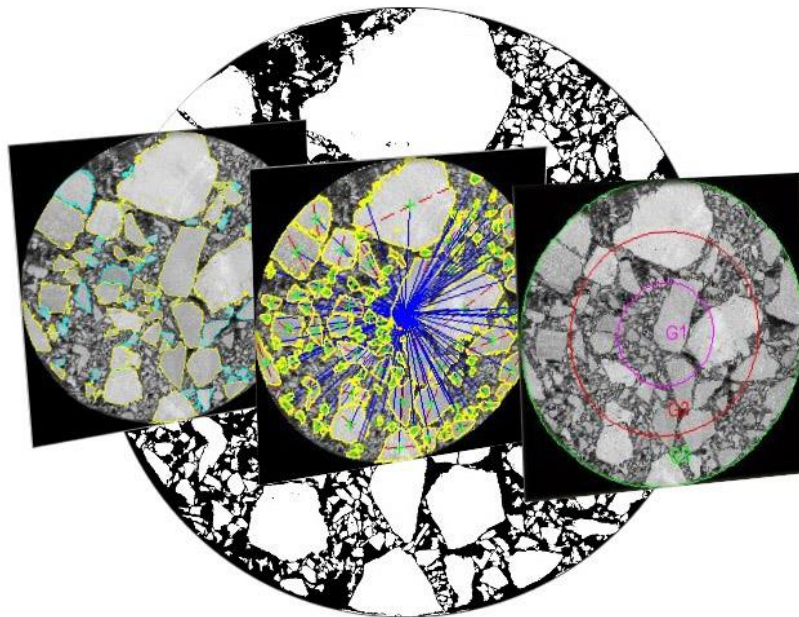




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ
ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ**



ΣΙΔΕΡΗΣ ΛΑΖΑΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Παναγιώτη Γεωργίου, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., για τη συμβολή του στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας και τις υποδείξεις του σε βασικά σημεία κατά τη συγγραφή της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη προσομοίωσης της επιτόπου συμπίκνωσης μέσω της συμπίκνωσης στο εργαστήριο έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων, μεταξύ των οποίων, η γυροσκοπική συμπίκνωση χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Οι σύγχρονες μέθοδοι αξιολόγησης της εργαστηριακής και επιτόπου συμπίκνωσης εστιάζουν στην εσωτερική δομή των μιγμάτων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εφαρμόσθηκε τεχνική ανάλυσης δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων δοκιμίων γυροσκοπικής συμπίκνωσης και πυρήνων οδοστρώματος με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της συμπίκνωσης στην εσωτερική δομή, εκφρασμένης μέσω των σημείων επαφής, του προσανατολισμού και του διαχωρισμού. Μελετήθηκε η επιρροή παραμέτρων που μεταβάλλονται στη γυροσκοπική συμπίκνωση (εσωτερική γωνία περιστροφής, θερμοκρασία και μηχανική κατεργασία) και διερευνήθηκε η δυνατότητα της γυροσκοπικής μεθόδου να αναπαράγει τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης. Μέσω των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, διαπιστώθηκε η διαφοροποίηση της εσωτερικής δομής λόγω της μεταβολής των παραμέτρων συμπίκνωσης, με σημαντικότερη τη μηχανική κατεργασία. Επίσης, αποδείχθηκε ότι η συμπίκνωση με εσωτερική γωνία περιστροφής 1.16° σε υψηλές θερμοκρασίες (της τάξεως των 150°C) αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση της επιτόπου συμπίκνωσης.

ABSTRACT

The need for simulation of field compaction in laboratory has led to the development of various methods, among which, the gyratory compaction is increasingly used in recent years. Modern evaluation methods of laboratory and field compaction focus on the internal structure of the mixtures. In the present study, a two-dimensional digital image analysis technique was applied in gyratory compacted specimens and field cores in order to investigate the effect of compaction on the internal structure, in terms of contact points, orientation and segregation. The influence of parameters varied in the gyratory compaction (internal gyration angle, temperature and mechanical process) was studied, along with the investigation of the ability of gyratory compaction to reproduce the field conditions. From the analysis results, the differentiation of the internal structure due to the variable compaction parameters was observed, among which, the mechanical process was found to be the most important. Moreover, it was demonstrated that gyratory compaction with internal angle of 1.16° at high temperatures (of around 150°C) is a good approximation of field compaction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	12
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	13
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	13
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	15
2.1 ΛΗΨΗ.....	15
2.1.1 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι	15
2.1.2 Καταστρεπτικές μέθοδοι.....	17
2.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	19
2.2.1 Κυριότερες μεθοδολογίες.....	20
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ	23
2.3.1 Σημεία επαφής.....	23
2.3.2 Προσανατολισμός.....	24
2.3.3 Διαχωρισμός.....	25
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ	27
3.1 ΤΥΠΟΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ	27
3.2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	29
3.3 ΠΥΡΗΝΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	32
3.4 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	33
4 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΙΚΟΝΑ	34
4.1 ΔΟΜΗ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	34
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ – ΒΑΘΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	35
4.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	35
4.3.1 Φίλτρο ενδιάμεσης τιμής	35
4.3.2 Φίλτρο H_{max}	37
4.3.3 Μετασχηματισμός Watershed.....	37
4.3.4 Κατωφλίωση	39
5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	41
5.1 ΛΗΨΗ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	41
5.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ	43
5.2.1 Προεπεξεργασία	43
5.2.2 Τελική επεξεργασία.....	43
5.2.2.1 Διερεύνηση της λειτουργίας του λογισμικού iPas.....	43
5.2.2.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία.....	46
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	49
5.3.1 Σημεία επαφής.....	49
5.3.2 Προσανατολισμός.....	51
5.3.3 Διαχωρισμός.....	53
5.3.4 Στατιστική ανάλυση εργαστηριακών δοκιμών	55
5.3.4.1 Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών	55
5.3.4.2 Διερεύνηση της επιρροής των μεταβλητών παραμέτρων.....	55
5.3.5 Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος.....	56

6	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	57
6.1	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	57
6.1.1	<i>Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών</i>	<i>57</i>
6.1.2	<i>Σημεία επαφής.....</i>	<i>59</i>
6.1.2.1	Ασφαλτόμιγμα M1	59
6.1.2.1.1	Γωνία περιστροφής.....	60
6.1.2.1.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	62
6.1.2.1.3	Μηχανική κατεργασία	64
6.1.2.2	Ασφαλτόμιγμα M2	66
6.1.2.2.1	Γωνία περιστροφής.....	67
6.1.2.2.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	69
6.1.2.2.3	Μηχανική κατεργασία	71
6.1.2.3	Ασφαλτόμιγμα M4	73
6.1.2.3.1	Γωνία περιστροφής.....	74
6.1.2.3.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	76
6.1.2.3.3	Μηχανική κατεργασία	78
6.1.2.4	Στατιστική Ανάλυση	79
6.1.3	<i>Προσανατολισμός.....</i>	<i>82</i>
6.1.3.1	Ασφαλτόμιγμα M1	82
6.1.3.1.1	Γωνία περιστροφής.....	83
6.1.3.1.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	85
6.1.3.1.3	Μηχανική κατεργασία	87
6.1.3.2	Ασφαλτόμιγμα M2	89
6.1.3.2.1	Γωνία περιστροφής.....	90
6.1.3.2.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	92
6.1.3.2.3	Μηχανική κατεργασία	94
6.1.3.3	Ασφαλτόμιγμα M4	96
6.1.3.3.1	Γωνία περιστροφής.....	97
6.1.3.3.2	Θερμοκρασία συμπίκνωσης.....	99
6.1.3.3.3	Μηχανική κατεργασία	101
6.1.3.4	Στατιστική Ανάλυση	102
6.1.4	<i>Διαχωρισμός.....</i>	<i>105</i>
6.1.4.1	Ασφαλτόμιγμα M1	105
6.1.4.2	Ασφαλτόμιγμα M2	109
6.1.4.3	Ασφαλτόμιγμα M4	113
6.1.4.4	Στατιστική Ανάλυση	117
6.2	ΠΥΡΗΝΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	119
6.2.1	<i>Σημεία επαφής.....</i>	<i>119</i>
6.2.1.1	Ασφαλτόμιγμα M1	119
6.2.1.2	Ασφαλτόμιγμα M2	122
6.2.1.3	Ασφαλτόμιγμα M4	125
6.2.2	<i>Προσανατολισμός.....</i>	<i>128</i>
6.2.2.1	Ασφαλτόμιγμα M1	128
6.2.2.2	Ασφαλτόμιγμα M2	131
6.2.2.3	Ασφαλτόμιγμα M4	134
6.2.3	<i>Διαχωρισμός.....</i>	<i>137</i>
7	ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	139
7.1	ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ.....	139
7.2	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ	140
7.3	ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ	140
7.4	ΣΧΟΛΙΑ	141
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	143

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Στάδια διαδικασίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας	15
Σχήμα 2.2	Σύστημα Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων X (X-ray CT).....	16
Σχήμα 2.3	Ακτινογραφίες καθ' ύψος και τρισδιάστατη ανασύνθεση του δοκιμίου	17
Σχήμα 2.4	Οριζόντιες και κάθετες τομές (Yue and Morin 1996).....	17
Σχήμα 2.5	Ψηφιακή εικόνα οριζόντιας διατομής δοκιμίου	18
Σχήμα 2.6	Εφαρμογή κατωφλίωσης.....	20
Σχήμα 2.7	Μέθοδος επεξεργασίας για την εύρεση σημείων επαφής (Masad et al. 1999a)	21
Σχήμα 2.8	Αλγόριθμος προσδιορισμού γραμμών επαφής (Tashman et al. 2001).....	21
Σχήμα 2.9	Εξισορρόπηση ιστογράμματος και διπλή κατωφλίωση (Zeleeuw and Papagiannakis 2011).....	22
Σχήμα 2.10	Γωνία προσανατολισμού αδρανών σε κάθετη (Masad et al. 1999a) και οριζόντια διατομή (Coenen et al. 2012).....	24
Σχήμα 2.11	Τμηματοποίηση διατομής σε περιοχές.....	25
Σχήμα 2.12	Τμηματοποίηση διατομής σε κυκλικούς τομείς (Hunter et al. 2004)	26
Σχήμα 3.1	Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης μιγμάτων M1, M2, M4.....	28
Σχήμα 3.2	Γυροσκοπική συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.	29
Σχήμα 3.3	Αρχή λειτουργίας γυροσκοπικής συμπύκνωσης.....	30
Σχήμα 3.4	Κοπή δοκιμίου	31
Σχήμα 3.5	Δοκίμιο διαμέτρου 150mm και ύψους 70mm και διαδοχική πυρηνοληψία και κοπή ..	31
Σχήμα 4.1	Αναπαράσταση ψηφιακής εικόνας μέσω δισδιάστατου πίνακα	34
Σχήμα 4.2	Γειτονιά 3x3 ενός εικονοστοιχείου	36
Σχήμα 4.3	Εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής	36
Σχήμα 4.4	Εφαρμογή φίλτρου Hmax	37
Σχήμα 4.5	Αναλογία εικόνας ασφαλτομίγματος με τοπογραφικό ανάγλυφο.....	38
Σχήμα 4.6	Εφαρμογή μετασχηματισμού watershed.....	38
Σχήμα 4.7	Εφαρμογή κατωφλίωσης με δύο διαφορετικές τιμές κατωφλίου.....	39
Σχήμα 4.8	Επιλογή τιμής T κατωφλίου.....	40
Σχήμα 5.1	Σάρωση με επιλογή million colors (α) και system palette (β)	42
Σχήμα 5.2	Επιφάνειες σάρωσης	42
Σχήμα 5.3	Προεπεξεργασία εικόνας της κορυφής του δοκιμίου M2/G/L/C.....	43
Σχήμα 5.4	Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας μέσω iPas	44
Σχήμα 5.5	Κριτήρια επεξεργασίας iPas.....	45
Σχήμα 5.6	Επεξεργασία εικόνας σύμφωνα με τα κριτήρια επεξεργασίας iPas	46
Σχήμα 5.7	Επεξεργασία εικόνας σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία	47
Σχήμα 5.8	Αρχική και επεξεργασμένη εικόνα της κορυφής του δοκιμίου M2/G/L/C.....	48
Σχήμα 5.9	Εικόνα της βάσης του δοκιμίου M4/E/130/C	48
Σχήμα 5.10	Υπολογισμός σημείων επαφής.....	49
Σχήμα 5.11	Διάγραμμα σημείων επαφής-SDT.....	50
Σχήμα 5.12	Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού	51
Σχήμα 5.13	Αντιστοίχιση αρμονικής συνάρτησης στο ιστόγραμμα γωνιών προσανατολισμού....	52
Σχήμα 5.14	Παράμετροι δ και Α της αρμονικής συνάρτησης.....	52
Σχήμα 5.15	Τμηματοποίηση της οριζόντιας διατομής σε δακτυλίους	53
Σχήμα 5.16	Παράδειγμα υπολογισμού διαχωρισμού	54
Σχήμα 6.1	Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M1)	60
Σχήμα 6.2	Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	61
Σχήμα 6.3	Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	61
Σχήμα 6.4	Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)	62

Σχήμα 6.5 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	63
Σχήμα 6.6 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	63
Σχήμα 6.7 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)	64
Σχήμα 6.8 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 135°C).....	64
Σχήμα 6.9 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 150°C).....	65
Σχήμα 6.10 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)	65
Σχήμα 6.11 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M2)	67
Σχήμα 6.12 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	68
Σχήμα 6.13 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	68
Σχήμα 6.14 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2) ..	69
Σχήμα 6.15 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	69
Σχήμα 6.16 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	70
Σχήμα 6.17 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2)	70
Σχήμα 6.18 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 135°C).....	71
Σχήμα 6.19 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 150°C).....	71
Σχήμα 6.20 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2)	72
Σχήμα 6.21 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M4)	74
Σχήμα 6.22 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	75
Σχήμα 6.23 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	75
Σχήμα 6.24 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4) ..	76
Σχήμα 6.25 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	76
Σχήμα 6.26 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	77
Σχήμα 6.27 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4)	77
Σχήμα 6.28 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 135°C).....	78
Σχήμα 6.29 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 150°C).....	78
Σχήμα 6.30 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4)	79
Σχήμα 6.31 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M1).....	83
Σχήμα 6.32 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	84
Σχήμα 6.33 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	84
Σχήμα 6.34 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1)	85
Σχήμα 6.35 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	85

Σχήμα 6.36 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	86
Σχήμα 6.37 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1) ...	86
Σχήμα 6.38 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 135°C).....	87
Σχήμα 6.39 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 150°C).....	87
Σχήμα 6.40 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1).....	88
Σχήμα 6.41 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M2).....	90
Σχήμα 6.42 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	91
Σχήμα 6.43 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	91
Σχήμα 6.44 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2)	92
Σχήμα 6.45 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	92
Σχήμα 6.46 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	93
Σχήμα 6.47 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2) ...	93
Σχήμα 6.48 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 135°C).....	94
Σχήμα 6.49 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 150°C).....	94
Σχήμα 6.50 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2).....	95
Σχήμα 6.51 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M4).....	97
Σχήμα 6.52 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	98
Σχήμα 6.53 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	98
Σχήμα 6.54 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4)	99
Σχήμα 6.55 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	99
Σχήμα 6.56 Επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	100
Σχήμα 6.57 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4) .	100
Σχήμα 6.58 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 130°C).....	101
Σχήμα 6.59 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 160°C).....	101
Σχήμα 6.60 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4).....	102
Σχήμα 6.61 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M1)	106
Σχήμα 6.62 Επιρροή παραμέτρων συμπίκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	107
Σχήμα 6.63 Επιρροή παραμέτρων συμπίκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	107
Σχήμα 6.64 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M1).....	108
Σχήμα 6.65 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπίκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1)	108
Σχήμα 6.66 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M1).....	109
Σχήμα 6.67 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M2)	110

Σχήμα 6.68 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	111
Σχήμα 6.69 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	111
Σχήμα 6.70 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M2).....	112
Σχήμα 6.71 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2)	112
Σχήμα 6.72 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M2).....	113
Σχήμα 6.73 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M4)	114
Σχήμα 6.74 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)	115
Σχήμα 6.75 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)	115
Σχήμα 6.76 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M4).....	116
Σχήμα 6.77 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4)	116
Σχήμα 6.78 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M4).....	116
Σχήμα 6.79 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	120
Σχήμα 6.80 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	121
Σχήμα 6.81 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	121
Σχήμα 6.82 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	123
Σχήμα 6.83 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	123
Σχήμα 6.84 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	124
Σχήμα 6.85 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	126
Σχήμα 6.86 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	126
Σχήμα 6.87 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	127
Σχήμα 6.88 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	129
Σχήμα 6.89 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	129
Σχήμα 6.90 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	130
Σχήμα 6.91 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	132
Σχήμα 6.92 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	132
Σχήμα 6.93 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	133
Σχήμα 6.94 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής	135
Σχήμα 6.95 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης	136
Σχήμα 6.96 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία	136

Σχήμα 6.97 Μέσες τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού (πυρήνες M1, M2, M4).....138

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες μιγμάτων M1, M2, M4.....	28
Πίνακας 3.2 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμίων	32
Πίνακας 3.3 Στάδια επιτόπου συμπύκνωσης.....	32
Πίνακας 6.1 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής (τεστ Kruskal-Wallis).....	57
Πίνακας 6.2 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (τεστ Mann-Whitney)	58
Πίνακας 6.3 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της μηχανικής κατεργασίας (τεστ Mann-Whitney).....	58
Πίνακας 6.4 Σημεία επαφής (δοκίμια M1).....	59
Πίνακας 6.5 Σημεία επαφής (δοκίμια M2).....	66
Πίνακας 6.6 Σημεία επαφής (δοκίμια M4).....	73
Πίνακας 6.7 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M1).....	80
Πίνακας 6.8 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M2).....	80
Πίνακας 6.9 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M4).....	81
Πίνακας 6.10 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M1)	82
Πίνακας 6.11 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M2)	89
Πίνακας 6.12 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M4)	96
Πίνακας 6.13 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M1).....	103
Πίνακας 6.14 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M2).....	103
Πίνακας 6.15 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M4).....	104
Πίνακας 6.16 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M1)	105
Πίνακας 6.17 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M2)	109
Πίνακας 6.18 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M4)	113
Πίνακας 6.19 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M1).....	117
Πίνακας 6.20 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M2).....	118
Πίνακας 6.21 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M4).....	118
Πίνακας 6.22 Σημεία επαφής (πυρήνες M1).....	119
Πίνακας 6.23 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M1).....	119
Πίνακας 6.24 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M1).....	120
Πίνακας 6.25 Σημεία επαφής (πυρήνες M2)	122
Πίνακας 6.26 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M2).....	122
Πίνακας 6.27 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M2).....	122
Πίνακας 6.28 Σημεία επαφής (πυρήνες M4)	125
Πίνακας 6.29 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M4).....	125
Πίνακας 6.30 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M4).....	125
Πίνακας 6.31 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M1)	128
Πίνακας 6.32 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M1).....	128
Πίνακας 6.33 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M1)	128
Πίνακας 6.34 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M2)	131
Πίνακας 6.35 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M2).....	131
Πίνακας 6.36 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M2)	131
Πίνακας 6.37 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M4)	134

Πίνακας 6.38 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M4).....	134
Πίνακας 6.39 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M4)	134
Πίνακας 6.40 Παράμετρος διαχωρισμού (πυρήνες M1, M2, M4)	137
Πίνακας 6.41 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (παράμετρος διαχωρισμού πυρήνων M1, M2, M4)	137
Πίνακας 6.42 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (παράμετρος διαχωρισμού πυρήνων M1, M2, M4)	137

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η διαδικασία της συμπύκνωσης αποτελεί το κρισιμότερο στάδιο στην κατασκευή των ασφαλτικών οδοστρωμάτων, επηρεάζοντας καθοριστικά τη συμπεριφορά τους. Στο πλαίσιο της αναλυτικής διαστασιολόγησης του ασφαλτομίγματος, υπεισέρχονται παράμετροι που εκτιμώνται μέσω της εργαστηριακής συμπύκνωσης. Παραταύτα, οι ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων πρακτικά διαμορφώνονται κατά την επιτόπου συμπύκνωση (Λοΐζος 2012). Συνεπώς τίθεται το ερώτημα κατά πόσο η συμπεριφορά των ασφαλτικών οδοστρωμάτων κατά τη φάση κατασκευής τους, μπορεί να προβλεφθεί και να αποτυπωθεί μέσω της συμπύκνωσης στο εργαστήριο.

Σε βάθος χρόνου έχουν αναπτυχθεί διάφορες εργαστηριακές μέθοδοι συμπύκνωσης, οι πιο διαδεδομένες εκ των οποίων είναι η μέθοδος Marshall, η μέθοδος συμπύκνωσης με ζύμωση (kneading), η δονητική μέθοδος (vibratory), η μέθοδος συμπύκνωσης με κύλινδρο τύπου Roller Compactor και η γυροσκοπική μέθοδος (gyratory). Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων συμπύκνωσης έχουν ως αποτέλεσμα την παρασκευή δοκιμών με διαφορετική μηχανική συμπεριφορά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των υπάρχουσών ερευνών, μέχρι στιγμής δεν έχει βρεθεί ποια μέθοδος εργαστηριακής συμπύκνωσης αναπαράγει καλύτερα τις συνθήκες της επιτόπου συμπύκνωσης και επομένως, το θέμα της προσομοίωσης της συμπύκνωσης στο πεδίο παραμένει επίκαιρο. Ειδικότερα, η ολοένα και μεγαλύτερη χρήση της γυροσκοπικής μεθόδου σε διεθνή κλίμακα τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε συνεχείς προσπάθειες εξέλιξης και διερεύνησης των παραμέτρων που την επηρεάζουν.

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης των μεθόδων συμπύκνωσης, οι παραδοσιακές μέθοδοι εστίαζαν στην μακροσκοπική συμπεριφορά του μίγματος με βάση την πυκνότητα. Εντούτοις, κατά αυτό τον τρόπο δεν ήταν δυνατό να εξηγηθεί η διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε δοκίμια ίδιων ογκομετρικών ιδιοτήτων. Στην προσπάθεια επίλυσης αυτού του προβλήματος, εισάγονται σύγχρονες μέθοδοι, οι οποίες εστιάζουν στην εσωτερική δομή ή αλλιώς, μικροδομή των μιγμάτων, μέσω ανάλυσης της ψηφιακής τους εικόνας.

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία

Το ασφαλτόμιγμα είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από διαφορετικές φάσεις: άσφαλτο, αδρανή και κενά αέρα. Η εσωτερική δομή του μίγματος περιγράφεται από την κατανομή των τριών φάσεων καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών. Μεταξύ άλλων, ποσοτικοποιείται μέσω των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών, του προσανατολισμού και του διαχωρισμού των αδρανών.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης μεταβλητών παραγόντων της γυροσκοπικής συμπύκνωσης στα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής του ασφαλτομίγματος (σημεία επαφής, προσανατολισμός, διαχωρισμός), καθώς και η συγκριτική αξιολόγηση της γυροσκοπικής και της επιτόπου συμπύκνωσης. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν μέσω της τεχνικής ανάλυσης ψηφιακής εικόνας ασφαλτομίγματος.

Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε λήψη δισδιάστατων εικόνων δοκιμίων συμπυκνωμένων με τη γυροσκοπική μέθοδο και πυρήνων οδοστρώματος, διαφορετικών τύπων ασφαλτομίγματος. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων της γυροσκοπικής συμπύκνωσης, επιλέχθηκαν εργαστηριακά δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί μεταβάλλοντας την εσωτερική γωνία περιστροφής (0.82° , 1.16° , 1.45°), τη θερμοκρασία συμπύκνωσης ($135/150^\circ\text{C}$ ή $130/160^\circ\text{C}$) και την αρχική διάμετρο (100 mm και 150 mm), τα οποία υπέστησαν επίσης μηχανική κατεργασία.

Ακολούθησε η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων των δοκιμίων και πυρήνων ώστε να απομονωθούν τα αδρανή από τις υπόλοιπες φάσεις του μίγματος και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα ζητούμενα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των εικόνων επεξεργάστηκαν με κατάλληλες στατιστικές μεθόδους.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

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

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αποτελεί ανασκόπηση των σημαντικότερων ερευνών σε θέματα ανάλυσης ψηφιακής εικόνας ασφαλτομιγμάτων.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφονται τα μίγματα τα οποία τέθηκαν υπό ανάλυση.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναλύονται εισαγωγικά βασικές έννοιες που αφορούν την ψηφιακή εικόνα και παρουσιάζονται οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

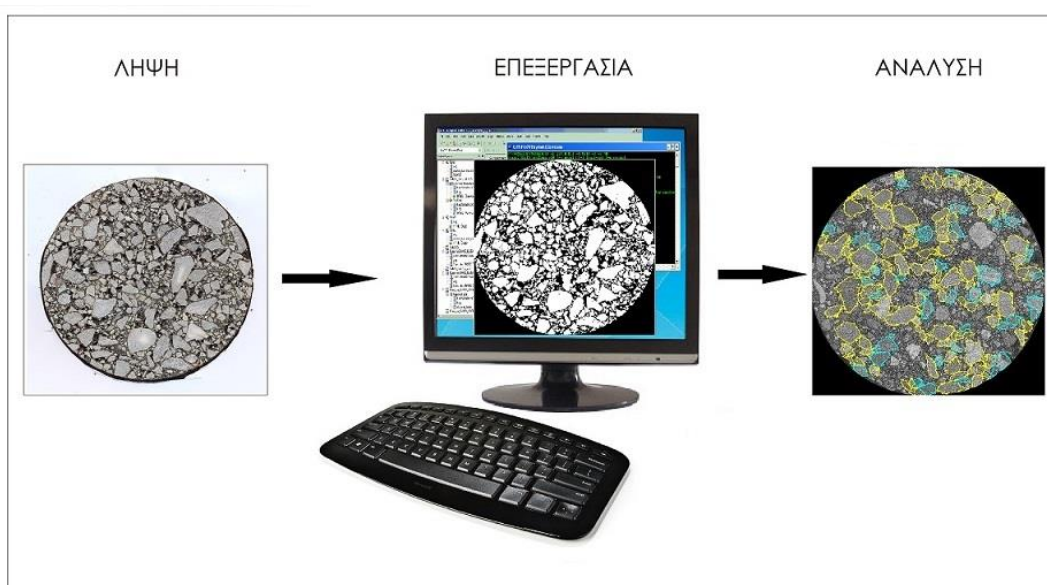
Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε σε κάθε επιμέρους στάδιο της διαδικασίας ανάλυσης της ψηφιακής εικόνας.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω της ανάλυσης των εικόνων των εργαστηριακών δοκιμών και των πυρήνων οδοστρώματος.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται εφαρμογές προς περαιτέρω διερεύνηση.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της διαδικασίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας ασφαλτομίγματος. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στις αρχές της Υπολογιστικής Όρασης και αφορά στην εφαρμογή αλγορίθμων οι οποίοι δέχονται ως είσοδο ψηφιακές εικόνες και παράγουν συμβολικές περιγραφές των εν λόγω οπτικών σκηνών, με σκοπό την εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας. Περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: λήψη, επεξεργασία και ανάλυση, μια σχηματική αναπαράσταση των οποίων, ακολουθεί στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Στάδια διαδικασίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας

2.1 Λήψη

Πρόκειται για τη διαδικασία μετατροπής ενός αντικειμένου σε ψηφιακή μορφή. Οι μέθοδοι λήψης ψηφιακής εικόνας από το εσωτερικό του ασφαλτομίγματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές.

2.1.1 Μη καταστρεπτικές μέθοδοι

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα της διατήρησης της ακεραιότητας του δοκιμίου, μιας και δεν απαιτείται κοπή. Η λήψη της εικόνας της εσωτερικής δομής

πραγματοποιείται μέσω συστήματος Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων Χ (X-ray Computed Tomography).

Ένα σύστημα ΥΤ ακτίνων Χ αποτελείται από την πηγή των ακτίνων, τον ανιχνευτή και ανάμεσά τους μια περιστρεφόμενη βάση, πάνω στην οποία τοποθετείται το δοκίμιο (σχήμα 2.2). Κατά τη λειτουργία του συστήματος γίνονται εγκάρσιες τομές της περιοχής του δοκιμίου, ενώ για την λήψη κάθε τομής, η πηγή διαγράφει μία περιστροφική κίνηση 360° γύρω από τον επιμήκη άξονά του. Ταυτόχρονα με την περιστροφική αυτή κίνηση, η πηγή εκπέμπει μία λεπτή δέσμη ακτινοβολίας πάχους 1 έως 10 mm που ακτινοβολεί το εξεταζόμενο αντικείμενο από διαφορετικές προβολικές κατευθύνσεις.

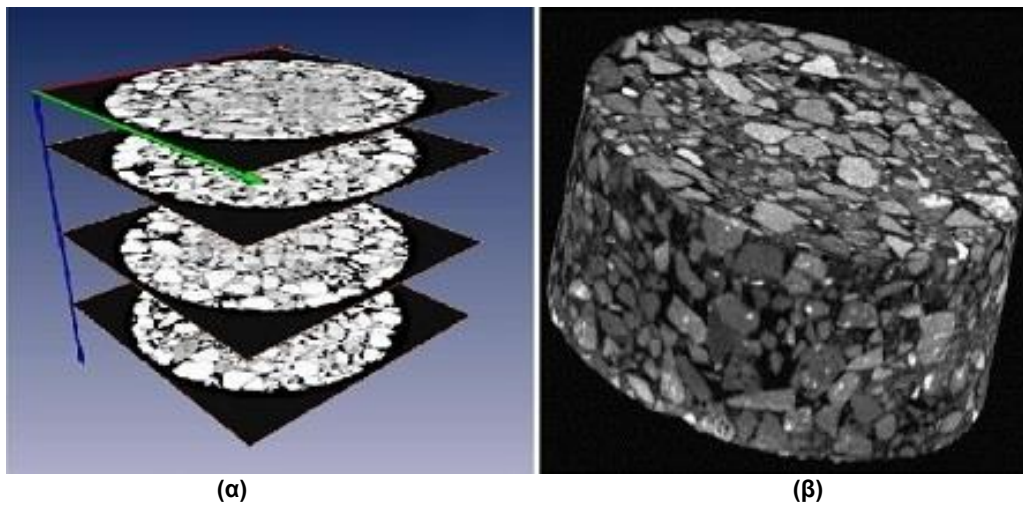


Σχήμα 2.2 Σύστημα Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων Χ (X-ray CT)

Η δέσμη αυτή περνά από όλα τα σημεία της τομής και βγαίνει εξασθενημένη σε ποσοστό που εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα και την ατομική σύσταση των υλικών που παρεμβάλλονται στην διαδρομή της. Η ένταση της ακτινοβολίας μετράται από τον ανιχνευτή πριν προσβάλει το δοκίμιο. Κατά την έξοδο της, οι τιμές εξασθένησης της ακτινοβολίας καταγράφονται με την βοήθεια άλλων ανιχνευτών που βρίσκονται σε αντιδιαμετρική θέση με την πηγή των ακτίνων και έτσι προσδιορίζεται ο συντελεστής εξασθένησης για την δεδομένη τομή. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στη μνήμη του υπολογιστή, ο οποίος μπορεί να ανασυνθέσει την εικόνα της τομής.

Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια αλληλουχία εικόνων όλων των τομών καθ' ύψος του δοκιμίου, ο αριθμός των οποίων, εξαρτάται από το πάχος της λεπτής δέσμης ακτινοβολίας (σχήμα 2.3(α)). Καθίσταται, επομένως, δυνατή η ανασύνθεση της εικόνας

του δοκιμίου (σχήμα 2.3(β)) και ο υπολογισμός της εσωτερικής δομής του σε τρεις διαστάσεις (Wang et al. 2004, Kutay et al. 2010, Zelelew and Paragiannakis 2011).

