



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΗΜΕΝΟΥ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ**



**ΣΑΛΩΝΙΤΗ ΜΑΡΙΑ**

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

**Αθήνα, Ιούλιος 2024**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνεται ένας κύκλος σπουδών, ο οποίος μου έδωσε πολλές γνώσεις και εμπειρίες. Ήταν ένα ταξίδι απαιτητικό και δύσκολο, αλλά συγχρόνως όμορφο και ικανοποιητικό.*

*Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Χριστίνα Πλατή, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να την ευχαριστήσω για την εξαιρετική καθοδήγηση και συνεργασία μας, την υπομονή, την επιμονή της, αλλά και το αμείωτο ενδιαφέρον της, ώστε να βγει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για τη συμπαράσταση, τη στήριξη και την κατανόηση τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.*

*Αθήνα, Ιούλιος 2024*

*Σαλωνίτη Μαρία*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημασία των οδοστρωμάτων για την ομαλή και ασφαλή μετακίνηση είναι αδιαμφισβήτητη. Τα ασφαλικά μίγματα αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την ποιότητα και την ανθεκτικότητα των οδοστρωμάτων, επηρεάζοντας την ασφάλεια και την άνεση των χρηστών, καθώς και τη διάρκεια ζωής των οδικών υποδομών. Η συνεχής βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού και κατασκευής των ασφαλικών στρώσεων και κατά προτεραιότητα των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εξασφάλιση υψηλών προδιαγραφών απόδοσης και αντοχής. Η παρούσα διπλωματική εργασία, εστιάζει σε μία νέα μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων, τη μέθοδο ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-Balanced Mix Design (BMD). Η μέθοδος BMD αποτελεί μία καινοτόμο προσέγγιση για τον σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων, καθώς εκτός από την ογκομετρική ανάλυση λαμβάνει υπόψη δοκιμές επιδόσεων σχετικά με τη ρηγμάτωση, την τροχοαυλάκωση και την υδροφιλία, οι οποίες είναι οι κύριες αιτίες αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων. Συνεπώς, πέρα από τον προσδιορισμό των ογκομετρικών παραμέτρων, επιτυγχάνεται και η βελτιστοποίηση της απόδοσης του ασφαλτομίγματος. Στην εργασία αυτή, διερευνώνται οι προσεγγίσεις της μεθόδου BMD, οι δοκιμές επιδόσεων και η εφαρμογή της σε διεθνές επίπεδο. Για την περαιτέρω κατανόηση της μεθόδου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας διαδικτυακής έρευνας, που διεξήχθη στο πλαίσιο του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP), η οποία παρέχει σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή της. Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της μεθόδου BMD με την παραδοσιακή μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων Marshall. Μέσω αυτής της σύγκρισης, αξιολογούνται οι διαφορές των δύο μεθόδων στις επιδόσεις, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συμπερασματικά, η εργασία αναδεικνύει τη μέθοδο BMD ως ένα σύγχρονο εργαλείο για τον σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων, προτείνοντας βελτιώσεις και ενισχύσεις των υφιστάμενων πρακτικών για τη διασφάλιση υψηλής ποιότητας και ανθεκτικότητας των οδοστρωμάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** οδοστρώματα, ασφαλτομίγματα, μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος, μέθοδος Marshall, εφαρμογή στις ΗΠΑ, διαδικτυακή έρευνα (SHRP)

## ABSTRACT

The importance of road surfaces for smooth and safe travel is undeniable. Asphalt mixtures are a critical element in the quality and durability of road surfaces, affecting the safety and comfort of users, as well as the lifetime of road infrastructure. Continuous improvement in the design and construction methods of asphalt layers and, in particular, the design methods of asphalt mixes is a key factor in ensuring high performance and durability standards. This thesis, focuses on a new method of asphalt mix design, the Balanced Mix Design (BMD) method. The BMD method is an innovative approach for asphalt mix design, as it takes into account not only volumetric analysis but also performance tests on cracking, rutting and moisture susceptibility, which are the main causes of failure of asphalt layers. Therefore, in addition to the determination of the volumetric parameters, the performance of the asphalt mix is optimized. With this thesis, the approaches of the BMD method, performance tests and its application at international level are investigated. To further understand the method, the results of an online survey, conducted within the Strategic Highway Research Program-SHRP, are presented, which provides significant results on the application of the method. Finally, a comparative evaluation of the BMD method with the traditional Marshall asphalt mix design method is performed. Through this comparison, the differences between the two methods in performance, cost and environmental impact are evaluated. In conclusion, the paper highlights the BMD method as a modern tool for asphalt pavement design, suggesting improvements and enhancements to existing practices to ensure high quality and durability of pavements.

**Key words:** pavements, asphalt mixtures, Balanced Mix Design method, Marshall method, US application, online survey (SHPR)

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο.....	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
<b>2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Γενικά στοιχεία.....	4
2.2 Εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομίγματος .....	4
<b>3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΗΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>8</b>
3.1 Γενικά στοιχεία.....	8
3.2 Προσεγγίσεις μεθόδου.....	9
3.2.1 Προσέγγιση Α: Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων.....	9
3.2.2 Προσέγγιση Β: Ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων .....	10
3.2.3 Προσέγγιση Γ: Τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων.....	11
3.2.4 Προσέγγιση Δ: Σχεδιασμός επιδόσεων.....	12
3.2.5 Αξιολόγηση προσεγγίσεων.....	14
3.3 Περιγραφή δοκιμών επιδόσεων .....	15
3.3.1 Disc-Shaped Compact Tension Test (ASTM D7313-13).....	15
3.3.2 Semicircular Bend Test (ASTM D8044-16).....	17
3.3.3 Illinois Flexibility Index Test (AASHTO TP 124-20).....	20
3.3.4 Overlay Test (Tex-248-F).....	23
3.3.5 Indirect Tension Asphalt Cracking Test (ASTM D8225-19).....	27
3.3.6 Asphalt Pavement Analyzer (AASHTO T 340-10).....	30
3.3.7 Hamburg Wheel Track Test (AASHTO T324-19) .....	32
3.3.8 Flow Number (AASHTO T378-17) .....	34
3.3.9 Stress Sweep Rutting Test (AASHTO T134-19) .....	35
3.3.10 High Temperature Indirect Tension .....	37
3.3.11 Rapid Shear Rutting Test (ASTM D8360-22).....	39
3.3.12 Bending Beam Fatigue (AASHTO T321-17).....	40
3.3.13 IDT Creep Compliance and Strength Test (AASHTO T 322-07).....	41

3.3.14 Nflex Factor (AASHTO TP 141-20) .....	43
3.3.15 Cantabro Test (AASHTO TP 108-14) .....	44
3.3.16 Tensile Strength Ratio (AASHTO T283-14) .....	45
3.3.17 Direct Tension Cyclic Fatigue Test (AASHTO TP 107-14 &AASHTO TP 133-19).....	47
<b>4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ BMD .....</b>	<b>49</b>
4.1 Εφαρμογές στις ΗΠΑ .....	49
4.1.1 Ιλινόις .....	50
4.1.2 Καλιφόρνια .....	54
4.1.3 Οκλαχόμα .....	56
4.1.4 Λουιζιάνα.....	60
4.1.5 Βιρτζίνια.....	61
4.1.6 Βερμόντ .....	64
4.1.7 Τέξας.....	64
4.1.8 Τενεσί .....	66
4.2 Ειδική έρευνα για την αξιολόγηση της μεθόδου .....	67
4.2.1 Αντικείμενο έρευνας .....	67
4.2.2 Υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων .....	68
4.2.3 Τύποι φθοράς οδοστρωμάτων.....	70
4.2.4 Δοκιμές επιδόσεων .....	71
4.2.5 Εφαρμογή της μεθόδου .....	76
4.2.6 Ερευνητικά ερωτήματα.....	76
<b>5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MARSHALL ΚΑΙ BMD .....</b>	<b>78</b>
5.1 Γενικές αρχές-Κριτήρια σχεδιασμού .....	78
5.2 Συγκριτική ανάλυση- Μετρήσεις επιδόσεων.....	81
5.3 Επιπτώσεις στο κόστος.....	87
5.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	91
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>96</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>102</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τυπική διατομή ασφαλτικού οδοστρώματος .....	4
Εικόνα 3.1: Αρχές λειτουργίας μεθόδου BMD (Al-Khayat, Newcomb, Zhou, & Van Deusen, 2021) .....	8
Εικόνα 3.2: Προσέγγιση Α: Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων.....	9
Εικόνα 3.3: Προσέγγιση Β: Ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων .....	11
Εικόνα 3.4: Προσέγγιση Γ: Τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων .....	12
Εικόνα 3.5: Προσέγγιση Δ: Σχεδιασμός επιδόσεων .....	13
Εικόνα 3.6: Διάταξη δοκιμίου DCT (Stewart, Oputa, & Garcia, 2018) .....	15
Εικόνα 3.7: Διάταξη δοκιμής DCT, μετρητής CMOD (Amirkhanian, Spring, & et al., 2011).....	16
Εικόνα 3.8: Πρότυπη επιφάνεια σήμανσης δείγματος DCT (Aurilio & Newcomb, 2018) .....	16
Εικόνα 3.9: Τυπική καμπύλη διατομής (Marasteanu et al., 2012) .....	17
Εικόνα 3.10: Σχήμα δοκιμίων μεθόδου SCB (ASTM International, 2016).....	18
Εικόνα 3.11: Διάταξη εξοπλισμού-δοκιμίου μεθόδου SCB (Le, et al., 2022).....	19
Εικόνα 3.12: Καμπύλη LOAD-CMOD μεθόδου SCB (Li & Marasteanu, 2004).....	19
Εικόνα 3.13: Ελάχιστη ενέργεια θραύσης SCB 350 J/m <sup>2</sup> για την αποφυγή θερμικής ρηγμάτωσης (Marasteanu et al. 2012) .....	20
Εικόνα 3.14: Σχήμα δοκιμίων μεθόδου I-FIT (AASHTO TP 124, 2020) .....	21
Εικόνα 3.15: Καμπύλη δοκιμής δείκτη ευκαμψίας FI & παράμετροι δοκιμής I-FIT (Newcomb & Zhou, 2018).....	23
Εικόνα 3.16: Διάταξη δοκιμίου OT (Newcomb & Zhou, 2018) .....	24
Εικόνα 3.17: Διαδικασία δοκιμής OT (Texas Transportation Institute, 2019) .....	25
Εικόνα 3.18: Περιοχή υπολογισμού της κρίσιμης ενέργειας θραύσης (Texas Transportation Institute, 2019) .....	26
Εικόνα 3.19: Υπολογισμός δείκτη CRI (Texas Transportation Institute, 2019) .....	26
Εικόνα 3.20: Διάταξη δοκιμής (IDEAL-CT) .....	27
Εικόνα 3.21: Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης (FD) δοκιμής IDEAL-CT (Zhou & West, 2023).....	28
Εικόνα 3.22: Καμπύλη δοκιμής IDEAL-CT (Chen, Zhang, & Bahia, 2021).....	29
Εικόνα 3.23: Ευαισθησία της δοκιμής IDEAL-CT στην περιεκτικότητα σε RAP και RAS (Zhou, et. al., 2017) .....	30
Εικόνα 3.24: Ευαισθησία της δοκιμής IDEAL-CT στο ποσοστό ασφάλτου (Zhou, et. al., 2017) ...	30
Εικόνα 3.25: Εξοπλισμός & δείγμα δοκιμής APA (Newcomb & Zhou, 2018) .....	31
Εικόνα 3.26: Δοκιμή HWTT (Newcomb & Zhou, 2018) .....	32
Εικόνα 3.27: Καμπύλη δοκιμής HWTT με παραμέτρους δοκιμής (Tran, et al., 2020).....	33
Εικόνα 3.28: Δοκίμιο FN (Zhang, Alvarez, Lee, Torres, & Walubita, 2013) .....	34
Εικόνα 3.29: Καμπύλη δοκιμής FN (Walubita, Zhang, Alvarez, & Hu, 2013) .....	35
Εικόνα 3.30: Συσσκευή και σχήμα δοκιμίου δοκιμής SSR (Kim, Ghanbari, & Underwood, 2021) .	36
Εικόνα 3.31: Εξοπλισμός δοκιμής HT-IDT (Vamsikrishna & Singh, 2023) .....	38
Εικόνα 3.32: Επίπεδα διάτμησης & τυπικό εξάρτημα δοκιμής IDEAL-RT (Cooper A. , 2020) .....	39
Εικόνα 3.33: Δοκίμιο και συσκευή δοκιμής BBF (Aurilio & Newcomb, 2018) .....	40

Εικόνα 3.34: Στάδια δοκιμής IDT (Richardson & Lusher, 2008) .....	42
Εικόνα 3.35: Δοκιμή Nflex (Yin, Garita, Taylor, & West, 2018) .....	43
Εικόνα 3.36: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δοκιμής Nflex (Yin, Garita, Taylor, & West, 2018).....	44
Εικόνα 3.37: Δοκιμή Cantabro Test (Abd Ali, Joni, & Al-Rubae, 2024).....	44
Εικόνα 3.38: Δοκίμια TSR (West, Rodezno, & Yin, 2018) .....	46
Εικόνα 3.39: Δοκίμιο και συσκευή δοκιμής TSR (Grönniger, Wistuba, & Renken, 2010).....	47
Εικόνα 3.40: Συσκευή και δοκίμιο μεθόδου Direct Tension Cyclic Fatigue (Wang & Kim, 2022)	48
Εικόνα 4.1: Χάρτης εφαρμογής της μεθόδου BMD στις ΗΠΑ (West, Rodezno, & Yin, 2018).....	49
Εικόνα 4.2: Επίδραση ποσοστού RAP σε δείκτη CT-index( University of Kansas, 2023) .....	58
Εικόνα 4.3: Επίδραση βαθμού απόδοσης PG σε βάθος αυλακώσεων Rut Depth( University of Kansas, 2023).....	59
Εικόνα 4.4: Επίδραση ασφαλικού συνδετικού υλικού (AC) σε δείκτη CT-index (University of Kansas, 2023).....	59
Εικόνα 4.5: Χάρτης των ΗΠΑ με τις συμμετέχουσες πολιτείες στην έρευνα (West, et al., 2018)	67
Εικόνα 4.6: Υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων (West, et al., 2018).....	68
Εικόνα 4.7: Τύποι αστοχίας οδοστρωμάτων-τμήματα μεταφορών (West, et al., 2018).....	70
Εικόνα 4.8: Τύποι αστοχίας οδοστρωμάτων -κατασκευαστές έργων οδοποιίας (West, et al., 2018).....	70
Εικόνα 4.9: Δοκιμές για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων (West, et al., 2018) .....	71
Εικόνα 4.10: Δοκιμές για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι θερμικής ρηγμάτωσης (West, et al., 2018).....	72
Εικόνα 4.11: Δοκιμές για αξιολόγηση αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ανακλαστικής ρηγμάτωσης (West, et al., 2018).....	73
Εικόνα 4.12: Δοκιμές αξιολόγησης αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από κάτω προς τα πάνω (West, et al., 2018) .....	74
Εικόνα 4.13: Δοκιμές αξιολόγησης αντίστασης ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από πάνω προς τα κάτω (West, et al., 2018) .....	75
Εικόνα 4.14: Δοκιμές υδροφιλίας (West, et al., 2018).....	75
Εικόνα 4.15: Ανησυχίες σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου BMD (West, et al., 2018).....	76
Εικόνα 4.16: Αξιολόγηση θεμάτων που σχετίζονται με την μέθοδο BMD (West, et al., 2018)....	77
Εικόνα 5.1: Σύγκριση συνολικού αρχικού κόστους μεθόδων Marshall και BMD.....	88
Εικόνα 5.2: Σύγκριση μακροχρόνιου κόστους των μεθόδων Marshall και BMD.....	90
Εικόνα 5.3: Σύγκριση μεταξύ της περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό και ανακυκλωμένο υλικό για τις μεθόδους Marshall και BMD.....	93
Εικόνα 5.4: Σύγκριση ποσοτήτων υλικών που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους Marshall και BMD .....	93



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Σύνοψη προσεγγίσεων της μεθόδου BMD .....	14
Πίνακας 3.2: Όρια δείκτη RSI(%) με βάση κυκλοφορία σχεδιασμού (Ghanbari, Underwood, & Kim, 2022).....	36
Πίνακας 4.1: Απαιτήσεις δοκιμών επιδόσεων του IDOT (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021).....	51
Πίνακας 4.2: Ογκομετρικές απαιτήσεις δοκιμών του IDOT (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021).....	52
Πίνακας 4.3: Ογκομετρικές απαιτήσεις CDOT για μίγματα HMA τύπου A και RHMA-G (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021) .....	55
Πίνακας 4.4: Προδιαγραφές του VDOT για τις απαιτήσεις ογκομετρικού σχεδιασμού για την προσέγγιση A (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2022) .....	62
Πίνακας 4.5: Προδιαγραφές VDOT για τις απαιτήσεις δοκιμών επιδόσεων σχεδιασμού μίγματος (προσέγγιση A&Δ) (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2022).....	63
Πίνακας 4.6: Κριτήρια δοκιμής επιδόσεων TDOT για την έγκριση σχεδιασμού μίγματος (Yin & West, 2021) .....	66
Πίνακας 4.7: Υφιστάμενα κριτήρια σχεδιασμού ασφαλτομίγματος- τμήματα μεταφορών (West, et al., 2018).....	69
Πίνακας 4.8: Υφιστάμενα κριτήρια σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-κατασκευαστές έργων οδοποιίας (West, et al., 2018).....	69
Πίνακας 5.1: Σύγκριση των φιλοσοφιών-κριτηρίων σχεδιασμού των μεθόδων Marshall & BMD .....	81
Πίνακας 5.2: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Zhang, et al., 2020) και (Cho, An, Youn, & Nam, 2019) .....	82
Πίνακας 5.3: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Yin, Taylor, & Tran, 2020).....	85
Πίνακας 5.4: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Tong, et al.,2023) .....	86
Πίνακας 5.5: Αρχικό κόστος μεθόδων Marshall & BMD κατά (Lv, et al., 2018), (Azarhoosh, et al., 2020), (Yin, et al., 2020) .....	88
Πίνακας 5.6: Σύγκριση κόστους μακροχρόνιας συντήρησης μεθόδων Marshall & BMD κατά (Zhang, et al., 2020), (Aurilio& Newcomb, 2018).....	90
Πίνακας 5.7 Πλεονεκτήματα βιωσιμότητας της μεθόδου BMD κατά (Aurilio V. , 2018) .....	92

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Τα οδοστρώματα αποτελούν ένα κρίσιμο σκέλος των οδικών υποδομών, επηρεάζοντας την ποιότητα των μεταφορών και την ασφάλεια των χρηστών. Η ανθεκτικότητα και η ποιότητα των οδοστρωμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα ασφαλτικά μίγματα που χρησιμοποιούνται. Η συνεχής βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων αποτελεί προτεραιότητα για την εξασφάλιση υψηλών προδιαγραφών απόδοσης και αντοχής. 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.

Αδιαμφισβήτητα, λοιπόν, η μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα των οδοστρωμάτων. Ως μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων ορίζεται η διαδικασία βάσει της οποίας προσδιορίζονται οι αναλογίες των αδρανών (χονδρόκοκκα, λεπτόκοκκα, παιπάλη) και του ασφαλικού συνδετικού υλικού, με στόχο τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και συμπεριφοράς τους, επιτυγχάνοντας το επιθυμητό επίπεδο προδιαγραφών του έργου. Αντικειμενικός σκοπός μιας μελέτης σύνθεσης είναι η παραγωγή ενός βέλτιστου και οικονομικού μίγματος 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 συμπίκνωσης (Jagat, A., n.d.)

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων (Roberts, Mohammad, & Wang, 2002). Οι πιο ευρέως γνωστές μέθοδοι είναι οι Marshall και Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements).

Η μέθοδος Marshall είναι μια εμπειρική και πειραματική προσέγγιση γνωστή για την απλότητα της και το χαμηλό κόστος εξοπλισμού που απαιτεί. Επικεντρώνεται στον καθορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου χρησιμοποιώντας ογκομετρικά δεδομένα, καθώς και τιμές ευστάθειας και υποχώρησης. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της είναι ότι τα ασφαλτομίγματα που παράγονται με αυτή τη μέθοδο έχουν προβλέψιμη και κατάλληλη συμπεριφορά για τα τοπικά υλικά, τις κλιματικές συνθήκες και τις κυκλοφοριακές απαιτήσεις της περιοχής ενδιαφέροντος. Παρά τα θετικά της στοιχεία, υπάρχουν παρατηρήσεις για ασυνέπειες στη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων σε πραγματικές συνθήκες κατά την κατασκευή και τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος αυτή θεωρείται πλέον παρωχημένη.

Εξαιτίας των περιορισμών της μεθόδου σχεδιασμού Marshall, αναπτύχθηκε η μέθοδος σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων Superpave. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει αναλυτικές και υπολογιστικές τεχνικές με εμπειρικά δεδομένα, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη μέθοδο σχεδιασμού. Η μέθοδος Superpave αναπτύχθηκε για να παρέχει μια πιο συνεπή και αντιπροσωπευτική μεθοδολογία σχεδιασμού και τελικά να ελαχιστοποιήσει τις τυπικές δυσχέρειες του οδοστρώματος, όπως η μόνιμη παραμόρφωση, η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και η ρηγμάτωση σε χαμηλή θερμοκρασία, καθώς και τις επιπτώσεις της γήρανσης και της υγρασίας στη μακροπρόθεσμη απόδοση των ασφαλτικών στρώσεων (Kennedy, Huber, Hariggan, Cominsky, & Hughes, 1994).

Ωστόσο, η αυξημένη χρήση ανακυκλωμένων υλικών δημιούργησε την ανάγκη να εξεταστούν και άλλες παράμετροι πέρα από τον ογκομετρικό σχεδιασμό. Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση των δοκιμών επιδόσεων κατέστη αναγκαία για την αποδοχή του σχεδιασμού ασφαλτομίγματος. Οι δοκιμές επιδόσεων παρέχουν καλύτερες προβλέψεις των πιθανών τύπων αστοχίας των οδοστρωμάτων και περιλαμβάνουν δοκιμές για την αντιμετώπιση της ρηγμάτωσης, της τροχοαυλάκωσης και της αξιολόγησης ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας. Αυτές οι εξελίξεις συνέβαλαν στην ανάπτυξη της μεθόδου ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-Balanced Mix Design (BMD).

Η μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος BMD αποτελεί μία σύγχρονη προσέγγιση στον σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων, η οποία στοχεύει στη βελτιστοποίηση των επιδόσεων και της ανθεκτικότητας των οδοστρωμάτων. Ενσωματώνει δοκιμές επιδόσεων που αξιολογούν την ανθεκτικότητα του μίγματος έναντι ρηγματώσεων και τροχοαυλακώσεων, παρέχοντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ποιότητας και της αντοχής των ασφαλτομιγμάτων.

Η μέθοδος Marshall παρά την ευρεία χρήση της έχει περιορισμούς στην αντιμετώπιση των σύγχρονων κυκλοφοριακών και κλιματικών συνθηκών, σε αντίθεση με τη μέθοδο BMD, η οποία λαμβάνει υπόψη τις κυκλοφοριακές και κλιματικές συνθήκες. Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος BMD έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας ασφαλτομιγμάτων, καθώς περιορίζοντας την πιθανότητα αστοχίας λόγω ρηγματώσεων ή τροχοαυλακώσεων επιτυγχάνεται ένα πιο ανθεκτικό και ταυτόχρονα βιώσιμο οδόστρωμα. Κατά συνέπεια, μειώνονται και οι τυχόν επεμβάσεις που θα χρειαστεί να γίνουν για αποκατάσταση φθορών.

## **1.2 Στόχος και μεθοδολογία**

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση και ανάλυση της νέας μεθόδου ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-BMD. Η εργασία εξετάζει τις

διάφορες προσεγγίσεις και τα αποτελέσματα των δοκιμών της μεθόδου, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιδόσεις των ασφαλτομιγμάτων. Ακόμα, παρουσιάζει τη σχετική εμπειρία από εφαρμογές της μεθόδου σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ, με εκτενή αναφορά σε μία διαδικτυακή έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP). Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της μεθόδου BMD με την παραδοσιακή μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων Marshall, με βάση μελέτες που έχουν γίνει για τις δύο μεθόδους εστιάζοντας στις επιδόσεις, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

### 1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

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

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται οι βασικές έννοιες του σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων και παρουσιάζονται οι δύο πιο ευρέως γνωστές μέθοδοι σχεδιασμού, οι μέθοδοι Marshall και Superpave.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται λεπτομερώς η μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος Balanced Mix Design-BMD. Περιγράφονται οι γενικές αρχές της μεθόδου, οι προσεγγίσεις της, καθώς και οι επιμέρους δοκιμές επιδόσεων που χρησιμοποιούνται.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η σχετική εμπειρία από την εφαρμογή της μεθόδου σε διεθνές επίπεδο και συγκεκριμένα σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ, με εκτενή αναφορά σε μία διαδικτυακή έρευνα που διεξήχθη στο πλαίσιο του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP) και παρέχει σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή της.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της μεθόδου BMD με την παραδοσιακή μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων Marshall. Αναλύονται οι διαφορές στις γενικές αρχές και στα κριτήρια σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων, στο οικονομικό κόστος, αλλά και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δύο μεθόδων.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, καθώς και ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν στο πλαίσιο επέκτασής της.

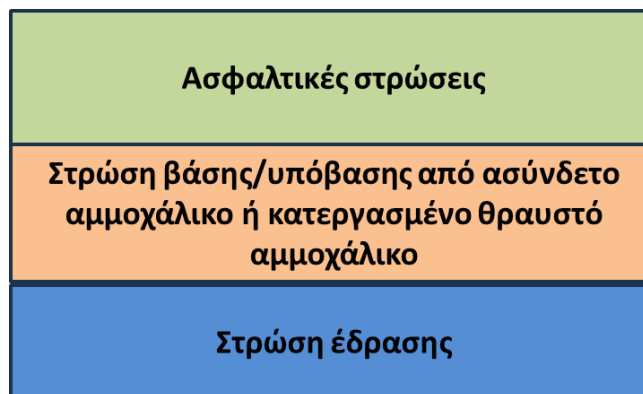
Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** περιλαμβάνεται το σύνολο της βιβλιογραφίας και των αναφορών που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

## 2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Τα οδοστρώματα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της ανθρώπινης ζωής, επηρεάζοντας την ποιότητα των μεταφορών και την ασφάλεια των χρηστών. Είναι κατασκευές μηχανικού και χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας για την καθημερινή ζωή, το εμπόριο, τις μεταφορές - μετακινήσεις και την εκτέλεση άλλων έργων. Οι οδικές μεταφορές είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος μεταφοράς στον κόσμο και η ανάπτυξη μιας χώρας συχνά μετριέται ως προς τη συνολική απόσταση που μπορεί να καλυφθεί σε ασφαλτοστρωμένο δρόμο. Η οδοποιία, λοιπόν, αποτελεί έναν σημαντικό κλάδο τόσο στις αναπτυσσόμενες όσο και στις ανεπτυγμένες χώρες. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαίο τα οδοστρώματα να είναι επαρκώς ισχυρά και ανθεκτικά για την θεωρούμενη διάρκεια ζωής τους. Πρέπει, λοιπόν, να σχεδιάζονται, να κατασκευάζονται, αλλά και να συντηρούνται σωστά.

Γενικά έχει καθιερωθεί η διάκριση των οδοστρωμάτων σε δύο κατηγορίες, τα ασφαλτικά, τα οποία μπορεί να είναι εύκαμπτα ή ημιάκαμπτα και τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα, στα οποία η ανώτερη στρώση-στρώση κυκλοφορίας αποτελείται από μία πλάκα σκυροδέματος. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στα ασφαλτικά οδοστρώματα, μία τυπική δομή των οποίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Τυπική διατομή ασφαλτικού οδοστρώματος

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 ένα ασφαλτικό οδοστρώμα αποτελείται από ασφαλτικές στρώσεις και στρώσεις βάσης/υπόβασης από ασύνδετο ή κατεργασμένο θραυστό αμμοχάλικο, οι οποίες εδράζονται πάνω σε διαμορφωμένο συμπυκνωμένο έδαφος.

### 2.2 Εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομίγματος

Οι ασφαλτικές στρώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε ασφαλτική βάση, ισοπεδωτική, συνδετική και επιφανειακή στρώση, αποτελούν το ανώτερο βασικό τμήμα της δομής ενός οδοστρώματος, στο οποίο συντελείται η κίνηση των οχημάτων. Συνεπώς, γίνεται εύκολα

αντιληπτό πως ένα ανθεκτικό ασφαλτόμιγμα είναι απαραίτητο, καθώς προσφέρει παράλληλα ασφάλεια και ένα ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης στους χρήστες μιας οδού ή ενός οδικού δικτύου.

Στόχος, λοιπόν, του σχεδιασμού ενός ασφαλτομίγματος είναι να προσδιοριστεί ο καταλληλότερος συνδυασμός συνδετικού υλικού (ασφάλτου) και αδρανών, που θα δώσει μακροχρόνια απόδοση και ανθεκτικότητα στο οδόστρωμα. Ένας επιθυμητός σχεδιασμός ασφαλτομίγματος χρησιμοποιεί μία κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών και μία περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό, η οποία εξασφαλίζει την ύπαρξη ενός ανθεκτικού οδοστρώματος, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί επαρκή ευστάθεια, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας χωρίς το οδόστρωμα να υποστεί παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις.

Ξεκινώντας με μία αναδρομή στην ιστορία των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων επισημαίνεται ότι δύο ήταν οι πιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι, οι Marshall και Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements).

Η πρώτη είναι μία εμπειρική - πειραματική μέθοδος, η οποία θεωρείται η πιο διαδεδομένη και εφαρμόσιμη μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων παγκοσμίως, όπως και στη χώρα μας. Αναπτύχθηκε από τον Bruce Marshall, ο οποίος εργαζόταν ως μηχανικός του Τμήματος Αυτοκινητοδρόμων του Μισισσιπή (Mississippi Department of Highways) και διακρίνεται για την απλότητα της και το χαμηλό κόστος εξοπλισμού που απαιτεί. Η μεθοδολογία της επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου βάσει των ογκομετρικών στοιχείων και των τιμών ευστάθειας και παραμόρφωσης. Αν και λόγω του εμπειρικού της χαρακτήρα δεν ανταποκρίνεται στις κυκλοφοριακές και κλιματικές μεταβολές (Asi, 2007) συνεχίζει να αποτελεί την επικρατέστερη διαδικασία σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων. Η επικράτηση της αυτή, οφείλεται στην πληθώρα πλεονεκτημάτων που έχει, όπως υποστηρίζουν οι (White, 1985) και (Sadid, 2010). Συγκεκριμένα:

- Πρόκειται για μία σχετικά απλή μέθοδο με γρήγορα αποτελέσματα
- Απαιτεί μικρό, ελαφρύ και ταυτόχρονα οικονομικό εξοπλισμό
- Οι ιδιότητες των μιγμάτων που παράγονται στο εργαστήριο σχετίζονται με τα αποτελέσματα στο πεδίο
- Είναι κατάλληλη για τα τοπικά υλικά και τις συνθήκες της εκάστοτε περιοχής
- Εφαρμόζονται τάσεις σε κάθε μέρος του δείγματος

Ωστόσο, οι (Jitsangiam, Chindaprasirt, & Nikraz, 2013) και (Kanneganti, 2002) χαρακτήρισαν την μέθοδο ως παρωχημένη, διότι παρά τα πλεονεκτήματα που διαθέτει, παρατηρούνται αρκετές διαφοροποιήσεις σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά του

ασφαλτομίγματος σε επί τόπου συνθήκες κατά την κατασκευή και κυρίως κατά τη διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος.

Αξιοποιώντας, λοιπόν, τα χαρακτηριστικά της καλύτερης και νέας τεχνολογίας ασφαλτομιγμάτων, μία αναλυτική-υπολογιστική μέθοδος με εμπειρικά στοιχεία, η μέθοδος Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), έρχεται να καλύψει τα κενά της μεθόδου Marshall. Η μέθοδος Superpave αποτελεί προϊόν του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP), που χρηματοδοτήθηκε το 1987 από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration-FHWA). Σκοπός του ήταν να αναπτύξει μία τεχνολογία και προδιαγραφές με βάση τις επιδόσεις που θα οδηγούσαν σε σημαντικές βελτιώσεις στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν οι αυτοκινητόδρομοι, για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις, λόγω της αυξανόμενης κυκλοφορίας. Μέσω αυτής της μεθόδου, επιτυγχάνεται ικανοποιητική αντιμετώπιση των βασικών μορφών αστοχίας ενός οδοστρώματος και παράλληλα λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις της γήρανσης και της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας (Cominksy, Huber, Kennedy, & Anderson, 1994).

Η μέθοδος Superpave μπορεί να εφαρμοστεί σε νέα, ανακυκλωμένα, πυκνής σύνθεσης θερμά ασφαλτομίγματα με ή χωρίς τη χρήση τροποποιητικών πρόσθετων υλικών, όπως τα πολυμερή. 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 -μόνιμη παραμόρφωση, ρηγμάτωση λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης, ρηγμάτωση λόγω χαμηλής θερμοκρασίας- και παράλληλα λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις της γήρανσης και της ευαισθησίας στην επίδραση της υγρασίας. Ωστόσο, οι δοκιμές έναντι των τριών βασικών μορφών αστοχίας αποτελούσαν απλά σύσταση της μεθόδου, χωρίς να αποτελούν ξεχωριστό βήμα της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων.

Κατ'επέκταση, και επειδή, για λόγους βιωσιμότητας, τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση του ανακτώμενου ασφαλικού υλικού (Reclaimed Asphalt Pavement-RAP) και του ανακυκλωμένου ασφαλικού υλικού (Reclaimed Asphalt Shingles-RAS), με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ποιότητα των νέων ασφαλικών μιγμάτων, οι υπάρχουσες μέθοδοι ελέγχου ποιότητας των ασφαλτομιγμάτων θεωρούνται πλέον μη επαρκείς. Σύμφωνα, μάλιστα, με την εθνική ένωση ασφάλτου (National Asphalt Pavement Association-NAPA), η βιομηχανία ασφαλτομιγμάτων παραμένει ο πιο επιμελής ανακυκλωτής της χώρας, με περισσότερο από το 95% του RAP να επαναχρησιμοποιείται σε νέα οδοστρώματα το 2021. Μάλιστα, το μέσο ποσοστό του RAP που χρησιμοποιείται σε ασφατικά μίγματα αυξήθηκε από 15,6% το 2009 σε σχεδόν 22% το 2021. Οι παραγωγί ασφαλτομιγμάτων εξακολουθούν να παρακινούνται να χρησιμοποιούν περισσότερα ανακυκλωμένα ασφατικά υλικά, καθώς το συνδετικό ασφάλτου στα ανακυκλωμένα

υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει ένα τμήμα του ασφαλικού συνδετικού υλικού, που συνήθως είναι το πιο ακριβό συστατικό σε ένα μίγμα. Επίσης, πλέον υπάρχει μεγαλύτερη ευθύνη για τους κατασκευαστές, οι οποίοι πρέπει να λειτουργούν με πιο βιώσιμο τρόπο.

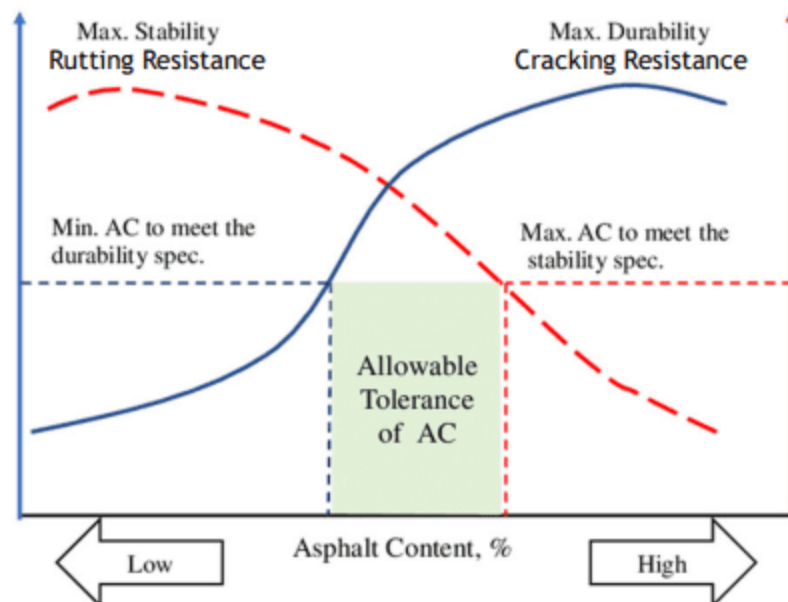
Ωστόσο, σύμφωνα με στοιχεία από έναν ικανό αριθμό κρατικών υπηρεσιών των ΗΠΑ παρατηρούνται πρόωρες αστοχίες σε σχετικά νέα οδοστρώματα, λόγω της ύπαρξης ανακυκλωμένων υλικών. Ως αποτέλεσμα, πολλοί φορείς αυτοκινητοδρόμων εργάζονται ενεργά για την εφαρμογή μιας νέας διαδικασίας ελέγχου ποιότητας ασφαλικών μιγμάτων, της μεθόδου ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος BMD, η οποία ενσωματώνει δοκιμές επιδόσεων για την αντιμετώπιση των βασικών μορφών αστοχίας των οδοστρωμάτων, με στόχο τη βελτίωση του ελέγχου της απόδοσης και της αντοχής τους.



### 3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΗΜΕΝΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ

#### 3.1 Γενικά στοιχεία

Η αύξηση των ποσοστών RAP και RAS στα ασφαλτικά μίγματα κατέστησε απαραίτητο να εξεταστούν παράμετροι πέραν του ογκομετρικού σχεδιασμού και να ενσωματωθούν δοκιμές επιδόσεων έναντι της μόνιμης παραμόρφωσης και της ρηγμάτωσης. Επιπλέον, η αδυναμία της μεθόδου Superpave να θεσπίσει ως ξεχωριστό βήμα της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων τις δοκιμές επιδόσεων, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης του ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-BMD. Αναλυτικότερα, τον Σεπτέμβριο του 2015, η ομάδα εργασίας εμπειρογνομόνων για τα μίγματα και την κατασκευή, της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration - FHWA) συγκρότησε μια ομάδα εργασίας για τον ισορροπημένο σχεδιασμό ασφαλτομίγματος, η οποία όρισε τη μέθοδο BMD σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO PP 105-20 ως "σχεδιασμό ασφαλτομίγματος με τη χρήση δοκιμών επιδόσεων σε κατάλληλα προετοιμασμένα δοκίμια που αντιμετωπίζουν πολλαπλούς τρόπους δυσλειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη τη γήρανση του μίγματος, την κυκλοφορία, το κλίμα και τη θέση εντός της δομής του οδοστρώματος" (West, Rodezno, & Yin, 2018). Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας της μεθόδου BMD.



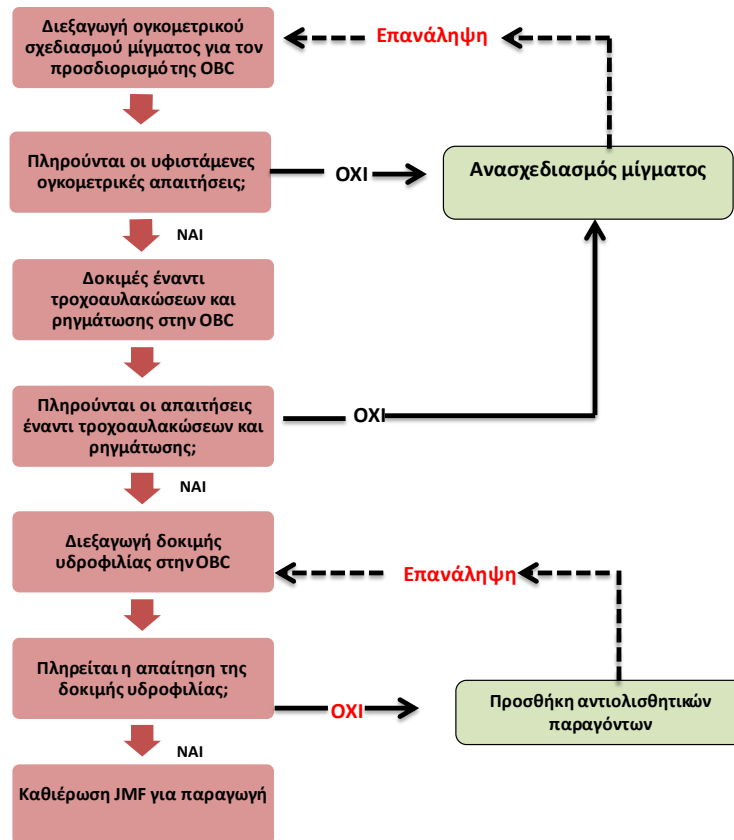
Εικόνα 3.1: Αρχές λειτουργίας μεθόδου BMD (Al-Khayat, Newcomb, Zhou, & Van Deusen, 2021)

Αναλυτικότερα, ο ισορροπημένος σχεδιασμός ασφαλτομίγματος συνεπάγεται ότι το μίγμα σχεδιάζεται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της αντίστασης έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων με τη χρήση κατάλληλα επιλεγμένων δοκιμών επιδόσεων και όχι με βάση ογκομετρικές οδηγίες, όπως στη μέθοδο Marshall.

### 3.2 Προσεγγίσεις μεθόδου

#### 3.2.1 Προσέγγιση Α: Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων

Η προσέγγιση Α ξεκινά με την τρέχουσα μέθοδο ογκομετρικού σχεδιασμού ασφαλτομίγματος (π.χ. Marshall ή Superpave) για τον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό (Optimum Binder Content -OBC), που πληροί όλες τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις. Στη συνέχεια, το μίγμα με τη βέλτιστη περιεκτικότητα που έχει υπολογιστεί, υποβάλλεται σε δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Προσέγγιση Α: Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων

Εάν ο σχεδιασμός του μίγματος αποτύχει στα κριτήρια των δοκιμών έναντι τροχοαυλακώσεων ή/και ρηγματώσεων, ολόκληρος ο σχεδιασμός του μίγματος επαναλαμβάνεται είτε με τη χρήση διαφορετικών υλικών (αλλαγές στα αδρανή, στο

ασφαλικό συνδετικό υλικό ή και προσθήκη ανακυκλωμένων υλικών) είτε ακόμα, μπορεί να χρειαστεί να τροποποιηθούν οι αναλογίες του μίγματος μέχρι να ικανοποιηθούν όλα τα κριτήρια ογκομέτρησης και δοκιμών έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεως. Αφού, λοιπόν, το μίγμα επιτύχει στις δοκιμές αυτές, στη συνέχεια δοκιμάζεται με μία δοκιμή υδροφιλίας για την αξιολόγηση της ευαισθησίας του στην επίδραση της υγρασίας.

Εάν ο σχεδιασμός περάσει τη δοκιμή υδροφιλίας, καθορίζεται ο τύπος μίγματος για την παραγωγή (Job Mix Formula-JMF). Διαφορετικά, πρέπει να προστεθούν αντιολισθητικοί παράγοντες, όπως υγρά αντιολισθητικά πρόσθετα (Liquid Anti-Strip-LAS) ή υδράσβεστος και το τροποποιημένο μίγμα αξιολογείται εκ νέου με την ίδια δοκιμή υδροφιλίας, μέχρι να επιτευχθεί επιτυχές αποτέλεσμα. Εάν χρησιμοποιηθούν αντιολισθητικά πρόσθετα, μπορεί να είναι απαραίτητο να επαναληφθεί η δοκιμή έναντι τροχοαυλακώσεων στο τροποποιημένο μίγμα για την επαλήθευση της συμμόρφωσης, καθώς η χρήση υπερβολικών δόσεων είναι δυνατό να προκαλέσει αυλακώσεις, καθώς θα μαλακώσει αρκετά το ασφαλικό συνδετικό υλικό. Επίσης, ένα πιθανό αρνητικό αποτέλεσμα της δοκιμής υδροφιλίας θα μπορούσε να βελτιωθεί με την αλλαγή της πηγής του ασφαλικού συνδετικού υλικού ή του τύπου των αδρανών.

