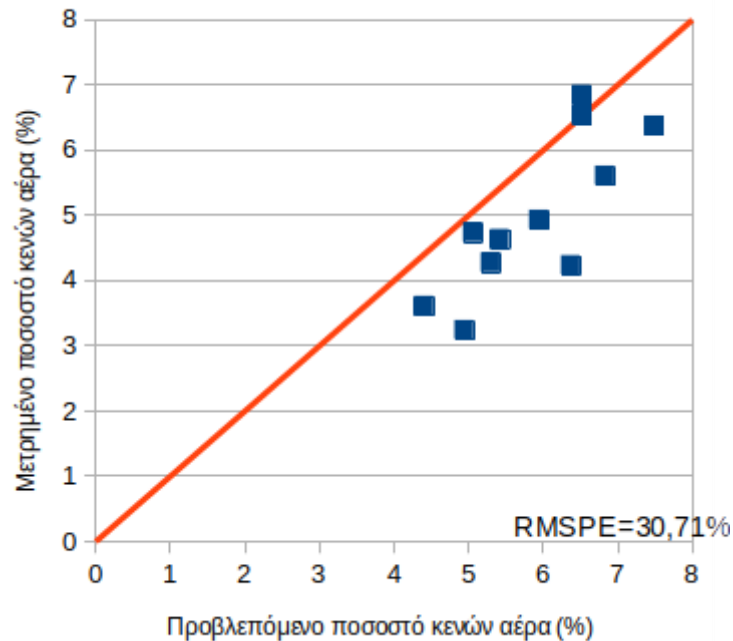
4.2.3. Διερεύνηση Σχέσης (Λοΐζος & Πλατή, 2011)

Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.5) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.9 – 5.7, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 5.6 – 10.2. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, αλλά με πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.



Εικόνα 4.15: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.5) για το σύνολο των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.15) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.5) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης, καθώς η τιμή 82,26% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.5) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Ειδικότερα, προβλέπει μηδενικές τιμές κενών αέρα για τα δεδομένα της αντιολισθηρής στρώσης, φαινόμενο πρακτικώς αδύνατο, που υποδεικνύει όμως ότι πιθανώς θα υπάρχει καλύτερη πρόβλεψη για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια, αγνοούνται τα δεδομένα μετρήσεων για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης και ακολουθεί σύγκριση των παραγόμενων και των προβλεπόμενων για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής στρώσης (Εικόνα 4.16).

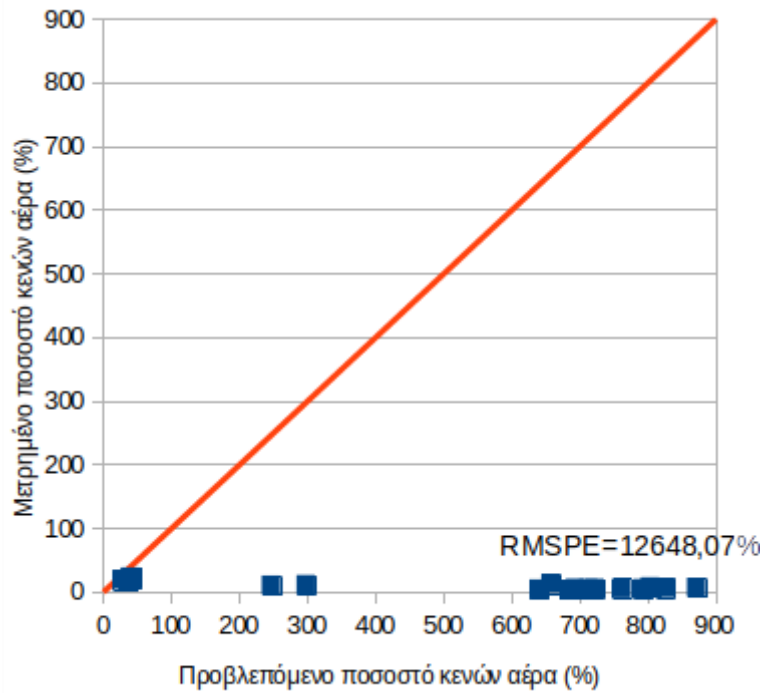


Εικόνα 4.16: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.5) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.16) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.5) επαληθεύεται εν μέρει για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Η τιμή 30,71% του RMSPE είναι μεν υψηλή, αλλά, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 4.16), το μοντέλο υπερεκτιμά τις προβλεπόμενες τιμές κενών αέρα με μικρή τυπική απόκλιση σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μικρή τυπική απόκλιση στα σφάλματα μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών (τυπική απόκλιση σφαλμάτων = 0.8 και μέση τιμή μετρημένων = 5.0).

4.2.4. Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2015)