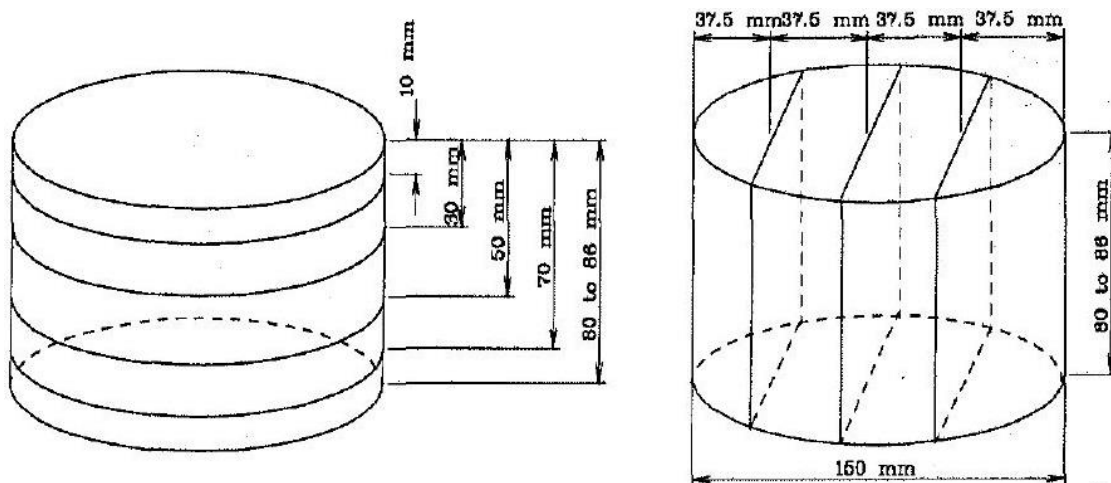


Σχήμα 2.3 Ακτινογραφίες καθ' ύψος και τρισδιάστατη ανασύνθεση του δοκιμίου

Το μεγάλο μειονέκτημα των μη καταστρεπτικών μεθόδων έγκειται στη χρησιμοποίηση αποκλειστικά συστήματος ΥΤ ακτίνων Χ για τη λήψη της εικόνας του εσωτερικού, καθώς ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι εξαιρετικά δαπανηρός και ο χειρισμός του προϋποθέτει εξειδικευμένη τεχνογνωσία.

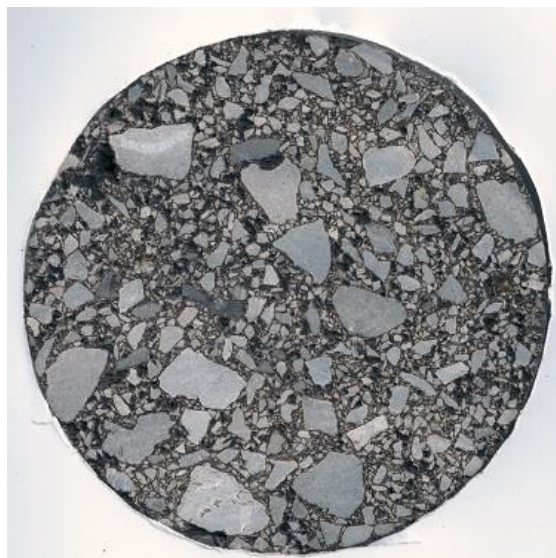
2.1.2 Καταστρεπτικές μέθοδοι

Στις καταστρεπτικές μεθόδους απαιτείται κοπή του δοκιμίου ώστε να αποκαλυφθεί η εσωτερική επιφάνεια. Η κοπή είναι δυνατόν να γίνει κατά την οριζόντια ή την κάθετη διεύθυνση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.4 Οριζόντιες και κάθετες τομές (Yue and Morin 1996)

Τα κυριότερα μέσα ψηφιοποίησης είναι ψηφιακή κάμερα και επίπεδος σαρωτής, ενώ η λήψη πραγματοποιείται απ' ευθείας στη διατομή του δοκιμίου, παράγοντας τη δισδιάστατη εικόνα του μίγματος. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η ψηφιακή εικόνα μιας οριζόντιας διατομής.



Σχήμα 2.5 Ψηφιακή εικόνα οριζόντιας διατομής δοκιμίου

Οι καταστρεπτικές μέθοδοι και κατ' επέκταση η δισδιάστατη ανάλυση του ασφαλτομίγματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία (Masad et al. 1999a, 1999b, Tashman et al. 2001, Hunter et al. 2004, Coenen et al. 2012), κυρίως λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν έναντι των μη καταστρεπτικών.

Οι καταστρεπτικές μέθοδοι είναι περισσότερο προσιτές, τόσο όσον αφορά το χειρισμό τους, δεδομένου ότι δεν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις χειρισμού των μηχανημάτων, όσο και από οικονομικής άποψης. Επιπλέον προσφέρεται στο χρήστη δυνατότητα λήψης της εικόνας σε υψηλότερη ανάλυση καθώς και μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών όσον αφορά τις δυνατότητες επεξεργασίας. Άλλωστε, από τη μέχρι τώρα ανάλυση των ασφαλτομιγμάτων έχει αποδειχτεί ότι η πληροφορία που εξάγεται μέσω της δισδιάστατης ανάλυσης ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα.

2.2 Επεξεργασία

Η επεξεργασία εικόνας χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών κυρίως για δύο σκοπούς. Για βελτίωση της οπτικής εμφάνισης των εικόνων και για προετοιμασία των εικόνων με σκοπό την μετέπειτα μέτρηση των χαρακτηριστικών τους. Η μέτρηση των εικόνων αποσκοπεί στην απόκτηση δεδομένων και είναι απαραίτητος ο σαφής καθορισμός των χαρακτηριστικών της. Επομένως η μεθοδολογία επεξεργασίας που ακολουθείται παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.

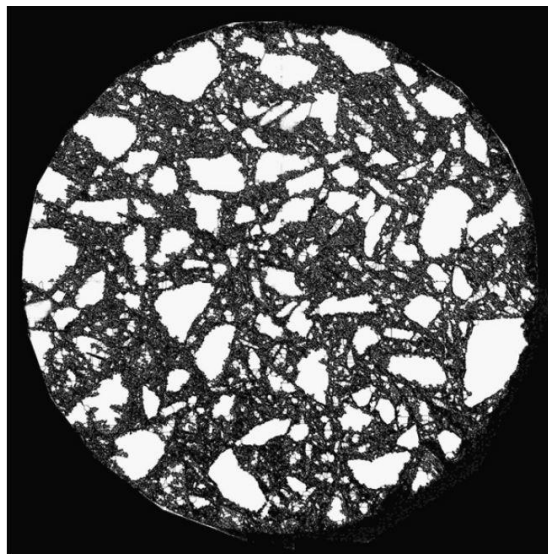
Σε βάθος χρόνου, έχει εφαρμοστεί πλήθος διαφορετικών μεθοδολογιών. Όλες, όμως, βασίζονται στην ίδια γενική ιδέα: την εφαρμογή των κατάλληλων φίλτρων και τελεστών με στόχο τον τελικό προσδιορισμό των περιοχών ενδιαφέροντος (regions of interest), απομονώνοντάς τες από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της εικόνας. Η ύπαρξη πληθώρας φίλτρων και τελεστών επεξεργασίας καθιστά δυνατή την εκτέλεση μεγάλου πλήθους διεργασιών, όπως για παράδειγμα βελτίωση της ποιότητας ή τονισμό των γνωρισμάτων της [μείωση θορύβου (noise reduction), ανίχνευση ακμών (edge detection)], κατάτμηση της εικόνας σε περιοχές [δυαδική κατάτμηση (binary segmentation) σε προσκήνιο και παρασκήνιο], αποκατάσταση μιας παραμορφωμένης εικόνας εισόδου (image restoration).

Οι μεθοδολογίες επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας ασφαλτομίγματος μπορούν να ταξινομηθούν σε χειροκίνητες (manual), αυτοματοποιημένες (automated) και ημι-αυτοματοποιημένες (semi-automated):

- Οι χειροκίνητες τεχνικές είναι χρονοβόρες και συνήθως απαιτούν καθορισμό της περιμέτρου ή διαφοροποίηση του χρωματισμού του κάθε αδρανούς ξεχωριστά, ώστε να διαχωριστούν από τις υπόλοιπες φάσεις του μίγματος.
- Οι αυτοματοποιημένες τεχνικές περιλαμβάνουν ήδη ανεπτυγμένους αλγόριθμους για την εφαρμογή φίλτρων επεξεργασίας και τελεστών. Ωστόσο, απαιτείται εισαγωγή ορισμένων δεδομένων από το χρήστη, συνήθως των ογκομετρικών ιδιοτήτων του μίγματος.
- Οι ημι-αυτοματοποιημένες τεχνικές περιλαμβάνουν επίσης αλγόριθμους εφαρμογής φίλτρων και τελεστών. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές των υπόψη φίλτρων, αναλόγως με την υπό ανάλυση εικόνα. Κριτήριο για τον καθορισμό των κατάλληλων τιμών είναι η ταύτιση των τιμών γνωστών ιδιοτήτων του μίγματος (π.χ. ποσοστό κενών), όπως έχουν υπολογιστεί ογκομετρικά στο εργαστήριο, με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται μέσω της εικόνας.

2.2.1 Κυριότερες μεθοδολογίες

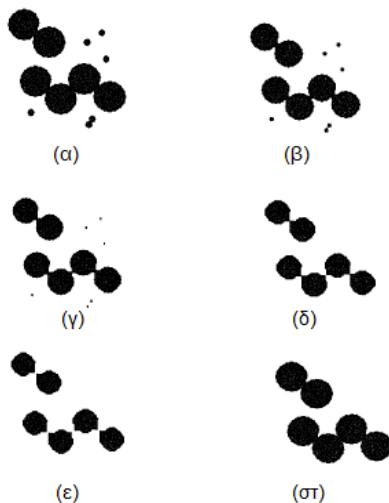
Οι πρώτες προσπάθειες επεξεργασίας των εικόνων ήταν πολύ απλές. Περιελάμβαναν μετατροπή της εικόνας σε μορφή 8-bit αποχρώσεων γκριζου και κατόπιν την τεχνική της κατωφλίωσης (thresholding), για τον προσδιορισμό είτε των κενών του μίγματος είτε των αδρανών (Hunter et al. 2004, Masad et al., 2002, Tashman et al. 2002). Να σημειωθεί ότι η τεχνική της κατωφλίωσης επιτρέπει την δυαδική κατάτμηση της εικόνας. Κατά αυτόν τον τρόπο διαχωρίζονται οι περιοχές ενδιαφέροντος από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της εικόνας. Ένα παράδειγμα εφαρμογής κατωφλίωσης σε εικόνα ασφαλτομίγματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6, όπου τα αδρανή έχουν διαχωριστεί από τις υπόλοιπες φάσεις του μίγματος.



Σχήμα 2.6 Κατωφλίωση

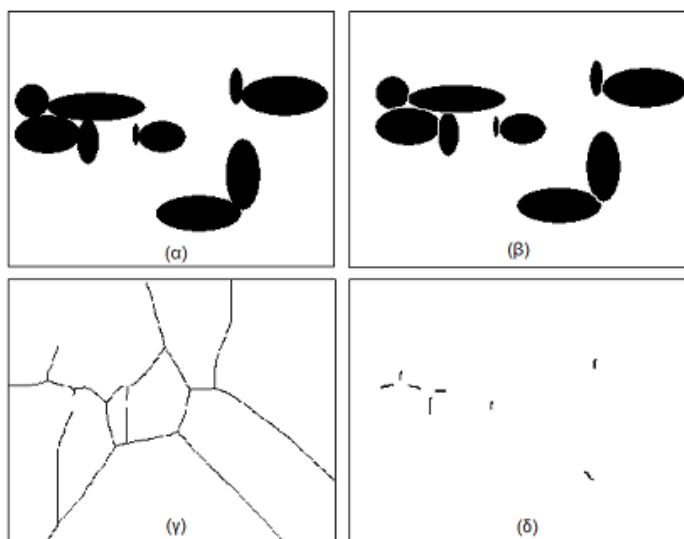
Ενίοτε, με σκοπό την υποβοήθηση του λογισμικού στον προσδιορισμό των αδρανών, εφαρμοζόταν συμπληρωματικά μια χειροκίνητη διαδικασία χρωματισμού κάθε αδρανούς με λευκό χρώμα (Masad et al. 1999a, 1999b).

Με στόχο τη διερεύνηση τρόπων υπολογισμού των σημείων επαφής των αδρανών, προτάθηκαν αρκετές μέθοδοι. Οι Masad et al. (1999b) χρησιμοποίησαν μια επαναληπτική εκδοχή μορφολογικής διάβρωσης (erosion) (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7 Μέθοδος επεξεργασίας για την εύρεση σημείων επαφής (Masad et al. 1999a)

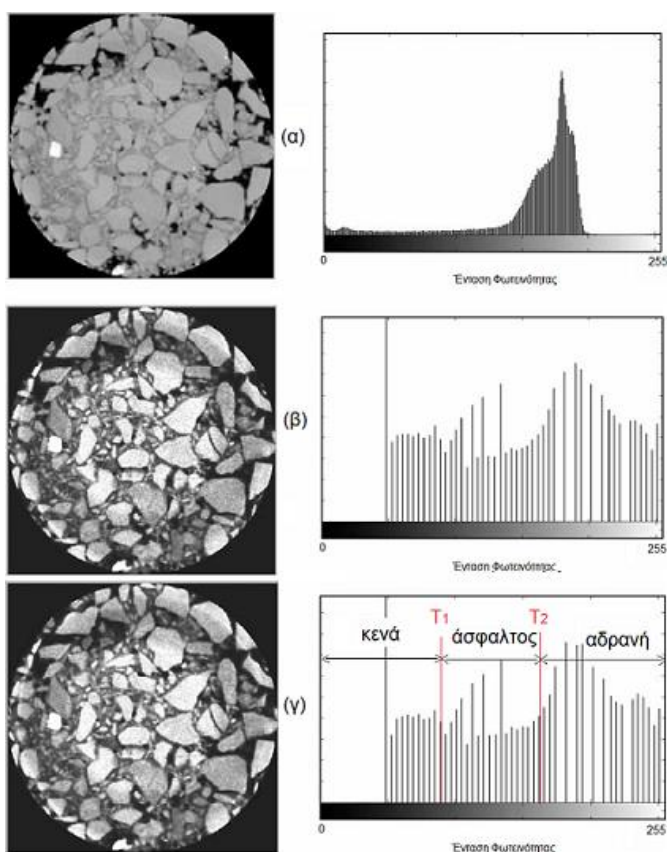
Σύμφωνα με την μέθοδο των Tashman et al. (2001), η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2.8, αρχικά εφαρμόζεται κατωφλίωση (α) και μετασχηματισμός watershed (β). Κατόπιν, η φωτεινότητα της εικόνας αντιστρέφεται και σε συνδυασμό με διάβρωση, οδηγεί στο "σκελετό" της εικόνας (γ). Η τελική πρόσθεση του "σκελετού" και της αρχικής εικόνας, με χρήση του τελεστή "AND", δίνει τις γραμμές επαφής (δ).



Σχήμα 2.8 Αλγόριθμος προσδιορισμού γραμμών επαφής (Tashman et al. 2001)

Στο πλαίσιο της μελέτης της κατανομής των φάσεων του μίγματος, έχει εισαχθεί μια επίσης διαδεδομένη τεχνική (Zeleeuw and Paragiannakis 2011). Πρόκειται για έναν αυτοματοποιημένο αλγόριθμο, ο οποίος δέχεται ως είσοδο τις ογκομετρικές ιδιότητες του μίγματος. Αρχικά εφαρμόζεται εξισορρόπηση του ιστογράμματος (histogram

equalization) για βελτίωση της αντίθεσης (contrast) και στη συνέχεια διπλή κατωφλίωση, διαχωρίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο, τις τρεις φάσεις του μίγματος (σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 Εξισορρόπηση ιστογράμματος και διπλή κατωφλίωση (Zeleeuw and Papagiannakis 2011)

Η καινοτομία έγκειται στο γεγονός ότι πραγματοποιούνται δοκιμές κατωφλίωσης μέχρι να ταυτιστούν οι τιμές των ογκομετρικών ιδιοτήτων υπολογισμένων στο εργαστήριο με τις αντίστοιχες τιμές υπολογισμένες μέσω της εικόνας. Κατόπιν, πραγματοποιείται ανίχνευση ακμών με χρήση του φίλτρου Canny και τέλος μετασχηματισμός watershed.

Πρόσφατα, στο πλαίσιο της προσπάθειας ανάπτυξης πρωτοκόλλου στο αντικείμενο της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας ασφαλτομίγματος, δημιουργήθηκε το λογισμικό Image Processing and Analysis System (iPas). Δέχεται ως είσοδο μια δισδιάστατη εικόνα συνοδευόμενη από συγκεκριμένες ιδιότητες του μίγματος και κατόπιν εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος που περιλαμβάνει μια σειρά από διαδοχικές εφαρμογές φίλτρων επεξεργασίας. Ο αλγόριθμος είναι ημι-αυτοματοποιημένος, καθώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις τιμές των φίλτρων επεξεργασίας έως ότου ταυτιστούν οι ήδη γνωστές ογκομετρικές ιδιότητες με τις αντίστοιχες υπολογισμένες μέσω της εικόνας (Coenen et al. 2012).

2.3 Ανάλυση

Αφού πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός των περιοχών ενδιαφέροντος, ακολουθεί το τελευταίο στάδιο, η ανάλυση της εικόνας. Αφορά την εξαγωγή σημαντικής πληροφορίας από την εικόνα μέσω της εφαρμογής μαθηματικών αλγορίθμων στις περιοχές ενδιαφέροντος. Πρακτικά, κατά το στάδιο της ανάλυσης πραγματοποιείται η μέτρηση των ζητούμενων μεγεθών της εσωτερικής δομής του μίγματος.

Η μελέτη των αδρανών έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τους ερευνητές, μιας και αποτελούν το "σκελετό" του μίγματος. Η περιγραφή της κατανομής και της αλληλεπίδρασης των αδρανών πραγματοποιείται κυρίως μέσω του υπολογισμού των εξής χαρακτηριστικών:

- σημεία επαφής (contact points), δηλαδή τα σημεία όπου τα γειτονικά αδρανή εφάπτονται
- προσανατολισμός (orientation), ο οποίος αναφέρεται στην διεύθυνση των αδρανών σε σχέση με κάποιο προκαθορισμένο άξονα
- διαχωρισμός (segregation), που αφορά την χωρική κατανομή των αδρανών στην επιφάνεια του μίγματος ανάλογα με το μέγεθός τους και έχει οριστεί ως "η έλλειψη ομοιογένειας αρκετά σημαντική ώστε να επιφέρει ταχύτερες βλάβες στο οδόστρωμα"

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες έρευνες σχετικά με τα παραπάνω χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής, στο πλαίσιο της δισδιάστατης ανάλυσης ασφαλτομιγμάτων.

2.3.1 Σημεία επαφής

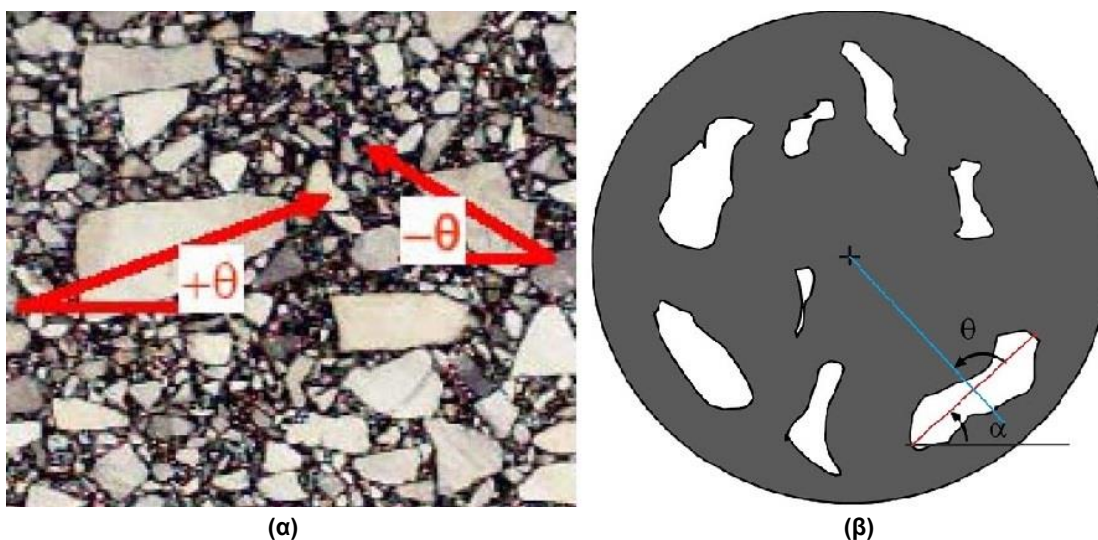
Οι Masad et al. (1999b) υπολόγισαν τον αριθμό των σημείων επαφής σε δοκίμια συμπυκνωμένα με δύο διαφορετικές μεθόδους και απέδειξαν ότι η μέθοδος συμπύκνωσης με ζύμωση παράγει δοκίμια με περισσότερα σημεία επαφής από τη γυροσκοπική μέθοδο.

Μια καινοτόμος θεώρηση παρουσιάστηκε από τους Coenen et al. (2012), η οποία βασίζεται στην απλή διαπίστωση ότι η επαφή μεταξύ δύο αδρανών είναι δυνατόν να βρίσκεται εκτός του επιπέδου τομής του δοκιμίου. Έτσι, δε θεωρούνται σε επαφή μόνο τα αδρανή που εφάπτονται, αλλά και γειτονικά αδρανή τα οποία απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από μια προκαθορισμένη απόσταση. Εξετάστηκαν δοκίμια συμπυκνωμένα με τη γυροσκοπική μέθοδο με μεταβλητές παραμέτρους συμπύκνωσης (θερμοκρασία και

πίεση) και διαφορετικής σύνθεσης αδρανών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι ο αριθμός των σημείων επαφής αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της πίεσης. Επίσης, αύξηση του μεγέθους του μέγιστου κόκκου αδρανών ή μείωση του ποσοστού των κενών, αυξάνει τα σημεία επαφής.

2.3.2 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός των αδρανών μπορεί να υπολογιστεί μέσω της γωνίας που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας του αδρανούς με έναν προκαθορισμένο άξονα. Σε μια κάθετη (ορθογωνική) διατομή δοκιμίου, γωνία προσανατολισμού ενός αδρανούς θεωρείται η γωνία μεταξύ του μεγάλου άξονά του και της οριζόντιας ευθείας (σχήμα 2.10(α)). Σε μια οριζόντια (κυκλική) διατομή θεωρείται η γωνία μεταξύ του μεγάλου άξονα και της ακτίνας της κυκλικής διατομής (σχήμα 2.10(β)).



Σχήμα 2.10 Γωνία προσανατολισμού αδρανών σε κάθετη (Masad et al. 1999a) και οριζόντια διατομή (Coenen et al. 2012)

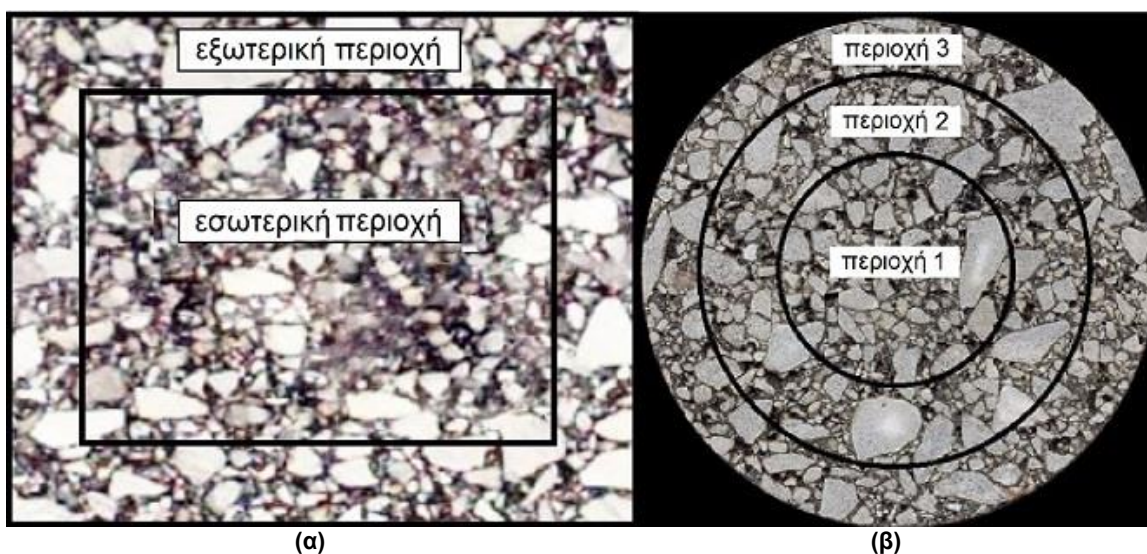
Η μελέτη του προσανατολισμού σε κάθετες διατομές έδειξε ότι τα αδρανή σε δοκίμια γυροσκοπικής μεθόδου τείνουν προς οριζόντιο προσανατολισμό και ότι η συμπύκνωση στις 100 περιστροφές προσεγγίζει επαρκώς τις συνθήκες της επιτόπου συμπύκνωσης (Masad et al. 1999a). Επίσης, η προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης επιτυγχάνεται κατά τη συμπύκνωση δοκιμίων ύψους 50-75 mm με εξωτερική γωνία περιστροφής 1.5° (Tashman et al. 2001).

Αντίστοιχα, κατά τη διερεύνηση του προσανατολισμού σε οριζόντιες τομές, τα αδρανή σε δοκίμια της γυροσκοπικής και της δονητικής μεθόδου παρουσίασαν ομόκεντρο

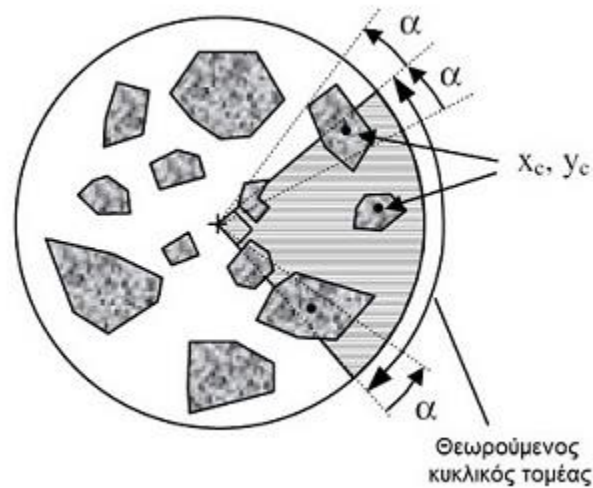
προσανατολισμό (γωνία προσανατολισμού ίση με 90° σε σχέση με την ακτίνα), με τη γωνία προσανατολισμού να αυξάνει με την αύξηση του μεγέθους των αδρανών (Hunter et al. 2004). Επιπλέον, έντονη τάση ομόκεντρου προσανατολισμού παρατηρήθηκε κατά τη γυροσκοπική μέθοδο αλλά και την επιτόπου συμπύκνωση, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως η γυροσκοπική μέθοδος συμπύκνωσης προσεγγίζει ικανοποιητικά την συμπύκνωση στο πεδίο (Coenen et al. 2012).

2.3.3 Διαχωρισμός

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση του διαχωρισμού, δύο είναι οι βασικές θεωρήσεις που έχουν προταθεί. Το κοινό τους σημείο είναι ότι η δισδιάστατη επιφάνεια ανάλυσης τμηματοποιείται σε περιοχές. Κατά την πρώτη θεώρηση, η επιφάνεια της διατομής τμηματοποιείται σε εσωτερική και εξωτερική περιοχή ή και σε τρεις περιοχές, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.11, ενώ κατά τη δεύτερη, η τμηματοποίηση γίνεται σε τομείς ή τεταρτημόρια (σχήμα 2.12). Ομοίως με τη μελέτη του προσανατολισμού, ο διαχωρισμός έχει εξεταστεί τόσο σε κάθετες, όσο και σε οριζόντιες τομές δοκιμίων.



Σχήμα 2.11 Τμηματοποίηση διατομής σε περιοχές



Σχήμα 2.12 Τμηματοποίηση διατομής σε κυκλικούς τομείς (Hunter et al. 2004)

Κατά τη διερεύνηση της γυροσκοπικής μεθόδου συμπύκνωσης, διαπιστώθηκε ότι τα πιο χονδρόκοκκα αδρανή έχουν την τάση να μεταφέρονται προς την εξωτερική περιοχή των δοκιμίων σε μία αξονοσυμμετρική κατανομή (Tashman et al. 2001, Hunter et al. 2004), ενώ σε άλλη έρευνα δεν παρατηρήθηκε τάση διαχωρισμού των αδρανών (Coenen et al. 2012).

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Με σκοπό τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη γυροσκοπική συμπύκνωση, εξεταστήκαν εργαστηριακά δοκίμια μεταβλητών παραμέτρων και διαφορετικών μιγμάτων, ενώ προκειμένου να διερευνηθεί η προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των χαρακτηριστικών της εσωτερικής δομής των εργαστηριακών δοκιμίων με την εσωτερική δομή πυρήνων οδοστρώματος, αντίστοιχων μιγμάτων.

3.1 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

Στη μελέτη συμπεριλήφθηκαν εργαστηριακά δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου και πυρήνες τριών διαφορετικών τύπων ασφαλτομίγματος που περιλαμβάνουν αδρανή διαφορετικής σύνθεσης και προέλευσης. Οι τύποι των ασφαλτομιγμάτων θα αναφέρονται υπό τις κωδικές ονομασίες M1, M2 και M4.

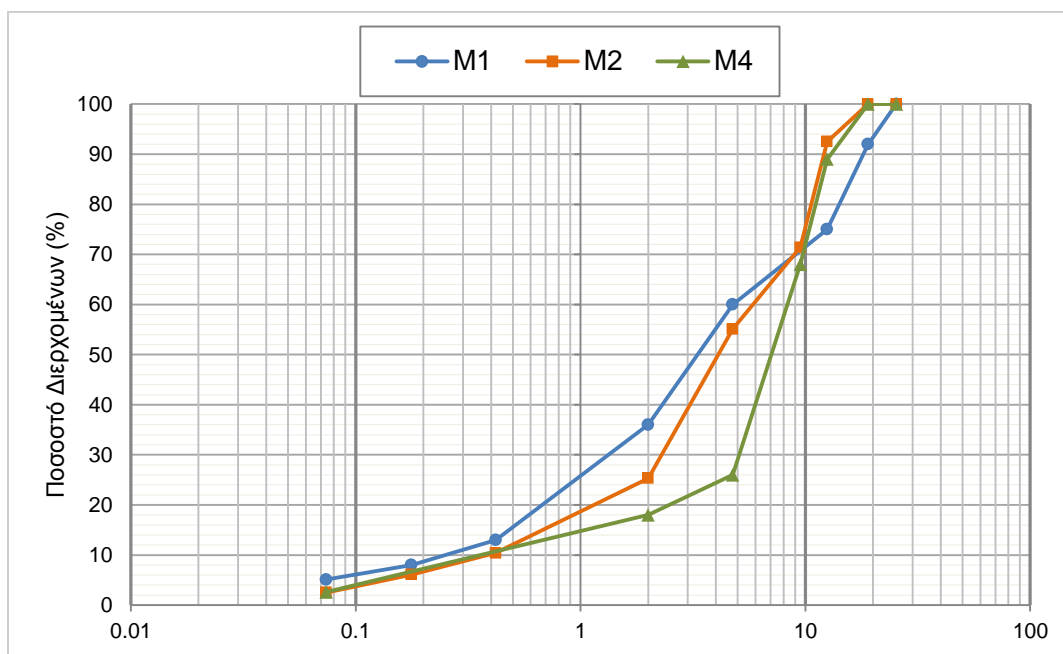
Συγκεκριμένα, τα μίγματα M1 και M2 είναι σύνθεσης κλειστού τύπου (ΠΤΠ A-265), με τύπο ασφάλτου 50/70 και ποσοστό ασφάλτου 4.3% κ.β. μίγματος. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ασβεστολιθικά πετρώματα (limestone). Το μίγμα M1 έχει μέγιστο κόκκο αδρανών 1 inch (25.4 mm), ενώ το M2 έχει μέγιστο κόκκο $\frac{3}{4}$ inch (19 mm).

Το μίγμα M4 είναι σύνθεσης ημι-ανοικτού τύπου (ΠΤΠ A-265), με τροποποιημένη άσφαλτο με πολυμερή ελαστομερούς τύπου (SBS) σε ποσοστό 4% και ποσοστό ασφάλτου 4.5% κ.β. μίγματος. Τα αδρανή του μίγματος αποτελούνται από αδρανή μεταλλουργικής σκωρίας (steel slag) και ασβεστολιθικά αδρανή, με μέγεθος μέγιστου κόκκου $\frac{3}{4}$ inch (19 mm).

Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται οι ιδιότητες των μιγμάτων M1, M2 και M4, ενώ στο σχήμα 3.1, δίνεται το διάγραμμα των κοκκομετρικών τους διαβαθμίσεων.

