



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΥΦΑΝΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΜΑΡΤΙΟΣ, 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στον καθηγητή κ. Ανδρέα Λοΐζο οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης 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 ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον διπλωματούχο πολιτικό μηχανικό κ. Αθανάσιο Λεβέντη, για τη συμβολή του στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών.

Επίσης, ευχαριστώ για τη δυνατότητα που μου παραχωρήθηκε στην απρόσκοπτη εκτέλεση του πειραματικού σκέλους της εργασίας στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρά τις πολλές και μακροχρόνιες ερευνητικές προσπάθειες που διενεργήθηκαν μέχρι σήμερα, δεν έχει βρεθεί μέθοδος εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων που προσομοιάζει ακριβώς την εργοταξιακή συμπίκνωση. Έτσι το θέμα της εργαστηριακής συμπίκνωσης παραμένει επίκαιρο. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει στροφή από την παραδοσιακή μέθοδο εργαστηριακής συμπίκνωσης Marshall, σε πιο σύγχρονες μεθόδους, όπως η γυροσκοπική μέθοδος. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε εργαστηριακό πείραμα για τη συστηματική διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπίκνωση μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, όπως η εσωτερική γωνία περιστροφής, η θερμοκρασία συμπίκνωσης και οι διαστάσεις των δοκιμίων. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της κατανομής των κενών στη μάζα των συμπυκνωμένων δοκιμίων, καθώς και προσδιορισμός και αξιολόγηση των καμπυλών συμπίκνωσης δύο τύπων ασφαλτομιγμάτων. Μεταξύ άλλων διαπιστώθηκε διαφοροποίηση της συμπυκνωσιμότητας των μιγμάτων όταν μεταβάλλεται η γωνία περιστροφής, η οποία είναι πιο χαρακτηριστική κατά τη σύγκριση μεταξύ των γωνιών που συνιστούν η ευρωπαϊκή και η αμερικανική προδιαγραφή. Επίσης, οι διαστάσεις των δοκιμίων, μέσω του λόγου ύψους προς διάμετρο, βρέθηκε ότι επηρεάζουν σημαντικά τη συμπίκνωση.

ABSTRACT

In spite of the large number and of many years of the research efforts that have been accomplished until today, it has not accepted only one laboratory compaction method that simulates exactly the field asphalt compaction. In this way, the problem of laboratory compaction remains opportune. Previous years, it has been done a change from the traditional laboratory compaction method Marshall, to modern methods, like the gyratory method. Within this investigation, a laboratory experiment was accomplished to investigate various factors that affect on the laboratory compaction with gyratory method, like the internal angle, the compaction temperature and the specimens dimensions. Additionally, it was investigated the air voids distribution in the specimens mass and the determination of the compaction curves. Among results, it was found that there is a difference to mixtures compactability, between angles that European and American specifications constitute. Additionally, it was found that specimens dimensions, in terms of height to diameter ratio, affects significantly compaction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	12
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	13
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	14
2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	16
2.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ.....	16
2.2 ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ.....	16
2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΟ (ROLLER).....	17
2.3.1 Γενικά.....	17
2.3.2 Η γαλλική μέθοδος.....	17
2.3.3 Η γερμανική μέθοδος.....	18
2.4 ΆΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	19
2.4.1 Μέθοδος συμπίκνωσης με ζύμωση (Kneading).....	19
2.4.2 Μέθοδος συμπίκνωσης με δόνηση (Vibratory).....	20
2.5 ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	21
2.5.1 Αρχή της γυροσκοπικής μεθόδου.....	21
2.5.2 Η γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης του Τέζας.....	22
2.5.3 Οι γυροσκοπικές μέθοδοι του Σώματος του Μηχανικού των ΗΠΑ.....	22
2.5.4 Η γαλλική μέθοδος.....	23
2.5.5 Η μέθοδος SUPERPAVE.....	24
3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΣΤΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ.....	26
3.1 ΓΩΝΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	26
3.1.1 Συσκευές μέτρησης της εσωτερικής γωνίας περιστροφής.....	27
3.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ.....	33
3.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	33
3.3.1 Κατανομή των κενών στα δοκίμια.....	34
3.3.2 Πυρήνες από δοκίμια.....	35
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	37
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	37
4.2 ΤΥΠΟΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	38
4.3 ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ.....	42
4.4 ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	45
4.5 ΕΠΑΝΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	48
5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	51
5.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	51
5.2 ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ Μ1.....	53
5.2.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.....	53
5.2.2 Επεξεργασία στοιχείων εργαστηριακών δεδομένων.....	54
5.2.2.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμών.....	55
5.2.2.2 Γωνία περιστροφής.....	62
5.2.2.3 Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	67
5.2.2.4 Διαστάσεις των δοκιμών.....	72
5.2.2.5 Καμπύλες συμπίκνωσης.....	85
5.2.3 Στατιστική ανάλυση.....	91
5.2.3.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμών.....	91

5.2.3.2	Γωνία περιστροφής	93
5.2.3.3	Θερμοκρασία συμπίκνωσης	95
5.2.3.4	Διαστάσεις δοκιμίων	96
5.2.3.5	Καμπύλες συμπίκνωσης	100
5.3	ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ Μ2	102
5.3.1	<i>Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών</i>	<i>102</i>
5.3.2	<i>Επεξεργασία στοιχείων εργαστηριακών δεδομένων.....</i>	<i>103</i>
5.3.2.1	Μηχανική κατεργασία δοκιμίων	104
5.3.2.2	Γωνία περιστροφής	111
5.3.2.3	Θερμοκρασία συμπίκνωσης	116
5.3.2.4	Διαστάσεις δοκιμίων	122
5.3.2.5	Καμπύλες συμπίκνωσης	134
5.3.3	<i>Στατιστική ανάλυση.....</i>	<i>140</i>
5.3.3.1	Μηχανική κατεργασία δοκιμίων	140
5.3.3.2	Γωνία περιστροφής	142
5.3.3.3	Θερμοκρασία συμπίκνωσης	144
5.3.3.4	Διαστάσεις δοκιμίων	146
5.3.3.5	Καμπύλες συμπίκνωσης	149
6	ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	152
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	154

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Κρουστική συσκευή συμπίκνωσης Marshall	17
Σχήμα 2.2. Γαλλική συσκευή συμπίκνωσης με κύλινδρο	18
Σχήμα 2.3. Η γερμανική συσκευή τομέα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.	19
Σχήμα 2.4. Συσκευή συμπίκνωσης με ζύμωση της Καλιφόρνια	20
Σχήμα 2.5. Συσκευή συμπίκνωσης με δόνηση	21
Σχήμα 2.6. Αρχή λειτουργίας της γυροσκοπικής μεθόδου	22
Σχήμα 2.7. Γυροσκοπική συσκευή ελέγχου (GTM).....	23
Σχήμα 2.8. Συσκευή της γαλλικής μεθόδου γυροσκοπικής συμπίκνωσης	24
Σχήμα 2.9. Συσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης Superprave.....	25
Σχήμα 3.1. Εξωτερική γωνία (α) και εσωτερικές γωνίες κορυφής ($\delta\tau$) και βάσης ($\delta\beta$)	26
Σχήμα 3.2. Συσκευή τύπου DAVK.....	28
Σχήμα 3.3. Rapid - Angle Measurement (RAM) συσκευή.....	29
Σχήμα 3.4. Η έκκεντρη φόρτιση των δοκιμίων κατά τη συμπίκνωση.....	29
Σχήμα 3.5. Τα μεταλλικά δακτυλίδια επαφής της συσκευής RAM	30
Σχήμα 3.6. Συσκευή τύπου DAV/HMS.....	30
Σχήμα 3.7. Η συσκευή DAV/HMS μέτρησης γυροσκοπικής γωνίας του Ε.Μ.Π.	32
Σχήμα 3.8. Μέτρηση της γωνίας στη γυροσκοπική συσκευή του Ε.Μ.Π.	32
Σχήμα 3.9. Κατανομή των κενών στα δοκίμια (Thyagarajan et al. 2010).....	35
Σχήμα 4.1. Δοκίμιο διαμέτρου 150 mm ύψους 170mm, αντίστοιχοι πυρήνες διαμέτρου 100mm	37
Σχήμα 4.2. Συνολική εικόνα των 72 δοκιμίων της τελικής διερεύνησης	38
Σχήμα 4.3. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομιγμάτων M1 και M2	39
Σχήμα 4.4. Τετραμερισμός του δείγματος	39
Σχήμα 4.5. Δοκιμή προσδιορισμού μέγιστης πυκνότητας ασφαλτομίγματος	40
Σχήμα 4.6. Η γυροσκοπική συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. και οι μήτρες της	44
Σχήμα 4.7. Δοκιμή προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας – υγρή μέθοδος	46
Σχήμα 4.8. Ζύγιση δοκιμίου μετά το σκούπισμα της επιφάνειάς του	47
Σχήμα 5.1. Δοκίμιο διαμέτρου 150mm και ύψους 70mm και αντίστοιχοι πυρήνες	52
Σχήμα 5.2. Δοκίμιο διαμέτρου 100mm και ύψους 170mm και ίδιο δοκίμιο μετά την κοπή	52
Σχήμα 5.3. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	55
Σχήμα 5.4. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	56
Σχήμα 5.5. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	57
Σχήμα 5.6. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	58
Σχήμα 5.7. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	59
Σχήμα 5.8. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	60

Σχήμα 5.9. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	61
Σχήμα 5.10. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	62
Σχήμα 5.11. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	63
Σχήμα 5.12. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	63
Σχήμα 5.13. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	64
Σχήμα 5.14. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	64
Σχήμα 5.15. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	65
Σχήμα 5.16. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	65
Σχήμα 5.17. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	66
Σχήμα 5.18. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	66
Σχήμα 5.19. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 0,82 ⁰	67
Σχήμα 5.20. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας 0,82 ⁰	67
Σχήμα 5.21. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰	68
Σχήμα 5.22. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰	68
Σχήμα 5.23. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,16 ⁰	69
Σχήμα 5.24. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας 1,16 ⁰	69
Σχήμα 5.25. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰	70
Σχήμα 5.26. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰	70
Σχήμα 5.27. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,45 ⁰	71
Σχήμα 5.28. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας 1,45 ⁰	71
Σχήμα 5.29. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰	72
Σχήμα 5.30. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	73
Σχήμα 5.31. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	73
Σχήμα 5.32. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	74
Σχήμα 5.33. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	74
Σχήμα 5.34. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	75
Σχήμα 5.35. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	75
Σχήμα 5.36. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	76
Σχήμα 5.37. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	76
Σχήμα 5.38. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	77
Σχήμα 5.39. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	77
Σχήμα 5.40. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	78
Σχήμα 5.41. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	78
Σχήμα 5.42. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	79
Σχήμα 5.43. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	79
Σχήμα 5.44. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	80
Σχήμα 5.45. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	80
Σχήμα 5.46. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	81
Σχήμα 5.47. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	81
Σχήμα 5.48. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	82
Σχήμα 5.49. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	82
Σχήμα 5.50. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	83
Σχήμα 5.51. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	83
Σχήμα 5.52. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	84

Σχήμα 5.53. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	84
Σχήμα 5.54. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M1, γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	86
Σχήμα 5.55. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M1 γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.	88
Σχήμα 5.56. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M1, γωνίας 1,45 ⁰ , θερμοκρασίας 150 ⁰ C	90
Σχήμα 5.57. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	104
Σχήμα 5.58. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	105
Σχήμα 5.59. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	106
Σχήμα 5.60. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	107
Σχήμα 5.61. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	108
Σχήμα 5.62. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	109
Σχήμα 5.63. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135 ⁰ C.....	110
Σχήμα 5.64. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150 ⁰ C.....	111
Σχήμα 5.65. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	112
Σχήμα 5.66. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	112
Σχήμα 5.67. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	113
Σχήμα 5.68. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	113
Σχήμα 5.69. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	114
Σχήμα 5.70. Δοκίμιο διαμέτρου 100mm ύψους 178mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	114
Σχήμα 5.71. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135 ⁰ C	115
Σχήμα 5.72. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150 ⁰ C	115
Σχήμα 5.73. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 0,82 ⁰	116
Σχήμα 5.74. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας 0,82 ⁰	116
Σχήμα 5.75. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰	117
Σχήμα 5.76. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰	117
Σχήμα 5.77. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,16 ⁰	118
Σχήμα 5.78. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας 1,16 ⁰	118
Σχήμα 5.79. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰	119
Σχήμα 5.80. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰	119
Σχήμα 5.81. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,45 ⁰	120
Σχήμα 5.82. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας 1,45 ⁰	120
Σχήμα 5.83. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰	121
Σχήμα 5.84. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰	121
Σχήμα 5.85. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	122
Σχήμα 5.86. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	122
Σχήμα 5.87. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	123
Σχήμα 5.88. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	123
Σχήμα 5.89. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	124
Σχήμα 5.90. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	124

Σχήμα 5.91. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	125
Σχήμα 5.92. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	125
Σχήμα 5.93. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	126
Σχήμα 5.94. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	126
Σχήμα 5.95. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	127
Σχήμα 5.96. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	127
Σχήμα 5.97. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C ..	128
Σχήμα 5.98. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C ..	128
Σχήμα 5.99. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C ..	129
Σχήμα 5.100. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	129
Σχήμα 5.101. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C	130
Σχήμα 5.102. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	130
Σχήμα 5.103. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	131
Σχήμα 5.104. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	131
Σχήμα 5.105. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	132
Σχήμα 5.106. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	132
Σχήμα 5.107. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 135 ⁰ C.....	133
Σχήμα 5.108. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C.....	133
Σχήμα 5.109. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M2 γωνίας 0,82 ⁰ θερμοκρασίας 150 ⁰ C	135
Σχήμα 5.110. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M2, γωνίας 1,16 ⁰ , θερμοκρασίας 150 ⁰ C	137
Σχήμα 5.111. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμίων M2, γωνίας 1,45 ⁰ , θερμοκρασίας 150 ⁰ C	139

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Τιμές παραμέτρων και παραγόντων παραμετρικής διερεύνησης	13
Πίνακας 4.1. Διορθωτικός συντελεστής K για τη θερμοκρασία	41
Πίνακας 5.1. Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών μίγματος M1	53
Πίνακας 5.2. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 μετά από πυρηνοληψία και κοπή	54
Πίνακας 5.3. Επανυπολογισμός πυκνότητας για τα δοκίμια M1/15-17/EHN και M1/10-17/EHN	85
Πίνακας 5.4. Επανυπολογισμός πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/EHN και M1/10-7/EHN	86
Πίνακας 5.5. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-17/UHN και M1/10-17/UHN	87
Πίνακας 5.6. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/UHN και M1/10-7/UHN	88
Πίνακας 5.7. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-17/GHN και M1/10-17/GHN	89
Πίνακας 5.8. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/GHN και M1/10-7/GHN	90
Πίνακας 5.9. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 πριν και μετά πυρηνοληψία-κοπή	91
Πίνακας 5.10. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 πριν και μετά πυρηνοληψία-κοπή	92
Πίνακας 5.11. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά κοπή	92
Πίνακας 5.12. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά κοπή	93
Πίνακας 5.13. Φαινόμενες πυκνότητες δοκιμών M1 για αριθμό περιστροφών N=205 ..	93
Πίνακας 5.14. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για γωνίες $0,82^{\circ}$ και $1,16^{\circ}$	94
Πίνακας 5.15. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για γωνίες $1,16^{\circ}$ και $1,45^{\circ}$	94
Πίνακας 5.16. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 για μεταβολή της θερμοκρασίας	95
Πίνακας 5.17. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135° C και 150° C	96
Πίνακας 5.18. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 για μεταβολή του ύψους	97
Πίνακας 5.19. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για τα ύψη 170mm και 70mm	97
Πίνακας 5.20. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου	98
Πίνακας 5.21. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου	98
Πίνακας 5.22. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 ύψους 70mm για μεταβολή της διαμέτρου	99
Πίνακας 5.23. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 ύψους 70mm για μεταβολή της διαμέτρου	99
Πίνακας 5.24. Συντελεστές α και β και δείκτης R^2 αποτελεσμάτων επανυπολογισμού δοκιμών M1	100
Πίνακας 5.25. Συντελεστές α και β της $y = a \log x + \beta$, με αύξουσα σειρά του α ανά γωνία	101
Πίνακας 5.26. Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών μίγματος M2	102
Πίνακας 5.27. Ποσοστά κενών δοκιμών M2 μετά την πυρηνοληψία και την κοπή	103

Πίνακας 5.28. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/EHN και M2/10-17/EHN	134
Πίνακας 5.29. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-7/EHN και M2/10-7/EHN	135
Πίνακας 5.30. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/UHN και M2/10-17/UHN.....	136
Πίνακας 5.31. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-7/UHN και M2/10-7/UHN.....	137
Πίνακας 5.32. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/GHN και M2/10-17/GHN.....	138
Πίνακας 5.33. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας M2/15-7/GHN και M2/10-7/GHN.....	139
Πίνακας 5.34. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 διαμέτρου 150 mm, πριν και μετά την κοπή	140
Πίνακας 5.35. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 διαμέτρου 150 mm πριν και μετά την κοπή	141
Πίνακας 5.36. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά την κοπή	141
Πίνακας 5.37. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά την κοπή	142
Πίνακας 5.38. Φαινόμενες πυκνότητες δοκιμίων M2 θερμοκρ. 150 ⁰ C για N=205.....	143
Πίνακας 5.39. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για γωνίες 0,82 ⁰ και 1,16 ⁰	143
Πίνακας 5.40. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για γωνίες 1,16 ⁰ και 1,45 ⁰	144
Πίνακας 5.41. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 για μεταβολή της θερμοκρασίας	145
Πίνακας 5.42. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135 ⁰ C και 150 ⁰ C.....	145
Πίνακας 5.43. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 για μεταβολή του ύψους.....	146
Πίνακας 5.44. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για τα ύψη 170mm και 70mm	147
Πίνακας 5.45. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου	147
Πίνακας 5.46. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου	148
Πίνακας 5.47. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 ύψους 70 mm για μεταβολή της διαμέτρου	148
Πίνακας 5.48. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 ύψους 70 mm για μεταβολή διαμέτρου.	149
Πίνακας 5.49. Συντελεστές α και β και δείκτης R αποτελεσμάτων επανυπολογισμού δοκιμών M2	150
Πίνακας 5.50. Συντελεστές α και β της $y=alogx+\beta$, με αύξουσα σειρά για τον α, ανά γωνία	150

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η διαδικασία σύνθεσης και εργαστηριακής συμπίκνωσης των ασφαλτομιγμάτων γίνεται με σκοπό τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς τους. Επίσης, τα ασφαλτομίγματα σχεδιάζονται και συμπυκνώνονται σύμφωνα με παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους κατά την επιτόπου συμπίκνωση. Σε κάθε περίπτωση επιδιώκεται η μέθοδος συμπίκνωσης στο εργαστήριο να προσομοιάζει κατά το δυνατόν τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης. Προς αυτή την κατεύθυνση, σε βάθος χρόνου, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι εργαστηριακής συμπίκνωσης.

Για πολλές δεκαετίες, η πιο διαδεδομένη μέθοδος σχεδιασμού και συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων ήταν η μέθοδος Marshall, ενώ στις δυτικές Πολιτείες των Η.Π.Α. χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο του Hveem. Λίγο αργότερα εμφανίστηκε η γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης. Νεότερες έρευνες βελτίωσαν την υπόψη μέθοδο και παράλληλα αναπτύχθηκε η μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο. Οι νεότερες μέθοδοι φαίνεται ότι προσομοιάζουν καλύτερα τις επιτόπου συνθήκες σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο Marshall.

Παρόλο που οι εργαστηριακές μέθοδοι συμπίκνωσης διαφέρουν στην προετοιμασία των δοκιμίων, στο είδος (κρουστική, γυροσκοπική, με κύλινδρο κ.ά.) και στη διαδικασία συμπίκνωσης, τα αποτελέσματα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τις επιτόπου συνθήκες συμπίκνωσης. Οι μηχανικοί οδοστρωμάτων έχουν αναγνωρίσει εδώ και καιρό, ότι οι διαφορετικές μέθοδοι συμπίκνωσης παράγουν δοκίμια με διαφορετικές ιδιότητες. Ωστόσο μέχρι σήμερα δεν υπάρχει ομοφωνία ποια μέθοδος προσομοιάζει καλύτερα την επιτόπου συμπίκνωση και κατά συνέπεια το θέμα της εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων παραμένει επίκαιρο.

Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος γυροσκοπικής συμπίκνωσης χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο διεθνώς και πραγματοποιούνται συστηματικές ερευνητικές προσπάθειες για τη βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη της.

1.2 Αντικείμενο και μεθοδολογία

Παράμετροι οι οποίοι επηρεάζουν τη συμπύκνωση μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, είναι η γωνία περιστροφής, η εφαρμοζόμενη κατακόρυφη πίεση και ο αριθμός περιστροφών, μέσω των οποίων μεταβάλλεται η ενέργεια συμπύκνωσης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής της γωνίας περιστροφής, των διαστάσεων των δοκιμίων και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στην εργαστηριακή συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου συμπύκνωσης, αξιοποιώντας τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Παράλληλοι στόχοι είναι η διερεύνηση της κατανομής των κενών στη μάζα των συμπυκνωμένων δοκιμίων, μέσω της μηχανικής κατεργασίας (πυρηνοληψία μέσα από τα δοκίμια και κοπή στη βάση και στην κορυφή τους), καθώς και η διερεύνηση της συμπυκνωσιμότητας (ρυθμού συμπύκνωσης) όταν μεταβάλλονται οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπύκνωση.

Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπύκνωσης ασφαλικών δοκιμίων με τη γυροσκοπική μέθοδο, για δύο τύπους ασφαλτομιγμάτων, μεταβάλλοντας τις τιμές των προαναφερθέντων παραμέτρων.

Σημειώνεται ότι μεταβάλλοντας κάθε φορά την τιμή μιας παραμέτρου και παράλληλα διατηρώντας την τιμή των υπόλοιπων παραμέτρων σταθερή, είναι δυνατή η διερεύνηση της επιρροής της υπόψη παραμέτρου στη συμπύκνωση.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Τιμές παραμέτρων και παραγόντων παραμετρικής διερεύνησης

Παράμετρος	Τιμές
Εσωτερική γωνία περιστροφής ($^{\circ}$)	0.82, 1.16, 1.45
Θερμοκρασία συμπύκνωσης ($^{\circ}\text{C}$)	135, 150
Διάμετρος (mm)	100, 150
Ύψος (mm)	70, 170
Αριθμός περιστροφών	205

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τρεις τιμές για την εσωτερική γωνία περιστροφής, 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. Επίσης επιλέχθηκαν δύο θερμοκρασίες συμπίκνωσης, 135°C , η οποία θεωρείται μια τυπική θερμοκρασία, καθώς και μία υψηλότερη 150°C . Για τη διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων των δοκιμών στη συμπτικνωσιμότητα των μιγμάτων, επιλέχθηκαν οι διάμετροι των 100 mm και 150 mm και συμπίκνωση των δοκιμών μέχρι τελικού ύψους 70 mm και 170 mm. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία (αποκλειστικά στα δοκίμια διαμέτρου 150 mm) και κοπή κατά 10 mm της κορυφής και της βάσης των δοκιμών και των πυρήνων, για τη διερεύνηση της κατανομής των κενών στη μάζα των συμπυκνωμένων δοκιμών. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συμπίκνωση δοκιμών με συγκεκριμένη ενέργεια συμπίκνωσης (ίδιο αριθμό περιστροφών 205) ώστε να αξιολογηθεί η συμπτικνωσιμότητα των μιγμάτων κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης.

Μετά την ολοκλήρωση των εργαστηριακών δοκιμών, τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν και αναλύθηκαν με κατάλληλη στατιστική μέθοδο.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

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

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων δίνοντας έμφαση στη μέθοδο γυροσκοπικής συμπίκνωσης.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπίκνωση ασφαλτομιγμάτων μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, με αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., καθώς και οι προδιαγραφές των εκτελεσθέντων δοκιμών.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στο πλαίσιο του εργαστηριακού πειράματος, καθώς και η στατιστική επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο **έκτο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

2.1 Εξέλιξη των μεθόδων εργαστηριακής συμπίκνωσης

Στα τέλη της δεκαετίας του 1920 δημιουργήθηκε στις Η.Π.Α. η κρουστική μέθοδος εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων, καθώς και η μέθοδος συμπίκνωσης με ζύμωση (Kneading) από τον ερευνητή Hveem. Στα τέλη της δεκαετίας του 1930 δημιουργήθηκε στο Τέξας η γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης και εισήχθη στις Η.Π.Α. η συσκευή συμπίκνωσης Marshall, η οποία ακολουθεί την κρουστική μέθοδο και που καθιερώθηκε στη διάρκεια του Β' Π. Πολέμου. Από τα πρώτα χρόνια μετά το Β' Π. Πόλεμο και για πολλές δεκαετίες έγιναν προσπάθειες βελτίωσης της γυροσκοπικής μεθόδου συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, δημιουργήθηκε στη Γαλλία, η μέθοδος εργαστηριακής συμπίκνωσης με κύλινδρο και αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1960, αντίστοιχη με την αμερικάνικη, γαλλική τροποποιημένη γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων σε ασφαλοτάπητες με αυξημένους κυκλοφοριακούς φόρτους, χρηματοδοτήθηκε και αναπτύχθηκε από το 1987 έως το 1993, το διεθνές πρόγραμμα έρευνας Strategic Highway Research Program (SHRP), με κύριο στόχο, την εισήγηση νέων σύγχρονων μεθόδων σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων. Το πρόγραμμα SHRP αξιολόγησε τις υπάρχουσες μεθόδους συμπίκνωσης και εισηγήθηκε τη μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων SUPERPAVE, με εφαρμογή της γυροσκοπικής μεθόδου συμπίκνωσης (Superpave Gyratory Compactor: SGC).

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες μέθοδοι εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων.

2.2 Κρουστική μέθοδος συμπίκνωσης

Η πιο σημαντική κρουστική μέθοδος εργαστηριακής συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων είναι η μέθοδος Marshall. Η μέθοδος συμπίκνωσης Marshall, όπως και η ομώνυμη μέθοδος σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων εισήχθη από τον Bruce Marshall το 1939, ήταν αποτέλεσμα ερευνητικού προγράμματος της Πολιτείας Μισισιπή και υιοθετήθηκε από το Σώμα Μηχανικού των Η.Π.Α. στη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου και αργότερα στα έργα ανασυγκρότησης των υποδομών πολλών χωρών. Κατά τη μέθοδο αυτή, η ενέργεια συμπίκνωσης στο υπό συμπίκνωση δοκίμιο, προσδίδεται με κρούση από την

πτώση συγκεκριμένου βάρους από συγκεκριμένο ύψος (σχήμα 2.1). Οι μήτρες για την παρασκευή των δοκιμών είναι κυλινδρικές και μεταλλικές. Η συσκευή συμπίκνωσης Marshall, μαζί με ειδικές συσκευές προσδιορισμού ευστάθειας και παραμόρφωσης των δοκιμών, χρησιμοποιούνται στην ομώνυμη μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων, για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου σε συγκεκριμένης σύνθεσης αδρανή υλικά.



Σχήμα 2.1. Κρουστική συσκευή συμπίκνωσης Marshall

2.3 Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (roller)

2.3.1 Γενικά

Η μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο, συνίσταται σε συμπίκνωση: (α) μέσω πνευματικών (ελαστικών) τροχών (pneumatic tires), (β) μέσω ασάλινων κυλίνδρων (steel roller) και (γ) μέσω κυλιόμενων πλακών (sliding plates). Στην κατηγορία της μεθόδου ανήκει η γαλλική και η γερμανική μέθοδος. Η γαλλική μέθοδος βασίζεται στη συμπίκνωση μέσω ελαστικών τροχών, ενώ η γερμανική μέθοδος βασίζεται στη χρήση ασάλινου κυλίνδρου.

2.3.2 Η γαλλική μέθοδος

Η υπόψη μέθοδος βασίζεται στη συμπίκνωση μέσω ενός ελαστικού τροχού (συμπύκνωση πλάκας διαστάσεων 500x180mm- σχήμα 2.2) ή δύο ελαστικών τροχών

(συμπύκνωση πλάκας διαστάσεων 600x400mm) και προτάθηκε από το LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chausees) στη δεκαετία του 1950.



Σχήμα 2.2. Γαλλική συσκευή συμπίκνωσης με κύλινδρο

Ο τροχός έχει διάμετρο 400 mm και πάχος 80 mm, ενώ το φορτίο που μεταβιβάζεται στον τροχό κυμαίνεται από 1 KN έως 10 KN και μέσω του τροχού μεταβιβάζεται στο δοκίμιο πίεση από 0,1 MPa έως 0,6 MPa. Η ταχύτητα του τροχού κυμαίνεται από 200 mm/sec έως 500 mm/sec. Το δείγμα συμπυκνώνεται σε τρεις ζώνες, μπροστινή, μεσαία και πίσω. Αρχικά γίνεται προσυμπύκνωση με δύο διελεύσεις (passes) τροχού σε κάθε ζώνη. Η κύρια συμπίκνωση ξεκινά από την μπροστινή ζώνη, συνεχίζεται στην πίσω ζώνη και τέλος στη μεσαία ζώνη. Η επιλογή του φορτίου τροχού και του αριθμού διελεύσεων εξαρτάται από την πυκνότητα που επιδιώκεται.

2.3.3 Η γερμανική μέθοδος

Η υπόψη μέθοδος βασίζεται στη συμπίκνωση μέσω ενός ασάλινου τομέα ο οποίος έχει ακτίνα 550 mm και εξασκεί δύναμη από 0 KN έως 30 KN στο δοκίμιο (πλάκα). Η αντίστοιχη συσκευή (German roller sector compactor - σχήμα 2.3) διαθέτει την ικανότητα εκτέλεσης των όλων των απαιτούμενων για τη συμπίκνωση ενεργειών.



Σχήμα 2.3. Η γερμανική συσκευή τομέα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.

Ανάλογα με το ποσοστό κενών – στόχο και την εξασκούμενη δύναμη (rolling force), ο αριθμός των διελεύσεων (roller passes) κυμαίνεται από 10 έως 50. Γίνεται αργή συνεχής στροφή της μήτρας της πλάκας από αριστερά προς τα δεξιά, καθ' όλη τη διάρκεια της συμπίκνωσης.

2.4 Άλλες μέθοδοι συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων

2.4.1 Μέθοδος συμπίκνωσης με ζύμωση (Kneading)

Η μέθοδος εργαστηριακής συμπίκνωσης με ζύμωση (kneading) του ασφαλτομίγματος προτάθηκε από τον ερευνητή Francis Hveem, στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και εκτελείται με κατάλληλη συσκευή συμπίκνωσης (California Kneading Compactor: CKC). Η υπόψη συσκευή συμπίκνωσης, μαζί με τη συσκευή ελέγχου ευστάθειας (stability test) χρησιμοποιούνται στη μέθοδο σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων του Hveem. Η υπόψη μέθοδος σχεδιασμού ασφαλτομιγμάτων είχε υιοθετηθεί από τις δυτικές πολιτείες των Η.Π.Α. Η συσκευή CKC αποτελείται από ένα μηχανικό συμπυκνωτή μάζας, από μια υποδοχή μήτρας για κυλινδρικό δοκίμιο, από ένα θερμικά μονωμένο τροφοδοτικό κανάλι μήκους 460 mm x πλάτους 102 mm x βάθους 64 mm, από ένα έμβολο τροφοδοσίας και

από ένα στρογγυλό ασάλινο «αναμείκτη» διαμέτρου 9,5 mm και μήκους 406 mm (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4. Συσσκευή συμπίκνωσης με ζύμωση της Καλιφόρνια

Ο μηχανικός συμπυκνωτής εφαρμόζει δύναμη στον «αναμείκτη», ο οποίος με τη σειρά του εξασκεί πίεση 3,5 MPa στο δοκίμιο, σε μια περιοχή 2000 mm² περίπου της επιφάνειας του δοκιμίου για 2/5 sec. Μετά από κάθε συμπίεση, ο «αναμείκτης» σηκώνεται και η συσκευή περιστρέφει το δοκίμιο κατά 1/6 της πλήρους περιστροφής. Η προετοιμασία των δοκιμίων εξαρτάται από το εάν αυτά προορίζονται για δοκιμή ελέγχου ευστάθειας ή για δοκιμή ελέγχου διόγκωσης (swell test). Στα δοκίμια για τη δοκιμή ελέγχου ευστάθειας οι μήτρες, το τροφοδοτικό κανάλι, το έμβολο τροφοδοσίας και ο «αναμείκτης» θερμαίνονται στη θερμοκρασία συμπίκνωσης. Στα δοκίμια για τη δοκιμή ελέγχου διόγκωσης οι μήτρες δεν θερμαίνονται, ενώ εσωτερικά των τοιχωμάτων τους τοποθετείται ειδικό παραφινωμένο χαρτί.

2.4.2 Μέθοδος συμπίκνωσης με δόνηση (Vibratory)

Η υπόψη μέθοδος βασίζεται στην πραγματοποίηση συμπίκνωσης με δόνηση (vibratory) του ασφαλτομίγματος και, εφαρμόζοντας μέσω κατάλληλης συσκευής (σχήμα 2.5) δόνηση στο δοκίμιο, φτάνει γρήγορα και με ακρίβεια στην πυκνότητα – στόχο ασφαλτικών μιγμάτων. Τα δοκίμια έχουν σχήμα κυλίνδρου ή ράβδου (beam), με διαστάσεις για τον κύλινδρο διάμετρο 150 mm και ύψος 75 mm.

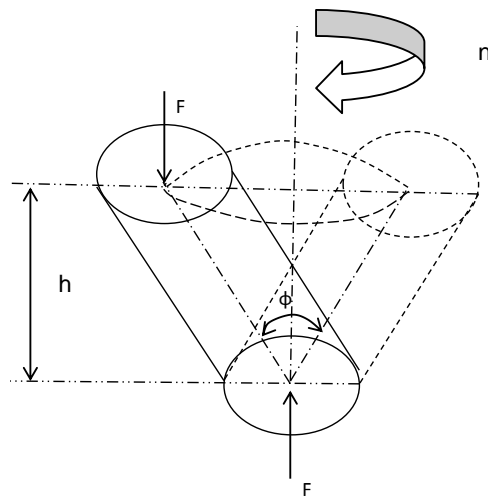


Σχήμα 2.5. Συσκευή συμπίκνωσης με δόνηση

2.5 Γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων

2.5.1 Αρχή της γυροσκοπικής μεθόδου

Στη γυροσκοπική μέθοδο, η συμπίκνωση του ασφαλτομίγματος και η παρασκευή του συμπυκνωμένου ασφαλτικού δοκιμίου επιτυγχάνεται μέσω της ταυτόχρονης δράσης μιας κατακόρυφης στατικής φόρτισης (vertical pressure F), που ασκείται από μια μηχανική κεφαλή και μιας διαμητικής δράσης που προκαλείται από την κίνηση του άξονα της μήτρας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κωνικής επιφάνειας περιστροφής, με συγκεκριμένη γωνία, που ονομάζεται γωνία περιστροφής (gyration angle ϕ). Η γωνία περιστροφής ως προς τον κατακόρυφο άξονα της μήτρας και η κατακόρυφη φόρτιση, κατά τη συμπίκνωση, παράγουν ορθές και διαμητικές τάσεις. Η ενέργεια συμπίκνωσης στη γυροσκοπική μέθοδο μπορεί να μεταβάλλεται μέσω τριών παραμέτρων: της γωνίας περιστροφής ϕ , της κατακόρυφης πίεσης F και του αριθμού περιστροφών n (number of gyrations) (σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. Αρχή λειτουργίας της γυροσκοπικής μεθόδου

Σημειώνεται ότι η μέθοδος της γυροσκοπικής συμπίκνωσης εξελίχθηκε και τροποποιήθηκε σε βάθος χρόνου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διάφορες τροποποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια:

2.5.2 Η γυροσκοπική μέθοδος συμπίκνωσης του Τέξας

Πρόκειται για την πρώτη γυροσκοπική μέθοδο συμπίκνωσης, η οποία αποτέλεσε τη βάση εξέλιξης των γυροσκοπικών μεθόδων. Πρωτοπαρουσιάστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 σε ερευνητικό πρόγραμμα της Πολιτείας του Τέξας. Η γωνία περιστροφής ϕ ρυθμίζεται στις 6° , 5° και 3° . Η διάμετρος των δειγμάτων είναι 4 inch = 100 mm περίπου. Η κατακόρυφη στατική φόρτιση ξεκινά από 50 psi στην αρχή της δοκιμής και φτάνει μέχρι τα 2500 psi. Η υπόψη μέθοδος πλέον δεν χρησιμοποιείται.

2.5.3 Οι γυροσκοπικές μέθοδοι του Σώματος του Μηχανικού των ΗΠΑ

Η πρώτη γυροσκοπική μέθοδος (και οι αντίστοιχες συσκευές USAGE) που αναπτύχθηκε από το Σώμα του Μηχανικού των Η.Π.Α., στη δεκαετία του 1950, βασίζεται σε γωνία περιστροφής 2° , ενώ επιτρέπεται στη μήτρα βαθμός ελευθερίας στην περιστροφή και στη στροφή κατά τη διεύθυνση της διαμέτρου του δοκιμίου. Η υπόψη μέθοδος πλέον δεν χρησιμοποιείται.

Η επόμενη γυροσκοπική μέθοδος, που αναπτύχθηκε επίσης από το Σώμα του Μηχανικού των Η.Π.Α. στη δεκαετία του 1960, συνδυάστηκε με τη δυνατότητα εκτέλεσης

και άλλων ελέγχων συμπυκνωμένων ασφαλτομιγμάτων. Οι αντίστοιχες συσκευές (γυροσκοπικές συσκευές ελέγχου: Gyrotory Testing Machine: GTM, - σχήμα 2.7), διακρίνονται σε δύο τύπους, ελαίου και αέρα. Οι μήτρες έχουν διάμετρο 100 mm και 150 mm (η διάμετρος 150 mm επιτρέπει και τη συμπίκνωση ασφαλτομίγματος με μεγάλο μέγεθος κόκκου αδρανών), η κατακόρυφη πίεση είναι σταθερή και μπορεί να φθάσει μέχρι 1 MPa, ενώ η γωνία περιστροφής (gyration angle) μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, με αρχική γωνία περιστροφής $1,5^{\circ}$ (στη συσκευή ελαίου) και 6° (στη συσκευή αέρα). Έχει οριστεί ως Gyrotory Stability Index (GSI) ο λόγος (max gyrotory angle) / (min gyrotory angle). Από τη συσκευή GTM μετράται αυτόματα ο δείκτης GSI, καθώς και η διατμητική αντοχή του μίγματος. Βρέθηκε ότι χαμηλές τιμές του GSI δείχνουν υψηλή ευστάθεια (stability) του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος, καθώς και αντοχή σε τροχαυλάκωση (GSI πάνω από 1,0 δείχνει μειωμένη ευστάθεια (stability) για το μίγμα και πιθανή δημιουργία τροχαυλάκωσης). Η υπόψη μέθοδος παραμένει ακόμη σε χρήση.



Σχήμα 2.7. Γυροσκοπική συσκευή ελέγχου (GTM)

2.5.4 Η γαλλική μέθοδος

Πρόκειται για τη γυροσκοπική μέθοδο και τις αντίστοιχες συσκευές, που προτάθηκαν από το Εργαστήριο Laboratoire Central des Ponts et Chausees (LCPC) στη Γαλλία, από τη δεκαετία του 1960 (σχήμα 2.8). Η κατακόρυφη πίεση του δείγματος είναι σταθερή στα 600 KPa περίπου και η (εξωτερική) γωνία περιστροφής μόλις 1° . Ο ρυθμός περιστροφής είναι επίσης σταθερός στις 6 στροφές ανά λεπτό (rpm). Η διάμετρος της μήτρας είναι

160 mm και προτείνεται ύψος δοκιμίων 150 mm περίπου. Εξέλιξη των υπόψη συσκευών, που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη, εξακολουθεί να εφαρμόζει (εξωτερική) γωνία 1° .



Σχήμα 2.8. Συσκευή της γαλλικής μεθόδου γυροσκοπικής συμπίκνωσης

2.5.5 Η μέθοδος *SUPERPAVE*

Πρόκειται για τη μέθοδο συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιείται στη μέθοδο σχεδιασμού *SUPERPAVE* και προτάθηκε από το πρόγραμμα SHRP. Η υπόψη μέθοδος και οι αντίστοιχες συσκευές χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σήμερα στις Η.Π.Α. Οι απαιτήσεις που έθεσε το πρόγραμμα SHRP κατά τη συμπίκνωση δοκιμίων με την υπόψη μέθοδο, ήταν: (α) γωνία περιστροφής (gyration angle, εξωτερική ως προς τα τοιχώματα της μήτρας) $1,25^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$, (β) κατακόρυφη πίεση $600 \pm 18 \text{KPa}$, (γ) διάμετρο της μήτρας από 149,9 mm έως 150,1 mm, (δ) διάμετρο των δίσκων (plates) από 149,5 mm έως 149,75mm και (ε) ρυθμό περιστροφής $30 \text{rpm} \pm 0,5 \text{rpm}$. Οι υπόψη απαιτήσεις συμπεριλήφθηκαν στην προδιαγραφή AASHTO T312.