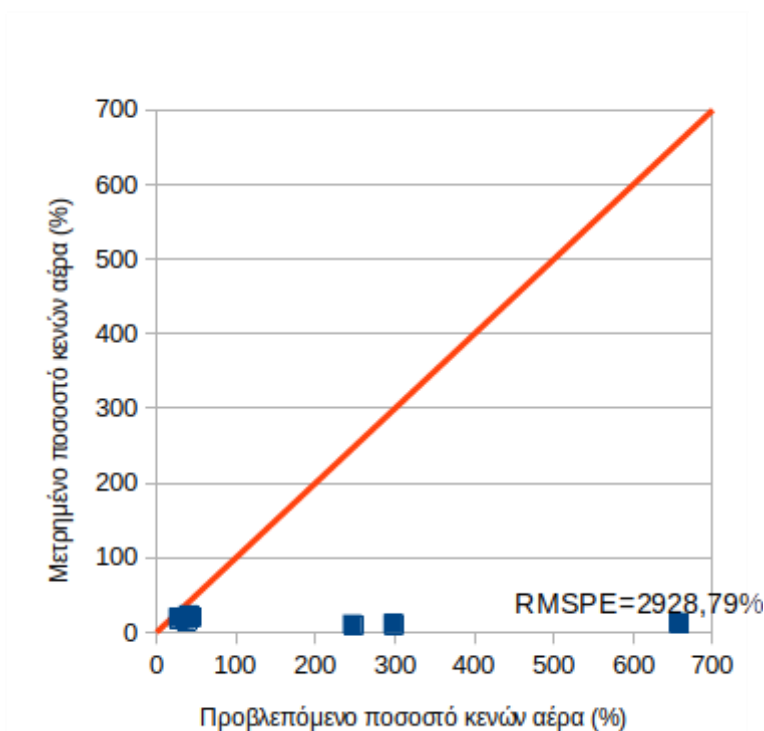
Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.6) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.6 – 5.6, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 6.7 – 12.0. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς και με μικρή πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής ή της αντιολισθηρής στρώσης.



Εικόνα 4.17: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για το σύνολο των μιγμάτων

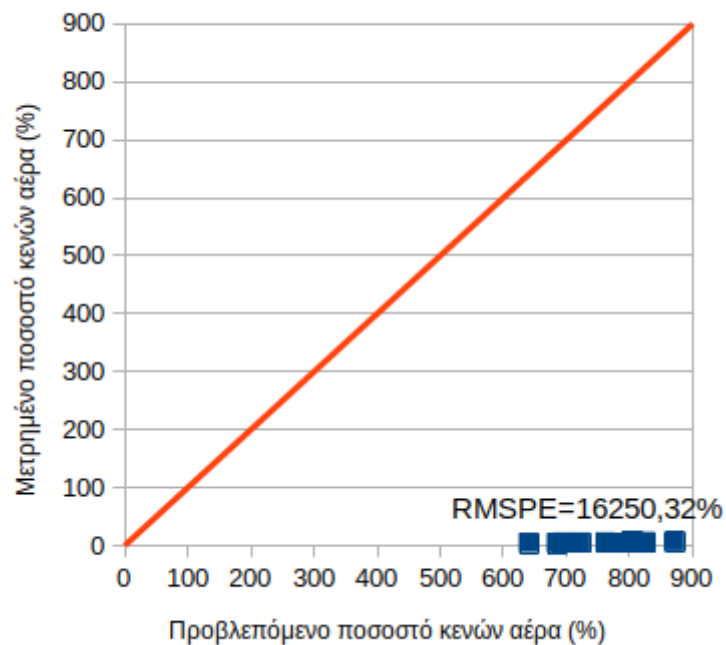
Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.17) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.6) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς η τιμή 12648,07% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.6) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Εν τέλει, φαίνεται όντως να μην είναι εμφανώς ευνοϊκότερα τα αποτελέσματα για τα δεδομένα μίας μόνο εκ των δύο στρώσεων, αλλά για λόγους εποπτείας

παρατίθενται παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα για την ισοπεδωτική στρώση και για την αντιολισθηρή στρώση (Εικόνα 4.18 & Εικόνα 4.19).



Εικόνα 4.18: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.18) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.6) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης. Η τιμή 2928,79% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.6) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης.

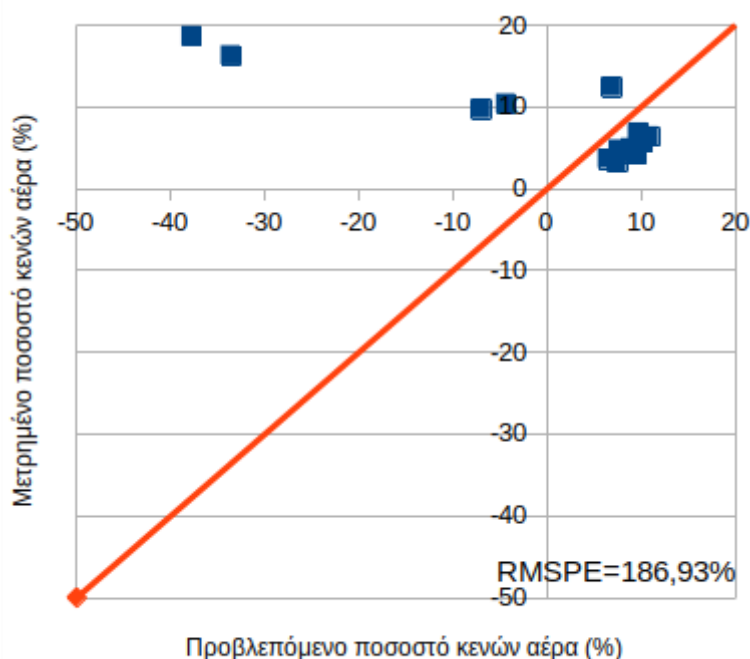


Εικόνα 4.19: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.6) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.19) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.6) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Η τιμή 16250,32% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.6) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.

