



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΝΘΕΣΗΣ  
ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ MARSHALL ΚΑΙ SUPERPAVE**



**ΜΟΥΖΑΚΗΣ ΠΟΛΥΚΑΡΠΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

**Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Ιούλιος 2022**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας σηματοδοτείται η περάτωση του κύκλου των προπτυχιακών μου σπουδών και αισθάνομαι την υποχρέωση να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους ανθρώπους που υπήρξαν αρωγοί σε όλη αυτή τη διαδρομή.*

*Καταρχάς, οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας, κ. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη της με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος. Η άριστη καθοδήγησή της, η αδιάκοπη ενασχόληση και διαθεσιμότητά της μαζί με τις πολύτιμες συμβουλές της και την ευχάριστη συνεργασία συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.*

*Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής για τις γενικότερες γνώσεις και συμβουλές που μου μετέδωσαν καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου.*

*Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι αποτέλεσαν σημαντικό στήριγμα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και με ενθάρρυναν σε όλη αυτή την προσπάθεια.*

*Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου και τον αδερφό μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια, την υπομονή τους και την ανεκτίμητη υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.*

*Αθήνα, Ιούλιος 2022*

*Μουζάκης Πολύκαρπος Αλέξανδρος*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο σχεδιασμού των ασφαλικών στρώσεων ενός σύγχρονου οδοστρώματος, είναι διαρκής η ανάγκη για έρευνα και ανάπτυξη ασφαλτομιγμάτων υψηλών προδιαγραφών. Οι σημαντικές αυξήσεις και μεταβολές των κυκλοφοριακών και κλιματικών συνθηκών, που επιφέρουν την εμφάνιση σημαντικών φθορών στο οδόστρωμα, υποδεικνύουν την ισχυρή αναγκαιότητα παροχής ενός ποιοτικού, οικονομικού και ανθεκτικού ασφαλτομίγματος. Εδώ και πολλές δεκαετίες, η πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων είναι η Marshall. Βέβαια, ήδη από το 1990 και έπειτα, έχει εισαχθεί στον αντίποδα αυτής η μέθοδος Superpave, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα σχεδιασμού ενός ασφαλτομίγματος υψηλών προδιαγραφών, το οποίο λαμβάνει υπόψη σημαντικά τις κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες της περιοχής του έργου. Με δεδομένα τα ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall και Superpave, στο πλαίσιο σχεδιασμού θερμών ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης. Η διερεύνηση αυτή, επικεντρώνεται στην διαφοροποίηση της εργαστηριακής διαδικασίας και κριτηρίων που ορίζει η κάθε μέθοδος και στην αξιοποίηση, επεξεργασία και στατιστική ανάλυση στοιχείων από βάση δεδομένων που αναπτύσσεται από μετρήσεις συναφών ερευνών. Το κύριο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι με τη μέθοδο Superpave απαιτείται χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου συγκριτικά με τη Marshall. Με άλλα λόγια, η μέθοδος Superpave φαίνεται να οδηγεί σε οικονομικότερες λύσεις παραγωγής ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση, σε βελτιστοποίηση της κατασκευής οδοστρωμάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** ασφαλικές στρώσεις, ασφαλτόμιγμα, μελέτης σύνθεσης, Marshall, Superpave, ανθεκτικότητα, υψηλές προδιαγραφές, στατιστική ανάλυση, βάση δεδομένων, συγκριτική αξιολόγηση, οικονομία

## **ABSTRACT**

As part of the design of asphalt layers of a modern road pavement, there is a constant need for research and development of asphalt mixtures with high standards, which is considered absolutely necessary. The significant increase and changes in traffic and climatic conditions, which cause severe damage to the pavement, show the urgent need to provide a high quality, economical and durable asphalt mix. For many decades, the most widely used and applied asphalt mix design method has been the Marshall method. Of course, the Superpave method was introduced as early as 1990, providing the opportunity to develop a high - quality asphalt mix that takes into account the traffic and climatic conditions of the project area. With this background, the subject of this thesis is the comparative evaluation of the methods of composition of asphalt mixtures based on Marshall and Superpave in the context of the design of dense graded hot mix asphalt. This research focuses on the differentiation of the laboratory procedure and the criteria defined by each method, as well as the use, processing and statistical analysis of a database developed from relevant research data. The main conclusion is that the Superpave method results in lower asphalt content compared to the Marshall method. In other words, Superpave seems to lead to more economical asphalt mixing solutions and, moreover, to the optimization of road construction.

**Key words:** asphalt layers, asphalt mix, composition study, Marshall, Superpave, durability, high standards, statistical analysis, database, comparative evaluation, economy

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική Ανασκόπηση .....	1
1.2 Στόχος και Μεθοδολογία.....	4
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας .....	4
<b>2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ MARSHALL .....</b>	<b>6</b>
2.1 Γενικά Στοιχεία.....	6
2.2 Συλλογή Υλικών .....	7
2.2.1 Αδρανή.....	7
2.2.2 Άσφαλτος .....	9
2.3 Προετοιμασία Δοκιμίων και Προσδιορισμός Ιδιοτήτων .....	11
2.3.1 Παρασκευή ασφαλτομίγματος και συμπίκνωση .....	11
2.3.2 Ευστάθεια και υποχώρηση.....	18
2.3.3 Ογκομετρικά στοιχεία.....	21
2.4 Προσδιορισμός Βέλτιστης Περιεκτικότητας σε Άσφαλτο.....	24
2.4.1 Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων .....	24
2.4.2 Χαρακτηριστικά κριτήρια.....	26
<b>3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ SUPERPAVE .....</b>	<b>28</b>
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	28
3.2 Συλλογή Υλικών .....	30
3.2.1 Αδρανή.....	30
3.2.2 Άσφαλτος .....	35
3.3 Δοκιμαστική Μείξη Σχεδιασμού Ασφαλτομίγματος.....	39
3.3.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	39
3.3.2 Εκτίμηση αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου .....	41
3.3.3 Συμπύκνωση κατά Superpave .....	43
3.3.4 Ογκομετρικά στοιχεία και έλεγχος προδιαγραφών .....	45
3.4 Προσδιορισμός Βέλτιστης Περιεκτικότητας σε Άσφαλτο.....	47
3.4.1 Επίπεδο σχεδιασμού 1 .....	47
3.4.2 Επίπεδα σχεδιασμού 2 και 3 .....	48

3.5 Αξιολόγηση Ευαισθησίας σε Υγρασία .....	49
<b>4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MARSHALL - SUPERPAVE .....</b>	<b>51</b>
4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά .....	51
4.2 Παράθεση Στοιχείων Συναφών Ερευνών.....	55
<b>5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΑΦΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ.....</b>	<b>67</b>
5.1 Ανάπτυξη Βάσης Δεδομένων .....	67
5.2 Μεθοδολογία Στατιστικής Ανάλυσης .....	70
5.3 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων.....	74
5.3.1 Ποσοστό ασφάλτου .....	74
5.3.2 Ποσοστό VMA.....	76
5.3.3 Ποσοστό VFA .....	78
5.3.4 Ευστάθεια.....	79
5.3.5 Έλεγχος υδροφιλίας (δείκτης TSR).....	80
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>81</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>84</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος αδρανών με οριακές καμπύλες.....	9
Εικόνα 2.2: Συσκευή δοκιμής διείσδυσης (Pavement Interactive, n.d.) .....	10
Εικόνα 2.3: Γράφημα θερμοκρασίας ανάμειξης και συμπύκνωσης ασφαλτομίγματος (Shrestha, 2018) .....	11
Εικόνα 2.4: Στάδια ανάμειξης αδρανών -ασφάλτου (Xiao, et al., 2011) .....	13
Εικόνα 2.5: Συσκευή κρουστικής συμπύκνωσης Marshall (Department of Civil Engineering - The University of Memphis, n.d.).....	14
Εικόνα 2.6: Χαλαρό και συμπυκνωμένο ασφαλτόμγμα (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	17
Εικόνα 2.7: Λουτρό ύδατος (Λοΐζος & Πλατή, 2020) .....	18
Εικόνα 2.8: Ευστάθεια και παραμόρφωση (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	19
Εικόνα 2.9: Ογκομετρική συσχέτιση αδρανών, αέρα και ασφάλτου (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	21
Εικόνα 2.10: Ογκομετρικές παράμετροι ασφαλτομίγματος (Πλατή, 2014).....	24
Εικόνα 2.11: Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων .....	25
Εικόνα 3.1: Γωνιώδη (αριστερά) και στρογγυλεμένα (δεξιά) αδρανή (Asphalt Institute, 2014).....	31
Εικόνα 3.2: Αδρανή με θραυσμένα σημεία (Hossain, et al., 2018) .....	32
Εικόνα 3.3: Συσκευή προσδιορισμού τιμής ισοδύναμου άμμου (Λοΐζος & Πλατή, 2020) .....	33
Εικόνα 3.4: Συσκευή Los Angeles (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	34
Εικόνα 3.5: Συσκευή RTFO (Hossain, et al., 2018) .....	36
Εικόνα 3.6: Συσκευή PAV (Vialab, n.d.) .....	36
Εικόνα 3.7: Συσκευή DSR (Hossain, et al., 2018), (Khan, 2008) .....	37
Εικόνα 3.8: Συσκευή RV (Hossain, et al., 2018).....	37
Εικόνα 3.9: Συσκευή BBR (Mastrad Limited, n.d.).....	37
Εικόνα 3.10: Κοκκομετρική διαβάθμιση με τα σημεία ελέγχου και την απαγορευμένη ζώνη (Asphalt Institute, 2014) .....	40
Εικόνα 3.11: Συσκευή γυροσκοπικής Συμπύκνωσης SGC (Matest-Innovative global manufacturer, n.d.) .....	43
Εικόνα 3.12: Ρύθμιση συσκευής SGC (Asphalt Institute, 2014).....	44
Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικά γραφήματα για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου (Asphalt Institute, 2014) .....	48
Εικόνα 3.14: Έλεγχος σε εφελκυστική αντοχή (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	50
Εικόνα 4.1: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Kanneganti, 2002).....	58
Εικόνα 4.2: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Habib, et al., 1998).....	61
Εικόνα 4.3: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Liang, 2008) .....	63



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα ποσοστού ασφάλτου ανά τύπο συνδετικού υλικού (Memon, 2006).....	64
Εικόνα 4.5: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Zaniewski & Nelson, 2003)..	66
Εικόνα 5.1: Ποσοστό ασφάλτου Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών .....	67
Εικόνα 5.2: Ποσοστό VMA Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών .....	68
Εικόνα 5.3: Ποσοστό VFA Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών .....	68
Εικόνα 5.4: Τιμή ευστάθειας Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών .....	68
Εικόνα 5.5: Τιμή δείκτη TSR Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών.....	69
Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικά σημεία θηκογράμματος-box plot (Τσιπλακίδης, n.d.) .....	71
Εικόνα 5.7: Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού ασφάλτου μεθόδων Marshall-Superpave .....	74
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα διασποράς τιμών ποσοστού ασφάλτου μεθόδων Marshall-Superpave .....	74
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού VMA μεθόδων Marshall-Superpave	76
Εικόνα 5.10: Διάγραμμα διασποράς τιμών VMA μεθόδων Marshall-Superpave .....	76
Εικόνα 5.11: Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού VFA μεθόδων Marshall-Superpave .....	78
Εικόνα 5.12: Διάγραμμα διασποράς τιμών VFA μεθόδων Marshall-Superpave .....	78

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΕΤΕΠ (Λοΐζος & Πλατή, 2020).....	8
Πίνακας 2.2: Αριθμός κτύπων βάσει συνθηκών κυκλοφορίας (Roberts, et al., 1991) .....	14
Πίνακας 2.3: Συντελεστές διόρθωσης τιμών ευστάθειας (Shrestha, 2018).....	20
Πίνακας 2.4: Οριακές απαιτήσεις χαρακτηριστικών κριτηρίων ασφαλτομιγμάτων (Asphalt Institute, 2014).....	26
Πίνακας 2.5: Κριτήρια ελαχίστου ποσοστού κενών στο σκελετό των αδρανών (VMA) (Asphalt Institute, 2014).....	27
Πίνακας 2.6: Ελάχιστο ποσοστό ασφαλικού συνδετικού υλικού βάσει μεγίστου ονομαστικού μεγέθους κόκκου αδρανών (Shrestha, 2018).....	27
Πίνακας 3.1: Προτεινόμενο μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών ανά τύπο ασφαλτικής στρώσης (Cominsky, et al., 1994) .....	30
Πίνακας 3.2: Έλεγχοι ιδιοτήτων αδρανών κατά Superpave (Harman, et al., 1999).....	31
Πίνακας 3.3: Ιδιότητες συναίνεσης αδρανών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014).....	33
Πίνακας 3.4: Ιδιότητες πηγής προέλευσης αδρανών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014).....	35
Πίνακας 3.5: Προδιαγραφές συστήματος Performance Grade ασφάλτου κατά Superpave (Cominsky, et al., 1994) .....	38
Πίνακας 3.6: Προσαρμογή στο βαθμό PG X μεγίστης θερμοκρασίας (Hossain, et al., 2018).....	39
Πίνακας 3.7: Κριτήρια σημείων ελέγχου και απαγορευμένης ζώνης κοκκομετρικής διαβάθμισης κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014).....	41
Πίνακας 3.8: Τιμές $N_{ini}$ , $N_{des}$ , $N_{max}$ (Cominsky, et al., 1994).....	44
Πίνακας 3.9: Κριτήρια προδιαγραφών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014).....	47
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά σημεία συγκριτικής αξιολόγησης μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall και Superpave .....	52
Πίνακας 4.2: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Asi, 2007) .....	56
Πίνακας 4.3: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Jitsangiam, et al., 2013) .....	57
Πίνακας 4.4: Τιμές ογκομετρικών στοιχείων για κάθε μείγμα κατά (Maupin, 1998) .....	60
Πίνακας 4.5: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Hanna & Shamseen, 2020).....	62
Πίνακας 4.6: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Selvam, et al., 2016) .....	64
Πίνακας 5.1: Μέση διαφορά τιμών εργαστηριακών αποτελεσμάτων μεθόδων Marshall και Superpave.....	70
Πίνακας 5.2: Ερμηνεία τιμών συντελεστή προσδιορισμού $R^2$ .....	72
Πίνακας 5.3: Τιμή $t_{κρίσιμη}$ (Γεωργοπούλου, 2013).....	73

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενική Ανασκόπηση

Οι ασφαλικές στρώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε ασφαλική βάση, ισοπεδωτική, συνδετική και επιφανειακή στρώση, αποτελούν το ανώτερο βασικό τμήμα της δομής ενός οδοστρώματος, στο οποίο συντελείται η κίνηση των οχημάτων προκειμένου να καλυφθούν σημαντικές ανθρώπινες ανάγκες, όπως είναι η δυνατότητα μετακινήσεων και μεταφοράς αγαθών και προϊόντων. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι ένα ανθεκτικό ασφαλτόμιγμα με καλή αντιολισθητική ικανότητα και ποιότητα κύλισης, είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την ομαλή λειτουργία των συγκοινωνιακών και οικονομικών συνθηκών μιας χώρας, προσφέροντας παράλληλα ασφάλεια και ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης στους χρήστες μιας οδού ή ενός οδικού δικτύου.

Βέβαια στη σύγχρονη εποχή, οι διαρκώς αυξανόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες, οι ακραίες κλιματικές μεταβολές και η τεράστια τεχνολογική εξέλιξη, με κυρίαρχη την τάση της ηλεκτροκίνησης, επηρεάζουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος μέσω διαφόρων φθορών και αστοχιών που πραγματοποιούνται. Οι ασφαλικές στρώσεις των οδοστρωμάτων, υπό την επίδραση των βαρέων αξονικών φορτίων της κυκλοφορίας, υπόκεινται σε συνεχή καταπόνηση προκαλώντας σημαντικές αστοχίες, οι οποίες εμφανίζονται με τη μορφή ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης και παραμενουσών παραμορφώσεων (Λοΐζος & Πλατή, 2021). Συνεπώς, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η **έρευνα και ανάπτυξη ασφαλτομιγμάτων** υψηλών προδιαγραφών, βελτιώνοντας τη συμπεριφορά τους και λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της βιωσιμότητας. Όπως υποστηρίζεται από τους (Yoder & Witczak, 1975), ένα ασφαλτόμιγμα, το οποίο συνθέτεται από δύο βασικά συστατικά, τα αδρανή (κυρίως ελαστική συμπεριφορά) και το ασφαλικό συνδετικό υλικό (ιξωδοελαστική συμπεριφορά), επιβάλλεται να θέτει ως κύριο γνώμονα τα παρακάτω σημαντικά χαρακτηριστικά:

- αντίσταση σε παραμένουσα παραμόρφωση
- ανθεκτικότητα σε ρηγμάτωση λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης (κόπωση)
- ανθεκτικότητα σε ρηγμάτωση λόγω χαμηλής θερμοκρασίας (θερμική επίδραση)
- συνεισφορά στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος
- υδατοστεγανότητα στις υποκείμενες στρώσεις
- επιτυχή εργασιμότητα και συμπύκνωση στο πεδίο
- οικονομία στη σύνθεση
- εφικτή και οικονομική συντήρηση

Ως **μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων** ορίζεται η διαδικασία βάσει της οποίας προσδιορίζονται οι αναλογίες των αδρανών (χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, παιπάλη) και του ασφαλτικού συνδετικού υλικού, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς του, επιτυγχάνοντας το επιθυμητό επίπεδο προδιαγραφών του έργου. Αντικειμενικός σκοπός μιας μελέτης σύνθεσης είναι η παραγωγή ενός βέλτιστου και οικονομικού μείγματος αδρανών και ασφάλτου (ασφαλτομίγματος), το οποίο μέσω της ισχυρής ανθεκτικότητάς του, της εργασιμότητας και των επαρκών κενών αέρα θα ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, των φορτίων και της συμπύκνωσης (Jagat, n.d.).

Σύμφωνα με τους (Λοΐζος & Πλατή, 2019) η γενική διαδικασία σχεδιασμού περιλαμβάνει **τρία στάδια**:

Στάδιο 1: Επιλογή αδρανών υλικών (τυποποιημένες δοκιμές και απαιτήσεις προδιαγραφών ως προς τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις)

Στάδιο 2: Επιλογή ασφάλτου (τύπος ασφάλτου και δοκιμές ελέγχου)

Στάδιο 3: Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου:

- Δοκιμαστικά μείγματα (κοινής κοκκομετρικής διαβάθμισης) με διαφορετικές περιεκτικότητες σε άσφαλτο
- Συμπύκνωση δοκιμαστικών μειγμάτων στο εργαστήριο
- Εργαστηριακές δοκιμές για προσδιορισμό βασικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος (χωρίς να γίνεται η θεώρηση ότι χαρακτηρίζουν επαρκώς τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε επιτόπου συνθήκες)
- Επιλογή περιεκτικότητας ασφάλτου για την οποία ικανοποιούνται καλύτερα οι στόχοι σχεδιασμού

Όσον αφορά την κατηγορία παραγωγής **θερμών ασφαλτομιγμάτων** (Hot Mix Asphalt-HMA) πυκνής σύνθεσης (dense graded), συναντώνται αρκετές μέθοδοι σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, οι οποίες διαφέρουν ως προς το μέγεθος του δείγματος δοκιμής, τον τρόπο συμπύκνωσης και τις προδιαγραφές που ορίζουν (Mathew, n.d.). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι σύνθεσης είναι η **Marshall** και η **Superpave** (Superior Performing Asphalt Pavements). Η πρώτη είναι μία εμπειρική - πειραματική μέθοδος, όπως και η μέθοδος Hveem (Sadid, et al., 2010), η οποία θεωρείται η πιο διαδεδομένη και εφαρμόσιμη μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων παγκοσμίως, όπως και στη χώρα μας. Όμως, η μέθοδος Marshall ως πειραματική βασίζεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους. Στον αντίποδα, η μέθοδος Superpave, αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά της καλύτερης τεχνολογίας ασφαλτομιγμάτων, έρχεται να καλύψει τις ελλείψεις της μεθόδου Marshall, θέτοντας αυστηρότερα κριτήρια ως προς την εργαστηριακή διαδικασία και περισσότερους ελέγχους για την αποτροπή βασικών μορφών αστοχίας.

Η μέθοδος **Marshall**, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί μία εμπειρική - πειραματική μέθοδο, η οποία διακρίνεται για την απλότητά της και το χαμηλότερο κόστος εξοπλισμού που απαιτεί. Η μεθοδολογία της στηρίζεται στα τρία στάδια της γενικής διαδικασίας σχεδιασμού, τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, και εστιάζει στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου βάσει των ογκομετρικών στοιχείων και των τιμών ευστάθειας και υποχώρησης. Ένα σημαντικό θετικό της στοιχείο, θεωρείται το γεγονός ότι η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, που παράγονται βάσει αυτής, είναι αρκετά γνώριμη και κατάλληλη για τα τοπικά υλικά και τις κλιματικές και κυκλοφοριακές συνθήκες που επικρατούν στην αντίστοιχη περιοχή (Habib, et al., 1998). Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά της, έχουν παρατηρηθεί αρκετές διαφοροποιήσεις σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος σε επί τόπου συνθήκες, κατά την κατασκευή και τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος, υποστηρίζοντας, επομένως, τον χαρακτηρισμό της ως παρωχημένη (Jitsangiam, et al., 2013), (Kanneganti, 2002).

Υπό το πρίσμα των ελλείψεων της μεθόδου σχεδιασμού κατά Marshall, αναπτύχθηκε η μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά **Superpave**, μία αναλυτική - υπολογιστική μέθοδος με εμπειρικά στοιχεία. Η αναγκαιότητα υψηλής ποιότητας οδικού δικτύου βάσει της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης των μετακινήσεων έστρεψε τους μηχανικούς οδοστρώματων στην εφαρμογή της Superpave. Συγκριτικά με τη μέθοδο Marshall, εντοπίζονται σημαντικές διαφορές και στα τρία βασικά βήματα μίας μελέτης σύνθεσης (επιλογή αδρανών, επιλογή ασφάλτου, προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου). Αυτό γίνεται εμφανές μέσα από τη συνεχή αξιολόγηση όλων των υλικών που ορίζει η Superpave, λαμβάνοντας υπόψη κλιματικές και κυκλοφοριακές συνθήκες του υπό μελέτη έργου. Επίσης, η τελική επιλογή του ποσοστού ασφάλτου στηρίζεται σε πρόσθετες εμπειρικές δοκιμές σχετικά με τις τρεις σημαντικότερες μορφές αστοχίας οδοστρώματος που έχουν συγκεντρώσει την προσοχή, οι οποίες είναι η μόνιμη παραμόρφωση, η ρηγμάτωση λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης (κόπωση) και η ρηγμάτωση λόγω χαμηλής θερμοκρασίας (θερμική επίδραση) (Özdemir, et al., 2019).

Γίνεται εύκολα αντιληπτό, το έντονο ενδιαφέρον που επικρατεί στη διεθνή βιβλιογραφία για τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, Marshall και Superpave, μέσα από σχετικές έρευνες και εργαστηριακές δοκιμές που έχουν εκπονηθεί από πλήθος πανεπιστημίων και ερευνητών παγκοσμίως. Αξιοσημείωτη είναι η διεθνής ανησυχία και οι ενδιαφέροντες που παρουσιάζουν αρκετές χώρες σε ό,τι αφορά την υλοποίηση της μεθόδου Superpave σε οδοστρώματα οδών και αεροδρομίων, με στόχο την αξιολόγηση του αντίκτυπου της στην οικονομία και την απόδοση αυτών των έργων.

## 1.2 Στόχος και Μεθοδολογία

Με βάση τα ανωτέρω, ο βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η συγκριτική διερεύνηση των μεθόδων Marshall και Superpave στο πλαίσιο της μελέτης σύνθεσης θερμών ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης.

Συγκεκριμένα, μέσα από διεθνείς συναφείς έρευνες, πειραματικές διαδικασίες και εργαστηριακούς οδηγούς (Asphalt Institute, 2014), (Cominsky, et al., 1994), (Shrestha, 2018), επιχειρείται μία σύγκριση των δύο μεθόδων τόσο σε στάδιο διαδικασίας σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων, όσο και σε επίπεδο συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η διερεύνηση των μεταξύ τους διαφοροποιήσεων επιτυγχάνεται μέσω της λεπτομερούς περιγραφής κάθε βήματος μελέτης και των προδιαγραφών και ελέγχων συμπεριφοράς που ορίζει η κάθε μέθοδος, ενώ πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των βασικών χαρακτηριστικών των δύο μεθόδων.

Επιπροσθέτως, συλλέγονται στοιχεία και μετρήσεις από διεθνείς εργαστηριακές μελέτες που έχουν διεξαχθεί από μηχανικούς και ερευνητές, οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με τη σύγκριση των δύο μεθόδων. Σκοπός είναι η ανάπτυξη μίας βάσης δεδομένων σχετικά με τα ογκομετρικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων, σχεδιασμένων με τις μεθόδους Marshall και Superpave. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται και αναλύονται προκειμένου να αξιολογηθούν οι διαφορές των δύο μεθόδων ως προς τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των παραγόμενων ασφαλτομιγμάτων.

## 1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία διαρθρώνεται από επτά κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στα **κεφάλαια 2 και 3** παρουσιάζονται, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την εφαρμογή της μεθόδου Marshall και Superpave αντίστοιχα, περιγράφοντας τη συλλογή υλικών, τον εξοπλισμό που απαιτείται, την προετοιμασία και συμπύκνωση των δοκιμίων, τον προσδιορισμό των εμπειρικών ιδιοτήτων και εν τέλει, του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου ικανοποιώντας τις εκάστοτε προδιαγραφές.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι βασικές διαφορές των δύο υπό διερεύνηση μεθόδων, οι οποίες αφορούν τόσο τη διαδικασία σχεδιασμού του ασφαλτομίγματος, όσο και τη συμπεριφορά του σε επί τόπου συνθήκες. Επιπλέον, παρατίθενται στοιχεία και εργαστηριακά αποτελέσματα από συναφείς έρευνες, στο πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης των δύο μεθόδων, με σκοπό την ανάπτυξη βάσης δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση.

Στο **κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται η στατιστική επεξεργασία των στοιχείων της βάσης δεδομένων, που αναπτύχθηκε με τα στοιχεία από το κεφάλαιο 4, αξιοποιώντας τα εργαλεία της περιγραφικής στατιστικής, της γραμμικής παλινδρόμησης και του ελέγχου μηδενικής υπόθεσης.

Στο **κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Ολοκληρώνοντας, στο **κεφάλαιο 7** περιλαμβάνεται το σύνολο της βιβλιογραφίας και των αναφορών που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

## 2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ MARSHALL

### 2.1 Γενικά Στοιχεία

Η μέθοδος Marshall (ASTM D1559) αποτελεί για περισσότερο από 50 χρόνια (1940 - 1990) την κύρια διαδικασία παραγωγής θερμών ασφαλτομιγμάτων. Περίπου το 75 % των οδοστρωμάτων στην Αμερική είναι κατασκευασμένο με παραλλαγές της υπόψη μεθόδου (Kanneganti, 2002). Οι βασικές αρχές της μεθόδου Marshall αρχικά αναπτύχθηκαν το 1939 από τον **Bruce Marshall**, ο οποίος εργαζόταν ως μηχανικός του Τμήματος Αυτοκινητοδρόμων του Μισισσιπή (Mississippi Department of Highways) και αργότερα ως σύμβουλος της Ένωσης Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (Union of Engineers of the US Army). Η εισοδός της στον κόσμο της επιστήμης καθιερώθηκε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με τη συνεισφορά του Marshall στη βελτίωση και προσαρμογή της μεθόδου για την ενίσχυση οδοστρωμάτων σε στρατιωτικά αεροδρόμια του Αμερικανικού Στρατού. Η μέθοδος Marshall τυποποιήθηκε από την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών το 1958 (The American Society of Testing and Materials - ASTM) (Asphalt Institute, n.d.).

Παρά την αδυναμία της να ανταποκρίνεται στις κυκλοφοριακές και κλιματικές μεταβολές λόγω του εμπειρικού της χαρακτήρα (Asi, 2007), εξακολουθεί να αποτελεί την επικρατέστερη διαδικασία σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, γεγονός το οποίο δικαιολογείται, όπως σημειώνουν οι (White, 1985) και (Sadid, et al., 2010), από τα εξής **θετικά στοιχεία**:

- Είναι απλή με γρήγορα αποτελέσματα
- Απαιτεί μικρό, ελαφρύ, φορητό και οικονομικό εξοπλισμό
- Εφαρμόζονται τάσεις σε κάθε μέρος του δείγματος
- Οι ιδιότητες των μειγμάτων που παράγονται στο εργαστήριο σχετίζονται με τα αποτελέσματα στο πεδίο
- Είναι κατάλληλη για τα τοπικά υλικά και συνθήκες της αντίστοιχης περιοχής

Τα **βασικά στάδια** της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά τη μέθοδο Marshall είναι τα ακόλουθα:

- Συλλογή αδρανών
- Επιλογή ασφαλτικού συνδετικού υλικού
- Παρασκευή δοκιμίων ασφαλτομίγματος και συμπύκνωση
- Προσδιορισμός ευστάθειας και υποχώρησης
- Προσδιορισμός ογκομετρικών στοιχείων
- Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλο



Για κάθε κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών, προετοιμάζονται μείγματα με **πέντε διαφορετικές περιεκτικότητες** ( $\pm 0.5\%$  και  $\pm 1\%$ ) σε άσφαλτο για τον υπολογισμό των εμπειρικών τους ιδιοτήτων και την τελική επιλογή ποσοστού συνδετικού υλικού. Τα αποτελέσματα για κάθε τιμή περιεκτικότητας σε άσφαλτο προέρχονται από το μέσο όρο τριών ίδιων μειγμάτων (Asphalt Institute, 2014). Ο τελικός στόχος της μεθόδου επιτυγχάνεται μέσω της κρίσης και της εμπειρίας του μηχανικού, ανάλογα με τις κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες, καθώς και τα τοπικά υλικά που είναι διαθέσιμα. Συνήθως, συνιστάται το ποσοστό ασφάλτου να αντιστοιχεί σε τέσσερα τοις εκατό (4%) ποσοστό κενών αέρα (Shrestha, 2018).

## 2.2 Συλλογή Υλικών

### 2.2.1 Αδρανή

Το πρώτο βήμα της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά τη μέθοδο Marshall, αποτελεί η **επιλογή των αδρανών υλικών** (χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, παιπάλη), τα οποία καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο όγκο του μείγματος. Σύμφωνα με τον (Jasim, 2012), τα αδρανή εκφράζουν τη δύναμη του δομικού σκελετού του ασφαλτομίγματος, η οποία αποτελεί ένδειξη για την αντοχή και την ανθεκτικότητα ενός οδοστρώματος. Για κάθε πηγή και κλάσμα αδρανών εκτελούνται εργαστηριακές δοκιμές, όπως κοκκομετρικής διαβάθμισης, αντοχής σε θρυμματισμό, δείκτη πλακοειδούς, ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση, ισοδύναμο άμμου, όπου τα αποτελέσματα που εξάγονται, αξιολογούνται βάσει των προδιαγραφών του έργου (Λοΐζος & Πλατή, 2019). Όπως αναφέρεται και στον οδηγό του (Shrestha, 2018), η τυπική μεθοδολογία ορίζει ως μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών τα 25 mm, ενώ με κάποιες προσαρμογές επιτρέπεται η χρήση έως 38 mm. Για κάθε μείγμα απαιτούνται περίπου 1.2 κιλά αδρανών, οπότε για 15 δοκιμαστικά δείγματα χρησιμοποιούνται προσεγγιστικά 23 κιλά, συνυπολογίζοντας και τις απώλειες.

Απαραίτητη προϋπόθεση, πριν την διαδικασία της κοκκομετρικής διαβάθμισης, είναι η θέρμανση των αδρανών στους 105-110 °C, προκειμένου να απομακρυνθεί η απορροφημένη υγρασία που περιέχουν, η οποία θα οδηγούσε σε αύξηση του βάρους τους και κατ' επέκταση σε ανακριβή δεδομένα. Η κοκκομετρία θα πρέπει να πληροί τα **όρια προδιαγραφών** του εκάστοτε προτύπου (AASHTO, ASTM κλπ.) που ακολουθείται σχετικά με τα ποσοστά διερχόμενου βάρους ανά μέγεθος κόσκινου (Diazgranados Diaz, 2003). Για παράδειγμα, για τους Ελληνικούς κανονισμούς ΠΕΤΕΠ, πρέπει να τηρούνται τα εξής όρια για τους πέντε διαφορετικούς τύπους ασφαλτομιγμάτων που εφαρμόζονται ανά ασφαλτική στρώση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Μέχρι να επιτευχθεί αυτή η απαίτηση, δημιουργούνται διάφορες διαβαθμίσεις διαφορετικών αναλογιών και μεγεθών κόκκου (Özdemir, et al., 2019). Επισημαίνεται ότι μαλακά αδρανή τείνουν να αποσυνθέτονται ευκολότερα, συγκριτικά με τα σκληρότερα, συμβάλλοντας σε δυσανάλογη διαβάθμιση για το μείγμα σχεδιασμού. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την

παράμετρο των λεπτόκοκκων αδρανών και πραγματοποιώντας αντίστοιχες προσαρμογές στην τελική παρτίδα, είναι εφικτό να αποφευχθεί η πτώση των κενών αέρα και των κενών στο σκελετό των αδρανών.

