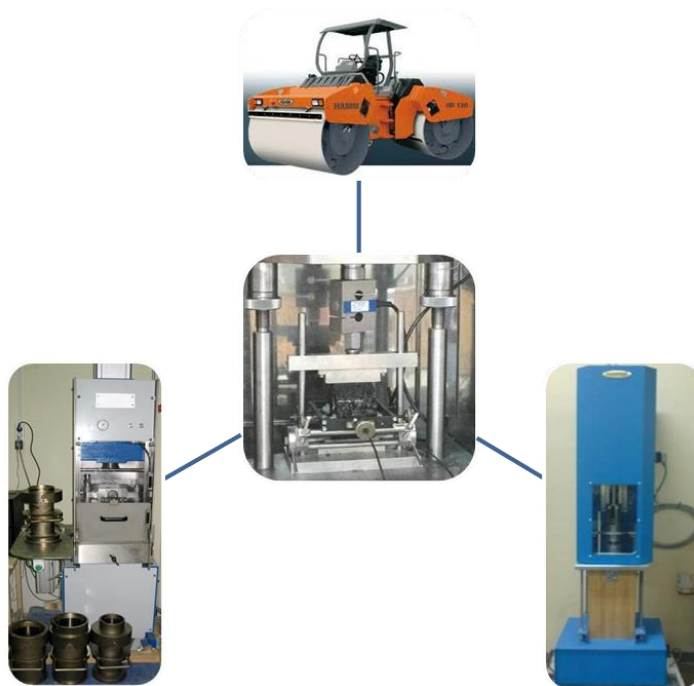




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ



ΙΡΙΣ ΚΟΥΦΟΥΔΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ, 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Λοΐζου Ανδρέα.

Στον κύριο Λοΐζο οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. κ. Παναγιώτη Γεωργίου για τη συμβολή του στη διεξαγωγή του εργαστηριακού πειράματος, καθώς και για την υποστήριξη στη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ για τη διάθεση του εργαστηριακού χώρου και την παραχώρηση των οργάνων για την πραγματοποίηση του πειραματικού σκέλους της εργασίας, καθώς και τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Εργαστηρίου για την πολύτιμη και πρόθυμη βοήθειά τους.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων μεθόδων εργαστηριακής συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος, καθώς επίσης και ο συσχετισμός τους με την επιτόπου συμπίκνωση. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακό πείραμα προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας μέσω δοκιμής σε έμμεσο εφελκυσμό δοκιμίων ασφαλτομιγμάτων ισοπεδωτικής στρώσης, συμπυκνωμένα με τη γυροσκοπική μέθοδο και με την κρουστική μέθοδο κατά Marshall, αλλά και πυρήνων που αποκόπηκαν από το οδόστρωμα. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επιρροή διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπίκνωση, όπως η θερμοκρασία συμπίκνωσης, η αρχική διάμετρος των δοκιμίων και η εσωτερική γωνία περιστροφής στο μέτρο δυσκαμψίας των εργαστηριακών δοκιμίων. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης όσον αφορά στα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαπιστώθηκε ότι μεταβολή της αρχικής διαμέτρου προκάλεσε έντονη διαφοροποίηση στο μέτρο δυσκαμψίας, ενώ αναφορικά με τα δοκίμια Marshall βρέθηκε ότι αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας. Επίσης, βρέθηκε ότι η κρουστική μέθοδος συμπίκνωσης κατά Marshall οδήγησε σε μικρότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με την γυροσκοπική μέθοδο, προσεγγίζοντας περισσότερο τις επιτόπου συνθήκες.

ABSTRACT

Within the framework of the present Diploma Thesis, the effect of different methods of laboratory compaction on the stiffness modulus of asphalt mixture, as well as their correlation with the field asphalt compaction, was investigated. For this purpose, a laboratory experiment was accomplished to measure the stiffness modulus through indirect tensile testing at specimens of asphalt base course mixtures, compacted with the gyratory method and the Marshall method, but also in cores taken from the asphalt pavement. Specifically, the effect of various parameters that affect laboratory compaction, such as the compaction temperature, the specimens' initial diameter and the internal angle of gyration on stiffness modulus of laboratory compacted specimens was studied. From the analysis results of the gyratory compacted specimens, it was found that change of the initial diameter causes intense differentiation of the stiffness modulus, while for the Marshall specimens it was found that increase of compaction temperature results in greater stiffness modulus values. In addition to the above, it appears that the Marshall compaction led to smaller values of the stiffness modulus compared to the gyratory method, simulating better the field conditions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	3
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	8
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	9
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	10
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	11
3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	15
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	15
3.2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	18
3.2.1 <i>Δοκιμές σε κάμψη.....</i>	<i>19</i>
3.2.1.1 Δοκιμή κάμψης δύο σημείων σε τραπεζοειδή (2PB-TR) ή πρισματικά δοκίμια (2PB-PR).....	19
3.2.1.2 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε πρισματικά δοκίμια (3PB-PR) και δοκιμή κάμψης 4 σημείων σε πρισματικά δοκίμια (4PB-PR).....	21
3.2.2 <i>Άμεσες μονοαξονικές δοκιμές.....</i>	<i>23</i>
3.2.2.1 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού – θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια (DTC-CY).....	23
3.2.2.2 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικά (DT-CY) ή σε πρισματικά δοκίμια (DT-PR)	24
3.2.3 <i>Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού</i>	<i>27</i>
3.2.3.1 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικά δοκίμια (IT- CY).....	27
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	34
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	34
4.2 ΤΥΠΟΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	34
4.2.1 <i>Στοιχεία σύνθεσης μιγμάτων</i>	<i>34</i>
4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	36
4.3.1 <i>Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο</i>	<i>36</i>
4.3.2 <i>Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη μέθοδο Marshall.....</i>	<i>39</i>
4.3.3 <i>Επί τόπου συμπύκνωση ασφαλτομίγματος</i>	<i>43</i>
4.4 ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ (ITSM).....	45
5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	48
5.1 ΓΕΝΙΚΑ	48
5.2 ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ Μ1.....	48
5.2.1 <i>Εργαστηριακά δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης</i>	<i>48</i>
5.2.1.1 Επίρροή του αριθμού των διαμέτρων στο μέτρο δυσκαμψίας.....	49
5.2.1.2 Επίδραση των παραμέτρων συμπύκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας.....	54
5.2.1.3 Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικής συμπύκνωσης	59
5.2.1.4 Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας υπό την επίδραση των παραμέτρων συμπύκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου	60
5.2.2 <i>Πυρήνες οδοστρώματος.....</i>	<i>64</i>
5.2.3 <i>Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος</i>	<i>66</i>
5.2.3.1 Δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης και πυρήνες	66
5.3 ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ Μ2.....	74
5.3.1 <i>Εργαστηριακά δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης</i>	<i>74</i>
5.3.1.1 Επίρροή του αριθμού των διαμέτρων στο μέτρο δυσκαμψίας.....	75
5.3.1.2 Επίδραση των παραμέτρων συμπύκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας.....	79
5.3.1.3 Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικής συμπύκνωσης	83
5.3.1.4 Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας υπό την επίδραση των παραμέτρων συμπύκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου	84
5.3.2 <i>Εργαστηριακά δοκίμια συμπύκνωσης Marshall</i>	<i>89</i>
5.3.2.1 Επίδραση της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας κατά Marshall	90

Διερεύνηση της επίδρασης της συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων

5.3.2.2	Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας κατά Marshall	91
5.3.3	Πυρήνες οδοστρώματος.....	92
5.3.4	Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος.....	94
5.3.4.1	Δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης και πυρήνες	94
5.3.4.2	Δοκίμια συμπίκνωσης Marshall και δοκίμια πεδίου.....	101
6	ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	112

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1. Σχέση χρόνου φόρτισης και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος.....	16
Σχήμα 3.2. Σχέση θερμοκρασίας και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος.....	17
Σχήμα 3.3. Τύποι φόρτισης εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού μέτρου δυσκαμψίας	18
Σχήμα 3.4. Απεικόνιση δοκιμής σε κάμψη δύο σημείων	19
Σχήμα 3.5. Απεικόνιση δοκιμής κάμψης 4 σημείων.....	21
Σχήμα 3.6. Δοκιμή σε άμεσο εφελκυσμό – θλίψη.....	23
Σχήμα 3.7. Πρότυπο δοκιμής σε άμεσο εφελκυσμό για κυλινδρικό δείγμα.....	25
Σχήμα 3.8. Παράδειγμα ισόθερων καμπυλών δοκιμής σε άμεσο εφελκυσμό.....	26
Σχήμα 3.9. Συσκευή δοκιμής σε έμμεσο εφελκυσμό.....	28
Σχήμα 3.10. Μορφή παλμικής φόρτισης, διάρκεια ανάδυσης και μέγιστο φορτίο	29
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης των μιγμάτων M1 και M2	35
Σχήμα 4.2. Συνολική εικόνα των δοκιμών των μιγμάτων M1 και M2	36
Σχήμα 4.3. Συσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης.....	37
Σχήμα 4.4. Συσκευή κρουστικής συμπίκνωσης Marshall.....	40
Σχήμα 4.5. Επισήμανση 4 διαμέτρων σε δοκίμια διαφόρων τύπων συμπίκνωσης.....	46
Σχήμα 4.6. Θάλαμος τοποθέτησης για απαιτούμενη θερμοκρασία δοκιμής	46
Σχήμα 4.7. Συσκευή προσδιορισμού μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό	47
Σχήμα 5.1. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1	50
Σχήμα 5.2. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης αρχικής διαμέτρου 150mm μίγματος M1	50
Σχήμα 5.3. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος M1	54
Σχήμα 5.4. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 0,82°	55
Σχήμα 5.5. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 1,16°	56
Σχήμα 5.6. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 1,45°	56
Σχήμα 5.7. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 υπό θερμοκρασία 135°C	57
Σχήμα 5.8. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 υπό θερμοκρασία 150°C	58
Σχήμα 5.9. Γραμμική εξίσωση συσχέτισης του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1	59
Σχήμα 5.10. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M1 διαμέτρου 100mm.....	63
Σχήμα 5.11. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M1 αρχικής διαμέτρου 150mm	64
Σχήμα 5.12. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών επιτόπου συμπίκνωσης μίγματος M1	66

Σχήμα 5.13. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	70
Σχήμα 5.14. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	70
Σχήμα 5.15. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής	71
Σχήμα 5.16. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής.....	71
Σχήμα 5.17. Γράφημα συσχέτισης γυροσκοπικών δοκιμίων και πυρήνων μίγματος M2	74
Σχήμα 5.18. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2.....	76
Σχήμα 5.19. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης αρχικής διαμέτρου 150mm μίγματος M2	76
Σχήμα 5.20. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος M2.....	79
Σχήμα 5.21. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 0,82°	80
Σχήμα 5.22. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 1,16°	81
Σχήμα 5.23. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 1,45°	81
Σχήμα 5.24. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 υπό θερμοκρασία 135°C	82
Σχήμα 5.25. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 υπό θερμοκρασία 150°C	83
Σχήμα 5.26. Γραμμική εξίσωση συσχέτισης του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2.....	84
Σχήμα 5.27. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M2 διαμέτρου 100mm.....	87
Σχήμα 5.28. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M2 διαμέτρου 150mm.....	88
Σχήμα 5.29. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων μεθόδου Marshall μίγματος M2	90
Σχήμα 5.30. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	91
Σχήμα 5.31. Ποσοστά κενών αέρος και μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	92
Σχήμα 5.32. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M2	94
Σχήμα 5.33. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	98
Σχήμα 5.34. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	98
Σχήμα 5.35. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής	99
Σχήμα 5.36. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης	99

Σχήμα 5.37. Μέτρο δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall και πυρήνων μίγματος M2	103
Σχήμα 5.38. Γράφημα συσχέτισης γυροσκοπικών δοκιμίων, δοκιμίων Marshall και πυρήνων μίγματος M2	105

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Τιμές παραμέτρων γυροσκοπικής και κρουστικής συμπύκνωσης	9
Πίνακας 4.1 : Μεταβλητές γυροσκοπικής συμπύκνωσης.....	38
Πίνακας 4.2 : Κωδικοποίηση γυροσκοπικών δοκιμίων	39
Πίνακας 4.3 : Κωδικοποίηση δοκιμίων Marshall	42
Πίνακας 4.4: Περιγραφή της λειτουργίας συμπύκνωσης για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος	43
Πίνακας 4.5 : Κωδικοποίηση πυρήνων.....	45
Πίνακας 5.1. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης M1	49
Πίνακας 5.2. Διαφορά μέσωσ όρων μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1	51
Πίνακας 5.3. Έλεγχος t για τους δύο μέσους όρους των μέτρων δυσκαμψίας των δύο ζευγών διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1	52
Πίνακας 5.4. Γενικός μέσος όρος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης M1	53
Πίνακας 5.5. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για τη μεταβολή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής	60
Πίνακας 5.6. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης.....	60
Πίνακας 5.7. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για τη μεταβολή της διαμέτρου.....	61
Πίνακας 5.8. Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για όλους τους συνδυασμούς παραγόντων	61
Πίνακας 5.9. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M1	65
Πίνακας 5.10. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ του συνόλου των γυροσκοπικών δοκιμίων και των πυρήνων του μίγματος M1	67
Πίνακας 5.11. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμίων διαμέτρου 100mm και των πυρήνων του μίγματος M1	68
Πίνακας 5.12. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και των πυρήνων του μίγματος M1	69
Πίνακας 5.13.Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής και επιτόπου συμπύκνωσης (πυρήνων) μίγματος M1	73
Πίνακας 5.14. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης M2	75
Πίνακας 5.15. Διαφορά μέσωσ όρων μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2	77
Πίνακας 5.16. Έλεγχος t για τους δύο μέσους όρους των μέτρων δυσκαμψίας των δύο ζευγών διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2	78
Πίνακας 5.17. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M2 για τη μεταβολή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής	85
Πίνακας 5.18. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M2 για τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης.....	85

Πίνακας 5.19. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M2 για τη μεταβολή της διαμέτρου.....	85
Πίνακας 5.20. Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M2 για όλους τους συνδυασμούς παραγόντων	86
Πίνακας 5.21. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall μίγματος M2.....	89
Πίνακας 5.22. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M2	93
Πίνακας 5.23. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ του συνόλου των γυροσκοπικών δοκιμίων και των πυρήνων του μίγματος M2.....	95
Πίνακας 5.24. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμίων διαμέτρου 100mm και των πυρήνων του μίγματος M2.....	96
Πίνακας 5.25. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και των πυρήνων του μίγματος M2	97
Πίνακας 5.25. Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής και επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνων) μίγματος M2.....	101
Πίνακας 5.26. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των δοκιμίων Marshall και των πυρήνων του μίγματος M2.....	102
Πίνακας 5.27. Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμίων κρουστικής και επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνων) μίγματος M2	104

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι σύγχρονες αναλυτικές μεθοδολογίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων χρησιμοποιούν την ελαστική θεωρία για πολυστρωματικά συστήματα, όπου τα υλικά χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας (δυσκαμψίας) και το λόγο Poisson. Ειδικότερα, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, η γνώση της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων αποτελεί βασικό στοιχείο στο πλαίσιο της ανάλυσης και του ορθολογικού σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στο εργαστήριο, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να προσδιορισθεί με μια σειρά από διαδικασίες εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες γενικά διακρίνονται στις δοκιμές σε άμεσο και έμμεσο εφελκυσμό και τις δοκιμές σε κάμψη. Μεταξύ αυτών, η δοκιμή σε έμμεσο εφελκυσμό, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε ευρεία κλίμακα για την αξιολόγηση ασφαλτομιγμάτων και αναλύσεις οδοστρωμάτων, θεωρείται από πολλούς ερευνητές αποτελεσματική για τον χαρακτηρισμό των θεμελιωδών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών και συγκεκριμένα της δυσκαμψίας τους.

Ωστόσο, ο εργαστηριακός προσδιορισμός της δυσκαμψίας προϋποθέτει την προετοιμασία και συμπίκνωση δοκιμίων ασφαλτομίγματος. Σε βάθος χρόνου, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι εργαστηριακής συμπίκνωσης, οι κυριότερες των οποίων είναι η συμπίκνωση με κρουστικό φορτίο (τύπου Marshall), η συμπίκνωση με δόνηση, η γυροσκοπική συμπίκνωση, η συμπίκνωση με κύλινδρο (τύπου Roller) κλπ., με σκοπό την προσομοίωση κατά το δυνατόν των συνθηκών της επιτόπου συμπίκνωσης. Η διαφοροποίηση των μεθόδων ως προς τον τρόπο συμπίκνωσης των ασφαλτομιγμάτων έχει σημαντική επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά των συμπυκνωμένων δοκιμίων. Το γεγονός ότι διαφορετικές μέθοδοι συμπίκνωσης δημιουργούν δοκίμια με παρόμοιες ογκομετρικές ιδιότητες αλλά διαφορετικές μηχανικές έχει τεκμηριωθεί επαρκώς. Ωστόσο, παρά τις εκτεταμένες ερευνητικές προσπάθειες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με το υπόψη ζήτημα, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής ομοφωνία ποια εργαστηριακή μέθοδος συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων προσομοιώνει καλύτερα την επιτόπου συμπίκνωση.

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία

Υπό το πρίσμα των παραπάνω, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων μεθόδων συμπίκνωσης που έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος, καθώς και ο συσχετισμός τους με την επιτόπου συμπίκνωση.

Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας μέσω της δοκιμής σε έμμεσο εφελκυσμό σε δοκίμια ασφαλτομιγμάτων που συμπυκνώθηκαν στο εργαστήριο με την κρουστική μέθοδο Marshall και τη γυροσκοπική μέθοδο, καθώς επίσης σε πυρήνες ασφαλτικών οδοστρωμάτων αντίστοιχων μιγμάτων.

Σημειώνεται ότι τα εργαστηριακά δοκίμια έχουν συμπυκνωθεί μεταβάλλοντας τις τιμές διαφόρων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία συμπίκνωσης, η αρχική διάμετρος των δοκιμίων ή η εσωτερική γωνία περιστροφής. Επισημαίνεται επίσης ότι όσον αφορά στα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης αρχικής διαμέτρου 150mm πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία, με αποτέλεσμα όλα τα δοκίμια που ελέγχθηκαν να έχουν τελική διάμετρο 100mm. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μέθοδο συμπίκνωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Τιμές παραμέτρων γυροσκοπικής και κρουστικής συμπίκνωσης

Παράμετρος	Τιμές	
	Γυροσκοπική συμπίκνωση	Συμπύκνωση Marshall
Θερμοκρασία συμπίκνωσης (°C)	135, 150	115, 125, 135, 150
Εσωτερική γωνία περιστροφής (°)	0.82, 1.16, 1.45	-
Αρχική διάμετρος (mm)	100, 150	100

Σε κάθε δοκίμιο το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται μέσω ελέγχου 4 διαφορετικών διαμέτρων. Μέσω της επεξεργασίας και ανάλυσης των εργαστηριακών δεδομένων, διερευνάται αρχικά η διακύμανση του μέτρου δυσκαμψίας στη μάζα των δοκιμίων. Ακόμη, μελετάται η επιρροή της μεταβολής των παραμέτρων συμπίκνωσης στο μέτρο

δυσκαμψίας. Ειδικότερα, όσον αφορά στην εσωτερική γωνία περιστροφής, διερευνήθηκαν τρεις τιμές, 0.82° , 1.16° και 1.45° . Επισημαίνεται ότι η γωνία περιστροφής 0.82° συστήνεται από την ευρωπαϊκή προδιαγραφή, ενώ η γωνία 1.16° από την αμερικάνικη προδιαγραφή και ως εκ τούτου επιδιώκεται η σύγκριση μεταξύ των προδιαγραφών. Εκτός αυτών, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση της εργαστηριακής και επιτόπου συμπίκνωσης στη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, όσον αφορά στο μέτρο δυσκαμψίας.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

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

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναφέρονται οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς μέχρι σήμερα σε σχέση με την επίδραση της εργαστηριακής συμπίκνωσης στη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στις μεθοδολογίες προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας μέσω εργαστηριακών δοκιμών, δίνοντας έμφαση στη δοκιμή σε έμμεσο εφελκυσμό (Indirect Tensile Stiffness Modulus: ITSM).

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. στο πλαίσιο της επίτευξης των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιλαμβάνονται η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων μετρήσεων στο πλαίσιο του εργαστηριακού πειράματος.

Στο **έκτο κεφάλαιο** αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που αφορούν στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα διεθνώς με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της συμπίκνωσης στη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, οι οποίες εξετάζουν τόσο τις αλλαγές που επιφέρουν οι παράμετροι συμπίκνωσης, όσο και την επιρροή της επιλεγόμενης μεθόδου συμπίκνωσης.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι έρευνες που αναφέρονται στο μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων, το οποίο αποτελεί θεμελιώδη μηχανική ιδιότητα που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικά, παρουσιάζονται εκείνες που μελετούν τη μέθοδο συμπίκνωσης με κρουστικό φορτίο τύπου Marshall και σύμφωνα με τις οποίες:

Προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας μέσω δοκιμής σε έμμεσο εφελκυσμό και μελετήθηκε η επιρροή των εξής παραμέτρων συμπίκνωσης: του μέγιστου ονομαστικού μεγέθους κόκκου (NMAS), των διαστάσεων του δοκιμίου (διαμέτρου και ύψους), της μορφής και της διάρκειας επιβολής του παλμικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα, προέκυψε ότι το μέτρο δυσκαμψίας επηρεάστηκε κυρίως από το μέγιστο ονομαστικό μέγεθος κόκκου, και μάλιστα μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου προσαύξησε την τιμή του μέτρου. Οι υπόλοιπες παράμετροι συμπίκνωσης επηρέασαν σε μικρότερο βαθμό το μέτρο δυσκαμψίας, με αυξήσεις στη διάρκεια φόρτισης και στις διαστάσεις του δοκιμίου να επιφέρουν μείωση του μέτρου. Ακόμη, από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων που εξετάστηκαν, η σημαντικότερη αποδείχθηκε η ταυτόχρονη μεταβολή του μέγιστου ονομαστικού μεγέθους κόκκου και της διαμέτρου, ιδιαίτερα για τις μικρές διαμέτρους, ενώ ακολούθησε ο συνδυασμός των δύο διαστάσεων του δοκιμίου, διαμέτρου και ύψους (Saleh and Ji, 2006 / Jahromi and Khodaii, 2009).

Μελετήθηκε η εξέλιξη του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό με την πάροδο του χρόνου, προκειμένου να διαπιστωθεί αν κρίνεται απαραίτητος για τις ανάγκες σχεδιασμού των οδοστρωμάτων ο διαχωρισμός του σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο, όταν εξετάζονται νέα ή άνω των δύο ετών ασφαλτομίγματα αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν εργαστηριακά δοκίμια διαφορετικού τύπου ασφαλτομιγμάτων και προσδιορίστηκε η τιμή του μέτρου δυσκαμψίας περιοδικά κατά τη διάρκεια δύο ετών. Προέκυψε ότι το μέτρο δυσκαμψίας αυξήθηκε σε σχέση με το χρόνο (Thenoux and Sandoval, 2011).

Μελετήθηκε το μέτρο δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό με σκοπό να ελεγχθεί η εφαρμοσιμότητά του τόσο σε πυκνής διαβάθμισης όσο και σε πορώδη ασφαλτομίγματα. Μεταξύ άλλων, εξετάστηκε η επίδραση δύο σημαντικών παραμέτρων: της επιλογής του αριθμού των διαμέτρων κατά μήκος των οποίων διεξάγεται η δοκιμή και ο αριθμός των παλμών προφόρτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέτρο δυσκαμψίας που προέκυψε κατά τη δοκιμή της δεύτερης διαμέτρου ήταν πάντα χαμηλότερο από το αντίστοιχο της πρώτης για όλα τα εξεταζόμενα μίγματα. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι αυξάνοντας τον αριθμό των διαμέτρων και των παλμών προφόρτισης, μειώθηκε η διακύμανση των τιμών και ως εκ τούτου βελτιώθηκε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Pasetto and Baldo, 2006).

Σε άλλη έρευνα μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του μεγέθους του φορτίου που ασκείται και της επιλογής του άξονα φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας. Ειδικότερα, διεξήχθησαν δοκιμές, κατά μήκος 3 τυχαίων αξόνων, με τέσσερα διαφορετικά ασκούμενα φορτία σε κάθε δοκίμιο και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε μείωση του μέτρου για μεγαλύτερες τιμές φόρτισης, καθώς επίσης και μείωση της διακύμανσης των τιμών του μέτρου όσο το φορτίο αυξανόταν. Το παραπάνω αποδόθηκε στο γεγονός ότι η δοκιμή είναι δυναμική, δηλαδή το φορτίο παραμένει σε επαφή με το δοκίμιο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, συνεπώς για χαμηλές φορτίσεις δεν αποκρίνεται όλο το δοκίμιο στο φορτίο αλλά, στην πραγματικότητα, ένα μικρότερο ποσοστό του υλικού. Όσον αφορά στον άξονα κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι φορτίσεις, οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας κατά τον δεύτερο άξονα εξέτασης βρέθηκαν χαμηλότερες από αυτές του πρώτου, και αντίστοιχα οι τιμές για τον τρίτο άξονα χαμηλότερες από αυτές για τους δύο που είχαν προηγηθεί, γεγονός το οποίο οφείλεται στη μείωση της ελαστικότητας του δοκιμίου μετά από κάθε διεξαγωγή φόρτισης (Al- Sugair and Almudaiheem, 1992).

Κατόπιν, γίνεται αναφορά των ερευνών αυτών που χρησιμοποιούν τη γυροσκοπική μέθοδο συμπύκνωσης, όπου:

Μελετήθηκε το μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος και η επίδραση που επιφέρει η αλλαγή της γεωμετρίας του δοκιμίου σε αυτό, μέσω της παρασκευής συνθετικών δοκιμίων ασφαλτομιγμάτων με διαφορετικό λόγο ύψους – διαμέτρου. Από τα αποτελέσματα σχετικής έρευνας, βρέθηκε ότι αύξηση του παραπάνω λόγου προκάλεσε αύξηση στο μέτρο δυσκαμψίας (Tandon et al., 2006).

Στους παράγοντες μελέτης της έρευνας αυτής περιλαμβάνονταν η συχνότητα φόρτισης, το ποσοστό ασφάλτου, το ποσοστό κενών αέρος και η θερμοκρασία δοκιμής.

Αποδείχθηκε ότι για υψηλότερες συχνότητες φόρτισης, μειωμένο ποσοστό ασφάλτου και μικρό ποσοστό κενών αέρος το μέτρο δυσκαμψίας αυξάνεται. Βρέθηκε, ακόμη, ότι αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία αποτέλεσε τον παράγοντα που επηρέασε το μέτρο, οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας (Robinette et al., 2010). Τους παράγοντες της θερμοκρασίας δοκιμής και της συχνότητας φόρτισης εξέτασε και άλλη έρευνα που κατέληξε στα αντίστοιχα συμπεράσματα, ότι δηλαδή για υψηλότερη θερμοκρασία το μέτρο δυσκαμψίας υπέστη μείωση, ενώ για υψηλότερη συχνότητα φόρτισης το ίδιο μέγεθος παρουσίασε αύξηση (Wang et al., 2000).

Διερευνήθηκε κατά πόσο η τροποποίηση ορισμένων παραμέτρων της γυροσκοπικής μεθόδου συμπύκνωσης προσομοιάζει τη μηχανική συμπεριφορά των πυρήνων πεδίου. Μελετήθηκαν η γωνία περιστροφής, το ύψος του δοκιμίου και η πίεση, στα πλαίσια της επίπτωσης της μεμονωμένης αλλαγής τους, αλλά και συνδυασμού τους, επί του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι την πιο σημαντική επιρροή στη μηχανική συμπεριφορά άσκησε η γωνία περιστροφής, με τους συνδυασμούς που την περιλαμβάνουν να ακολουθούν, και μάλιστα όσο η γωνία μεγάλωνε, το μέτρο υφίστατο μείωση. Ωστόσο, το παραπάνω γεγονός δεν επαληθεύτηκε για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών της γωνίας περιστροφής ($1.5^\circ - 2.0^\circ$) (Peterson et al., 2004). Σε άλλη έρευνα, όπου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας με τιμές γωνίας περιστροφής $1,25^\circ$ και 6° , βρέθηκε ότι η εξωτερική γωνία περιστροφής της γυροσκοπικής συμπύκνωσης μετέβαλε με τον ίδιο τρόπο το μέγεθος του μέτρου, καθώς αυτό απέδωσε μεγαλύτερες αριθμητικές τιμές για τη γωνία $1,25^\circ$ (Khan et al., 1998).

Τέλος, παρατίθενται οι έρευνες στα πλαίσια μελέτης των οποίων διεξήχθη σύγκριση της γυροσκοπικής μεθόδου συμπύκνωσης και της μεθόδου συμπύκνωσης Marshall και συσχέτιση με την επιτόπου συμπύκνωση. Με βάση αυτές:

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει από την εργαστηριακή δοκιμή σε δείγματα ασφαλτομιγμάτων συμπυκνωμένων με την κρουστική μέθοδο κατά Marshall και του αντίστοιχου μεγέθους για πυρήνες που ελήφθησαν από το οδόστρωμα και βρέθηκε ότι το μέτρο που προσδιορίστηκε για τα εργαστηριακά δοκίμια προέκυψε σταθερά μεγαλύτερο από αυτό των πυρήνων πεδίου, με το μεταξύ τους λόγο να κυμαίνεται γύρω στο 1,4 (Thenoux and Sandoval, 2011).

Προσδιορίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας μέσω δοκιμής σε εφελκυσμό για τη μελέτη της επίδρασης της μεθόδου συμπύκνωσης Marshall και της γυροσκοπικής μεθόδου

συμπύκνωσης του ίδιου ασφαλτομίγματος, σε σχέση με τη διάμετρο του δοκιμίου. Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος Marshall απέδωσε υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας απ' ό τι η γυροσκοπική μέθοδος για μικρές διαμέτρους (100mm), ενώ για μεγαλύτερες διαμέτρους (150mm) δεν υπήρξε σημαντική διαφοροποίηση στην επίδραση των δύο μεθόδων (Saleh and Ji, 2006). Αντιθέτως, σε άλλη έρευνα όπου πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη σύγκριση των μέτρων δυσκαμψίας, αποδείχθηκε ότι η γυροσκοπική μέθοδος οδήγησε σε υψηλότερες τιμές του μέτρου σε σχέση με τη μέθοδο Marshall, για την οποία όμως επετεύχθη μεγαλύτερος βαθμός προσέγγισης της επιτόπου συμπίκνωσης (Hartman et al., 2001). Το εύρημα αυτό επιβεβαιώθηκε από τρίτη έρευνα, όπου βρέθηκαν μεγαλύτερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας για τη γυροσκοπική συμπίκνωση σε σχέση με την κρουστική μέθοδο κατά Marshall. Ωστόσο, σχετικά με την προσομοίωση των συνθηκών πεδίου προέκυψε καλύτερη προσέγγιση με χρήση της γυροσκοπικής μεθόδου, ιδιαίτερα για εσωτερική γωνία περιστροφής $1,16^\circ$ (Khan et al., 1998).

Από τα παραπάνω , λοιπόν, προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της επιρροής που ασκεί η επιλεγόμενη μέθοδος συμπίκνωσης και οι παράμετροι αυτής στη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων.

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

3.1 Γενικά στοιχεία

Το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί θεμελιώδη μηχανική ιδιότητα των ασφαλτομιγμάτων. Ισούται με το λόγο τάσης – παραμόρφωσης και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απομείωση των τάσεων, οι οποίες παραλαμβάνονται από τις υποκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος. Γενικά, στην περίπτωση ασφαλτομίγματος με μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας, η καταπόνηση των υποκείμενων στρώσεων είναι μικρότερη σε σχέση με ένα ασφαλτόμιγμα με μικρότερο μέτρο δυσκαμψίας. Ωστόσο, μεγάλες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας ενδεχομένως να οδηγήσουν σε πρόωρη ρηγμάτωση του ασφαλτομίγματος. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι το μέτρο δυσκαμψίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της συμπεριφοράς των ασφαλτικών στρώσεων όσο και συνολικά του οδοστρώματος.

Το ασφαλτόμιγμα εμπεριέχει δύο υλικά με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά (Λοΐζος 2011) : την άσφαλτο, με ιξωδοελαστική συμπεριφορά και τα συμπυκνωμένα αδρανή, με κατά βάση ελαστική συμπεριφορά. Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει τελικά και όλο το μίγμα συμπεριφέρεται ως ιξωδοελαστικό υλικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και το χρόνο φόρτισης και επομένως να δίνεται από μία σχέση του τύπου:

$$S_m = (\sigma / \epsilon) T, t \quad [3.1]$$

Όπου :

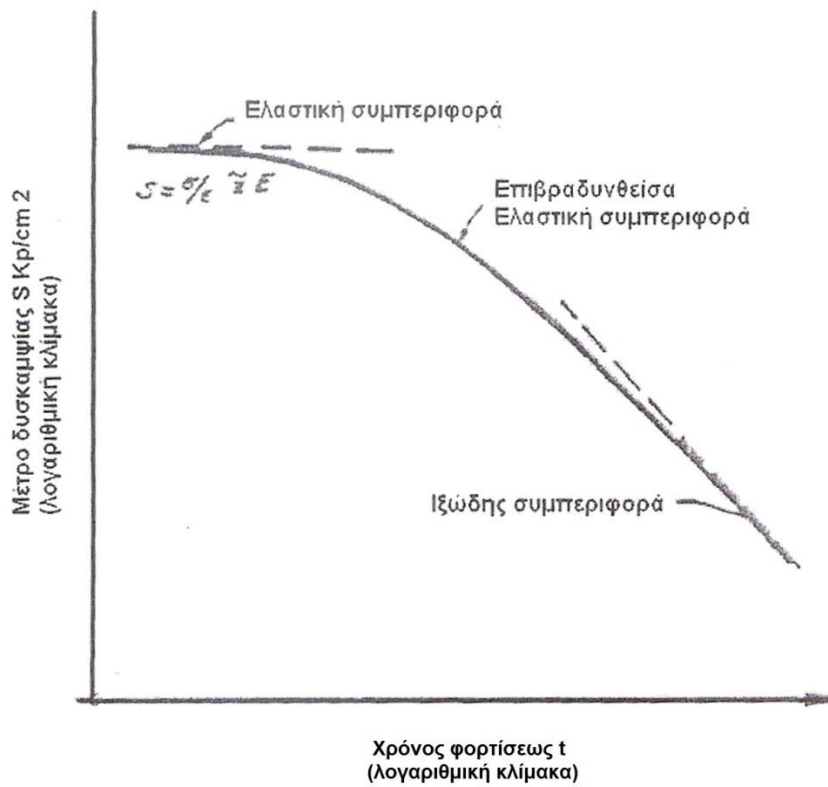
σ : η αναπτυσσόμενη τάση

ϵ : η παραμόρφωση του ασφαλτομίγματος

T: η θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος

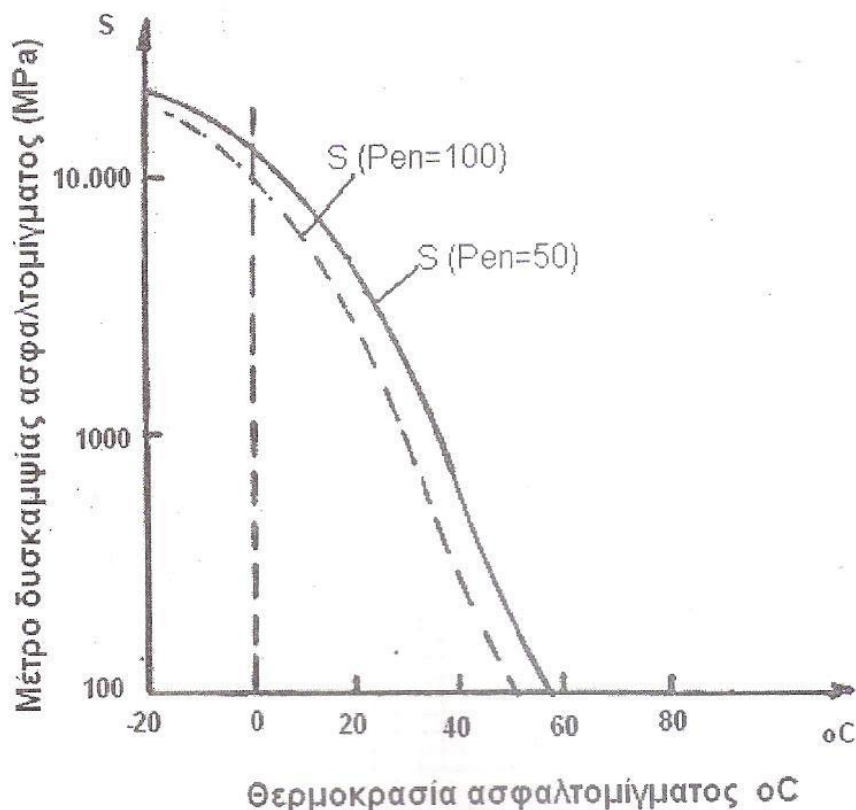
t: ο χρόνος φόρτισης

Η επίδραση των δύο μεγεθών, της θερμοκρασίας και του χρόνου φόρτισης, στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα (Λοΐζος 2011).