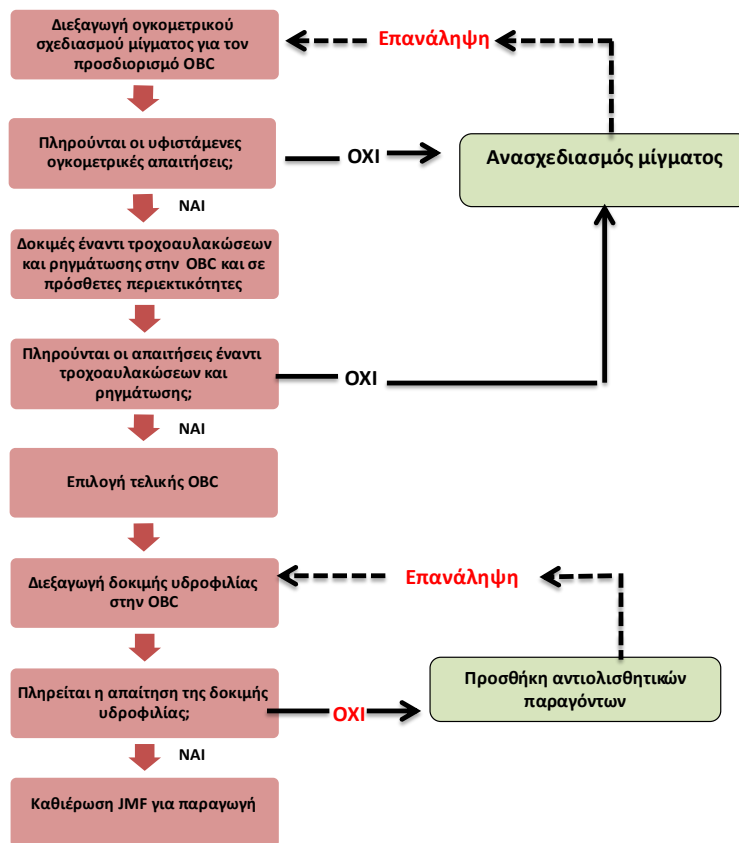
Ωστόσο, αυτές οι διορθωτικές τροποποιήσεις δεν προτιμώνται, επειδή θα απαιτούσαν τον επανασχεδιασμό του μίγματος, ώστε να διατηρηθεί η συμμόρφωση με όλα τα ογκομετρικά κριτήρια και τα κριτήρια απόδοσης.

### **3.2.2 Προσέγγιση Β: Ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων**

Η προσέγγιση Β είναι μια διευρυμένη έκδοση της προσέγγισης Α. Ξεκινά επίσης με την τρέχουσα μέθοδο ογκομετρικού σχεδιασμού μίγματος (π.χ. Marshall, Superpave) για τον προσδιορισμό της αρχικής βέλτιστης περιεκτικότητας ασφαλικού συνδετικού υλικού OBC, που πληροί όλες τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις.

Το μίγμα υπόκειται σε δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων στην αρχική περιεκτικότητα ασφαλικού συνδετικού υλικού, αλλά και σε δύο ή περισσότερες πρόσθετες περιεκτικότητες σε συνδετικό υλικό με βήμα  $\pm 0,3-0,5\%$  του αρχικού ποσοστού OBC. Στη συνέχεια, επιλέγεται ως τελική OBC η περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό, που ικανοποιεί τα κριτήρια της δοκιμής έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων.

Σε περιπτώσεις που δεν προκύψει περιεκτικότητα συνδετικού υλικού που να ικανοποιεί όλα τα κριτήρια, επαναλαμβάνεται ολόκληρη η διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος με τη χρήση διαφορετικών συστατικών ή αναλογιών του μίγματος (π.χ. αδρανή, ασφατικά συνδετικά υλικά, ανακυκλωμένα υλικά και πρόσθετα), έως ότου ικανοποιηθούν τα κριτήρια έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων. Μετά την επιλογή της τελικής περιεκτικότητας OBC, ο σχεδιασμός του μίγματος αξιολογείται στη συνέχεια με μία δοκιμή υδροφιλίας (Εικόνα 3.3).

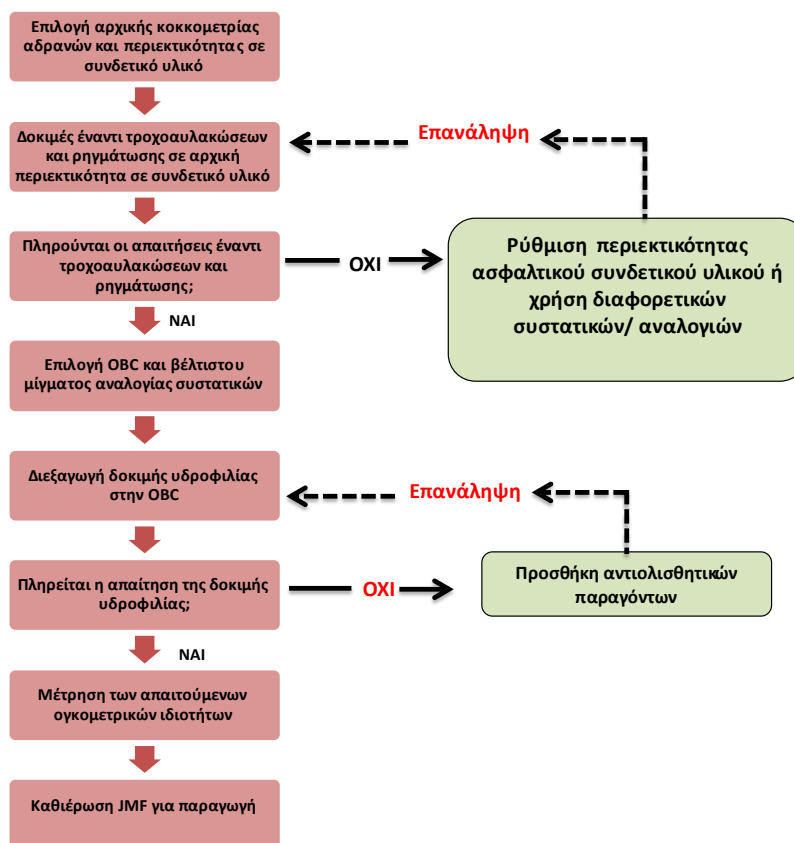


**Εικόνα 3.3: Προσέγγιση Β: Ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων**

Εάν ο σχεδιασμός περάσει το κριτήριο της δοκιμής υδροφιλικότητας, καθορίζεται ο τύπος μίγματος εργασίας για την παραγωγή (JMF). Διαφορετικά, ισχύουν τα ίδια με την προσέγγιση Α και πρέπει να προστεθούν αντιολισθητικοί παράγοντες, όπως πρόσθετα LAS ή υδράσβεστος. Έπειτα, το τροποποιημένο μίγμα αξιολογείται εκ νέου με την ίδια δοκιμή υδροφιλικότητας, έως ότου το κριτήριο ικανοποιηθεί. Θα μπορούσαν επίσης να διεξαχθούν πρόσθετες δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων στο τροποποιημένο μίγμα για σκοπούς επαλήθευσης της απόδοσης.

### 3.2.3 Προσέγγιση Γ: Τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων

Η προσέγγιση Γ ξεκινά πάλι με την τρέχουσα μέθοδο ογκομετρικού σχεδιασμού μίγματος (π.χ. Marshall, Superpave) για τον καθορισμό της αρχικής κοκκομετρίας των αδρανών και της περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4, ο αρχικός σχεδιασμός υπόκειται σε δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων.



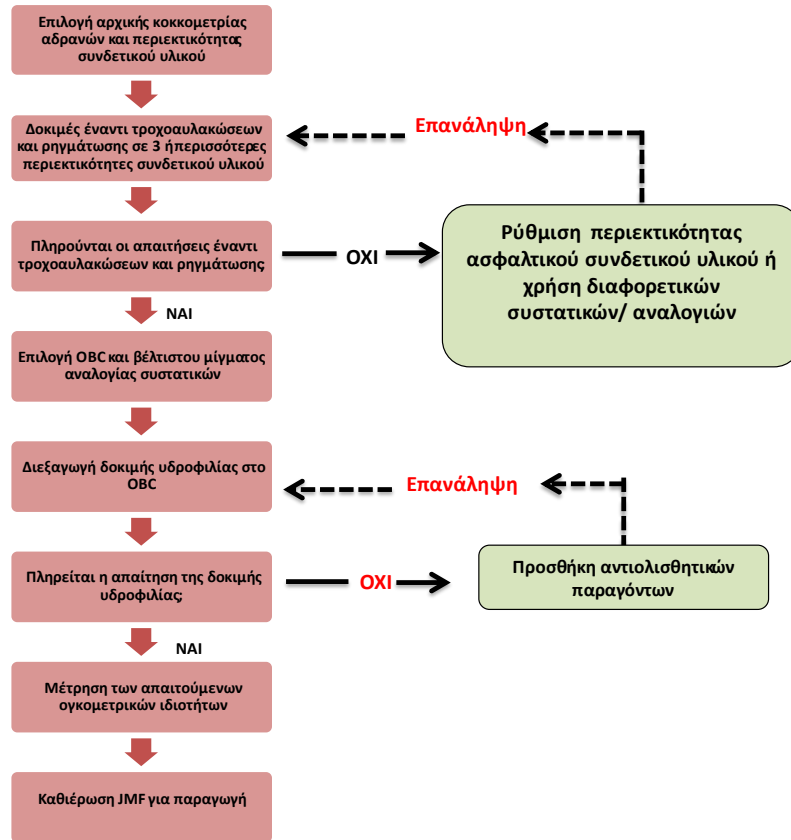
**Εικόνα 3.4: Προσέγγιση Γ: Τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων**

Τα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιούνται και το τροποποιημένο μίγμα αξιολογείται εκ νέου με μία δοκιμή υδροφιλίας, μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο. Θα μπορούσαν επίσης να διεξαχθούν πρόσθετες δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων στο τροποποιημένο μίγμα για σκοπούς επαλήθευσης της απόδοσης.

### 3.2.4 Προσέγγιση Δ: Σχεδιασμός επιδόσεων

Η προσέγγιση Δ ξεκινά με την επιλογή της αρχικής κοκκομετρίας των αδρανών υλικών, της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα ασφαλτικά υλικά και της ποιότητας του συνδετικού υλικού. Ο αρχικός σχεδιασμός μίγματος υπόκειται σε δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων σε τρεις ή περισσότερες περιεκτικότητες συνδετικού υλικού με βήμα  $\pm 0,3-0,5\%$  της αρχικής περιεκτικότητας. Επιλέγεται ως OBC μία περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό που ικανοποιεί τόσο τα κριτήρια των δοκιμών έναντι των τροχοαυλακώσεων όσο και της ρηγμάτωσης. Σε περιπτώσεις όπου δεν προκύψει περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό που να ικανοποιεί τους ελέγχους, ο αρχικός σχεδιασμός του μίγματος πρέπει να προσαρμοστεί χρησιμοποιώντας διαφορετικά συστατικά ή αναλογίες του μίγματος (π.χ. αδρανή, ασφαλτικά συνδετικά υλικά, ανακυκλωμένα υλικά) μέχρι να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των δοκιμών έναντι

τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων. Στη συνέχεια, ο σχεδιασμός του μίγματος αξιολογείται με μία δοκιμή υδροφιλίας (Εικόνα 3.5).



**Εικόνα 3.5: Προσέγγιση Δ: Σχεδιασμός επιδόσεων**

Εάν ο σχεδιασμός περάσει το κριτήριο της δοκιμής υδροφιλίας, καθορίζεται ο σχεδιασμός του μίγματος εργασίας (JMF). Διαφορετικά, πρέπει να προστεθούν αντιολισθητικοί παράγοντες όπως πρόσθετα LAS ή υδράββεστος και το τροποποιημένο μίγμα αξιολογείται εκ νέου με την ίδια δοκιμή υδροφιλίας μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο. Θα μπορούσαν επίσης να διεξαχθούν πρόσθετες δοκιμές έναντι τροχοαυλακώσεων και ρηγματώσεων στο τροποποιημένο μίγμα για σκοπούς επαλήθευσης της απόδοσης.

### 3.2.5 Αξιολόγηση προσεγγίσεων

Η προσέγγιση Α απαιτεί πλήρη συμμόρφωση με τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις και είναι η πιο συντηρητική. Αντίθετα, η προσέγγιση Β απαιτεί πλήρη συμμόρφωση με τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις στο αρχικό OBC, αλλά επιτρέπει μέτριες αλλαγές στην περιεκτικότητά του για βελτιστοποίηση της απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών επιδόσεων. Αν και η προσέγγιση Β είναι ελαφρώς πιο ευέλικτη από την προσέγγιση Α, εξακολουθεί να θεωρείται μια συντηρητική προσέγγιση με περιορισμένη δυνατότητα καινοτομίας. Όσον αφορά την προσέγγιση Γ, επιτρέπει τη χαλάρωση ή την εξάλειψη ορισμένων ογκομετρικών απαιτήσεων, εφόσον πληρούνται τα κριτήρια επιδόσεων. Οι τροποποιήσεις του σχεδιασμού του μίγματος που επιτρέπονται για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων δεν περιορίζονται σε αλλαγές στην περιεκτικότητα του ασφαλικού συνδετικού υλικού. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση Γ είναι λιγότερο συντηρητική από τις προσεγγίσεις Α και Β και παρέχει μεσαίου βαθμού δυνατότητες καινοτομίας. Τέλος, η προσέγγιση Δ δεν έχει καμία απαίτηση για τις ογκομετρικές ιδιότητες και βασίζεται αποκλειστικά στα αποτελέσματα των δοκιμών επιδόσεων του μίγματος για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του μίγματος και, ως εκ τούτου, θεωρείται η λιγότερο συντηρητική προσέγγιση με την μεγαλύτερη δυνατότητα καινοτομίας. Η σύνοψη της αξιολόγησης των προσεγγίσεων παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1: Σύνοψη προσεγγίσεων της μεθόδου BMD**

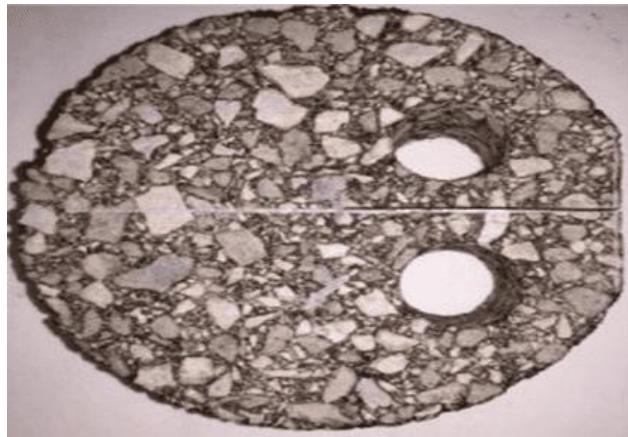
Προσέγγιση BMD	Ογκομετρικές απαιτήσεις	Απαιτήσεις επιδόσεων	Ευελιξία
Α-Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων	Πλήρης συμμόρφωση	Πλήρης συμμόρφωση	Συντηρητική
Β-Ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων	Πλήρης συμμόρφωση στο προκαταρκτικό ποσοστό ασφαλικού συνδετικού υλικού (OBC)	Βελτιστοποίηση των επιδόσεων μέσω μέτριων αλλαγών στην περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό	Λίγο πιο ευέλικτη από την προσέγγιση Α
Γ-Τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός	Ορισμένες απαιτήσεις χαλαρώθηκαν ή καταργήθηκαν	Βελτιστοποίηση των επιδόσεων με προσαρμογή της αρχικής περιεκτικότητας σε ασφαλικό συνδετικό υλικό ή των ιδιοτήτων του μίγματος ή των αναλογιών	Λιγότερη συντηρητική από την προσέγγιση Α και Β
Δ-Σχεδιασμός επιδόσεων	Περιορισμένες ή μηδενικές απαιτήσεις	Βελτιστοποίηση της απόδοσης με ρύθμιση των συστατικών του μίγματος και των αναλογιών	Λιγότερο συντηρητική

### 3.3 Περιγραφή δοκιμών επιδόσεων

Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού μίγματος BMD χρησιμοποιεί δοκιμές επιδόσεων στοχεύοντας στην ανάπτυξη ασφαλτομιγμάτων υψηλών προδιαγραφών. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι δοκιμές.

#### 3.3.1 Disc-Shaped Compact Tension Test (ASTM D7313-13)

Ο Buttlar και οι συνεργάτες του (Buttlar, et al., 2006) ανέπτυξαν τη δοκιμή Disc-Shaped Compact Tension Test-DCT για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσεων λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Ένα δοκίμιο σε σχήμα δίσκου με διάμετρο 150 mm, πάχος 50 mm και με δύο οπές 25 mm εκατέρωθεν μιας εγκοπής 62,5 mm αποτελεί το βασικό εργαλείο της εν λόγω δοκιμής, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7313-13 (ASTM International, 2013). Το σχήμα του δοκιμίου με όλες τις απαραίτητες τομές παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6.



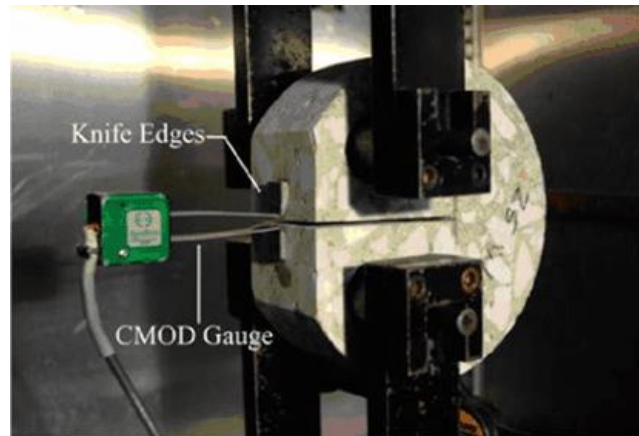
Εικόνα 3.6: Διάταξη δοκιμίου DCT (Stewart, Oputa, & Garcia, 2018)

Στη δοκιμή DCT, τα δοκίμια υποβάλλονται αρχικά σε προφόρτιση μικρότερη από 0,2 kN και στη συνέχεια δοκιμάζονται με σταθερό δείκτη που μετράει το άνοιγμα του εύρους της σχηματιζόμενης ρωγμής (Crack Mouth Opening Displacement-CMOD), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Συγκεκριμένα, το δείγμα τοποθετείται στη συσκευή δοκιμής, όπου η φόρτιση εφαρμόζεται συμμετρικά στις δύο πλευρές της εγκοπής και οι δυνάμεις που ασκούνται προκαλούν ρηγμάτωση. Το εύρος της ρωγμής-CMOD μετριέται με τη χρήση εξειδικευμένων αισθητήρων τοποθετημένων στην περιοχή της εγκοπής. Σημειώνεται πως η δοκιμή γίνεται με ρυθμό ανοίγματος 1mm/min και με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η φόρτιση εφαρμόζεται με ελεγχόμενο και σταθερό τρόπο, κάτι που είναι κρίσιμο για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της δοκιμής.

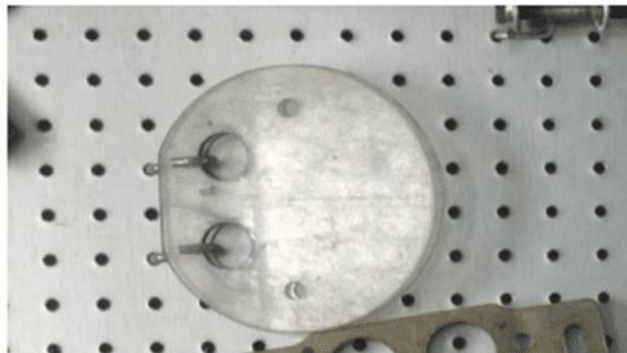
Το βασικό για τη δοκιμή DCT είναι η προετοιμασία του δείγματος. Το δείγμα μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας κατάλληλο εξοπλισμό (συμπιεστή Superpave Gyrotory Compactor-SGC) ή πυρήνες πεδίου. Η προετοιμασία του δείγματος DCT



περιλαμβάνει τέσσερις τομές. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται ένα πρότυπο σήμανσης για να υποδείξει τη θέση των δύο οπών φόρτισης που πρέπει να διανοιχθούν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8. Έπειτα, ένα μηχάνημα χρησιμοποιείται για την παραγωγή των δύο τελικών τομών: μια πεπλατυσμένη επιφάνεια για να διευκολυνθεί η τοποθέτηση του μετρητή CMOD και μια εγκοπή 62.5 mm, κατά μήκος των δύο οπών.



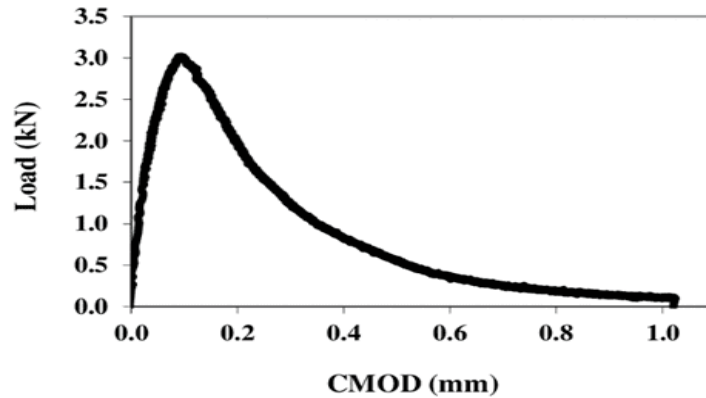
**Εικόνα 3.7: Διάταξη δοκιμής DCT, μετρητής CMOD (Amirkhanian, Spring, & et al., 2011)**



**Εικόνα 3.8: Πρότυπη επιφάνεια σήμανσης δείγματος DCT (Aurilio & Newcomb, 2018)**

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ερευνητές του Πανεπιστημίου του Ιλινόις προσδιόρισαν ότι ο μέσος χρόνος κατασκευής ανά δείγμα κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 λεπτών για τη δοκιμή DCT. Ο μετρητής CMOD χρειάζεται να τοποθετηθεί στις δύο πλευρές του στόματος της ρωγμής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Επισημαίνεται πως αν και ο χρόνος της δοκιμής είναι σύντομος, καθώς διαρκεί μόνο 1 έως 6 λεπτά, ο πραγματικός χρόνος δοκιμής ανά δείγμα είναι πιθανώς περισσότερο από 15 λεπτά, λαμβάνοντας υπόψη τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας δοκιμής και την τοποθέτηση των δειγμάτων στη συσκευή δοκιμής.

Παραγόμενο αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής είναι η ενέργεια θραύσης  $G_f$ , η οποία υπολογίζεται με τον προσδιορισμό του εμβαδού κάτω από την καμπύλη φορτίου-εύρους ανοίγματος ρωγμής (Load-CMOD) κανονικοποιημένη με βάση το αρχικό μήκος της ρωγμής και το πάχος του δείγματος. Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη δοκιμής.



**Εικόνα 3.9: Τυπική καμπύλη διατομής (Marasteanu et al., 2012)**

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια θραύσης  $G_f$ , τόσο καλύτερη είναι η αντοχή του ασφαλτομίγματος έναντι ρηγματώσεως. Ο υπολογισμός της ενέργειας θραύσης  $G_f$  είναι σχετικά εύκολος, αλλά απαιτείται ένα πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων ή ένα πρόγραμμα Excel με μακροεντολές, δεδομένου ότι απαιτείται ολοκλήρωση της καμπύλης. Σημειώνεται ότι το ελάχιστο αποδεκτό όριο για την ενέργεια θραύσης κυμαίνεται μεταξύ 400-600 J/m<sup>2</sup>. Βέβαια, το όριο αυτό μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου.

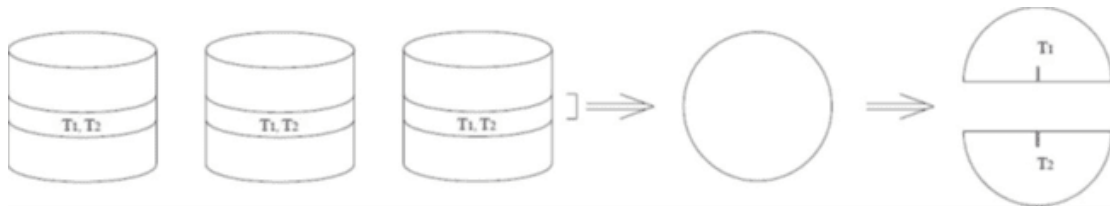
### **3.3.2 Semicircular Bend Test (ASTM D8044-16)**

Η δοκιμή Semicircular Bend Test-SCB αφορά και αυτή την αξιολόγηση της αντίστασης του ασφαλτομίγματος έναντι ρηγματώσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες και αναπτύχθηκε από τον Marasteanu και τους συνεργάτες του (Li & Marasteanu, 2004), (Marasteanu, et al., 2012).

Σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής ASTM D8044-16 το δείγμα SCB μπορεί να κατασκευαστεί από εργαστηριακά συμπιεσμένα δείγματα ή πυρήνες πεδίου. Το δείγμα που χρησιμοποιείται είναι ημικυκλικού σχήματος με μία διαμετρική τομή, η οποία χρησιμεύει ως σημείο εκκίνησης για τη ρωγή και τοποθετείται σε ειδική βάση της συσκευής δοκιμής. Οι στηρίξεις της βάσης συγκρατούν το δείγμα με τρόπο που επιτρέπει την εφαρμογή του φορτίου στο κέντρο του άκρου του και ένα σταδιακά αυξανόμενο φορτίο εφαρμόζεται στο κέντρο της επίπεδης επιφάνειας του δείγματος. Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μαζί με το φορτίο μετράται και η μετατόπιση που προκαλείται κατά μήκος της γραμμής, όπου

εφαρμόζεται το φορτίο στο δείγμα (Load Line Displacement- LLD) με τη χρήση ενός μετρητή μετατόπισης ή ενός μηχανισμού αισθητήρων LVDT (Linear Variable Differential Transformer) που τοποθετείται στην περιοχή όπου εφαρμόζεται το φορτίο.

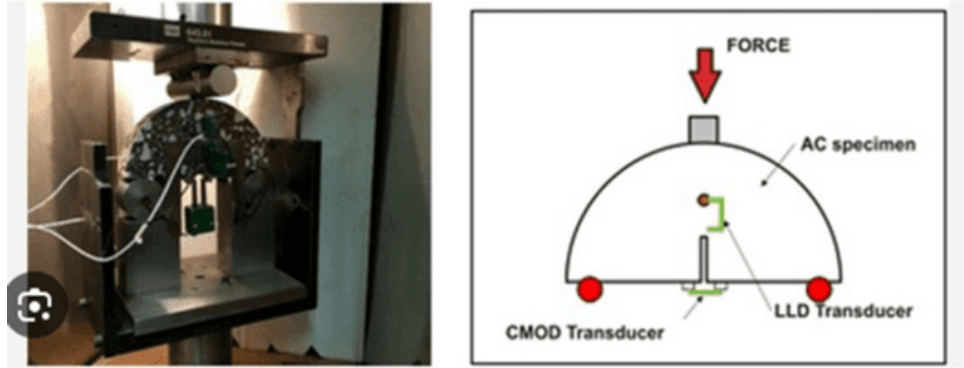
Κατασκευάζονται τουλάχιστον τρία δείγματα με διάμετρο 150 mm και πάχος 120 mm χρησιμοποιώντας έναν περιστροφικό συμπιεστή Superpave (SGC). Τα κενά αέρος πρέπει να είναι  $7\pm 0,5\%$ , σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής. Για να προετοιμαστούν τα ημικυκλικού σχήματος δοκίμια διαχωρίζεται ένα δείγμα 150 mm επί 120 mm σε δύο πανομοιότυπους κυκλικούς δίσκους πάχους 57 mm από τη μέση του δείγματος SGC. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.10, διαχωρίζεται ο εκάστοτε δίσκος σε δύο ημι-δίσκους κατά μήκος του κεντρικού άξονά του. Για τους πυρήνες πεδίου σημειώνεται πως η διάμετρος πρέπει να είναι 150 mm και το πάχος μεταξύ 38 και 60 mm. Έπειτα, γίνεται μία εγκοπή κατά μήκος του άξονα συμμετρίας κάθε ημικυκλικού δείγματος. Το πλάτος της εγκοπής πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5 mm. Αφού προσδιοριστεί η θερμοκρασία δοκιμής, που είναι περίπου  $25^{\circ}\text{C}$ , τοποθετείται ένα εικονικό δείγμα με έναν ανιχνευτή θερμοκρασίας στον θάλαμο ταυτόχρονα με το δείγμα δοκιμής, για να προσδιοριστεί τότε το δείγμα φτάνει στη θερμοκρασία στόχο. Ύστερα, ακολουθεί η τοποθέτηση του δείγματος στη συσκευή ελέγχου, διασφαλίζοντας ότι είναι κεντραρισμένο, επίπεδο και ότι κάνει ομοιόμορφη επαφή με τους κυλίνδρους στήριξης.



**Εικόνα 3.10: Σχήμα δοκιμίων μεθόδου SCB (ASTM International, 2016)**

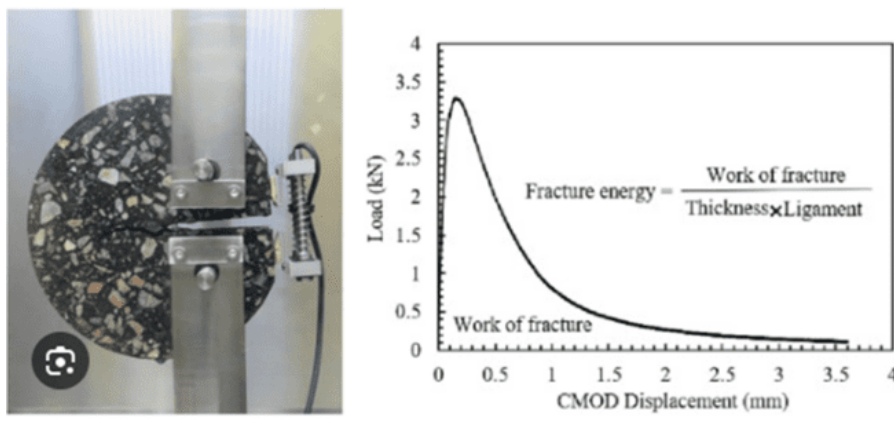
Για να ξεκινήσει η δοκιμή εισάγονται οι πληροφορίες στον ελεγκτή δοκιμής. Ρυθμίζεται η θερμοκρασία δοκιμής και μόλις επιτευχθεί, εφαρμόζεται μία προφόρτιση 45 N στο δείγμα για μέγιστη διάρκεια 30 sec, για να διασφαλιστεί ότι το δείγμα έχει τοποθετηθεί σωστά. Αφού επαληθευτεί η θέση του, αποδεσμεύεται το φορτίο. Αμέσως μετά ξεκινά η δοκιμή και εφαρμόζεται φορτίο στο δείγμα με ρυθμό LLD  $0,5\text{mm}/\text{min}$ . Επίσης, η δοκιμή γίνεται με ρυθμό CMOD  $0,03\text{mm}/\text{min}$ , ο οποίος είναι 33 φορές πιο αργός από τον ρυθμό φόρτισης DCT. Η δοκιμή τερματίζει όταν προκληθεί αστοχία ή όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο μειωθεί στο 25% του φορτίου αιχμής. Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή αφαιρείται το δείγμα και καταγράφεται η σχέση φορτίου και κατακόρυφης παραμόρφωσης.

Παρόμοια με τη δοκιμή DCT, η δοκιμή SCB χαρακτηρίζει την ενέργεια θραύσης ενός δείγματος ασφαλτομίγματος. Η εγκατάσταση του μετρητή CMOD είναι η ίδια (ή παρόμοια) με τη δοκιμή DCT. Στην Εικόνα 3.11 απεικονίζεται η διάταξη της δοκιμής SCB.



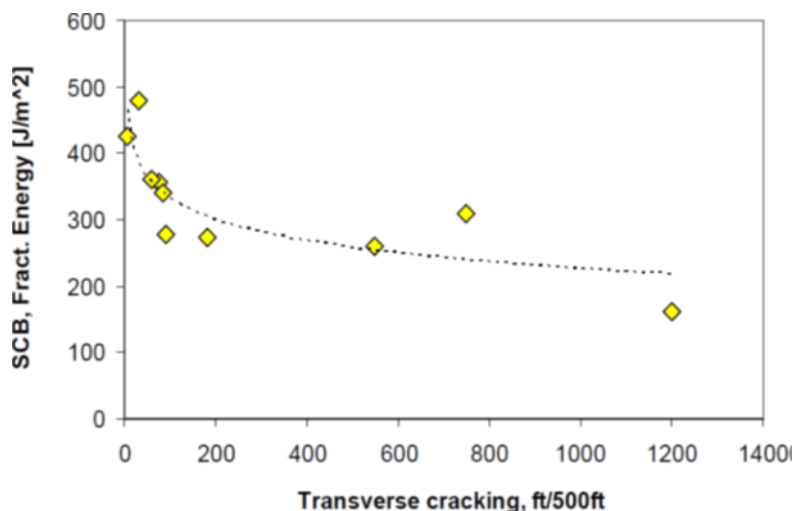
**Εικόνα 3.11: Διάταξη εξοπλισμού-δοκιμίου μεθόδου SCB (Le, et al., 2022)**

Η ενέργεια θραύσης SCB ( $G_f$ ) υπολογίζεται πάλι με τον προσδιορισμό του εμβαδού κάτω από την καμπύλη μετατόπισης γραμμής φορτίου (LLD) κανονικοποιημένη με βάση το πάχος του δείγματος και το αρχικό μήκος της ρωγμής (Εικόνα 3.12). Από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης εξάγονται σημαντικές παράμετροι, όπως το μέγιστο φορτίο και η αντίστοιχη μετατόπιση, οι οποίες βοηθούν στον υπολογισμό της αντοχής στη θραύση και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων του ασφαλτομίγματος.



**Εικόνα 3.12: Καμπύλη LOAD-CMOD μεθόδου SCB (Li & Marasteanu, 2004)**

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε σε διάφορα οδικά τμήματα των ΗΠΑ, όπως αυτά στο Ιλινόις, στη Μινεσότα και στο Ουισκόνσιν, ότι η ενέργεια θραύσης SCB συσχετίζεται με το συνολικό μήκος της εγκάρσιας ρηγματώσης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.13.



**Εικόνα 3.13: Ελάχιστη ενέργεια θραύσης SCB 350 J/m<sup>2</sup> για την αποφυγή θερμικής ρηγμάτωσης (Marasteanu et al. 2012)**

Με βάση τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην εικόνα αυτή, προτάθηκε μια οριακή ελάχιστη τιμή της ενέργειας θραύσης, 350 J/m<sup>2</sup>. Η τιμή αυτή μπορεί να προσαρμοστεί σε όριο 400 J/m<sup>2</sup>, ώστε να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της γήρανσης.

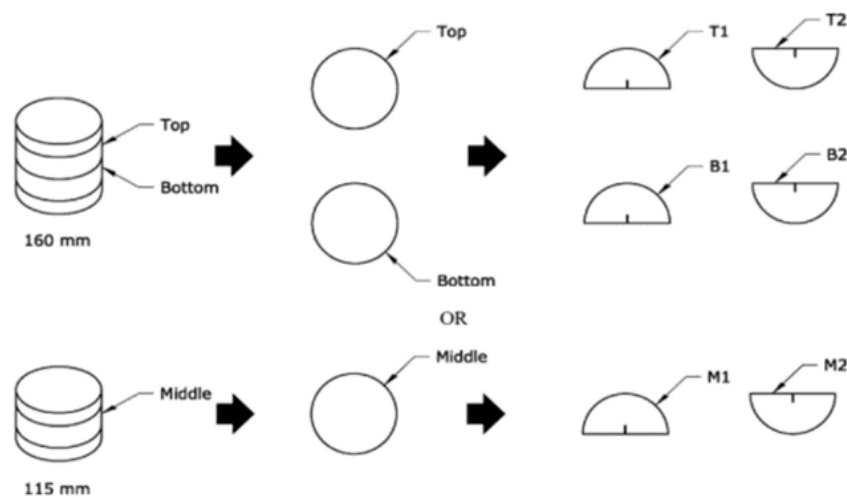
### 3.3.3 Illinois Flexibility Index Test (AASHTO TP 124-20)

Η δοκιμή Illinois Flexibility Index Test- I-FIT αποτελεί μία παραλλαγή της δοκιμής SCB για την αξιολόγηση της αντίστασης έναντι θερμικής ρηγμάτωσης και έχει προταθεί από το Πανεπιστήμιο του Ιλινόις (Al-Qadi, et al., 2015). Χρησιμοποιεί ένα δείγμα δοκιμής SCB, δηλαδή έναν μισό δίσκο με μία εγκοπή παράλληλη προς τη φόρτιση και τον κατακόρυφο άξονα. Το φορτίο εφαρμόζεται κατά μήκος της κατακόρυφης ακτίνας του δείγματος SCB και μετριέται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής μαζί με τη κατακόρυφη μετατόπιση της κεφαλής φόρτισης. Το φορτίο εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρείται σταθερή η κατακόρυφη ταχύτητα της εγκάρσιας κεφαλής σε 50 mm/min. Τα δεδομένα δοκιμής δίνουν μία ένδειξη της αντοχής ενός ασφαλικού μίγματος στη ρηγμάτωση στους 25°C. Σημειώνεται ότι αυτή η μέθοδος δοκιμής ισχύει για ασφαλικά μίγματα με ονομαστικό μέγεθος αδρανών ή ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανών NMA (Nominal Maximum Aggregate Size) 14 mm ή λιγότερο.

Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται δύο δείγματα που είτε προέρχονται από έναν πυρήνα πεδίου είτε μπορούν να παρασκευαστούν από έναν εργαστηριακά συμπιεσμένο περιστροφικό συμπιεστή Superpave (SGC). Για τα εργαστηριακά συμπυκνωμένα δείγματα, τα κενά αέρος μέσα στο μίγμα προσδιορίζονται για κάθε έναν από τους δύο κυκλικούς δίσκους και πρέπει να είναι 7±0,5%. Προτείνεται το ελάχιστο ύψος των δοκιμίων που συμπυκνώνονται με τον περιστροφικό συμπιεστή Superpave να είναι τουλάχιστον 160±1 mm, για να επιτευχθεί ο στόχος 7±0,5% των κενών σε κάθε έναν από τους άνω και κάτω δίσκους.

Για τα δοκίμια ύψους 160 mm, λαμβάνονται από το μέσο κάθε δοκιμίου, δύο κυλινδρικοί δίσκοι πάχους  $50 \pm 1$  mm. Αυτοί οι δίσκοι στη συνέχεια χωρίζονται στη μέση, δημιουργώντας τέσσερα ημικυκλικά δείγματα (T1, T2, B1, B2), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14. Εάν ο στόχος των κενών αέρα δεν μπορεί να επιτευχθεί για κάθε δίσκο με ύψος  $160 \pm 1$  mm, τότε το ύψος του δοκιμίου μπορεί να αυξηθεί.

Εάν το ύψος του δοκιμίου δεν μπορεί να αυξηθεί ή εάν ο περιστροφικός συμπίεστης SGC δυσκολεύεται να συμπυκνώσει δοκίμια ύψους 160 mm, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο δοκίμια SGC, καθένα με ύψος τουλάχιστον 115 mm. Ο δίσκος αυτός στη συνέχεια χωρίζεται στη μέση, δημιουργώντας δύο ημικυκλικά δείγματα (M1, M2). Για τους πυρήνες πεδίου χρησιμοποιούνται δοκίμια διαμέτρου 150mm και πάχους 50mm.



**Εικόνα 3.14: Σχήμα δοκιμών μεθόδου I-FIT (AASHTO TP 124, 2020)**

Στη συνέχεια, δημιουργείται μία κάθετη εγκοπή 15 mm κατά μήκος του συμμετρικού άξονα κάθε ημικυκλικού δείγματος. Το μέγιστο πλάτος της εγκοπής είναι 2,25 mm. Μετά από αυτή τη διαδικασία, το δείγμα τοποθετείται σε λουτρό ύδατος ή σε εξωτερικό θάλαμο στους  $25^{\circ}\text{C}$  για δύο ώρες. Τονίζεται πως αν χρησιμοποιηθεί λουτρό ύδατος είναι καλό το δείγμα να τοποθετηθεί σε μία σφραγισμένη σακούλα, ώστε να αποτραπεί η είσοδος υγρασίας.

Αφού γίνουν όλα αυτά τοποθετείται το δείγμα στη συσκευή. Αρχικά, επιβάλλεται ένα φορτίο 0,1 KN και παρακολουθείται η δοκιμή, για να διασφαλιστεί ότι το δείγμα έχει τοποθετηθεί σωστά. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το φορτίο και η δοκιμή σταματάει όταν πέσει κάτω από 0,1 KN. Επισημαίνεται πως η δοκιμή πρέπει να ολοκληρωθεί εντός 5 min από την αφαίρεση του δείγματος από το λουτρό ύδατος, ώστε να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία.

Με αυτή τη δοκιμή ελέγχεται μία παράμετρος που ονομάζεται Δείκτης Ευκαμψίας (FI). Η εξίσωση για τον δείκτη FI περιγράφεται στην σχέση 3.1:

$$FI = A * \left( \frac{Gf}{abs(m)} \right) \quad (\text{Σχέση 3.1})$$

όπου:

FI = Δείκτης ευκαμψίας

A = Συντελεστής βαθμονόμησης (0,01 για μη παλαιωμένα μίγματα)

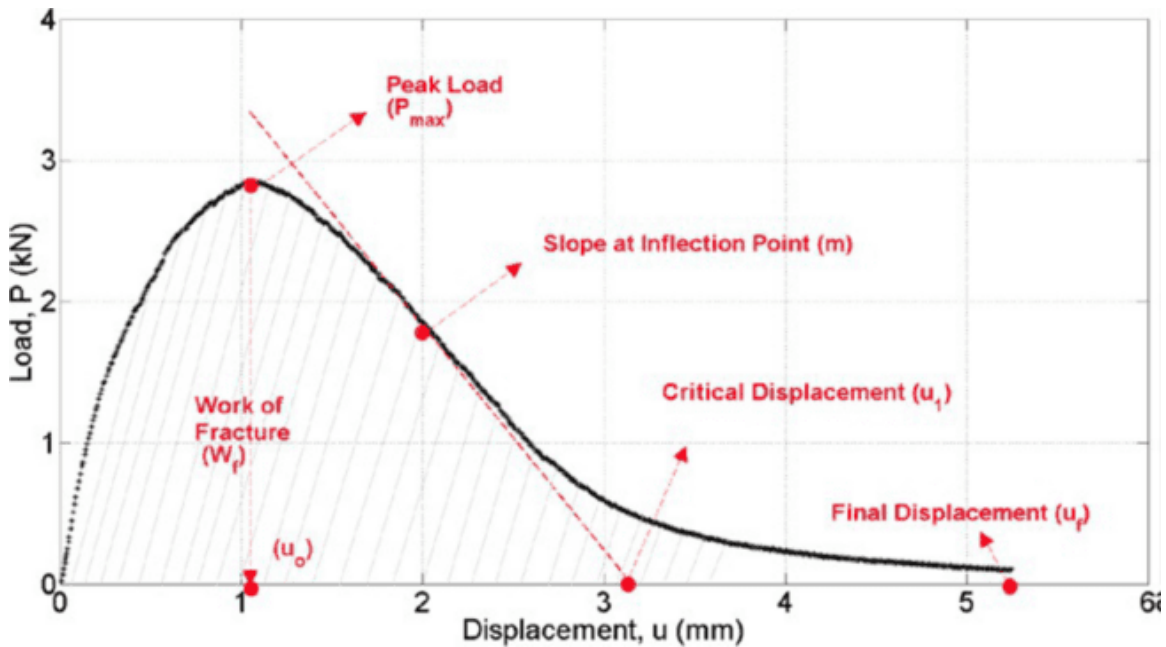
Gf = Έργο της ενέργειας θραύσης (Wf) στο μέγιστο φορτίο

abs(m) = Απόλυτη τιμή της κλίσης μετά την κορυφή του σημείου αιχμής

Παραγόμενο αποτέλεσμα της δοκιμής αυτής είναι μία καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο που καταδεικνύει ορισμένες παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι η ενέργεια θραύσης, το φορτίο αιχμής, η κλίση μετά την αιχμή, ο δείκτης ευκαμψίας και η κρίσιμη μετατόπιση και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.15.

Σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO TP 124-20 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020) , η ενέργεια θραύσης είναι η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την αστοχία του δοκιμίου και αντιπροσωπεύεται από το συνολικό εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Είναι συνάρτηση τόσο του φορτίου αιχμής όσο και της κλίσης μετά την αιχμή. Το φορτίο αιχμής είναι το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής και η κλίση μετά την αιχμή είναι η κλίση στο πρώτο σημείο καμπής της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μετά το φορτίο αιχμής.

Η ενέργεια θραύσης από μόνη της μπορεί να είναι ανεπαρκής για τη διάκριση μεταξύ εύθραυστων και όλκιμων ασφαλτομιγμάτων, καθώς εξετάζει μόνο το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Ως εκ τούτου, λαμβάνεται υπόψη ο δείκτης ευκαμψίας, ο οποίος ενσωματώνει την κλίση μετά την αιχμή. Ο Δείκτης Ευκαμψίας (FI) είναι η ενέργεια θραύσης διαιρεμένη με την κλίση της καμπύλης του διαγράμματος μετά το σημείο αιχμής, όπως αυτή περιγράφεται στην Εικόνα 3.15. Ένας υψηλότερος δείκτης FI υποδηλώνει μεγαλύτερη αντίσταση έναντι ρηγματώσης. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η κρίσιμη μετατόπιση (δηλαδή όσο μικρότερη είναι η κλίση), τόσο πιο όλκιμο είναι το υλικό και αντίστροφα. Τονίζεται πως μία υψηλή τιμή FI μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός συνδυασμού υψηλής ενέργειας θραύσης και χαμηλής κλίσης.



**Εικόνα 3.15: Καμπύλη δοκιμής δείκτη ευκαμψίας FI & παράμετροι δοκιμής I-FIT (Newcomb & Zhou, 2018)**

Στις παραμέτρους ασφαλτομιγμάτων που οδηγούν σε υψηλότερη τιμή FI περιλαμβάνονται η χρήση ασφαλτομιγμάτων τροποποιημένων με πολυμερή και χαμηλότερων RBR- Reclaimed Binder Ratio- παράμετρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το ποσοστό επαναχρησιμοποιημένου ασφαλτικού υλικού σε ένα ασφαλτικό μίγμα. Σε μελέτη πεδίου το 2017, οι (Lippert, et al., 2017) διαπίστωσαν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ χαμηλότερης εγκάρσιας ρηγμάτωσης και υψηλότερων τιμών FI.

### 3.3.4 Overlay Test (Tex-248-F)

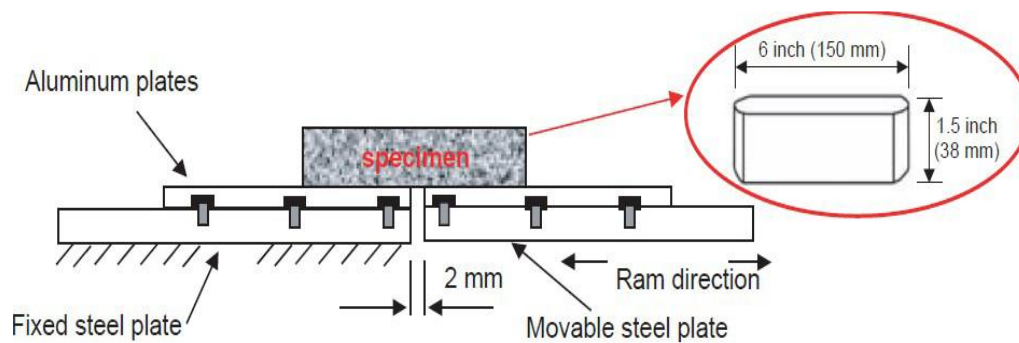
Οι (Zhou & Scullion, 2005) τροποποίησαν τη δοκιμή Overlay Test-OT, η οποία είχε χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων γεωσυνθετικών υλικών από τότε που σχεδιάστηκε αρχικά από τους Lytton et al. στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και πρότειναν τη χρήση της για την αξιολόγηση της αντοχής έναντι ρηγμάτωσης των θερμών ασφαλτομιγμάτων (Hot Mix Asphalt- HMA) (Zhou & Scullion, 2005), (Zhou, Hu, & Scullion, 2006). Έκτοτε, διάφοροι ερευνητές, συμπεριλαμβανομένων των (Bennert, 2009), (Bennert, Worden, & Turo, 2009), (Hajj, Sebaaly, Porras, & Azofeifa, 2010), (Bennert, Fee, Sheehy, Blight, & Sauber, 2011) και (Walubita, et al., 2012), έχουν χρησιμοποιήσει την δοκιμή OT και την έχουν αξιολογήσει ως μια αξιόπιστη και πρακτική δοκιμή για τον έλεγχο και την αξιολόγηση της αντοχής έναντι ρηγματώσεων των θερμών ασφαλτομιγμάτων (HMA) στο εργαστήριο.

Οι (Loria-Salazar, 2018) έκαναν μια ολοκληρωμένη μελέτη βιβλιογραφικής ανασκόπησης, που παραθέτει διάφορες πιθανές εργαστηριακές δοκιμές που έχουν εφαρμοστεί στην



πράξη για την αξιολόγηση της αντίστασης των θερμών ασφαλτομιγμάτων (HMA) έναντι της ανακλαστικής ρηγμάτωσης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η δοκιμή OT είναι η μόνη μέθοδος εργαστηριακής δοκιμής, η οποία παρουσίασε συνέπεια μεταξύ των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής και της αντίστοιχης απόδοσης στο πεδίο. Η δοκιμή OT σχεδιάστηκε από τους (Germann & Lytton, 2009), για να προσομοιώνει το άνοιγμα και το κλείσιμο των αρμών ή των ρωγμών, οι οποίες αποτελούν την κύρια αιτία που προκαλεί την έναρξη και τη διάδοση ανακλαστικών ρωγμών.

Τα βασικά μέρη της δοκιμής ήταν δύο χαλύβδινες πλάκες, η μία σταθερή και η άλλη κινητή οριζόντια για την προσομοίωση του ανοίγματος και κλεισίματος αρμών ή ρωγμών σε παλαιά οδοστρώματα. Η διάταξη που περιγράφεται απεικονίζεται στην Εικόνα 3.16.



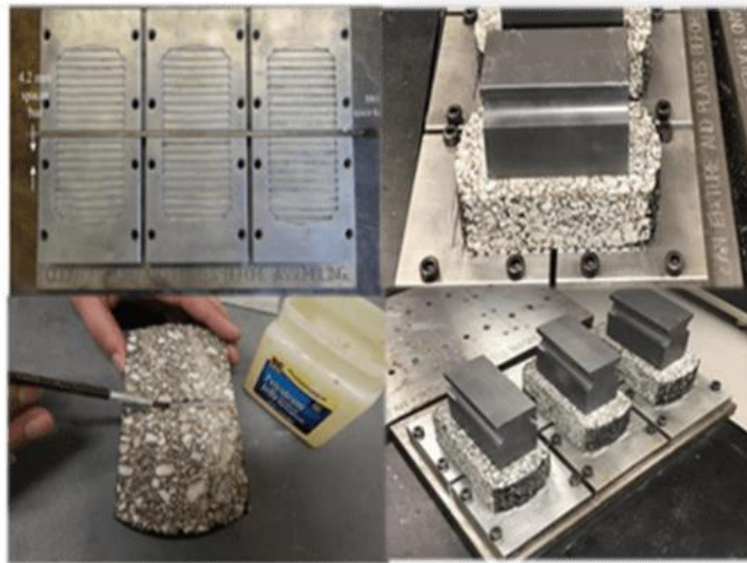
Εικόνα 3.16: Διάταξη δοκιμίου OT (Newcomb & Zhou, 2018)

Έτσι, αναπτύχθηκε μία δοκιμή OT με στόχο να μπορεί να δοκιμάζει δείγματα διαμέτρου 150 mm, τα οποία θα μπορούσαν εύκολα να κατασκευαστούν στο εργαστήριο ή να ληφθούν από τυποποιημένους πυρήνες πεδίου (Zhou & Scullion, 2005). Η αναβαθμισμένη, λοιπόν, δοκιμή OT αποτελείται από ένα πλήρως ελεγχόμενο από υπολογιστή σύστημα με ειδικά προγράμματα. Τα δεδομένα της δοκιμής, συμπεριλαμβανομένων του χρόνου, της μετατόπισης και της δύναμης, καταγράφονται αυτόματα και αποθηκεύονται ως αρχείο Excel.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση της δοκιμής OT σύμφωνα με το τμήμα μεταφορών του Τέξας-TxDOT Designation: Tex-241-F (Texas Transportation Institute, 2019) περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.17. Αναλυτικότερα, προετοιμάζονται τρία δείγματα, η διάμετρος των οποίων πρέπει να είναι 150 mm και το ύψος τους  $115 \pm 5$  mm, και πρέπει να δοκιμαστούν εντός 5 ημερών από την κατασκευή τους. Η πυκνότητα των δειγμάτων πρέπει να είναι  $93 \pm 1\%$ . Για τα δείγματα από πυρήνες οδοστρώματος, η διάμετρος πρέπει να είναι  $150 \pm 2$  mm και το ύψος τουλάχιστον 38 mm, χωρίς συγκεκριμένη απαίτηση πυκνότητας.

Στη συνέχεια, τα δείγματα με διάμετρο 150 mm και ύψος  $115 \pm 5$  mm επεξεργάζονται κατάλληλα, ώστε να παραχθούν δείγματα με πλάτος  $76 \pm 0,5$  mm και ύψος  $38 \pm 0,5$  mm και υπολογίζεται η πυκνότητά τους. Η πυκνότητα πρέπει να είναι  $93 \pm 1\%$ . Μετά, το δείγμα τοποθετείται πάνω σε μεταλλικές βάσεις και πάνω του αφήνεται ένα βάρος 2,25kg, για να εξασφαλιστεί η πλήρης επαφή. Υστερα, τοποθετούνται τα δείγματα στον θάλαμο θερμοκρασίας στους  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$  για τουλάχιστον μία ώρα πριν από τη δοκιμή.

Καλό είναι όλα τα δείγματα να δοκιμαστούν την ίδια μέρα, για να ελαχιστοποιηθεί η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων. Η δοκιμή εκτελείται σε σταθερή θερμοκρασία  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$  και συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μείωση 93% του μέγιστου φορτίου ή μέχρι 1.000 κύκλους. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, το δείγμα αφαιρείται και καταγράφεται ο αριθμός των ρωγμών στην κορυφή των δειγμάτων.



**Εικόνα 3.17: Διαδικασία δοκιμής OT (Texas Transportation Institute, 2019)**

Από τη δοκιμή αυτή υπολογίζεται η κρίσιμη ενέργεια θραύσης με τη σχέση 3.2.

$$G_c = W_c/b * h \quad (\text{Σχέση 3.2})$$

Όπου:

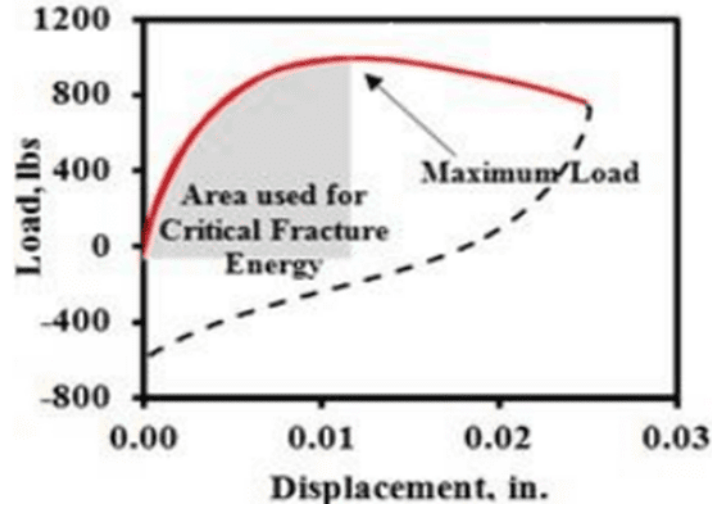
$G_c$  = κρίσιμη ενέργεια θραύσης, lb.-in./in.<sup>2</sup>(kN-mm<sup>2</sup>)

$W_c$  = περιοχή θραύσης, lb.-in. (kN-mm)

$b$  = πλάτος δοκιμίου: 3 in. (76,2 mm)

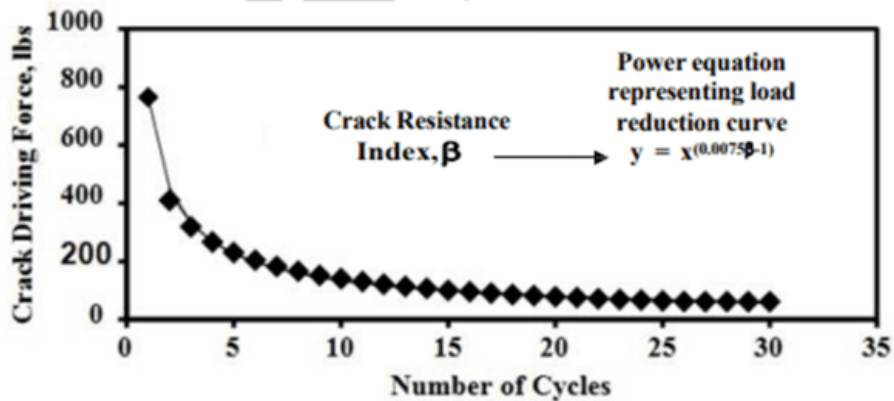
$h = \text{ύψος δοκιμίου: } 1,5 \text{ in. (38,1 mm)}$

Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης και η περιοχή υπολογισμού της ενέργειας θραύσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.18.



**Εικόνα 3.18: Περιοχή υπολογισμού της κρίσιμης ενέργειας θραύσης (Texas Transportation Institute, 2019)**

Ακόμα, μέσω της δοκιμής OT υπολογίζεται ο δείκτης αντίστασης έναντι ρηγμάτωσης (Crack Resistance Index - CRI) από την προσαρμογή μιας εξίσωσης ισχύος στο μέγιστο φορτίο σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων (Εικόνα 3.19). Ουσιαστικά, αυτό που γίνεται είναι η μοντελοποίηση της μείωσης του μέγιστου φορτίου κατά τη διάρκεια των κύκλων της δοκιμής και η εκτίμηση του αριθμού των κύκλων μέχρι το μέγιστο φορτίο να μειωθεί κατά 93% από την αρχική τιμή του. Ο δείκτης CRI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκριθεί η αντοχή διαφορετικών ασφαλτομιγμάτων ενάντια στη ρηγμάτωση. Ένας υψηλός δείκτης CRI υποδηλώνει καλύτερη αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης, ενώ ένας χαμηλός CRI υποδηλώνει κακή αντίσταση.

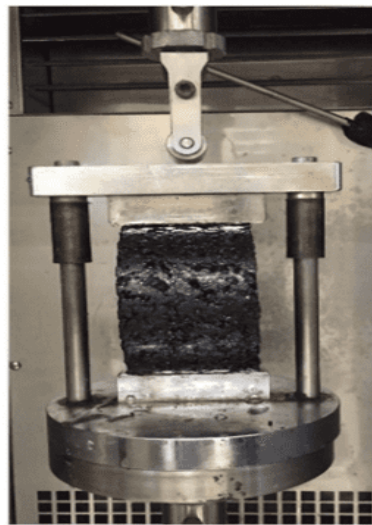


**Εικόνα 3.19: Υπολογισμός δείκτη CRI (Texas Transportation Institute, 2019)**

Επισημαίνεται πως το Τμήμα Μεταφορών του Τέξας χρησιμοποιεί τη δοκιμή αυτή από το 2009 και μια αναθεωρημένη έκδοσή της από το 2014. Συμπερασματικά, η δοκιμή μπορεί εύκολα να καταγράψει τις επιδράσεις της περιεκτικότητας σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό, του τύπου του συνδετικού υλικού, της κοκκομετρίας των αδρανών, των κενών και άλλων ιδιοτήτων σχεδιασμού του μίγματος (Zhou & Scullion, 2005), (Zhou, Hu, & Scullion, 2006), (Walubita, et al., 2012). Τα αποτελέσματα της δοκιμής OT σχετίζονται στενά με τη διάδοση των ρωγμών στο πεδίο (Zhou & Scullion, 2005), (Zhou, Hu, & Scullion, 2006), (Bennert & Maher, 2008), (Walubita, et al., 2012), (Hajj, Sebaaly, Porras, & Azofeifa, 2010). Οι (Bennert, Worden, & Turo, 2009) εφάρμοσαν με επιτυχία αυτό το σύστημα σε ένα έργο για το τμήμα μεταφορών της Μασαχουσέτης για τον εντοπισμό των αιτιών της πρόωρης ανακλαστικής ρηγμάτωσης στον αυτοκινητόδρομο Interstate 495 στις Ηνωμένες Πολιτείες I-495.

### 3.3.5 Indirect Tension Asphalt Cracking Test (ASTM D8225-19)

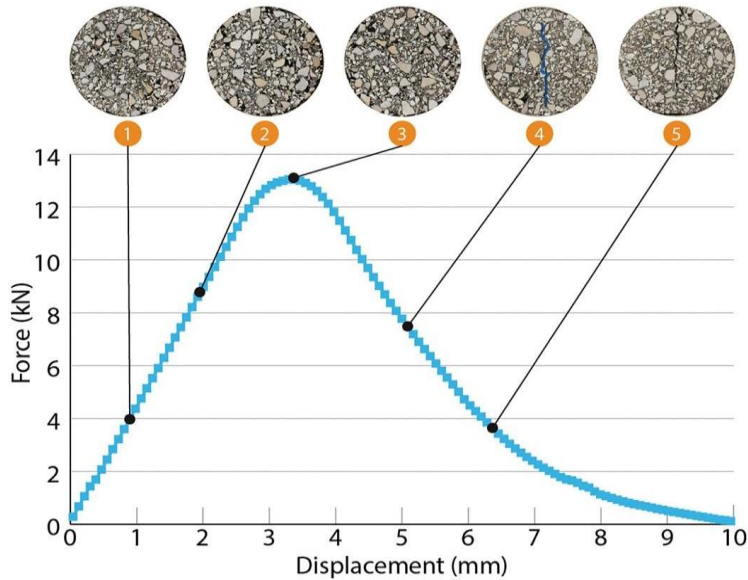
Οι (Zhou, Im, Sun, & Scullion, 2017) ανέπτυξαν την δοκιμή Indirect Tension Asphalt Cracking Test-IDEAL-CT, μία δοκιμή για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης. Η δοκιμή εφαρμόζει ένα κατακόρυφο φορτίο σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο με σταθερό ρυθμό 50mm/min, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20 και σταματάει όταν το φορτίο μειωθεί σε 0,1 kN. Το δοκίμιο έχει διάμετρο 150 mm και ύψος 61,5 mm και η δοκιμή εκτελείται στους 25°C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D8225-19 (ASTM International, 2019).



Εικόνα 3.20: Διάταξη δοκιμής (IDEAL-CT)

Παραγόμενο αποτέλεσμα της δοκιμής αποτελεί η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης FD, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Εικόνα 3.21). Στην δοκιμή

IDEAL-CT, το φορτίο και η μετατόπιση παρακολουθούνται και καταγράφονται μέχρι την πλήρη αστοχία του δείγματος. Η παράμετρος της δοκιμής, είναι ο δείκτης CT και ορίζεται ως ο δείκτης αντίστασης έναντι ρηγματώσης, ο οποίος υπολογίζεται με την σχέση 3.3.



**Εικόνα 3.21: Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης (FD) δοκιμής IDEAL-CT (Zhou & West, 2023)**

Οι (Zhou, Im, Sun, & Scullion, 2017) παρουσίασαν τον δείκτη CT ως συνάρτηση του πάχους του δείγματος, της ενέργειας θραύσης  $G_f$ , της μετατόπισης στο 75% του μέγιστου φορτίου, της κλίσης της καμπύλης FD στο 75% του μέγιστου φορτίου και της διαμέτρου του δείγματος. Υπάρχουν τρεις σημαντικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του δείκτη CT, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.22: η ενέργεια θραύσης ( $G_f$ ) που ορίζεται ως το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης, η κλίση μετά την αιχμή του διαγράμματος στο 75% του φορτίου αιχμής ( $/m75/$ ) και η μετατόπιση του δοκιμίου στο 75% του φορτίου αιχμής ( $l75$ ). Ένας υψηλότερος δείκτης CT είναι επιθυμητός για τα ασφαλτομίγματα που αντιστέκονται στη ρηγματώση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες.

$$CT = \frac{t}{62} \times \frac{l75}{D} \times \frac{G_f}{|m75|} \times 10^6 \quad (\text{Σχέση 3.3})$$

όπου:

CT = δείκτης αντίστασης έναντι ρηγματώσης

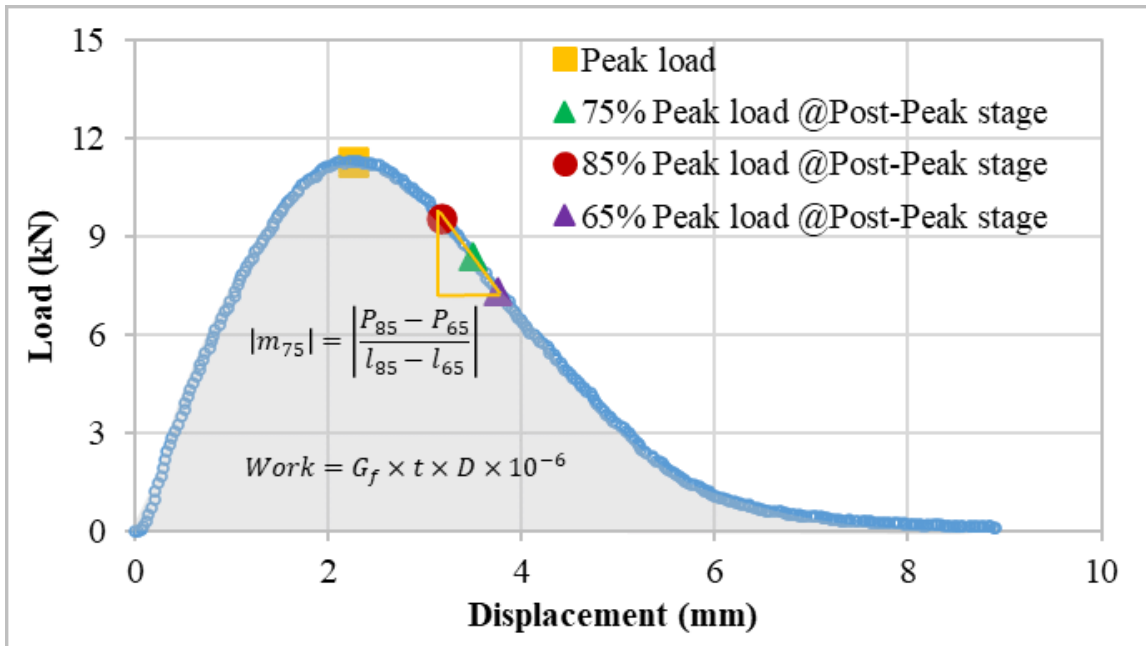
$G_f$  = ενέργεια θραύσης ( $J/m^2$ )

$|m_{75}|$  = απόλυτη τιμή της κλίσης  $m_{75}$  μετά την αιχμή (N/m)

$l_{75}$  = μετατόπιση στο 75% του φορτίου αιχμής (mm)

$D$  = διάμετρος του δείγματος (mm) και

$t$  = πάχος δείγματος (mm)

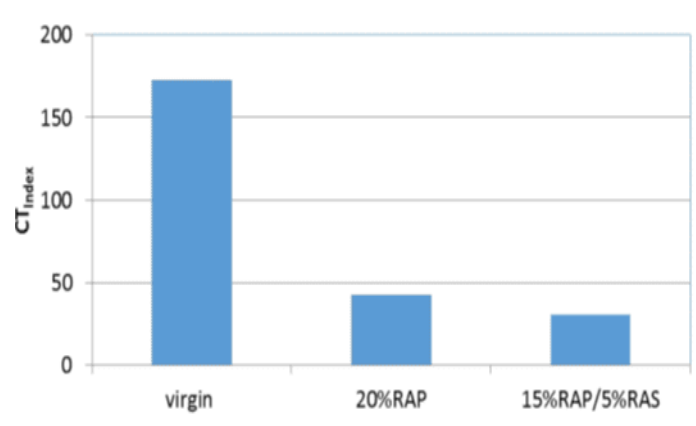


Εικόνα 3.22: Καμπύλη δοκιμής IDEAL-CT (Chen, Zhang, & Bahia, 2021)

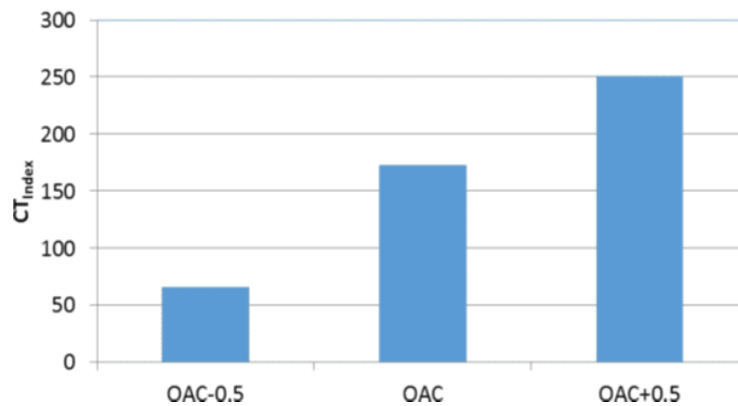
Ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της δοκιμής IDEAL-CT παρουσιάζονται παρακάτω. Η προετοιμασία του δείγματος για τη δοκιμή είναι πολύ απλή, απαιτώντας μόνο την εργαστηριακή συμπύκνωση του μίγματος, έτσι ώστε να επιτευχθούν κενά αέρος  $7 \pm 0,5\%$ . Η δοκιμή επίσης, είναι πολύ γρήγορη, καθώς ο ρυθμός φόρτισης είναι 50 mm/min και δεν απαιτείται ειδική προετοιμασία θερμοκρασίας, καθώς η δοκιμή εκτελείται στους 25°C. Ακόμα, η ανάλυσή της απαιτεί απλώς τον υπολογισμό της περιοχής κάτω από την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης για τον προσδιορισμό της ενέργειας θραύσης και άλλων παραμέτρων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης CT, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης. Το αποδεκτό όριο για το δείκτη CT κυμαίνεται μεταξύ 75-80. Συγκεκριμένα, όταν ο δείκτης CT είναι ίσος ή μεγαλύτερος από 75-80, τότε το ασφαλόμιγμα θεωρείται ότι έχει καλή αντοχή στη ρηγμάτωση.

Οι (Zhou, Im, Sun, & Scullion, 2017) απέδειξαν ότι η δοκιμή σε εργαστηριακά παρασκευασμένα δοκίμια ήταν ευαίσθητη στην περιεκτικότητα σε RAP και RAS, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.23 και στην περιεκτικότητα σε ασφαλικό συνδετικό υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.24. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως το μίγμα με μηδενική

περιεκτικότητα σε RAP αναμένεται να έχει την καλύτερη αντίσταση έναντι ρηγματώσης, ακολουθούμενη από το μίγμα 15% RAP και το μίγμα με 15% RAP και 5% RAS.



**Εικόνα 3.23: Ευαισθησία της δοκιμής IDEAL-CT στην περιεκτικότητα σε RAP και RAS (Zhou, et. al., 2017)**



**Εικόνα 3.24: Ευαισθησία της δοκιμής IDEAL-CT στο ποσοστό ασφάλτου (Zhou, et. al., 2017)**

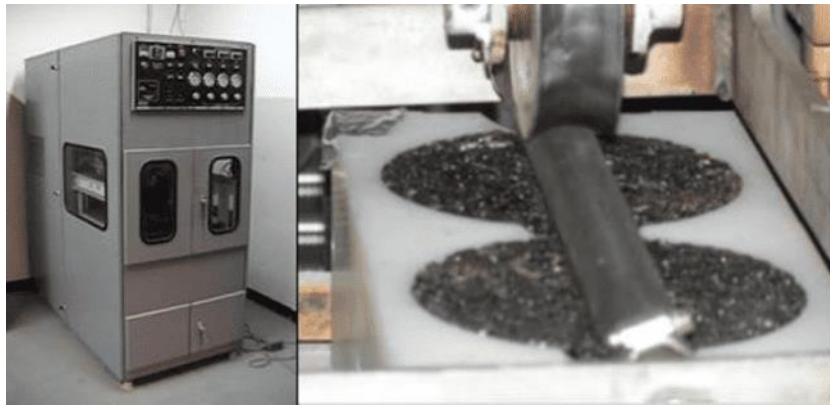
Επίσης, προέκυψε ότι η δοκιμή IDEAL-CT επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό, καθώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.24 όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό ο δείκτης CT αυξάνεται, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη αντίσταση έναντι ρηγματώσεων.

### 3.3.6 Asphalt Pavement Analyzer (AASHTO T 340-10)

Η δοκιμή Asphalt Pavement Analyzer-APA είναι μία δοκιμή που αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 για τη μέτρηση της απόδοσης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοσυλακώσεων. Η τυποποιημένη διαδικασία βρίσκεται στο πρότυπο AASHTO T 340-10 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010). Στη

δοκιμή αυτή ένας τροχός κινείται συνεχώς πάνω σε ένα δείγμα θερμού ασφαλτομίγματος (HMA), μέσω ενός ελαστικού σωλήνα που βρίσκεται υπό πίεση. Συγκεκριμένα, ο τροχός κινείται κατά μήκος του δείγματος για 8.000 κύκλους χρησιμοποιώντας φορτίο 100 lb (445 N) και πίεση σωλήνα 100 psi (690 kPa).

Αναλυτικότερα, τρία σετ δειγμάτων θερμού ασφαλτομίγματος (HMA) τοποθετούνται στον θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας APA. Απαιτούνται έξι κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 75 mm σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στην αρχή και ξανά μετά από 8.000 κύκλους. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων είναι η αυλάκωση που προκαλείται από τη δοκιμή APA. Ένας μέσος όρος όλων των δειγμάτων αναφέρεται ως το μέσο βάθος αυλάκωσης APA. Αν το μέσο βάθος αυλάκωσης είναι μικρότερο από 8 mm, τότε θεωρείται επιτυχής η δοκιμή έναντι τροχοαυλάκωσης, ενώ αν είναι μεγαλύτερο από 8 mm, τότε τα μίγματα έχουν αποτύχει στο κριτήριο απόδοσης. Ο εξοπλισμός της δοκιμής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.25 και περιλαμβάνει θάλαμο για δοκιμές σε υψηλές θερμοκρασίες.



**Εικόνα 3.25: Εξοπλισμός & δείγμα δοκιμής APA (Newcomb & Zhou, 2018)**

Οι (Kandhal & Cooley, 2003) αξιολόγησαν τη συσχέτιση της δοκιμής APA με την απόδοση των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων στο πεδίο. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα εργαστηριακά βάθη αυλακώσεων που μετρήθηκαν με την δοκιμή APA είχαν καλή συσχέτιση με τα βάθη αυλακώσεων πεδίου σε μεμονωμένα έργα, όπως αυτά που διεξήχθησαν στις εγκαταστάσεις FHWA-ALF (Accelerated Load Facility) στη Βιρτζίνια και στην οδική αρτηρία I-80 στη Νεβάδα. Ωστόσο, στην περίπτωση 10 δοκιμαστικών τμημάτων στην πίστα δοκιμών του Εθνικού Κέντρου Τεχνολογίας Ασφάλτου των ΗΠΑ, τα βάθη αυλακώσεων που μετρήθηκαν με τη δοκιμή APA είχαν κακή συσχέτιση με τα βάθη αυλακώσεων πεδίου, καθώς δεν εμφάνισαν σημαντικές τροχοαυλακώσεις μετά από δύο χρόνια φόρτισης.

Συμπερασματικά, με βάση τα περιορισμένα δεδομένα, η δοκιμή APA συγκρίνεται καλά με άλλες δοκιμές επιδόσεων για την πρόβλεψη της πιθανότητας εμφάνισης



τροχοαυλακώσεων στο πεδίο. Ωστόσο, γενικά, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί το βάθος αυλακώσεων στο πεδίο από το βάθος αυλακώσεων στη δοκιμή APA για ένα συγκεκριμένο έργο, χρησιμοποιώντας σχέσεις που αναπτύχθηκαν σε άλλα έργα με διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες και κυκλοφορία (Kandhal & Cooley, 2003).

### 3.3.7 Hamburg Wheel Track Test (AASHTO T324-19)

Η δοκιμή Hamburg Wheel Track Test-HWTT αναπτύχθηκε αρχικά στη Γερμανία και είναι μία δοκιμή για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων. Η δοκιμή HWTT διεξάγεται σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T324-19 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο δοκίμια μορφής πλάκας όσο και κυλινδρικά δοκίμια. Ωστόσο, συχνά προτιμώνται τα κυλινδρικά δοκίμια, λόγω της εύκολης προετοιμασίας. Τυπικά, δύο συμπιεσμένα δοκίμια με διάμετρο 150 mm και πάχος 61 mm τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο, βυθίζονται σε νερό σε θερμοκρασία μεταξύ 40° C και 60° C και υποβάλλονται σε 52 περάσματα ενός χαλύβδινου τροχού 705 N ανά λεπτό (Εικόνα 3.26). Η δοκιμή σταματάει στα 20.000 περάσματα ή όταν επιτευχθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος αυλακώσεων που είναι 12.5mm. Σημειώνεται ότι, επειδή η δοκιμή διεξάγεται σε νερό, επιτρέπει επίσης και την αξιολόγηση της ευαισθησίας των μιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας.



Εικόνα 3.26: Δοκιμή HWTT (Newcomb & Zhou, 2018)

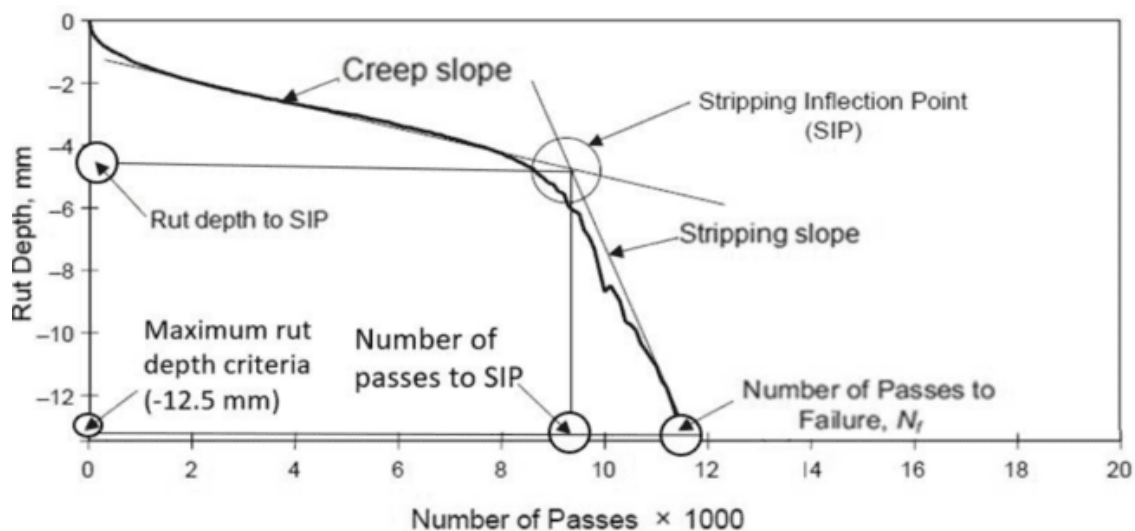
Η καταπόνηση του ασφαλτομίγματος στη δοκιμή αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις (Solaimanian, Harvey, Tahmoressi, & Tandon, 2003):

- μετά τη συμπύκνωση
- ερπυσμός και
- απώλεια συνάφειας

Η καταπόνηση στη φάση μετά τη συμπύκνωση αφορά στη συμπίεση του δοκιμίου, όπου μετά την επαναλαμβανόμενη φόρτιση τα κενά μειώνονται σημαντικά, ενώ η

παραμόρφωση στη φάση του ερπυσμού είναι κυρίως αποτέλεσμα της ιξώδους συμπεριφοράς του μίγματος. Η φάση της απώλειας συνάφειας αρχίζει όταν ο δεσμός μεταξύ του ασφαλτικού συνδετικού υλικού και των αδρανών αρχίζει να εξασθενεί. Από την δοκιμή, λοιπόν, προκύπτει η καμπύλη HWTT, η οποία περιλαμβάνει έξι παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι είναι η κλίση ερπυσμού, η κλίση αποκόλλησης, ο αριθμός των περασμάτων μέχρι την αστοχία, ο αριθμός των περασμάτων μέχρι το σημείο καμπής αποκόλλησης (SIP), το βάθος αυλάκωσης μέχρι την αστοχία και το βάθος αυλάκωσης μέχρι το σημείο SIP. Μία τυπική καμπύλη HWTT, καθώς και οι παράμετροι της δοκιμής παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.27.

Σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής η κλίση ερπυσμού είναι ο αριθμός των περασμάτων ανά 1 mm παραμόρφωσης πριν από την αποκόλληση υλικού και η κλίση αποκόλλησης είναι ο αριθμός των περασμάτων ανά 1 mm παραμόρφωσης κατά την απώλεια συνάφειας. Η τομή μεταξύ των κλίσεων ερπυσμού και απώλειας συνάφειας είναι το σημείο καμπής αποκόλλησης υλικού (SIP), το οποίο αντιπροσωπεύει την ευαισθησία ενός δοκιμίου στην υγρασία. Αριθμός περασμάτων μέχρι την αστοχία ορίζεται ο συνολικός αριθμός των περασμάτων που απαιτούνται για την επίτευξη των κριτηρίων μέγιστου βάθους αυλακώσεων στη μέση του περάσματος του τροχού και αριθμός περασμάτων μέχρι το σημείο SIP ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός των περασμάτων πριν από την έναρξη της αποκόλλησης. Τέλος, το μέγιστο βάθος αυλακώσεων είναι η παραμόρφωση στο μέσο του περάσματος του τροχού στο τέλος της δοκιμής, και το βάθος αυλακώσεων μέχρι το σημείο SIP είναι η παραμόρφωση στο μέσο του περάσματος του τροχού πριν από την έναρξη της αποκόλλησης. Το μέσο του περάσματος του τροχού είναι το σημείο όπου επιτυγχάνεται η πλήρης επαφή και η μέγιστη τάση του τροχού, επομένως είναι η επιθυμητή θέση για την αξιολόγηση των μετρήσεων του βάθους αυλακώσεων. Μίγματα με υψηλότερες τιμές SIP και χαμηλότερο βάθος αυλακώσεων θεωρούνται ότι έχουν καλύτερη απόδοση.



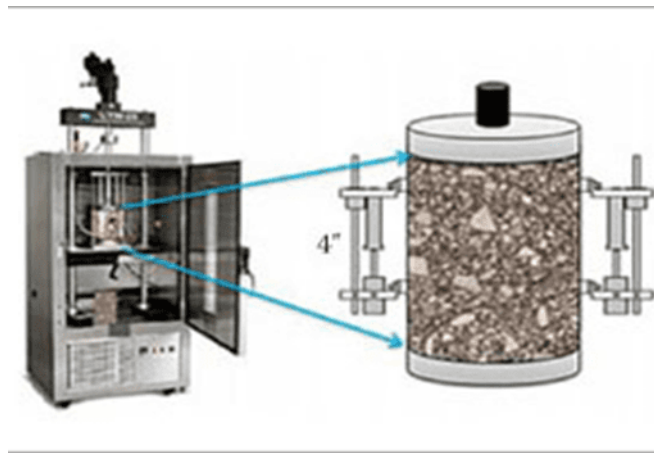
Εικόνα 3.27: Καμπύλη δοκιμής HWTT με παραμέτρους δοκιμής (Tran, et al., 2020)

Η δοκιμή HWTT έχει βρεθεί ότι έχει εξαιρετική συσχέτιση με την απόδοση στο πεδίο, ιδίως στην αξιολόγηση αστοχιών εξαιτίας της επίδρασης της υγρασίας (Aschenbrener, 1995), (Izzo & Tahmoressi, 1999), (Williams & Prowell, 1999). Ωστόσο, μπορεί να αποτύχει να διαφοροποιήσει ορισμένα μίγματα καλής και κακής απόδοσης (Zhou, Chen, Scullion, & Bilyeu, 2003). Η δοκιμή HWTT έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως από υπηρεσίες αυτοκινητοδρόμων στις ΗΠΑ, όπως η Καλιφόρνια, το Κολοράντο, το Ιλινόις, η Αϊόβα, η Λουϊζιάνα, η Μοντάνα, η Οκλαχόμα, το Τέξας, η Γιούτα, η Ουάσιγκτον και το Ουισκόνσιν (Mohammad, Elseifi, Raghavendra, & Ye, 2016).

### 3.3.8 Flow Number (AASHTO T378-17)

Η δοκιμή Flow Number-FN αναπτύχθηκε αρχικά από την ερευνητική ομάδα του Εθνικού προγράμματος Έρευνας Συνεργατικών Αυτοκινητοδρόμων NCHRP 9-19 (Witczak, Kaloush, Pellinen, El-Basyouny, & Von Quintus, 2002) ως μια απλή δοκιμή απόδοσης για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοσυλακώσεων. Έκτοτε, βελτιώθηκε περαιτέρω στο πλαίσιο του προγράμματος NCHRP 9-29 (Bonaquist, 2008) και τελικά τυποποιήθηκε στην προσωρινή διαδικασία του προτύπου AASHTO T387-17 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017).

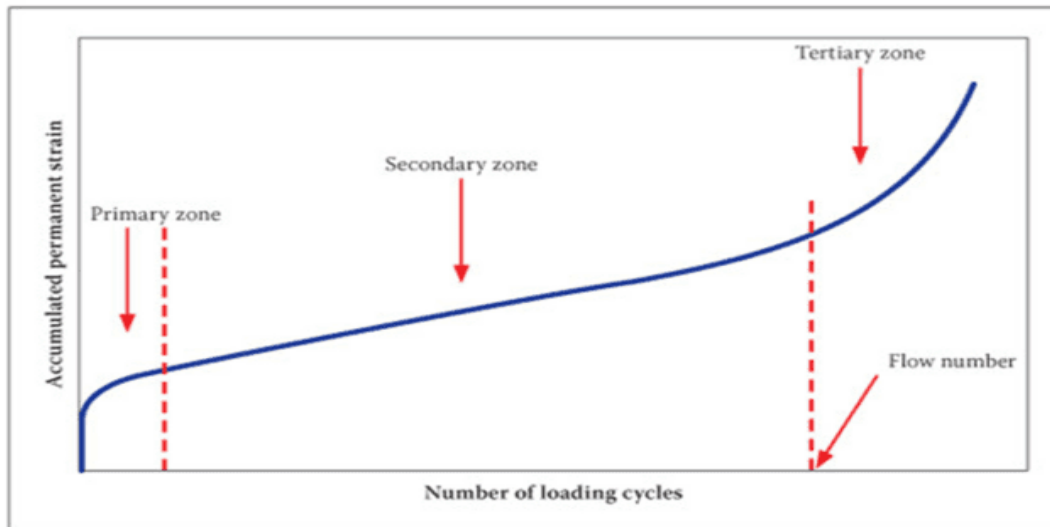
Το δείγμα της δοκιμής FN έχει διάμετρο 100 mm και ύψος 150 mm με πυρήνα από ένα εργαστηριακά συμπυκνωμένο δείγμα διαμέτρου 150 mm και ύψους 150 mm. Το δοκίμιο FN υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση θλιπτικών τάσεων σε υψηλή θερμοκρασία (Εικόνα 3.28). Αυτή η επαναλαμβανόμενη φόρτιση προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση στο δοκίμιο.



Εικόνα 3.28: Δοκίμιο FN (Zhang, Alvarez, Lee, Torres, & Walubita, 2013)

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής FN, τα κύρια δεδομένα εξόδου περιλαμβάνουν το φορτίο (καταπόνηση), τον αριθμό των κύκλων φορτίου, την παραμόρφωση και τον χρόνο ανά κύκλο φόρτισης. Με βάση αυτά τα στοιχεία, δημιουργείται μια γραφική παράσταση της

συσσωρευμένης μόνιμης καταπόνησης σε σχέση με τους κύκλους φορτίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.29.