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες μιγμάτων M1, M2, M4

	M1	M2	M4
Τύπος σύνθεσης	Κλειστός	Κλειστός	Ημι-ανοικτός
Τύπος αδρανών	Ασβεστολιθικά	Ασβεστολιθικά	Σκωρία - Ασβεστολιθικά
Μέγεθος μέγιστου κόκκου (mm)	25.4	19	19
Ειδ. βάρος αδρανών (kg/m ³)	2.696	2.735	3.138
Τύπος ασφάλτου	50/70	50/70	Τροποποιημένη με SBS (4%)
Ποσοστό ασφάλτου (% κ.β. μίγματος)	4.3	4.3	4.5
Ειδ. βάρος ασφάλτου (kg/m ³)	1.025	1.020	1.025



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης μιγμάτων M1, M2, M4

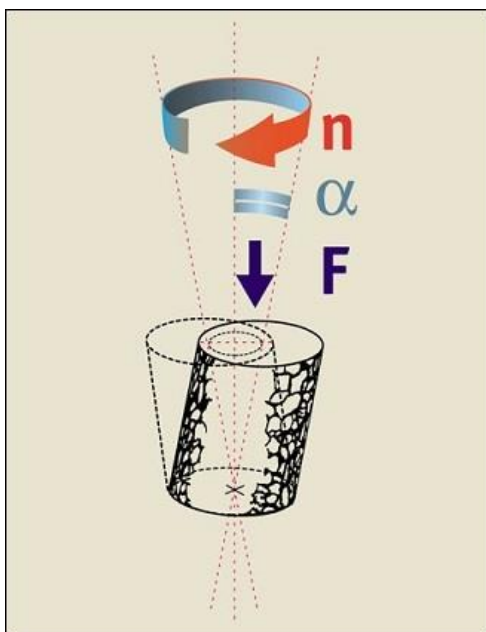
3.2 Εργαστηριακά δοκίμια

Τα εργαστηριακά δοκίμια συμπυκνώθηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., στο πλαίσιο προγενέστερης διπλωματικής εργασίας (Υφαντής 2013) και της ερευνητικής δραστηριότητας του εργαστηρίου. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γυροσκοπική συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 3.2 Γυροσκοπική συσκευή του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.

Γενικά, κατά τη γυροσκοπική μέθοδο η συμπύκνωση του μίγματος επιτυγχάνεται μέσω της ταυτόχρονης δράσης μιας κατακόρυφης στατικής φόρτισης (F) από μια μηχανική κεφαλή και μιας διατμητικής δράσης που προκαλείται από την κίνηση της μήτρας, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας κωνικής επιφάνειας περιστροφής με συγκεκριμένη εσωτερική γωνία (α). Επίσης μεταβλητός είναι ο αριθμός των περιστροφών (n). Στο σχήμα 3.3 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας της γυροσκοπικής συμπύκνωσης.



Σχήμα 3.3 Αρχή λειτουργίας γυροσκοπικής συμπίκνωσης

Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια συμπυκνωμένα με μεταβλητή εσωτερική γωνία περιστροφής και θερμοκρασία συμπίκνωσης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές εσωτερικής γωνίας περιστροφής: 0.82° , η οποία συστήνεται από τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές, 1.16° , σύμφωνα με τις αμερικανικές προδιαγραφές και 1.45° , ως μια μεγαλύτερη τιμή. Τα δοκίμια των μιγμάτων M1 και M2 συμπυκνώθηκαν σε δύο διαφορετικές θερμοκρασίες: 135°C , που είναι μια τυπική τιμή και 150°C , μια κάπως μεγαλύτερη τιμή. Αντίστοιχα, για τα δοκίμια του μίγματος M4 χρησιμοποιήθηκαν οι θερμοκρασίες 130°C και 160°C .

Ακόμη, επιλέχθηκαν δοκίμια με δύο διαφορετικές αρχικές διαμέτρους: 100 mm και 150 mm και αρχικό ύψος 70 mm. Τα δοκίμια υπέστησαν μηχανική κατεργασία, αρχικά υπό μορφή πυρηνοληψίας δοκιμίων διαμέτρου 100 mm αποκλειστικά από τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια κοπή τμημάτων ύψους 10 mm από την κορυφή και τη βάση (σχήμα 3.4), καταλήγοντας σε δοκίμια ίδιων διαστάσεων, με διάμετρο 100 mm και ύψος 50 mm.



Σχήμα 3.4 Κοπή δοκιμίου

Στο σχήμα 3.5 απεικονίζεται ένα δοκίμιο διαμέτρου 150 mm και ύψους 70 mm που υπέστη διαδοχική πυρηνοληψία και κοπή.



Σχήμα 3.5 Δοκίμιο διαμέτρου 150mm και ύψους 70mm και διαδοχική πυρηνοληψία και κοπή

Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους της συμπύκνωσης, η κατακόρυφη πίεση διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 600 kPa, ενώ ο αριθμός των περιστροφών δεν ήταν προκαθορισμένος, καθώς τα δοκίμια περιστρέφονταν έως ότου επιτευχθεί το ζητούμενο ύψος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι μεταβλητές παράμετροι με τις διάφορες τιμές τους, για τα δοκίμια που αναλύθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 3.2 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμών

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΕΣ
Τύπος ασφαλτομίγματος	M1, M2, M4
Εσωτερική γωνία περιστροφής (°)	0.82, 1.16, 1.45
Θερμοκρασία συμπύκνωσης (°C)	135 - 150 για M1, M2 130 - 160 για M4
Μηχανική κατεργασία	κοπή (αρχική διάμετρος 100 mm) κοπή και πυρηνοληψία (αρχική διάμετρος 150 mm)

Με βάση τις παραπάνω τιμές, για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος προέκυψαν 12 συνδυασμοί εσωτερικής γωνίας – θερμοκρασίας – μηχανικής κατεργασίας. Επομένως εξετάστηκαν συνολικά 36 δοκίμια συμπυκνωμένα στο εργαστήριο.

3.3 Πυρήνες οδοστρώματος

Η συμπύκνωση στο πεδίο πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία επιτόπου συμπύκνωσης για κάθε τύπο ασφαλτομίγματος.

Πίνακας 3.3 Στάδια επιτόπου συμπύκνωσης

ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑ	ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΑ		
	1 ^ο ΣΤΑΔΙΟ	2 ^ο ΣΤΑΔΙΟ	3 ^ο ΣΤΑΔΙΟ
M1	Στατικός	Δονητικός και λαστιχοφόρος	Στατικός
M2	Στατικός	Δονητικός	Στατικός
M4	Στατικός	Δονητικός	Στατικός

Μετά τη συμπύκνωση και πριν η οδός δοθεί σε κυκλοφορία, πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική λήψη πυρήνων διαμέτρου 95 mm από χαρακτηριστικές θέσεις του οδοστρώματος. Συνολικά αναλύθηκαν 7 πυρήνες ασφαλτομίγματος M1, 6 πυρήνες ασφαλτομίγματος M2 και 7 πυρήνες ασφαλτομίγματος M4.

3.4 Κωδικοποίηση

Με σκοπό την διάκριση των δοκιμών μεταξύ τους με ταυτόχρονη αναφορά στις διαφορετικές παραμέτρους παρασκευής, χρησιμοποιήθηκε ονομασία με κωδικοποίηση. Οι εσωτερικές γωνίες περιστροφής με τιμές 0.82° , 1.16° και 1.45° αναφέρονται με τους κωδικούς E, U, G, αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες 135°C και 150°C στα μίγματα M1 και M2 αναφέρονται ως L και H, αντίστοιχα, ενώ στα δοκίμια μίγματος M4, οι θερμοκρασίες αναφέρονται με την αριθμητική τιμή τους, δηλαδή 130 και 160. Σχετικά με τη μηχανική κατεργασία, ο κωδικός C χρησιμοποιήθηκε για την κοπή, ενώ ο κωδικός CC για την κοπή και πυρηνοληψία.

Για παράδειγμα, ένα δοκίμιο μίγματος M1 συμπυκνωμένο με εσωτερική γωνία 0.82° και θερμοκρασία 135°C που υπέστη μόνο κοπή (αρχικής διαμέτρου 100 mm), θα αναφέρεται στο εξής με τον κωδικό M1/E/L/C, ενώ ένα δοκίμιο μίγματος M4 συμπυκνωμένο με εσωτερική γωνία 1.45° και θερμοκρασία 160°C που υπέστη κοπή και πυρηνοληψία (αρχικής διαμέτρου 150 mm), θα αναφέρεται με τον κωδικό M4/G/160/CC.

Όσον αφορά στους πυρήνες, στην κωδικοποίηση περιλαμβάνεται ο τύπος του ασφαλτομίγματος και ο αύξων αριθμός που δόθηκε κατά την πυρηνοληψία, συνοδευόμενοι από τον κωδικό F, ως ένδειξη ότι πρόκειται για πυρήνα οδοστρώματος (field core). Για παράδειγμα, ο κωδικός M2/30/F αναφέρεται στον πυρήνα υπ' αριθμόν 30 ασφαλτομίγματος M2.

4 ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΙΚΟΝΑ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται εισαγωγικά βασικές έννοιες που αφορούν την ψηφιακή εικόνα. Επιπροσθέτως, αναλύονται οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κατά το στάδιο επεξεργασίας της ψηφιακής εικόνας ασφαλτομίγματος.

4.1 Δομή ψηφιακής εικόνας

Η ψηφιακή εικόνα αποτελείται από εικονοστοιχεία ή αλλιώς pixels (*picture element* = στοιχείο εικόνας), διατεταγμένα οριζόντια και κάθετα. Το pixel είναι το μικρότερο στοιχειώδες τμήμα μιας εικόνας και αποτελεί μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για γραφικά υπολογιστών. Συνεπώς, στην οθόνη ενός υπολογιστή η εικόνα αναπαρίσταται μέσω ενός δισδιάστατου πίνακα A διαστάσεων $m \times n$, κάθε στοιχείο a_{ij} του οποίου είναι ένα pixel (σχήμα 4.1).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mj} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 4.1 Αναπαράσταση ψηφιακής εικόνας μέσω δισδιάστατου πίνακα

Κάθε pixel είναι συνάρτηση τριών μεταβλητών: των συντεταγμένων του στο επίπεδο x - y , που δίνουν τη θέση του pixel στην εικόνα και της έντασης φωτεινότητας στον άξονα z , η οποία περιλαμβάνει τη χρωματική πληροφορία. Η αναπαράσταση της χρωματικής πληροφορίας στηρίζεται στην θεωρία ότι κάθε χρώμα μπορεί να δημιουργηθεί με την κατάλληλη μίξη τριών χρωμάτων: κόκκινο, πράσινο, μπλε (RGB).

Άρα, σε μια έγχρωμη εικόνα, η τιμή της φωτεινότητας είναι μια διατεταγμένη τριάδα θετικών αριθμών, καθένας από τους οποίους δίνει την ένταση για ένα από τα τρία βασικά χρώματα. Αντιθέτως, σε μία εικόνα αποχρώσεων γκριζου (grayscale), η ένταση της φωτεινότητας δίνεται από έναν θετικό αριθμό.

4.2 Ανάλυση εικόνας – Βάθος ανάλυσης

Ο όρος ανάλυση εικόνας (image resolution) αναφέρεται στον αριθμό των pixels από τα οποία αποτελείται μια εικόνα. Ένας τρόπος προσδιορισμού της ανάλυσης μιας εικόνας είναι με αναφορά στον αριθμό των pixels ανά μονάδα μήκους. Κατά κανόνα, ως μονάδα μέτρησης στην οθόνη χρησιμοποιείται η μονάδα ppi (pixels per inch = εικονοστοιχεία ανά ίντσα) ή όταν αναφερόμαστε σε εκτύπωση στο χαρτί η μονάδα dpi (dots per inch = κουκίδες ανά ίντσα).

Με τον όρο βάθος ανάλυσης εικόνας (image depth resolution), αναφερόμαστε στον αριθμό των bit που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ενός pixel (bpp). Το bit είναι η στοιχειώδης μονάδα πληροφορίας στην Επιστήμη Υπολογιστών και αποτελεί την ποσότητα της πληροφορίας που μπορεί να αποθηκευτεί από μία δυαδική συσκευή. Εκφράζει τον αριθμό των διαφορετικών χρωματισμών (εντάσεων φωτεινότητας) που μπορεί να απεικονίσει ένα pixel. Έτσι για παράδειγμα, σε μια εικόνα 1-bit, όπου χρησιμοποιείται 1 bit για κάθε pixel, μπορούν να απεικονιστούν 2^1 διαφορετικοί χρωματισμοί (μονόχρωμη εικόνα), ενώ σε μια εικόνα 8-bit υπάρχει δυνατότητα απεικόνισης $2^8=256$ διαφορετικών χρωματισμών.

4.3 Τεχνικές επεξεργασίας

Υπάρχει μια εξαιρετικά μεγάλη ποικιλία φίλτρων και μαθηματικών τελεστών που εφαρμόζονται με σκοπό την βελτίωση και προετοιμασία της ψηφιακής εικόνας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

4.3.1 Φίλτρο ενδιάμεσης τιμής

Με τον όρο θόρυβος (noise) σε μια εικόνα, αναφερόμαστε στην τυχαία παρεμβολή pixels διαφορετικής έντασης φωτεινότητας. Οφείλεται σε κακή ποιότητα λήψης ή χαμηλή ανάλυση και κατά αυτό τον τρόπο αλλοιώνεται η πληροφορία της εικόνας. Ωστόσο, ο θόρυβος μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη χρήση των κατάλληλων φίλτρων.

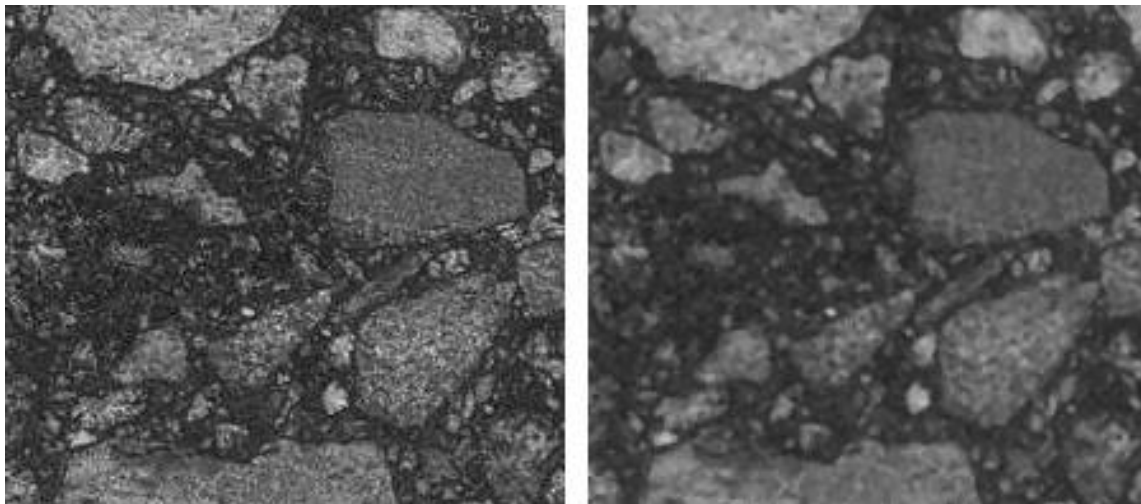
Χαρακτηριστικό φίλτρο αυτής της κατηγορίας είναι το φίλτρο της ενδιάμεσης τιμής (median filter). Είναι ένα μη γραμμικό χωρικό φίλτρο εξομάλυνσης του θορύβου με χρήση της διαδικασίας κυλιόμενων παραθύρων-γειτονιών (sliding neighborhood

operation). Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία, η ένταση φωτεινότητας κάθε pixel (i, j) αντικαθίσταται από την ενδιάμεση τιμή των εντάσεων φωτεινότητας ενός παραθύρου διαστάσεων $n \times n$ της γειτονιάς του. Στο σχήμα 4.2 απεικονίζεται η γειτονιά διαστάσεων 3×3 του pixel με συντεταγμένες (i, j) .

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	i, j	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

Σχήμα 4.2 Γειτονιά 3×3 ενός εικονοστοιχείου

Παράδειγμα της εφαρμογής φίλτρου ενδιάμεσης τιμής σε τμήμα εικόνας ασφαλτομίγματος δίνεται στο σχήμα 4.3. Παρατηρούμε ότι στη δεξιά εικόνα έχει μειωθεί σημαντικά ο θόρυβος.

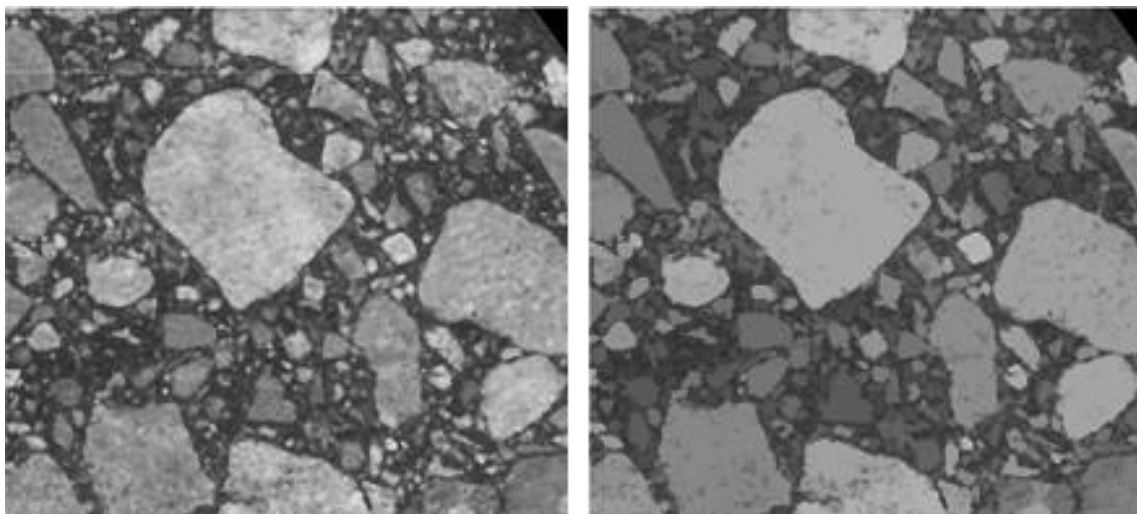


Σχήμα 4.3 Εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής

4.3.2 **Φίλτρο *Hmax***

Μια τεχνική επεξεργασίας που χρησιμοποιείται στις εικόνες ασφαλτομίγματος με σκοπό την ομογενοποίηση των περιοχών με έντονες διακυμάνσεις στο χρωματισμό, είναι η τεχνική της καταστολής τοπικών μεγίστων. Αφορά την εξομάλυνση της έντασης φωτεινότητας των pixels και επιτυγχάνεται μέσω του φίλτρου *Hmax*.

Η λειτουργία του φίλτρου *Hmax* είναι πολύ απλή: τίθεται μια μέγιστη οριακή τιμή *H* και οι τιμές φωτεινότητας που υπερβαίνουν το όριο αντικαθίστανται από την συγκεκριμένη τιμή *H*. Στο σχήμα 4.4 απεικονίζεται η εφαρμογή του υπόψη φίλτρου σε τμήμα εικόνας ασφαλτομίγματος.



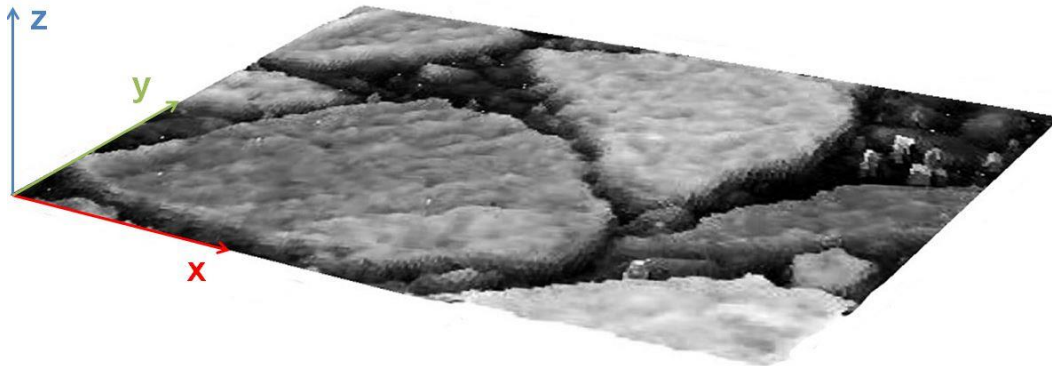
Σχήμα 4.4 Εφαρμογή φίλτρου *Hmax*

4.3.3 **Μετασχηματισμός *Watershed***

Ο όρος κατάτμηση εικόνας (image segmentation) αναφέρεται στη διαδικασία διαίρεσης μιας ψηφιακής εικόνας σε ομοιογενή τμήματα, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο. Στόχος μιας τέτοιας επεξεργασίας είναι η απλοποίηση της εικόνας, ώστε να είναι πιο εύκολη η ανάλυσή της.

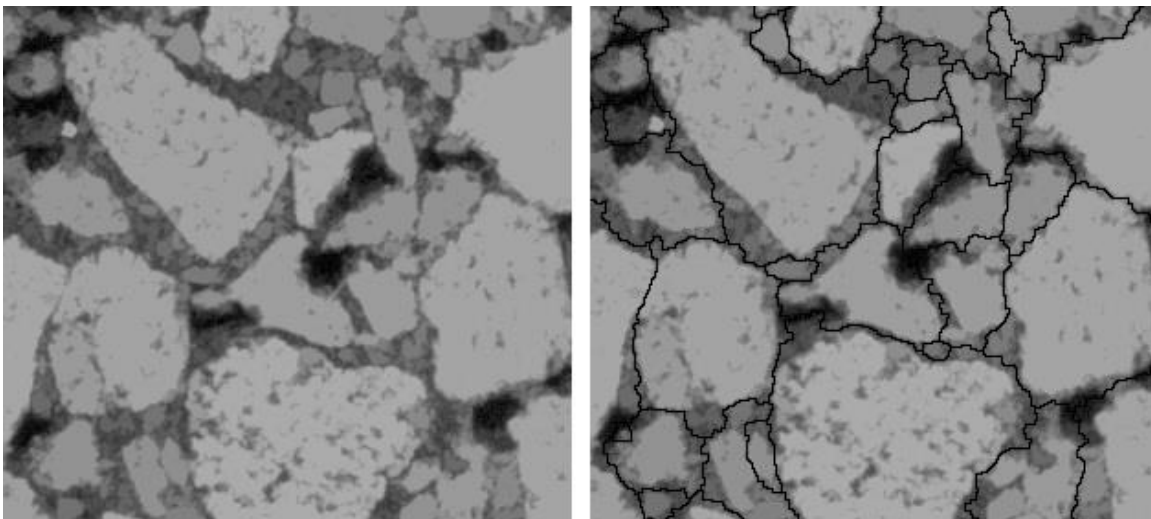
Μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος κατάτμησης είναι ο μετασχηματισμός watershed (watershed transformation). Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδέα πως μια εικόνα αποχρώσεων γκριζου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τοπογραφικό ανάγλυφο, όπου το ύψος του ανάγλυφου σε κάθε σημείο αντιστοιχεί στη φωτεινότητα του pixel στο συγκεκριμένο σημείο.

Η τρισδιάστατη παρουσίαση της εικόνας ενός τμήματος ασφαλτομίγματος, όπου στον κάθετο άξονα z μετράται η ένταση φωτεινότητας, κάνει περισσότερο κατανοητή την βασική ιδέα της μεθόδου (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Αναλογία εικόνας ασφαλτομίγματος με τοπογραφικό ανάγλυφο

Έπειτα, μετά από εφαρμογή κατάλληλων μαθηματικών διαδικασιών, αναγνωρίζονται τα ομοιογενή τμήματα και διαχωρίζονται. Μια απεικόνιση εφαρμογής του μετασχηματισμού watershed δίνεται στο σχήμα 4.6 όπου τα αδρανή έχουν διαχωριστεί σε "νησίδες" μέσω συνεχόμενων γραμμών.



Σχήμα 4.6 Εφαρμογή μετασχηματισμού watershed

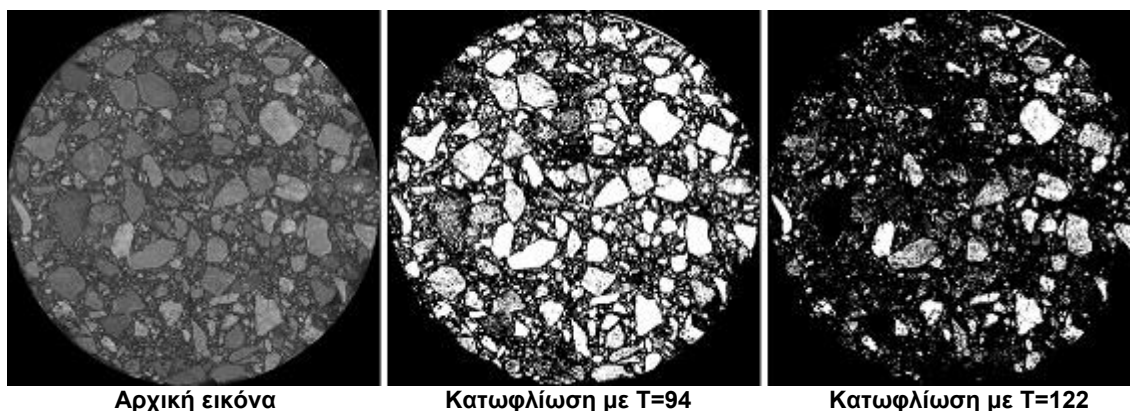
4.3.4 Κατωφλίωση

Μέσω της κατωφλίωσης (thresholding) απομονώνονται οι περιοχές ενδιαφέροντος (regions of interest) – στην προκειμένη περίπτωση τα αδρανή – από το υπόλοιπο μίγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετατροπή μιας εικόνας σε δυαδική (binary image), δηλαδή σε ασπρόμαυρη, μέσω της εξίσωσης:

$$h_{ij} = \begin{cases} 0 \text{ (μαύρο)}, & \text{αν } f_{ij} < T \\ 255 \text{ (λευκό)}, & \text{αν } f_{ij} \geq T \end{cases} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

όπου T η τιμή κατωφλίου, f_{ij} και h_{ij} η ένταση φωτεινότητας του pixel α_{ij} , πριν και μετά την εφαρμογή κατωφλίωσης, αντίστοιχα

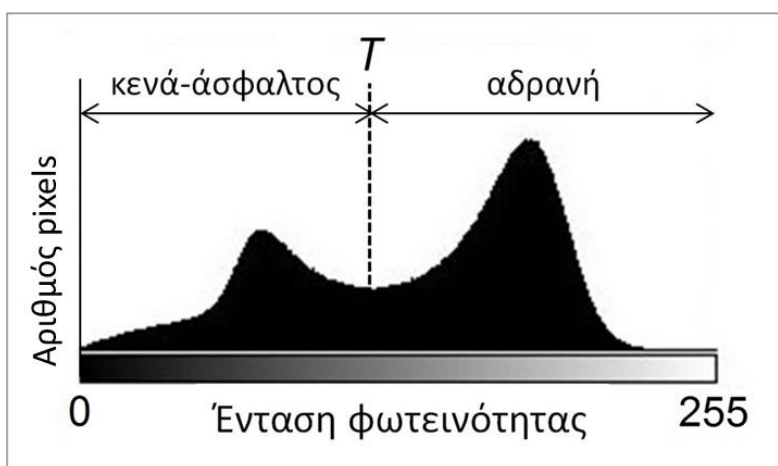
Κατά τη μέθοδο αυτή, οι τιμές φωτεινότητας των pixels της εικόνας εισόδου συγκρίνονται με την οριακή τιμή T κατωφλίου (threshold). Αν είναι μικρότερες, αντικαθίστονται από την τιμή 0 (μαύρο), ενώ αν είναι μεγαλύτερες ή ίσες, αντικαθίστονται από την τιμή 255 (λευκό). Στο σχήμα 4.7 εφαρμόζεται κατωφλίωση στην αρχική εικόνα μιας οριζόντιας τομής ασφαλτομίγματος μεταβάλλοντας την τιμή κατωφλίου. Είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στις δύο επεξεργασμένες εικόνες. Συνεπώς συμπεραίνουμε πως είναι σημαντική η επιλογή της κατάλληλης τιμής T .



Σχήμα 4.7 Εφαρμογή κατωφλίωσης με δύο διαφορετικές τιμές κατωφλίου

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της βέλτιστης τιμής κατωφλίου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος, η οποία βασίζεται στον χειροκίνητο προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής T , με κριτήριο τη μορφή του ιστογράμματος φωτεινότητας.

Το ιστόγραμμα φωτεινότητας είναι η γραφική παράσταση που απεικονίζει την συχνότητα με την οποία εμφανίζονται οι διάφορες τιμές έντασης φωτεινότητας σε μια εικόνα. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται το εύρος των χρωματισμών που μπορεί να αντιπροσωπεύσει ένα pixel, ενώ στον κάθετο είναι ο αριθμός των pixels που απεικονίζουν κάθε συγκεκριμένο χρωματισμό. Το εύρος των τιμών του οριζόντιου άξονα εκφράζει την διακύμανση της φωτεινότητας (contrast). Όπως έχει αναφερθεί, σε μια εικόνα 8-bit αποχρώσεων γκριζου οι τιμές φωτεινότητας που μπορεί να λάβει ένα pixel είναι 256. Η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα (0), ενώ η μέγιστη στο λευκό (255).



Σχήμα 4.8 Επιλογή τιμής T κατωφλίου

Η βασική ιδέα είναι ότι η μορφή του ιστογράμματος σε μια εικόνα ασφαλτομίγματος προκύπτει από τον συνδυασμό δυο διαφορετικών κατανομών. Όπως παρατηρούμε στο ιστόγραμμα του σχήματος 4.8, εύκολα διακρίνονται οι δύο κατανομές. Η πιο σκουρόχρωμη (πλησιέστερα στο 0) αντιπροσωπεύει την άσφαλο μαζί με τα κενά, ενώ η πιο ανοιχτόχρωμη (πλησιέστερα στο 255), τα αδρανή. Επιλέγοντας ως τιμή κατωφλίου την τιμή T ανάμεσα στις δύο κατανομές, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός των αδρανών.

5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε, τόσο στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας ανάλυσης της ψηφιακής εικόνας (λήψη, επεξεργασία, ανάλυση), όσο και στην μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από την ανάλυση.

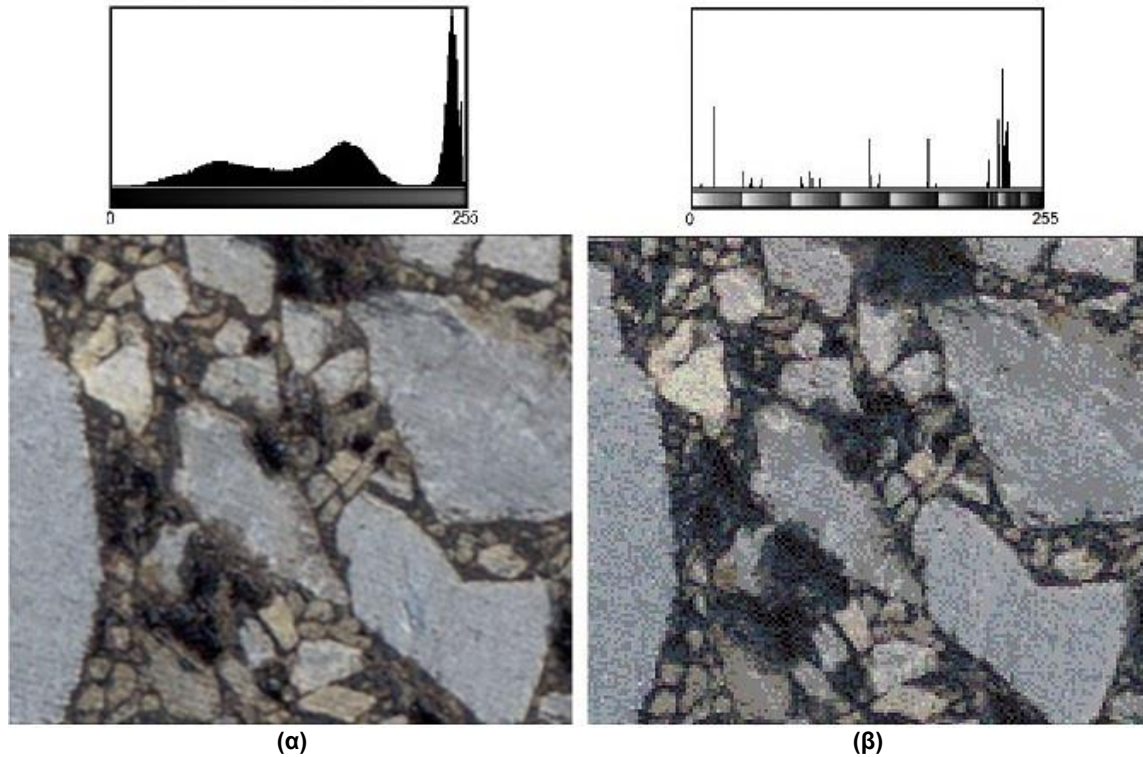
5.1 Λήψη εικόνας

Η λήψη της ψηφιακής εικόνας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια επίπεδου σαρωτή, μοντέλου HP Scanjet 3800. Με στόχο τη βέλτιστη επιλογή ιδιοτήτων της εικόνας πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές σαρώσεις.