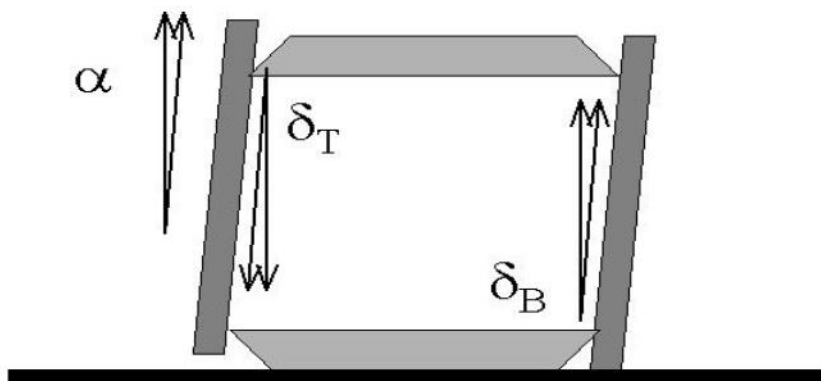
Σχήμα 2.9. Συσσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης Superpave

Η συσκευή της μεθόδου συμπίκνωσης Superpave (σχήμα 2.9) μετρά αυτόματα το ύψος του δοκιμίου, το φαινόμενο βάρος και προσδιορίζει την καμπύλη συμπίκνωσης.

3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΣΤΗ ΓΥΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

3.1 Γωνία περιστροφής

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος SHRP διαπιστώθηκε ότι αυξημένη γωνία περιστροφής (5° στην γυροσκοπική μέθοδο του Τέξας) προκαλεί πολύ γρήγορη συμπίκνωση στο δοκίμιο, με αποτέλεσμα η καμπύλη συμπίκνωσης να έχει μεγαλύτερη κλίση από αυτή της συμπίκνωσης στο εργοτάξιο (field), ενώ μειωμένη γωνία (1° στη γαλλική μέθοδο γυροσκοπικής συμπίκνωσης) παράγει δοκίμια με μικρότερη πυκνότητα. Έτσι, το πρόγραμμα SHRP κατέληξε στην καθιέρωση (εξωτερικής) γωνίας $1,25^{\circ}$ για την SUPERPAVE μέθοδο και στον δυναμικό προσδιορισμό της γωνίας περιστροφής, δηλαδή να μετράται κατά τη συμπίκνωση και όχι στατικά στην κατάσταση προ φόρτισης.



Σχήμα 3.1. Εξωτερική γωνία (α) και εσωτερικές γωνίες κορυφής (δ_T) και βάσης (δ_B)

Καθώς η έρευνα επικεντρώθηκε στα αποτελέσματα της πυκνότητας των δοκιμών για διαφορετικούς τύπους γυροσκοπικών συσκευών SUPERPAVE με την ίδια εξωτερική γωνία (Buchanan et al. 2004), διαπιστώθηκε ότι τα υπόψη αποτελέσματα παρουσιάζουν διασπορά. Η διασπορά αυτή αποδείχτηκε ότι μειώνεται όταν χρησιμοποιείται η ίδια εσωτερική γωνία (η οποία μετράται εσωτερικά της μήτρας, δυναμικά κατά τη συμπίκνωση και λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων στην κορυφή και στη βάση της μήτρας – σχήμα 3.1). Έτσι προέκυψε η ανάγκη μέτρησης της εσωτερικής γωνίας με ειδικές συσκευές, οι οποίες αναφέρονται στην επόμενη ενότητα.

Συγκεκριμένα, στην προσπάθεια αντιστοίχισης της εξωτερικής γωνίας $1,25^{\circ}$ με συγκεκριμένη εσωτερική γωνία, βρέθηκε ότι στη συσκευή Pine SGC η εξωτερική γωνία $1,25^{\circ}$ αντιστοιχεί σε εσωτερική $1,18^{\circ}$ και στη συσκευή Troxler Likewise SGC η εξωτερική γωνία $1,25^{\circ}$ αντιστοιχεί σε $1,14^{\circ}$. Έτσι, τροποποιήθηκε η προδιαγραφή AASHTO T312, στις AASHTO PP48 και ASTM D7115 και καθιερώθηκε απαίτηση για εσωτερική γωνία $1,16^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$ ($20,2 \pm 0,5$ mrad).

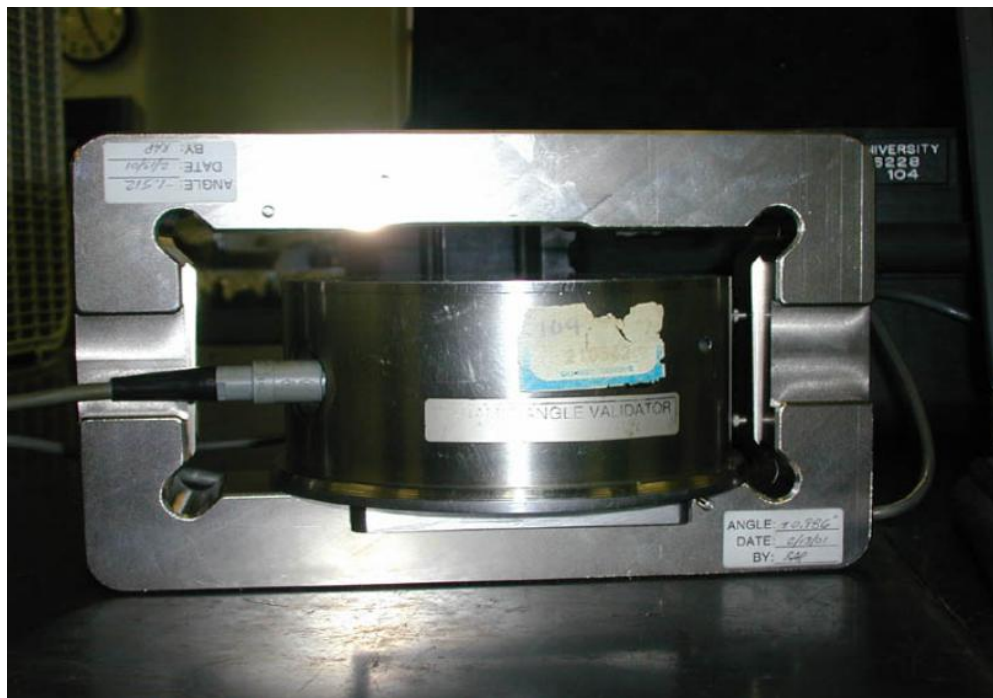
Διερευνώντας την αύξηση της γωνίας περιστροφής, από $1,0^{\circ}$ σε $1,25^{\circ}$, $1,5^{\circ}$ και $2,0^{\circ}$, προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια πυκνότητα των δοκιμών, προέκυψε μείωση του απαιτούμενου αριθμού των περιστροφών, (Swami et al. 2004). Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι η πυκνότητα του μίγματος αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας των gyrations, αλλά η αύξηση είναι ασήμαντη για γωνίες μεταξύ $1,25^{\circ}$ και 2° .

Σε άλλη έρευνα (Prowell et al. 2000), βρέθηκε ότι αύξηση της εσωτερικής γωνίας κατά $0,1^{\circ}$ προκαλεί αύξηση της πυκνότητας κατά $0,014 G_{mb}$ (ή μείωση κατά $0,4\%$ του ποσοστού κενών), ενώ επιπλέον διερευνήθηκε η μεταβολή της εσωτερικής γωνίας με τη μεταβολή του ύψους των δοκιμών.

Επίσης, βρέθηκε (Prowell et al. 2003) ότι αλλαγή στην εσωτερική γωνία κατά $0,01^{\circ}$ επιφέρει αλλαγή στο ποσοστό κενών του δοκιμίου κατά $0,05\%$, κατά μέσο όρο

3.1.1 **Συσκευές μέτρησης της εσωτερικής γωνίας περιστροφής**

Για την μέτρηση (και πιστοποίηση) της εσωτερικής γωνίας στις γυροσκοπικές συσκευές προτάθηκαν συσκευές που πραγματοποιούν τη μέτρηση μαζί με το ασφαλτόμιγμα στη μήτρα και συσκευές που πραγματοποιούν τη μέτρηση χωρίς την παρουσία ασφαλτομίγματος στη μήτρα, με αποτέλεσμα να πλεονεκτούν έναντι των πρώτων συσκευών.



Σχήμα 3.2. Συσσκευή τύπου DAVK

Οι συσκευές που πραγματοποιούν τη μέτρηση κι επαλήθευση της γωνίας μαζί με το ασφαλτόμιγμα στη μήτρα κατά τη συμπίκνωση είναι οι συσκευές τύπου DAVK (Dynamic Angle Validation Kit, σχήμα 3.2.). Η συσκευή DAVK περιέχει δύο ηλεκτρομηκυσιόμετρα σε απόσταση 37,5 mm περίπου μεταξύ τους και τοποθετείται μαζί με το ασφαλτόμιγμα μέσα στη μήτρα, κατά τη συμπίκνωση. Υπάρχει διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στην περίπτωση κατά την οποία το DAVK τοποθετείται μαζί με το ασφαλτόμιγμα στην κορυφή ή στη βάση της μήτρας και γι' αυτό λαμβάνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων.

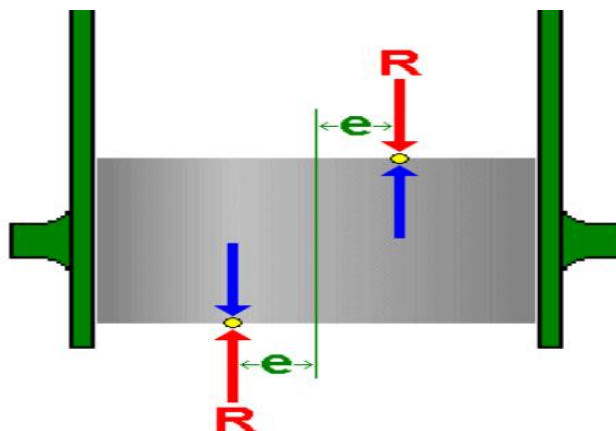
Η συσκευή DAVK χωρά μέσα στη μήτρα με το μίγμα για ύψος δοκιμίου 115 mm στις συσκευές Pine AFG1A και AFC125X, αλλά όχι στις συσκευές Pine AFGB1A, Troxler 4140 και 4141. Γι' αυτό, στις τελευταίες συσκευές για να βρεθεί η γωνία που αντιστοιχεί σε ύψος δοκιμίου μεγαλύτερο από 115 mm, εφαρμόστηκε η διαδικασία της γραφικής επέκτασης (extrapolation). Με τη διαδικασία δηλαδή μετράται η εσωτερική γωνία σε τρία δοκίμια ύψους μικρότερου των 115 mm, το διάγραμμα ύψους δοκιμίων – εσωτερικών γωνιών επεκτείνεται γραφικά μέχρι το ύψος του δοκιμίου που είναι μεγαλύτερο από 115mm.

Οι συσκευές που πραγματοποιούν μέτρηση (και πιστοποίηση) της εσωτερικής γωνίας στις γυροσκοπικές συσκευές χωρίς την παρουσία υλικού στη μήτρα, είναι δύο ειδών: η συσκευή τύπου Rapid Angle Measurement (RAM) και η συσκευή τύπου DAV / Hot Mix Simulator (DAV/HMS).

Η συσκευή RAM (σχήμα 3.3) αποτελείται από μεταλλική μήτρα και προσομοιώνει την έκκεντρη φόρτιση του δοκιμίου (σχήμα 3.4) μέσω δακτυλίων (σχήμα 3.5), η διάμετρος των οποίων αντιπροσωπεύει την εκκεντρότητα e του φορτίου.



Σχήμα 3.3. Rapid - Angle Measurement (RAM) συσκευή



Σχήμα 3.4. Η έκκεντρη φόρτιση των δοκιμίων κατά τη συμπίκνωση



Σχήμα 3.5. Τα μεταλλικά δακτυλίδια επαφής της συσκευής RAM

Η DAV/HMS συσκευή (σχήμα 3.6) προσομοιώνει την έκκεντρη φόρτιση του δοκιμίου μέσω κυρτού δίσκου.



Σχήμα 3.6. Συσκευή τύπου DAV/HMS

Η εκκεντρότητα της φόρτισης e και η γωνία καταπτώσεως δ του πάνω δίσκου, συνδέονται με τη σχέση $e = \tan \delta \cdot 115/2$. Ωστόσο δημιουργήθηκε η ανάγκη εναρμόνισης των αποτελεσμάτων μέτρησης των δύο τύπων συσκευών. Για το σκοπό αυτό

πραγματοποιήθηκαν έρευνες ώστε να προκύψει η ισοδυναμία των αποτελεσμάτων με βάση τη στιγμιαία ροπή (tilting moment), η οποία ορίζεται μαθηματικά ως εξής:

$$M = \frac{e \cdot F}{1000} \quad (3.1)$$

όπου,

M =στιγμιαία ροπή (σε N.m)

e = εκκεντρότητα (σε mm)

F=δύναμη εφαρμοζόμενη στο δοκίμιο (σε N)

Τα αποτελέσματα των ερευνών έδειξαν ότι επιτυγχάνεται ισοδυναμία όταν χρησιμοποιείται δαχτυλίδι επαφής 44mm στη συσκευή RAM και κώνος 21⁰ (deg) και εφαρμοζόμενη δύναμη 10,6 KN (που αντιστοιχεί σε πίεση 600 KPa) στη συσκευή DAV/HMS. Τότε έχουμε :

$$\text{Για τη RAM : } M = 22mm \cdot 10,6KN = 233,2 N \cdot m \quad (3.2)$$

$$\text{Για τη DAV/HMS: } e = \tan((\text{radians})21^0) \cdot \frac{115}{2} = 22,07 mm \quad (3.3)$$

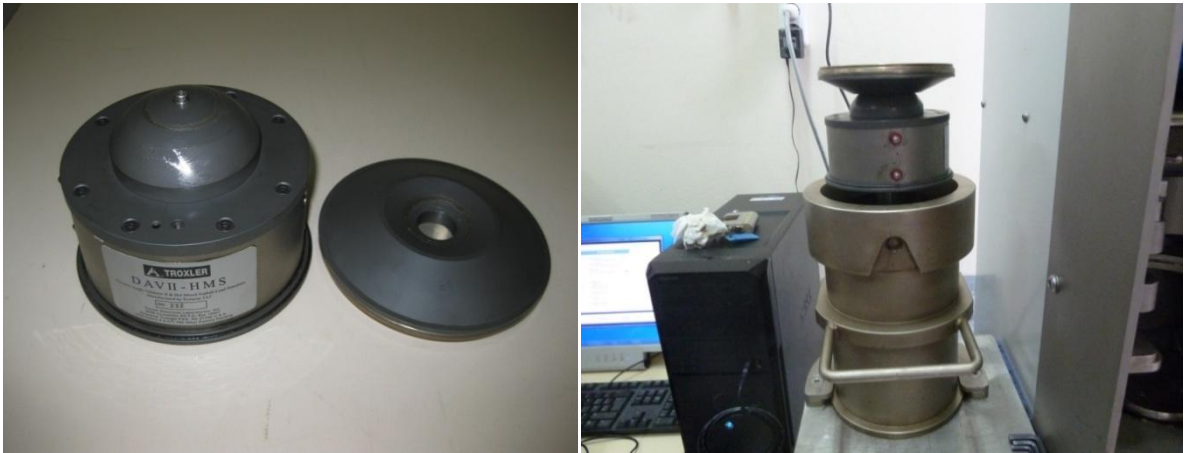
$$\text{άρα, } M = 22,07mm \cdot 10,6KN = 234,0 N \cdot m \quad (3.4)$$

Η μέτρηση της εσωτερικής γωνίας συστήνεται να πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου, παρά το γεγονός ότι κατά τη συμπίκνωση η μήτρα με το υλικό είναι θερμότερη. Βρέθηκε ότι οι διαφορές μεταξύ «θερμής» και «κρύας» μήτρας, όσον αφορά στη μέτρηση της εσωτερικής γωνίας είναι της τάξης του 2% για τις συσκευές Pine και Troxler, με τη «θερμή» γωνία λίγο μικρότερη από τη γωνία της «κρύας μήτρας», συνήθως. Στατιστική επεξεργασία μεταξύ των τιμών γωνίας «θερμής μήτρας» και «κρύας μήτρας», (FHWA 2010), έδειξε ότι η διαφορά τους δεν είναι σημαντική (στην πράξη).

Προκειμένου να εξασφαλιστούν ακριβείς μετρήσεις με τις γυροσκοπικές συσκευές απαιτούνται, η έγκαιρη εκτέλεση όλων των εργασιών συντήρησης των συσκευών σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και η επιθεώρηση – πιστοποίηση των μηχανικών μερών τουλάχιστο μία φορά κατ' έτος (ή πιο συχνά αν γίνεται συχνή χρήση). Επιπλέον, απαιτείται όλες οι επιφάνειες των γυροσκοπικών συσκευών και των μητρών να είναι καθαρές και να ελέγχονται οι εσωτερικές διάμετροι των μητρών ότι δεν υπερβαίνουν τα 150 mm.

Τις παραπάνω εξελίξεις στη γωνία περιστροφής ακολούθησε και η ευρωπαϊκή γυροσκοπική μέθοδος. Έτσι, προβλέπεται να μετράται η εσωτερική γωνία περιστροφής, καθώς και να επαληθεύεται η τιμή της γωνίας με όργανα πιστοποίησης μετρήσεων (EN 12697-31, 2007).

Για τη μέτρηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής της γυροσκοπικής συσκευής του Ε.Μ.Π. χρησιμοποιήθηκε συσκευή DAV/HMS (σχήμα 3.8) και ακολουθήθηκε η προδιαγραφή EN 12697-31.



Σχήμα 3.7. Η συσκευή DAV/HMS μέτρησης γυροσκοπικής γωνίας του Ε.Μ.Π.

Η συσκευή DAV/HMS τοποθετήθηκε σε μήτρα διαμέτρου 150mm και η υπόψη μήτρα με τη συσκευή DAV/HMS τοποθετήθηκε στη γυροσκοπική συσκευή σε λειτουργία συμπίκνωσης (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8. Μέτρηση της γωνίας στη γυροσκοπική συσκευή του Ε.Μ.Π.

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις μετρήσεις εσωτερικής γωνίας για την κορυφή και τέσσερις για τη βάση. Το αποτέλεσμα λήφθηκε ως ο μέσος όρος των παραπάνω μετρήσεων.

3.2 Θερμοκρασία συμπίκνωσης

Από τα αποτελέσματα του προγράμματος SHRP, καθώς και από έρευνα των Coree et al (1998), είχε διαπιστωθεί ότι υπάρχει μία κατάλληλη θερμοκρασία, για κάθε τύπο ασφάλτου, όπου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα στην εργαστηριακή συμπίκνωση των ασφαλτομιγμάτων. Αυτή η θερμοκρασία είναι εκείνη για την οποία το $\dot{\epsilon}$ της ασφάλτου είναι 0,28 Pa.sec.

Από έρευνα των Lee S. et al (2007), διαπιστώθηκε ότι δοκίμια με συμβατική και τροποποιημένη με ελαστομερή άσφαλο, συμπυκνωμένα σε επίπεδα συμπίκνωσης 30 και 70 περιστροφών, είχαν τις ίδιες περίπου ογκομετρικές ιδιότητες για θερμοκρασίες συμπίκνωσης από 116⁰ C έως 173⁰ C. Με την προσθήκη ελαστικού (rubber) στην άσφαλο, σε ποσοστά 10% και 15%, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία από 116⁰ C στους 173⁰ C, το ποσοστό κενών μειώνεται.

Από έρευνα που διενήργησαν οι West et al (2010), διαπιστώθηκε ότι για να υπάρξει αξιοσημείωτη αύξηση του ποσοστού κενών δοκιμίων ίδιας κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών, συμπυκνωμένων στις ίδιες διαστάσεις και με τον ίδιο αριθμό περιστροφών, η θερμοκρασία συμπίκνωσης θα πρέπει να είναι μικρότερη των 120⁰ C.

3.3 Διαστάσεις των δοκιμίων

Με αύξηση της διαμέτρου των δοκιμίων από 100mm σε 150mm γενικά μειώνεται η πυκνότητα εργαστηριακά συμπυκνωμένων ασφαλτομιγμάτων SUPERPAVE., (Iwama M. 2009 και Thyagarajan et al. 2010).

Στις ίδιες έρευνες βρέθηκε ότι για δοκίμια διαμέτρου 100mm γενικά παρατηρείται μικρή μείωση της πυκνότητας, καθώς αυξάνει το ύψος των δοκιμίων από 50mm σε 150mm. Για δοκίμια διαμέτρου 150mm παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας, καθώς αυξάνει το ύψος από 50mm σε 150mm.

Αποτέλεσμα της συμπίκνωσης δοκιμίων σε διαφορετικές διαστάσεις χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους συμπίκνωσης είναι η διαφοροποίηση της κατανομής των κενών στη μάζα των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται αυξημένα κενά στις περιφερειακές

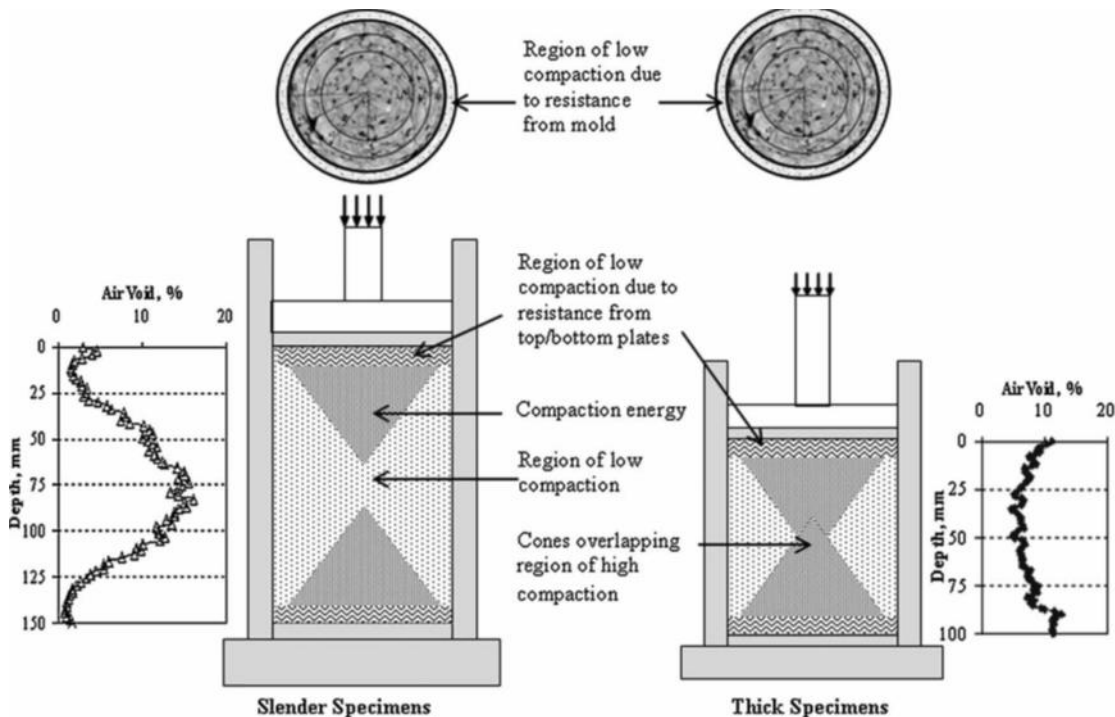
περιοχές των δοκιμίων. Για να εξαλειφθεί η υπόψη ετερογένεια χρησιμοποιείται πυρηνοληψία μέσα από δοκίμια, καθώς και κοπή του πυθμένα και της κορυφής. Ακολουθούν οι έρευνες που διενεργήθηκαν για την υπόψη ετερογένεια, καθώς και για τον τρόπο αντιμετώπισής της.

3.3.1 **Κατανομή των κενών στα δοκίμια**

Από έρευνα που πραγματοποίησαν και δημοσίευσαν οι Hartman, et al (2001), συμπυκνώνοντας θερμό κυλινδρούμενο ασφαλτόμιγμα (Hot-rolled asphalt: HRA) και πυκνής σύνθεσης (Dense base course) mac-adam (DBC) με γυροσκοπική συσκευή βρήκαν ότι στα δοκίμια με ασφαλτόμιγμα HRA τα κενά είχαν ομοιόμορφη κατανομή, ενώ στο ασφαλτόμιγμα DBC ήταν περισσότερα τα κενά κοντά στην περιφέρεια του δοκιμίου.

Από έρευνα που πραγματοποίησαν και δημοσίευσαν οι Hunter A., et al (2004), αναλύοντας ασφαλτομίγματα σε δοκίμια συμπυκνωμένα με SGC συσκευές, με παραμέτρους συμπύκνωσης σύμφωνες με τις συστάσεις του προγράμματος SHRP, βρέθηκαν υψηλά κενά στην περιφέρεια των δοκιμίων και χαμηλότερα στο κέντρο.

Στην έρευνα που πραγματοποίησαν οι Thyagarajan S., et al (2010), βρέθηκε ότι η κατανομή των κενών στα δοκίμια των γυροσκοπικών συσκευών δεν ήταν ομοιόμορφη, με τα περισσότερα κενά να εμφανίζονται στην περιφέρεια. Συγκεκριμένα, σε μία ζώνη 10 έως 20 mm εσωτερικά της περιφέρειας, καθώς και σε ζώνη μερικών χιλιοστών (mm) στη βάση και στην κορυφή του δοκιμίου, η πυκνότητα είναι μικρότερη από αυτή της υπόλοιπης μάζας του δοκιμίου. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ακριβώς μετά (επάνω και κάτω, προς το μέσο ύψος του δοκιμίου) τις ζώνες μικρότερης πυκνότητας των δοκιμίων, σχηματίζονται δύο κώνοι μεγαλύτερης πυκνότητας από την υπόλοιπη μάζα του δοκιμίου (σχήμα 3.10). Όταν το ύψος των δοκιμίων αυξάνει, αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο κώνων, ενώ η περιοχή στο μέσο (καθ' ύψος) των δοκιμίων έχει χαμηλότερη πυκνότητα. Μειώνοντας το ύψος των δοκιμίων, μειώνεται η απόσταση μεταξύ των δύο κώνων, προκαλώντας μείωση της ετερογένειας του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος των δοκιμίων.



Σχήμα 3.9. Κατανομή των κενών στα δοκίμια (Thyagarajan et al. 2010)

Για τη διερεύνηση της εσωτερικής δομής των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της ανάλυσης εικόνας (Image analysis techniques, Hunter A., et al. 2004). Συγκεκριμένα, σε παράλληλες προς τη βάση τομές, μετράται η γωνία θ , μεταξύ της ακτίνας του δοκιμίου και της μέγιστης διαγωνίου του κόκκου, ενώ σε τρισδιάστατη απεικόνιση των κόκκων του δοκιμίου μετράται η γωνία α , μεταξύ οριζόντιας διεύθυνσης και μέγιστης διαγωνίου του κόκκου. Η υπόψη γωνία θ ορίστηκε ως βαθμός προσανατολισμού των κόκκων των αδρανών. Από τη διερεύνηση βρέθηκε ότι στα οριζόντια επίπεδα δοκιμίων συμπυκνωμένων με γυροσκοπικές συσκευές συμπίκνωσης, παρουσιάζεται διαφορετικός προσανατολισμός, με τους πιο μεγαλύτερους κόκκους να τοποθετούνται γενικά κοντά στην περιφέρεια των κυλινδρικών δοκιμίων. Έτσι, βρέθηκε ότι αυξάνεται ο βαθμός προσανατολισμού των κόκκων στην περιφέρεια των κυλινδρικών δοκιμίων.

3.3.2 Πυρήνες από δοκίμια

Στην έρευνα των Thyagarajan et al (2010), βρέθηκε επίσης ότι εάν κοπούν πυρήνες διαμέτρου 100mm από την κεντρική περιοχή των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, η πυκνότητα αυξάνεται.

Σε έρευνα που δημοσιεύτηκε στην Αναφορά (Report) 513 (2003) του National Cooperative Highway Research Program, λήφθηκαν πυρήνες διαμέτρου 100mm από το κέντρο δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150mm και ύψους 165mm, που συμπυκνώθηκαν με συσκευές Superpave. Από την υπόψη έρευνα βρέθηκαν ότι: (1) οι πυρήνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (dynamic modulus), ενώ παλιότερες έρευνες είχαν δείξει ότι κατάλληλα δοκίμια για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας είναι μόνον αυτά με λόγο ύψους προς διάμετρο 1,5, (2) στους πυρήνες εξαλείφεται το υψηλό ποσοστό κενών που εμφανίζεται στις άκρες της παράπλευρης επιφάνειας των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν με γυροσκοπικές συσκευές και (3) με την πυρηνοληψία από δοκίμια μπορούν να αποκτηθούν πυρήνες ίδιας γεωμετρίας και επιπεδότητας πλευρών με τους εργοταξιακούς πυρήνες.

Σε έρευνα που διενεργήθηκε από τους Anochie – Boateng J. et al (2010), από δοκίμια που συμπυκνώθηκαν σε γυροσκοπική συσκευή, σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO T312, διαμέτρου 150 mm και ύψους 170 mm, λήφθηκαν πυρήνες διαμέτρου 100 mm και ύψους 150 mm, προκειμένου να εξαλειφθούν τα αυξημένα κενά της περιφέρειας των δοκιμίων και πραγματοποιήθηκε κοπή των πυρήνων σε διαφορετικού ύψους επίπεδα παράλληλα προς τη βάση. Διαπιστώθηκε ότι τα τελικά ποσοστά κενών των υπόψη πυρήνων μετά την κοπή, εξαρτώνται από το ύψος των επιπέδων που γίνονται οι κοπές.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2, προκειμένου να διερευνηθεί το μέγεθος της επιρροής παραγόντων που επηρεάζουν την εργαστηριακή συμπίκνωση ασφαλτομίγματος με γυροσκοπική συσκευή, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε πειραματική διαδικασία στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., που περιέλαβε δοκιμές συμπίκνωσης με τη γυροσκοπική μέθοδο και προσδιορισμού ποσοστού κενών δύο ασφαλτομιγμάτων.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπίκνωσης ασφαλτικών δοκιμίων μεταβάλλοντας τη γωνία περιστροφής (0.82° , 1.16° και 1.45°), τη θερμοκρασία συμπίκνωσης (135°C και 150°C), τη διάμετρο (100 mm και 150 mm) και τα ύψη (70 mm και 170 mm). Κατόπιν πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία (αποκλειστικά στα δοκίμια διαμέτρου 150 mm) και κοπή κατά 10 mm της κορυφής και της βάσης των δοκιμίων (σχήμα 4.1). Επιπλέον, προκειμένου να σχηματιστούν οι καμπύλες συμπίκνωσης (μεταβολής της πυκνότητας ως προς τον αριθμό των περιστροφών, στη διάρκεια της συμπίκνωσης), πραγματοποιήθηκε παρασκευή δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν για τον ίδιο αριθμό περιστροφών N, με $N=205$.



Σχήμα 4.1. Δοκίμιο διαμέτρου 150 mm ύψους 170mm, αντίστοιχοι πυρήνες διαμέτρου 100mm

Σημειώνεται επίσης, ότι για τον προσδιορισμό της μάζας του ασφαλτομίγματος που απαιτείται για κάθε δοκίμιο, προηγήθηκε παρασκευή και συμπίκνωση δοκιμαστικών δοκιμίων και εκτελέστηκαν δοκιμές προσδιορισμού της μέγιστης πυκνότητας για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος. Με βάση τα παραπάνω, παρασκευάστηκαν 36 δοκίμια, για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος (σχήμα 4.2).



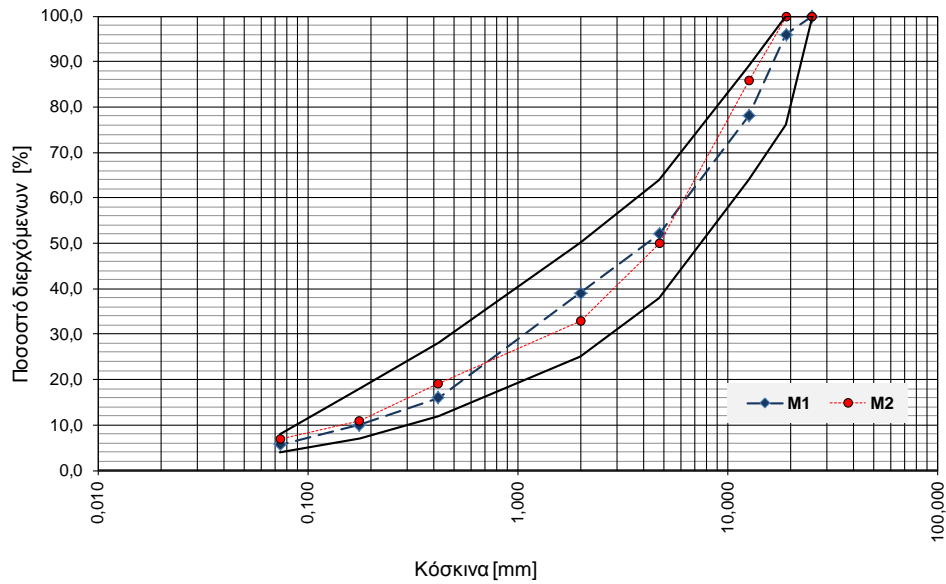
Σχήμα 4.2. Συνολική εικόνα των 72 δοκιμίων της τελικής διερεύνησης

4.2 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης (ΠΤΠ Α-265), στους οποίους δόθηκαν οι κωδικές ονομασίες Μ1 και Μ2.

Το ασφαλτόμιγμα Μ1 έχει μέγιστο κόκκο 1 inch, ενώ το ασφαλτόμιγμα Μ2 έχει μέγιστο κόκκο $\frac{3}{4}$ inch. Τα δύο ασφαλτομίγματα περιείχαν τύπο ασφάλτου 50/70 και ποσοστό ασφάλτου 4,5% (κ.β. αδρανών).

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης των δύο ασφαλτομιγμάτων:



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης ασφαλτομιγμάτων M1 και M2

Στα υπόψη ασφαλτομίγματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού της μέγιστης πυκνότητας (προδιαγραφή EN 12697-5). Σύμφωνα με την προδιαγραφή, μία ποσότητα ασφαλτομίγματος (λίγο μεγαλύτερη από 1250 gr), μετά από τετραμερισμό (σχήμα 4.4), η οποία είχε θερμανθεί για να αποβάλλει την υγρασία, διαχωρίστηκε με τα χέρια, έτσι ώστε να μην παρατηρούνται συνδεδεμένοι κόκκοι.



Σχήμα 4.4. Τετραμερισμός του δείγματος

Στη συνέχεια, το δείγμα κρύωσε σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν ζυγίστηκε το πικνόμετρο της δοκιμής (m_1). Έπειτα, τοποθετήθηκε το ασφαλτόμιγμα στο πικνόμετρο και ζυγίστηκε (m_2). Προστέθηκε στο πικνόμετρο νερό θερμοκρασίας 25°C , μέχρι να καλυφθεί το ασφαλτόμιγμα και κατόπιν καλύφτηκε με το ειδικό σκέπασμα του πικνόμετρου. Το πικνόμετρο τοποθετήθηκε σε συσκευή, η οποία αφαίρεσε τον αέρα από το πικνόμετρο και μετά το δόνησε για 15 λεπτά περίπου, με αποτέλεσμα το νερό να εισχωρήσει στα κενά του χαλαρού ασφαλτομίγματος παίρνοντας τη θέση του αέρα (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. Δοκιμή προσδιορισμού μέγιστης πυκνότητας ασφαλτομίγματος

Ο αέρας βγήκε από το νερό και αφαιρέθηκε από το πάνω μέρος του πικνόμετρου. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αφαίρεσης του αέρα, προστέθηκε στο δοχείο νερό θερμοκρασίας 25°C , μέχρι να γεμίσει. Απαιτήθηκε προσοχή ώστε να μην μείνουν φυσαλίδες στο δοχείο. Ακολούθως το δοχείο με το ασφαλτόμιγμα τοποθετήθηκε σε λουτρό ύδατος θερμοκρασίας επίσης 25°C για άλλα 30 λεπτά περίπου. Κατόπιν το δοχείο σκουπίστηκε εξωτερικά και ζυγίστηκε (m_3). Αν v_p ήταν ο όγκος του δοχείου (σε lt), (m_1 , m_2 , m_3 σε gr) τότε η μέγιστη πυκνότητα του χαλαρού ασφαλτομίγματος ρ_M (σε Kg/m^3) υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\rho_M = \frac{m_1 - m_2}{v_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (4.1)$$

όπου ρ_w ήταν η πυκνότητα του νερού, η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Η πυκνότητα του νερού στους 25⁰ C είναι 997,1 Kgr/m³ . Για άλλες θερμοκρασίες του νερού η πυκνότητα θα είναι (997,1 X K) Kgr/m³, όπου ο συντελεστής K δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1. Διορθωτικός συντελεστής K για τη θερμοκρασία

Θερμοκρασία νερού °C	Διορθ. συντελεστής K	Πυκνότητα νερού Kg/m ³	Θερμοκρασία νερού °C	Διορθ. συντελεστής K	Πυκνότητα νερού Kg/m ³
10	1,0027	999,8	20	1,0012	998,3
11	1,0026	999,7	21	1,0010	998,1
12	1,0025	999,6	22	1,0007	997,8
13	1,0023	999,4	23	1,0005	997,6
14	1,0022	999,3	24	1,0003	997,4
15	1,0021	999,2	25	1,0000	997,1
16	1,0019	999,0	26	0,9997	996,8
17	1,0017	998,8	27	0,9995	996,6
18	1,0016	998,7	28	0,9992	996,3
19	1,0014	998,5	29	0,9989	996,0
20	1,0012	998,3	30	0,9986	995,7

Πρέπει τέλος να σημειωθεί η σχολαστικότητα που απαιτείται στην εκτέλεση της δοκιμής προσδιορισμού της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας του χαλαρού ασφαλτομίγματος, καθόσον στους μεγάλους αριθμούς περιστροφών, όπου τα ποσοστά κενών μειώνονται σε μεγάλο βαθμό και η αντίστοιχη πυκνότητα προσεγγίζει τη μέγιστη.

4.3 Δοκιμή συμπίκνωσης με γυροσκοπική συσκευή

Η παρασκευή των δοκιμίων με τη συσκευή γυροσκοπικής συμπίκνωσης του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. εκτελέστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12697-31. Κατ' αρχήν ελέγχθηκε ότι ο μέγιστος κόκκος αδρανών των δύο ασφαλτομιγμάτων δεν είναι μεγαλύτερος από 31,5 mm, όπως απαιτεί η υπόψη προδιαγραφή.

Αρχή της δοκιμής: Το ασφαλτόμιγμα εισήχθη σε κυλινδρική μήτρα και περιορίστηκε από δίσκους (inserts) στην κορυφή και στη βάση, σε σταθερή θερμοκρασία εντός καθορισμένων ανοχών, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η συμπίκνωση επιτεύχθηκε με την ταυτόχρονη εφαρμογή μιας χαμηλής στατικής πίεσης και μιας διατμητικής τάσης που επήλθε από την κίνηση του άξονα της μήτρας, καθώς διέγραψε κωνική επιφάνεια περιστροφής, με κορυφή Ο και γωνία 2φ, ενώ οι έδρες του δοκιμίου παρέμειναν ιδεατά κάθετες στον άξονα της κωνικής επιφάνειας.

Η συσκευή της δοκιμής ικανοποιούσε τις απαιτήσεις της προδιαγραφής EN 12697-31.

Προετοιμασία των δοκιμίων: Η μάζα Μ του μίγματος, που εισήχθη στη μήτρα για την παρασκευή δοκιμίου, υπολογίστηκε βάσει της απαιτούμενης πυκνότητας και του όγκου του δοκιμίου. Έτσι, η μάζα Μ υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$M = \pi \cdot 10^9 \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h_{min} \cdot \rho_M \quad (4.2)$$

όπου:

Μ ήταν η μάζα του μίγματος που εισήχθη στη μήτρα (σε Kgr)

D ήταν η εσωτερική διάμετρος της μήτρας (σε mm)

h_{min} ήταν το ελάχιστο ύψος δοκιμίου, που αντιστοιχούσε σε μηδενικό ποσοστό κενών
(σε mm)

ρ_M ήταν η μέγιστη πυκνότητα του μίγματος, όπως υπολογίστηκε από την εκτέλεση της δοκιμής EN 12697-5, με νερό, (σε Kgr/m^3)

Ο λόγος του ελάχιστου ύψους h_{\min} προς την εσωτερική διάμετρο D έπρεπε να ήταν μεταξύ 0,66 και 1,05, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12697-31. Σημειώνονται οι ακόλουθες απαιτήσεις της υπόψη προδιαγραφής: Αν το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών είναι 16 mm ή μικρότερο, η διάμετρος του δοκιμίου μπορεί να είναι 100 mm, 150 mm ή 160mm. Αν το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών είναι μεγαλύτερο από 16 mm, η διάμετρος του δοκιμίου μπορεί να είναι 150 mm ή 160 mm.