Πίνακας 2.1: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης ΠΕΤΕΠ (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2 (mm)	Τύπος ασφαλτομίγματος				
	ΑΣ 40	ΑΣ 31.5	ΑΣ 20	ΑΣ 12.5	ΑΣ 10
63	100				
40	90-100	100			
31.5	–	90-100	100		
20	58-81	–	90-100	100	
12.5	–	56-80	–	90-100	100
10	–	–	58-81	–	90-100
4	20-50	26-56	30-60	39-70	49-80
2	14-39	18-43	21-46	25-55	29-63
0.25	3-15	4-16	4-18	4-19	6-21
0.063	0-5	1-6	1-7	1-9	1-9
<b>Προτεινόμενα μεγέθη χονδρόκοκκων αδρανών</b>					
X-10/40 & X-4/31.5	X-4/31.5	X-4/20	X-2/12.5	X-2/10	
<b>Συνιστώμενα πάχη μεμονωμένης στρώσης (mm)</b>					
70-100	50-80	40-60	25-40	<30	
<b>Προτεινόμενη χρήση</b>					
				Ισοπεδωτική στρώση	
			Επιφανειακή στρώση		
		Συνδετική στρώση			
Ασφαλτική βάση					

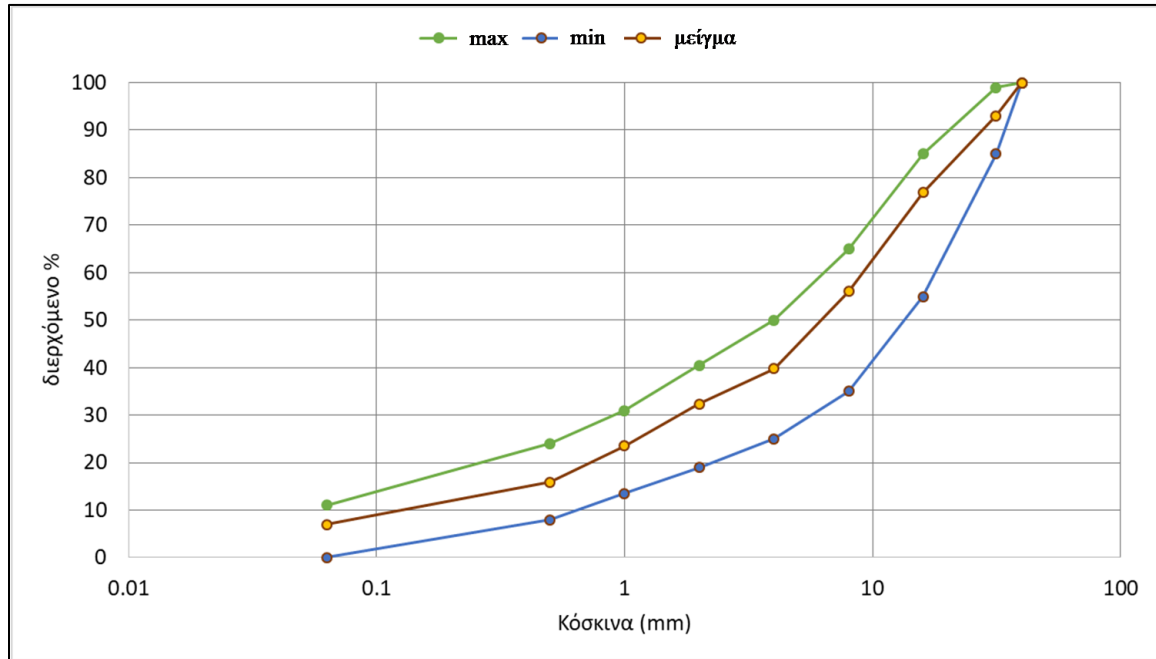
Σύμφωνα με τον (Shrestha, 2018), συναντώνται **τρεις βασικές μέθοδοι** σε ό,τι αφορά την επιλογή κλασμάτων αδρανών για το επόμενο βήμα της ανάμειξης με το ασφαλτικό συνδετικό υλικό, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς το χρόνο εκτέλεσής τους και της ακρίβειας που προσφέρουν.

*1η Μέθοδος: Μερική κλασμάτωση μεμονωμένων αδρανών*

*2η Μέθοδος: Προανάμειξη δειγμάτων πριν την κλασμάτωση των αδρανών*

*3η Μέθοδος: Ολική κλασμάτωση όλων των αδρανών*

Γενικά, συνιστάται η τελική κοκκομετρική καμπύλη του μείγματος αδρανών να είναι ομαλή και όσον το δυνατό παράλληλα με τις οριακές καμπύλες. Στην Εικόνα 2.1 δίνεται ένα παράδειγμα κοκκομετρικής διαβάθμισης μείγματος αδρανών με τις οριακές καμπύλες μεγίστου και ελαχίστου.



**Εικόνα 2.1: Κοκκομετρική διαβάθμιση μείγματος αδρανών με οριακές καμπύλες**

## 2.2.2 Ασφάλτος

Η **άσφαλτος** αποτελεί το συνδετικό συστατικό, το οποίο λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της προσδίδει στο ασφαλτόμιγμα τη συγκεκριμένη ιδιότητα, ενώ συνδέεται άμεσα με τη συνοχή και ομοιομορφία. Στη μέθοδο Marshall, η άσφαλτος κατηγοριοποιείται βάσει των τιμών διεισδυτικότητάς της, οι οποίες εξαρτώνται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά και τη γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής του υπό μελέτη έργου. Γενικά, η άσφαλτος που χρησιμοποιείται είναι συνήθως 40 / 50 έως και 180 / 200 pen. Εν συνεχεία της επιλογής της ασφάλτου, οι μελετητές οφείλουν να αξιολογήσουν την καταλληλότητα της ως ενσωματούμενο υλικό στο ασφαλτόμιγμα, καθώς και τη συμπεριφορά της (Moutaz, 2006). Τα βασικά χαρακτηριστικά των ασφαλτικών υλικών (συμβατικών και τροποποιημένων) που πρέπει να ελέγχονται, στο πλαίσιο της εναρμόνισης με τις ευρωπαϊκές και εγχώριες προδιαγραφές, αφορούν γενικά στη συνεκτικότητα, ανθεκτικότητα, ασφάλεια και καθαρότητα. Οι βασικές **εργαστηριακές δοκιμές** που πραγματοποιούνται αναλύονται παρακάτω (Λοΐζος & Πλατή, 2020):

Δοκιμή διείσδυσης (Penetration): Με τη **δοκιμή διείσδυσης** προσδιορίζεται η συνεκτικότητά της. Στη δοκιμή αυτή μια πρότυπη βελόνα αφήνεται να διεισδύσει σε

δοκίμιο ασφάλτου υπό συγκεκριμένο φορτίο, σε σταθερή θερμοκρασία και για ορισμένο χρόνο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2: Συσκευή δοκιμής διείσδυσης (Pavement Interactive, n.d.)**

Δοκιμή μάλθωσης: Το σημείο μάλθωσης είναι μία άλλη ιδιότητα που συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συνεκτικότητας της ασφάλτου και εκφράζει τη θερμοκρασία κατά την οποία μετατρέπεται από εύθραυστη σε πιο ρευστή.

Δοκιμή γήρανσης ασφάλτου - Αντίσταση σε σκλήρυνση: Δοκιμή RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) κατά την οποία προσδιορίζονται οι αλλαγές που επήλθαν στην ασφαλτο λόγω της συνδυαστικής επίδρασης της θερμοκρασίας και του αέρα, προσομοιάζοντας τη σκλήρυνση που επέρχεται στην ασφαλτο κατά τη φάση ανάμειξης στην εγκατάσταση παραγωγής.

Δοκιμή ανάφλεξης: Προσδιορισμός του σημείο ανάφλεξης, δηλαδή της θερμοκρασίας κατά την οποία οι ατμοί που παράγονται κατά τη θέρμανση της ασφάλτου αναφλέγονται για χρονικό διάστημα πέντε δευτερολέπτων.

Δοκιμή διαλυτότητας: Στοχεύει στην επιβεβαίωση καθαρότητας της ασφάλτου μέσω του προσδιορισμού ανεπιθύμητων συστατικών που εμπεριέχονται σε αυτή.

Δοκιμή ιξώδους: Το ιξώδες αποτελεί μία έκφραση της συνοχής (εσωτερικής αντίστασης) της ασφάλτου, το οποίο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Δοκιμή σημείου θραύσης Fraass: Προσδιορισμός της χαμηλής θερμοκρασίας στην οποία η ασφαλτος, λόγω της υψηλής δυσκαμψίας της, ρηγματώνεται.

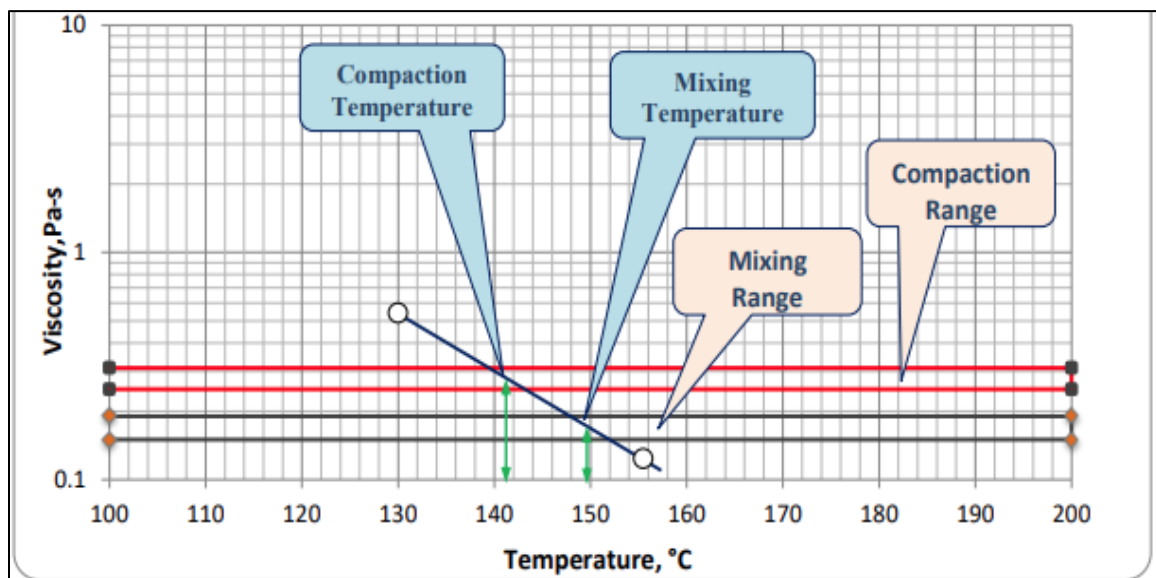
Ελαστική επαναφορά: Καθορίζει την ελαστική παραμόρφωση της ασφάλτου και πραγματοποιείται σε θερμοκρασία των 25 °C.

Γενικά, η τιμή περιεκτικότητας της ασφάλτου εξαρτάται σημαντικά από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Βέβαια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι πολύ χαμηλό ή πολύ υψηλό ποσοστό συνδετικού υλικού, επηρεάζει δυσμενώς τα χαρακτηριστικά της ευστάθειας, εργασιμότητας και ανθεκτικότητας. Επομένως, αποτελεί κρίσιμο σημείο η ορθή ισορροπία των ποσοτήτων των αναμειγνυόμενων συστατικών (Department of Civil Engineering - The University of Memphis, n.d.).

## 2.3 Προετοιμασία Δοκιμών και Προσδιορισμός Ιδιοτήτων

### 2.3.1 Παρασκευή ασφαλτομίγματος και συμπίκνωση

Εν συνεχεία της συλλογής των υλικών για τη σύνθεση του ασφαλτομίγματος, καθορίζεται η **θερμοκρασία μείξης και συμπίκνωσης** βάσει ενός γραφήματος ιξώδους - θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα στην Εικόνα 2.3. Σύμφωνα με τον (Shrestha, 2018), η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να θερμαίνεται η άσφαλτος για ανάμειξη και συμπίκνωση θα πρέπει να παράγει ιξώδες  $170 \pm 20$  centistokes και  $280 \pm 30$  cS αντίστοιχα.



Εικόνα 2.3: Γράφημα θερμοκρασίας ανάμειξης και συμπίκνωσης ασφαλτομίγματος (Shrestha, 2018)

Κατά τη διαδικασία της ανάμειξης των υλικών είναι αναγκαίο να δίνεται προσοχή στα εξής σημεία (Shrestha, 2018):

- Τοποθέτηση αδρανών και ασφάλτου στον κλίβανο στη θερμοκρασία ανάμειξης τουλάχιστον δύο ώρες πριν την έναρξη της διαδικασίας.

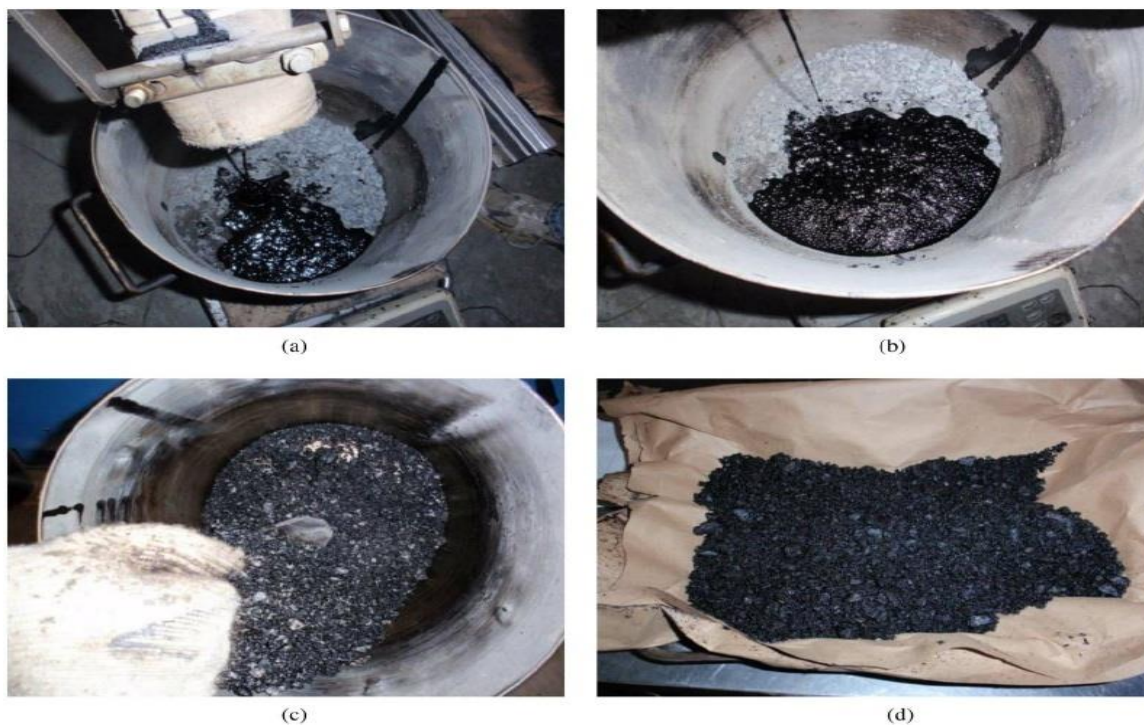
- Τοποθέτηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού (μπολ, καλούπια) στον κλίβανο 30 λεπτά με μία ώρα πριν την ανάμειξη.
- Διατήρηση ασφάλτου σε μικρά δοχεία, για αποφυγή γήρανσης από τη διαρκή θέρμανση.
- Επιβεβαίωση ρύθμισης κλίβανου σε θερμοκρασία συμπίκνωσης, προκειμένου να δεχτεί τις αναμειγμένες παρτίδες.
- Η διαδικασία της ανάμειξης πραγματοποιείται έως όλα τα αδρανή να είναι επικαλυμμένα επιμελώς (περίπου 60 δευτερόλεπτα για μεμονωμένες παρτίδες).

Όπως αναφέρθηκε, για κάθε κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών προετοιμάζονται μείγματα **πέντε διαφορετικών περιεκτικότητων** σε ασφάλτο. Η αρχική ποσότητα "σχεδιασμού" του συνδετικού υλικού προκύπτει είτε εμπειρικά είτε μέσω αναλυτικής σχέσης. Βάσει του αρχικού ποσοστού ασφάλτου κατά βάρος ασφαλτομίγματος προκύπτουν, με βήμα 0.5 % άνω και κάτω, οι υπόλοιπες περιεκτικότητες. Η μέθοδος Marshall χρησιμοποιεί συγκεκριμένες μήτρες διαμέτρου 101.6 mm και ύψους 63.5 mm (Zumrawi & Edrees, 2016). Όσον αφορά τη μάζα των αδρανών, είναι πιθανό να πραγματοποιηθούν ορισμένες προσαρμογές, ώστε το μείγμα να έχει το απαιτούμενο ύψος 63.5 mm ± 1.27 mm. Για αυτό προτείνεται να προετοιμαστεί ένα δοκιμαστικό μείγμα στην αρχή, και εάν η τιμή του ύψους βρίσκεται εκτός ορίων να εφαρμοστεί η ακόλουθη ρύθμιση:

$$\text{Προσαρμοσμένη μάζα αδρανών} = 63.5 \times \frac{\text{αρχική μάζα αδρανών}}{\text{ύψος δοκιμαστικού δοκιμίου (mm)}} \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

Μία άλλη παράμετρος, που πρέπει να ληφθεί υπόψη, αποτελούν τα χαρακτηριστικά **απορροφητικότητας** των αδρανών, τα οποία είναι πιθανό να επηρεάσουν τις τιμές του φαινόμενου ειδικού βάρους ( Bulk specific gravity -  $G_{mb}$  ) και του μέγιστου θεωρητικού ειδικού βάρους (Theoretical maximum specific gravity -  $G_{mm}$ ). Συνιστάται μία περίοδος διατήρησης του μίγματος για δύο ώρες πριν από τη διαδικασία της εργαστηριακής συμπίκνωσης. Αδρανή με υψηλότερη απορροφητικότητα θα πρέπει να διατηρούνται για ακόμη μεγαλύτερη περίοδο (έως και τέσσερις ώρες).

Στην Εικόνα 2.4 παρατηρούνται οι φάσεις ανάμειξης αδρανών και ασφάλτου, καθώς και το παραγόμενο ασφαλτόμιγμα .

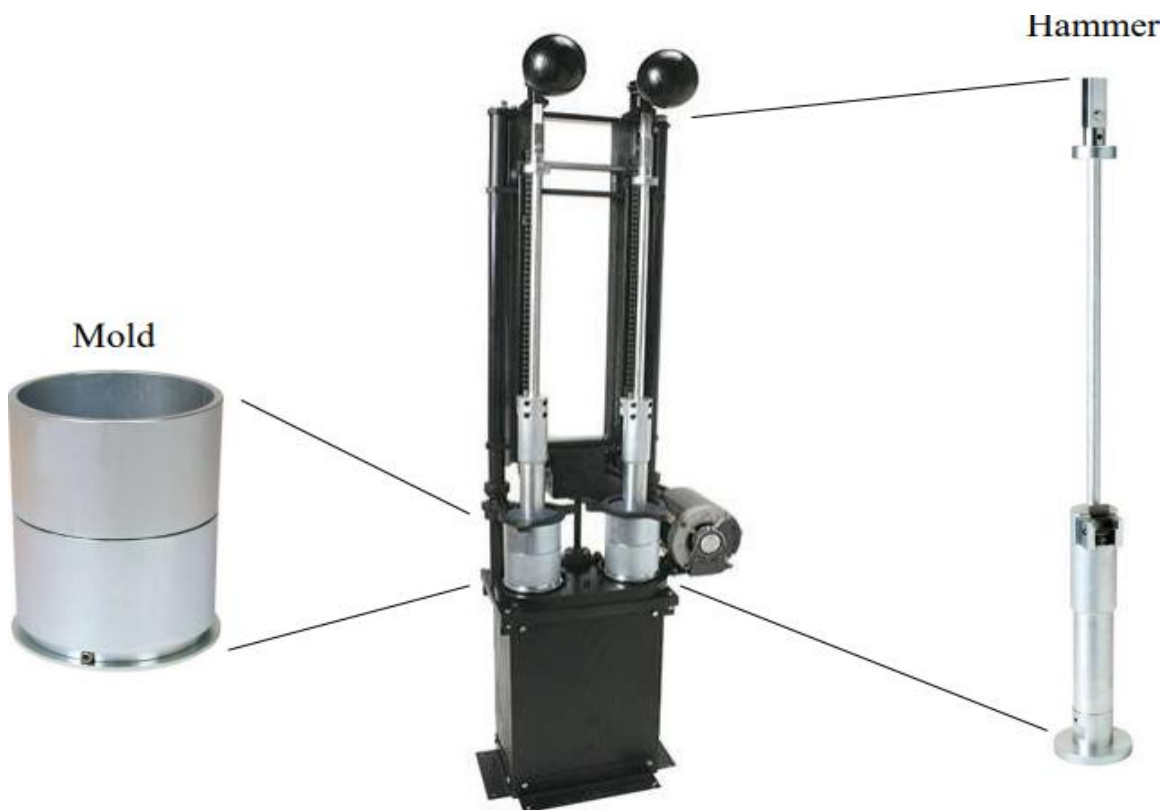


**Εικόνα 2.4: Στάδια ανάμειξης αδρανών -ασφάλτου (Xiao, et al., 2011)**

Ακολούθως, συντελείται η **συμπύκνωση του παρασκευασμένου ασφαλτομίγματος**, διαδικασία που αποτελεί και το χαρακτηριστικό σημείο της μελέτης σύνθεσης κατά Marshall. Σκοπός της είναι να προσομοιάσει όσο το δυνατόν καλύτερα την πυκνότητα που θα επέλθει στο οδόστρωμα εξαιτίας της καταπόνησης των αξονικών φορτίων που θα υποστεί. Για κάθε δοκίμιο τύπου Marshall εφαρμόζεται η κρουστική συμπύκνωση. Η συμπύκνωση των δοκιμίων γίνεται μέσω της συσκευής της Εικόνα 2.5, η οποία αποτελείται από πίπτον βάρους τύπου "σφυριού" (Marshall hammer), το οποίο πραγματοποιεί ελεύθερη πτώση ύψους 457 mm. Το ασφαλτόμιγμα τοποθετείται σε κυλινδρικές μεταλλικές μήτρες διαμέτρου 101.6 mm και υποβάλλεται σε προσυμπύκνωση με σπάτουλα, περιμετρικά και στο κέντρο. Στη συνέχεια, η μήτρα με το ασφαλτόμιγμα προσαρμόζονται στη συσκευή συμπύκνωσης και αυτή τίθεται σε λειτουργία. Μέσω του "σφυριού" της συσκευής συμπύκνωσης εφαρμόζονται στο ασφαλτόμιγμα επαναλαμβανόμενα κρουστικά φορτία ("κτύποι"), πρώτα από τη μία πλευρά και στη συνέχεια από την άλλη (Λοΐζος & Πλατή, 2020). Ο αριθμός των "κτύπων" προσδιορίζεται βάσει των συνθηκών κυκλοφορίας σχεδιασμού (Roberts, et al., 1991), όπως εντοπίζεται στον παρακάτω Πίνακας 2.2.

Πίνακας 2.2: Αριθμός κτύπων βάσει συνθηκών κυκλοφορίας (Roberts, et al., 1991)

	Χαμηλή Κυκλοφορία (ESALs < 10 <sup>4</sup> )	Μέση Κυκλοφορία (10 <sup>4</sup> < ESALs < 10 <sup>6</sup> )	Υψηλή Κυκλοφορία (ESALs > 10 <sup>6</sup> )
Αριθμός "κτύπων" συμπίκνωσης σε κάθε μεριά του μείγματος	35	50	75



Εικόνα 2.5: Συσκευή κρουστικής συμπίκνωσης Marshall (Department of Civil Engineering - The University of Memphis, n.d.)

Μία εναλλακτική του προαναφερθέντα τρόπου συμπίκνωσης, είναι η τάση για χειροκίνητη συμπίκνωση μέσω σφυριών, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες τιμές πυκνότητας συγκριτικά με τα μηχανικά σφυριά. Ωστόσο, το Ινστιτούτο Ασφάλτου



(Asphalt Institute ) συνιστά τη χρήση μόνο μηχανικών σφυριών για τη μελέτη σύνθεσης ασφαλτομίγματος (Shrestha, 2018).

Μετά το πέρας της συμπύκνωσης, το μείγμα διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου έως να μην προκύπτουν επιπλέον παραμορφώσεις, και στη συνέχεια αφαιρείται από τη μήτρα. Το συμπυκνωμένο ασφαλτόμιγμα πλέον είναι έτοιμο να υποβληθεί στους απαραίτητους **ελέγχους και μετρήσεις**, ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότερη περιεκτικότητα σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Για τον προσδιορισμό των εμπειρικών ιδιοτήτων (ευστάθεια - υποχώρηση και ογκομετρικά στοιχεία) πραγματοποιούνται οι εξής έλεγχοι με τη συγκεκριμένη σειρά:

- Υπολογισμός ύψους μείγματος
- Προσδιορισμός φαινόμενου ειδικού βάρους (συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος)
- Προσδιορισμός μεγίστου θεωρητικού ειδικού βάρους ("χαλαρού" ασφαλτομίγματος)
- Ευστάθεια και υποχώρηση
- Πυκνότητα και ογκομετρική ανάλυση

Είναι προφανές, ότι οι τιμές του ύψους, του φαινόμενου βάρους και του μεγίστου θεωρητικού βάρους υπολογίζονται εν συνεχεία της προαναφερθείσας διαδικασίας συμπύκνωσης ασφαλτομίγματος. Το **θεωρητικό υπόβαθρο** των συγκεκριμένων μεγεθών παρουσιάζεται στο παρόν εδάφιο, καθώς τα αποτελέσματά τους θα αξιοποιηθούν για τον προσδιορισμό των εμπειρικών ιδιοτήτων.

#### Ύψος δοκιμίου

Πραγματοποιούνται τέσσερις ξεχωριστές μετρήσεις ύψους σε κάθε δοκίμιο.

#### Φαινόμενο ειδικό βάρος (Bulk Specific Gravity -Gmb) -AASHTO T 166 ή ASTM D2726

Αρχικά, ζυγίζεται το συμπυκνωμένο ασφαλτόμιγμα στην ξηρή του κατάσταση. Έπειτα βυθίζεται σε νερό θερμοκρασίας 25 °C για τρία έως τέσσερα λεπτά και στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα του δοκιμίου μέσα στο νερό. Τέλος, αφαιρείται από το νερό, και σκουπίζεται επιφανειακά με μία πετσέτα, προκειμένου να υπολογιστεί το βάρος του επιφανειακά στεγνού κορεσμένου (Saturated Surface Dry - SSD). Το φαινόμενο ειδικό βάρος (Gmb) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Gmb = \frac{A}{B-C} \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

όπου:

A = Βάρος συμπυκνωμένου ξηρού δοκιμίου (g)

B = Βάρος επιφανειακά στεγνού κορεσμένου δοκιμίου (SSD) (g)

C = Μάζα δοκιμίου στο νερό στους 25 °C (g)

Η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται σε ασφαλτομίγματα με απορρόφηση νερού χαμηλότερη ή ίση του 2 % του όγκου του μείγματος. Ο συγκεκριμένος έλεγχος πρέπει να πραγματοποιείται για μείγματα με την υποψία εκτεταμένης απορροφητικότητας.

Η **απορροφητικότητα** νερού υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Ποσοστό απορροφητικότητας νερού κατά όγκο (\%)} = 100 \times \frac{(B-A)}{(B-C)} \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

Οι τιμές Gmb προσδιορίζονται για όλα τα δοκιμαστικά δοκίμια, και ανά περιεκτικότητα ασφάλτου προκύπτει ο μέσος όρος από τα αντίστοιχα τρία ασφαλτομίγματα.

Μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος (Theoretical Maximum Specific Gravity - Gmm) - ASTM D2041 / D2041M-11

Αποτελεί το βάρος των επικαλυμμένων με άσφαλο αδρανών, χωρίς κενά αέρα, δηλαδή αναφέρεται στην κατάσταση του "χαλαρού" ασφαλτομείγματος. Αυτή είναι και η βασική διαφορά με το φαινόμενο βάρος το οποίο περιλαμβάνει τον όγκο του αέρα. Θεωρητικά, εάν ήταν εφικτή συμπύκνωση έως 0 % κενά αέρα, οι τιμές τους θα ήταν ίδιες, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατόν, με αποτέλεσμα η τιμή Gmm να είναι πάντα μεγαλύτερη της Gmb. (Shrestha, 2018).

Αρχικά, το δείγμα προετοιμάζεται και γίνεται διαχωρισμός των κόκκων με τα χέρια. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στο πυκνόμετρο και προστίθεται νερό θερμοκρασίας 25 °C μέχρι την πλήρη κάλυψη του υλικού. Το δείγμα τοποθετείται σε συσκευή δόνησης και ταυτόχρονα εφαρμόζεται υποπίεση για να αφαιρεθεί ο αέρας, που είναι τυχόν εγκλωβισμένος, μεταξύ των κόκκων του μείγματος (δοκιμή RICE). Το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(B-C)} \quad (\text{Σχέση 2.4})$$

όπου:

A = Βάρος "χαλαρού" ξηρού ασφαλτομείγματος (g)

B = Βάρος πυκνόμετρου γεμάτο με νερό και "χαλαρού" μείγματος (g)

C = Βάρος πυκνόμετρου γεμάτο με νερό (g)

Οι τιμές Gmm και Gmb πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε δοκιμαστική περιεκτικότητα σε άσφαλο. Το Ινστιτούτο Ασφάλτου δεν απαιτεί τον υπολογισμό των παραπάνω και για τα τρία δοκιμαστικά μείγματα που αντιστοιχούν σε μία από τις πέντε διαφορετικές ποσότητες ασφάλτου.

Εναλλακτικά, αντί να πραγματοποιηθεί ξεχωριστός υπολογισμός του θεωρητικού μεγίστου βάρους για κάθε περιεκτικότητα ασφάλτου, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η τιμή  $G_{mm}$  για τη μία, και για τις υπόλοιπες να γίνει χρήση του ενεργού ειδικού βάρους των αδρανών (Effective specific gravity of the aggregate -  $G_{se}$ ) ως εξής:

$$G_{se} = \frac{P_s}{\frac{100 - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (\text{Σχέση 2.5})$$

όπου:

$P_s$  = Ποσοστό αδρανών στο συνολικό βάρος του μείγματος

$P_b$  = Ποσοστό ασφάλτου στο συνολικό βάρος του μείγματος (το ποσοστό όπου υπολογίστηκε η τιμή  $G_{mm}$ )

$G_{mm}$  ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ) = Ειδικό μέγιστο βάρος του "χαλαρού" ασφαλτομείγματος

$G_b$  = Ειδικό βάρος ασφάλτου

Για κάθε άλλη περιεκτικότητα ασφάλτου η τιμή  $G_{mm}$  προκύπτει με τον ακόλουθο τύπο:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (\text{Σχέση 2.6})$$

όπου:

$$P_s + P_b = 100$$

Τονίζεται ότι όσο το ασφαλικό συνδετικό υλικό αυξάνεται, τόσο η τιμή  $G_{mm}$  μειώνεται. Στην παρακάτω Εικόνα 2.6 φαίνεται η διαφορά μεταξύ "χαλαρού" και συμπυκνωμένου ασφαλτομείγματος.

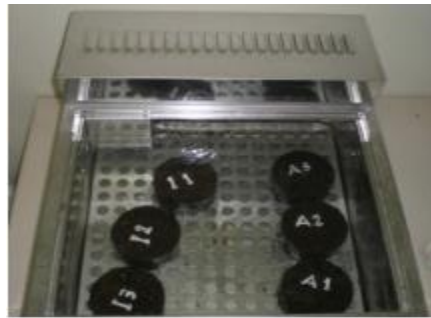


**Εικόνα 2.6: Χαλαρό και συμπυκνωμένο ασφαλτόμυγμα (Λοΐζος & Πλατή, 2020)**

Αναφορικά με τις παραπάνω σχέσεις, παρατηρείται ότι χρησιμοποιείται η έννοια του ειδικού βάρους εναλλακτικά της πυκνότητας, όπως εντοπίζεται σε αρκετές πηγές στη διεθνή βιβλιογραφία. Αξίζει να τονιστεί, ότι στην ουσία πρόκειται για τις ίδιες τιμές, με τη διαφορά ότι στον όρο του ειδικού βάρους η πυκνότητα του υλικού διαιρείται με την πυκνότητα του νερού ( $1 \text{ g} / \text{cm}^3$ ). Αυτό προκύπτει από τον ορισμό του ειδικού βάρους ως ο λόγος της πυκνότητας ενός υλικού προς την πυκνότητα του νερού. Κατά συνέπεια, το ειδικό βάρος αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος σε αντίθεση με την πυκνότητα που μετριέται σε  $\text{g} / \text{cm}^3$  (Advanced Asphalt Technologies, LLC., 2011).