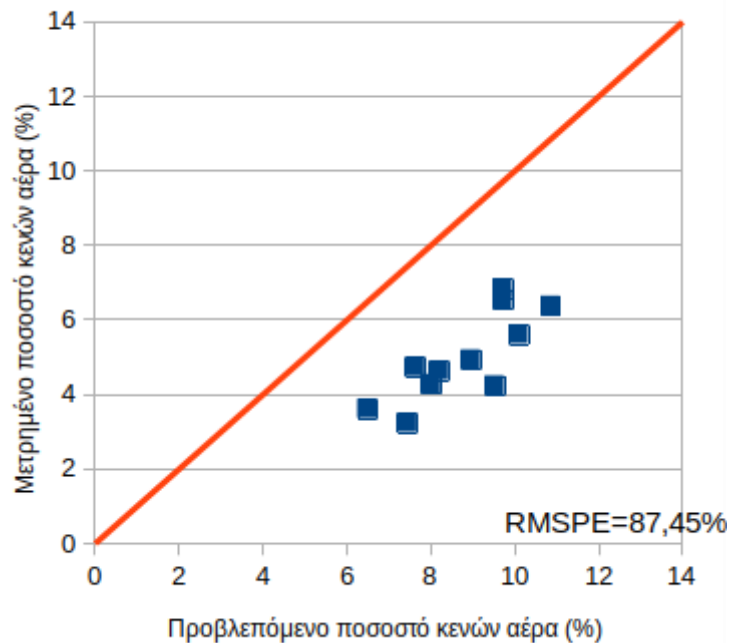
4.2.5. Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2018)

Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.7) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 3.6 – 5.7, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.7 – 22.4. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, αλλά με πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.



Εικόνα 4.20: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.7) για το σύνολο των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.20) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.7) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης, καθώς η τιμή 186,93% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.7) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Ειδικότερα, προβλέπει αρνητικές τιμές κενών αέρα για τα δεδομένα της αντιολισθηρής στρώσης, φαινόμενο πρακτικώς αδύνατο, που υποδεικνύει όμως ότι πιθανώς θα υπάρχει καλύτερη πρόβλεψη για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια, αγνοούνται τα δεδομένα μετρήσεων για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης και ακολουθεί σύγκριση των παραγόμενων και των προβλεπόμενων για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής στρώσης (Εικόνα 4.21).

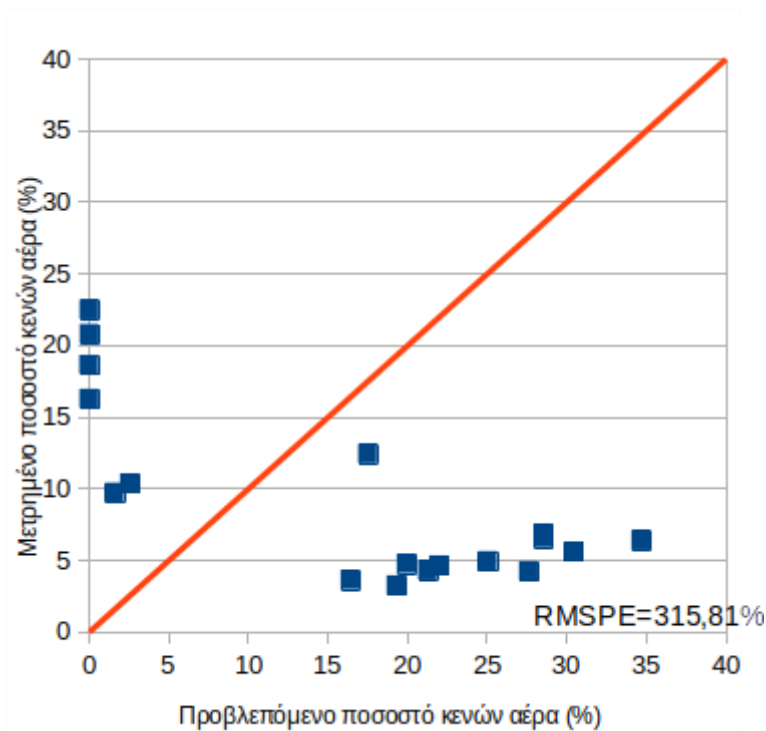


Εικόνα 4.21: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.7) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.21) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.7) επαληθεύεται εν μέρει για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Η τιμή 87,45% του RMSPE είναι μεν αρκετά υψηλή, αλλά, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 4.21), το μοντέλο υπερεκτιμά τις προβλεπόμενες τιμές κενών αέρα με μικρή τυπική απόκλιση σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μικρή τυπική απόκλιση στα σφάλματα μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών (τυπική απόκλιση σφαλμάτων = 0.7 και μέση τιμή μετρημένων = 5.0).

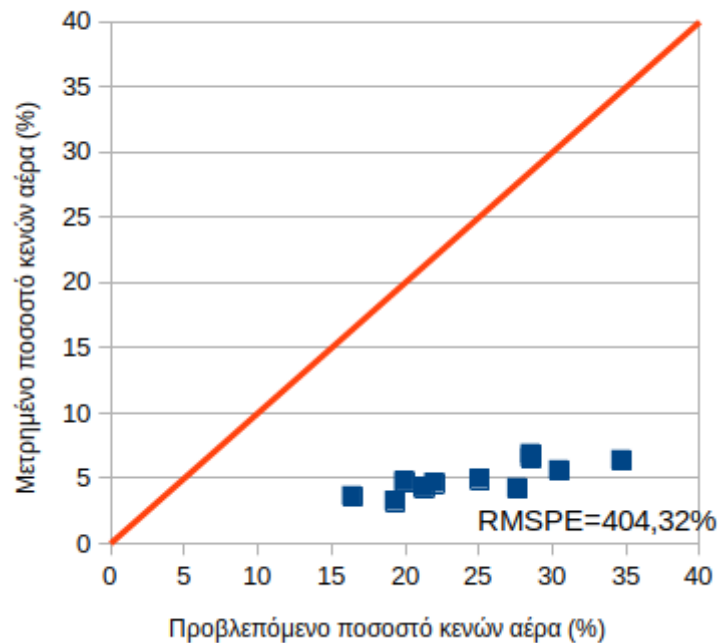
4.2.6. Διερεύνηση Σχέσης (Wilson et al., 2019)

Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.8) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 2.9 – 5.0, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 0.4 – 6.2. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, αλλά με πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.