Σχήμα 3.1. Σχέση χρόνου φόρτισης και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος

Στο σχήμα 3.1 παρατηρείται ότι αύξηση του χρόνου φόρτισης επιφέρει μείωση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας, γεγονός το οποίο φανερώνει την αρνητική επίδραση του χρόνου φόρτισης στο μέτρο δυσκαμψίας του οδοστρώματος.



Σχήμα 3.2. Σχέση θερμοκρασίας και μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτομιγματος

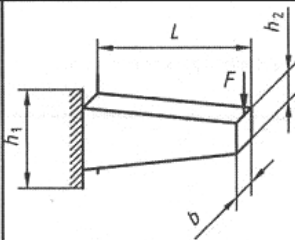
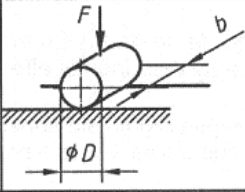
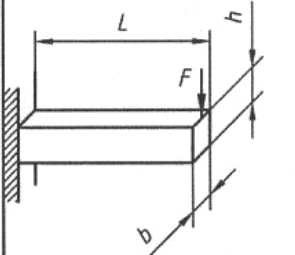
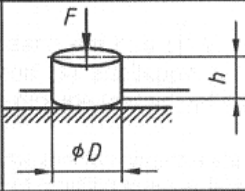
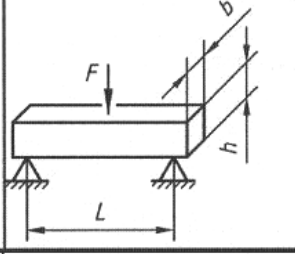
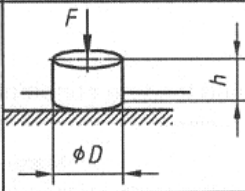
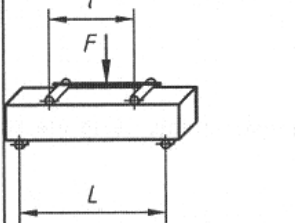
Παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 3.2, φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση ότι το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Επομένως, τόσο η αύξηση του χρόνου φόρτισης, όσο και η αύξηση της θερμοκρασίας, επιδρούν αρνητικά στο μέτρο δυσκαμψίας, επιφέροντας μείωση της τιμής του. Οι μεταβολές αυτές θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του οδοστρώματος προκειμένου να μην υπάρξουν καταστροφικές επιπτώσεις.

Η διαδικασία προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εργαστηριακά με κατάλληλες δοκιμές επί δοκιμίων ή πυρήνων οδοστρώματος, είτε με την ενεργοποίηση αλγορίθμων. Στην περίπτωση υφιστάμενου οδοστρώματος, το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται επί τόπου με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT: Non Destructive Testing). Υπενθυμίζεται ότι, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακός προσδιορισμός του μέτρου δυσκαμψίας δύο τύπων ασφαλτομιγμάτων.

3.2 Εργαστηριακός προσδιορισμός μέτρου δυσκαμψίας

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται διεθνώς για το χαρακτηρισμό της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων διακρίνονται σε δοκιμές σε κάμψη και δοκιμές σε άμεσο και έμμεσο εφελκυσμό. Οι υπόψη δοκιμές πραγματοποιούνται σε συμπυκνωμένα ασφαλτικά δοκίμια με την επιβολή είτε παλμικής είτε αρμονικής (ημιτονοειδούς) φόρτισης, ωστόσο διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τον τύπο δοκιμίου και τον τρόπο τοποθέτησής του στη διάταξη της συσκευής. Ως αποτέλεσμα αυτών, παρατηρούνται αποκλίσεις του μέτρου δυσκαμψίας που προκύπτει, τόσο λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας όσο και του διαφορετικού τρόπου φόρτισης του δοκιμίου (σχήμα 3.3).

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ		ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΑΜΕΣΟ ΚΑΙ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	
2PB-TR		IT-CY	
2PB-PR		DTC-CY	
3PB-PR		DT-CY DT-PR	
4PB-PR			

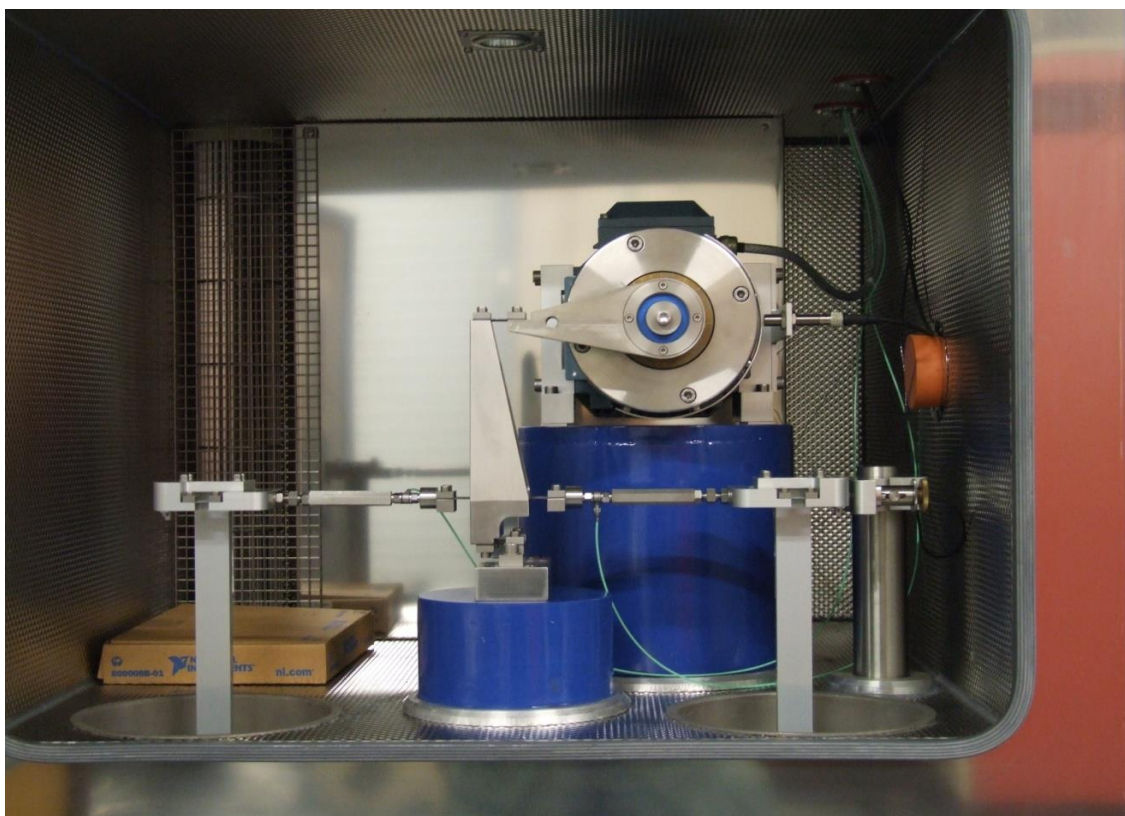
Σχήμα 3.3. Τύποι φόρτισης εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού μέτρου δυσκαμψίας

Παρακάτω, περιγράφονται οι μεθοδολογίες και πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, οι οποίες συστήνονται από την ευρωπαϊκή προδιαγραφή (EN 12697-2004).

3.2.1 Δοκιμές σε κάμψη

3.2.1.1 Δοκιμή κάμψης δύο σημείων σε τραπεζοειδή (2PB-TR) ή πρισματικά δοκίμια (2PB-PR)

Αποτελεί μέθοδο μέτρησης της δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων κάνοντας χρήση της δοκιμής κάμψης σε πρόβολο. Ημιτονοειδής δύναμη ή μετατόπιση εφαρμόζεται στην κορυφή δοκιμίου, το οποίο βασίζεται σε ένα στήριγμα επί άκαμπτου πλαισίου. Η δύναμη ή η μετατόπιση θα πρέπει να είναι τόση έτσι ώστε η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση που προκαλείται να μην ξεπερνά τα 50 microstrain στο σημείο του δοκιμίου που δέχεται τη μεγαλύτερη τάση. Μέσω της δύναμης, της μετατόπισης και της γωνίας φάσης, υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας για διαφορετικές θερμοκρασίες και συχνότητες.



Σχήμα 3.4. Απεικόνιση δοκιμής σε κάμψη δύο σημείων

Προετοιμασία δείγματος

Τα δοκίμια έχουν σχήμα τραπεζοειδές ή πρισματικό με συγκεκριμένες διαστάσεις, μετρημένες με ακρίβεια 0,1 mm, και μάζα με ακρίβεια 0,1g.

Λαμβάνονται από κοπή εργαστηριακών πλακών σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-33 ή από πλάκες που έχουν αποκοπεί από επιφάνειες οδοστρωμάτων με πάχος άνω των 60mm. Ο διαμήκης άξονας της πλάκας θα πρέπει να είναι παράλληλος ως προς τον οριζόντιο άξονα συμπύκνωσης του μίγματος.

Τα δείγματα φυλάσσονται σε επίπεδη επιφάνεια προστατευμένη από τον ήλιο, σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 30°C και υπό συνθήκες που αποτρέπουν την κάμψη.

Η φαινόμενη πυκνότητά τους προσδιορίζεται με βάση το πρότυπο EN 12697-6 και για κάθε ένα από αυτά δεν πρέπει να διαφέρει πάνω από 1% από τη μέση φαινόμενη πυκνότητα του συνόλου, ειδάλως το συγκεκριμένο δοκίμιο απορρίπτεται.

Κάθε δοκίμιο προσκολλάται μέσω της βάσης του σε ένα μεταλλικό στήριγμα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται σωστή γεωμετρική τοποθέτηση του δοκιμίου σε σχέση με το στήριγμα.

Τρόπος λειτουργίας

Στην κορυφή του δοκιμίου εφαρμόζεται ημιτονοειδής δύναμη για χρονικό διάστημα διάρκειας 30 s έως και 2 min και επιβαλλόμενη μετατόπιση που αντιστοιχεί σε μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση μικρότερη των 50 microstrain.

Οι μετρήσεις της δύναμης, της μετατόπισης και της γωνίας φάσης καταγράφονται για τα 10 τελευταία δευτερόλεπτα της δοκιμής.

Το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται κατ' ελάχιστο για 4 θερμοκρασίες που διαφέρουν μεταξύ τους έως και 10 °C, για κάθε μία από τις οποίες πραγματοποιείται ξεχωριστά προσδιορισμός του μέτρου σε 3 διαφορετικές συχνότητες, ομοιόμορφα κατανεμημένες σε λογαριθμική κλίμακα με ελάχιστο λόγο ακραίων συχνοτήτων ίσο με 10.

3.2.1.2 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε πρισματικά δοκίμια (3PB-PR) και δοκιμή κάμψης 4 σημείων σε πρισματικά δοκίμια (4PB-PR)

Αποτελεί μέθοδο μέτρησης της δυσκαμψίας των ασφαλτικών μιγμάτων μέσω δοκιμής κάμψης. Ένα πρισματικό δοκίμιο υποβάλλεται σε περιοδική κάμψη 3 ή 4 σημείων με ελεύθερη περιστροφή και (οριζόντια) μετατροπή σε κάθε σημείο φόρτισης και αντίδρασης (σχήμα 3.5). Η κάμψη πραγματοποιείται με τη μετακίνηση του(ων) κεντρικού(ων) σημείου(ων) φόρτισης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, κάθετα ως προς το διαμήκη άξονα του δοκιμίου, ενώ οι κατακόρυφες θέσεις των 2 ακραίων σημείων παραμένουν σταθερές. Η εφαρμοζόμενη περιοδική μετατόπιση είναι συμμετρική ως προς το μηδέν και ημιτονοειδούς μορφής. Το εύρος της θα πρέπει να είναι σταθερό, ως συνάρτηση του χρόνου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, η απαιτούμενη δύναμη για την παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζεται ως συνάρτηση του χρόνου καθώς επίσης και της διαφοράς φάσης που επικρατεί μεταξύ δύναμης και μετατόπισης. Έτσι, προσδιορίζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.



Σχήμα 3.5. Απεικόνιση δοκιμής κάμψης 4 σημείων

Προετοιμασία δείγματος

Το δοκίμιο έχει σχήμα πρισματικής δοκού με συγκεκριμένο λόγο διαστάσεων και ανοχών όσον αφορά στο συνολικό μήκος.

Τα δείγματα λαμβάνονται από κοπή εργαστηριακά συμπυκνωμένων πλακών (σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-33) ή από πλάκες που έχουν αποκοπεί από επιφάνειες οδοστρωμάτων με πάχος μεγαλύτερο των 60 mm.

Από κάθε πλάκα προκύπτουν έξι δοκίμια, τα οποία φυλάσσονται σε επίπεδη επιφάνεια ώστε να μην κάμπτονται και σε θερμοκρασία χαμηλότερη των 30°C.

Οι διαστάσεις τους υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-29 και η μάζα τους μετράται με ακρίβεια 0,1g. Η φαινόμενη πυκνότητα των δοκιμίων προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-6 και κάθε δείγμα δεν πρέπει να διαφέρει παραπάνω από 1% από τη μέση φαινόμενη πυκνότητα του συνόλου των προς εξέταση δοκιμίων, ειδάλλως το συγκεκριμένο δοκίμιο απορρίπτεται.

Τρόπος λειτουργίας

Τρεις (3PB) ή τέσσερις (4PB) σφινγκήρες στερεώνονται στο δοκίμιο σε ίσες αποστάσεις, με ανοχή διαστημάτων ± 2 mm.

Στη διάταξη της δοκιμής, το δείγμα περιστρέφεται κατά 90° κατά μήκος του διαμήκη άξονά του σε σχέση με την αρχική του θέση.

Η πρισματική δοκός ζυγίζεται καθώς επίσης και όλα τα κινητά μέρη ανάμεσα στο θάλαμο φόρτισης και τη δοκό (κινητό πλαίσιο, σφινγκήρες και αισθητήρας παραμόρφωσης), καθώς επίσης και τα σημεία της δοκού όπου οι υπόψη μάζες ασκούν επιρροή προσδιορίζονται με σκοπό να υπολογισθεί ο συντελεστής μάζας.

Στο δοκίμιο επιβάλλεται δύναμη ημιτονοειδούς μορφής προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης (50 ± 3 microstrain). Το εύρος της παραμόρφωσης θα πρέπει να παραμένει στο 2% της ονομαστικής τιμής.

Η δύναμη, η παραμόρφωση και η γωνία φάσης καταγράφονται, μαζί με τη θερμοκρασία δοκιμής και τη συχνότητα.

Το αρχικό μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται για έναν κύκλο φόρτισης μεταξύ της 45^{ης} και της 100^{ης} επανάληψης. Ο αριθμητικός μέσος των τιμών των μέτρων δυσκαμψίας τουλάχιστον 2 δειγμάτων αποτελεί το τελικό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

3.2.2 Άμεσες μονοαξονικές δοκιμές

3.2.2.1 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού – θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια (DTC-CY)

Ημιτονοειδής ανηγμένη παραμόρφωση εφαρμόζεται σε κυλινδρικό δείγμα, το οποίο έχει συγκολληθεί σε 2 σιδερένιες πλάκες βιδωμένες στο πλαίσιο φόρτισης. Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 25 microstrain. Με μετρημένες την δύναμη και τη γωνία φάσης, υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες και συχνότητες.



Σχήμα 3.6. Δοκιμή σε άμεσο εφελκυσμό – θλίψη

Προετοιμασία δείγματος

Το δοκίμιο είναι κυλινδρικό και λαμβάνεται είτε από διάτρηση πυρήνων και κοπή πλακών εργαστηριακά συμπυκνωμένων (σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-33 ή από οδόστρωμα) ή μέσω γυροσκοπικής συμπύκνωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-31. Τόσο η διάμετρός του όσο και το μήκος και πλάτος του πρέπει να λαμβάνουν τιμές εντός διακεκριμένων διαστημάτων ($50\text{mm} \leq D \leq 160\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$, $1,8 \leq H/D \leq 3$).

Κάθε δοκίμιο προσκολλάται από τα δύο άκρα του σε ατσάλινες πλάκες. Οι σφαιρικοί σύνδεσμοι των άκρων επιτρέπουν την προσαρμογή της θέσης του δοκιμίου. Μόλις βρεθεί η σωστή θέση, η περιστροφή των σφαιρικών συνδέσμων εμποδίζεται. Ο άξονας του κυλίνδρου είναι παράλληλος προς τον άξονα μετακίνησης της συσκευής συμπύκνωσης.

Στη συνέχεια, η μοναδική μετακίνηση που επιτρέπεται για τον άνω δίσκο είναι λόγω μονοαξονικής φόρτισης σε εφελκυσμό – θλίψη. Η κάτω πλάκα είναι σταθερή στο πλαίσιο φόρτισης και ημιτονοειδής ανηγμένη παραμόρφωση εφαρμόζεται στην άνω ατσάλινη πλάκα.

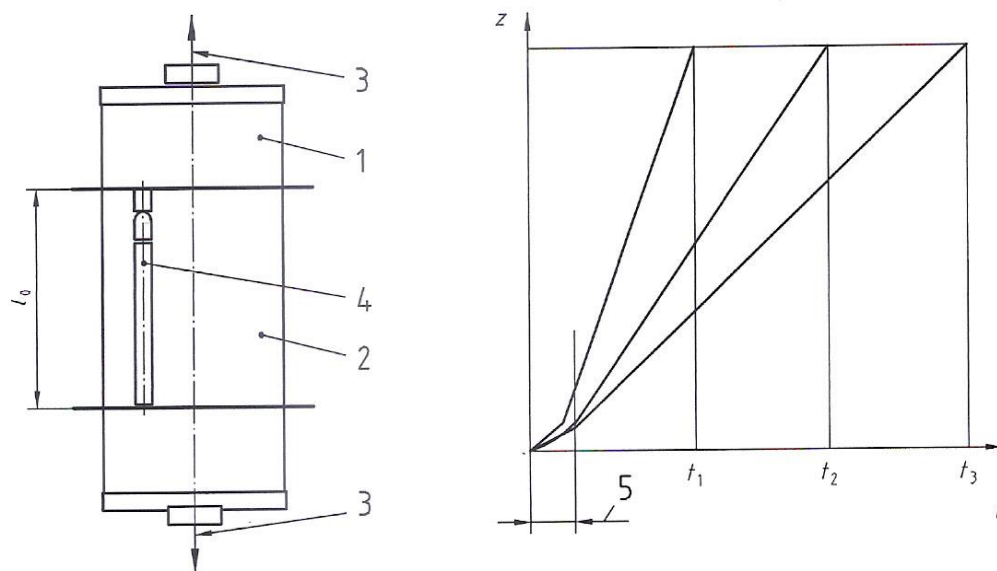
Για κάθε ασφαλικό μίγμα διεξάγονται τουλάχιστον 4 επαναλήψεις.

Τρόπος λειτουργίας

Το δοκίμιο υποβάλλεται σε ημιτονοειδή ανηγμένη παραμόρφωση μικρότερη ή ίση με 25 microstrain. Το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται σε τουλάχιστον 4 διαφορετικές θερμοκρασίες και 6 συχνότητες.

3.2.2.2 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικά (DT-CY) ή σε πρισματικά δοκίμια (DT-PR)

Κατά τη δοκιμή αυτή, στο δοκίμιο επιβάλλονται φορτία μονοαξονικού εφελκυσμού για δεδομένες θερμοκρασίες και χρόνους φόρτισης, εφαρμόζοντας παραμόρφωση η οποία αυξάνεται γραμμικά, $z = a \times t$. Το δείγμα θα πρέπει να είναι καλά σταθεροποιημένο πριν και μετά από κάθε διεξαγωγή δοκιμής στοιχείου. Η διάταξη της δοκιμής απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.7. Πρότυπο δοκιμής σε άμεσο εφελκυσμό για κυλινδρικό δείγμα

Προετοιμασία δείγματος

- Κυλινδρικά δοκίμια

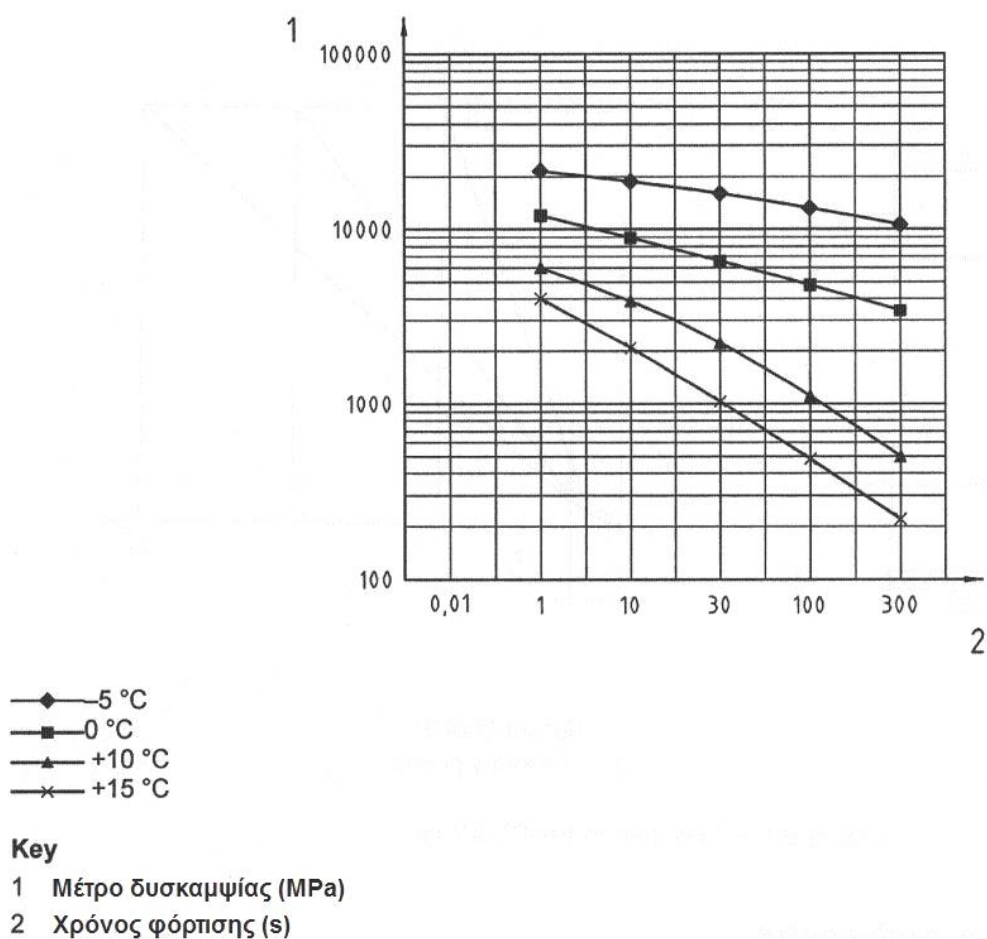
Τα κυλινδρικά δοκίμια είναι ορθογωνικοί κύλινδροι που λαμβάνονται είτε από διάτρηση πυρήνων και κοπή πλακών εργαστηριακά συμπυκνωμένων (σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-33 ή από οδόστρωμα) ή μέσω γυροσκοπικής συμπίκνωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-31. Τόσο η διάμετρός τους όσο και το μήκος και πλάτος τους πρέπει να λαμβάνουν τιμές εντός διακεκριμένων διαστημάτων ($50\text{mm} \leq D \leq 160\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$, $2 \leq H/D \leq 3$). Σε περίπτωση δοκιμίου οδοστρώματος ή πλάκας παρασκευασμένης στο εργαστήριο, ο άξονας του κυλίνδρου θα πρέπει να είναι παράλληλος ως προς τον άξονα μετακίνησης της συσκευής συμπίκνωσης. Τέλος, για κάθε ασφαλτικό μίγμα διεξάγονται τουλάχιστον 4 επαναλήψεις.

- Πρισματικά δοκίμια

Τα πρισματικά δοκίμια λαμβάνονται από κοπή πλακούντων οδοστρωμάτων ή εργαστηριακά συμπυκνωμένων πλακών σύμφωνα με το πρότυπο EN 12697-33. Αποτελούνται από μια ορθογωνική διατομή με συγκεκριμένα όρια και αναλογίες διαστάσεων, ενώ ο άξονας του πρισματικού μέρους βρίσκεται παράλληλος ως προς τον άξονα μετακίνησης της συσκευής συμπίκνωσης. Και σε αυτήν την περίπτωση, διεξάγονται τουλάχιστον 4 επαναλήψεις για κάθε ασφαλτόμιγμα.

Τρόπος λειτουργίας

Οι δοκιμές των δοκιμίων καθορίζονται επιλέγοντας κάθε φορά τη θερμοκρασία δοκιμής, το επίπεδο της σχετικής παραμόρφωσης και το χρόνο φόρτισης (με ακρίβεια 2%). Αφού διεξαχθεί η δοκιμή, προσδιορίζεται η τάση για τη δεδομένη παραμόρφωση. Στη συνέχεια, γίνεται εξαγωγή της θεμελιώδους καμπύλης (master curve), ως εξής : οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας παρουσιάζονται γραφικά σε λογαριθμική κλίμακα υπό μορφή ισόθερμων καμπυλών του μέτρου συναρτήσεως των χρόνων φόρτισης. Παράδειγμα ισόθερμων καμπυλών δίνεται στο επόμενο σχήμα 3.8. Η καμπύλη master curve σε ορισμένη θερμοκρασία δημιουργείται από τη μετατόπιση των ισόθερμων καμπυλών σε άλλες θερμοκρασίες με μετατροπή κατά μήκος της κλίμακας των χρόνων φόρτισης. Ο παράγοντας μετατόπισης προσδιορίζεται γραφικά ή υπολογιστικά έτσι ώστε να ληφθεί μια συνεχής καμπύλη στην απαιτούμενη θερμοκρασία. Το μέτρο δυσκαμψίας στον απαιτούμενο χρόνο φόρτισης εντοπίζεται στην καμπύλη master curve της ζητούμενης θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.8. Παράδειγμα ισόθερμων καμπυλών δοκιμής σε άμεσο εφελκυσμό

3.2.3 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

3.2.3.1 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού σε κυλινδρικά δοκίμια (IT- CY)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κυλινδρικά δοκίμια με διάφορες διαμέτρους και πάχη, παρασκευασμένα στο εργαστήριο ή κομμένα από επιφάνειες οδοστρωμάτων.

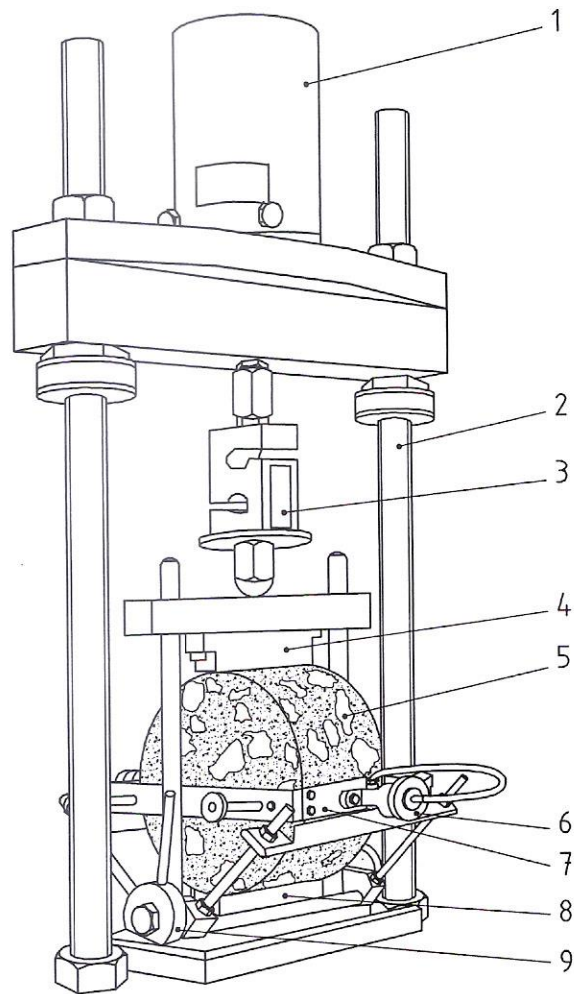
Εξοπλισμός

- Γενικές συσκευές

Για τη διεξαγωγή της δοκιμής απαιτούνται θερμόμετρο ή θερμοστοιχείο με ικανότητα μέτρησης $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του δοκιμίου, καθώς και του περιβάλλοντος αποθήκευσης και δοκιμής, χάρακας με διαβάθμιση 1 mm, παχύμετρα με δυνατότητα μέτρησης $\pm 0,1$ mm και δισκοπρίονο για την κοπή των δοκιμίων σύμφωνα με τις απαιτούμενες διαστάσεις.

- Εξοπλισμός δοκιμής

Η συσκευή της δοκιμής αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης με δύο ανοξείδωτες ράβδους. Τα στελέχη επιβολής φορτίου έχουν κοίλη επιφάνεια που εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δοκιμίου και στρογγυλεμένες άκρες προκειμένου να μην κοπεί το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το κάτω στέλεχος επιβολής φορτίου κεντράρεται με τον άξονα του μεταλλικού πλαισίου φόρτισης, ενώ το άνω στέλεχος επιβολής φορτίου εφάπτεται με το σύστημα φόρτισης μέσω σφαιρικού στοιχείου (σχήμα 3.9).



- | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|
| 1 | Ενεργοποιητής φορτίου | 6 | Ρυθμιστής ηλεκτρομηκνισομέτρων |
| 2 | Μεταλλικό πλαίσιο φόρτισης | 7 | Πλαίσιο συγκράτησης ηλεκτρομηκνισομέτρων |
| 3 | Δυναμοκυψέλη | 8 | Κάτω στέλεχος επιβολής φορτίου |
| 4 | Άνω στέλεχος επιβολής φορτίου | 9 | Συσκευή ευθυγράμμισης ηλεκτρομηκνισομέτρων |
| 5 | Δοκίμιο | | |

Σχήμα 3.9. Συσκευή δοκιμής σε έμμεσο εφελκυσμό

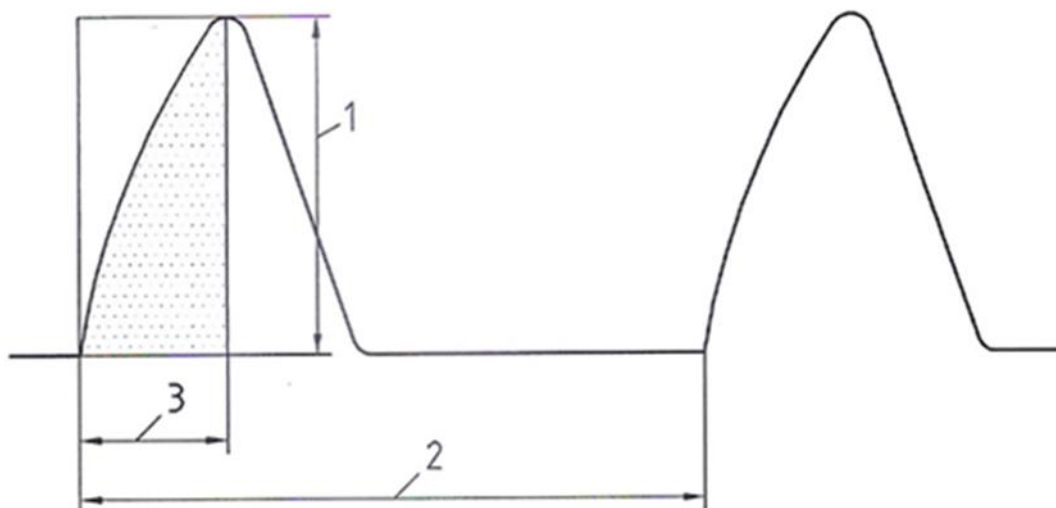
- Σύστημα φόρτισης

Το σύστημα φόρτισης περιλαμβάνει έναν ενεργοποιητή φορτίου, με τη βοήθεια του οποίου το φορτίο επιβάλλεται κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου διαμέσω των δύο στελεχών, άνω και κάτω. Ο ενεργοποιητής εφαρμόζει επαναλαμβανόμενες φορτίσεις με περίοδο ανάπαυσης μεταξύ τους. Η κυματομορφή του φορτίου ακολουθεί την εξίσωση του Haversine [$\text{haversin}(\theta) = \sin^2(\theta/2)$], ενώ ο χρόνος φόρτισης ελέγχεται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Η διάρκεια ανάδυσσης, η οποία είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το φορτίο μέχρι να φτάσει από το μηδέν στην ανώτερη τιμή του, μετράται από τη χρονική στιγμή που ξεκινά ο πρώτος χτύπος φόρτισης και είναι της τάξεως των (124 ± 4) ms. Η μέγιστη τιμή του φορτίου θα πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα ούτως ώστε να επιτευχθεί μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση της τάξης του 0,005% της διαμέτρου του δείγματος.

Επιπλέον, για τη μέτρηση του ασκούμενου φορτίου χρησιμοποιείται μια δυναμοκυψέλη ακρίβειας 2%. Το διάστημα μέχρι την επανάληψη του επόμενου χτύπου πρέπει να είναι $(3,0 \pm 0,1)$ s.

Υπολογίζεται, ακόμη, ο συντελεστής περιοχής φόρτισης ως ο λόγος της σκιασμένης περιοχής που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 3.10 προς το γινόμενο της περιόδου ανόδου επί το μέγιστο φορτίο. Στην περίπτωση που ο υπόψη συντελεστής αποκλίνει της τιμής 0,60 τότε το μέτρο δυσκαμψίας που έχει υπολογισθεί πρέπει να διορθώνεται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.



- 1 Μέγιστη φόρτιση
- 2 Κύκλος φόρτισης
- 3 Διάρκεια ανάδυσσης

Σχήμα 3.10. Μορφή παλμικής φόρτισης, διάρκεια ανάδυσσης και μέγιστο φορτίο

Ένας εξοπλισμός καταγραφής που περιλαμβάνει μία ψηφιακή μονάδα συνδεδεμένη με μικροϋπολογιστή χρειάζεται ώστε να παρακολουθεί και να καταγράφει τα ηλεκτρικά σήματα από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα.

Η δοκιμή καθώς επίσης και η προθέρμανση των δοκιμών πραγματοποιούνται μέσα σε κατάλληλο θερμοθάλαμο.

Προετοιμασία δείγματος

Τα κυλινδρικά δοκίμια θα πρέπει να έχουν πάχος μεταξύ 30 mm και 75 mm και ονομαστική διάμετρο 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm ή 200 mm. Και οι δύο διαστάσεις επιλέγονται με βάση το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών του μίγματος.

Τα προς εξέταση δοκίμια μπορούν να προέρχονται είτε από διάτρηση πυρήνων συμπυκνωμένων στρώσεων οδοστρώματος ή εργαστηριακά συμπυκνωμένων πλακών και κυλινδρικών δοκιμών.