### 2.3.2 Ευστάθεια και υποχώρηση

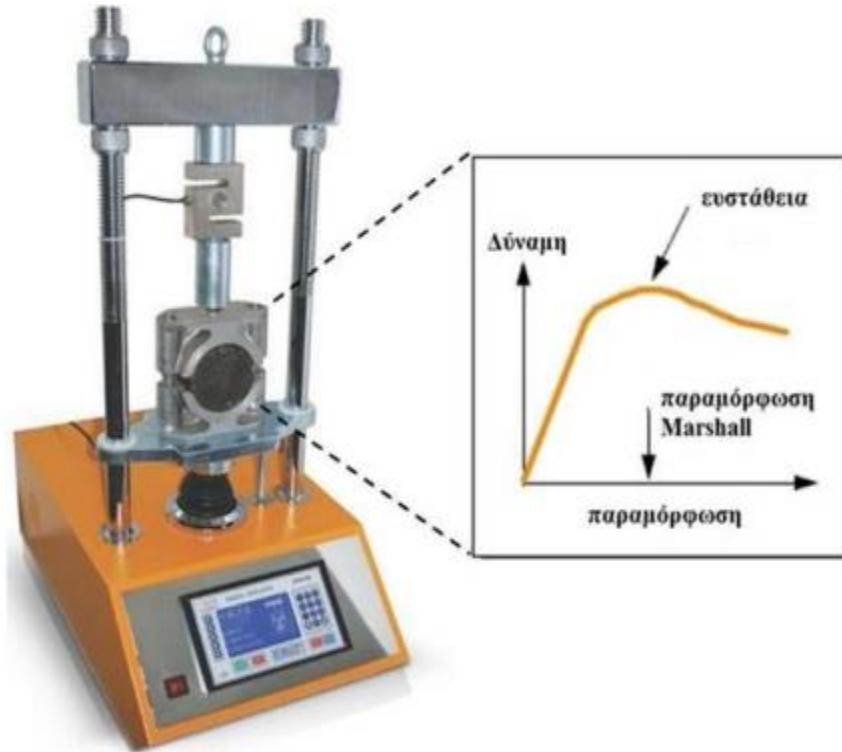
Η **ευστάθεια και η παραμόρφωση** είναι τα δύο χαρακτηριστικά Marshall που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την ειδική συσκευή Marshall για θραύση δοκιμίων και πραγματοποιείται σε όλα τα δοκιμαστικά μείγματα. Πριν τοποθετηθούν τα δοκίμια στη συσκευή Marshall πρέπει πρώτα να τοποθετηθούν σε λουτρό ύδατος για 40 λεπτά περίπου σε θερμοκρασία  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  (Εικόνα 2.7). Η συνολική διαδικασία ελέγχου από τη στιγμή της αφαίρεσης των μειγμάτων από το λουτρό ύδατος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 30 δευτερόλεπτα (Jasim, 2012).



Εικόνα 2.7: Λουτρό ύδατος (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

Η συσκευή Marshall συμπιέζει διαμετρικά το δοκίμιο με σταθερό ρυθμό ( $50 \text{ mm} / \text{min}$ ) μέχρι τελικής θραύσεως. Αρχικά, το φορτίο αυξάνεται μέχρι να φτάσει στη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά. Η φόρτιση ολοκληρώνεται όταν το δοκίμιο παραμορφωθεί πλήρως (καταστρεπτική δοκιμή ελέγχου). Η μέγιστη δύναμη που καταγράφεται κατά τη θραύση του δοκιμίου δίνει το μέτρο ευστάθειας του μείγματος μετρούμενο σε N ή lb και η αντίστοιχη κατακόρυφη παραμόρφωση καταγράφεται ως παραμόρφωση Marshall μετρούμενη σε mm ή inches (Εικόνα 2.8). Η τιμή της υποχώρησης εκφράζει την κατακόρυφη παραμόρφωση του δείγματος. Η καταγραφή των παραπάνω τιμών στις σύγχρονες συσκευές Marshall γίνεται αυτόματα από ειδικό καταγραφέα (Λοΐζος & Πλατή, 2020).

Αν βάσει των αποτελεσμάτων προκύψει για ένα μείγμα χαμηλή τιμή ευστάθειας και υψηλή τιμή παραμόρφωσης, τότε θα είναι υψηλή η πιθανότητα τροχοσυλάκωσης και παραμόρφωσης υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας. Αντίθετα, υψηλή τιμή ευστάθειας και χαμηλή τιμή παραμόρφωσης, θα έχει ως αποτέλεσμα να είναι πιο εύθραυστο και ευάλωτο σε ρηγμάτωση ( American Association of State Highway and Transportation Officials.; United States. Army. Corps of Engineers, 1991).



**Εικόνα 2.8:** Ευστάθεια και παραμόρφωση (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

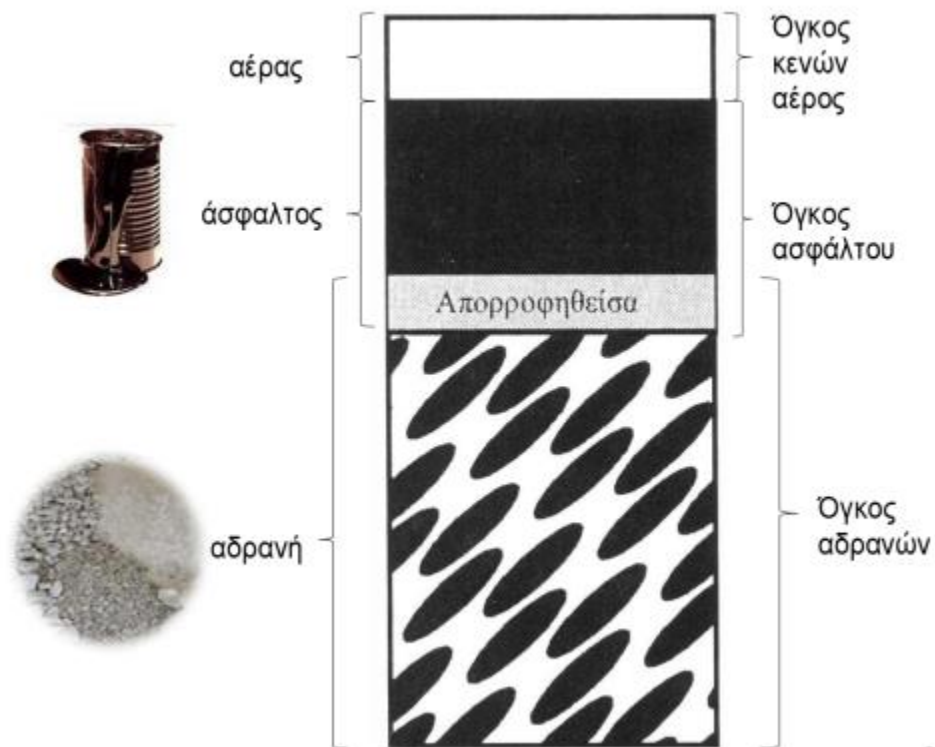
Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας είναι ορθά μόνο στην περίπτωση που το ύψος του δοκιμίου είναι 63.5 mm. Σε διαφορετική περίπτωση, η τιμή της ευστάθειας πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή διόρθωσης. Στον παρακάτω Πίνακας 2.3 παρατίθενται οι τιμές συντελεστών διόρθωσης για δείγματα με ύψος διαφορετικό των 63.5 mm, ανάλογα με τον όγκο του μείγματος.

**Πίνακας 2.3: Συντελεστές διόρθωσης τιμών ευστάθειας (Shrestha, 2018)**

<b>Όγκος Μείγματος, cm<sup>3</sup></b>	<b>Προσεγγιστικό Πάχος Μείγματος, mm</b>	<b>Συντελεστής Διόρθωσης</b>
200 έως 213	25.4	5.56
214 έως 225	27	5
226 έως 237	28.6	4.55
238 έως 250	30.2	4.17
251 έως 264	31.8	3.85
265 έως 276	33.3	3.57
277 έως 289	34.9	3.33
290 έως 301	36.5	3.03
302 έως 316	38.1	2.78
317 έως 328	39.7	2.5
329 έως 340	41.3	2.27
341 έως 353	42.9	2.08
354 έως 367	44.4	1.92
386 έως 379	46	1.79
380 έως 392	47.6	1.67
393 έως 405	49.2	1.56
406 έως 420	50.8	1.47
421 έως 431	52.4	1.39
432 έως 443	54	1.32
444 έως 456	55.6	1.25
457 έως 470	57.2	1.19
471 έως 482	58.7	1.14
483 έως 495	60.3	1.09
496 έως 508	61.9	1.04
509 έως 522	63.5	1
523 έως 535	65.1	0.96
536 έως 546	66.7	0.93
547 έως 559	68.3	0.89
560 έως 573	69.8	0.86
574 έως 585	71.4	0.83
586 έως 598	73	0.81
599 έως 610	74.6	0.78
611 έως 625	76.2	0.76

### 2.3.3 Ογκομετρικά στοιχεία

Μετά την ανάμειξη και συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο, ο συνολικός όγκος του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος αποτελείται από τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, τον όγκο της ασφάλτου και τον όγκο των κενών αέρος. Η ογκομετρική συσχέτιση αυτών των τριών συστατικών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9, υπό μορφή διαγράμματος φάσεων. Ο σχεδιασμός του ασφαλτομίγματος αποσκοπεί στον ποσοστιαίο προσδιορισμό κατ' όγκο του ασφαλτικού συνδετικού υλικού και των αδρανών υλικών που είναι αναγκαία για την παραγωγή ενός μείγματος με τις επιθυμητές ιδιότητες. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι μετρήσεις βάρους είναι συνήθως πολύ ευκολότερες, τυπικά λαμβάνονται και στη συνέχεια μετατρέπονται σε όγκο χρησιμοποιώντας τα ειδικά βάρη των συστατικών για την αξιολόγηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος (Λοΐζος & Πλατή, 2020).



Εικόνα 2.9: Ογκομετρική συσχέτιση αδρανών, αέρα και ασφάλτου (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

Για κάθε τιμή περιεκτικότητας συνδετικού υλικού χρησιμοποιείται η μέση τιμή του ύψους, του Gmm, Gmb. Οι **ογκομετρικές παράμετροι** που αξιολογούνται είναι:

- Το ποσοστό κενών αέρα - (Voids in Total Mix - VTM)
- Το ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών - (Voids in Mineral Aggregates - VMA)
- Το ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο - (Voids Filled with Asphalt - VFA)

#### Ποσοστό κενών αέρα - VTM

Τα κενά αέρα αποτελούν μικρούς χώρους ή θύλακες αέρα που δημιουργούνται μεταξύ των επικαλυμμένων με άσφαλτο αδρανών στο τελικό συμπυκνωμένο ασφαλτομίγμα. Η ανθεκτικότητα και η πυκνότητα του ασφαλτικού οδοστρώματος συνδέονται άμεσα με τα κενά του αέρα. Υψηλό ποσοστό κενών παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, καθώς ενδέχεται αέρας και νερό να εισχωρήσει κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Από την άλλη, πολύ χαμηλές τιμές VTM προκαλούν διόγκωση της ασφάλτου (Christensen & Bonaquist, 2006). Το ποσοστό κενών του ασφαλτομίγματος πρέπει να είναι τόσο, ώστε το οδόστρωμα να επιδέχεται ένα μικρό μόνο ποσοστό συμπίκνωσης από τα κυκλοφοριακά φορτία κατά τη λειτουργία του.

Τα κενά του αέρα υπολογίζονται με την ακόλουθη σχέση:

$$VTM = \left(1 - \frac{Gmb}{Gmm}\right) \times 100 \% \quad (\text{Σχέση 2.7})$$

όπου:

Gmb = Ειδικό βάρος συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος

Gmm = Μέγιστο ειδικό βάρος "χαλαρού" ασφαλτομίγματος

#### Ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών - VMA

Τα κενά στο σκελετό των αδρανών ορίζονται ως τα κενά ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών σε ένα συμπυκνωμένο μείγμα, το οποίο περιλαμβάνει τα κενά του αέρα και τον όγκο της ασφάλτου. Σημειώνεται ότι τα αδρανή, λόγω των πόρων τους, απορροφούν ένα μέρος της ασφάλτου με αποτέλεσμα η εναπομένουσα ποσότητα ασφάλτου να είναι αυτή που περιβάλλει τα αδρανή, γεμίζει τα κενά μεταξύ των αδρανών και δίνει συνοχή στο μείγμα. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται ενεργό ποσοστό ασφάλτου και είναι μικρότερη της αρχικής ποσότητας που προστέθηκε στο μείγμα. Το VMA διασφαλίζει ότι ο διαθέσιμος χώρος μεταξύ των αδρανών είναι επαρκής για να παραλάβει την ποσότητα της ασφάλτου (Λοΐζος & Πλατή, 2020). Εκφρασμένο ως ποσοστό του συνολικού όγκου του μείγματος, αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σχεδιασμού που επηρεάζουν την αντοχή των θερμών ασφαλτομιγμάτων (Buchanan & Brown, 2001).



Το VMA προσδιορίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb} \quad (\text{Σχέση 2.8})$$

όπου:

$Gmb$  = Ειδικό βάρος συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος

$Ps$  = Ποσοστό αδρανών στη συνολική μάζα του δοκιμίου

$Gsb$  = Φαινόμενο ειδικό βάρος αδρανών

#### Ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο - VFA

Τα κενά που καλύφθηκαν με άσφαλτο εκφράζουν το ποσοστό κατ' όγκο των VMA που συμπληρώθηκε με το ενεργό ποσοστό ασφάλτου. Το VFA διασφαλίζει ότι επαρκής αριθμός κενών καλύφθηκε με άσφαλτο, καθορίζοντας έτσι την ελάχιστη ποσότητα ασφάλτου στο μείγμα για επιτυχή συνεκτικότητα των κόκκων, αλλά και τη μέγιστη που μπορεί να παραλάβει η δεδομένη κοκκομετρική διαβάθμιση, ώστε να αποφευχθεί ανάδυση ασφάλτου και πρόωρη παραμόρφωση.

Ο υπολογισμός του VFA γίνεται με τη σχέση:

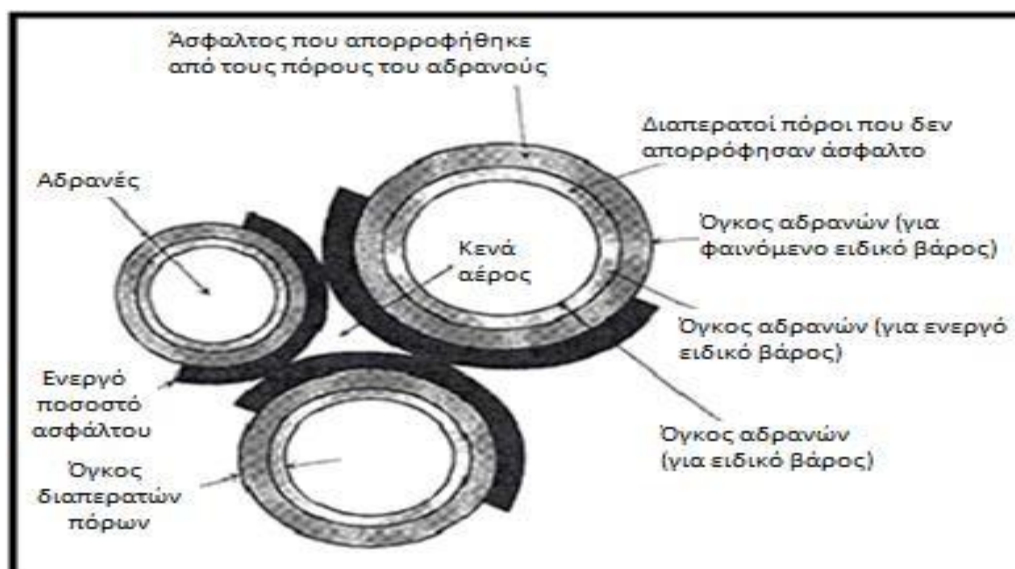
$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VTM}{VMA} \quad (\text{Σχέση 2.9})$$

όπου:

$VTM$  = Κενά αέρα

$VMA$  = Κενά στο σκελετό των αδρανών

Με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας που μόλις περιγράφηκε, ακολουθεί το τελικό στάδιο της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων με τη μέθοδο Marshall. Οι παραπάνω ογκομετρικές έννοιες γίνονται κατανοητές και σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα στην Εικόνα 2.10.



Εικόνα 2.10: Ογκομετρικές παράμετροι ασφαλτομίγματος (Πλατή, 2014)

## 2.4 Προσδιορισμός Βέλτιστης Περιεκτικότητας σε Άσφαλτο

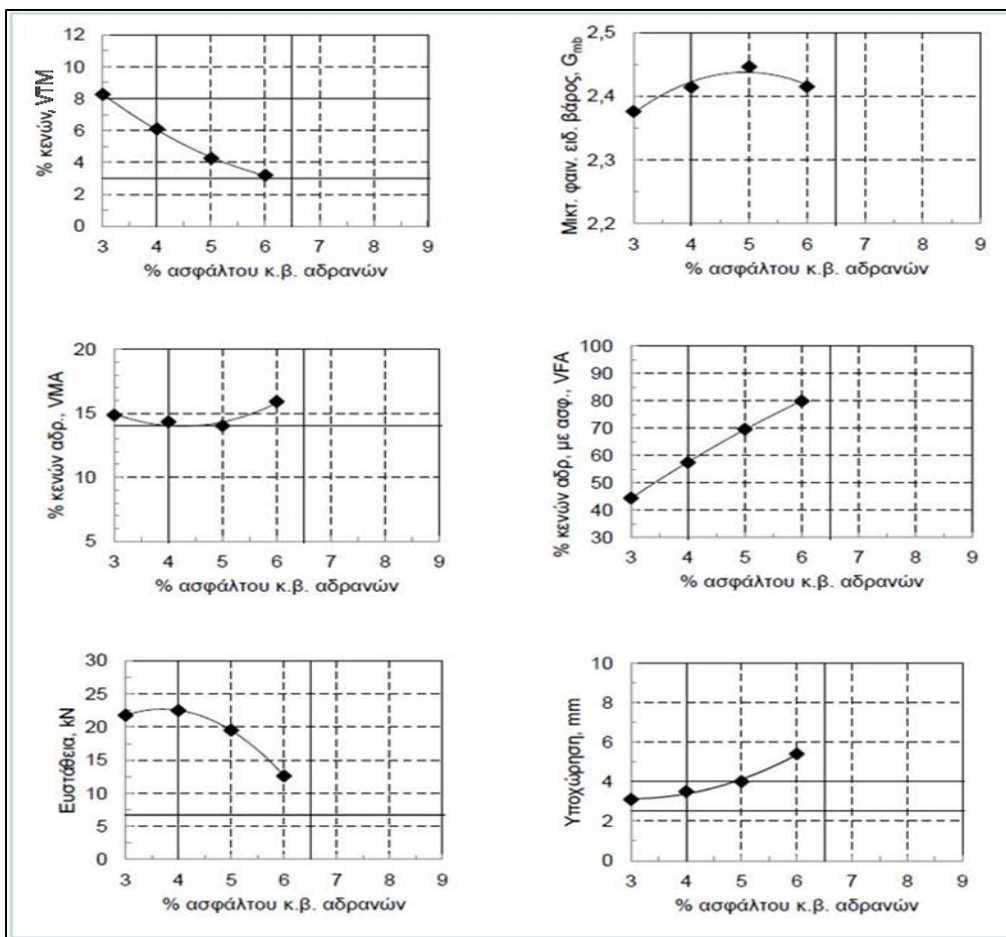
### 2.4.1 Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων

Το **τελικό βήμα** μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall στοχεύει στην βέλτιστη επιλογή της περιεκτικότητας ασφάλτου, έτσι ώστε να διατίθεται ένα οικονομικό ασφαλτόμιγμα το οποίο να πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές ευστάθειας, παραμόρφωσης και ογκομετρικών στοιχείων (Kanneganti, 2002).

Αρχικά, έχοντας υπολογίσει, για κάθε διαφορετική τιμή ποσοστού ασφάλτου ( $\pm 0.5\%$  και  $\pm 1\%$ ), τις μέσες τιμές των μεγεθών ευστάθειας, υποχώρησης, των ογκομετρικών στοιχείων (VTM, VMA, VFA) και του φαινόμενου ειδικού βάρους-πυκνότητας, προσδιορίζονται τα αντίστοιχα σημεία και ενώνοντας με ομοιόμορφη καμπύλη σχεδιάζονται τα εξής έξι (6) **διαγράμματα**:

- VTM ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών
- VMA ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών
- VFA ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών
- Gmb ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών
- Ευστάθεια (Stability) ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών
- Υποχώρηση (Flow) ως προς ποσοστό ασφάλτου κατά βάρος αδρανών

Ένα παράδειγμα των προαναφερθέντων διαγραμμάτων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων τοποθετείται στη συνέχεια στην Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων

Βάσει των συγκεκριμένων διαγραμμάτων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Τα κενά αέρος (VTM) σταθερά μειώνονται, καθώς αυξάνεται το ποσοστό ασφάλτου.
- Τα κενά στο σκελετό των αδρανών (VMA) γενικά μειώνονται μέχρις μιας ελάχιστης τιμής (λόγω καλύτερης συμπύκνωσης) και μετά αυξάνονται.
- Τα κενά που γέμισαν με άσφαλτο (VFA) σταθερώς αυξάνονται, καθώς αυξάνεται το ποσοστό ασφάλτου (λόγω της συμπλήρωσης των VMA με άσφαλτο).
- Η καμπύλη του φαινομένου ειδικού βάρους παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή, καθώς αυξάνεται το ποσοστό ασφάλτου και ακολούθως μειώνεται.
- Η καμπύλη της Ευστάθειας (S) παρουσιάζει, ομοίως, μία μέγιστη τιμή καθώς αυξάνεται το ποσοστό ασφάλτου και ακολούθως μειώνεται.
- Η Υποχώρηση (F) συνεχώς αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα ασφάλτου.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων η συνήθης πρακτική γενικά είναι να επιλέγεται ως **βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου**, αυτό που αντιστοιχεί στο μέσο ποσοστό

κενών αέρα σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών (τυπικά η τιμή αυτή ορίζεται στο 4 %), εφόσον βέβαια ικανοποιούνται ταυτόχρονα και οι υπόλοιπες απαιτήσεις των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που ορίζονται στις προδιαγραφές, για τις οποίες αναφέρεται το επόμενο υποκεφάλαιο (Asphalt Institute, 2014).

#### 2.4.2 Χαρακτηριστικά κριτήρια

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη σύνθεσης κατά Marshall, κρίνεται αναγκαίο, πέρα από την τυπική τιμή των κενών αέρα, να ικανοποιούνται και τα **χαρακτηριστικά κριτήρια** της συμπίκνωσης, της ευστάθειας, της παραμόρφωσης, του VMA και VFA, στοχεύοντας στην παραγωγή ενός ασφαλτομίγματος το οποίο θα προσφέρει σημαντική ανθεκτικότητα και συνεισφορά στη φέρουσα ικανότητα, εργασιμότητα και αντίσταση σε σοβαρές φθορές. Ο ενδεικτικός πίνακας με τις οριακές απαιτήσεις για χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων για όλες τις ασφαλτικές στρώσεις σύμφωνα με τις εν ισχύ προδιαγραφές παρουσιάζεται στη συνέχεια (Πίνακας 2.4).

**Πίνακας 2.4: Οριακές απαιτήσεις χαρακτηριστικών κριτηρίων ασφαλτομιγμάτων (Asphalt Institute, 2014)**

Κριτήρια Μεθόδου Marshall	Χαμηλή Κυκλοφορία - Επιφανειακή και στρώση βάσης		Μεσαία Κυκλοφορία - Επιφανειακή και στρώση βάσης		Υψηλή Κυκλοφορία - Επιφανειακή και στρώση βάσης	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Αριθμοί "κτύπων" συμπίκνωσης σε κάθε μεριά του μείγματος	35		50		75	
Ευστάθεια (Stability), N	3336	-	5338	-	8006	-
Υποχώρηση (flow), 0.25 mm	8	18	8	16	8	14
Ποσοστό κενών αέρα (VTM)	3	5	3	5	3	5
Ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών (VMA)	Δες <u>Πίνακας 2.5</u>					
Ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο (VFA)	70	80	65	78	65	75

**Πίνακας 2.5: Κριτήρια ελαχίστου ποσοστού κενών στο σκελετό των αδρανών (VMA)  
(Asphalt Institute, 2014)**

Μέγιστο Ονομαστικό Μέγεθος Κόκκου Αδρανών (NMA5)		Ελάχιστο Ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών (VMA)		
		Ποσοστό κενών αέρα (VTM)		
mm	in	3	4	5
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19	20	21
4.75	No.4	16	17	18
9.5	3/8	14	15	16
12.5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1.0	11	12	13
37.5	1.5	10	11	12

Τέλος, συνιστάται να λαμβάνεται υπόψη ο εξής πίνακας, ο οποίος καθορίζει το ελάχιστο ποσοστό ασφάλτου που χρησιμοποιείται, ανάλογα με το μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου των αδρανών (Πίνακας 2.6) (Shrestha, 2018).

**Πίνακας 2.6: Ελάχιστο ποσοστό ασφαλτικού συνδετικού υλικού βάσει μεγίστου ονομαστικού μεγέθους κόκκου αδρανών (Shrestha, 2018)**

Σύνθεση για:	Ασφαλτικό Σκυρόδεμα (BC)		Ασφαλτικό Μακαντάμ (DBM)	
	19 mm	13.2 mm	26.5 mm	35.5 mm
NMA5				
Ποσοστό ασφάλτου κ.β. συνολικού μείγματος	Min 5.2	Min 5.4	Min 4.5	Min 4

## 3. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ SUPERPAVE

### 3.1 Γενικά Στοιχεία

Η εμφάνιση σημαντικών φθορών στα οδοστρώματα σε συνδυασμό με την επακόλουθη μείωση της απόδοσής τους και την απουσία χρηματοδότησης για έρευνα, ώθησε το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών το 1987 στην έγκριση ενός προγράμματος, με την ονομασία **Στρατηγικό Ερευνητικό Πρόγραμμα Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP)**. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα διάρκειας πέντε ετών και συνολικού προϋπολογισμού \$ 150 εκατομμυρίων είχε θέσει ως κύριο στόχο τη βελτίωση της ανθεκτικότητας και των λειτουργικών χαρακτηριστικών των αυτοκινητοδρόμων των ΗΠΑ. Το ένα τρίτο των κονδυλίων του SHRP αφορούσε την ανάπτυξη υψηλών προδιαγραφών συμπεριφοράς ασφαλικού υλικού για τη μέγιστη προσομοίωση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις επί τόπου συνθήκες (Hossain, et al., 2018). Η εφαρμογή του προαναφερθέντος προγράμματος επιτεύχθηκε μέσω της συνεργασίας σημαντικών φορέων, όπως είναι η Αμερικανική Ένωση Κρατικών Υπαλλήλων Αυτοκινητοδρόμων και Μεταφορών (American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO), η Επιτροπή Έρευνας Μεταφορών (Transportation Research Board - TRB), η Βιομηχανία (Industry) και η Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration - FHWA) (Harman, et al., 1999).

Η μέθοδος Superpave, ακρωνύμιο για το **Superior Performing Asphalt Pavements**, αποτελεί το τελικό προϊόν του προγράμματος SHRP (D'Angelo, 2001). Πρόκειται για μία μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, η οποία στηρίζεται στην απλότητα και την τυποποιημένη διαδικασία προηγούμενων εμπειρικών μεθόδων, όπως είναι η Marshall και η Hveem (Liu, et al., 2022), παρέχει στους μηχανικούς οδοστρωμάτων και ερευνητές τα απαραίτητα εργαλεία για τη βελτίωση της συμπεριφοράς των θερμών ασφαλτομιγμάτων (Asphalt Institute, 2014). Η υιοθέτηση της συγκεκριμένης μεθόδου εξαπλώνεται ραγδαία, με αποτέλεσμα να θεωρείται η κυρίαρχη διαδικασία μελέτης σύνθεσης στις ΗΠΑ και στον Καναδά (Asphalt Institute, 2014).

Η διαρκώς αυξανόμενη προτίμηση και το έντονο διεθνές ενδιαφέρον για εφαρμογή της μεθόδου Superpave μπορεί να δικαιολογηθεί από τα ακόλουθα σημαντικά σημεία:

- Η επιλογή των βασικών συστατικών του ασφαλτομίγματος (αδρανών και ασφάλτου) περιλαμβάνει υψηλότερες προδιαγραφές προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες (Özdemir, et al., 2019).

- Η χρήση περιστροφικού τρόπου συμπίκνωσης (Superpave Gyrotory Compactor-SGC) αναπαριστά με μεγαλύτερη επιτυχία τις επί τόπου συνθήκες (Maurin, 1998).
- Απαιτείται χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου συγκριτικά με τις εμπειρικές μεθόδους επιδρώντας ευεργετικά στην οικονομία και το περιβάλλον (Jasim, 2012), (Wang, et al., 2000).
- Έλεγχος ευαισθησίας στο νερό (Özdemir, et al., 2019).
- Επιπρόσθετοι έλεγχοι συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων (παραμένουσα παραμόρφωση, ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, ρηγμάτωση λόγω χαμηλής θερμοκρασίας (Advanced Asphalt Technologies, LLC., 2011).

Η μέθοδος Superpave μπορεί να εφαρμοστεί σε νέα, ανακυκλωμένα, πυκνής σύνθεσης θερμά ασφαλτομίγματα με τη χρήση τροποποιητικών ή όχι. Είναι δυνατό να αξιοποιηθεί για την κατασκευή οποιασδήποτε ασφαλικής στρώσης, καθώς και για επίστρωση σε ήδη υπάρχον οδόστρωμα. Μέσω των νέων συστημάτων επιλογής υλικών που ορίζει, επιτυγχάνεται ικανοποιητική αντιμετώπιση των τριών βασικών μορφών αστοχίας ενός οδοστρώματος, και παράλληλα λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις της γήρανσης και ευαισθησίας στην υγρασία (Cominsky, et al., 1994).

Η διαδικασία μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Superpave, περιλαμβάνει ανάλογα με τις κυκλοφοριακές συνθήκες **τρία επίπεδα σχεδιασμού**, η διαφοροποίηση των οποίων έγκειται στις αυστηρότερες προδιαγραφές και αναγκαιότητας αξιοπιστίας και στην προσθήκη επιπλέον ελέγχων σε ότι αφορά τις τρεις βασικές φθορές ενός οδοστρώματος. Τα **βασικά βήματα** της μεθόδου είναι τα εξής:

- Συλλογή αδρανών
- Επιλογή ασφαλτικού συνδετικού υλικού
- Δοκιμαστικά μείγματα αδρανών με άσφαλο και προσδιορισμός τελικής δομής σχεδιασμού ασφαλτομίγματος
- Βάσει της επιλεγείσας τελικής δομής σχεδιασμού, παρασκευή δοκιμίων διαφορετικών περιεκτικότητας ασφαλτικού συνδετικού υλικού
- Ανάμειξη, γήρανση, συμπίκνωση και ογκομετρική ανάλυση
- Προσδιορισμός βέλτιστης περιεκτικότητας σε άσφαλο
- Αξιολόγηση ευαισθησίας στο νερό

Σημειώνεται ότι παρά την απουσία επίσημης απαίτησης για τους επιπλέον ελέγχους συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, το Ινστιτούτο Ασφάλτου συνιστά να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους ελέγχους παραμένουσας παραμόρφωσης, ρηγμάτωσης λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης και ρηγμάτωσης λόγω χαμηλών θερμοκρασιών, ιδιαίτερα σε έργα υψηλότερων προδιαγραφών, που ανήκουν δηλαδή στα επίπεδα σχεδιασμού δύο και τρία (Asphalt Institute, 2014).

## 3.2 Συλλογή Υλικών

### 3.2.1 Αδρανή

Όσον αφορά την επιλογή των αδρανών, η μέθοδος Superpave δεν θέτει κάποιο περιορισμό ως προς την γεωλογία και την σύνθεση τους πέρα από τα χαρακτηριστικά της συμβατότητάς τους με την ασφαλτο και της ευαισθησίας στο νερό. Ως μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών ορίζονται τα 50 mm. **Δύο έννοιες** που σχετίζονται με το μέγεθος κόκκου και αξιοποιούνται στις απαιτήσεις κοκκομετρικής διαβάθμισης αποτελούν το μέγιστο ονομαστικό μέγεθος (Nominal Maximum Aggregate Size-NMAS) και το μέγιστο μέγεθος (Maximum Size), οι ορισμοί των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια (Cominsky, et al., 1994).

Μέγιστο Ονομαστικό Μέγεθος Κόκκου Αδρανών - NMAS: Το μέγεθος κόσκινου, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το πρώτο που συγκρατεί περισσότερο από 10 % των αδρανών.

Μέγιστο Μέγεθος Κόκκου Αδρανών - MS: Το μέγεθος κόσκινου, το οποίο είναι το αμέσως μεγαλύτερο από το μέγιστο ονομαστικό.

Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συστάσεις της μεθόδου σχετικά με την επιλογή του Nmas, για το σχεδιασμό κάθε ασφαλτικής στρώσης ενός οδοστρώματος, για μέγεθος έως τα 37.5 mm.