Όσον αφορά την ανάλυση της εικόνας (image resolution), εκτελέστηκαν διαδοχικές σαρώσεις σε 300 rpi, 600 rpi και 1200 rpi. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των pixels ανά ίντσα, τόσο ακριβέστερη είναι η ψηφιακή απεικόνιση. Για τα μίγματα M1 και M2 επιλέχθηκε ανάλυση 600 rpi, ενώ για το μίγμα M4 επιλέχθηκε ανάλυση 1200 rpi, λόγω της ιδιαιτερότητας των σκουρόχρωμων αδρανών.

Επιπλέον, εξετάστηκε η σάρωση με διαφορετικά συστήματα απεικόνισης των χρωματισμών: τριών παλετών χρωμάτων (system palette, web palette, adaptive palette) και πραγματικών χρωμάτων (million colors). Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται η ίδια εικόνα σαρωμένη με την επιλογή million colors (α) και system palette (β), καθώς και τα αντίστοιχα ιστογράμματα. Η διαφορά ποιότητας ανάμεσα στις δύο εικόνες είναι εμφανής. Κατά τη σάρωση με system palette περιλαμβάνεται μικρότερος αριθμός διαφορετικών χρωματισμών, όπως αποδεικνύεται από το ασυνεχές ιστόγραμμα, ενώ παρατηρώντας την εικόνα βλέπουμε ότι τα pixels διακρίνονται με γυμνό μάτι. Συνεπώς επιλέχθηκε σάρωση με επιλογή million colors.

Η εικόνα αποθηκεύτηκε σε μορφή TIFF, ως ποιοτικότερη όλων και το βάθος ανάλυσης ρυθμίστηκε στα 8-bit (256 χρώματα).



Σχήμα 5.1 Σάρωση με επιλογή million colors (α) και system palette (β)

Αφού καθορίστηκαν οι ιδιότητες, πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις στις επιφάνειες 1 και 2 (σχήμα 5.2), καταλήγοντας σε δυο εικόνες για κάθε δοκίμιο και πυρήνα. Συνολικά έγινε λήψη 72 εικόνων εργαστηριακών δοκιμίων και 40 εικόνων πυρήνων.



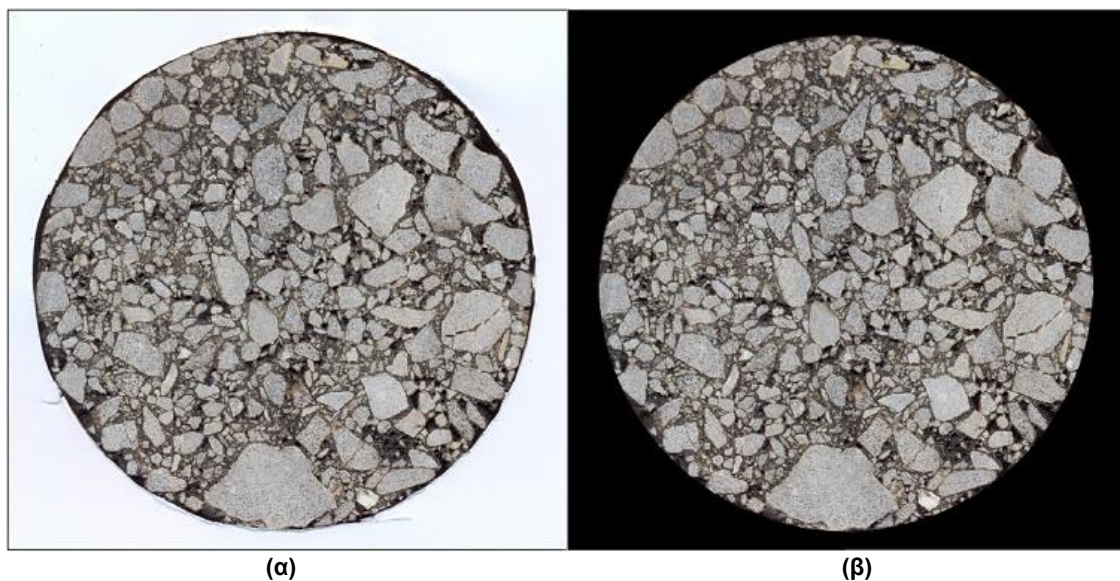
Σχήμα 5.2 Επιφάνειες σάρωσης

5.2 Επεξεργασία εικόνας

Η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων χωρίστηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο περιλαμβάνει προεπεξεργασία της ακατέργαστης ψηφιακής εικόνας από τη σάρωση, ενώ κατά το δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε η τελική επεξεργασία μέσω του λογισμικού iPas.

5.2.1 Προεπεξεργασία

Το στάδιο της προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διευκόλυνση της μετέπειτα επεξεργασίας, Περιελάμβανε εξάλειψη των ατελειών της περιμέτρου που οφείλονται στη σάρωση και κατόπιν απομόνωση της κυκλικής διατομής του ασφαλτομίγματος από το φόντο (background). Στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται η ίδια εικόνα, πριν (α) και μετά την προεπεξεργασία (β).



Σχήμα 5.3 Προεπεξεργασία εικόνας της κορυφής του δοκιμίου M2/G/L/C

5.2.2 Τελική επεξεργασία

5.2.2.1 Διερεύνηση της λειτουργίας του λογισμικού iPas

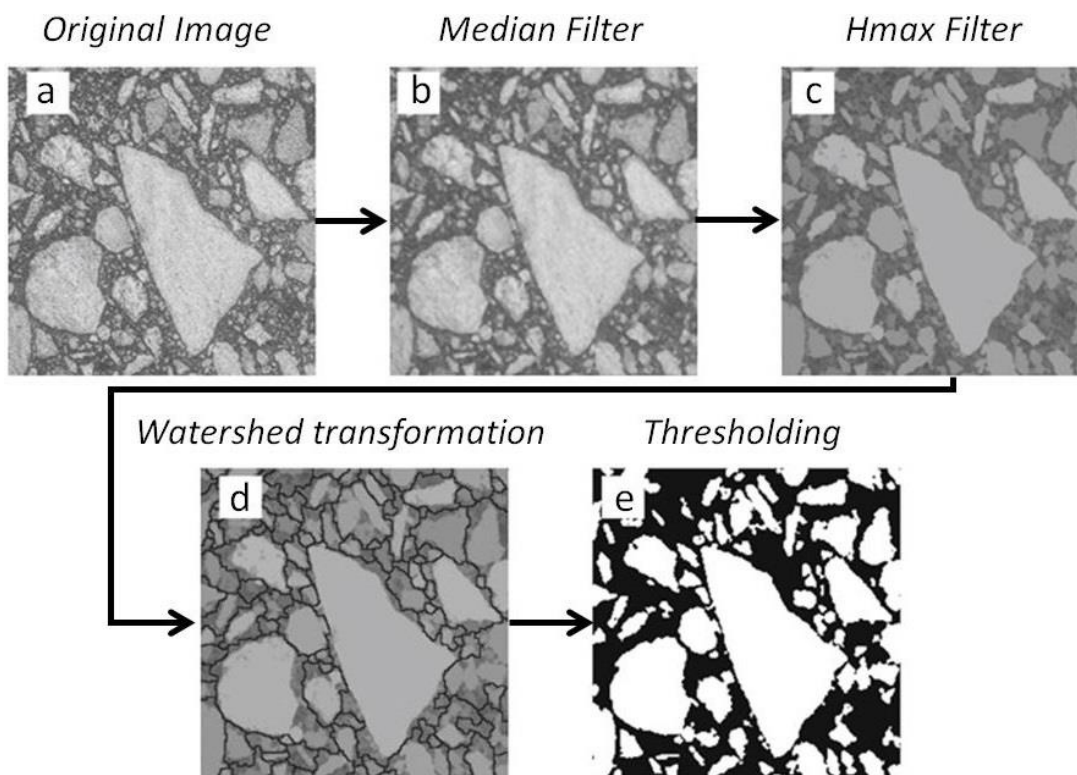
Το λογισμικό iPas εξειδικεύεται στην επεξεργασία και ανάλυση δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων ασφαλτομίγματος. Αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ερευνών της ομάδας *Task Group 2*

(*Technical Committee 237-SIB*) υπό την αιγίδα της διεθνούς ένωσης *RILEM*, ως ευρύτερο μέλος της οποίας συμμετέχει και το Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.

Η λειτουργία του λογισμικού έχει ως εξής :

Αρχικά ο χρήστης εισάγει τις ογκομετρικές ιδιότητες του μίγματος [ποσοστό κενών, ποσοστό ασφάλτου (κ.β. μίγματος), ειδικό βάρος αδρανών και ασφάλτου]. Οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ποσοστού των αδρανών (P_{sv}) ως προς τον συνολικό όγκο του μίγματος. Επιπλέον, εισάγονται τα στοιχεία της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών, μέσω των οποίων υπολογίζεται το ποσοστό συγκρατούμενων για κάθε μέγεθος κόσκινο (PR_i) και δημιουργείται το αντίστοιχο διάγραμμα.

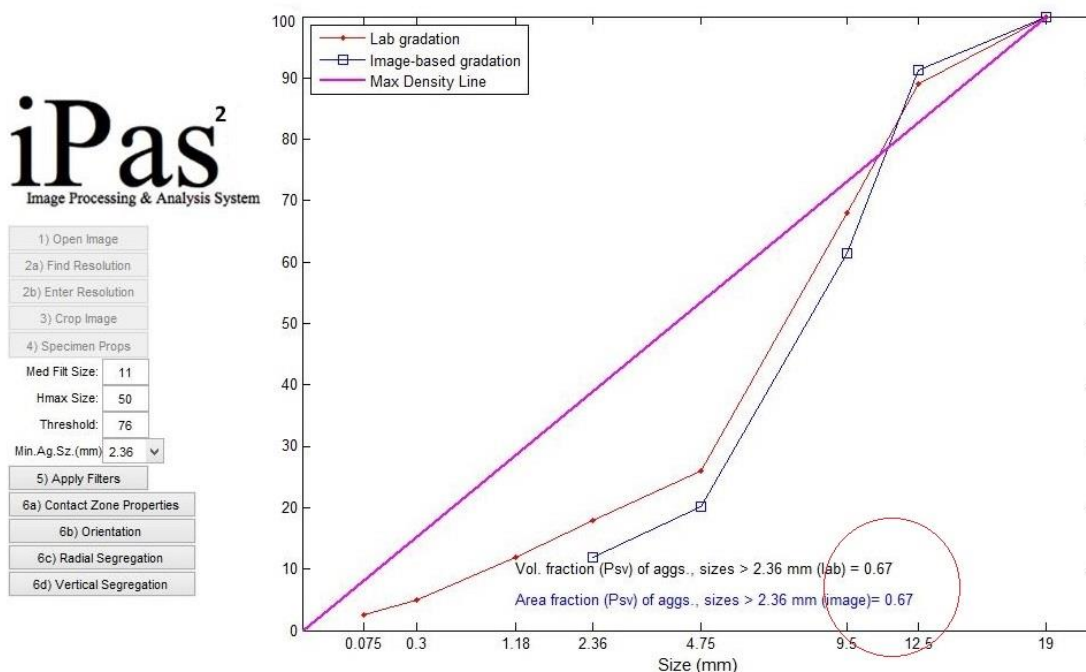
Ακολουθεί η επεξεργασία της εικόνας. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο κατά τον οποίο εφαρμόζονται διαδοχικά το φίλτρο της ενδιάμεσης τιμής (median filter), το φίλτρο Hmax, ο μετασχηματισμός watershed (watershed transformation) και η κατωφλίωση (thresholding). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις τιμές των φίλτρων, η λειτουργία των οποίων έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 4.3. Στο σχήμα 5.4 απεικονίζονται τα επιμέρους στάδια του αλγόριθμου επεξεργασίας.



Σχήμα 5.4 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας μέσω iPas

Εν συνεχεία, υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αδρανών. Υπολογίζονται το εμβαδόν, η ισοδύναμη διάμετρος και το κεντροειδές (centroid) κάθε αδρανούς, μέσω των οποίων προσδιορίζεται το ποσοστό χονδρόκοκκων αδρανών στην εικόνα (P_{sv}^{im}) και η κοκκομετρική διαβάθμιση (PR_i^{im}).

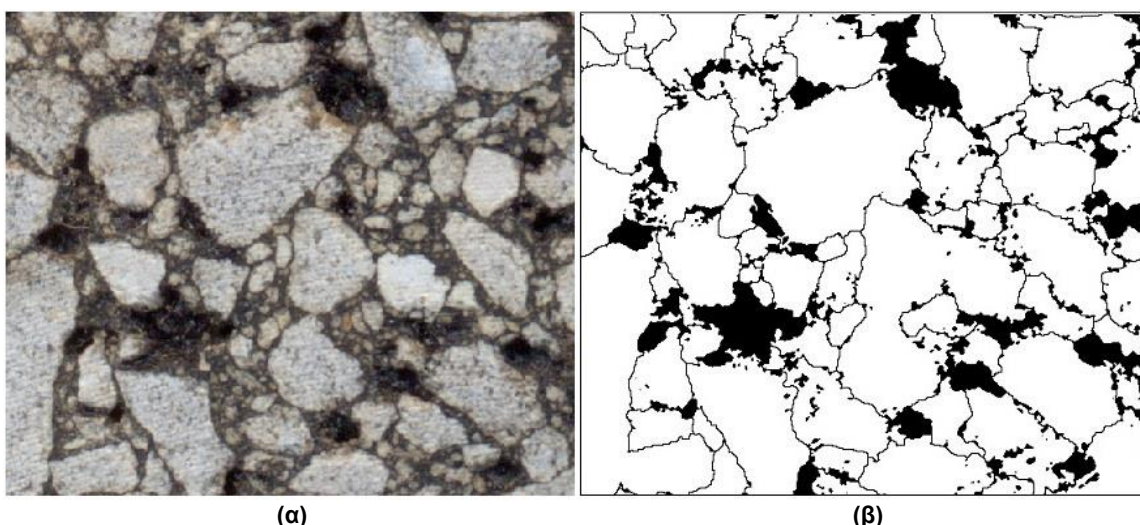
Κριτήριο για τη σωστή επεξεργασία της εικόνας αποτελεί η σύγκριση των μεγεθών $P_{sv}^{im}-P_{sv}$ και $PR_i^{im}-PR_i$, δηλαδή του ποσοστού χονδρόκοκκων αδρανών και της κοκκομετρικής διαβάθμισης, υπολογισμένα με δύο τρόπους: μέσω της εικόνας (με βάση το εμβαδόν) και μέσω των ογκομετρικών εργαστηριακών δοκιμών. Ο χρήστης καλείται να μεταβάλλει τις τιμές των φίλτρων επεξεργασίας έως ότου τα μεγέθη ταυτίζονται. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα όπου τα παραπάνω κριτήρια επεξεργασίας πληρούνται. Παρατηρούμε ότι έχει γίνει ακριβής ταύτιση των $P_{sv}^{im} - P_{sv}$ στην τιμή 0.67, και ότι οι καμπύλες των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων είναι παραπλήσιες. Μια τέτοια επεξεργασία θεωρητικά είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 5.5 Κριτήρια επεξεργασίας iPas

Εντούτοις, όπως έδειξε η διερεύνηση της λειτουργίας του iPas, τα κριτήρια αυτά δεν εξασφαλίζουν πάντοτε τον ακριβή προσδιορισμό των αδρανών στην εικόνα, που πρακτικά αποτελεί το στόχο της επεξεργασίας. Όπως αναφέρθηκε, το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας στο iPas είναι η κατωφλίωση (thresholding). Από την κατωφλιωμένη εικόνα προκύπτει η αναγνώριση των αδρανών και κατ' επέκταση τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά τους. Συνεπώς ο ακριβής προσδιορισμός των αδρανών στην εικόνα έχει πολύ μεγάλη σημασία.



Σχήμα 5.6 Επεξεργασία εικόνας σύμφωνα με τα κριτήρια επεξεργασίας iPas

Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται, ως παράδειγμα, ένα τμήμα εικόνας επεξεργασμένης με τα προαναφερθέντα κριτήρια. Αντιπαραβάλλοντας την κατωφλιωμένη εικόνα (β) με την αρχική (α), είναι φανερό πως στην εικόνα (β) ο προσδιορισμός της επιφάνειας και της περιμέτρου των αδρανών δεν είναι ακριβής, παρόλο που πληρούνταν τα κριτήρια επεξεργασίας.

5.2.2.2 Προτεινόμενη μεθοδολογία

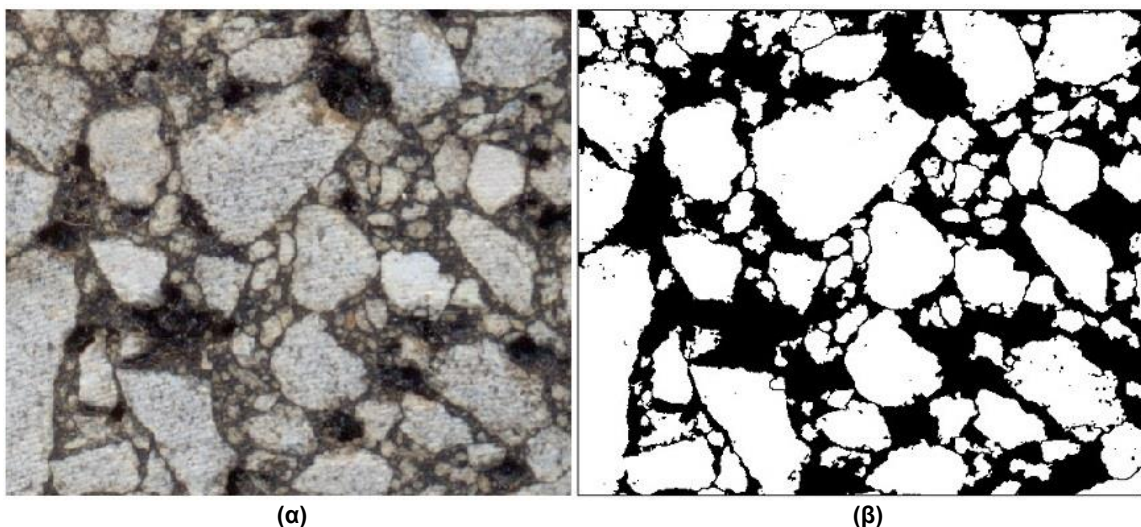
Η αδυναμία του ακριβούς προσδιορισμού των αδρανών στην εικόνα κατά την επεξεργασία με τα κριτήρια του iPas, οδήγησε στην υιοθέτηση μιας διαφορετικής μεθοδολογίας επεξεργασίας μέσω iPas.

Κατά τη μεθοδολογία αυτή, ο αλγόριθμος επεξεργασίας (σχήμα 5.4) παραμένει ως έχει, με τη διαφορά ότι η επεξεργασία βασίζεται στην οπτική επισκόπηση των επεξεργασμένων εικόνων σε κάθε επιμέρους στάδιο του αλγορίθμου, αγνοώντας ουσιαστικά τη σύγκριση των μεγεθών $P_{sv}^{im} - P_{sv}$ και $PR_i^{im} - PR_i$.

Αρχικά εφαρμόζονται το φίλτρο της ενδιάμεσης τιμής και το φίλτρο Hmax. Μετά την εφαρμογή αυτών των δύο φίλτρων πραγματοποιείται αυτόματα μετασχηματισμός watershed. Σε αυτό το βήμα σχηματίζονται οι γραμμές που διαχωρίζουν τα αδρανή μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μεταβάλλοντας τις τιμές των παραπάνω φίλτρων με στόχο την ακριβέστερη απεικόνιση. Κατόπιν, χρησιμοποιείται η μέθοδος

προσδιορισμού της τιμής T κατωφλίου (threshold) μέσω του ιστογράμματος φωτεινότητας, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 4.3.4.

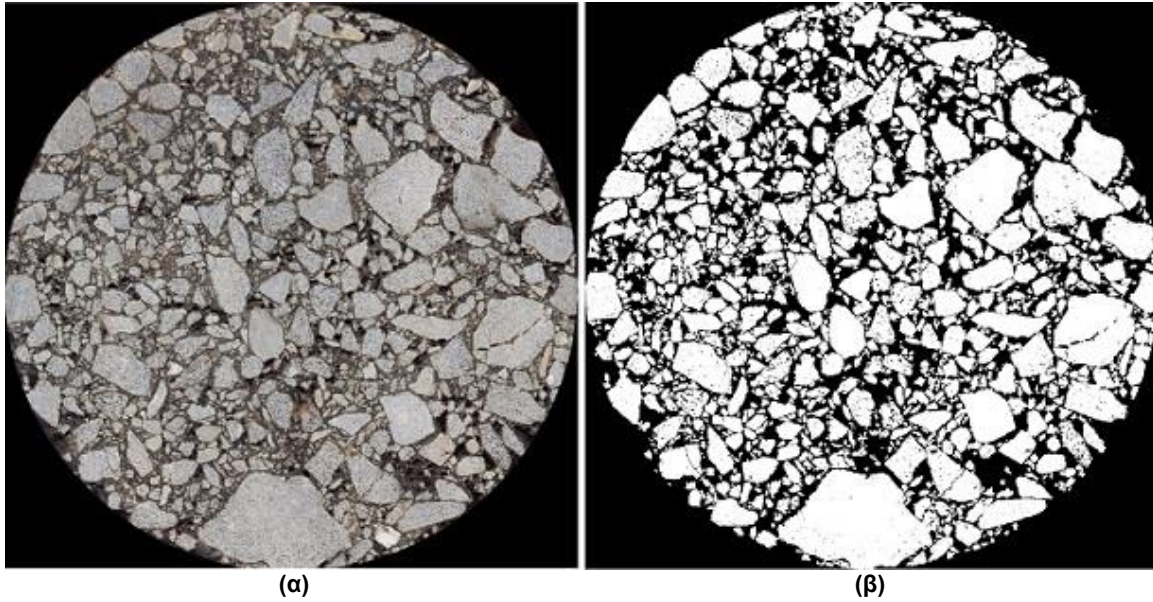
Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται το τμήμα της εικόνας που εξετάστηκε στο παράδειγμα του σχήματος 5.6, επεξεργασμένο με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Παρατηρούμε ότι τα αδρανή στην εικόνα (β) έχουν απομονωθεί και προσδιοριστεί ακριβώς όπως φαίνονται στην αρχική εικόνα του μίγματος (α), καταλήγοντας σε μια εμφανή βελτίωση της απεικόνισης σε σύγκριση με την εικόνα του σχήματος 5.6(β).



Σχήμα 5.7 Επεξεργασία εικόνας σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία

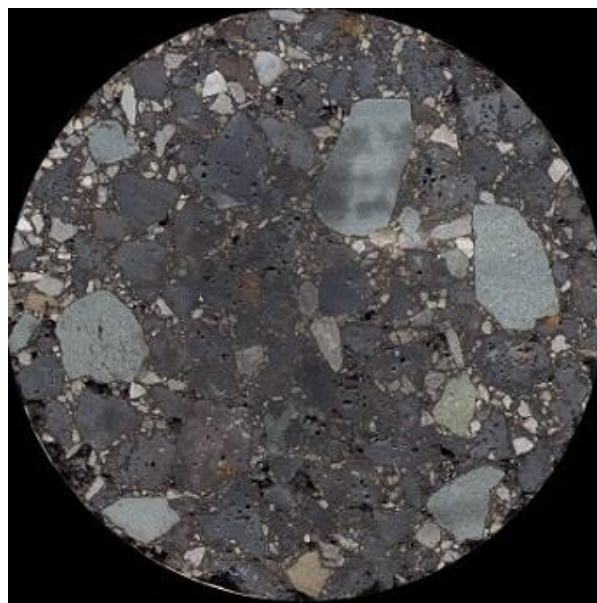
Ωστόσο, η παραπάνω μεθοδολογία αν και ακριβέστερη στον προσδιορισμό των αδρανών, δεν είναι εφαρμόσιμη σε όλα τα μίγματα. Βασική προϋπόθεση για την ακριβή αναγνώριση των αδρανών είναι η διαφοροποίηση τους χρωματικά σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά του μίγματος.

Στα μίγματα M1 και M2 τα αδρανή είναι ανοιχτόχρωμα (ασβεστολιθικά) και διαφοροποιούνται χρωματικά συγκρινόμενα με την άσφαλτο. Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η αρχική (α) και η τελική (β) εικόνα της κορυφής του δοκιμίου M2/G/L/C, όπως προκύπτει μετά την επεξεργασία με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Συνεπώς οι εικόνες των μιγμάτων M1 και M2 επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τα παραπάνω.



Σχήμα 5.8 Αρχική και επεξεργασμένη εικόνα της κορυφής του δοκιμίου M2/G/L/C

Αντιθέτως, το μίγμα M4 περιλαμβάνει αδρανή σκωρίας, τα οποία ως επί το πλείστον είναι σκουρόχρωμα και δεν διαφοροποιούνται χρωματικά σε σχέση με την άσφαλτο. Επιπλέον, τα αδρανή της σκωρίας σχηματίζουν συσσωματώματα μην επιτρέποντας στην άσφαλτο να εισχωρήσει ανάμεσα. Επομένως ο ακριβής προσδιορισμός των αδρανών στην εικόνα ενός τέτοιου μίγματος καθίσταται δύσκολος έως αδύνατος. Η επεξεργασία των εικόνων των δοκιμίων και πυρήνων του μίγματος M4 πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα κριτήρια επεξεργασίας του iPas. Μια απεικόνιση ενός χαρακτηριστικού δοκιμίου μίγματος M4, δίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9 Εικόνα της βάσης του δοκιμίου M4/E/130/C

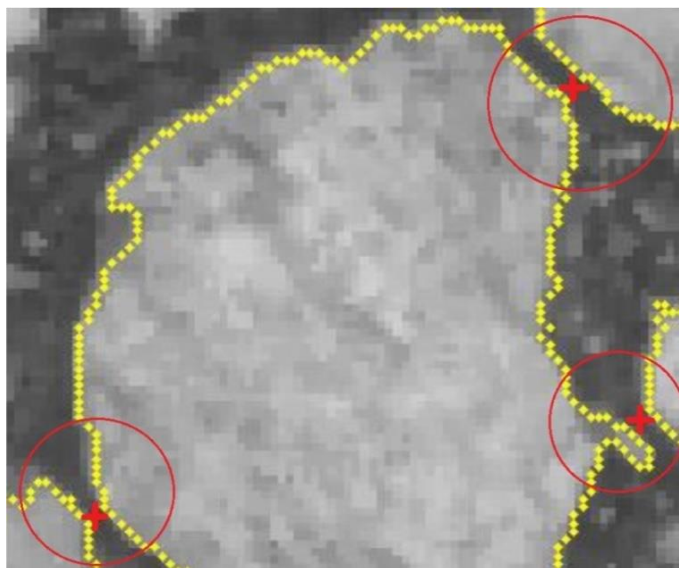
5.3 Ανάλυση εικόνας και επεξεργασία δεδομένων

Η εσωτερική δομή των ασφαλτομιγμάτων ποσοτικοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού των σημείων επαφής, του προσανατολισμού και του διαχωρισμού των αδρανών. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των ζητούμενων μεγεθών, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού iPas, καθώς και οι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν.

5.3.1 Σημεία επαφής

Ο υπολογισμός των σημείων επαφής βασίζεται στη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των περιμετρικών pixels των γειτονικών αδρανών. Αφού καθοριστεί η απόσταση SDT (surface distance threshold), κάτω από την οποία τα αδρανή θεωρείται ότι βρίσκονται σε επαφή και η ελάχιστη διάμετρος των αδρανών που θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό, εκτελείται σάρωση της εικόνας και υπολογίζονται τα σημεία επαφής.

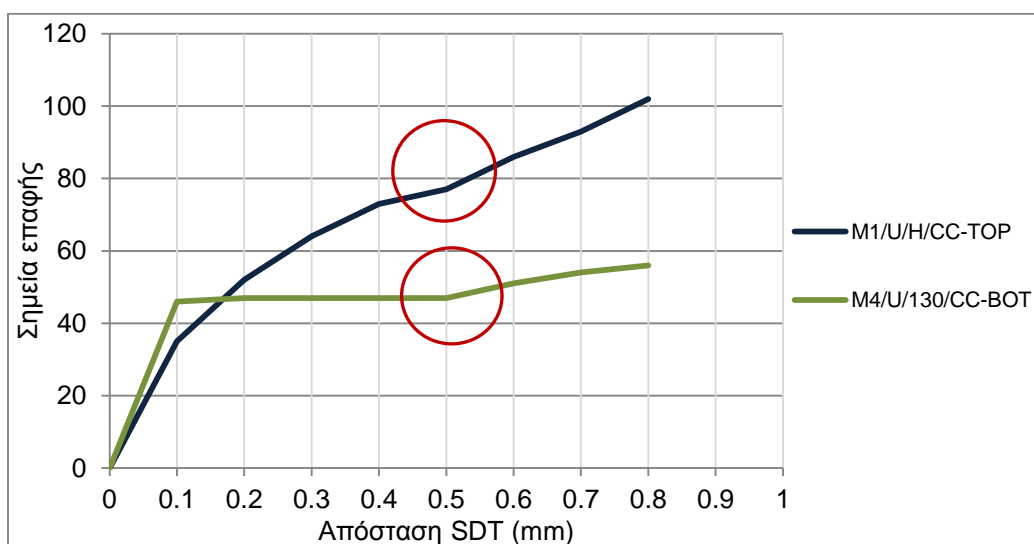
Μια απεικόνιση του υπολογισμού των σημείων επαφής φαίνεται στο σχήμα 5.10. Με κίτρινο χρώμα έχουν τονιστεί τα περιμετρικά pixels και με κόκκινο τα σημεία επαφής.



Σχήμα 5.10 Υπολογισμός σημείων επαφής

Όσον αφορά την απόσταση SDT, είναι προφανές πως όσο αυτή αυξάνεται, τόσο περισσότερα αδρανή θεωρούνται σε επαφή. Ωστόσο, σχετική έρευνα έδειξε ότι η αύξηση της τιμής της απόστασης πάνω από κάποιο όριο, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του

ρυθμού αύξησης των επαφών. Το σημείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τιμή της μεταβλητής SDT (Coenen et al. 2012). Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, πραγματοποιήθηκε έλεγχος προσδιορισμού της απόστασης SDT σε εικόνες ασφαλτομίγματος. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε αλλαγή της κλίσης στα 0.5 mm και ως εκ τούτου, ως απόσταση SDT επιλέχθηκε η τιμή 0.5 mm, ενιαία για όλα τα δοκίμια. Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η σχετική ανάλυση δύο εικόνων ασφαλτομίγματος.



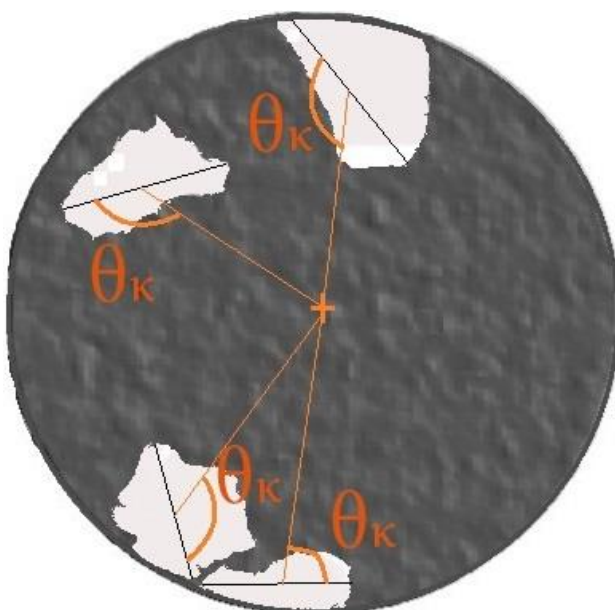
Σχήμα 5.11 Διάγραμμα σημείων επαφής-SDT

Σχετικά με την επιλογή του ελάχιστου μεγέθους αδρανών, αυτή καθορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα σχετικών διεθνών ερευνών (Sefidmazgi et al. 2012). Επιλέχθηκε ελάχιστο μέγεθος κόκκου 2.36 mm για τα μίγματα σύνθεσης κλειστού τύπου (M1 και M2) και 4.75 mm για το μίγμα σύνθεσης ημι-ανοικτού τύπου (M4).

Τέλος, σημειώνεται ότι ο συνολικός αριθμός των σημείων επαφής κάθε δοκιμίου και πυρήνα προκύπτει ως η μέση τιμή των σημείων επαφής που υπολογίζονται από τις δύο εικόνες (κορυφή και βάση).