Η διάμετρος κάθε πυρήνα θα πρέπει να απέχει από την ονομαστική διάμετρο ± 5 mm. Οποιαδήποτε τμήματα προεξέχουν απομακρύνονται και ο κύλινδρος τοποθετείται στο πλαίσιο ευθυγράμμισης όπου συσφίγγεται και, στη συνέχεια, κόβεται σε στρώσεις συγκεκριμένου πάχους, η κάθε μία από τις οποίες αποτελεί ένα ξεχωριστό δοκίμιο. Το πάχος κάθε δοκιμίου υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12627-29. Έπειτα, χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο μαρκαδόρο, μία διάμετρος χαράσσεται σε μια επίπεδη επιφάνεια του δοκιμίου.

Όσον αφορά στις συνθήκες αποθήκευσης, αν το δοκίμιο έχει αποθηκευτεί για λιγότερο από 4 ημέρες, τότε η θερμοκρασία αποθήκευσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 25°C, ενώ για περισσότερες των 4 ημερών το ανώτατο όριο θερμοκρασίας είναι 5°C. Τα δοκίμια αποθηκεύονται πάνω σε επίπεδη οριζόντια επιφάνεια και απαγορεύεται αυστηρά να στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο.

Τρόπος λειτουργίας

- Συντήρηση και δοκιμή θερμοκρασίας

Το δείγμα τοποθετείται σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και παρακολουθείται έως ότου φτάσει την θερμοκρασία δοκιμής. Η θερμοκρασία του δοκιμίου προσδιορίζεται από αισθητήρες οι οποίοι συνδέονται στην κυρτή επιφάνεια και το κέντρο δοκιμίου όμοιου με το προς εξέταση. Η θερμοκρασία του υπόψη δοκιμίου παρακολουθείται μέχρις ότου οι μετρήσεις δείξουν ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σημείου στο εξωτερικό του και σημείου στο κέντρο του δεν υπερβαίνει τους 0,4°C. Ο μέσος όρος των δύο

αυτών θερμοκρασιών καταγράφεται ως η πραγματική θερμοκρασία του δοκιμίου. Κατόπιν, το δοκίμιο τοποθετείται στη διάταξη της συσκευής ελέγχου. Η θερμοκρασία δοκιμής δεν πρέπει να διαφοροποιείται περισσότερο από 0,5°C από την απαιτούμενη θερμοκρασία.

- Τοποθέτηση δοκιμίου

Τα στελέχη επιβολής φορτίου καθαρίζονται με κάποιον διαλύτη πριν από τη διεξαγωγή της δοκιμής, εάν κρίνεται απαραίτητο. Μόλις το δοκίμιο φτάσει τη ζητούμενη θερμοκρασία, ετοιμάζεται προκειμένου να δοκιμαστεί κατά μήκος μίας από τις μαρκαρισμένες κάθετες διαμέτρους. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσαρμογή των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων και του συστήματος μέτρησης και πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

- Μέτρηση δυσκαμψίας

Αρχικά πραγματοποιείται προφόρτιση του δοκιμίου με 10 παλμούς ώστε να προσαρμοστεί το μέγεθος και η διάρκεια φόρτισης να αποδώσει την προκαθορισμένη οριζόντια διαμετρική παραμόρφωση και χρονική διάρκεια.

Στη συνέχεια, το δοκίμιο υποβάλλεται σε 5 επιπλέον παλμούς φόρτισης και, για κάθε παλμό φόρτισης, υπολογίζεται και καταγράφεται η διακύμανση του ασκούμενου φορτίου και της οριζόντιας διαμετρικής παραμόρφωσης με το χρόνο. Επίσης, προσδιορίζεται ο συντελεστής περιοχής φόρτισης για καθεμία από τις εφαρμογές των 5 κτύπων φόρτισης.

Το άνω στέλεχος επιβολής φορτίου τοποθετείται έτσι ώστε να επιτευχθεί συντελεστής περιοχής φόρτισης εντός του διαστήματος 0,50 – 0,70. Εάν αυτό δεν επιτευχθεί, τα αποτελέσματα του εν λόγω δείγματος απορρίπτονται. Η συνιστώμενη τιμή του παραπάνω συντελεστή είναι 0,60.

- Υπολογισμός μέτρου δυσκαμψίας

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των 5 κτύπων φόρτισης, το μέτρο δυσκαμψίας προσδιορίζεται για κάθε παλμό φόρτισης ως εξής :

$$S_m = F \times (v + 0,27) / (z \times h) \quad [3.2]$$

Όπου :

S_m το μέτρο δυσκαμψίας (MPa),

F η μέγιστη τιμή του ασκούμενου κατακόρυφου φορτίου (N),

z το μέγεθος της οριζόντιας παραμόρφωσης (βλέπε σχήμα) κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης (mm),

h το μέσο πάχος του δοκιμίου (mm) και

ν ο λόγος Poisson.

Σε περίπτωση που ο λόγος Poisson δεν καθορίζεται, λαμβάνεται η τιμή 0,35 και ισχύει για όλες τις θερμοκρασίες.

Το μέτρο δυσκαμψίας διορθώνεται για συντελεστή περιοχής φόρτισης τιμής 0,60 μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$S'_m = S_m \times [1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k)] \quad [3.3]$$

Όπου :

S'_m το μέτρο δυσκαμψίας (MPa), διορθωμένο για συντελεστή περιοχής φόρτισης 0,60,

k ο συντελεστής περιοχής φόρτισης που έχει καταμετρηθεί και

S_m το μέτρο δυσκαμψίας (MPa) για συντελεστή περιοχής φόρτισης k (°C).

- Μέτρο δυσκαμψίας δοκιμίου

Το δοκίμιο απομακρύνεται από τον εξοπλισμό δοκιμής, περιστρέφεται κατά $(90^\circ \pm 10^\circ)$ ως προς τον οριζόντιο άξονά του και επανατοποθετείται στη συσκευή, σύμφωνα με την προηγούμενη διαδικασία. Η δοκιμή και ο υπολογισμός του μέτρου επαναλαμβάνονται ακριβώς όπως πρωτύτερα.

Αν η μέση τιμή του μέτρου δυσκαμψίας της δοκιμής αυτής βρεθεί εντός διαστήματος +10% ή -20% της μέσης τιμής που προσδιορίστηκε από την πρώτη δοκιμή, τότε το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου προκύπτει από το μέσο όρο των δύο δοκιμών (Indirect Tensile Stiffness Modulus - ITSM). Αν πάλι, η διαφορά των δύο τιμών ξεπερνά τα παραπάνω όρια τα αποτελέσματα απορρίπτονται και η δοκιμή επαναλαμβάνεται. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, το ίδιο δοκίμιο δεν πρέπει να υποβάλλεται σε περαιτέρω έλεγχο εντός 24 ωρών (EN12697-26).

Κατά την διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω μέθοδος για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών ασφαλτομίγματος. Σημειώνεται ότι η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού αποτελεί μία από τις πλέον διαδεδομένες και αξιόπιστες μεθόδους και υπερτερεί έναντι των υπολοίπων, κυρίως λόγω της ταχύτητας προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας, της ευκολίας εφαρμογής της και της σχετικά μεγάλης ακρίβειας των μετρήσεων.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Γενικά

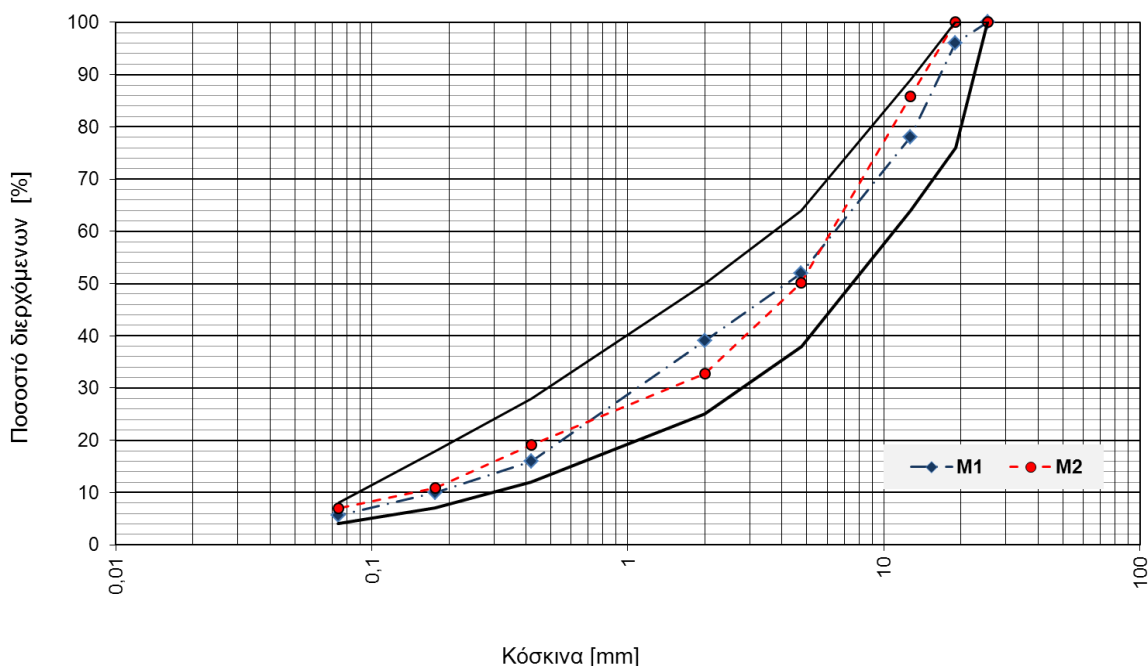
Στα πλαίσια της διερεύνησης της επίδρασης των παραμέτρων συμπίκνωσης στη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων μέσω της εκτίμησης του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό, παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. κυλινδρικά δοκίμια ισοπεδωτικής στρώσης A265 σύμφωνα με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (Π.Τ.Π.). Η συμπίκνωση μέρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη γυροσκοπική μέθοδο (Gyratory), ενώ για τα υπόλοιπα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η κρουστική μέθοδος συμπίκνωσης κατά Marshall. Επιπρόσθετα, από πειραματικά ασφαλτικά οδοστρώματα αντίστοιχων μιγμάτων αποκόπηκαν πυρήνες και όλα τα παραπάνω δοκίμια υποβλήθηκαν σε εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας τους, με χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού και πειραματικών διατάξεων.

4.2 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

4.2.1 Στοιχεία σύνθεσης μιγμάτων

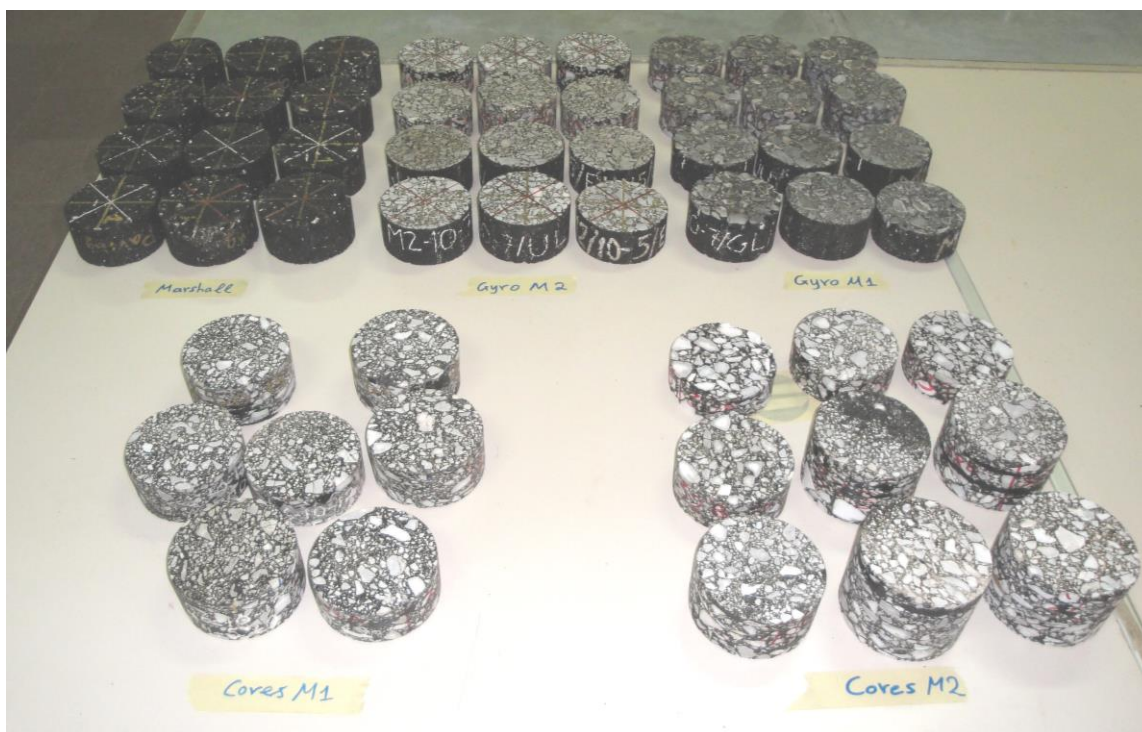
Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης (ΠΤΠ A-265) με κωδικές ονομασίες M1 και M2. Το ασφαλτόμιγμα M1 περιέχει αδρανή ασβεστολιθικού τύπου με μέγιστο κόκκο 1 inch, ενώ το ασφαλτόμιγμα M2 περιέχει αδρανή επίσης ασβεστολιθικού τύπου, με μέγιστο κόκκο $\frac{3}{4}$ inch. Τα δύο ασφαλτομίγματα περιείχαν τύπο ασφάλτου 50/70 και ίδιο ποσοστό ασφάλτου (4,5% κ.β. αδρανών).

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης των δύο ασφαλτομιγμάτων:



Σχήμα 4.1. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης των μιγμάτων M1 και M2

Η προετοιμασία και συμπίκνωση των εργαστηριακών δοκιμίων, που είχε ως στόχο την επίτευξη παρόμοιου ποσοστού κενών αέρα με τους πυρήνες του αντίστοιχου ασφαλτομίγματος, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. με εφαρμογή της γυροσκοπικής μεθόδου συμπίκνωσης και της μεθόδου κρουστικής συμπίκνωσης Marshall, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Μέσω της πειραματικής διαδικασίας, συμπτυνώθηκαν συνολικά 12 εργαστηριακά δοκίμια ασφαλτομίγματος M1 και 24 εργαστηριακά δοκίμια ασφαλτομίγματος M2, τα οποία διατέθηκαν προς έλεγχο ως προς το μέτρο δυσκαμψίας τους. Επιπλέον, 10 επιτόπου δοκίμια μίγματος M1 και 7 επιτόπου δοκίμια μίγματος M2 απομονώθηκαν από το οδόστρωμα με τη βοήθεια ειδικού μηχανήματος (καροταρία). Στο σχήμα 4.2 απεικονίζονται τα δοκίμια εργαστηριακής συμπίκνωσης, γυροσκοπικής και Marshall, όπως επίσης και οι πυρήνες που ελέγχθηκαν.



Σχήμα 4.2. Συνολική εικόνα των δοκιμίων των μιγμάτων M1 και M2

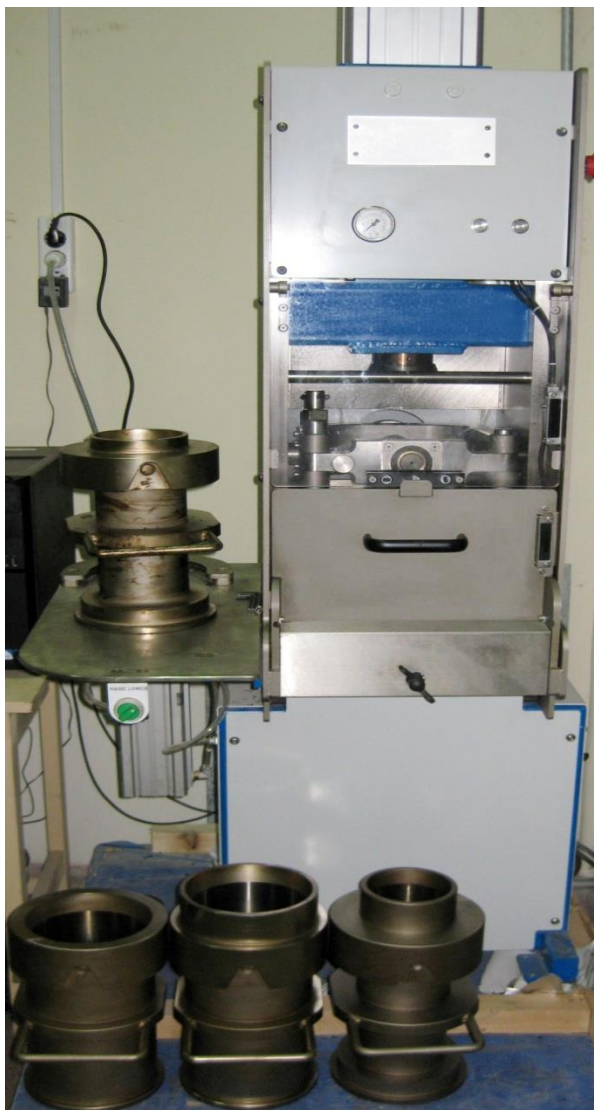
4.3 Μέθοδοι συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων

4.3.1 Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη γυροσκοπική μέθοδο

Η γυροσκοπική μέθοδος είναι διεθνώς αναγνωρισμένη ως μία από τις καταλληλότερες για τη συμπίκνωση εργαστηριακών δοκιμίων.

Κατά τη γυροσκοπική μέθοδο, η συμπίκνωση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας κάθετης δύναμης (συνήθως 600 KPa) διαμέσω ακραίων μεταλλικών πλακών σε γνωστή μάζα ασφαλτομίγματος, η οποία εισάγεται σε καλούπι (μεταλλική μήτρα) εσωτερικής διαμέτρου 100 ή 150mm. Ο διαμήκης άξονας της μεταλλικής μήτρας περιστρέφεται με σταθερή γωνία ως προς την κατακόρυφο (gyration angle), ενώ οι μεταλλικές πλάκες παραμένουν παράλληλες και οριζόντιες. Κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, το ύψος του δοκιμίου μετράται αυτόματα και υπολογίζονται η πυκνότητα και το ποσοστό κενών του δείγματος. Μέσω κατάλληλου λογισμικού, δίνεται η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου συμπίκνωσης για προκαθορισμένο αριθμό περιστροφών ή έως ότου επιτευχθεί μια συγκεκριμένη τιμή για την πυκνότητα του μίγματος ή για το περιεχόμενο ποσοστό κενών.

Η παρασκευή των δοκιμίων που εξετάστηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο, 24 στον αριθμό, εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π, κάνοντας χρήση της συσκευής γυροσκοπικής συμπίκνωσης (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3. Συσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Κάθε δοκιμή εφαρμόστηκε μεταβάλλοντας κάποια από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπίκνωση με τη γυροσκοπική μέθοδο. Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί, αναφέρονται αναλυτικά οι παράμετροι συμπίκνωσης και ο αριθμός των δοκιμίων που μεταβλήθηκαν για κάθε μία από αυτές.

Πίνακας 4.1 : Μεταβλητές γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Μεταβλητές γυροσκοπικής συμπίκνωσης	Αριθμός δοκιμών
Αρχική διάμετρος δοκιμίου	12
Εσωτερική γωνία περιστροφής	6
Θερμοκρασία συμπίκνωσης	6

Σε όλες τις φάσεις των δοκιμών, και αργότερα των αναλύσεων, δόθηκε στα προς εξέταση δείγματα συγκεκριμένη κωδικοποίηση, η οποία ήταν απαραίτητη για τον διαχωρισμό τους εξαιτίας του μεγάλου αριθμού τους.

Όσον αφορά στις δοκιμές συμπίκνωσης με τη γυροσκοπική συσκευή, χρησιμοποιήθηκαν μήτρες δύο διαμέτρων, 100mm και 150mm. Ο κωδικός ονομασίας κάθε δοκιμίου περιλαμβάνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά με την εξής σειρά :

1. τον τύπο του μίγματος, M1 για το πιο χονδρόκοκκο μίγμα και M2 για το πιο λεπτόκοκκο,
2. την τελική διάμετρο του δείγματος (σε εκατοστά),
3. το ύψος του δείγματος (σε εκατοστά),
4. τη γωνία περιστροφής, με κωδικό E για την τιμή 0,82°, U για την τιμή 1,16° και G για την τιμή 1,45°,
5. τη θερμοκρασία συμπίκνωσης, με κωδικό L να αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 135°C και κωδικό H σε θερμοκρασία 150°C και
6. τέλος, η ένδειξη C αν έχει κοπεί η βάση και η κορυφή δοκιμίου αρχικής διαμέτρου 100mm, ενώ η ένδειξη CC αν έχει ληφθεί πυρήνας από δοκίμιο αρχικής διαμέτρου 150mm και κατόπιν κοπής βάσης και κορυφής. Ως αποτέλεσμα, όλα τα δοκίμια που διατέθηκαν προς έλεγχο είχαν τελική διάμετρο 100mm.

Για παράδειγμα, ο κωδικός M1/10-5/EL/C αντιστοιχεί σε δοκίμιο διαμέτρου 100mm μίγματος M1 και αρχικού ύψους 70mm, από το οποίο αποκόπηκε η κορυφή και η βάση του κατά 10mm και που συμπτυκνώθηκε υπό γωνία 0,82° και θερμοκρασία 135°C.

Ακόμη, ο κωδικός M2/10-5/GH/CC αντιστοιχεί σε πυρήνα διαμέτρου 100mm, που λήφθηκε από δοκίμιο αρχικής διαμέτρου 150mm, μίγματος M2 και αρχικού ύψους 70mm, από το οποίο αποκόπηκε η κορυφή και η βάση του κατά 10mm και συμπυκνώθηκε υπό γωνία 1,45°C και θερμοκρασία 150°C.

Η κωδικοποίηση των γυροσκοπικών δοκιμών των μιγμάτων M1 και M2 παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 : Κωδικοποίηση γυροσκοπικών δοκιμών

Γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M1	Γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M2
M1/10-5/EL/CC	M2/10-5/EL/CC
M1/10-5/EL/C	M2/10-5/EL/C
M1/10-5/EH/CC	M2/10-5/EH/CC
M1/10-5/EH/C	M2/10-5/EH/C
M1/10-5/UL/CC	M2/10-5/UL/CC
M1/10-5/UL/C	M2/10-5/UL/C
M1/10-5/UH/CC	M2/10-5/UH/CC
M1/10-5/UH/C	M2/10-5/UH/C
M1/10-5/GL/CC	M2/10-5/GL/CC
M1/10-5/GL/C	M2/10-5/GL/C
M1/10-5/GH/CC	M2/10-5/GH/CC
M1/10-5/GH/C	M2/10-5/GH/C

4.3.2 **Συμπύκνωση ασφαλτομίγματος με τη μέθοδο Marshall**

Μία ακόμα από τις πιο ευρεία χρησιμοποιούμενες μεθόδους εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων αποτελεί η κρουστική μέθοδος κατά Marshall. Η μέθοδος συμπίκνωσης Marshall, καθώς και η ομώνυμη μέθοδος σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων, εισήχθη από τον Bruce Marshall το 1939 και έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν σε μεγάλο αριθμό έργων ανασυγκρότησης υποδομών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Κατά τη μέθοδο αυτή, η ενέργεια συμπίκνωσης στο υπό συμπίκνωση δοκίμιο προσδίδεται με κρούση από την πτώση καθορισμένου βάρους από συγκεκριμένο ύψος (σχήμα 4.4). Η συσκευή συμπίκνωσης Marshall, μαζί με ειδικές συσκευές προσδιορισμού ευστάθειας και παραμόρφωσης των δοκιμίων, χρησιμοποιούνται στην ομώνυμη μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου σε αδρανή υλικά συγκεκριμένης σύνθεσης.



Σχήμα 4.4. Συσκευή κρουστικής συμπίκνωσης Marshall

Όπως και κατά τη διαδικασία εξέτασης των δοκιμίων της γυροσκοπικής συμπίκνωσης, έτσι και εδώ, στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας στα δείγματα κρουστικής συμπίκνωσης Marshall μεταβλήθηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη μέθοδο αυτή.

Όπως προηγουμένως, στα προς εξέταση δοκίμια αποδόθηκε συγκεκριμένη κωδικοποίηση ώστε να είναι διακριτά μεταξύ τους. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall ακολουθούν, αντίστοιχα, την παρακάτω σειρά κωδικοποίησης :

1. τον τύπο του μίγματος, M2 εδώ αποκλειστικά μιας και έχουν παρασκευαστεί μόνο από το πιο λεπτόκοκκο μίγμα,
2. τη θερμοκρασία συμπίκνωσής τους, η οποία λαμβάνει τις τιμές των 110°C, 125°C, 135°C και 150°C
3. την αριθμητική σειρά συμπίκνωσής τους, με κωδικό 1 να αντιστοιχεί στο πρώτο δοκίμιο που συμπυκνώθηκε, κωδικό 2 στο δεύτερο και κωδικό 3 στο τρίτο δοκίμιο αντίστοιχα, και
4. τέλος, ένδειξη M που δηλώνει ότι το δοκίμιο έχει συμπυκνωθεί με τη μέθοδο Marshall.

Παραδείγματος χάριν, ο κωδικός M2/125-2/M αντιστοιχεί σε δοκίμιο μίγματος M2, που συμπυκνώθηκε δεύτερο κατά σειρά με τη μέθοδο Marshall σε θερμοκρασία 125°C.

Η κωδικοποίηση των δοκιμών κρουστικής συμπίκνωσης Marshall, τα οποία ανήκουν αποκλειστικά στο μίγμα M2, παρουσιάζεται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 : Κωδικοποίηση δοκιμών Marshall

Δοκίμια Marshall μίγματος M2
M2/110-1/M
M2/110-2/M
M2/110-3/M
M2/125-1/M
M2/125-2/M
M2/125-3/M
M2/135-1/M
M2/135-2/M
M2/135-3/M
M2/150-1/M
M2/150-2/M
M2/150-3/M

Για την παρασκευή των 12 δοκιμών Marshall, το μίγμα, χωρισμένο σε ποσότητες των 1200 g περίπου, τοποθετήθηκε σε δοχεία και στη συνέχεια στο φούρνο προκειμένου να αποκτήσει την απαιτούμενη θερμοκρασία συμπίκνωσης. Μόλις το μίγμα έφτασε στην κατάλληλη θερμοκρασία, τοποθετήθηκε σε ειδικές μεταλλικές μήτρες, κυλινδρικού σχήματος και διαμέτρου 101,6cm. Στη συνέχεια, το μίγμα δέχτηκε ελαφριά προσυμπύκνωση με τη βοήθεια μεταλλικής ράβδου (15 χτυπήματα περιμετρικά και 10 στο κέντρο) και οι μήτρες τοποθετήθηκαν στη συσκευή συμπίεσης Marshall, όπου και συμπυκνώθηκαν (αναλόγως του τύπου ασφαλτομίγματος), σε θερμοκρασία που κυμάνθηκε μεταξύ 110°C – 150°C. Στο τέλος, τα δοκίμια, αφού ελέγχθηκαν ως προς την επιπεδότητα των δύο όψεων ώστε να μην έχουν υποστεί καμία διαταραχή, απομακρύνθηκαν από τις μήτρες, απαριθμήθηκαν και ακολούθησε ο προσδιορισμός των εξής δύο χαρακτηριστικών τους : του φαινόμενου ειδικού βάρους και του περιεχόμενου ποσοστού κενών.

4.3.3 Επί τόπου συμπύκνωση ασφαλτομίγματος

Η συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος στο οδόστρωμα πραγματοποιήθηκε με οδοστρωτήρες. Κατά τη διάρκεια της επιτόπου συμπύκνωσης, ακολουθήθηκε διαφορετική διαδικασία για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος, η οποία περιελάμβανε τις φάσεις συμπύκνωσης που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Περιγραφή της λειτουργίας συμπύκνωσης για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος

Τύπος μίγματος	Φάσεις συμπύκνωσης		
	Αρχική	Ενδιάμεση	Τελική
M1	Στατικός οδοστρωτήρας	Δονητικός και λαστιχοφόρος οδοστρωτήρας	Στατικός οδοστρωτήρας
M2	Στατικός οδοστρωτήρας	Δονητικός οδοστρωτήρας	Στατικός οδοστρωτήρας

Αρχικά, τα δύο ασφαλτομίγματα υπέστησαν προσυμπύκνωση με τη βοήθεια δονητικής πλάκας διαστρωτή εξελιγμένου τύπου, σε θερμοκρασία τάξεως 140°C – 150°C. Ακολούθησε κυλίνδρωση σε θερμοκρασία περίπου 140°C, με ομοιόμορφες διελεύσεις στατικού οδοστρωτήρα παράλληλα με τον άξονα της οδού. Να σημειωθεί ότι πριν την κυλίνδρωση, συμπυκνώθηκαν εγκάρσιοι και διαμήκεις αρμοί, όπου αυτοί υπήρχαν.

Σε κάθε διαδρομή του οδοστρωτήρα, οι τροχοί έπρεπε να διαβρέχονται συνεχώς με νερό και να επικαλύπτονται κάθε ίχνος προηγούμενης διέλευσης, αποφεύγοντας απότομες αλλαγές της σειράς διαδρομής και απότομα σταματήματα, που ίσως μετατόπιζαν το μίγμα και του δημιουργούσαν ανωμαλίες ή τριχοειδείς ρωγμές.

Μετά από τις αρχικές διελεύσεις του δίτροχου οδοστρωτήρα, σειρά είχαν οι λαστιχοφόροι οδοστρωτήρες με το κατάλληλο πάντα βάρος, οι οποίοι ακολούθησαν τις ίδιες διαδρομές, σε θερμοκρασία τέτοια ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη συμπύκνωση.

Η τελική επιφάνεια διαμορφώθηκε με τη διέλευση στατικού οδοστρωτήρα που ακολούθησε τις ήδη διαγραφόμενες από τους προηγούμενους οδοστρωτήρες διαδρομές,

με σκοπό την ομαλοποίηση και την εξαφάνιση τυχόν ανωμαλιών που δημιουργούνται στο ασφαλτόμιγμα από το τύμπανο ή τα λάστιχα του λαστιχοφόρου οδοστρώτηρα. Μεταξύ των διαφόρων φάσεων συμπίκνωσης, δεν υπήρξε διακοπή εργασιών.

Κατά τη διάρκεια της διάστρωσης έγινε δειγματοληψία ασφαλτομίγματος με σκοπό την παρασκευή εργαστηριακών δοκιμίων. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία και εργαστηριακός προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας και του ποσοστού κενών αέρος των πυρήνων μέσα από κατάλληλες διαδικασίες. Βάσει του υπολογισμένου ποσοστού κενών έγινε προσπάθεια επίτευξης αντίστοιχου ποσοστού κενών κατά τις εργαστηριακές μεθόδους συμπίκνωσης. Συνολικά αποσπάστηκαν από το οδόστρωμα 17 πυρήνες, οι 10 εκ των οποίων αφορούν στο μίγμα M1 και οι υπόλοιποι 7 στο μίγμα M2.

Όσον αφορά στην κωδικοποίηση που δόθηκε στα δοκίμια πεδίου, πραγματοποιήθηκε απαριθμώντας :

1. τον τύπο του μίγματος, M1 για το πιο χονδρόκοκκο μίγμα και M2 για το πιο λεπτόκοκκο,
2. έναν αριθμό, που εξυπηρετεί την ανάγκη διάκρισης των δοκιμίων μεταξύ τους, και
3. τέλος, την ένδειξη F που δηλώνει ότι το δοκίμιο προέρχεται από το πεδίο

Για παράδειγμα, ο κωδικός M1/12/F αντιστοιχεί σε δοκίμιο πεδίου, μίγματος M1, με διακεκριμένη ονομασία «12».

Η κωδικοποίηση των πυρήνων των μιγμάτων M1 και M2 αναγράφεται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5 : Κωδικοποίηση πυρήνων

Πυρήνες μίγματος M1	Πυρήνες μίγματος M2
M1/17/F	M2/40/F
M1/13/F	M2/37/F
M1/14/F	M2/30/F
M1/5/F	M2/38/F
M1/15/F	M2/32/F
M1/21/F	M2/29/F
M1/1/F	M2/27/F
M1/20/F	
M1/12/F	
M1/16/F	

4.4 Δοκιμή προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας (ITSM)

Σε όλους τους παραπάνω τύπους δοκιμών των μιγμάτων M1 και M2 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό (ITSM).

Το πρώτο στάδιο της δοκιμής περιλάμβανε επισήμανση με ειδικό μαρκαδόρο στην επιφάνεια κάθε δοκιμίου 4 διαμέτρων, κάθετων μεταξύ τους ανά 2, όπως επιβάλλουν οι προδιαγραφές του προτύπου της συγκεκριμένης δοκιμής (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. Επισήμανση 4 διαμέτρων σε δοκίμια διαφόρων τύπων συμπίκνωσης

Κατόπιν, μετρήθηκε με τη βοήθεια ενός παχύμετρου, τόσο το μήκος των διαμέτρων χάραξης, όσο και το ύψος του δοκιμίου σε mm για 4 αντιδιαμετρικά σημεία. Αφού υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των διαμέτρων και των υψών για όλα τα δείγματα, αυτά τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο (σχήμα 4.6) προκειμένου να αποκτήσουν τη ζητούμενη θερμοκρασία (20°C).



Σχήμα 4.6. Θάλαμος τοποθέτησης για απαιτούμενη θερμοκρασία δοκιμής

Στη συνέχεια, το κάθε ένα με τη σειρά τους, τοποθετήθηκαν στην ειδική συσκευή NAT (Nottingham Asphalt Tester, σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7. Συσκευή προσδιορισμού μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε εκτενώς στο εδάφιο 3.2.3 και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα για το σύνολο των 4 μετρήσεων που εφαρμόστηκαν σε κάθε δείγμα.

5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις εργαστηριακές δοκιμές σε έμμεσο εφελκυσμό που εκτελέστηκαν στα δοκίμια της εργαστηριακής και επιτόπου συμπύκνωσης για τα δύο παρασκευασμένα μίγματα με σκοπό τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας σε έμμεσο εφελκυσμό (ITSM).

Ακολουθεί επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών στοιχείων προκειμένου να διερευνηθεί η επίπτωση που επέφεραν οι μεταβολές των παραμέτρων συμπύκνωσης, τόσο της γυροσκοπικής μεθόδου όσο και της κρουστικής μεθόδου Marshall, στο μέτρο δυσκαμψίας.

Επιπλέον, επιχειρείται συσχέτιση, μέσω στατιστικής ανάλυσης, των πειραματικών δεδομένων των μέτρων δυσκαμψίας που προσδιορίστηκαν για τα δοκίμια εργαστηριακής συμπύκνωσης και των αντίστοιχων μέτρων των δοκιμών πεδίου.

5.2 Ασφαλτόμιγμα M1

Εξετάστηκαν 12 εργαστηριακά δοκίμια του μίγματος M1, τα οποία αποτελούν δείγματα γυροσκοπικής συμπύκνωσης.