**Εικόνα 3.29: Καμπύλη δοκιμής FN (Walubita, Zhang, Alvarez, & Hu, 2013)**

Ο δείκτης FN ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων φορτίου, για τους οποίους η κλίση της καμπύλης της συσσωρευμένης μόνιμης καταπόνησης έναντι των κύκλων φορτίου είναι η ελάχιστη (Archilla, Diaz, & Carpenter, 2007). Καθώς αυξάνεται ο δείκτης FN, αυξάνεται και η αντίσταση έναντι της τροχοαυλάκωσης. Μία τυπική τιμή του δείκτη FN για ασφαλτομίγματα που προορίζονται για υψηλής κυκλοφορίας οδούς είναι συνήθως μεγαλύτερη από 740. Ωστόσο, οι ακριβείς τιμές είναι πιθανό να διαφέρουν ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του έργου. Αποδείχθηκε ότι η δοκιμή FN έδειξε καλή συσχέτιση με την απόδοση σε τροχοαυλακώσεις των μιγμάτων από τα ερευνητικά προγράμματα των ΗΠΑ: WesTrack, MnROAD και FHWA-ALF (Kaloush, 2001), (Witczak, 2007).

### 3.3.9 Stress Sweep Rutting Test (AASHTO T134-19)

Η δοκιμή Stress Sweep Rutting-SSR χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T 134-19 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019). Στη δοκιμή αυτή τα δοκίμια υποβάλλονται σε περιορισμένη δοκιμή κυκλικής συμπίεσης σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες, TH (55°C) και TL (26°C). Επίσης, υποβάλλονται και σε συνθήκες φόρτισης 200 κύκλων σε τρία επίπεδα μεταβαλλόμενης τάσης, διατηρώντας σταθερή πίεση 69 kPa. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, μετράται η μόνιμη παραμόρφωση των δοκιμίων μαζί με την εφαρμοζόμενη τάση, το ιστορικό φόρτισης και η θερμοκρασία.

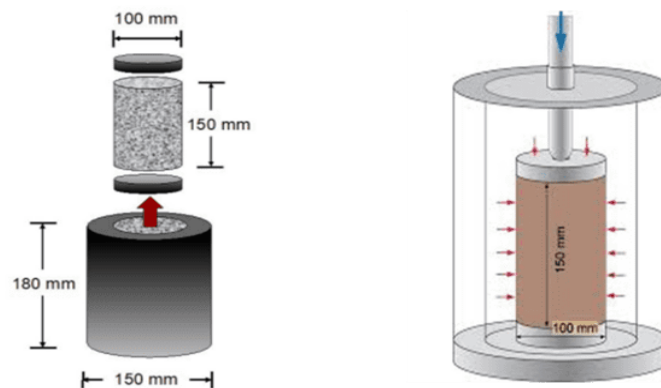
Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει ο δείκτης παραμόρφωσης λόγω τροχοαυλακώσεων (Rutting Strain Index-RSI), που έχει υιοθετηθεί και από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (FHWA). Ο δείκτης RSI αντιπροσωπεύει τη μέση μόνιμη παραμόρφωση, εκφρασμένη ως ποσοστό, που προκύπτει από την επανάληψη 30 εκατομμυρίων διελεύσεων ισοδύναμου μονοαξονικού φορτίου-ESALs (Equivalent Single Axle Loads) κατά τη διάρκεια μίας περιόδου 20 ετών σε μια τυπική δομή οδοστρώματος. Μια χαμηλότερη τιμή RSI υποδηλώνει μεγαλύτερη αντίσταση έναντι τροχοαυλάκωσης για ένα μίγμα. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα αποδεκτά όρια του δείκτη RSI σε σχέση με την κυκλοφορία σχεδιασμού.

**Πίνακας 3.2: Όρια δείκτη RSI(%) με βάση κυκλοφορία σχεδιασμού (Ghanbari, Underwood, & Kim, 2022)**

Κυκλοφορία ( εκατομμύρια ESALs)	Όρια RSI (%)
Μικρότερη από 10	<12
Μεταξύ 10 και 30	<4
Μεγαλύτερη από 30	<2
Μεγαλύτερη από 30 και αργή κυκλοφορία	<1

Οι πιο αυστηρές απαιτήσεις για μεγαλύτερα επίπεδα κυκλοφορίας και αργή κυκλοφορία, υποδεικνύουν την ανάγκη για υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα του οδοστρώματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μακροχρόνια απόδοση του.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή SSR έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις για την εξασφάλιση της ομοιομορφίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Η διάμετρος των δοκιμίων είναι 100 mm, ενώ το ύψος τους 150 mm. Τα δοκίμια αυτά προέρχονται από αρχικά δείγματα με διάμετρο 150 mm και ύψος 180 mm, εξασφαλίζοντας έτσι ότι τα τελικά δοκίμια είναι αντιπροσωπευτικά του υλικού που πρόκειται να δοκιμαστεί (Εικόνα 3.30).

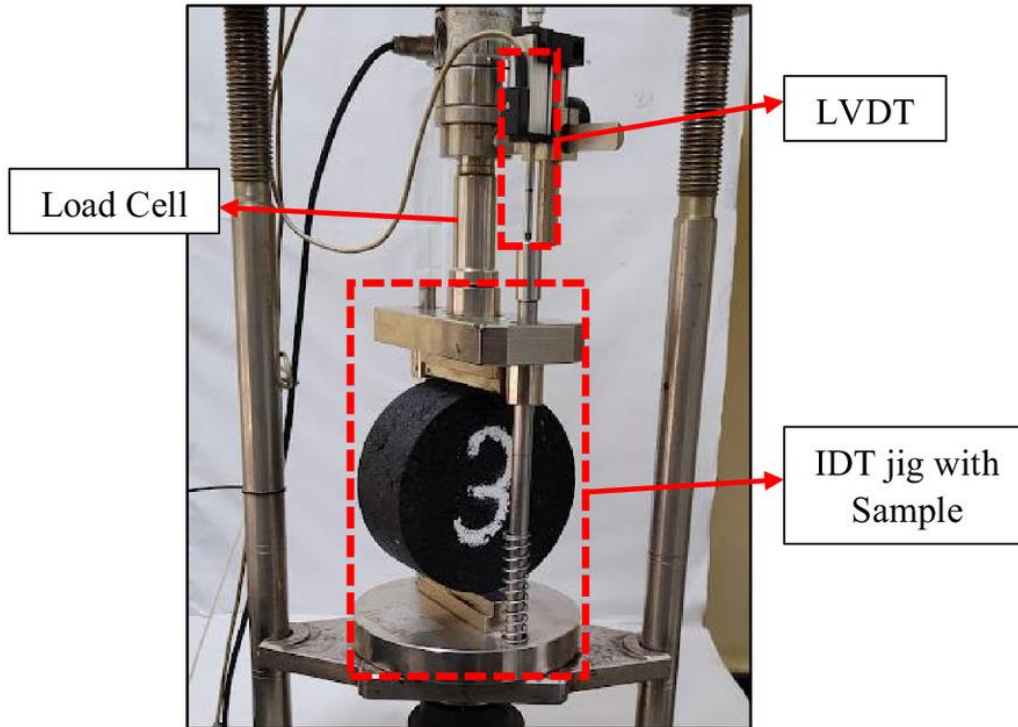


**Εικόνα 3.30: Συσκευή και σχήμα δοκιμίου δοκιμής SSR (Kim, Ghanbari, & Underwood, 2021)**

Η αξιολόγηση των δοκιμών πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες: υψηλή (TH) και χαμηλή (TL). Αυτές οι θερμοκρασίες επιλέγονται για να προσομοιώσουν τις ακραίες συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσει το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η διαδικασία της φόρτισης των δοκιμών πραγματοποιείται σε συγκεκριμένους χρονικούς κύκλους, για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Ο χρόνος φόρτισης είναι σταθερός και διαρκεί 0,4 sec. Η περίοδος ανάπαυσης διαφέρει ανάλογα με τη θερμοκρασία της δοκιμής: για τη θερμοκρασία TH (55°C) είναι 3,6 sec, ενώ για τη θερμοκρασία TL (26°C) είναι 1,6 sec. Τα δείγματα δοκιμάζονται σε πίεση 10 psi (69 kPa) και φορτίζονται για 200 κύκλους σε τρία διαφορετικά επίπεδα φόρτισης (συνολικά 600 κύκλοι ανά δείγμα). Τα φορτία που εφαρμόζονται στα δοκίμια ποικίλλουν ανάλογα με τη θερμοκρασία της δοκιμής. Αυτές οι διαφοροποιήσεις επιτρέπουν την αξιολόγηση της αντοχής των υλικών σε διαφορετικά επίπεδα καταπόνησης. Η συνολική διάρκεια της δοκιμής είναι έξι ώρες για τέσσερις δοκιμές SSR. Για κάθε θερμοκρασία δοκιμής (TH και TL) χρησιμοποιούνται δύο δοκίμια, συνεπώς συνολικά τέσσερα δοκίμια. Αυτός ο αριθμός διασφαλίζει την αξιοπιστία και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

### **3.3.10 High Temperature Indirect Tension**

Η δοκιμή High Temperature Indirect Tension-HT-IDT, η οποία αναπτύχθηκε από τους Christensen και Bonaquist και είναι προσαρμοσμένη στην κλασική δοκιμή αντοχής έναντι εφελκυσμού, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των ασφαλτομιγμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες. Αναλυτικότερα, η δοκιμή αυτή περιγράφει τον προσδιορισμό της έμμεσης αντοχής σε εφελκυσμό σε υψηλή θερμοκρασία. Παρόλο που δεν έχει επίσημο πρότυπο, τα αποτελέσματά της και συγκεκριμένα η αντοχή HT-IDT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων. Η δοκιμή μπορεί να διεξαχθεί σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών φόρτισης και θερμοκρασιών σε κυλινδρικά δοκίμια διαφόρων υψών. Κατά την εκτέλεσή της, εφαρμόζεται ένας σταθερός ρυθμός αξονικής μετατόπισης στο δοκίμιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.31.



**Εικόνα 3.31: Εξοπλισμός δοκιμής HT-IDT (Vamsikrishna & Singh, 2023)**

Κατά τη διάρκεια μίας πρακτικής εφαρμογής της δοκιμής επιλέχθηκε ρυθμός φόρτισης 50 mm/min για διάφορους λόγους, όπως πρακτικότητα και συνέπεια. Πρακτικότητα, καθώς η επιλογή αυτού του ρυθμού φόρτισης οδηγεί σε μία πολύ σύντομη διάρκεια δοκιμής και συνέπεια, καθώς ο εν λόγω ρυθμός φόρτισης είναι ο ίδιος με αυτόν άλλων δοκιμών, όπως οι δοκιμές έναντι ρηγμάτωσης και αξιολόγησης της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας, γεγονός που διασφαλίζει ομοιομορφία στις διαδικασίες δοκιμών. Η θερμοκρασία δοκιμής καθορίστηκε στους 54,4°C και τρία δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 62 mm κατασκευάστηκαν με κενά αέρος  $7 \pm 0,5\%$ .

Μόλις η δοκιμή ολοκληρώθηκε, προσδιορίστηκε η αντοχή HT-IDT με την σχέση 3.4:

$$\text{HT-IDT Strength} = 2000 \times \frac{P_{\max}}{\pi \times t \times D} \quad (\text{Σχέση 3.4})$$

Όπου,

HT-IDT Strength = δύναμη, kPa

$P_{\max}$  = μέγιστο φορτίο, N

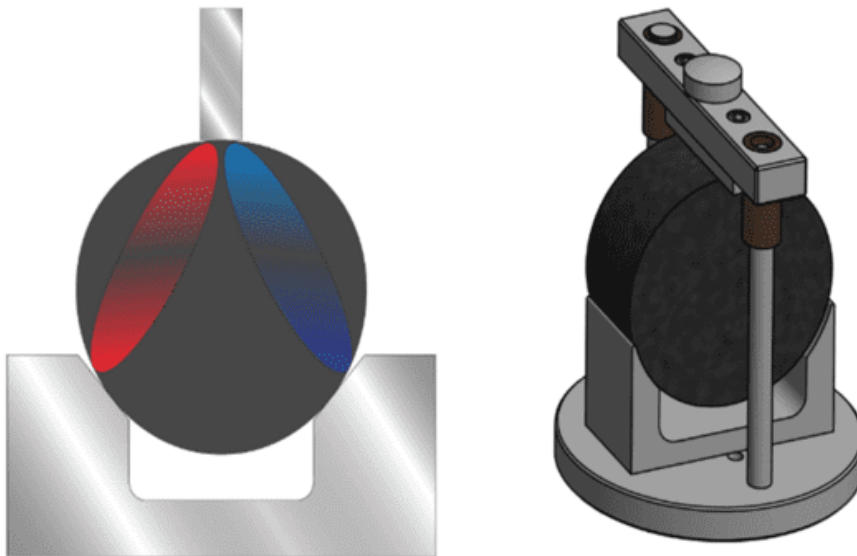
$t$  = πάχος δοκιμίου, mm

$D$  = διάμετρος δοκιμίου, mm

Το αποδεκτό όριο για την αντοχή HT-IDT είναι 133kPa. Αν η τιμή προκύψει μικρότερη από 133 kPa τότε η δοκιμή θεωρείται αποτυχημένη, ενώ αν είναι ίση ή μεγαλύτερη από 133 kPa, η δοκιμή θεωρείται επιτυχημένη. Σημειώνεται πως υψηλότερη τιμή αντοχής υποδηλώνει καλύτερη αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων.

### 3.3.11 Rapid Shear Rutting Test (ASTM D8360-22)

Ερευνητές του Ινστιτούτου Μεταφορών του Τέξας πρότειναν πρόσφατα μια δοκιμή, που ονομάζεται Rapid Shear Rutting Test και είναι επίσης γνωστή ως IDEAL-RT (Zhou, Hu, & Newcomb, 2020). Το δοκίμιο της δοκιμής έχει διάμετρο 150mm και ύψος 62mm και τοποθετείται σε μία διάταξη διάτμησης σχήματος U, όπου εφαρμόζεται ρυθμός φόρτισης 50 mm/min κατά μήκος του διαμετρικού επιπέδου του δοκιμίου. Εξαιτίας της διάταξης αυτής αναπτύσσονται δύο ξεχωριστά επίπεδα διάτμησης κατά το φορτίο που εφαρμόζεται στο δείγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.32. Η δοκιμή IDEAL-RT διεξάγεται σε θερμοκρασία 50°C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D8360-22 (ASTM International, 2022).



Εικόνα 3.32: Επίπεδα διάτμησης & τυπικό εξάρτημα δοκιμής IDEAL-RT (Cooper A. , 2020)

Η αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη αντίστασης έναντι τροχοαυλάκωσης (RT), όπως φαίνεται στην σχέση 3.5. Ένας υψηλότερος δείκτης RT υποδηλώνει μεγαλύτερη αντίσταση έναντι τροχοαυλάκωσης.

$$RT = 6,618 \times 10^{-5} \times 0.356 \times \frac{P_{max}}{t \times D} \quad (\text{Σχέση 3.5})$$

Όπου

$P_{max}$  = μέγιστο φορτίο, N



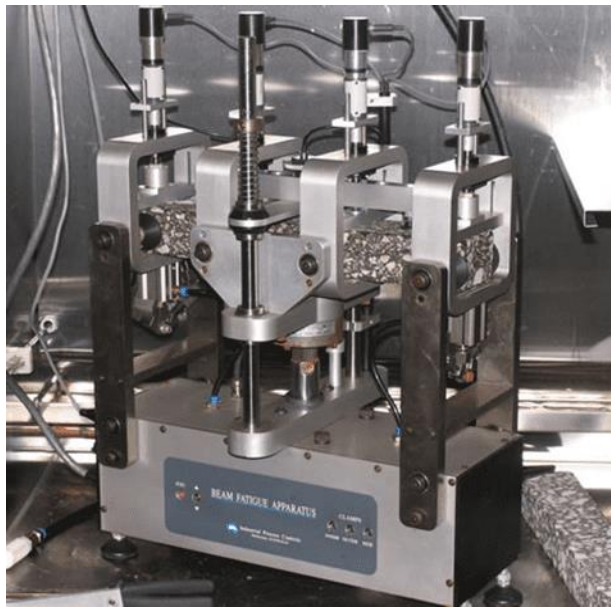
$t$  = πάχος δοκιμίου, m

$D$ =διάμετρος δοκιμίου, m

### 3.3.12 Bending Beam Fatigue (AASHTO T321-17)

Οι δοκιμές κόπωσης των δοκών εκτελούνται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, συνήθως στους 20°C, σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T321-17 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017). Γενικά στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιείται ευρέως ο τρόπος σταθερής παραμόρφωσης, επειδή φαίνεται να παρέχει αποτελέσματα που σχετίζονται περισσότερο με τις παρατηρήσεις πεδίου. Η αστοχία ορίζεται συνήθως ως το σημείο, στο οποίο το φορτίο φθάνει σε κάποια προκαθορισμένη τιμή, συνήθως το 50 % της αρχικής τιμής.

Στη δοκιμή Bending Beam Fatigue-BFF, χρησιμοποιούνται δοκοί από θερμό ασφαλτόμιγμα (HMA) διαστάσεων (380x50x63mm) και υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση σε μηχανή φόρτισης τεσσάρων σημείων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.33.



**Εικόνα 3.33: Δοκίμιο και συσκευή δοκιμής BBF (Aurilio & Newcomb, 2018)**

Ο χρόνος δοκιμής εξαρτάται από το επίπεδο παραμόρφωσης που επιλέγεται. Τα υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης (400-800  $\mu$ strain) μπορεί να ολοκληρωθούν σε λίγες ώρες. Οι δοκιμές χαμηλής παραμόρφωσης (200-400  $\mu$ strain) μπορεί να διαρκέσουν αρκετές ημέρες. Αξίζει να σημειωθεί ότι δοκιμές με πολύ χαμηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης (50-100  $\mu$ strain) μπορεί να διαρκέσουν έως και ένα μήνα ή και περισσότερο. Συνήθως, χρησιμοποιούνται 8 έως 10 δείγματα για την ανάπτυξη αποτελεσμάτων για κάθε μίγμα. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρειαστούν αρκετές ημέρες έως αρκετές εβδομάδες για να

αναπτυχθεί επαρκής κόπωση, που να επιτρέπει την ανάλυση ενός συγκεκριμένου μίγματος. Κατά συνέπεια, η δοκιμή αυτή είναι πιθανό να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έρευνα υψηλού επιπέδου.

### 3.3.13 IDT Creep Compliance and Strength Test (AASHTO T 322-07)

Η δοκιμή IDT Creep Compliance And Strength Test χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσεων. Η μέθοδος περιλαμβάνει μία σειρά από δοκιμές που εκτελούνται διαδοχικά σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T 322-07 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007). Αναλυτικότερα, περιλαμβάνει τη δοκιμή ελαστικής παραμόρφωσης, τη δοκιμή ερπυσμού και τη δοκιμή αντοχής, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

**Δοκιμή Ελαστικής Παραμόρφωσης (Resilient Modulus Test):** Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός δυναμικού φορτίου σε μορφή ημιτονοειδούς κύματος στο δείγμα για 0.1 sec, ακολουθούμενη από μια περίοδο ανάπαυσης 0,9 sec. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται πέντε φορές. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καταγράφονται οι οριζόντιες και κάθετες παραμορφώσεις, από τις οποίες προσδιορίζονται το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson.

**Δοκιμή Ερπυσμού (Creep Test):** Για την παρατήρηση της συμπεριφοράς ερπυσμού εφαρμόζεται ένα στατικό φορτίο στο δείγμα για 1000 sec. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του φορτίου, καταγράφονται οι οριζόντιες και κάθετες παραμορφώσεις.

**Δοκιμή Αντοχής (Strength Test):** Αυτή η δοκιμή περιλαμβάνει την εφαρμογή αυξανόμενου φορτίου μέχρι την αστοχία του δείγματος, για να προσδιοριστεί η αντοχή σε εφελκυσμό και η παραμόρφωση.

Η συνολική ανάλυση των δεδομένων των δοκιμών αυτών επιτρέπει την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των ασφαλτομιγμάτων και την πρόβλεψη της απόδοσης τους σε πραγματικές συνθήκες χρήσης.

Τα δείγματα που δοκιμάζονται μπορεί να προέρχονται από το πεδίο ή να παρασκευάζονται στο εργαστήριο. Τα δοκίμια έχουν διάμετρο 150 mm και πάχος 50 mm. Πριν τη δοκιμή, τα δείγματα ψύχονται στην επιθυμητή θερμοκρασία για τουλάχιστον τρεις ώρες. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε κάθε πλευρά του δείγματος τέσσερα μεταλλικά εξαρτήματα με διάμετρο 8 mm και πάχος 3 mm. Αυτά τα μεταλλικά εξαρτήματα είναι απαραίτητα για την ακριβή μέτρηση των παραμορφώσεων, καθώς λειτουργούν ως σημεία σύνδεσης για τους αισθητήρες παραμόρφωσης (LVDT). Οι αισθητήρες παραμόρφωσης προσαρμόζονται στα μεταλλικά εξαρτήματα και καταγράφουν τις κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις του δείγματος. Έτσι, διασφαλίζεται η ακριβής μέτρηση των παραμορφώσεων που είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον υπολογισμό των μηχανικών παραμέτρων του ασφαλτομίγματος, όπως η συμμόρφωση σε ερπυσμό (creep compliance)

και η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength). Έπειτα, τα δείγματα τοποθετούνται στη συσκευή φόρτισης και στερεώνονται με τις άνω και κάτω πλάκες φόρτισης, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η δοκιμή. Τα στάδια της δοκιμής που περιγράφονται παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 3.34.



**Εικόνα 3.34: Στάδια δοκιμής IDT (Richardson & Lusher, 2008)**

Τα αποτελέσματα της δοκιμής περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της συμμόρφωσης σε ερπυσμό (IDT creep compliance) και της αντοχής σε εφελκυσμό (IDT tensile strength) του δείγματος. Η συμμόρφωση σε ερπυσμό (IDT creep compliance) είναι η εξάρτηση της παραμόρφωσης από τον χρόνο υπό σταθερό φορτίο και υπολογίζεται με τη σχέση 3.6.

$$D(t) = \varepsilon(t) / \sigma_0$$

(Σχέση 3.6)

Όπου,

$D(t)$  = συμμόρφωση σε ερπυσμό σε χρόνο  $t$  (1/MPa)

$\varepsilon(t)$  = οριζόντια παραμόρφωση σε χρόνο  $t$  (mm/mm ή %)

$\sigma_0$  = σταθερό εφαρμοζόμενο φορτίο (MPa)

Η αντοχή σε εφελκυσμό (IDT tensile strength) υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής με την εφαρμογή ενός κατακόρυφου φορτίου μέχρι να προκληθεί η θραύση του δείγματος. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται με τη σχέση 3.7.

$$\sigma_t = 2 \times P / \pi \times t \times D$$

(Σχέση 3.7)

Όπου,

$\sigma_t$ = αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)

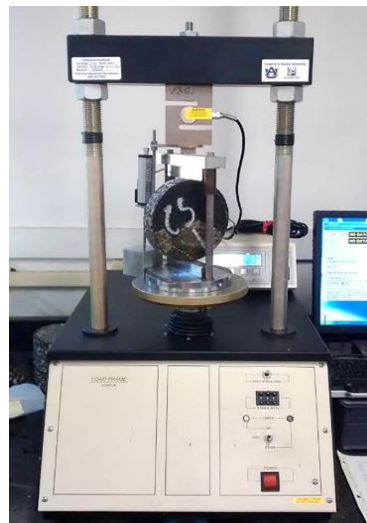
P= μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη (N)

t= πάχος δείγματος (mm)

D= διάμετρος δείγματος (mm)

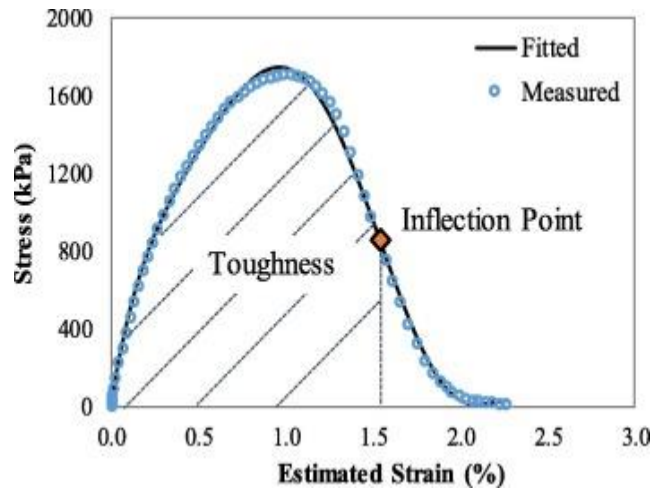
### 3.3.14 Nflex Factor (AASHTO TP 141-20)

Η δοκιμή Nflex Factor είναι παρόμοια με την παραδοσιακή δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό. Η δοκιμή εφαρμόζει ένα φορτίο σε κυλινδρικό δοκίμιο με σταθερό ρυθμό 50 mm/min σε θερμοκρασία  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Τα δοκίμια Nflex πρέπει να έχουν διάμετρο 150 mm και πάχος 50 mm, σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής AASHTO TP 141-20 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η μετατόπιση της εγκάρσιας κεφαλής παρακολουθείται συνεχώς και καταγράφεται (Εικόνα 3.35).



Εικόνα 3.35: Δοκιμή Nflex (Yin, Garita, Taylor, & West, 2018)

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται με βάση την καμπύλη φορτίου έναντι μετατόπισης. Ο συντελεστής Nflex υπολογίζεται διαιρώντας την αντοχή του υλικού (περιοχή κάτω από την καμπύλη μετατόπισης φορτίου) με την κλίση της καμπύλης στο σημείο καμψής μετά την αιχμή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.36.

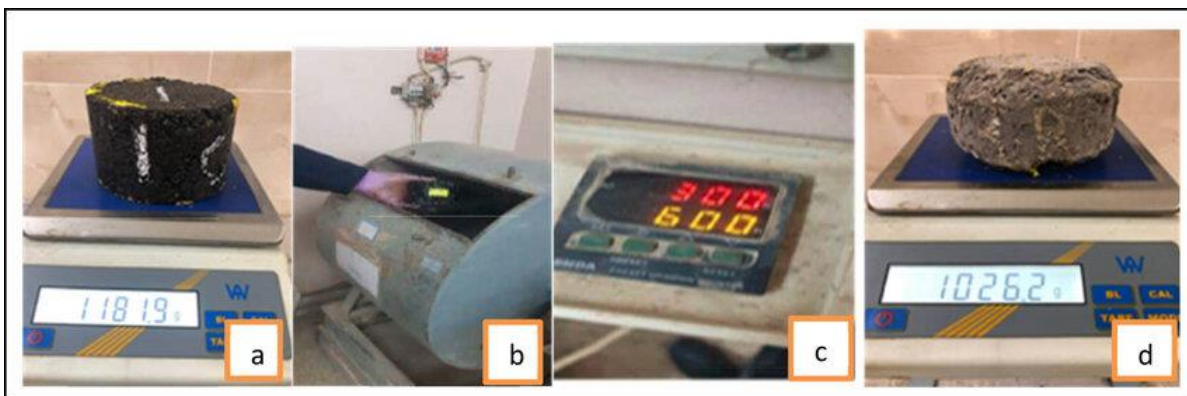


Εικόνα 3.36: Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δοκιμής Nflex (Yin, Garita, Taylor, & West, 2018)

Μια προκαταρκτική μελέτη διαπίστωσε ότι ο παράγοντας Nflex είχε καλή συσχέτιση με τα δεδομένα ρηγματώσης λόγω κόπωσης, που προέκυψαν από τμήματα δοκιμών επιταχυνόμενης φόρτισης της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (FHWA). Γενικά, ένας υψηλότερος συντελεστής Nflex είναι επιθυμητός για τα ασφαλτομίγματα.

### 3.3.15 Cantabro Test (AASHTO TP 108-14)

Η δοκιμή Cantabro παρέχει μια γενική ένδειξη της ανθεκτικότητας των ασφαλτομιγμάτων. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται δύο δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO TP108-14 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014), των οποίων η διάμετρος πρέπει να είναι 150 mm και το ύψος τους  $115 \pm 5$  mm. Επίσης, η πυκνότητα των δειγμάτων πρέπει να είναι  $93 \pm 1\%$ . Αρχικά, τα συμπιεσμένα δείγματα ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου και μετράται το βάρος τους (παράμετρος A). Έπειτα, τα δοκίμια τοποθετούνται στη συσκευή Los Angeles, χωρίς όμως να περιλαμβάνονται οι χαλύβδινες σφαίρες. Στο τέλος γίνεται περιστροφή της συσκευής Los Angeles με ταχύτητα 30 έως 33 στροφές ανά λεπτό για 300 κύκλους (Εικόνα 3.37).



Εικόνα 3.37: Δοκιμή Cantabro Test (Abd Ali, Joni, & Al-Rubaei, 2024)

Μετά τις 300 στροφές το χαλαρό υλικό που αποκόπηκε από το δείγμα δοκιμής αφαιρείται. Χωρίς να συμπεριληφθεί κάποιο από το υλικό που απορρίφθηκε υπολογίζεται ξανά το βάρος του δοκιμίου (παράμετρος B). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η απώλεια Cantabro με τη σχέση 3.8.

$$CL = \left( \frac{A-B}{A} \right) \times 100 \quad (\text{Σχέση 3.8})$$

Όπου,

CL = Απώλεια Cantabro, %

A = Αρχικό βάρος του δοκιμίου

B = Τελικό βάρος του δοκιμίου

### 3.3.16 Tensile Strength Ratio (AASHTO T283-14)

Η δοκιμή Tensile Strength Ratio -TSR είναι μια τυπική δοκιμή για την αξιολόγηση της ευαισθησίας του μίγματος στην επίδραση της υγρασίας και διεξάγεται σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T283-14 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014). Με βάση λοιπόν, το πρότυπο, χρησιμοποιούνται δοκίμια ασφάλτου με διάμετρο 150 mm, πάχος 95±5 mm και ποσοστό κενών αέρος 7%. Τα δοκίμια ενσωματώνονται μέσα σε νερό με θερμοκρασία 25±0,5°C για δύο ώρες πριν από την τοποθέτησή τους μεταξύ δύο πλακών έδρασης στο μηχάνημα δοκιμών. Ο ρυθμός φόρτισης είναι συνήθως 50 mm/min και η μέγιστη αντοχή σε θλίψη καταγράφεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας για τον περαιτέρω υπολογισμό της αντοχής σε εφελκυσμό σύμφωνα με την σχέση 3.9.

$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad (\text{Σχέση 3.9})$$

Όπου,

St= αντοχή σε εφελκυσμό (kPa),

P = μέγιστο φορτίο (N)

t = πάχος δοκιμίου (mm) και

D= διάμετρος δοκιμίου (mm)

Αρχικά, προετοιμάζονται τουλάχιστον έξι δοκίμια με διάμετρο 101.6 mm και ύψος συνήθως 63.5 mm με κενά αέρος 7±1%. Τα δείγματα κατανέμονται σε τρεις ομάδες: η πρώτη ομάδα ελέγχου παραμένει χωρίς καμία επεξεργασία, η δεύτερη ομάδα υποβάλλεται

σε κορεσμό των κενών με νερό, για να προσομοιωθούν συνθήκες 4 ετών, ενώ η τρίτη ομάδα υποβάλλεται σε κορεσμό κενών και σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-τήξης, για να προσομοιωθούν συνθήκες 4 έως 12 ετών (Εικόνα 3.38). Επισημαίνεται πως οι κύκλοι ψύξης-τήξης περιγράφουν την κατάσταση, στην οποία το νερό που βρίσκεται ενός του οδοστρώματος παγώνει και στη συνέχεια λιώνει, γεγονός που προκαλεί τη συστολή και διαστολή των υλικών, προκαλώντας ρηγμάτωση και φθορές στο οδόστρωμα.



**Εικόνα 3.38: Δοκίμια TSR (West, Rodezno, & Yin, 2018)**

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, τα δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμή εφελκυσμού με φορτίο που εφαρμόζεται με ταχύτητα 50 mm/min. Καταγράφεται το μέγιστο φορτίο για κάθε δοκίμιο (Εικόνα 3.39) και στη συνέχεια υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή (υγρή και ξηρή) και ο λόγος TSR, που είναι το ποσοστό της υγρής προς την ξηρή αντοχή (σχέση 3.10).

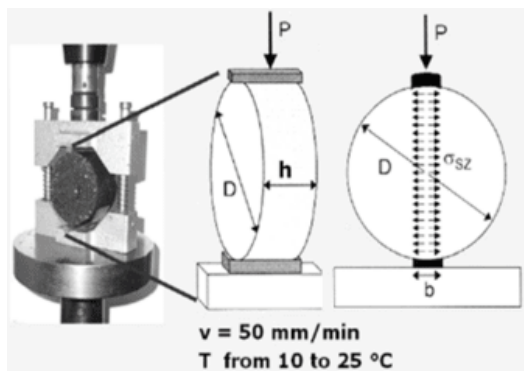
$$\text{TSR} = \text{Stm} / \text{Std} * 100 \quad (\text{Σχέση 3.10})$$

Όπου:

TSR: Αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό(%)

Stm: υγρή αντοχή ή μέση εφελκυστική αντοχή του υποσυνόλου που έχει υποστεί επεξεργασία με υγρασία (kPa)

Std: αντοχή ξηρού υλικού ή μέση εφελκυστική αντοχή του ξηρού υποσυνόλου



Indirect tensile strength ( $\beta_{sz}$ , ITS)

$$\beta_{sz} = \frac{2 \cdot F_{max}}{\pi \cdot h \cdot d} \quad [N/mm^2]$$

Indirect tensile strength ratio (ITSR)

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100 \quad [\%]$$

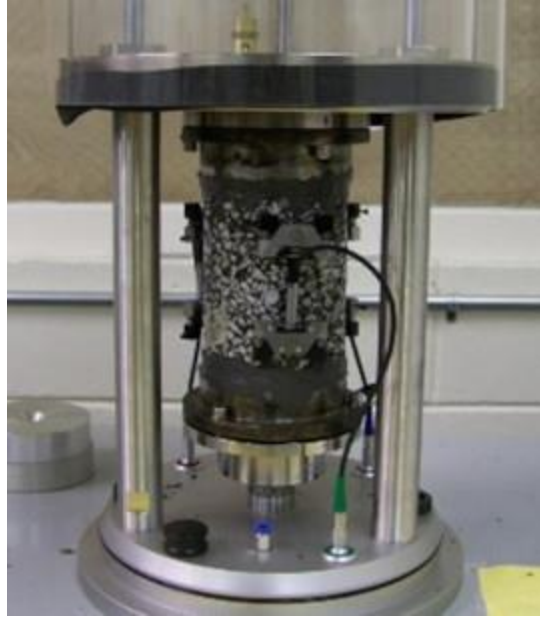
**Εικόνα 3.39: Δοκίμιο και συσκευή δοκιμής TSR (Grönniger, Wistuba, & Renken, 2010)**

Ένας λόγος TSR από 0,70 έως 0,80 θεωρείται αποδεκτός για την επάρκεια των μιγμάτων. Τελικά, η δοκιμή TSR παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας και συμβάλλει στην πρόβλεψη της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας των οδοστρωμάτων.

### 3.3.17 Direct Tension Cyclic Fatigue Test (AASHTO TP 107-14 & AASHTO TP 133-19)

Η δοκιμή Direct Tension Cyclic Fatigue Test χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης. Η διεξαγωγή της δοκιμής πραγματοποιείται με βάση δύο πρότυπα. Συγκεκριμένα, υπάρχει το AASHTO TP 107-14 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014), το οποίο αφορά δείγματα με διάμετρο 100mm και πάχος 150mm και το AASHTO TP 133-19 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2019), που αναφέρεται σε δείγματα με διάμετρο 38mm και πάχος 110mm. Η χρήση μεγάλων δειγμάτων επιτρέπει την καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν στα οδοστρώματα, καθώς τα μεγαλύτερα δείγματα μπορούν να αντιμετωπίσουν καλύτερα τη συμπεριφορά των υλικών. Ωστόσο, τα μικρά δείγματα προσφέρουν μία πιο πρακτική προσέγγιση για δοκιμές στο εργαστήριο. Ένα τυπικό δείγμα, καθώς και η συσκευή της δοκιμής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.40. Η δοκιμή Direct Tension Cyclic Fatigue Test διεξάγεται σε διάφορες θερμοκρασίες, όπως 4°C, 20°C και 35°C, προκειμένου να προσομοιωθούν οι πραγματικές κλιματολογικές συνθήκες.





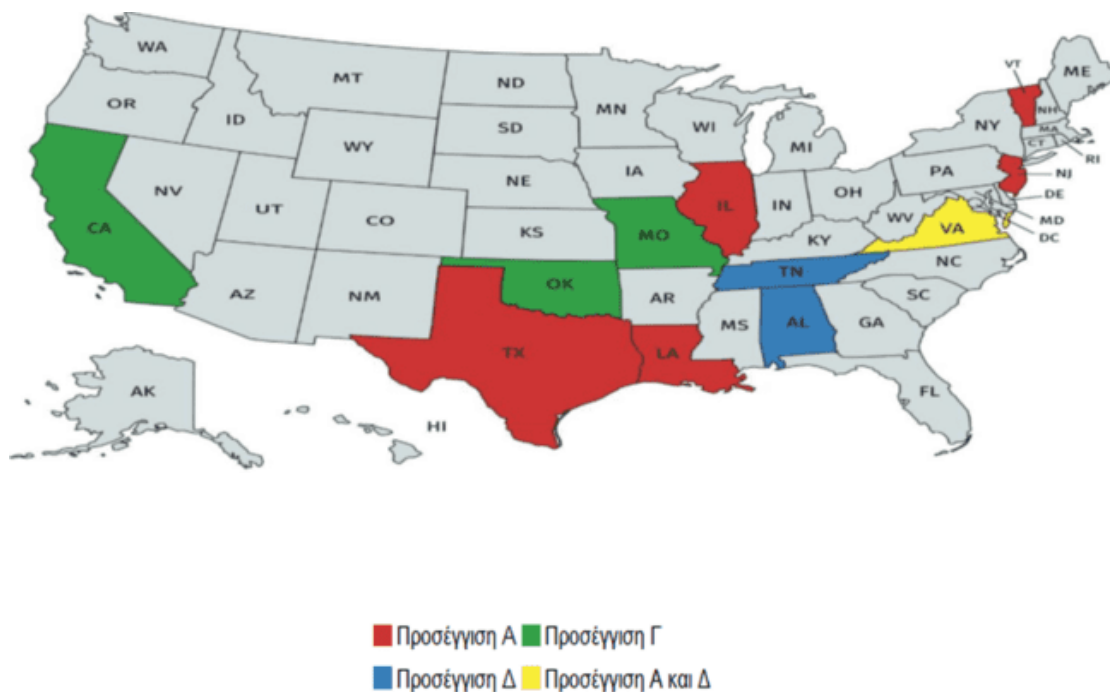
**Εικόνα 3.40: Συσκευή και δοκίμιο μεθόδου Direct Tension Cyclic Fatigue (Wang & Kim, 2022)**

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφαρμόζεται στα δείγματα ελεγχόμενη παραμόρφωση και καταγράφονται τα αποτελέσματα της τάσης και της παραμόρφωσης. Σκοπός είναι να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι, όπως ο δυναμικός συντελεστής ελαστικότητας (Dynamic Modulus), ο οποίος μετρά την απόδοση του μίγματος υπό επαναλαμβανόμενα φορτία και η χαρακτηριστική καμπύλη φθοράς, η οποία απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της μείωσης της σκληρότητας του ασφαλτομίγματος και των αλλαγών στην εσωτερική του δομή, όπως η δημιουργία ρωγμών και η διάσπαση της συνοχής των υλικών, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της καταπόνησης του οδοστρώματος από την κυκλοφορία. Τέλος, σημαντική παράμετρο αποτελεί και ο δείκτης κόπωσης  $S_{app}$ , ο οποίος εκτιμά το επιτρεπόμενο επίπεδο κυκλοφορίας που μπορεί να αντέξει το μίγμα.

## 4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ BMD

### 4.1 Εφαρμογές στις ΗΠΑ

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ένας χάρτης των ΗΠΑ με τις Πολιτειακές Διοικήσεις Αυτοκινητοδρόμων (State Highway Agencies-SHAs) που έχουν αναπτύξει είτε σχέδιο, είτε προσωρινή, είτε τυποποιημένη προδιαγραφή για την μέθοδο BMD. Οι πληροφορίες αυτές συλλέχθηκαν κυρίως από μια έρευνα που διεξήχθη από το Εθνικό Κέντρο Τεχνολογίας Ασφάλτου (NCAT) τον Μάιο του 2020 και συμμετείχαν διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ, καθώς και η βιομηχανία ασφαλικών οδοστρωμάτων. Μεταξύ των 11 πολιτειών που συμμετείχαν στην έρευνα για την μέθοδο BMD, το Ιλινόις, η Λουιζιάνα, το Νιου Τζέρσεϊ, το Τέξας και το Βέρμοντ χρησιμοποιούν την προσέγγιση Α -ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων-, η Καλιφόρνια, το Μιζούρι και η Οκλαχόμα χρησιμοποιούν επί του παρόντος την προσέγγιση Γ -τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων-, η Αλαμπάμα και το Τενεσί διερευνούν την προσέγγιση Δ -σχεδιασμός επιδόσεων-, ενώ η Βιρτζίνια επιτρέπει τόσο την προσέγγιση Α όσο και την προσέγγιση Δ. Σημειώνεται πως καμία πολιτεία δεν εφαρμόζει επί του παρόντος την προσέγγιση Β- ογκομετρικός σχεδιασμός με βελτιστοποίηση επιδόσεων.



Εικόνα 4.1: Χάρτης εφαρμογής της μεθόδου BMD στις ΗΠΑ (West, Rodezno, & Yin, 2018)

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η εφαρμογή της μεθόδου BMD σε διάφορες πολιτείες των ΗΠΑ, καθώς και οι δοκιμές που εφαρμόζονται σε αυτές.

#### 4.1.1 Ιλινόις

Στο Ιλινόις παρατηρήθηκε ότι η αντοχή των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοαυλακώσεων βελτιώθηκε με τη χρήση ανακυκλωμένων ασφαλικών υλικών RAP και RAS. Αυτό αποδείχθηκε με τη δοκιμή HWTT, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στο Ιλινόις και έδειξε χαμηλότερο βάθος αυλακώσεων στα μίγματα. Ωστόσο, η εφαρμογή της δοκιμής HWTT από το Τμήμα Μεταφορών του Ιλινόις (Illinois Department of Transportation-IDOT), για την εξακρίβωση άλλων παραμέτρων αστοχίας ασφαλικών μιγμάτων έδειξε ότι τα ασφαλτομίγματα με, ιδίως, αυξημένη περιεκτικότητα σε RAP και RAS, είναι πιο εύθραυστα και επιρρεπή σε πρόωρη ρηγμάτωση.

Κατά συνέπεια, το IDOT άρχισε να εξετάζει τη χρήση μιας δοκιμής επιδόσεων έναντι ρηγμάτωσης για τη συμπλήρωση της δοκιμής HWTT κατά την επαλήθευση του σχεδιασμού και την παραγωγή ασφαλτομίγματος. Το IDOT χρηματοδότησε και συντόνισε τη σχετική έρευνα με το Illinois Center for Transportation (ICT) του Πανεπιστημίου του Ιλινόις στο Urbana- Champaign (UIUC) για την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής δοκιμής ρηγμάτωσης. Τον Ιανουάριο του 2016, το IDOT ανέπτυξε μια Ειδική διάταξη: Hot-Mix Asphalt - Mixture Design Verification and Production (Modified for I-FIT Data Collection) για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αντίστασης στη ρηγμάτωση του παραγόμενου ασφαλτομίγματος με τη χρήση της παραμέτρου FI, της δοκιμής I-FIT.

Τον Σεπτέμβριο του 2020, το IDOT αναθεώρησε την ειδική διάταξη για τη δοκιμή I-FIT για όλα τα ασφαλτομίγματα, η οποία εισήχθη σε όλες τις συμβάσεις σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων από τον Ιανουάριο του 2021. Ακόμα, το IDOT χρησιμοποιεί τη δοκιμή TSR για την αξιολόγηση της ευαισθησίας του μίγματος στην επίδραση της υγρασίας. Οι απαιτήσεις του IDOT για τον ογκομετρικό σχεδιασμό και τις δοκιμές επιδόσεων για όλα τα ασφαλτομίγματα συνοψίζονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2.