5.3.2 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός χαρακτηρίζεται μέσω της γωνίας προσανατολισμού των αδρανών του μίγματος. Ως γωνία προσανατολισμού ενός αδρανούς, θεωρείται η γωνία θ_k που σχηματίζει ο μεγάλος άξονάς του με την ακτίνα της οριζόντιας κυκλικής διατομής (σχήμα 5.12) και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 179°.



Σχήμα 5.12 Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση του προσανατολισμού, αντιστοιχίζεται στο ιστόγραμμα γωνιών προσανατολισμού μια αρμονική συνάντηση, η εξίσωση της οποίας έχει προσδιοριστεί πειραματικά σε παλαιότερες έρευνες (Tashman et al. 2001, Coenen et al. 2012) και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{freq}_{harm} = \text{freq}_{ave} (1 + a * \cos^2\theta + 2b * \sin\theta\cos\theta - a * \sin^2\theta) \quad \text{Εξ. 5.1}$$

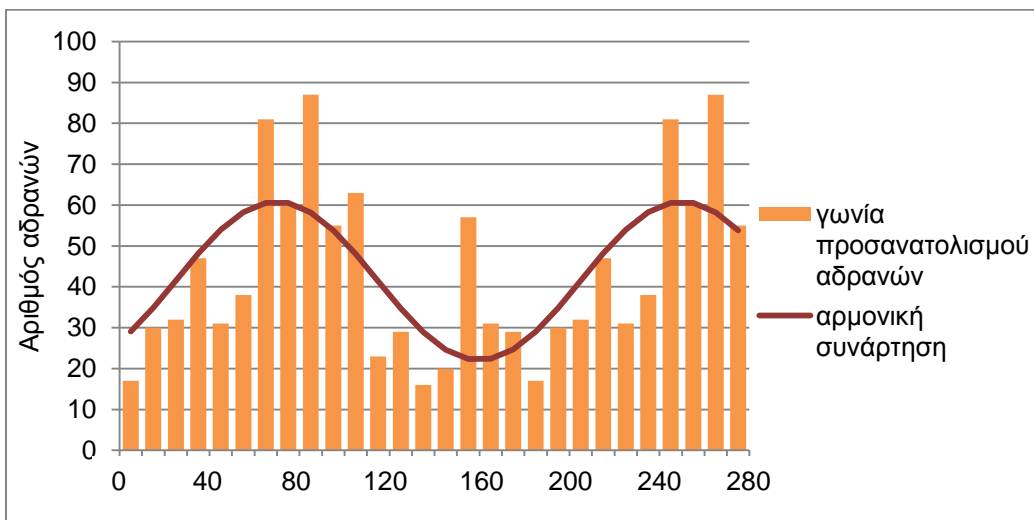
$$\text{όπου } a = [2 \sum_{k=1}^N \cos(2\theta_k)]/N \quad \text{Εξ. 5.2}$$

$$b = [2 \sum_{k=1}^N \sin(2\theta_k)]/N \quad \text{Εξ. 5.3}$$

$$\text{freq}_{ave} = N/N_d \quad \text{Εξ. 5.4}$$

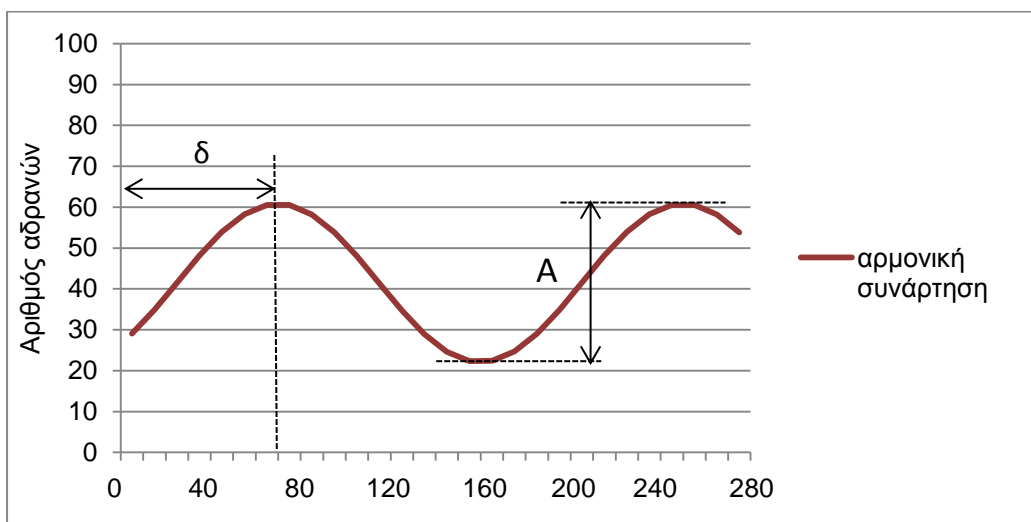
και θ_k η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας του αδρανούς με την ακτίνα
 N ο συνολικός αριθμός των αδρανών στην εικόνα
 N_d ο αριθμός των γωνιών θ_k που υπολογίζονται στις αρμονικές

Ο αριθμός N_d των γωνιών θ_k που υπολογίζονται στις αρμονικές είναι ο αριθμός των κλάσεων στις οποίες ομαδοποιούνται οι γωνίες προσανατολισμού των αδρανών. Στην παρούσα εργασία δεν πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση και επομένως ο αριθμός N_d ισούται με 180, όσο και το εύρος τιμών της γωνίας προσανατολισμού. Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση της αρμονικής συνάρτησης στα δεδομένα μιας κατανομής γωνιών προσανατολισμού.



Σχήμα 5.13 Αντιστοίχιση αρμονικής συνάρτησης στο ιστόγραμμα γωνιών προσανατολισμού

Η αρμονική συνάρτηση και κατ' επέκταση ο προσανατολισμός των αδρανών, μπορεί να περιγραφεί πλήρως μέσω των παραμέτρων δ και A , οι οποίες απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 5.14.



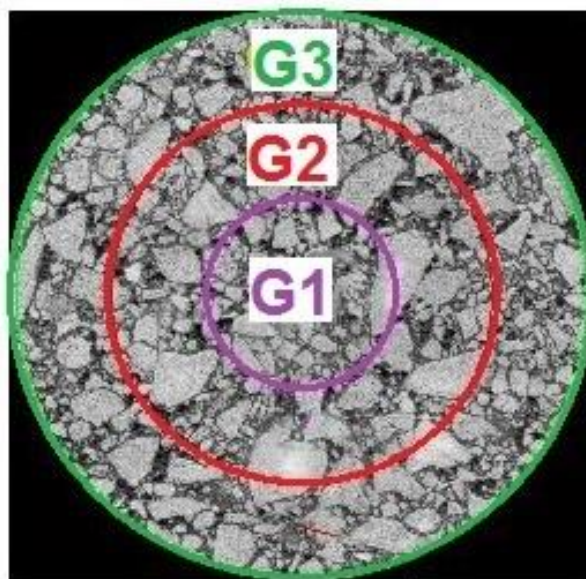
Σχήμα 5.14 Παράμετροι δ και A της αρμονικής συνάρτησης

Η παράμετρος δ είναι το σημείο στο οποίο η αρμονική παρουσιάζει το πρώτο μέγιστο. Πρόκειται για την επικρατούσα τιμή της κατανομής και πρακτικά αντιπροσωπεύει την γωνία προσανατολισμού των αδρανών του μίγματος.

Η παράμετρος A είναι η απόσταση μεταξύ του μεγίστου και του ελάχιστου της αρμονικής συνάρτησης. Εκφράζει την τάση των αδρανών να προσανατολίζονται προς τη συγκεκριμένη γωνία δ . Η ελάχιστη τιμή, το μηδέν, αντιστοιχεί σε τελείως τυχαία κατανομή του προσανατολισμού και δεν υπάρχει τάση προσανατολισμού προς κάποια γωνία. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το A τόσο εντονότερη είναι η τάση προσανατολισμού των αδρανών προς τη συγκεκριμένη γωνία δ και συνεπώς παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού.

5.3.3 Διαχωρισμός

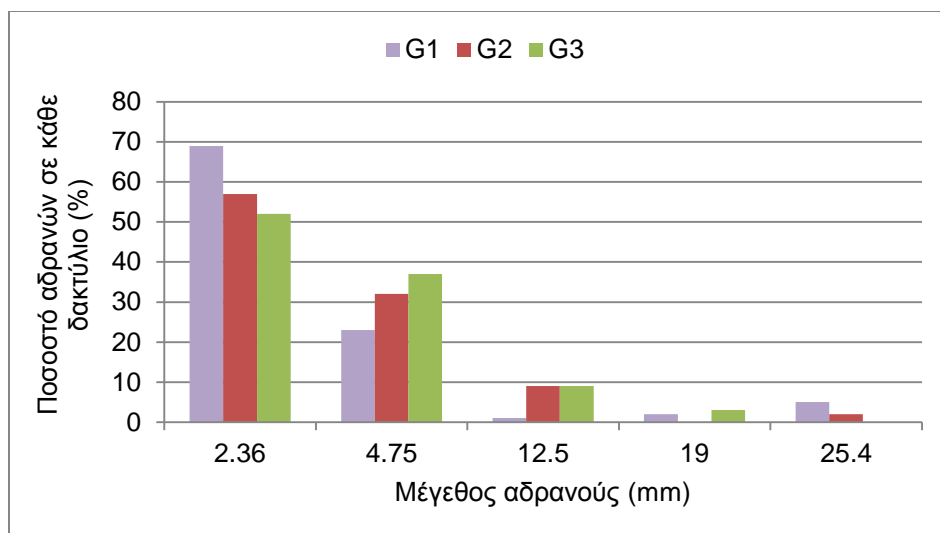
Για την ποσοτικοποίηση του διαχωρισμού, πραγματοποιείται τμηματοποίηση της κυκλικής διατομής σε τρεις δακτυλίους, διαιρώντας την ακτίνα R_{im} της διατομής σε τρία ίσα τμήματα. Ο κύκλος που περιβάλλει τον πρώτο δακτύλιο (G1) έχει ακτίνα $R_{im}/3$, ο δακτύλιος G2 βρίσκεται μεταξύ ακτίνας $R_{im}/3$ και $2R_{im}/3$ και ο δακτύλιος G3 μεταξύ ακτίνας $2R_{im}/3$ και R_{im} (σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15 Τμηματοποίηση της οριζόντιας διατομής σε δακτυλίους

Ο διαχωρισμός υπολογίζεται με βάση τη διάμετρο των αδρανών. Προσδιορίζονται τα αδρανή που ανήκουν σε κάθε έναν από τους τρεις δακτυλίους της επιφάνειας. Για κάθε

διαφορετικό μέγεθος αδρανών, υπολογίζεται το ποσοστό (επί του συνόλου των αδρανών της συγκεκριμένης διαμέτρου) που βρίσκεται σε κάθε δακτύλιο (σχήμα 5.16).



Σχήμα 5.16 Παράδειγμα υπολογισμού διαχωρισμού

Κατόπιν προσδιορίστηκε η παράμετρος διαχωρισμού S_H , η οποία εκφράζει την χωρική κατανομή των αδρανών στο μίγμα με βάση τη διάμετρο (Tashman et al. 2001), και ορίζεται ως εξής:

$$S_H = (D_{out}/D_{in} - 1) * 100 \% \quad \text{Εξ. 5.5}$$

όπου D_{out} η μέση διάμετρος των αδρανών στην εξωτερική περιοχή

D_{in} η μέση διάμετρος των αδρανών στην εσωτερική περιοχή

Μέσω της παραμέτρου S_H μετράται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης διαμέτρου των αδρανών από την εσωτερική στην εξωτερική περιοχή μιας διατομής ασφαλτομίγματος. Στην παρούσα ανάλυση, ως εξωτερική περιοχή θεωρήθηκε ο δακτύλιος G3 και ως εσωτερική περιοχή, οι δακτύλιοι G1 και G2, ως ενιαίο τμήμα. Θετική τιμή της παραμέτρου υποδηλώνει συγκέντρωση των πιο χονδρόκοκκων αδρανών στην εξωτερική περιοχή. Αρνητική τιμή υποδηλώνει συγκέντρωση των πιο χονδρόκοκκων αδρανών στην εσωτερική περιοχή, ενώ όταν η παράμετρος παίρνει την τιμή μηδέν, δεν παρατηρείται διαχωρισμός των αδρανών και η χωρική κατανομή θεωρείται ομοιογενής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τιμές της παραμέτρου S_H τάξεως του $|5|\%$ εκφράζουν μεταβολή της μέσης διαμέτρου των αδρανών κατά περίπου 0.2 mm. Ως εκ τούτου, για $S_H \leq |5|\%$, η χωρική κατανομή των αδρανών είναι δυνατόν να θεωρηθεί πρακτικά ομοιογενής.

5.3.4 Στατιστική ανάλυση εργαστηριακών δοκιμών

5.3.4.1 Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών

Αρχικά έγινε διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών σε κάθε μίγμα προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται λόγω της διαφοροποίησης των κενών ανά δοκίμιο.

Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκαν τα μη παραμετρικά στατιστικά τεστ ανεξαρτήτων δειγμάτων Mann-Whitney και Kruskal-Wallis κατά περίπτωση για τη σύγκριση 2 και 3 δειγμάτων, αντίστοιχα. Ο αριθμός των δειγμάτων, στα οποία χωρίστηκαν τα δοκίμια, διαμορφώθηκε ανάλογα με τον αριθμό των διαφορετικών τιμών της κάθε παραμέτρου (3 εσωτερικές γωνίες περιστροφής, 2 θερμοκρασίες, 2 είδη μηχανικής κατεργασίας).

Σύμφωνα με τα παραπάνω τεστ, ελέγχθηκε η μηδενική υπόθεση H_0 ισότητας των μέσων τιμών του ποσοστού κενών ανάμεσα στα δείγματα με κριτήριο την τιμή του παρατηρηθέντος επίπεδου στατιστικής σημαντικότητας. Για τιμές μικρότερες του 0.05 (διάστημα εμπιστοσύνης 95%) δεν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση, άρα δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση του ποσοστού των κενών. Σε αυτή την περίπτωση τα δοκίμια είναι συγκρίσιμα παρά τη διαφορά στο ποσοστό κενών και τα αποτελέσματα επηρεάζονται μόνο λόγω της μεταβολής των τριών παραμέτρων.

5.3.4.2 Διερεύνηση της επιρροής των μεταβλητών παραμέτρων

Προκειμένου να μελετηθεί η στατιστική σημαντικότητα της επιρροής των τριών μεταβλητών παραμέτρων (εσωτερικής γωνίας περιστροφής, θερμοκρασίας και μηχανικής κατεργασίας) σε κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής, πραγματοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης (analysis of variance - ANOVA). Η ανάλυση έγινε για τα δοκίμια κάθε ασφαλτομίγματος ξεχωριστά.

Χρησιμοποιήθηκε το γενικό γραμμικό μοντέλο (general linear model - GLM) που δίνεται μέσω της σχέσης:

$$\{\text{Χαρακτηριστικό εσωτ. δομής}\} = f(\text{γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία,} \\ \text{γωνία περιστροφής} \times \text{θερμοκρασία,} \\ \text{θερμοκρασία} \times \text{μηχ. κατεργασία,} \\ \text{γωνία περιστροφής} \times \text{μηχ. κατεργασία}) \quad \text{Εξ. 5.6}$$

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο εξετάζεται η στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων διακριτών μεταβλητών (γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχανική κατεργασία) και των συνδυασμών τους ανά δύο, στα αποτελέσματα της εκάστοτε εξαρτημένης συνεχούς μεταβλητής (σημεία επαφής, προσανατολισμός, διαχωρισμός). Ποσοτικοποιείται μέσω της τιμής του παρατηρηθέντος επίπεδου στατιστικής σημαντικότητας (p -value). Για διάστημα εμπιστοσύνης 95%, τιμές του p μικρότερες του 0.05 υποδηλώνουν στατιστικά σημαντική επίδραση.

5.3.5 **Σύγκριση εργαστηριακών δοκιμών και πυρήνων οδοστρώματος**

Με στόχο την διερεύνηση της δυνατότητας της γυροσκοπικής μεθόδου να αναπαράγει τις συνθήκες της επιτόπου συμπύκνωσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της εσωτερικής δομής των εργαστηριακών δοκιμών και των πυρήνων, αντίστοιχων ασφαλτομιγμάτων.

Προκειμένου όμως να πραγματοποιηθεί αυτή η σύγκριση, πρέπει να προσδιοριστεί ένας δείκτης αντιπροσωπευτικός για όλο το πλήθος των πυρήνων που αναλύθηκαν. Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε το μη παραμετρικό τεστ Kolmogorov-Smirnov για να ελεγχθεί η κανονικότητα των δεδομένων και κατ' επέκταση η δυνατότητα χρησιμοποίησης των μέσων τιμών των πυρήνων κάθε μίγματος, ως αντιπροσωπευτικές τιμές.

6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέσω της διαδικασίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας, σύμφωνα με μεθοδολογία του κεφαλαίου 5.

6.1 Εργαστηριακά δοκίμια

Στην ενότητα αυτή διερευνήθηκε η επίδραση τριών μεταβλητών παραμέτρων (εσωτερική γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχανική κατεργασία) στην εσωτερική δομή εργαστηριακών δοκιμών γυροσκοπικής συμπύκνωσης διαφορετικών ασφαλτομιγμάτων.

6.1.1 Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών

Αρχικά, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν επηρεάζονται από το μεταβλητό ποσοστό κενών των εργαστηριακών δοκιμών.

Πίνακας 6.1 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής (τεστ Kruskal-Wallis)

	Test Statistics ^a		
	κενά M1	κενά M2	κενά M4
Chi-Square	3.042	.126	.465
df	2	2	2
Asymp. Sig.	.219	.939	.793

a. Grouping Variable: Εσωτερική γωνία περιστροφής

Η διαφοροποίηση του ποσοστού των κενών ανάμεσα στα δοκίμια διαφορετικής εσωτερικής γωνίας περιστροφής δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική σύμφωνα με τη ανάλυση. Οι τιμές του παρατηρηθέντος επιπέδου στατιστικής σημαντικότητας (Asymp. Sig.) προέκυψαν μεγαλύτερες του 0.05 (διάστημα εμπιστοσύνης 95%) στα δοκίμια όλων των ασφαλτομιγμάτων (πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.2 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (τεστ Mann-Whitney)

	Test Statistics ^a		
	κενά M1	κενά M2	κενά M4
Mann-Whitney U	13.000	8.500	11.000
Wilcoxon W	34.000	29.500	32.000
Z	-.805	-1.527	-1.125
Asymp. Sig. (2-tailed)	.421	.127	.261
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.485	.132	.310

a. Grouping Variable: Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Πίνακας 6.3 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της μηχανικής κατεργασίας (τεστ Mann-Whitney)

	Test Statistics ^a		
	κενά M1	κενά M2	κενά M4
Mann-Whitney U	13.500	15.000	13.500
Wilcoxon W	34.500	36.000	34.500
Z	-.724	-.482	-.723
Asymp. Sig. (2-tailed)	.469	.630	.470
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.485	.699	.485

a. Grouping Variable: Μηχανική κατεργασία

Ομοίως, ο έλεγχος της επιρροής του ποσοστού των κενών των δοκιμίων ταξινομημένων ανάλογα με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης και τη μηχανική κατεργασία, έδειξε ότι δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική μεταβολή, με τις τιμές του παρατηρηθέντος επίπεδου στατιστικής σημαντικότητας {Exact. Sig. [2*(1-tailed Sig.)]} να είναι μεγαλύτερες του 0.05 σε όλες τις περιπτώσεις (πίνακες 6.2 και 6.3).

6.1.2 Σημεία επαφής

Προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής των αδρανών, δημιουργήθηκαν τα σχετικά διαγράμματα. Κρατώντας σταθερές δύο παραμέτρους μελετάται η επιρροή της τρίτης. Ακολούθησε στατιστική ανάλυση διακύμανσης των αποτελεσμάτων.

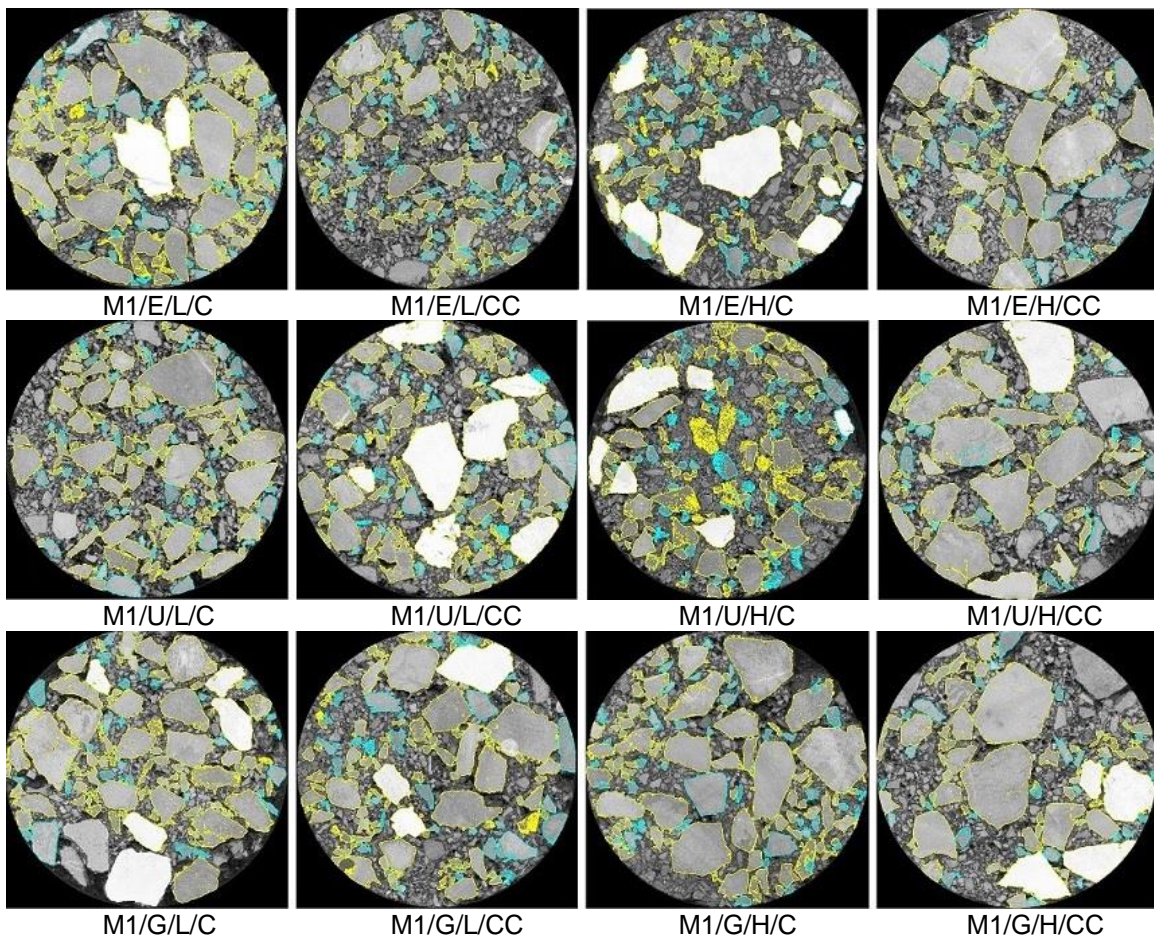
6.1.2.1 Ασφαλτόμιγμα M1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.4 Σημεία επαφής (δοκίμια M1)

Κωδικός δοκιμίου	Σημεία επαφής
M1/E/L/C	151
M1/E/L/CC	128
M1/E/H/C	106
M1/E/H/CC	87
M1/U/L/C	125
M1/U/L/CC	115
M1/U/H/C	126
M1/U/H/CC	98
M1/G/L/C	125
M1/G/L/CC	111
M1/G/H/C	108
M1/G/H/CC	98

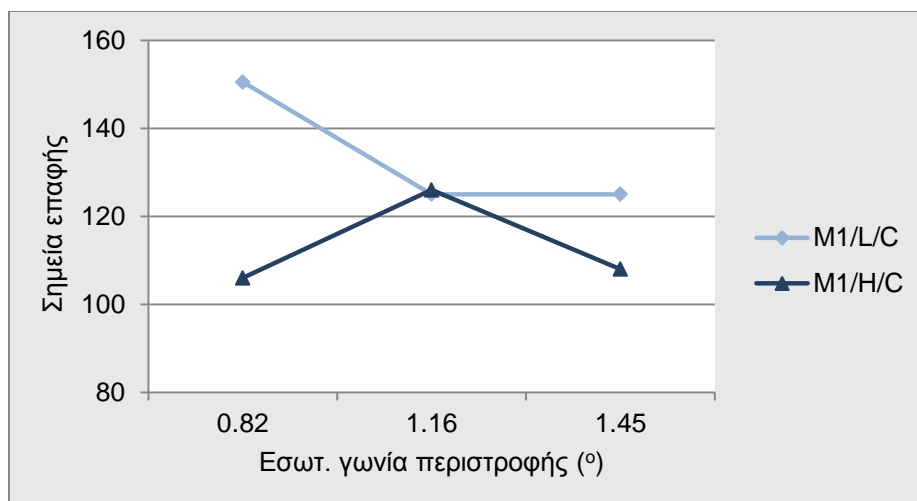
Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M1 μετά τον υπολογισμό των σημείων επαφής, όπου φαίνονται γραφικά τα αδρανή τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Μέσω των εικόνων αυτών μπορούμε να παρατηρήσουμε ποιοτικά τη διακύμανση του αριθμού των σημείων επαφής ανά δοκίμιο. Να σημειωθεί ότι έχει επιλεγεί η αντιπροσωπευτικότερη εικόνα εκ των δύο που αναλύθηκαν για κάθε δοκίμιο.



Σχήμα 6.1 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M1)

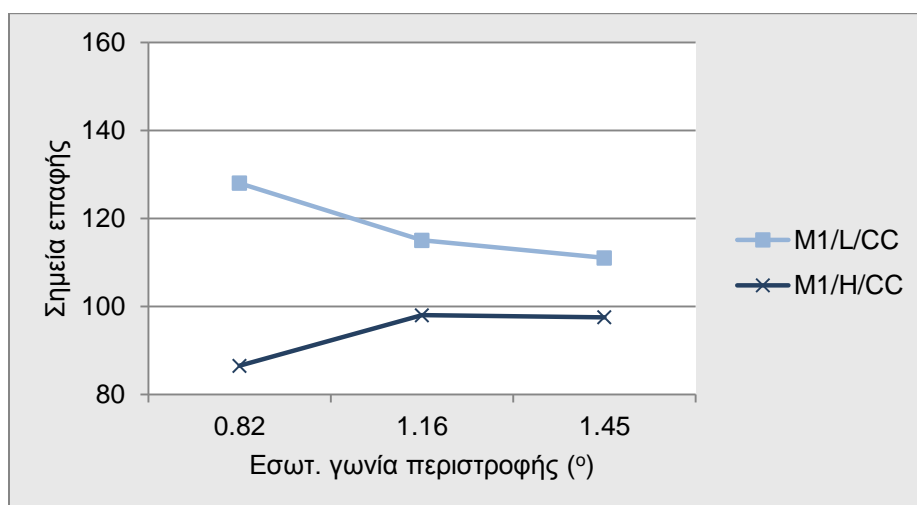
6.1.2.1.1 Γωνία περιστροφής

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.2 δίνεται η επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 100 mm. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C, με αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16°, τα σημεία επαφής μειώνονται κατά 17%, ενώ με περαιτέρω αύξηση της γωνίας σε 1.45° παραμένουν σταθερά. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, η αύξηση της γωνίας αρχικά αυξάνει τα σημεία επαφής κατά 19%, ενώ με επιπλέον αύξηση της γωνίας παρατηρείται μείωση κατά 14%.



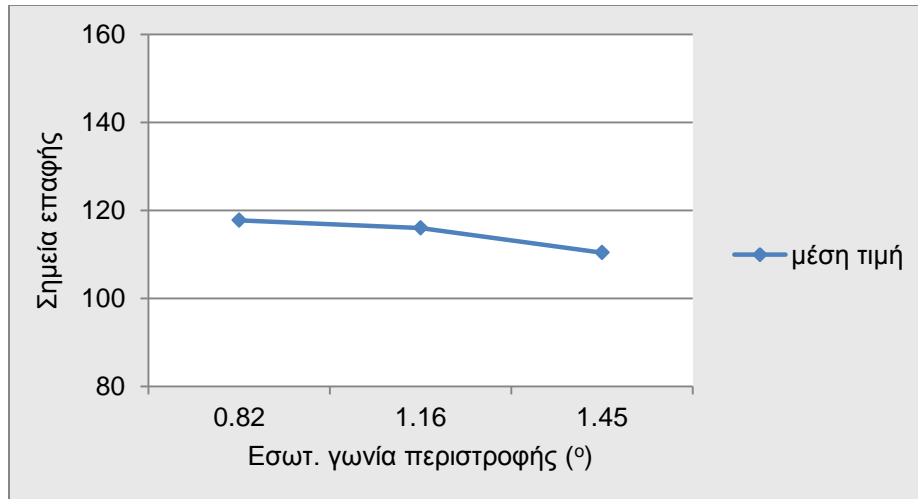
Σχήμα 6.2 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135 °C, τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία δοκιμίων μεγαλύτερης διαμέτρου, αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και στη συνέχεια σε 1.45° μειώνει τα σημεία επαφής κατά 10% και 3%, αντίστοιχα. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, η αύξηση της γωνίας σε 1.16° προκαλεί αύξηση των επαφών κατά 13%, ενώ η αύξηση σε 1.45° δεν προκαλεί κάποια μεταβολή (σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Παρατηρείται τάση μείωσης των σημείων επαφής με αύξηση της γωνίας περιστροφής στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C και διαφορετικών αρχικών διαμέτρων, ενώ για τα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C και διαφορετικών αρχικών διαμέτρων, παρατηρήθηκε αρχικά αύξηση και έπειτα μείωση των επαφών.



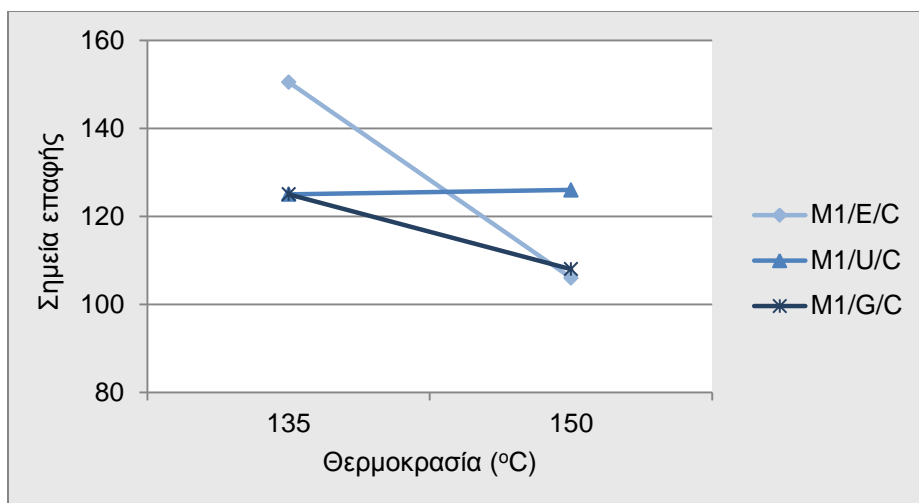
Σχήμα 6.4 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.4 εξετάζεται η μέση επιρροή της γωνίας περιστροφής, ως ο μέσος όρος των σημείων επαφής για όλα τα δοκίμια που αντιστοιχούν στην ίδια γωνία. Για αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και από 1.16° σε 1.45°, παρατηρούμε μικρή μείωση κατά 1% και περαιτέρω μείωση της τάξης του 5%, αντίστοιχα.

6.1.2.1.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

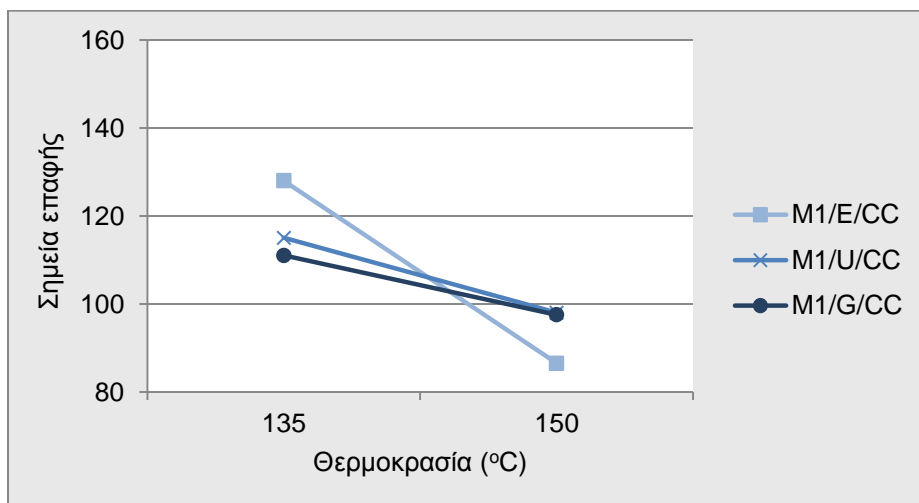
Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης από 135°C σε 150°C, στα σημεία επαφής των δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 100 mm.