5.2.1 Εργαστηριακά δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια του ασφαλτομίγματος M1. Συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις εργαστηριακές δοκιμές στα 12 δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο για κάθε μία από τις 4 διαμέτρους χάραξης (S_{m1} , S_{m2} , S_{m3} , S_{m4} αντίστοιχα), καθώς και οι μέσοι όροι αυτών ανά 2 ($S_{m1,2}$, $S_{m3,4}$), όπως συνιστά η ευρωπαϊκή προδιαγραφή. Δηλαδή:

$$S_{m1,2} = (S_{m1} + S_{m2}) / 2 \quad [5.1]$$

και

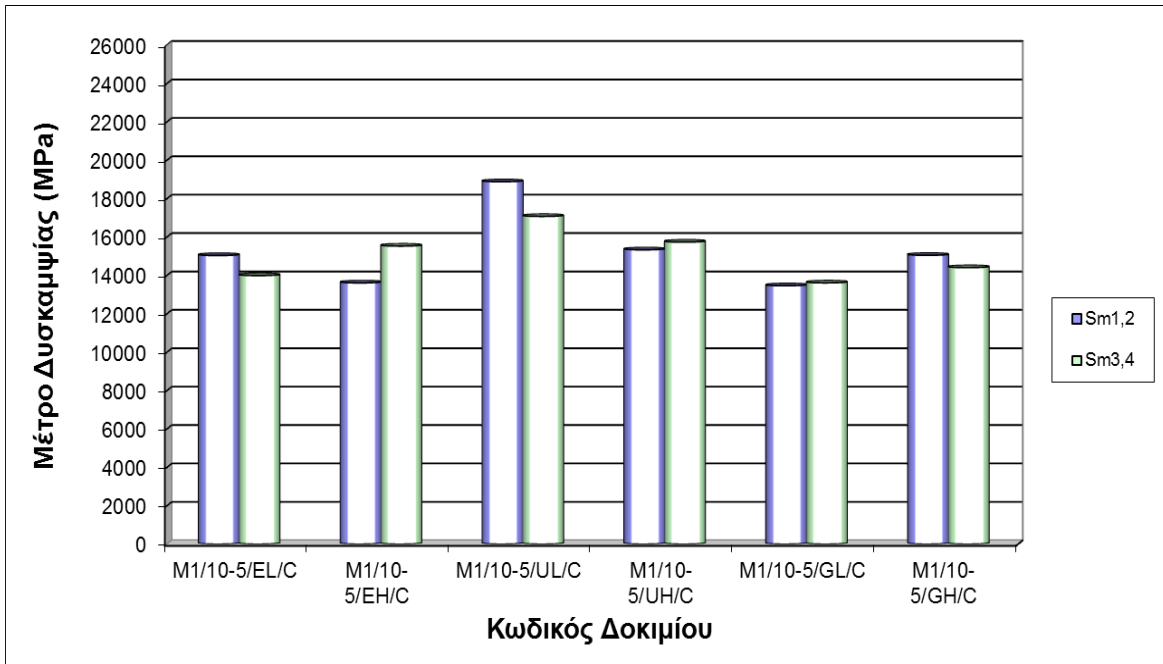
$$S_{m3,4} = (S_{m3} + S_{m4}) / 2 \quad [5.2]$$

Πίνακας 5.1. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης M1

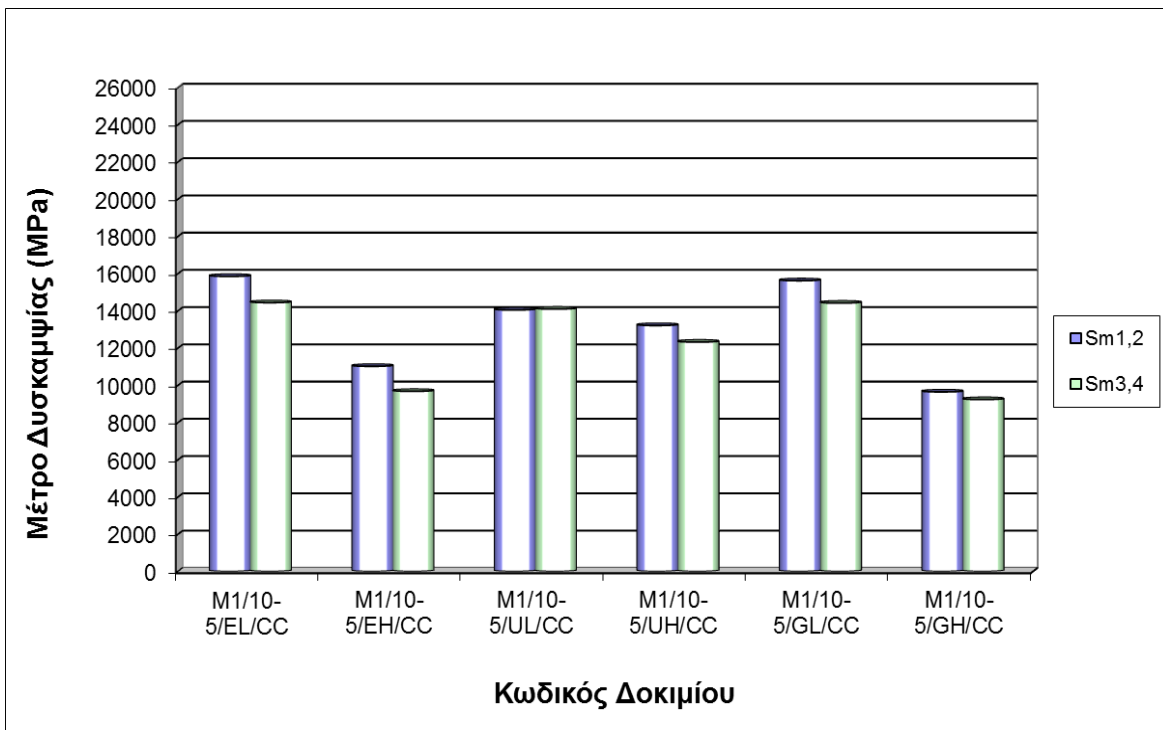
Κωδικός δοκιμίου	Sm1/ 20°C (MPa)	Sm2/ 20°C (MPa)	Sm1,2/ 20°C (MPa)	Sm3/ 20°C (MPa)	Sm4/ 20°C (MPa)	Sm3,4/ 20°C (MPa)
M1-10-5/EL/CC	15772	15942	15857	14319	14566	14443
M1-10-5/EL/C	15981	14099	15040	15319	12671	13995
M1-10-5/EH/CC	11369	10679	11024	9905	9456	9681
M1-10-5/EH/C	14063	13163	13613	15776	15288	15532
M1-10-5/UL/CC	15041	13059	14050	14652	13547	14100
M1-10-5/UL/C	19344	18424	18884	17114	17042	17078
M1-10-5/UH/CC	13650	12782	13216	12833	11819	12326
M1-10-5/UH/C	15880	14792	15336	16102	15376	15739
M1-10-5/GL/CC	16891	14352	15622	15144	13698	14421
M1-10-5/GL/C	14138	12793	13466	13648	13582	13615
M1-10-5/GH/CC	9948	9349	9649	9306	9175	9241
M1-10-5/GH/C	15074	15026	15050	14904	13912	14409

5.2.1.1 Επίρροή του αριθμού των διαμέτρων στο μέτρο δυσκαμψίας

Σε πρώτη φάση, δημιουργήθηκαν γραφήματα με τα αποτελέσματα των μέτρων δυσκαμψίας για τους μέσους όρους Sm1,2 και Sm3,4, που αντιστοιχούν στις μετρήσεις των δύο πρώτων διαμέτρων και των δύο επόμενων αντίστοιχα, ξεχωριστά για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm και για εκείνα αρχικής διαμέτρου 150 mm (σχήμα 5.1 και 5.2).



Σχήμα 5.1. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1



Σχήμα 5.2. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης αρχικής διαμέτρου 150mm μίγματος M1

Ωστόσο, από τα παραπάνω γραφήματα, παρατηρείται ότι υπάρχει σχετικά μικρή διαφορά μεταξύ των $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$ κάθε δοκιμίου, αν και αξίζει να σημειωθεί ότι το μέτρο δυσκαμψίας κατά τις δύο τελικές δοκιμές παρατηρείται μειωμένο σε σχέση με το μέτρο που προσδιορίστηκε κατά την 1^η και 2^η δοκιμή για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, ενώ για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα από την αντίστοιχη σύγκριση.

Προς αυτή την κατεύθυνση, έγινε διερεύνηση κατά πόσο οι διαφορές του μέτρου δυσκαμψίας μεταξύ των διαφορετικών διαμέτρων είναι στατιστικά σημαντικές μέσω του ελέγχου t- test. Συγκεκριμένα, έγινε έλεγχος του μέσου όρου σε δύο δείγματα ($S_{m1,2}$, $S_{m3,4}$) με μηδενική υπόθεση $\mu_{Sm1,2} = \mu_{Sm3,4}$ για το σύνολο των υπό εξεταζόμενων δοκιμών.

Στη συνέχεια, δίνεται ένα παράδειγμα για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm, όπου υπολογίζεται η διαφορά των δύο παραπάνω μεγεθών και εξάγονται τα αποτελέσματα του ελέγχου t – test (Πίνακες 5.2 – 5.3).

Πίνακας 5.2. Διαφορά μέσων όρων μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1

Κωδικός δοκιμίου	$S_{m1,2} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m3,4} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	Διαφορά $S_{m1,2} - S_{m3,4} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)
M1/10-5/EL/C	15040	13995	1045
M1/10-5/EH/C	13613	15532	-1919
M1/10-5/UL/C	18884	17078	1806
M1/10-5/UH/C	15336	15739	-403
M1/10-5/GL/C	13466	13615	-149
M1/10-5/GH/C	15050	14409	641

Πίνακας 5.3. Έλεγχος t για τους δύο μέσους όρους των μέτρων δυσκαμψίας των δύο ζευγών διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M1

Στατιστικά στοιχεία	Sm _{1,2}	Sm _{3,4}
Μέσος	15231,5	15061,33333
Διακύμανση	3831564,7	1680437,867
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,752801436	
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	0,320480771	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,380782246	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,761564493	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Από τον παραπάνω έλεγχο προκύπτει ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, το οποίο δηλώνει ότι, για τα δείγματα γυροσκοπικής συμπίκνωσης με διάμετρο 100mm του μίγματος M1, δεν προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας για τα δύο ζεύγη διαμέτρων εξέτασης. Δηλαδή, δεν υπάρχει έντονη διακύμανση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας στη μάζα των δοκιμών.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια εργαστηριακής και επιτόπου συμπίκνωσης. Από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης προέκυψε ότι σε γενικές γραμμές οι διαφορές του μέτρου δυσκαμψίας για τις διαφορετικές διαμέτρους εξέτασης δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

Προκειμένου να ελεγχθεί αν οι μετρήσεις κατά μήκος 2 μόνο διαμέτρων είναι επαρκώς αξιόπιστες, υπολογίστηκε αρχικά ο γενικός μέσος όρος (S_m) των προηγούμενων δύο μέσων όρων $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$, των μέτρων δυσκαμψίας, ο οποίος αντιστοιχεί στο σύνολο 4 διαμετρικών δοκιμών, όπου:

$$S_m = (S_{m1,2} + S_{m3,4}) / 2 \quad [5.3]$$

Στον πίνακα 5.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα του γενικού μέσου όρου του μέτρου δυσκαμψίας (S_m) για το σύνολο των δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης του μίγματος M1.

Πίνακας 5.4. Γενικός μέσος όρος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης M1

Κωδικός δοκιμίου	$S_m / 20^\circ\text{C}$ (MPa)
M1-10-5/EL/CC	15150
M1-10-5/EL/C	14518
M1-10-5/EH/CC	10353
M1-10-5/EH/C	14573
M1-10-5/UL/CC	14075
M1-10-5/UL/C	17981
M1-10-5/UH/CC	12771
M1-10-5/UH/C	15538
M1-10-5/GL/CC	15022
M1-10-5/GL/C	13541
M1-10-5/GH/CC	9445
M1-10-5/GH/C	14730

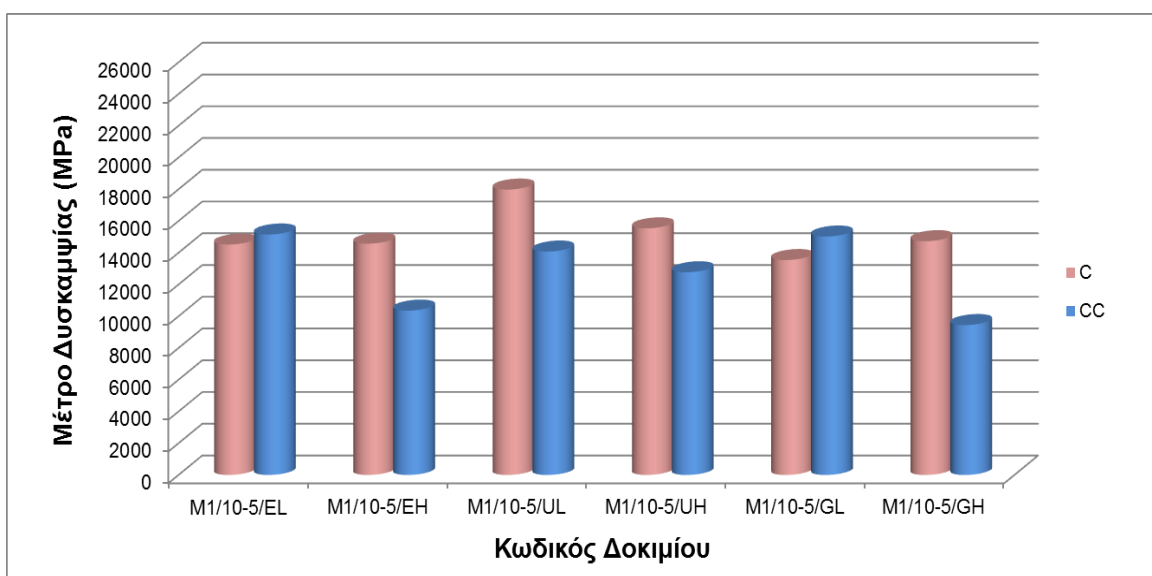
Στο σημείο αυτό, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$, καθώς και το αντίστοιχο μέγεθος για το γενικό μέσο όρο των μέτρων δυσκαμψίας S_m , ως δείκτης της ακρίβειας των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά μήκος 2 και 4 διαμέτρων αντίστοιχα. Βρέθηκε ότι η τυπική απόκλιση παρουσίασε μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δοκιμών κατά μήκος 2 διαμέτρων, αλλά παρατηρήθηκε μειωμένη για τη διεξαγωγή των 4 διαμετρικών δοκιμών.

Έτσι, με βάση τα προαναφερθέντα, στο πλαίσιο της ανάλυσης και της επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων, επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή του μέτρου δυσκαμψίας ο γενικός μέσος όρος των προηγούμενων δύο μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας (S_m), εξασφαλίζοντας τη μεγαλύτερη αξιοπιστία για το σύνολο των μετρήσεων.

5.2.1.2 Επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας

Για την εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου, και συγκεκριμένα της διαμέτρου του δοκιμίου, της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας, δημιουργήθηκαν τα γραφήματα που ακολουθούν, τα οποία δίνουν μια συγκριτική εικόνα για την αξιολόγηση της επιρροής της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά.

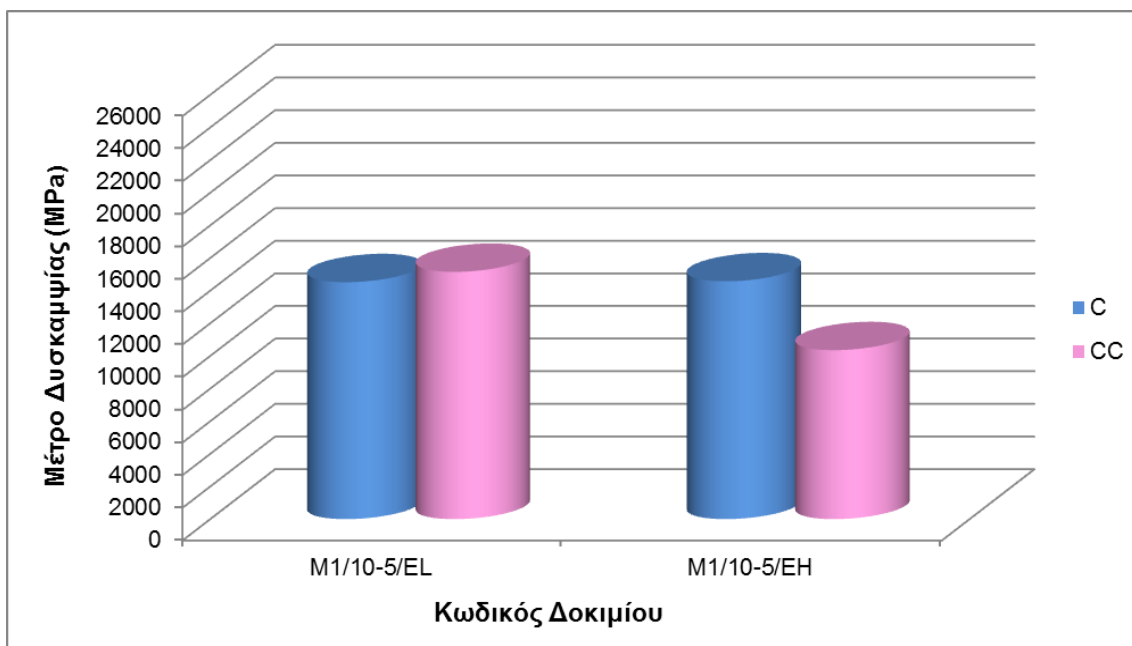
Στο σχήμα 5.3 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας που πραγματοποιήθηκαν στα 12 δοκίμια διαμέτρου 100mm και 150mm του μίγματος M1 που έχουν συμπυκνωθεί με τη γυροσκοπική μέθοδο.



Σχήμα 5.3. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος M1

Από το σχήμα αυτό παρατηρείται μείωση του μέτρου δυσκαμψίας με την αύξηση της διαμέτρου από 100mm σε 150mm σε τέσσερα από τα έξι δοκίμια. Στα υπόλοιπα δύο δοκίμια παρατηρείται αύξηση στις τιμές του μέτρου δυσκαμψίας, ωστόσο σε μικρότερο βαθμό.

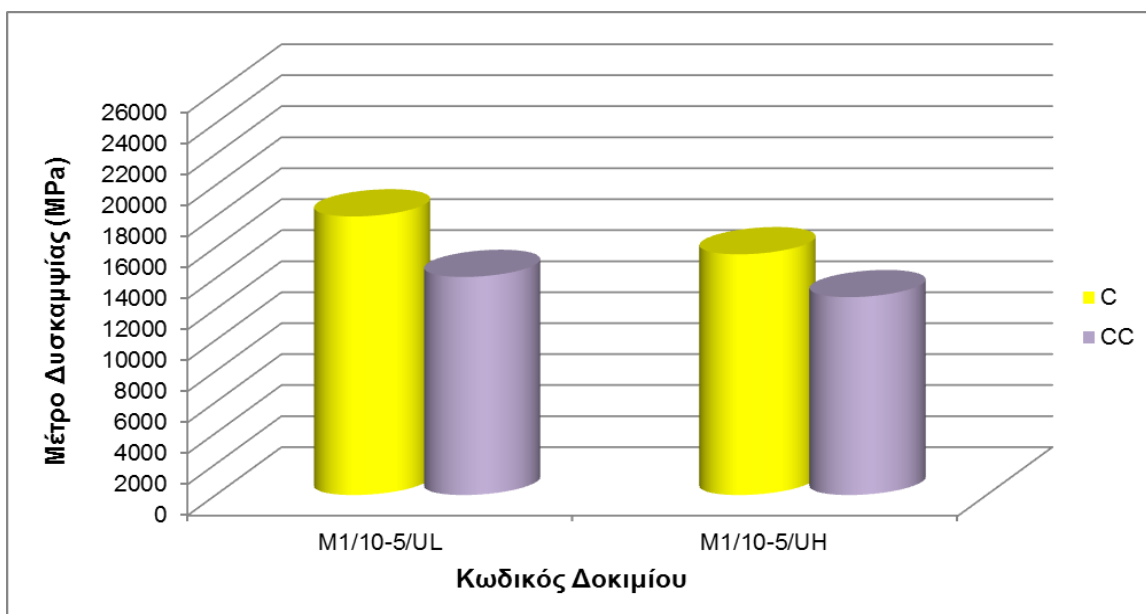
Στα σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6 παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια του μίγματος M1 που έχουν συμπυκνωθεί γυροσκοπικά σε θερμοκρασίες 135°C και 150°C, υπό σταθερή εσωτερική γωνία τιμής 0,82°, 1,16° και 1,45° αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 0,82°

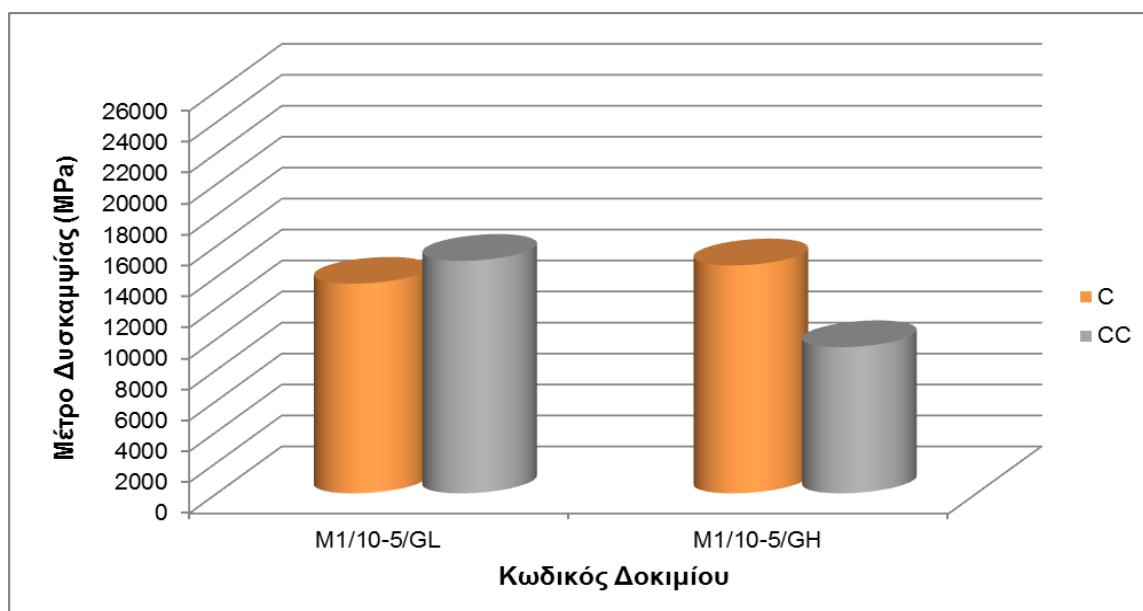
Από το σχήμα 5.4 παρατηρείται ότι, με αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C και υπό σταθερή γωνία περιστροφής 0,82°, το μέτρο δυσκαμψίας αυξάνεται κατά 3% για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm, ενώ για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm η τιμή του μέτρου υφίσταται ποσοστιαία μείωση 32%.

Διερεύνηση της επίδρασης της συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων



Σχήμα 5.5. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 1,16°

Από το σχήμα 5.5 προκύπτει σημαντική μείωση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C και υπό σταθερή γωνία περιστροφής 1,16° τόσο για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm (μείωση 14%) όσο και για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm (μείωση 9%).

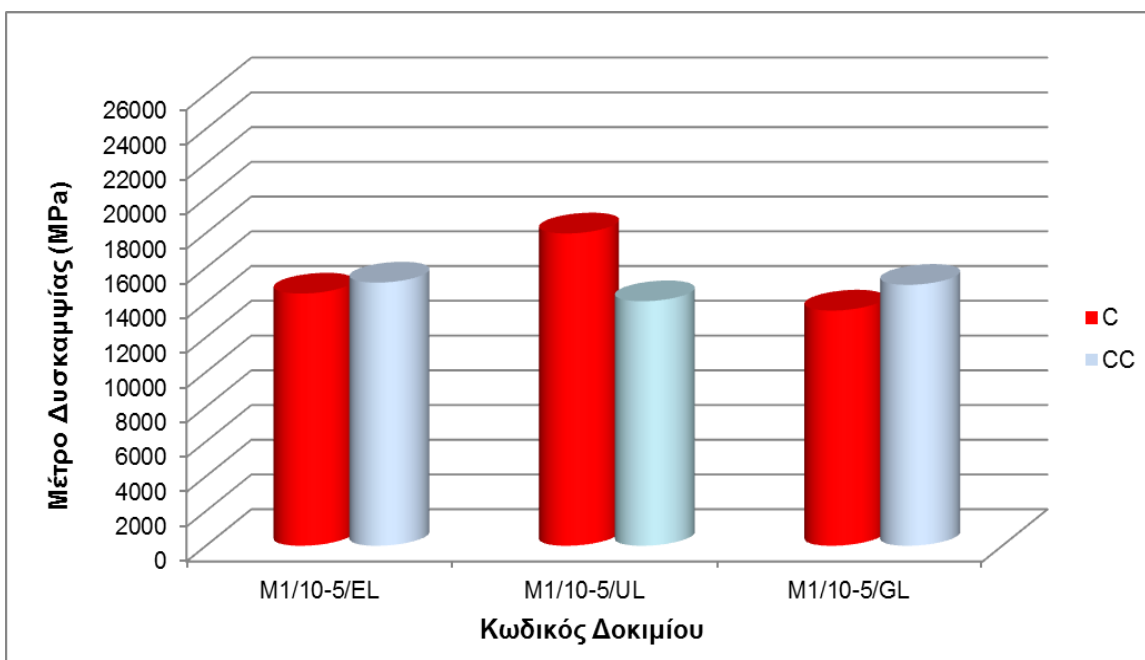


Σχήμα 5.6. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 με εσωτερική γωνία 1,45°

Το σχήμα 5.6 που αναφέρεται στη γωνία περιστροφής $1,45^\circ$ δείχνει ότι αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, από 135°C σε 150°C , επιφέρει αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας σε ποσοστό 9% για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm, ενώ αντίθετα σημαντική μείωση κατά 37% για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι, για τα συμπυκνωμένα δοκίμια με σταθερή εσωτερική γωνία περιστροφής διαμέτρου 100mm, το μέτρο δυσκαμψίας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή για τις δύο θερμοκρασίες συμπίκνωσης, ενώ για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm σημειώνεται μείωση του μέτρου καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.

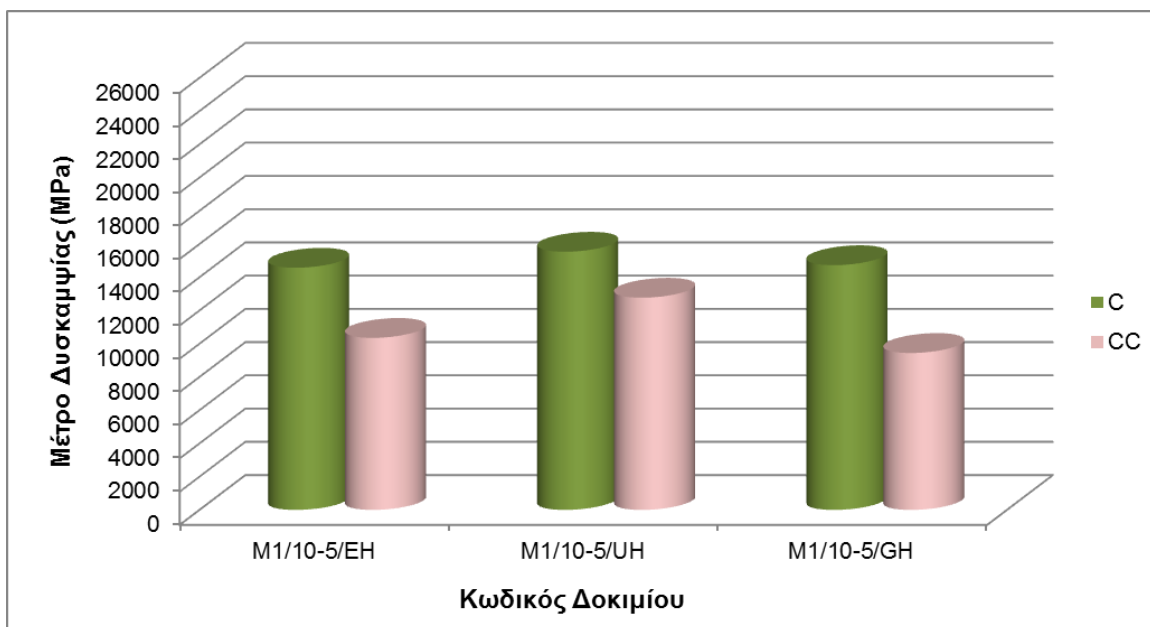
Στα σχήματα 5.7 και 5.8 φαίνονται τα αποτελέσματα του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί γυροσκοπικά με εσωτερικές γωνίες περιστροφής $0,82^\circ$, $1,16^\circ$ και $1,45^\circ$, υπό θερμοκρασία 135°C και 150°C αντίστοιχα.



Σχήμα 5.7. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 υπό θερμοκρασία 135°C

Όσον αφορά στα δοκίμια διαμέτρου 100mm και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135°C , από το σχήμα 5.7 προκύπτει ότι αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$ επιφέρει ποσοστιαία αύξηση 24% του μέτρου δυσκαμψίας. Αντίθετα, περαιτέρω αύξηση της γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$ επιφέρει αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της τάξης του 25%. Για τα αντίστοιχης θερμοκρασίας δοκίμια μεγαλύτερης αρχικής διαμέτρου, με τιμή 150mm, παρουσιάζεται μείωση κατά 7% του μέτρου δυσκαμψίας για αύξηση της

εσωτερικής γωνίας από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$ και αύξηση (7%) για περαιτέρω αύξηση της εσωτερικής γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$.



Σχήμα 5.8. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1 υπό θερμοκρασία 150°C

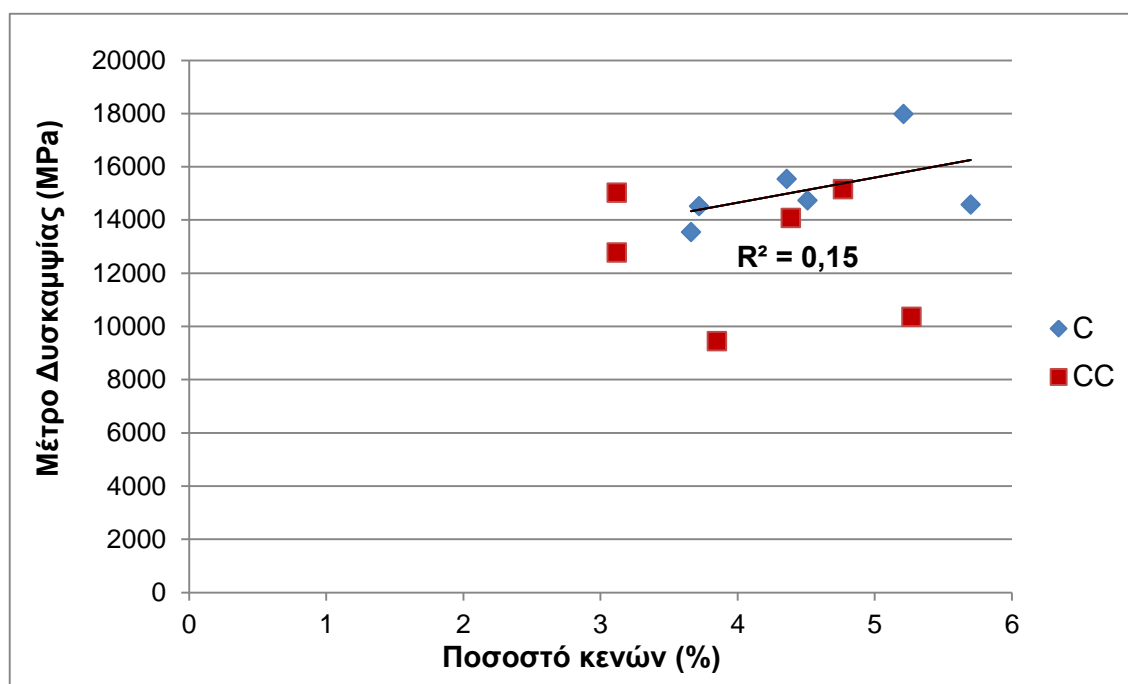
Με βάση το σχήμα 5.8 προκύπτει αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας σε ποσοστό 7% για αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$ και ποσοστιαία μείωση 5% της τιμής του μέτρου για περαιτέρω αύξηση της γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$, για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150°C . Η ίδια τάση παρατηρείται όσον αφορά στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, ίδιας θερμοκρασίας, για τα οποία ωστόσο σημειώνονται μεγαλύτερες διαφορές του μέτρου δυσκαμψίας (23% και 26%, αντίστοιχα).

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι δεν υπάρχει σαφής τάση μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας με τη μεταβολή καθενός από τους υπό διερεύνηση παράγοντες συμπίκνωσης. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω ανάλυσης με κατάλληλη στατιστική μέθοδο, η οποία θα εξετάσει την επιρροή που ασκούν οι παράμετροι της γυροσκοπικής συμπίκνωσης στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας.

5.2.1.3 Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Αρχικά, μελετάται η επίδραση που ασκεί η μεταβολή του ποσοστού κενών αέρα στη μάζα των δοκιμίων της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας τους.

Στο σχήμα 5.9 απεικονίζεται η συσχέτιση του μεγέθους του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για το σύνολο των δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης, διαμέτρων 100mm και 150mm ξεχωριστά.



Σχήμα 5.9. Γραμμική εξίσωση συσχέτισης του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1

Από το σχήμα παρατηρείται μικρός βαθμός συσχέτισης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας των γυροσκοπικών δοκιμίων και του ποσοστού κενών, όπως αποδεικνύεται και από τη χαμηλή τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής συσχέτισης ($R^2 = 0,15$). Στην επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης που αφορούν στην επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης.

5.2.1.4 Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας υπό την επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου

Στα πλαίσια της διερεύνησης της επίδρασης των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου (διάμετρος δοκιμίου, θερμοκρασία συμπίκνωσης, εσωτερική γωνία περιστροφής) στο μέτρο δυσκαμψίας, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση διακύμανσης (Analysis Of Variance) με χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Επίσης, εξετάζεται η αλληλεπίδραση δύο παραμέτρων ταυτόχρονα στο μέτρο δυσκαμψίας, δηλαδή προκύπτουν και τρεις επιπλέον συνδυασμοί ανά δύο παραμέτρους συμπίκνωσης.

Οι πίνακες 5.5 - 5.7 που ακολουθούν, παρουσιάζουν τους εκτιμώμενους οριακούς μέσους (estimated marginal means) του μέτρου δυσκαμψίας, δηλαδή το μέσο όρο, το τυπικό σφάλμα και το διάστημα για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% για κάθε υπό διερεύνηση παράμετρο.