Εικόνα 4.22: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.8) για το σύνολο των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.22) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.8) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων της αντιολισθηρής στρώσης, καθώς η τιμή 315,81% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.8) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Ειδικότερα, προβλέπει μηδενικές τιμές κενών αέρα για τα δεδομένα της αντιολισθηρής στρώσης, φαινόμενο πρακτικώς αδύνατο, που υποδεικνύει όμως ότι πιθανώς θα υπάρχει καλύτερη πρόβλεψη για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια, αγνοούνται τα δεδομένα μετρήσεων για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης και ακολουθεί σύγκριση των παραγόμενων και των προβλεπόμενων για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής στρώσης (Εικόνα 4.23).

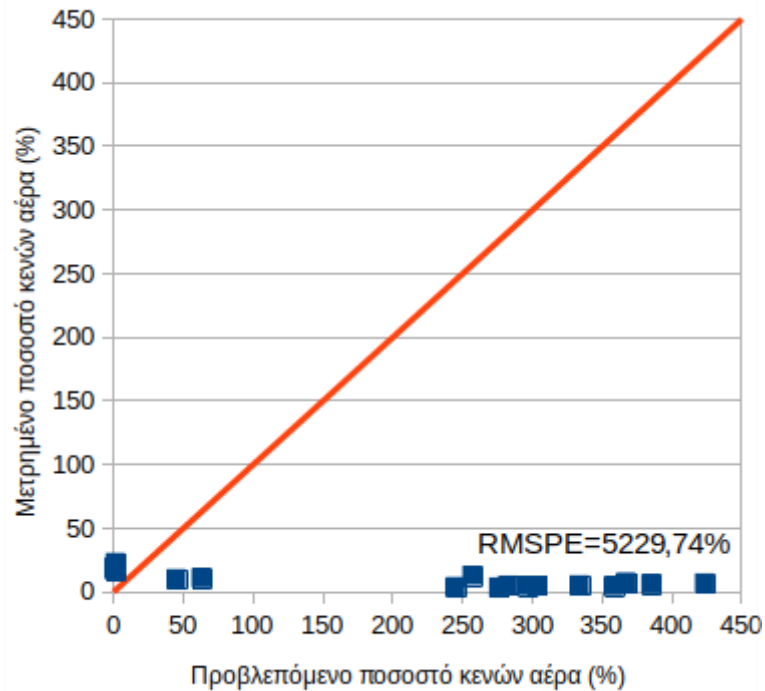


Εικόνα 4.23: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.8) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.23) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.8) δεν επαληθεύεται ικανοποιητικά για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης, καθώς η τιμή 404,32% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.8) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Βέβαια, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 4.23), το μοντέλο υπερεκτιμά τις προβλεπόμενες τιμές κενών αέρα, αλλά με όχι αρκετά μικρή τυπική απόκλιση σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγάλη τυπική απόκλιση στα σφάλματα μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών (τυπική απόκλιση σφαλμάτων = 3.9 και μέση τιμή μετρημένων = 5.0).

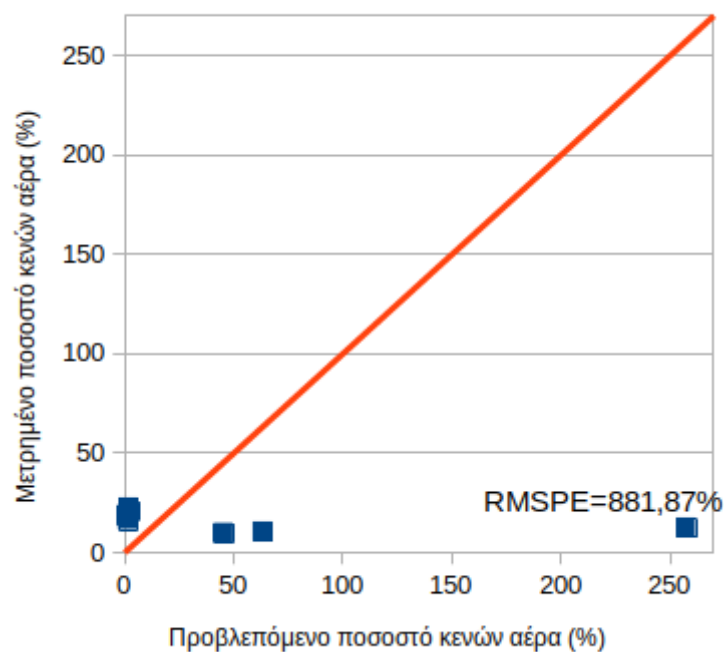
4.2.7. Διερεύνηση Σχέσης (Hoegh et al., 2019)

Υπενθυμίζεται πως για τη Σχέση (3.9) ισχύει ότι το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) ήταν 4.4 – 4.8, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 6.1 – 11.2. Τα παραπάνω εύρη τιμών των διηλεκτρικών σταθερών φαίνονται μη συμβατά με εκείνα των μετρήσεων του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ικανοποιητική επαλήθευση του εν λόγω μοντέλου για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς και με μικρή πιθανότητα επαλήθευσης για τα μίγματα μόνο της ισοπεδωτικής ή της αντιολισθηρής στρώσης.