Επιπλέον, εκτελέστηκαν οι ακόλουθες ενέργειες: οι μήτρες και οι δίσκοι (inserts) τοποθετήθηκαν τουλάχιστο για 2 ώρες σε θερμοκρασία συμπίκνωσης του μίγματος $\pm 10^{\circ} \text{C}$, οι μήτρες να επαλείφθηκαν με ειδικό λάδι ή λιπαντικό και η μάζα εισήχθη με χωνί και ζυγίστηκε με ανοχή 0,1%.

Διαδικασία της δοκιμής: Η εφαρμοζόμενη δύναμη F , είχε καθοριστεί στο παράρτημα A.3.2 της προδιαγραφής. Η γωνία περιστροφής ϕ πιστοποιήθηκε στην αρχή της σειράς των δοκιμών συμπίκνωσης, με ανοχή $\pm 0,02^{\circ}$. Η ταχύτητα περιστροφής διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής, με ανοχή $\pm 10\%$. Οι θερμοκρασίες συμπίκνωσης ήταν σύμφωνες με την προδιαγραφή EN 12697-35.

Για τη συμπίκνωση, τοποθετήθηκε η μήτρα με το μίγμα και τους δίσκους στη συσκευή (σχήμα 4.6). Με τη μηχανική κεφαλή σε επαφή με το δίσκο κορυφής, ξεκίνησε η περιστροφή της συσκευής. Η δύναμη F και η γωνία κλίσης ϕ εφαρμόστηκαν από την πρώτη περιστροφή. Χωρίς να διακοπεί η περιστροφή, μετρήθηκε από τη συσκευή το ύψος του δοκιμίου $h(n_g)$, με ακρίβεια $\pm 0,2$ mm για τους ακόλουθους αριθμούς περιστροφών: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 και όταν κρινόταν απαραίτητο, για 120, 150, 200, 205 μέχρι 261 περιστροφές. Ο μέσος όρος του ποσοστού κενών $v(n_g)$ σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12697-8, για κάθε αριθμό περιστροφών n_g υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$v(n_g) = 100 \cdot \frac{h(n_g) - h_{\min}}{h(n_g)} \quad (4.3)$$

όπου:

$v(n_g)$ ήταν το ποσοστό κενών μετά από n_g αριθμό περιστροφών, επί τοις εκατό

$h(n_g)$ ήταν το ύψος του δοκιμίου μετά από n_g αριθμό περιστροφών, σε χιλιοστά (mm)

h_{min} ήταν το ελάχιστο ύψος του συμπυκνωμένου δοκιμίου, που αντιστοιχεί σε μηδενικό ποσοστό κενών, σε χιλιοστά (mm).

Η εξόλκευση του δοκιμίου από τη μήτρα έγινε με τη χρήση του μοχλού εξόλκευσης, αφού το δοκίμιο ψύχθηκε για 5 με 10 λεπτά μετά τη συμπίκνωση.

Για το σχηματισμό της καμπύλης μεταβολής της πυκνότητας ως προς τον αριθμό περιστροφών, η συσκευή κατέγραψε το ύψος του δοκιμίου στον αντίστοιχο αριθμό περιστροφών, ενώ η τελική πυκνότητα του δοκιμίου προσδιορίστηκε πειραματικά, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12697-6.



Σχήμα 4.6. Η γυροσκοπική συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. και οι μήτρες της

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2, οι συμπυκνώσεις εκτελέστηκαν είτε με στόχο συγκεκριμένο ύψος (170 mm ή 70 mm), είτε με στόχο τον συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών 205. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές ύψους που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών, όπως αυτές καταγράφηκαν από τη συσκευή συμπύκνωσης.

4.4 Δοκιμή προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμών

Στο πλαίσιο του εργαστηριακού πειράματος πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας συμπυκνωμένων δοκιμών ασφαλτομίγματος (προδιαγραφή EN 12697-6). Σύμφωνα την προδιαγραφή, ο προσδιορισμός της φαινόμενης πυκνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- (α) φαινόμενη πυκνότητα – ξηρή (για δοκίμια με πολύ κλειστή επιφάνεια)
- (β) φαινόμενη πυκνότητα – με διαβρεγμένη επιφάνεια (SSD) (για δοκίμια με κλειστή επιφάνεια)
- (γ) φαινόμενη πυκνότητα – δοκίμια σφραγισμένα (για δοκίμια με ανοικτή επιφάνεια ή επιφάνεια με χονδρόκοκκα αδρανή)
- (δ) φαινόμενη πυκνότητα από τις διαστάσεις (για δοκίμια με κανονικές επιφάνειες και απλά γεωμετρικά σχήματα, π.χ. τετράγωνα, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, κυλινδρικά).

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε η δεύτερη διαδικασία, διότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη γυροσκοπική συσκευή συμπύκνωσης είναι δοκίμια με κλειστή επιφάνεια, δηλαδή η φαινόμενη πυκνότητα μετρήθηκε με τη μέθοδο της διαβρεγμένης επιφάνειας (SSD), η οποία περιγράφεται ακολούθως:

Αρχή της δοκιμής: Η φαινόμενη πυκνότητα ενός άθικτου συμπυκνωμένου δοκιμίου ασφαλτομίγματος καθορίζεται από τη μάζα του δοκιμίου και από τον όγκο του. Η μάζα του δοκιμίου λήφθηκε ζυγίζοντάς το σε ξηρή κατάσταση στον αέρα. Στον SSD τρόπο που εφαρμόστηκε, το δοκίμιο πρώτα βυθίστηκε σε νερό και κατόπιν εξαλείφθηκε η υγρασία από την επιφάνειά του με απορροφητικό ύφασμα.

Με δεδομένα, ότι το νερό μεταβάλλει την πυκνότητά του με τη θερμοκρασία και η πυκνότητα του νερού στους 25⁰ C είναι 997,1 Kgr/m³, σε κάθε δοκιμή μετρήθηκε η θερμοκρασία του νερού και η πυκνότητά του υπολογίστηκε από τη σχέση (997,1 X K) Kgr/m³, όπου ο συντελεστής K λαμβανόταν από τον πίνακα 4.2. της παραγράφου 4.2.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε ζυγός, ακρίβειας ±0,1 gr, με ικανότητα να ζυγίσει οποιοδήποτε δοκίμιο εργαστηριακής συσκευής συμπύκνωσης στον αέρα ή μέσα στο νερό (το δοκίμιο παρέμεινε στο νερό μέσα σε καλάθι δεμένο στο ζυγό) και θερμομέτρο ακρίβειας ±1,0 °C.

Προετοιμασία του δοκιμίου: Τα δοκίμια ήταν καθαρά, βουρτσίστηκαν ή πλύθηκαν αν αυτό ήταν απαραίτητο. Επίσης διασφαλίστηκε ότι ήταν ξηρά, με σταθερή μάζα, είτε διότι παρέμειναν σε ξηρό περιβάλλον μετά τη συμπύκνωση, είτε διότι εξαλείφθηκε η υγρασία σε φούρνο με θερμοκρασία έως 45⁰ C, αν προέρχονταν από πυρηνοληψία ή κοπή. Σταθερή μάζα θεωρείται εκείνη η οποία σε ζυγίσεις μεταξύ 6 ωρών η μεταβολή της είναι μικρότερη από 0,1%.

Διαδικασία της δοκιμής: Ακολουθώντας τη μέθοδο μέτρησης της φαινόμενης πυκνότητας με διαβρεγμένη επιφάνεια (SSD), βρήκαμε τη μάζα του ξηρού δοκιμίου (m₁). Όλες οι μάζες μετρήθηκαν σε γραμμάρια με ακρίβεια 0,1 gr. Καθορίσαμε την πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία της δοκιμής με ακρίβεια 0,1Kgr/m³ (ρ_w) σύμφωνα με τον πίνακα 4.2. της παραγράφου 4.2. Βυθίσαμε το δοκίμιο στο λουτρό με το νερό στη γνωστή θερμοκρασία της δοκιμής (σχήμα 4.7.).



Σχήμα 4.7. Δοκιμή προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας – υγρή μέθοδος

Δόθηκε η δυνατότητα, το νερό να εμποτίσει τόσο το δοκίμιο ώστε να μην αλλάζει η μάζα του. Γενικά, ο χρόνος βύθισης ήταν 30 λεπτά. Όσο διάστημα το δοκίμιο βρισκόταν μέσα στο λουτρό, γινόταν κυκλοφορία του νερού, ώστε να διατηρείται ομοιόμορφη η θερμοκρασία. Βρήκαμε τη μάζα του διαβρεγμένου δοκιμίου όταν αυτό ήταν βυθισμένο (m_2), προσέχοντας να μην υπάρχουν φυσαλίδες αέρα στην επιφάνεια του δοκιμίου ή φυσαλίδες να φεύγουν από το δοκίμιο όταν αυτό ζυγιζόταν. Βγάλαμε το δοκίμιο από το νερό, διώξαμε την υγρασία από την επιφάνειά του, σκουπίζοντας αμέσως με την πετσέτα. Η πετσέτα ήταν τόσο απορροφητική, ώστε η υγρασία της επιφάνειας του δοκιμίου να φεύγει, χωρίς να απορροφάται η υγρασία από τα εσωτερικά κενά.

Βρήκαμε τη μάζα του δοκιμίου με τη σκουπισμένη επιφάνεια (σχήμα 4.8), αμέσως μετά το σκούπισμα (m_3).



Σχήμα 4.8. Ζύγιση δοκιμίου μετά το σκούπισμα της επιφάνειάς του

Υπολογισμοί: Για τη μέθοδο μέτρησης της φαινόμενης πυκνότητας με διαβρεγμένη επιφάνεια (SSD): Υπολογίστηκε η SSD φαινόμενη πυκνότητα του δοκιμίου (ρ_{bssd}) με ακρίβεια $1\text{kg}/\text{m}^3$ από τη σχέση:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w \quad (4.4)$$

όπου

ρ_{bssd} ήταν η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα (σε Kg/m^3)

m_1 ήταν η μάζα του ξηρού δοκιμίου σε γραμμάρια (gr)

m_2 ήταν η μάζα του δοκιμίου στο νερό σε γραμμάρια (gr)

m_3 ήταν η μάζα του δοκιμίου με σκουπισμένη επιφάνεια σε γραμμάρια

ρ_w ήταν η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία της δοκιμής (σε Kgr/m^3)

Δόθηκε προσοχή, ώστε η μάζα m_1 του ξηρού δοκιμίου να είναι απαλλαγμένη υγρασίας, όπως αναφέρθηκε στην προετοιμασία του δοκιμίου.

Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η δοκιμή προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας με διαβρεγμένη επιφάνεια (SSD) εκτελέστηκε για κάθε δοκίμιο, τόσο στην αρχική του κατάσταση μετά τη συμπίκνωσή του, όσο και διαδοχικά μετά την πυρηνοληψία και την κοπή (σχήμα 4.8.).

4.5 Επανυπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής συμπίκνωσης με χρήση της γυροσκοπικής συσκευής, όπως ήδη αναφέρθηκε, καταγράφεται από τη συσκευή η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου για κάθε περιστροφή, σχηματίζοντας έτσι την καμπύλη της συμπίκνωσης. Χρησιμοποιώντας τη δοθείσα τη δοθείσα μάζα και το ύψος που καταγράφηκε, υπολογίζεται η πυκνότητα του δοκιμίου, καθώς και το ποσοστό κενών. Η πυκνότητα όμως που υπολογίζεται από τη συσκευή δεν είναι η πραγματική. Έτσι, απαιτείται ο προσδιορισμός της πραγματικής πυκνότητας, με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας. Καθώς απαιτείται να γνωρίζουμε την πυκνότητα (ή το ποσοστό κενών) που αντιστοιχεί σε κάθε αριθμό περιστροφών, ιδίως όταν η συμπίκνωση φθάνει μέχρι ένα συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών, προκύπτει η ανάγκη επανυπολογισμού (ή ανάστροφου υπολογισμού, backcalulation), της πυκνότητας του δοκιμίου, με βάση την προσδιορισθείσα πειραματικά τιμή της φαινόμενης πυκνότητας, για κάθε ζητούμενο αριθμό περιστροφών.

Ο υπόψη επανυπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας μπορεί να εκτελεστεί:

(α) Σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO TP4, η διορθωμένη σχετική πυκνότητα δοκιμίου (ως ποσοστό της μέγιστης θεωρητικής πυκνότητας του ασφαλτομίγματος) σε οποιοδήποτε αριθμό x περιστροφών (C_x), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_x = \frac{G_{mb} \cdot h_m \cdot 100}{G_{mm} \cdot h_x} \quad (4.5)$$

όπου

G_{mb} : φαινόμενη σχετική πυκνότητα του εξαχθέντος δοκιμίου (σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO T 166)

h_m : ύψος του εξαχθέντος δοκιμίου, σε mm

G_{mm} : μέγιστη ειδική πυκνότητα του μίγματος (σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO T 209)

h_x : ύψος του δοκιμίου στη διάρκεια της συμπύκνωσης, στις x περιστροφές, σε mm.

(β) Σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D6925 (2009), αρχικά προσδιορίζεται η μέγιστη θεωρητική πυκνότητα (G_{mm}) του ασφαλτομίγματος. Εκτελείται η δοκιμή συμπύκνωσης με γυροσκοπική συσκευή, στον αριθμό περιστροφών N_{final} . Λαμβάνεται από τη συσκευή τα ύψη (h_x) που αντιστοιχούν σε τυχαίο αριθμό x περιστροφών, καθώς και το ύψος (h_{final}) του συμπυκνωμένου δοκιμίου και προσδιορίζεται πειραματικά η φαινόμενη πυκνότητα του συμπυκνωμένου δοκιμίου ($G_{mbfinal}$). Η φαινόμενη πυκνότητα (G_{mbx}), που αντιστοιχεί σε x περιστροφές, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{mbx} = G_{mbfinal} \cdot \frac{h_{final}}{h_x} \quad (4.6)$$

και η σχετική πυκνότητα ($\%G_{mm}$) του συμπυκνωμένου δοκιμίου στις x περιστροφές υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\%G_{mm} = \frac{G_{mbx} \cdot 100}{G_{mm}} \quad (4.7)$$

όπου:

$G_{mbfinal}$: φαινόμενη σχετική πυκνότητα δοκιμίου στις N_{final} περιστροφές

h_{final} : ύψος δοκιμίου στις N_{final} περιστροφές, (σε mm)

G_{mm} : μέγιστη ειδική πυκνότητα του χαλαρού ασφαλτομίγματος

h_x : ύψος δοκιμίου στις x περιστροφές, (σε mm)

Όπως αναφέρθηκε, στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής διερεύνησης συμπυκνώθηκαν δοκίμια με αριθμό περιστροφών $N_{final} = 205$. Από τις καταγραφές των υψών κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης, καθώς και τη μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε ο επανυπολογισμός της φαινόμενης πυκνότητας σύμφωνα με τη σχέση (4.6). Σημειώνεται ότι ο επανυπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί και βάσει των σχέσεων (4.5) ή (4.7), χωρίς ωστόσο να υπάρχει διαφοροποίηση του αποτελέσματος.

5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Γενικά

Λόγω της μεγάλης ποσότητας των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν και της ανάγκης διάκρισης μεταξύ τους, σε όλες τις φάσεις των δοκιμών και αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε κωδικοποίηση, η οποία παρουσιάζεται ακολούθως:

Οι δοκιμές συμπίκνωσης με τη γυροσκοπική συσκευή εκτελέστηκαν για τρεις εσωτερικές γωνίες, $0,82^\circ$, $1,16^\circ$ και $1,45^\circ$. Χρησιμοποιήθηκαν μήτρες δύο διαμέτρων, η μία διάμετρος ήταν 150mm κι η άλλη 100 mm. Ο κωδικός ονομασίας των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν με τη γυροσκοπική συσκευή περιλαμβάνει πρώτα τον τύπο του μίγματος, M1 για το περισσότερο χονδρόκοκκο μίγμα και M2 για το λιγότερο χονδρόκοκκο. Ακολουθεί η διάμετρος του δοκιμίου σε εκατοστά και κατόπιν το ύψος του δοκιμίου σε εκατοστά. Έπειτα αναγράφεται η γωνία περιστροφής, κωδικός E για την εσωτερική γωνία $0,82^\circ$, U για την εσωτερική γωνία $1,16^\circ$ και G για την εσωτερική γωνία $1,45^\circ$. Ακολουθεί ο κωδικός της θερμοκρασίας συμπίκνωσης, L για τη θερμοκρασία των 135° C και H για τη θερμοκρασία των 150° C. Τέλος, αν έχει ληφθεί πυρήνας από δοκίμιο διαμέτρου 150mm ή έχει κοπεί η βάση και η κορυφή δοκιμίου διαμέτρου 100mm αναγράφεται η ένδειξη C, ενώ αν κοπεί η βάση και η κορυφή πυρήνα, τότε αναγράφεται η ένδειξη CC.

Έτσι, για παράδειγμα, ο κωδικός M2/10-7/GH/C, αντιστοιχεί σε πυρήνα διαμέτρου 100 mm που λήφθηκε από δοκίμιο διαμέτρου 150 mm και ύψους 70 mm, και που συμπυκνώθηκε υπό γωνία $1,45^\circ$ C και θερμοκρασία 150° C. Ο κωδικός M2/10-5/GH/CC, αντιστοιχεί σε πυρήνα διαμέτρου 100 mm που λήφθηκε από το ίδιο δοκίμιο και αποκόπηκε η κορυφή και η βάση του κατά 10 mm. (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1. Δοκίμιο διαμέτρου 150mm και ύψους 70mm και αντίστοιχοι πυρήνες

Ακόμη για παράδειγμα, ο κωδικός M1/10-15/UL/C, αντιστοιχεί σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm και αρχικού ύψους 170 mm, από το οποίο αποκόπηκε η κορυφή και η βάση του κατά 10 mm και που συμπυκνώθηκε υπό γωνία $1,16^\circ$ C και θερμοκρασία 135° C (σχ.5.2).



Σχήμα 5.2. Δοκίμιο διαμέτρου 100mm και ύψους 170mm και ίδιο δοκίμιο μετά την κοπή

5.2 Ασφαλτόμιγμα M1

5.2.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίκνωσης και προσδιορισμού του ποσοστού κενών, για το ασφαλτόμιγμα M1, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 5.1 και 5.2:

Πίνακας 5.1. Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών μίγματος M1

Κωδικός δοκιμίου	Εσωτερ. Γωνία (°)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Θερμοκρ. Συμπύκν. (°C)	Αριθμός περιστρ. (gyrations)
M1/15-17/EL	0,82	150	170	130	47
M1/10-17/EL	0,82	100	170	138	158
M1/15-7/EL	0,82	150	70	134	82
M1/10-7/EL	0,82	100	70	133	32
M1/15-17/EH	0,82	150	170	150	49
M1/10-17/EH	0,82	100	170	152	185
M1/15-7/EH	0,82	150	70	153	74
M1/10-7/EH	0,82	100	70	145	49
M1-15-17/UL	1,16	150	170	134	28
M1-10-17/UL	1,16	100	170	139	130
M1-15-7/UL	1,16	150	70	138	26
M1-10-7/UL	1,16	100	70	138	31
M1-15-17/UH	1,16	150	170	154	24
M1-10-17/UH	1,16	100	170	151	67
M1-15-7/UH	1,16	150	70	152	32
M1-10-7/UH	1,16	100	70	151	26
M1-15-17/GL	1,45	150	170	139	14
M1-10-17/GL	1,45	100	170	139	53
M1-15-7/GL	1,45	150	70	139	29
M1-10-7/GL	1,45	100	70	139	21
M1-15-17/GH	1,45	150	170	148	14
M1-10-17/GH	1,45	100	170	149	46
M1-15-7/GH	1,45	150	70	150	20
M1-10-7/GH	1,45	100	70	151	16

Πίνακας 5.2. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 μετά από πυρηνοληψία και κοπή

Κωδικός αρχικού δοκιμίου	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)	Κωδικός μετά από πυρηνοληψία	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)	Κωδικός μετά από κοπή	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)
M1/15-17/EL	7,0	M1/10-17/EL/C	6,4	M1/10-15/EL/CC	5,4
M1/10-17/EL	6,0			M1/10-15/EL/C	6,2
M1/15-7/EL	6,1	M1/10-7/EL/C	5,8	M1/10-5/EL/CC	4,8
M1/10-7/EL	5,1			M1/10-5/EL/C	3,7
M1/15-17/EH	7,0	M1/10-17/EH/C	6,5	M1/10-15/EH/CC	5,4
M1/10-17/EH	5,5			M1/10-15/EH2/C	5,5
M1/15-7/EH	6,4	M1/10-7/EH/C	6,3	M1/10-5/EH/CC	5,3
M1/10-7/EH	6,9			M1/10-5/EH/C	5,7
M1/15-17/UL	5,2	M1-10-17/UL/C	4,6	M1/10-15/UL/CC	4,1
M1/10-17/UL	4,2			M1/10-15/UL/C	4,2
M1/15-7/UL	5,9	M1/10-7/UL/C	5,4	M1/10-5/UL/CC	4,4
M1/10-7/UL	6,7			M1/10-5/UL/C	5,2
M1/15-17/UH	7,2	M1/10-17/UH/C	6,4	M1/10-15/UH/CC	5,8
M1/10-17/UH	4,2			M1/10-15/UH/C	4,2
M1/15-7/UH	4,5	M1/10-7/UH/C	4,0	M1/10-5/UH/CC	3,1
M1/10-7/UH	5,4			M1/10-5/UH/C	4,4
M1/15-17/GL	6,4	M1/10-17/GL/C	5,6	M1/10-15/GL/CC	5,0
M1/10-17/GL	4,4			M1/10-15/GL/C	4,5
M1/15-7/GL	4,3	M1/10-7/GL/C	3,9	M1/10-5/GL/CC	3,1
M1/10-7/GL	4,2			M1/10-5/GL/C	3,7
M1/15-17/GH	5,9	M1/10-17/GH/C	5,0	M1/10-15/GH/CC	4,5
M1/10-17/GH	4,6			M1/10-15/GH/C	4,6
M1/15-7/GH	4,9	M1/10-7/GH/C	4,5	M1/10-5/GH/CC	3,9
M1/10-7/GH	5,3			M1/10-5/GH/C	4,5

Ο πίνακας 5.1 δείχνει τις παραμέτρους συμπίκνωσης για κάθε δοκίμιο, ενώ ο πίνακας 5.2 τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών υπολογισμού του ποσοστού κενών, τόσο στην αρχική κατάσταση όσο και μετά την πυρηνοληψία και κοπή.

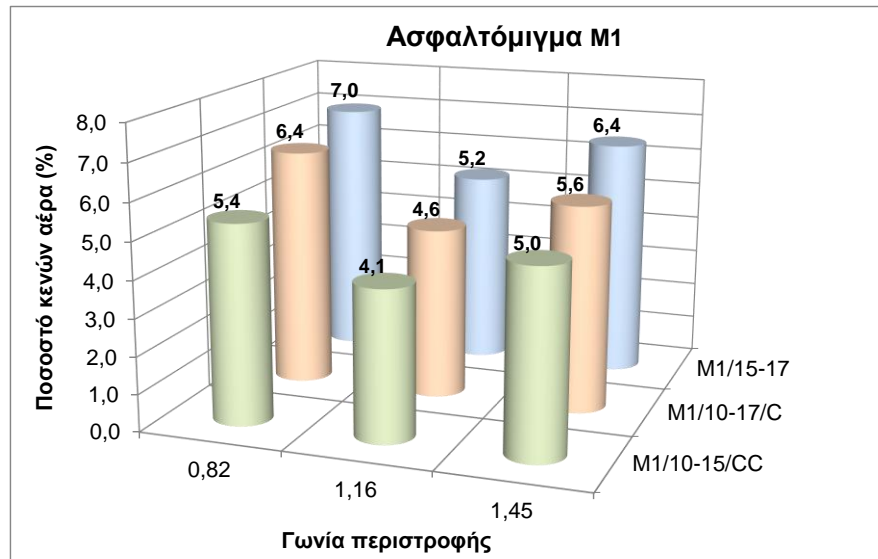
5.2.2 Επεξεργασία στοιχείων εργαστηριακών δεδομένων

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα των δοκιμών για το ασφαλτόμιγμα M1, δημιουργήθηκαν διαγράμματα, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της λήψης πυρήνων διαμέτρου 100 mm από δοκίμια διαμέτρου 150 mm, της

κοπής της βάσης και της κορυφής των δοκιμίων κατά 1 cm, της μεταβολής της εσωτερικής γωνίας, της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και των διαστάσεων των δοκιμίων.

5.2.2.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμίων

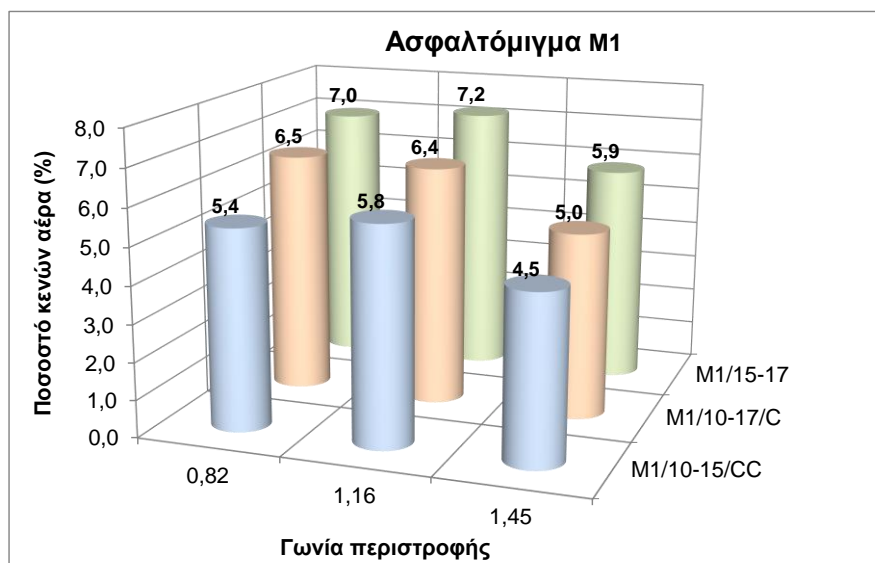
Ακολουθεί διάγραμμα των ποσοστών κενών δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M1, ανά διάμετρο, ύψος και θερμοκρασία συμπίκνωσης.



Σχήμα 5.3. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C

Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,6%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,6%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,5%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰ μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,6% (σχήμα 5.3).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,6%, 1,1% και 1,4%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

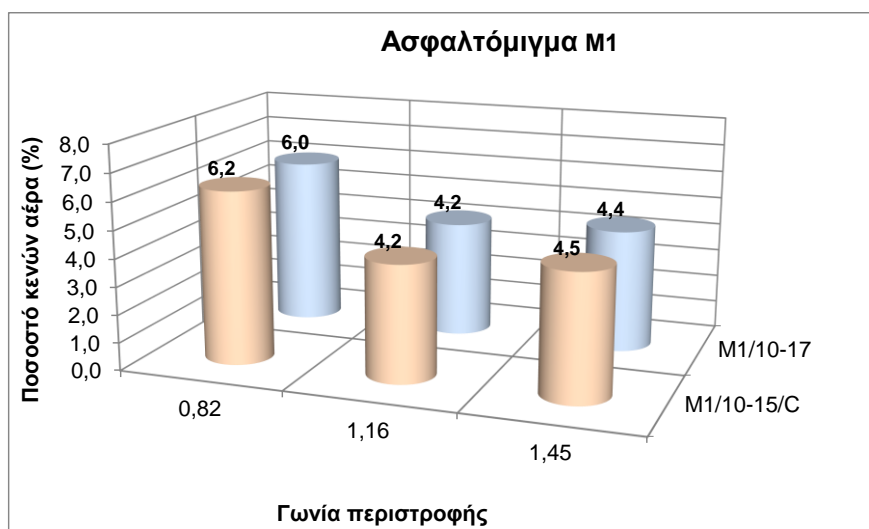


Σχήμα 5.4. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C, και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,5%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,9%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,6%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,9%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,5%. (σχήμα 5.4).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,6%, 1,4% και 1,4%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

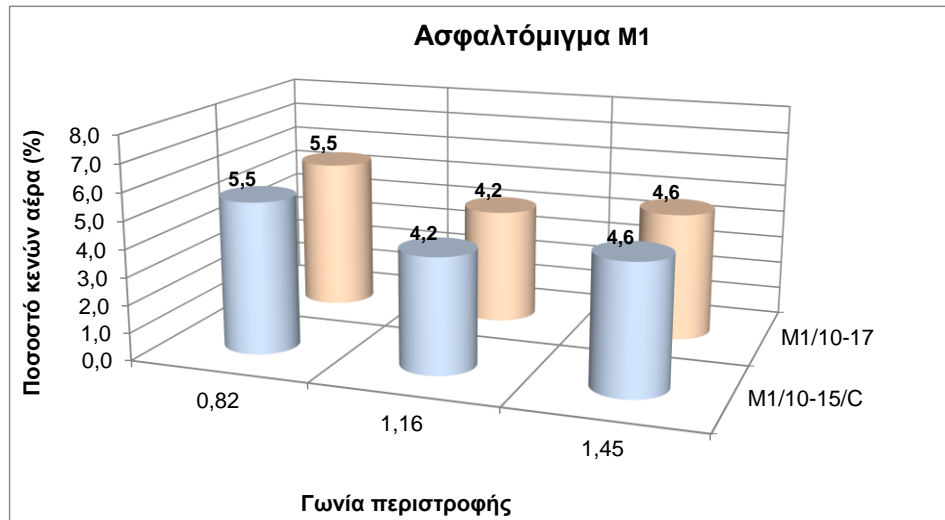
Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας $0,82^{\circ}$, θερμοκρασίας συμπύκνωσης 135°C , μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 0,2%. Σε δοκίμια ίδιων διαστάσεων, ίδιας θερμοκρασίας συμπύκνωσης και εσωτερικών γωνιών $1,16^{\circ}$ και $1,45^{\circ}$, μετά την κοπή των βάσεων και των κορυφών κατά 10 mm δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή του ποσοστού κενών. (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπύκνωσης 135°C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 135°C , μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, αυξάνεται κατά 0,2%, 0% και 0,1%, για τις γωνίες $0,82^{\circ}$, $1,16^{\circ}$ και $1,45^{\circ}$ αντίστοιχα.

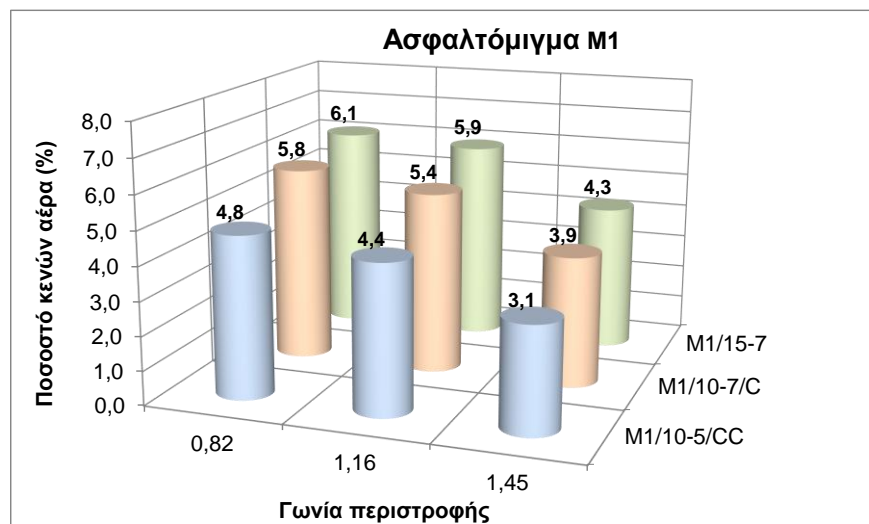
Στα δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασίας συμπύκνωσης 150°C , για όλες τις εσωτερικές γωνίες $0,82^{\circ}$, $1,16^{\circ}$ και $1,45^{\circ}$, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή του ποσοστού κενών. (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Δηλαδή, από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm δεν παρουσιάζεται μεταβολή.

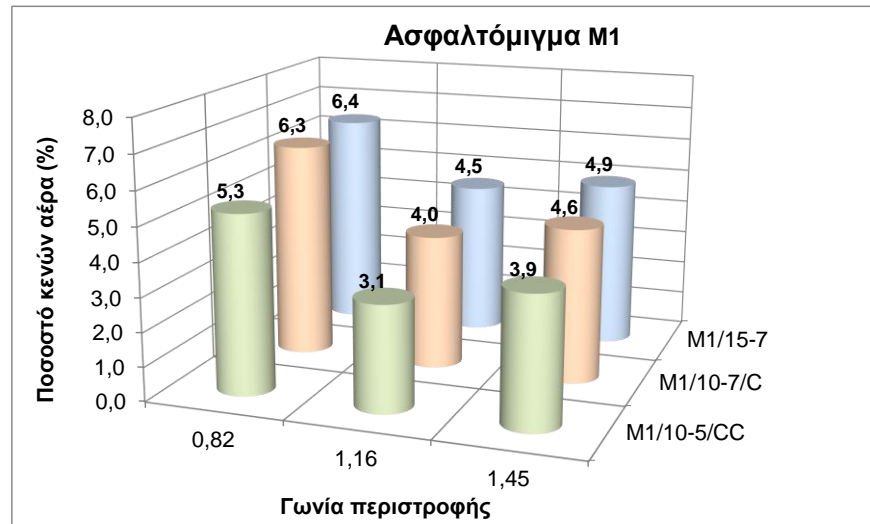
Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,3%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,6%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,4%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8% (σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,3%, 1,5% και 1,2%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

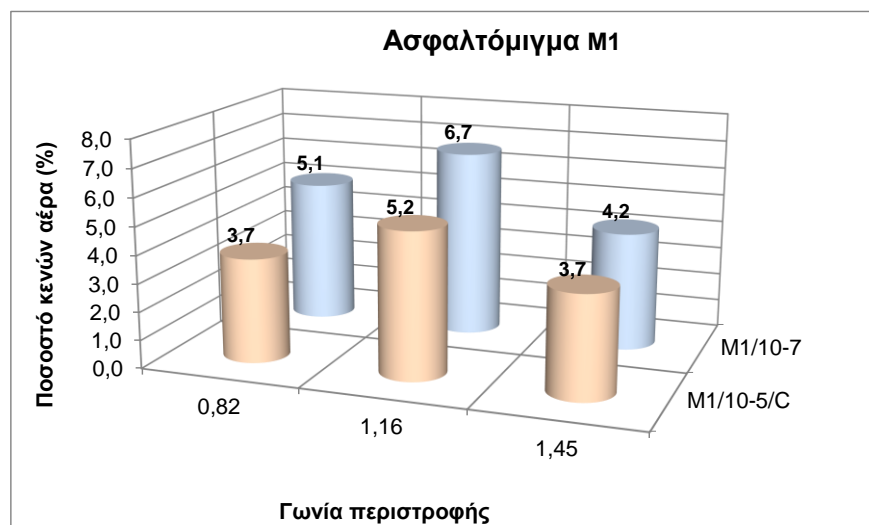
Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,1%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,5%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,9%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά τη λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,3%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,7% (σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,1%, 1,4% και 1,0%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

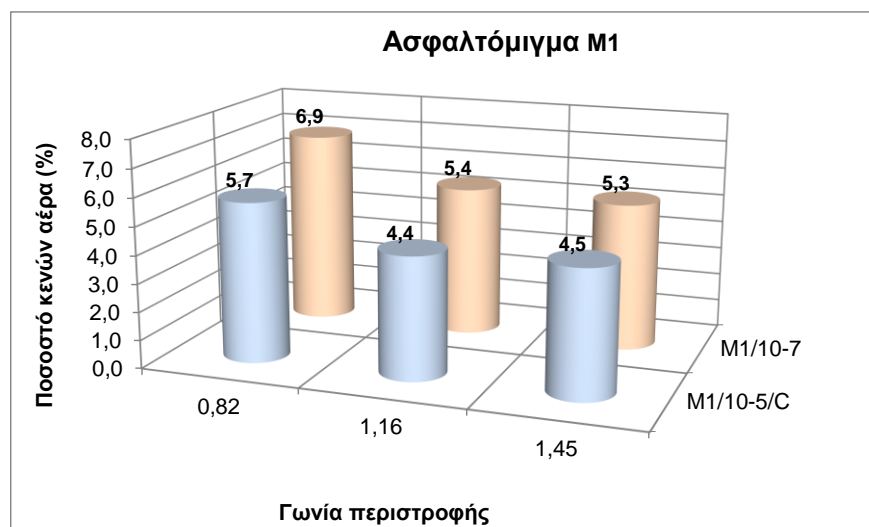
Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,4%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,5%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,5% (σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, μειώνεται κατά 1,4%, 1,5% και 0,5%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,2%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8% (σχ. 5.10).



Σχήμα 5.10. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, μειώνεται κατά 1,2%, 1,0% και 0,8%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

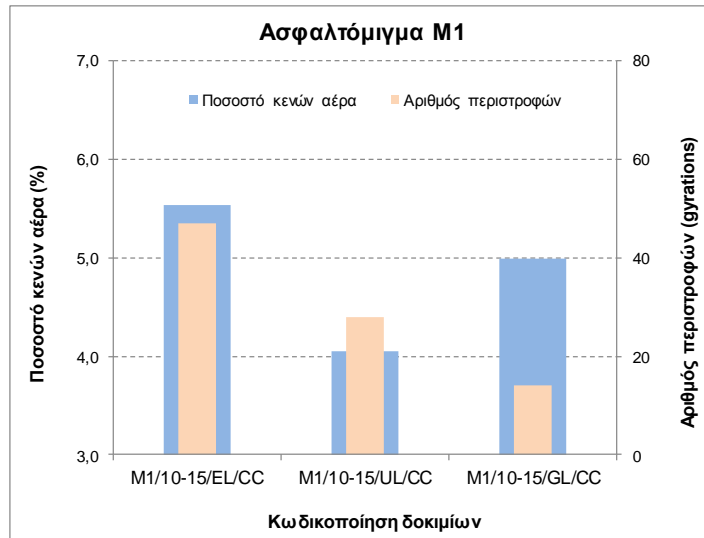
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μέση μείωση του ποσοστού κενών όλων των δοκιμίων ασφαλτομίγματος M1, μετά από πυρηνοληψία για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, είναι 1,0%, 0,99% και 0,8%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

5.2.2.2 Γωνία περιστροφής

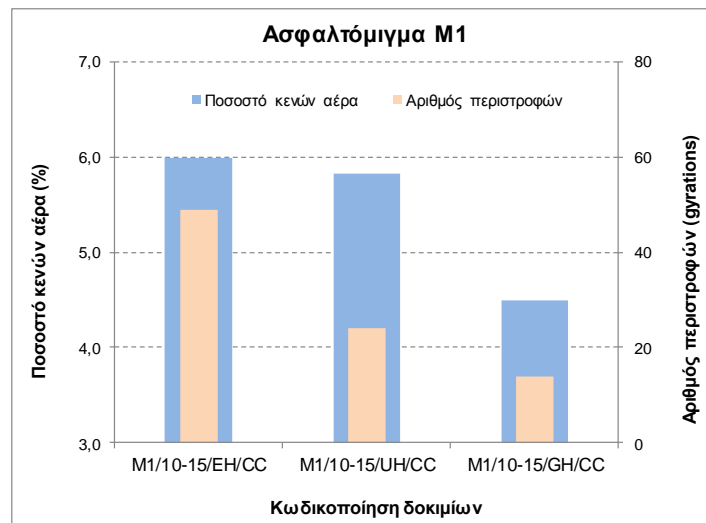
Ακολουθούν τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμίων M1, όπου κάθε φορά στην ίδια διάμετρο και ύψος δοκιμίου και για τη ίδια θερμοκρασία συμπίκνωσης, μεταβάλλεται η εσωτερική γωνία περιστροφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις τρεις εσωτερικές γωνίες περιστροφής 0,82⁰=E, 1,16⁰=U και 1,45⁰=G, όσον αφορά στα αποτελέσματα των ποσοστών κενών που αντιστοιχούν στα δοκίμια μετά από την πυρηνοληψία και την κοπή τους (ονομάζονται πυρήνες).

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 19, ενώ το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα

μειώνεται κατά 1,5% και καθώς η γωνία αυξάνει από $1,16^{\circ}$ σε $1,45^{\circ}$, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 14 και το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα αυξάνεται κατά 0,9% (σχήμα 5.11).