Με αύξηση της θερμοκρασίας, τα δοκίμια συμπυκνωμένα με γωνία περιστροφής 0.82° και 1.45° παρουσίασαν μείωση 30% και 14% στα σημεία επαφής, αντίστοιχα, ενώ στα δοκίμια γωνίας 1.16°, τα σημεία επαφής πρακτικά παρέμειναν σταθερά.

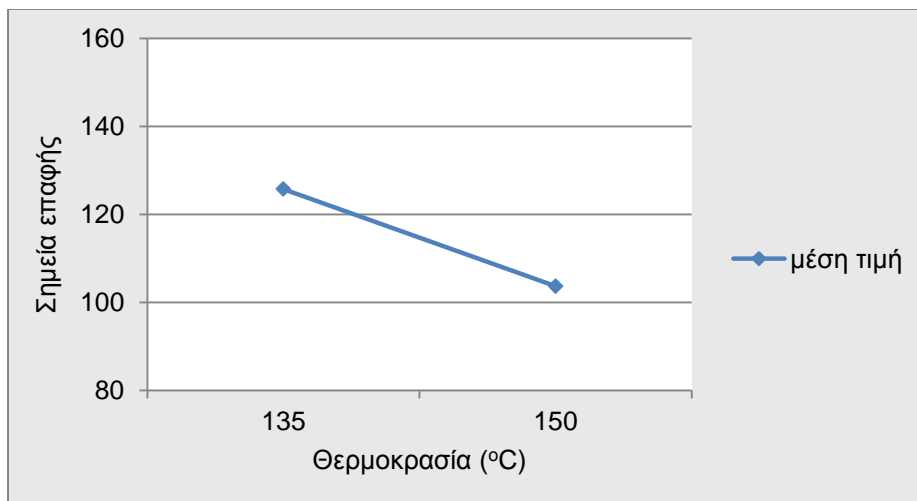


Σχήμα 6.5 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Ομοίως, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6, στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm γωνιών περιστροφής 0.82°, 1.16° και 1.45°, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε μείωση των επαφών, κατά 32%, 15% και 12%, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.6 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

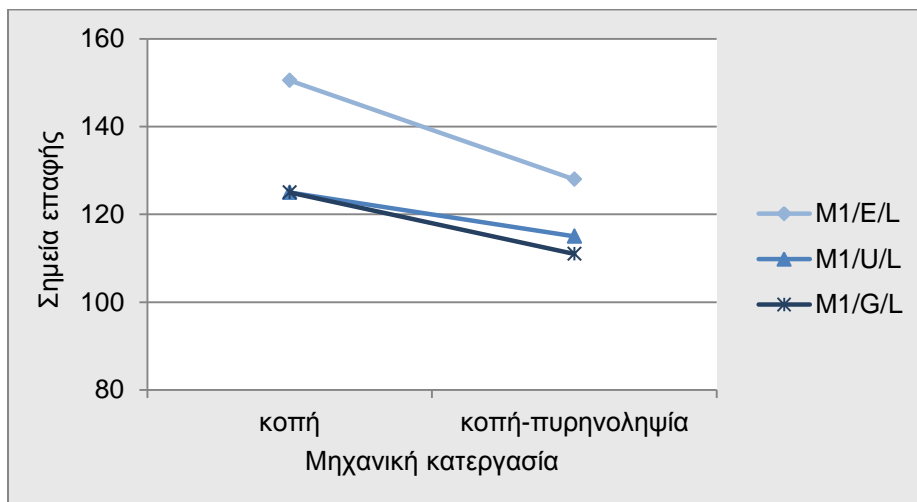


Σχήμα 6.7 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διαπιστώνεται γενική τάση μείωσης των σημείων επαφής με αύξηση της θερμοκρασίας από 135°C σε 150°C, της τάξης του 18% κατά μέσο όρο (σχήμα 6.7).

6.1.2.1.3 Μηχανική κατεργασία

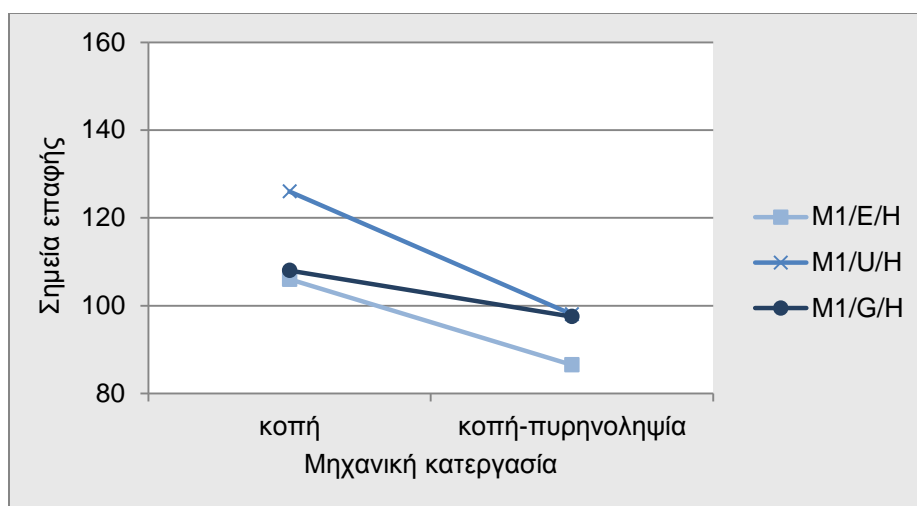
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση της λήψης πυρήνα διαμέτρου 100 mm από δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, μέσω της σύγκρισης με το αντίστοιχο δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, το οποίο δεν έχει υποστεί πυρηνοληψία.



Σχήμα 6.8 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 135°C)

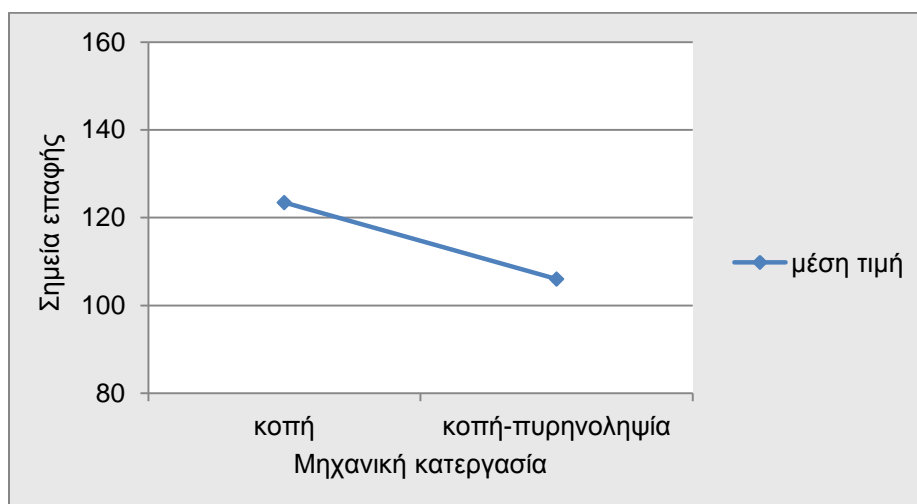
Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 135°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45°, εμφάνισαν μειωμένα σημεία επαφής κατά 15%, 8% και

11%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.9 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 150°C)

Ομοίως στα δοκίμια συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 150°C, και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45° παρατηρήθηκε μείωση των σημείων επαφής κατά 18%, 22% και 10%, αντίστοιχα (σχήμα 6.9), οδηγώντας σε συνολική μέση μείωση των σημείων επαφής λόγω πυρηνοληψίας κατά 14% (σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M1)

Συμπεραίνουμε με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, ότι για δοκίμια ίδιας διαμέτρου υπάρχει τάση μείωσης των σημείων επαφής για εκείνα τα οποία έχουν προκύψει μέσω πυρηνοληψίας από δοκίμια μεγαλύτερης διαμέτρου.

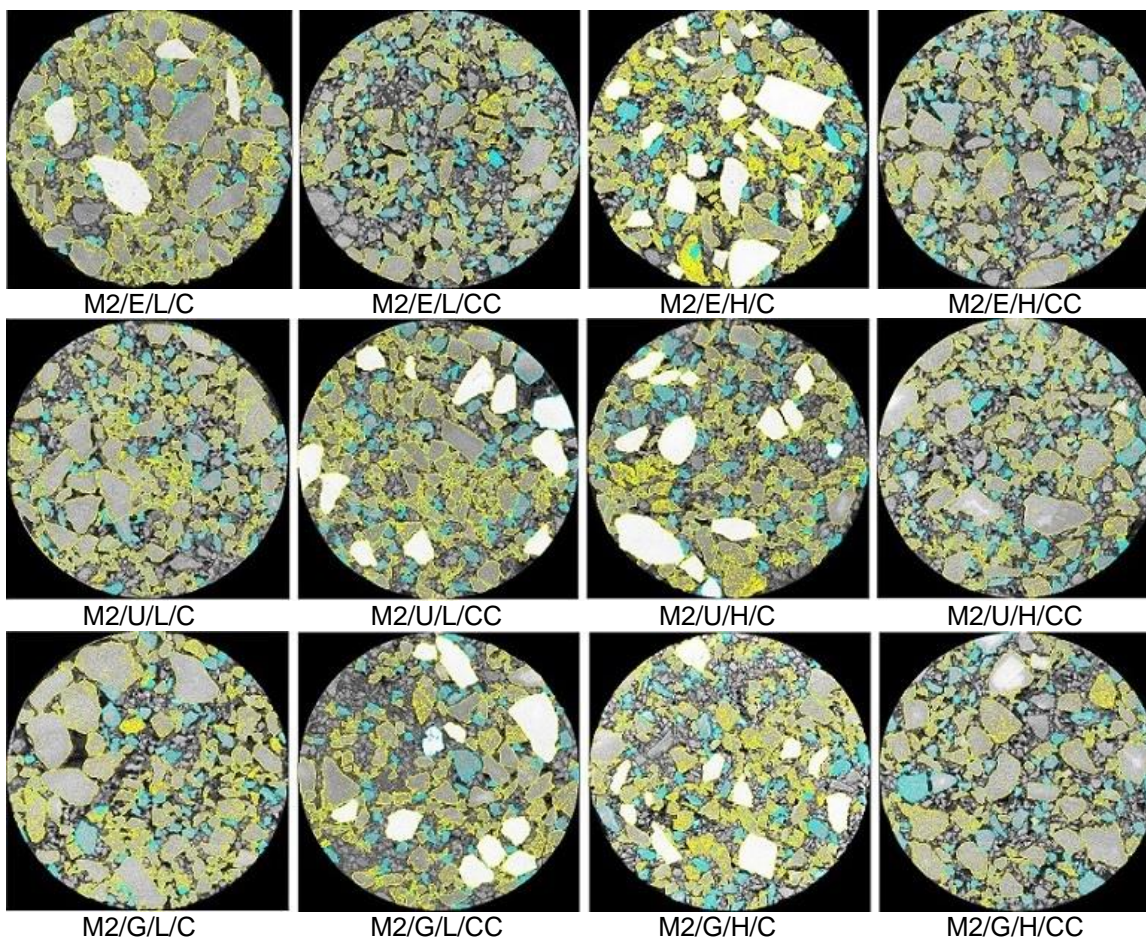
6.1.2.2 Ασφαλτόμιγμα M2

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.5 Σημεία επαφής (δοκίμια M2)

Κωδικός δοκιμίου	Σημεία επαφής
M2/E/L/C	281
M2/E/L/CC	226
M2/E/H/C	266
M2/E/H/CC	208
M2/U/L/C	246
M2/U/L/CC	231
M2/U/H/C	214
M2/U/H/CC	212
M2/G/L/C	216
M2/G/L/CC	194
M2/G/H/C	226
M2/G/H/CC	182

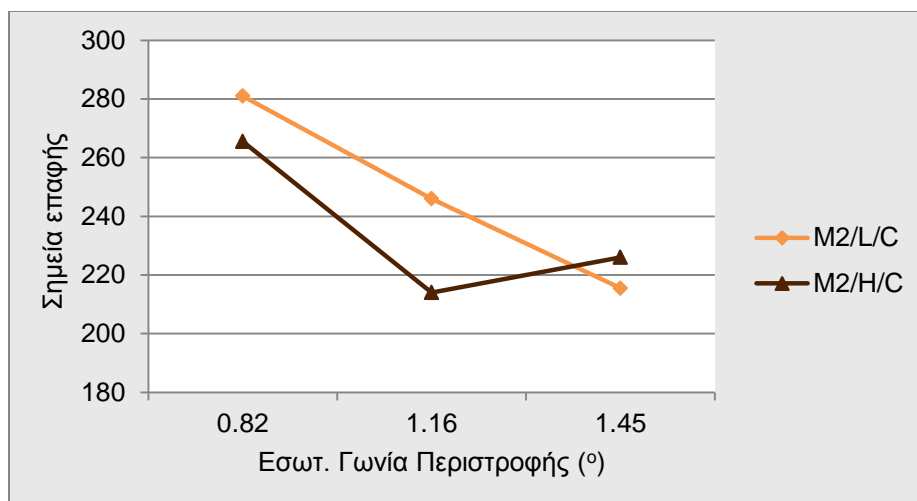
Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M2 μετά τον υπολογισμό των σημείων επαφής, όπου φαίνονται γραφικά τα αδρανή τα οποία βρίσκονται σε επαφή.



Σχήμα 6.11 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M2)

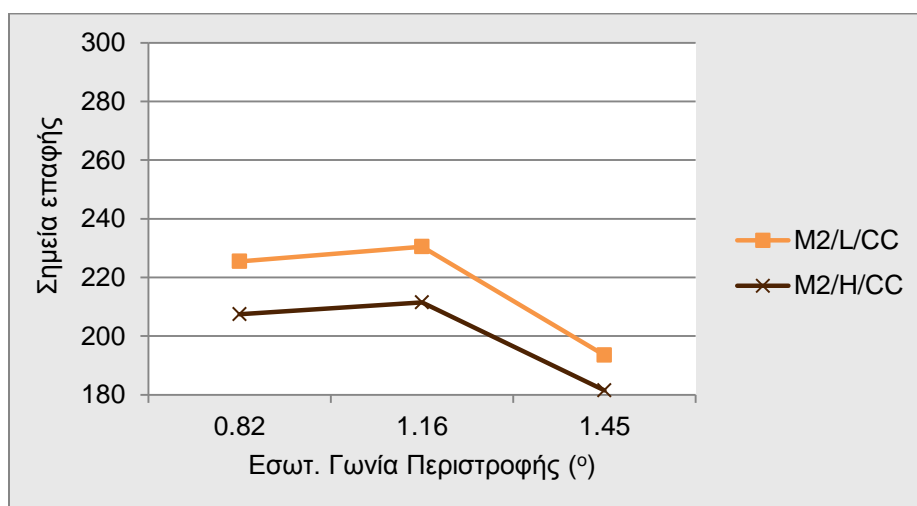
6.1.2.2.1 Γωνία περιστροφής

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.12 δίνεται η επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής των δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 100 mm. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C, με αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16°, τα σημεία επαφής μειώνονται κατά 12%, ενώ με περαιτέρω αύξηση της γωνίας σε 1.45°, μειώνονται επίσης κατά 12%. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C η αύξηση της γωνίας αρχικά μειώνει τα σημεία επαφής κατά 19%, ενώ αντιθέτως επιπλέον αύξηση της γωνίας προκαλεί αύξηση κατά 6%.



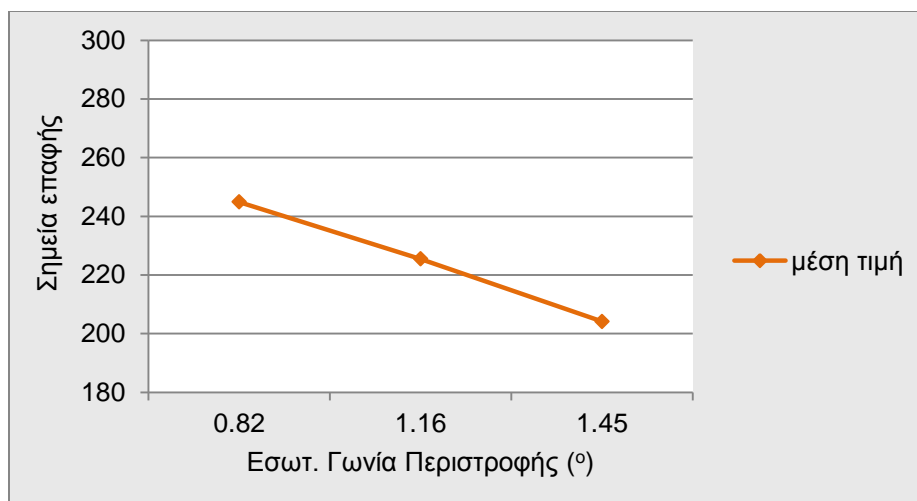
Σχήμα 6.12 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C, τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία δοκιμίων μεγαλύτερης διαμέτρου, η αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° προκαλεί αύξηση των επαφών κατά 2%, ενώ με αύξηση από 1.16° σε 1.45° παρατηρείται μείωση 16% στα σημεία επαφής. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και στη συνέχεια σε 1.45° αυξάνει τα σημεία επαφής κατά 2% και τα μειώνει κατά 14%, αντίστοιχα (σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm, με αύξηση της γωνίας περιστροφής παρατηρείται τάση αύξησης και κατόπιν μείωσης των σημείων επαφής, ενώ στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm δεν διαπιστώνεται κάποια σταθερή τάση.

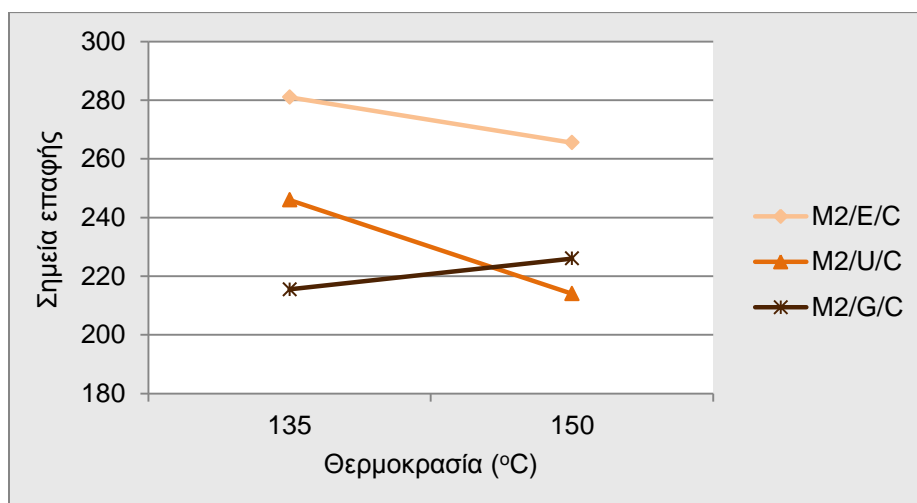


Σχήμα 6.14 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M2)

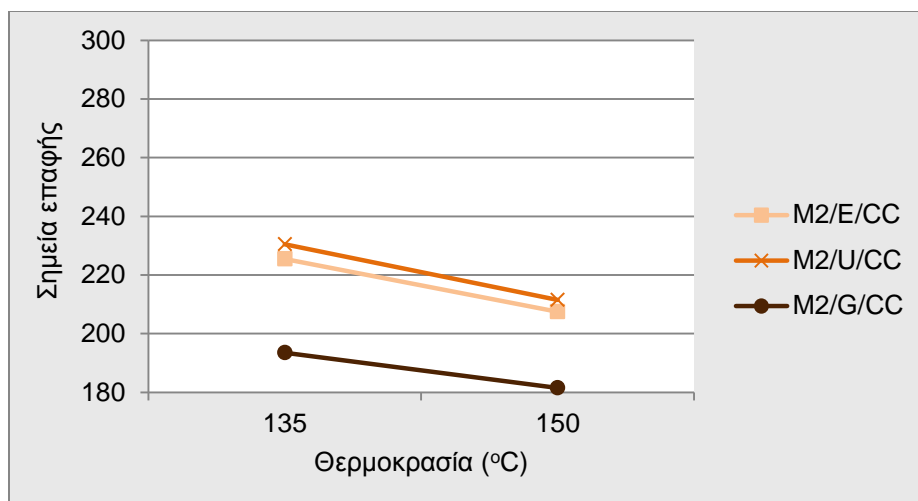
Στο διάγραμμα του σχήματος 6.14 εξετάζεται η μέση επιρροή της γωνίας περιστροφής. Για αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και από 1.16° σε 1.45°, παρατηρούμε αρχική μείωση των σημείων επαφής κατά 8% και έπειτα περαιτέρω μείωση 9%, αντίστοιχα.

6.1.2.2.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Στο σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης από 135°C σε 150°C, στα σημεία επαφής των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 100 mm. Τα δοκίμια συμπυκνωμένα με γωνία περιστροφής 0.82° και 1.16° παρουσίασαν μείωση 6% και 13%, αντίστοιχα. Αύξηση κατά 5% παρουσιάστηκε στα δοκίμια εσωτερικής γωνίας περιστροφής 1.45°.

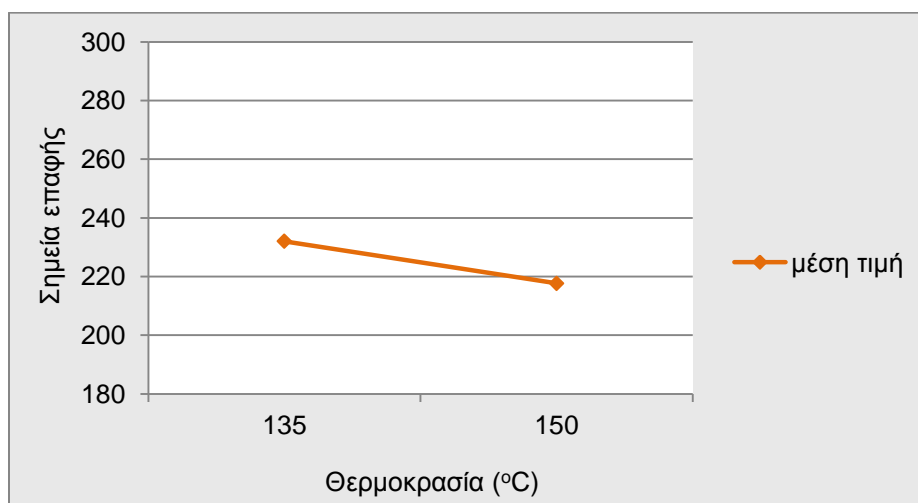


Σχήμα 6.15 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)



Σχήμα 6.16 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Ομοίως, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.16, στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm γωνιών περιστροφής 0.82°, 1.16° και 1.45°, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε μείωση των επαφών κατά 8%, 8% και 6%, αντίστοιχα.

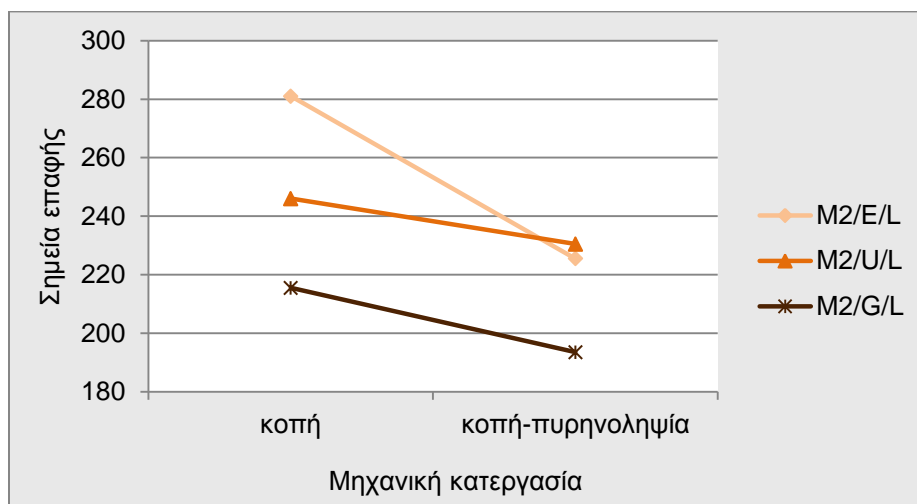


Σχήμα 6.17 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M2)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, με αύξηση της θερμοκρασίας από 135°C σε 150°C παρατηρείται τάση μείωσης των σημείων επαφής, της τάξης του 6% κατά μέσο όρο (σχήμα 6.17).

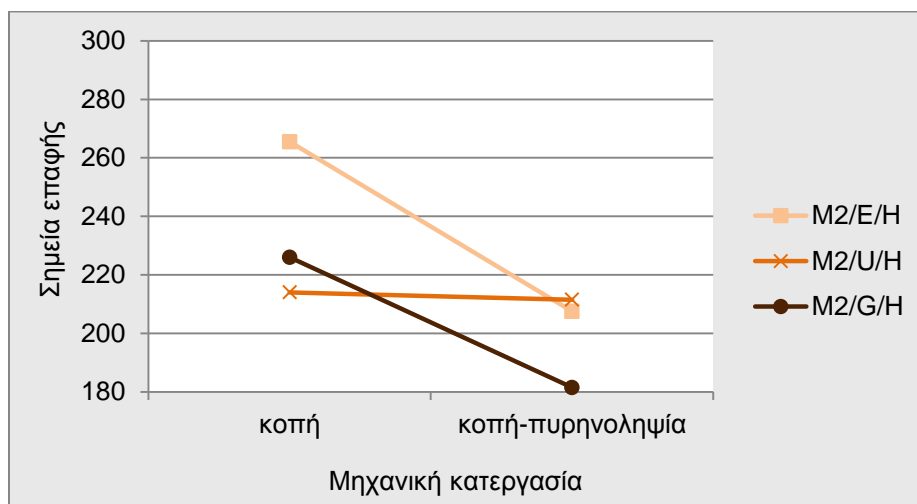
6.1.2.2.3 Μηχανική κατεργασία

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση της λήψης πυρήνα διαμέτρου 100 mm από δοκίμιο διαμέτρου 150 mm, μέσω της σύγκρισης με το αντίστοιχο δοκίμιο διαμέτρου 100 mm, το οποίο δεν έχει υποστεί πυρηνοληψία. Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 135°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45°, εμφάνισαν μειωμένα σημεία επαφής κατά 20%, 6% και 10%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.18).

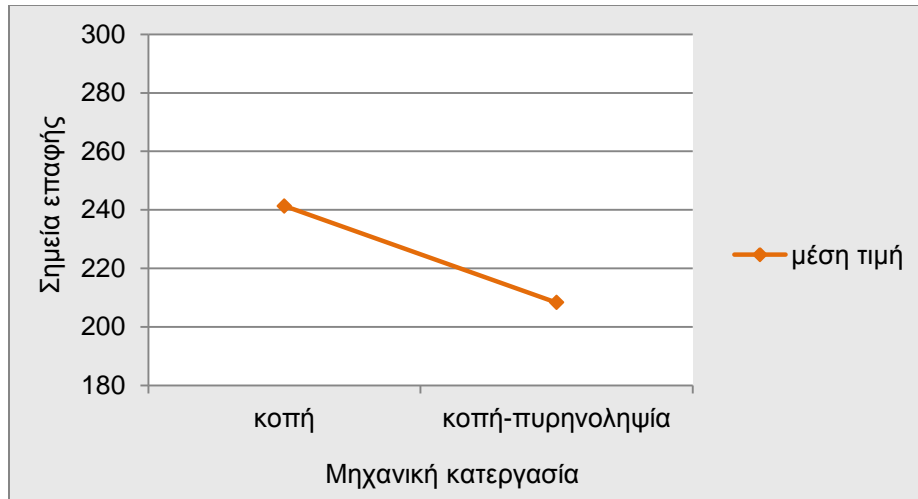


Σχήμα 6.18 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 135°C)

Ομοίως στα δοκίμια συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 150°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45° παρατηρήθηκε μείωση των σημείων επαφής κατά 22%, 1% και 20% αντίστοιχα (σχήμα 6.19), οδηγώντας σε συνολική μέση μείωση των σημείων επαφής λόγω πυρηνοληψίας κατά 14% (σχήμα 6.20).



Σχήμα 6.19 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 150°C)



Σχήμα 6.20 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M2)

Συμπεραίνουμε, με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, ότι στα δοκίμια μίγματος M2 ίδιας διαμέτρου υπάρχει τάση μείωσης των σημείων επαφής για εκείνα τα οποία έχουν προκύψει μέσω πυρηνοληψίας, τάση όμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε στο ασφαλτόμιγμα M1.

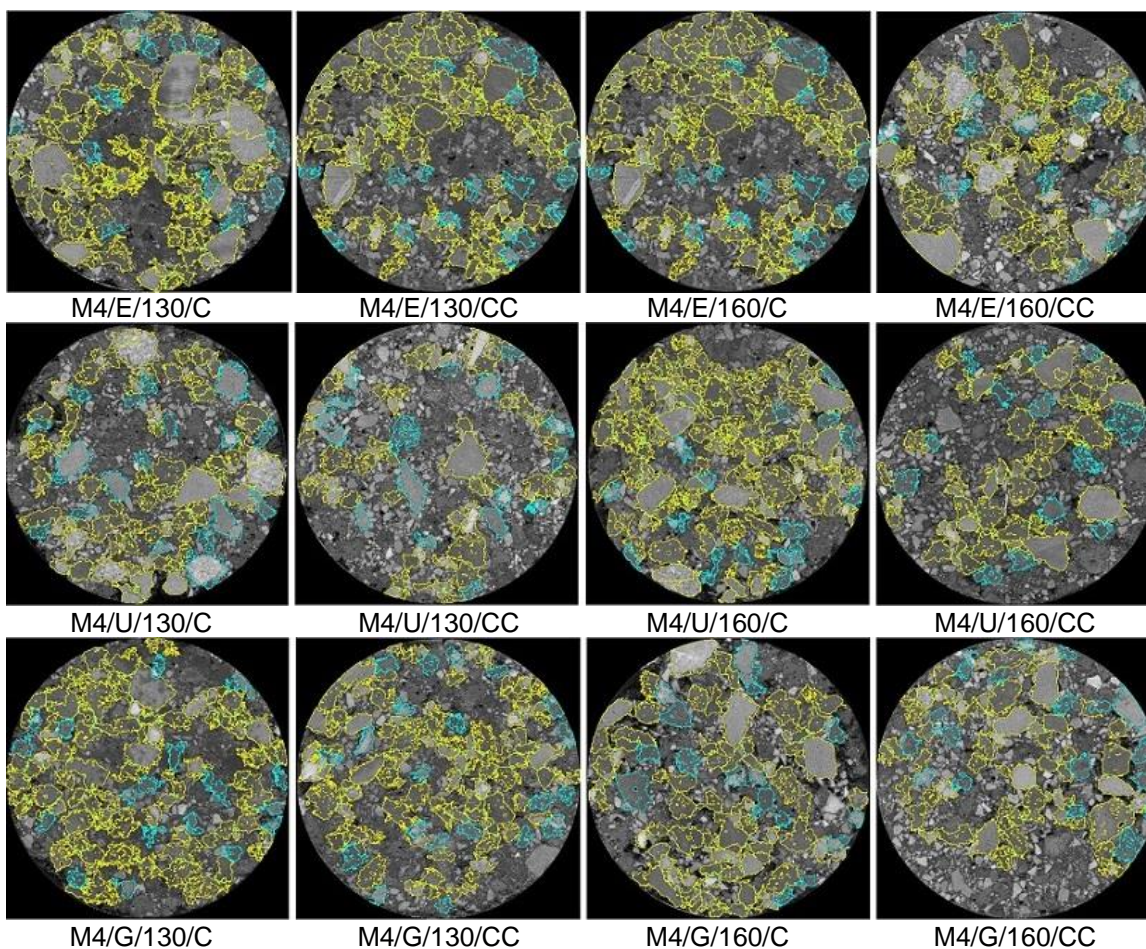
6.1.2.3 Ασφαλτόμιγμα M4

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M4 δίνονται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6 Σημεία επαφής (δοκίμια M4)

Κωδικός δοκιμίου	Σημεία επαφής
M4/E/130/C	95
M4/E/130/CC	88
M4/E/160/C	105
M4/E/160/CC	78
M4/U/130/C	90
M4/U/130/CC	60
M4/U/160/C	107
M4/U/160/CC	57
M4/G/130/C	98
M4/G/130/CC	94
M4/G/160/C	79
M4/G/160/CC	78

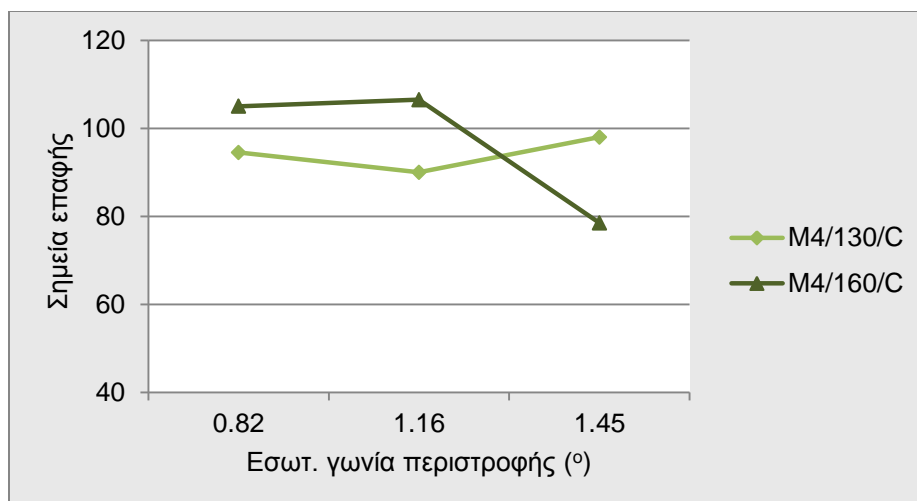
Στο σχήμα 6.21 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M4 μετά τον υπολογισμό των σημείων επαφής, όπου φαίνονται γραφικά τα αδρανή τα οποία βρίσκονται σε επαφή.