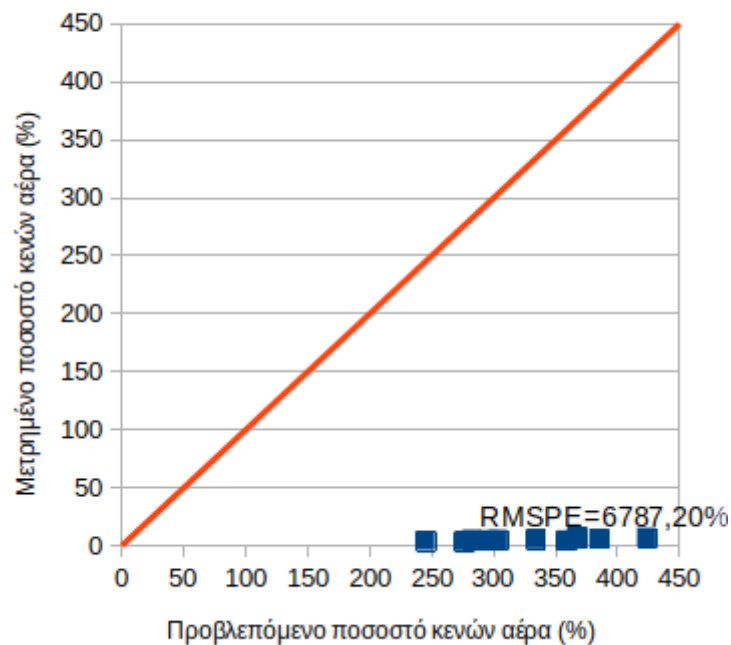
Εικόνα 4.24: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για το σύνολο των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.24) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (3.9) δεν επαληθεύεται για το σύνολο των μιγμάτων, καθώς η τιμή 5229,74% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.9) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για το σύνολο των μιγμάτων. Εν τέλει, φαίνεται όντως να μην είναι εμφανώς ευνοϊκότερα τα αποτελέσματα για τα δεδομένα μίας μόνο εκ των δύο στρώσεων, αλλά για λόγους εποπτείας παρατίθενται παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα για την ισοπεδωτική μόνο στρώση και για την αντιολισθηρή μόνο στρώση (Εικόνα 4.25 & Εικόνα 4.26).



Εικόνα 4.25: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.25) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.9) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης. Η τιμή 881,87% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.9) κρίνεται ακατάλληλη να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της αντιολισθηρής στρώσης.



Εικόνα 4.26: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (3.9) για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.26) προκύπτει πως όντως το μοντέλο της Σχέσης (3.9) δεν επαληθεύεται για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης. Η τιμή 6787,20% του RMSPE είναι υπερβολικά υψηλή. Συνεπώς, η Σχέση (3.9) κρίνεται ακατάλληλη για να προβλέψει τα κενά αέρος για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης.

4.3. Ανάπτυξη μοντέλου συσχέτισης κενών αέρα και διηλεκτρικών σταθερών

4.3.1. Γενικά

Σύμφωνα με το παραπάνω υποκεφάλαιο (4.2.), γίνεται εμφανές το γεγονός πως τα μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας για την πρόβλεψη των κενών αέρα βάσει των διηλεκτρικών σταθερών, παρά τις ικανοποιητικές τους συσχετίσεις, δεν επιφέρουν αξιόπιστη πρόβλεψη για τα συγκεκριμένα δεδομένα της παρούσας διπλωματικής. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια ακολουθεί διερεύνηση των μετρημένων δεδομένων της βάσης δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., ώστε να αναπτυχθεί ένα νέο μοντέλο, βαθμονομημένο σύμφωνα με τις ανάγκες και τα δεδομένα της παρούσας εργασίας.

Η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς και του ποσοστού των κενών πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης. Το σύνολο των μιγμάτων (πλήθος δοκιμίων = 60), αποτελείται από δοκίμια της ισοπεδωτικής στρώσης και από δοκίμια της αντιολισθητής στρώσης για κάθε μίγμα και κάθε ποσοστό περιεκτικότητας ασφάλτου. Από το σύνολο των μιγμάτων αυτών, πραγματοποιήθηκε ο εξής διαχωρισμός στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης. Επιλέχθηκε το 70% των μιγμάτων (ήτοι $70\% \cdot 60 = 42$), κατ' αναλογία στα μίγματα της κάθε στρώσης με σταθερή συχνότητα επιλογής μετρήσεων, από το οποίο εξάγεται το μοντέλο συσχέτισης που θα ακολουθήσει παρακάτω στο υποκεφάλαιο 4.3. (Σχέση (4.3)). Στη συνέχεια, το υπολειπόμενο 30% των μιγμάτων (ήτοι $30\% \cdot 60 = 18$) αξιοποιείται στο υποκεφάλαιο 4.3.3. για την στατιστική αξιολόγηση/επαλήθευση του μοντέλου της Σχέσης(4.3).