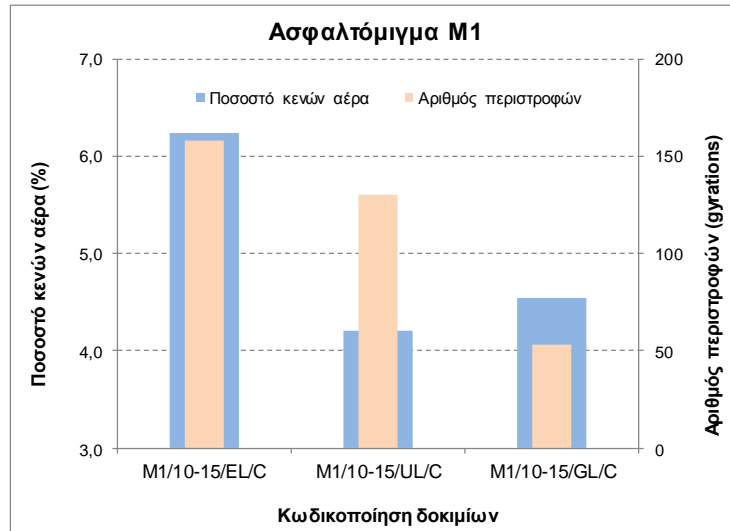


Σχήμα 5.11. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135°C

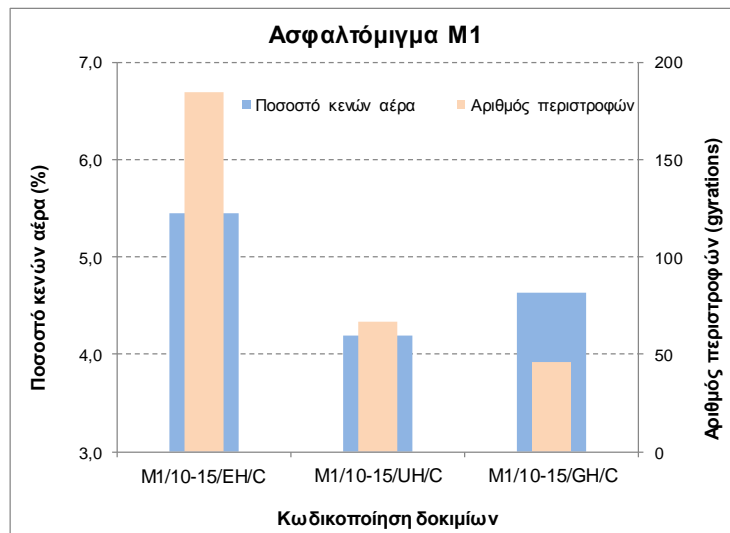


Σχήμα 5.12. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας 150°C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150°C , καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από $0,82^{\circ}$ σε $1,16^{\circ}$, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 25 και το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα μειώνεται κατά 0,2%. Καθώς η γωνία αυξάνει από $1,16^{\circ}$ σε $1,45^{\circ}$, ο αριθμός των περιστροφών και το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα μειώνονται κατά 10 και κατά 1,3% αντίστοιχα (σχήμα 5.12).

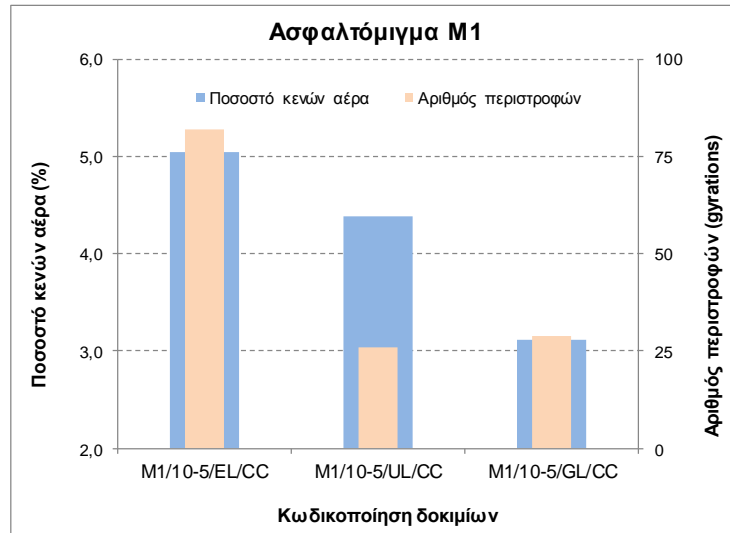


Σχήμα 5.13. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135⁰ C

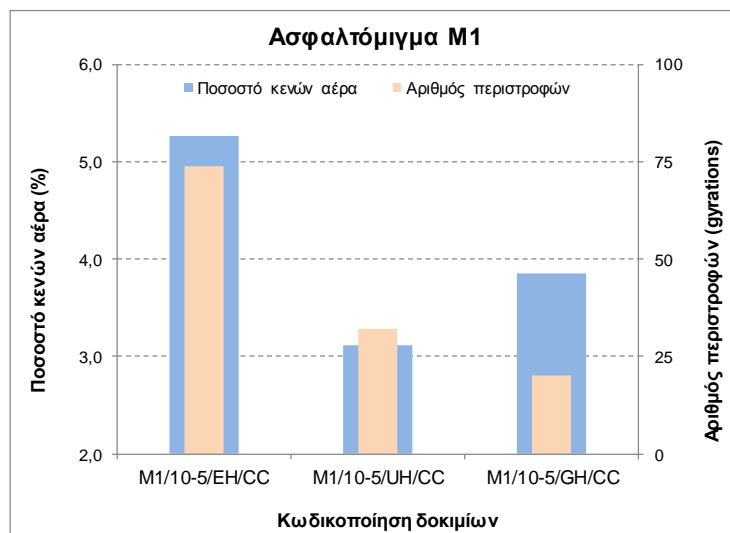


Σχήμα 5.14. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 28 και 118 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 2,0% και 1,3% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 77 και 31 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,3% και 0,5% αντίστοιχα (σχήματα 5.13 και 5.14).

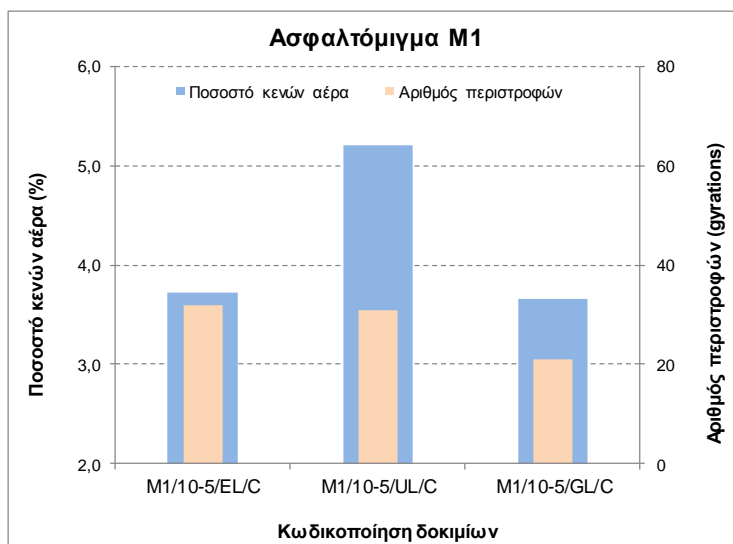


Σχήμα 5.15. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135⁰ C

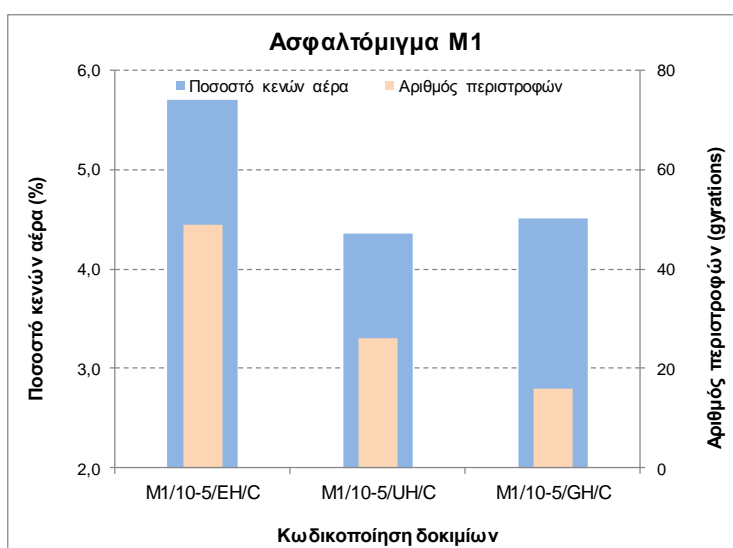


Σχήμα 5.16. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm και θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 56 και 42 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,7% και 2,2%. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 3 και μειώνεται κατά 12 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,3% και 0,7% αντίστοιχα (σχήματα 5.15 και 5.16).



Σχήμα 5.17. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135⁰ C



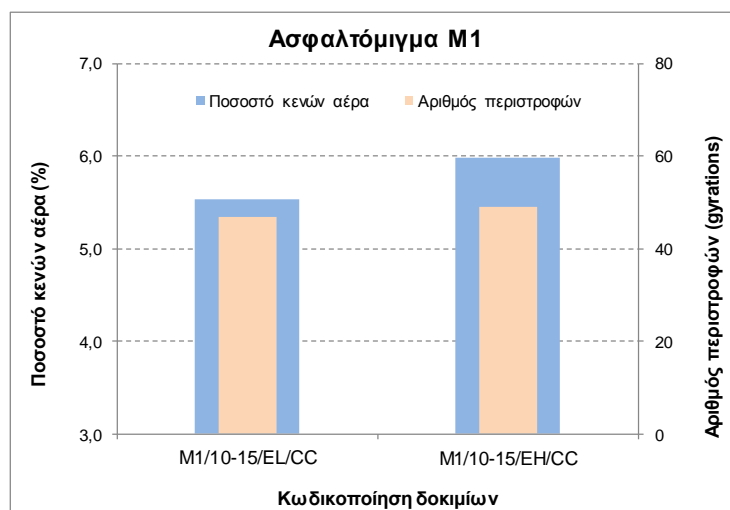
Σχήμα 5.18. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm και θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 1 και 23 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 1,5% και μειώνεται κατά 1,3% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 10 και στις δύο περιπτώσεις, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,6% και αυξάνεται κατά 0,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.17 και 5.18).

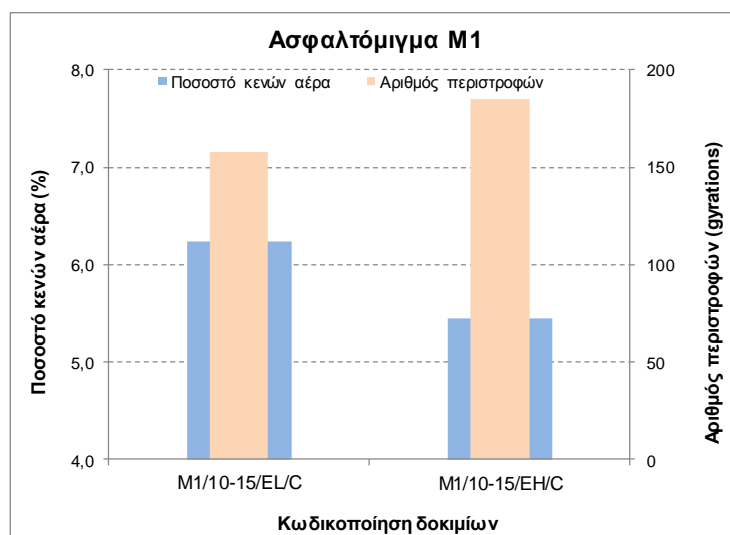
Μετά τα παραπάνω, προκύπτει ότι με αύξηση της γωνίας από $0,82^{\circ}$ σε $1,16^{\circ}$ παρουσιάζεται τάση μείωσης του ποσοστού κενών, ενώ με αύξηση της γωνίας από $1,16^{\circ}$ σε $1,45^{\circ}$ παρουσιάζεται πολύ μικρότερη τάση μείωσης του ποσοστού κενών.

5.2.2.3 Θερμοκρασία συμπίκνωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμίων M1, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, διάμετρο και ύψος δοκιμίου, μεταβάλλεται η θερμοκρασία συμπίκνωσης (από 135°C σε 150°C).

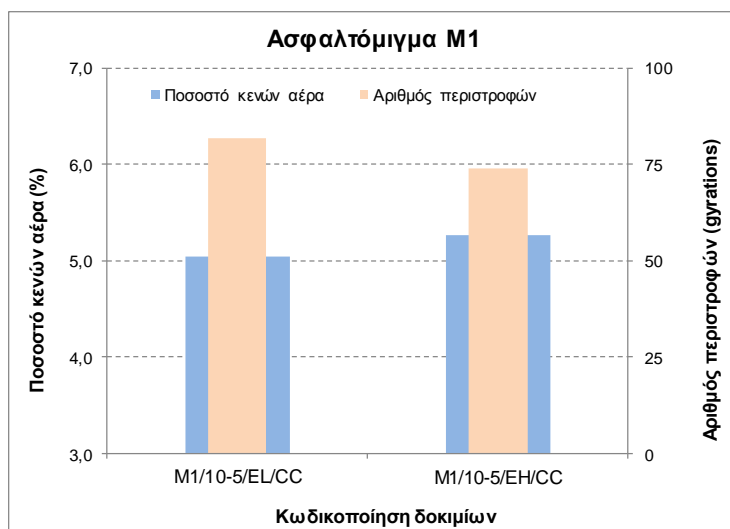


Σχήμα 5.19. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας $0,82^{\circ}$

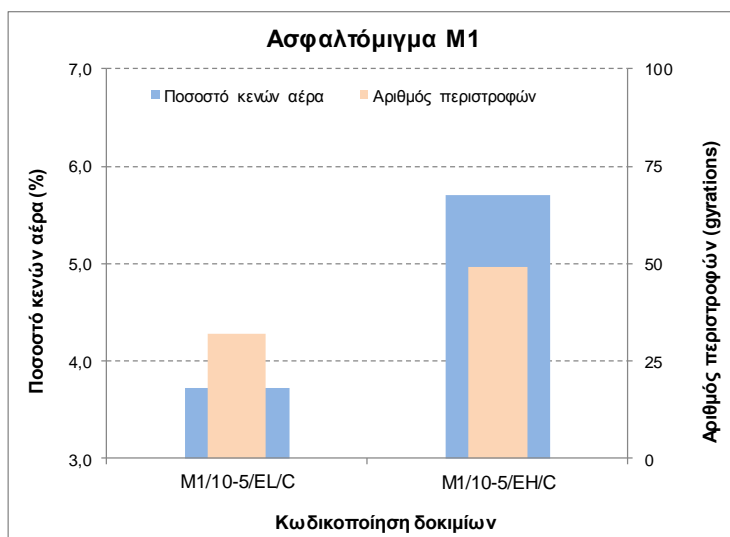


Σχήμα 5.20. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας $0,82^{\circ}$

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm και εσωτερικής γωνίας περιστροφής $0,82^\circ$, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135°C σε 150°C , ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 2 και 27, ενώ το ποσοστό κενών κατά 0,5% και 0,8%, αντίστοιχα (σχήμα 5.19 και 5.20).



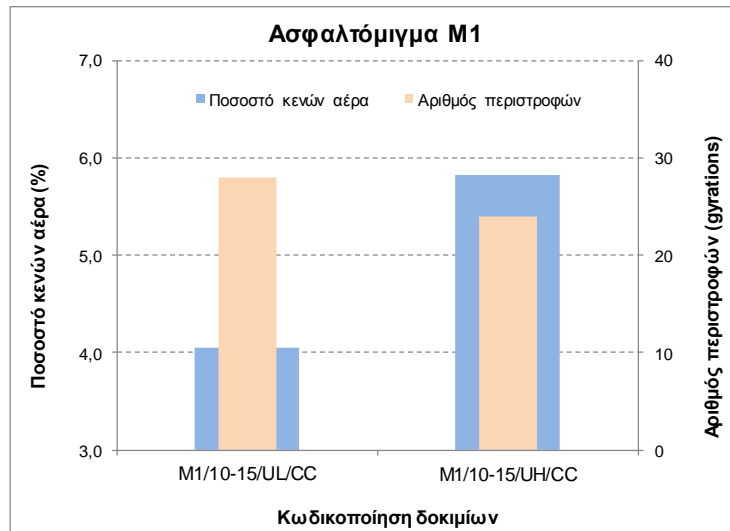
Σχήμα 5.21. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας $0,82^\circ$



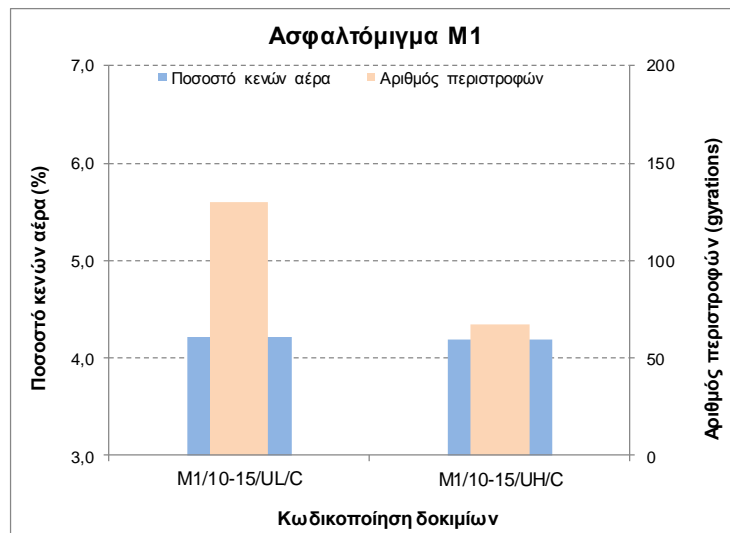
Σχήμα 5.22. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας $0,82^\circ$

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής $0,82^\circ$ και διαμέτρων 150mm και 100mm καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135°C σε 150°C , ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 8 και αυξάνεται κατά 17 αντίστοιχα, ενώ το

ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,2% και 2,0% αντίστοιχα (σχήματα 5.21 και 5.22).

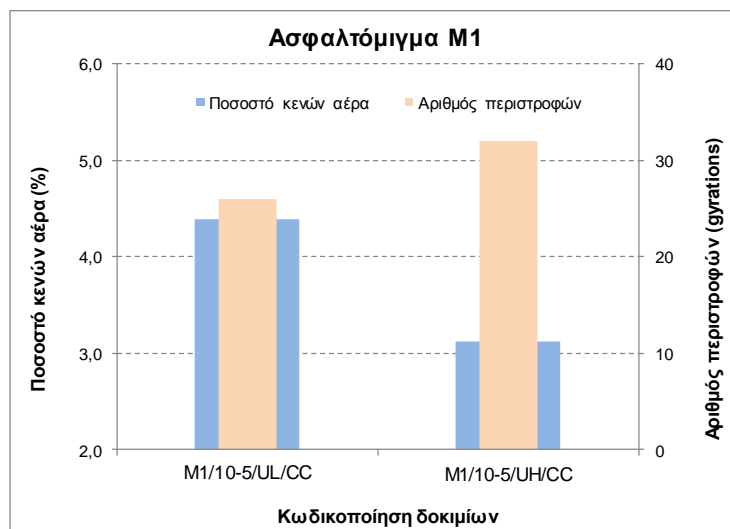


Σχήμα 5.23. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,16⁰

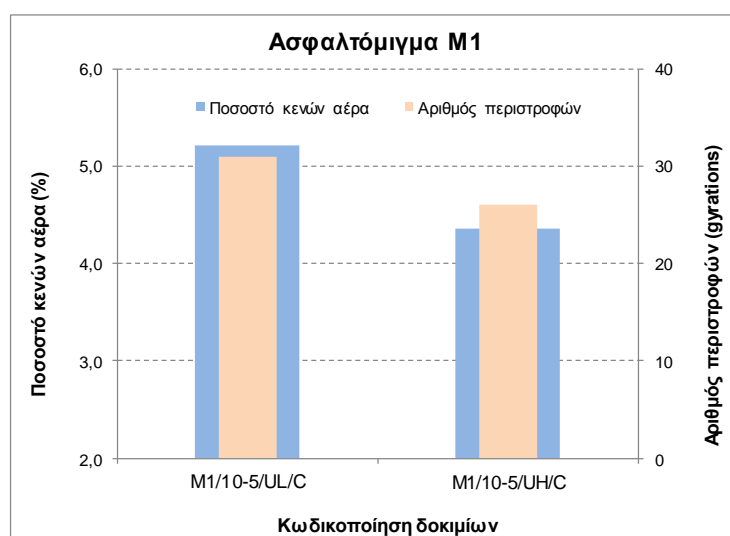


Σχήμα 5.24. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας 1,16⁰

Για δοκίμια ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 4 και κατά 63 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 1,8% και παραμένει αμετάβλητο, αντίστοιχα (σχήματα 5.23 και 5.24).

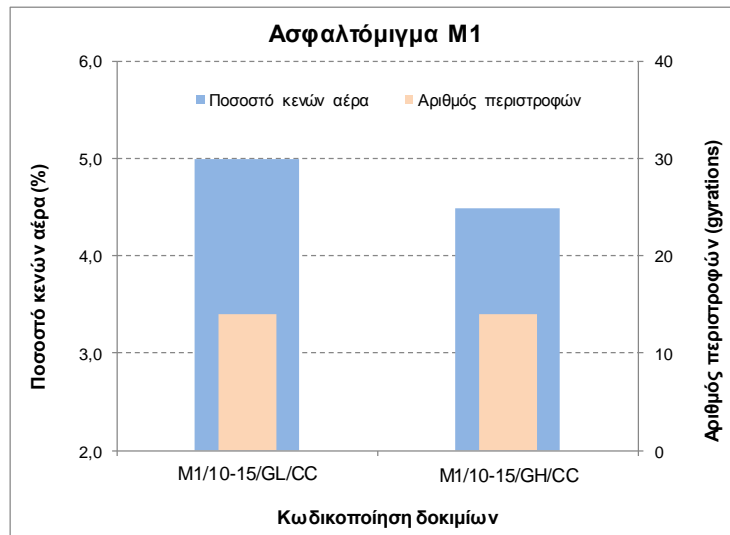


Σχήμα 5.25. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰

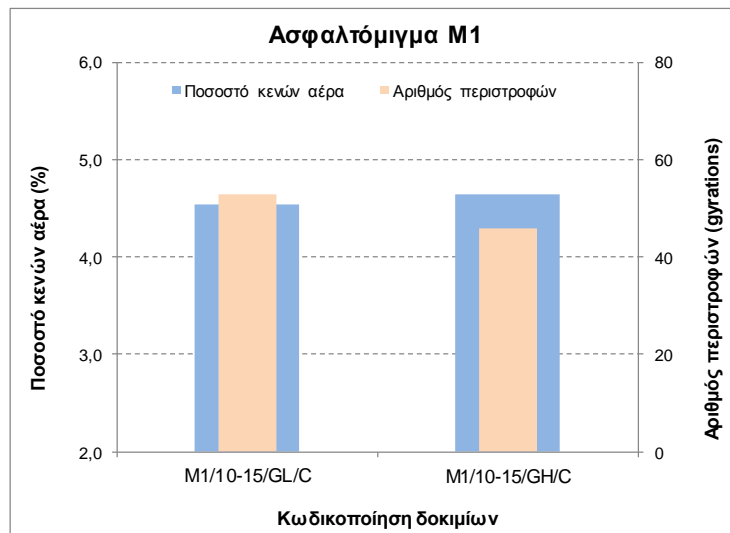


Σχήμα 5.26. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 6 και μειώνεται κατά 5, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,3% και 0,9% αντίστοιχα (σχήματα 5.25 και 5.26).

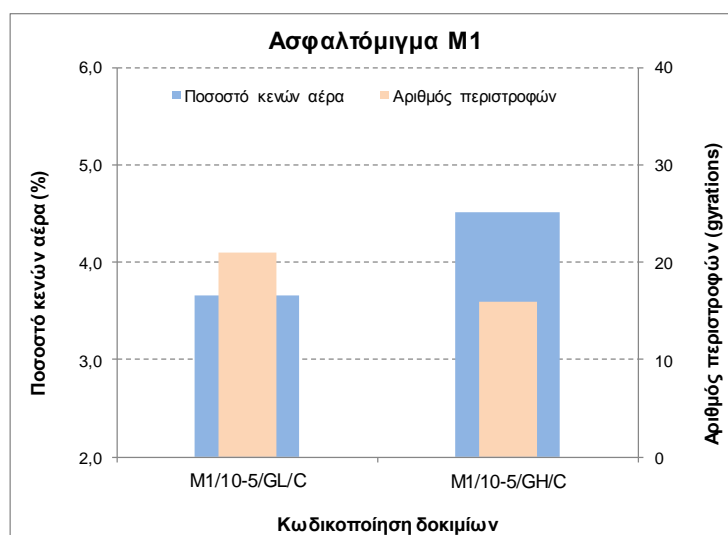


Σχήμα 5.27. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,45⁰



Σχήμα 5.28. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 170mm γωνίας 1,45⁰

Για δοκίμια ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών δεν μεταβάλλεται και μειώνεται κατά 7 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,5% και αυξάνεται κατά 0,1% αντίστοιχα (σχήματα 5.27 και 5.28).



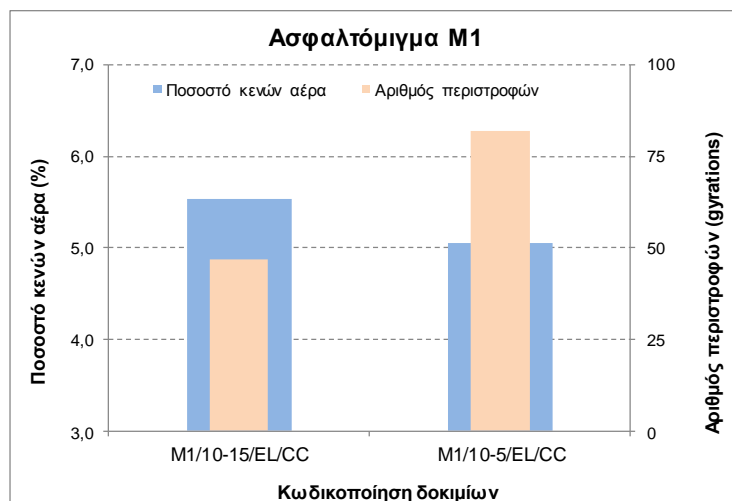
Σχήμα 5.29. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,45°

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm και εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45°, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135° C σε 150° C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 5 και το ποσοστό κενών του δοκιμίου μετά την κοπή αυξάνεται κατά 0,9% (σχήμα 5.29).

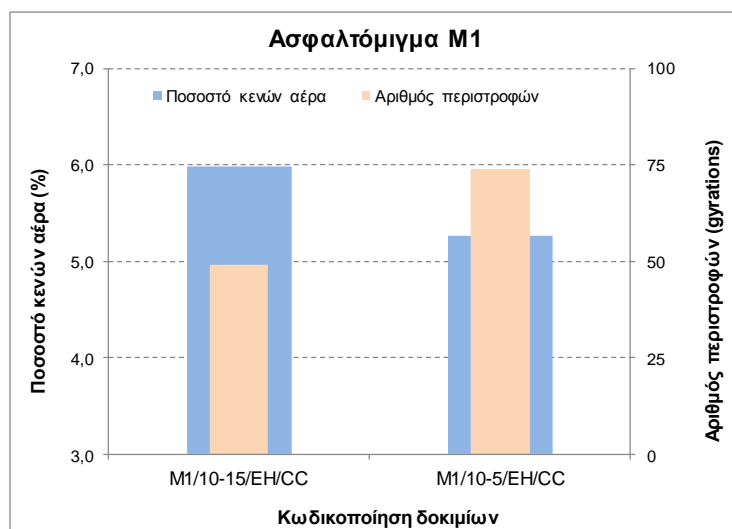
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι δεν παρουσιάζεται σαφής τάση μεταβολής του ποσοστού κενών των δοκιμίων M1, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσής τους μεταβάλλεται από 135° C σε 150° C.

5.2.2.4 Διαστάσεις των δοκιμίων

Ακολουθούν τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M1, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, θερμοκρασία συμπίκνωσης και διάμετρο, μεταβάλλεται το ύψος (από 170 mm σε 70 mm).

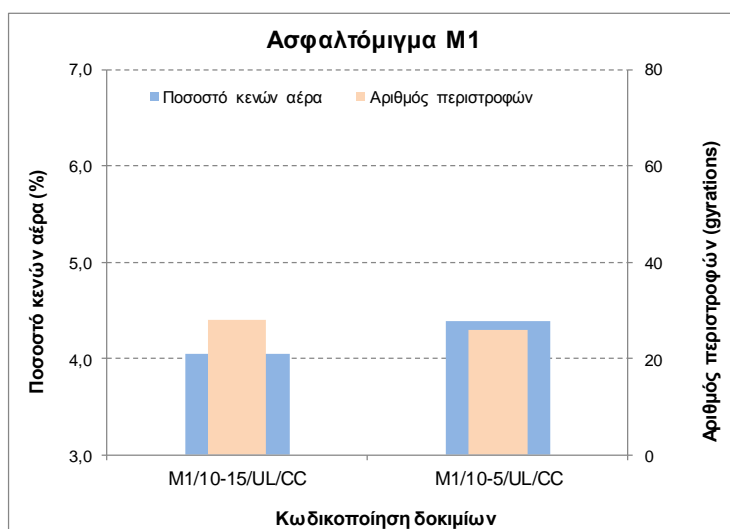


Σχήμα 5.30. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

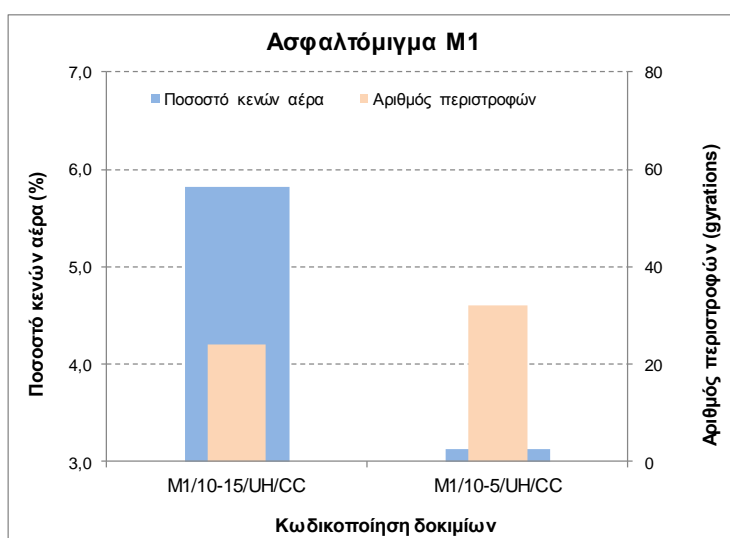


Σχήμα 5.31. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 35 και 25 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,5% και 0,7% αντίστοιχα (σχήματα 5.30 και 5.31).

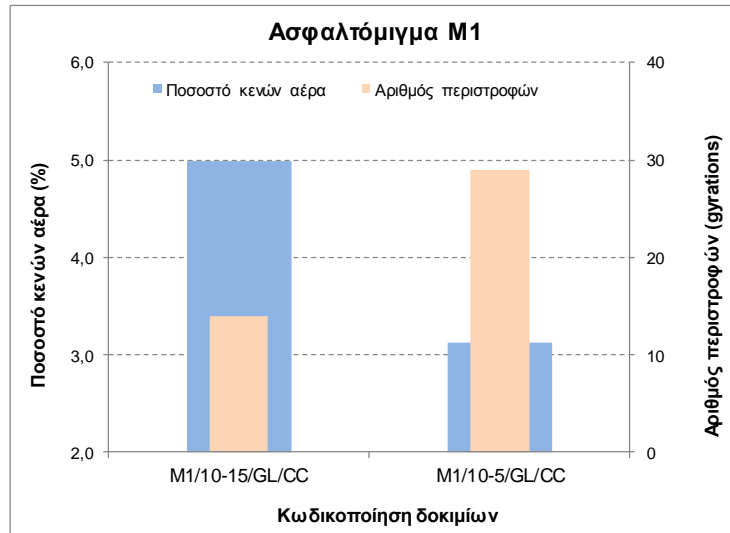


Σχήμα 5.32. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας $1,16^{\circ}$ θερμοκρασίας 135°C

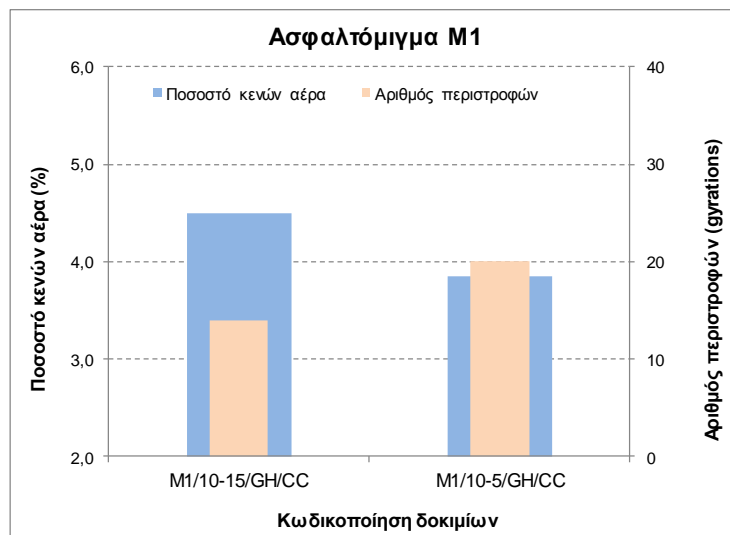


Σχήμα 5.33. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας $1,16^{\circ}$ θερμοκρασίας 150°C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής $1,16^{\circ}$ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135°C και 150°C , καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 2 και αυξάνεται κατά 8 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,3% και μειώνεται κατά 2,7% αντίστοιχα (σχήματα 5.32 και 5.33).

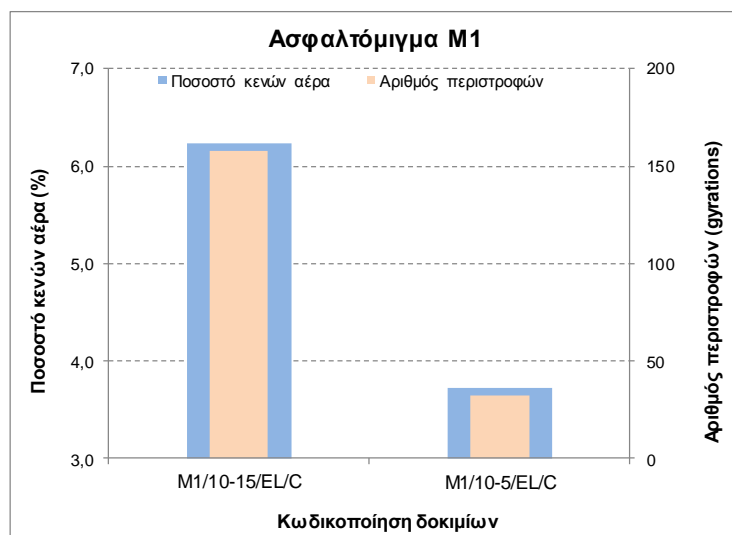


Σχήμα 5.34. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

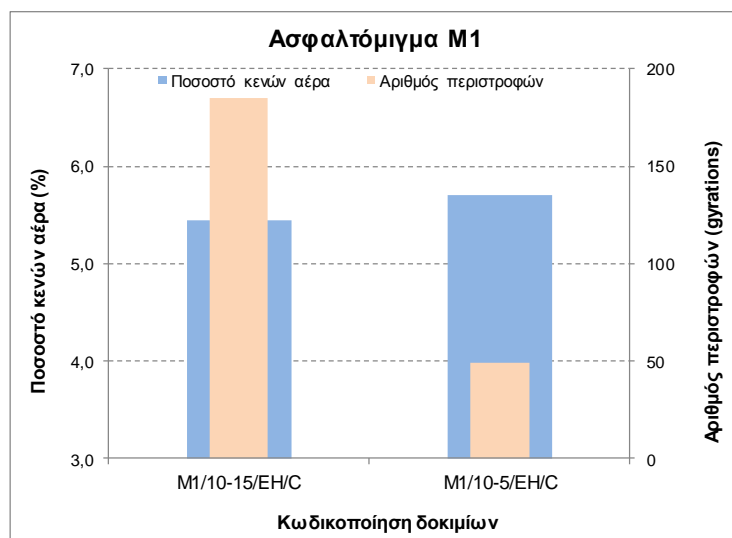


Σχήμα 5.35. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 15 και 6 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,9% και 0,6% αντίστοιχα (σχήματα 5.34 και 5.35). Άρα, συνολικά σε δοκίμια διαμέτρου 150 mm, η παραπάνω μείωση του ύψους επιφέρει μέση μείωση ποσοστού κενών 1,0% και μέση αύξηση αριθμού περιστροφών κατά 15, δηλαδή φαίνεται σαφής τάση μείωσης του ποσοστού κενών.

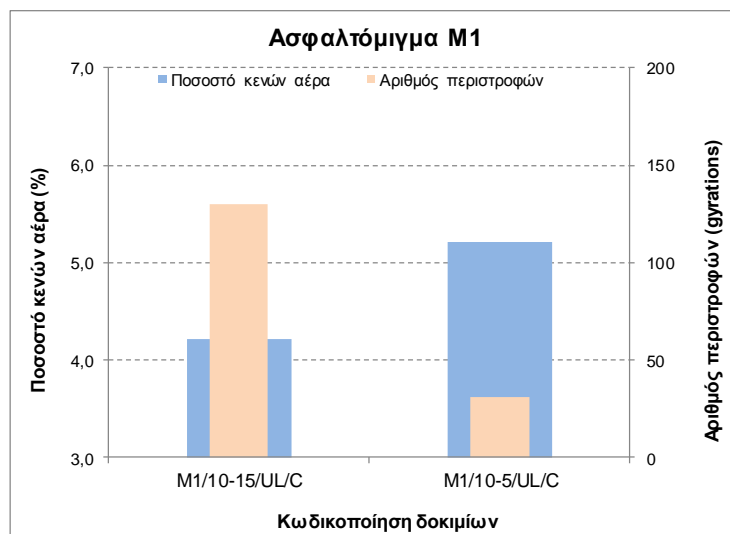


Σχήμα 5.36. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

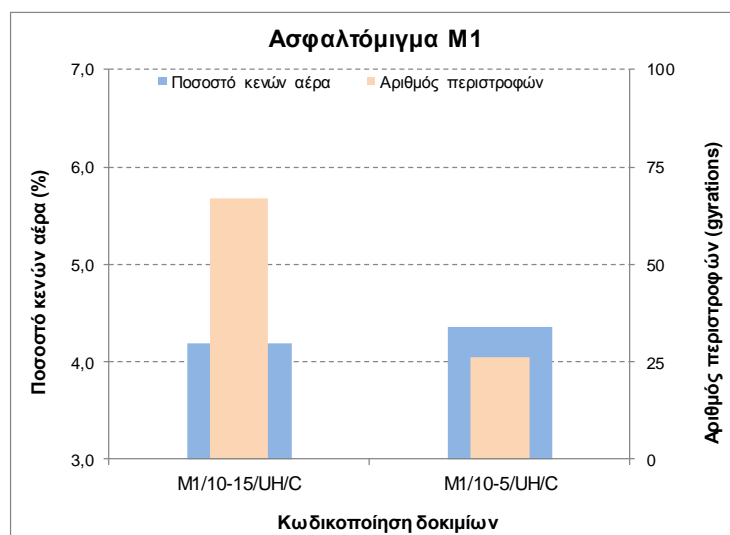


Σχήμα 5.37. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 126 και 136 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή μειώνεται κατά 2,5% και αυξάνεται κατά 0,3% αντίστοιχα (σχήματα 5.36 και 5.37).

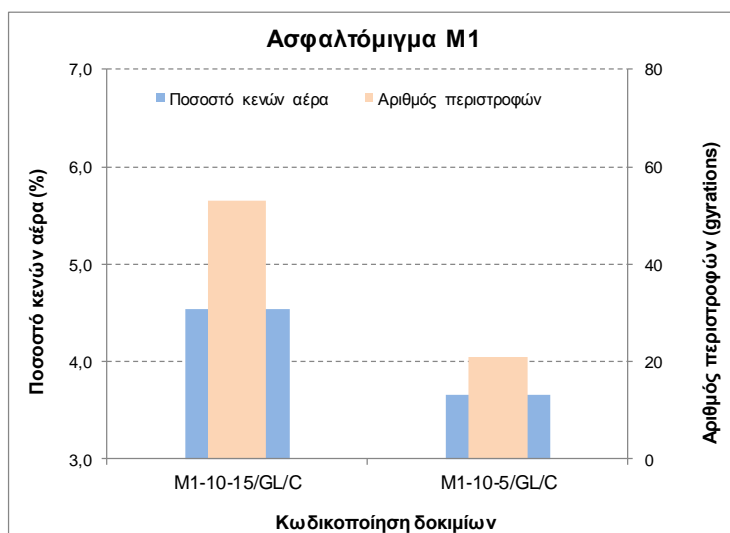


Σχήμα 5.38. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

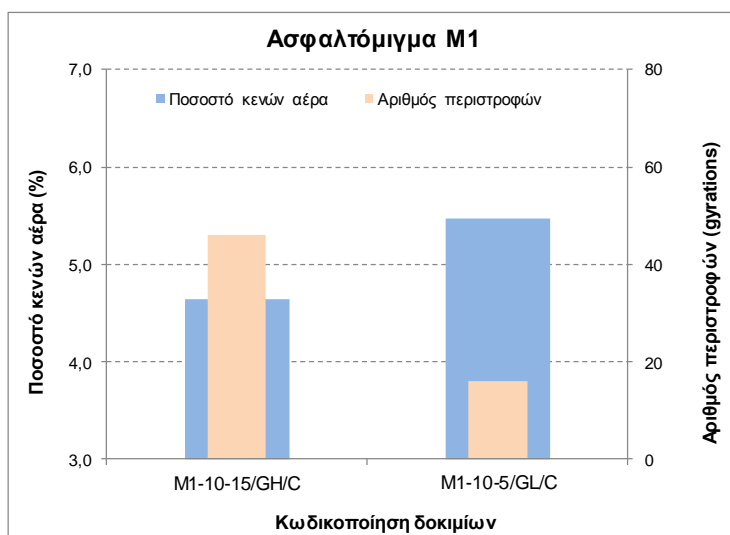


Σχήμα 5.39. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 99 και 41 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή αυξάνεται κατά 1,0% και 0,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.38 και 5.39).