Πίνακας 5.5. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για τη μεταβολή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής

εσωτερική γωνία (°)	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
0,82	13648	1031,001	9212	18084
1,16	15091	1031,001	10655	19527
1,45	13184	1031,001	8748	17620

Πίνακας 5.6. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμίων μίγματος M1 για τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης

θερμοκρασία συμπίκνωσης (°C)	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
135	15047	841,809	11425	18669
150	12901	841,809	9279	16523

Πίνακας 5.7. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M1 για τη μεταβολή της διαμέτρου

αρχική διάμετρος	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
100 (τύπου C)	15146	841,809	11524	18768
150 (τύπου CC)	12802	841,809	9180	16424

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων γυροσκοπικής συμπίκνωσης που επιδρούν σε αυτό φαίνονται στον πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8. Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M1 για όλους τους συνδυασμούς παραγόντων

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων αποκλίσεων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο αποκλίσεων	Τιμή F	Επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας
μοντέλο	2392498014,5	10	239249801,450	56,270	0,018
εσωτερική γωνία	7910025,500	2	3955012,750	0,930	0,518
θερμοκρασία συμπίκνωσης	13818094,083	1	13818094,083	3,250	0,213
διάμετρος	16485352,083	1	16485352,083	3,877	0,188
εσωτερική γωνία & διάμετρος	1482920,167	2	741460,083	0,174	0,852
θερμοκρασία συμπίκνωσης & διάμετρος	9150786,750	1	9150786,750	2,152	0,280
εσωτερική γωνία & θερμοκρασία	127185,167	2	63592,583	0,015	0,985
σφάλμα	8503708,500	2	4251854,250		
σύνολο	2401001723,0	12			

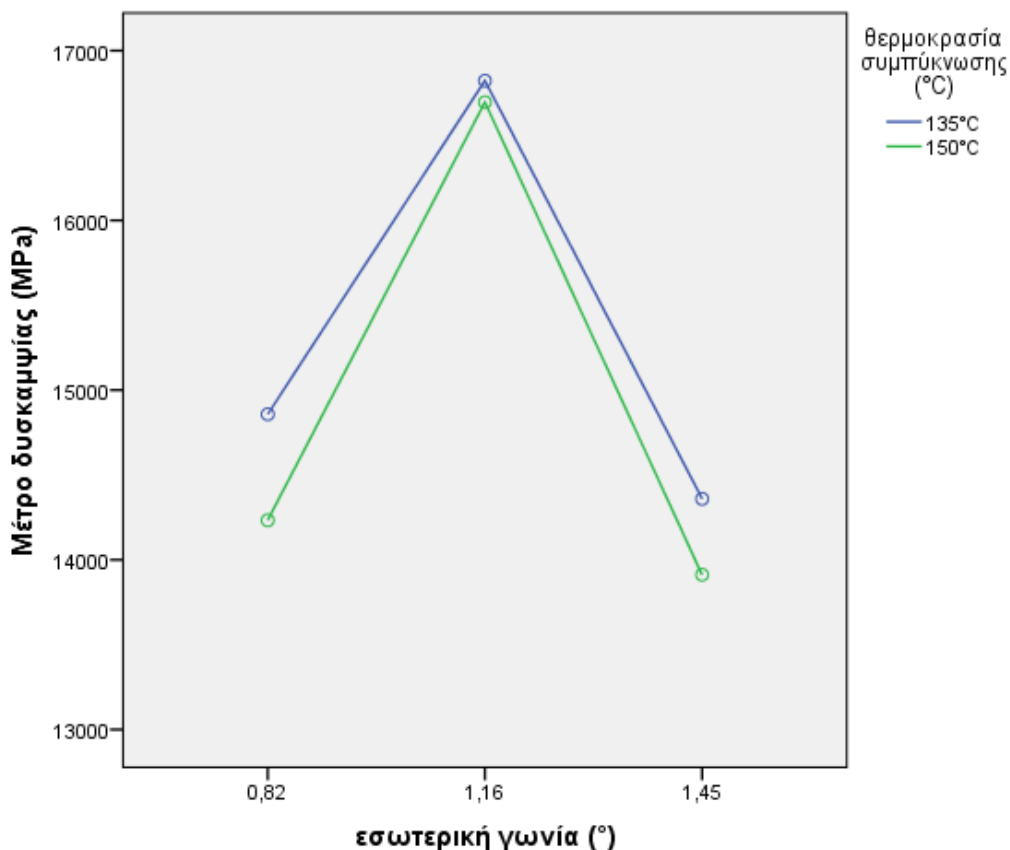
a. δείκτης $R^2 = 0,996$ (προσαρμοσμένος δείκτης $R^2 = 0,979$)

Με βάση την υπολογισθείσα τιμή του F για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες ή συνδυασμούς παραγόντων, μπορεί να συμπεράνει κανείς κατά πόσο η επιρροή του/ους αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για τη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα, ορίζοντας επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, τιμή στατιστικής σημαντικότητας (sig.) ίση με 0,05 ή χαμηλότερη αυτής ασκεί έντονη επιρροή στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας. Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 5.8 προκύπτει ότι κανένας από τους παραπάνω παράγοντες δεν είναι στατιστικά σημαντικός. Ωστόσο,

αξίζει να σημειωθεί ότι η διάμετρος του δοκιμίου επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας. Αυτό σημαίνει ότι ενδεχόμενη μεταβολή της διαμέτρου ενός γυροσκοπικά συμπυκνωμένου δοκιμίου θα επιφέρει και μεγαλύτερη μεταβολή στο μέτρο δυσκαμψίας που θα προσδιοριστεί. Την αμέσως επόμενη σημαντικότερη επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας ασκεί η θερμοκρασία συμπύκνωσης και κατόπιν ο συνδυασμός των παραμέτρων διαμέτρου και θερμοκρασίας. Τέλος, η εσωτερική γωνία περιστροφής όπως και οι συνδυασμοί των παραμέτρων που την εμπριέχουν, φαίνεται να ασκούν τη μικρότερη επιρροή στο μέγεθος του μέτρου δυσκαμψίας.

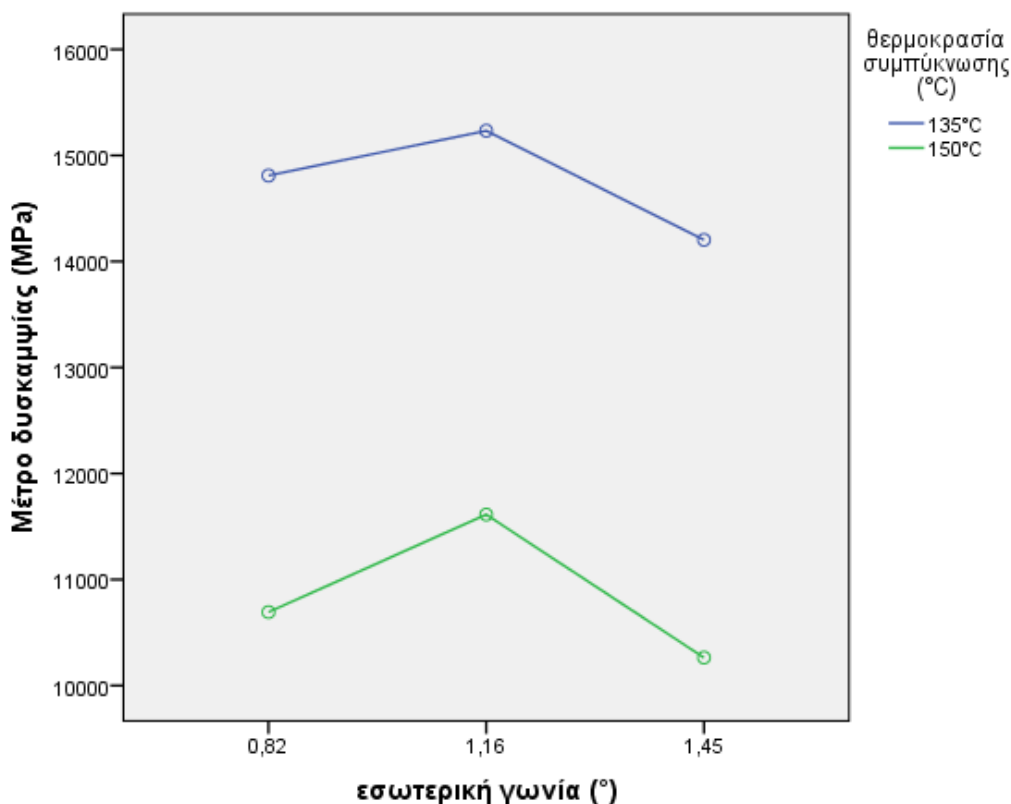
Στο τέλος της συγκεκριμένης ανάλυσης, παρατίθενται τα γραφήματα των σχημάτων 5.10 και 5.11, τα οποία απεικονίζουν την επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας, για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm και 150mm ξεχωριστά.

Το σχήμα 5.10 απεικονίζει τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας κατά τις μεταβολές της εσωτερικής γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης με διάμετρο 100mm. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο δυσκαμψίας σημειώνει τη μέγιστη τιμή του για τη γωνία περιστροφής των $1,16^\circ$, την ελάχιστη τιμή του για τη γωνία των $1,45^\circ$, ενώ για τη γωνία των $0,82^\circ$ λαμβάνει μια τιμή ανάμεσα στις δύο προηγούμενες. Το παραπάνω ισχύει, όπως δείχνει το γράφημα του σχήματος, και για τις δύο τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Ακόμη, μπορεί κανείς να παρατηρήσει εύκολα ότι, για αύξηση της θερμοκρασίας από τους 135°C στους 150°C , το μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται και για τις τρεις τιμές της εσωτερικής γωνίας, με τη μικρότερη μείωση να σημειώνεται για την εσωτερική γωνία περιστροφής με τιμή $1,16^\circ$.



Σχήμα 5.10. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M1 διαμέτρου 100mm

Το σχήμα 5.11, με τη σειρά του, απεικονίζει την επίδραση των μεταβολών της εσωτερικής γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας, για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης με αρχική διάμετρο 150mm. Με βάση το σχήμα 5.11, προκύπτει ότι το μέτρο δυσκαμψίας παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του για τη γωνία περιστροφής των 1,16°, την ελάχιστη τιμή του για τη γωνία των 1,45°, ενώ για τη γωνία των 0,82° λαμβάνει μια ενδιάμεση τιμή, κάτι το οποίο συμβαίνει και για τις δύο τιμές της θερμοκρασίας συμπίκνωσης. Δηλαδή, το μέτρο δυσκαμψίας διαγράφει ανάλογη πορεία με το αντίστοιχο μέγεθος των δοκιμίων διαμέτρου 100mm. Επίσης, προκύπτει ότι, για αύξηση της θερμοκρασίας από τους 135°C στους 150°C, το μέτρο υφίσταται μείωση και για τις τρεις τιμές της εσωτερικής γωνίας, με τη μικρότερη απ' όλες να σημειώνεται για την εσωτερική γωνία περιστροφής με τιμή 1,16°.



Σχήμα 5.11. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M1 αρχικής διαμέτρου 150mm

Επιπλέον, από τη συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών διαφορετικών διαμέτρων, αποφαίνεται ότι η διαφοροποίηση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας λόγω της επίδρασης της μεταβολής της γωνίας περιστροφής είναι μεγαλύτερη για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης με διάμετρο 100mm, ενώ σημειώνεται μεγαλύτερη διαφοροποίηση των τιμών του μέτρου λόγω της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στην περίπτωση των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 150mm.

5.2.2 Πυρήνες οδοστρώματος

Για το μίγμα M1 εξετάζονται, εκτός από εργαστηριακά δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης, και 10 πυρήνες οδοστρώματος.

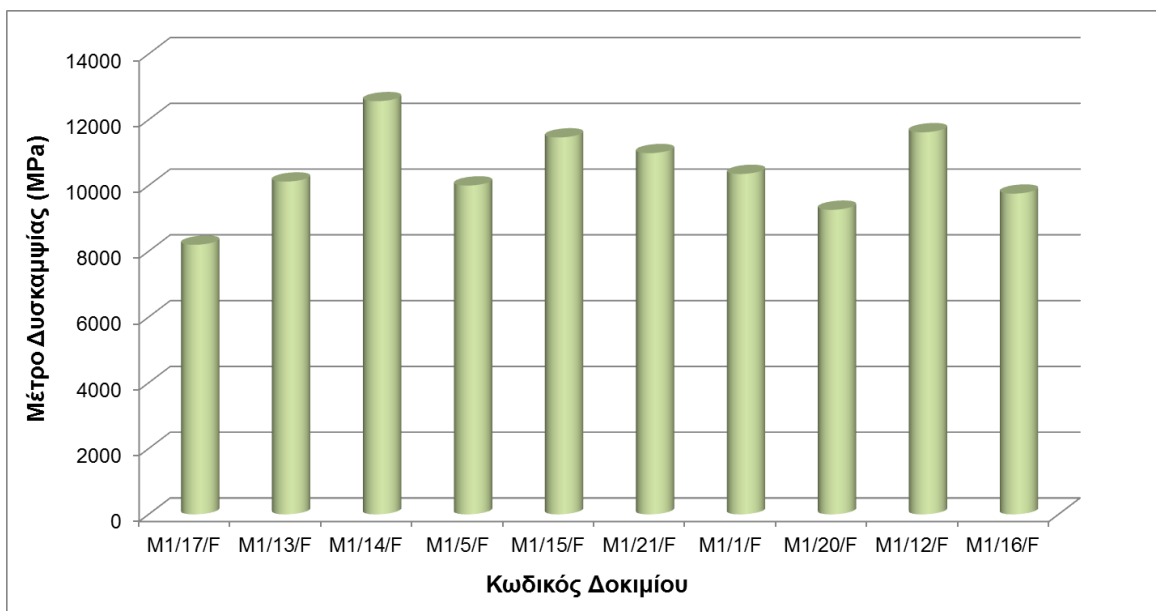
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια πεδίου ασφαλτομίγματος M1. Συγκεκριμένα, ο πίνακας 5.9 απεικονίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων για κάθε μία από τις 4 διαμέτρους χάραξης (Sm_1 , Sm_2 , Sm_3 , Sm_4 αντίστοιχα), καθώς και τους μέσους όρους αυτών ανά 2 ($Sm_{1,2}$, $Sm_{3,4}$) και τον γενικό μέσο όρο των ανωτέρω (Sm), μέσω των σχέσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως (5.1, 5.2, 5.3).

Πίνακας 5.9. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M1

Κωδικός δοκιμίου	$Sm_1/20^\circ C$ (MPa)	$Sm_2/20^\circ C$ (MPa)	$Sm_{1,2}/20^\circ C$ (MPa)	$Sm_3/20^\circ C$ (MPa)	$Sm_4/20^\circ C$ (MPa)	$Sm_{3,4}/20^\circ C$ (MPa)	$Sm/20^\circ C$ (MPa)
M1/17/F	7750	7612	7681	9067	8364	8716	8199
M1/13/F	9910	9259	9585	11397	9913	10655	10120
M1/14/F	12700	12053	12377	13243	12261	12752	12565
M1/5/F	10331	9080	9706	10701	9889	10295	10001
M1/15/F	11628	10354	10991	12094	11771	11933	11462
M1/21/F	11147	10028	10588	11849	10918	11384	10986
M1/1/F	10332	9749	10041	11065	10260	10663	10352
M1/20/F	9408	9339	9374	9330	8973	9152	9263
M1/12/F	11737	10807	11272	12228	11707	11968	11620
M1/16/F	9990	9482	9736	9904	9636	9770	9753

Από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας $Sm_{1,2}$ και $Sm_{3,4}$, καθώς και του γενικού μέσου όρου των μέτρων δυσκαμψίας Sm , αποδείχθηκε ότι η μικρότερη τυπική απόκλιση σημειώθηκε για τις 4 διαμέτρους δοκιμής.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, ο γενικός μέσος όρος Sm αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας για τις 4 συνολικά μετρήσεις κάθε δοκιμής. Στη συνέχεια, παρατίθεται το σχήμα 5.12 που απεικονίζει τα αποτελέσματα των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου.



Σχήμα 5.12. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών επιτόπου συμπίκνωσης μίγματος M1

5.2.3 Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος

5.2.3.1 Δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης και πυρήνες

Προκειμένου να γίνει σύγκριση του μέτρου δυσκαμψίας, όπως αυτό προσδιορίστηκε στα εργαστηριακά δοκίμια και τους πυρήνες, ελέγχθηκε αρχικά αν το ποσοστό κενών για τις δύο κατηγορίες είναι παρόμοιο, μέσω κατάλληλου στατιστικού ελέγχου (t- test). Τα αποτελέσματα του ελέγχου t (με την υπόθεση άνισων διακυμάνσεων) του μέσου ποσοστού κενών των πυρήνων και των γυροσκοπικών δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ του συνόλου των γυροσκοπικών δοκιμών και των πυρήνων του μίγματος M1

Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) συνόλου γυροσκοπικών δοκιμών	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,306666667	5,25
Διακύμανση	0,70349697	1,847222222
Μέγεθος δείγματος	12	10
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	14	
t	-1,9122832	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,038261189	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,761310136	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,076522377	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,144786688	

Από τον παραπάνω έλεγχο, προέκυψε ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t) \text{ δίπλευρη} > \alpha$ που λαμβάνει την τιμή 0,05 για επίπεδο σημαντικότητας 95%. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι η διαφορά μεταξύ της κατανομής κενών των δύο τύπων δοκιμών του μίγματος M1 δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Αντίστοιχος έλεγχος διενεργήθηκε και για τη διαφοροποίηση του ποσοστού κενών μεταξύ των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών με διάμετρο 100mm και των δοκιμών πεδίου (Πίνακας 5.11).

Πίνακας 5.11. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 100mm και των πυρήνων του μίγματος M1

Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 100mm	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,526666667	5,25
Διακύμανση	0,654706667	1,847222222
Μέγεθος δείγματος	6	10
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	14	
t	-1,334390746	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,101687287	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,761310136	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,203374573	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,144786688	

Τα αποτελέσματα που δίνει ο ανωτέρω έλεγχος συγκλίνουν με αυτά του αμέσως προηγούμενου, αφού και εδώ $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t)$ δίπλευρη $> \alpha$ για τιμή 0,05. Άρα, δεν υπάρχει σημαντική στατιστική διαφοροποίηση μεταξύ της κατανομής κενών των δοκιμών πεδίου και των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών με διάμετρο 100mm και των δοκιμών πεδίου.

Τέλος, εφαρμόζεται ο έλεγχος t όσον αφορά στο μέσο ποσοστό κενών των γυροσκοπικών δοκιμών αρχικής διαμέτρου 150mm και των δοκιμών πεδίου (Πίνακας 5.12).

Πίνακας 5.12. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμών αρχικής διαμέτρου 150mm και των πυρήνων του μίγματος M1

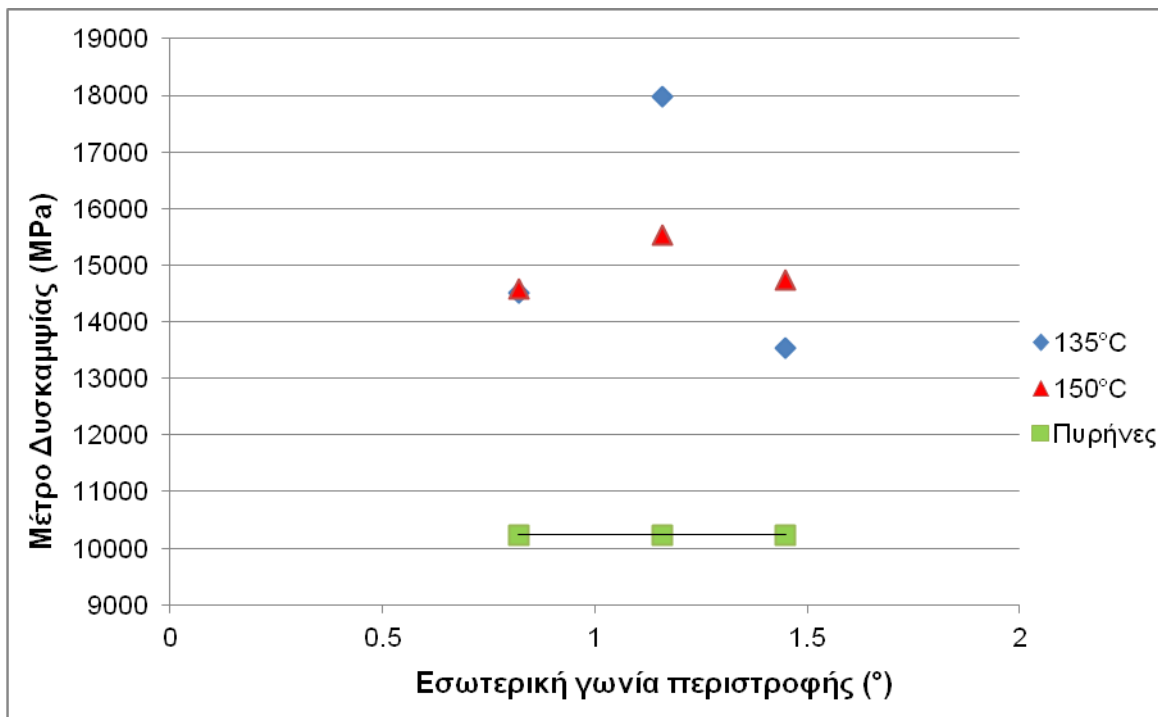
Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 100mm	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,086666667	5,25
Διακύμανση	0,776826667	1,847222222
Μέγεθος δείγματος	6	10
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	14	
t	-2,075418527	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,02842832	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,761310136	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,056856641	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,144786688	

Και εδώ ισχύει ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή $P(T \leq t) \text{ δίπλευρη} > \alpha$ με τιμή 0,05, πράγμα που δείχνει ότι αποτελέσματα του παραπάνω ελέγχου, συμφωνούν με αυτά των δύο προηγούμενων. Επομένως, η διαφορά μεταξύ των ποσοστών κενών των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών με αρχική διάμετρο 150mm και των δοκιμών πεδίου δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική.

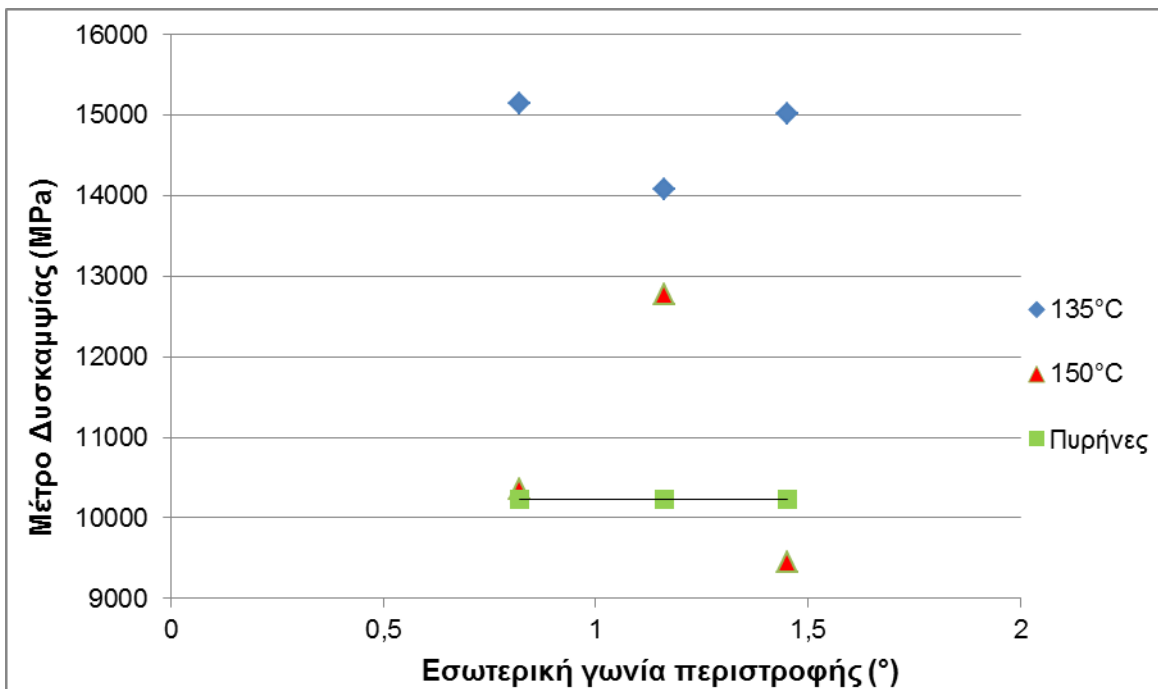
Για ακόμα μεγαλύτερη επιβεβαίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων, διενεργήθηκαν και έλεγχοι t του μέσου δύο δειγμάτων με υποτιθέμενες ίσες διακυμάνσεις για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν προηγουμένως και οι οποίοι οδήγησαν στα ίδια ακριβώς συμπεράσματα προς τη μη αξιόλογη διαφοροποίηση της κατανομής των κενών μεταξύ των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών και των δοκιμών πεδίου.

Παρακάτω, δίνονται τα σχήματα 5.13 - 5.14 και 5,15 – 5.16 που απεικονίζουν τα μέτρα δυσκαμψίας των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών, ξεχωριστά για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100mm και 150mm αντίστοιχα. Στα σχήματα, φαίνεται και η τιμή του διάμεσου των μέτρων δυσκαμψίας των πυρήνων ως σταθερή συνεχής γραμμή, με σκοπό να αναδειχθεί στα μεν πρώτα γραφήματα η θερμοκρασία συμπίκνωσης και σε

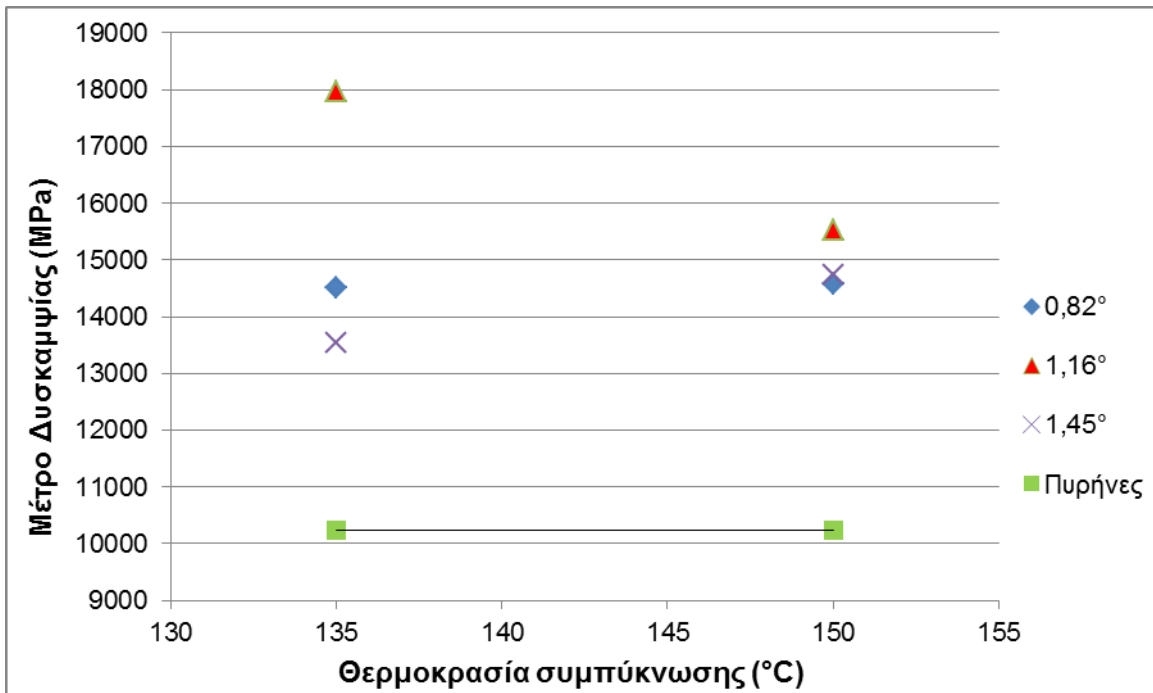
αυτά που ακολουθούν η γωνία περιστροφής για τις οποίες το εργαστηριακό μέτρο δυσκαμψίας προσεγγίζει περισσότερο αυτό των επιτόπου συνθηκών.



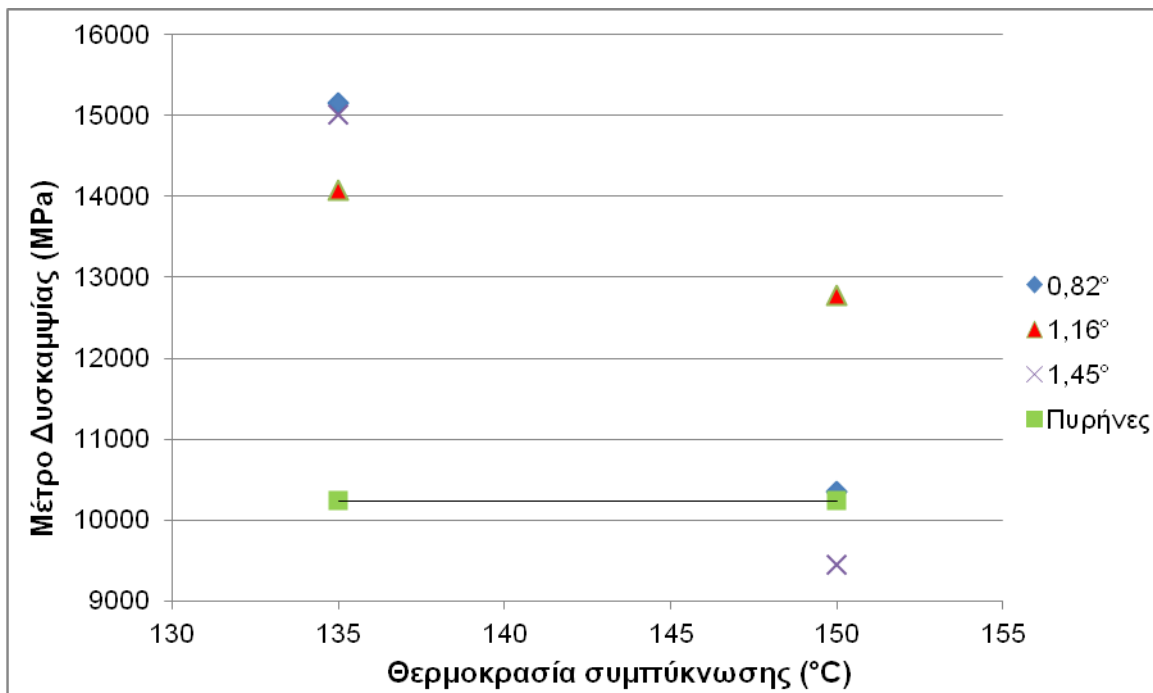
Σχήμα 5.13. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπτυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης



Σχήμα 5.14. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπτυκνωμένων δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης



Σχήμα 5.15. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 5.16. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M1 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής

Από τα γραφήματα των σχημάτων αυτών, παρατηρείται ότι οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των εργαστηριακά συμπυκνωμένων δοκιμίων με διάμετρο 100mm πλησιάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το αντίστοιχο μέτρο των πυρήνων για το συνδυασμό εσωτερικής γωνίας περιστροφής με τιμή 1,45° και θερμοκρασίας συμπίκνωσης με τιμή 135°C. Όσον αφορά στα εργαστηριακά δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας τους προσεγγίζουν περισσότερο το αντίστοιχο μέτρο των πυρήνων για το συνδυασμό γυροσκοπικής γωνίας περιστροφής τιμής 0,82° και θερμοκρασίας συμπίκνωσης τιμής 150°C.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η διαδικασία της συσχέτισης των μέτρων δυσκαμψίας που προσδιορίστηκαν για τα δοκίμια που έχουν υποστεί γυροσκοπική συμπίκνωση και για τα δοκίμια πεδίου, κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

Αρχικά, ορίστηκε ο λόγος k_1 των μέτρων δυσκαμψίας ως το πηλίκο των διαμέσων για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης και τα δοκίμια πεδίου. Για τη συσχέτιση των μέτρων δυσκαμψίας εργαστηριακών δοκιμίων και πυρήνων επελέγη ο διάμεσος ως ένα χαρακτηριστικό στατιστικό μέγεθος.

$$k_1 = \frac{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M1}}{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων πεδίου μίγματος M1}}$$

Πιο αναλυτικά, υπολογίζεται ο λόγος ξεχωριστά για τις 3 διαφορετικές τιμές που λαμβάνει η εσωτερική γωνία περιστροφής, δηλαδή:

$$Sm_{\text{Gyro, M1}}(0,82^\circ) = 1,42 \times Sm_{\text{Field, M1}} \quad [5.4]$$

$$Sm_{\text{Gyro, M1}}(1,16^\circ) = 1,45 \times Sm_{\text{Field, M1}} \quad [5.5]$$

$$Sm_{\text{Gyro M1}}(1,45^\circ) = 1,38 \times Sm_{\text{Field, M1}} \quad [5.6]$$

όπου:

$Sm_{\text{Gyro, M1}}(i)$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης του μίγματος M1 με εσωτερική γωνία $i = [0,82, 1,16, 1,45]^\circ$

Ύστερα, υπολογίστηκαν ο μέσος όρος και ο συντελεστής μεταβλητότητας του μέτρου δυσκαμψίας, τόσο για τα εργαστηριακά δοκίμια όσο και για τους πυρήνες.

Στον πίνακα 5.13 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων μεγεθών των μέτρων δυσκαμψίας, καθώς και οι τιμές του διάμεσου που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, για τα διαφορετικής μεθόδου συμπίκνωσης δοκίμια.

Πίνακας 5.13.Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής και επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνων) μίγματος M1

Δοκίμια	Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας (MPa)			
	Μέσος όρος	Διάμεσος	Συντελεστής μεταβλητότητας	Λόγος
Γυροσκοπικής συμπίκνωσης	13.974	14.545	0,047	1,4
Επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνες)	10.432	10.236	0,038	

Έτσι, μπορεί να εξαχθεί η εξής σχέση για τα μέτρα δυσκαμψίας των δοκιμών διαφορετικών μεθόδων συμπίκνωσης του μίγματος M1:

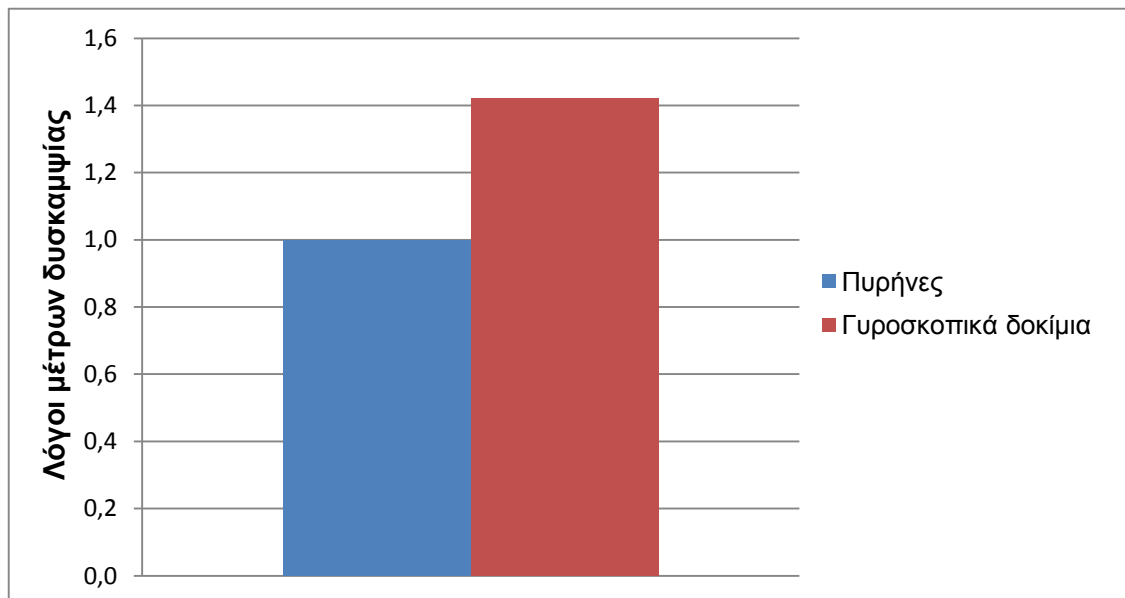
$$Sm_{Gyro, M1} = 1.4 \times Sm_{Field, M1} \quad [5.7]$$

όπου:

$Sm_{Gyro, M1}$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης του μίγματος M1

$Sm_{Field, M1}$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου του μίγματος M1

Για τις ανάγκες της συσχέτισης των μέτρων δυσκαμψίας μεταξύ των δύο μεθόδων συμπίκνωσης, παρατίθεται το σχήμα 5.17 όπου φαίνονται οι αντιπροσωπευτικοί λόγοι του μέτρου δυσκαμψίας της γυροσκοπικής συμπίκνωσης με το αντίστοιχο μέγεθος της επιτόπου συμπίκνωσης, για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια του μίγματος M1.



Σχήμα 5.17. Γράφημα συσχέτισης γυροσκοπικών δοκιμών και πυρήνων μίγματος M1

Από το σχήμα 5.17 παρατηρείται ότι η γυροσκοπική συμπίκνωση αποδίδει υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τη συμπίκνωση του πεδίου. Σε άλλη έρευνα έχει βρεθεί ότι η γυροσκοπική συμπίκνωση αποδίδει παρόμοιες ή χαμηλότερες αριθμητικά τιμές του μέτρου δυσκαμψίας συγκριτικά με την επιτόπου συμπίκνωση, ενώ η μεγαλύτερη προσέγγιση των επιτόπου συνθηκών επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται εσωτερική γωνία περιστροφής των $1,16^\circ$ (Khan et al., 1998).

5.3 Ασφαλτόμιγμα M2

Το μίγμα M2 διαφέρει με το μίγμα M1, καθώς για αυτό εξετάστηκαν και ορισμένα δείγματα κρουστικής συμπίκνωσης κατά Marshall. Πιο αναλυτικά, τα εργαστηριακά δοκίμια του μίγματος αυτού είναι συνολικά 24 στον αριθμό, τα μισά από τα οποία αποτελούν δείγματα γυροσκοπικής συμπίκνωσης και τα υπόλοιπα δείγματα συμπίκνωσης Marshall.

5.3.1 Εργαστηριακά δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Στον πίνακα 5.14 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα συμπτυκνωμένα με τη γυροσκοπική μέθοδο δοκίμια του ασφαλτομίγματος M2. Συγκεκριμένα, περιέχει τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα

12 δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με χρήση της γυροσκοπικής μεθόδου για κάθε μία από τις 4 διαμέτρους χάραξης (S_{m1} , S_{m2} , S_{m3} , S_{m4} αντίστοιχα), καθώς και τους μέσους όρους αυτών ανά 2 ($S_{m1,2}$, $S_{m3,4}$) και τον γενικό μέσο όρο των ανωτέρω (S_m), μέσω των σχέσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως (5.1, 5.2, 5.3).