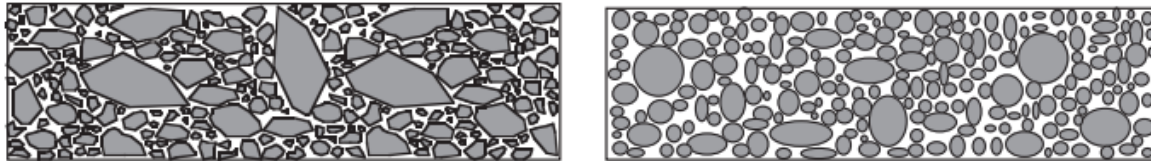
**Πίνακας 3.1: Προτεινόμενο μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών ανά τύπο ασφαλτικής στρώσης (Cominsky, et al., 1994)**

Ασφαλτική Στρώση	Μέγιστο Ονομαστικό Μέγεθος Κόκκου Αδρανών (mm)
Επιφανειακή	9.5-12.5
Συνδετική	25-37.5
Βάσης	25-37.5

Τα αδρανή, όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, συνδέονται άμεσα με την ανθεκτικότητα και την αντοχή ενός οδοστρώματος, μέσω της τριβής και αντίστασης σε μετακίνηση που προσφέρουν τα σωματίδιά τους. **Γωνιώδη με τραχιά επιφάνεια αδρανή** παρέχουν ισχυρότερη αντίσταση συγκριτικά με στρογγυλεμένα λείας υφής, ακόμα και αν είναι του ίδιου γεωλογικού τύπου, γεγονός το οποίο οφείλεται στην πιο επιτυχή συνεργασία και συνοχή τους. Κατ' επέκταση, η αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση εξαρτάται πρωτίστως σε αυτή την εσωτερική τριβή που παρέχουν τα αδρανή, η οποία σχετίζεται άρρηκτα με το σχήμα και την επιφάνεια τόσο των χονδρόκοκκων όσο και των λεπτόκοκκων, καθώς και των χαρακτηριστικών της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Ακόμα και η ποσότητα λεπτότατης σκόνης, αργιλώδους



μορφής, είναι σημαντικό να περιορίζεται καθώς η στρογγυλότητα της οδηγεί σε αδύναμη εσωτερική τριβή (Asphalt Institute, 2014), (Advanced Asphalt Technologies, LLC., 2011). Η διαφορά μεταξύ αδρανών με τραχιά επιφάνεια και στρογγυλεμένων εντοπίζεται στην Εικόνα 3.1



**Εικόνα 3.1: Γωνιώδη (αριστερά) και στρογγυλεμένα (δεξιά) αδρανή (Asphalt Institute, 2014)**

Ο σπουδαίος ρόλος των αδρανών στην αντιμετώπιση της μόνιμης παραμόρφωσης κυρίως, συντέλεσε στην βελτίωση και ενσωμάτωση δύο κατηγοριών ιδιοτήτων για τα αδρανή: τις ιδιότητες συναίνεσης (Consensus) και ιδιότητες πηγής προέλευσης (Source) (Asphalt Institute, 2014). Όπως υποστηρίζεται από τους (Harman, et al., 1999), οι έλεγχοι αυτοί που εφαρμόζονται στην επιλογή των αδρανών δεν είναι καινούριοι, αλλά υιοθετήθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν από την Superpave βάσει των ήδη υπάρχοντων κριτηρίων. Στον παρακάτω Πίνακας 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι συγκεκριμένες προδιαγραφές.

**Πίνακας 3.2: Έλεγχοι ιδιοτήτων αδρανών κατά Superpave (Harman, et al., 1999)**

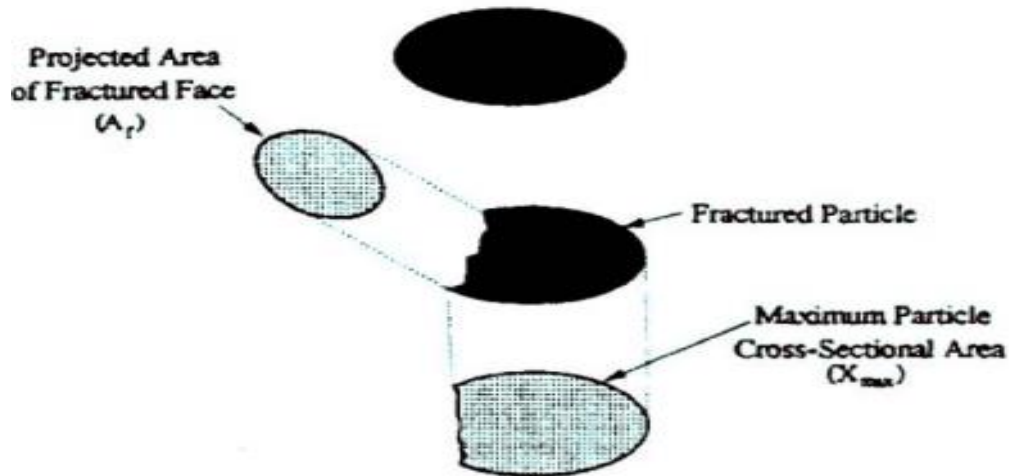
<b>Ιδιότητες συναίνεσης (Consensus Properties)</b>	<b>Ιδιότητες πηγής προέλευσης (Source Properties)</b>
Γωνιότητα χονδρόκοκκων αδρανών	Αντοχή σε θρυμματισμό
Γωνιότητα λεπτόκοκκων αδρανών	Έλεγχος υγείας
Επίπεδα και Επιμήκη αδρανή	Επιβλαβή υλικά
Ισοδύναμο Άμμου	

### **Ιδιότητες συναίνεσης (Consensus Properties)**

Οι ιδιότητες συναίνεσης δημιουργήθηκαν από μία ομάδα ειδικών ερευνητών (Expert Task Group) κατά τη διάρκεια του προγράμματος SHRP και ήταν καθοριστικές για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων των θερμών ασφαλτομιγμάτων. Η αυστηρότητα των κριτηρίων τους καθορίζεται ανάλογα με τα επίπεδα κυκλοφοριακών συνθηκών και το βάθος τους στο οδόστρωμα (Hossain, et al., 2018). Αδρανή σε μικρότερο βάθος και με υψηλότερα επίπεδα κυκλοφορίας είναι αναγκαίο να ικανοποιούν υψηλότερες προδιαγραφές. Όπως τονίζεται από το (Asphalt Institute, 2014), οι έλεγχοι προτείνεται να εφαρμόζονται συνολικά στο προτεινόμενο δοκιμαστικό μείγμα αδρανών.

### Γωνιότητα Χονδρόκοκκων Αδρανών (Coarse Aggregate Angularity-CAA)-ASTM D 5821

Ορίζεται ως το ποσοστό βάρους των αδρανών μεγαλύτερων από βαθμό κόσκινου 4.75 mm με ένα ή περισσότερα θραυσμένα σημεία. Στις προδιαγραφές επισημαίνεται το ελάχιστο ποσοστό γωνιότητας χονδρόκοκκων αδρανών για την επίτευξη υψηλού βαθμού ανθεκτικότητας. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η σημασία των θραυσμένων σημείων.



**Εικόνα 3.2: Αδρανή με θραυσμένα σημεία (Hossain, et al., 2018)**

### Γωνιότητα Λεπτόκοκκων Αδρανών (Fine Aggregate Angularity-FAA)-AASHTO T 304

Ορίζεται ως το ποσοστό των κενών αέρα, που εντοπίζονται σε χαλαρά συμπιεσμένα αδρανή που διέρχονται από μέγεθος κόσκινου 2.36 mm. Υψηλότερο ποσοστό κενών εκφράζει μεγαλύτερο βαθμό θραυσμένων σημείων, και κατά συνέπεια πιο ικανοποιητική τριβή και εσωτερική αντίσταση των σωματιδίων (Hossain, et al., 2018).

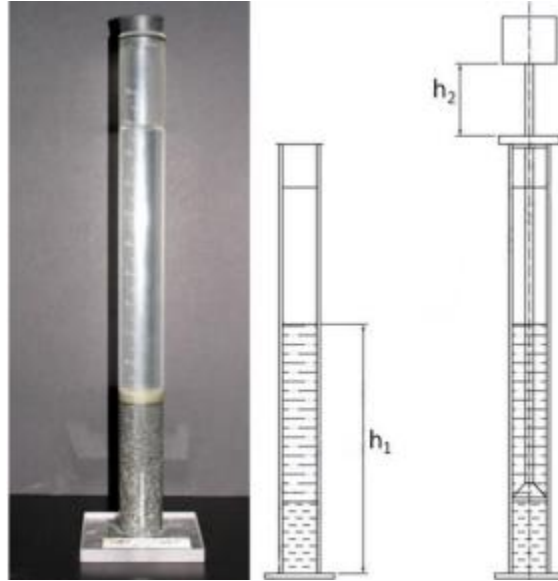
### Επίπεδα και Επιμήκη Αδρανή (Flat and Elongated Particles)-ASTM D4791

Εφαρμόζεται στα χονδρόκοκκα αδρανή και εκφράζει το ποσοστό κατά μάζα ή αριθμό αδρανών, τα οποία έχουν αναλογία μέγιστης προς ελάχιστης διάστασης μεγαλύτερη από πέντε προς ένα. Τα επίπεδα και επιμήκη αδρανή θεωρούνται ανεπιθύμητα, διότι τείνουν να αποσυνθέτονται κατά τη φάση της κατασκευής και υπό την επίδραση των αξονικών φορτίων, με αποτέλεσμα να μειώνεται το VMA.

### Περιεκτικότητα σε άργιλο ή Ισοδύναμο Άμμου (Clay Content or Sand Equivalent)-AASHTO T 176

Εκφράζει το ποσοστό περιεκτικότητας σε άργιλο στην παρτίδα αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο με μέγεθος τα 4.75 mm (Asphalt Institute, 2014). Η ύπαρξη χαμηλού ποσοστού ισοδύναμου άμμου χαρακτηρίζει τα αδρανή ως μη καθαρά και αποτελεί μία ένδειξη ότι πιθανότατα στα λεπτόκοκκα αδρανή του μείγματος περιέχεται επιβλαβής

ποσότητα πολύ λεπτών κόκκων διαστάσεων αργίλου (Λοΐζος & Πλατή, 2020). Με το κριτήριο ελαχίστου ποσοστού επιτυγχάνεται ο στόχος ικανοποιητικής συγκόλλησης αδρανών με την άσφαλτο (Zumrawi & Edrees, 2016). Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η συσκευή δοκιμής Ισοδύναμου Άμμου.



**Εικόνα 3.3:** Συσκευή προσδιορισμού τιμής ισοδύναμου άμμου (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

Στον παρακάτω Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα όρια των κριτηρίων που ορίζονται από τη μέθοδο Superpave για τους προαναφερθέντες ελέγχους επιλογής αδρανών.

**Πίνακας 3.3:** Ιδιότητες συναίνεσης αδρανών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014)

20ετή Κυκλοφορία σχεδιασμού (10 <sup>6</sup> ) ESALs	Γωνιότητα χονδρόκοκκων αδρανών (ελάχιστο %)		Γωνιότητα λεπτόκοκκων αδρανών (ελάχιστο %)		Ισοδύναμο Άμμου (ελάχιστο %)	Επίπεδα και Επιμήκη αδρανή (μέγιστο %)
	≤100 mm	>100 mm	≤100 mm	>100 mm		
< 0.3	55/-	-/-	-	-	40	-
0.3 έως 3	75/-	50/-	40	40	40	10
3 έως 10	85/80	60/-	45	40	45	10
10 έως 30	95/90	80/75	45	40	45	10
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	10

### Ιδιότητες πηγής προέλευσης(Source Properties)

Συμπληρωματικά με τους προηγούμενες ελέγχους, είναι κρίσιμο να αξιολογούνται και οι ιδιότητες πηγής, όπως αυτές καθορίζονται από τοπικούς φορείς λόγω της ποικιλίας τύπων αδρανών που διατίθενται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Παρά το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες ιδιότητες ελέγχονται κατά τη διαδικασία σύνθεσης του μείγματος, είναι εφικτό να εφαρμοστούν και για την καταλληλότητα αποδοχής των αδρανών.

#### Σκληρότητα-Δοκιμή αντοχής σε θρυμματισμό (Toughness)-AASHTO T 96 or ASTM C131 or C535

Εκφράζει την αντοχή των χονδρόκοκκων αδρανών σε θρυμματισμό και μηχανική αποσύνθεση κατά την κατασκευή και λειτουργία. Ο πιο συνήθης έλεγχος είναι η δοκιμή Los Angeles (Εικόνα 3.4) που εκφράζει το ποσοστό απώλειας μάζας ενός τυποποιημένου δείγματος δοκιμής. Όσο χαμηλότερη η τιμή, τόσο ικανοποιητικότερη η αντίσταση ολίσθησης και ανθεκτικότητας του οδοστρώματος.



Εικόνα 3.4: Συσκευή Los Angeles (Λοΐζος & Πλατή, 2020)

#### Έλεγχος υγείας-Δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (Soundness)-AASHTO T 104 or ASTM C88

Ο έλεγχος υγείας προσδιορίζει την ανθεκτικότητα των αδρανών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές. Η εναλλαγή των εποχιακών θερμοκρασιών είναι πιθανό να οδηγήσει θρυμματισμό των μη ανθεκτικών αδρανών, λόγω της μεταβολής του όγκου τους, με σοβαρές φθορές για το οδόστρωμα. Ο πιο συνήθης έλεγχος είναι ο έλεγχος υγείας με τη χρήση θεικού μαγνησίου, σύμφωνα με τον οποίο προσδιορίζεται η ποσοστιαία απώλεια βάρους λόγω της φθοράς που επήλθε. (Λοΐζος & Πλατή, 2019).

### Επιβλαβή υλικά (Deleterious Materials)-AASHTO T 112,ASTM C142

Ορίζεται ως το ποσοστό μάζας επιβλαβών υλικών, όπως είναι σβόλοι αργίλου, σχιστόλιθος, ξύλο, μαρμαρυγία και άνθρακας στο συνολικό μείγμα αδρανών. Στον ακόλουθο Πίνακας 3.4 παρουσιάζονται συνολικά οι παραπάνω απαιτήσεις.

**Πίνακας 3.4: Ιδιότητες πηγής προέλευσης αδρανών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014)**

20ετή Κυκλοφορία σχεδιασμού (10 <sup>6</sup> ) ESALs	Αντοχή σε θρυμματισμό- Δοκιμή Los Angeles (μέγιστο %)	Έλεγχος υγείας- Δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (μέγιστο %)	Επιβλαβή Υλικά	
			Άργιλος - Εύθραστα σωματίδια	Ελαφριού βάρους σωματίδια
< 0.3	45	25	<5	<5
0.3 έως 3	40	20	<4	<4
3 έως 10	30	15	<3	<3
10 έως 30	30	15	<2	<2
≥30	25	<10	<1	<1

### 3.2.2 Ασφάλτος

Στη μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Superpave, η επίδραση της ασφάλτου στο βαθμό σοβαρότητας των χαρακτηριστικών φθορών οδοστρώματος (Moutaz, 2006), συμβάλλει στην εισαγωγή ενός νέου τρόπου κατηγοριοποίησης της, ο οποίος δεν στηρίζεται στις τιμές διεισδυτικότητάς της και σε συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας. Η Superpave αξιοποιεί το **σύστημα Performance Grade (PG)**, το οποίο στοχεύοντας στην βέλτιστη πραγματική συμπεριφορά, κατηγοριοποιεί το συνδεδετικό υλικό βάσει του κλίματος και των αναμενόμενων ακραίων θερμοκρασιών του οδοστρώματος (Asphalt Institute, 2014). Ο κωδικός κατηγοριοποίησης της ασφάλτου είναι τύπου PG X - Y όπου:

X = Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία οδοστρώματος, βάσει της υψηλότερης μέσης εφταήμερης θερμοκρασίας που έχει καταγραφεί ετησίως στην περιοχή του έργου.

Y = Η ελάχιστη αναμενόμενη θερμοκρασία οδοστρώματος, η οποία προκύπτει από την ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας που έχει καταγραφεί στην περιοχή του έργου ετησίως.

Στις προδιαγραφές του συστήματος PG περιλαμβάνονται ορισμένοι έλεγχοι για την **αξιολόγηση του ασφαλτικού συνδεδετικού υλικού στα τρία στάδια ζωής του**, τα οποία είναι η φάση της μεταφοράς και αποθήκευσης, το στάδιο ανάμειξης και κατασκευής και το τελικό στάδιο γήρανσης που συντελείται στα πέντε με δέκα έτη (Hossain, et al., 2018), (Khan, 2008). Οι έλεγχοι είναι οι εξής:

Rolling Thin Film Oven (RTFO): Προσομοίωση χαρακτηριστικών βραχυπρόθεσμης γήρανσης και σκληρότητας ασφάλτου (Εικόνα 3.5)

Pressure Aging Vessel (PAV): Προσομοίωση χαρακτηριστικών μακροπρόθεσμης γήρανσης και σκληρότητας ασφάλτου (Εικόνα 3.6)

Dynamic Shear Rheometer (DSR): Προσδιορισμός ιδιοτήτων ασφάλτου σε υψηλές και μέσες θερμοκρασίες (Εικόνα 3.7)

Rotational Viscometer (RV): Προσδιορισμός ιδιοτήτων ασφάλτου σε υψηλές θερμοκρασίες (Εικόνα 3.8)

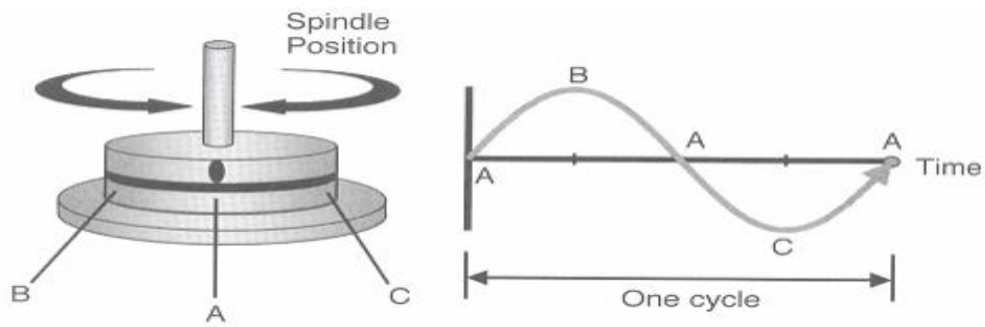
Bending Beam Rheometer (BBR) & Direct Tension Tester (DTT): Προσδιορισμός ιδιοτήτων ασφάλτου σε χαμηλές θερμοκρασίες (Εικόνα 3.9)



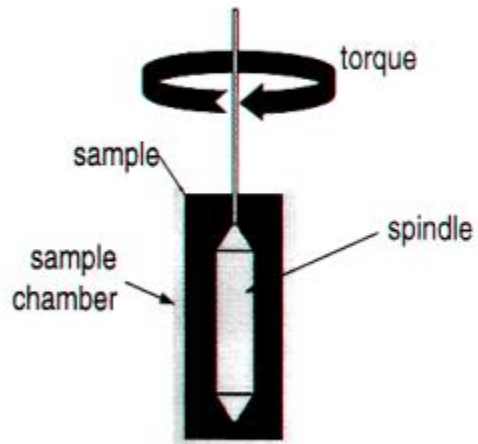
Εικόνα 3.5: Συσκευή RTFO (Hossain, et al., 2018)



Εικόνα 3.6: Συσκευή PAV (Vialab, n.d.)



**Εικόνα 3.7:** Συσσκευή DSR (Hossain, et al., 2018), (Khan, 2008)



**Εικόνα 3.8:** Συσσκευή RV (Hossain, et al., 2018)



**Εικόνα 3.9:** Συσσκευή BBR (Mastrad Limited, n.d.)

Ακολουθώς τοποθετείται ο Πίνακας 3.5, στον οποίο παρουσιάζεται το σύστημα PG.

**Πίνακας 3.5: Προδιαγραφές συστήματος Performance Grade ασφάλτου κατά Superpave (Cominsky, et al., 1994)**

PERFORMANCE GRADE	PG 70-						PG 76-						PG 82-					
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34		
Average 7-day Maximum Pavement Design Temp, °C <sup>b</sup>	<70						<76						<82					
Minimum Pavement Design Temperature, °C <sup>b</sup>	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34		
<b>ORIGINAL BINDER</b>																		
Flash Point Temp, T48: Minimum °C	230																	
Viscosity, ASTM D4402: <sup>2</sup> Maximum, 3 Pa*s, Test Temp, °C	135																	
Dynamic Shear, TP5: <sup>4</sup> G'/sinδ, Minimum, 1.00 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76						82					
<b>ROLLING THIN FILM OVEN (T240)</b>																		
Mass Loss, Maximum, percent	1.00																	
Dynamic Shear, TP5: G'/sinδ, Minimum, 2.20 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	70						76						82					
<b>PRESSURE AGING VESSEL RESIDUE (PP1)</b>																		
PAV Aging Temperature, °C <sup>4</sup>	100(110)						100(110)						100(110)					
Dynamic Shear, TP5: G'/sinδ, Maximum, 5000 kPa Test Temp @ 10 rad/s, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28		
Physical Hardening <sup>4</sup>	Report																	
Creep Stiffness, TP1: <sup>1</sup> S, Maximum, 300.0 MPa, m - value, Minimum, 0.300 Test Temp @ 60s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		
Direct Tension, TP3: <sup>1</sup> Failure Strain, Minimum, 1.0% Test Temp @ 1.0 mm/min, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		

Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του κατάλληλου τύπου PG X-Y αποτελεί και το **επίπεδο αξιοπιστίας**, το οποίο λαμβάνεται υπόψη στο υπό μελέτη έργο. Η αξιοπιστία εκφράζει την πιθανότητα στην οποία οι πραγματικές τιμές θερμοκρασιών δεν θα ξεπεράσουν τις επιλεγθείσες τιμές σχεδιασμού X και Y σε ένα έτος. Το επίπεδο αξιοπιστίας συνήθως καθορίζεται από τοπικούς φορείς ή την κρίση του μηχανικού αναλογίζοντας τις απαιτήσεις προδιαγραφών και το κόστος του έργου. Επιπροσθέτως, για οδοστρώματα που αναμένεται να αναλάβουν υψηλά αξονικά φορτία ή χαμηλών ταχυτήτων, προτείνεται να γίνεται η χρήση του παρακάτω Πίνακας 3.6, με σκοπό την κατάλληλη προσαρμογή του βαθμού PG X μεγίστης θερμοκρασίας, αυξάνοντας τον κατά την ενδεικτική τιμή.



Πίνακας 3.6: Προσαρμογή στο βαθμό PG X μεγίστης θερμοκρασίας (Hossain, et al., 2018)

20ετή Κυκλοφορία σχεδιασμού ESALs ( $10^6$ )	Προσαρμογή στο βαθμό PG X μεγίστης θερμοκρασίας		
	Συνθήκες ταχύτητας κυκλοφορίας		
	$\leq 20$ km / h	20 έως 70 km / h	$\geq 70$ km / h
< 0.3	1	–	–
0.3 έως 3	2	1	–
3 έως 10	2	1	–
10 έως 30	2	1	1
$\geq 30$	2	1	1

### 3.3 Δοκιμαστική Μείξη Σχεδιασμού Ασφαλτομίγματος

#### 3.3.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση

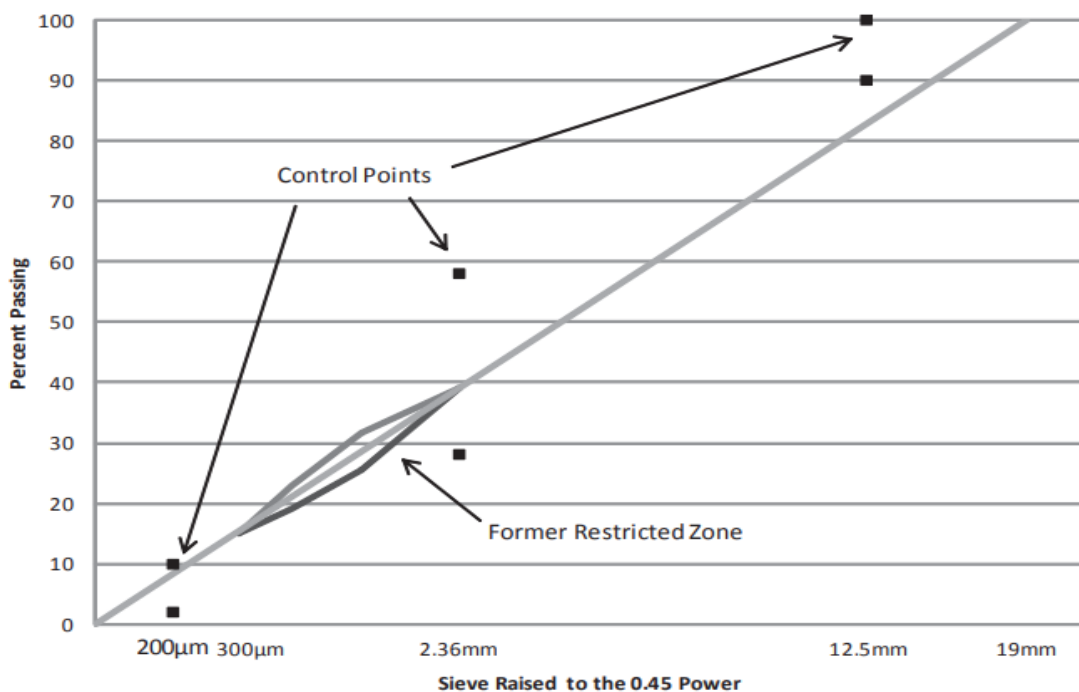
Βασικό βήμα της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Superpave πριν τη σύγκριση διαφορετικών περιεκτικοτήτων ασφάλτου, για την επιλογή του βέλτιστου ποσοστού, αποτελεί ο προσδιορισμός της **δομής αδρανών σχεδιασμού**. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται δοκιμαστικά μείγματα κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών, συνήθως τρία ή τέσσερα, και αξιολογούνται για τον καθορισμό της τελικής τους δομής. Η Superpave εισάγει ορισμένες έννοιες, των οποίων η σημασία παρουσιάζεται ακολούθως, προκειμένου να θεωρείται αποδεκτή μία κοκκομετρική διαβάθμιση ενός μείγματος αδρανών.

Γραμμή Μέγιστης Πυκνότητας (Maximum Density Line): Η ευθεία γραμμή από την αρχή του διαγράμματος με κόσκινα υψωμένα στην 0.45 δύναμη έως το σημείο που αντιστοιχεί στο μέγιστο μέγεθος κόσκινου από το οποίο διέρχεται το 100 % του μείγματος (Cominsky, et al., 1994). Ουσιαστικά, η συγκεκριμένη γραμμή αναπαριστά μία διαβάθμιση στην οποία επιτυγχάνεται η πιο πυκνή διάταξη των αδρανών, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό λόγω των πολύ περιορισμένων κενών που θα δημιουργηθούν (Moutaz, 2006).

Σημεία Ελέγχου (Control Points): Καθορίζουν τον τύπο του μείγματος και λειτουργούν ως το εύρος μεγίστου και ελαχίστου σημείου από τα οποία είναι αναγκαίο να διέρχεται η κοκκομετρική διαβάθμιση. Σημεία ελέγχου συναντώνται στο μέγιστο ονομαστικό μέγεθος N<sub>mas</sub>, στο μεσαίο μέγεθος 2.36 mm και στο ελάχιστο κόσκινο 0.075 mm. (Asphalt Institute, 2014). Για κάθε ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανούς αντιστοιχεί και ο ανάλογος πίνακας με τα εύρη των σημείων ελέγχου.

Απαγορευμένη Ζώνη ή Κρίσιμη Περιοχή (Restricted Zone): Αποτελεί μία περιοχή γύρω από τη γραμμή μέγιστης πυκνότητας μεταξύ των κοσκίνων με μέγεθος 2.36 mm και 0.3 mm, από την οποία απαγορεύεται να διέρχεται η κοκκομετρική διαβάθμιση. Η έννοια της απαγορευμένης ζώνης εισήχθη καθώς παρατηρήθηκε ότι κοκκομετρίες που διέρχονται από τη συγκεκριμένη ζώνη αποτελούσαν ένδειξη υψηλού ποσοστού αργίλου στο μείγμα, οδηγώντας σε χαμηλές τιμές VMA (Al-Khateeb, et al., 2017). Ομοίως με τα σημεία ελέγχου, η απαγορευμένη ζώνη διαφοροποιείται ανάλογα με το μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών.

Γενικά, προτείνεται σε υψηλά επίπεδα κυκλοφορίας η κοκκομετρική διαβάθμιση να κινείται προς τις ελάχιστες τιμές των σημείων ελέγχου, κάτω από την απαγορευμένη ζώνη. Σύμφωνα με τους (Zhang, et al., 2004), όταν η κοκκομετρική διαβάθμιση κινείται κάτω από την απαγορευμένη ζώνη παρατηρούνται υψηλότερες τιμές VMA, χωρίς ωστόσο να αποτελεί καθοριστικό κριτήριο η συγκεκριμένη οδηγία. Στη συνέχεια παρατίθενται ο Πίνακας 3.7 με τιμές σημείων ελέγχου και της απαγορευμένης ζώνης και στην Εικόνα 3.10 το διάγραμμα με κόσκινα υψωμένα στην 0.45 δύναμη.



**Εικόνα 3.10: Κοκκομετρική διαβάθμιση με τα σημεία ελέγχου και την απαγορευμένη ζώνη (Asphalt Institute, 2014)**

**Πίνακας 3.7: Κριτήρια σημείων ελέγχου και απαγορευμένης ζώνης κοκκομετρικής διαβάθμισης κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014)**

Πρότυπο Μέγεθος Κόσκινου (mm)	Μέγιστο Ονομαστικό Μέγεθος Κόκκου Αδρανών (mm)				
	9.5	12.5	19	25	37.5
<b>Σημεία Ελέγχου (Control Points)-Διερχόμενο %</b>					
50					100
37.5				100	90-100
25			100	90-100	
19		100	90-100		
12	100	90-100			
9.5	90-100				
2.36	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41
0.075	2-10	2-10	2-8	1-7	0-6
<b>Απαγορευμένη ζώνη (Restricted Zone)-Εύρος %</b>					
4.75				39.5	34.7
2.36	47.2	39.1	34.6	26.8-30.8	23.3-27.3
1.18	31.6-37.6	25.6-31.6	22.3-28.3	18.1-24.1	15.5-21.5
0.6	23.5-27.5	19.1-23.1	16.7-20.7	13.6-17.6	11.7-15.7
0.3	18.7	15.5	13.7	11.4	10

### 3.3.2 Εκτίμηση αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου

Εν συνεχεία των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, προσδιορίζεται για κάθε δοκιμαστική μείξη μία **αρχική περιεκτικότητα ασφάλτου** για την ανάμειξη και σύνθεση του ασφαλτομίγματος. Κύριο μέλημα είναι η επιλογή του κατάλληλου ποσοστού το οποίο θα οδηγήσει στο επιθυμητό ποσοστό κενών αέρα 4 % στο συμπυκνωμένο μείγμα, με αποδεκτό ένα εύρος τιμών  $\pm 2$  % για το βήμα της δοκιμαστικής μείξης. Η επιλογή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω μεθόδων είτε βάσει της εμπειρίας του μηχανικού, χωρίς να είναι επιτακτική ανάγκη η υψηλή ακρίβεια, καθώς ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου προκύπτει από το επόμενο βήμα της διαδικασίας, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.4. Επισημαίνεται ότι για κάθε δοκιμαστική μείξη αδρανών παράγονται δύο δοκίμια ασφαλτομιγμάτων, συνεπώς έξι ή οχτώ συνολικά.

Παρακάτω περιγράφεται η **διαδικασία** που ακολουθείται για την εκτίμηση της αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου για κάθε δοκιμαστική κοκκομετρική διαβάθμιση, όπως περιγράφεται από τους (Hossain, et al., 2018).

Βήμα 1: Υπολογισμός ενεργού ειδικού βάρους του μείγματος αδρανών με τη σχέση:

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8 \times (G_{sa} - G_{sb}) \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

όπου:

$G_{se}$  = Ενεργό ειδικό βάρος μείγματος αδρανών

$G_{sb}$  = Φαινόμενο ειδικό βάρος μείγματος αδρανών

$G_{sa}$  = Εμφανές ειδικό βάρος μείγματος αδρανών

Ο συντελεστής 0.8 μπορεί να μεταβληθεί σε 0.6 ή 0.5 ανάλογα με την απορροφητικότητα των αδρανών.