Σχήμα 6.21 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (δοκίμια M4)

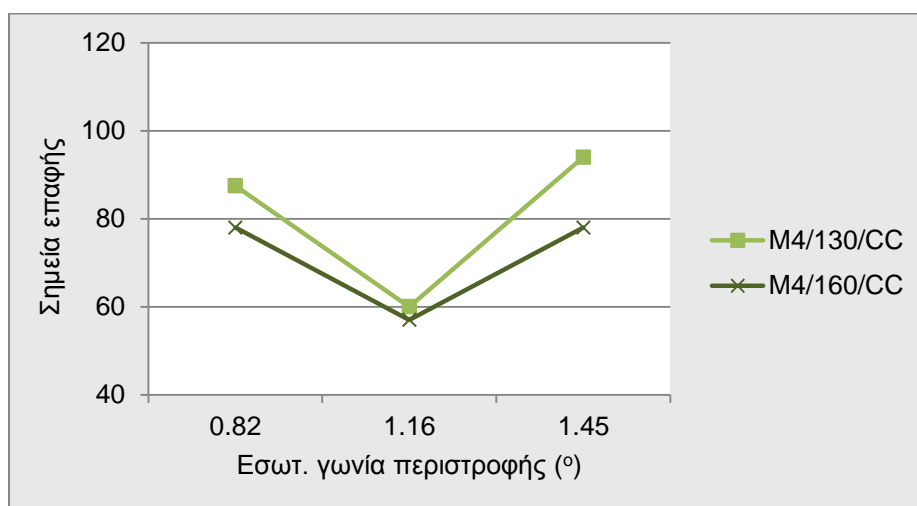
6.1.2.3.1 Γωνία περιστροφής

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.22 δίνεται η επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής των δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 100 mm. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 130°C, με αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16°, τα σημεία επαφής μειώνονται κατά 5%, ενώ με περαιτέρω αύξηση της γωνίας σε 1.45° αυξάνονται κατά 9%. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 160°C με αύξηση της γωνίας, τα σημεία επαφής αρχικά παραμένουν πρακτικά σταθερά (αύξηση 1%), ενώ με επιπλέον αύξηση της γωνίας προκαλείται μείωση κατά 26%.



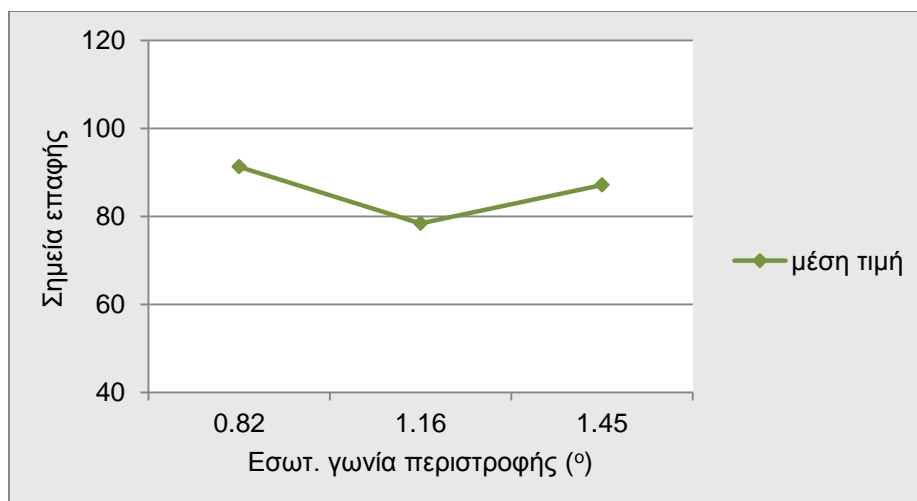
Σχήμα 6.22 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 130 °C, τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία δοκιμίων μεγαλύτερης διαμέτρου, η αύξηση της γωνίας σε 1.16° προκαλεί μείωση των επαφών κατά 31%, ενώ με αύξηση σε 1.45° παρατηρείται μεγάλη αύξηση κατά 57%. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 160°C, αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και στη συνέχεια σε 1.45°, μειώνει τα σημεία επαφής κατά 27% και τα αυξάνει κατά 37%, αντίστοιχα (σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.23 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Εξετάζοντας τα ανωτέρω στοιχεία διαπιστώνεται τάση μείωσης και κατόπιν αύξησης των σημείων επαφής με αύξηση της γωνίας περιστροφής στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm, ενώ στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm δεν διαπιστώνεται σταθερή τάση.

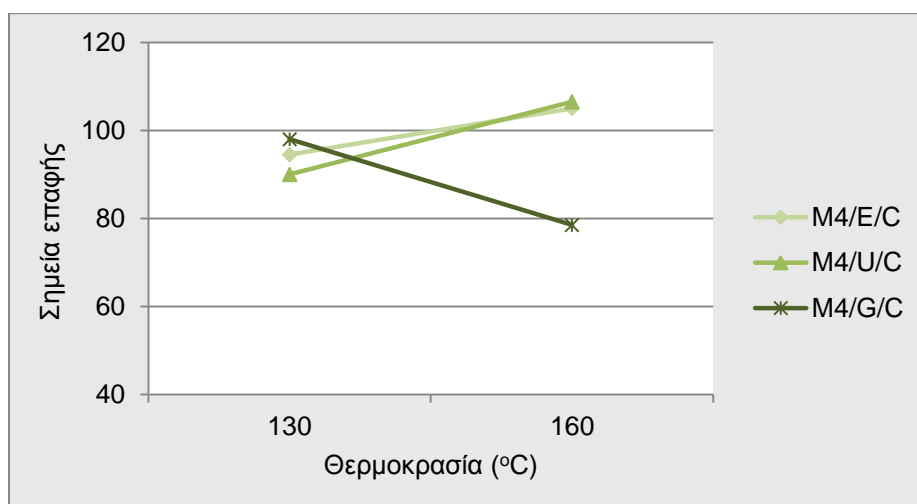


Σχήμα 6.24 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στα σημεία επαφής (δοκίμια M4)

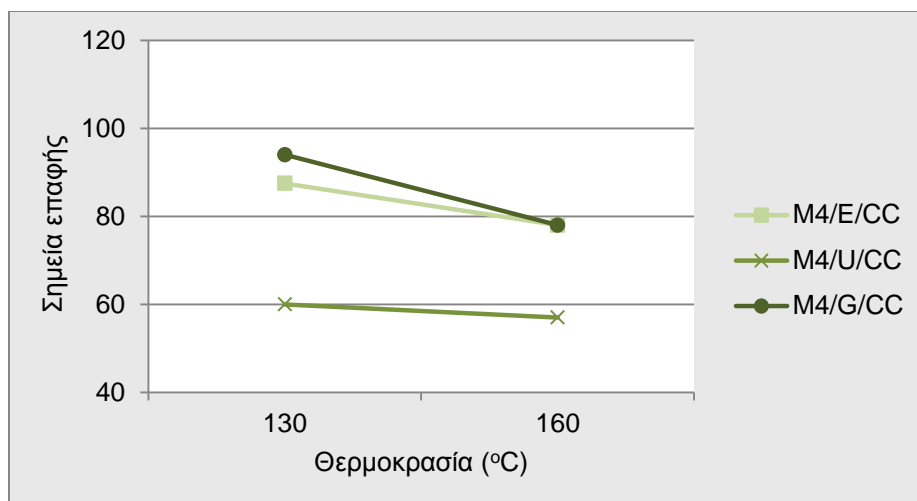
Στο διάγραμμα του σχήματος 6.24 εξετάζεται η μέση επιρροή της γωνίας περιστροφής. Για αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και από 1.16° σε 1.45°, παρατηρούμε αρχική μείωση κατά 14% κι έπειτα αύξηση της τάξης του 11%, αντίστοιχα.

6.1.2.3.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Στο σχήμα 6.25 παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης από 130°C σε 160°C, στα σημεία επαφής των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 100 mm. Τα δοκίμια συμπυκνωμένα με γωνίες περιστροφής 0.82° και 1.16°, παρουσίασαν αύξηση 11% και 18% στα σημεία επαφής, ενώ μείωση κατά 20% παρουσίασαν τα σημεία επαφής στα δοκίμια γωνίας περιστροφής 1.45°.

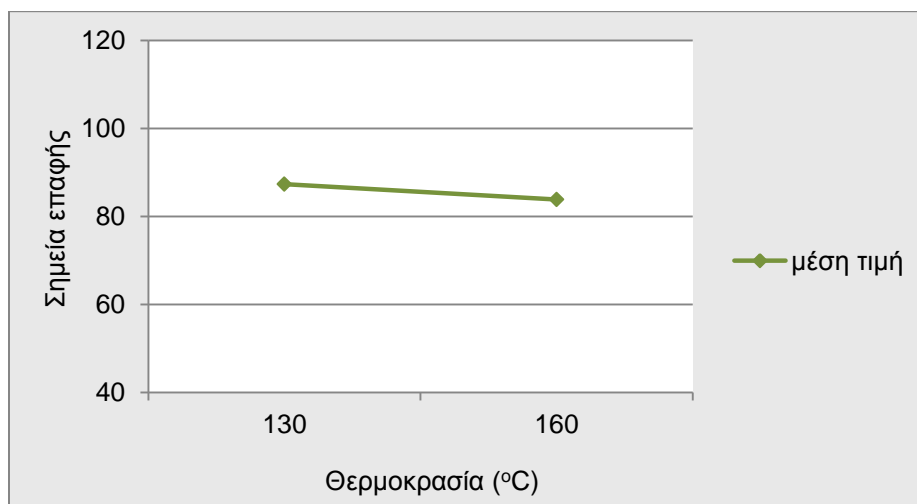


Σχήμα 6.25 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)



Σχήμα 6.26 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.26, στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm και γωνιών περιστροφής 0.82°, 1.16° και 1.45° παρατηρήθηκε μείωση των επαφών κατά 11%, 5% και 17%, αντίστοιχα, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.

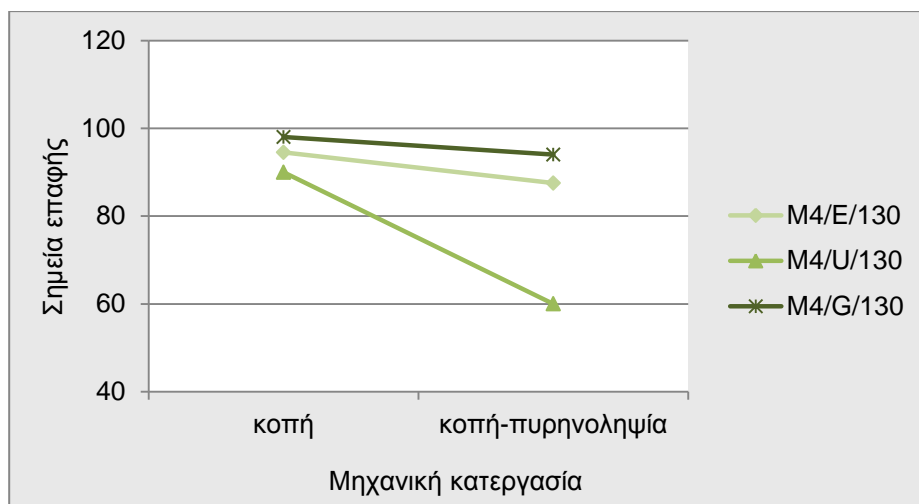


Σχήμα 6.27 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα σημεία επαφής (δοκίμια M4)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μείωση, κατά κύριο λόγο, στα σημεία επαφής των αδρανών, ιδιαίτερα στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm. Βέβαια, η τάση αυτή δεν είναι τόσο έντονη κάτι που εκφράζεται από την μικρή μέση μείωση των σημείων επαφής κατά 4% (σχήμα 6.27).

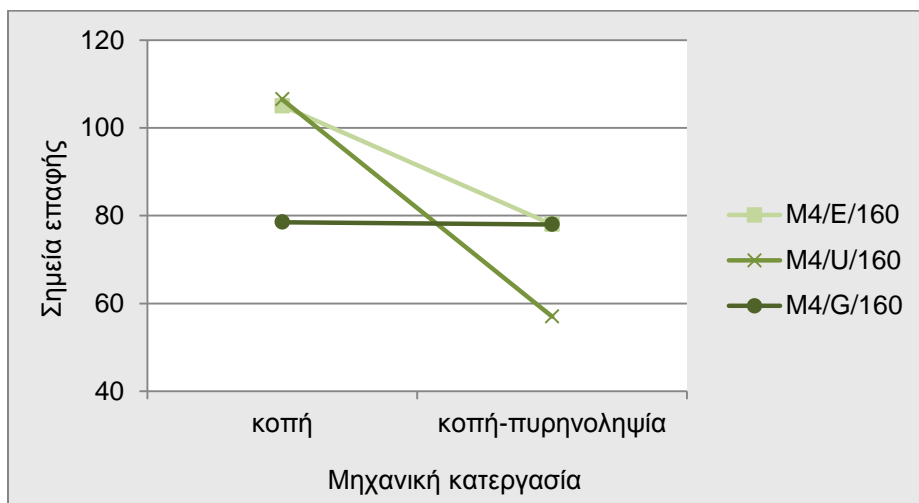
6.1.2.3.3 Μηχανική κατεργασία

Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 130°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45°, εμφάνισαν μειωμένα σημεία επαφής κατά 7%, 33% και 4%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.28).



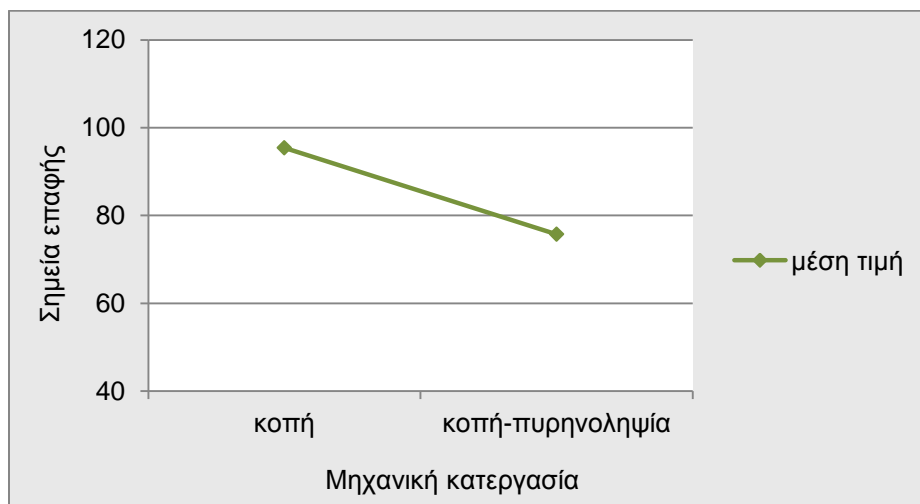
Σχήμα 6.28 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 135°C)

Ομοίως στα δοκίμια συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 150°C και γωνίες 0.82°, 1.16°, παρατηρήθηκε μείωση των σημείων επαφής κατά 26%, 46%, αντίστοιχα, ενώ στη γωνία περιστροφής 1.45° δεν παρατηρήθηκε μεταβολή λόγω πυρηνοληψίας (σχήμα 6.29).



Σχήμα 6.29 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 150°C)

Η επιρροή της μηχανικής κατεργασίας επέφερε συνολική μέση μείωση των σημείων επαφής κατά 21% (σχήμα 6.30).



Σχήμα 6.30 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στα σημεία επαφής (δοκίμια M4)

Συμπεραίνουμε με βάση τα ανωτέρω στοιχεία ότι στα δοκίμια μίγματος M4 ίδιας διαμέτρου, υπάρχει μείωση των σημείων επαφής για εκείνα τα οποία έχουν προκύψει μέσω πυρηνοληψίας. Υπενθυμίζεται ότι το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στα άλλα δύο μίγματα που εξετάστηκαν, γεγονός που υποδηλώνει την έντονη ανομοιογένεια που προκαλείται λόγω συμπύκνωσης στο εσωτερικό του μίγματος.

6.1.2.4 Στατιστική Ανάλυση

Εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, της θερμοκρασίας, της μηχ. κατεργασίας, καθώς και των συνδυασμών τους ανά δύο, στα αποτελέσματα του αριθμού των σημείων επαφής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το γενικό γραμμικό μοντέλο (*general linear model - GLM*):

$$\text{Αριθμός σημείων επαφής} = f(\text{γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία,} \\ \text{γωνία περιστροφής} \times \text{θερμοκρασία,} \\ \text{θερμοκρασία} \times \text{μηχ. κατεργασία,} \\ \text{γωνία περιστροφής} \times \text{μηχ. κατεργασία})$$

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κάθε ασφαλτόμιγμα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, όπου οι στατιστικά σημαντικές παράμετροι (για τιμές p μικρότερες του 0.05) έχουν σημειωθεί με αστερίσκο.

Πίνακας 6.7 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	161453.333 ^a	10	16145.333	400.298	.002
Γωνία περιστροφής	120.667	2	60.333	1.496	.401
Θερμοκρασία*	1452.000	1	1452.000	36.000	.027
Μηχανική κατεργασία *	901.333	1	901.333	22.347	.042
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	686.000	2	343.000	8.504	.105
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	8.333	1	8.333	.207	.694
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	44.667	2	22.333	.554	.644
Σφάλμα	80.667	2	40.333		
Σύνολο	161534.000	12			

a. $R^2 = 1.000$ (Adjusted $R^2 = .997$)

* Στατιστικά σημαντική παράμετρος

Πίνακας 6.8 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	617012.500 ^a	10	61701.250	803.925	.001
Γωνία περιστροφής*	3323.167	2	1661.583	21.649	.044
Θερμοκρασία	616.333	1	616.333	8.030	.105
Μηχανική κατεργασία *	3201.333	1	3201.333	41.711	.023
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	307.167	2	153.583	2.001	.333
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	12.000	1	12.000	.156	.731
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	1152.167	2	576.083	7.506	.118
Σφάλμα	153.500	2	76.750		
Σύνολο	617166.000	12			

a. $R^2 = 1.000$ (Adjusted $R^2 = .999$)

* Στατιστικά σημαντικό

Πίνακας 6.9 Ανάλυση διακύμανσης των σημείων επαφής (δοκίμια M4)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	90952.833 ^a	10	9095.283	206.320	.005
Γωνία περιστροφής	351.500	2	175.750	3.987	.201
Θερμοκρασία	36.750	1	36.750	.834	.458
Μηχανική κατεργασία *	1180.083	1	1180.083	26.769	.035
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	318.500	2	159.250	3.612	.217
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	114.083	1	114.083	2.588	.249
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	715.167	2	357.583	8.112	.110
Σφάλμα	88.167	2	44.083		
Σύνολο	91041.000	12			

a. $R^2 = .999$ (Adjusted $R^2 = .994$)

* Στατιστικά σημαντικό

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά στο ασφαλτόμιγμα M1, η θερμοκρασία και η μηχανική κατεργασία επηρεάζουν σημαντικά τα σημεία επαφής, ενώ στο ασφαλτόμιγμα M2, στατιστικά σημαντικές παράμετροι είναι η εσωτερική γωνία περιστροφής και η μηχανική κατεργασία. Στο ασφαλτόμιγμα M4 μόνο η μηχανική κατεργασία επέφερε στατιστικά σημαντικές μεταβολές στα σημεία επαφής.

Συμπεραίνοντας, η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι η μεταβολή των παραμέτρων κατά τη συμπύκνωση έχει ως αποτέλεσμα σημαντική διαφοροποίηση των σημείων επαφής. Η μηχανική κατεργασία αποδείχτηκε στατιστικά σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα σημεία επαφής σε κάθε ασφαλτόμιγμα, υποδηλώνοντας την έντονη ανομοιογένεια που προκαλείται στα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου συμπυκνωμένα με διαφορετική διάμετρο. Σχετικά με τις άλλες δύο παραμέτρους, η επιρροή της θερμοκρασίας αποδείχτηκε σημαντική στο μίγμα M1, ενώ η γωνία περιστροφής σημαντική στο μίγμα M2.

6.1.3 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός των αδρανών υπολογίστηκε και ποσοτικοποιήθηκε με τη μέθοδο που αναλύθηκε στο εδάφιο 5.3.2.

Με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και της μηχανικής κατεργασίας στην προσανατολισμό των αδρανών, δημιουργήθηκαν τα σχετικά διαγράμματα.

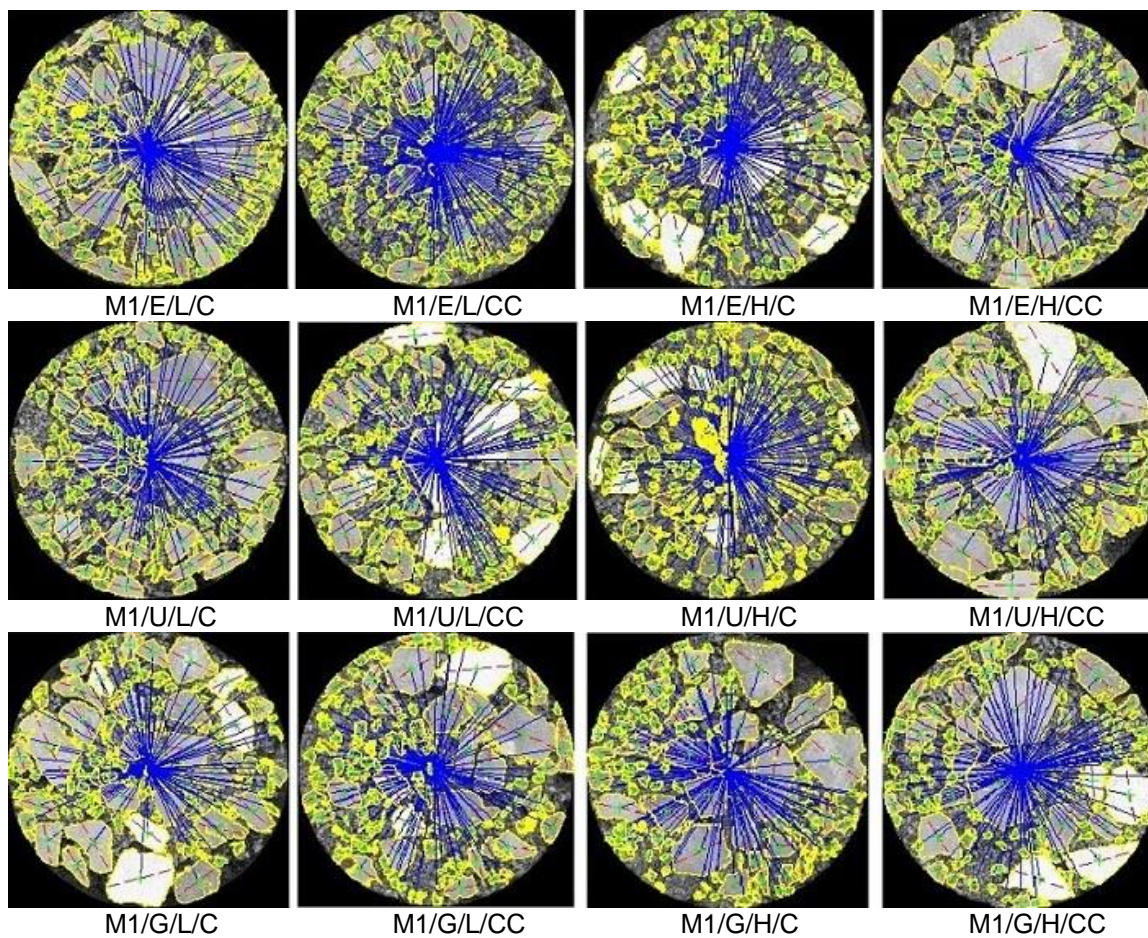
6.1.3.1 Ασφαλτόμιγμα M1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.10 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M1)

Κωδικός δοκιμίου	δ	A
M1/E/L/C	109	3.6
M1/E/L/CC	119	5.3
M1/E/H/C	105	2.4
M1/E/H/CC	109	5.6
M1/U/L/C	69	4.2
M1/U/L/CC	96	3.8
M1/U/H/C	79	4.6
M1/U/H/CC	87	7.5
M1/G/L/C	49	5.3
M1/G/L/CC	89	5.5
M1/G/H/C	65	3.7
M1/G/H/CC	86	7.1

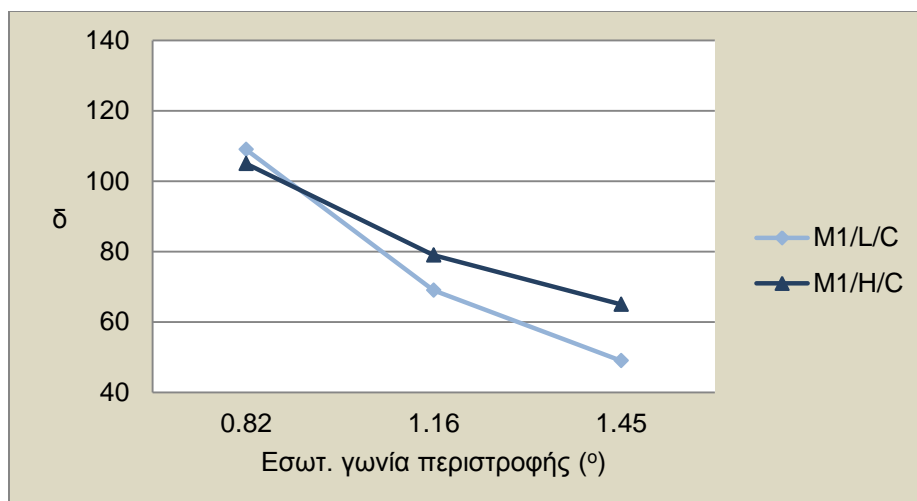
Στο σχήμα 6.31 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M1 μετά τον υπολογισμό του προσανατολισμού των αδρανών. Έχουν τονιστεί τα περιγράμματα και ο μεγάλος άξονας των αδρανών, καθώς και η ακτίνα που συνδέει το κεντροειδές κάθε αδρανούς με το κέντρο της κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.31 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M1)

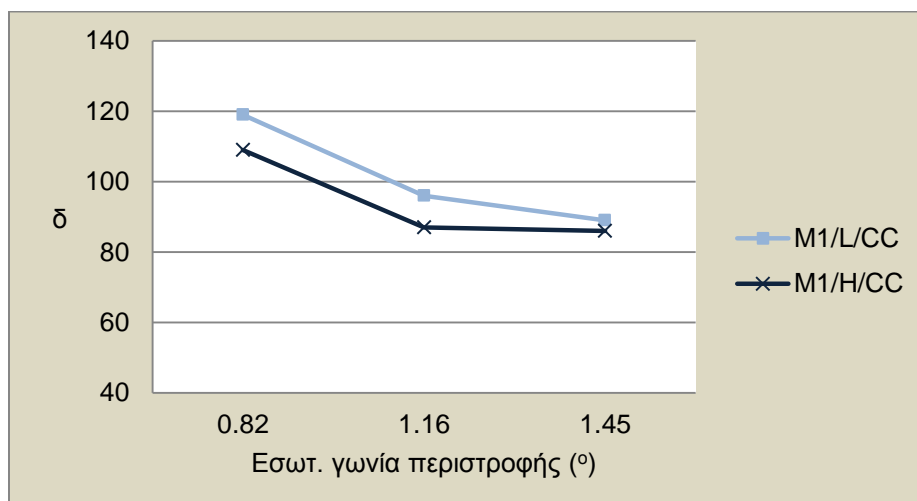
6.1.3.1.1 Γωνία περιστροφής

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.32 δίνεται η επίδραση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στη γωνία προσανατολισμού των αδρανών των δοκιμίων M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C, με αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16°, η γωνία προσανατολισμού μειώνεται κατά 37%, ενώ με περαιτέρω αύξηση της γωνίας περιστροφής σε 1.45°, η γωνία προσανατολισμού μειώνεται επιπλέον κατά 29%. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, η αύξηση της γωνίας σε 1.16° κι έπειτα σε 1.45° επιφέρει διαδοχικές μειώσεις στη γωνία προσανατολισμού κατά 25% και 18%, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.32 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

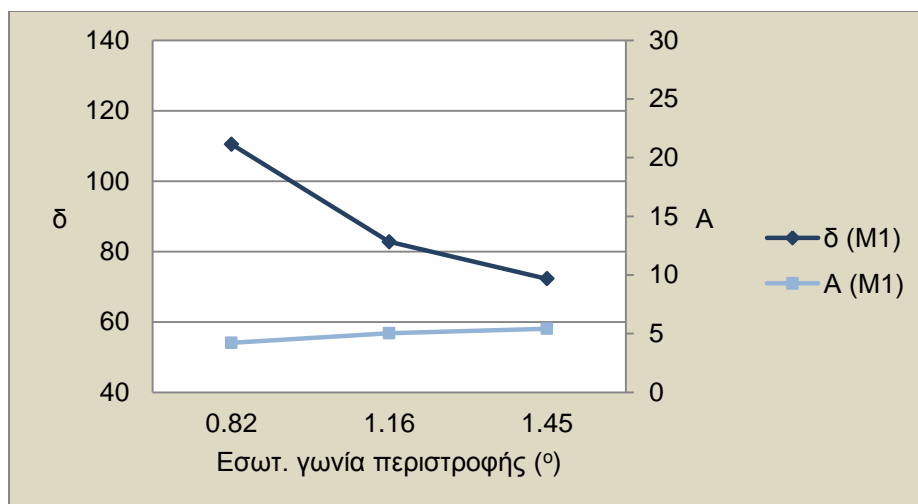
Όπως διαπιστώνεται στο σχήμα 6.33, στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία, αύξηση της γωνίας από 0.82° σε 1.16° και στη συνέχεια σε 1.45° μειώνει τη γωνία προσανατολισμού κατά 19% και 7%, αντίστοιχα. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, η αύξηση της γωνίας σε 1.16° επιφέρει μείωση 20%, ενώ σε 1.45° δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή, με αμελητέα μείωση κατά 1%.



Σχήμα 6.33 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Προκύπτει ότι αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και μετά σε 1.45° προκαλεί αρχική μέση μείωση της γωνίας προσανατολισμού των αδρανών κατά 25% και στη συνέχεια μείωση κατά 13% (σχήμα 6.34). Επίσης, οι τιμές της παραμέτρου A

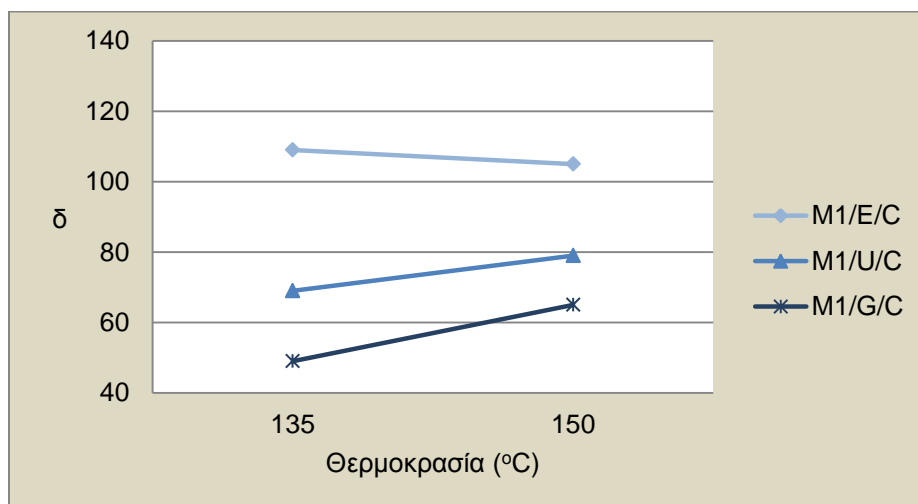
δείχνουν ότι στις γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45° υπάρχει εντονότερη τάση προσανατολισμού των αδρανών προς την αντίστοιχη γωνία προσανατολισμού.