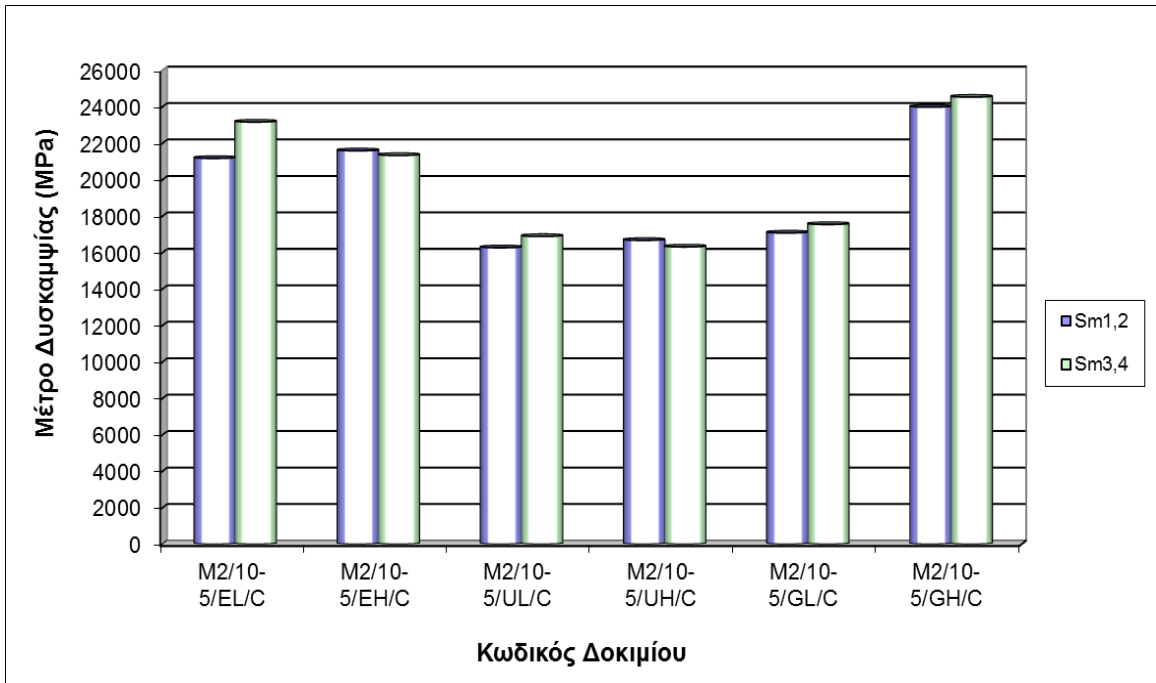
Πίνακας 5.14. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης M2

Κωδικός δοκιμίου	$S_{m1}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m2}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m1,2}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m3}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m4}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m3,4}/20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_m / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)
M2/10-5/EL/CC	12091	11488	11790	11165	10813	10989	11390
M2/10-5/EL/C	22838	19515	21177	23819	22522	23171	22174
M2/10-5/EH/CC	11053	10276	10665	11341	10565	10953	10809
M2/10-5/EH/C	22344	20842	21593	21821	20858	21340	21467
M2/10-5/UL/CC	20608	19203	19906	18183	19073	18628	19267
M2/10-5/UL/C	16968	15578	16273	17290	16501	16896	16585
M2/10-5/UH/CC	13053	12796	12925	12954	11822	12388	12657
M2/10-5/UH/C	17199	16158	16679	16892	15743	16318	16499
M2/10-5/GL/CC	15178	14379	14779	14059	12584	13322	14051
M2/10-5/GL/C	17232	16935	17084	17293	17808	17551	17318
M2/10-5/GH/CC	10981	10369	10675	9955	9816	9886	10281
M2/10-5/GH/C	23735	24242	23989	24856	24222	24539	24264

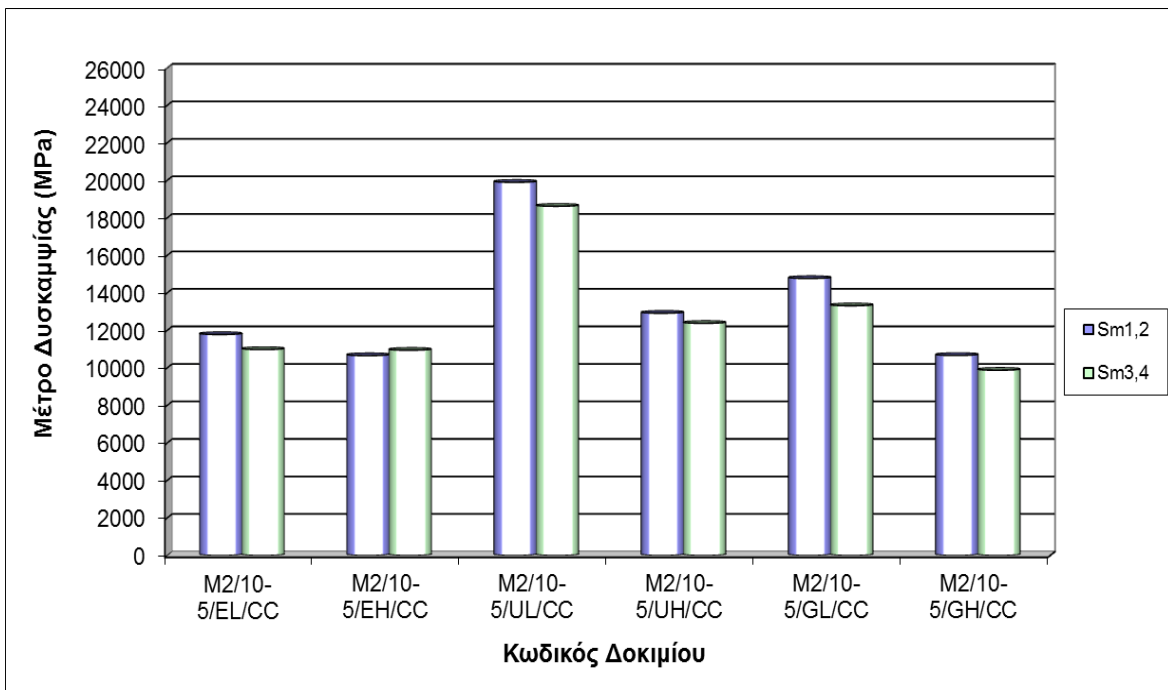
5.3.1.1 Επιρροή του αριθμού των διαμέτρων στο μέτρο δυσκαμψίας

Αρχικά, δημιουργήθηκαν, και για το μίγμα M2, τα γραφήματα με τα αποτελέσματα των μέτρων δυσκαμψίας για τους μέσους όρους $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$, οι οποίοι αντιστοιχούν στις μετρήσεις των δύο πρώτων διαμέτρων και των δύο επόμενων αντίστοιχα, ξεχωριστά για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm και 150 mm (σχήμα 5.18 και 5.19).

Διερεύνηση της επίδρασης της συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομιγμάτων



Σχήμα 5.18. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2



Σχήμα 5.19. Μέσοι όροι μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης αρχικής διαμέτρου 150mm μίγματος M2

Από τα παραπάνω γραφήματα, παρατηρήθηκε ότι το μέτρο δυσκαμψίας που προσδιορίζεται κατά την 3^η και 4^η δοκιμή ($S_{m3,4}$) εμφανίζεται αυξημένο για τέσσερα από τα έξι δοκίμια διαμέτρου 100mm, μειωμένο δε για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, σε σχέση με το αντίστοιχο μέτρο των δύο πρώτων δοκιμών ($S_{m1,2}$). Ωστόσο, για μία ακόμη φορά, είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει σχετικά μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο Μ.Ο. $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$ κάθε δοκιμίου.

Για το λόγο αυτό, επαναλήφθηκε ο ίδιος έλεγχος t -test που πραγματοποιήθηκε και για το μίγμα M1 για τη διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών του μέτρου δυσκαμψίας μεταξύ των διαφορετικών διαμέτρων εξέτασης. Έτσι, υπολογίστηκε για όλα τα δοκίμια του μίγματος M2 η διαφορά των δύο παραπάνω μεγεθών και, στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι του μέσου όρου των δειγμάτων ($S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$) με μηδενική υπόθεση $\mu_{S_{m1,2}} = \mu_{S_{m3,4}}$. Στους πίνακες 5.15 και 5.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενδεικτικά για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm του μίγματος M2.

Πίνακας 5.15. Διαφορά μέσων όρων μέτρων δυσκαμψίας για τα 2 ζεύγη διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	$S_{m1,2} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	$S_{m3,4} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)	Διαφορά $S_{m1,2}-S_{m3,4} / 20^{\circ}\text{C}$ (MPa)
M2/10-5/EL/C	21177	23171	-1994
M2/10-5/EH/C	21593	21340	253
M2/10-5/UL/C	16273	16896	-623
M2/10-5/UH/C	16679	16318	361
M2/10-5/GL/C	17084	17551	-467
M2/10-5/GH/C	23989	24539	-550

Πίνακας 5.16. Έλεγχος t για τους δύο μέσους όρους των μέτρων δυσκαμψίας των δύο ζευγών διαμέτρων δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm μίγματος M2

Στατιστικά στοιχεία	$S_{m1,2}$	$S_{m3,4}$
Μέσος	19465,83333	19969,16667
Διακύμανση	10309144,17	12327439,77
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,972428115	
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-1,461339988	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,101882667	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,203765335	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Από τον παραπάνω έλεγχο προκύπτει ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t) \text{ δίπλευρη} > \alpha$ που λαμβάνει την τιμή 0,05 για επίπεδο σημαντικότητας 95%, κάτι το οποίο σημαίνει ότι, και για τα δείγματα γυροσκοπικής συμπίκνωσης του ασφαλτομίγματος M2 με διάμετρο 100mm, η διαφοροποίηση μεταξύ των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας για τα δύο ζεύγη διαμέτρων ελέγχου δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τα δείγματα όλων των μεθόδων συμπίκνωσης και οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, και για την περίπτωση του μίγματος M2, δεν υπάρχει έντονη διακύμανση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας στη μάζα των δοκιμών, για όλες τις περιπτώσεις.

Επιπλέον, από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$, καθώς και του γενικού μέσου όρου των μέτρων δυσκαμψίας S_m , βρέθηκε μείωση της τυπικής απόκλισης για τις 4 διαμέτρους δοκιμής, αυξάνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυτών.

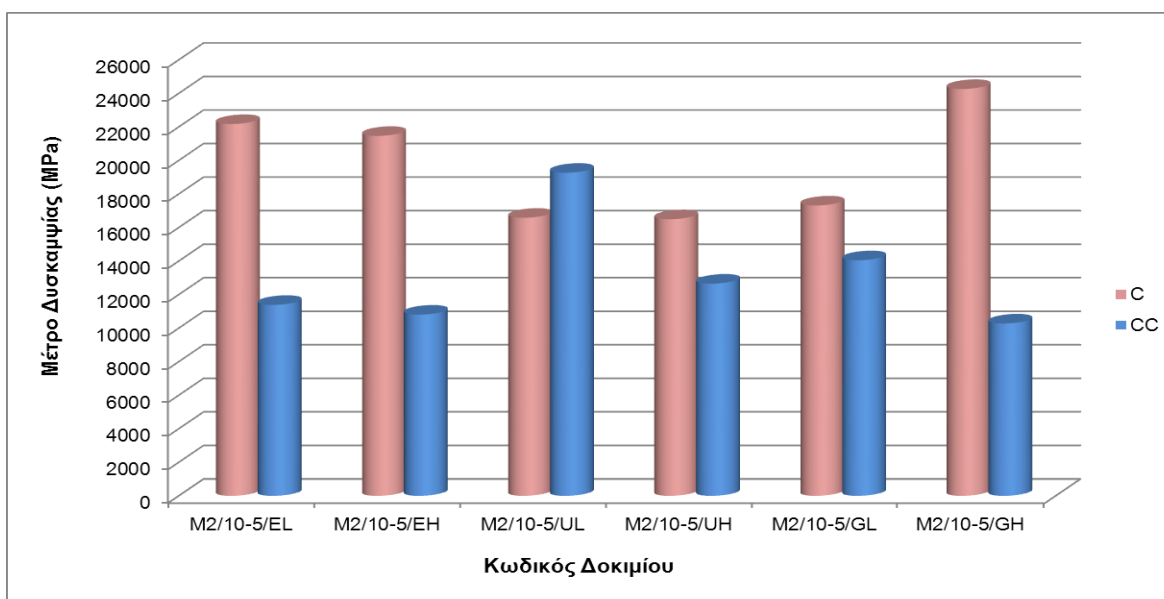
Με βάση τα προηγούμενα, λοιπόν, για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, επιλέχθηκε, όπως ακριβώς έγινε και για το μίγμα M1, ο γενικός μέσος όρος των

προηγούμενων δύο μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας (S_m), ο οποίος αποτελεί την πιο αξιόπιστη τιμή για το σύνολο των 4 διαμετρικών δοκιμών.

5.3.1.2 Επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας

Στο πλαίσιο της μελέτης της επίδρασης των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου, δηλαδή της διαμέτρου του δοκιμίου, της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας, πραγματοποιείται συγκριτική απεικόνιση για την αξιολόγηση της επιρροής της κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, μέσω των γραφημάτων που παρατίθενται στη συνέχεια.

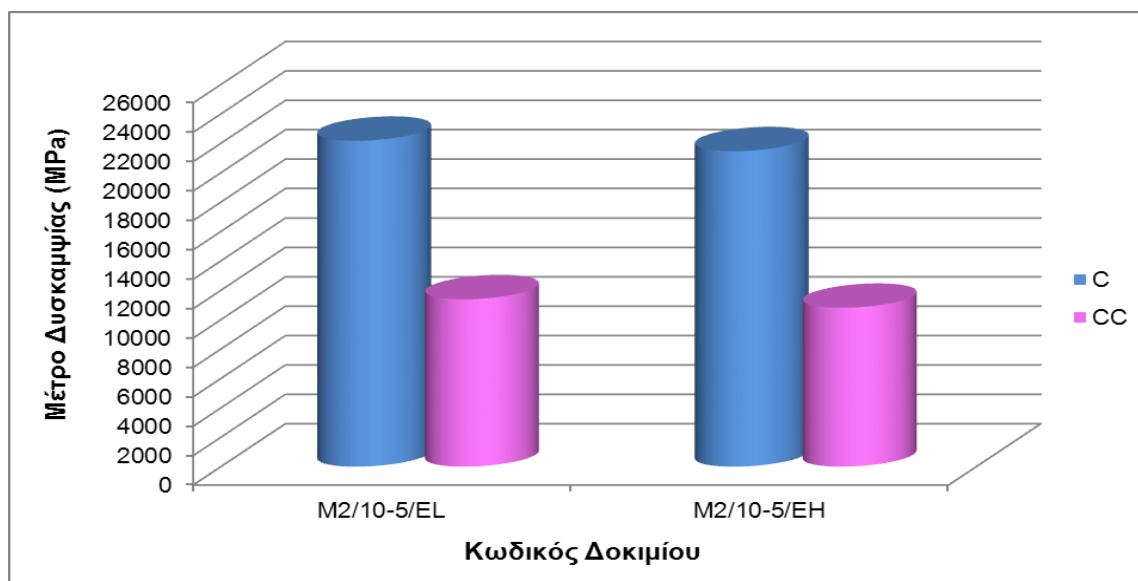
Στο σχήμα 5.20 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τις δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας που πραγματοποιήθηκαν στα 12 δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης διαμέτρου 100mm και 150mm του μίγματος M2.



Σχήμα 5.20. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος M2

Το παραπάνω σχήμα φανερώνει μείωση του μέτρου δυσκαμψίας με την αύξηση της διαμέτρου από 100mm σε 150mm για όλα σχεδόν τα δοκίμια της γυροσκοπικής συμπίκνωσης που απαρτίζουν το μίγμα M2, με αρκετά μεγάλες διαφορές να σημειώνονται μεταξύ των δύο τιμών για το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων διαφορετικής διαμέτρου.

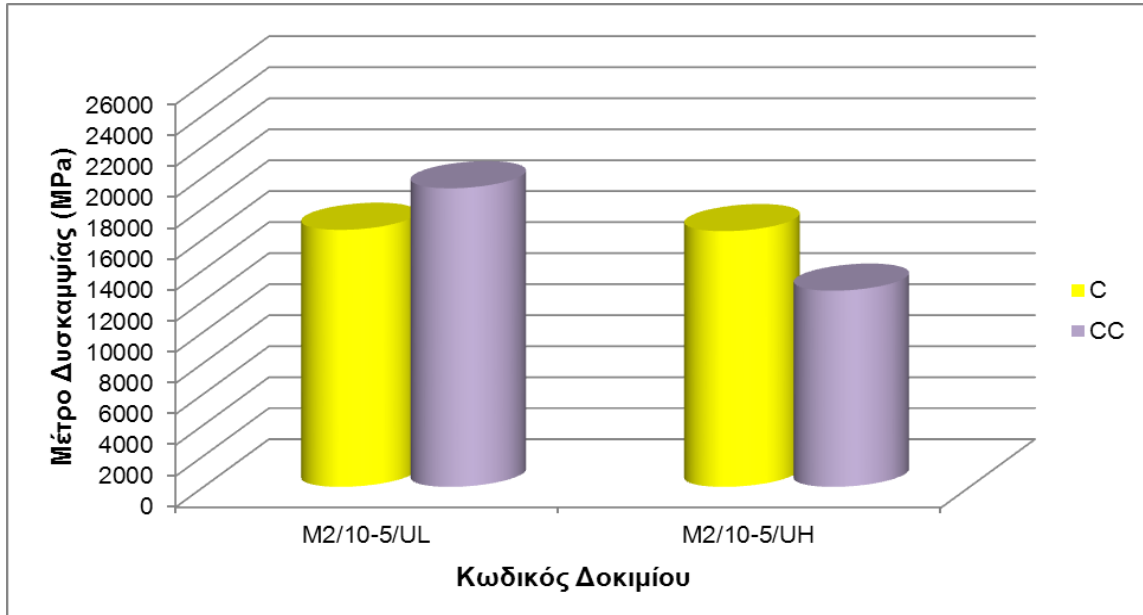
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια του μίγματος M2 που έχουν συμπυκνωθεί γυροσκοπικά σε θερμοκρασίες 135°C και 150°C, υπό σταθερή εσωτερική γωνία τιμής 0,82° , 1,16° και 1,45° αντίστοιχα.



Σχήμα 5.21. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 0,82°

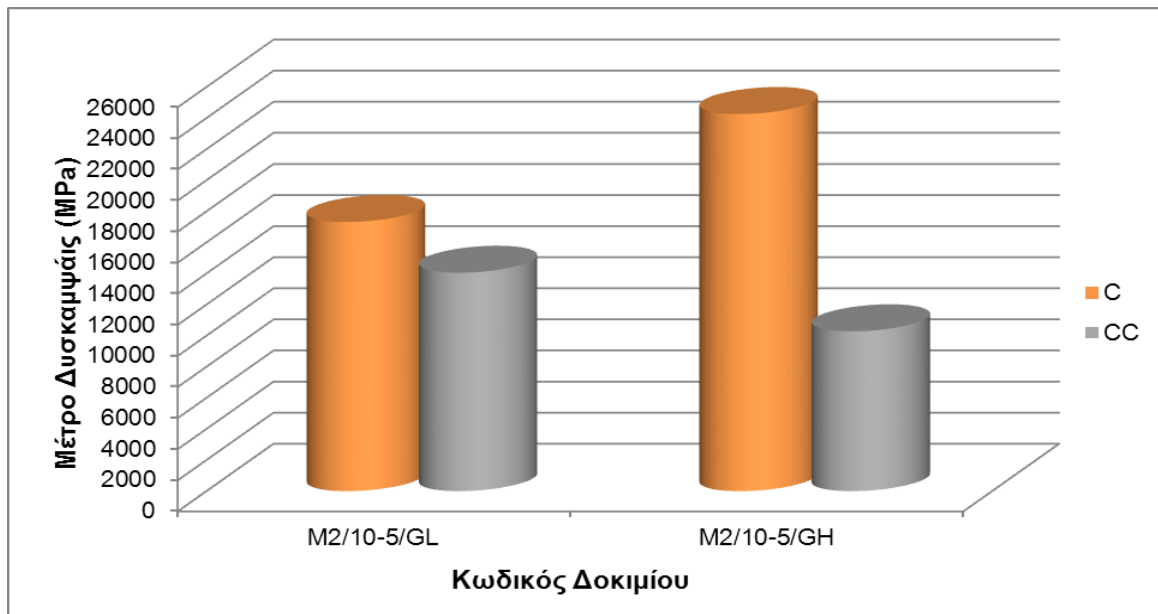
Από το σχήμα 5.21 παρατηρείται ότι, με αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C και υπό σταθερή γωνία περιστροφής 0,82°, το μέτρο δυσκαμψίας δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη μεταβολή τόσο για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm (μείωση 3%) όσο και για εκείνα αρχικής διαμέτρου 150mm (μείωση 5%).

Ακολουθεί το σχήμα 5.22, από το οποίο προκύπτει 34% μείωση της τιμής του μέτρου δυσκαμψίας με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C και σταθερή γωνία περιστροφής 1,16° για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, ενώ για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm η τιμή του μέτρου δεν φαίνεται να μεταβάλλεται ιδιαίτερα (μείωση 1%).



Σχήμα 5.22. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 1,16°

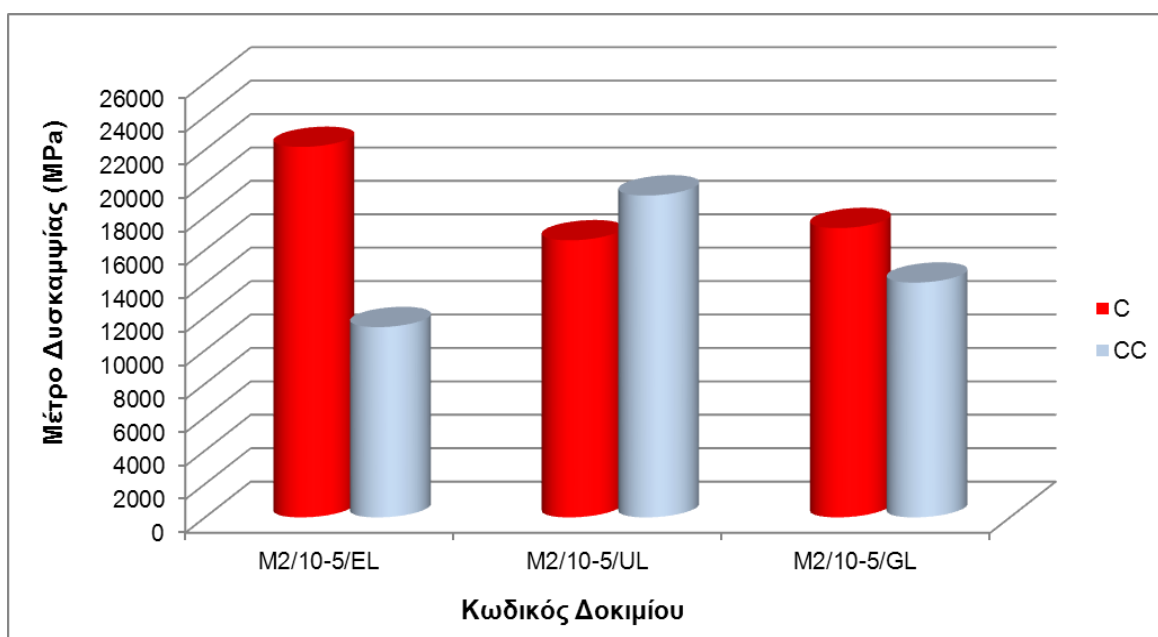
Το τελευταίο σχήμα 5.23, σταθερής εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45°, απεικονίζει 40% αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm και μείωσή του κατά 27% για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C.



Σχήμα 5.23. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 με εσωτερική γωνία 1,45°

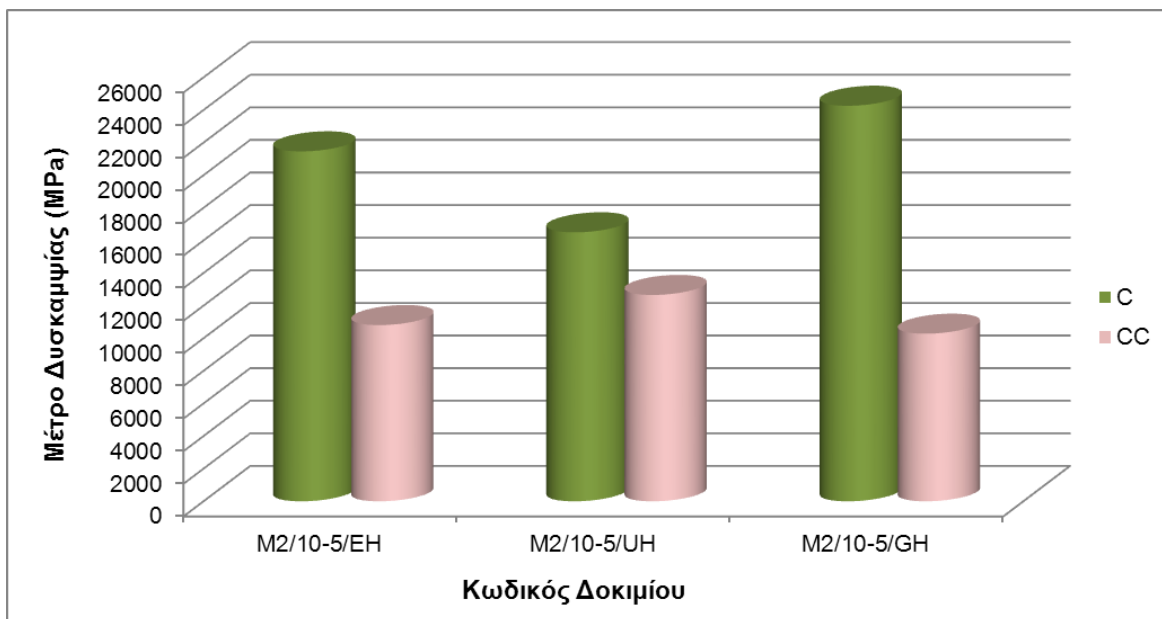
Από τα ανωτέρω σχήματα δεν μπορεί να βγει κάποιο γενικό συμπέρασμα για την τάση του μέτρου δυσκαμψίας με τη μεταβολή του παράγοντα της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αφού για τα μισά από το σύνολο των συμπυκνωμένων δοκιμίων με σταθερή εσωτερική γωνία περιστροφής το μέτρο δυσκαμψίας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή, ενώ για τα υπόλοιπα δοκίμια το μέτρο, κατά βάση, σημειώνει μείωση, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.

Τέλος, στα σχήματα 5.24 και 5.25 φαίνονται τα αποτελέσματα του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί γυροσκοπικά με εσωτερικές γωνίες περιστροφής $0,82^\circ$, $1,16^\circ$ και $1,45^\circ$, υπό θερμοκρασία 135°C και 150°C αντίστοιχα.



Σχήμα 5.24. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 υπό θερμοκρασία 135°C

Το σχήμα 5.24 δείχνει, για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm σταθερής θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους 135°C , ποσοστιαία μείωση 25% του μέτρου δυσκαμψίας για αρχική αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$ και 4% αύξηση της τιμής του μέτρου για περαιτέρω αύξηση της γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$. Αντιθέτως, για τα αντίστοιχης θερμοκρασίας δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, σημειώνεται αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας σε ποσοστό 69% για αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$, ενώ για τη περαιτέρω μεταβολή της γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$ παρατηρείται μείωση της τιμής του κατά 27%.



Σχήμα 5.25. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2 υπό θερμοκρασία 150°C

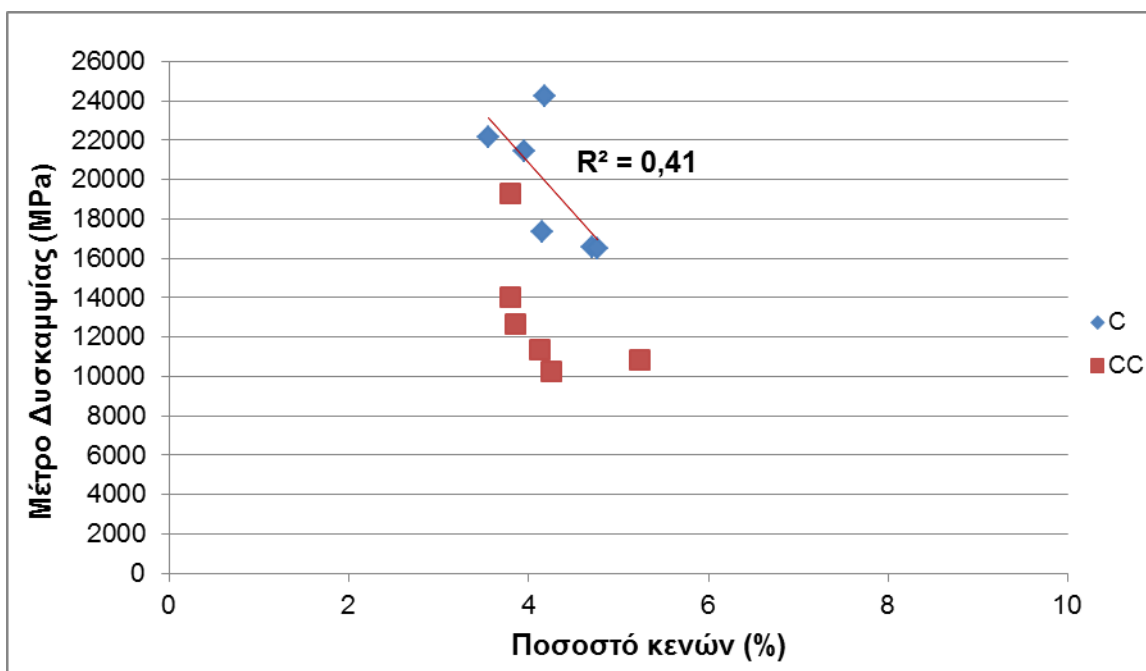
Το σχήμα 5.25 δείχνει, όπως και το ακριβώς προηγούμενο, μείωση του μέτρου δυσκαμψίας σε ποσοστό 23% για αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από 0,82° σε 1,16° και αύξηση 47% της τιμής του μέτρου για περαιτέρω αύξηση της γωνίας από 1,16° σε 1,45°, για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150°C. Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, ίδιας θερμοκρασίας, σημειώνουν παρόμοιες τιμές, με μικρότερη αύξηση του μέτρου (17%) να συντελείται κατά την αρχική αύξηση της εσωτερικής γωνίας από 0,82° σε 1,16° και επίσης κατά πολύ μικρότερου βαθμού μείωση της τιμής του (19%) για περαιτέρω αύξηση της γωνίας από 1,16° σε 1,45°.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι δεν διαγράφεται σαφής τάση μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας με τη μεταβολή καθενός από τους υπό διερεύνηση παράγοντες. Γι' αυτό, δημιουργείται η ανάγκη για μεγαλύτερη εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων της γυροσκοπικής συμπίκνωσης στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας, η οποία διενεργείται μέσω ανάλυσης με κατάλληλη στατιστική μέθοδο.

5.3.1.3 Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Αρχικά, μελετάται η επιρροή της μεταβολής του ποσοστού κενών αέρα στη μάζα των δοκιμών της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας. Στο σχήμα 5.26

απεικονίζεται η συσχέτιση του μεγέθους του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για το σύνολο των γυροσκοπικών δοκιμών, διαμέτρων 100mm και 150mm ξεχωριστά.



Σχήμα 5.26. Γραμμική εξίσωση συσχέτισης του ποσοστού κενών με το μέτρο δυσκαμψίας για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2

Από το σχήμα παρατηρείται μέτριος βαθμός συσχέτισης μεταξύ του μέτρου δυσκαμψίας των γυροσκοπικών δοκιμών και του ποσοστού κενών, όπως αποδεικνύεται και από την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής συσχέτισης ($R^2 = 0,41$). Στην επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης που αφορούν στην επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου στο μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης.

5.3.1.4 Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας υπό την επίδραση των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου

Με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων συμπίκνωσης της γυροσκοπικής μεθόδου (διάμετρος δοκιμίου, θερμοκρασία συμπίκνωσης, εσωτερική γωνία περιστροφής) στο μέτρο δυσκαμψίας, πραγματοποιείται και για το μίγμα M2, ακριβώς όπως και για το μίγμα M1, στατιστική ανάλυση διακύμανσης.

Στην παραπάνω διαδικασία συμπεριλαμβάνεται η αλληλεπίδραση δύο παραμέτρων ταυτόχρονα στο μέτρο δυσκαμψίας, μέσω των επιπλέον συνδυασμών ανά δύο παραμέτρους συμπύκνωσης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στους πίνακες 5.17 - 5.19 οι υπολογισμοί για το μέσο όρο, το τυπικό σφάλμα και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι) του μέτρου δυσκαμψίας, ξεχωριστά για κάθε υπό διερεύνηση παράμετρο.

Πίνακας 5.17. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M2 για τη μεταβολή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής

εσωτερική γωνία (°)	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
0,82	16460	1366,810	10579	22340
1,16	16252	1366,810	10371	22132
1,45	16478	1366,810	10597	22359

Πίνακας 5.18. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M2 για τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης

θερμοκρασία συμπύκνωσης (°C)	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
135	16797	1115,996	11995	21599
150	15996	1115,996	11194	20797

Πίνακας 5.19. Εκτιμώμενοι οριακοί μέσοι μέτρων δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M2 για τη μεταβολή της διαμέτρου

αρχική διάμετρος (mm)	Μέσος όρος	Τυπικό σφάλμα	Διάστημα εμπιστοσύνης (95%)	
			Κάτω όριο	Άνω όριο
100 (τύπου C)	19717	1115,996	14916	24519
150 (τύπου CC)	13075	1115,996	8274	17877

Στον πίνακα 5.20 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων γυροσκοπικής συμπύκνωσης που επιδρούν σε αυτό.