Βήμα 2: Υπολογισμός απορροφημένου όγκου ασφάλτου από τα αδρανή με τη σχέση:

$$V_{ba} = \frac{P_s \times (1 - VTM)}{\left[ \frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right]} \times \left[ \frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right] \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

όπου:

$V_{ba}$  = Όγκος ασφάλτου που απορροφάται από τα αδρανή

$P_b$  = Ποσοστό ασφάλτου (έστω 5 %)

$P_s$  = Ποσοστό αδρανών (έστω 95 %)

$G_b$  = Ειδικό βάρος ασφάλτου (έστω 1.02)

$VTM$  = Κενά αέρα (έστω 4 %)

Βήμα 3: Υπολογισμός ενεργού όγκου ασφάλτου με τη σχέση:

$$V_{be} = 0.176 - 0.0675 \times \log(S_n) \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

όπου:

$V_{be}$  = Ενεργός όγκος ασφάλτου

$S_n$  = Μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών στο μείγμα

Βήμα 4: Εκτίμηση αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου με τη σχέση:

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{[G_b \times (V_{be} + V_{ba}) + W_s]} \times 100 \quad (\text{Σχέση 3.4})$$

όπου:

$P_{bi}$  = Ποσοστό αρχικής εκτιμώμενης περιεκτικότητας ασφάλτου

$V_{be}$  = Ενεργός όγκος ασφάλτου

$V_{ba}$  = Όγκος ασφάλτου που απορροφάται από τα αδρανή

$G_b$  = Ειδικό βάρος ασφάλτου

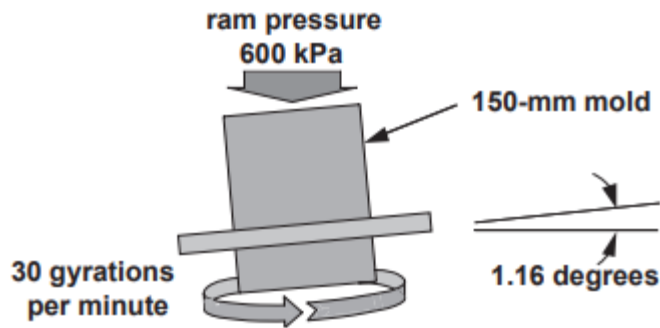
$$W_s = \text{Βάρος αδρανών} = \frac{P_s \times (1 - VTM)}{\left[ \frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right]} \quad (\text{Σχέση 3.5})$$

### 3.3.3 Συμπύκνωση κατά Superpave

Η Superpave δεν ακολουθεί τον κρουστικό τρόπο συμπύκνωσης της μεθόδου Marshall, αλλά χρησιμοποιεί την περιστροφική διαδικασία για τη βέλτιστη προσομοίωση των επί τόπου συνθηκών. Οι **γυροσκοπικοί συμπυκνωτές (Superpave Gyrotory Compactor-SGC)** αναπτύχθηκαν μέσω του προγράμματος SHRP ως μέρος της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων. Ο SGC αποτελεί μία συσκευή, η οποία παρέχει τη δυνατότητα ενημέρωσης του χρήστη, σχετικά με το ύψος του συμπυκνωμένου δοκιμίου, και κατ' επέκταση την πυκνότητα, στοιχεία τα οποία διατίθενται σε κάθε περιστροφή. Το ασφαλτόμιγμα τοποθετείται σε μήτρες διαμέτρου 150 mm, και κατά τη γυροσκοπική συμπύκνωση εφαρμόζεται πίεση 600 kPa, εσωτερική γωνία περιστροφής 1,16 ° και ταχύτητα περιστροφής 30 στροφές ανά λεπτό. Στην παρακάτω Εικόνα 3.11 φαίνεται η συσκευή SGC, ενώ στην Εικόνα 3.12 παρατηρούνται τα στοιχεία ρύθμισής της.



**Εικόνα 3.11:** Συσκευή γυροσκοπικής Συμπύκνωσης SGC (Matest-Innovative global manufacturer, n.d.)



Εικόνα 3.12: Ρύθμιση συσκευής SGC (Asphalt Institute, 2014)

Ο **βαθμός συμπίκνωσης** κατά τη μέθοδο Superpave καθορίζεται από την αναμενόμενη κυκλοφορία σχεδιασμού και τη μέγιστη μέση εφταήμερη θερμοκρασία. Κατά τη διαδικασία της συμπίκνωσης, τρία είναι τα βασικά σημεία, τα οποία εκφράζουν και το διαφορετικό επίπεδο συμπίκνωσης ανάλογα με τον αριθμό περιστροφών που έχει πραγματοποιηθεί. Αυτά τα σημεία είναι τα  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$ ,  $N_{max}$ , των οποίων οι τιμές προσδιορίζονται ακολουθώντας τον Πίνακα 3.8 και οι έννοιες τους αναφέρονται παρακάτω. Επίσης, τονίζεται ότι αποτελούν καθοριστικά κριτήρια τόσο για την επιλογή της τελικής δοκιμαστικής μείξης όσο και για την επιλογή του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου.

$N_{ini}$  = Αρχικός αριθμός περιστροφών (Μετά την επίστρωση και πριν τη συμπίκνωση)

$N_{des}$  = Αριθμός περιστροφών σχεδιασμού (20ετή λειτουργία οδοστρώματος)

$N_{max}$  = Μέγιστος αριθμός περιστροφών (Τέλος ζωής οδοστρώματος)

Πίνακας 3.8: Τιμές  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$ ,  $N_{max}$  (Cominsky, et al., 1994)

Επίπεδα Κυκλοφορίας (ESALs)	Μέγιστη Μέση Εφταήμερη Θερμοκρασία Σχεδιασμού (° C)											
	< 39			39-41			41-43			43-45		
	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$
$< 3 \times 10^5$	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
$< 1 \times 10^6$	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
$< 3 \times 10^6$	7	86	134	7	95	150	8	100	158	8	105	167
$< 1 \times 10^7$	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
$< 3 \times 10^7$	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
$< 1 \times 10^8$	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
$\geq 1 \times 10^8$	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288

### 3.3.4 Ογκομετρικά στοιχεία και έλεγχος προδιαγραφών

Η τελική επιλογή του μείγματος αδρανών σχεδιασμού εξάγεται από τον υπολογισμό των ογκομετρικών στοιχείων και έλεγχο των προδιαγραφών για τα VTM, VMA, VFA και ποσοστά πυκνότητας (%Gmm) στα επίπεδα συμπίκνωσης  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$ ,  $N_{max}$ . Πέρα από τα δύο μείγματα που συμπυκνώνονται, δημιουργούνται άλλα δύο για τον υπολογισμό του Gmm, ως το μέσο όρο τους.

Ακολουθείται η εξής **διαδικασία** (Hossain, et al., 2018):

**Βήμα 1:** Εκτίμηση  $G_{mb}$  από τις μετρήσεις ύψους του SGC με τη σχέση:

$$G_{mb} = \frac{W_m/V_m}{\gamma_w} \quad (\text{Σχέση 3.6})$$

όπου:

$G_{mb}$  = Εκτιμώμενο φαινόμενο ειδικό βάρος

$W_m$  = Μάζα ασφαλτομίγματος

$$V_m = \text{Όγκος ασφαλτομίγματος} = \frac{\pi d^2 h}{4} \times 0.001 \quad (d = 150\text{mm}) \quad (\text{Σχέση 3.7})$$

$\gamma_w$  = Ειδικό βάρος νερού

**Βήμα 2:** Συντελεστής διόρθωσης για υπολογισμό πραγματικού ειδικού βάρους με τη σχέση:

$$C = \frac{h_{max}}{h_i} \quad (\text{Σχέση 3.8})$$

όπου:

$h_{max}$  = Τιμή ύψους δοκιμίου στο τέλος

$h_i$  = Τιμή ύψους δοκιμίου στον αντίστοιχο γύρο συμπίκνωσης

**Βήμα 3:** Διόρθωση εκτιμώμενου φαινόμενου ειδικού βάρους με τη σχέση:

$$G_{mb(\text{πραγματικό})} = C \times G_{mb} \quad (\text{Σχέση 3.9})$$

Σε κάθε επίπεδο συμπίκνωσης το %Gmm υπολογίζεται ως το πηλίκου του  $G_{mb(\text{πραγματικό})}$  προς το μέση τιμή του Gmm των δύο δοκιμίων.

**Βήμα 4:** Υπολογισμός κενών αέρα VTM στα  $N_{des}$  με τη σχέση:

$$VTM = 100 - \%Gmm@N_{des} \quad (\text{Σχέση 3.10})$$

Βήμα 5: Υπολογισμός VMA στα  $N_{des}$  με τη σχέση:

$$VMA = 100 - \frac{\%Gmm@Ndes \times Gmm \times Ps}{Gsb} \quad (\text{Σχέση 3.11})$$

όπου:

$Ps$  = Ποσοστό αδρανών

Βήμα 6: Υπολογισμός VFA στα  $N_{des}$  με τη σχέση:

$$VFA = 100 \times \frac{\%VMA@Ndes - VTM@Ndes}{\%VMA@Ndes} \quad (\text{Σχέση 3.12})$$

Τα ογκομετρικά κριτήρια αναφέρονται σε ποσοστό κενών 4 %, κατά συνέπεια με διαφορετική τιμή VTM στα  $N_{des}$ , η διαδικασία συνεχίζεται για τον υπολογισμό προσαρμοσμένης τιμής περιεκτικότητας ασφάλτου για την επίτευξη του συγκεκριμένου ποσοστού.

Βήμα 7: Υπολογισμός περιεκτικότητας ασφάλτου στα  $N_{des}$  για VTM = 4 % με τη σχέση:

$$Pb = Pbi - [0.4 \times (4 - VTM)] \quad (\text{Σχέση 3.13})$$

όπου:

$Pbi$  = Αρχική εκτιμώμενη περιεκτικότητα ασφάλτου

VTM = Ποσοστό κενών αέρα για την αρχική εκτιμώμενη περιεκτικότητα ασφάλτου

Βήμα 8: Υπολογισμός VMA στα  $N_{des}$  για VTM = 4 % με τη σχέση:

$$VMA' = VMA + C_1 \times (4 - VTM) \quad (\text{Σχέση 3.14})$$

Βήμα 9: Υπολογισμός VFA στα  $N_{des}$  για VTM = 4 % με τη σχέση:

$$VFA = 100 \times \frac{\%VMA' - 4}{\%VMA'} \quad (\text{Σχέση 3.15})$$

Τελικά, επικρατεί μία ακόμη απαίτηση η οποία σχετίζεται με την **αναλογία σκόνης** που εντοπίζεται (**Dust Proportion-DP**). Υπολογίζεται διαιρώντας το διερχόμενο ποσοστό μάζας που διέρχεται από το μέγεθος κόσκινου 0.075 mm με την ενεργή περιεκτικότητα ασφάλτου (ποσοστό μάζας στο ασφαλόμιγμα) ως εξής:

$$DP = P_{0.075} / P_{be} \quad (\text{Σχέση 3.16})$$

όπου:

$$P_{be} = Pb - \left[ (Ps \times Gb) \times \left( \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) \right] \quad (\text{Σχέση 3.17})$$



Τελικά, η τελική δομή του δοκιμαστικού μείγματος αδρανών για το επόμενο βήμα του προσδιορισμού της βέλτιστης περιεκτικότητας σε ασφάλτο, συγκρίνοντας διαφορετικά ποσοστά, προκύπτει αξιολογώντας τον παρακάτω Πίνακα 3.9 κριτηρίων ως το πιο κατάλληλο μείγμα.

**Πίνακας 3.9: Κριτήρια προδιαγραφών κατά Superpave (Asphalt Institute, 2014)**

20ετή Κυκλοφορία σχεδιασμού (10 <sup>6</sup> ) ESALs	%Gmm			VMA (ελάχιστο %)					VFA	DP
				Μέγιστο Ονομαστικό Μέγεθος Κόκκου Αδρανών (mm)						
	N <sub>ini</sub>	N <sub>des</sub>	N <sub>max</sub>	37.5	25	19	12.5	9.5		
< 0.3	≤91.5								70-80	0.6 έως 1.2
0.3 έως 3	≤90.5								65-78	
3 έως 10		≤96	≤98	11	12	13	14	15	65-75	
10 έως 30	≤89									
≥ 30									65-75	

### 3.4 Προσδιορισμός Βέλτιστης Περιεκτικότητας σε Ασφάλτο

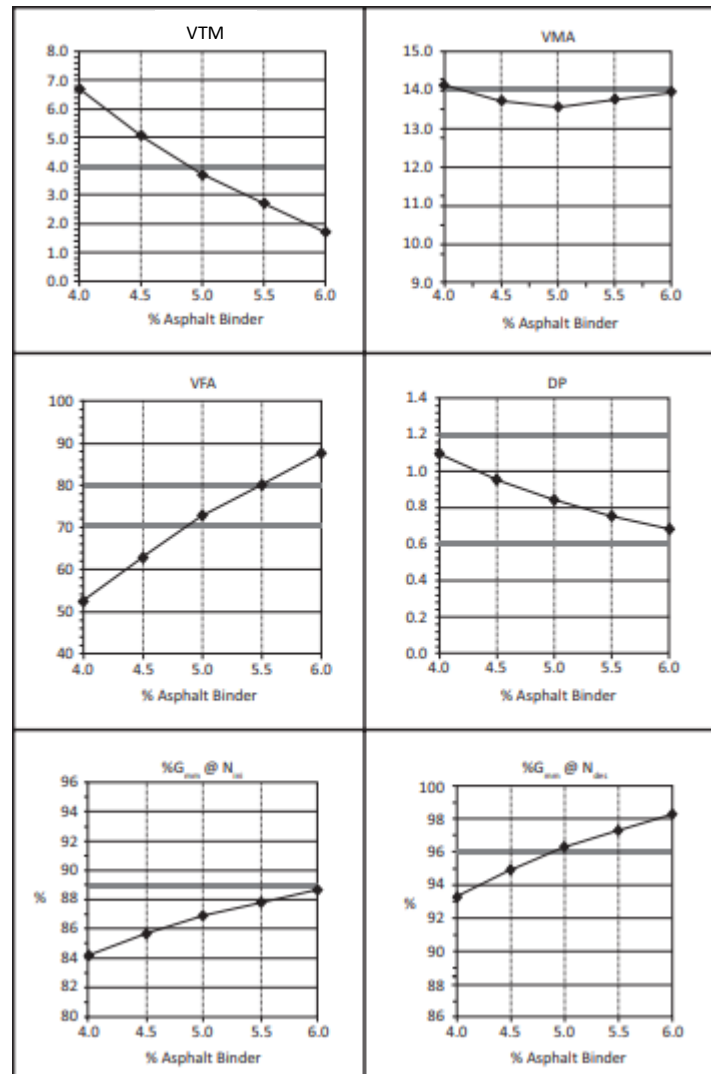
#### 3.4.1 Επίπεδο σχεδιασμού 1

Τον προσδιορισμό της τελικής δοκιμαστικής μείξης σχεδιασμού αδρανών με το εκτιμώμενο ποσοστό ασφάλτου ακολουθεί το στάδιο για τη εύρεση του βέλτιστου ποσοστού συνδετικού υλικού. Σε αυτό το βήμα συμπυκνώνονται ασφαλτομείγματα με τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητες ασφάλτου, την αρχική εκτιμώμενη και σε ποσοστό ± 0.5 % και +1 %. Τουλάχιστον δύο μείγματα για κάθε περιεκτικότητα προετοιμάζονται για τον προσδιορισμό του μεγίστου θεωρητικού ειδικού βάρους. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στο βήμα δοκιμαστικής μείξης σχεδιασμού (Hossain, et al., 2018).

Οι ογκομετρικές ιδιότητες υπολογίζονται για κάθε περιεκτικότητα σε αριθμό περιστροφών N<sub>des</sub>. Από τα σημεία που προκύπτουν σχεδιάζονται τα εξής **γραφήματα**:

- Κενά αέρα -VTM (%) προς περιεκτικότητα ασφάλτου (%)
- VMA (%) προς περιεκτικότητα ασφάλτου (%)
- VFA (%) προς περιεκτικότητα ασφάλτου (%)

Το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου προκύπτει για κενά αέρα 4 %, εφόσον ικανοποιούνται και τα υπόλοιπα κριτήρια (% G<sub>mm</sub> σε N<sub>ini</sub> , % G<sub>mm</sub> σε N<sub>max</sub> και αναλογία σκόνης DP) (Hossain, et al., 2018).



**Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικά γραφήματα για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου (Asphalt Institute, 2014)**

### 3.4.2 Επίπεδα σχεδιασμού 2 και 3

Το επίπεδο 1, που μόλις περιγράφηκε αποτελεί μία ογκομετρική ανάλυση στην οποία δεν περιλαμβάνονται οι έλεγχοι συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Σε έργα υψηλότερων προδιαγραφών και αυξημένων φορτίων συνιστάται να εφαρμόζονται και ορισμένοι έλεγχοι για τη βέλτιστη αξιολόγηση του παραγόμενου ασφαλτομίγματος. Οι έλεγχοι αυτοί αποτελούν ένδειξη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος στις τρεις βασικές φθορές της μόνιμης παραμόρφωσης, της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης και της ρηγμάτωσης λόγω χαμηλής θερμοκρασίας.

### Μόνιμη Παραμόρφωση

- Έλεγχος απλής διάτμησης σε σταθερό ύψος δοκιμίου (simple shear at constant height)
- Έλεγχος διάτμησης επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε σταθερό ρυθμό τάσης (repeated shear at constant stress ratio)
- Έλεγχος διάτμησης σε εύρος συχνοτήτων και σταθερό ύψος δοκιμίου (frequency sweep at constant height)

### Ρηγμάτωση λόγω Επαναλαμβανόμενης Φόρτισης

- Έλεγχος διάτμησης σε εύρος συχνοτήτων και σταθερό ύψος δοκιμίου (frequency sweep at constant height)
- Έλεγχος διάτμησης σε σταθερό ύψος (shear at constant height)
- Έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό (indirect tensile strength)

### Ρηγμάτωση λόγω Χαμηλών Θερμοκρασιών

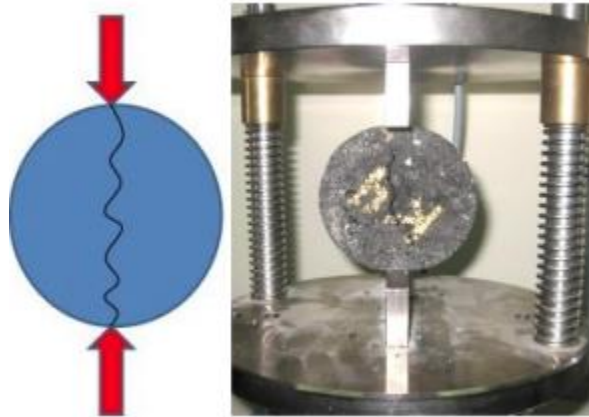
- Έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό (indirect tensile strength)
- Δοκιμή ερπυσμού σε έμμεσο εφελκυσμό (indirect tensile creep test)

Σημειώνεται ότι καθένας από τους προαναφερθέντες ελέγχους πραγματοποιείται στην κατάλληλη θερμοκρασία. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η διαφορά σχεδιασμού μεταξύ των επιπέδων δύο και τρία αφορά στην αυστηρότητα των κριτηρίων. Είναι δυνατό για κάθε τύπο φθοράς οδοστρώματος να εφαρμοστεί και διαφορετικό επίπεδο σχεδιασμού. Το επίπεδο 3 περιλαμβάνει επιπλέον τους παρακάτω δύο ελέγχους για τη μέτρηση της μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του σκελετού των αδρανών:

- Υδροστατική κατάσταση καταπόνησης (hydrostatic state of stress)
- Μονοαξονική καταπόνηση (uniaxial strain)

## **3.5 Αξιολόγηση Ευαισθησίας σε Υγρασία**

Το τελικό στάδιο της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Superpave περιλαμβάνει τη διασφάλιση καλής συμπεριφοράς του μείγματος βάσει της ευαισθησίας του στην επίδραση του νερού (έλεγχος υδροφιλίας). Για τον έλεγχο της υδροφιλίας συμπυκνωμένα δοκίμια ασφαλτομίγματος, αφού υποβληθούν σε διαφορετικές συνθήκες προετοιμασίας (υγρές και ξηρές συνθήκες), υποβάλλονται στη δοκιμή εφελκυστικής αντοχής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14.



**Εικόνα 3.14: Έλεγχος σε εφελκυστική αντοχή (Λοΐζος & Πλατή, 2020)**

Συγκεκριμένα, τα ασφαλτομίγματα συμπυκνώνονται σε  $7 \pm 0.5$  % κενά αέρα, τρία σε υγρές και τρία σε ξηρές συνθήκες. Η δοκιμή εφελκυστικής αντοχής πραγματοποιείται με ρυθμό 51 mm / min. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής προσδιορίζονται ως εξής:

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times h \times D} \quad (\text{Σχέση 3.18})$$

όπου:

$S_t$  = Εφελκυστική αντοχή (kPa)

$P$  = Μέγιστο φορτίο (N)

$h$  = Ύψος δοκιμίου (mm)

$D$  = Διάμετρος δοκιμίου (mm)

Τελικά, η υδροφιλία ελέγχεται με βάση το λόγο της εφελκυστικής αντοχή των υγρών δοκιμίων προς την εφελκυστική αντοχή των ξηρών δοκιμίων. Ο δείκτης ονομάζεται TSR (Tensile Strength Ratio) και προσδιορίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$TSR = \frac{S_{wet}}{S_{dry}} \quad (\text{Σχέση 3.19})$$

όπου:

$S_{dry}$  = Μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής των δοκιμίων σε ξηρές συνθήκες

$S_{wet}$  = Μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής των δοκιμίων σε υγρές συνθήκες

## 4. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MARSHALL - SUPERPAVE

### 4.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή των δύο υπό διερεύνηση μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, είναι εμφανής ο σημαντικός αριθμός διαφοροποιήσεων που τις χαρακτηρίζει. Η **συγκριτική τους αξιολόγηση** κρίνεται υψηλής σημασίας τόσο για την πλήρη εργαστηριακή διαδικασία και ανάλυση που εφαρμόζεται για την κάθε μέθοδο, όσο και τη συμπεριφορά του οδοστρώματος σε πραγματικές συνθήκες. Η βασική τους διαφορά στηρίζεται στον **τύπο** που αντιπροσωπεύει η κάθε μέθοδος. Η Marshall αποτελεί μία πειραματική μέθοδο, η οποία έχει βασιστεί στις παρατηρήσεις και την εμπειρία των μηχανικών σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά και τις φθορές των ασφαλτικών στρώσεων με την πάροδο του χρόνου. Από την άλλη, η Superpave θεωρείται ως μία βελτιωμένη μέθοδος, η οποία ακολουθώντας την ογκομετρική ανάλυση της Marshall θέτει μία σειρά πρόσθετων ελέγχων και προδιαγραφών δικαιολογώντας τον χαρακτηρισμό της ως αναλυτική.

Αναφορικά με τα παραπάνω, προκύπτει και ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου Superpave. Η εισαγωγή νέων ελέγχων, προδιαγραφών και συστημάτων για την επιλογή των δύο βασικών συστατικών του ασφαλτομίγματος προσδίδει υψηλότερη ποιότητα και ανθεκτικότητα στο τελικό προϊόν. Γενικά, παρατηρείται υψηλότερη **αυστηρότητα** σε κάθε βήμα της τελευταίας μεθόδου, ενώ ξεχωριστό στάδιο αποτελεί η αξιολόγηση της ευαισθησίας στην υγρασία.

Αξιοσημείωτο σημείο σύγκρισης των δύο μεθόδων αποτελεί φυσικά το **είδος και το κόστος του εξοπλισμού** που χρησιμοποιείται για την εργαστηριακή διαδικασία. Η απλότητα εύρεσης και χρήσης, όπως και η οικονομία του εξοπλισμού που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου Marshall, αποτελούν ένα κρίσιμο σημείο το οποίο δημιουργεί ενδιαασμούς σχετικά με την υιοθέτηση της Superpave. Είναι προφανές ότι οι επιπλέον έλεγχοι είτε για την αξιολόγηση των αδρανών και της ασφάλτου είτε για τους ελέγχους συμπεριφοράς, σχετικά με τις φθορές οδοστρωμάτων, περιπλέκουν την όλη διαδικασία και αυξάνουν το κόστος εφαρμογής της Superpave. Ενδεικτικά, όπως αναφέρεται από τον (Memon, 2006), ο γυροσκοπικός συμπτκνωτής SGC είναι περίπου επτά φορές πιο ακριβός από το σφυρί Marshall.

Εν συνεχεία της διερεύνησης για το είδος του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, ιδιαίτερη αναφορά αξίζει στον **τρόπο συμπύκνωσης** που πραγματοποιείται. Η Superpave εφαρμόζει γυροσκοπική συμπύκνωση με τον Superpave Gyrotory Compactor σε αντίθεση με τη μέθοδο Marshall που στηρίζεται στον κρουστικό τρόπο με το ομώνυμο σφυρί. Προφανώς, διαφορετικά στοιχεία εντοπίζεται τόσο στις διαμέτρους των μητρών

και τα επίπεδα συμπίκνωσης ,όσο και στην επιτυχία προσομοίωσης της συμπίκνωσης με τις επί τόπου συνθήκες.

Επιπλέον, η βέλτιστη αναπαράσταση των εργαστηριακών συνθηκών με τις πραγματικές ικανοποιείται μέσα από μία **σειρά ελέγχων συμπεριφοράς** για την παραμένουσα παραμόρφωση, τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και τη ρηγμάτωση λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Παρά το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι έλεγχοι δεν αποτελούν επίσημη προϋπόθεση , το Ινστιτούτο Ασφάλτου υποστηρίζει την αναγκαιότητα εφαρμογή τους, ειδικά για έργα σημαντικών προδιαγραφών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Superpave και Marshall επικεντρώνεται στα εξής βασικά σημεία:

- τύπος διαδικασίας
- προδιαγραφές επιλογής υλικών
- έλεγχος υδροφιλίας
- είδος και κόστος εξοπλισμού
- τρόπος συμπίκνωσης
- αναπαράσταση πραγματικών συνθηκών
- αξιολόγηση στις βασικές φθορές οδοστρώματος

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η ενδελεχής ανασκόπηση της διεθνούς εμπειρίας και πρακτικής όσον αφορά στο υπόψη θέμα, οδήγησε στην διαμόρφωση του Πίνακας 4.1, στον οποίο παρουσιάζονται συγκριτικά τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων.

**Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά σημεία συγκριτικής αξιολόγησης μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall και Superpave**

<b>Μέθοδος Marshall</b>	<b>Μέθοδος Superpave</b>
<b>1.</b> Εμπειρική-Πειραματική μέθοδος	<b>1.</b> Αναλυτική - υπολογιστική μέθοδος με εμπειρικά στοιχεία
<b>2.</b> Απλότητα	<b>2.</b> Πιο πολύπλοκη μέθοδος
<b>3.</b> Οικονομικός και εύκολα προσβάσιμος εξοπλισμός	<b>3.</b> Σύνθετος με υψηλότερο κόστος εξοπλισμός

<b>4.</b> Καμία διάκριση σε επίπεδα σχεδιασμού	<b>4.</b> Διάκριση σε τρία επίπεδα σχεδιασμού
<b>5.</b> Τυπικοί έλεγχοι καταλληλότητας συστατικών ασφαλτομίγματος	<b>5.</b> Συνεχής και αυστηρή αξιολόγηση συστατικών ασφαλτομίγματος
<b>6.</b> Μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών 25 mm (ή 38 mm με προσαρμογές)	<b>6.</b> Μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών 50 mm
<b>7.</b> Μη εφαρμογή της έννοιας μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών - Nmas	<b>7.</b> Χρήση έννοιας μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου αδρανών-Nmas
<b>8.</b> Μη απαίτηση ελέγχου αδρανών στις ιδιότητες συναίνεσης και πηγής προέλευσης	<b>8.</b> Έλεγχος αδρανών στις ιδιότητες συναίνεσης και πηγής προέλευσης
<b>9.</b> Κοκκομετρική διαβάθμιση χωρίς σημεία ελέγχου και απαγορευμένη ζώνη	<b>9.</b> Κοκκομετρική διαβάθμιση με σημεία ελέγχου και απαγορευμένη ζώνη
<b>10.</b> Επιλογή και κατηγοριοποίηση ασφάλτου βάσει τιμών διεισδυτικότητας	<b>10.</b> Επιλογή ασφάλτου βάσει συστήματος Performance Grade (PG - X Y)
<b>11.</b> Τυπικές εργαστηριακές δοκιμές διείσδυσης, μάλθωσης, ανάφλεξης, ιξώδους, γήρανσης κλπ.	<b>11.</b> Έλεγχοι αξιολόγησης πλήρης ζωής ασφάλτου όπως, RTFO, PAV, DSR, RV, BBR, DTT
<b>12.</b> Μη πραγματοποίηση δοκιμαστικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων	<b>12.</b> Δοκιμαστικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις για την επιλογή της τελικής δομής αδρανών
<b>13.</b> Προσδιορισμός αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου εμπειρικά ή μέσω τύπου	<b>13.</b> Προσδιορισμός αρχικής περιεκτικότητας ασφάλτου βάσει της πιο κατάλληλης κοκκομετρίας
<b>14.</b> Κρουστική μέθοδος συμπίκνωσης - εφαρμογή "κτύπων" με το σφυρί Marshall	<b>14.</b> Γυροσκοπικός τρόπος συμπίκνωσης- περιστροφικό γυροσκόπιο Superpave Gyrotory Compactor
<b>15.</b> Μήτρες με διάμετρο περίπου 102 mm (101.6 mm)	<b>15.</b> Μήτρες με διάμετρο 150 mm
<b>16.</b> Καθορισμός επιπέδου συμπίκνωσης (αριθμός "κτύπων") βάσει κυκλοφορίας	<b>16.</b> Καθορισμός επιπέδου συμπίκνωσης (αριθμός περιστροφών) βάσει κυκλοφορίας και θερμοκρασιών
<b>17.</b> Καμία αναφορά στις έννοιες $N_{max}$ , $N_{ini}$ , $N_{des}$	<b>17.</b> Εισαγωγή εννοιών $N_{max}$ , $N_{ini}$ , $N_{des}$ ως επίπεδα συμπίκνωσης για αξιολόγηση κριτηρίων

<b>18.</b> Υπολογισμός ειδικού βάρους με τη λήξη της κρουστικής συμπίκνωσης	<b>18.</b> Δυνατότητα υπολογισμού ειδικού βάρους σε κάθε περιστροφή (επίπεδο συμπίκνωσης)
<b>19.</b> Καμία αναφορά στην έννοια αναλογίας σκόνης (Dust Proportion)	<b>19.</b> Έλεγχος αναλογία σκόνης (Dust Proportion) για την επιλογή της πιο κατάλληλης δομής μείγματος
<b>20.</b> Κανένας έλεγχος ποσοστών φαινομένου ειδικού βάρους	<b>20.</b> Έλεγχος απαιτήσεων ποσοστών φαινομένου ειδικού βάρους στα τρία επίπεδα συμπίκνωσης
<b>21.</b> Χαρακτηριστικό στάδιο ο έλεγχος ευστάθειας και παραμόρφωσης	<b>21.</b> Καμία αναφορά στην ειδική συσκευή Marshall για τον προσδιορισμό της ευστάθειας και παραμόρφωσης
<b>22.</b> Δημιουργία μειγμάτων με πέντε διαφορετικές περιεκτικότητας ασφάλτου για την τελική επιλογή	<b>22.</b> Δημιουργία μειγμάτων με τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητας ασφάλτου για την τελική επιλογή
<b>23.</b> Επιλογή βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου βάσει VTM, VMA, VFA, ευστάθειας και παραμόρφωσης	<b>23.</b> Επιλογή βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου βάσει VTM, VMA, VFA, DP, % Gmm σε $N_{ini}$ , % Gmm σε $N_{max}$
<b>24.</b> Καμία αναφορά σε ελέγχους συμπεριφοράς για τους τρεις τύπους αστοχίας οδοστρώματος	<b>24.</b> Επιπρόσθετοι έλεγχοι συμπεριφοράς σχετικά με τους τρεις τύπους αστοχίας οδοστρώματος
<b>25.</b> Καμία αναφορά για ξεχωριστή αξιολόγηση της ευαισθησίας του ασφαλτομείγματος σε υγρασία	<b>25.</b> Χαρακτηριστικό βήμα της μελέτης η αξιολόγησης της ευαισθησίας του ασφαλτομείγματος σε υγρασία
<b>26.</b> Συνήθως απαιτείται συμπίκνωση $\geq 95$ % της μέγιστης εργαστηριακής τιμής	<b>26.</b> Γενικά απαιτείται συμπίκνωση 94 % (+ / -2 %) της Μέγιστης θεωρητικής τιμής
<b>27.</b> Δεν αξιοποιούνται οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι LTPP και Sharp	<b>27.</b> Αξιοποιούνται οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι LTPP και Sharp για $T_{max}$ , $T_{min}$ , (PG)
<b>28.</b> Διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη συμπεριφορά σε επί τόπου συνθήκες	<b>28.</b> Άμεση συσχέτιση εργαστηρίου-πραγματικών συνθηκών στο πεδίο
<b>29.</b> Πλειοψηφία συναφών ερευνών καταλήγει σε μεγαλύτερο ποσοστό ασφάλτου	<b>29.</b> Πλειοψηφία συναφών ερευνών καταλήγει σε μικρότερο ποσοστό ασφάλτου
<b>30.</b> Πλειοψηφία συναφών ερευνών καταλήγει σε χαμηλότερη ανθεκτικότητα	<b>30.</b> Πλειοψηφία συναφών ερευνών καταλήγει σε υψηλότερη ανθεκτικότητα



## 4.2 Παράθεση Στοιχείων Συναφών Ερευνών

Στο παρόν εδάφιο συγκεντρώνονται **εργαστηριακά αποτελέσματα** και συμπεράσματα από διάφορες μελέτες μηχανικών-ερευνητών βάσεις της **διεθνούς βιβλιογραφίας**. Το πλήθος των εκτεταμένων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί αντικατοπτρίζει το ισχυρό ενδιαφέρον που επικρατεί παγκοσμίως σχετικά με την αντικατάσταση της εφαρμογής της μεθόδου Marshall από την Superpave. Αρκετοί είναι οι συγκοινωνιακοί φορείς ή ερευνητικά πανεπιστήμια, τα οποία προωθούν την συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων. Ιδιαίτερα κρίσιμη θεωρείται η αναγκαιότητα υιοθέτησης της Superpave σε οδούς χαμηλής σημασίας και κυκλοφοριακών συνθηκών. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία από 15 συναφείς έρευνες, στις οποίες λήφθηκαν υπόψη τοπικά υλικά, κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής, προκειμένου να προσδιοριστεί εάν ισχύει η υπεροχή της μεθόδου Superpave. Η πλειοψηφία των μελετών υποστηρίζει την εφαρμογή της Superpave, ενώ μερικές δεν καταλήγουν σε αξιοσημείωτη διαφοροποίησή τους. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα, τα οποία προκύπτουν, αφορούν κυρίως τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος, δηλαδή το ποσοστό ασφάλτου, VMA, VFA, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζεται και η διερεύνηση τους βάσει ελέγχων συμπεριφοράς, με βασικότερους τον έλεγχο υδροφιλίας και την ευστάθεια. Αναλυτικότερα, αναφέρονται οι ακόλουθες έρευνες.