Αναφορικά με τις ογκομετρικές απαιτήσεις οι παράμετροι που αξιολογούνται είναι οι εξής:

- 1) Ndesign: αριθμός περιστροφών (διελεύσεων) σχεδιασμού (20ετή λειτουργία οδοστρώματος)
- 2) πυκνότητα σχεδιασμού μίγματος
- 3) περιεκτικότητα ασφαλικού συνδετικού υλικού
- 4) ποσοστό κενών στο σκελετό των αδρανών - (Voids in Mineral Aggregates - VMA)
- 5) ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο - (Voids Filled with Asphalt - VFA)
- 6) αναλογία σκόνης-παιπάλης προς συνδετικό υλικό (Dust Proportion-D/P)

Τα κριτήρια της δοκιμής HWTT βασίζονται στο ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος BMD, όπως και η Superpave δεν κατηγοριοποιεί την άσφαλτο με βάση τις τιμές διεισδυτικότητάς της και σε συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας, αλλά αξιοποιεί το σύστημα Performance Grade (PG), το οποίο στοχεύοντας στη βέλτιστη αναπαράσταση στο εργαστήριο της πραγματικής συμπεριφοράς του μίγματος, κατηγοριοποιεί το συνδετικό υλικό βάσει του κλίματος και των αναμενόμενων ακραίων θερμοκρασιών του οδοστρώματος (Asphalt Intitute, 2014). Ο κωδικός κατηγοριοποίησης της ασφάλτου είναι τύπου PG X - Y όπου:

X = Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία οδοστρώματος, βάσει της υψηλότερης μέσης επταήμερης 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.

Το κριτήριο για τη δοκιμή TSR (αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό) για την αξιολόγηση της ευαισθησίας του μίγματος στην επίδραση της υγρασίας είναι το ίδιο για όλα τα ασφαλτομίγματα. Μία τιμή ίση ή μεγαλύτερη με 0,85 υποδεικνύει καλή αντοχή του ασφαλτομίγματος. Ακόμα, για τον δείκτη ευκαμψίας FI έχει καθοριστεί, με βάση με τις επιδόσεις έναντι ρηγμάτωσης, στο πεδίο πολλών ασφαλτομιγμάτων, ένα κατώτατο όριο η τιμή 8.0.

**Πίνακας 4.1: Απαιτήσεις δοκιμών επιδόσεων του IDOT (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021)**

Βαθμός PG συνδετικού υλικού	HWTT (αριθμός περασμάτων για βάθος αυλακώσεων 12,5 mm)	I-FIT	Αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό (TSR)
PG 58-xx ή χαμηλότερος	> 5.000	> 8.0	0.85
PG 64-xx	> 7.500		
PG 70-xx	> 15.000		
PG 76-xx ή υψηλότερος	> 20.000		

**Πίνακας 4.2: Ογκομετρικές απαιτήσεις δοκιμών του IDOT (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021)**

Τύπος μείγματος	Ndesign	Περιεκτικότητα ασφαλτικού υλικού(%)	Πυκνότητα σχεδιασμού (%)	VMA(ελάχιστο %)				VFA(%)	Αναλογία παιπάλης προς συνδετικό υλικό (D/P)	
				Ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανών(NMAS)(mm)						
				19	12.50	9.50	4.75			
Υψηλό ESAL	IL-19.0	50	-	96.0	13.5	-	-	-	65-78	≤1.0
		70	-	96.0	13.5	-	-	-	65-75	≤1.0
		90	-	96.0	13.5	-	-	-	65-75	≤1.0
	IL-9.50	50	-	96.0	-	-	15.0	-	65-78	≤1.0
		70	-	96.0	-	-	15.0	-	65-75	≤1.0
		90	-	96.0	-	-	15.0	-	65-75	≤1.0
IL-4.75	50	-	96.0	-	-	-	18.5	76-83	≤1.0	
Χαμηλό ESAL	IL-19.0L	30	4.0-8.0	96.0	13.5	-	-	-	-	≤1.0
	IL-9.50L	80	4.0-8.0	96.0	-	-	15.0	-	65-78	≤1.0

Η μέθοδος BMD του IDOT για το σχεδιασμό όλων των ασφαλτομιγμάτων και την έγκριση των JMF ακολουθεί την προσέγγιση A- Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων. Οι σχεδιαστές ασφαλτομίγματος θα πρέπει να είναι σε θέση να κατανοήσουν τι απαιτείται για τη δημιουργία ενός σταθερού και ανθεκτικού ασφαλτομίγματος, κατανοώντας το ρόλο κάθε συστατικού στις ογκομετρικές ιδιότητες του μίγματος. Ενώ αρχικά το IDOT δεν άλλαξε καμία από τις καθορισμένες ογκομετρικές απαιτήσεις, παρόλα αυτά η απαίτηση για το αποδεκτό ποσοστό των κενών που πληρώθηκαν με άσφαλο (VFA) εξαιρέθηκε στις τυποποιημένες προδιαγραφές του 2022.

Για την περαιτέρω ανάλυση της εφαρμογής της μεθόδου BMD στο Ιλινόις, παρουσιάζονται οι βασικές τροποποιήσεις των κριτηρίων ογκομετρικού σχεδιασμού που εφαρμόστηκαν από το IDOT, σε σύγκριση με τα βασικά πρότυπα της μεθόδου Superpave AASHTO M 323-20 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020) και AASHTO R 35-20 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020) . Συγκεκριμένα:

- Καθορίστηκε χαμηλότερος αριθμός περιστροφών (διελεύσεων) σχεδιασμού (Ndesign) για όλα τα ασφαλτομίγματα, συμπεριλαμβανομένων των μιγμάτων High ESAL και Low ESAL
- Αυξήθηκε η απαίτηση του ποσοστού VMA κατά 0,5% για όλα τα ασφαλτομίγματα των 19,0 mm και κατά 2,5% για τα μίγματα των 4,75 mm.

- Καθορίστηκε απαίτηση για την απομάκρυνση του μίγματος IL-4.75.
- Μειώθηκε η απαίτηση αναλογίας παιπάλης προς συνδετικό υλικό (Σημείωση: το IDOT χρησιμοποιεί την αναλογία παιπάλης προς συνολικό συνδετικό υλικό σε αντίθεση με την αναλογία παιπάλης προς αποτελεσματικό συνδετικό υλικό).

Οι παραπάνω αλλαγές αποσκοπούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας και της αντοχής έναντι ρηγματώσεων ενός ασφαλτομίγματος, επιτρέποντας την προσθήκη περισσότερου συνδετικού υλικού στο μίγμα χωρίς να διακυβεύεται η αντοχή του έναντι τροχοαυλακώσεων (όσο χαμηλότερος είναι ο Ndesign και όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό VMA, τόσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό για δεδομένο επίπεδο κενών αέρα).

Αναφορικά με την επιλογή των δοκιμών επιδόσεων και της καταλληλότητας τους επισημαίνεται πως τρεις ήταν οι κυριότεροι παράγοντες για το IDOT κατά την επιλογή μιας δοκιμής επιδόσεων. Συγκεκριμένα: ευαισθησία υλικού, επαλήθευση στο πεδίο και επαναληψιμότητα. Αναλυτικότερα, η δοκιμή θα πρέπει να είναι ευαίσθητη στις ιδιότητες ή τις αναλογίες των συστατικών του ασφαλτομίγματος (π.χ. αδρανή, συνδετικά, ανακυκλωμένα υλικά), στα κενά αέρα και στη γήρανση. Το IDOT αναγνωρίζει ότι μια δοκιμή που είναι σημαντικά ευαίσθητη στα υλικά θα έχει πιθανώς μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα της δοκιμής. Η επαλήθευση στο πεδίο και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών επιδόσεων με τα μετρούμενα δεδομένα επιδόσεων στο πεδίο αποτελεί τη βάση για κάθε προσέγγιση BMD και ήταν ένα από τα κίνητρα του IDOT για την εφαρμογή των δοκιμών επιδόσεων. Κατά τη διαδικασία επιλογής, εξετάστηκε επίσης η ικανότητα της δοκιμής επιδόσεων να παρέχει συνεπή αποτελέσματα που ακολουθούν τις τάσεις της κοινής λογικής και την κατάταξη των δοκιμαζόμενων ασφαλτομιγμάτων (με βάση τις εμπειρικές τιμές επιδόσεων ασφαλτομιγμάτων που έχουν προκύψει από χρόνιες παρατηρήσεις). Για το IDOT, τα αποτελέσματα των δοκιμών των τοπικών ασφαλτομιγμάτων δεν θα πρέπει να έρχονται σε αντίθεση με τις γνωστές και παρατηρούμενες επιδόσεις των οδοστρωμάτων στο πεδίο. Η ύπαρξη αποδεκτής επαναληψιμότητας (εντός των εργαστηρίων) και αναπαραγωγιμότητας (μεταξύ των εργαστηρίων) των αποτελεσμάτων των δοκιμών είναι το κλειδί για την επιτυχή εφαρμογή των προδιαγραφών.

Συνοψίζοντας, ο παραδοσιακός ογκομετρικός σχεδιασμός μίγματος δεν παρείχε βέλτιστη απόδοση για ασφαλτομίγματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένα υλικά, ενώ η χρήση της μεθόδου BMD, σε έργα πεδίου, επέτρεψε στους εργολάβους να βελτιστοποιήσουν τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών και να είναι σε θέση να παράγουν ασφαλτομίγματα που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του IDOT.

#### 4.1.2 Καλιφόρνια

Το Τμήμα Μεταφορών της Καλιφόρνια (Caltrans Department of Transportation-CDOT) αποτελεί μία από τις πρώτες Πολιτειακές Διοικήσεις Αυτοκινητοδρόμων που εφάρμοσαν τη μέθοδο BMD. Το CDOT χρησιμοποιεί επί του παρόντος την προσέγγιση Γ-τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων- για το σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων για οδοστρώματα μεγάλης διάρκειας ζωής. Αναλυτικότερα, αναφέρεται σε ασφατικά οδοστρώματα διάρκειας 40 ετών, με ελάχιστη συντήρηση της επιφανειακής στρώσης, όπου ο σχεδιασμός του ασφαλτομίγματος πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις των δοκιμών επιδόσεων με ελάχιστες απαιτήσεις για την ογκομετρία του μίγματος. Οι δοκιμές επιδόσεων που χρησιμοποιούνται για την έγκριση του σχεδιασμού και την επαλήθευση του τύπου μίγματος εργασίας (JMF) περιλαμβάνουν τη δοκιμή Flow Number (FN) για την αξιολόγηση της αντίστασης έναντι τροχοσυλακώσεων, τις δοκιμές Bending Beam Fatigue Test (BBF) και Illinois Flexibility Index Test (I-FIT) για την αξιολόγηση της αντίστασης σε ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και τέλος τη δοκιμή Hamburg Wheel-Tracking Test (HWTT) για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας.

Οι δοκιμές αυτές εφαρμόζονται σε θερμά ασφαλτομίγματα (HMA) τύπου A και σε RHMA-G (Rubberized Hot Mix Asphalt - Gap Graded). Αναλυτικότερα, τα μίγματα HMA τύπου A, είναι μίγματα πυκνής διαβάθμισης, ενώ στα μίγματα RHMA-G υπάρχει ένα κενό (Gap) στην κατανομή του μεγέθους των κόκκων. Πιο συγκεκριμένα, λείπει ένα συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων από τη ζώνη διαβάθμισης, συνήθως από το μεσαίο τμήμα της. Με άλλα λόγια, το μίγμα περιέχει πολλούς μεγάλους και μικρούς κόκκους, αλλά λίγους ή καθόλου κόκκους μεσαίου μεγέθους. Η απουσία αυτών των μεσαίων κόκκων δημιουργεί κενά στο μίγμα, τα οποία επιτρέπουν την προσθήκη μεγαλύτερων ποσοτήτων τροποποιημένου συνδετικού υλικού, προσδίδοντας στο μίγμα βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση.

Οι ογκομετρικές απαιτήσεις του CDOT για τα μίγματα HMA τύπου A και RHMA-G συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3. Σημειώνεται πως για τον βαθμό συμπίκνωσης των μιγμάτων ισχύουν τα ίδια με τη μέθοδο Superpave. Συγκεκριμένα, ο βαθμός συμπίκνωσης 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 διελεύσεων που έχει πραγματοποιηθεί. Αυτά τα σημεία είναι τα  $N_{initial}$ ,  $N_{design}$ ,  $N_{max}$ , των οποίων οι έννοιες περιγράφονται παρακάτω:

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

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

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

**Πίνακας 4.3: Ογκομετρικές απαιτήσεις CDOT για μίγματα HMA τύπου A και RHMA-G (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2021)**

Ογκομετρικές παράμετροι	Απαίτηση	
	Τύπος A HMA	RHMA-G
Περιεκτικότητα σε κενά αέρα $V_m$ (%)	8.0 στο $N_{initial}$ 4 στο $N_{design}$ 2,0 σε $N_{max}$	4 στο $N_{design}$
Βαθμός συμπίκνωσης	$N_{initial} = 8$ $N_{design} = 85$ $N_{max} = 130$	$N_{design} = 50-150$
VMA (min. %) Διαβάθμιση:		
No. 4 (4.75mm)	16.5-19.5	18-23
3/8'' (9.5mm)	15.5-18.5	
1/2'' (12.5mm)	14.5-17.5	
3/4'' (19mm)	13.5-16.5	
1'' (25mm) με NMA=1''	13.5-16.5	
NMA=3/4''	14.5-17.5	
Αναλογία παιπάλης προς συνδετικό υλικό	0.6-1.3	Απλή αναφορά

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τροποποιήσεις που εφαρμόζει το CDOT στα κριτήρια ογκομετρικού σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων, σε σύγκριση με τα πρότυπα AASHTO M 323-20 και AASHTO R 35-20 της μεθόδου Superpave. Συγκεκριμένα, καθορίστηκε:

- Χαμηλότερος αριθμός περιστροφών (διελεύσεων) για το σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων.
- Αύξηση της απαίτησης του ποσοστού VMA για θερμά ασφαλτομίγματα (HMA) τύπου A κατά 0,5-3,5% για τα μίγματα των 4.75, 9.5, 12.5 και 19.0 mm και κατά 1,5-4,5% για τα μίγματα των 25,0 mm.
- Αύξηση της απαίτησης του ποσοστού VMA κατά 4-9% για το RHMA-G και κατά 5-10% για τα μίγματα 12,5 και 19,0 mm.



- Αύξηση κατά 0,1 % του ανώτατου ορίου της απαίτησης αναλογίας παιπάλης προς ασφαλτικό συνδετικό υλικό για ασφαλτομίγματα HMA τύπου A.
- Εξαίρεση της απαίτησης για την αναλογία παιπάλης προς συνδετικό υλικό για τα μίγματα RHMA-G (Rubberized Hot Mix Asphalt - Gap Graded).

Οι παραπάνω αλλαγές αποσκοπούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας και της αντοχής σε ρηγματώσεις ενός ασφαλτομίγματος, επιτρέποντας την προσθήκη περισσότερου ασφαλτικού συνδετικού υλικού στο μίγμα, χωρίς να διακυβεύεται η αντοχή του έναντι τροχοαυλακώσεων (όσο χαμηλότερος είναι ο Ndesign και όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό VMA, τόσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό για δεδομένο επίπεδο κενών αέρα).

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, οι παραγωγοί ασφάλτου υποχρεούνται να διεξάγουν τη δοκιμή FN και τις δοκιμές I-FIT και HWTT στα μίγματα που παράγονται στο εργοστάσιο για τον έλεγχο της ποιότητας.

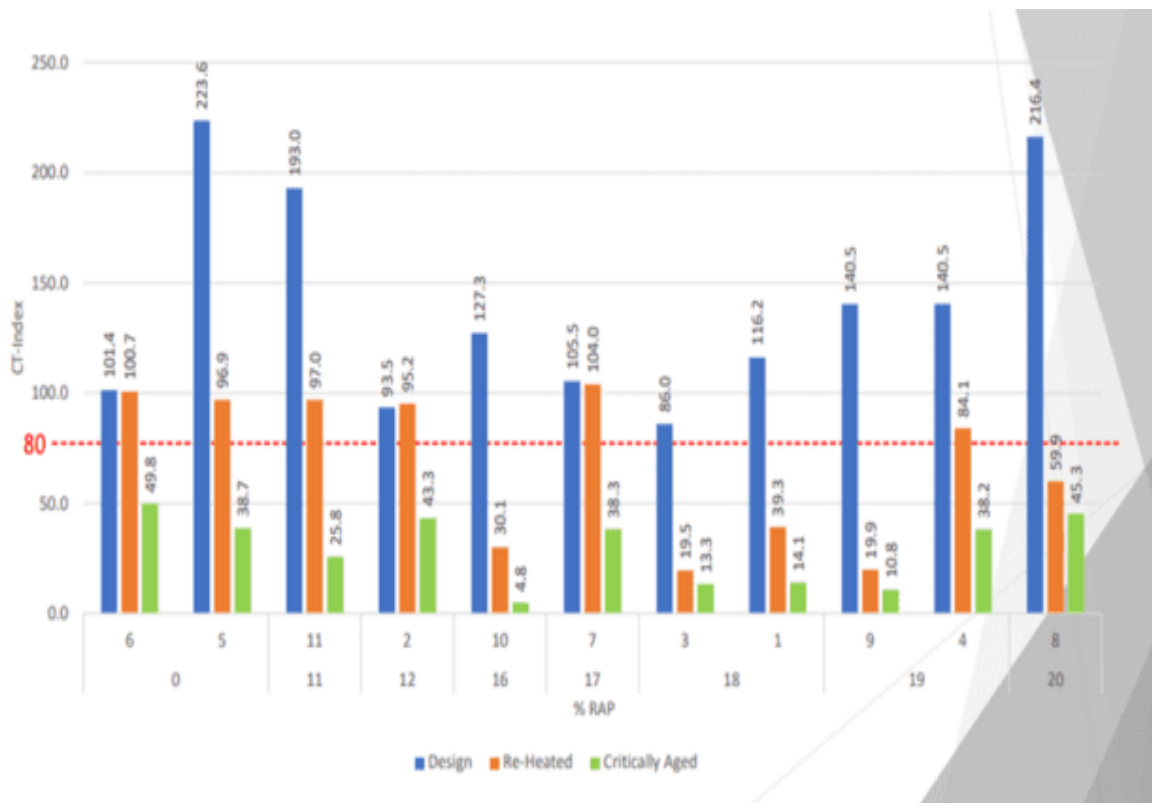
Αναφορικά με τις δοκιμές επιδόσεων για το CDOT οι τρεις κυριότεροι παράγοντες κατά την επιλογή μιας δοκιμής επιδόσεων για συνήθη χρήση ήταν οι ίδιες με το IDOT: ευαισθησία υλικού, επαλήθευση στο πεδίο και επαναληψιμότητα. Αναλυτικότερα, η δοκιμή θα πρέπει να είναι ευαίσθητη στις ιδιότητες ή τις αναλογίες των συστατικών του ασφαλτομίγματος (π.χ. αδρανή, ασφαλτικά συνδετικά, ανακυκλωμένα υλικά), στα κενά αέρα και στη γήρανση. Το CDOT αναγνωρίζει ότι μια δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης είναι πιθανό να έχει μεγαλύτερη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα της δοκιμής. Η επαλήθευση στο πεδίο και η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών επιδόσεων με τα μετρούμενα δεδομένα επιδόσεων στο πεδίο αποτελεί τη βάση για κάθε προσέγγιση BMD και ήταν ένα από τα κίνητρα του CDOT για την εφαρμογή των δοκιμών επιδόσεων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών των τοπικών ασφαλτομιγμάτων δεν πρέπει να έρχονται σε αντίθεση με τις γνωστές και παρατηρούμενες επιδόσεις των οδοστρωμάτων στο πεδίο. Η αποδεκτή επαναληψιμότητα (εντός των εργαστηρίων) και αναπαραγωγιμότητα (μεταξύ των εργαστηρίων) των αποτελεσμάτων των δοκιμών είναι το κλειδί για την επιτυχή εφαρμογή των προδιαγραφών.

### 4.1.3 Οκλαχόμα

Το Τμήμα Μεταφορών της Οκλαχόμα (Oklahoma Department of Transportation -ODOT) άρχισε να προχωρά στην εφαρμογή της μεθόδου BMD το 2017. Στην ισχύουσα διάταξη του ODOT, Balanced Mix Design Requirements, χρησιμοποιείται η προσέγγιση Γ-τροποποιημένος ογκομετρικός σχεδιασμός επιδόσεων. Η περιεκτικότητα σε κενά αέρος σχεδιασμού είναι 3,0% έως 4,0% σε Ndesign 50, 65 και 80 διελεύσεων για μίγματα που περιέχουν συνδετικό υλικό PG 64-xx, PG 70-xx και PG 76-xx, αντίστοιχα. Τα ελάχιστα κριτήρια VMA κυμαίνονται από 12,5% έως 16,5% σε συνάρτηση με το συνολικό NMAS.

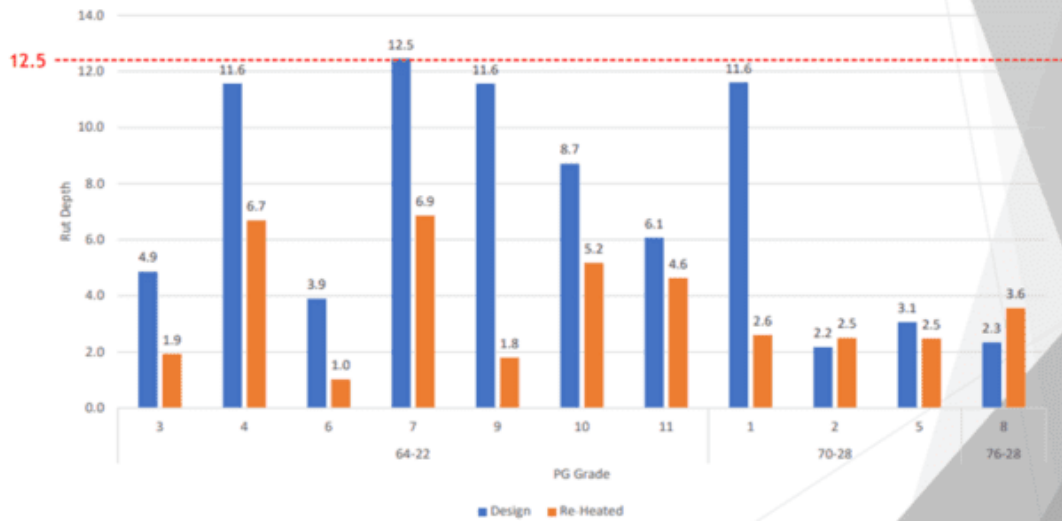
Οι δοκιμές επιδόσεων ασφαλτομίγματος που χρησιμοποιούνται είναι οι HWTT και IDEAL-CT. Και οι δύο δοκιμές διεξάγονται σε δοκίμια που έχουν υποστεί βραχυχρόνια συντήρηση για τέσσερις ώρες στους 135°C πριν από τη συμπύκνωση. Τα κριτήρια HWTT βασίζονται στον αριθμό των διελεύσεων για βάθος τροχοαυλακώσεων 12,5 mm στους 50°C, με το απαιτούμενο ελάχιστο όριο να ορίζεται σε 10.000, 15.000 και 20.000 διελεύσεις για μίγματα που περιέχουν συνδετικό υλικό PG 64-xx, PG 70-xx και PG 76-xx, αντίστοιχα. Το κριτήριο για τη δοκιμή IDEAL-CT είναι ο ελάχιστος δείκτης αντοχής έναντι ρηγματώσεων CT, η τιμή του οποίου πρέπει να είναι 80 για όλα τα μίγματα, ανεξάρτητα από την ποιότητα του πρωτογενούς συνδετικού υλικού.

Το ODOT ολοκλήρωσε 4 πιλοτικά έργα BMD το 2019 και το 2020 και 11 το 2022. Αξιολογώντας τα αποτελέσματά τους προκύπτει ότι με τη μέθοδο BMD επιτρέπεται η χρήση RAP σε ποσοστό έως και 40% για ασφαλτικά μίγματα με πιο μαλακό συνδετικό υλικό, η χρήση αναζωογονητών και τέλος οι ογκομετρικές απαιτήσεις γίνονται λίγο πιο ευέλικτες. Στις Εικόνες 4.2, 4.3 και 4.4. παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα από τα πιλοτικά έργα του 2022 από το πανεπιστήμιο του Κάνσας (Patrick, L., 2023). Επισημαίνεται, ότι οι τιμές των διαγραμμάτων αφορούν τρεις διαφορετικές καταστάσεις κάθε μίγματος. Αναλυτικότερα, η πρώτη κατάσταση αναφέρεται στις αρχικές συνθήκες του μίγματος, όπως σχεδιάστηκε (Design), η δεύτερη στο μίγμα που έχει υποστεί επαναθέρμανση (Re-Heated) και τέλος η τρίτη αφορά το μίγμα που έχει υποβληθεί σε συνθήκες γήρανσης (Critically Aged). Επίσης, οι κόκκινες γραμμές δείχνουν τα αποδεκτά όρια για τους αντίστοιχους δείκτες. Αναλυτικότερα, για τον δείκτη CT το ελάχιστο όριο αποδοχής είναι το 80% και για το βάθος αυλακώσεων τα 12.5 mm.



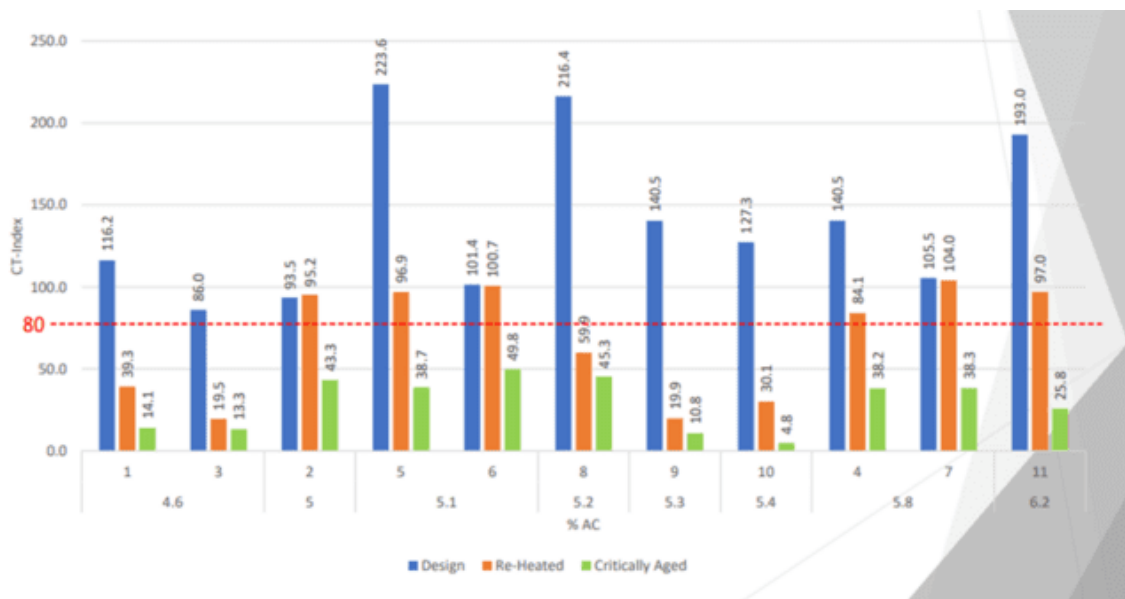
**Εικόνα 4.2: Επίδραση ποσοστού RAP σε δείκτη CT-index( University of Kansas, 2023)**

Αναφορικά με την επίδραση του ποσοστού RAP στο δείκτη CT παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό RAP στο μίγμα τόσο αυξάνεται και η απόκλιση ανάμεσα στην αναμενόμενη τιμή του δείκτη CT και στην πραγματική, επιβεβαιώνοντας τους (Zhou, Im, Sun, & Scullion, 2017) που υποστηρίζουν ότι η δοκιμή IDEAL-CT είναι ευαίσθητη στην περιεκτικότητα σε RAP.



**Εικόνα 4.3: Επίδραση βαθμού απόδοσης PG σε βάθος αυλακώσεων Rut Depth( University of Kansas, 2023)**

Όσον αφορά την επίδραση του βαθμού απόδοσης PG στο βάθος αυλακώσεων, επισημαίνεται ότι καθώς ο βαθμός του συνδετικού υλικού αυξάνεται μειώνεται το βάθος αυλακώσεων, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων για τα ασφαλτομίγματα που περιέχουν ένα πιο σκληρό συνδετικό υλικό έναντι ενός πιο μαλακού συνδετικού υλικού. Τονίζεται πως αυτό συμβαίνει και στις τρεις φάσεις των μιγμάτων, με τα μίγματα να διατηρούν χαμηλότερα βάθη αυλακώσεων σε υψηλότερους βαθμούς PG.



**Εικόνα 4.4: Επίδραση ασφαλτικού συνδετικού υλικού (AC) σε δείκτη CT-index (University of Kansas, 2023)**

Τέλος, αναφορικά με την επίδραση του ποσοστού ασφαλτικού συνδετικού υλικού στον δείκτη CT συμπεραίνεται πως τα μίγματα με υψηλότερο ποσοστό ασφαλτικού υλικού έχουν μεγαλύτερο δείκτη CT και συνεπώς μεγαλύτερη αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης. Ακόμα, το βέλτιστο ποσοστό συνδετικού υλικού κυμαίνεται μεταξύ 5-5.8%, καθώς τα μίγματα εμφανίζουν ικανοποιητικές τιμές και στις τρεις φάσεις.

#### 4.1.4 Λουϊζιάνα

Τα κίνητρα για την εφαρμογή της μεθόδου BMD στο Τμήμα Μεταφορών και Ανάπτυξης της Λουϊζιάνα (Louisiana Department of Transportation and Development-LaDOTD) ήταν κυρίως δύο. Το πρώτο ήταν πως υπήρχε άμεση ανάγκη να αντιμετωπιστούν οι παρατηρούμενες πρόωρες αστοχίες των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, ως αποτέλεσμα της σημαντικής αύξησης του όγκου κυκλοφορίας και το δεύτερο ότι υπήρχε η επιθυμία για υπεύθυνη χρήση καινοτόμων και ανακυκλωμένων υλικών για τη βελτίωση της απόδοσης των ασφαλτικών οδοστρωμάτων. Οι αρχικές προδιαγραφές του LaDOTD είχαν ως αποτέλεσμα δύσκαμπτα και εύθραυστα ασφαλτομίγματα, που ήταν επιρρεπή σε πρόωμη ρηγμάτωση και σε προβλήματα ανθεκτικότητας.

Αναλυτικότερα, με τη σημαντική αύξηση του όγκου κυκλοφορίας στους αυτοκινητοδρόμους, το LaDOTD παρατήρησε ότι τα ασφαλτικά οδοστρώματα που κατασκευάστηκαν με αποδεκτά επίπεδα ποιότητας σύμφωνα με τις προδιαγραφές άρχισαν να παρουσιάζουν συχνότερα πρόωρες αστοχίες. Επιπλέον, η αύξηση του ενδιαφέροντος για τη χρήση τροποποιημένων συνδετικών υλικών και RAP κατέστησε δύσκολο για το LaDOTD να διασφαλίσει επαρκώς τη μακροπρόθεσμη απόδοση των ασφαλτικών μιγμάτων με τις συμβατικές πρακτικές ελέγχου ποιότητας, οι οποίες βασίζονται κυρίως στις ογκομετρικές ιδιότητες (π.χ. VMA, κενά αέρα). Κατά συνέπεια, το LaDOTD άρχισε να εξετάζει τη χρήση διευρυμένων δοκιμών επιδόσεων, όπως αυτών της μεθόδου BMD για τον έλεγχο ποιότητας στα ασφαλτομίγματα που εφαρμόζονται στην περιοχή ευθύνης της.

Το LaDOTD εφάρμοσε τη μέθοδο BMD στα τέλη του 2015. Με βάσει τις τρέχουσες προδιαγραφές του LaDOTD, Standard Specifications for Roads and Bridges, απαιτείται η προσέγγιση A (Ογκομετρικός σχεδιασμός με επαλήθευση επιδόσεων) σε όλα τα ασφαλτομίγματα. Ο σχεδιασμός του μίγματος απαιτείται να πληροί τόσο τις ογκομετρικές απαιτήσεις όσο και τις απαιτήσεις δοκιμών επιδόσεων. Η περιεκτικότητα σε κενά αέρος σχεδιασμού είναι 3,5%, σε Ndesign 55 ή 65 διελεύσεων ανάλογα με το επίπεδο κυκλοφορίας και τον τύπο του μίγματος. Τα ελάχιστα κριτήρια VMA κυμαίνονται από 11,5 έως 13,5% σε συνάρτηση με το NMAS των αδρανών. Άλλες ογκομετρικές απαιτήσεις μίγματος περιλαμβάνουν το ποσοστό VFA και τον λόγο D/B.

Οι δοκιμές που χρησιμοποιεί το LaDOTD είναι η δοκιμή HWTT και η δοκιμή SCB-Jc. Η δοκιμή HWTT διεξάγεται στους 50°C και εφαρμόζεται για την αξιολόγηση της αντίστασης του μίγματος έναντι τροχοαυλακώσεων. Τα κριτήρια δοκιμής βασίζονται στο συνολικό

βάθος αυλακώσεων σε 20.000 διελεύσεις, όπου ορίζεται μέγιστο όριο 10 mm για μίγματα που αφορούν οδοστρώματα με χαμηλή ή μέτρια κυκλοφορία και 6 mm για τα μίγματα που προορίζονται για πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως κύριοι αυτοκινητόδρομοι και περιοχές με υψηλή κυκλοφορία, όπου οι απαιτήσεις για αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων είναι πιο αυστηρές.

Η δοκιμή SCB-Jc απαιτεί να πληρούνται οι απαιτήσεις των δοκιμών επιδόσεων με ορισμένες από τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις να έχουν χαλαρώσει ή να έχουν καταργηθεί. Επίσης, χρησιμοποιείται και η δοκιμή I-FIT για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσεων. Το JMF θεωρείται επικυρωμένο με επιτυχή αποτελέσματα της δοκιμής HWTT. Τα αποτελέσματα των δοκιμών SCB-Jc και I-FIT προορίζονται μόνο για ενημερωτικούς σκοπούς.

Συμπερασματικά, η χρήση της μεθόδου BMD σε έργα πεδίου επέτρεψε στους εργολάβους να χρησιμοποιήσουν καινοτόμα και ανακυκλωμένα υλικά, προκειμένου να παράγουν ασφαλτομίγματα, που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του LaDOTD. Οι δοκιμές επιδόσεων βοήθησαν στο σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων με υψηλότερη περιεκτικότητα σε RAP- επιτρέποντας έτσι την παραγωγή οικονομικών και φιλικών προς το περιβάλλον ασφαλτομιγμάτων χωρίς να διακυβεύεται η απόδοσή τους. Το LaDOTD πιστεύει ότι η εφαρμογή της μεθόδου BMD είναι πιθανό να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους, παρέχοντας στους παρασκευαστές μεγαλύτερη ευελιξία κατά το σχεδιασμό των ασφαλτομιγμάτων και επιτρέποντας περισσότερες ευκαιρίες για τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η απόδοση των οδοστρωμάτων.

#### **4.1.5 Βιρτζίνια**

Το Τμήμα Μεταφορών της Βιρτζίνια (Virginia Department of Transportation -VDOT) βρίσκεται στη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου BMD. Το VDOT επιτρέπει δύο διαφορετικές προσεγγίσεις BMD για το σχεδιασμό και την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων στις πιο πρόσφατες ειδικές διατάξεις του, Balanced Mix Design Surface Mixtures Designed Using Performance Criteria και High Reclaimed Asphalt Pavement Content Surface Mixtures Designed using Performance Criteria, τις προσεγγίσεις Α και Δ. Σημειώνεται ότι τα " μίγματα υψηλής περιεκτικότητας σε ποσοστά RAP" αναφέρονται σε ασφαλτικά μίγματα που περιέχουν ποσοστό RAP 40% ή περισσότερο, ενώ τα τρέχοντα σχέδια μίγματος Superpave δεν επιτρέπεται να έχουν ποσοστό RAP περισσότερο από 30%. Η πρώτη προσέγγιση BMD απαιτεί να πληρούνται οι ογκομετρικές απαιτήσεις, αλλά και οι απαιτήσεις των δοκιμών επιδόσεων (προσέγγιση Α).

Στη δεύτερη προσέγγιση της μεθόδου BMD (προσέγγιση Δ) οι απαιτήσεις για το εύρος των αδρανών υλικών του μίγματος σχεδιασμού και τις ογκομετρικές ιδιότητες καταργούνται- ωστόσο, οι απαιτήσεις NMAΣ εξακολουθούν να ισχύουν. Το

ασφαλτόμιγμα με την περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό σχεδιασμού πρέπει να πληροί τα κριτήρια επιδόσεων έναντι ρηγματώσης, τροχοαυλάκωσης και ανθεκτικότητας. Ο σχεδιασμός του μίγματος βασίζεται καθαρά στα αποτελέσματα των δοκιμών επιδόσεων του μίγματος χωρίς απαιτήσεις σχετικά με την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών (εκτός από το NMAS), την ποιότητα του συνδετικού υλικού και τις ογκομετρικές ιδιότητες.

Οι δοκιμές επιδόσεων που χρησιμοποιούνται και στις δύο προσεγγίσεις BMD είναι οι APA, Cantabro και IDEAL-CT για την αξιολόγηση της αντίστασης έναντι τροχοαυλακώσεων, της συνολικής ανθεκτικότητας και της αντίστασης έναντι ρηγματώσεων, αντίστοιχα. Η δοκιμή APA διεξάγεται στους 64°C. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε προετοιμασία για δύο ώρες στη θερμοκρασία συμπύκνωσης σχεδιασμού. Για να θεωρηθεί επιτυχής η δοκιμή, το βάθος αυλακώσεων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 8,0 mm σε 8.000 περάσματα. Η μέγιστη αποδεκτή απώλεια μάζας στη δοκιμή Cantabro καθορίζεται στο 7,5%, ενώ η ελάχιστη αποδεκτή τιμή του δείκτη CT για την επιτυχία της δοκιμής είναι 70. Οι απαιτήσεις για τον ογκομετρικό σχεδιασμό και τις δοκιμές επιδόσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.4 και 4.5:

**Πίνακας 4.4: Προδιαγραφές του VDOT για τις απαιτήσεις ογκομετρικού σχεδιασμού για την προσέγγιση A (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2022)**

Τύπος μίγματος	Απαιτούμενη πυκνότητα (% του Gmm)	VMA (ελάχιστο %)					VFA (%)	D/B	Ndesign
		NMAS (mm)							
		25	19	12.5	9.5	4.75			
NMA <sub>s</sub> =9.5mm - μέτρια κυκλοφορία	96	-	-	-	16.0	-	75-80	0.7-1.3	50
NMA <sub>s</sub> =9.5mm - υψηλή κυκλοφορία	96	-	-	-	16.0	-	75-80	0.7-1.3	50
NMA <sub>s</sub> =12.5mm - μέτρια κυκλοφορία	96	-	-	15.0	-	-	73-79	0.7-1.3	50
NMA <sub>s</sub> =9.5mm - υψηλή κυκλοφορία	96	-	-	15.0	-	-	73-79	0.7-1.3	50

**Πίνακας 4.5: Προδιαγραφές VDOT για τις απαιτήσεις δοκιμών επιδόσεων σχεδιασμού μίγματος (προσέγγιση A&Δ) (Hajj, Aschenbrener, & Nener-Plante, 2022)**

Παράμετρος δείκτη	Πρότυπο Δοκιμής	Κριτήρια
Απώλεια μάζας Cantabro	AASHTO TP 108	$\leq 7.5\%$
CTindex	ASTM D8225	$\geq 70$ στους $25^{\circ}\text{C}$
APA βάθος αυλακώσεων	AASHTO T 340	$\leq 8,0$ mm μετά από 8.000 περάσματα στους $64^{\circ}\text{C}$
TSR	AASHTO T 283	$\geq 0,80$ στους $25^{\circ}\text{C}$

Σε σύγκριση με τα πρότυπα AASHTO M 323-20 και AASHTO R 35-20 της μεθόδου Superpave, λόγω των συνεχιζόμενων ανησυχιών σχετικά με την ανθεκτικότητα του μίγματος, το VDOT εφάρμοσε το 2016 τις ακόλουθες βασικές τροποποιήσεις στα κριτήρια ογκομετρικού σχεδιασμού:

- Καθορίστηκαν 50 περιστροφές-διελεύσεις για το σχεδιασμό και την αποδοχή των επιφανειακών μιγμάτων BMD ή υψηλής περιεκτικότητας σε ποσοστά RAP.
- Αυξήθηκε η απαίτηση του ποσοστού VMA κατά 1% και για τα δύο NMAS των 9,5 και 12,5 mm.
- Γενικά, αυξήθηκαν τα κατώτερα και ανώτερα όρια των κενών που γεμίζουν με άσφαλτο (VFA).
- Αυξήθηκε το κατώτερο και του ανώτερο όριο του λόγου παιπάλης προς συνδετικό υλικό κατά 0,1.

Οι παραπάνω αλλαγές αποσκοπούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας και της αντοχής σε ρηγμάτωση ενός ασφαλτομίγματος, αφήνοντας περισσότερο ασφαλτικό συνδετικό υλικό στο μίγμα, χωρίς να διακυβεύεται η αντοχή του σε τροχοαυλακώσεις (όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό VMA, τόσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα ασφαλτικού συνδετικού υλικού για δεδομένο επίπεδο κενών αέρα).

Το VDOT ολοκλήρωσε συνολικά πέντε πιλοτικά έργα το 2019 και το 2020. Τέσσερα από τα πέντε έργα χρησιμοποίησαν μίγματα BMD με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP, με μαλακότερο συνδετικό υλικό PG 58-28, ενώ το πέμπτο χρησιμοποίησε το τυπικό μίγμα παραγωγής με ποσοστό RAP 26%.

Η προδιαγραφή μίγματος με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP ήταν μοναδική για τους ακόλουθους δύο λόγους:

- Η προδιαγραφή προέβλεπε την προσθήκη τουλάχιστον (και όχι κατ' ανώτατο όριο) 40% RAP. Η ελάχιστη περιεκτικότητα σε RAP καθορίστηκε για να διαφοροποιηθεί από τα παραδοσιακά ασφαλτομίγματα με μέγιστο ποσοστό RAP 30%.



- Η προδιαγραφή δεν προέβλεπε συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης PG του ασφαλτικού συνδετικού υλικού. Κάθε βαθμός PG επιτρεπόταν υπό την προϋπόθεση ότι το ασφαλτόμιγμα πληρούσε όλες τις απαιτούμενες απαιτήσεις ογκομετρικών ιδιοτήτων ή/και δοκιμών επιδόσεων.

Η χρήση της μεθόδου BMD σε δοκιμαστικά έργα πεδίου επέτρεψε στους εργολάβους να χρησιμοποιήσουν καινοτόμα και ανακυκλωμένα υλικά (π.χ. RAP, RAS, PG των ασφαλτικών συνδετικών υλικών) προκειμένου να παράγουν ασφαλτομίγματα που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του VDOT. Επιπλέον, ο παραδοσιακός ογκομετρικός σχεδιασμός μίγματος δεν παρείχε βέλτιστη απόδοση για ασφαλτομίγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP. Οι δοκιμές επιδόσεων βοήθησαν στο σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε RAP που είχαν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντοχή έναντι των βασικών τύπων αστοχίας των οδοστρωμάτων-τροχοαυλάκωση, ρηγματώση- επιτρέποντας έτσι την παραγωγή οικονομικών και φιλικών προς το περιβάλλον ασφαλτομιγμάτων, χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση.

#### 4.1.6 Βερμόντ

Το Τμήμα Μεταφορών του Βερμόντ (VTrans) ανέπτυξε μια ειδική προδιαγραφή για τη μέθοδο BMD, τη Superpave Bituminous Concrete Pavement, Performance Engineered Method», το 2019. Αυτή η ειδική προδιαγραφή απαιτεί την προσέγγιση A, του ογκομετρικού σχεδιασμού με επαλήθευση επιδόσεων, όπου τα ασφαλτικά μίγματα απαιτείται να πληρούν τόσο τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις της Superpave όσο και τις απαιτήσεις των δοκιμών επιδόσεων. Η περιεκτικότητα σε κενά αέρος σχεδιασμού είναι  $4,0 \pm 1,0\%$ , σε Ndesign 65 διελεύσεων και το ελάχιστο κριτήριο VMA είναι 16,5%.