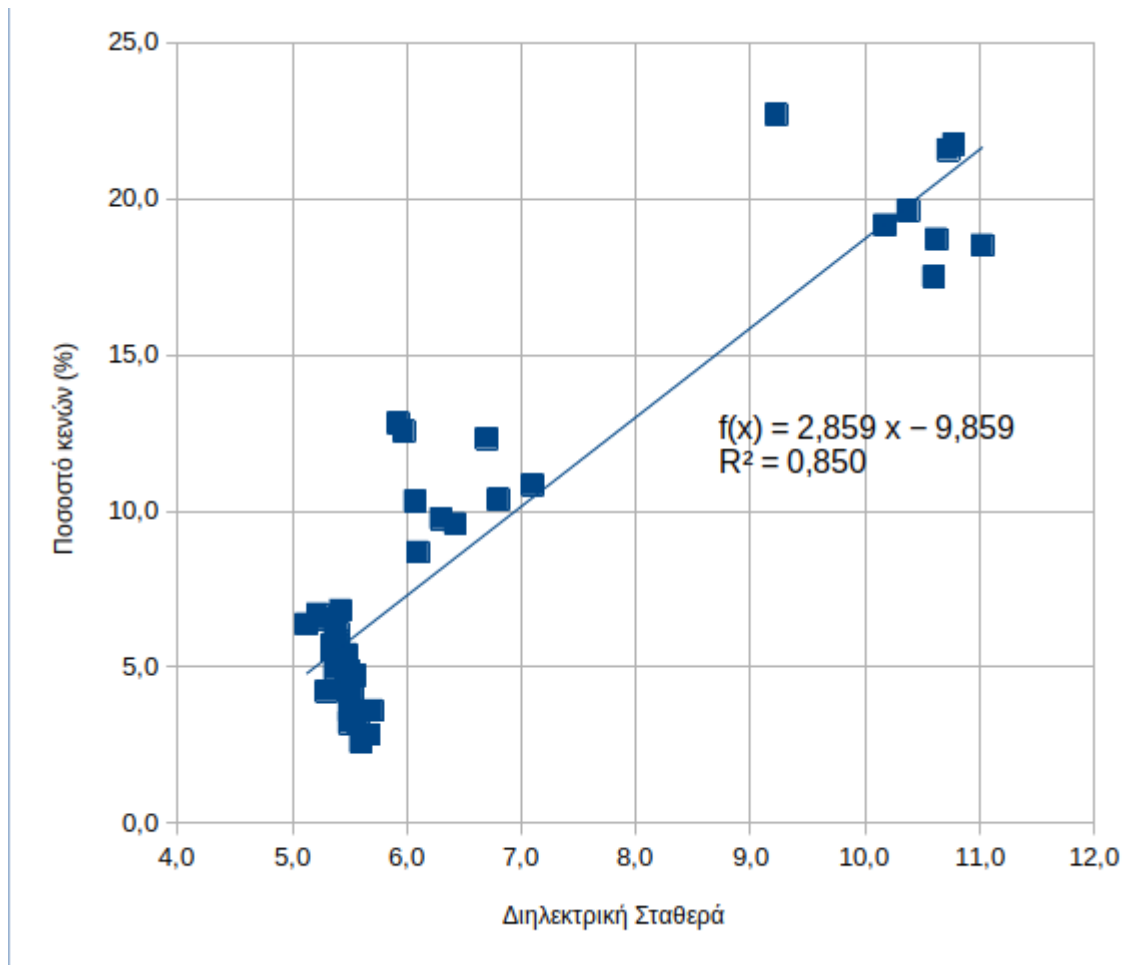
Όσον αφορά τα αποτελέσματα της συσχέτισης βάσει των μετρήσεων του εργαστηρίου, σημεία ενδιαφέροντος για την αξιολόγησή της αποτελούν:

- η συσχέτιση των υπό μελέτη μεγεθών (διηλεκτρική σταθερά και ποσοστό κενών αέρα) βάσει του συντελεστή συσχέτισης R^2 (με $R^2 = 1$ να εκφράζεται απόλυτη συσχέτιση και θεωρώντας εμπειρικά πως $R^2 > 0,7$ εκφράζει καλή συσχέτιση, $R^2 > 0,85$ εκφράζει ικανοποιητική συσχέτιση και $R^2 > 0,95$ εκφράζει άριστη συσχέτιση).
- το μέγεθος του δείγματος, καθώς συνηθίζεται να θεωρείται (εμπειρικά) στατιστικά σημαντικό κάποιο δείγμα με περισσότερες των 30 παρατηρήσεις.

Στο σημείο αυτό, ας σημειωθεί πως η προσέγγιση των δεδομένων δεν πραγματοποιήθηκε μόνο με γραμμική παλινδρόμηση, δοκιμάστηκαν κι άλλες βασικές μορφές παλινδρόμησης (εκθετική & λογαριθμική), αλλά εν τέλει η καλύτερη προσέγγιση σημειώθηκε με τη γραμμική παλινδρόμηση.

4.3.2. Προσδιορισμός παραμέτρων γραμμικής παλινδρόμησης

Στην Εικόνα 4.27 παρουσιάζεται η συσχέτιση για το 70% του συνόλου των δοκιμίων, όπως αυτή αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 4.27: Συσχέτιση κενών αέρα και διηλεκτρικής σταθεράς για το 70% του συνόλου των δοκιμίων

Το γραμμικό μοντέλο του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.27) περιγράφεται από τη σχέση:

$$V_m = 2.859 * \varepsilon_r - 9.859 \quad (4.3)$$

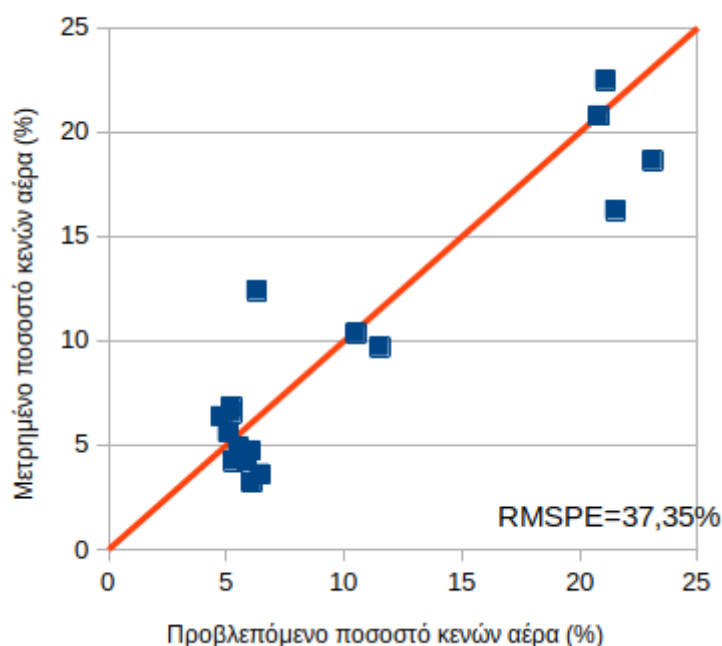
όπου:

- V_m : το ποσοστό κενών αέρα
- ε_r : η διηλεκτρική σταθερά

Για το παραπάνω μοντέλο (Σχέση (4.3)), ο συντελεστής συσχέτισης R^2 ισούται με 0.850, τιμή αρκετά ικανοποιητική και το πλήθος των δοκιμίων ισούται με 42 που είναι περισσότερα των 30. Σημειώνεται, επιπλέον, πως το εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ε_r) είναι 5.1 – 11.0, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.4 – 22.7. Υπενθυμίζεται πως το παρόν μοντέλο αφορά μίγματα και από τις δύο ασφαλικές στρώσεις (αντιολισθηρή και ισοπεδωτική).

4.3.3. Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης

Υπενθυμίζεται ότι για τη Σχέση (4.3) ισχύει ότι εύρος των τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ_r) είναι 5.1 – 11.0, ενώ το εύρος των τιμών του ποσοστού κενών (V_m) ήταν 2.4 – 22.7. Σημειώνεται πως μιας που τα δοκίμια διέφεραν αισθητά ανά μίγμα και ανά ποσοστό ασφάλτου, αναμένεται να υπάρξει κάποια επαλήθευση, αλλά πιθανώς όχι τόσο ικανοποιητική ώστε το μοντέλο της Σχέσης (4.3) να μπορεί να αξιοποιηθεί για την ακριβή πρόβλεψη των κενών αέρα σε τυχαίο δείγμα (ανεξαρτήτως σύστασης και λοιπών παραμέτρων).



Εικόνα 4.28: Επαλήθευση μοντέλου πρόβλεψης βάσει της Σχέσης (4.3) για το 30% του συνόλου των μιγμάτων

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος (Εικόνα 4.28) προκύπτει πως το μοντέλο της Σχέσης (4.3) επαληθεύεται εν μέρει για το 30% του συνόλου των μιγμάτων. Η τιμή 37,35% του RMSPE είναι μεν υψηλή, αλλά, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 4.28), το μοντέλο υπερεκτιμά συνήθως τις προβλεπόμενες τιμές κενών αέρα με μικρή διακύμανση σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται σχετικά μικρή τυπική απόκλιση στα σφάλματα μεταξύ των προβλεπόμενων και μετρημένων τιμών (τυπική απόκλιση σφαλμάτων = 1.4 και μέση τιμή μετρημένων = 9.4).

5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο αντικείμενο τη διερεύνηση της συσχέτισης του ποσοστού των κενών αέρα και της διηλεκτρικής σταθεράς συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος. Στόχος υπήρξε η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τη γρήγορη και αξιόπιστη εκτίμηση του ποσοστού των κενών αέρα του ασφαλτομίγματος βάσει των μετρήσεων της διηλεκτρικής σταθεράς.

Από την επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι διεθνείς σχέσεις που έχουν αναπτυχθεί και εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, δεν μπορούν, στην πλειοψηφία τους, να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ του ποσοστού κενών αέρα και της διηλεκτρικής σταθεράς, για τα ασφαλτομίγματα που θεωρήθηκαν στην παρούσα διερεύνηση. Μέτρια προσαρμογή και μόνο για τα μίγματα της ισοπεδωτικής στρώσης έχουν δύο από τις έξι σχέσεις. Η μη καλή προσαρμογή των διεθνών σχέσεων ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι, για την ανάπτυξή τους αξιοποιήθηκαν κυρίως επιτόπου μετρήσεις του γεωφυσικού συστήματος GPR και όχι εργαστηριακά δεδομένα. Επίσης, ενδέχεται η ογκομετρική σύσταση του ασφαλτομίγματος (ποσοστό ασφάλτου και αδρανών), το είδος των αδρανών καθώς και οι επιτόπου συνθήκες (ποσοστό υγρασίας), να σχετίζονται με την μη επαλήθευση των υπόψη σχέσεων.
- Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά σε μίγματα τόσο αντιολισθηρές όσο και ισοπεδωτικής στρώσης. Η σχέση είναι γραμμικής μορφής και η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού ($R^2=0.850$) υποδεικνύει την ύπαρξη ισχυρής συσχέτισης μεταξύ του ποσοστού κενών αέρα και της διηλεκτρικής σταθεράς.
- Κατά την επαλήθευση του μοντέλου, αρχικά παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση των τιμών του ποσοστού κενών αέρα. Η τιμή του RMSPE (37,35%) κρίνεται μεν υψηλή, ωστόσο παρατηρείται σχετικά μικρή τυπική απόκλιση σφαλμάτων. Το παραπάνω γεγονός, δύναται –υπό περαιτέρω έρευνα– να καταστήσει το μοντέλο ικανό να προσφέρει μία αρχική και προσεγγιστική εκτίμηση για τα κενά αέρα βάσει των μετρημένων τιμών της διηλεκτρικής σταθεράς.