*I. Asi, I., 2007. Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. Construction and Building Materials, 21(8), pp. 1732-1740.*

Η εμφάνιση σημαντικών φθορών στο οδικό δίκτυο της Ιορδανίας, οδήγησε τον (Asi, 2007) στη συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχείς μεταβολές στις κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η διερεύνηση αναγκαιότητας εφαρμογής της μεθόδου Superpave έναντι της παραδοσιακής Marshall. Αξιοποιήθηκαν τοπικά διαθέσιμα υλικά, όπως θρυμματισμένος ασβεστόλιθος και ασφάλτος 60 / 70 pen, ενώ για τη μέθοδο Superpave εφαρμόστηκαν οι έλεγχοι ιδιοτήτων αδρανών και το σύστημα PG. Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι από τα τρία δοκιμαστικά μείγματα αδρανών αποδεκτό έγινε αυτό που διερχόταν από το κάτω μέρος της απαγορευμένης ζώνης στην κοκκομετρική διαβάθμιση, καθώς τα υπόλοιπα απέτυχαν λόγω των κριτηρίων αναλογίας σκόνης και VMA. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς το τελικό βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου και ως προς μία σειρά αντιπροσωπευτικών ελέγχων συμπεριφοράς. Οι έλεγχοι που μελετήθηκαν είναι η ευστάθεια Marshall και το ποσοστό απώλειάς της, η έμμεση εφελκυστική αντοχή ITS και το ποσοστό απώλειάς της, το ελαστικό μέτρο, η αντίσταση σε κόπωση, η αντίσταση σε παραμένονσα παραμόρφωση, η συμπεριφορά σε ερπυσμό. Η υπεροχή της μεθόδου Superpave έγινε αισθητή σε όλους τους εργαστηριακούς ελέγχους και

επιβεβαιώνεται με την παρουσίαση των ακόλουθων δεδομένων που προέκυψαν στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Asi, 2007)**

	Marshall	Superpave
<b>Ποσοστό Ασφάλτου</b>	5.2	4.8
<b>Ευστάθεια (N)</b>	13659	18082
<b>Ποσοστό Απώλειας Ευστάθειας</b>	43	28.6
<b>Εφελκυστική Αντοχή <math>ITS_{wet}</math> (kPa)</b>	521	853
<b>Εφελκυστική Αντοχή <math>ITS_{dry}</math> (kPa)</b>	761	1053
<b>Ποσοστό Απώλειας ITS</b>	31.5	19
<b>TSR (%) = <math>ITS_{wet} / ITS_{dry}</math></b>	68.6	81
<b>Δυσκαμψία (MPa)</b>	429.5	969.2

*II. Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P. & Nikraz, H., 2013. An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. Construction and Building Materials, Τόμος 40, pp. 961-970.*

Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι (Jitsangiam, et al., 2013), οι οποίοι επιχείρησαν να αξιολογήσουν την υιοθέτηση της μεθόδου Superpave στις τοπικές συνθήκες της Ταϊλάνδης, λόγω της αδυναμίας της Marshall να προσομοιώσει την πραγματική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος, κατά την κατασκευή και τη διάρκεια ζωής του. Η συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθη στο πλαίσιο μίας γενικότερης ανησυχίας του τμήματος αυτοκινητοδρόμων (Department of Highway - DOH), το οποίο είχε ενθαρρύνει μηχανικούς οδοστρωμάτων και πανεπιστήμια στην αντίστοιχη εξέταση εφαρμογής της Superpave. Χρησιμοποιώντας τοπικά υλικά, όπως θρυμματισμένος ασβεστόλιθος και άσφαλτος AC 60 - 70 (PG 64 - 22) και εκτελώντας αντίστοιχους ελέγχους, όπως ο (Asi, 2007), αποδείχθηκε η βελτιωμένη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος που σχεδιάστηκε κατά Superpave. Βέβαια, επισημαίνεται ότι ο συνήθης τύπος συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται δεν ήταν κατάλληλος για τις τοπικές συνθήκες και απαιτούνταν η χρήση τροποποιητικών. Οι τιμές που προέκυψαν από τους ελέγχους συμπεριφοράς παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.3: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Jitsangiam, et al., 2013)**

	Marshall	Superpave
<b>Ποσοστό Ασφάλτου</b>	5.2	5
<b>Ευστάθεια (N)</b>	13,859	18,200
<b>Ποσοστό Απώλειας Ευστάθειας</b>	31	22
<b>Εφελκυστική Αντοχή ITS<sub>wet</sub> (kPa)</b>	580	853
<b>Εφελκυστική Αντοχή ITS<sub>dry</sub> (kPa)</b>	850	1050
<b>Ποσοστό Απώλειας ITS</b>	28	16
<b>TSR (%) = ITS<sub>wet</sub> / ITS<sub>dry</sub></b>	68.2	81.2
<b>Δυσκαμψία (MPa)</b>	320	680

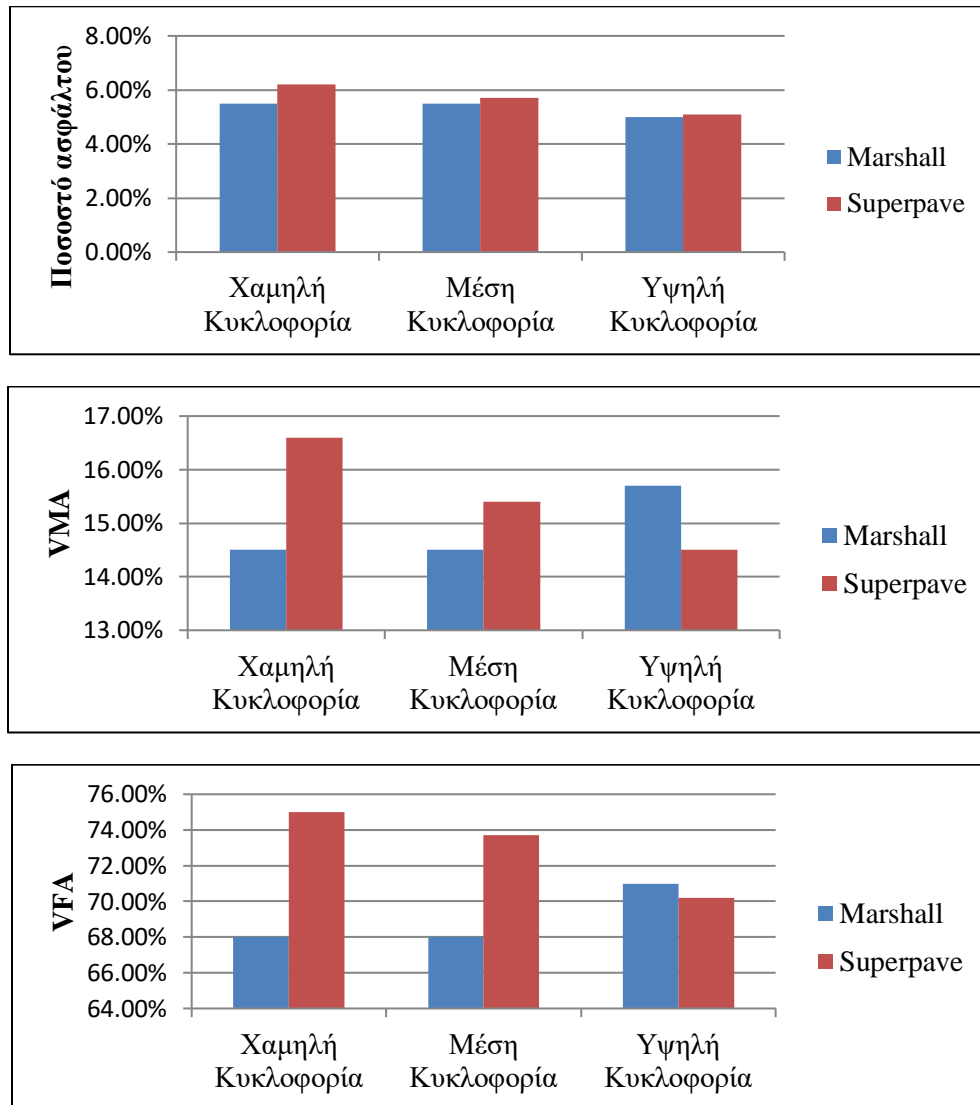
*III. Jasim, I., 2012. Comparison between marshall and superpave mixtures design. Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences, 5(4), pp. 394-406.*

Ο (Jasim, 2012) μέσω της έρευνάς του, υποστήριξε ότι παρά την καταλληλότητα της μεθόδου Marshall για τα τοπικά υλικά και κυκλοφοριακές συνθήκες του Ιράκ, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση της Superpave με τις τεράστιες δυνατότητες που προσφέρει. Αναλύοντας τα ογκομετρικά στοιχεία που προέκυψαν με την εφαρμογή των δύο μεθόδων κατέληξε στην οικονομία της Superpave, λόγω του χαμηλότερου ποσοστού ασφάλτου που απαίτησε (4.6 % έναντι 4.7 %). Επιπλέον, παρατηρώντας τα χαρακτηριστικά διαγράμματα, υπολογίζονται οι εξής τιμές VMA και VFA για τις μεθόδους Marshall και Superpave αντίστοιχα (13,25 % και 82.5 % έναντι 14.8 % και 73.3 %).

*IV. Kanneganti, V., 2002. Comparison of 19mm Superpave and Marshall base II mixes in West Virginia.*

Ο (Kanneganti, 2002), στην προσπάθειά του να συνεισφέρει στις εργασίες του Τμήματος Αυτοκινητοδρόμων της Δυτικής Βιρτζίνια (West Virginia Division of Highways-WVDOH) για την εφαρμογή της μεθόδου Superpave σε οδούς χαμηλής και μέσης κυκλοφορίας κατέληξε σε διαφορετικά αποτελέσματα από τις συνήθεις ενδείξεις τις διεθνούς βιβλιογραφίας. Για τη συγκριτική διερεύνηση προετοιμάστηκαν μείγματα, με αδρανή ονομαστικού μεγέθους κόκκου 19 mm και ασφαλτο PG 70 - 22, τα οποία ικανοποιούσαν τα κριτήρια και των δύο μεθόδων με σκοπό τη βέλτιστη αξιολόγηση τους. Σημειώνεται ότι η ανάλυση συμπεριέλαβε και τα τρία επίπεδα κυκλοφορίας (χαμηλή, μέση, υψηλή) για μία πληρέστερη προσέγγιση. Επιπλέον, μελετήθηκε η αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση μέσω του ελέγχου Asphalt Pavement Analyzer (APA), χωρίς όμως να είναι στατιστικά σημαντικά τα δείγματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τελικά, παρατηρήθηκε υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου κατά 0.2 % - 0.7

% στα μείγματα που σχεδιάστηκαν κατά Superpave. Τα ογκομετρικά στοιχεία παρουσιάζονται παρακάτω στην Εικόνα 4.1.



**Εικόνα 4.1: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Kanneganti, 2002)**

*V. Zumrawi, M. & Edrees, S., 2016. Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. International Journal of Scientific and Technical Advancements, 2(1), pp. 29-35.*

Οι (Zumrawi & Edrees, 2016), αναγνωρίζοντας το σπουδαίο ρόλο του ασφαλτομείγματος στη συμπεριφορά και ανθεκτικότητα των οδοστρωμάτων του Σουδάν, διεξήγαγαν εργαστηριακό πρόγραμμα δοκιμών μειγμάτων σχεδιασμένα κατά Marshall και Superpave. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσίασαν γίνεται εύκολα αντιληπτή η υπεροχή και η οικονομία της μεθόδου Superpave (Τιμές ποσοστού ασφάλτου, VMA, VFA για Marshall και Superpave αντίστοιχα: 5.4 %, 15.8 %, 75 % έναντι 5.3 %, 14.3 %, 70.2 % αντίστοιχα).

72.3 %). Ολοκληρώνοντας, τόνισαν ότι στο βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου για την Superpave επιτυγχάνεται υψηλότερη τιμή πυκνότητας, γεγονός το οποίο οφείλεται στον γυροσκοπικό τρόπο συμπύκνωσης του SGC.

VI. Al-Khateeb, G., Khedaywi, T. & Obaidat, T., 2010. Volumetric Analysis-Based Comparison between Superpave and Marshall Mix Design Procedures, Irbid: s.n.

Οι (Al-Khateeb, et al., 2010) επισήμαναν στη μελέτη τους ότι η επιλογή κοινής κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών και για τις δύο μεθόδους σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, συμβάλλει σε παρόμοια τιμή περιεκτικότητας ασφάλτου. Παρατηρείται ότι το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου κατά Superpave είναι 5.4 % έναντι 5.6 % κατά Marshall για κενά αέρα 4 %. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για τη μέθοδο Marshall εάν η προτεινόμενη τιμή περιεκτικότητας προσδιοριστεί ως ο μέσος όρος τριών τιμών των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων για κενά 4 %, για μέγιστη ευστάθεια και για μέγιστη πυκνότητα, προκύπτει ομοίως η τιμή 5.4 %. Όσον αφορά τα ογκομετρικά στοιχεία των VMA και VFA οι τιμές είναι 14.1 %, 71.7 % για Marshall και 14.4 %, 72.4 % για Superpave. Τέλος, οι (Al-Khateeb, et al., 2010) τονίζουν ότι το ασφαλτόμιγμα που σχεδιάστηκε κατά Superpave παρουσίασε χαμηλότερη ευαισθησία στην υγρασία.

VII. Maurin, G., 1998. Comparison of several asphalt design methods, Charlottesville, Virginia.

Ο (Maurin, 1998) πραγματοποίησε μία ευρεία έρευνα με σκοπό τη σύγκριση έξι μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων επιφανειακής στρώσης, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα πεδίου. Οι μέθοδοι που αναφέρονται είναι η μέθοδος Marshall (μέσης και υψηλής κυκλοφορίας), η Superpave (δύο είδη εξοπλισμού γυροσκοπικής συμπύκνωσης) και η χρήση του ειδικού μηχανήματος Gyrotory Testing Machine-GTM της Ένωσης Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού. Για τη διεξαγωγή του εργαστηριακού σχεδιασμού συλλέχθηκαν έξι επιφανειακά μείγματα από το πεδίο προκειμένου να αποτελέσουν οδηγό για την κοκκομετρική διαβάθμιση και το ποσοστό ασφάλτου σχεδιασμού. Σύμφωνα με τον (Maurin, 1998) η επιλογή του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου σχεδιασμού διαφέρει ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται λόγω της ενέργειας και του τύπου συμπύκνωσης και των κριτηρίων αξιολόγησης που λαμβάνονται υπόψη. Σημαντικά στοιχεία που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη έρευνα αποτέλεσαν το γεγονός ότι τα δύο είδη γυροσκοπικών συμπυκνωτών έδωσαν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα και το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου κατά Superpave κυμαινόταν από - 0.3 % έως + 0.2 %, συγκριτικά με τη Marshall. Για την παρούσα διπλωματική εργασία παρατίθενται τα στοιχεία βάσει της μεθόδου Marshall για υψηλή κυκλοφορία και της Superpave ως η μέση τιμή βάσει των δύο ειδών συμπυκνωτών. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι αξιοποιούνται τα στοιχεία της έρευνας που ακολουθούν τις οδηγίες του Ινστιτούτου Ασφάλτου για κενά αέρα 4 %, σε αντίθεση με του Τμήματος Μεταφορών της Βιρτζίνια

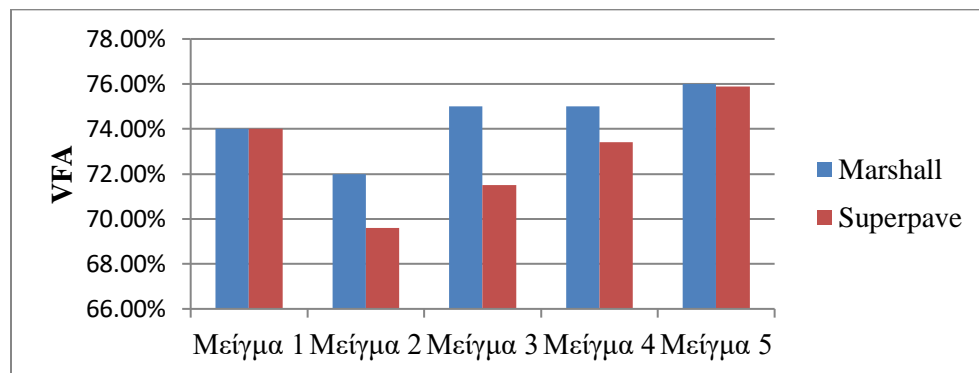
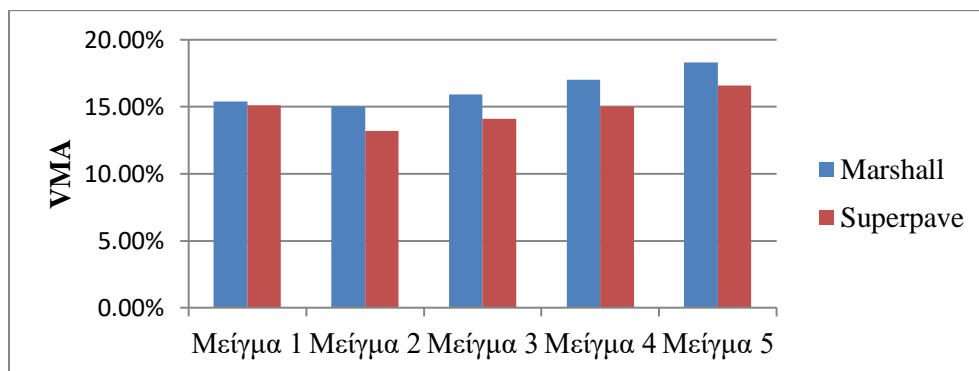
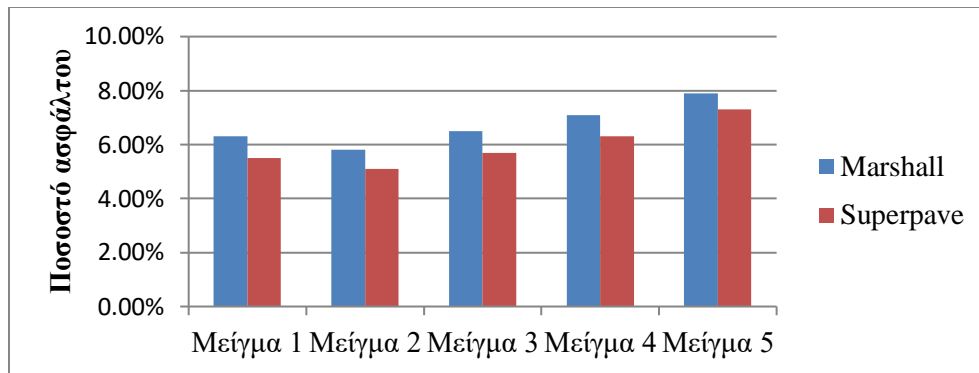
(Virginia Department of Transportation-VDOT) που προτείνουν 4.5 %. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4: Τιμές ογκομετρικών στοιχείων για κάθε μείγμα κατά (Maupin, 1998)**

Μείγμα	Ποσοστό Ασφάλτου		VMA		VFA	
	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave	Marshall	Superpave
1	5.50%	5.45%	15.40%	14.95%	74.00%	73.80%
2	5.60%	5.45%	17.60%	17.30%	77.80%	75.55%
3	5.30%	5.05%	15.80%	14.70%	75.40%	72.65%
4	4.60%	4.35%	14.60%	14.15%	72.70%	70.85%
5	4.60%	4.70%	13.90%	13.75%	70.70%	71.35%
6	4.90%	5.00%	15.40%	15.10%	73.70%	73.50%

*VIII. Habib, A., Hossain, M., Kaldate, R. & Fager, G., 1998. Comparison of Superpave and Marshall mixtures for low-volume roads and shoulders. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1609(1), pp. 44- 50.*

Η εφαρμογή της Superpave κυρίως σε οδούς υψηλών προδιαγραφών και με κυκλοφορία βαρέων αξονικών φορτίων ώθησε τους (Habib, et al., 1998) στην πραγματοποίηση εκτεταμένης έρευνας για την καταλληλότητα της μεθόδου σε οδούς χαμηλών κυκλοφοριακών συνθηκών, και ιδίως σε λωρίδες έκτακτης ανάγκης. Η μελέτη αφορούσε τη διαδρομή Kansas Route 177, μία περιοχή που διακρίνεται από αρκετές αγροτικές και χαμηλής σημαντικότητας οδούς. Κύριος στόχος ήταν η σύγκριση των δύο μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων βάσει της ογκομετρικής ανάλυσης και οικονομίας. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν τρία είδη αδρανών με μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου 19 mm και ασφάλτος AC-10 (PG 58 - 22), και εν συνεχεία αξιολογήθηκαν πέντε διαφορετικά είδη μειγμάτων (πέντε διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις). Σύμφωνα με τους (Habib, et al., 1998), η εφαρμογή της Superpave (Επίπεδο σχεδιασμού 1) έδωσε χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου 0.7 % κατά μέσο όρο σε σχέση με την Marshall (50 "κτύποι"), για κενά αέρα 4 %. Τα υπόλοιπα ογκομετρικά στοιχεία ήταν χαμηλότερα για την Superpave. Ακολουθώς, στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται διαγράμματα για τα προαναφερθέντα στοιχεία.



**Εικόνα 4.2: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Habib, et al., 1998)**

*IX. Asi, I., 2007. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. Building and environment, 42(1), pp. 325-329.*

Ο (Asi, 2007) μελέτησε την επίδραση διαφορετικών ποσοστών ασφάλτου στην αντίσταση ολίσθησης των οδοστρωμάτων. Όπως ανέφερε, χαμηλό επίπεδο ολίσθησης του ασφαλτομίγματος μπορεί να οφείλεται σε υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου, στην ίδια τη διαδικασία της Marshall, στην κοκκομετρική διαβάθμιση και την ποιότητα των αδρανών. Για το σκοπό αυτό, αφού προσδιόρισε το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου κατά Marshall και Superpave, διερεύνησε την αντίσταση σε ολίσθηση μεταβάλλοντας το ποσοστό ασφάλτου. Επισημαίνεται, ότι η τιμή περιεκτικότητας ασφάλτου που προέκυψε και με τις δύο μεθόδους ήταν κοινή και προσδιορίστηκε στα 5.4 %.

*X. Hanna, R. & Shamseen, M., 2020. Improving the Design of Asphalt Mixtures by Superpave Method and Comparison it with Marshall Method. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, 42(4).*

Οι (Hanna & Shamseen, 2020) ανέλυσαν εργαστηριακά αποτελέσματα των δύο εξεταζόμενων μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά υλικά και κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στη Συρία. Στην ανάλυσή τους παρουσιάζεται η ογκομετρική ανάλυση και η αξιολόγηση της ευαισθησίας σε υγρασία των ασφαλτομιγμάτων που σχεδιάστηκαν με τις δύο μεθόδους. Τα στοιχεία που προέκυψαν συμφωνούν με την πλειοψηφία των συναφών ερευνών και τοποθετούνται στη συνέχεια στον Πίνακα 4.5.

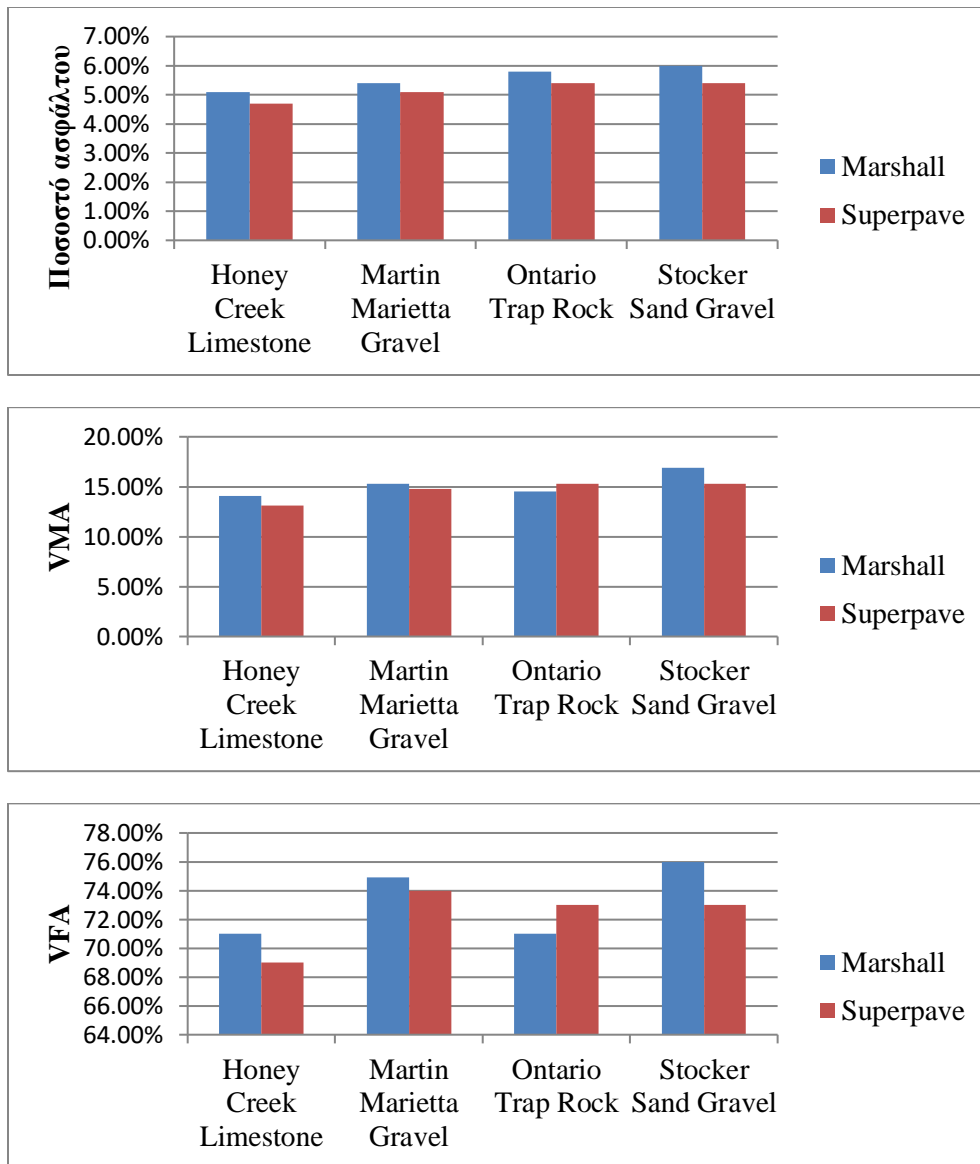
**Πίνακας 4.5: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Hanna & Shamseen, 2020)**

	Marshall	Superpave
<b>Ποσοστό Ασφάλτου</b>	5.2	4.8
<b>Ποσοστό VMA</b>	15.9	14.2
<b>Ποσοστό VFA</b>	72.7	72.4
<b>TSR (%)</b>	78.7	84.2

*XI. Liang, R., 2008. Refine AASHTO T283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave, Ohio: United States. Federal Highway Administration.*

Ο (Liang, 2008) διεξήγαγε μία εκτεταμένη έρευνα για τον έλεγχο υδροφιλίας, μελετώντας την επιρροή του, βάσει καθοριστικών παραγόντων, όπως είναι οι πηγές αδρανών, το συνδετικό υλικό, η μέθοδος συμπύκνωσης, το μέγεθος μήτρας, η γήρανση, ο βαθμός υγρασίας. Συγκεκριμένα, αξιοποίησε τέσσερις πηγές αδρανών (Honey Creek Limestone, Martin Marietta Gravel, Ontario Trap Rock, Stocker Sand Gravel) τις οποίες ανέμειξε με συμβατική και τροποποιημένη άσφαλτο. Οι μέθοδοι που εφάρμοσε ήταν η Marshall και η Superpave, όπου χρησιμοποίησε μήτρες διαμέτρου 100 mm και 150 mm. Όπως επισήμανε, οι τιμές TSR ήταν κοινές και συγκρίσιμες για τη μέθοδο Marshall και τη Superpave με μήτρες 150mm. Παρακάτω, στην Εικόνα 4.3, παρουσιάζονται τα ογκομετρικά στοιχεία των δύο προαναφερθέντων μεθόδων (Marshall και Superpave με μήτρες διαμέτρου 150 mm) που προσδιορίστηκαν βάσει των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων που παραθέτει ο (Liang, 2008).





Εικόνα 4.3: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Liang, 2008)

*XII. Selvam, K., Rahamathullah, U., Raja, D. & Thangal, V., 2016. Feasibility Study On Transition From Marshall Mix Design To Superpave Mix Design. International Journal of Novel Research in Civil Structural and Earth Sciences, 3(2), pp. 1-21.*

Οι (Selvam, et al., 2016), έδειξαν μέσω της έρευνα τους τα θετικά στοιχεία της Superpave σε ό,τι αφορά την ανθεκτικότητα του ασφαλτομίγματος στους βασικούς τύπους φθορών. Η περιεκτικότητα συνδετικού υλικού υπολογίστηκε μεγαλύτερη κατά 0.2% για σχεδιασμό κατά Superpave. Πέρα από τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου για τις δύο μεθόδους, παρουσίασαν στοιχεία σύγκρισης της ευστάθειας, του βαθμού υποχώρησης και δυσκαμψίας που προέκυψαν βάσει της Superpave και της Marshall. Οι τιμές που υπολογίστηκαν από τα χαρακτηριστικά

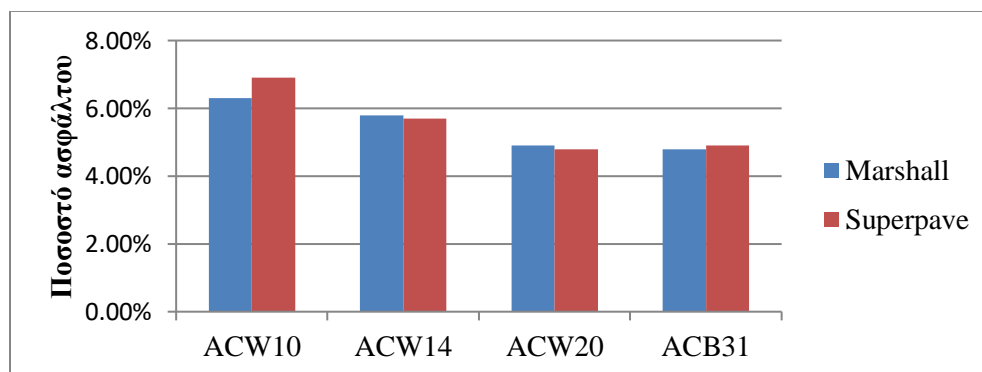
διαγράμματα, τους ελέγχους ευστάθειας Marshall και την έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό (Indirect Tensile Stiffness Modulus Test) τοποθετούνται στον παρακάτω Πίνακα 4.6:

**Πίνακας 4.6: Εργαστηριακά αποτελέσματα μελέτης κατά (Selvam, et al., 2016)**

	Marshall	Superpave
<b>Ποσοστό Ασφάλτου</b>	5.6	5.8
<b>Ποσοστό VFA</b>	77	71.261
<b>Ευστάθεια (N)</b>	14410	15788
<b>Υποχώρηση (mm)</b>	3.72	3.41
<b>Δυσκαμψία {Φάση 1} (MPa)</b>	1806	2132
<b>Δυσκαμψία {Φάση 2} (MPa)</b>	1659	2157

*XIII. Memon, N., 2006. Comparison between Superpave gyratory and Marshall laboratory compaction methods, Skudai, Johor, Malaysia.*

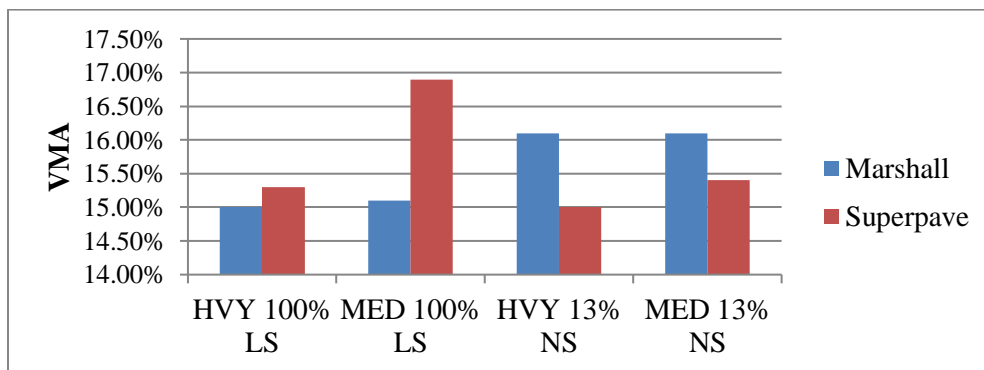
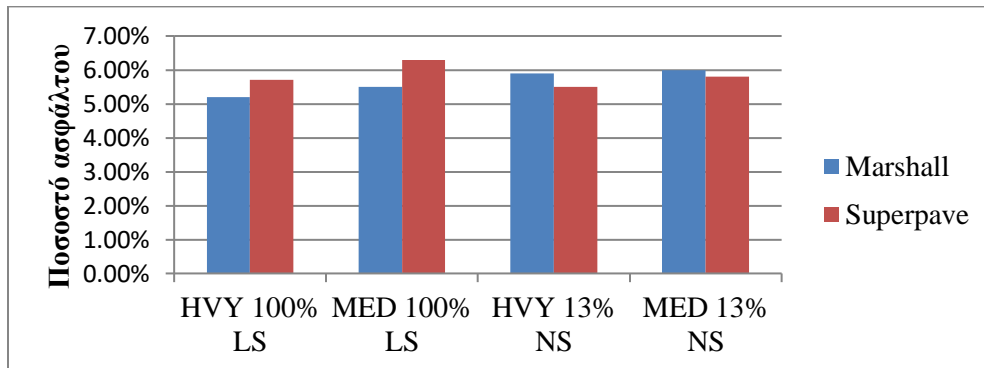
Η σημαντική αύξηση των κυκλοφοριακών συνθηκών με την επακόλουθη εμφάνιση σημαντικών φθορών στο οδικό δίκτυο της Μαλαισίας, παρότρυνε τον (Memon, 2006) στη συγκριτική αξιολόγηση της παραδοσιακής μεθόδου σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων Marshall με την Superpave. Στη μελέτη του χρησιμοποίησε τέσσερις τύπους συνδετικού υλικού (ACW10, ACW14, ACW20 και ACB28) για την παραγωγή ασφαλτομίγματος. Επιπλέον, προσδιόρισε τον αριθμό περιστροφών που απαιτούνταν για τη γυροσκοπική συμπύκνωση για κάθε τύπο ασφάλτου, ώστε να υπάρχει αντιστοιχία στο επίπεδα πυκνότητας με την κρουστική μέθοδο συμπύκνωσης της Marshall (75 "κτύποι"). Όπως εντοπίζεται και στην παρακάτω Εικόνα 4.4, δεν διαπιστώθηκε σημαντική διαφορά ανάμεσα στα βέλτιστα ποσοστά ασφάλτου, εκτός από τον τύπο ACW10.