Σχήμα 5.40. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

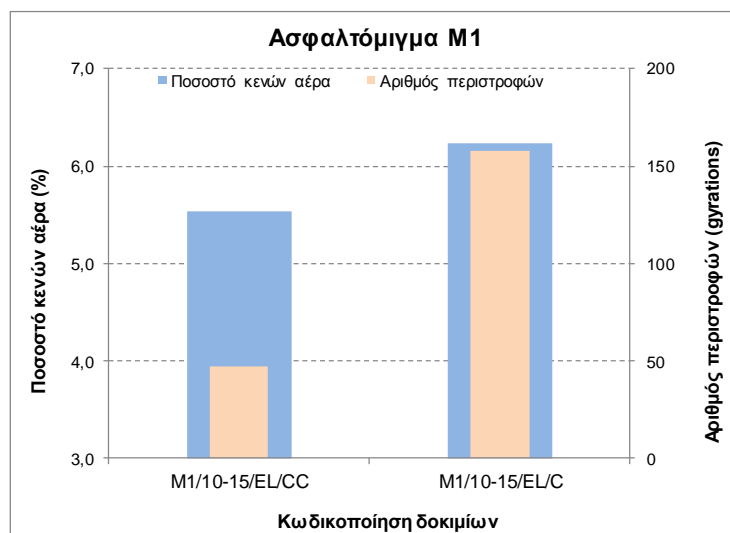


Σχήμα 5.41. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

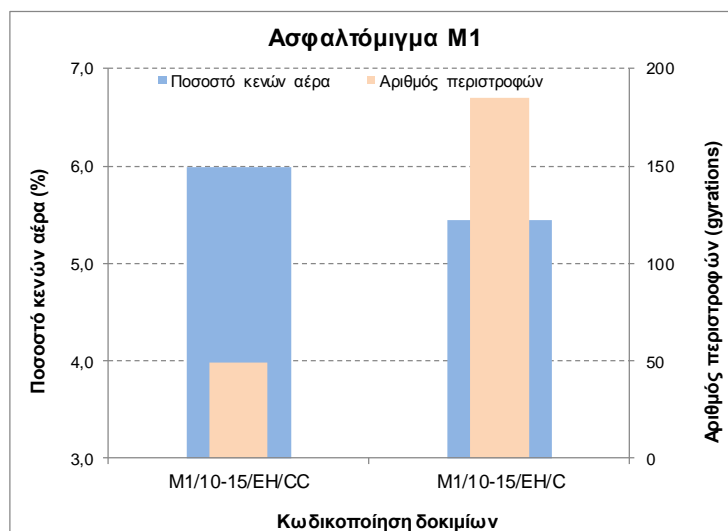
Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 32 και 30 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή μειώνεται κατά 0,9% και 0,8% αντίστοιχα (σχήματα 5.40 και 5.41).

Σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm, η παραπάνω μείωση του ύψους επιφέρει μέση μείωση ποσοστού κενών 0,2% και μέση μείωση αριθμού περιστροφών κατά 77.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμών του ασφαλτομίγματος M1, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, θερμοκρασία συμπίκνωσης και ύψος, μεταβάλλεται η διάμετρος (από 150 mm σε 100 mm).

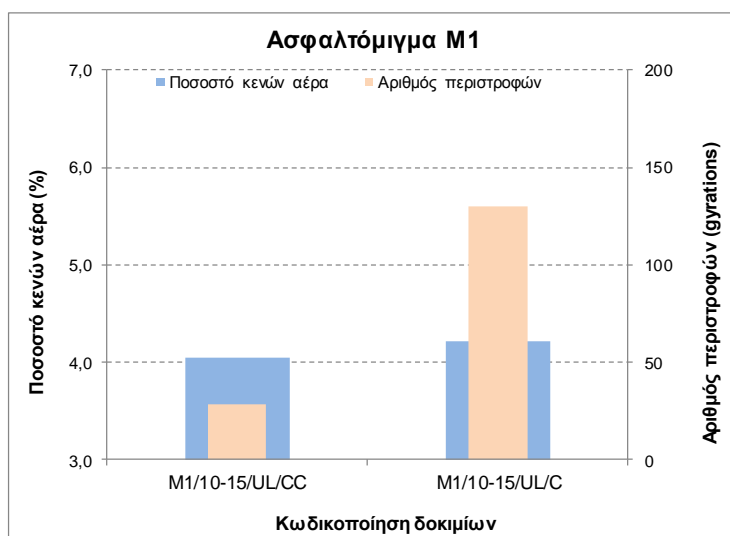


Σχήμα 5.42. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

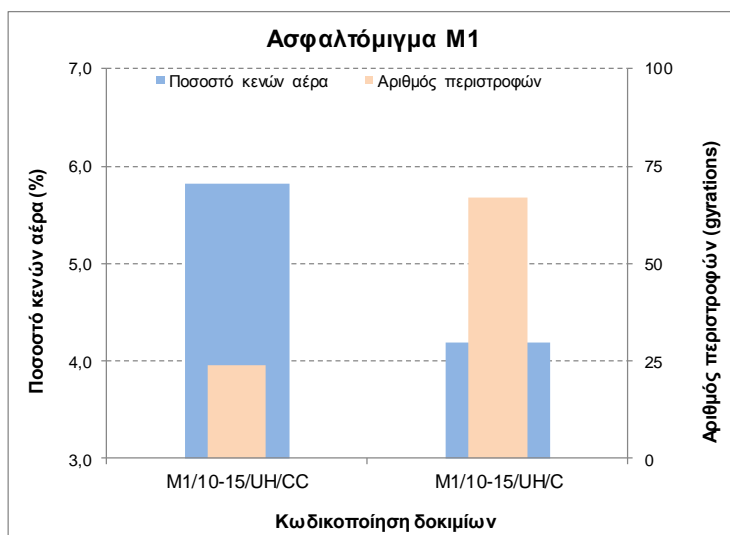


Σχήμα 5.43. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 111 και 136, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,7% και 0,5%, αντίστοιχα (σχήμα 5.42 και 5.43).

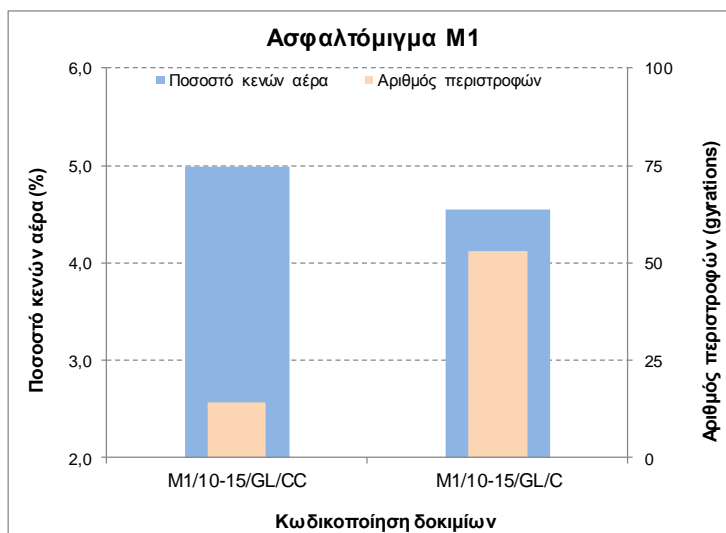


Σχήμα 5.44. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

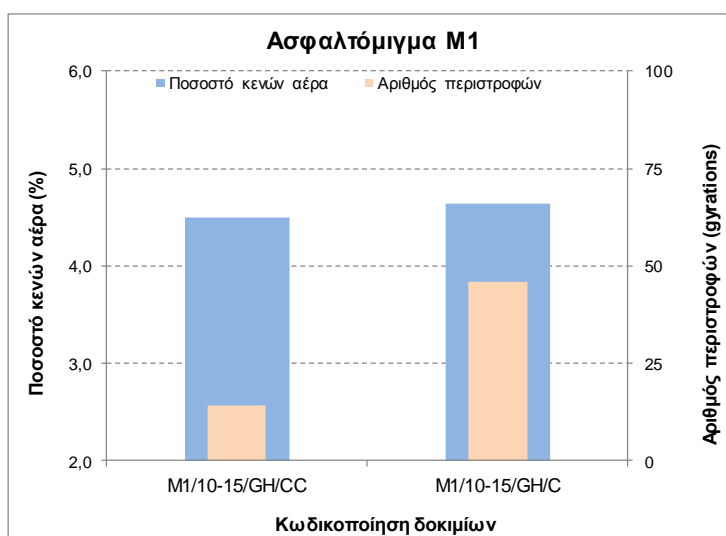


Σχήμα 5.45. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 102 και 43, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,2% και μειώνεται κατά 1,6% αντίστοιχα (σχήματα 5.44 και 5.45).

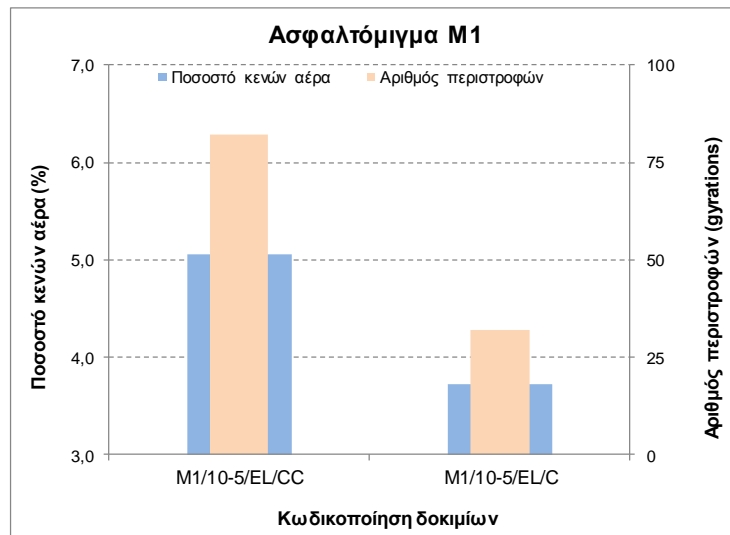


Σχήμα 5.46. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

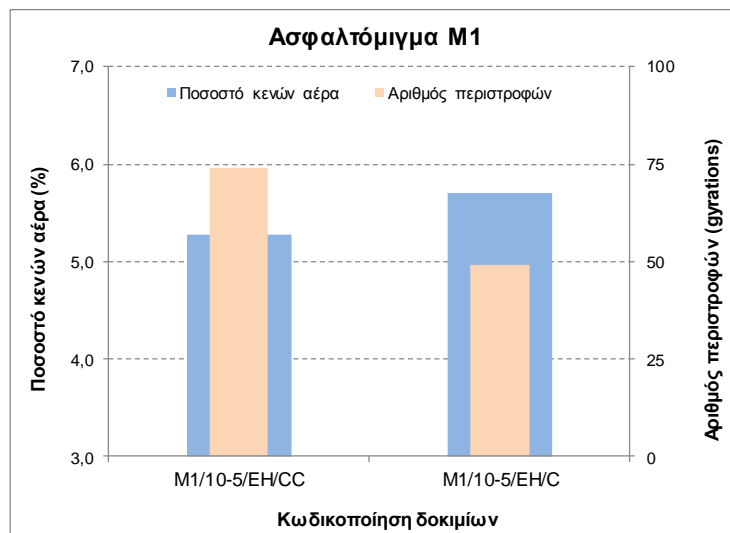


Σχήμα 5.47. Δοκίμια ύψους 170mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 39 και 32 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,4% και αυξάνεται κατά 0,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.46 και 5.47). Άρα, συνολικά, σε δοκίμια ύψους 170 mm, η παραπάνω μείωση της διαμέτρου επιφέρει μέση μείωση ποσοστού κενών 0,3% και μέση αύξηση αριθμού περιστροφών 77, δηλαδή παρουσιάζεται σαφής τάση μείωσης του ποσοστού κενών.

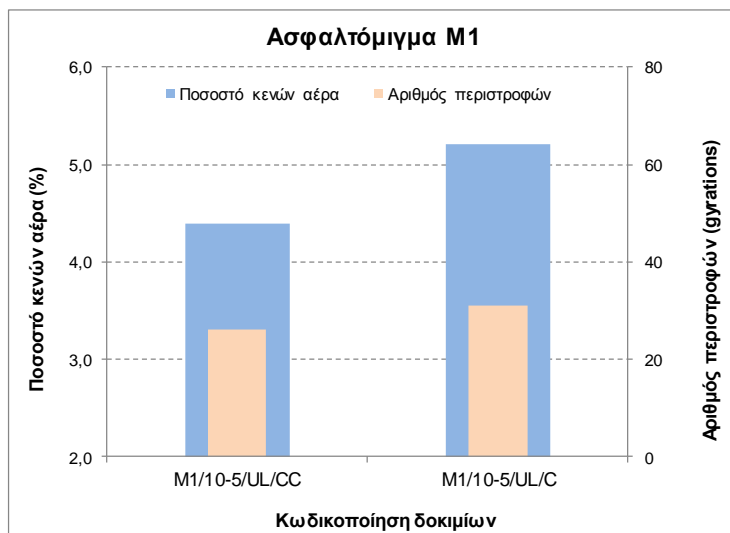


Σχήμα 5.48. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

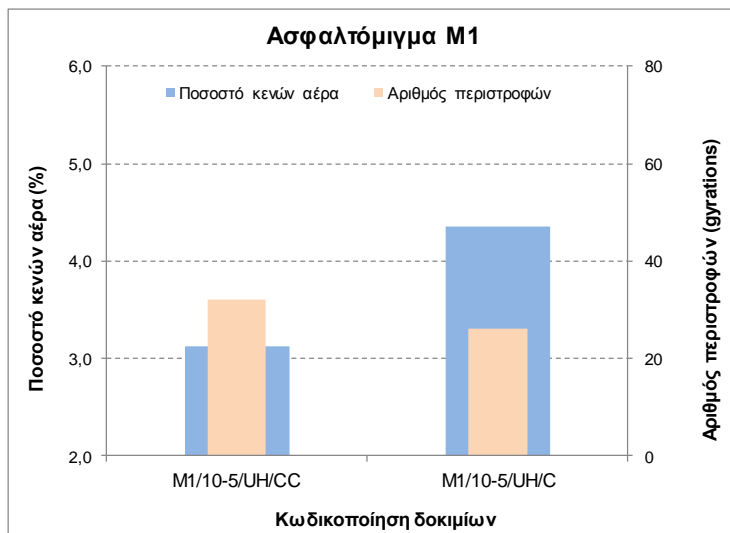


Σχήμα 5.49. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 50 και 25 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,3% και αυξάνεται κατά 0,4% αντίστοιχα (σχήματα 5.48 και 5.49).

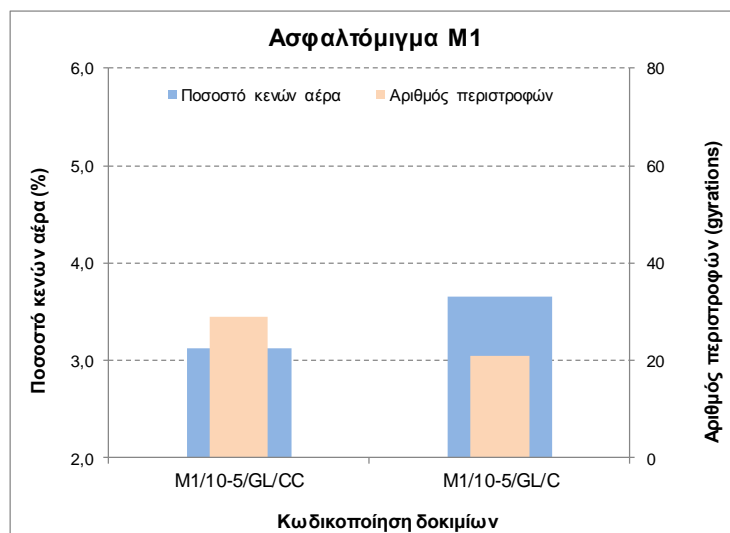


Σχήμα 5.50. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

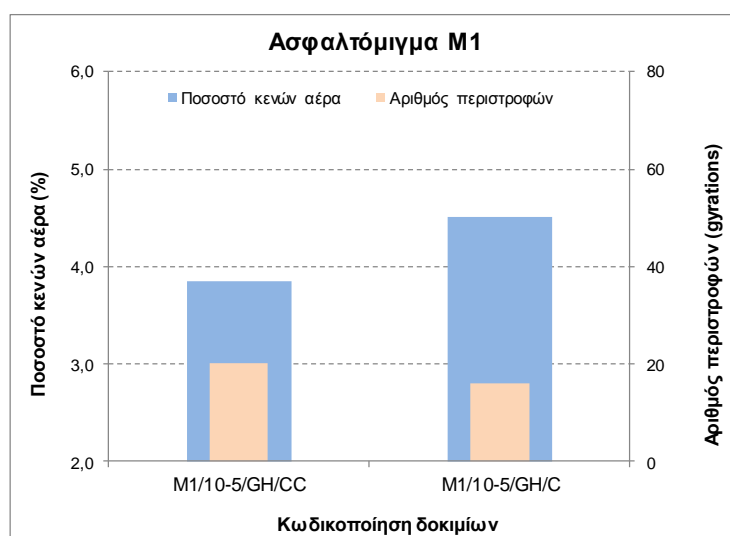


Σχήμα 5.51. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 5 και μειώνεται κατά 6, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,8% και 1,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.50 και 5.51).



Σχήμα 5.52. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C



Σχήμα 5.53. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 8 και 4 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,5% και 0,7% αντίστοιχα (σχήματα 5.52 και 5.53). Άρα, συνολικά, σε δοκίμια ύψους 70 mm, η παραπάνω μείωση της διαμέτρου επιφέρει μέση αύξηση ποσοστού κενών 0,4% και μέση μείωση αριθμού περιστροφών 15, δηλαδή παρουσιάζεται σαφής τάση αύξησης του ποσοστού κενών.

5.2.2.5 Καμπύλες συμπίκνωσης

Από τις καταγραφές των υψών κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, από τη συσκευή, για τα δοκίμια που συμπτυνώθηκαν με αριθμό περιστροφών $N = 205$, καθώς και τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας αυτών των δοκιμίων όπως προσδιορίστηκαν πειραματικά, με βάση τη σχέση (4.6) έγινε επανυπολογισμός της φαινόμενης (διορθωμένης) πυκνότητας σε κάθε αριθμό συγκεκριμένων περιστροφών.

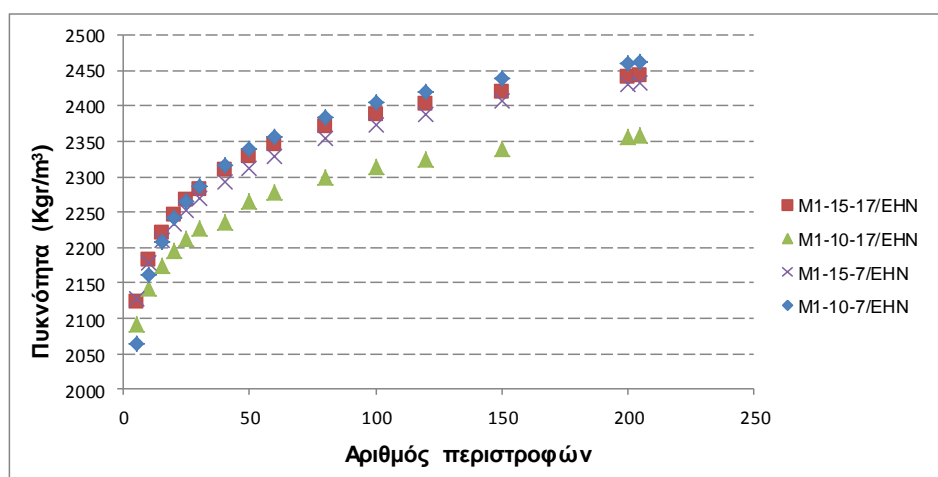
Στους πίνακες 5.3 και 5.4 και στο σχήμα 5.54 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M1, που συμπτυνώθηκαν με εσωτερική γωνία $0,82^\circ$:

Πίνακας 5.3. Επανυπολογισμός πυκνότητας για τα δοκίμια M1/15-17/EHN και M1/10-17/EHN

M1/15-17/EHN			M1/10-17/EHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	184,5	2124	5	191,4	2091
10	179,4	2184	10	186,7	2143
15	176,4	2220	15	184,0	2174
20	174,4	2246	20	182,2	2196
25	172,8	2267	25	180,9	2213
30	171,6	2283	30	179,7	2226
40	169,7	2309	40	179,0	2236
50	168,2	2329	50	176,7	2264
60	167,0	2346	60	175,7	2278
80	165,2	2371	80	174,1	2299
100	163,9	2389	100	173,0	2314
120	162,9	2404	120	172,0	2326
150	161,8	2421	150	171,0	2340
200	160,4	2442	200	169,8	2357
205	160,3	2444	205	169,6	2359

Πίνακας 5.4. Επανυπολογισμός πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/EHN και M1/10-7/EHN

M1/15-7/EHN			M1/10-7/EHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	77,4	2127	5	78,9	2063
10	75,6	2177	10	75,3	2161
15	74,5	2210	15	73,7	2209
20	73,7	2234	20	72,6	2242
25	73,1	2252	25	71,8	2266
30	72,6	2269	30	71,2	2286
40	71,8	2293	40	70,3	2316
50	71,2	2312	50	69,6	2339
60	70,7	2329	60	69,1	2357
80	69,9	2354	80	68,3	2385
100	69,4	2373	100	67,7	2405
120	68,9	2389	120	67,3	2421
150	68,4	2408	150	66,7	2440
200	67,7	2431	200	66,1	2461
205	67,7	2433	205	66,1	2464



Σχήμα 5.54. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M1, γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.54) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

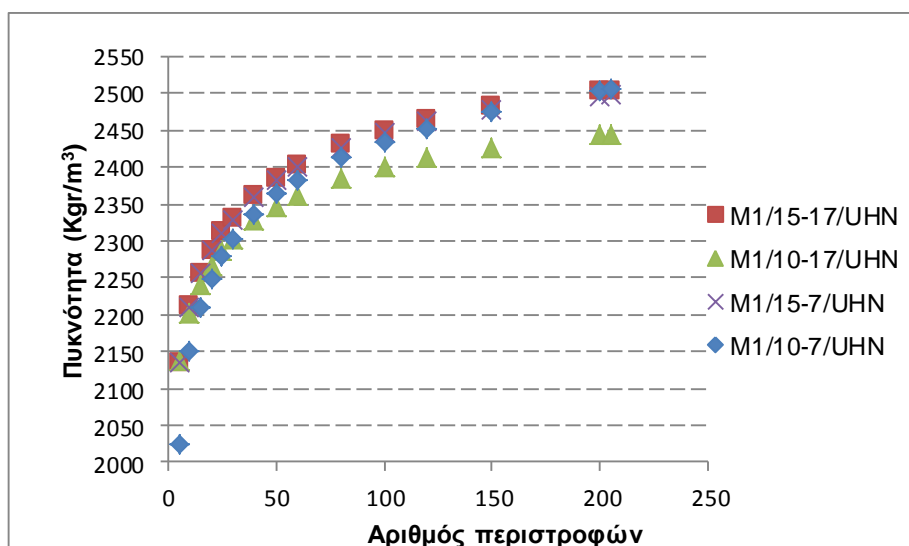
Στους πίνακες 5.5 και 5.6 και στο σχήμα 5.55 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M1, που συμπυκνώθηκαν με εσωτερική γωνία $1,16^{\circ}$:

Πίνακας 5.5. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-17/UHN και M1/10-17/UHN

M1/15-17/UHN			M1/10-17/UHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	184,5	2136	5	187,6	2139
10	178,1	2213	10	182,2	2203
15	174,6	2257	15	179,1	2240
20	172,2	2288	20	177,0	2267
25	170,4	2312	25	175,5	2286
30	169,0	2332	30	174,3	2303
40	166,8	2363	40	172,4	2327
50	165,2	2385	50	171,0	2347
60	163,9	2403	60	169,9	2362
80	162,1	2431	80	168,2	2385
100	160,8	2451	100	167,1	2402
120	159,8	2465	120	166,2	2414
150	158,7	2483	150	165,3	2427
200	157,4	2503	200	164,2	2444
205	157,3	2504	205	164,2	2444

Πίνακας 5.6. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/UHN και M1/10-7/UHN

M1/15-7/UHN			M1/10-7/UHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	75,7	2134	5	80,1	2023
10	73,1	2211	10	75,4	2150
15	71,6	2255	15	73,4	2209
20	70,7	2287	20	72,1	2250
25	69,9	2310	25	71,1	2279
30	69,4	2329	30	70,4	2303
40	68,5	2360	40	69,4	2337
50	67,8	2383	50	68,6	2364
60	67,3	2400	60	68,0	2384
80	66,6	2427	80	67,2	2413
100	66,0	2447	100	66,6	2435
120	65,6	2462	120	66,1	2454
150	65,2	2478	150	65,5	2475
200	64,7	2497	200	64,7	2504
205	64,7	2499	205	64,7	2507



Σχήμα 5.55. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M1 γωνίας 1,16° θερμοκρασίας 150° C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.55) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

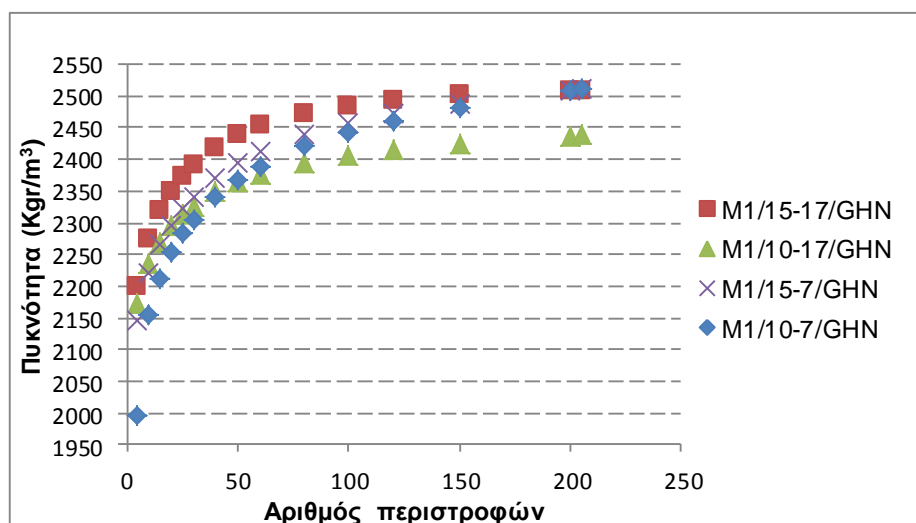
Στους πίνακες 5.7 και 5.8 και στο σχήμα 5.56 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M1, που συμπυκνώθηκαν με εσωτερική γωνία 1,45°:

Πίνακας 5.7. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-17/GHN και M1/10-17/GHN

M1/15-17/GHN			M1/10-17/GHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	177,2	2199	5	184,2	2172
10	171,2	2276	10	178,9	2235
15	167,9	2320	15	176,2	2270
20	165,7	2351	20	174,4	2294
25	164,1	2374	25	173,0	2312
30	162,8	2392	30	171,9	2327
40	161,0	2419	40	170,3	2349
50	159,7	2439	50	169,2	2364
60	158,8	2453	60	168,3	2376
80	157,6	2473	80	167,1	2394
100	156,7	2486	100	166,3	2406
120	156,2	2494	120	165,6	2415
150	155,7	2501	150	164,9	2426
200	155,3	2509	200	164,1	2438
205	155,2	2509	205	164,0	2439

Πίνακας 5.8. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M1/15-7/GHN και M1/10-7/GHN

M1/15-7/GHN			M1/10-7/GHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	76,0	2146	5	81,4	1996
10	73,5	2220	10	75,4	2154
15	72,0	2265	15	73,4	2213
20	71,0	2297	20	72,1	2254
25	70,2	2322	25	71,1	2283
30	69,7	2341	30	70,4	2306
40	68,8	2372	40	69,4	2340
50	68,1	2394	50	68,6	2368
60	67,6	2411	60	68,0	2389
80	66,9	2438	80	67,1	2420
100	66,4	2458	100	66,5	2444
120	65,9	2473	120	66,0	2461
150	65,5	2489	150	65,4	2483
200	65,0	2509	200	64,8	2507
205	64,9	2511	205	64,7	2510



Σχήμα 5.56. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M1, γωνίας 1,45°, θερμοκρασίας 150° C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.56) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

5.2.3 Στατιστική ανάλυση

Για να βρεθεί εάν η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων διαφοροποιεί σημαντικά την συμπύκνωση των δοκιμών με γυροσκοπική συσκευή πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων σε σχέση με τη μηχανική κατεργασία, τη γωνία, τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, τη διάμετρο και το ύψος του δοκιμίου.

5.2.3.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμών

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της μηχανικής κατεργασίας στο ποσοστό κενών. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στην αρχική κατάσταση των δοκιμών M1 διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9:

Πίνακας 5.9. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 πριν και μετά πυρηνοληψία-κοπή

Κωδικός μετά την κοπή	Αρχική κατάσταση v_{ng} (%)	Ποσοστό κενών μετά πυρηνοληψία και κοπή v_{ng} (%)
M1/10-15/EL/CC	7,0	5,4
M1/10-5/EL/CC	6,1	4,8
M1/10-5/EL/C	5,1	3,7
M1/10-15/EH/CC	7,0	5,4
M1/10-5/EH/CC	6,4	5,3
M1/10-5/EH/C	6,9	5,7
M1/10-15/UL/CC	5,2	4,1
M1/10-5/UL/CC	5,9	4,4
M1/10-5/UL/C	6,7	5,2
M1/10-15/UH/CC	7,2	5,8
M1/10-5/UH/CC	4,5	3,1
M1/10-5/UH/C	5,4	4,4
M1/10-15/GL/CC	6,4	5,0
M1/10-5/GL/CC	4,3	3,1
M1/10-5/GL/C	4,2	3,7
M1/10-15/GH/CC	5,9	4,5
M1/10-5/GH/CC	4,9	3,9
M1/10-5/GH/C	5,3	4,5

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα και μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$ παίρνουμε:

Πίνακας 5.10. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 πριν και μετά πυρηνοληψία-κοπή

	μ_A	μ_B
	<i>Αρχική κατάσταση</i>	<i>Μετά πυρηνοληψία-κοπή</i>
Μέσος	5,797222222	4,543888889
Διακύμανση	0,936597712	0,699201634
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,962673879	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	17	
t	19,07261105	
P(T<=t) μονόπλευρη	3,24634E-13	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
P(T<=t) δίπλευρη	6,49268E-13	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm του ασφαλτομίγματος M1, υπάρχει σημαντική διαφορά των ποσοστών κενών πριν και μετά την πυρηνοληψία και κοπή της κορυφής και της βάσης, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου και της παραγράφου 5.2.2.1. συνεπάγεται ότι, στα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm του ασφαλτομίγματος M1, μετά την πυρηνοληψία και κοπή της κορυφής και της βάσης κατά 10 mm, η μείωση του ποσοστού κενών είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στην αρχική κατάσταση των δοκιμών M1 διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm μετά την κοπή κορυφής και βάσης κατά 10 mm παρουσιάζονται στον πίνακα 5.11:

Πίνακας 5.11. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά κοπή

Κωδικός μετά την κοπή	Αρχική κατάσταση v_{ng} (%)	Ποσοστό κενών μετά την κοπή v_{ng} (%)
M1/10-15/EL/C	6,0	6,2
M1/10-15/EH/C	5,5	5,5
M1/10-15/UL/C	4,2	4,2
M1/10-15/UH/C	4,2	4,2
M1/10-15/GL/C	4,4	4,5
M1/10-15/GH/C	4,6	4,6

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα και μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$ παίρνουμε:

Πίνακας 5.12. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M1 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά κοπής

	μ_A	μ_B
	Αρχική κατάσταση	Μετά την κοπή
Μέσος	4,825	4,878333333
Διακύμανση	0,58759	0,654536667
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,99421017	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-1,378081925	
$P(T \leq t)$ μονόπλευρη	0,113327746	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
$P(T \leq t)$ δίπλευρη	0,226655493	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm του ασφαλτομίγματος M1, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά των ποσοστών κενών πριν και μετά την κοπή της κορυφής και της βάσης, άρα η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται.

5.2.3.2 Γωνία περιστροφής

Για τη μεταβολή της γωνίας περιστροφής, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της φαινόμενης πυκνότητας για $N=205$ περιστροφές. Έτσι, συντάχθηκε ο πίνακας 5.13, με τρεις στήλες για το ασφαλτόμιγμα M1, όπου σε κάθε στήλη αντιστοιχεί μία γωνία ($E=0,82^\circ$, $U=1,16^\circ$ και $G=1,45^\circ$).

Πίνακας 5.13. Φαινόμενες πυκνότητες δοκιμίων M1 για αριθμό περιστροφών $N=205$

	EHN	UHN	GHN
M1/15-17	2444	2504	2509
M1/10-17	2359	2444	2439
M1/15-7	2433	2499	2511
M1/10-7	2464	2507	2510

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις γωνίες $E=0,82^\circ$ και $U=1,16^\circ$ στις δύο πρώτες στήλες του πίνακα 5.13 και μηδενική υπόθεση $\mu_E = \mu_U$, έχουμε:

Πίνακας 5.14. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για γωνίες 0,82° και 1,16°

	μ_E	μ_U
	<i>M1/EHN</i>	<i>M1/UHN</i>
Μέσος	2425	2488,5
Διακύμανση	2100,666667	891
Μέγεθος δείγματος	4	4
Συσχέτιση Pearson	0,983603512	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	3	
t	-7,328278283	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,002624594	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,353363435	
P(T<=t) δίπλευρη	0,005249189	
t κρίσιμο, δίπλευρο	3,182446305	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι για τις γωνίες 0,82° και 1,16° στο ασφαλτόμιγμα M1, υπάρχει σημαντική διαφορά των πυκνοτήτων, καθώς μεταβάλλεται η γωνία, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από 0,82° σε 1,16° η αύξηση της πυκνότητας είναι στατιστικά σημαντική.

Ομοίως, εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις γωνίες U=1,16° και G=1,45° για τη δεύτερη και την τρίτη στήλη του πίνακα 5.13. και με μηδενική υπόθεση $\mu_U = \mu_G$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.15. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για γωνίες 1,16° και 1,45°

	μ_U	μ_G
	<i>M1/UHN</i>	<i>M1/GHN</i>
Μέσος	2488,5	2492,25
Διακύμανση	891	1260,916667
Μέγεθος δείγματος	4	4
Συσχέτιση Pearson	0,992035543	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	3	
t	-1,072340814	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,181078887	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,353363435	
P(T<=t) δίπλευρη	0,362157775	
t κρίσιμο, δίπλευρο	3,182446305	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι για τις γωνίες 1,16° και 1,45° στο ασφαλτόμιγμα M1, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά των πυκνοτήτων, καθώς μεταβάλλεται η γωνία, άρα η

μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $1,16^{\circ}$ σε $1,45^{\circ}$ η μεταβολή της πυκνότητας δεν είναι στατιστικά σημαντική.

5.2.3.3 Θερμοκρασία συμπίκνωσης

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο ποσοστό κενών. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης των δοκιμών ασφαλτομίγματος M1 από 135°C σε 150°C , παρουσιάζονται στον πίνακα 5.16:

Πίνακας 5.16. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 για μεταβολή της θερμοκρασίας

Κωδικός δοκιμίου	Θερμοκρασία 135°C	Θερμοκρασία 150°C
M1/15-17/E	5,4	5,4
M1/10-17/E	6,2	5,5
M1/15-7/E	4,8	5,3
M1/10-7/E	3,7	5,7
M1/15-17/U	4,1	5,8
M1/10-17/U	4,2	4,2
M1/15-7/U	4,4	3,1
M1/10-7/U	5,2	4,4
M1/15-17/U	5,0	4,5
M1/10-17/U	4,5	4,6
M1/15-7/U	3,1	3,9
M1/10-7/U	3,7	4,5

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα και μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.17. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 για θερμοκρασίες συμπίκνωσης 135°C και 150°C

	μ_A	μ_B
	Θερμοκρ. 135°C	Θερμοκρ. 150°C
Μέσος	4,5225	4,7325
Διακύμανση	0,737656818	0,662147727
Μέγεθος δείγματος	12	12
Συσχέτιση Pearson	0,269784302	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	11	
t	-0,719339419	
$P(T \leq t)$ μονόπλευρη	0,243466689	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,795884819	
$P(T \leq t)$ δίπλευρη	0,486933377	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,20098516	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M1, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των ποσοστών κενών των δοκιμών, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C , άρα η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135°C σε 150°C , η μεταβολή του ποσοστού κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική.

5.2.3.4 Διαστάσεις δοκιμών

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων (ύψους και διαμέτρου) στο ποσοστό κενών.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή του ύψους των δοκιμών ασφαλτομίγματος M1 από 170 mm σε 70 mm, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.18:

Πίνακας 5.18. Ποσοστά κενών δοκιμίων M1 για μεταβολή του ύψους

Κωδικός δοκιμίου	Ύψος 170mm	Ύψος 70mm
M1/15/EL	5,4	4,8
M1/15/EH	5,4	5,3
M1/15/UL	4,1	4,4
M1/15/UH	5,8	3,1
M1/15/GL	5,0	3,1
M1/15/GH	4,5	3,9
M1/10/EL	6,2	3,7
M1/10/EH	5,5	5,7
M1/10/UL	4,2	5,2
M1/10/UH	4,2	4,4
M1/10/GL	4,5	3,7
M1/10/GH	4,6	4,5

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.18 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.19. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M1 για τα ύψη 170mm και 70mm

	μ_A	μ_B
	Ύψος 170mm	Ύψος 70mm
Μέσος	4,948333333	4,306666667
Διακύμανση	0,495778788	0,70349697
Μέγεθος δείγματος	12	12
Συσχέτιση Pearson	-0,137518768	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	11	
t	1,904839626	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,041632703	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,795884819	
P(T<=t) δίπλευρη	0,083265406	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,20098516	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M1, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά για μεταβολή των υψών 170 mm σε 70 mm και η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Άρα, για το ασφαλτόμιγμα M1, για μείωση του ύψους των δοκιμίων, από τα 170 mm περίπου στα 70 mm, η μείωση του ποσοστού κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της διαμέτρου από 150mm σε 100 mm των δοκιμών ύψους 170 mm ασφαλτομίγματος M1, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.20:

Πίνακας 5.20. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου

Ύψος 170mm	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
M1/17/EL	5,4	6,2
M1/17/EH	5,4	5,5
M1/17/UL	4,1	4,2
M1/17/UH	5,8	4,2
M1/17/GL	5,0	4,5
M1/17/GH	4,5	4,6

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.20 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.21. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου

	μ_A	μ_B
Ύψος 170 mm	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
Μέσος	5,018333333	4,878333333
Διακύμανση	0,424416667	0,654536667
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,349932323	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	0,406958403	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,350437183	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
P(T<=t) δίπλευρη	0,700874367	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M1, σε δοκίμια ύψους 170 mm, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά για μεταβολή της διαμέτρου από 150 mm σε 100 mm και η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Άρα, για το ασφαλτόμιγμα M1, σε δοκίμια ύψους 170 mm, για μείωση της διαμέτρου από 150 mm στα 100 mm, η μείωση του ποσοστού κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της διαμέτρου από 150mm σε 100 mm των δοκιμών ύψους 70 mm ασφαλτομίγματος M1, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.22:

Πίνακας 5.22. Ποσοστά κενών δοκιμών M1 ύψους 70mm για μεταβολή της διαμέτρου

Ύψος 70mm	Διάμε- τρος 150mm	Διάμε- τρος 100mm
M1/7/EL	4,8	3,7
M1/7/EH	5,3	5,7
M1/7/UL	4,4	5,2
M1/7/UH	3,1	4,4
M1/7/GL	3,1	3,7
M1/7/GH	3,9	4,5

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.22 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$ παίρνουμε:

Πίνακας 5.23. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M1 ύψους 70mm για μεταβολή της διαμέτρου

Ύψος 70 mm	μ_A	μ_B
	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
Μέσος	4,086666667	4,526666667
Διακύμανση	0,776826667	0,654706667
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,574160232	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-1,377018597	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,113481494	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
P(T<=t) δίπλευρη	0,226962988	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M1 και για ύψος 70 mm, δεν υπάρχει στατιστική διαφοροποίηση για τη μεταβολή της διαμέτρου και η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Άρα, στο ασφαλτόμιγμα M1, για ύψος δοκιμίου στα 70 mm, με μεταβολή της διαμέτρου, η μεταβολή του ποσοστού κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική.