Οι δοκιμές που χρησιμοποιούνται είναι οι HWTT και I-FIT. Η δοκιμή HWTT διεξάγεται στους  $45 \pm 1,0^\circ\text{C}$  για την αξιολόγηση της αντίστασης έναντι τροχοαυλακώσεων και της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας. Τα κριτήρια δοκιμής περιλαμβάνουν μέγιστο βάθος αυλακώσεων 10,0 mm σε 20.000 διελεύσεις και ελάχιστο όριο 15.000 διελεύσεων για το σημείο καμψής αποκόλλησης υλικού (SIP). Η αντίσταση έναντι ρηγματώσεων του μίγματος αξιολογείται με τη χρήση της δοκιμής I-FIT. Για να θεωρηθεί επιτυχής η δοκιμή, η ελάχιστη τιμή του δείκτη FI πρέπει να είναι 10.

#### 4.1.7 Τέξας

Με την αύξηση της χρήσης των υλικών RAP και RAS, τα ασφαλτομίγματα άρχισαν να παρουσιάζουν πρόωρη αστοχία ή δεν απέδιδαν, όπως αρχικά προβλεπόταν. Κατά συνέπεια, το Τμήμα Μεταφορών του Τέξας (Texas Department of Transportation-TxDOT) άρχισε να εξετάζει τη χρήση των δοκιμών επιδόσεων και της μεθόδου BMD. Ένα νέο πρότυπο, το (TxDOT SS 3074, 2019) Mixtures - Balanced Mix Design αναπτύχθηκε για την παραγωγή ασφαλτομιγμάτων με ικανοποιητική ογκομετρική και μηχανική απόδοση.

Το πρότυπο SS 3074 στοχεύει στη βελτίωση της απόδοσης των ασφαλτικών οδοστρωμάτων μέσω της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών στα ασφαλτικά μίγματα. Για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των ασφαλτομιγμάτων κατά τη διαδικασία σχεδιασμού χρησιμοποιούνται οι δοκιμές HWTT και OT.

Το TxDOT έχει μακρά ιστορία στη χρήση δοκιμών επιδόσεων για την έγκριση του σχεδιασμού μίγματος, καθώς αποτελεί μία από τις πρώτες έξι Πολιτειακές Διοικήσεις Αυτοκινητοδρόμων που εφάρμοσαν τη μέθοδο BMD. Η προσέγγιση BMD, η οποία καθορίζεται στην πιο πρόσφατη προδιαγραφή του TxDOT, την ειδική προδιαγραφή 3074: Superpave Mixtures - Balanced Mix Design, είναι η προσέγγιση A: Ογκομετρικού σχεδιασμού με επαλήθευση επιδόσεων, όπου όλα τα μίγματα απαιτείται να πληρούν τις υφιστάμενες ογκομετρικές απαιτήσεις, καθώς και τις απαιτήσεις των δοκιμών επιδόσεων. Η περιεκτικότητα σε κενά αέρος σχεδιασμού είναι 4,0% με βάση το Ndesign 50 διελεύσεων για όλα τα επίπεδα κυκλοφορίας, αν και το Ndesign μπορεί να μειωθεί σε τουλάχιστον 35 διελεύσεις κατά την κρίση του αναδόχου. Το ελάχιστο κριτήριο VMA του μίγματος (12,5 mm NMAS) είναι 15,0 % για το σχεδιασμό του μίγματος και 14,5% για την παραγωγή.

Η δοκιμή HWTT χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης του μίγματος έναντι τροχοαυλακώσεων και για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των μιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας. Το κριτήριο της βασίζεται στον αριθμό των περασμάτων σε βάθος αυλακώσεων 12,5 mm, όπου καθορίζεται ελάχιστο όριο 10.000, 15.000 και 20.000 περασμάτων για μίγματα που περιέχουν PG 64 (ή χαμηλότερο), PG 70 και PG 76 (ή υψηλότερο) συνδετικό υλικό, αντίστοιχα.

Η αντίσταση του μίγματος έναντι ρηγματώσεων αξιολογείται με τη χρήση της δοκιμής OT κατά το πρότυπο T-248-F. Τα κριτήρια δοκιμής περιλαμβάνουν ελάχιστο όριο για την κρίσιμη ενέργεια θραύσης 1,0 in.-lb/in.<sup>2</sup>. Εάν ο σχεδιασμός του μίγματος καλύψει τις απαιτήσεις των δοκιμών HWTT και OT, τότε θα διεξαχθούν πρόσθετες δοκιμές OT και IDEAL-CT στο ποσοστό OBC και σε πρόσθετες περιεκτικότητες του ποσοστού OBC  $\pm 0,5\%$ .

Εάν τα αποτελέσματα καλύψουν τις απαιτήσεις των δοκιμών HWTT και OT για την έγκριση του σχεδιασμού μίγματος, ο ανάδοχος επιτρέπεται να προχωρήσει στην παραγωγή του χρησιμοποιώντας τον αρχικό σχεδιασμό μίγματος (JMF1). Διαφορετικά, ο ανάδοχος πρέπει να κάνει προσαρμογές στις αναλογίες του μίγματος και να υποβάλει αναθεωρημένο σχέδιο μίγματος για παραγωγή (JMF2). Σε αυτή την περίπτωση, θα διεξαχθούν οι δοκιμές HWTT, IDEAL-CT και ενδεχομένως και η δοκιμή OT (εάν η δοκιμή IDEAL-CT δεν πληροί το όριο συσχέτισης) στα μίγματα του αρχικού μίγματος για σκοπούς επαλήθευσης της συμμόρφωσης.

Από τον Οκτώβριο του 2020, το TxDOT έχει ολοκληρώσει τέσσερα έργα στις περιοχές Ατλάντα, Σαν Αντόνιο και Γιόκουμ.

#### 4.1.8 Τενεσί

Το Τμήμα Μεταφορών του Τενεσί (TDOT) αποφάσισε να προχωρήσει στην εφαρμογή της μεθόδου BMD και ανέπτυξε ένα προσχέδιο μιας μελλοντικής προδιαγραφής, Performance Based Mix Design of Asphalt Mixtures, το 2020. Η προδιαγραφή θα επιτρέπει στους εργολάβους να σχεδιάζουν ασφαλτομίγματα χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του σχεδιασμού βάσει επιδόσεων χωρίς απαιτήσεις σχετικά με την ογκομέτρηση του μίγματος. Οι αναμενόμενες δοκιμές επιδόσεων για την έγκριση του σχεδιασμού μίγματος είναι οι HWTT και IDEAL-CT. Τα κριτήρια των δοκιμών επιδόσεων για την έγκριση του σχεδιασμού του ασφαλτομίγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6: Κριτήρια δοκιμής επιδόσεων TDOT για την έγκριση σχεδιασμού μίγματος (Yin & West, 2021)**

Ταξινόμηση οδών	HWTT (12,5 mm)	HWTT SIP	IDEAL-CT CTindex
Κρατικές οδοί < 10.000 ADT	≥ 10,000	≥ 10,000	≥ 50
Κρατικές οδοί > 10.000 ADT	≥ 15,000	≥ 10,000	≥ 75
Διαπολιτειακές και κρατικές οδοί ελεγχόμενης πρόσβασης	≥ 20,000	≥ 10,000	≥ 100

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των δοκιμών HWTT και IDEAL-CT με βάση τις οδούς και την μέση ημερήσια κυκλοφορία τους (Average Daily Traffic-ADT). Αναλυτικότερα, η κατηγοριοποίηση των οδών περιλαμβάνει δρόμους που δεν είναι αυτοκινητόδρομοι ή δρόμοι υψηλής ταχύτητας με περιορισμένη είσοδο/έξοδο και που έχουν λιγότερα από 10.000 οχήματα κατά μέσο όρο την ημέρα. Επίσης, αναφέρεται στην ίδια κατηγορία οδών που έχουν όμως περισσότερα από 10.000 οχήματα κατά μέσο όρο την ημέρα και τέλος σε δρόμους που είναι σχεδιασμένοι για να διαχειρίζονται μεγαλύτερους όγκους κυκλοφορίας και συνήθως έχουν χαρακτηριστικά, όπως λωρίδες εισόδου και εξόδου, διαχωριστικές νησίδες και περιορισμένη πρόσβαση σε διασταυρώσεις.

Το TDOT δεν έχει αποφασίσει σχετικά με τις διαδικασίες για την αποδοχή της παραγωγής των μιγμάτων BMD. Εξετάζονται δύο επιλογές, η πρώτη επιλογή είναι η αποδοχή της

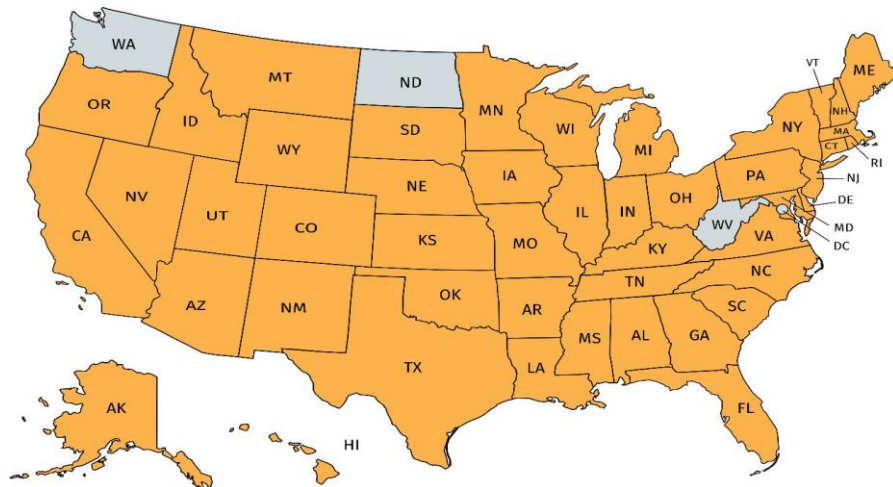
παραγωγής με βάση τη περιεκτικότητα σε ασφαλικό συνδετικό υλικό και τη κοκκομετρική διαβάθμιση. Η δεύτερη επιλογή είναι να καθοριστεί η αποδοχή της παραγωγής με βάση τα αποτελέσματα της ογκομέτρησης και των δοκιμών επιδόσεων- σε αυτή την περίπτωση, η δοκιμή IDEAL-CT και μια δοκιμή έναντι τροχοαυλακώσεων που δεν έχει ακόμη καθοριστεί, θα διεξάγονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής σε μίγματα που παράγονται στο εργοστάσιο.

## 4.2 Ειδική έρευνα για την αξιολόγηση της μεθόδου

### 4.2.1 Αντικείμενο έρευνας

Στο πλαίσιο αξιολόγησης της μεθόδου BMD πραγματοποιήθηκε μία διαδικτυακή έρευνα σχετικά με την αναγκαιότητα, την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, αλλά και τις ανησυχίες που προκαλούνται σχετικά με την εφαρμογή της. Στην έρευνα αυτή συμμετείχαν πολιτειακά τμήματα μεταφορών των ΗΠΑ, τα οποία έχουν ήδη εφαρμόσει ή ετοιμάζονται να εφαρμόσουν δοκιμές επιδόσεων στα ασφαλτομίγματα τους, αλλά και κατασκευαστές έργων οδοποιίας που ήδη εφαρμόζουν ή εξετάζουν την εφαρμογή της μεθόδου BMD.

Συγκεκριμένα, το 2017 διεξήχθη μία διαδικτυακή έρευνα στο πλαίσιο του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP), στην οποία συμμετείχαν 50 πολιτειακά τμήματα μεταφορών των ΗΠΑ, εκ των οποίων τα 44 ανταποκρίθηκαν θετικά και απάντησαν στις ερωτήσεις της έρευνας. Ακόμα, συμμετείχαν και κατασκευαστές έργων οδοποιίας, που δραστηριοποιούνται στις ΗΠΑ και στον Καναδά, από τους οποίους ελήφθησαν 51 απαντήσεις από 34 πολιτείες των ΗΠΑ και δύο επαρχίες του Καναδά. Στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται ο χάρτης με τις συμμετέχουσες πολιτείες των ΗΠΑ στην έρευνα.

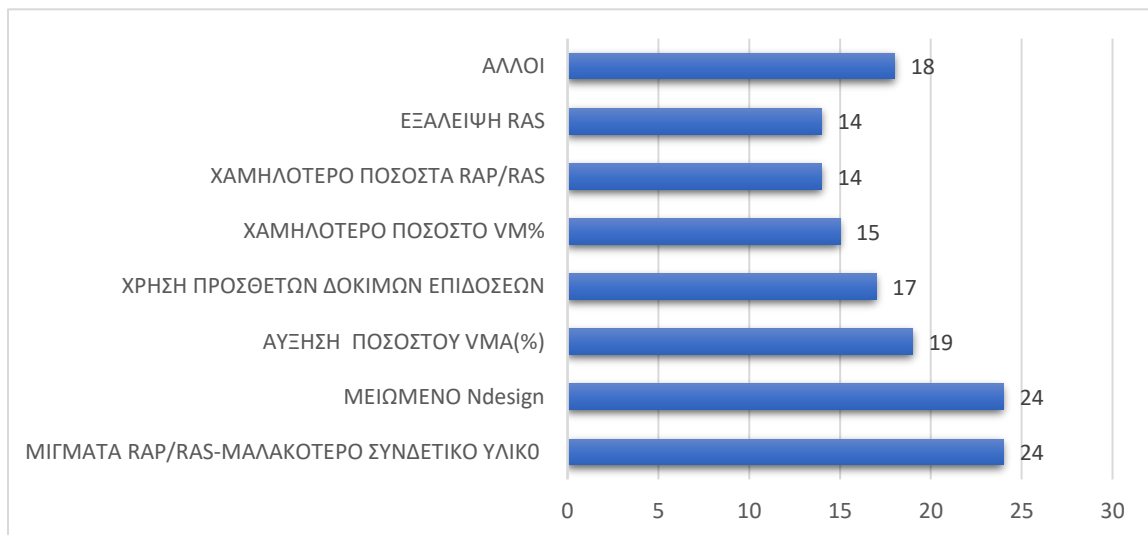


Εικόνα 4.5: Χάρτης των ΗΠΑ με τις συμμετέχουσες πολιτείες στην έρευνα (West, et al., 2018)

Οι ερωτήσεις που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα επικεντρώθηκαν στις υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων που εφαρμόζουν οι πολιτείες και οι κατασκευαστές έργων οδοποιίας, στους τύπους φθοράς των οδοστρωμάτων που αντιμετωπίζουν συχνότερα, καθώς και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου BMD.

#### 4.2.2 Υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων

Αναφορικά με τις υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να συντάξουν έναν κατάλογο των αλλαγών που έχουν ήδη εφαρμοστεί στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων (West, et al., 2018)

Αναλυτικότερα, 24 οργανισμοί ανέφεραν ότι έκαναν αλλαγές που απαιτούσαν τη χρήση μαλακότερων συνδετικών υλικών για μίγματα που περιέχουν ποσοστά RAP/RAS. Ακόμα, 24 φορείς μείωσαν τον αριθμό διελεύσεων σχεδιασμού (Ndesign). Επιπλέον, περισσότεροι από 13 φορείς αύξησαν το ποσοστό των κενών ανάμεσα στα αδρανή (VMA), πρόσθεσαν δοκιμές επιδόσεων και μείωσαν το επιτρεπτό ποσοστό των κενών αέρα σχεδιασμού (VM). Ακόμα, άλλοι μείωσαν τις επιτρεπόμενες περιεκτικότητες σε ποσοστά RAP και RAS ή εξάλειψαν τελείως τη χρήση RAS. Σημειώνεται ότι υπήρχαν και άλλες αλλαγές που επισημάνθηκαν από τους οργανισμούς και περιλάμβαναν τη χρήση αναζωογονητών και τη μείωση του λόγου παιπάλης προς συνδετικό υλικό (D/P).

Στη συνέχεια, τους ζητήθηκε να επιλέξουν τα υφιστάμενα κριτήρια σχεδιασμού ασφαλτομίγματος που θα μπορούσαν να χαλαρώσουν ή να καταργηθούν, χωρίς όμως να

επηρεαστεί η απόδοση του μίγματος. Οι απαντήσεις τους συνοψίζονται στους Πίνακες 4.7 και 4.8.

**Πίνακας 4.7: Υφιστάμενα κριτήρια σχεδιασμού ασφαλτομίγματος- τμήματα μεταφορών (West, et al., 2018)**

Κριτήρια σχεδιασμού μίγματος	Καμία αλλαγή	Μετρίαση	Εξάλειψη
% Gmm στο Ni	19%	36%	45%
% Gmm σε Nm	22%	37%	41%
VFA (%)	37%	39%	24%
VM (%)	53%	42%	5%
Λόγος D/P	54%	34%	12%
TSR	63%	15%	23%
VMA (%)	67%	24%	10%

**Πίνακας 4.8: Υφιστάμενα κριτήρια σχεδιασμού ασφαλτομίγματος-κατασκευαστές έργων οδοποιίας (West, et al., 2018)**

Κριτήρια σχεδιασμού μίγματος	Καμία αλλαγή	Μετρίαση	Εξάλειψη
% Gmm στο Ni	13%	28%	59%
% Gmm σε Nm	19%	27%	54%
VFA (%)	31%	43%	26%
VM (%)	37%	53%	0%
Λόγος D/P	33%	49%	18%
TSR	51%	23%	26%
VMA (%)	36%	53%	11%

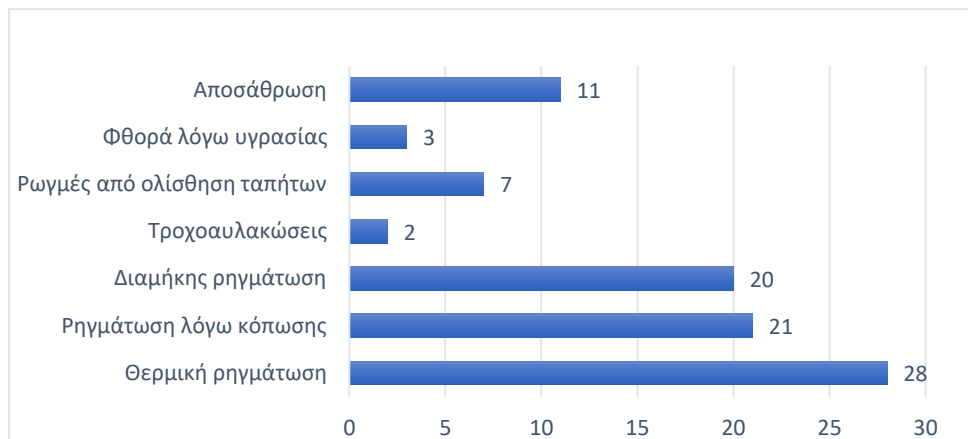
Η πλειονότητα των ερωτηθέντων, δηλαδή πάνω από το 50% ανέφερε ότι τα κριτήρια που αφορούν το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος %Gmm στα επίπεδα συμπίκνωσης Ni και Nmax, καθώς και το κριτήριο που αφορά τα κενά που πληρώθηκαν με άσφαλτο (VFA) θα μπορούσαν να χαλαρώσουν ή να καταργηθούν. Ωστόσο, οι υφιστάμενες απαιτήσεις για το ποσοστό VMA, τον λόγο αντοχής σε εφελκυσμό (TSR), τον λόγο παιπάλης προς συνδετικό υλικό D/P και το ποσοστό των κενών αέρα VM θα πρέπει να διατηρηθούν.

### 4.2.3 Τύποι φθοράς οδοστρωμάτων

Έπειτα, η έρευνα επικεντρώθηκε στους τύπους φθοράς των οδοστρωμάτων που αντιμετωπίζουν συχνότερα τόσο τα τμήματα μεταφορών όσο και οι κατασκευαστές έργων οδοποιίας. Οι απαντήσεις τους συνοψίζονται στις Εικόνες 4.7 και 4.8. Συγκεκριμένα, από τις απαντήσεις των τμημάτων μεταφορών προέκυψε ότι οι τρεις τύποι φθοράς που εμφανίζονται πιο συχνά, είναι η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, η τροχοαυλάκωση και η θερμική ρηγμάτωση.



**Εικόνα 4.7: Τύποι αστοχίας οδοστρωμάτων-Τμήματα Μεταφορών (West, et al., 2018)**



**Εικόνα 4.8: Τύποι αστοχίας οδοστρωμάτων -κατασκευαστές έργων οδοποιίας (West, et al., 2018)**

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από τις απαντήσεις των κατασκευαστών έργων οδοποιίας, από τις οποίες προκύπτει ότι οι πιο συχνοί τύποι αστοχιών είναι η θερμική ρηγμάτωση και η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης.

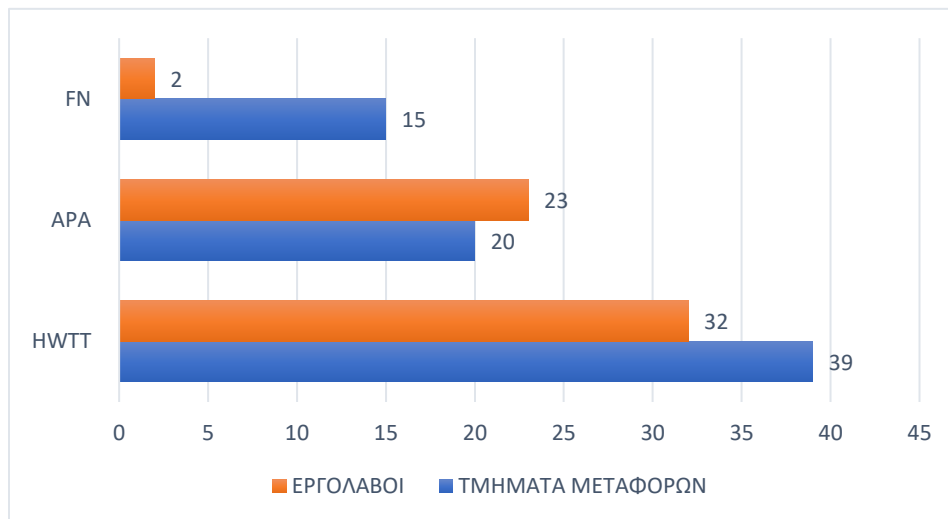
#### 4.2.4 Δοκιμές επιδόσεων

Αφού, λοιπόν, εντοπίστηκαν οι τύποι φθοράς των οδοστρωμάτων σημειώθηκαν οι δοκιμές επιδόσεων που χρησιμοποιούν για την αντιμετώπιση του εκάστοτε τύπου φθοράς.

#### Δοκιμές έναντι τροχοσυλακώσεων

Αναφορικά με τις δοκιμές έναντι τροχοσυλακώσεων 24 οργανισμοί ανέφεραν στην έρευνα ότι χρησιμοποιούν επί του παρόντος δοκιμές έναντι τροχοσυλακώσεων στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους. Πιο συγκεκριμένα, 11 πολιτείες, μεταξύ των οποίων η Αλάσκα, η Αλαμπάμα, το Αρκάνσας, η Τζόρτζια, το Αϊντάχο, η Βόρεια Καρολίνα, το Νιου Τζέρσεϊ, το Όρεγκον, η Νότια Καρολίνα, η Νότια Ντακότα και η Βιρτζίνια, χρησιμοποιούν τη δοκιμή Asphalt Pavement Analyzer (APA). Ακόμα, 10 είναι οι πολιτείες που χρησιμοποιούν τη δοκιμή Hamburg Wheel Tracking Test (HWTT) μεταξύ των οποίων είναι η Καλιφόρνια, η Αϊόβα, το Ιλινόις, η Λουϊζιάνα, η Μασαχουσέτη, το Μέιν, η Μοντάνα, το Τέξας, η Γιούτα και η Ουάσιγκτον. Επιπλέον, το Ντέλαγουερ χρησιμοποιεί τη δοκιμή Flow Number (FN).

Για να δημιουργηθεί μία καλύτερη εικόνα σχετικά με τις δοκιμές αυτές ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να επιλέξουν τις δοκιμές επιδόσεων που πιστεύουν ότι έχουν τις περισσότερες δυνατότητες για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου τύπου φθοράς, εν προκειμένω των τροχοσυλακώσεων. Οι απαντήσεις τους συνοψίζονται στην Εικόνα 4.9.



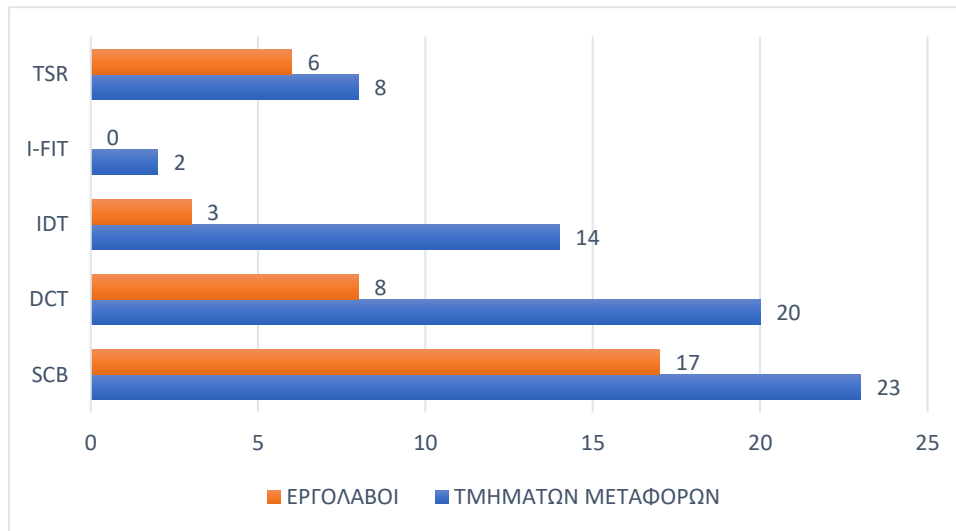
Εικόνα 4.9: Δοκιμές για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχοσυλακώσεων (West, et al., 2018)



Όπως φαίνεται, πάνω από 70 συμμετέχοντες στην έρευνα (συμπεριλαμβανομένων 39 τμημάτων μεταφορών και 32 εργολάβων) επέλεξαν τη δοκιμή HWTT. Η δεύτερη πιο συχνά επιλεγείσα δοκιμή ήταν η APA. Επιπλέον, 15 κρατικοί οργανισμοί θα εξέταζαν τη δοκιμή FN ως μία πιθανή δοκιμή για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι τροχαυλακώσεων.

### Δοκιμές έναντι θερμικής ρηγμάτωσης

Επί του παρόντος, μόνο τρεις πολιτείες (Αϊόβα, Μινεσότα και Μιζούρι) απαιτούν δοκιμή έναντι θερμικής ρηγμάτωσης στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους και όλες χρησιμοποιούν τη δοκιμή DCT. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η επιλογή των πλέον πιθανών δοκιμών για την αντιμετώπιση της θερμικής ρηγμάτωσης.

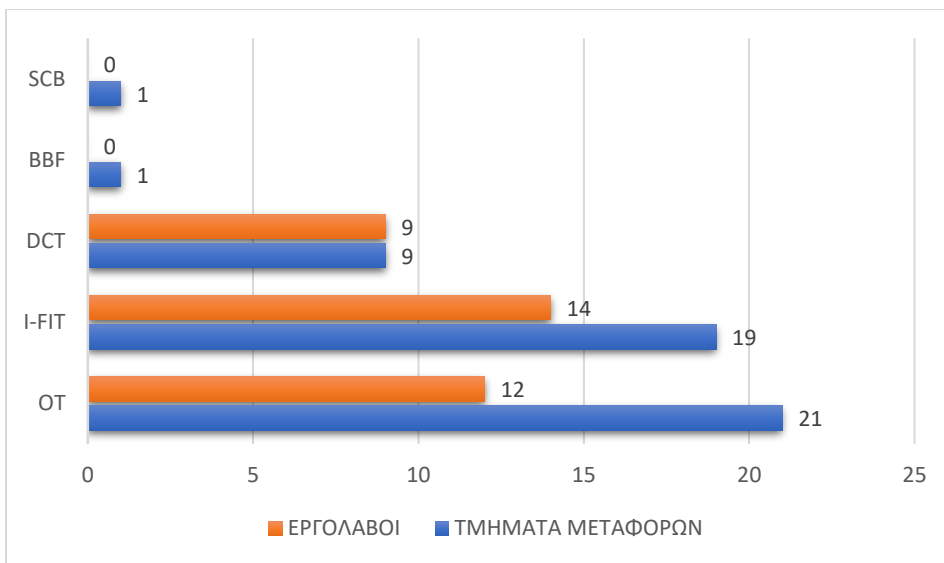


**Εικόνα 4.10: Δοκιμές για την αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι θερμικής ρηγμάτωσης (West, et al., 2018)**

Τόσο για τα τμήματα μεταφορών όσο και για τους κατασκευαστές έργων οδοποιίας, οι δύο πρώτες επιλογές ήταν η δοκιμή SCB και η δοκιμή DCT. Επιπλέον, 17 και 14 ερωτηθέντες στην έρευνα επέλεξαν τις δοκιμές IDT και TSR. Τέλος, τρεις οργανισμοί ανέφεραν ότι η δοκιμή I-FIT θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των ασφαλτομιγμάτων έναντι θερμικής ρηγμάτωσης.

### Δοκιμές έναντι ανακλαστικής ρηγμάτωσης

Τέσσερις πολιτείες απάντησαν ότι χρησιμοποιούν επί του παρόντος μια δοκιμή έναντι ανακλαστικής ρηγμάτωσης στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους. Το Νιου Τζέρσεϊ και το Τέξας χρησιμοποιούν τη δοκιμή OT, το Ιλινόις χρησιμοποιεί τη δοκιμή I-FIT και η Λουϊζιάνα χρησιμοποιεί τη δοκιμή SCB.

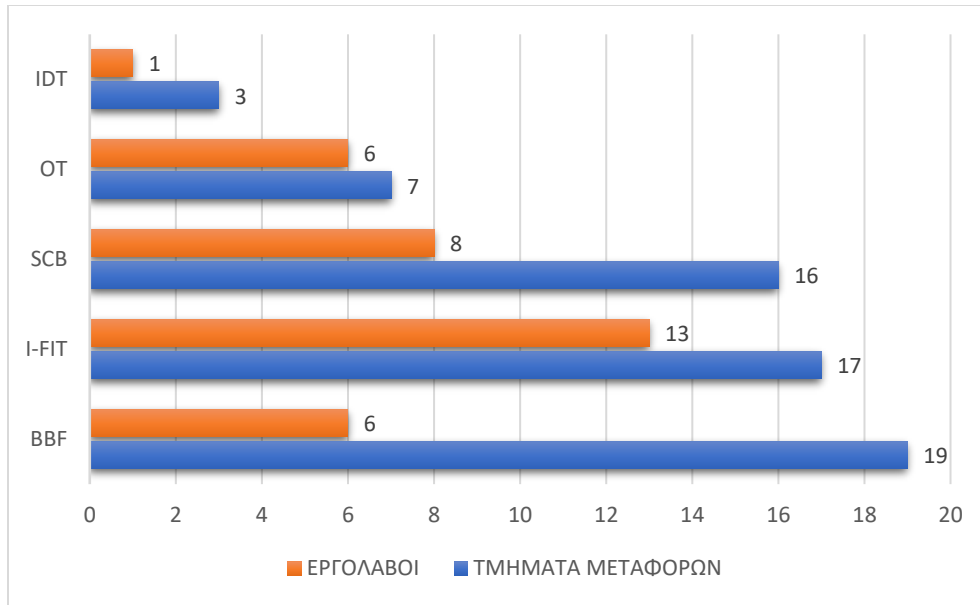


**Εικόνα 4.11: Δοκιμές για αξιολόγηση αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ανακλαστικής ρηγμάτωσης (West, et al., 2018)**

Οι απαντήσεις της έρευνας που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.7 έδειξαν ότι η πλειονότητα των συμμετεχόντων ήταν υπέρ της χρήσης των δοκιμών OT και I-FIT για την αξιολόγηση της αντίστασης του μίγματος έναντι ανακλαστικής ρηγμάτωσης. Σημειώνεται ότι 18 συμμετέχοντες στην έρευνα επέλεξαν την δοκιμή DCT, ως μία άλλη πιθανή δοκιμή για την αντιμετώπιση της ανακλαστικής ρηγμάτωσης.

#### **Δοκιμές ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης(από κάτω προς τα πάνω)**

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, έξι πολιτείες δήλωσαν ότι απαιτούν δοκιμή ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από κάτω προς τα πάνω (Bottom up- Fatigue Cracking) στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων. Η Αϊόβα, το Νιου Τζέρσεϊ και η Πενσυλβάνια χρησιμοποιούν επί του παρόντος τη δοκιμή BBF. Το Ιλινόις χρησιμοποιεί την I-FIT, η Λουϊζιάνα χρησιμοποιεί την SCB και το Τέξας χρησιμοποιεί την OT. Στην Εικόνα 4.12 παρουσιάζεται η επιλογή των δοκιμών επιδόσεων με τις περισσότερες δυνατότητες αντιμετώπισης της ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από κάτω προς τα πάνω.

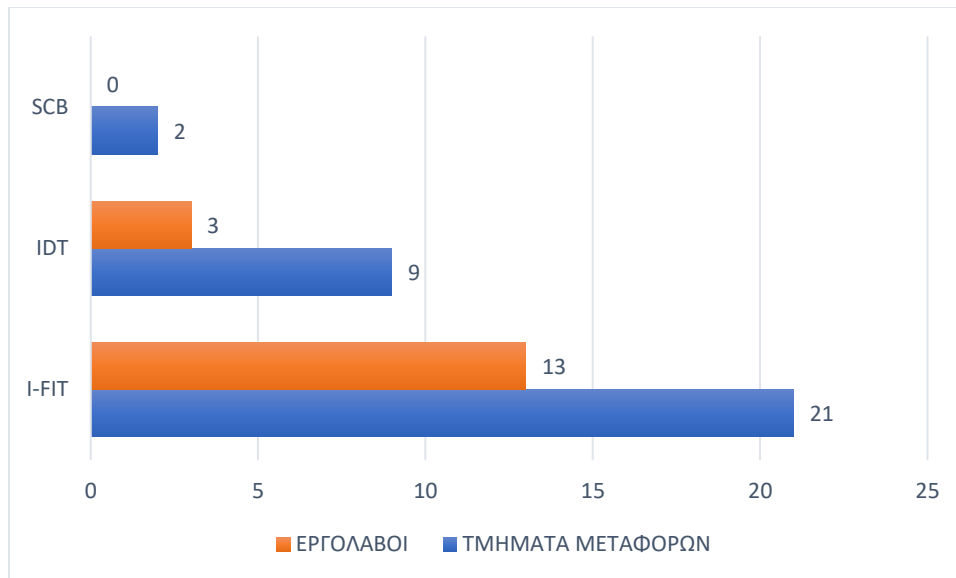


**Εικόνα 4.12: Δοκιμές αξιολόγησης αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από κάτω προς τα πάνω (West, et al., 2018)**

Οι τρεις κύριες επιλογές των τμημάτων μεταφορών ήταν οι BBF, I-FIT και SCB αντίστοιχα. Παρόμοιες απαντήσεις ελήφθησαν και από τους εργολάβους. Ορισμένες άλλες υποψήφιες δοκιμές που προσδιορίστηκαν από τους συμμετέχοντες στην έρευνα ήταν οι δοκιμές OT και IDT.

#### **Δοκιμές ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης (από πάνω προς τα κάτω)**

Μόνο το Ιλινόις και η Λουιζιάνα απαιτούν δοκιμή ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από πάνω προς τα κάτω (Top-Down Fatigue Cracking) στις τρέχουσες προδιαγραφές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων. Σε αυτές τις δύο πολιτείες, οι δοκιμές I-FIT και SCB χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συνολικής αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσεων συμπεριλαμβανομένης της ρηγμάτωσης κόπωσης από πάνω προς τα κάτω. Στην Εικόνα 4.13 συνοψίζονται οι απαντήσεις όλων των συμμετεχόντων σχετικά με τις δοκιμές ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης από πάνω προς τα κάτω.

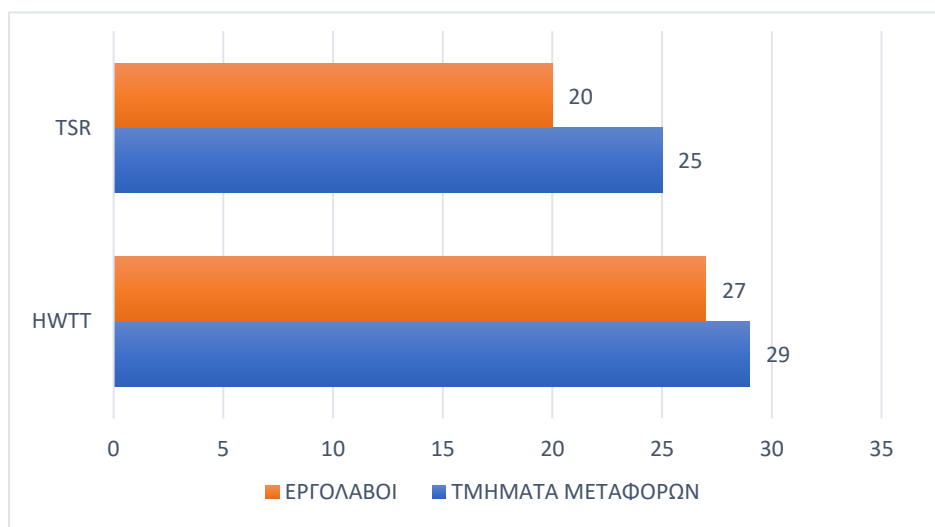


**Εικόνα 4.13: Δοκιμές αξιολόγησης αντίστασης ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσης λόγω κόπωσης από πάνω προς τα κάτω (West, et al., 2018)**

Οι απαντήσεις στην έρευνα έδειξαν ότι η δοκιμή I-FIT θεωρείται ότι έχει τις περισσότερες δυνατότητες να αντιμετωπίσει τη ρηγματώση λόγω κόπωσης από πάνω προς τα κάτω, ακολουθούμενη από τη δοκιμή IDT. Σημειώνεται ότι μόνο δύο οργανισμοί επέλεξαν τη δοκιμή SCB.

#### Δοκιμές υδροφιλίας

Σχεδόν όλοι οι οργανισμοί απαιτούν δοκιμές υδροφιλίας στις τρέχουσες προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους.

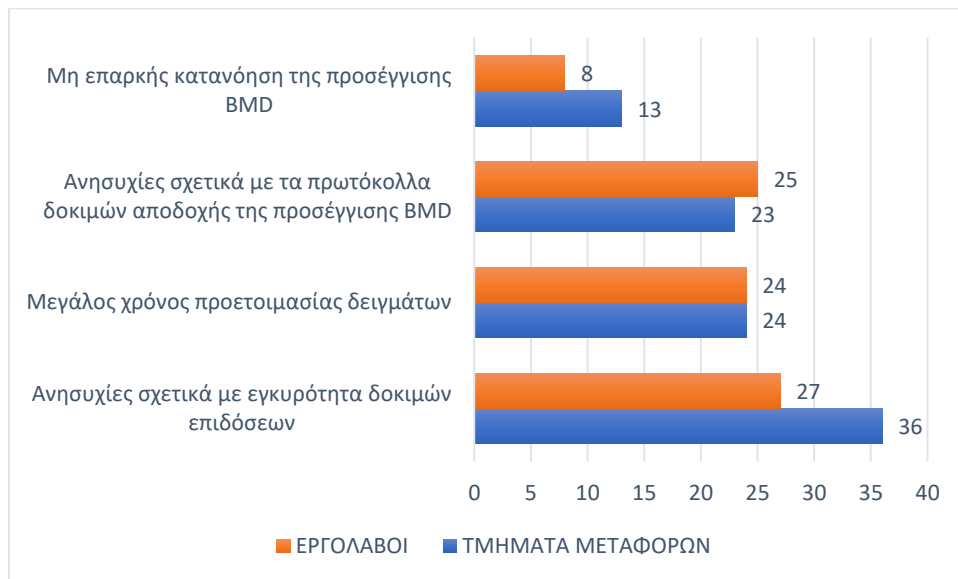


**Εικόνα 4.14: Δοκιμές υδροφιλίας (West, et al., 2018)**

Από την έρευνα προέκυψε ότι οι δοκιμές που επιλέγονται συχνότερα είναι είτε η δοκιμή TSR είτε η δοκιμή HWTT. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι τρεις πολιτείες (Καλιφόρνια, Μοντάνα και Ιλινόις) που χρησιμοποιούν τη δοκιμή HWTT ως δοκιμή αντιμετώπισης των τροχοαυλακώσεων επέλεξαν τη δοκιμή TSR ως δοκιμή για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας.

#### 4.2.5 Εφαρμογή της μεθόδου

Στην Εικόνα 4.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αξιολόγησης από την εφαρμογή της μεθόδου BMD.



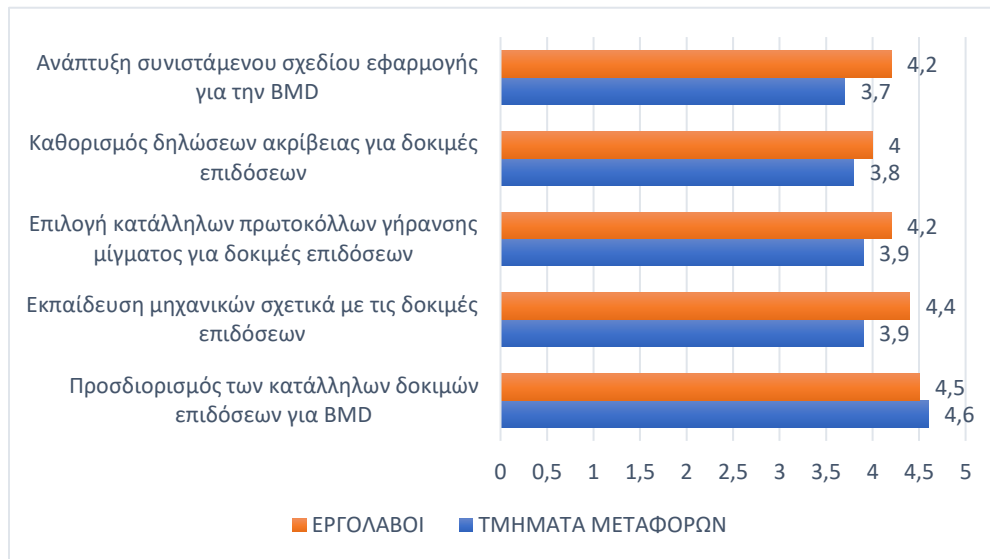
Εικόνα 4.15: Ανησυχίες σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου BMD (West, et al., 2018)

Η μεγαλύτερη ανησυχία αφορά την εγκυρότητα των δοκιμών απόδοσης. Συγκεκριμένα, οι συμμετέχοντες στην έρευνα εξέφρασαν την ανησυχία τους για το αν τα αποτελέσματα των δοκιμών επαληθεύονται στο πεδίο, αλλά και για την μεταβλητότητα των δοκιμών. Αυτό υποδηλώνει ότι δεν είναι σίγουροι για το ποιες δοκιμές πρέπει να χρησιμοποιούνται και ποια κριτήρια είναι κατάλληλα για τις εκάστοτε προδιαγραφές. Ακόμα, μία άλλη ανησυχία σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου BMD αφορούσε την ανάλυση κόστους-οφέλους για τη σύγκριση της ογκομετρικής προσέγγισης έναντι της προσέγγισης BMD με τη χρήση δοκιμών επιδόσεων.

#### 4.2.6 Ερευνητικά ερωτήματα

Τέλος, προτάθηκε ένας αριθμός ερευνητικών θεμάτων που σχετίζονται με την μέθοδο BMD και ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να αξιολογήσουν τα θέματα αυτά με βάση

το επίπεδο σπουδαιότητάς τους. Η αξιολόγηση γίνεται σε κλίμακα από το 1 έως το 5, με το 1 να σημαίνει "καθόλου σημαντικό" και το 5 "πολύ σημαντικό". Οι απαντήσεις της έρευνας συνοψίζονται στην Εικόνα 4.16.



**Εικόνα 4.16: Αξιολόγηση θεμάτων που σχετίζονται με την μέθοδο BMD (West, et al., 2018)**

Μεταξύ των πέντε προτεινόμενων θεμάτων, το "προσδιορισμός των κατάλληλων δοκιμών επιδόσεων για την μέθοδο BMD" επιλέχθηκε ως το πιο σημαντικό. Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον είχε και το θέμα της "εκπαίδευσης μηχανικών σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου BMD". Τα άλλα τρία θέματα "επιλογή κατάλληλων πρωτοκόλλων γήρανσης μίγματος για δοκιμές επιδόσεων", "καθορισμός δηλώσεων ακριβείας για δοκιμές επιδόσεων" και "ανάπτυξη συνιστάμενου σχεδίου εφαρμογής της μεθόδου BMD" θεωρήθηκαν επίσης σημαντικά, αλλά με ελαφρώς χαμηλότερη προτεραιότητα.

## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ MARSHALL ΚΑΙ BMD

### 5.1 Γενικές αρχές-Κριτήρια σχεδιασμού

Η φιλοσοφία σχεδιασμού που διέπει τις μεθόδους Marshall και BMD αντιπροσωπεύει μια θεμελιώδη απόκλιση στην προσέγγιση των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων. Οι διαφορές αυτές επηρεάζουν σημαντικά την προκύπτουσα απόδοση του οδοστρώματος, την επιλογή υλικών και τη συνολική μεθοδολογία σχεδιασμού.

Η μέθοδος Marshall, που αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 από τον Bruce Marshall, είναι κατά βάση εμπειρική. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε προκαθορισμένα κριτήρια που βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα επιδόσεων και σε εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων του μίγματος και των επιδόσεων του οδοστρώματος. Σύμφωνα με τους (Lv, et al., 2018), η μέθοδος Marshall επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου βάσει των ογκομετρικών στοιχείων και των τιμών ευστάθειας και υποχώρησης, για να εξασφαλιστεί επαρκής απόδοση του οδοστρώματος.

Στη μέθοδο Marshall, η δοκιμή ευστάθειας αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο, μετρώντας την αντίσταση του ασφαλτομίγματος στην παραμόρφωση υπό φορτίο. Σύμφωνα με τους (Lv, et al., 2018) η δοκιμή ευστάθειας είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι το ασφαλτόμιγμα μπορεί να αντισταθεί στην παραμόρφωση υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Οι υψηλές τιμές ευστάθειας υποδεικνύουν ένα μίγμα που είναι ανθεκτικό σε μόνιμη παραμόρφωση. Εξίσου σημαντική είναι και η παράμετρος της τιμής υποχώρησης, η οποία εκφράζει την κατακόρυφη παραμόρφωση του δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, αν βάσει των αποτελεσμάτων προκύψει ένα μίγμα με χαμηλή τιμή ευστάθειας και υψηλή τιμή παραμόρφωσης, τότε θα είναι υψηλή η πιθανότητα τροχοαυλάκωσης και παραμόρφωσης υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας. Αντίθετα, υψηλή τιμή ευστάθειας και χαμηλή τιμή παραμόρφωσης, θα έχει ως αποτέλεσμα ένα οδόστρωμα πιο εύθραυστο και ευάλωτο σε ρηγμάτωση (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1991).

Αναφορικά με τα ογκομετρικά στοιχεία της μεθόδου, σημειώνεται πως είναι ιδιαίτερα σημαντικές οι παράμετροι που περιλαμβάνουν το ποσοστό κενών στον σκελετό των αδρανών (Voids Mineral Aggregate – VMA), το ποσοστό κενών που καλύφθηκαν με άσφαλτο (Voids Filled with Asphalt - VFA) και το ποσοστό των κενών αέρα (Air Voids - AV). Το VMA αντιπροσωπεύει τα κενά διαστήματα μεταξύ των σωματιδίων των αδρανών, τα οποία πρέπει να γεμίσουν με ασφαλτικό συνδετικό υλικό και αέρα. Το VFA είναι το ποσοστό του VMA που γεμίζει με ασφαλτικό συνδετικό υλικό, ενώ το AV αντιπροσωπεύει τα κενά αέρα εντός του συμπυκνωμένου μίγματος. Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες για την εξασφάλιση επαρκούς περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό, η οποία επηρεάζει την ανθεκτικότητα του μίγματος και την αντοχή στη γήρανση. Σύμφωνα με τους (Lv, et al.,

2018) ο κατάλληλος έλεγχος των κενών εξασφαλίζει ότι το ασφαλτόμιγμα έχει επαρκή ανθεκτικότητα και αντοχή στη φθορά από την υγρασία.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της εμπειρικής προσέγγισης είναι η απλότητα και η ευκολία εφαρμογής της. Οι τυποποιημένες δοκιμές και τα κριτήρια καθιστούν απλή την εφαρμογή της σε διάφορα πλαίσια, με ελάχιστη ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό ή εκτεταμένη εκπαίδευση. Ωστόσο, αυτή η απλότητα έχει ως κόστος την ακρίβεια. Όπως σημειώνουν οι (Azarhoosh & Rouesmaeil, 2020), η εμπειρική προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε υπερσχεδιασμό ή υποσχεδιασμό σε ορισμένα σενάρια, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες φόρτισης που θα αντιμετωπίσει το οδόστρωμα.

Ο εμπειρικός χαρακτήρας της μεθόδου Marshall, σημαίνει ότι οι προσαρμογές και οι τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του μίγματος βασίζονται συχνά στη δοκιμή και το σφάλμα, με γνώμονα τις εμπειρίες του παρελθόντος και όχι τα μοντέλα πρόβλεψης. Αν και η προσέγγιση αυτή έχει εξυπηρετήσει καλά τον κλάδο για δεκαετίες, οι περιορισμοί της γίνονται όλο και πιο εμφανείς καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις απόδοσης του οδοστρώματος και καθώς διατίθενται πιο εξελιγμένα υλικά και τεχνικές κατασκευής.

Η μέθοδος Balanced Mix Design (BMD) αντιπροσωπεύει μια σημαντική μετάβαση από την εμπειρική προσέγγιση, στην προσέγγιση που βασίζεται στις επιδόσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες ενός οδοστρώματος. Αναπτύχθηκε ως απάντηση στην ανάγκη για πιο ανθεκτικά οδοστρώματα και ενσωματώνει τις δοκιμές επιδόσεων απευθείας στη διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος. Σύμφωνα με τους (Yin, Taylor, & Tran, 2020) η μέθοδος BMD στοχεύει στην εξισορρόπηση της αντίστασης του μίγματος σε πολλαπλούς τύπους καταπόνησης, όπως η τροχοαυλάκωση και η ρηγματώση, μέσω στοχευμένων δοκιμών επιδόσεων.

Στη φιλοσοφία της μεθόδου BMD, η διαδικασία σχεδιασμού του μίγματος αρχίζει με την επιλογή των υλικών και την αρχική αναλογία με βάση τα παραδοσιακά ογκομετρικά κριτήρια. Ωστόσο, η κρίσιμη διαφορά έγκειται στην ενσωμάτωση δοκιμών επιδόσεων, όπως η δοκιμή HWTT, για την αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων και η δοκιμή BBF για την αντίσταση έναντι ρηγματώσεων.

Η δοκιμή HWTT περιλαμβάνει την επανειλημμένη διέλευση ενός τροχού πάνω από ένα δοκίμιο ασφάλτου βυθισμένο σε νερό, προσομοιώνοντας τις επιδράσεις της φόρτισης της κυκλοφορίας και της υγρασίας και μετρά το βάθος των αυλακώσεων που σχηματίζονται παρέχοντας μια άμεση αξιολόγηση της ικανότητας του μίγματος να αντιστέκεται στη μόνιμη παραμόρφωση. Μάλιστα, σύμφωνα με τους (Yin, Taylor, & Tran, 2020) η δοκιμή HWTT είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και στον εντοπισμό ασφαλτομιγμάτων που έχουν ευαισθησία στην υγρασία.



Αντίστοιχα, η δοκιμή BBF που αναφέρεται, αξιολογεί την αντίσταση του μίγματος έναντι ρηγμάτωσης λόγω κόπωσης υπό επανειλημμένη φόρτιση. Σύμφωνα με τους (Zhang, et al., 2020) η δοκιμή αυτή προσομοιώνει τις συνθήκες που θα αντιμετωπίσει το οδόστρωμα στο πεδίο, παρέχοντας μια πιο ακριβή εκτίμηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης του μίγματος. Τα μίγματα που έχουν καλές επιδόσεις στις δοκιμές κόπωσης είναι λιγότερο πιθανό να εμφανίσουν ρωγμές, με αποτέλεσμα οδοστρώματα μεγαλύτερης διάρκειας. Οι δοκιμές αυτές έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των αναμενόμενων επιδόσεων του μίγματος.

Η προσέγγιση με βάση τις επιδόσεις επιτρέπει έναν πιο προσαρμοσμένο και ακριβή σχεδιασμό του μίγματος. Σύμφωνα με τους (Zhang, et al., 2020), η δυνατότητα πρόβλεψης του τρόπου με τον οποίο το μίγμα θα συμπεριφέρεται υπό πραγματικές συνθήκες επιτρέπει στους μηχανικούς να βελτιστοποιούν τις ιδιότητες του υλικού, ώστε να ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες ανάγκες κάθε έργου. Αυτή η βελτιστοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και την απόδοσή του.

Επιπλέον, η προσέγγιση BMD ενθαρρύνει την καινοτομία και τη χρήση προηγμένων υλικών. Για παράδειγμα, ενθαρρύνεται η χρήση ανακυκλωμένων υλικών, όπως τα RAP και RAS, τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν με μεγαλύτερη ευκολία στο σχεδιασμό του μίγματος, καθώς η απόδοσή τους μπορεί να μετρηθεί άμεσα και να επικυρωθεί μέσω δοκιμών. Αυτή η προσαρμοστικότητα ενισχύει τη βιωσιμότητα και τις όλο αυξανόμενες απαιτήσεις επαναχρησιμοποίησης υλικών, αλλά επιτρέπει επίσης και την εξοικονόμηση κόστους χωρίς συμβιβασμούς στην ποιότητα.

Ενώ η μέθοδος BMD απαιτεί πιο εξελιγμένο εξοπλισμό και τεχνογνωσία, τα οφέλη από την άποψη της βελτιωμένης απόδοσης και της ανθεκτικότητας συχνά δικαιολογούν την αρχική επένδυση. Σύμφωνα με τους (Tong, Habbouche, Diefenderfer, & Flintsch, 2023) το αυξημένο αρχικό κόστος των δοκιμών επιδόσεων αντισταθμίζεται από τη μειωμένη ανάγκη για συντήρηση και αποκατάσταση κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται όλες οι παραπάνω διαφορές στην φιλοσοφία και στα κριτήρια σχεδιασμού των μεθόδων Marshall και BMD.

**Πίνακας 5.1: Σύγκριση των φιλοσοφιών-κριτηρίων σχεδιασμού των μεθόδων Marshall & BMD**

	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
Προσέγγιση	Εμπειρική	Με βάση τις δοκιμές επιδόσεων
Βασικές παράμετροι	Ευστάθεια, παραμόρφωση, κενά αέρος	Αντίσταση έναντι τροχοαυλάκωσης, ρηγματώσεων
Μέθοδοι δοκιμών	Δοκιμές ευστάθειας και υποχώρησης	HWTT, TSR, BBF
Απαιτήσεις εξοπλισμού	Τυποποιημένος, ελάχιστος εξειδικευμένος εξοπλισμός	Απαιτείται προηγμένος εξοπλισμός δοκιμών
Ευελιξία στην επιλογή υλικών	Περιορισμένη	Υψηλή (συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών)
Μέθοδος προσαρμογής	Δοκιμή και σφάλμα	Προβλεπτική μοντελοποίηση και δοκιμές
Επιπτώσεις στο κόστος	Χαμηλότερο αρχικό κόστος δοκιμών	Υψηλότερο αρχικό κόστος δοκιμών, χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής
Βιωσιμότητα	Παραδοσιακά υλικά, λιγότερη έμφαση στην ανακύκλωση	Έμφαση σε βιώσιμες πρακτικές, υψηλή χρήση ανακυκλωμένων υλικών

## 5.2 Συγκριτική ανάλυση- Μετρήσεις επιδόσεων

### Παράθεση Στοιχείων Συναφών Ερευνών

Zhang, W., Tang, J., Dong, Z., Ma, T., Akber, M. A., Huang, X., ... & Luan, Y. (2020). Performance characterization of recycled-asphalt pavement with stabilized rubber-modified asphalt using balanced mix design method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12), 04020387

Η ανθεκτικότητα είναι ένας κρίσιμος δείκτης ένδειξης της απόδοσης των ασφαλτομιγμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής και τις απαιτήσεις συντήρησης του οδοστρώματος. Οι προσεγγίσεις των μεθόδων Marshall και BMD δίνουν

διαφορετική έμφαση στην ανθεκτικότητα. Η μέθοδος Marshall για να διασφαλίσει την ανθεκτικότητα βασίζεται κυρίως σε εμπειρικά κριτήρια, όπως η ευστάθεια και οι τιμές υποχώρησης. Σύμφωνα με μία μελέτη των (Lv, et al., 2018), η ανθεκτικότητα της μεθόδου Marshall αξιολογείται έμμεσα μέσω των ογκομετρικών ιδιοτήτων και των τιμών ευστάθειας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν εξετάζει ρητά τη μακροπρόθεσμη γήρανση και την αντοχή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι κρίσιμοι για την ανθεκτικότητα.

Αντίθετα, η προσέγγιση της μεθόδου BMD ενσωματώνει ρητά δοκιμές επιδόσεων που μετρούν άμεσα τις ιδιότητες που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων. Για παράδειγμα, οι (Yin, Taylor, & Tran, 2020) διερεύνησαν την αποδοτικότητα των δοκιμών HWTT και APA για την αξιολόγηση της αντίστασης σε μόνιμη παραμόρφωση. Αυτές οι δοκιμές παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της ικανότητας του οδοστρώματος να αντέχει σε μακροχρόνιες περιβαλλοντικές καταπονήσεις και καταπονήσεις που προκαλούνται από φορτία. Μάλιστα, σύμφωνα με την ίδια μελέτη, τα οδοστρώματα που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της μεθόδου BMD παρουσίασαν σημαντικά καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά τη μείωση των ρωγμών και των τροχοσυλακώσεων με την πάροδο του χρόνου σε σύγκριση με εκείνα που σχεδιάστηκαν με παραδοσιακές μεθόδους, όπως η μέθοδος Marshall.

Τα εμπειρικά δεδομένα υποστηρίζουν αυτά τα ευρήματα. Μια συγκριτική ανάλυση από τους (Zhang, et al., 2020) διαπίστωσε ότι τα ασφαλτομίγματα που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της μεθόδου BMD παρουσίασαν βελτίωση κατά 25% στις μετρήσεις ανθεκτικότητας, όπως η αντίσταση στη θερμική ρηγμάτωση και στις φθορές που προκαλούνται από την υγρασία. Αυτό αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στις δοκιμές επιδόσεων που περιλαμβάνονται στη διαδικασία της μεθόδου BMD, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο Marshall. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, που προέκυψαν από την ανάλυση των μελετών των (Zhang, et al., 2020) και (Cho, An, Youn, & Nam, 2019).

**Πίνακας 5.2: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Zhang, et al., 2020) και (Cho, An, Youn, & Nam, 2019)**

	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
Ευστάθεια(kN)	9.5	Μη εφαρμόσιμη
Υποχώρηση(mm)	12.5	Μη εφαρμόσιμη
Βάθος αυλακώσεων (mm)	Μη εφαρμόσιμη	4.8

Ευαισθησία στην υγρασία-απώλεια αντοχής (%)	15.0	9.8
Αντίσταση έναντι ρηγματώσεως (CTindex)	Μη εφαρμόσιμη	85

Αναλυτικότερα, με βάση τις μελέτες αυτές, προέκυψαν συμπεράσματα για τις παραμέτρους: ευστάθεια, υποχώρηση, βάθος αυλακώσεων, ευαισθησία στην επίδραση της υγρασίας και αντίσταση σε ρηγματώσεις. Συγκεκριμένα, αναφορικά με την ευστάθεια, η οποία είναι μία παράμετρος που εξετάζεται στη μέθοδο Marshall, το εύρος των τιμών της μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 8-12 kN ανάλογα με το ποσοστό περιεκτικότητας σε ασφαλτικό συνδετικό υλικό και άλλες παραμέτρους (Cho, An, Youn, & Nam, 2019).

Όσον αφορά την παράμετρο της ευστάθειας στη μέθοδο BMD, επισημαίνεται πως αν και υπάρχουν δοκιμές που περιλαμβάνουν τη φόρτιση του δοκιμίου μέχρι την αστοχία και οι οποίες θα μπορούσαν να συγκριθούν με την έννοια της ευστάθειας στη μέθοδο Marshall, η προσέγγιση και τα κριτήρια αξιολόγησης διαφέρουν. Ενδεικτικά αναφέρονται οι δοκιμές DCT και IDEAL-CT, οι οποίες παρέχουν τιμές που μπορούν να θεωρηθούν ανάλογες της ευστάθειας στη μέθοδο Marshall. Στη δοκιμή DCT, η οποία χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντίστασης του μίγματος έναντι ρηγματώσεως το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι την αστοχία και μετριέται η ενέργεια θραύσης (Gf). Αντίστοιχα, στη δοκιμή IDEAL-CT το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι την αστοχία και μετριέται ο δείκτης αντίστασης έναντι ρηγματώσεως (CT). Συμπερασματικά, η μέθοδος BMD επικεντρώνεται σε πιο εξειδικευμένες δοκιμές που εξετάζουν συγκεκριμένες μορφές αστοχίας (ρηγματώση, τροχοαυλάκωση) υπό συνθήκες που προσομοιώνουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια, εξετάστηκε η παράμετρος της υποχώρησης, η οποία είναι γνωστή ως 'flow' και μετριέται σε mm. Στη μέθοδο Marshall, η υποχώρηση μετράει τη μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης μέχρι την αστοχία και ένα τυπικό και αποδεκτό εύρος τιμών κυμαίνεται από 8 έως 18mm για διαφορετικά επίπεδα κυκλοφορίας. Για τη μέθοδο BMD δεν υπάρχει άμεσος δείκτης που να μετρά την κατακόρυφη παραμόρφωση, καθώς επικεντρώνεται σε δοκιμές που θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικές των πραγματικών συνθηκών κυκλοφορίας και περιβάλλοντος, γι' αυτό και δεν περιλαμβάνει άμεσα μια παράμετρο, όπως η υποχώρηση στη μέθοδο Marshall. Παραδείγματος χάρη υπάρχει η δοκιμή HWTT, η οποία αξιολογεί την αντίσταση του μίγματος έναντι τροχοαυλακώσεων και μπορεί να θεωρηθεί ότι παρέχει μια μορφή μετρούμενης παραμόρφωσης, αλλά σε διαφορετικό πλαίσιο από την υποχώρηση στη μέθοδο Marshall.

Αναφορικά με το βάθος αυλακώσεων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέθοδος BMD εστιάζει σε αυτό με διάφορες δοκιμές, όπως οι HWTT και APA. Μία μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό AsphaltPro Magazine (Yin, F., 2020) εξέτασε την απόδοση ασφαλτομιγμάτων χρησιμοποιώντας τη δοκιμή HWTT. Οι τιμές βάθους αυλακώσεων που προέκυψαν από διαφορετικό αριθμό περασμάτων ήταν:- 4.6 mm (μετά από 10.000 περάσματα και -4.7 mm (μετά από 20.000 περάσματα).

Τα εμπειρικά δεδομένα υποστηρίζουν την ανωτερότητα της απόδοσης της μεθόδου BMD στην ενίσχυση της αντίστασης έναντι τροχοαυλακώσεων. Οι (Zhang, et al., 2020) διεξήγαγαν επίσης, μία συγκριτική ανάλυση ασφαλτομιγμάτων που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της μεθόδου BMD. Τα ευρήματά της έδειξαν ότι τα μίγματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο αυτή παρουσίασαν μείωση του βάθους αυλακώσεων κατά 40% μετά από 20.000 διελεύσεις τροχών στη δοκιμή HWTT. Αυτή η σημαντική βελτίωση αποδίδεται στην ενσωμάτωση των δοκιμών επιδόσεων που προσομοιώνουν καλύτερα τις συνθήκες του πεδίου.

Η επόμενη παράμετρος που αξιολογήθηκε ήταν η ευαισθησία της επίδρασης των ασφαλτομιγμάτων στην υγρασία και συγκεκριμένα η απώλεια αντοχής μετά από έκθεση στην υγρασία. Αναφορικά με τη μέθοδο Marshall η ευαισθησία των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας, συνήθως αξιολογείται μέσω μίας δοκιμής, η οποία μετρά την αντοχή των ασφαλτικών μιγμάτων σε κύκλους υγρασίας και ξήρανσης και υπολογίζει τον λόγο έμμεσης εφελκυστικής αντοχής (Tensile Strength Ratio - TSR). Ο λόγος TSR υπολογίζεται ως ο λόγος της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής των υγροποιημένων δειγμάτων προς την αντίστοιχη αντοχή των ξηρών δειγμάτων και ένας αποδεκτός λόγος TSR κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 70% και 80%. Αντίθετα, στη μέθοδο BMD η ευαισθησία των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας αξιολογείται κυρίως μέσω των δοκιμών HWTT και TSR. Από τη μελέτη των (Zhang, et al., 2020) προέκυψε ότι με τη μέθοδο BMD έχουμε απώλεια αντοχής 9.8%, συγκριτικά με τη μέθοδο Marshall που έχει 15%, που σημαίνει ότι το μίγμα έχει καλύτερη ανθεκτικότητα στην υγρασία, γεγονός που οφείλεται στη χρήση ενισχυμένων ασφαλτικών συνδετικών υλικών και προηγμένων μεθόδων δοκιμών.

Τέλος, η αντίσταση έναντι ρηγματώσεων είναι μια κρίσιμη παράμετρος για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των ασφαλτικών μιγμάτων, ιδιαίτερα στις συνθήκες κυκλοφορίας και περιβάλλοντος. Επισημαίνεται ότι η μέθοδος Marshall δεν περιλαμβάνει συνήθως μετρήσεις αντίστασης έναντι ρηγματώσεως. Αντίθετα, η μέθοδος BMD παρέχει βελτιωμένη αξιολόγηση της αντίστασης σε ρηγματώσεις μέσω σύγχρονων δοκιμών, όπως οι SCB και DCT, οι οποίες προσφέρουν αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Αυτές οι δοκιμές είναι πιο κατάλληλες για την εκτίμηση της πραγματικής ανθεκτικότητας των ασφαλτικών μιγμάτων έναντι ρηγματώσεων. Στον Πίνακα 5.2 αναφέρεται ο δείκτης CT, που υπολογίζεται από τη δοκιμή IDEAL-CT. Από τη μελέτη των (Zhang, et al., 2020)

προέκυψε μία τιμή του δείκτη ίση με 85, η οποία υποδηλώνει καλή αντοχή στη ρηγμάτωση.

Yin, F., Taylor, A. J., Tran, N., & Director, P. A. (2020). Performance testing for quality control and acceptance OF balanced mix design. *NCAT: Greensboro, NC, USA*, 30.

Μία ακόμη έρευνα που έγινε στο πλαίσιο διερεύνησης της μεθόδου BMD είναι αυτή των (Yin, Taylor, & Tran, 2020), βάσει της οποίας προέκυψαν συμπεράσματα για τις ίδιες παραμέτρους που εξετάστηκαν και στην προηγούμενη μελέτη- ευστάθεια, υποχώρηση και βάθος αυλακώσεων. Ακόμη, σε αυτή τη μελέτη εξετάστηκε και η αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της μελέτης αυτής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

**Πίνακας 5.3: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Yin, Taylor, & Tran, 2020)**

	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
Ευστάθεια Marshall (kN)	9.5	Μη εφαρμόσιμη
Υποχώρηση(mm)	12.5	Μη εφαρμόσιμη
Βάθος αυλάκωσης ( mm)	Μη εφαρμόσιμη	7.2
Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	Μέτρια	Υψηλή

Όπως, αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μέθοδος Marshall αξιολογεί την αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων κυρίως μέσω δοκιμών ευστάθειας, οι οποίες μετρούν το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει ένα συμπυκνωμένο δοκίμιο πριν από την αστοχία. Η δοκιμή αυτή, αν και χρήσιμη, έχει περιορισμούς. Σύμφωνα με τους (Lv, et al., 2018), η δοκιμή ευστάθειας δεν μετρά άμεσα το δυναμικό αυλακώσεων υπό επαναλαμβανόμενα φορτία, το οποίο αποτελεί σημαντική πτυχή της απόδοσης του οδοστρώματος κατά τη λειτουργία. Η τιμή ευστάθειας Marshall είναι ένας δείκτης της αντοχής του μίγματος, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη την πολύπλοκη αλληλεπίδραση των φορτίων και των περιβαλλοντικών συνθηκών που προκαλούν αυλακώσεις με την πάροδο του χρόνου. Αντίθετα, η προσέγγιση BMD περιλαμβάνει δοκιμές βάσει επιδόσεων ειδικά σχεδιασμένες για την αξιολόγηση της αντίστασης σε τροχοαυλακώσεις υπό ρεαλιστικές συνθήκες. Επιπλέον, στη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε ότι τα μίγματα BMD είχαν μεγαλύτερη αντίσταση έναντι τροχοαυλακώσεων ακόμη και σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίες είναι γνωστό ότι επιτείνουν τη μόνιμη παραμόρφωση στα ασφαλτικά οδοστρώματα.

Tong, B., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D., & Flintsch, G. W. (2023). Multi-level performance evaluation of BMD surface mixtures with conventional and high RAP contents: a case study in Virginia. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), 2325609.

Ακόμα, στις μελέτες των (Yin, Taylor, & Tran, 2020) και (Tong, Habbouche, Diefenderfer, & Flintsch, 2023) γίνεται ειδική αναφορά για τη ρηγμάτωση των οδοστρωμάτων. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα, που προέκυψαν για την αντίσταση των οδοστρωμάτων έναντι ρηγμάτωσης για τις μεθόδους Marshall και BMD. Η αντίσταση στη ρηγμάτωση είναι ένα άλλο κρίσιμο μέτρο απόδοσης, καθώς επηρεάζει τη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης των ασφαλικών οδοστρωμάτων. Η ρηγμάτωση μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των θερμικών καταπονήσεων, της φόρτισης από την κυκλοφορία και της κόπωσης του υλικού. Η μέθοδος Marshall δεν ελέγχει άμεσα την αντοχή σε ρηγμάτωση. Αντ' αυτού, βασίζεται σε έμμεσους δείκτες, όπως η ευστάθεια και οι τιμές υποχώρησης, οι οποίοι δεν είναι ειδικά προσαρμοσμένοι για την αξιολόγηση της ικανότητας του οδοστρώματος να αντέχει στη ρηγμάτωση. Όπως επισημαίνεται από τους (Azarhoosh & Pouresmaeil, 2020), η έλλειψη ειδικών δοκιμών αντοχής σε ρηγμάτωση της μεθόδου Marshall μπορεί να οδηγήσει σε μίγματα που μπορεί να έχουν καλή απόδοση αρχικά, αλλά είναι επιρρεπή σε πρόωρη ρηγμάτωση υπό πραγματικές συνθήκες.

**Πίνακας 5.4: Σύγκριση μετρήσεων κατά (Tong, et al.,2023)**

	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
CTIndex	Μη εφαρμόσιμη	85
Αντοχή σε θερμική ρηγμάτωση	Μέτρια	Υψηλή
Εφελκυστική αντοχή (kPa)	650	800

Αντίθετα, η προσέγγιση της μεθόδου BMD ενσωματώνει δοκιμές επιδόσεων που μετρούν συγκεκριμένα την αντίσταση ενός ασφαλομίγματος σε διάφορους τύπους ρηγμάτωσης. Για παράδειγμα, η δοκιμή BBF αξιολογεί την ικανότητα ενός μίγματος να αντέχει σε επαναλαμβανόμενη κάμψη, προσομοιώνοντας τις επιπτώσεις της φόρτισης από την κυκλοφορία. Σύμφωνα με τους (Cooper, Mohammad, Kabir, & King, Jr, 2014), η δοκιμή αυτή παρέχει ένα άμεσο μέτρο της διάρκειας ζωής ενός μίγματος σε κόπωση, προσφέροντας μια πιο ακριβή πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης αντίστασης σε ρηγμάτωση.

Ο “Δείκτης Αντίστασης έναντι ρηγμάτωσης (Cracking Tolerance Index - CTIndex)” είναι ένας άλλος δείκτης απόδοσης που χρησιμοποιείται στην μέθοδο BMD. Αυτός ο δείκτης αξιολογεί την ικανότητα του μίγματος να αντιστέκεται στη ρηγμάτωση σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που είναι ιδιαίτερα κρίσιμο σε περιοχές με σημαντικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τους (Tong, Habbouche, Diefenderfer, &

Flintsch, 2023) τα μίγματα που σχεδιάζονται με τη μέθοδο BMD εμφανίζουν συνήθως υψηλότερες τιμές του δείκτη CT, υποδεικνύοντας καλύτερη αντίσταση στη θερμική ρηγμάτωση.

Από τις μελέτες αυτές προέκυψε επίσης η έμμεση εφελκυστική αντοχή ίση με 800kPa στη μέθοδο BMD, μία τιμή που υποδηλώνει υψηλή αντοχή του μίγματος σε εφελκυστική καταπόνηση, σε αντίθεση με τη μέθοδο Marshall, όπου η έμμεση εφελκυστική αντοχή βρέθηκε μικρότερη. Ακόμη, η τιμή του δείκτη CT προέκυψε 85 με τη μέθοδο BMD, μία τιμή που δηλώνει πολύ καλή αντίσταση έναντι ρηγμάτωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στην προηγούμενη μελέτη των (Zhang, et al., 2020) προέκυψε ένας δείκτης CT με τιμή ίση με 85. Συνεπώς, παρατηρείται ότι υπάρχει καλή απόδοση της δοκιμής IDEAL-CT και του δείκτη CT.

### 5.3 Επιπτώσεις στο κόστος

#### Αρχικό κόστος

Το αρχικό κόστος του σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την επιλογή των μεθόδων σχεδιασμού του μίγματος. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει την απόκτηση υλικών, το σχεδιασμό του μίγματος και τα έξοδα κατασκευής. Οι προσεγγίσεις των μεθόδων Marshall και BMD παρουσιάζουν διακριτές επιπτώσεις στο κόστος λόγω των διαφορετικών μεθοδολογιών και απαιτήσεων τους. Η μέθοδος σχεδιασμού ασφαλτομίγματος Marshall, που έχει καθιερωθεί και υιοθετηθεί ευρέως, είναι γνωστή για τη σχετικά απλή και λιγότερο δαπανηρή διαδικασία. Σύμφωνα με τους (Lv, et al., 2018), η διαδικασία Marshall περιλαμβάνει τη χρήση τυποποιημένου εξοπλισμού και καλά καθορισμένων εμπειρικών δοκιμών, όπως οι δοκιμές ευστάθειας και υποχώρησης Marshall, οι οποίες είναι σχετικά ανέξοδες για τη διεξαγωγή τους. Η απλότητα της μεθόδου Marshall επιτρέπει ταχύτερες και λιγότερο δαπανηρές αρχικές φάσεις δοκιμών. Επιπλέον, ο εμπειρικός χαρακτήρας της μεθόδου Marshall, η οποία βασίζεται σε ογκομετρικές ιδιότητες, απαιτεί λιγότερο εξειδικευμένες δοκιμές, μειώνοντας έτσι το αρχικό κόστος δοκιμών.

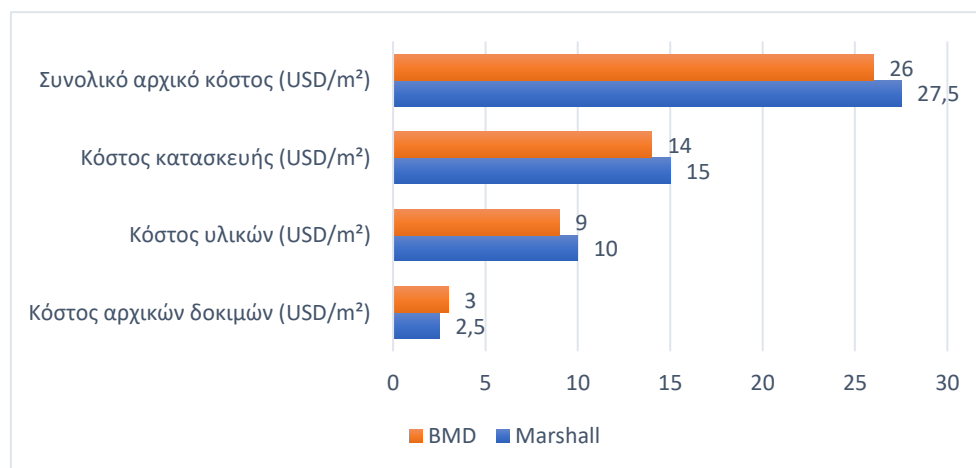
Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι, ενώ το αρχικό κόστος δοκιμών στη μέθοδο Marshall είναι χαμηλότερο, η έλλειψη συγκεκριμένων δοκιμών που σχετίζονται με τις επιδόσεις μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητες στην πρόβλεψη των μακροπρόθεσμων επιδόσεων του οδοστρώματος. Αυτή η αβεβαιότητα συχνά απαιτεί συντηρητικούς σχεδιασμούς, αυξάνοντας δυνητικά το αρχικό κόστος κατασκευής για την εξασφάλιση της ανθεκτικότητας και της απόδοσης. Όπως σημειώνεται από τους (Azarhoosh & Pouresmaeil, 2020), αυτοί οι συντηρητικοί σχεδιασμοί μπορεί να οδηγήσουν σε υπερβολική χρήση υλικών, αυξάνοντας έμμεσα το αρχικό κόστος.



Αντίθετα, η προσέγγιση της μεθόδου BMD, η οποία ενσωματώνει δοκιμές βάσει επιδόσεων, συνεπάγεται γενικά υψηλότερο αρχικό κόστος. Οι (Yin, Taylor, & Tran, 2020) τονίζουν ότι η διαδικασία της μεθόδου BMD περιλαμβάνει προηγμένες μεθοδολογίες δοκιμών, όπως η δοκιμή HWTT και η BBF, οι οποίες απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνογνωσία. Αυτές οι δοκιμές επιδόσεων έχουν σχεδιαστεί για την ακριβή πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του οδοστρώματος υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης και περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός του μίγματος βελτιστοποιείται για συγκεκριμένα κριτήρια επιδόσεων. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται το αρχικό κόστος της εκάστοτε μεθόδου, συμπεριλαμβανομένων του κόστους των υλικών ανά τετραγωνικό μέτρο οδοστρώματος, του κόστους κατασκευής και του κόστους των αρχικών δοκιμών. Η γραφική απεικόνιση των παραπάνω στοιχείων δίνεται στην Εικόνα 5.1.

**Πίνακας 5.5: Αρχικό κόστος μεθόδων Marshall & BMD κατά (Lv, et al., 2018), (Azarhoosh, et al., 2020), (Yin, et al., 2020)**

<b>Κόστος</b>	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
Κόστος αρχικών δοκιμών (USD/m <sup>2</sup> )	2.50	3.00
Κόστος υλικών (USD/m <sup>2</sup> )	10.00	9.00
Κόστος κατασκευής (USD/m <sup>2</sup> )	15.00	14.00
Συνολικό αρχικό κόστος (USD/m <sup>2</sup> )	27.50	26.00



**Εικόνα 5.1: Σύγκριση συνολικού αρχικού κόστους μεθόδων Marshall και BMD**

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι παρόλο που το αρχικό κόστος δοκιμών για τη μέθοδο BMD ήταν περίπου 20% υψηλότερο από ό,τι για τη μέθοδο Marshall, οι βελτιστοποιημένοι σχεδιασμοί συχνά οδηγούν σε αποδοτικότερη χρήση υλικών και σε οδοστρώματα με καλύτερες επιδόσεις. Αναλυτικότερα, η μέθοδος BMD προέκυψε ότι έχει 10%

χαμηλότερο κόστος υλικών και 6,67% χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Συνεπώς, ο βασισμένος στην απόδοση χαρακτήρας της μεθόδου BMD επιτρέπει την ακριβή βαθμονόμηση του σχεδιασμού του μίγματος, μειώνοντας την ανάγκη για συντηρητικό υπερσχεδιασμό και εξισορροπώντας έτσι τη διαφορά αρχικού κόστους.

### **Μακροπρόθεσμο κόστος συντήρησης**

Το μακροπρόθεσμο κόστος συντήρησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αξιολόγηση της συνολικής σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει την τακτική συντήρηση, τις επισκευές και τις προσπάθειες αποκατάστασης που απαιτούνται για τη διατήρηση της λειτουργικότητας του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Ο σχεδιασμός ασφαλτομίγματος με τη μέθοδο Marshall, λόγω της εξάρτησής του από εμπειρικά κριτήρια, μπορεί να οδηγήσει σε οδοστρώματα που απαιτούν συχνότερη συντήρηση. Σύμφωνα με μια μελέτη των (Ahmad, Abdul Rahman, Hainin, & Hossain, 2012), τα οδοστρώματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο Marshall παρουσίαζαν υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης αυλακώσεων και ρηγματώσεων με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που απαιτούσε συχνότερες επεμβάσεις. Η εμπειρική προσέγγιση, αν και αποτελεσματική σε πολλά σενάρια, δεν λαμβάνει πλήρως υπόψη την πολύπλοκη και δυναμική φύση της απόδοσης των οδοστρωμάτων υπό ποικίλες φορτίσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι συχνές δραστηριότητες συντήρησης όχι μόνο αυξάνουν το άμεσο κόστος, αλλά έχουν επίσης ως αποτέλεσμα έμμεσο κόστος που σχετίζεται με τις διακοπές της κυκλοφορίας και τις καθυστερήσεις των χρηστών. Οι (Azarhoosh & Pouresmaeil, 2020) τονίζουν ότι η αυξημένη συχνότητα συντήρησης για τα οδοστρώματα που σχεδιάζονται με τη μέθοδο Marshall μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο συνολικό κόστος κύκλου ζωής, επισκιάζοντας την αρχική εξοικονόμηση κόστους.

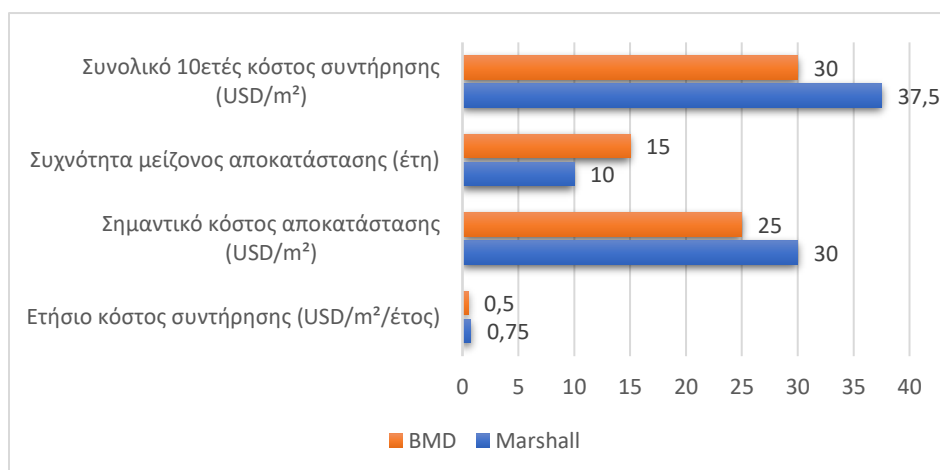
Αντίθετα, η μέθοδος BMD στοχεύει στη βελτιστοποίηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης μέσω της ενσωμάτωσης κριτηρίων που βασίζονται στην απόδοση. Με την ειδική αντιμετώπιση πιθανών ζητημάτων, όπως η τροχοαυλάκωση και η ρηγμάτωση κατά τη φάση του σχεδιασμού, τα οδοστρώματα BMD σχεδιάζονται για να αντέχουν αποτελεσματικότερα στις εν λόγω καταπονήσεις. Οι (Yin, Taylor, & Tran, 2020) απέδειξαν ότι τα οδοστρώματα BMD παρουσίασαν σημαντικά καλύτερες επιδόσεις αναφορικά με την αντίσταση σε τροχοαυλακώσεις και ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, με αποτέλεσμα λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης.

Τα εμπειρικά δεδομένα υποστηρίζουν την αποδοτικότητα της BMD μακροπρόθεσμα. Οι (Zhang, et al., 2020) ανέφεραν ότι τα οδοστρώματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο BMD απαιτούσαν 30% λιγότερες παρεμβάσεις συντήρησης για μια περίοδο 10 ετών σε σύγκριση με εκείνα που σχεδιάστηκαν με άλλες μεθόδους. Αυτή η μείωση της συχνότητας συντήρησης μεταφράζεται σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους, τόσο όσον αφορά τις άμεσες δαπάνες συντήρησης όσο και τις έμμεσες δαπάνες που σχετίζονται με τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την ταλαιπωρία των χρηστών.

Επιπλέον, η παρατεταμένη διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων BMD συμβάλλει στη μείωση του κόστους αποκατάστασης. Οι (Aurilio V. , 2018) διαπίστωσαν ότι τα οδοστρώματα BMD είχαν μεγαλύτερη πραγματική διάρκεια ζωής, καθυστερώντας την ανάγκη για σημαντικές δραστηριότητες αποκατάστασης. Αυτή η παρατεταμένη διάρκεια ζωής αποδίδεται στα βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης των μιγμάτων BMD, τα οποία έχουν σχεδιαστεί για να αντιστέκονται καλύτερα στις συνήθεις καταπονήσεις που οδηγούν σε φθορά του οδοστρώματος. Τα παραπάνω αποτελέσματα σχετικά με το μακροχρόνιο κόστος των δύο μεθόδων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6 και παρουσιάζονται γραφικά στην Εικόνα 5.2.

**Πίνακας 5.6: Σύγκριση κόστους μακροχρόνιας συντήρησης μεθόδων Marshall & BMD κατά (Zhang, et al., 2020), (Aurilio & Newcomb, 2018)**

	Marshall	BMD
Ετήσιο κόστος συντήρησης (USD/m <sup>2</sup> /έτος)	0.75	0.50
Σημαντικό κόστος αποκατάστασης (USD/m <sup>2</sup> )	30.00	25.00
Συχνότητα μείζονος αποκατάστασης (έτη)	10	15
Συνολικό 10ετές κόστος συντήρησης (USD/m <sup>2</sup> )	37.50	30.00



**Εικόνα 5.2: Σύγκριση μακροχρόνιου κόστους των μεθόδων Marshall και BMD**

Ενώ, λοιπόν, το αρχικό κόστος που σχετίζεται με τη μέθοδο BMD μπορεί να είναι υψηλότερο λόγω των προηγμένων απαιτήσεων δοκιμών απόδοσης, το κόστος αυτό αντισταθμίζεται από τη μειωμένη χρήση υλικών και τις βελτιστοποιημένες πρακτικές κατασκευής. Το πιο σημαντικό είναι ότι η προσέγγιση BMD προσφέρει σημαντική μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους μέσω των βελτιωμένων χαρακτηριστικών επιδόσεων, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος συντήρησης και αποκατάστασης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, από τις μελέτες αυτές προέκυψε ότι η μέθοδος BMD έχει 16.67% χαμηλότερο κόστος αποκατάστασης και 33.33% χαμηλότερο ετήσιο κόστος συντήρησης σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Ακόμα, η μέθοδος BMD απαιτεί 33.33% λιγότερο συχνή αποκατάσταση σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Συνεπώς, τα εμπειρικά δεδομένα υποδεικνύουν σαφώς ότι η μέθοδος BMD, αν και αρχικά είναι ακριβότερη, μακροπρόθεσμα παρέχει μια πιο αποδοτική λύση, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και μειώνοντας τη συχνότητα και τη σοβαρότητα των επεμβάσεων συντήρησης.

## 5.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

### Χρήση υλικών και βιωσιμότητα

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων είναι μια κρίσιμη πτυχή που επηρεάζει την επιλογή των μεθόδων σχεδιασμού του μίγματος. Η χρήση υλικών και η βιωσιμότητα αποτελούν βασικά στοιχεία για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αυτών των μεθόδων. Τόσο ο σχεδιασμός ασφαλτομίγματος με τη μέθοδο Marshall όσο και ο ισορροπημένος σχεδιασμός μίγματος BMD έχουν διαφορετικές προσεγγίσεις που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά βιωσιμότητάς τους.

Η μέθοδος σχεδιασμού ασφαλτομίγματος Marshall, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο, οδηγεί συχνά σε συντηρητικούς σχεδιασμούς λόγω της εξάρτησής της από εμπειρικά κριτήρια. Σύμφωνα με τους (Lv, et al., 2018), η μέθοδος Marshall απαιτεί συνήθως υψηλότερες ποσότητες συνδετικού υλικού και αδρανών για την ικανοποίηση των κριτηρίων ευστάθειας και υποχώρησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην υπερβολική χρήση υλικών. Αυτή η υπερβολική δαπάνη όχι μόνο αυξάνει το κόστος αλλά και ενισχύει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω της υψηλότερης ζήτησης φυσικών πόρων.