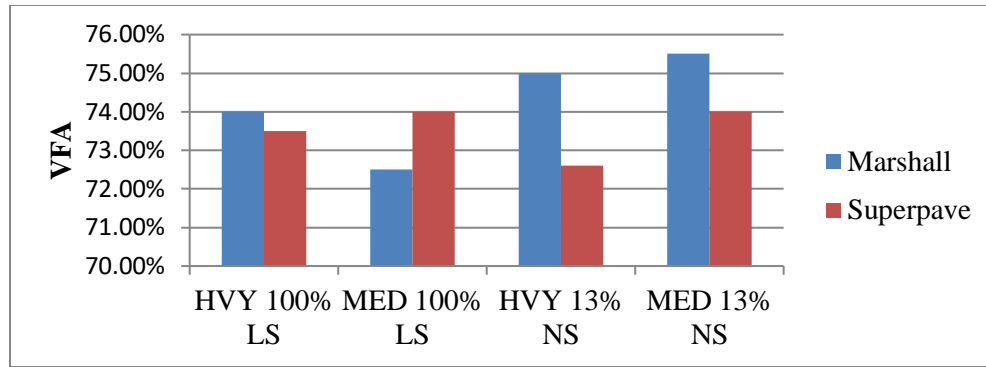


**Εικόνα 4.4: Διάγραμμα ποσοστού ασφάλτου ανά τύπο συνδετικού υλικού (Memon, 2006)**

XIV. Zaniewski, J. & Nelson, J., 2003. Comparison of 9.5 mm Superpave and Marshall Wearing I Mixes in West Virginia, Morgantown, West Virginia.

Στη μελέτη των (Zaniewski & Nelson, 2003), η οποία διεξήχθη το 2005, συγκρίθηκαν οι μέθοδοι Marshall και Superpave ως προς το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου για μέση και υψηλή κυκλοφορία, χρησιμοποιώντας αδρανή ονομαστικού μεγέθους κόκκου 9.5 mm. Για κάθε επίπεδο κυκλοφορίας δημιουργήθηκαν μείγματα τα οποία περιείχαν ασβεστόλιθο σε ποσοστό 100 % ή σε 87 % μαζί με φυσική άμμο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, δεν προέκυψε κάποια σταθερή ένδειξη προτίμησης της μίας μεθόδου έναντι της άλλης. Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσίασε το γεγονός ότι, στις περιπτώσεις μειγμάτων με 100 % χρήση ασβεστόλιθου προέκυψε υψηλότερη περιεκτικότητα συνδετικού υλικού για την Superpave και στα δύο επίπεδα κυκλοφορίας, ενώ για τα μείγματα που περιείχαν φυσική άμμο, παρατηρήθηκε το ακριβώς αντίθετο. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι μείγματα που περιέχουν σωματίδια μικρής διαμέτρου μειώνουν την αναλογία κενών στη διαδικασία της γυροσκοπικής συμπίκνωσης της Superpave οδηγώντας σε χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στη συνέχεια στην Εικόνα 4.5.





**Εικόνα 4.5: Διαγράμματα ογκομετρικών στοιχείων κατά (Zaniewski & Nelson, 2003)**

*XV. Namli, R. & Kuloğlu, N., 2007. Superpave ve Marshall Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması. Teknik Dergi, 18(87), pp. 4103-4118.*

Σε μία έρευνα του 2007 για τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων, οι (Namli & Kuloğlu, 2007), τόνισαν την αναγκαιότητα και τα προτερήματα υιοθέτησης της Superpave για τα οδικά έργα της Τουρκίας. Όπως έδειξαν, τα ποσοστά ασφάλτου ήταν χαμηλότερα συγκριτικά με της Marshall κατά 0.61 % (4.75 % έναντι 5.36 %).

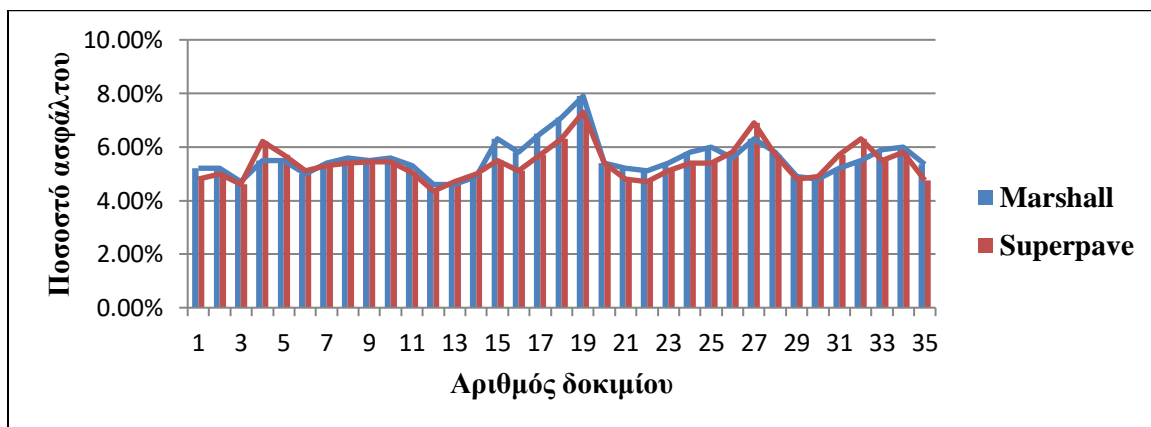
## 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΑΦΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

### 5.1 Ανάπτυξη Βάσης Δεδομένων

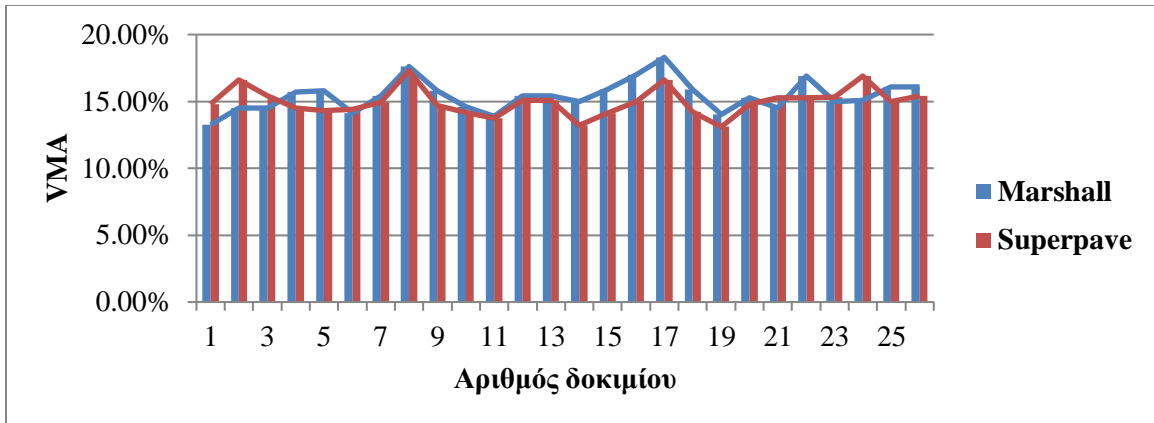
Αξιοποιώντας και συγκεντρώνοντας τα εργαστηριακά αποτελέσματα από τις έρευνες που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρούνται ορισμένα σημεία σε ό,τι αφορά τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά, την ευστάθεια και την ευαισθησία σε υγρασία του ασφαλτομίγματος, ανάλογα με την επιλεγθείσα μέθοδο μελέτης σύνθεσής του. Ενδεικτικά, δημιουργούνται **πέντε δείγματα για το ποσοστό ασφάλτου, το VMA, το VFA, την ευστάθεια και το δείκτη TSR** με αριθμό παρατηρήσεων  $N$  τους εξής:

- Δείγμα ποσοστού ασφάλτου με πλήθος παρατηρήσεων  $N_1 = 35$ .
- Δείγμα ποσοστού VMA με πλήθος παρατηρήσεων  $N_2 = 26$ .
- Δείγμα ποσοστού VFA με πλήθος παρατηρήσεων  $N_3 = 27$ .
- Δείγμα τιμών ευστάθειας με πλήθος παρατηρήσεων  $N_4 = 3$ .
- Δείγμα τιμών δείκτη TSR με πλήθος παρατηρήσεων  $N_5 = 3$ .

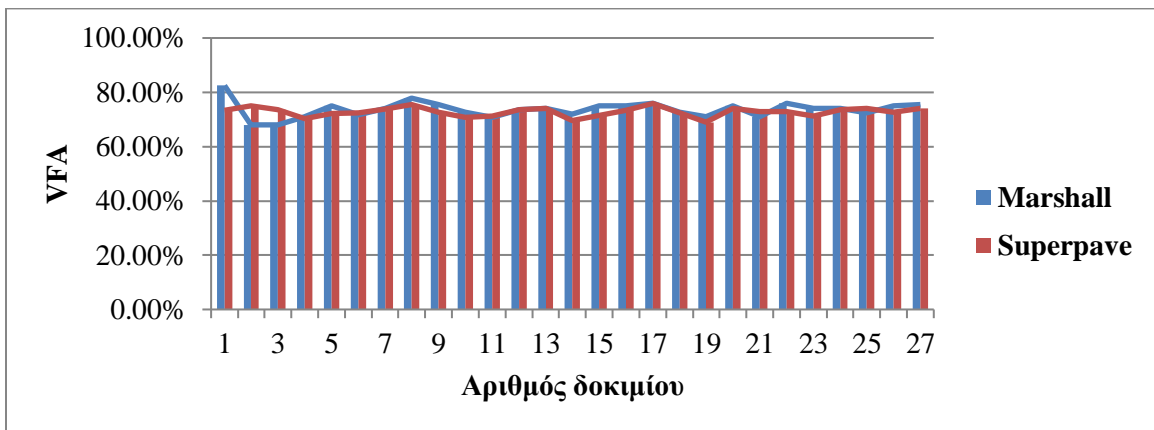
Ακολουθως, στις Εικόνα 5.1, Εικόνα 5.2, Εικόνα 5.3, Εικόνα 5.4, Εικόνα 5.5, παρουσιάζονται τα διαγράμματα, σε μορφή ραβδογράμματος, των παραπάνω στοιχείων, όπως προέκυψαν για κάθε μέθοδο μελέτης σύνθεσης, ανά περίπτωση δοκιμίου.



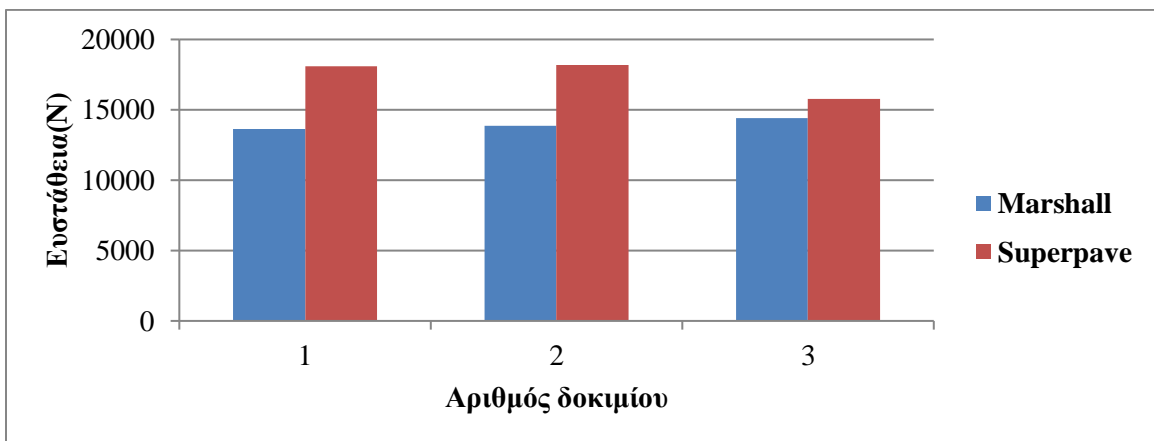
Εικόνα 5.1: Ποσοστό ασφάλτου Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών



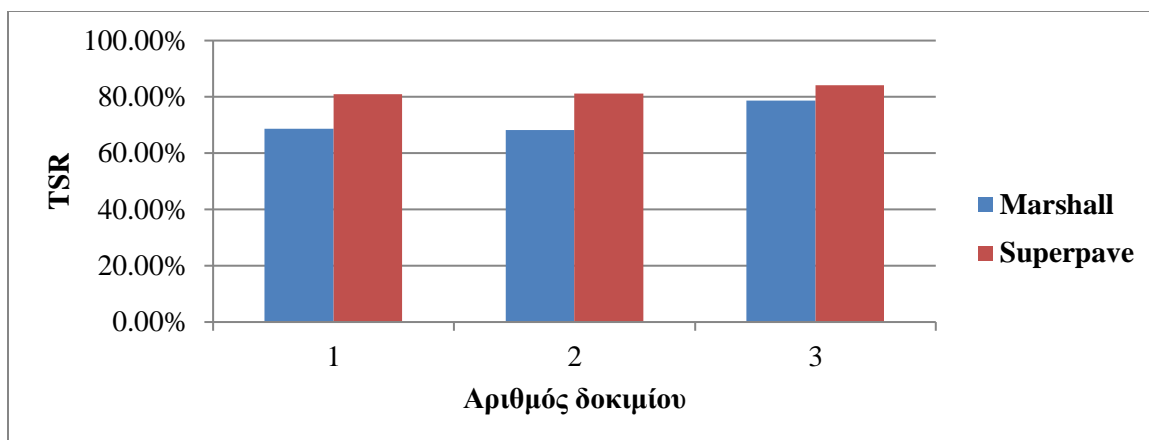
Εικόνα 5.2: Ποσοστό VMA Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών



Εικόνα 5.3: Ποσοστό VFA Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών



Εικόνα 5.4: Τιμή ευστάθειας Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών



**Εικόνα 5.5: Τιμή δείκτη TSR Marshall-Superpave βάσει στοιχείων ερευνών**

Συγκρίνοντας, τις τιμές των δεδομένων για κάθε δείγμα εντοπίζονται οι ακόλουθες **τάσεις**, όπως επιβεβαιώνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, σχετικά με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά και τις μεθόδους Marshall και Superpave:

- Χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου κατά Superpave
- Υψηλότερο ποσοστό VMA κατά Marshall
- Υψηλότερο ποσοστό VFA κατά Marshall
- Χαμηλότερη τιμή ευστάθειας κατά Marshall
- Χαμηλότερη τιμή δείκτη TSR κατά Marshall

Αναλύοντας τα στοιχεία που προέκυψαν, είναι δυνατό να προσδιοριστεί σε τι μέγεθος διαφοράς εντοπίζονται οι παραπάνω τάσεις. Υπολογίζοντας τη μέση τιμή κάθε στοιχείου ανά μέθοδο σύνθεσης ασφαλτομίγματος, εξάγονται οι ακόλουθες διαφορές (Marshall από Superpave), όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Επισημαίνεται ότι για τα χαρακτηριστικά της ευστάθειας και του δείκτη TSR προσδιορίζεται η ποσοστιαία διαφορά ως προς τη μέθοδο Marshall. Επιπροσθέτως, αξίζει να τονιστεί, ότι η αιτία που επιλέγεται η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων στο **πλαίσιο των διαφορών των δεδομένων** τους, είναι ότι διακρίνονται αρκετοί παράγοντες, οι οποίοι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τελική τιμή του ποσοστού ασφάλτου, του VMA, του VFA, της ευστάθειας και του δείκτη TSR. Είναι προφανές, ότι οι τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών επηρεάζονται από τα αδρανή, τον τύπο συνδετικού υλικού, την τελική κοκκομετρική διαβάθμιση, τις κλιματικές και κυκλοφοριακές συνθήκες. Κατά συνέπεια, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά των παραπάνω στοιχείων που προέκυψε για συγκεκριμένη επιλογή υλικών, κοκκομετρίας, επίπεδο σχεδιασμού, χρήση τροποποιητικών ή μη και ό,τι άλλο στοιχείο αξιοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη έρευνα.

**Πίνακας 5.1: Μέση διαφορά τιμών εργαστηριακών αποτελεσμάτων μεθόδων Marshall και Superpave**

Διαφορά			Μέση Ποσοστιαία Διαφορά	
Ποσοστό ασφάλτου	Ποσοστό VMA	Ποσοστό VFA	Ευστάθεια	Δείκτης TSR
0.16%	0.46%	0.86%	24.42%	14.71%

## 5.2 Μεθοδολογία Στατιστικής Ανάλυσης

Εν συνεχεία, δίνεται το **θεωρητικό υπόβαθρο** για τις αναλύσεις των προαναφερθέντων στοιχείων. Για την καλύτερη παρουσίαση των δεδομένων αξιοποιούνται εργαλεία της περιγραφικής στατιστικής (θηκογράμματα). Επιπλέον, εφαρμόζεται η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης για τη συσχέτιση των υπό διερεύνηση μεγεθών. Τέλος, ελέγχεται η μηδενική υπόθεση για τη σημαντικότητα των διαφορών των δειγμάτων με την εφαρμογή του στατιστικού t-test ζευγαρωτών παρατηρήσεων.

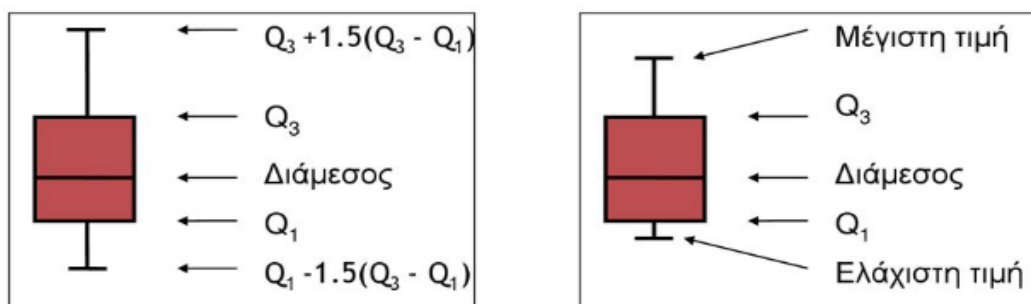
### Θηκόγραμμα (box plot)

Αποτελεί γράφημα-εργαλείο της περιγραφικής στατιστικής, σχήματος κουτιού, στο οποίο αναπαριστάται ένα σύνολο δεδομένων μίας μεταβλητής μέσω ορισμένων χαρακτηριστικών σημείων (Galarnyk, 2018). Σκοπός του είναι η ταχεία ανάγνωση των τεταρτημορίων, της ασυμμετρίας και των ακραίων τιμών του συνόλου δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά του **θηκογράμματος** είναι τα εξής (Καλατζής, 2020):

- Ελάχιστη και μέγιστη τιμή (μύστακες - whiskers) = ακραίες ράβδοι πέρα από το θηκόγραμμα
- Πρώτο τεταρτημόριο (Q1/25εκατοστιαίο σημείο ή η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 25 % των δεδομένων) = κάτω μέρος κουτιού
- Διάμεσος ή δεύτερο τεταρτημόριο (Q2/50εκατοστιαίο σημείο ή η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 50 % των δεδομένων) = ράβδος στο μέσο του κουτιού
- Τρίτο τεταρτημόριο (Q3/75εκατοστιαίο σημείο ή η τιμή κάτω από την οποία βρίσκεται το 75 % των δεδομένων) = άνω μέρος κουτιού
- Ενδοτεταρτημοριακό εύρος (interquartile range - IQR) = το ύψος του κουτιού, δηλαδή η διαφορά μεταξύ Q3 και Q1 ή  $IQR = Q3 - Q1$
- Μέση τιμή = Συμβολισμός με " $\times$ "
- Ύποπτη ακραία τιμή (outlier) = Σημείο έξω από τις ακραίες ράβδους, δηλαδή απόσταση από τα άκρα του κουτιού μεγαλύτερη από 1.5IQR



Τα χαρακτηριστικά πέντε σημεία ενός θηκογράμματος εντοπίζονται στην Εικόνα 5.6.



**Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικά σημεία θηκογράμματος-box plot (Τσιπλακίδης, n.d.)**

### Διάγραμμα διασποράς

Πρόκειται για ένα διάγραμμα, όπου κάθε σημείο του έχει ως συντεταγμένες το ζεύγος παρατηρήσεων που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους. Συνεπώς, στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχούν τα δεδομένα της μίας μεθόδου ενώ στον κατακόρυφο της άλλης. Επιπλέον, σχεδιάζεται γραμμή-διχοτόμος από την αρχή των αξόνων, η οποία αναπαριστά την θεώρηση ότι οι δύο μέθοδοι οδήγησαν στην ίδια τιμή αποτελέσματος. Τα στοιχεία τα οποία αξιοποιούνται βάσει του συγκεκριμένου γραφήματος είναι το εύρος τιμών κάθε στοιχείου, η διαπίστωση χαμηλότερου ή υψηλότερου αποτελέσματος ανά μέθοδο και σε τι ποσοστό παρατηρείται. Η προσεκτική παρατήρηση ενός διαγράμματος διασποράς είναι πιθανό να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τη σχέση εξάρτησης που ενδεχομένως υπάρχει στα ζεύγη παρατηρήσεων.

Με την απλή γραμμική παλινδρόμηση διερευνάται η γραμμική σχέση εξάρτησης μεταξύ δύο μεταβλητών (εξαρτημένη και ανεξάρτητη). Συγκριτικά, η παλινδρόμηση προσδιορίζει τη σχέση εξάρτησης μεταξύ δύο μεταβλητών, ενώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης δίνει ένα μέτρο του μεγέθους της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών.

Μία άλλη έννοια αποτελεί ο **συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$** , ο οποίος δηλώνει το ποσοστό μεταβλητότητας των τιμών της  $Y$  που υπολογίζεται από τη  $X$  (κι αντίστροφα) κι είναι ένας χρήσιμος τρόπος να συνοψιστεί η συσχέτιση δύο τυχαίων μεταβλητών. Ο συντελεστής  $R^2$  μετρά πόση διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής κατάφεραν να ερμηνεύσουν οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  (Πίνακας 5.2) κυμαίνονται από το 0 ως το 1 και όσο η τιμή πλησιάζει προς το 1 τόσο καλύτερη συσχέτιση διαπιστώνεται (Χαλικιάς, n.d.).

**Πίνακας 5.2: Ερμηνεία τιμών συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup>**

Τιμές συντελεστή R <sup>2</sup>	Ερμηνεία
1	Τέλεια συσχέτιση
0.85 έως 1	Πολύ καλή συσχέτιση
0.7 έως 0.85	Καλή συσχέτιση
0.6 έως 0.7	Ικανοποιητική συσχέτιση
0 έως 0.6	Κακή συσχέτιση
0	Μη συσχέτιση

*T-test ζευγαρωτών παρατηρήσεων ή εξαρτημένων δειγμάτων (Paired t-test)*

Σύμφωνα με την (Shier, 2004) ένα T-test εξαρτημένων δειγμάτων ή paired t-test εφαρμόζεται με σκοπό τη σύγκριση των μέσων τιμών δύο δειγμάτων, για την ίδια συνεχή μεταβλητή, όπου οι παρατηρήσεις-στοιχεία μεταξύ τους έχουν άμεση συσχέτιση. Συνήθεις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται είναι η ανάλυση παρατηρήσεων πριν - μετά για κοινό αντικείμενο, δηλαδή σε δύο χρονικές στιγμές, ή , όπως στην παρούσα διπλωματική εργασία, η διερεύνηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από μετρήσεις δύο διαφορετικών μεθόδων για κοινό χαρακτηριστικό. Η πραγματοποίηση ενός t-test είναι αναγκαίο να ακολουθεί τις εξής παραδοχές (Αγγελίδης, n.d.):

- Να μην υπάρχουν σημαντικά ακραίες τιμές (outliers), καθώς μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στο t-test, μειώνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- Τα στοιχεία του δείγματος θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα (μη συσχετιζόμενα), το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ των παρατηρήσεων.
- Οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι ανεξάρτητες, δηλαδή μια παρατήρηση από το ένα δείγμα δεν πρόκειται να ανήκει και στο άλλο.
- Η εξαρτημένη μεταβλητή ελέγχου πρέπει να είναι ποσοτική μεταβλητή, είτε διαστήματος (interval) είτε αναλογίας (ratio).
- Αν η εξαρτημένη μεταβλητή προσεγγίζει την κανονική κατανομή εκτελείται παραμετρικό τεστ (Paired Sample T-test).

Για τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης (στατιστική σημαντικότητα) των δεδομένων, ακολουθούνται τα εξής (Γεωργοπούλου, 2013):

- Διατύπωση Μηδενικής (H<sub>0</sub>) και Εναλλακτικής (H<sub>1</sub>) υπόθεσης - Διπλής κατεύθυνσης υπόθεση (H<sub>0</sub>: μ<sub>α</sub> = μ<sub>β</sub> και H<sub>1</sub>: μ<sub>α</sub> ≠ μ<sub>β</sub>)-
- Προσδιορισμός τιμής  $t = \frac{d}{sd/\sqrt{n}}$  (Σχέση 5.1)

όπου:

$d$  = διαφορά μέσω των τιμών των δύο δειγμάτων

$s_d$  = τυπική απόκλιση της διαφοράς

$n$  = μέγεθος δείγματος

- Επιλογή επιπέδου σημαντικότητας
- Υπολογισμός βαθμών ελευθερίας  $df = n-1$
- Προσδιορισμός τιμής  $t_{\text{κρισιμη}}$  από Πίνακα 5.3
- Αν  $t > t_{\text{κρισιμη}}$ : δεν ισχύει η μηδενική υπόθεση και συμπεραίνεται ότι υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά

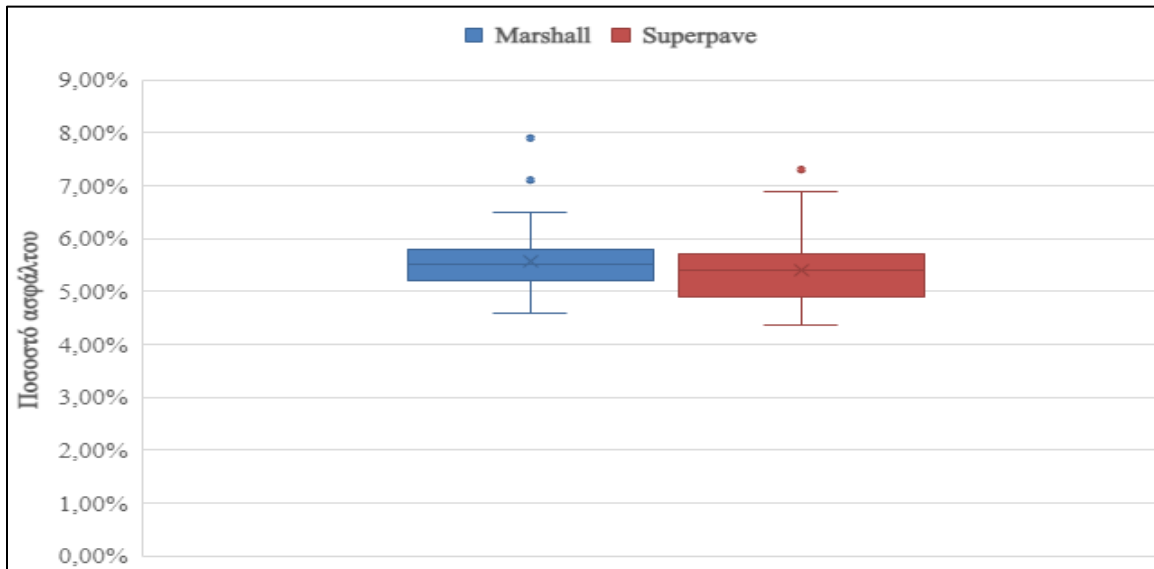
Πίνακας 5.3: Τιμή  $t_{\text{κρισιμη}}$  (Γεωργοπούλου, 2013)

1-κατεύθυνση	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
2-κατεύθυνση	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646

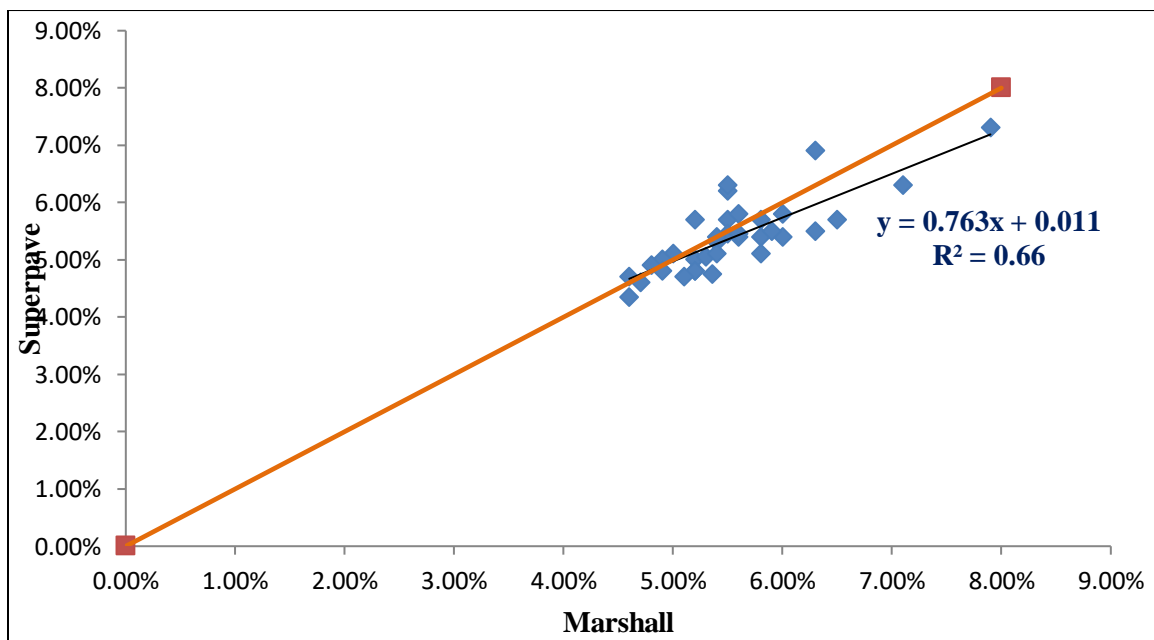
## 5.3 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων

### 5.3.1 Ποσοστό ασφάλτου

Αναλύοντας το δείγμα των 35 παρατηρήσεων για το βέλτιστο ποσοστό ασφάλτου που προέκυψε, εφαρμόζοντας τις μεθόδους σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall και Superpave, εξάγονται τα εξής διαγράμματα (Εικόνα 5.7, Εικόνα 5.8), με τα αντίστοιχα συμπεράσματα που τοποθετούνται στη συνέχεια..