5.2.3.5 Καμπύλες συμπύκνωσης

Για τη διερεύνηση της συμπυκνωσιμότητας των δοκιμών ασφαλτομίγματος M1, στις διάφορες διαστάσεις και γωνίες περιστροφής, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της διορθωμένης πυκνότητας των δοκιμών (παράγραφος 5.2.2.5.), πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση με τη μέθοδο της παλινδρόμησης. Το πρότυπο έχει τη μορφή $y = a \log x + \beta$, όπου y : η διορθωμένη πυκνότητα και x : ο αριθμός των περιστροφών. Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης (συντελεστές α και β της εξίσωσης $y = a \log x + \beta$, καθώς και ο δείκτης R^2 συσχετισμού με την ευθεία της υπόψη εξίσωσης) παρουσιάζονται στον πίνακα 5.24:

Πίνακας 5.24. Συντελεστές α και β και δείκτης R^2 αποτελεσμάτων επανυπολογισμού δοκιμών M1

Κωδικός δοκιμίου	R^2	α	β
M1/15-17/EHN	0,999	200,5	1986
M1/10-17/EHN	0,998	166,8	1976
M1/15-7/EHN	0,999	193,8	1984
M1/10-7/EHN	0,993	297,3	1745
M1/15-17/UHN	0,995	228,6	1989
M1/10-17/UHN	0,994	189,8	2018
M1/15-7/UHN	0,994	225,8	1990
M1/10-7/UHN	0,986	284,0	1868
M1/15-17/GHN	0,966	189,9	2098
M1/10-17/GHN	0,984	161,9	2079
M1/15-7/GHN	0,995	226,6	2000
M1/10-7/GHN	0,976	294,7	1853

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M1, ο συντελεστής R^2 προσεγγίζει τη μονάδα και ως εκ τούτου είναι πολύ καλή η προσαρμογή με την ευθεία $y = a \log x + \beta$.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής α στην εξίσωση $y = a \log x + \beta$, εκτιμά το ρυθμό συμπύκνωσης, δηλαδή πόσο γρήγορα συμπυκνώνεται το δοκίμιο στη γυροσκοπική συσκευή. Έτσι, για να βρούμε το ρυθμό συμπύκνωσης ανά γωνία, αναδιατάσσονται οι γραμμές του πίνακα 5.24. με αύξουσα σειρά για τον συντελεστή α , ανά γωνία:

Πίνακας 5.25. Συντελεστές α και β της $y=\alpha \log x+\beta$, με αύξουσα σειρά του α ανά γωνία

Κωδικός δοκιμίου	α	β	R^2
M1/10-17/EHN	166,8	1976	0,998
M1/15-7/EHN	193,8	1984	0,999
M1/15-17/EHN	200,5	1986	0,999
M1/10-7/EHN	297,3	1745	0,993
M1/10-17/UHN	189,8	2018	0,994
M1/15-7/UHN	225,8	1990	0,994
M1/15-17/UHN	228,6	1989	0,995
M1/10-7/UHN	284,0	1868	0,986
M1/10-17/GHN	161,9	2079	0,984
M1/15-17/GHN	189,9	2098	0,966
M1/15-7/GHN	226,6	2000	0,995
M1/10-7/GHN	294,7	1853	0,976

Από τον πίνακα 5.25 προκύπτει ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm (10X7) συμπυκνώνονται πιο γρήγορα. Αντίθετα, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm (10X17) συμπυκνώνονται πιο αργά. Τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα σε εσωτερική γωνία $1,16^{\circ}$ απ' ό τι σε γωνία $0,82^{\circ}$, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για την εσωτερική γωνία $1,45^{\circ}$ σε σχέση με τη γωνία $1,16^{\circ}$.

5.3 Ασφαλτόμιγμα M2

5.3.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίκνωσης και προσδιορισμού του ποσοστού κενών, για το ασφαλτόμιγμα M2, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες 5.27 και 5.28:

Πίνακας 5.26. Παράμετροι συμπίκνωσης δοκιμών μίγματος M2

Κωδικός δοκιμίου	Εσωτερ. Γωνία (°)	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	Θερμοκρ. Συμπύκν. (°C)	Αριθμός περιστρ. (gyrations)
M2/15-17/EL	0,82	150	170	135	139
M2-10-17/EL	0,82	100	178	135	261
M2/15-7/EL	0,82	150	70	135	150
M2/10-7/EL	0,82	100	70	150	152
M2/15-17/EH	0,82	150	170	150	142
M2/10-17/EH	0,82	100	176	150	260
M2/15-7/EH	0,82	150	70	150	139
M2/10-7/EH	0,82	100	70	150	119
M2/15-17/UL	1,16	150	170	135	63
M2/10-17/UL	1,16	100	178	135	128
M2/15-7/UL	1,16	150	70	135	81
M2/10-7/UL	1,16	100	70	135	63
M2/15-17/UH	1,16	150	170	150	60
M2/10-17/UH	1,16	100	178	150	173
M2/15-7/UH	1,16	150	70	150	95
M2/10-7/UH	1,16	100	70	150	53
M2/15-17/GL	1,45	150	170	135	43
M2/10-17/GL	1,45	100	178	135	106
M2/15-7/GL	1,45	150	70	135	56
M2/10-7/GL	1,45	100	70	135	45
M2/15-17/GH	1,45	150	170	150	40
M2/10-17/GH	1,45	100	178	150	94
M2/15-7/GH	1,45	150	70	150	47
M2/10-7/GH	1,45	100	70	150	59

Πίνακας 5.27. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 μετά την πυρηνοληψία και την κοπή

Κωδικός αρχικού δοκιμίου	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)	Κωδικός μετά την πυρηνοληψία	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)	Κωδικός μετά την κοπή	Ποσοστό κενών v_{ng} (%)
M2/15-17/EL	6,6	M2/10-17/EL/C	5,6	M2/10-15/EL/CC	5,2
M2/10-17,8/EL	8,1			M2/10-15/EL/C	8,7
M2/15-7/EL	5,7	M2/10-7/EL/C	5,5	M2/10-5/EL/CC	4,1
M2/10-7/EL	4,9			M2/10-5/EL/C	3,6
M2/15-17/EH	6,1	M2/10-17/EH/C	4,0	M2/10-15/EH/CC	3,3
M2/10-17,6/EH	7,8			M2/10-15/EH2/C	8,8
M2/15-7/EH	6,0	M2/10-7/EH/C	5,8	M2/10-5/EH/CC	5,2
M2/10-7/EH	5,0			M2/10-5/EH/C	4,0
M2/15-17/UL	6,4	M2/10-17/UL/C	5,6	M2/10-15/UL/CC	5,1
M2/10-17/UL	8,2			M2/10-15/UL/C	9,3
M2/15-7/UL	4,9	M2/10-7/UL/C	4,5	M2/10-5/UL/CC	3,8
M2/10-7/UL	5,5			M2/10-5/UL/C	4,7
M2/15-17/UH	6,6	M2/10-17/UH/C	5,9	M2/10-15/UH/CC	5,4
M2/10-17/UH	7,2			M2/10-15/UH/C	9,5
M2/15-7/UH	5,2	M2/10-7/UH/C	5,0	M2/10-5/UH/CC	3,9
M2/10-7/UH	5,9			M2/10-5/UH/C	4,8
M2/15-17/GL	6,3	M2/10-17/GL/C	5,6	M2/10-15/GL/CC	5,0
M2/10-17/GL	7,4			M2/10-15/GL/C	9,0
M2/15-7/GL	5,3	M2/10-7/GL/C	5,0	M2/10-5/GL/CC	3,8
M2/10-7/GL	5,1			M2/10-5/GL/C	4,2
M2/15-17/GH	6,7	M2/10-17/GH/C	6,1	M2/10-15/GH/CC	5,6
M2/10-17/GH	7,8			M2/10-15/GH/C	9,4
M2/15-7/GH	5,9	M2/10-7/GH/C	5,6	M2/10-5/GH/CC	4,3
M2/10-7/GH	5,0			M2/10-5/GH/C	4,2

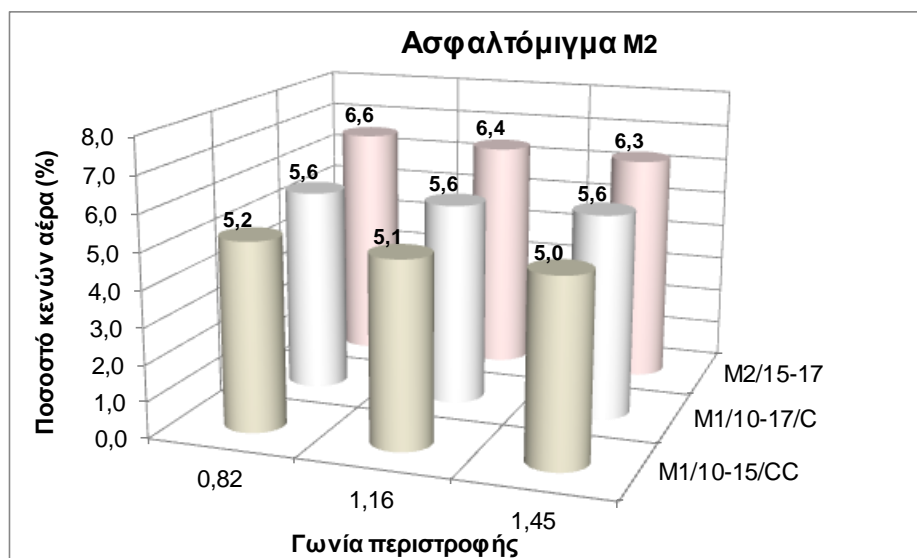
Ο πίνακας 5.27 δείχνει τις παραμέτρους συμπύκνωσης για κάθε δοκίμιο, ενώ ο πίνακας 5.28 τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών υπολογισμού του ποσοστού κενών, τόσο στην αρχική κατάσταση όσο και μετά την πυρηνοληψία και κοπή.

5.3.2 Επεξεργασία στοιχείων εργαστηριακών δεδομένων

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα των δοκιμών για το ασφαλτόμιγμα M2, δημιουργήθηκαν διαγράμματα, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της λήψης πυρήνων διαμέτρου 100 mm από δοκίμια διαμέτρου 150 mm, της κοπής του πυθμένα και της κορυφής των δοκιμίων κατά 1 cm, της μεταβολής της εσωτερικής γωνίας, της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και των διαστάσεων των δοκιμίων.

5.3.2.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμών

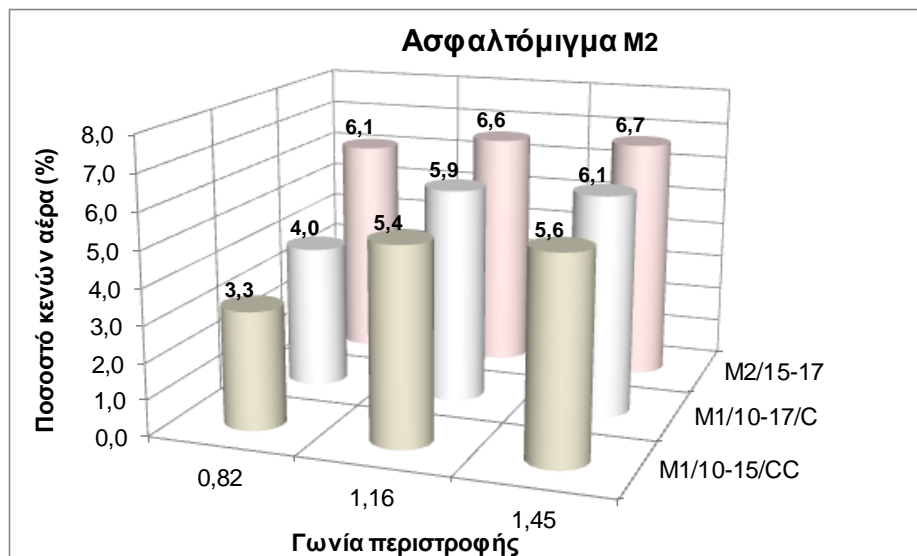
Ακολουθεί διάγραμμα των ποσοστών κενών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2, ανά διάμετρο, ύψος και θερμοκρασία συμπίκνωσης.



Σχήμα 5.57. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C

Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,0%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,4%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,5%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,7%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,6% (σχήμα 5.57).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμών διαμέτρου 150mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,6%, 1,3% και 1,3%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.



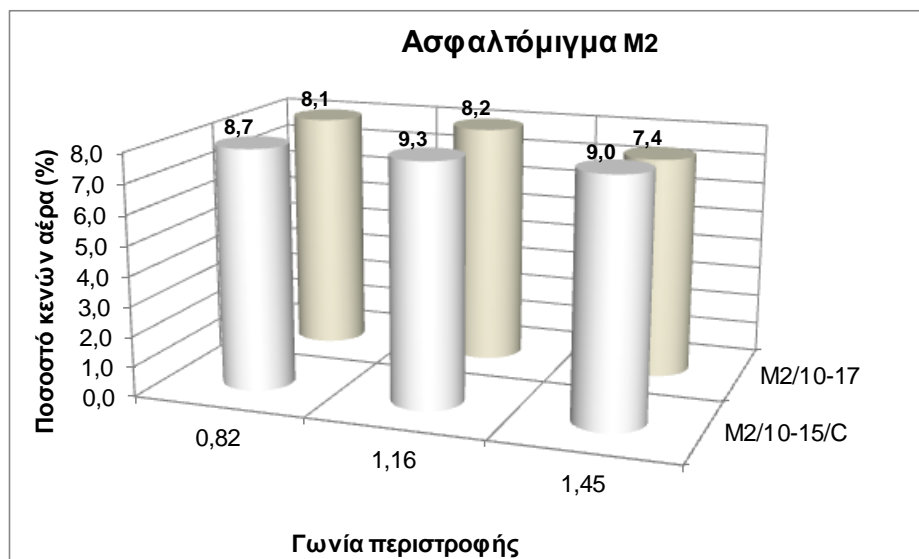
Σχήμα 5.58. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπύκνωσης 150⁰ C

Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm, θερμοκρασίας συμπύκνωσης 150⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 2,1%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,7%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπύκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,7%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,5%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπύκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,6%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,5% (σχήμα 5.58).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 2,8%, 1,2% και 1,1%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, θερμοκρασίας συμπύκνωσης 135⁰C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 0,6%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπύκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 1,1%. Σε δοκίμιο ίδιων

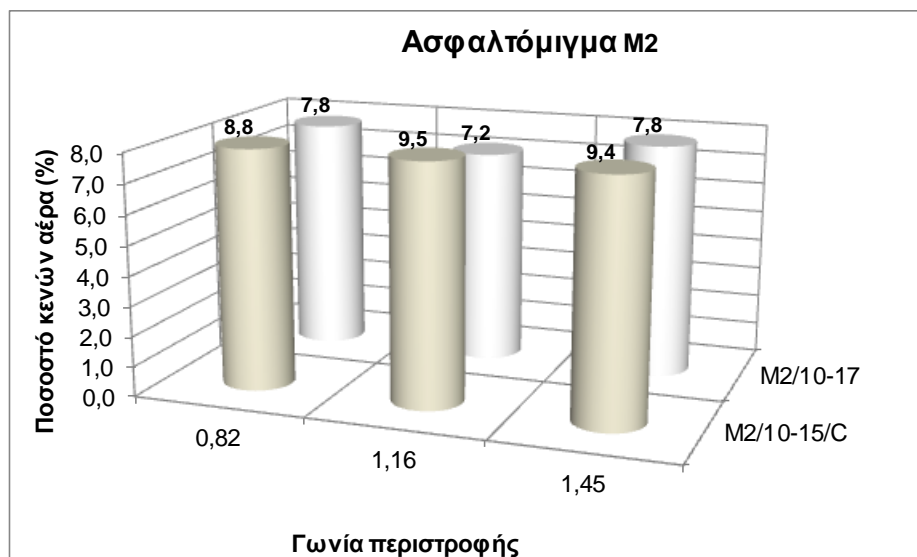
διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας $1,45^{\circ}$, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 1,6% (σχήμα 5.59).



Σχήμα 5.59. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135° C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 135° C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, αυξάνεται κατά 0,6%, 1,1% και 1,6%, για τις γωνίες $0,82^{\circ}$, $1,16^{\circ}$ και $1,45^{\circ}$ αντίστοιχα.

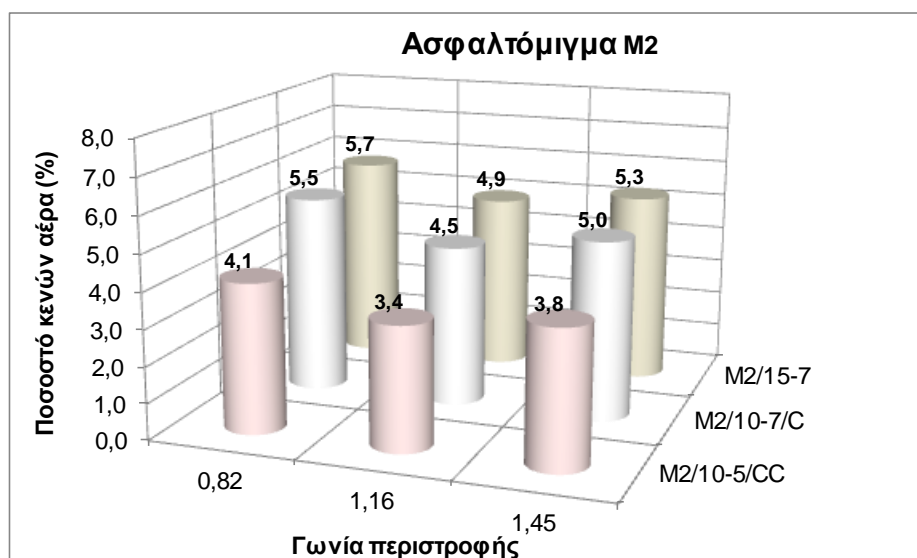
Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 170 mm, εσωτερικής γωνίας $0,82^{\circ}$, αλλά θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150° C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας $1,16^{\circ}$, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 2,3%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας $1,45^{\circ}$, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών αυξάνεται κατά 1,6% (σχήμα 5.60).



Σχήμα 5.60. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 170 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 170mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, αυξάνεται κατά 1,0%, 2,3% και 1,6%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

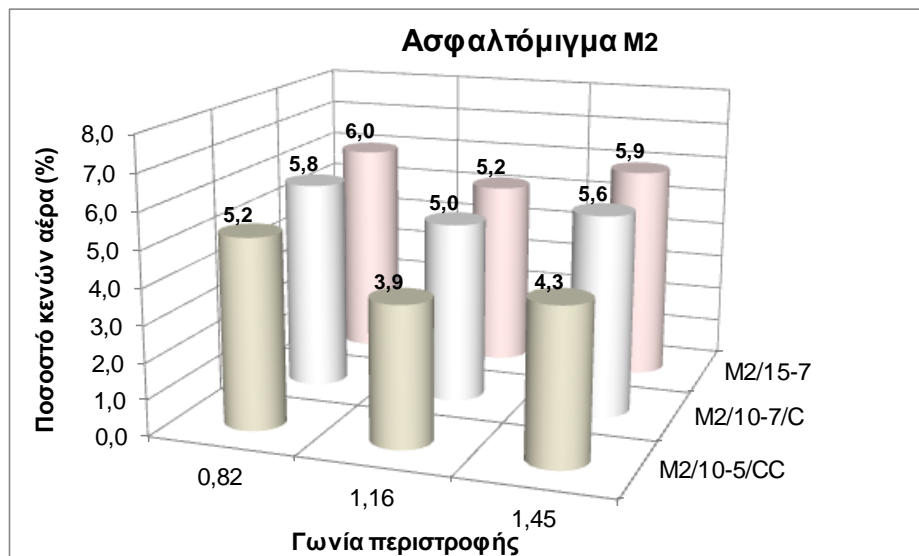
Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,2%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,4%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,4%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,1%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,3%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,2% (σχήμα 5.61).



Σχήμα 5.61. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 1,6%, 1,5% και 1,5%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

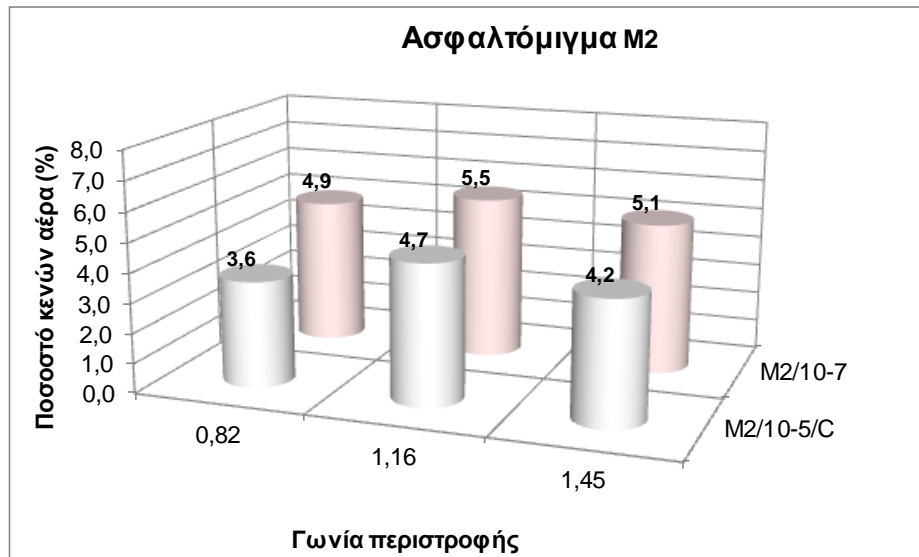
Σε δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,2%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 0,6%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,2%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,1%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την λήψη πυρήνα διαμέτρου 100 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,3%, ενώ μετά και την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται περαιτέρω κατά 1,3% (σχήμα 5.62).



Σχήμα 5.62. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 150mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή, μειώνεται συνολικά κατά 0,8%, 1,3% και 1,6%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

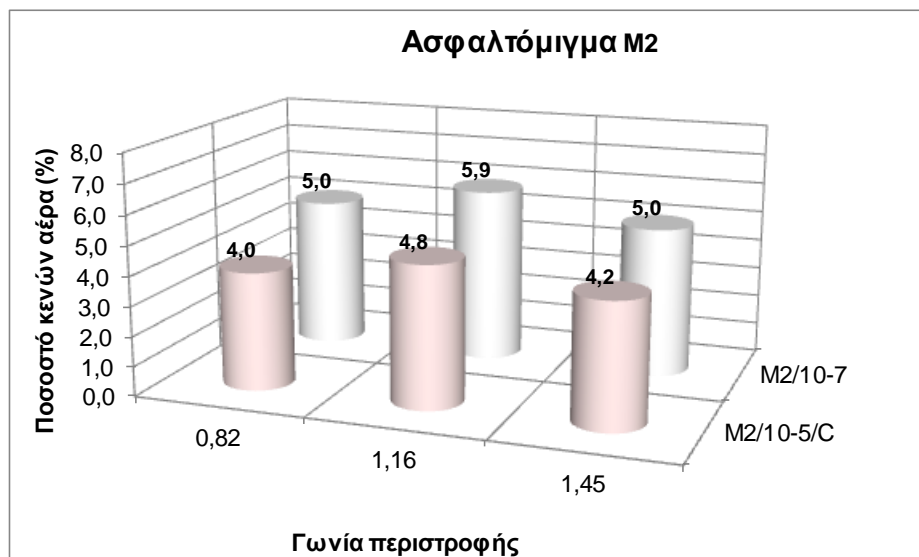
Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,3%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,9% (σχήμα 5.63).



Σχήμα 5.63. Δοκίμια διαμέτρου 100 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 135⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 135⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, μειώνεται κατά 1,3%, 0,8% και 0,9%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

Σε δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm, θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C και εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,0%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,16⁰, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 1,1%. Σε δοκίμιο ίδιων διαστάσεων και θερμοκρασίας συμπίκνωσης, αλλά εσωτερικής γωνίας 1,45⁰, αλλά θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κατά 10 mm το ποσοστό κενών μειώνεται κατά 0,8% (σχήμα 5.64).



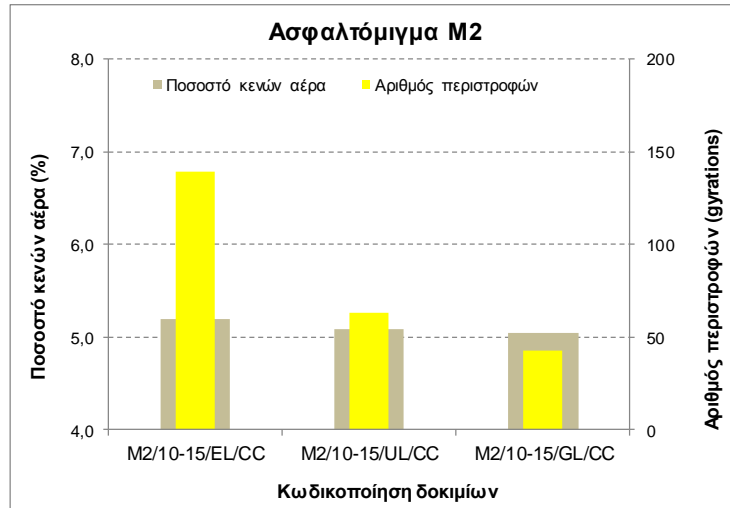
Σχήμα 5.64. Δοκίμια διαμέτρου 150 mm ύψους 70 mm θερμοκρασίας συμπίκνωσης 150⁰ C

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ποσοστό κενών των δοκιμίων διαμέτρου 100mm, ύψους 70mm και θερμοκρασίας 150⁰ C, μετά την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, μειώνεται κατά 1,0%, 1,1% και 0,8%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

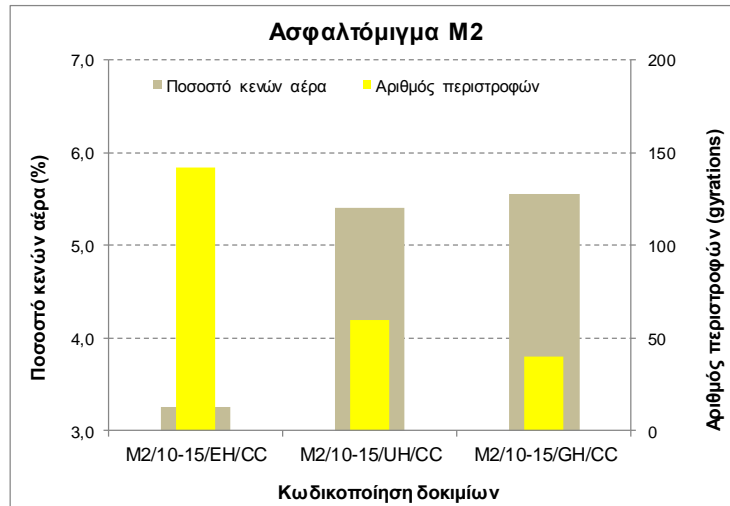
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μέση μείωση του ποσοστού κενών όλων των δοκιμίων ασφαλτομίγματος M2, μετά από πυρηνοληψία για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και την κοπή της βάσης και της κορυφής κάθε δοκιμίου κατά 10 mm, είναι 0,94%, 0,48% και 0,5%, για τις γωνίες 0,82⁰, 1,16⁰ και 1,45⁰ αντίστοιχα.

5.3.2.2 Γωνία περιστροφής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M2, όπου κάθε φορά στην ίδια διάμετρο και ύψος δοκιμίου και για τη ίδια θερμοκρασία συμπίκνωσης, μεταβάλλεται η εσωτερική γωνία περιστροφής. Η σύγκριση πραγματοποιείται για τις τρεις εσωτερικές γωνίες περιστροφής 0,82⁰=E, 1,16⁰=U και 1,45⁰=G, όσον αφορά στα αποτελέσματα των ποσοστών κενών που αντιστοιχούν στα δοκίμια μετά από την πυρηνοληψία και την κοπή τους (ονομάζονται πυρήνες).

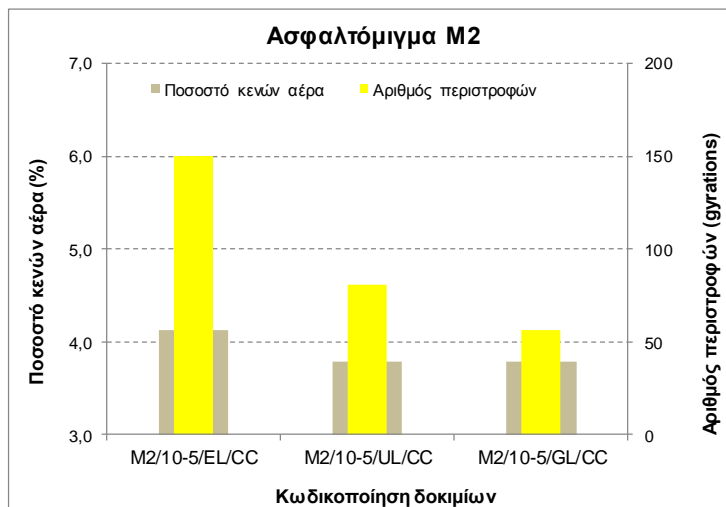


Σχήμα 5.65. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 135⁰ C

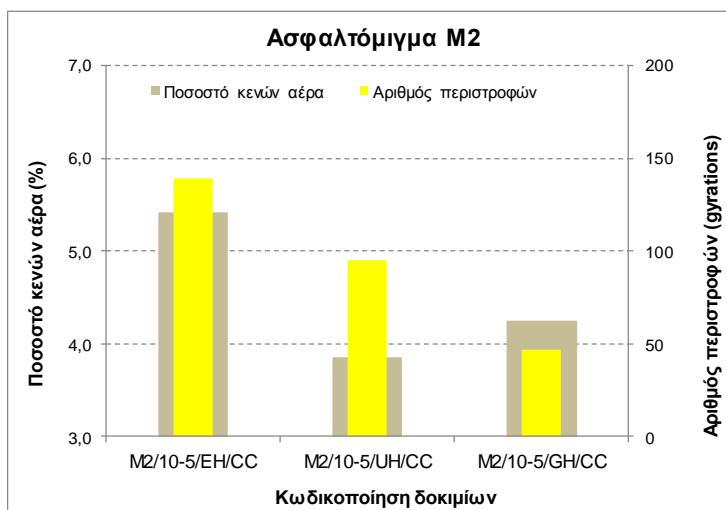


Σχήμα 5.66. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 170 mm και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 76 και 82 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα μειώνεται κατά 0,1% και αυξάνεται κατά 2,1% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 20 και στις δύο περιπτώσεις, ενώ το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου και αυξάνεται κατά 0,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.65 και 5.66).

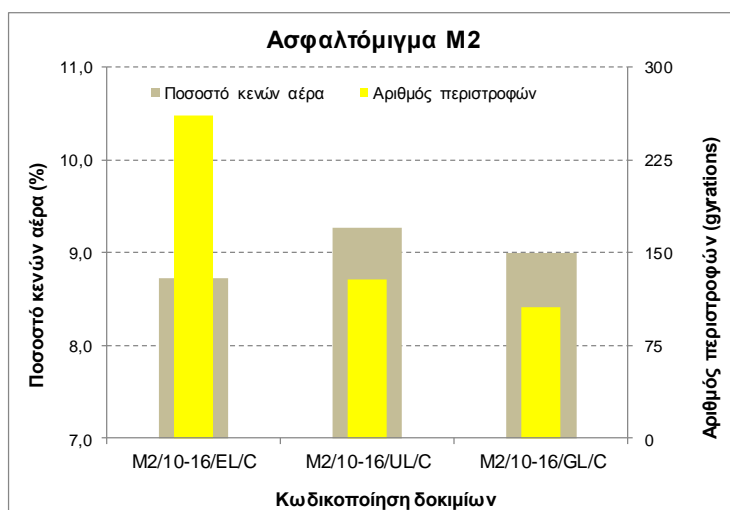


Σχήμα 5.67. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135⁰ C

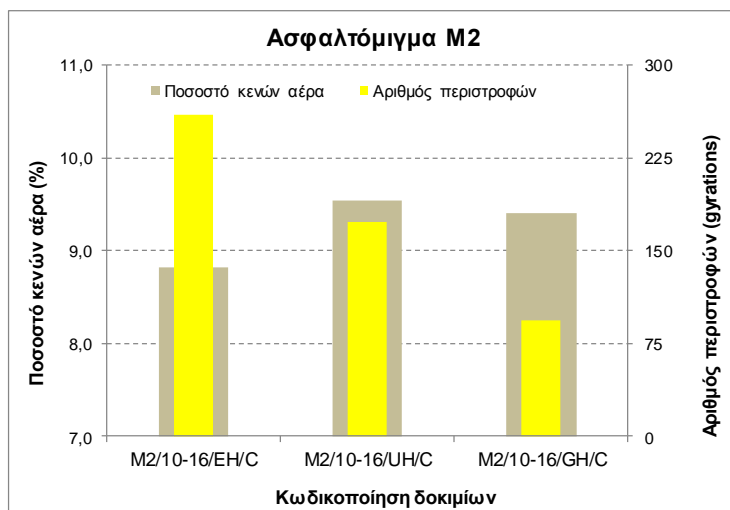


Σχήμα 5.68. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, ύψους 70 mm και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 69 και 44 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,3% και 1,6% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 25 και 48 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων δεν μεταβάλλεται και αυξάνεται κατά 0,4% αντίστοιχα (σχήματα 5.67 και 5.68).

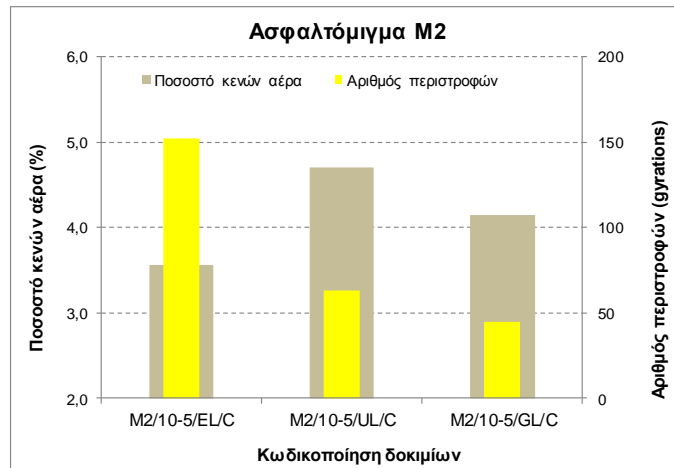


Σχήμα 5.69. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm θερμοκρασίας 135⁰ C

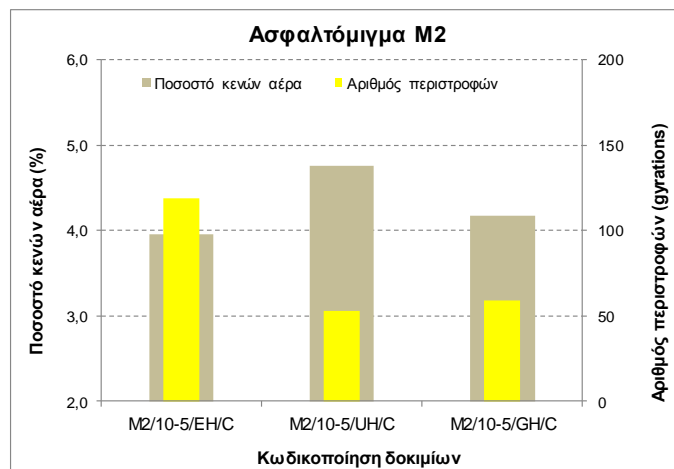


Σχήμα 5.70. Δοκίμιο διαμέτρου 100mm ύψους 178mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 178 mm και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 133 και 87 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,6% και 0,7% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 22 και 79 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,3% και 0,1% αντίστοιχα (σχήματα 5.69 και 5.70).



Σχήμα 5.71. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 135⁰ C



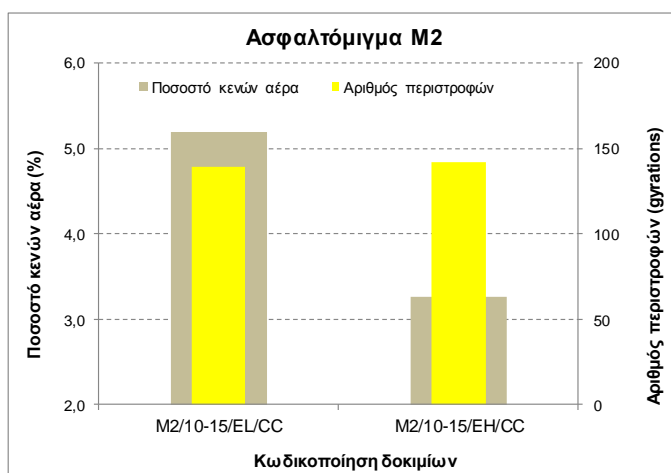
Σχήμα 5.72. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ύψους 70 mm και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η εσωτερική γωνία περιστροφής αυξάνει από 0,82⁰ σε 1,16⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 89 και 66 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 1,2% και κατά 0,8% αντίστοιχα. Καθώς η γωνία αυξάνει από 1,16⁰ σε 1,45⁰, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 18 και αυξάνεται κατά 6 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,6% και στις δύο περιπτώσεις (σχήματα 5.71 και 5.72).

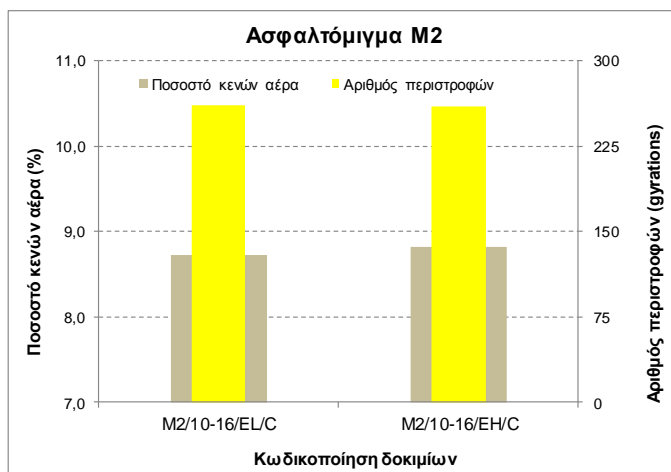
Μετά τα παραπάνω, προκύπτει ότι με αύξηση της γωνίας από 0,82⁰ σε 1,16⁰ παρουσιάζεται τάση μείωσης του ποσοστού κενών, ενώ με αύξηση της γωνίας από 1,16⁰ σε 1,45⁰ δεν παρουσιάζεται σαφής τάση μεταβολής του ποσοστού κενών.

5.3.2.3 Θερμοκρασία συμπίκνωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, διάμετρο και ύψος δοκιμίου, μεταβάλλεται η θερμοκρασία συμπίκνωσης (από 135⁰ C σε 150⁰ C).



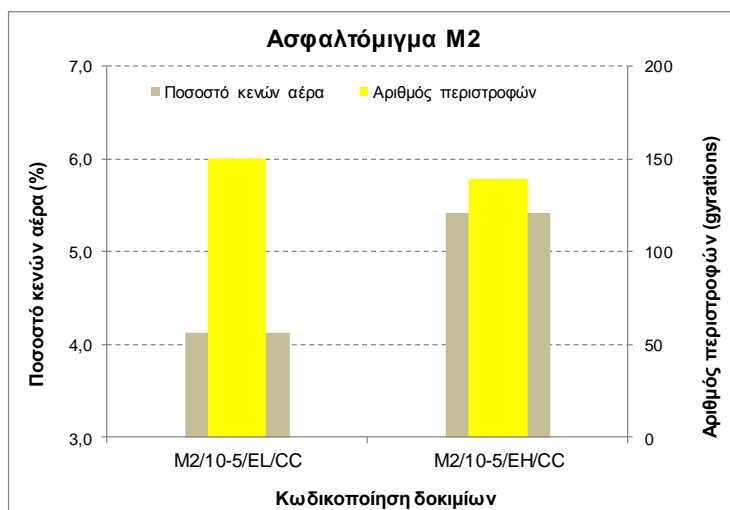
Σχήμα 5.73. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 0,82⁰



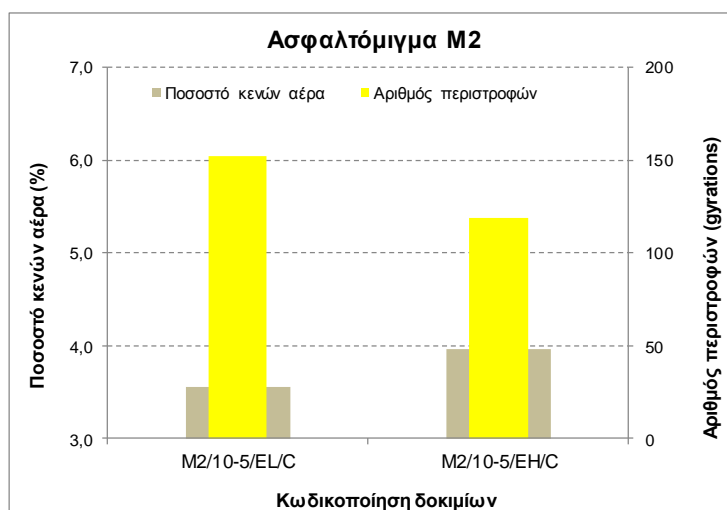
Σχήμα 5.74. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας 0,82⁰

Για δοκίμια εσωτερικής γωνίας 0,82⁰, υψών 170 mm και 178 mm και διαμέτρων 150 mm, και 100 mm αντίστοιχα, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 3 και μειώνεται κατά 10 αντίστοιχα,

ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,9% και παραμένει σχεδόν αμετάβλητο αντίστοιχα (σχήματα 5.73 και 5.74).