Όσον αφορά τη βιωσιμότητα, η μέθοδος Marshall δεν λαμβάνει ρητά υπόψη τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών ή τη βελτιστοποίηση των αναλογιών των υλικών. Όπως σημειώνουν οι (Azarhoosh & Pouresmaeil, 2020), ο εμπειρικός χαρακτήρας της μεθόδου Marshall συχνά περιορίζει την προσαρμοστικότητά της για την ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών, όπως η χρήση ανακτημένου ασφαλτοτάπητα (RAP) ή άλλων ανακυκλωμένων

υλικών. Κατά συνέπεια, οι δυνατότητες μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω της επαναχρησιμοποίησης υλικών δεν αξιοποιούνται πλήρως στη μέθοδο Marshall.

Αντίθετα, η μέθοδος BMD δίνει έμφαση σε κριτήρια που βασίζονται στην απόδοση, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη χρήση υλικών. Οι (Yin, Taylor, & Tran, 2020) τονίζουν ότι οι δοκιμές επιδόσεων της BMD επιτρέπουν την ακριβή βελτιστοποίηση των αναλογιών συνδετικού υλικού και αδρανών, διασφαλίζοντας ότι το μίγμα πληροί τις απαιτήσεις επιδόσεων χωρίς υπερβολική χρήση υλικών. Αυτή η βελτιστοποίηση οδηγεί συχνά σε χαμηλότερη περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall, μειώνοντας τη συνολική κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων.

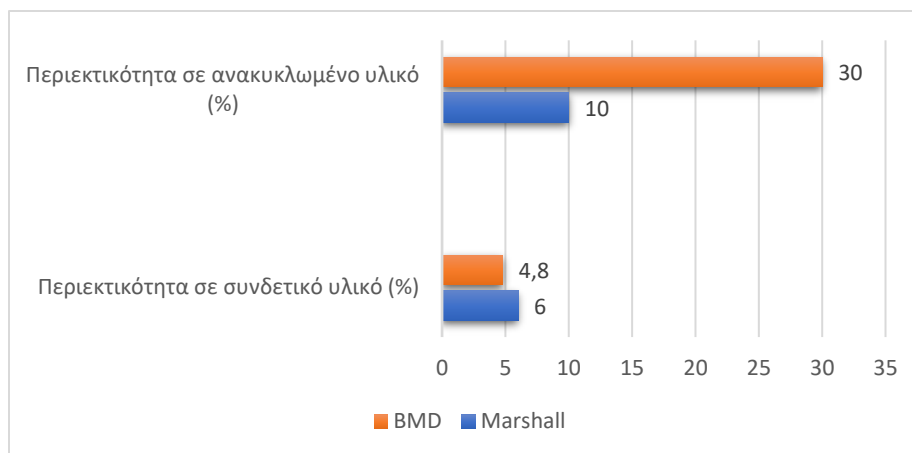
Η μέθοδος BMD διευκολύνει επίσης την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών. Σύμφωνα με τους (Zhang, et al., 2020) η μέθοδος BMD μπορεί εύκολα να ενσωματώσει ανακυκλωμένα υλικά χωρίς να διακυβεύονται οι επιδόσεις. Αυτή η προσαρμοστικότητα όχι μόνο εξοικονομεί φυσικούς πόρους, αλλά μειώνει επίσης την περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με την εξόρυξη και την επεξεργασία πρωτογενών υλικών.

Εμπειρικά δεδομένα υποστηρίζουν τα πλεονεκτήματα βιωσιμότητας της BMD. Οι (Aurilio V., 2018) διεξήγαγαν μια μελέτη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ασφαλτομιγμάτων που σχεδιάστηκαν με τη χρήση της μεθόδου BMD, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7 και απεικονίζονται γραφικά στις Εικόνες 5.3 και 5.4.

**Πίνακας 5.7 Πλεονεκτήματα βιωσιμότητας της μεθόδου BMD κατά (Aurilio V., 2018)**

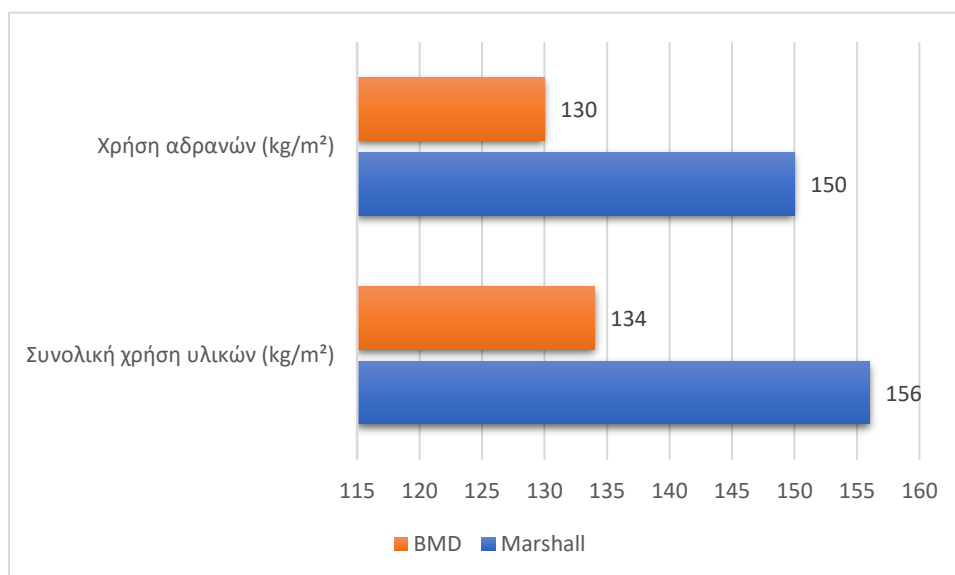
	<b>Marshall</b>	<b>BMD</b>
Περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό (%)	6.0	4.8
Χρήση αδρανών (kg/m <sup>2</sup> )	150	130
Περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό (%)	10	30
Συνολική χρήση υλικών (kg/m <sup>2</sup> )	156	134

Τα ευρήματά τους έδειξαν ότι τα ασφαλτομίγματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο BMD ενσωμάτωναν έως και 30% περισσότερα ανακυκλωμένα υλικά από άλλου τύπου μίγματα, μειώνοντας σημαντικά τη ζήτηση για νέες πρώτες ύλες. Αυτή η αυξημένη χρήση ανακυκλωμένου υλικού μεταφράζεται σε χαμηλότερες συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για τα οδοστρώματα που σχεδιάζονται με τη μέθοδο BMD.



**Εικόνα 5.3: Σύγκριση μεταξύ της περιεκτικότητας σε συνδετικό υλικό και ανακυκλωμένο υλικό για τις μεθόδους Marshall και BMD**

Ακόμα, προέκυψε ότι η μέθοδος BMD έχει 20% χαμηλότερη περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους της μεθόδου BMD, καθώς το ασφαλικό συνδετικό υλικό είναι το ακριβότερο συστατικό ενός μίγματος.



**Εικόνα 5.4: Σύγκριση ποσοτήτων υλικών που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους Marshall και BMD**

Τέλος, προέκυψε και ότι η μέθοδος BMD χρησιμοποιεί 13.33% λιγότερα αδρανή και κατ'επέκταση 14.10% λιγότερα συνολικά υλικά σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall, η οποία συχνά υιοθετεί συντηρητικούς σχεδιασμούς για να εξασφαλίσει την ανθεκτικότητα και την απόδοση του οδοστρώματος. Αυτό όμως οδηγεί σε μεγαλύτερη χρήση αδρανών υλικών, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η συνολική χρήση υλικών.

## Ανάλυση κύκλου ζωής

Η “Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)” παρέχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με όλα τα στάδια της ζωής ενός οδοστρώματος, από την εξόρυξη των πρωτογενών υλικών μέχρι την κατασκευή, τη συντήρηση και τη διάθεση στο τέλος του κύκλου ζωής. Η σύγκριση της AKZ των οδοστρωμάτων που σχεδιάστηκαν με τις μεθόδους Marshall και BMD δίνει σημαντικές πληροφορίες για τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική βιωσιμότητά τους.

Η AKZ των οδοστρωμάτων που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο Marshall εμφανίζει συνήθως υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, λόγω της μεγάλης κατανάλωσης υλικών που απαιτούνται κατά την κατασκευή οδοστρωμάτων που βασίζονται σε αυτή τη μέθοδο. Σύμφωνα με την αξιολόγηση του κύκλου ζωής από τους (Espino Gonzalez, et al., 2018) τα οδοστρώματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο Marshall παρουσίασαν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gas - GHG) κατά τις φάσεις εξόρυξης υλικών και κατασκευής. Η ανάγκη για υψηλότερη περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό και η περιορισμένη χρήση ανακυκλωμένων υλικών συμβάλλουν σε αυτές τις αυξημένες επιπτώσεις.

Επιπλέον, η εμπειρική προσέγγιση της μεθόδου Marshall οδηγεί συχνά σε οδοστρώματα με μικρότερη διάρκεια ζωής και υψηλότερες απαιτήσεις συντήρησης. Όπως σημειώνεται από τους (Azarhoosh & Pouresmaeil, 2020), η έλλειψη βελτιστοποίησης βάσει επιδόσεων μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη φθορά του οδοστρώματος, καθιστώντας αναγκαίες συχνότερες επισκευές και επικαλύψεις. Αυτές οι δραστηριότητες συντήρησης όχι μόνο αυξάνουν το κόστος, αλλά συμβάλλουν επίσης σε πρόσθετες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της παραγωγής υλικών, της μεταφοράς και των εργασιών κατασκευής.

Αντίθετα, η μέθοδος BMD παρουσιάζει ένα πιο ευνοϊκό προφίλ AKZ. Ο βασισμένος στις επιδόσεις χαρακτήρας της μεθόδου BMD διασφαλίζει ότι τα ασφατομίγματα βελτιστοποιούνται για ανθεκτικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής, μειώνοντας τη συχνότητα των επεμβάσεων συντήρησης. Οι (Yin, Taylor, & Tran, 2020) ανέφεραν ότι τα οδοστρώματα BMD είχαν 25% μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με άλλου τύπου οδοστρώματα, γεγονός που μεταφράζεται σε λιγότερους κύκλους συντήρησης και συναφείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η ικανότητα της μεθόδου BMD να ενσωματώνει υψηλότερα ποσοστά ανακυκλωμένων υλικών ενισχύει περαιτέρω τη βιωσιμότητα του κύκλου ζωής της. Οι (Zhang, et al., 2020) διαπίστωσαν ότι η χρήση RAP και άλλων ανακυκλωμένων υλικών σε μίγματα BMD μείωσε σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας στην κατασκευή και συντήρηση οδοστρωμάτων.

Συνεπώς, η μέθοδος BMD προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη μέθοδο Marshall. Βελτιστοποιώντας τη χρήση υλικών και ενσωματώνοντας υψηλότερα ποσοστά ανακυκλωμένων υλικών, η μέθοδος BMD μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα τόσο κατά την αρχική φάση κατασκευής όσο και κατά τον κύκλο ζωής του οδοστρώματος. Η προσέγγιση της μεθόδου BMD με βάση τις επιδόσεις εξασφαλίζει οδοστρώματα μεγαλύτερης διάρκειας, οδηγώντας σε λιγότερες επεμβάσεις συντήρησης και χαμηλότερες συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα ευρήματα αυτά υπογραμμίζουν τη σημασία της υιοθέτησης βιώσιμων πρακτικών στον σχεδιασμό ασφαλτομιγμάτων για την επίτευξη μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Η μελέτη σύνθεσης-σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων αποτελεί μία σύνθετη διαδικασία, για την οποία έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς διάφορες μέθοδοι (Roberts, Mohammad, & Wang, 2002). Μεταξύ αυτών η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος Marshall είναι μία εμπειρική-πειραματική μέθοδος. Ως πειραματική βασίζεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους και συγκεκριμένα εστιάζει στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας ασφάλτου βάσει των ογκομετρικών στοιχείων και των τιμών ευστάθειας και υποχώρησης. 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 περιοχή ενδιαφέροντος (Habib, Hossain, Kaldate, & Fager, 1998). Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί αστάθεια στην απόδοση του ασφαλτομίγματος σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής και χρήσης, γεγονός που την καθιστά λιγότερο αξιόπιστη και πιθανόν παρωχημένη.

Για να καλυφθούν τα κενά και οι ελλείψεις της μεθόδου Marshall, αναπτύχθηκε μία υπολογιστική-αναλυτική μέθοδος, η Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements). Η μέθοδος Superpave θεωρείται ως μία βελτιωμένη προσέγγιση, η οποία ακολουθεί την ογκομετρική ανάλυση της μεθόδου Marshall και ταυτόχρονα θέτει μία σειρά πρόσθετων ελέγχων και προδιαγραφών, δικαιολογώντας τον χαρακτηρισμό της ως αναλυτική. Ωστόσο, η αδυναμία της μεθόδου Superpave να θεσπίσει ως ξεχωριστό βήμα της μελέτης σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων τις δοκιμές επιδόσεων, οδήγησε σε νέες διερευνήσεις.

Επομένως, κατέστη αναγκαίο να βρεθεί μία μέθοδος που θα χρησιμοποιεί δοκιμές επιδόσεων, ώστε να ληφθούν υπόψη οι πραγματικές συνθήκες κατασκευής και χρήσης των οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε μία νέα, καινοτόμος μέθοδος, η μέθοδος ισορροπημένου σχεδιασμού ασφαλτομίγματος Balanced Mix Design (BMD). Αυτή η νέα προσέγγιση επιτρέπει την εξισορρόπηση της αντίστασης του μίγματος σε πολλαπλούς τύπους καταπόνησης, όπως η τροχοαυλάκωση και η ρηγματώση, μέσω συγκεκριμένων δοκιμών επιδόσεων. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή συντελεί σε μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των αναμενόμενων επιδόσεων του μίγματος, επιτρέποντας στους μηχανικούς να βελτιστοποιούν τις ιδιότητες των μιγμάτων, ώστε να ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες ανάγκες-συνθήκες κάθε έργου.

Η μέθοδος BMD περιλαμβάνει τέσσερις προσεγγίσεις: 1) τον ογκομετρικό σχεδιασμό με επαλήθευση επιδόσεων, 2) τον ογκομετρικό σχεδιασμό με βελτιστοποίηση επιδόσεων, 3) τον τροποποιημένο ογκομετρικό σχεδιασμό επιδόσεων και 4) τον σχεδιασμό επιδόσεων. Χρησιμοποιεί διάφορες δοκιμές, ώστε να βελτιστοποιήσει την αντίσταση των ασφαλτομιγμάτων έναντι ρηγματώσεων, τροχοαυλακώσεων, αλλά και να αξιολογήσει την ευαισθησία τους στην επίδραση της υγρασίας. Ενδεικτικά, αναφέρονται η δοκιμή HWTT για την αξιολόγηση της αντίστασης έναντι τροχοαυλακώσεων, η δοκιμή SCB για την

αξιολόγηση της αντίστασης έναντι ρηγματώσεων και η δοκιμή TSR που χρησιμοποιείται κυρίως για την αξιολόγηση της ευαισθησίας των ασφαλτομιγμάτων στην επίδραση της υγρασίας.

Από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας προέκυψε ότι η μέθοδος BMD έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως στις ΗΠΑ, όπου και αναπτύχθηκε. Ενδεικτικά, παρουσιάστηκε η εφαρμογή της σε ορισμένες πολιτείες των ΗΠΑ, όπως η Καλιφόρνια, το Τέξας και το Ιλινόις. Μάλιστα, για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα μίας διαδικτυακής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Στρατηγικού Προγράμματος Έρευνας Αυτοκινητοδρόμων (Strategic Highway Research Program-SHRP), στην οποία συμμετείχαν ορισμένα τμήματα μεταφορών των πολιτειών των ΗΠΑ που είτε εφαρμόζουν ήδη τη μέθοδο BMD είτε ενδιαφέρονται για την εφαρμογή της, καθώς και κατασκευαστές έργων οδοποιίας στις ίδιες πολιτείες, οι οποίοι έχουν επίσης εφαρμόσει ή εξετάζουν την εφαρμογή της μεθόδου.

Συνολικά, ελήφθησαν απαντήσεις από 47 τμήματα μεταφορών και 51 κατασκευαστές. Η έρευνα εστίασε στις εφαρμοζόμενες πρακτικές σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων, στους τύπους φθοράς των οδοστρωμάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν και στην εφαρμογή της μεθόδου BMD. Συνοψίζοντας ορισμένα αποτελέσματα της έρευνας, βάσει των υφιστάμενων πρακτικών σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων τα κριτήρια ογκομετρικού σχεδιασμού του μίγματος που αφορούν το μέγιστο θεωρητικό ειδικό βάρος στα επίπεδα συμπύκνωσης  $N_i$  και  $N_{max}$  (%Gmm σε  $N_i$ , %Gmm σε  $N_m$ ), καθώς και το κριτήριο που αφορά τα κενά που πληρώθηκαν με άσφαλτο (VFA) θα μπορούσαν να χαλαρώσουν ή να καταργηθούν, χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση του μίγματος. Ωστόσο, άλλες παράμετροι, όπως το ποσοστό των κενών στον σκελετό των αδρανών (VMA), ο λόγος αντοχής σε εφελκυσμό (TSR), ο λόγος παιπάλης προς συνδετικό υλικό (D/P) και το ποσοστό των κενών αέρα (VM), είναι σημαντικό να παραμείνουν αμετάβλητες.

Επιπλέον, οι βασικότεροι τύποι φθοράς των οδοστρωμάτων, για τους οποίους συνίσταται να εφαρμοστούν δοκιμές επιδόσεων είναι η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, η μόνιμη παραμόρφωση και η θερμική ρηγμάτωση. Μέσω της έρευνας αναδεικνύεται επίσης η σημασία των δοκιμών υδροφιλίας. Σχεδόν όλες οι πολιτείες ανέφεραν ότι απαιτούν επί του παρόντος μια δοκιμή υδροφιλίας στις προδιαγραφές σχεδιασμού των ασφαλτομιγμάτων τους, με τη δοκιμή TSR να είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη, ακολουθούμενη από τη δοκιμή HWTT.

Τέλος, από την αξιολόγηση της εφαρμογής της μεθόδου BMD προέκυψε ότι υπάρχει μία αβεβαιότητα σχετικά με την εγκυρότητα των δοκιμών επιδόσεων των ασφαλτομιγμάτων, καθώς κάποιες φορές παρατηρείται ασυμφωνία αποτελεσμάτων μεταξύ εργαστηρίου και πεδίου και μεταβλητότητα στις δοκιμές. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για τη διεξαγωγή των δοκιμών και την προετοιμασία των δειγμάτων είναι εκτεταμένος, και

επίσης υπάρχουν ερωτήματα σχετικά με τα πρωτόκολλα δοκιμών αποδοχής της προσέγγισης BMD.

Με δεδομένα πλέον τα ανωτέρω, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση της παραδοσιακής μεθόδου σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων Marshall και της μεθόδου BMD συλλέγοντας στοιχεία από τη διεθνή βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν βάσει ερευνών οι διαφορές στις γενικές αρχές των μεθόδων, στα κριτήρια σχεδιασμού και τις παραμέτρους τους, στο κόστος και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Από τα αποτελέσματα της συγκριτικής ανάλυσης εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ❖ Η μέθοδος Marshall είναι εμπειρική, βασιζόμενη σε απλές δοκιμές ευστάθειας και υποχώρησης για την αξιολόγηση των ασφαλτομιγμάτων. Αντίθετα, η μέθοδος BMD δίνει έμφαση στην αξιολόγηση της αντίστασης των ασφαλτομιγμάτων έναντι μόνιμης παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης μέσω της χρήσης πιο εξελιγμένων δοκιμών επιδόσεων.
- ❖ Τα ασφαλτομίγματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο BMD αποδεικνύεται ότι έχουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά στην ανθεκτικότητα στη μόνιμη παραμόρφωση συγκριτικά με τη μέθοδο Marshall. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης βελτιστοποιημένων ασφαλτομιγμάτων και εξελιγμένων δοκιμών επιδόσεων.
- ❖ Τα ασφαλτομίγματα που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο BMD αποδεικνύεται ότι έχουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά στην ανθεκτικότητα στην ρηγμάτωση συγκριτικά με τη μέθοδο Marshall. Αναλυτικότερα, η μέθοδος BMD παρέχει βελτιωμένη αξιολόγηση της αντίστασης έναντι ρηγμάτωσης μέσω σύγχρονων δοκιμών, όπως η SCB και η DCT, οι οποίες προσφέρουν αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Η μέθοδος Marshall δεν περιλαμβάνει συνήθως μετρήσεις αντίστασης έναντι ρηγμάτωσης.
- ❖ Στη μέθοδο Marshall δεν γίνεται καμία αναφορά για ξεχωριστή αξιολόγηση της ευαισθησίας του ασφαλτομίγματος στην επίδραση της υγρασίας. Αντίθετα, στη μέθοδο BMD αποτελεί χαρακτηριστικό βήμα της μελέτης σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων.
- ❖ Η μελέτη σύνθεσης ασφαλτομιγμάτων με τη μέθοδο BMD έχει υψηλότερο αρχικό κόστος δοκιμών, λόγω του προηγμένου και εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτούν οι δοκιμές, καθώς επίσης και των περισσότερων εργατοωρών εξειδικευμένου προσωπικού. Σε αντίθεση με τη μέθοδο Marshall οι απαιτήσεις είναι λιγότερες και πλέον τετριμμένες.
- ❖ Το οικονομικό κόστος του παραγόμενου ασφαλτομίγματος, το οποίο έχει

μελετηθεί με τη μέθοδο BMD είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Παρόλο που η μέθοδος Marshall είναι ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή στην αρχική φάση, η μέθοδος BMD προσφέρει σημαντική μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους μέσω των βελτιωμένων χαρακτηριστικών επιδόσεων, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος συντήρησης και αποκατάστασης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του οδοστρώματος.

- ❖ Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του παραγόμενου ασφαλτομίγματος στο περιβάλλον, το οποίο έχει μελετηθεί με τη μέθοδο BMD είναι μικρότερο σε σύγκριση με τη μέθοδο Marshall. Η μέθοδος BMD δίνει έμφαση στη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, με περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο υλικό που φτάνει το 30%, σε σύγκριση με το 10% στη μέθοδο Marshall. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων.

Εν κατακλείδι, η συγκριτική ανάλυση των δύο αυτών μεθόδων καταδεικνύει ότι η μέθοδος BMD φαίνεται να υπερτερεί σε πολλούς τομείς απόδοσης και βιωσιμότητας. Συγκεκριμένα, προσφέρει μακροπρόθεσμα οφέλη σε ανθεκτικότητα, απόδοση, κόστος συντήρησης και περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η υιοθέτηση της μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη υψηλών προδιαγραφών απόδοσης και βιωσιμότητας στις σύγχρονες κατασκευές οδοστρωμάτων.

Αξιολογώντας όλα τα παραπάνω, η μέθοδος BMD έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Ωστόσο, είναι γεγονός πως δεν είναι τόσο διαδεδομένη σε άλλες χώρες εκτός των ΗΠΑ. Αυτό συμβαίνει για αρκετούς λόγους. Καταρχάς, οι προδιαγραφές και οι κανονισμοί για τη μέθοδο αυτή βασίζονται κατά κύριο λόγο σε πρότυπα των ΗΠΑ, όπως τα AASHTO. Σε άλλες χώρες χρησιμοποιούνται διαφορετικά πρότυπα και κανονισμοί που είναι τοπικά προσαρμοσμένοι στις συνθήκες και τις απαιτήσεις των αντίστοιχων περιοχών. Παραδείγματος χάρη, οι ευρωπαϊκές χώρες χρησιμοποιούν τα πρότυπα CEN (European Committee for Standardization) για την κατασκευή και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων. Ακόμα, ένας πιθανός λόγος που δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα σε περισσότερες χώρες είναι ότι η εφαρμογή της μεθόδου BMD απαιτεί εξειδικευμένο και ακριβό εξοπλισμό, το οποίο μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό κριτήριο για μία χώρα. Τέλος, η πλειοψηφία των μελετών και των δεδομένων που υποστηρίζουν την μέθοδο BMD προέρχονται από έρευνες και εφαρμογές στις ΗΠΑ, καθιστώντας δυσκολότερη την αποδοχή και την εφαρμογή της σε άλλες χώρες χωρίς τοπικά δεδομένα.

Βάσει, λοιπόν, των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η μέθοδος BMD σε πολλούς τομείς, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η συνέχιση της ανάπτυξης και εφαρμογής της στις χώρες που

ήδη τη χρησιμοποιούν. Επιπλέον, είναι ουσιώδες να προωθηθεί η υιοθέτησή της σε άλλες χώρες όπου δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα, ώστε να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματά της σε απόδοση και βιωσιμότητα. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητο να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για την επέκταση της εφαρμογής της μεθόδου, υπό το πρίσμα των ακόλουθων προτάσεων:

- ❖ Συλλογή και ανάλυση τοπικών δεδομένων από χώρες της Ευρώπης για την προσαρμογή των δοκιμών και των προτύπων στις τοπικές κλιματολογικές και κυκλοφοριακές συνθήκες.
- ❖ Εκπαίδευση και κατάρτιση των μηχανικών για τα πρότυπα και τον εξοπλισμό των δοκιμών επιδόσεων. Στο πλαίσιο αυτό, είναι δυνατό να δημιουργηθούν ειδικά προγράμματα κατάρτισης για την επιτυχή υιοθέτηση της μεθόδου BMD. Έτσι, θα εξασφαλιστεί η κατανόηση των αρχών της μεθόδου και η κατάλληλη εκτέλεση των εξελιγμένων δοκιμών.
- ❖ Απόκτηση του απαραίτητου εξοπλισμού για τις δοκιμές επιδόσεων της μεθόδου BMD. Σημειώνεται ότι, όπως έχει αποδειχθεί παρόλο που η αγορά και η εγκατάσταση του εξοπλισμού συνεπάγεται υψηλό αρχικό κόστος, η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση από τη βελτιωμένη απόδοση των οδοστρωμάτων δικαιολογεί την επένδυση.
- ❖ Διερεύνηση σχετικά με τις ογκομετρικές παραμέτρους-Διερεύνηση χαλάρωσης κριτηρίων και διερεύνηση ποσοστού χαλάρωσης.
- ❖ Χρήση μακροπρόθεσμων δεδομένων επιδόσεων πεδίου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των κριτηρίων επιδόσεων BMD τόσο στη ρηγμάτωση όσο και στην μόνιμη παραμόρφωση.
- ❖ Διερεύνηση της απόδοσης των ασφαλτομιγμάτων με βάση τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών. Πιο συγκεκριμένα, είναι σημαντικό τα υλικά αυτά να δοκιμαστούν για την επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων, καθώς ακόμη και αν καλύπτουν τις ογκομετρικές απαιτήσεις είναι απαραίτητο να διερευνηθεί πώς επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων και να εξεταστούν νέα πρότυπα.

Αυτές είναι ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να αξιολογηθούν από τους εκάστοτε φορείς, ώστε να εξελιχθεί και διευρυνθεί η εφαρμογή της μεθόδου BMD.

Αναφορικά τώρα με την παρούσα διπλωματική εργασία, στο πλαίσιο επέκτασης του αντικειμένου της, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις:

- ❖ Συγκριτική μελέτη μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης της μεθόδου BMD και με άλλες διεθνώς αναγνωρισμένες μεθόδους, όπως η Superpave.
- ❖ Προσαρμογή και ανάπτυξη των δοκιμών επιδόσεων της μεθόδου BMD σε ελληνικά δεδομένα και συγκεκριμένα, στις ελληνικές κλιματολογικές και κυκλοφοριακές συνθήκες, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα πρωτόκολλο δοκιμών που να ανταποκρίνεται καλύτερα στις τοπικές ανάγκες.
- ❖ Εργαστηριακές δοκιμές σύγκρισης απόδοσης των ασφαλτομιγμάτων που σχεδιάστηκαν με τη μέθοδο BMD και άλλες μεθόδους, χρησιμοποιώντας υλικά παραγόμενα στον ελληνικό χώρο. Αυτές οι δοκιμές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη δοκιμή υδροφιλίας, την αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση και ρηγμάτωση.
- ❖ Διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ασφαλτομιγμάτων σχεδιασμένων με τη μέθοδο BMD σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων. Η διερεύνηση αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την αξιολόγηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών και της εκπομπής ρύπων κατά την παραγωγή, κατασκευή και συντήρηση των οδοστρωμάτων.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abd Ali, N., Joni, H., & Al-Rubaei, R. (2024). Effect of asphalt modified with waste engine oil on the durability properties of hot asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Open Engineering*, 14(1), p. 20220529.
- Ahmad, J., Abdul Rahman, M., Hainin, M., & Hossain, M. (2012). Comparative evaluation of hot-mix asphalt design methods. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(2), pp. 89-97.
- Al-Khayat, H., Newcomb, D., Zhou, F., & Van Deusen, D. (2021). Evaluation of the Minnesota asphalt mixtures based on balanced mix-design approach. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(3), p. 04021045.
- Al-Qadi, I., Ozer, H., Lambros, J., El Khatib, A., Singhvi, P., Khan, T., & Doll, B. (2015). Testing protocols to ensure performance of high asphalt binder replacement mixes using RAP and RAS. Illinois Center for Transportation.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1991). Hot-mix asphalt paving handbook. Washington, DC.: US Army Corps of Engineers.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). AASHTO T322-07, Standard Method of Test for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). AASHTO T 340-10, Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA). Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO T283-14, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO TP 107-14, Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO TP108-14, Standard Method of Test for Determining the Abrasion Loss of Asphalt Mixture Specimens. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO T 378-17, Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington, D.C.: AASHTO.

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO T321-17, Determining The Fatigue Life of Asphalt Mixture Using Flexural Bending Beam. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). AASHTO T 324-19, Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures,. Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). AASHTO T134-19, Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soil–Cement Mixtures. Washington, D.C.: AASHTO .
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2019). AASHTO TP133-19, Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using Small Specimens in the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test ). Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO M 323-20, Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO R 35-20, Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures. Washington, D.C.: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO TP 124-20, Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT). Washington, D.C. : AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO TP141-20, Provisional Standard Method of Test for Determining the Indirect Tensile Nflex Factor to Assess the Cracking Resistance of Asphalt Mixtures. Washington, D.C.: AASHTO.
- Amirkhanian, A., Spring, D., & et al. (2011). Disk-shaped compact tension test for plain concrete. *Proceedings of the Transportation and Development Institute Congress 2011: Integrated Transportation and Development for a Better Tomorrow*, (pp. 688-698).
- Archilla, A., Diaz, L., & Carpenter, S. (2007). Proposed Method to Determine the Flow Number in Bituminous Mixtures from Repeated Axial Load Tests. *Journal of Transportation Engineering*, 133(11), pp. 610-617.
- Aschenbrener, T. (1995). Evaluation of Hamburg wheel-tracking device to predict moisture damage in hot-mix asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1492, pp. 193-201.



- 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 Intitute. (2014). *Asphalt Mix Design Methods*. s.l: s.n.
- ASTM International. (2013). ASTM D7313, Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2016). ASTM D8044, Standard Test Method For Evaluation Of Asphalt Mixture Cracking Resistance Using The Semi-Circular Bend Test (SCB) At Intermediate Temperatures. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM D8225, Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2022). ASTM D8360, Standard Test Method for Determination of Rutting Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Ideal Rutting Test. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aurilio, V. (2018). The Merits of Balance Mix Design. *Proceedings of the Sixty-third Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association*, 231-250. Regina Saskatchewan, Canada.
- Aurilio, V., & Newcomb, D. (2018, November). The Merits of Balanced Mix Design. *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*, (pp. 232-250).
- Azarhoosh, A., & Pouresmaeil, S. (2020). Prediction of Marshall Mix Design Parameters in Flexible Pavements Using Genetic Programming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(10), pp. 8427-8441.
- Bennert, T. (2009, October). Lab Overlay Testers For Characterizing HMA Crack Resistance. *In Northeast asphalt user producer group annual conference*. Maine, South Portland.
- Bennert, T., Fee, F., Sheehy, E., Blight, R., & Sauber, R. (2011). Implementation of performance-based HMA specialty mixtures in New Jersey. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 80, pp. 719-758.
- Bennert, T., & Maher, A. (2008). Field and Laboratory Evaluation of a Reflection Crack Interlayer in New Jersey. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2048(1), pp. 114-123.

- Bennert, T., Worden, M., & Turo, M. (2009). Field and laboratory forensic analysis of reflective cracking on Massachusetts Interstate 495. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2126, pp. 27-38.
- Bonaquist, R. (2008). Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. (N. R. Transportation Research Board, Επμ.) Washington, D.C.: NCHRP Report 614.
- Buttlar, W., Wagoner, M., Paulino, G., Blankenship, P., Roque, R., Rongzong, W., & Gibson, N. (2006). Laboratory testing suite for characterization of asphalt concrete mixtures obtained from field cores. *Proceedings of the Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings of the Technical Sessions*, 75, pp. 815-852.
- Chen, H., Zhang, Y., & Bahia, H. (2021). The role of binders in mixture cracking resistance measured by ideal-CT test. *International Journal of Fatigue*, 142, p. 105947.
- Cho, B., An, J., Youn, H., & Nam, B. (2019). An Optimized Data Interpretation for Marshall Flow and Stability Test. *Proceedings of the Solving Pavement and Construction Materials Problems with Innovative and Cutting-edge Technologies*, 119-130. HangZhou, China: Springer International Publishing.
- Cominsky, R. J., Huber, G. A., Kennedy, T. W., & Anderson, M. (1994). The superpave mix design manual for new construction and overlays. *Washington, DC: Strategic Highway Research Program*.
- Cooper, S. B., Mohammad, L. N., Kabir, S., & King, Jr, W. (2014). Balanced Asphalt Mixture Design through Specification Modification: Louisiana's Experience. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2447(1), pp. 92-100.
- Espino Gonzalez, C., Molina, W., Chávez García, H., Velázquez Perez, J., Ruiz, R., Gomez, C., . . . Alonso-Guzman, E. (2018). Design of Asphalt Mixtures with 30% of RCA as Replacement of Natural Aggregate by Means Marshall Methodology. *Materials Science Forum*, 940, pp. 128-132.
- Germann, F., & Lytton, R. (2009). Methodology for predicting the reflection cracking life of asphalt concrete overlays. *Interim Report*.
- Ghanbari, A., Underwood, B., & Kim, Y. (2022). Development of a rutting index parameter based on the stress sweep rutting test and permanent deformation shift model. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), pp. 387-399.
- Grönniger, J., Wistuba, M., & Renken, P. (2010). Adhesion in bitumen-aggregate-systems: New technique for automated interpretation of rolling bottle tests. *Road Materials and Pavement Design*, 11(4), pp. 881-898.

- 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.
- Hajj, E., Aschenbrener, T., & Nener-Plante, D. (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures: California Department of Transportation (Caltrans)*. NR Pavement Engineering & Science Program.
- Hajj, E., Aschenbrener, T., & Nener-Plante, D. (2021). *Case Studies on the Implementation of Balanced Mix Design and Performance Tests for Asphalt Mixtures: Illinois Department of Transportation (IDOT)*. UNR Pavement Engineering & Science Program.
- Hajj, E., Aschenbrener, T., & Nener-Plante, D. (2022). *Positive Practices, Lessons Learned, and Challenges When Implementing Balanced Design of Asphalt Mixtures: Site Visits*.
- Hajj, E., Sebaaly, P., Porras, J., & Azofeifa, J. (2010). *Reflective Cracking of Flexible Pavements Phase III: Field Verification*.
- Izzo, R., & Tahmoressi, M. (1999). Use of the Hamburg wheel-tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1681(1), pp. 76-85.
- Jagat, A. (n.d.). Academia.edu. Retrieved May 5, 2024, from [https://www.academia.edu/36122701/MARSHALL\\_MIX\\_DESIGN\\_PROJECT](https://www.academia.edu/36122701/MARSHALL_MIX_DESIGN_PROJECT)
- Jitsangiam, P., Chindapasirt, 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*, 40, pp. 961-970.
- Kaloush, K. (2001). Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures. Arizona State University.
- Kandhal, P., & Cooley, L. (2003). NCHRP Report 508: Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council. Retrieved from [http://trb.org/news/blurb\\_detail.asp?id=2169](http://trb.org/news/blurb_detail.asp?id=2169).
- Kanneganti, V. (2002). Comparison of 19mm Superpave and Marshall base II mixes in west Virginia. *West Virginia University*.
- Kennedy, T., Huber, G., Hariggan, E., Cominsky, R., & Hughes, C. (1994). *Superior Performing Asphalt Pavements(Superpave): The Product of the SHPR Asphalt Research program*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Kim, Y., Ghanbari, A., & Underwood, S. (2021). *Rutting Strain Index (RSI) Parameter for Asphalt Balanced Mixture Design (No. FHWA-HRT-21-044)*. Federal Highway Administration.

- Le, J., Marasteanu, M., Matias De Oliveira, J., Calhoon, T., Turos, M., & Zanko, L. (2022). Investigations of electrical conductivity and damage healing of graphite nano-platelet (GNP)-taconite modified asphalt materials. *Road Materials and Pavement Design*, 23, pp. 196-207.
- Li, X., & Marasteanu, M. (2004). Evaluation of the low temperature fracture resistance of asphalt mixtures using the semi circular bend test. *In Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technology Sessions*, 73, 401-426.
- Lippert, Wu, S., Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Meister, J. F., Renshaw, G., & Vespa, J. W. (2017). Construction and performance monitoring of various asphalt mixes in Illinois: 2016 interim report.
- Loria-Salazar, L. (2018). *Reflective cracking of flexible pavements: Literature review, analysis models, and testing methods*. University of Nevada, Reno.
- Lv, J., Zhacneng, X., Yingmei, Y., Jiantong, Z., Xiaolong, S., & Chuanhai, W. (2018). Comparison of asphalt mixtures designed using the marshall and improved GTM methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), p. 7328791.
- Marasteanu, M., Buttlar, W., Bahia, H., Williams, C., Moon, K., Teshale, E., & Kvasnak, A. (2012). Investigation of low temperature cracking in asphalt pavements national pooled fund study—phase II.
- Mohammad, L., Elseifi, M., Raghavendra, A., & Ye, M. (2016). amburg wheel-track test equipment requirements and improvements to AASHTO T 324. (No. NCHRP Project 20-07/Task 361).
- Newcomb, D., & Zhou, F. (2018). *Balanced design of asphalt mixtures (No. MN/RC 2018-22)*. Minnesota. Dept. of Transportation. Research Services & Library.
- Patrick, L. (2023, December 7). Balanced Mix Design: Oklahoma Perspective. *Presentation at 67th Annual KU Asphalt Paving Conference*. Lawrence, KS.: Oklahoma Transportation.
- Richardson, D., & Lusher, S. (2008). *Determination of Creep Compliance and Tensile Strength of Hot-Mix Asphalt for Wearing Courses in Missouri (No. RI05-052)*. Missouri: Dept. of Transportation.
- Roberts, F., Mohammad, L., & Wang, L. (2002). History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(4), pp. 279-293.
- Sadid, M. W. (2010). Material acceptance risk analysis: superpave hot mix asphalt. *FHWA-ID-10-182B*.

- Solaimanian, M., Harvey, J., Tahmoressi, M., & Tandon, V. (2003). Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements. *Transportation Research Board National Seminar*, 77-110. San Diego, California.
- Stewart, C., Oputa, C., & Garcia, E. (2018). Effect of specimen thickness on the fracture resistance of hot mix asphalt in the disk-shaped compact tension (DCT) configuration. *Construction and Building Materials*, 160, pp. 487-496.
- Texas Transportation Institute. (2019, July). Test Procedure for Overlay Test TxDOT Designation: Tex-248-F. 1-12. Retrieved from <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/25534>
- Tong, B., Habbouche, J., Diefenderfer, S. D., & Flintsch, G. W. (2023). Multi-level performance evaluation of BMD surface mixtures with conventional and high RAP contents: a case study in Virginia. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), p. 2325609.
- Tran, T., Rizk, M., Shalaby, A., Eng, P., Ghazy, A., Kibbins, B., & Branch, H. (2020). Cracking and Rutting Performance of Asphalt Mixes for a Balanced Mix Design: Pilot Study.
- TxDOT SS 3074. (2019). *Superpave Mixtures – Balanced Mix Design*. Texas Department of Transportation.
- Vamsikrishna, G., & Singh, D. (2023). Comparison of Rutting Resistance of Plant Produced Asphalt Mixes Using Hamburg Wheel Tracker and Surrogate Simple Performance Tests: IDEAL-RT and HT-IDT. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(12), p. 04023471.
- Walubita, L., Faruk, A., Das, G., Tanvir, H., Zhang, J., & Scullion, T. (2012). The overlay tester: a sensitivity study to improve repeatability and minimize variability in the test results. *No. FHWA/TX-12/0-6607-1*. Texas Transportation Institute.
- Walubita, L., Zhang, J., Alvarez, A., & Hu, X. (2013). Exploring the flow number (FN) index as a means to characterise the HMA permanent deformation response under FN testing. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, 55(3), pp. 103-112.
- Wang, Y., & Kim, Y. (2022). Development of a fatigue index parameter, Sapp, for asphalt mixes using viscoelastic continuum damage theory. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), pp. 438-452.
- West, R., Rodezno, C., & Yin, F. (2018). Development of a framework for balanced mix design. *Final Report to the National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Project NCHRP 20-07/Task 406*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies.
- White, T. D. (1985). Marshall procedures for design and quality control of asphalt mixtures. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, 54, 265-284.

- Williams, R., & Prowell, B. (1999). Comparison of laboratory wheel-tracking test results with Wes Track performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1681(1), pp. 121-128.
- Witczak, M. (2007). Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting (Vol 580). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Witczak, M., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., & Von Quintus, H. (2002). NCHRP Report 465: Simple Performance Test for Superpave Mix Design. *TRB, National Research Council*. Washington, D.C.
- Yin, F. (2020). How to Use the Hamburg Wheel Track Test for Balanced Mix Design. *AsphaltPro Magazine*. Retrieved from <https://theasphaltpro.com/articles/how-to-use-the-hamburg-wheel-track-test-for-balanced-mix-design/>
- Yin, F., & West, R. (2021). *Balanced Mix Design Resource Guide (IS-143)*. National Asphalt Pavement Association.
- Yin, F., Garita, J., Taylor, A., & West, R. (2018). Refining the indirect tensile (IDT) Nflex factor test to evaluate cracking resistance of asphalt mixtures for mix design and quality assurance. *Construction and Building Materials*, 172, pp. 396-405.
- Yin, F., Taylor, A. J., & Tran, N. (2020). *Performance testing for quality control and acceptance OF balanced mix design*. NCAT: Greensboro, NC, USA, 30.
- Zhang, J., Alvarez, A., Lee, S., Torres, A., & Walubita, L. (2013). Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, 44, pp. 391-398.
- Zhang, W., Tang, J., Dong, Z., Ma, T., Akber, M., Huang, X., . . . Luan, Y. (2020). Performance characterization of recycled-asphalt pavement with stabilized rubber–modified asphalt using balanced mix design method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12), p. 04020387.
- Zhou, F., & Scullion, T. (2005). Overlay Tester: A Rapid Performance Related Crack Resistance Test, Report FHWA/TX-05/0-4667-2. Texas A & M University System: Texas Transportation Institute.
- Zhou, F., & West, K. (2023). Research Pays Off: Indirect Tension Asphalt Cracking Test Ensuring Asphalt Mix Designs for Durable Pavements. *Transportation Research Board*(345), pp. 32-34.
- Zhou, F., Chen, D., Scullion, T., & Bilyeu, J. (2003). Case study: Evaluation of laboratory test methods to characterize permanent deformation properties of asphalt mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), pp. 155-164.

Zhou, F., Hu, S., & Newcomb, D. (2020). Development of a performance-related framework for production quality control with ideal cracking and rutting tests. *Construction and Building Materials*, 261, p. 120549.

Zhou, F., Hu, S., & Scullion, T. (2006). *Integrated asphalt (overlay) mixture design, balancing rutting and cracking requirements (No. FHWA/TX-06/0-5123-1)*. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.

Zhou, F., Im, S., Sun, L., & Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design*, 18, pp. 405-427.