Πίνακας 5.20. Ανάλυση διακύμανσης του μέτρου δυσκαμψίας γυροσκοπικών δοκιμών μίγματος M2 για όλους τους συνδυασμούς παραγόντων

Παράμετρος	Άθροισμα τετραγώνων αποκλίσεων	Βαθμοί ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο αποκλίσεων	Τιμή F	Επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας
μοντέλο	3454620131,333	10	345462013,133	46,230	0,021
εσωτερική γωνία	126544,667	2	63272,333	0,008	0,992
θερμοκρασία συμπύκνωσης	1926405,333	1	1926405,333	0,258	0,662
διάμετρος	132348492,000	1	132348492,000	17,711	0,052
εσωτερική γωνία & διάμετρος	57318374,000	2	28659187,000	3,835	0,207
θερμοκρασία συμπύκνωσης & διάμετρος	24407416,333	1	24407416,333	3,266	0,212
εσωτερική γωνία & θερμοκρασία	12219178,667	2	6109589,333	0,818	0,550
σφάλμα	14945360,667	2	7472680,333		
σύνολο	3469565492,000	12			

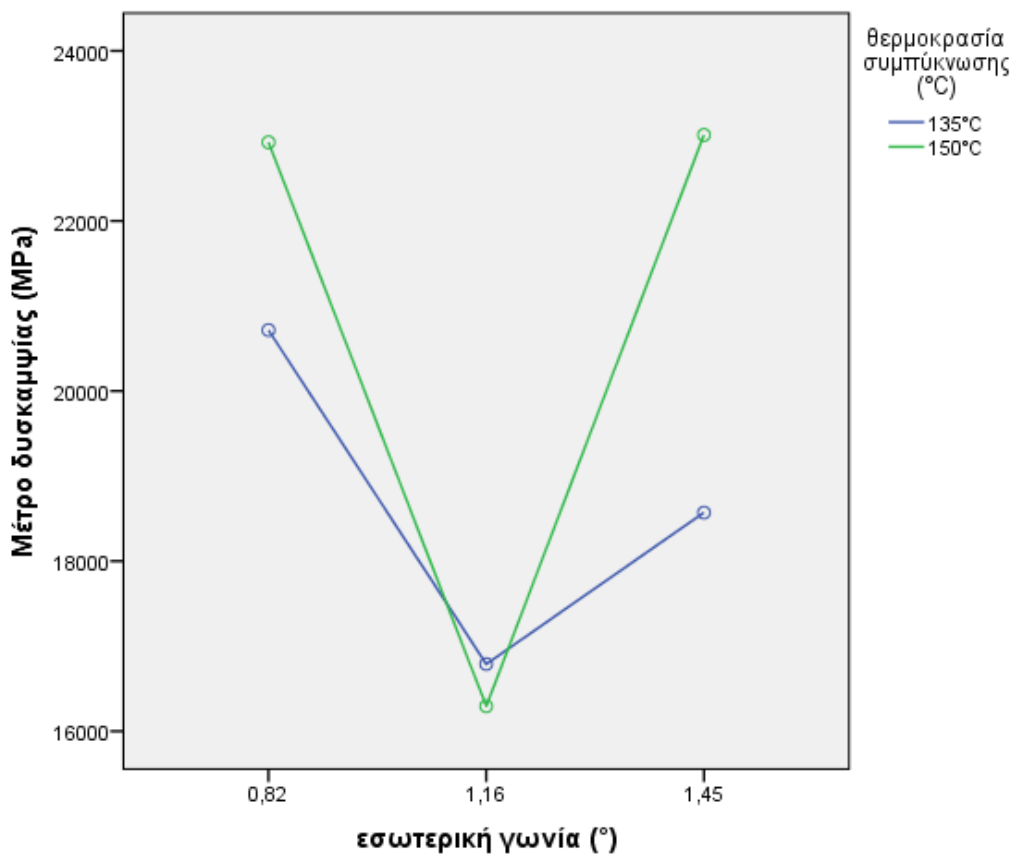
a. δείκτης $R^2 = 0,996$ (προσαρμοσμένος δείκτης $R^2 = 0,974$)

Με κριτήριο την τιμή F που υπολογίζεται για κάθε έναν από τους εξεταζόμενους παράγοντες - συνδυασμούς, αξιολογείται το μέγεθος της επιρροής του/τους στη συμπεριφορά του μέτρου δυσκαμψίας, ενώ μέσω της τιμής σημαντικότητας της 6^{ης} στήλης συμπεραίνεται αν η επίδραση αυτή αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για τη συμπεριφορά του μεγέθους ή όχι. Από τα αποτελέσματα που δίνει ο παραπάνω πίνακας διαπιστώνεται ότι η παράμετρος που ασκεί τη μεγαλύτερη επιρροή στο μέτρο δυσκαμψίας είναι η διάμετρος του δοκιμίου, αφού η τιμή της σημαντικότητάς της είναι η χαμηλότερη όλων. Η διάμετρος δείχνει να αποτελεί το κυρίαρχο χαρακτηριστικό μέγεθος που ευθύνεται για τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας. Ακολουθούν οι συνδυασμοί του παράγοντα της διαμέτρου, τόσο με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, όσο και με την εσωτερική γωνία περιστροφής, οι οποίοι κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα ως προς το μέγεθος της επίδρασής τους. Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι η εσωτερική γωνία αποτελεί

την παράμετρο με τη μικρότερη επιρροή στο μέγεθος του μέτρου δυσκαμψίας, όπως βρέθηκε και για το μίγμα M1.

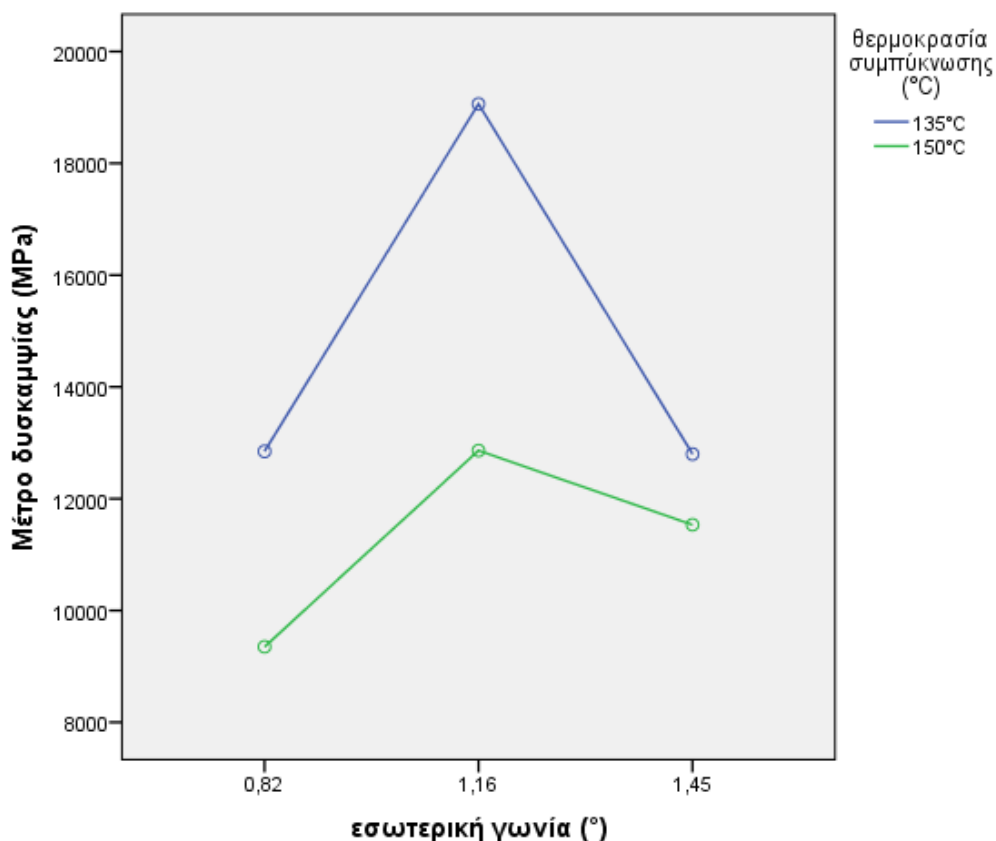
Έπειτα, παρατίθενται τα γραφήματα των σχημάτων 5.27 και 5.28 που απεικονίζουν την επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας, για τα δοκίμια διαμέτρου 100mm και 150mm ξεχωριστά.

Από το σχήμα 5.27 προκύπτει ότι το μέτρο δυσκαμψίας παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του για τη γωνία περιστροφής των $1,16^\circ$, ενώ για τις γωνίες των $0,82^\circ$ και των $1,45^\circ$ εμφανίζει συγκριτικά υψηλότερες τιμές, κάτι το οποίο ισχύει και για τις δύο τιμές που λαμβάνει η θερμοκρασία συμπίκνωσης. Ακόμη, παρατηρείται ότι, η διαφοροποίηση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας λόγω της επίδρασης της μεταβολής της γωνίας περιστροφής είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης των 150°C .



Σχήμα 5.27. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M2 διαμέτρου 100mm

Το σχήμα 5.28 απεικονίζει την επίδραση των μεταβολών της εσωτερικής γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας, για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης με αρχική διάμετρο 150mm. Το μέτρο δυσκαμψίας παρουσιάζει εδώ μία εντελώς διαφορετική εικόνα σε σχέση με τα δοκίμια διαμέτρου 100mm. Όπως είναι φανερό, σημειώνει τη μέγιστη τιμή του για τη γωνία περιστροφής των 1,16°, ενώ για τις γωνίες των 0,82° και των 1,45° λαμβάνει τιμές αρκετά χαμηλότερες. Το παραπάνω επαληθεύεται και για τις δύο τιμές της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, με φανερή διαφορά, ωστόσο, μεταξύ τους όσον αφορά στη διαφοροποίηση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας λόγω της επίδρασης της μεταβολής της γωνίας, η οποία προκύπτει πολύ μεγαλύτερη για τη θερμοκρασία των 135°C. Τέλος, παρατηρείται ότι για αύξηση της θερμοκρασίας από τους 135°C στους 150°C, το μέτρο δυσκαμψίας υφίσταται μείωση και για τις τρεις τιμές της εσωτερικής γωνίας, με τη μικρότερη απ' όλες να σημειώνεται για την εσωτερική γωνία περιστροφής με τιμή 1,16°.



Σχήμα 5.28. Γραφική απεικόνιση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας για τα γυροσκοπικά δοκίμια μίγματος M2 διαμέτρου 150mm

Επιπλέον, από τη συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών διαφορετικών διαμέτρων, αποφαίνεται ότι η διαφοροποίηση των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας λόγω της επίδρασης της μεταβολής της γωνίας περιστροφής είναι μεγαλύτερη για τα δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης με διάμετρο 100mm.

5.3.2 Εργαστηριακά δοκίμια συμπύκνωσης Marshall

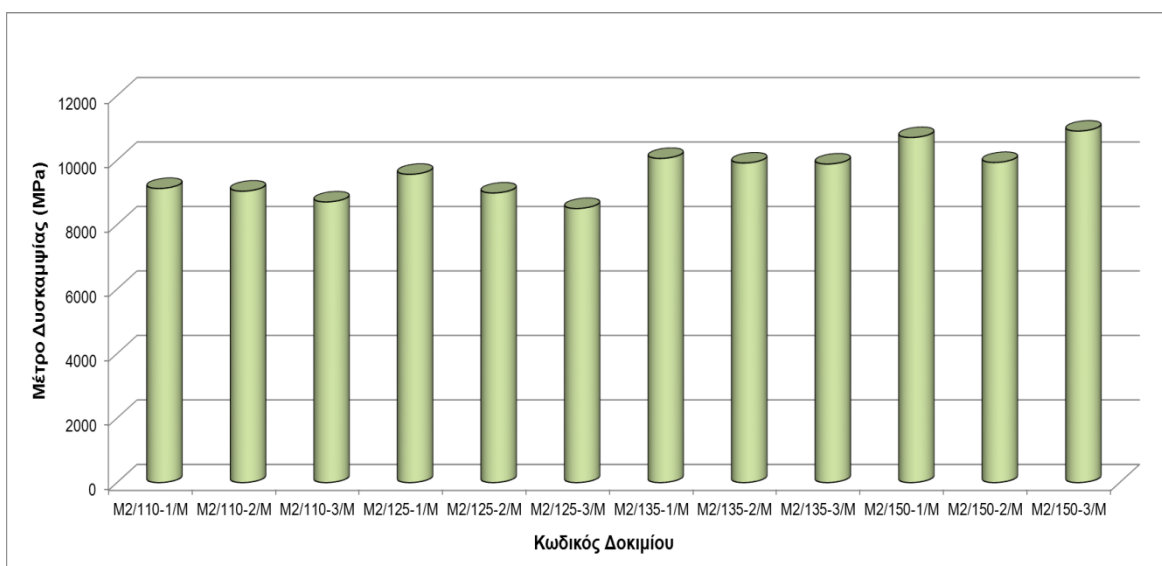
Ο πίνακας 5.21 περιλαμβάνει αντίστοιχα τα αποτελέσματα του μέτρου δυσκαμψίας των 12 συμπυκνωμένων με τη μέθοδο Marshall δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2 για κάθε μία από τις 4 διαμέτρους χάραξης (S_{m1} , S_{m2} , S_{m3} , S_{m4} αντίστοιχα), καθώς και τους μέσους όρους αυτών ανά 2 ($S_{m1,2}$, $S_{m3,4}$) και τον γενικό μέσο όρο των ανωτέρω (S_m), μέσω των σχέσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως (5.1, 5.2, 5.3).

Πίνακας 5.21. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών Marshall μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	$S_{m1}/20^\circ$ C (MPa)	$S_{m2}/20^\circ$ C (MPa)	$S_{m1,2}/20^\circ$ C (MPa)	$S_{m3}/20^\circ$ C (MPa)	$S_{m4}/20^\circ$ C (MPa)	$S_{m3,4}/20^\circ$ C (MPa)	$S_m /20^\circ$ C (MPa)
M2/110-1/M	9447	8476	8962	9537	9026	9282	9122
M2/110-2/M	9350	8440	8895	9049	9317	9183	9039
M2/110-3/M	8582	7850	8216	9286	9099	9193	8705
M2/125-1/M	9816	8990	9403	10200	9239	9720	9562
M2/125-2/M	9667	8660	9164	8959	8640	8800	8982
M2/125-3/M	8514	7789	8152	9226	8472	8849	8501
M2/135-1/M	10377	9626	10002	10384	9825	10105	10054
M2/135-2/M	9784	9288	9536	10741	9834	10288	9912
M2/135-3/M	9711	8797	9254	11071	9941	10506	9880
M2/150-1/M	10489	9912	10201	11389	11019	11204	10703
M2/150-2/M	10383	9565	9974	10042	9726	9884	9929
M2/150-3/M	11366	10043	10705	11397	10802	11100	10903

Από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας $S_{m1,2}$ και $S_{m3,4}$, καθώς και του γενικού μέσου όρου των μέτρων δυσκαμψίας S_m αποδείχθηκε ότι η μικρότερη τυπική απόκλιση σημειώθηκε για τις 4 διαμέτρους δοκιμής.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, ο γενικός μέσος όρος S_m αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας, εξασφαλίζοντας τη μεγαλύτερη ακρίβεια για το σύνολο των μετρήσεων κάθε δοκιμής. Στη συνέχεια, παρατίθεται το σχήμα 5.29, το οποίο απεικονίζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων από τις δοκιμές του μέτρου δυσκαμψίας στα δοκίμια του μίγματος M2 που συμπυκνώθηκαν ακολουθώντας την κρουστική μέθοδο Marshall.

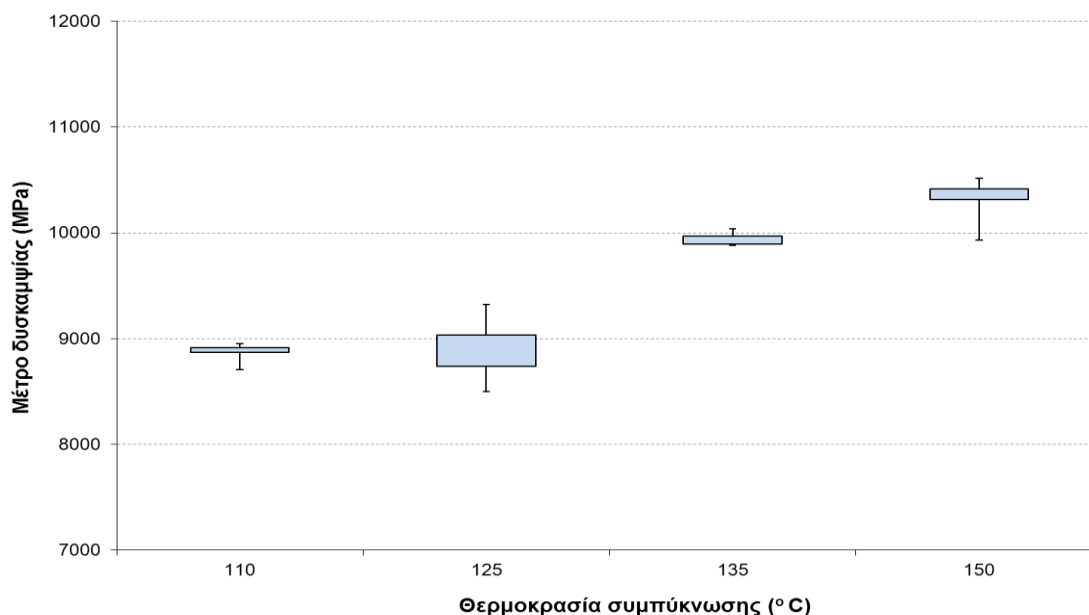


Σχήμα 5.29. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων μεθόδου Marshall μίγματος M2

5.3.2.1 Επίδραση της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας κατά Marshall

Η θερμοκρασία συμπίκνωσης αποτελεί τον βασικό παράγοντα της μεθόδου συμπίκνωσης κατά Marshall που επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας.

Για την πιο εξειδικευμένη μελέτη της επίδρασης αυτής, δημιουργήθηκε το θηκόγραμμα του σχήματος 5.30, που περιλαμβάνει το σύνολο των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας για κάθε μία από τις τέσσερις θερμοκρασίες συμπίκνωσης που μελετώνται : 110°C, 125°C, 135°C και 150°C.



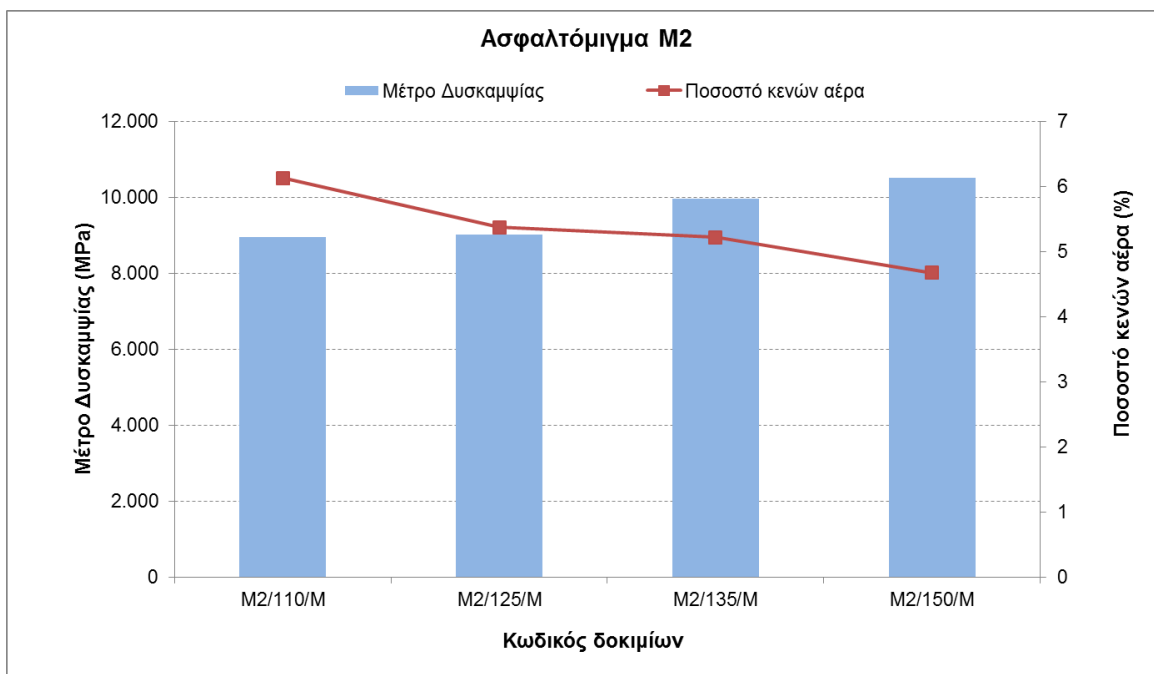
Σχήμα 5.30. Μέτρα δυσκαμψίας δοκιμών Marshall μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης

Από αυτό, παρατηρείται ότι, με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, το μέτρο δυσκαμψίας ακολουθεί ανοδική πορεία, καθώς για κάθε ξεχωριστή αύξηση της θερμοκρασίας, σημειώνεται αύξηση και στο μέγεθος του μέτρου. Ακόμη, όπως φαίνεται από το σχήμα, η μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές του μέτρου πραγματοποιείται για τα δοκίμια με θερμοκρασία συμπίκνωσης στους 125°C, ενώ για τα δοκίμια των άλλων θερμοκρασιών οι αριθμητικές τιμές του μέτρου παρουσιάζουν μικρή διαφορά μεταξύ τους.

5.3.2.2 Επίδραση του ποσοστού κενών αέρα στο μέτρο δυσκαμψίας κατά Marshall

Ένας ακόμη παράγοντας ο οποίος φαίνεται να επηρεάζει το μέτρο δυσκαμψίας που προσδιορίζεται σε δοκίμια συμπυκνωμένα σύμφωνα με τη μέθοδο Marshall είναι και η μεταβολή του ποσοστού κενών για κάθε εξεταζόμενο δείγμα.

Στο γράφημα του σχήματος 5.31 απεικονίζεται η μεταβολή του ποσοστού κενών σε σχέση με το μέτρο δυσκαμψίας για το σύνολο των δοκιμών Marshall, για κάθε θερμοκρασία συμπίκνωσης ξεχωριστά.



Σχήμα 5.31. Ποσοστά κενών αέρος και μέτρα δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η σχέση που συνδέει το μέγεθος του ποσοστού κενών με αυτό του μέτρου δυσκαμψίας είναι αντίστροφη, καθώς ενόσω αυξάνεται το ποσοστό των κενών στη μάζα των δοκιμίων, το μέτρο δυσκαμψίας τους μειώνεται. Δηλαδή, σε μικρότερο ποσοστό κενών, το οποίο σημειώνεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες συμπίκνωσης, αντιστοιχεί μεγαλύτερη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας.

5.3.3 Πυρήνες οδοστρώματος

Για το μίγμα M2, όπως έγινε και για το μίγμα M1, εξετάζονται, εκτός από εργαστηριακά δείγματα εργαστηριακής συμπίκνωσης, ακόμη 7 πυρήνες οδοστρώματος.

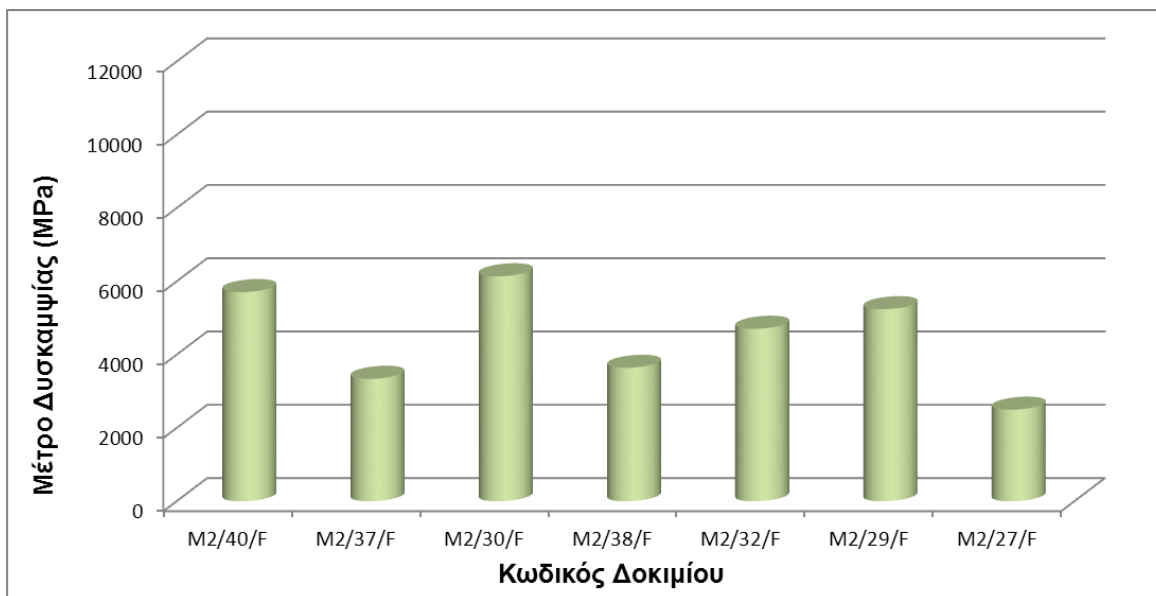
Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμίων πεδίου του ασφαλτομίγματος M2. Συγκεκριμένα, ο πίνακας 5.22 απεικονίζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του μέτρου δυσκαμψίας των πυρήνων για κάθε μία από τις 4 διαμέτρους χάραξης (Sm_1 , Sm_2 , Sm_3 , Sm_4 αντίστοιχα), καθώς επίσης και τους μέσους όρους αυτών ανά 2 ($Sm_{1,2}$, $Sm_{3,4}$) και τον γενικό μέσο όρο των ανωτέρω (Sm), μέσω των ήδη γνωστών σχέσεων (5.1, 5.2, 5.3).

Πίνακας 5.22. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	Sm1/ 20°C (MPa)	Sm2/ 20°C (MPa)	Sm1,2/ 20°C (MPa)	Sm3/ 20°C (MPa)	Sm4/ 20°C (MPa)	Sm3,4/ 20°C (MPa)	Sm /20°C (MPa)
M2/40/F	6099	5732	5916	5696	5303	5500	5708
M2/37/F	3155	3063	3109	3493	3656	3575	3342
M2/30/F	6368	5996	6182	6263	5928	6096	6139
M2/38/F	3774	3579	3677	3632	3578	3605	3641
M2/32/F	4815	5048	4932	4668	4296	4482	4707
M2/29/F	5233	5015	5124	5556	5158	5357	5241
M2/27/F	2548	2458	2503	2539	2450	2495	2499

Από τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης των μέσων όρων των μέτρων δυσκαμψίας Sm_{1,2} και Sm_{3,4}, καθώς και του γενικού μέσου όρου των μέτρων δυσκαμψίας Sm, αποδείχθηκε ότι η τυπική απόκλιση σημείωσε μικρότερη τιμή για τις 4 διαμέτρους δοκιμής.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, ο γενικός μέσος όρος Sm αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική και αξιόπιστη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας για τις 4 συνολικά μετρήσεις κάθε δοκιμής. Στη συνέχεια, παρατίθεται το σχήμα 5.32 που απεικονίζει τα αποτελέσματα των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου.



Σχήμα 5.32. Μέτρα δυσκαμψίας πυρήνων μίγματος M2

5.3.4 Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος

5.3.4.1 Δοκίμια γυροσκοπικής συμπίκνωσης και πυρήνες

Με στόχο τη σύγκριση του μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής συμπίκνωσης και των πυρήνων, εφαρμόστηκε, σε πρώτη φάση, κατάλληλος στατιστικός έλεγχος (t- test) προκειμένου να διαπιστωθεί αν το ποσοστό κενών των δύο ομάδων δοκιμών είναι παρόμοιο. Τα αποτελέσματα του ελέγχου t με υποτιθέμενες άνισες διακυμάνσεις του μέσου ποσοστού κενών των πυρήνων και των γυροσκοπικών δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 5.23.

Πίνακας 5.23. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ του συνόλου των γυροσκοπικών δοκιμών και των πυρήνων του μίγματος M2

Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) συνόλου γυροσκοπικών δοκιμών	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,198333333	5,3
Διακύμανση	0,234960606	2,493333333
Μέγεθος δείγματος	12	7
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	7	
t	-1,797168725	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,057680728	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,894578605	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,115361455	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,364624252	

Ο έλεγχος αυτός οδήγησε σε $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t)$ δίπλευρη $> \alpha$, το οποίο α λαμβάνει την τιμή 0,05, εφόσον το επίπεδο εμπιστοσύνης κυμαίνεται στο 95%. Το παραπάνω δείχνει ότι τα ποσοστά κενών αέρος των δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης και τα αντίστοιχα ποσοστά των δοκιμών πεδίου δεν έχουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους.

Στον πίνακα 5.24 παρατίθενται τα αποτελέσματα αντίστοιχου ελέγχου, ο οποίος εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της διαφοροποίησης του ποσοστού κενών μεταξύ των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών με διάμετρο 100mm και των δοκιμών πεδίου.

Πίνακας 5.24. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 100mm και των πυρήνων του μίγματος M2

Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 100mm	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,22	5,3
Διακύμανση	0,20828	2,493333333
Μέγεθος δείγματος	6	7
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	7	
t	-1,727383648	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,063867997	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,894578605	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,127735993	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,364624252	

Οι υπολογισμοί των μεγεθών του ανωτέρω ελέγχου συγκλίνουν με αυτούς του αμέσως προηγούμενου, αφού και εδώ $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t)$ δίπλευρη $> \alpha$ για τιμή 0,05. Άρα, δεν υπάρχει σημαντικά στατιστική διαφοροποίηση για την κατανομή των κενών αέρος ανάμεσα στα δοκίμια γυροσκοπικής συμπύκνωσης με διάμετρο 100mm και στα δοκίμια πεδίου του μίγματος M2.

Τέλος, εφαρμόζεται ο έλεγχος t με υποτιθέμενες άνισες διακυμάνσεις του μέσου ποσοστού κενών των γυροσκοπικών δοκιμών με αρχική διάμετρο 150mm και των δοκιμών πεδίου (Πίνακας 5.25).

Πίνακας 5.25. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των γυροσκοπικών δοκιμών αρχικής διαμέτρου 150mm και των πυρήνων του μίγματος M2

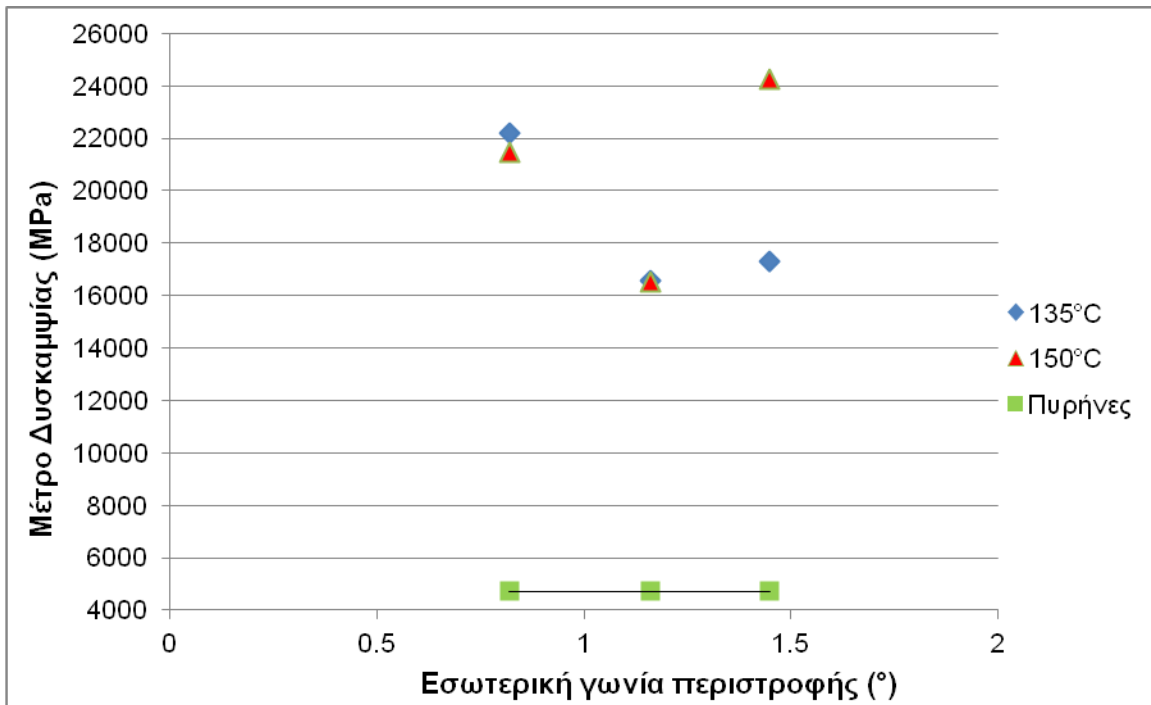
Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) γυροσκοπικών δοκιμών διαμέτρου 150mm	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	4,176666667	5,3
Διακύμανση	0,307506667	2,493333333
Μέγεθος δείγματος	6	7
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	8	
t	-1,759851281	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,058236588	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,859548038	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,116473175	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,306004135	

Και εδώ, ισχύει ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή $P(T \leq t) \text{ δίπλευρη} > \alpha$ με τιμή 0,05, γεγονός που δηλώνει συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του ελέγχου αυτού με εκείνα των δύο προηγούμενων ελέγχων. Άρα, για μία φορά ακόμα, η διαφορά που επικρατεί ανάμεσα στα ποσοστά κενών των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών με αρχική διάμετρο 150mm και των δοκιμών πεδίου δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική.

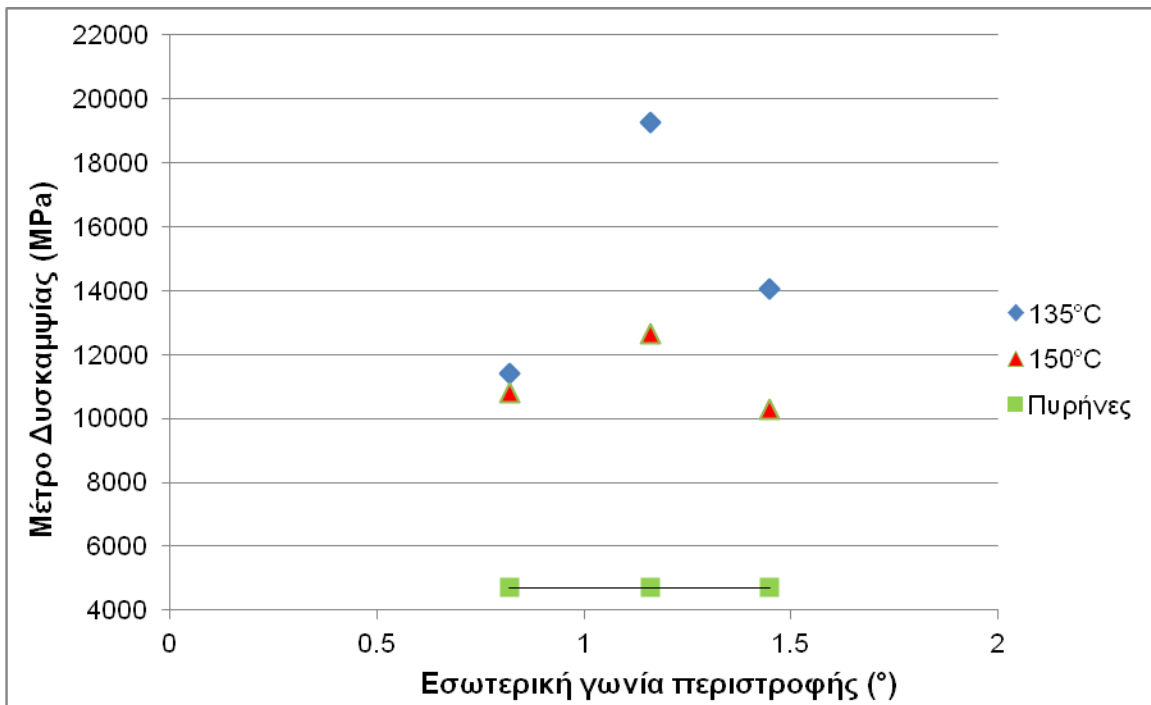
Για ακόμα μεγαλύτερη επιβεβαίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων, διενεργήθηκαν και έλεγχοι t του μέσου δύο δειγμάτων με υποτιθέμενες ίσες διακυμάνσεις για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν προηγουμένως και οι οποίοι οδήγησαν στα ίδια συμπεράσματα για τη μη αξιόλογη σημασία της διαφοράς των ποσοστών κενών μεταξύ των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών και των δοκιμών πεδίου.