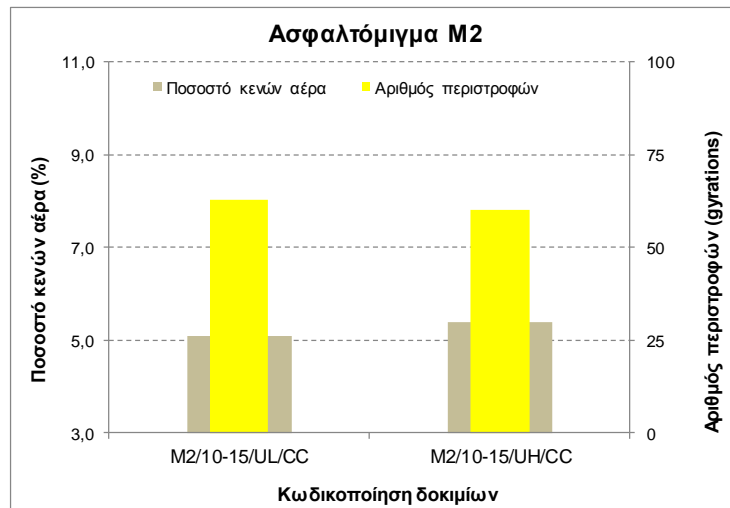


Σχήμα 5.75. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰

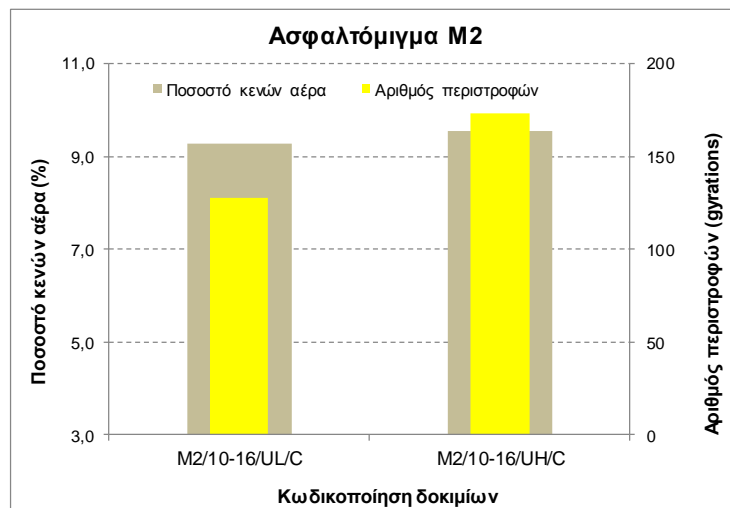


Σχήμα 5.76. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 11 και 3 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 1,3% και 0,4% αντίστοιχα (σχήματα 5.75 και 5.76).

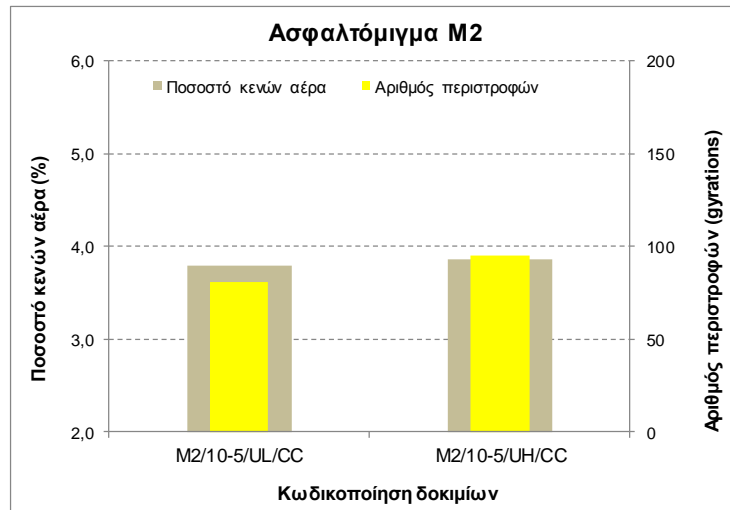


Σχήμα 5.77. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας $1,16^0$

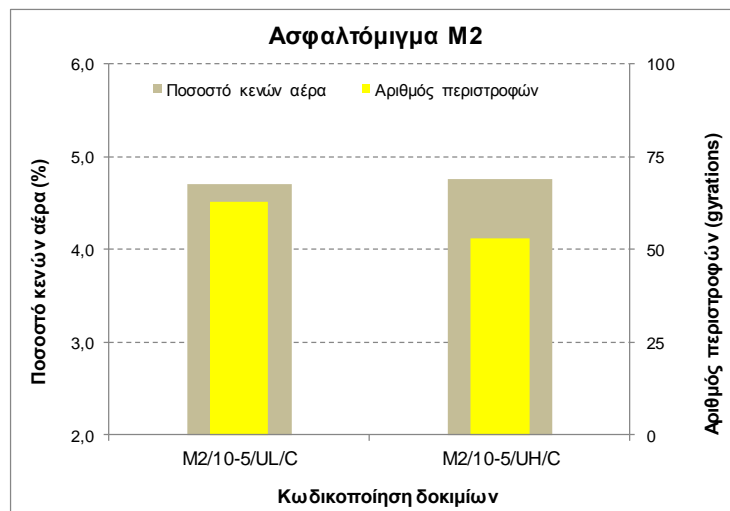


Σχήμα 5.78. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας $1,16^0$

Για δοκίμια εσωτερικής γωνίας περιστροφής $1,16^0$, υψών 170 mm και 178 mm και διαμέτρων 150 mm και 100 mm αντίστοιχα, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135^0 C σε 150^0 C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 3 και αυξάνεται κατά 45 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,3% και στις δύο περιπτώσεις (σχήμα 5.77 και 5.78).

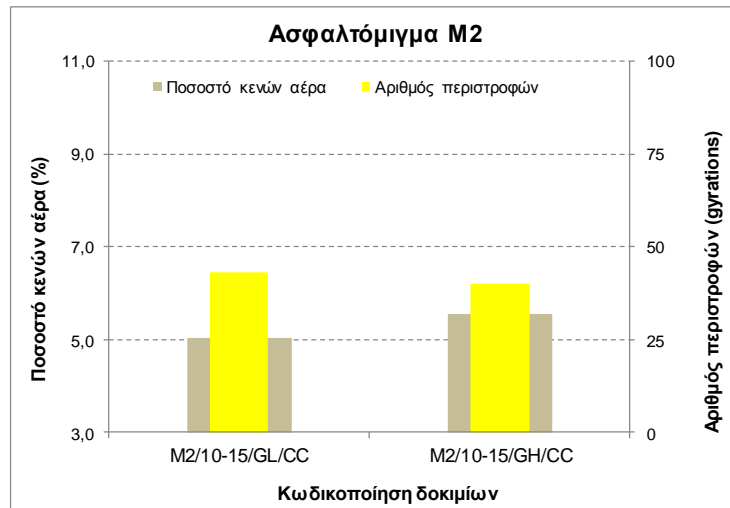


Σχήμα 5.79. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας $1,16^0$

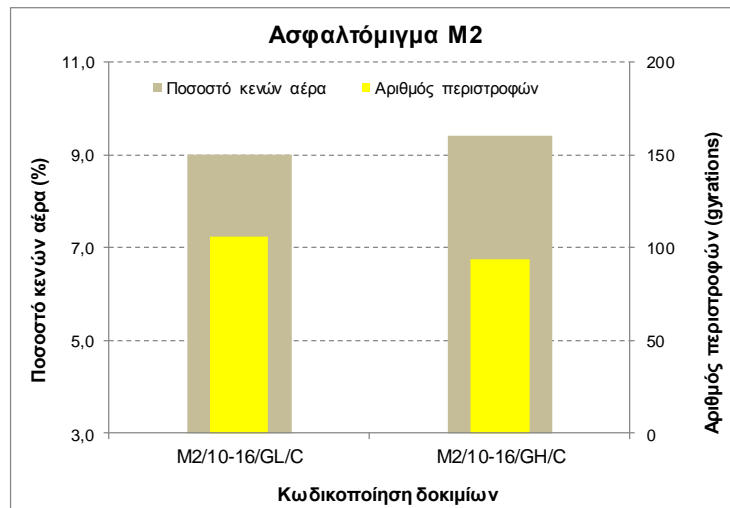


Σχήμα 5.80. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας $1,16^0$

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής $1,16^0$, και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135^0 C σε 150^0 C, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 14 και μειώνεται κατά 10 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων παραμένει σχεδόν αμετάβλητο και στις δύο περιπτώσεις (σχήματα 5.79 και 5.80).

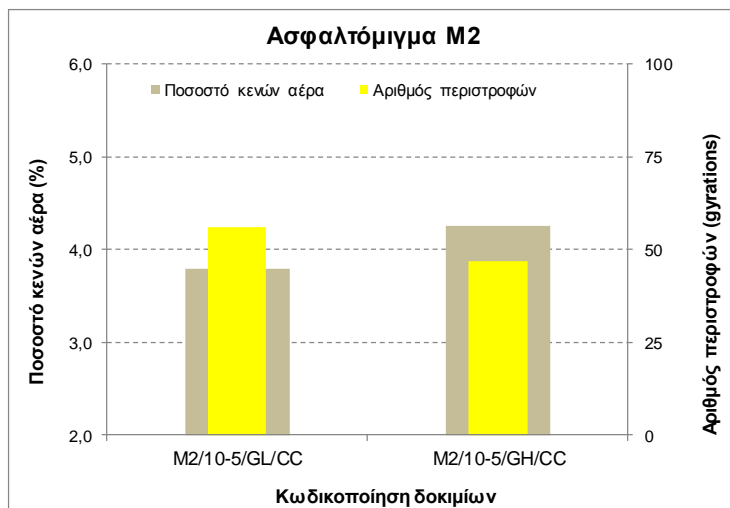


Σχήμα 5.81. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 170mm γωνίας 1,45⁰

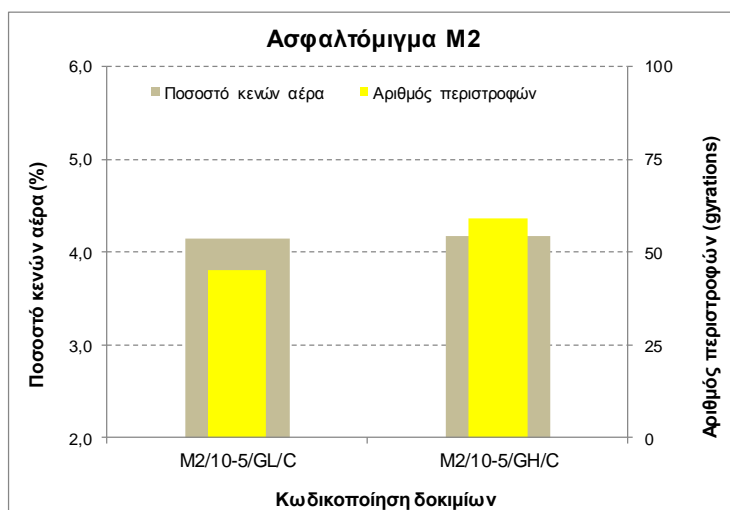


Σχήμα 5.82. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 178mm γωνίας 1,45⁰

Για δοκίμια εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰, υψών 170 mm και 178 mm και διαμέτρων 150 mm και 100 mm αντίστοιχα, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 3 και 12 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,5% και 0,4% αντίστοιχα (σχήματα 5.81 και 5.82).



Σχήμα 5.83. Δοκίμια διαμέτρου 150mm ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰



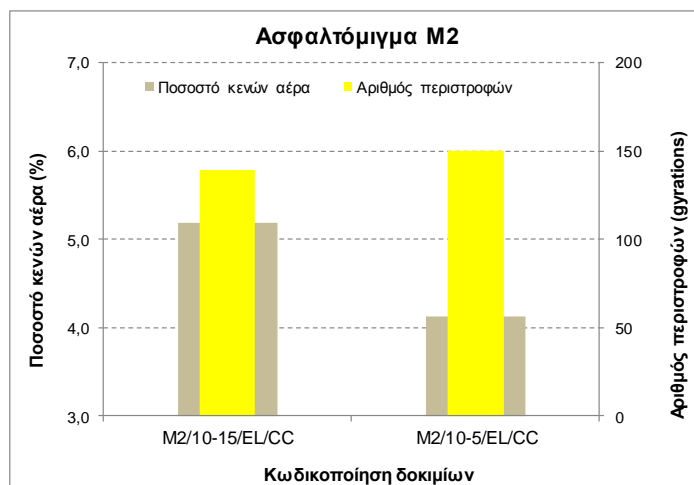
Σχήμα 5.84. Δοκίμια διαμέτρου 100mm ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰, και διαμέτρων 150 mm και 100 mm, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσης αυξάνει από 135⁰ C σε 150⁰ C, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 9 και αυξάνεται κατά 14 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,5% και παραμένει σχεδόν αμετάβλητο αντίστοιχα (σχήματα 5.83 και 5.84).

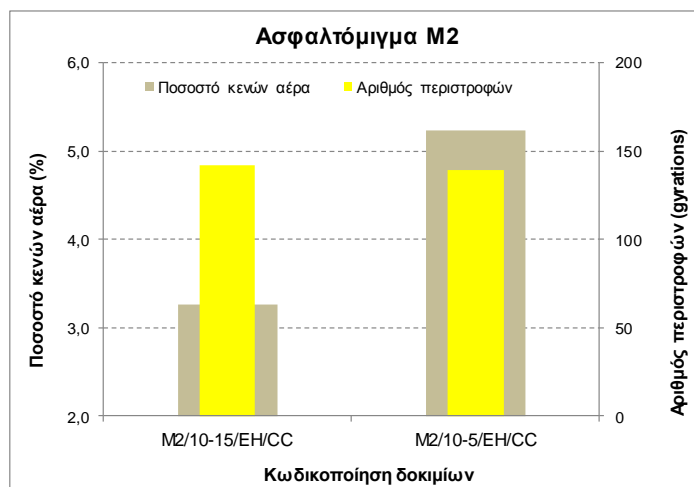
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται ότι δεν παρουσιάζεται σαφής τάση μεταβολής του ποσοστού κενών των δοκιμίων M1, καθώς η θερμοκρασία συμπίκνωσής τους μεταβάλλεται από 135⁰ C σε 150⁰ C.

5.3.2.4 Διαστάσεις δοκιμίων

Ακολουθούν τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M2, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, θερμοκρασία συμπίκνωσης και ύψος, μεταβάλλεται η διάμετρος (από 150 mm σε 100 mm).



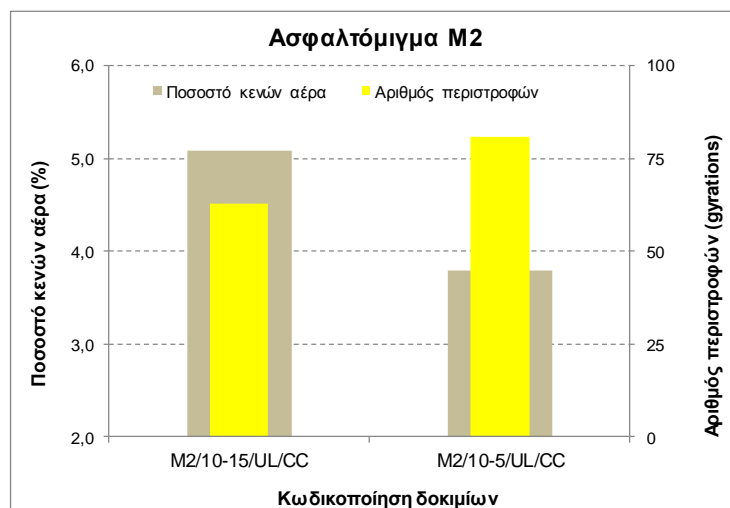
Σχήμα 5.85. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C



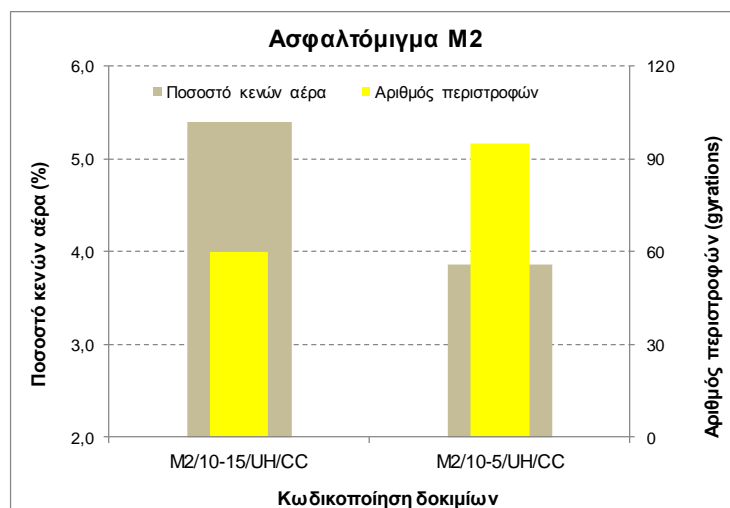
Σχήμα 5.86. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 11 και μειώνεται κατά 3

αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών του αντίστοιχου πυρήνα μειώνεται κατά 1,1% και αυξάνεται κατά 2,0% αντίστοιχα (σχήματα 5.85 και 5.86).

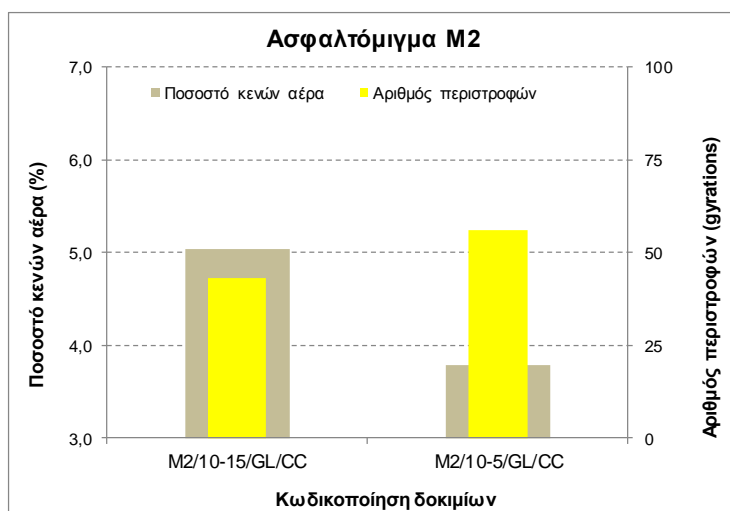


Σχήμα 5.87. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

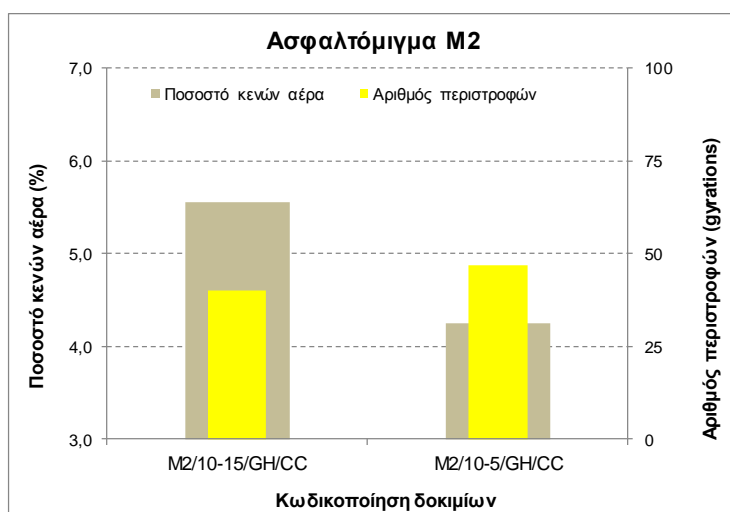


Σχήμα 5.88. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 18 και 35 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,3% και 1,5% αντίστοιχα (σχήματα 5.87 και 5.88).



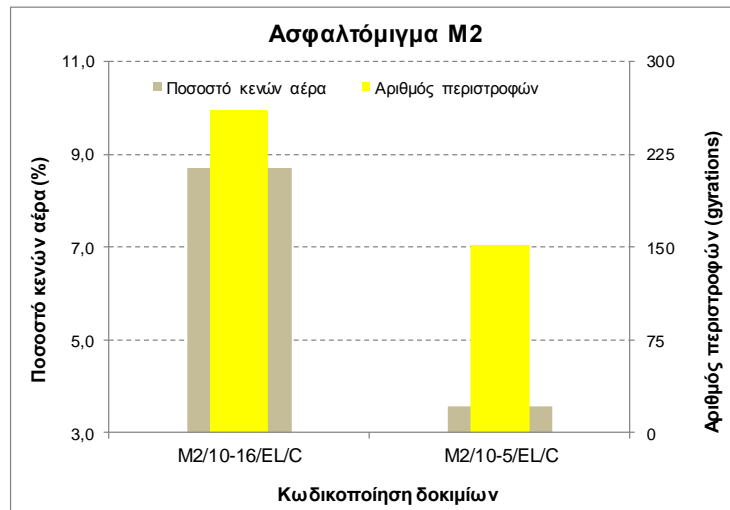
Σχήμα 5.89. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C



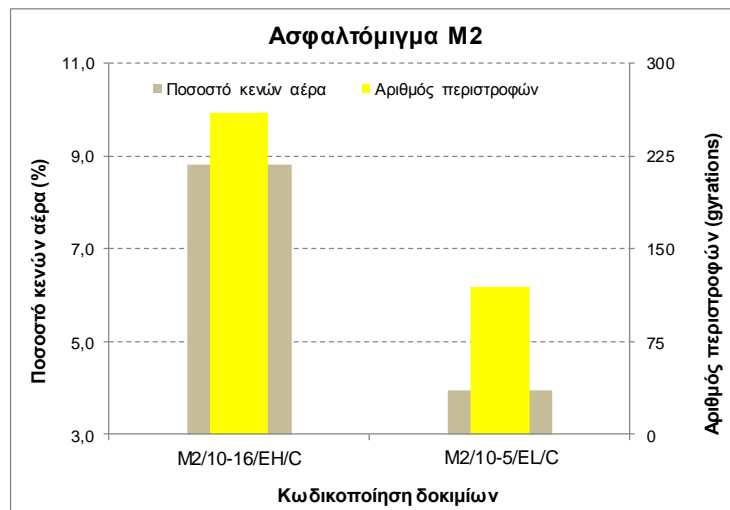
Σχήμα 5.90. Δοκίμια διαμέτρου 150mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 150 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 178 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 13 και 7 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 1,3% και στις δύο περιπτώσεις (σχήματα 5.89 και 5.90).

Σε δοκίμια διαμέτρου 150 mm, η παραπάνω μείωση του ύψους επιφέρει μέση μείωση ποσοστού κενών 0,8% και μέση αύξηση αριθμού περιστροφών κατά 14.

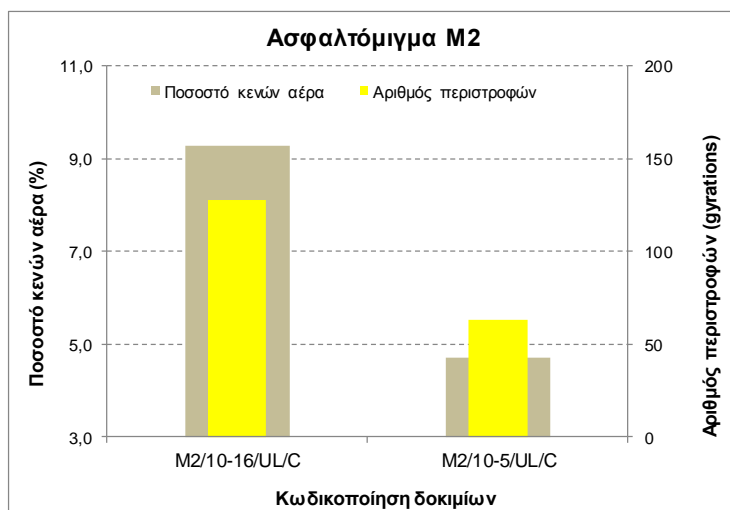


Σχήμα 5.91. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

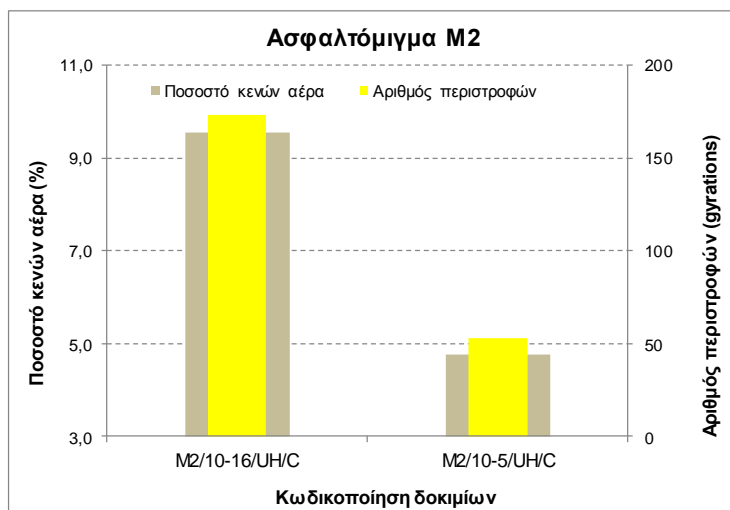


Σχήμα 5.92. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 178 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 109 και 141 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή μειώνεται κατά 5,2% και 4,9% αντίστοιχα (σχήματα 5.91 και 5.92).

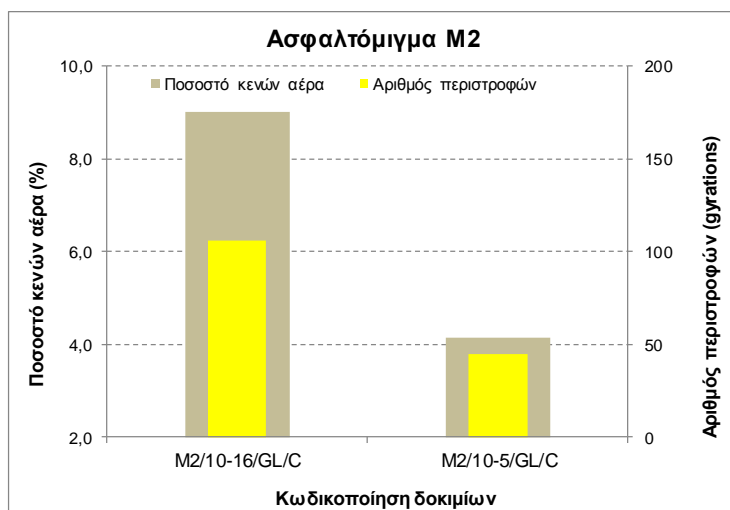


Σχήμα 5.93. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

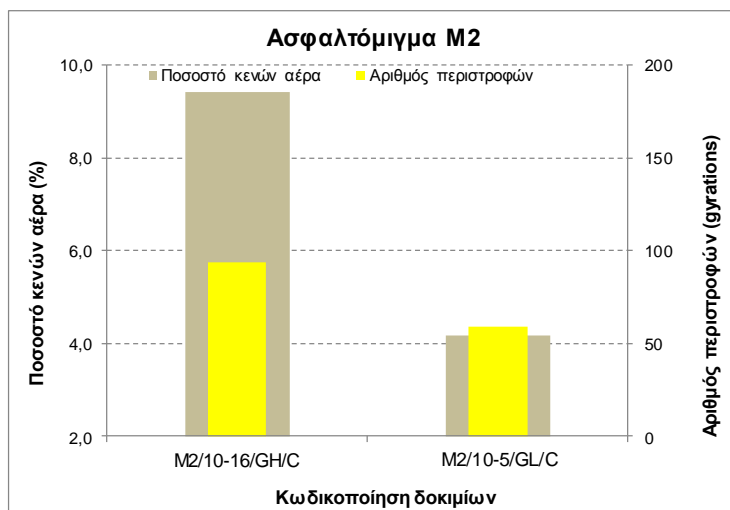


Σχήμα 5.94. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 178 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 65 και 120 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή μειώνεται κατά 4,6% και 4,7% αντίστοιχα (σχήματα 5.93 και 5.94).



Σχήμα 5.95. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

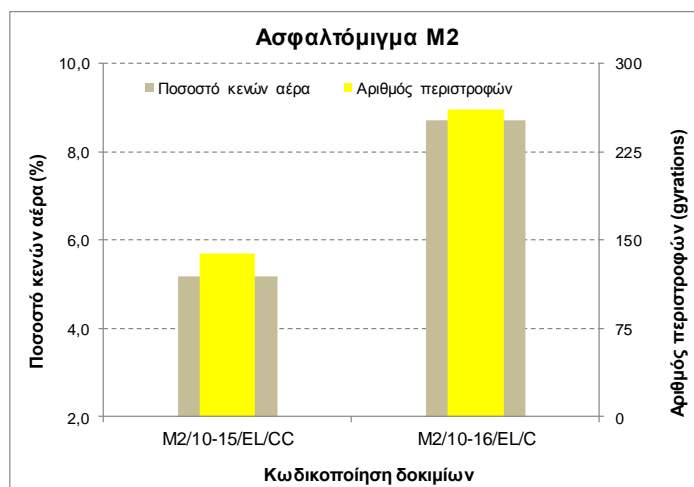


Σχήμα 5.96. Δοκίμια διαμέτρου 100mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

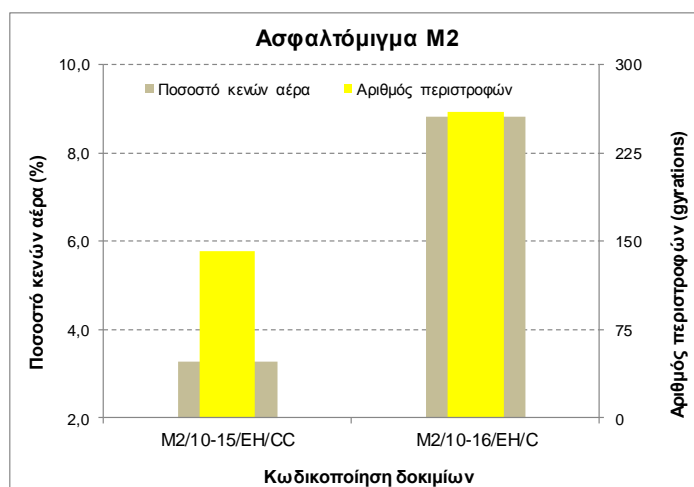
Για δοκίμια διαμέτρου 100 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς το ύψος μειώνεται από 170 mm σε 70 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 61 και 35 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των δοκιμίων μετά την κοπή μειώνεται κατά 4,9% και 5,2% αντίστοιχα (σχήματα 5.95 και 5.96).

Σε δοκίμια διαμέτρου 100 mm, η παραπάνω μείωση του ύψους επιφέρει μέση μείωση ποσοστού κενών 4,9% και μέση μείωση αριθμού περιστροφών κατά 89.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ποσοστού κενών – αριθμού περιστροφών των δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2, όπου κάθε φορά στην ίδια γωνία περιστροφής, θερμοκρασία συμπίκνωσης και ύψος, μεταβάλλεται η διάμετρος (από 150 mm σε 100 mm).

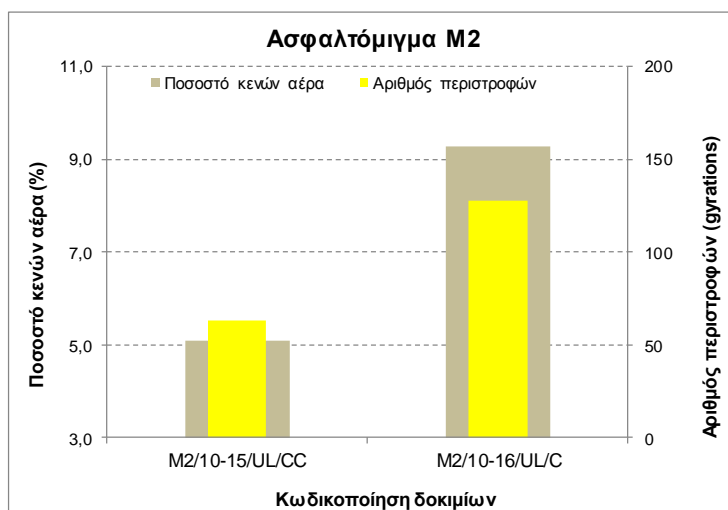


Σχήμα 5.97. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

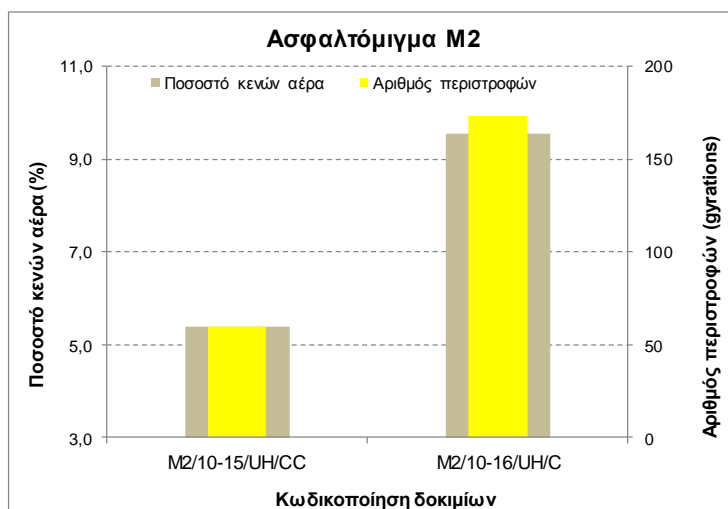


Σχήμα 5.98. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 170 mm και 178 mm αντίστοιχα, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C αντίστοιχα, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 122 και 118 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 3,5% και 5,6% αντίστοιχα (σχήματα 5.97 και 5.98).

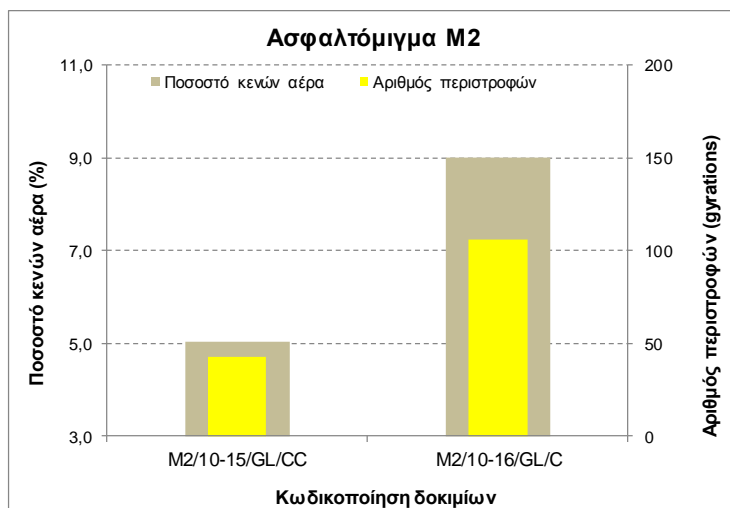


Σχήμα 5.99. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας $1,16^{\circ}$ θερμοκρασίας 135° C

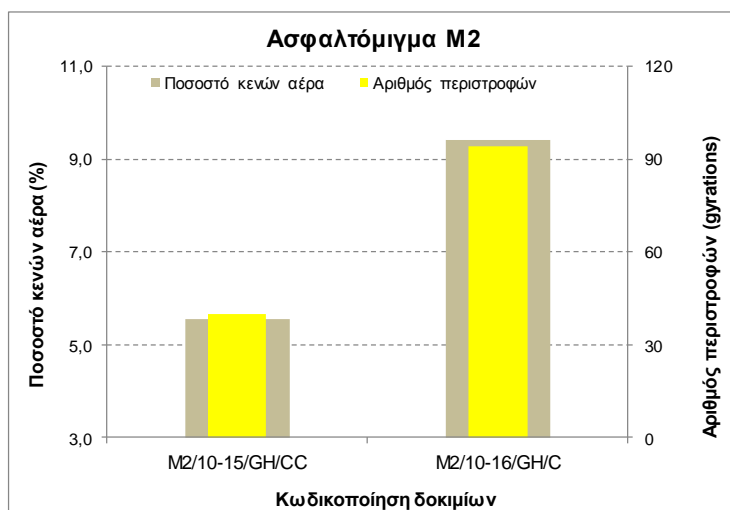


Σχήμα 5.100. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας $1,16^{\circ}$ θερμοκρασίας 150° C

Για δοκίμια ύψους 170 mm και 178 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής $1,16^{\circ}$ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135° C και 150° C αντίστοιχα, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 65 και 113 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 4,2% και 4,1% αντίστοιχα (σχήματα 5.99 και 5.100).



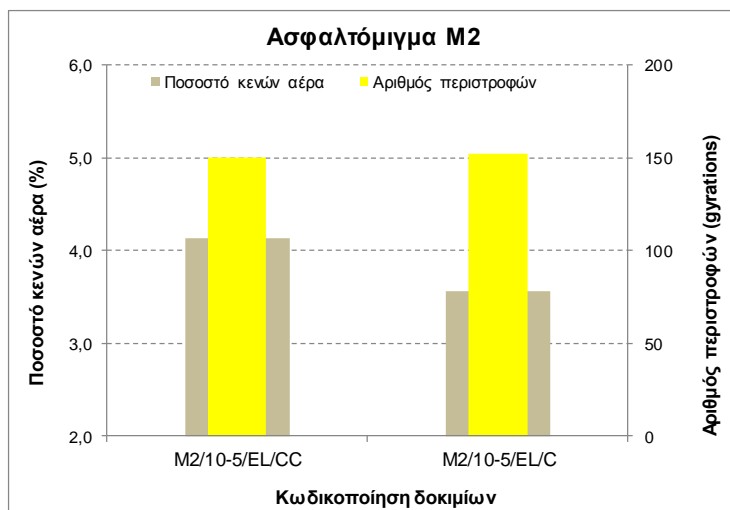
Σχήμα 5.101. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,45^ο θερμοκρασίας 135^ο C



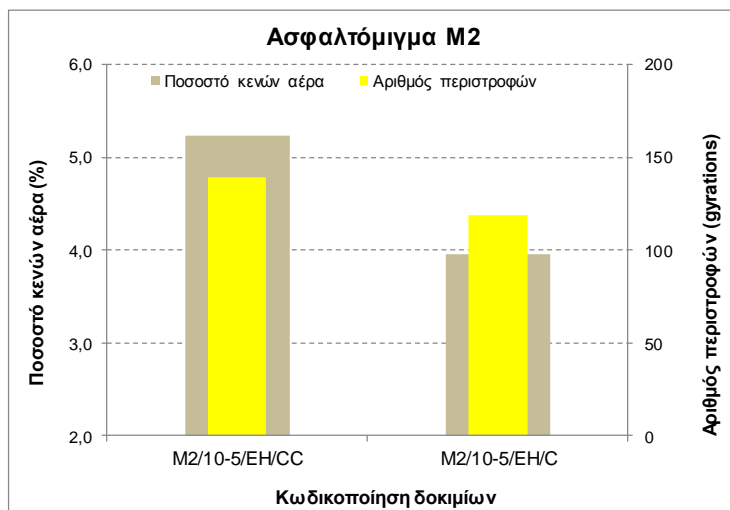
Σχήμα 5.102. Δοκίμια ύψους 170mm και 178mm γωνίας 1,45^ο θερμοκρασίας 150^ο C

Για δοκίμια ύψους 170 mm και 178 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45^ο και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135^ο C και 150^ο C αντίστοιχα, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 63 και 54 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων κομμένων δοκιμίων αυξάνεται κατά 4,0% και κατά 3,9% αντίστοιχα (σχήματα 5.101 και 5.102).

Σε δοκίμια ύψους 170 mm και 178 mm, η παραπάνω μείωση της διαμέτρου επιφέρει μέση αύξηση ποσοστού κενών 4,2% και μέση αύξηση αριθμού περιστροφών κατά 89.

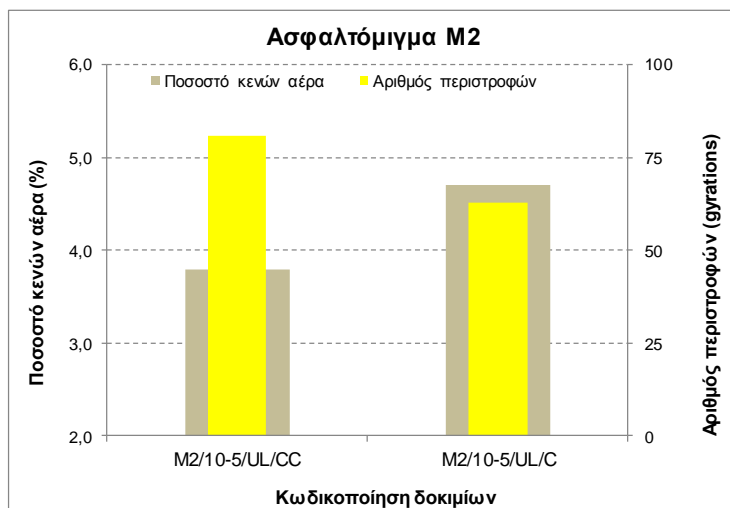


Σχήμα 5.103. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

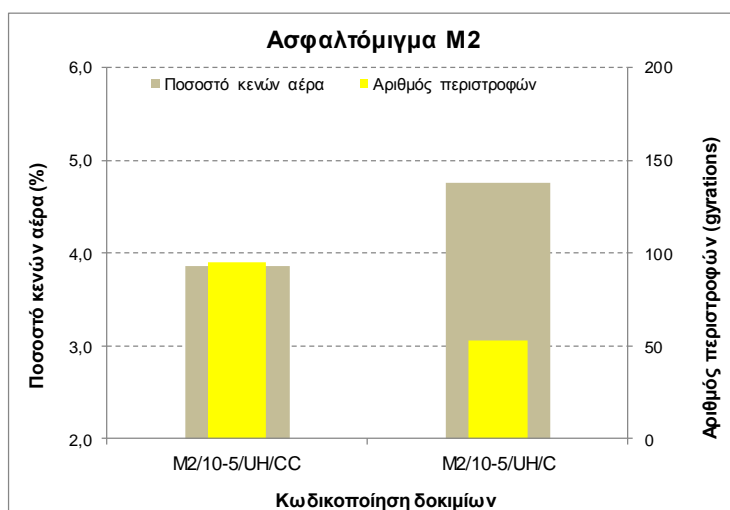


Σχήμα 5.104. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 0,82⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γυροσκοπικής γωνίας 0,82⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών αυξάνεται κατά 2 και μειώνεται κατά 20 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων μειώνεται κατά 0,6% και 1,3% αντίστοιχα (σχήματα 5.103 και 5.104).