Αντικείμενο για περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να αποτελέσει η επίδραση επιπλέον παραμέτρων στη διηλεκτρική σταθερά των ασφαλτομιγμάτων. Τέτοιες παραμέτρους αποτελούν το ποσοστό της ασφάλτου, το ποσοστό των αδρανών, και το είδος αδρανών. Λαμβάνοντας υπόψιν τις προαναφερόμενες παραμέτρους, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν νέα μοντέλα συσχέτισης.

Τέλος, προτείνεται η διεξαγωγή αντίστοιχου πειράματος αλλά με μετρήσεις πεδίου με χρήση GPR, καθώς τα αποτελέσματα δύναται να διαφέρουν από εκείνα των μετρήσεων εργαστηρίου με χρήση Percometer.

6. Βιβλιογραφικές αναφορές

ΕΛΟΤ 2009α (2009), Αντιολισθηρή Στρώση Ασφαλτικού Σκυροδέματος. Τ.Π. 1501-05-03-12-01:2009.

ΕΛΟΤ 2009β, (2009), Ασφαλικές Στρώσεις Κλειστού Τύπου. Τ.Π. 1501-05-03-11-04:2009.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2007) Accuracy of pavement thickness estimation using different ground penetrating radar analysis approaches.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2011) Assessment of HMA Air-Voids and Stiffness Based on Material Dielectric Properties, Road Materials and Pavement Design, Vol. 12, No. 1/2011, pp. 217 - 226.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2013) Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2018a) Σημειώσεις για το μάθημα “Κατασκευή Οδών”, Ενότητα: Υλικά & Δομή. Αθήνα: Ε.Μ.Π.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2018b) Σημειώσεις για το μάθημα “Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων”. Αθήνα: Ε.Μ.Π.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2020) Σημειώσεις για το μάθημα “Αξιολόγηση και Συντήρηση Οδοστρωμάτων”.

Πρότυπος Τεχνική Προδιαγραφή (1966), Ασφαλικό Σκυρόδεμα Α 265.

Al-Qadi, I., Leng, Z. & Larkin, A. (2011) In-place hot mix asphalt density estimation using ground penetrating radar.

ASTM (2011α), Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. Road and Paving Materials; Vehicle - Pavement Systems, D1188, Vol. 04.03.

ASTM (2011β), Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, D2041/D2041M, Vol. 04.03.

ASTM (2011γ) Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, D3203-05, Vol. 04.03.

ASTM (2011δ) Standard Test Method for Thickness or Height of Compacted Bituminous Paving Mixture Specimens. Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, D3549-03, Vol. 04.03.

ASTM (2011ε) Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. Road and Paving Materials; Vehicle – Pavement Systems, D2726, Vol. 04.03.

Baltrusaitis, A., Vaitkus, A. & Smirnovs, J. (2020) Asphalt layer density and air voids content: GPR and laboratory testing data reliance.

Berthalot, B., Podborochynski, D., Saarenketo, T., Marjerison, B. & Prang, C. (2010) Ground-penetrating radar evaluation of moisture and frost across typical Saskatchewan road soils.

Chen, D., Hong, F., Zhou, W. & Ying, P. (2014) Estimating the hotmix asphalt air voids from ground penetrating radar.

EN 13242:2002 (2002), Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction.

EN 2007 (2007), Ασφαλτικά Μίγματα - Μέθοδοι Δοκιμής Θερμού Ασφαλομίγματος – Μέρος 6ο: Προσδιορισμός της Φαινόμενης Πυκνότητας Ασφαλτικών Δοκιμίων. EN 12697-6:2003+A1:2007.

Evans, R., Frost M. Stonecliffe-Jones, M. & Dixon, N. (2006) Assessment of the in-situ dielectric constant of bituminous pavement materials.

Hoegh, K., Dai, S., Steiner, T. & Khazanovich, L. (2018) Enhanced model for continuous dielectric-based asphalt compaction evaluation.

Hoegh, K., Khazanovich, L., Dai, S. & Yu, T. (2015) Evaluating asphalt concrete air void variation via GPR antenna array data.

Hoegh, K., Roberts, R., Dai, S. & Teshale, Z. (2019) Toward core-free pavement compaction evaluation: an innovative method relating asphalt permittivity to density.

Mara Nord Project, in cooperation with European Commission, Finnish Transport Agency & Swedish Transport Administration (2011) Recommendations for guidelines for the use of GPR in asphalt air voids content measurement.

Martinez, A. & Byrnes, A. (2002) Modeling dielectric-constant values of geologic materials: an aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation.

Pellinen, T., Eskelinen, P., Hartikainen, A., Huuskonen-Snicker, E. & Eskelinen, J. (2016) Assessment of air void content of asphalt using dielectric constant measurements by GPR and with microwave radar.

Pellinen, T., Eskelinen, P., Huuskonen-Snicker, E. & Hadikainen, A. (2015) Assessment of air void content of asphalt using dielectric constant measurements by GPR and with VNA.

Porubiaková, A. & Komačka, J. (2015) A comparison of dielectric constants of various asphalts calculated from time intervals and amplitudes.

Saarenketo, T. (2006) Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys.

Saarenketo, T. & Scullion, T. (1999) Road evaluation with ground penetrating radar.

Scullion, T. & Saatenketo, T. (2001) Use of ground penetrating radar for site investigation of low-volume roadways and design recommendations.

Wallia, A., Rastogi, R., Kumar, P. & Jain, S. (2015) Reviewing methods for determination of dielectric constant required to calibrate GPR study for asphalt layers.

Wilson, B., Sebesta, S. & Scullion, T. (2019) Evaluation of the rolling density meter for rapid continuous measurement of asphalt mixture density.