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού ασφάλτου μεθόδων Marshall-Superpave



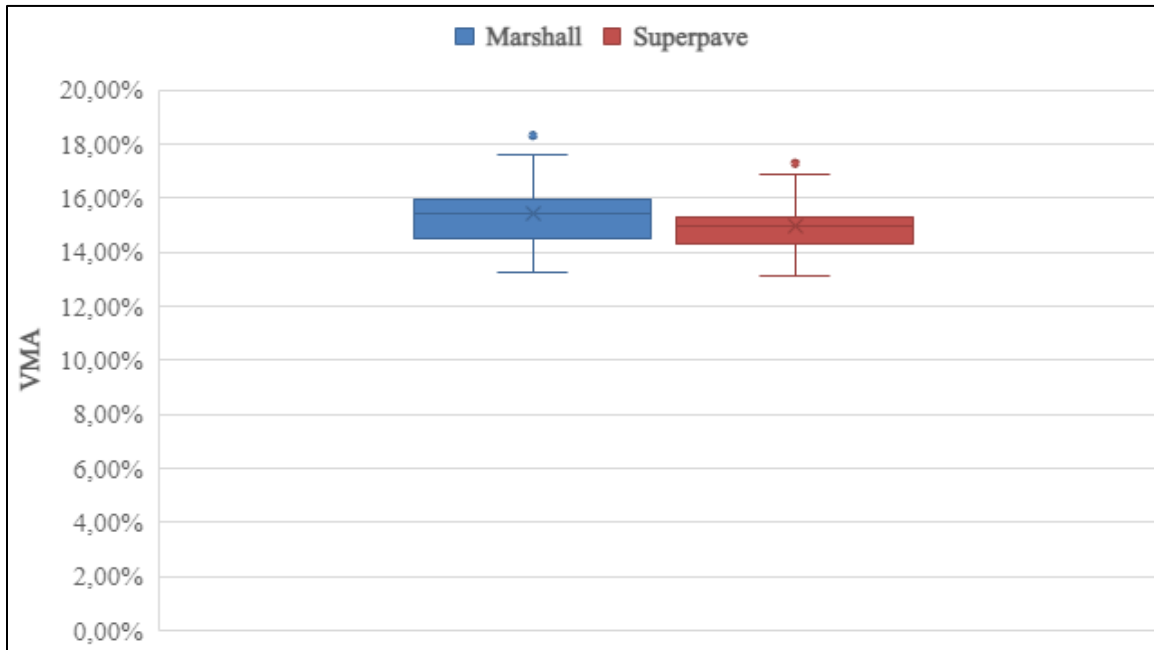
Εικόνα 5.8: Διάγραμμα διασποράς τιμών ποσοστού ασφάλτου μεθόδων Marshall-Superpave

Τα συμπεράσματα της στατιστικής ανάλυσης συνοψίζονται παρακάτω:

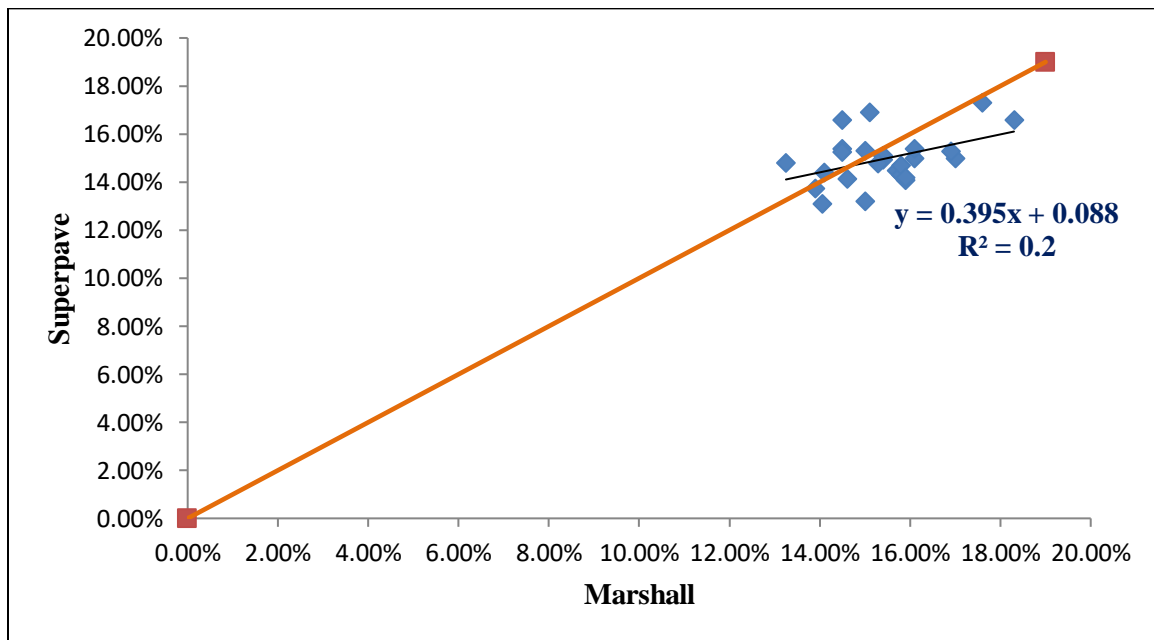
- Κατά 68.6 % (σχετική συχνότητα = 24) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου κατά **Marshall**.
- Κατά 28.6 % (σχετική συχνότητα = 10) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό ασφάλτου κατά **Superpave**.
- Κατά 2.8 % (σχετική συχνότητα = 1) προέκυψε κοινή τιμή ποσοστού ασφάλτου.
- Μέγιστη διαφορά ποσοστού ασφάλτου μεταξύ των δύο μεθόδων ήταν  $\pm 0.8$  %.
- Τιμές θηκογράμματος για **Marshall**:
  - Μέση τιμή = 5.56 %
  - min = 4.6 %
  - Q1 = 5.2 %
  - Q2 = 5.5 %
  - Q3 = 5.8 %
  - max = 7.9 %
  - IQR = 0.6 %
  - εύρος = 3.3 %
- Τιμές θηκογράμματος για **Superpave**:
  - Μέση τιμή = 5.4 %
  - min = 4.35 %
  - Q1 = 4.95 %
  - Q2 = 5.4 %
  - Q3 = 5.7 %
  - max = 7.3 %
  - IQR = 0.75 %
  - εύρος = 2.95 %
- Εξίσωση γραμμικής εξάρτησης  $Y = 0.0115 + 0.7639 \times X$ .
- Συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.66$ : Ικανοποιητική συσχέτιση.
- $t = 2.276 > t_{\text{κρίσιμη}}(\text{διπλής κατεύθυνσης}) = 2.03$ : Δεν ισχύει ο έλεγχος μηδενικής υπόθεσης (δηλαδή η υπόθεση  $\mu_{\text{Marshall}} = \mu_{\text{Superpave}}$ ). Συνεπώς υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %.

### 5.3.2 Ποσοστό VMA

Με την επεξεργασία του δείγματος των 26 παρατηρήσεων, για το ποσοστό VMA που προέκυψε για τις δύο εξεταζόμενες μεθόδους σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, σχηματίζονται τα εξής διαγράμματα στις Εικόνα 5.9, Εικόνα 5.10.



**Εικόνα 5.9:** Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού VMA μεθόδων Marshall-Superpave



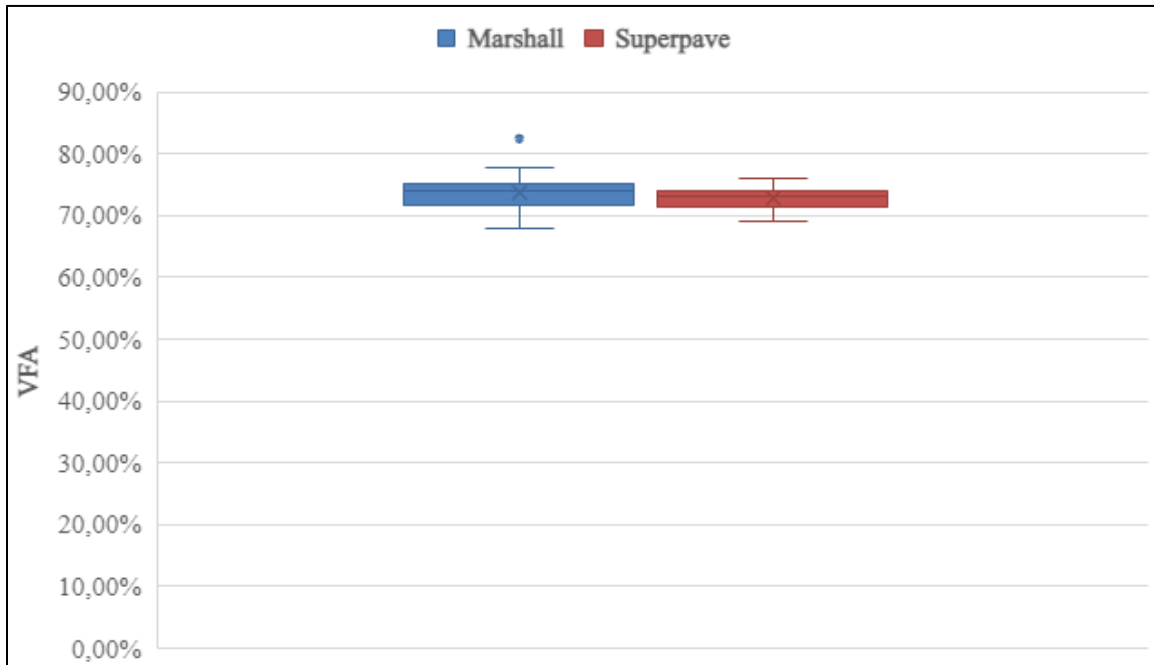
**Εικόνα 5.10:** Διάγραμμα διασποράς τιμών VMA μεθόδων Marshall-Superpave

Τα συμπεράσματα της στατιστικής ανάλυσης συνοψίζονται παρακάτω:

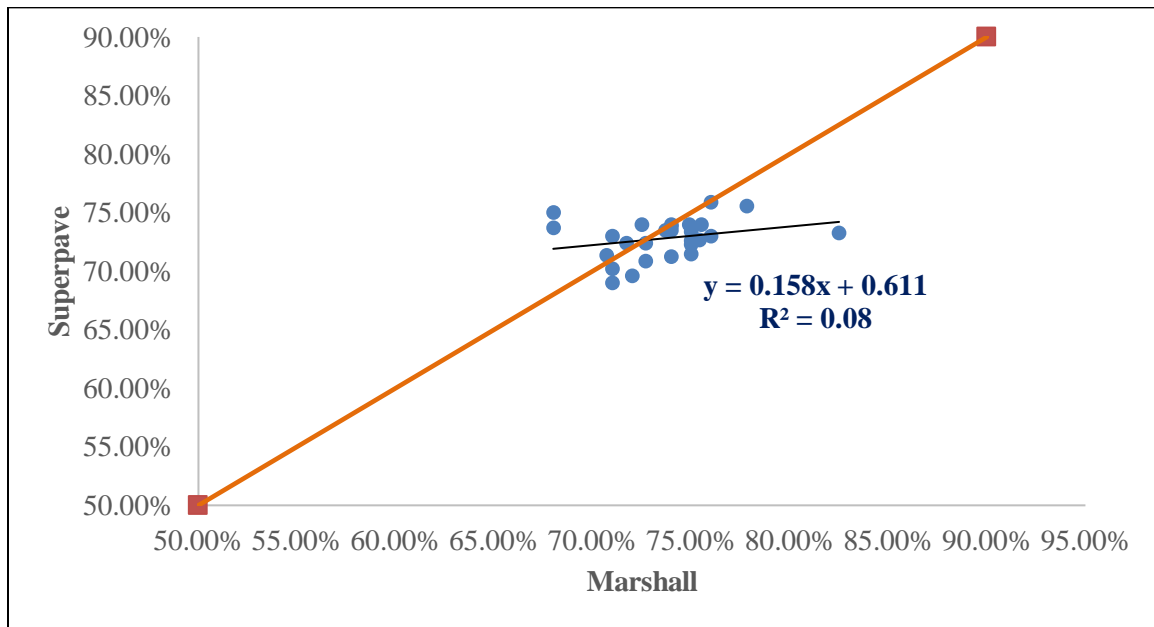
- Κατά 73.1 % (σχετική συχνότητα = 19) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό VMA κατά **Marshall**.
- Κατά 26.9 % (σχετική συχνότητα = 7) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό VMA κατά **Superpave**.
- Δεν προέκυψε κοινή τιμή ποσοστού VMA.
- Μέγιστη διαφορά ποσοστού VMA μεταξύ των δύο μεθόδων ήταν 2.1 % υψηλότερο κατά Superpave και 2 % υψηλότερο κατά Marshall.
- Τιμές θηκογράμματος για **Marshall**:
  - Μέση τιμή = 15.43 %
  - min = 13.25 %
  - Q1 = 14.53 %
  - Q2 = 15.4 %
  - Q3 = 15.9 %
  - max = 18.3 %
  - IQR = 1.37 %
  - εύρος = 5.05 %
- Τιμές θηκογράμματος για **Superpave**:
  - Μέση τιμή = 14.97 %
  - min = 13.1 %
  - Q1 = 14.33 %
  - Q2 = 14.98 %
  - Q3 = 15.3 %
  - max = 17.3 %
  - IQR = 0.97 %
  - εύρος = 4.2 %
- Εξίσωση γραμμικής εξάρτησης  $Y = 0.0887 + 0.3953 \times X$ .
- Συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.2$ : Κακή συσχέτιση.
- $t = 2.015 < t_{\text{κρίσιμη}}(\text{διπλής κατεύθυνσης}) = 2.06$ : Ισχύει ο έλεγχος μηδενικής υπόθεσης, συνεπώς δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %.

### 5.3.3 Ποσοστό VFA

Αναλύοντας το δείγμα των 27 παρατηρήσεων για το ποσοστό VFA που προέκυψε για τις δύο εξεταζόμενες μεθόδους σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων, προκύπτουν τα εξής διαγράμματα στις Εικόνα 5.11, Εικόνα 5.12.



**Εικόνα 5.11: Διάγραμμα θηκογράμματος ποσοστού VFA μεθόδων Marshall-Superpave**



**Εικόνα 5.12: Διάγραμμα διασποράς τιμών VFA μεθόδων Marshall-Superpave**



Τα συμπεράσματα της στατιστικής ανάλυσης συνοψίζονται παρακάτω:

- Κατά 74.1 % (σχετική συχνότητα = 20) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό VFA κατά **Marshall**.
- Κατά 22.2 % (σχετική συχνότητα = 6) προέκυψε υψηλότερο ποσοστό VFA κατά **Superpave**.
- Κατά 3.7 % (σχετική συχνότητα = 1) προέκυψε κοινή τιμή ποσοστού VFA.
- Μέγιστη διαφορά ποσοστού VFA μεταξύ των δύο μεθόδων ήταν 7 % υψηλότερο κατά Superpave και 9.2 % υψηλότερο κατά Marshall.
- Τιμές θηκογράμματος για **Marshall**:
  - Μέση τιμή = 73.67 %
  - min = 68 %
  - Q1 = 71.85 %
  - Q2 = 74 %
  - Q3 = 75 %
  - max = 82.5 %
  - IQR = 3.15 %
  - εύρος = 14.5 %
- Τιμές θηκογράμματος για **Superpave**:
  - Μέση τιμή = 72.81 %
  - min = 69 %
  - Q1 = 71.9 %
  - Q2 = 73 %
  - Q3 = 73.9 %
  - max = 75.9 %
  - IQR = 2 %
  - εύρος = 6.9 %
- Εξίσωση γραμμικής εξάρτησης  $Y = 0.6113 + 0.1585 \times X$ .
- Συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0.08$ : Μη συσχέτιση.
- $t = 1.52 < t_{\text{κρισιμη}}(\text{διπλής κατεύθυνσης}) = 2.06$ : Ισχύει ο έλεγχος μηδενικής υπόθεσης, συνεπώς δεν υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %.

### 5.3.4 Ευστάθεια

Όσον αφορά το χαρακτηριστικό της ευστάθειας του ασφαλτομίγματος σχεδιασμού, το δείγμα είναι αρκετά μικρό (τρεις παρατηρήσεις). Ο πολύ χαμηλός αριθμός παρατηρήσεων δεν επιτρέπει τη δημιουργία θηκογράμματος καθώς ούτε και την εφαρμογή του ελέγχου στατιστικής σημαντικότητας μέσω του paired t-test. Ωστόσο, όπως επιβεβαιώνεται και από την Εικόνα 5.4, και στις τρεις περιπτώσεις η ευστάθεια ήταν μεγαλύτερη για το μείγμα που σχεδιάστηκε κατά Superpave.

### 5.3.5 Έλεγχος υδροφιλίας (δείκτης TSR)

Ομοίως, το πλήθος των παρατηρήσεων για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος στην υγρασία δεν είναι σημαντικό. Όμως, η υπεροχή της μεθόδου Superpave, βάσει του υψηλότερου δείκτη TSR που προέκυψε και στις τρεις περιπτώσεις, γίνεται αισθητή και από την Εικόνα 5.5.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων κατά Marshall και Superpave, στο πλαίσιο σχεδιασμού θερμών ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης.

**Καταρχάς**, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση της μεθόδου Marshall και αναλύθηκαν τα βασικά βήματα της εργαστηριακής διαδικασίας. Τα στάδια περιλαμβάνουν όλο το εύρος, από την κατάλληλη επιλογή των υλικών και τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης έως τον υπολογισμό του τελικού βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου, βάσει ορισμένων χαρακτηριστικών διαγραμμάτων και κριτηρίων. Ομοίως, βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας περιγράφηκε και η καινοτόμα μέθοδος Superpave, όπου εντοπίστηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε όλα τα στάδια μελέτης σύνθεσης του ασφαλτομίγματος. Τα κυριότερα σημεία σύγκρισής τους επικεντρώνονται στον τρόπο επιλογής συνδετικού υλικού (τιμές διεισδυτικότητας έναντι σύστημα PG X - Y), στον τρόπο συμπύκνωσης (κρουστικός έναντι γυροσκοπικός) και στους επιπλέον ελέγχους επιλογής υλικών και συμπεριφοράς που αναφέρονται στην Superpave.

**Εν συνεχεία**, παρουσιάστηκαν μέσω ενός πίνακα οι διαφορές που εντοπίστηκαν ανάμεσα στις μεθόδους Marshall και Superpave, όπου γίνεται εμφανής η αξία διερεύνησης της καταλληλότερης μεθόδου σύνθεσης. Παράλληλα, συγκεντρώθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από μηχανικούς οδοστρωμάτων και πανεπιστήμια, παγκοσμίως, με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους. Επισημαίνεται ότι κάθε έρευνα, διεξήχθη σε διαφορετικές περιοχές με τις εκάστοτε κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες και τα ανάλογα τοπικά υλικά. Σημαντικοί παράγοντες για τα τελικά ογκομετρικά στοιχεία και τα χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, που υπολογίστηκαν, αποτέλεσαν, και οι επιλεγθέντες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, η χρήση τροποποιητικών ή μη και το επίπεδο σχεδιασμού που εφαρμόστηκαν ανά έρευνα.

**Επίσης**, βάσει των εργαστηριακών αποτελεσμάτων των συναφών ερευνών αναπτύχθηκε μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τιμές για το ποσοστό ασφάλτου, το ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών (VMA), το ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο (VFA), την ευστάθεια και τον έλεγχο υδροφιλίας (δείκτης TSR). Οι τιμές των μεγεθών της βάσης δεδομένων παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν με γραφήματα θεκογράμματος, ραβδογράμματος και διασποράς. Εν συνεχεία, μέσω της διαδικασίας της γραμμικής παλινδρόμησης και τον υπολογισμό του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  διερευνήθηκε η συσχέτιση των δεδομένων ανά δείγμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης για τη διαπίστωση στατιστικώς σημαντικών διαφορών, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %.

Δεδομένων των παραπάνω, τα κύρια **συμπεράσματα** που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται ακολούθως.

Όσον αφορά την εργαστηριακή διαδικασία προκύπτουν τα εξής:

1. Η μέθοδος Marshall είναι μία απλή, πειραματική μέθοδος με χαμηλό κόστος εξοπλισμού, σε αντίθεση με την Superpave που διακρίνεται για τον αναλυτικό-υπολογιστικό της τύπο και το υψηλό κόστος εξοπλισμού.
2. Η μέθοδος Marshall για την επιλογή του ασφαλικού συνδετικού υλικού αξιοποιεί την κατάταξη βάσει των τιμών διεισδυτικότητας, ενώ η Superpave εφαρμόζει το σύστημα PG X - Y.
3. Η μέθοδος Marshall εφαρμόζει τον κρουστικό τρόπο συμπύκνωσης, ενώ η Superpave το γυροσκοπικό
4. Η μέθοδος Superpave ορίζει πλήθος επιπλέον ελέγχων επιλογής υλικών και συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.
5. Η μέθοδος Superpave υποστηρίζεται, βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας, ότι προσομοιώνει με μεγαλύτερη επιτυχία τις συνθήκες πεδίου.

Από την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων και τις σχετικές αναλύσεις προκύπτουν τα εξής:

1. Το ποσοστό ασφάλτου προέκυψε χαμηλότερο κατά Superpave (μέση τιμή διαφοράς με Marshall 0.16 %).
2. Το ποσοστό VMA προέκυψε χαμηλότερο κατά Superpave, γεγονός το οποίο δικαιολογείται από το χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου, χωρίς όμως να παρουσιάζεται πρόβλημα στα χαρακτηριστικά κριτήρια (μέση τιμή διαφοράς με Marshall 0.46 %).
3. Ομοίως, το ποσοστό VFA προέκυψε χαμηλότερο κατά Superpave (μέση τιμή διαφοράς με Marshall 0.86 %).
4. Η συσχέτιση βάσει των συντελεστών προσδιορισμού κρίνεται ικανοποιητική μόνο στην περίπτωση του ποσοστού ασφάλτου. Όσον αφορά τα ποσοστά VMA και VFA, φαίνεται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση.
5. Υπάρχει ένδειξη ότι με τη μέθοδο Superpave σχεδιάζεται ασφαλτόμιγμα υψηλότερης ευστάθειας και ικανοποιητικότερης συμπεριφοράς έναντι υγρασίας.
6. Από τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης για τις διαφορές των δειγμάτων με εφαρμογή του t-test ζευγαρωτών παρατηρήσεων, προέκυψε ότι οι διαφορές είναι στατιστικώς σημαντικές μόνο στην περίπτωση του ποσοστού ασφάλτου.

Με βάση τα ανωτέρω, φαίνεται ότι βασικό εύρημα της παρούσας εργασίας είναι ότι η μελέτη σύνθεσης κατά Superpave οδηγεί σε χαμηλότερο ποσοστό ασφάλτου, γεγονός το οποίο σημαίνει οικονομικότερη κατασκευή, στο πλαίσιο και της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων. Επιπροσθέτως, οι ενδείξεις καλύτερης συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος

σχεδιασμένου κατά Superprave ως προς την ευστάθεια και την υδροφιλία, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης λόγω του περιορισμένου αριθμού παρατηρήσεων των δειγμάτων.

Ως **περαιτέρω έρευνα** του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διαμορφώνονται οι ακόλουθες προτάσεις:

1. Μελέτη αναγκαιότητας εφαρμογής μεθόδου Superprave σε οδούς χαμηλής κυκλοφορίας, καθώς εντοπίστηκε πολύ περιορισμένος αριθμός συναφών ερευνών για το συγκεκριμένο πεδίο.
2. Αξιοποίηση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, ερευνώντας ποικίλους τύπους συνδετικού υλικού και αδρανών, με διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και ονομαστικά μεγέθη κόκκου αδρανών.
3. Μελέτη επιρροής πρόσθετων παραγόντων διαπίστωσης υπεροχής μίας μεθόδου, με κυριότερους τους ελέγχους συμπεριφοράς στους βασικούς τύπους αστοχιών οδοστρώματος (παραμένουσα παραμόρφωση, ρηγμάτωση λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης και ρηγμάτωση λόγω χαμηλών θερμοκρασιών).
4. Συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων με εφαρμογή στο πεδίο.
5. Αξιολόγηση πρόσθετων κριτηρίων εφελκυστικής αντοχής, βάθους τροχοαυλάκωσης, αντίστασης σε κόπωση.
6. Ανάλυση κόστους οφέλους αναλογίζοντας και την εκτιμώμενη αύξηση διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- American Association of State Highway and Transportation Officials.; United States. Army. Corps of Engineers, 1991. *Hot-mix asphalt paving handbook*. s.l.: [Washington, D.C.] : US Army Corps of Engineers.
- Advanced Asphalt Technologies, LLC., 2011. *A manual for design of Hot Mix asphalt with commentary*, Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Al-Khateeb, G., Ghuzlan, K. & Al-Barqawi, M., 2017. Effect of Superpave restricted zone on volumetric and compaction properties of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(6), pp. 488-496.
- Al-Khateeb, G., Khedaywi, T. & Obaidat, T., 2010. *Volumetric Analysis-Based Comparison between Superpave and Marshall Mix Design Procedures*, Irbid: s.n.
- Asi, I., 2007. Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes. *Building and environment*, 42(1), pp. 325-329.
- Asi, I., 2007. Performance evaluation of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs to suite Jordan climatic and traffic conditions. *Construction and Building Materials*, 21(8), pp. 1732-1740.
- Asphalt Institute, 2014. *Asphalt Mix Design Methods*. 7η επιμ. s.l.:s.n.
- Asphalt Institute, n.d. *Asphalt Institute*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.asphaltinstitute.org/timeline/roh-1992-bruce-g-marshall/>  
[Πρόσβαση 7 Μαρτίου 2022].
- Buchanan, M. S. & Brown, E. R., 2001. Effect of Superpave Gyratory Compactor Type on Compacted Hot-Mix Asphalt Density. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1761(1), pp. 50-60.
- Christensen, D. & Bonaquist, R., 2006. Volumetric requirements for Superpave mix design. *Transportation Research Board*, Τόμος 567.
- Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W. & Anderson, M., 1994. *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- D'Angelo, J., 2001. *Superpave mix design tests methods and requirements*. s.l.:U.S. Federal Highway Administration.
- Department of Civil Engineering - The University of Memphis, n.d. *memphis.edu*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://www.ce.memphis.edu/3137/slides/21%20-%20Marshall%20Mix%20Design.pdf>  
[Πρόσβαση 17 Απριλίου 2022].

Diazgranados Diaz, D., 2003. *Evaluation of 4.75 mm Superpave mix criteria for West Virginia*, s.l.: s.n.

Economy-pedia, n.d. <https://economy-pedia.com/>. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://el.economy-pedia.com/11035388-box-plot>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].

Galarnyk, M., 2018. *Towards Data Science*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].

Habib, A., Hossain, M., Kaldate, R. & Fager, G., 1998. Comparison of Superpave and Marshall mixtures for low-volume roads and shoulders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1609(1), pp. 44-50.

Hanna, R. & Shamseen, M., 2020. Improving the Design of Asphalt Mixtures by Superpave Method and Comparison it with Marshall Method. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series*, 42(4).

Harman, T., D'Angelo, J. & Bukowski, J., 1999. *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop*. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

Hossain, M., Fager, G. & Maag, R. G., 2018. *Superpave Volumetric Mixture Design and Analysis Handbook*. Manhattab,Kansas: Kansas State University.

Jagat, A., n.d. *Academia.edu*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
[https://www.academia.edu/36122701/MARSHALL\\_MIX\\_DESIGN\\_PROJECT](https://www.academia.edu/36122701/MARSHALL_MIX_DESIGN_PROJECT)  
[Πρόσβαση 5 Απριλίου 2022].

Jasim, I., 2012. Comparison between marshall and superpave mixtures design. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 5(4), pp. 394-406.

Jitsangiam, P., Chindaprasirt, P. & Nikraz, H., 2013. An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. *Construction and Building Materials*, Τόμος 40, pp. 961-970.

Kanneganti, V., 2002. *Comparison of 19mm Superpave and Marshall base II mixes in West Virginia.*, s.l.: s.n.

- Khan, K., 2008. *Impact of Superpave Mix Design Method on Rutting Behavior of Flexible Pavements*, Taxila: s.n.
- Liang, R., 2008. *Refine AASHTO T283 resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage for superpave*, Ohio: United States. Federal Highway Administration.
- Liu, J. και συν., 2022. Optimizing asphalt mix design through predicting effective asphalt content and absorbed asphalt content using machine learning. *Construction and Building Materials*, Τόμος 325.
- Mastrad Limited, n.d. *Mastrad - Quality Control and Test Equipment*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.mastrad.com/bbr.htm>  
[Πρόσβαση 30 Ιουνίου 2022].
- Matest-Innovative global manufacturer, n.d. *Matest: Material testing equipment*.  
[Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.matest.com/en/product/b041-gyrotronic-superpave-gyratory-compactor>  
[Πρόσβαση 2 Μαΐου 2022].
- Mathew, T. V., n.d. *Lecture Notes in Transportation Systems Engineering*, s.l.: s.n.
- Maupin, G., 1998. *Comparison of several asphalt design methods*, Charlottesville, Virginia: s.n.
- Memon, N., 2006. *Comparison between Superpave gyratory and Marshall laboratory compaction methods*, Skudai, Johor, Malaysia: s.n.
- Moutaz, N., 2006. *Comparative Evaluation for the Performance of Paving Materials by Using Marshall and Superpave Compaction Methods*, s.l.: s.n.
- Namli, R. & Kuloğlu, N., 2007. Superpave ve Marshall Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması. *Teknik Dergi*, 18(87), pp. 4103-4118.
- Özdemir, D. K., Topal, A. T., Almusawi, A. & Şengöz, B., 2019. *Comparative Study of Marshall and Superpave Asphalt Pavement Design Methods*. İzmir - Turkey, s.n.
- Pavement Interactive, n.d. *Pavement Interactive*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/penetration-test/>  
[Πρόσβαση 22 Φεβρουαρίου 2022].
- Roberts, F. L. και συν., 1991. *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*. First Edition επιμ. Maryland(Lanham): NAPA Education Foundation.



- Sadid, H. και συν., 2010. *Material acceptance risk analysis: superpave hot mix asphalt*, Idaho: s.n.
- Selvam, K., Rahamathullah, U., Raja, D. & Thangal, V., 2016. Feasibility Study On Transition From Marshall Mix Design To Superpave Mix Design. *International Journal of Novel Research in Civil Structural and Earth Sciences*, 3(2), pp. 1-21.
- Shier, R., 2004. *Statistics support for students*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/paired-t-test.pdf>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].
- Shrestha, R. N., 2018. Marshall Method of HMA Mix Design. Στο: M. ο. P. I. a. Transport, επιμ. *Manual for Dense Graded Bituminous Mixes (DBM/BC)*. s.l.:Government of Nepal, pp. 33-60.
- Vialab, n.d. *VIALAB - Expert in bitumen emulsion*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.vialab.fr/en/produits/bitumen/pav-pressure-aging-vessel/>  
[Πρόσβαση 30 Ιουνίου 2022].
- Wang, J. N., Kennedy, T. W. & McGennis, R. B., 2000. Volumetric and mechanical performance properties of superpave mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(3), pp. 238-245.
- White, T. D., 1985. Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Τόμος 54, pp. 265-284.
- Xiao, F., Punith, V., Putman, B. & Amirghanian, S., 2011. Utilization of foaming technology in warm-mix-asphalt mixtures containing moist aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(9), pp. 1328-1337.
- Yoder, E. & Witczak, M., 1975. *Principles of Pavement Design*. 2η επιμ. New York: Wiley.
- Zaniewski, J. & Nelson, J., 2003. *Comparison of 9.5 mm Superpave and Marshall Wearing I Mixes in West Virginia*, Morgantown, West Virginia: s.n.
- Zhang, J., Cooley Jr, L., Hurley, G. & Parker, F., 2004. Effect of Superpave defined restricted zone on hot-mix asphalt performance. *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*, 189(1), pp. 103-111.
- Zumrawi, M. & Edrees, S., 2016. Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*, 2(1), pp. 29-35.

Αγγελίδης, Β., n.d. *DUTHNET eClass*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://eclass.duth.gr>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].

Βραχίμης, Σ., n.d. *Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Κύπρου*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.spolmik.org/wp-content/uploads/2015/09/%CE%A3%CE%B5%CE%BC%CE%B9%CE%BD%CE%B1%CF%81%CE%B9%CE%BF-%CE%91%CF%83%CF%86%CE%B1%CE%BB%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC-%CE%A3%CE%A0%CE%9F%CE%9B%CE%9C%CE%97%CE%9A.pdf>  
[Πρόσβαση 2 Μαρτίου 2022].

Γεωργοπούλου, Σ. Χ., 2013. *Μεθοδολογία Έρευνας και Ανάλυση Δεδομένων στη Λογοπαθολογία*. Πάτρα: s.n.

Καλατζής, Ι., 2020. *Medical Image and Signal Processing Laboratory*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
<https://medisp.bme.uniwa.gr/eclass/modules/document/file.php/MTMBIT101/%CE%A5%CE%9B%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%99.%20%CE%9A%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%A4%CE%96%CE%97%20%28DESCRIPTIVE%20STATISTICS%2C%20HYPOTHESIS%20TESTING%2C%20CLUSTERING%2C%20PCA%2C%20LDA%29/1.%20>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2019. Σημειώσεις για το μάθημα Κατασκευή Οδών. Στο: *Υλικά & Δομή*. Αθήνα: Ε.Μ.Π., pp. 23-78.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2020. *Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*. Αθήνα: Ε.Μ.Π..

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2021. *Σημειώσεις για το μάθημα Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων*. Αθήνα: Ε.Μ.Π..

Πλατή, 2014. *DocPlayer*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://docplayer.gr/32257092-Ethniko-metsovio-polytehneio-diplomatiki-ergasia-dierynisi-toy-dynamikoy-metroy-dyskampsias-stin-koposi-ton-asfaltomigmaton.html>  
[Πρόσβαση 28 Απριλίου 2022].

Τσιπλακίδης, Δ., n.d. *SlidePlayer*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://slideplayer.gr/slide/13232626/>  
[Πρόσβαση 3 Ιουνίου 2022].

Χαλκιάς, Μ., n.d. *Open eClass*-<http://eclass.teipir.gr/openeclass/>. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/BUSI101/I.%20CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%9C%CE%B1%CE%B8%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82/VI.%20%CE%A3%CF%85%CF%83%CF%87%CE%AD%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%B7%20>

[Πρόσβαση 14 Ιουνίου 2022].