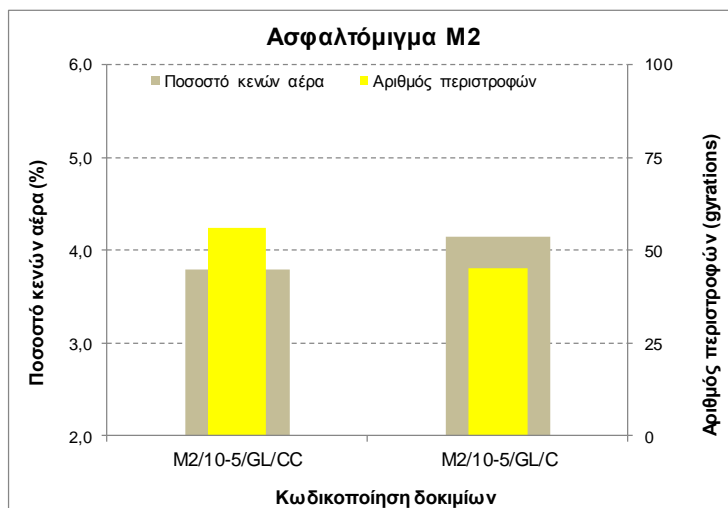


Σχήμα 5.105. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C

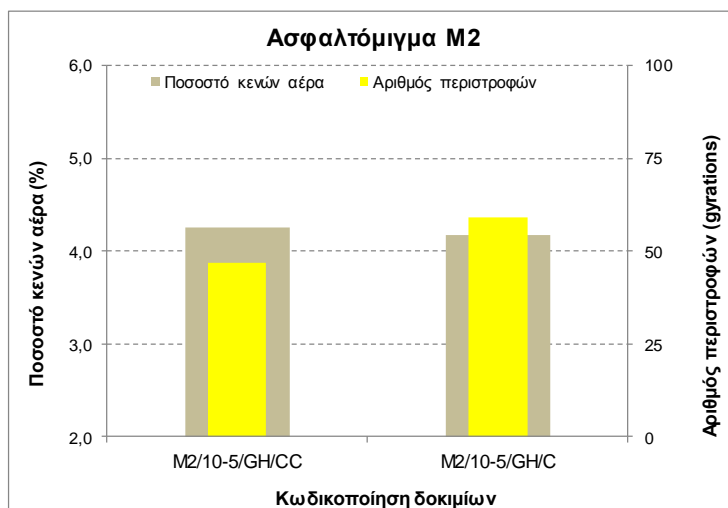


Σχήμα 5.106. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,16⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,16⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 18 και 42 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,9% και στις δύο περιπτώσεις (σχήματα 5.105 και 5.106).



Σχήμα 5.107. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 135⁰ C



Σχήμα 5.108. Δοκίμια ύψους 70mm γωνίας 1,45⁰ θερμοκρασίας 150⁰ C

Για δοκίμια ύψους 70 mm, εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1,45⁰ και θερμοκρασιών συμπίκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C, καθώς η διάμετρος μειώνεται από 150 mm σε 100 mm, ο αριθμός των περιστροφών μειώνεται κατά 11 και 12 αντίστοιχα, ενώ το ποσοστό κενών των αντίστοιχων πυρήνων αυξάνεται κατά 0,4% και μειώνεται κατά 0,1% αντίστοιχα (σχήματα 5.107 και 5.108).

Σε δοκίμια ύψους 70 mm, η παραπάνω μείωση της διαμέτρου επιφέρει μέση αύξηση ποσοστού κενών 0,1% και μέση μείωση αριθμού περιστροφών κατά 17.

5.3.2.5 Καμπύλες συμπίκνωσης

Από τις καταγραφές των υψών κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, από τη συσκευή, για τα δοκίμια που συμπτυνώθηκαν με αριθμό περιστροφών $N = 205$, καθώς και τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας αυτών των δοκιμίων, όπως προσδιορίστηκαν πειραματικά, με βάση τη σχέση (4.6) έγινε επανυπολογισμός της φαινόμενης (διορθωμένης) πυκνότητας σε κάθε αριθμό συγκεκριμένων περιστροφών.

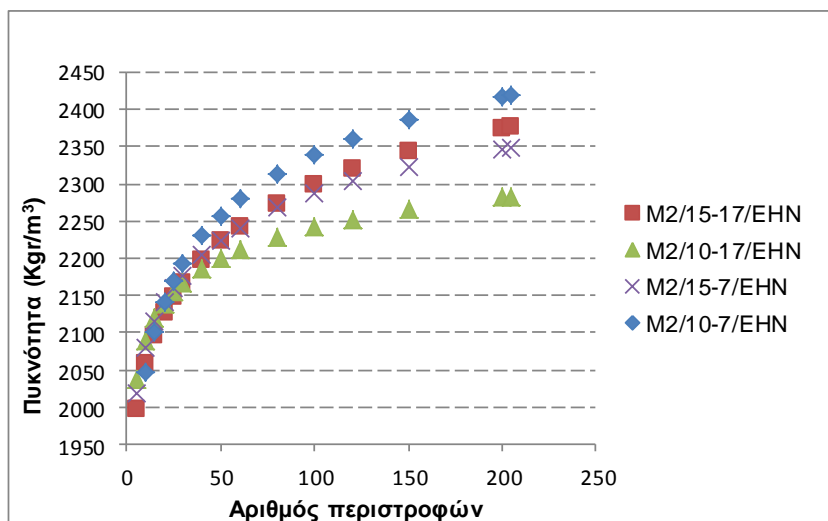
Στους πίνακες 5.29 και 5.30 και στο σχήμα 5.109 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M2, που συμπτυνώθηκαν με εσωτερική γωνία $0,82^\circ$:

Πίνακας 5.28. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/EHN και M2/10-17/EHN

M2/15-17/EHN			M2/10-17/EHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	197,9	1998	5	201,8	2037
10	192,0	2059	10	196,7	2089
15	188,4	2097	15	194,0	2119
20	185,9	2126	20	192,1	2139
25	183,9	2149	25	190,7	2155
30	182,3	2168	30	189,7	2167
40	179,8	2198	40	188,0	2186
50	177,8	2223	50	186,8	2200
60	176,2	2243	60	185,8	2212
80	173,8	2274	80	184,3	2229
100	171,9	2300	100	183,3	2242
120	170,3	2320	120	182,4	2253
150	168,6	2345	150	181,4	2265
200	166,4	2375	200	180,1	2282
205	166,2	2377	205	180,0	2283

Πίνακας 5.29. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M2/15-7/EHN και M2/10-7/EHN

M2/15-7/EHN			M2/10-7/EHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	81,1	2018	5	85,9	1918
10	78,7	2079	10	80,5	2047
15	77,4	2114	15	78,4	2102
20	76,5	2140	20	77,0	2140
25	75,8	2160	25	75,9	2170
30	75,2	2177	30	75,1	2194
40	74,2	2204	40	73,9	2230
50	73,6	2225	50	73,0	2258
60	73,0	2241	60	72,3	2279
80	72,1	2269	80	71,2	2313
100	71,5	2288	100	70,4	2340
120	71,0	2304	120	69,8	2361
150	70,5	2322	150	69,0	2386
200	69,8	2346	200	68,2	2417
205	69,7	2348	205	68,1	2419



Σχήμα 5.109. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M2 γωνίας 0,82° θερμοκρασίας 150° C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.109) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm

συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

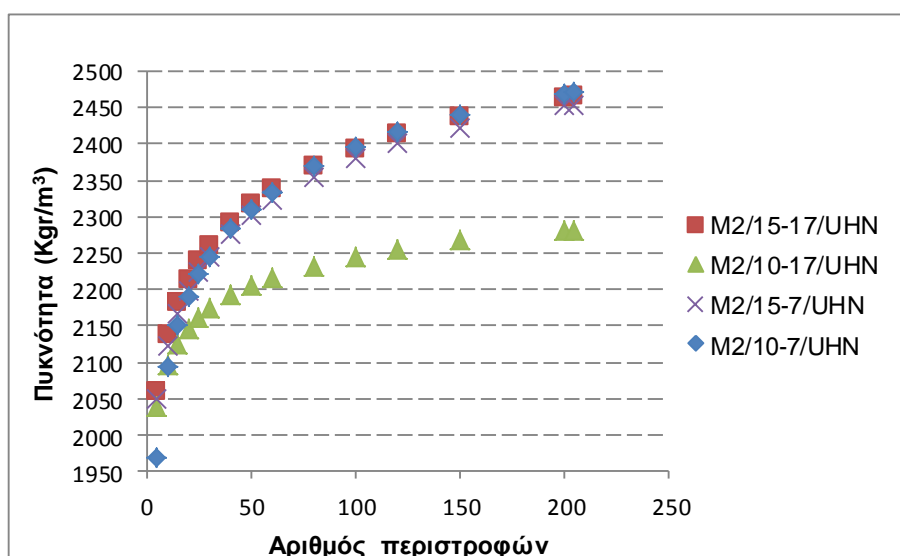
Στους πίνακες 5.32 και 5.33 και στο σχήμα 5.110 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M2, που συμπυκνώθηκαν με εσωτερική γωνία $1,16^{\circ}$:

Πίνακας 5.30. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/UHN και M2/10-17/UHN

M2/15-17/UHN			M2/10-17/UHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	192,2	2060	5	198,8	2040
10	185,4	2137	10	193,5	2095
15	181,6	2181	15	190,8	2125
20	178,9	2214	20	189,0	2146
25	176,9	2239	25	187,6	2162
30	175,3	2260	30	186,5	2174
40	172,8	2292	40	185,0	2192
50	170,9	2317	50	183,8	2206
60	169,4	2338	60	183,0	2216
80	167,1	2370	80	181,6	2233
100	165,4	2394	100	180,6	2245
120	164,1	2414	120	179,8	2255
150	162,5	2437	150	178,9	2267
200	160,7	2465	200	177,7	2281
205	160,5	2467	205	177,7	2283

Πίνακας 5.31. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμών M2/15-7/UHN και M2/10-7/UHN

M2/15-7/UHN			M2/10-7/UHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	80,2	2049	5	84,0	1969
10	77,5	2122	10	79,1	2093
15	75,9	2166	15	76,9	2150
20	74,8	2199	20	75,5	2190
25	73,9	2224	25	74,5	2221
30	73,2	2244	30	73,7	2246
40	72,2	2277	40	72,5	2283
50	71,4	2302	50	71,6	2311
60	70,7	2324	60	70,9	2333
80	69,8	2356	80	69,8	2369
100	69,0	2381	100	69,1	2396
120	68,5	2400	120	68,5	2416
150	67,8	2423	150	67,8	2440
200	67,0	2452	200	67,0	2469
205	67,0	2454	205	67,0	2471



Σχήμα 5.110. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M2, γωνίας 1,16°, θερμοκρασίας 150° C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.110) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

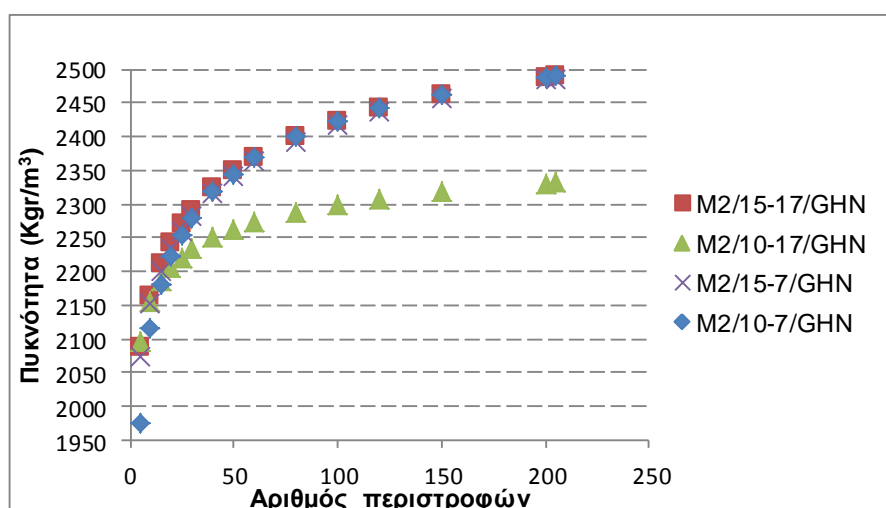
Στους πίνακες 5.34 και 5.35 και στο σχήμα 5.111 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια ασφαλτομίγματος M2, που συμπυκνώθηκαν με εσωτερική γωνία $1,45^{\circ}$:

Πίνακας 5.32. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας δοκιμίων M2/15-17/GHN και M2/10-17/GHN

M2/15-17/GHN			M2/10-17/GHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	188,9	2088	5	194,5	2096
10	182,2	2164,	10	189,2	2155
15	178,3	2211	15	186,6	2185
20	175,7	2244	20	184,8	2206
25	173,7	2270	25	183,6	2221
30	172,1	2291	30	182,6	2233
40	169,6	2324	40	181,2	2251
50	167,8	2350	50	180,2	2263
60	166,4	2370	60	179,4	2273
80	164,3	2400	80	178,2	2289
100	162,7	2424	100	177,3	2300
120	161,4	2442	120	176,6	2308
150	160,1	2463	150	175,8	2319
200	158,5	2488	200	174,9	2331
205	158,4	2490	205	174,8	2332

Πίνακας 5.33. Επανυπολογισμός φαινόμενης πυκνότητας M2/15-7/GHN και M2/10-7/GHN

M2/15-7/GHN			M2/10-7/GHN		
Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό	Αριθμός περιστροφών	Ύψος δοκιμίου (mm)	Πυκνότητα μετά τον επανυπολογισμό
5	79,3	2074	5	82,5	1975
10	76,4	2153	10	77,0	2116
15	74,7	2200	15	74,8	2180
20	73,6	2234	20	73,3	2223
25	72,8	2260	25	72,3	2255
30	72,1	2282	30	71,5	2280
40	71,0	2316	40	70,3	2318
50	70,3	2341	50	69,5	2345
60	69,6	2363	60	68,8	2368
80	68,7	2394	80	67,9	2401
100	68,1	2417	100	67,2	2424
120	67,5	2436	120	66,7	2444
150	66,9	2458	150	66,1	2464
200	66,2	2484	200	65,5	2488
205	66,1	2487	205	65,5	2490



Σχήμα 5.111. Διορθωμένη πυκνότητα δοκιμών M2, γωνίας 1,45°, θερμοκρασίας 150° C

Από το παραπάνω διάγραμμα (σχ. 5.111) αριθμού περιστροφών – διορθωμένης πυκνότητας φαίνεται ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα, ενώ, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

5.3.3 Στατιστική ανάλυση

Για να βρεθεί εάν η μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων διαφοροποιεί σημαντικά την συμπίκνωση των δοκιμών με γυροσκοπική συσκευή πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων σε σχέση με τη μηχανική κατεργασία, τη γωνία, τη θερμοκρασία συμπίκνωσης, τη διάμετρο και το ύψος του δοκιμίου.

5.3.3.1 Μηχανική κατεργασία δοκιμών

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της μηχανικής κατεργασίας στο ποσοστό κενών. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στην αρχική κατάσταση των δοκιμών M2 διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm, μετά την πυρηνοληψία και την κοπή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.36:

Πίνακας 5.34. Ποσοστά κενών δοκιμών M2 διαμέτρου 150 mm, πριν και μετά την κοπή

Κωδικός μετά την κοπή	Αρχική κατάσταση v_{ng} (%)	Ποσοστό κενών μετά πυρηνοληψία και κοπή v_{ng} (%)
M2/10-15/EL/CC	6,6	5,2
M2/10-5/EL/CC	5,7	4,1
M2/10-5/EL/C	4,9	3,6
M2/10-15/EH/CC	6,1	3,3
M2/10-5/EH/CC	6,0	5,2
M2/10-5/EH/C	5,0	4,0
M2/10-15/UL/CC	6,4	5,1
M2/10-5/UL/CC	4,9	3,4
M2/10-5/UL/C	5,5	4,7
M2/10-15/UH/CC	6,6	5,4
M2/10-5/UH/CC	5,2	3,9
M2/10-5/UH/C	5,9	4,8
M2/10-15/GL/CC	6,3	5,0
M2/10-5/GL/CC	5,3	3,8
M2/10-5/GL/C	5,1	4,2
M2/10-15/GH/CC	6,7	5,6
M2/10-5/GH/CC	5,9	4,3
M2/10-5/GH/C	5,0	4,2

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.36 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$ παίρνουμε:

Πίνακας 5.35. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 διαμέτρου 150 mm πριν και μετά την κοπή

	μ_A	μ_B
<i>Αρχική κατάσταση Μετά πυρηνοληψία-κοπή</i>		
Μέσος	5,728888889	4,418888889
Διακύμανση	0,39769281	0,517398693
Μέγεθος δείγματος	18	18
Συσχέτιση Pearson	0,762306154	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω βαθμοί ελευθερίας	0	17
t	11,75609453	
$P(T \leq t)$ μονόπλευρη	6,88368E-10	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,739606726	
$P(T \leq t)$ δίπλευρη	1,37674E-09	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,109815578	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm του ασφαλτομίγματος M2, υπάρχει σημαντική διαφορά για τα ποσοστά κενών των υπόψη δοκιμίων πριν και μετά την πυρηνοληψία και κοπή της κορυφής και της βάσης, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, στα δοκίμια διαμέτρου 150 mm και διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm του ασφαλτομίγματος M2, μετά την πυρηνοληψία και κοπή της κορυφής και της βάσης κατά 10 mm, η μείωση του ποσοστού κενών είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στην αρχική κατάσταση των δοκιμίων M2 διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm μετά την κοπή κορυφής και βάσης κατά 10 mm παρουσιάζονται στον πίνακα 5.38:

Πίνακας 5.36. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά την κοπή

Κωδικός μετά την κοπή	Αρχική κατάσταση v_{ng} (%)	Ποσοστό κενών μετά πυρηνοληψία και κοπή v_{ng} (%)
M2/10-15/EL/C	8,1	8,7
M2/10-15/EH/C	7,8	8,8
M2/10-15/UL/C	8,2	9,3
M2/10-15/UH/C	7,2	9,5
M2/10-15/GL/C	7,4	9,0
M2/10-15/GH/C	7,8	9,4

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.38 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$ παίρνουμε:

Πίνακας 5.37. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M2 διαμέτρου 100mm ύψους 170mm πριν και μετά την κοπή

	μ_A	μ_B
	<i>Αρχική κατάσταση Μετά πυρηνοληψία-κοπή</i>	
Μέσος	7,743333333	9,126666667
Διακύμανση	0,177906667	0,109426667
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	-0,403697774	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-5,357716258	
$P(T \leq t)$ μονόπλευρη	0,001522493	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
$P(T \leq t)$ δίπλευρη	0,003044985	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm του ασφαλτομίγματος M2, υπάρχει σημαντική διαφορά για τα ποσοστά κενών των υπόψη δοκιμών πριν και μετά την κοπή της κορυφής και της βάσης, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Συνεπώς στα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm του ασφαλτομίγματος M2, μετά την κοπή της κορυφής και της βάσης κατά 1 cm, η αύξηση του ποσοστού κενών είναι στατιστικά σημαντική.

5.3.3.2 Γωνία περιστροφής

Για τη μεταβολή της γωνίας περιστροφής, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της φαινόμενης πυκνότητας για $N=205$ περιστροφές. Έτσι, συντάχθηκε ο πίνακας 5.40, με τρεις στήλες για το ασφαλτόμιγμα M2, όπου σε κάθε στήλη αντιστοιχεί μία γωνία ($E=0,82^0$, $U=1,16^0$ και $G=1,45^0$).

Πίνακας 5.38. Φαινόμενες πυκνότητες δοκιμών M2 θερμοκρ. 150° C για N=205

	EHN	UHN	GHN
M2/15-17	2377	2467	2490
M2/10-17	2283	2283	2332
M2/15-7	2348	2454	2487
M2/10-7	2419	2471	2490

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις γωνίες $E=0,82^{\circ}$ και $U=1,16^{\circ}$ στις δύο πρώτες στήλες του πίνακα 5.38 και με μηδενική υπόθεση $\mu_E=\mu_U$, έχουμε:

Πίνακας 5.39. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M2 για γωνίες 0,82° και 1,16°

	μ_E	μ_U
	M2/EHN	M2/UHN
Μέσος	2356,75	2418,75
Διακύμανση	3266,916667	8242,916667
Μέγεθος δείγματος	4	4
Συσχέτιση Pearson	0,894965114	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	3	
t	-2,630963471	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,039130174	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,353363435	
P(T<=t) δίπλευρη	0,078260347	
t κρίσιμο, δίπλευρο	3,182446305	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι για τις γωνίες $0,82^{\circ}$ και $1,16^{\circ}$ στο ασφαλτόμιγμα M2, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά των πυκνοτήτων, καθώς μεταβάλλεται η γωνία, άρα η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από $0,82^{\circ}$ σε $1,16^{\circ}$ η αύξηση της πυκνότητας δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Ομοίως, εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις γωνίες $U=1,16^{\circ}$ και $G=1,45^{\circ}$ στη δεύτερη και στην τρίτη στήλη του πίνακα 5.38 και με μηδενική υπόθεση $\mu_U=\mu_G$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.40. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για γωνίες 1,16° και 1,45°

	μ_U	μ_G
	<i>M2/UHN</i>	<i>M2/GHN</i>
Μέσος	2418,75	2449,75
Διακύμανση	8242,916667	6164,25
Μέγεθος δείγματος	4	4
Συσχέτιση Pearson	0,998041375	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	3	
t	-4,638418413	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,009441646	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,353363435	
P(T<=t) δίπλευρη	0,018883292	
t κρίσιμο, δίπλευρο	3,182446305	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι για τις γωνίες 1,16° και 1,45° στο ασφαλτόμιγμα M2, υπάρχει σημαντική διαφορά των πυκνοτήτων, καθώς μεταβάλλεται η γωνία, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής από 1,16° σε 1,45° η αύξηση της πυκνότητας είναι στατιστικά σημαντική.

5.3.3.3 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο ποσοστό κενών. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης των δοκιμίων ασφαλτομίγματος M2 από 135° C σε 150° C, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.41:

Πίνακας 5.41. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 για μεταβολή της θερμοκρασίας

Κωδικός δοκιμίου	Θερμοκρασία 135 ⁰ C	Θερμοκρασία 150 ⁰ C
M2/15-17/E	5,2	3,3
M2/10-17/E	8,7	8,8
M2/15-7/E	4,1	5,2
M2/10-7/E	3,6	4,0
M2/15-17/U	5,1	5,4
M2/10-17/U	9,3	9,5
M2/15-7/U	3,4	3,9
M2/10-7/U	4,7	4,8
M2/15-17/U	5,0	5,6
M2/10-17/U	9,0	9,4
M2/15-7/U	3,8	4,3
M2/10-7/U	4,2	4,2

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.44 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.42. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 για θερμοκρασίες συμπύκνωσης 135⁰ C και 150⁰ C

	μ_A 135 ⁰ C	μ_B 150 ⁰ C
Μέσος	5,505	5,686666667
Διακύμανση	4,792063636	5,11149697
Μέγεθος δείγματος	12	12
Συσχέτιση Pearson	0,946791399	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	11	
t	-0,862935019	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,203297195	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,795884819	
P(T<=t) δίπλευρη	0,406594391	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,20098516	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M2, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των στηλών του πίνακα 5.43, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία συμπίκνωσης από 135⁰ C σε 150⁰ C, άρα η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται.

Κατόπιν τούτου, συνεπάγεται ότι με η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης από 135⁰ C σε 150⁰ C, η μεταβολή του ποσοστού κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική.

5.3.3.4 Διαστάσεις δοκιμίων

Στην ενότητα αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των διαστάσεων (ύψους και διαμέτρου) στο ποσοστό κενών.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή του ύψους των δοκιμίων ασφαλτομίγματος M2 από 170 mm σε 70 mm, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.46:

Πίνακας 5.43. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 για μεταβολή του ύψους

Κωδικός δοκιμίου	Ύψος 170mm	Ύψος 70mm
M2/15/EL	5,2	4,1
M2/15/EH	3,3	5,2
M2/15/UL	5,1	3,4
M2/15/UH	5,4	3,9
M2/15/GL	5,0	3,8
M2/15/GH	5,6	4,3
M2/10/EL	8,7	3,6
M2/10/EH	8,8	4,0
M2/10/UL	9,3	4,7
M2/10/UH	9,5	4,8
M2/10/GL	9,0	4,2
M2/10/GH	9,4	4,2

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.46 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.44. Έλεγχος t μέσου δοκιμών M2 για τα ύψη 170mm και 70mm

	μ_A	μ_B
	Ύψος 170mm	Ύψος 70mm
Μέσος	7,025833333	4,1675
Διακύμανση	5,191717424	0,273838636
Μέγεθος δείγματος	12	12
Συσχέτιση Pearson	-0,006802851	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	11	
t	4,229049262	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,000707339	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,795884819	
P(T<=t) δίπλευρη	0,001414678	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,20098516	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M2, υπάρχει σημαντική διαφορά για μεταβολή των υψών 170 mm σε 70 mm, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Άρα, για το ασφαλτόμιγμα M2, για μείωση του ύψους των δοκιμών, από τα 170 mm περίπου στα 70 mm, η μείωση του ποσοστού κενών είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της διαμέτρου από 150mm σε 100 mm των δοκιμών ύψους 170 mm ασφαλτομίγματος M2, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.48:

Πίνακας 5.45. Ποσοστά κενών δοκιμών M2 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου

Ύψος 170mm	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
M2/17/EL	5,2	8,7
M2/17/EH	3,3	8,8
M2/17/UL	5,1	9,3
M2/17/UH	5,4	9,5
M2/17/GL	5,0	9,0
M2/17/GH	5,6	9,4

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.48 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.46. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 ύψους 170mm για μεταβολή της διαμέτρου

	μ_A	μ_B
	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
Μέσος	4,923333333	9,128333333
Διακύμανση	0,703626667	0,108936667
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	0,57215707	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-14,6288526	
P(T<=t) μονόπλευρη	1,3481E-05	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
P(T<=t) δίπλευρη	2,6962E-05	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| > t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M2, σε δοκίμια ύψους 170 mm, υπάρχει σημαντική διαφορά για μεταβολή της διαμέτρου από 150 mm σε 100 mm, άρα η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται. Συνεπώς, στο ασφαλτόμιγμα M2, για μείωση της διαμέτρου από 150 mm στα 100 mm, για ύψος δοκιμίου στα 170mm, η αύξηση του ποσοστού κενών είναι στατιστικά σημαντική.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών για μεταβολή της διαμέτρου από 150mm σε 100 mm των δοκιμίων ύψους 70 mm ασφαλτομίγματος M2, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.50:

Πίνακας 5.47. Ποσοστά κενών δοκιμίων M2 ύψους 70 mm για μεταβολή της διαμέτρου

Ύψος 70mm	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
M2/7/EL	4,1	3,6
M2/7/EH	5,2	4,0
M2/7/UL	3,4	4,7
M2/7/UH	3,9	4,8
M2/7/GL	3,8	4,2
M2/7/GH	4,3	4,2

Εφαρμόζοντας έλεγχο t του μέσου δύο δειγμάτων συσχετισμένων ζευγών για τις δύο στήλες του παραπάνω πίνακα 5.50 και με μηδενική υπόθεση $\mu_A = \mu_B$, παίρνουμε:

Πίνακας 5.48. Έλεγχος t μέσου δοκιμίων M2 ύψους 70 mm για μεταβολή διαμέτρου

	μ_A	μ_B
Ύψος 70 mm	Διάμετρος 150mm	Διάμετρος 100mm
Μέσος	4,115	4,22
Διακύμανση	0,38755	0,20828
Μέγεθος δείγματος	6	6
Συσχέτιση Pearson	-0,537325687	
Υποθέμενη διαφορά μέσω	0	
βαθμοί ελευθερίας	5	
t	-0,270935792	
$P(T \leq t)$ μονόπλευρη	0,398634768	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	2,015048373	
$P(T \leq t)$ δίπλευρη	0,797269536	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,570581836	

Επειδή $|t| < t_{\text{κρίσιμο}}$ προκύπτει ότι, για το ασφαλτόμιγμα M2, σε δοκίμια ύψους 70 mm, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά για μεταβολή της διαμέτρου από 150 mm σε 100 mm, άρα η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Επομένως, στο ασφαλτόμιγμα M2, για ύψος δοκιμίου στα 70 mm το ποσοστό κενών δεν είναι στατιστικά σημαντική η μεταβολή του ποσοστού κενών.

5.3.3.5 Καμπύλες συμπύκνωσης

Για τη διερεύνηση της συμπυκνωσιμότητας των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M2, στις διάφορες διαστάσεις και γωνίες περιστροφής, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της διορθωμένης πυκνότητας των δοκιμίων (παράγραφος 5.2.3.5.), πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση με τη μέθοδο της παλινδρόμησης. Το πρότυπο έχει τη μορφή $y = a \log x + \beta$, όπου y : η διορθωμένη πυκνότητα και x : ο αριθμός των περιστροφών. Τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης (συντελεστές a και β της εξίσωσης $y = a \log x + \beta$, καθώς και ο δείκτης R^2 συσχετισμού με την ευθεία της υπόψη εξίσωσης) παρουσιάζονται στον πίνακα 5.52:

Πίνακας 5.49. Συντελεστές α και β και δείκτης R αποτελεσμάτων επανυπολογισμού δοκιμών M2

Κωδικός δοκιμίου	α	β	R^2
M2/15-17/EHN	240,9	1817	0,998
M2/10-17/EHN	150,2	1941	0,997
M2/15-7/EHN	206,6	1873	0,999
M2/10-7/EHN	297,3	1745	0,993
M2/15-17/UHN	254,1	1884	0,999
M2/10-17/UHN	146,6	1951	0,993
M2/15-7/UHN	254,4	1869	0,999
M2/10-7/UHN	301,3	1790	0,993
M2/15-17/GHN	251,8	1916	0,998
M2/10-17/GHN	140,4	2018	0,986
M2/15-7/GHN	257,6	1899	0,999
M2/10-7/GHN	303,3	1814	0,981

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι, ο συντελεστής R^2 προσεγγίζει τη μονάδα και ως εκ τούτου είναι πολύ καλή η προσαρμογή με την ευθεία με εξίσωση $y = a \log x + \beta$.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής α εκτιμά το ρυθμό συμπυκνωσιμότητας, δηλαδή πόσο γρήγορα συμπυκνώνεται το δοκίμιο στη γυροσκοπική συσκευή, δηλαδή τόσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός συμπύκνωσης. Έτσι, για να βρούμε το ρυθμό συμπύκνωσης ανά γωνία, αναδιατάσσονται οι γραμμές του πίνακα 5.50 με αύξουσα σειρά για τον συντελεστή α , ανά γωνία:

Πίνακας 5.50. Συντελεστές α και β της $y = a \log x + \beta$, με αύξουσα σειρά για τον α , ανά γωνία

Κωδικός δοκιμίου	α	β	R^2
M2/10-17/EHN	150,2	1941	0,997
M2/15-7/EHN	206,6	1873	0,999
M2/15-17/EHN	240,9	1817	0,998
M2/10-7/EHN	297,3	1745	0,993
M2/10-17/UHN	146,6	1951	0,993
M2/15-17/UHN	254,1	1884	0,999
M2/15-7/UHN	254,4	1869	0,999
M2/10-7/UHN	301,3	1790	0,993
M2/10-17/GHN	140,4	2018	0,986
M2/15-17/GHN	251,8	1916	0,998
M2/15-7/GHN	257,6	1899	0,999
M2/10-7/GHN	303,3	1814	0,981

Από τον πίνακα 5.51 προκύπτει ότι τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα. Αντίθετα, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά. Τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα σε εσωτερική γωνία $1,16^{\circ}$ απ' ότι σε γωνία $0,82^{\circ}$, αλλά δεν υπάρχει η ίδια σαφής τάση για την εσωτερική γωνία $1,45^{\circ}$ σε σχέση με τη γωνία $1,16^{\circ}$.

6 ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καθώς δεν έχει βρεθεί μία μέθοδος εργαστηριακής συμπύκνωσης διεθνώς αποδεκτή, το θέμα της εργαστηριακής συμπύκνωσης παραμένει επίκαιρο. Αν και η εργαστηριακή μέθοδος συμπύκνωσης Marshall παραμένει η επίσημη μέθοδος, κατά τις ελληνικές προδιαγραφές, έχει διαπιστωθεί ότι νεότερες μέθοδοι εργαστηριακής συμπύκνωσης προσομοιώνουν καλύτερα τη συμπύκνωση στο εργοτάξιο. Συγκεκριμένα, η γυροσκοπική μέθοδος συμπύκνωσης τείνει να χρησιμοποιείται διεθνώς όλο και περισσότερο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε συστηματική διερεύνηση παραγόντων που επηρεάζουν την εργαστηριακή συμπύκνωση ασφαλτομιγμάτων μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου.

Προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκε εκτενές εργαστηριακό πείραμα, αξιοποιώντας τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. Στο εργαστηριακό πείραμα συμπυκνώθηκαν δοκίμια δύο τύπων ασφαλτομιγμάτων πυκνής σύνθεσης, για διάφορες παραμέτρους συμπύκνωσης (γωνία περιστροφής, θερμοκρασία συμπύκνωσης και διαστάσεις δοκιμίων) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μηχανική κατεργασία (πυρηνοληψία και κοπή βάσης και κορυφής) των συμπυκνωθέντων δοκιμίων. Σε όλες τις φάσεις του πειράματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας και του ποσοστού κενών.

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

- Διαπιστώθηκε ότι καθώς αυξάνει η εσωτερική γωνία περιστροφής από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$, δηλαδή οι γωνίες που συνιστούν η ευρωπαϊκή και η αμερικάνικη προδιαγραφή αντίστοιχα, αυξάνεται γενικά η φαινόμενη πυκνότητα (και αντίστοιχα μειώνεται το ποσοστό κενών). Η μεταβολή από $1,16^\circ$ σε $1,45^\circ$ αυξάνει γενικά τη φαινόμενη πυκνότητα, αλλά σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τη μεταβολή από $0,82^\circ$ σε $1,16^\circ$.
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, από 135°C στους 150°C , δεν επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό κενών των συμπυκνωμένων δοκιμίων.
- Για μείωση του ύψους των δοκιμίων, από 170 mm σε 70 mm, το ποσοστό κενών γενικά μειώνεται.

- Για μείωση της διαμέτρου από 150 mm στα 100 mm, στην περίπτωση των δοκιμίων ύψους 170mm, το ποσοστό κενών γενικά αυξάνεται, ενώ στην περίπτωση των δοκιμίων ύψους 70 mm, δεν υπάρχει σαφής τάση μεταβολής.
- Στα δοκίμια διαμέτρου 150 mm, μετά τη λήψη πυρήνων διαμέτρου 100 mm, το ποσοστό κενών μειώνεται.
- Σε όλους τους τύπους των δοκιμίων, μετά την κοπή της κορυφής και της βάσης κατά 10 mm, υπάρχει σημαντική μείωση του ποσοστού κενών. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm, όπου μετά την κοπή το ποσοστό κενών γενικά αυξάνεται.
- Τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 70 mm συμπυκνώνονται πιο γρήγορα από τα δοκίμια των υπολοίπων διαστάσεων, ενώ αντίθετα, τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 170 mm συμπυκνώνονται πιο αργά.

Γενικά παρατηρείται διαφορά στη συμπυκνωσιμότητα των μιγμάτων, ακολουθώντας την ευρωπαϊκή και την αμερικάνικη προδιαγραφή. Στην προσπάθεια αναζήτησης της καταλληλότερης μεθόδου απαιτείται διερεύνηση συσχετισμού της εργαστηριακής με την επιτόπου συμπύκνωση, καθώς επίσης έλεγχος της μηχανικής συμπεριφοράς των συμπυκνωμένων ασφαλτομιγμάτων.

Ο λόγος ύψους – διαμέτρου επηρεάζει σημαντικά τη συμπυκνωσιμότητα του μίγματος. Συγκεκριμένα, η αύξηση του λόγου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού κενών. Κατόπιν τούτου, προτείνεται η διερεύνηση του ορίου πάνω από το οποίο ο λόγος ύψους – διάμετρο καθίσταται ο πιο καθοριστικός παράγοντας στη συμπύκνωση του μίγματος.

Η μηχανική κατεργασία κατέδειξε ανομοιογένεια του ποσοστού κενών εντός της μάζας του συμπυκνωμένου δοκιμίου. Ωστόσο, πιο σαφή συμπεράσματα μπορεί να προκύψουν με την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών ελέγχου της εσωτερικής δομής των δοκιμίων μέσω της ανάλυσης εικόνας.

Επιπλέον, προτείνεται η διερεύνηση διαφορετικού τύπου μιγμάτων (π.χ. ανοικτής σύνθεσης), καθώς και ποσοστού και τύπου 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.
- AASHTO TP4 (1999). Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the SHRP Gyratory Compactor.
- AASHTO T312 (2003). Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.
- Anochie – Boateng, J., Komba, J., Ventura, D. and Verhaeghe, B. (2010). Effect of sample geometry on bulk relative density of HMA mixes. *10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa*.
- ASTM D6925 (2009) Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.
- Brown, R., Hainin, R., Cooley, A. and Hurley, G. (2004). Relationships of HMA In – Place Air Voids, Lift Thickness and Permeability, (*Vol. 1*), *National Center of Asphalt Technology, University Auburn, TRB of the National Academies*
- Buchanan, M., Brumfield, J. and Sheffield, R. (2004). Investigation of the Gyration Angle of Superpave Gyratory Compactors, *Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No 5, pg 444-451*.
- Coree, B. and VanDerHorst, K. (1998). Superpave Compaction, *Transportation Conference Proceeding, Iowa*
- EN 12697.05 (2007). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density.
- EN 12697.06 (2007). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.
- EN 12697.08 (2007). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.

EN 12697.31 (2007). Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor.

FHWA (2010). Superpave Gyratory Compactors, *Technical Brief*, FHWA - HIF-11-032

Hahtala, M., Spoo, H., Saarinen, L. and Halonen, P. (1997). Asphalt Mixture Laboratory Test, *Minnesota Department of Transportation, Report Number 97-20*

Hartman, M., Gilchrist, M. 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*.

Hunter, A., Airey, G. and Coolop, A. (2004). Effect of Asphalt Mixture Compaction on Aggregate Orientation and Mechanical Performance, *10th Conference on asphalt pavements for Southern Africa*.

Iwama, M. (2009). Influence of specimen size on orientation on the mechanical properties of laboratory compacted asphalt specimens, *Thesis, University of Nottingham*

Kandhal, P., Cross, S. and Ray Brown, E (1990). Evaluation of Bituminous Pavements for high pressure truck tires, *National Center for Asphalt Technology*.

Maupin, G. (1998). Comparison of Several Asphalt Design Methods, *Final Report, Virginia Transportation Research Council*

Lee, S., Amirkhanian, S., Putman B. and Kim, K. (2007). Laboratory study of the effects of compaction on the volumetric and rutting properties of CRM asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol.19, No 12, pg 1079-1089*.

Peterson, R., Mahboud, K., Anderson, M., Masad, E. and L. Tashman, L. (2004). Comparing Superpave Gyratory Data to Field Cores, *Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No 1, pg 78-83*.

Prowell, B., Ray Brown, E. and M. Huner, M. (2003). Evaluation of the internal Angle of Superpave Gyratory Compactors in Alabama, *National Center for Asphalt Technology*

Swami, B., Mehta, Y. and Bose, S. (2004). A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials sourced in India, *International Journal of Pavements Engineering, Vol. 5, No 3, p. 163-173*

Swiertz, D., Mahmoud, E. and Bahia, H. (2010). Asphalt Mixture Compaction and Aggregate Structure Analysis Techniques State of the Art Report, *University of Wisconsin - Madison*

Thyagarajan, S., Tashman, L., Masad, E. and Bayomy, F. (2010). The Heterogeneity and Mechanical Response of Hot Mix Asphalt Laboratory Specimens, *International Journal of Pavements Engineering, Vol. 11, No 2, p. 107-121.*

West, R., Watson, D., and Turner, P. (2010). Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in HMA, *NCHRP report No 648.*