Ακολουθούν τα σχήματα 5.33 - 5.34 και 5.35 – 5.36, στα οποία απεικονίζονται τα μέτρα δυσκαμψίας των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμών, για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100mm και 150mm αντίστοιχα. Στα σχήματα αποτυπώνεται με μια ευθεία γραμμή και η τιμή του διάμεσου των μέτρων δυσκαμψίας των πυρήνων, προκειμένου να αναδειχθεί στα πρώτα από αυτά η θερμοκρασία συμπύκνωσης και στα επόμενα η γωνία

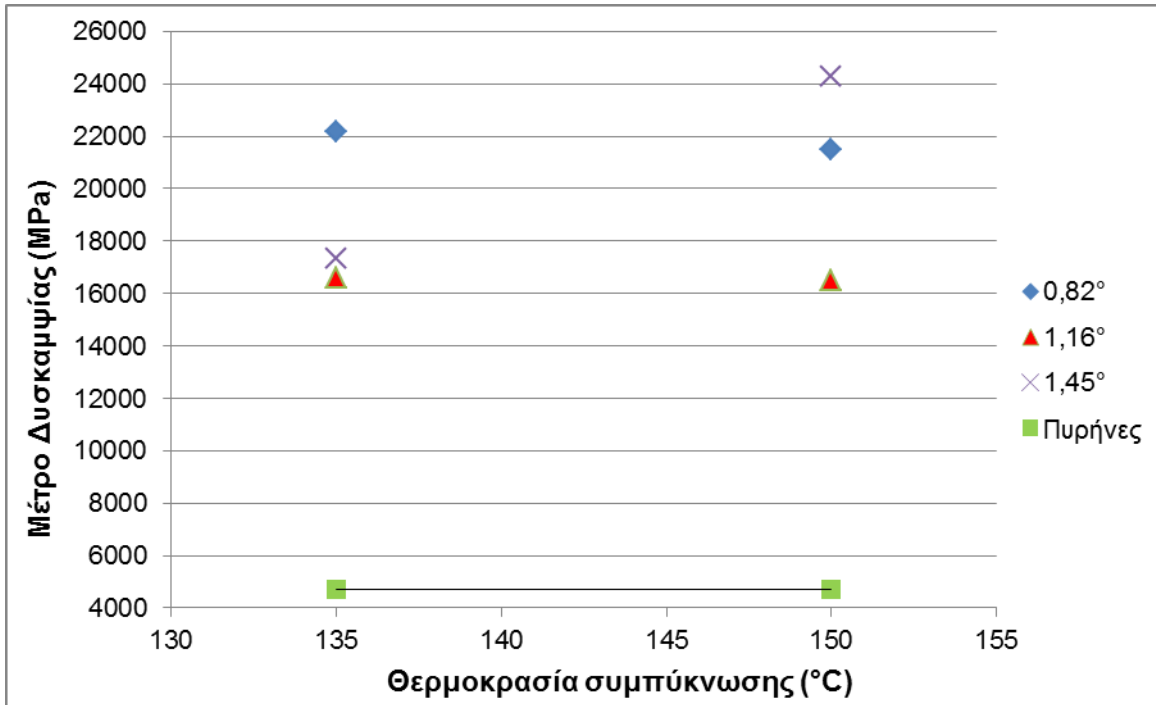
περιστροφής για τις οποίες το μέτρο δυσκαμψίας της γυροσκοπικής συμπίκνωσης προσεγγίζει αυτό των επιτόπου συνθηκών.



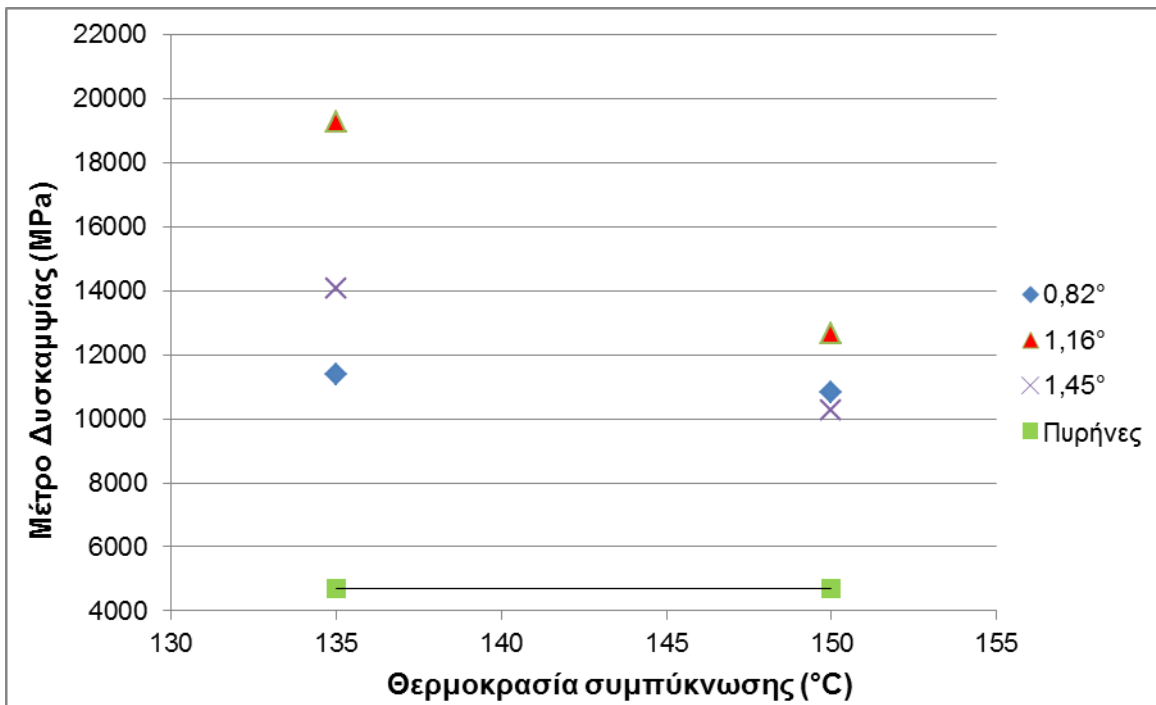
Σχήμα 5.33. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπτυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης



Σχήμα 5.34. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπτυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης



Σχήμα 5.35. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 100mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 5.36. Μέτρο δυσκαμψίας γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων διαμέτρου 150mm και πυρήνων μίγματος M2 ανά θερμοκρασία συμπίκνωσης

Από τα γραφήματα των σχημάτων αυτών, παρατηρείται ότι οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των γυροσκοπικά συμπυκνωμένων δοκιμίων με διάμετρο 100mm πλησιάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό το αντίστοιχο μέτρο των πυρήνων για την εσωτερική γωνία περιστροφής των $1,16^\circ$ και για τις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες συμπίκνωσης. Αντίθετα, για τα γυροσκοπικά δοκίμια με αρχική διάμετρο 150mm, οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας τους προσεγγίζουν περισσότερο το αντίστοιχο μέτρο της επιτόπου συμπίκνωσης για το συνδυασμό γωνίας περιστροφής τιμής $1,45^\circ$ και θερμοκρασίας συμπίκνωσης τιμής 150°C .

Στο πλαίσιο της συσχέτισης των μέτρων δυσκαμψίας που προσδιορίστηκαν για τα δοκίμια που έχουν υποστεί γυροσκοπική συμπίκνωση με αυτά των δοκιμίων πεδίου, εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για το μίγμα M1, δηλαδή:

Στην αρχή, προσδιορίστηκε ο λόγος k_2 των μέτρων δυσκαμψίας από το πηλίκο των διαμέσων που υπολογίστηκαν προηγουμένως, για τα δοκίμια των δύο διαφορετικών μεθόδων συμπίκνωσης. Για τη συσχέτιση των μέτρων δυσκαμψίας εργαστηριακών δοκιμίων και πυρήνων επελέγη ο διάμεσος ως ένα χαρακτηριστικό στατιστικό μέγεθος.

$K_2 = \frac{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης μίγματος M2}}{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων πεδίου μίγματος M2}}$

Πιο αναλυτικά, υπολογίζεται ο λόγος ξεχωριστά για τις 3 διαφορετικές τιμές που λαμβάνει η εσωτερική γωνία περιστροφής, δηλαδή:

$$Sm_{\text{Gyro, M2}}(0,82^\circ) = 3,49 \times Sm_{\text{Field, M2}} \quad [5.8]$$

$$Sm_{\text{Gyro, M2}}(1,16^\circ) = 3,51 \times Sm_{\text{Field, M2}} \quad [5.9]$$

$$Sm_{\text{Gyro M2}}(1,45^\circ) = 3,33 \times Sm_{\text{Field, M2}} \quad [5.10]$$

όπου:

$Sm_{\text{Gyro, M2}}(i)$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης του μίγματος M2 με εσωτερική γωνία $i = [0,82, 1,16, 1,45]^\circ$

Κατόπιν, υπολογίστηκαν ο μέσος όρος και ο συντελεστής μεταβλητότητας του μέτρου δυσκαμψίας, τόσο για τα εργαστηριακά δοκίμια όσο και για τους πυρήνες.

Στον πίνακα 5.25 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων μεγεθών των μέτρων δυσκαμψίας, καθώς και οι τιμές του διάμεσου που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, για τα διαφορετικής μεθόδου συμπύκνωσης δοκίμια.

Πίνακας 5.25. Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής και επιτόπου συμπύκνωσης (πυρήνων) μίγματος M2

Δοκίμια	Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας (MPa)			
	Μέσος όρος	Διάμεσος	Συντελεστής μεταβλητότητας	Λόγος
Γυροσκοπικής συμπύκνωσης	16.397	16.542	0,083	3,5
Επιτόπου συμπύκνωσης (πυρήνες)	4.468	4.707	0,114	

Συνεπώς, μπορεί να διατυπωθεί η ακόλουθη σχέση για τα μέτρα δυσκαμψίας των δύο δοκιμών διαφορετικής μεθόδου συμπύκνωσης του μίγματος M2:

$$Sm_{Gyro, M2} = 3,5 \times Sm_{Field, M2} \quad [5.11]$$

όπου:

$Sm_{Gyro, M2}$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης του μίγματος M2

$Sm_{Field, M2}$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου του μίγματος M2

5.3.4.2 Δοκίμια συμπύκνωσης Marshall και δοκίμια πεδίου

Προς την κατεύθυνση της σύγκρισης του μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών που έχουν συμπυκνωθεί με την κρουστική μέθοδο κατά Marshall και των δοκιμών εκείνων που έχουν ληφθεί από το έδαφος, πραγματοποιήθηκε ο ίδιος στατιστικός έλεγχος για την αξιολόγηση της διαφοροποίησης του ποσοστού κενών μεταξύ των δύο κατηγοριών δοκιμών. Πιο αναλυτικά, παρατίθενται στον πίνακα 5.26 τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test με υποτιθέμενες άνισες διακυμάνσεις του μέσου ποσοστού κενών των δοκιμών πεδίου και των δοκιμών Marshall του μίγματος M2.

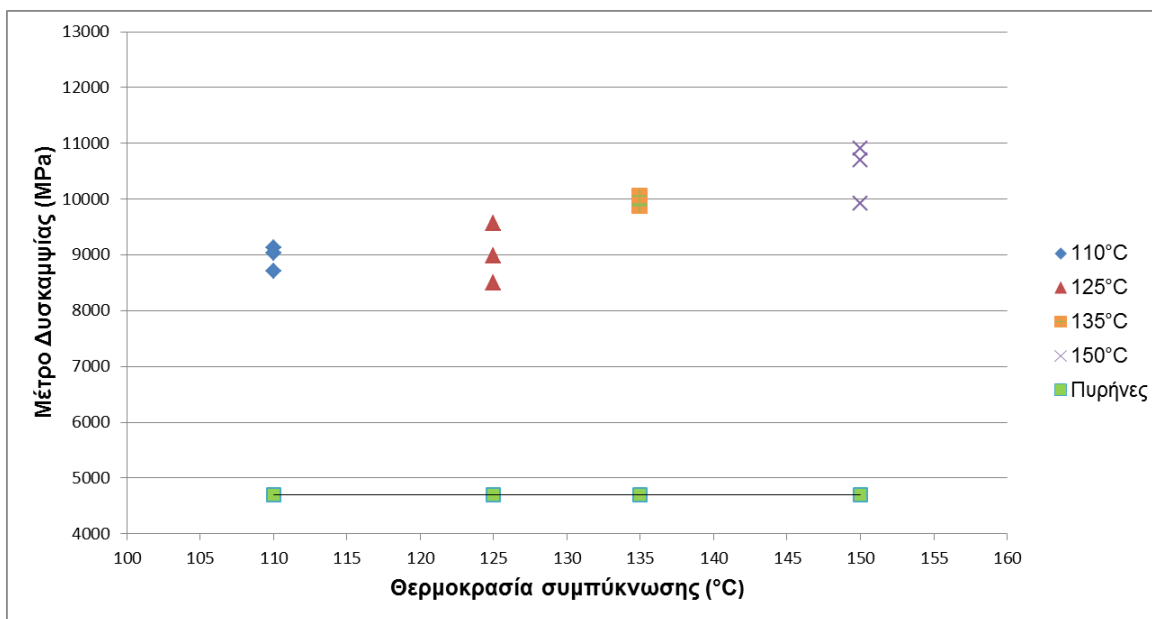
Πίνακας 5.26. Έλεγχος t για το ποσοστό κενών μεταξύ των δοκιμών Marshall και των πυρήνων του μίγματος M2

Στατιστικά στοιχεία	Ποσοστό κενών (%) δοκιμών Marshall	Ποσοστό κενών (%) πυρήνων
Μέσος	5,346464406	5,3
Διακύμανση	0,308940193	2,493333333
Μέγεθος δείγματος	12	7
Υποτιθέμενη διαφορά	0	
βαθμοί ελευθερίας	7	
t	0,075183992	
P (T ≤ t) μονόπλευρη	0,471085933	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,894578605	
P (T ≤ t) δίπλευρη	0,942171866	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,364624252	

Από τον παραπάνω έλεγχο προέκυψε ότι $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$, ή αλλιώς $P(T \leq t)$ δίπλευρη $> \alpha$ με τιμή 0,05 για επίπεδο σημαντικότητας 95%, το οποίο φανερώνει στατιστικά ασήμαντη διαφορά ανάμεσα στα ποσοστά κενών αέρος των δοκιμών Marshall και των δοκιμών πεδίου του μίγματος M2.

Πέρα από τον έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων με υποτιθέμενες άνισες διακυμάνσεις, εφαρμόστηκε και αντίστοιχος έλεγχος με ίσες διακυμάνσεις που οδήγησε στα ίδια αποτελέσματα ως προς τη μεταβολή του ποσοστού κενών μεταξύ των δοκιμών Marshall και των δοκιμών πεδίου.

Παρακάτω δίνεται το σχήμα 5.37, στο οποίο σημειώνονται τα μέτρα δυσκαμψίας όλων των συμπυκνωμένων δοκιμών κατά Marshall, για κάθε θερμοκρασία συμπύκνωσης που εξετάζεται. Επίσης, αποτυπώνεται με μια ευθεία γραμμή και η τιμή του διάμεσου του μέτρου δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου, προκειμένου να ευρεθεί η τιμή της θερμοκρασίας εκείνης για την οποία η εργαστηριακή συμπύκνωση κατά Marshall προσεγγίζει περισσότερο τις επιτόπου συνθήκες.



Σχήμα 5.37. Μέτρο δυσκαμψίας δοκιμίων Marshall και πυρήνων μίγματος M2

Είναι εμφανές από το γράφημα του παραπάνω σχήματος ότι οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των εργαστηριακά συμπυκνωμένων δοκιμίων με τη μέθοδο Marshall προσεγγίζει καλύτερα το μέτρο δυσκαμψίας των πυρήνων για θερμοκρασία συμπίκνωσης 110°C και 125°. Ωστόσο, για τις υψηλότερες θερμοκρασίες των 135°C και των 150°C, το μέτρο δυσκαμψίας κατά Marshall αυξάνεται αρκετά, συνεπώς αποκλίνει και από το μέτρο της επιτόπου συμπίκνωσης.

Ακολουθεί η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την επίτευξη της συσχέτισης των μέτρων δυσκαμψίας που προσδιορίστηκαν για τα δοκίμια που έχουν υποστεί κρουστική συμπίκνωση κατά Marshall και για τα δοκίμια πεδίου.

Σε πρώτη φάση, ορίστηκε ως λόγος k_3 των μέτρων δυσκαμψίας το πηλίκο των ανωτέρω διαμέσων. Για τη συσχέτιση των μέτρων δυσκαμψίας εργαστηριακών δοκιμίων και πυρήνων επελέγη ο διάμεσος ως ένα χαρακτηριστικό στατιστικό μέγεθος.

$$K_3 = \frac{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων συμπύκν. Marshall μίγματος M2}}{\text{διάμεσος μέτρων δυσκαμψίας δοκιμίων πεδίου μίγματος M2}}$$

Πιο αναλυτικά, υπολογίζεται ο λόγος ξεχωριστά για τις 4 διαφορετικές τιμές που λαμβάνει η θερμοκρασία συμπίκνωσης, δηλαδή:

$$S_m \text{ Marshall, M2 (110}^\circ\text{C)} = \mathbf{1,92} \times S_m \text{ Field, M2} \quad [5.12]$$

$$S_m \text{ Marshall, M2 (125}^\circ\text{C)} = \mathbf{1,91} \times S_m \text{ Field, M2} \quad [5.13]$$

$$S_m \text{ Marshall, M2 (135}^\circ\text{C)} = \mathbf{2,12} \times S_m \text{ Field, M2} \quad [5.14]$$

$$S_m \text{ Marshall, M2 (150}^\circ\text{C)} = \mathbf{2,27} \times S_m \text{ Field, M2} \quad [5.15]$$

όπου:

$S_m \text{ Marshall, M2 (i)}$ το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών κρουστικής συμπίκνωσης Marshall του μίγματος M2 με θερμοκρασία συμπίκνωσης $i = [110, 125, 135, 150]^\circ\text{C}$

Έπειτα, υπολογίστηκαν και εδώ ο μέσος όρος και ο συντελεστής μεταβλητότητας του μέτρου δυσκαμψίας, τόσο για τα εργαστηριακά δοκίμια όσο και για τους πυρήνες.

Στον πίνακα 5.27 που ακολουθεί στη συνέχεια, φαίνονται τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων μεγεθών των μέτρων δυσκαμψίας, καθώς και οι τιμές του διάμεσου που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, για τα διαφορετικού τύπου συμπίκνωσης δοκίμια του μίγματος M2.

Πίνακας 5.27. Αναλογία των μέτρων δυσκαμψίας των δοκιμών κρουστικής και επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνων) μίγματος M2

Δοκίμια	Στατιστικά στοιχεία μέτρου δυσκαμψίας (MPa)			
	Μέσος όρος	Διάμεσος	Συντελεστής μεταβλητότητας	Λόγος
Κρουστικής συμπίκνωσης	9.607	9.721	0,023	2,1
Επιτόπου συμπίκνωσης (πυρήνες)	4.468	4.707	0,114	

Εξάγεται, λοιπόν, η παρακάτω σχέση όσον αφορά στα μέτρα δυσκαμψίας των δοκιμών συμπίκνωσης Marshall και των πυρήνων του μίγματος M2:

$$S_m \text{ Marshall, M2} = \mathbf{2,1} \times S_m \text{ Field, M2} \quad [5.16]$$

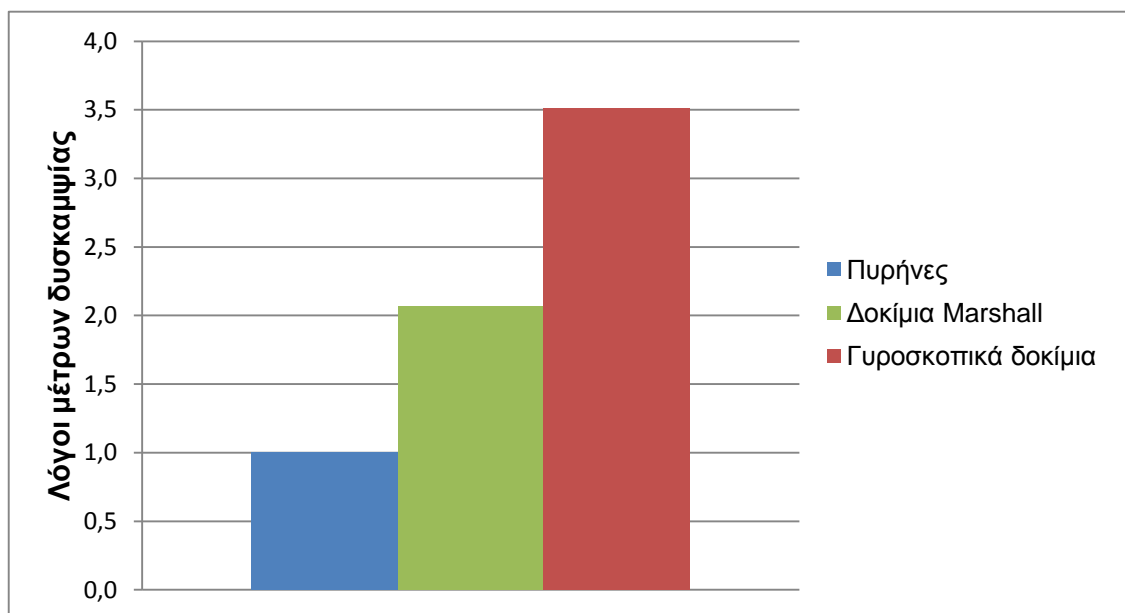
όπου:

S_m Marshall, M2 το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών κρουστικής συμπίκνωσης Marshall του μίγματος M2

S_m Field, M2 το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμών πεδίου του μίγματος M2

Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι το μέτρο δυσκαμψίας των εργαστηριακά συμπτυκνωμένων δοκιμών κατά την κρουστική μέθοδο Marshall είναι μεγαλύτερο, περίπου ίσο με το διπλάσιο, του αντίστοιχου μέτρου των δοκιμών πεδίου. Το γεγονός αυτό συμφωνεί σε γενικές γραμμές με τα ευρήματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε από τους Thenoux και Sandoval (2010), οι οποίοι όμως έχουν προσδιορίσει το λόγο μεταξύ εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων με τιμή 1,4.

Στο πλαίσιο της συγκριτικής αξιολόγησης της επίδρασης των εργαστηριακών μεθόδων συμπίκνωσης και της επιτόπου συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας, παρατίθεται το σχήμα 5.38 όπου φαίνονται οι αντιπροσωπευτικοί λόγοι των μέτρων δυσκαμψίας της γυροσκοπικής συμπίκνωσης και της κρουστικής συμπίκνωσης κατά Marshall σε σχέση με το αντίστοιχο μέγεθος της επιτόπου συμπίκνωσης, για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια του μίγματος M2.



Σχήμα 5.38. Γράφημα συσχέτισης γυροσκοπικών δοκιμών, δοκιμών Marshall και πυρήνων μίγματος M2

Από το σχήμα 5.38 παρατηρείται ότι η γυροσκοπική συμπίκνωση αποδίδει τις υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας, ακολουθεί η κρουστική συμπίκνωση Marshall ενώ το μέτρο δυσκαμψίας των επιτόπου συνθηκών φαίνεται να αποτελεί το μικρότερο μέγεθος όλων. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η κρουστική μέθοδος Marshall προσεγγίζει καλύτερα την επιτόπου συμπίκνωση. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τα αποτελέσματα παρόμοιας έρευνας, κατά την οποία βρέθηκε ότι το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων Marshall είναι μικρότερο των δοκιμίων γυροσκοπική συμπίκνωσης για γωνία περιστροφής $1,16^\circ$ (Hartman et al., 2001). Ωστόσο, έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα άλλης έρευνας που κατέδειξε ότι το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης με γωνία περιστροφής $1,16^\circ$ προσεγγίζει το μέτρο δυσκαμψίας δοκιμίων επιτόπου συμπίκνωσης (Khan et al., 1998).

6 ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων μεθόδων εργαστηριακής συμπίκνωσης στο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, καθώς επίσης και η διερεύνηση συσχετισμού εργαστηριακής και επιτόπου συμπίκνωσης. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας σε δοκίμια δύο ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης (τύπου A265), συμπτυκνωμένα με τη μέθοδο Marshall και τη γυροσκοπική μέθοδο για διάφορες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία συμπίκνωσης, η αρχική διάμετρος των δοκιμίων και η εσωτερική γωνία περιστροφής, καθώς επίσης και σε πυρήνες που ελήφθησαν από το πεδίο.

Από την ανάλυση και επεξεργασία των εργαστηριακών δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Από τη διεξαγωγή μετρήσεων κατά μήκος 4 διαφορετικών διαμέτρων σε κάθε δοκίμιο, είτε εργαστηριακό είτε πυρήνα, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων και διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει διακύμανση του μέτρου δυσκαμψίας στη μάζα των συμπτυκνωμένων δοκιμίων. Επίσης, μετά από συγκριτικό έλεγχο της τυπικής απόκλισης των μέτρων δυσκαμψίας μεταξύ των δοκιμών κατά μήκος 2 διαμέτρων, όπως ορίζει το ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 12697-26,2004), καθώς και κατά μήκος 4 διαμέτρων, βρέθηκε μειωμένη τυπική απόκλιση για την περίπτωση των 4 διαμετρικών δοκιμών. Ως εκ τούτου, προτείνεται η διεξαγωγή μετρήσεων κατά μήκος 4 διαφορετικών διαμέτρων, αφού με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από αντίστοιχη έρευνα (Pasetto and Baldo, 2006)

Σχετικά με τη γυροσκοπική συμπίκνωση, διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

- Για αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C προέκυψε γενικά μείωση του μέτρου δυσκαμψίας, με τη μικρότερη μεταβολή να σημειώνεται για το συνδυασμό εσωτερικής γωνίας 1,16° και αρχικής διαμέτρου 100mm.
- Για αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από 0,82° σε 1,16°, δηλαδή τις τιμές που συνιστούν η ευρωπαϊκή και η αμερικάνικη προδιαγραφή αντίστοιχα, το μέτρο δυσκαμψίας παρουσίασε μικρή αύξηση, ενώ για περαιτέρω αύξηση της

γωνίας από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$ σημειώθηκε μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Σημειώνεται ότι οι μικρότερες μεταβολές του μέτρου δυσκαμψίας παρατηρήθηκαν για τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm, στα οποία πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία μέσω πυρηνοληψίας.

- Για αύξηση της αρχικής διαμέτρου των δοκιμίων από 100 mm σε 150 mm παρατηρήθηκε μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Επισημαίνεται ότι όλα τα δοκίμια που ελέγχθηκαν είχαν τελική διάμετρο 100mm, εφόσον στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150mm πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία.
- Το μέτρο δυσκαμψίας των γυροσκοπικών δοκιμίων βρέθηκε να επηρεάζεται περισσότερο από τη μεταβολή της αρχικής διαμέτρου. Ο επόμενος παράγοντας γυροσκοπικής συμπίκνωσης που φαίνεται να επηρέασε τη δυσκαμψία των μιγμάτων ήταν ο συνδυασμός αρχικής διαμέτρου και θερμοκρασίας, ενώ όσον αφορά στην εσωτερική γωνία περιστροφής βρέθηκε ότι έχει μικρή επίδραση στο μέτρο δυσκαμψίας.

Περί της κρουστικής συμπίκνωσης κατά Marshall, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης προκάλεσε αυξητική μεταβολή στο μέτρο δυσκαμψίας. Το παραπάνω ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης οδήγησε σε μειωμένο ποσοστό κενών αέρος, το οποίο βρέθηκε να επηρεάζει μονοσήμαντα το μέτρο δυσκαμψίας, δεδομένου ότι υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας παρατηρήθηκαν για μικρότερα ποσοστά κενών.

Με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση του μέτρου δυσκαμψίας εργαστηριακής και επιτόπου συμπίκνωσης, ελέγχθηκε η διαφορά μεταξύ του ποσοστού κενών αέρος των εργαστηριακών δοκιμίων και των πυρήνων, η οποία και κρίθηκε στατιστικά αμελητέα. Από τη διεξαγωγή της ανωτέρω σύγκρισης, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης απέδωσε υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας σε σχέση με τη μέθοδο συμπίκνωσης κατά Marshall. Συγκριτικά με τις εργαστηριακές μεθόδους συμπίκνωσης, μικρότερες τιμές προσδιορίστηκαν για τις συνθήκες επιτόπου συμπίκνωσης. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται από σχετικές έρευνες, οι οποίες έχουν δείξει ότι με χρήση της γυροσκοπικής μεθόδου συμπίκνωσης επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές του μέτρου δυσκαμψίας

συγκριτικά με τη συμπίκνωση Marshall και την επιτόπου συμπίκνωση (Hartman et al., 2001)

- Από το συσχετισμό κρουστικής συμπίκνωσης Marshall και επιτόπου συμπίκνωσης προσδιορίστηκε ο μέσος λόγος των μέτρων δυσκαμψίας των 2 μεθόδων, ο οποίος ισούται με 2.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι καλύτερη προσέγγιση των επιτόπου συνθηκών επετεύχθη για τη θερμοκρασία συμπίκνωσης των 125°C, κατά την οποία ο υπόψη λόγος ισούται με 1,9. Από τα αποτελέσματα αντίστοιχης έρευνας προέκυψε λόγος των μέτρων δυσκαμψίας κρουστικής και επιτόπου συμπίκνωσης της τάξης του 1,4 (Thenoux and Sandoval, 2011).
- Από το συσχετισμό γυροσκοπικής και επιτόπου συμπίκνωσης, ο λόγος των μέτρων δυσκαμψίας των 2 μεθόδων διαφοροποιήθηκε μεταξύ των 2 μίγμάτων, λαμβάνοντας τιμές της τάξης του 1,4 για το μίγμα M1 και τιμές της τάξης του 3,5 για το μίγμα M2. Επισημαίνεται ότι καλύτερη προσέγγιση των συνθηκών πεδίου επιτυγχάνεται για επιλογή συμπίκνωσης δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm, θερμοκρασία συμπίκνωσης 150°C και γωνία περιστροφής 1,45°, παρά το γεγονός ότι η μεταβολή της γωνίας δεν προκαλεί ιδιαίτερη διαφοροποίηση στις τιμές του μέτρου δυσκαμψίας. Τα παραπάνω έρχονται σε αντίθεση με τα ευρήματα παρόμοιας έρευνας, σύμφωνα με την οποία καλύτερη προσέγγιση των επιτόπου συνθηκών επιτυγχάνεται για γυροσκοπική γωνία περιστροφής 1,16° (Khan et al., 1998)

Συμπερασματικά, η κρουστική συμπίκνωση Marshall φαίνεται να αποτελεί την πιο κατάλληλη μέθοδο για την προσέγγιση των επιτόπου συνθηκών, αφού, όπως αποδείχθηκε, απέδωσε τιμές του μέτρου δυσκαμψίας πλησιέστερες στο μέτρο που προσδιορίστηκε για τις συνθήκες πεδίου.

Αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η μελέτη της εργαστηριακής μεθόδου συμπίκνωσης με κύλινδρο τύπου Roller με σκοπό να συγκριθεί με τις υπόλοιπες εργαστηριακές μεθόδους συμπίκνωσης, καθώς επίσης να αναδειχθούν οι συνθήκες για τις οποίες η εν λόγω μέθοδος προσεγγίζει τις επιτόπου συνθήκες. Προς αυτή την κατεύθυνση, η διερεύνηση θα μπορούσε να περιλαμβάνει διαφορετικού τύπου μίγματα (π.χ. ανοικτής σύνθεσης), καθώς και ποσοστά και τύπους ασφάλτου (π.χ. τροποποιημένης ασφάλτου).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λοΐζος, Α. (2012). Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα, Αθήνα.
- Λοΐζος, Α. (2012). Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων, Αθήνα.
- Al –Sugair F.H. and Almudaiheem J.A. (1992). Variations in measured resilient modulus asphalt mixes, *Journal of Materials in Civil Engineering Vol.4, No 4, pg. 343-352*.
- EN 12697-26 (2004). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness.
- Hartman A. M., Gilchrist M. D. and Walsh G. (2001). Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue, *Journal of Transportation Engineering, Vol.127, No 5, pg.370-378*.
- Jahromi G. S. and Khodaii A. (2009). Comparing factors affecting resilient modulus in asphalt mixtures, *Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering, Vol. 16, No 5, pg. 367-375*.
- Khan Z.A., Wahab H.I.A., Asi I. and Ramadhan R. (1998). Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction, *Construction and Building Materials, Vol. 12, Issue 6-7, pg. 373-384*.
- Loulizi A., Al-Qadi I.L., Lahouar S. and Freeman T.E. (2002). Measurement of vertical compressive stress pulse in flexible pavements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1816, pg. 125-136*.
- Pasetto M. and Baldo N. (2006). Critical Analysis of the EN 12697-26 Standard for the Determination of the Indirect Tensile Stiffness Modulus, *10th International Conference on Asphalt Pavements, August 12-17, Quebec, Canada*.
- Peterson R.L., Mahboub K.C., Anderson R.M., Masad E. and Tashman L. (2004). Comparing Superpave gyratory compactor data to field cores, *Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No 1, pg. 78-83*.

Robinette C.J., Breakah T. M., Williams R. C. and Bausano J. P. (2010). Evaluation of the Variability of $|E^*|$ with Field Procured Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, No 3, pg. 559-582.

Saleh M. and Ji S.J. (2006). Factors Affecting Resilient Modulus, *10th International Conference on Asphalt Pavements, August 12-17, Quebec, Canada*.

Tandon V., Bai X. and Nazarian S. (2006). Impact of specimen geometry on dynamic modulus measurement test setup, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.18, No 4, pg. 477-484

Thenoux G. Z. and Sandoval G. P. (2011). Stiffness Modulus Behavior In Hot Mix Asphalt, *Transportation Research Board, 90th Annual Meeting, January 23-27, Washington D.C.*

Wang J.N., Kennedy T.W. and McGennis R.B. (2000). Volumetric and mechanical performance properties of Superpave mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.12, No 3, pg. 238-244

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμίων γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος Μ1

Κωδικός δοκιμίου	Εσωτερική γωνία (°)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Θερμοκρ. Συμπύκν. (°C)	Ποσοστό κενών, νηg (%)
M1-10-5/EL/CC	0,82	150	58,31	134	4,8
M1-10-5/EL/C	0,82	100	42,36	133	3,7
M1-10-5/EH/CC	0,82	150	52,43	153	5,3
M1-10-5/EH/C	0,82	100	46,00	145	5,7
M1-10-5/UL/CC	1,16	150	48,99	138	4,4
M1-10-5/UL/C	1,16	100	50,84	138	5,2
M1-10-5/UH/CC	1,16	150	51,83	152	3,1
M1-10-5/UH/C	1,16	100	45,73	151	4,4
M1-10-5/GL/CC	1,45	150	50,74	139	3,1
M1-10-5/GL/C	1,45	100	53,74	139	3,7
M1-10-5/GH/CC	1,45	150	49,68	150	3,9
M1-10-5/GH/C	1,45	100	47,50	151	4,5

Παράμετροι συμπύκνωσης δοκιμών πεδίου μίγματος M1

Κωδικός δοκιμίου	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Ποσοστό κενών, νηg (%)
M1/17/F	94,57	43,84	7,0
M1/13/F	94,60	52,27	4,9
M1/14/F	94,52	48,03	3,1
M1/5/F	94,52	46,26	5,0
M1/15/F	94,61	46,40	3,8
M1/21/F	94,50	46,94	5,3
M1/1/F	94,39	51,35	5,3
M1/20/F	94,45	46,74	7,8
M1/12/F	94,68	48,64	4,9
M1/16/F	94,88	53,76	5,4

Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών γυροσκοπικής μεθόδου μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	Εσωτερική γωνία (°)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Θερμοκρ. Συμπύκν. (°C)	Ποσοστό κενών, νηg (%)
M2/10-5/EL/CC	0,82	150	47,95	135	4,1
M2/10-5/EL/C	0,82	100	43,48	135	3,6
M2/10-5/EH/CC	0,82	150	55,89	150	5,2
M2/10-5/EH/C	0,82	100	46,31	150	4,0
M2/10-5/UL/CC	1,16	150	60,45	135	3,8
M2/10-5/UL/C	1,16	100	53,21	135	4,7
M2/10-5/UH/CC	1,16	150	50,06	150	3,9
M2/10-5/UH/C	1,16	100	53,05	150	4,8
M2/10-5/GL/CC	1,45	150	46,2	135	3,8
M2/10-5/GL/C	1,45	100	49,31	135	4,2
M2/10-5/GH/CC	1,45	150	50,68	150	4,3
M2/10-5/GH/C	1,45	100	51,31	150	4,2

Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών Marshall μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Θερμοκρ. Συμπύκν. (°C)	Ποσοστό κενών, νηg (%)
M2/110-1/M	101,57	53,38	110	6,3
M2/110-2/M	101,63	53,24	110	6,0
M2/110-3/M	101,64	52,18	110	6,2
M2/125-1/M	101,71	51,87	125	5,3
M2/125-2/M	101,69	52,21	125	5,4
M2/125-3/M	101,67	52,27	125	5,4
M2/135-1/M	101,66	52,3	135	5,4
M2/135-2/M	101,64	51,97	135	5,2
M2/135-3/M	101,65	51,52	135	5,0
M2/150-1/M	101,64	52,09	150	4,7
M2/150-2/M	101,65	51,62	150	4,6
M2/150-3/M	101,68	51,41	150	4,7

Παράμετροι συμπύκνωσης δοκιμών πεδίου μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Ποσοστό κενών, vng (%)
M2/40/F	99,34	51,11	3,5
M2/37/F	99,13	45,63	5,7
M2/30/F	99,42	47,81	3,2
M2/38/F	99,52	49,92	6,4
M2/32/F	99,88	45,07	5,6
M2/29/F	100,00	52,89	5,0
M2/27/F	99,56	55,96	7,7