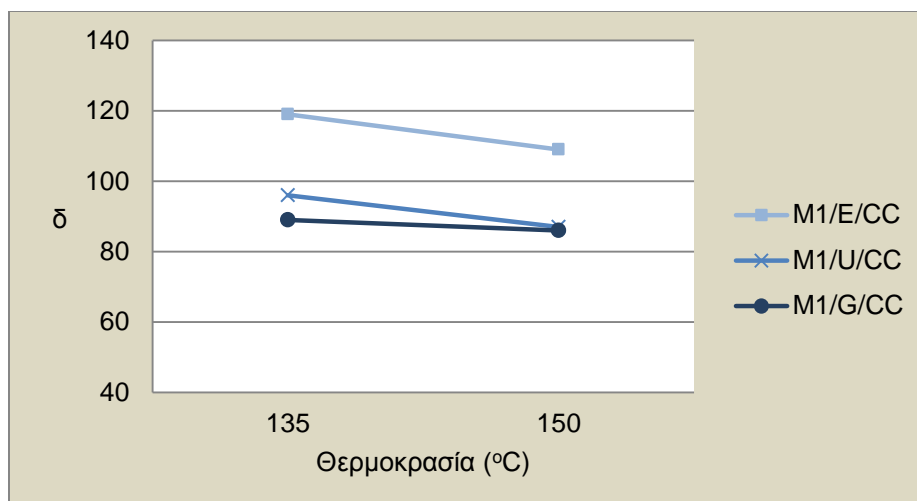
Σχήμα 6.34 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M1)

6.1.3.1.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Στα διαγράμματα που ακολουθούν εξετάζεται η μεταβολή της γωνίας προσανατολισμού των αδρανών, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Τα δοκίμια συμπυκνωμένα με γωνία περιστροφής 0.82° , τα οποία δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία, παρουσίασαν μείωση 4% στη γωνία προσανατολισμού κατά την αύξηση της θερμοκρασίας από 135°C σε 150°C , ενώ στα αντίστοιχα δοκίμια γωνιών περιστροφής 1.16° και 1.45° η γωνίας προσανατολισμού αυξήθηκε κατά 14% και 33%, αντίστοιχα (σχήμα 6.35).



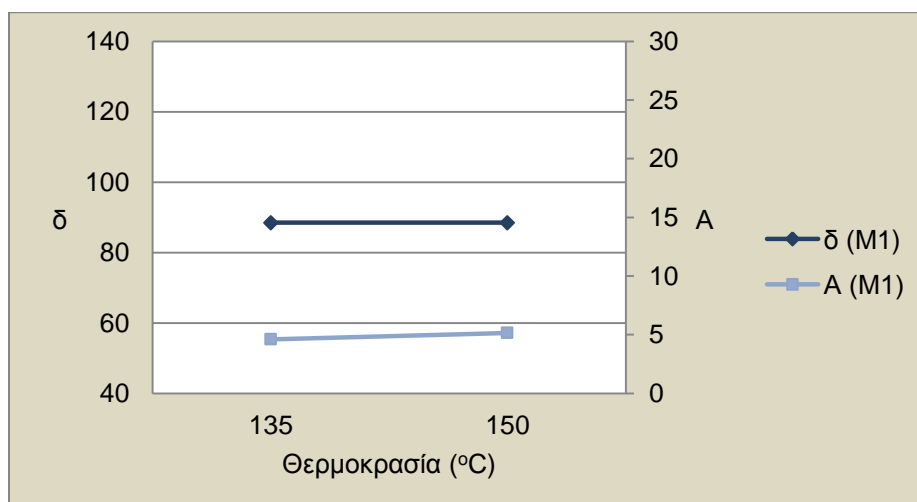
Σχήμα 6.35 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)



Σχήμα 6.36 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Στα δοκίμια που αντιστοιχούν στις γωνίες περιστροφής 0.82° , 1.16° και 1.45° , τα οποία προήλθαν από πυρηνοληψία, επήλθε μείωση 8%, 9% και 3%, αντίστοιχα (σχήμα 6.36).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, με την αύξηση της θερμοκρασίας στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm, παρατηρείται μείωση της γωνίας προσανατολισμού, ενώ στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm παρατηρείται κυρίως αύξηση της γωνίας προσανατολισμού.

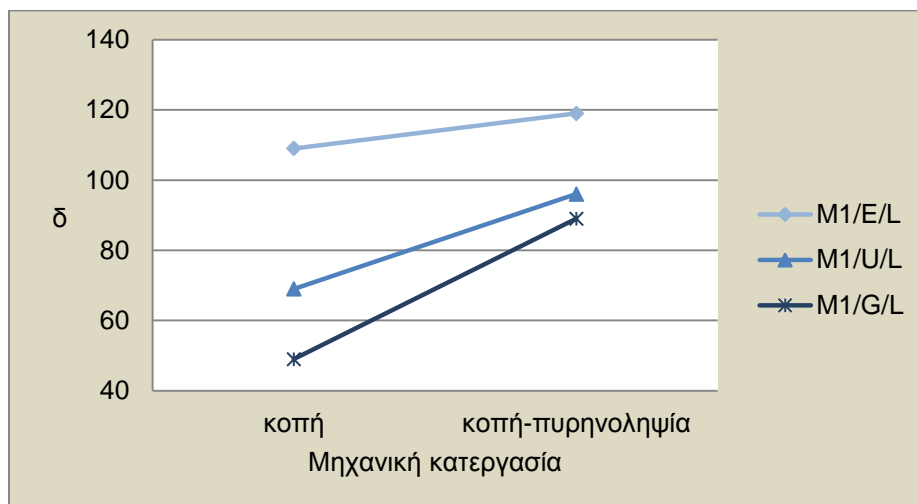


Σχήμα 6.37 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M1)

Η μέση επιρροή της θερμοκρασίας εξετάζεται στο σχήμα 6.37, όπου η τιμή της γωνίας προσανατολισμού παραμένει σταθερή, ενώ η μεταβολή της παραμέτρου A υποδηλώνει ελαφρώς εντονότερη τάση προσανατολισμού προς συγκεκριμένη γωνία κατά τη συμπύκνωση με θερμοκρασία 150°C .

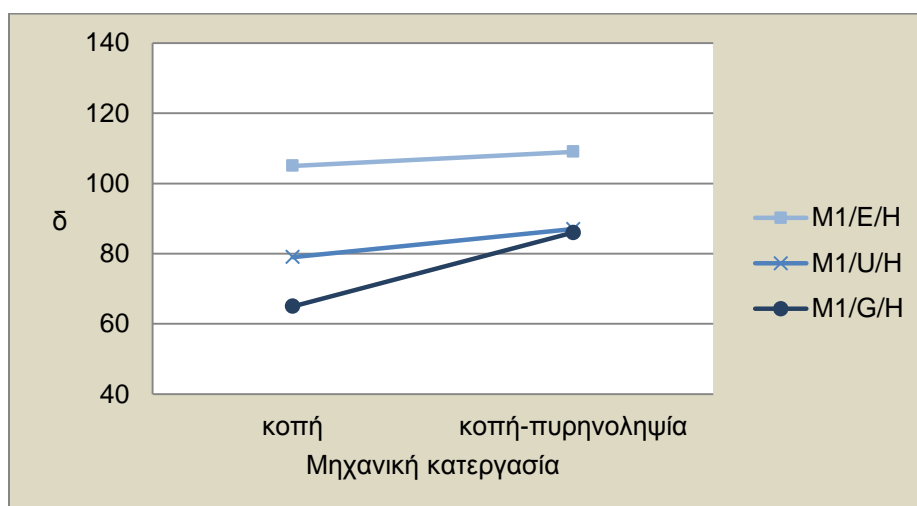
6.1.3.1.3 Μηχανική κατεργασία

Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 135°C, και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45° εμφάνισαν αυξημένη γωνία προσανατολισμού κατά 9%, 39% και 82% αντίστοιχα, σε σχέση με τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.38).



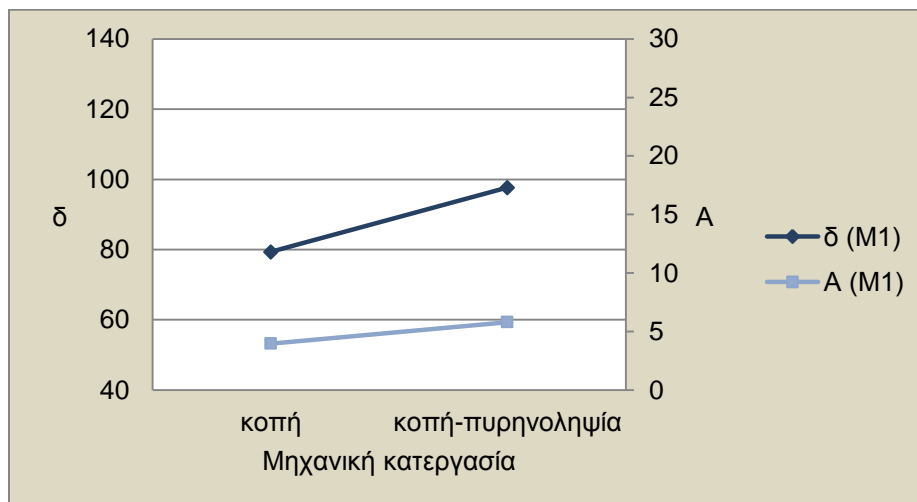
Σχήμα 6.38 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 135°C)

Ομοίως, στα δοκίμια συμπυκνωμένα με θερμοκρασία 150°C και γωνίες περιστροφής 0.82°, 1.16° και 1.45°, παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας προσανατολισμού λόγω πυρηνοληψίας κατά 4%, 10% και 32%, αντίστοιχα (σχήμα 6.39).



Σχήμα 6.39 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1 θερμοκρασίας 150°C)

Συμπεραίνουμε, με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, πως υπάρχει έντονη ανομοιομορφία μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού τμήματος στα δοκίμια του μίγματος M1, η οποία προκαλείται από τη συμπύκνωση.



Σχήμα 6.40 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M1)

Η παραπάνω διαπίστωση ποσοτικοποιείται πιο συγκεκριμένα μέσω της αύξησης της παραμέτρου A κατά 45% (σχήμα 6.40). Εξετάζοντας ένα δοκίμιο το οποίο δεν προέρχεται από πυρηνοληψία, η κατανομή της κατεύθυνσης είναι περισσότερο τυχαία, ενώ στο αντίστοιχο δοκίμιο που προέρχεται από πυρηνοληψία, η τάση προσανατολισμού προς συγκεκριμένη γωνία είναι πιο έντονη.

Ακόμη, η μέση γωνία προσανατολισμού στα δοκίμια τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία είναι 79° , ενώ σε εκείνα που δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία, η αντίστοιχη μέση τιμή είναι 98° (αύξηση 23%).

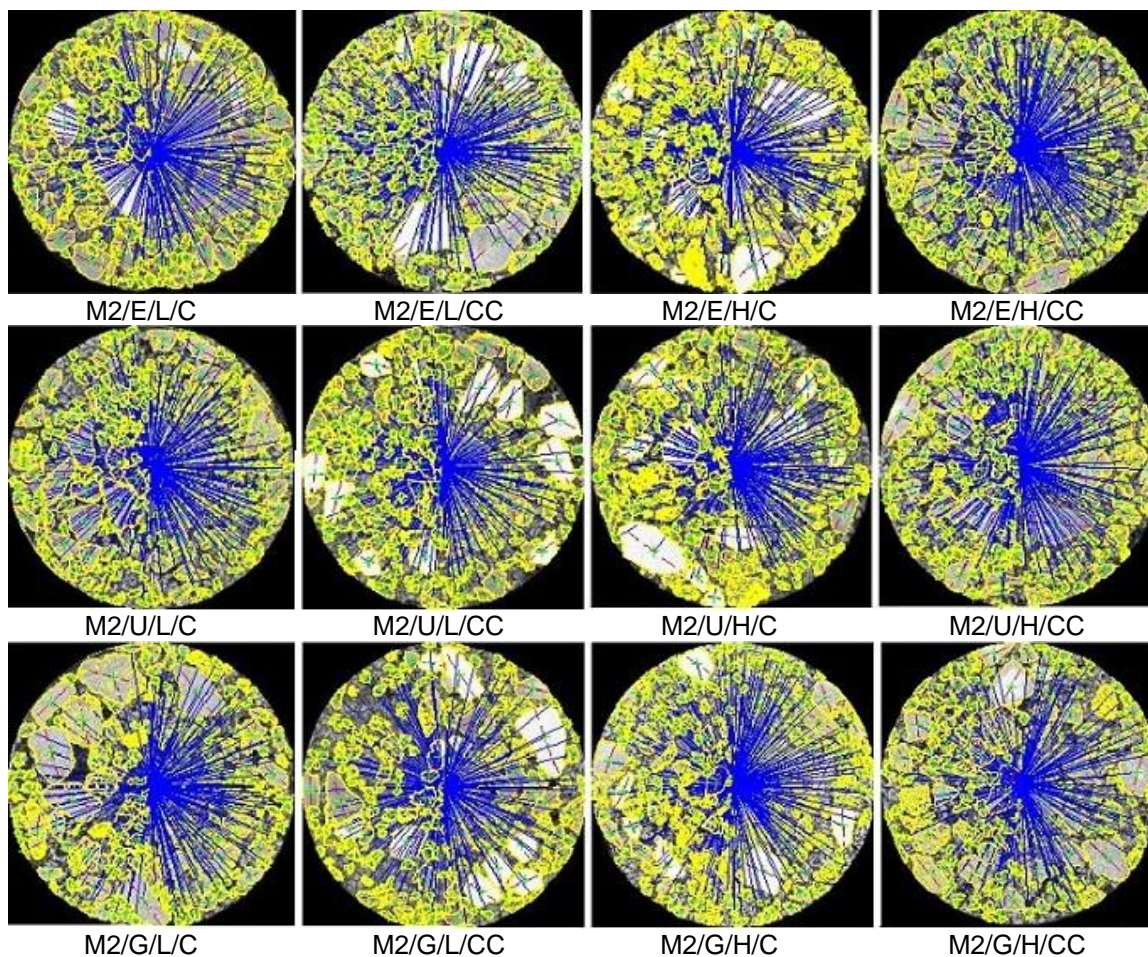
6.1.3.2 Ασφαλτόμιγμα M2

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M2 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.11 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M2)

Κωδικός δοκιμίου	δ	A
M2/E/L/C	95	10.7
M2/E/L/CC	113	11.6
M2/E/H/C	90	9.0
M2/E/H/CC	118	3.7
M2/U/L/C	98	8.1
M2/U/L/CC	108	12.6
M2/U/H/C	88	7.3
M2/U/H/CC	97	18.3
M2/G/L/C	61	1.8
M2/G/L/CC	95	9.9
M2/G/H/C	63	14.2
M2/G/H/CC	80	16.4

Στο σχήμα 6.41 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M2 μετά τον υπολογισμό του προσανατολισμού των αδρανών.

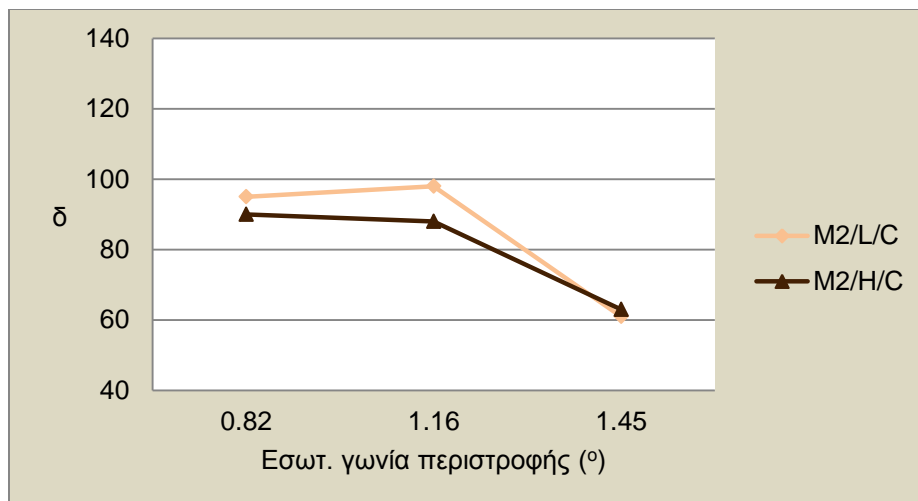


Σχήμα 6.41 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M2)

6.1.3.2.1 Γωνία περιστροφής

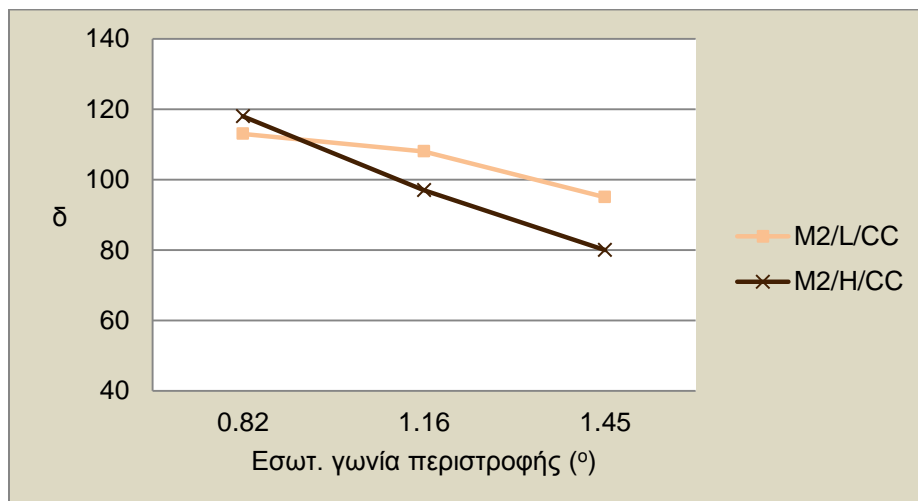
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται η επίδραση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στη γωνία προσανατολισμού των αδρανών.

Από το σχήμα 6.42 παρατηρούμε ότι στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C και αρχικής διαμέτρου 100 mm, με αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16°, η γωνία προσανατολισμού αυξάνεται κατά 3%, ενώ με περαιτέρω αύξηση της γωνίας περιστροφής σε 1.45°, παρουσιάζεται μεγάλη μείωση στη γωνία (38%). Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C, η αύξηση της γωνίας περιστροφής σε 1.16° και έπειτα 1.45°, προκαλεί διαδοχικές μειώσεις κατά 2% και 28%, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.42 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

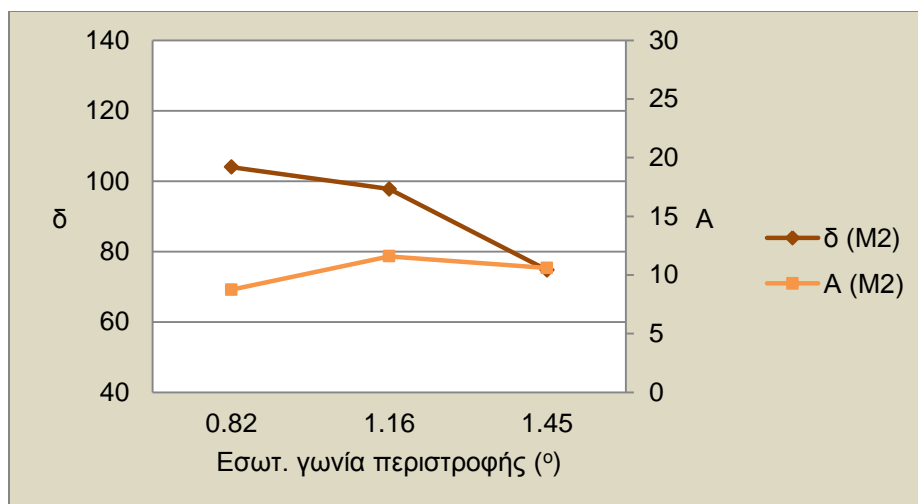
Στα δοκίμια θερμοκρασίας 135°C και αρχικής διαμέτρου 100 mm, καθώς αυξάνεται η γωνία περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και από 1.16° σε 1.45°, εμφανίζεται μείωση της γωνίας προσανατολισμού κατά 4% και 12%, αντίστοιχα. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C και αρχικής διαμέτρου 100 mm, παρατηρείται γραμμική μεταβολή, με μείωση 18% σε κάθε αύξηση της γωνίας περιστροφής (σχήμα 6.43).



Σχήμα 6.43 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι διαδοχική αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και μετά σε 1.45°, προκαλεί αρχική μικρή μείωση της γωνίας προσανατολισμού των αδρανών κατά 6% και στη συνέχεια μεγαλύτερη μείωση της τάξης του 24% κατά μέσο όρο (σχήμα 6.44). Επίσης, οι τιμές της παραμέτρου A δείχνουν ότι στις γωνίες

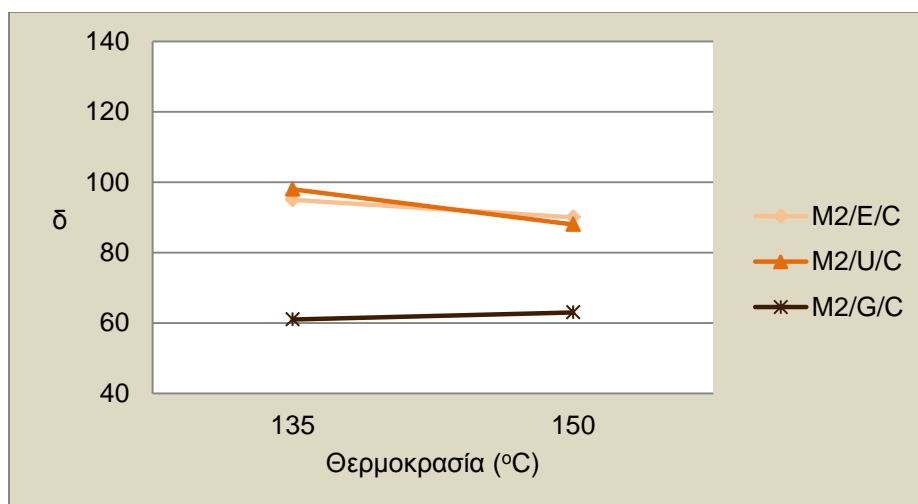
περιστροφής 1.16° και 1.45° υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού των αδρανών.



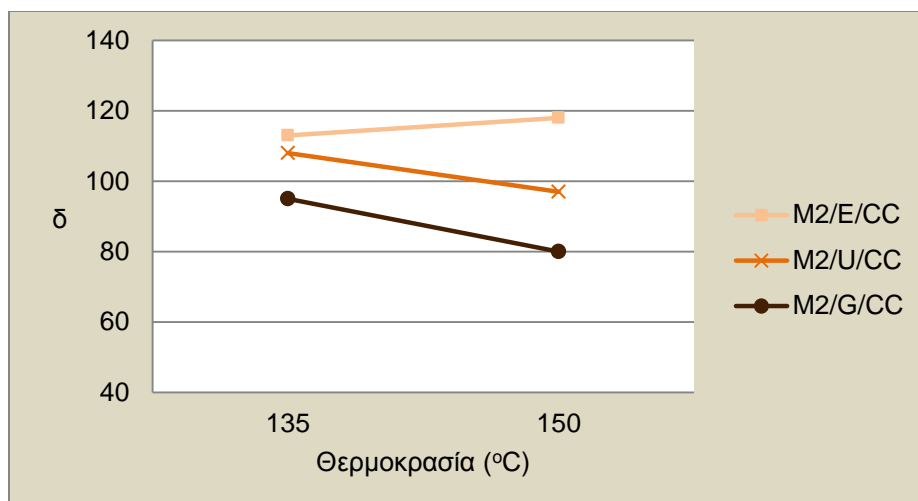
Σχήμα 6.44 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M2)

6.1.3.2.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Με την αύξηση της θερμοκρασίας από 135°C σε 150°C , τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm συμπυκνωμένα με γωνίες περιστροφής 0.82° και 1.16° παρουσίασαν μείωση 5% και 10% στη γωνία προσανατολισμού, αντίστοιχα. Αντιθέτως, στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm συμπυκνωμένα με γωνία περιστροφής 1.45° παρατηρήθηκε αύξηση κατά 3% της γωνίας προσανατολισμού (σχήμα 6.45).

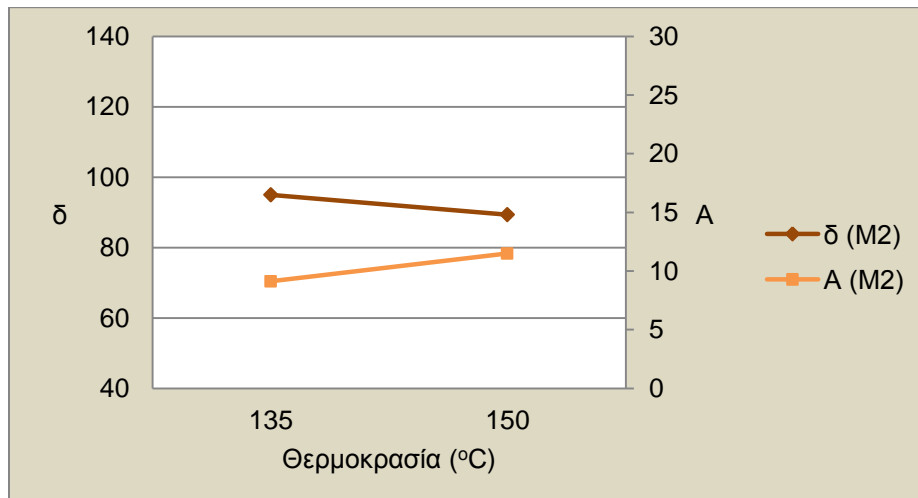


Σχήμα 6.45 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)



Σχήμα 6.46 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Στα δοκίμια γωνίας περιστροφής 0.82° , τα οποία προήλθαν από πυρηνοληψία δοκιμίων μεγαλύτερης διαμέτρου, επήλθε αύξηση 4% στη γωνία προσανατολισμού. Στα αντίστοιχα δοκίμια γωνιών περιστροφής 1.16° και 1.45° , επήλθε μείωση της τάξης του 10% και 16%, αντίστοιχα (σχήμα 6.46).

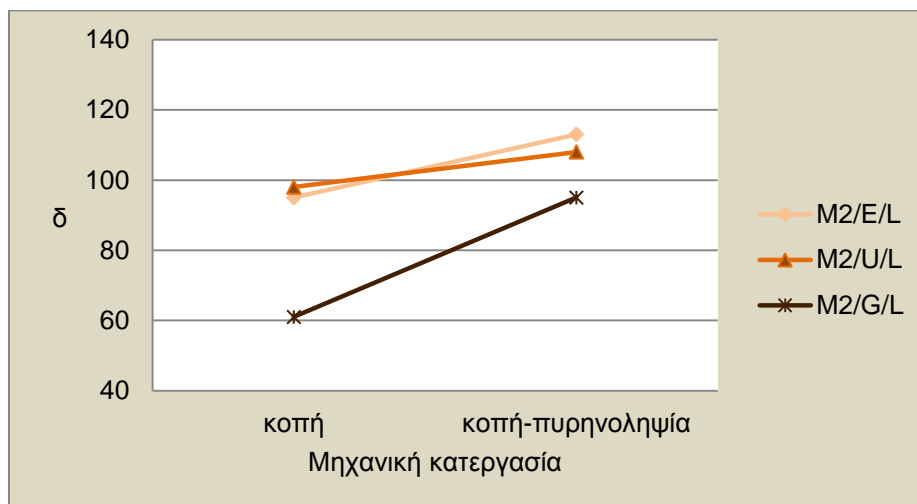


Σχήμα 6.47 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M2)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δεν παρατηρείται κάποια σαφής τάση μεταβολής της γωνίας προσανατολισμού με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως διαπιστώνεται μέσω της μικρής μέσης μείωσης κατά 6% της γωνίας προσανατολισμού. Επίσης, η αύξηση της μέσης τιμής της παραμέτρου A υποδηλώνει μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού στη συμπύκνωση σε θερμοκρασία 150°C (σχήμα 6.47).

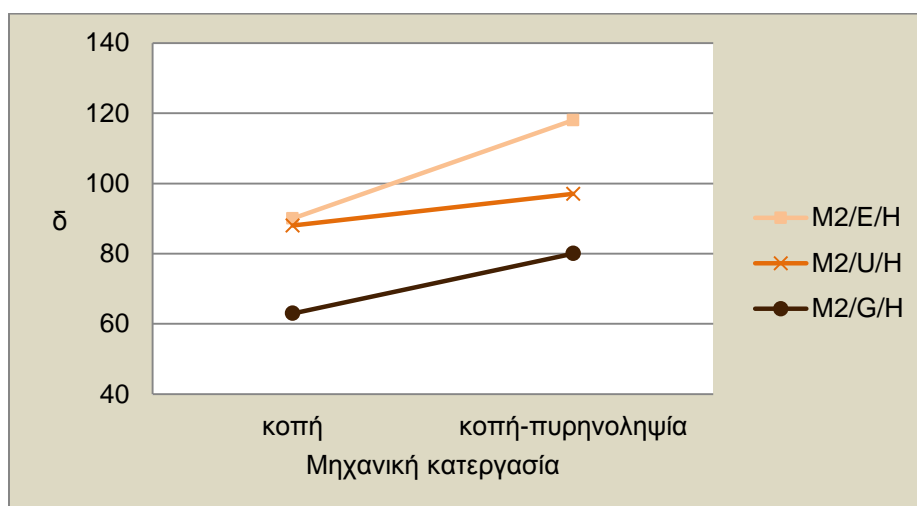
6.1.3.2.3 Μηχανική κατεργασία

Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 135°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45°, εμφάνισαν αυξημένη γωνία προσανατολισμού κατά 19%, 10% και 56%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.48).



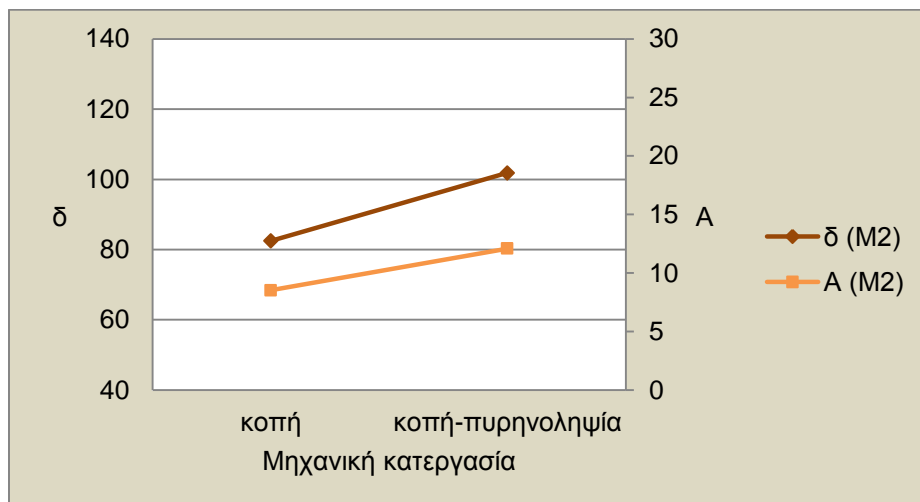
Σχήμα 6.48 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 135°C)

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C και γωνιών 0.82°, 1.16° και 1.45°, παρατηρήθηκε αύξηση της γωνίας προσανατολισμού λόγω πυρηνοληψίας, κατά 31%, 10% και 27%, αντίστοιχα (σχήμα 6.49).



Σχήμα 6.49 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2 θερμοκρασίας 150°C)

Συμπεραίνουμε, με βάση τα ανωτέρω στοιχεία, πως υπάρχει έντονη ανομοιομορφία μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού τμήματος στα δοκίμια του μίγματος M2, που προκαλείται λόγω της συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.50 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M2)

Εξετάζοντας την παράμετρο A, η κατανομή της κατεύθυνσης είναι περισσότερο τυχαία σε ένα δοκίμιο το οποίο δεν προέρχεται από πυρηνοληψία, ενώ στο αντίστοιχο δοκίμιο που προέρχεται από πυρηνοληψία, η τάση προσανατολισμού προς συγκεκριμένη γωνία είναι πιο έντονη (σχήμα 6.50).

Ακόμη, η μέση γωνία προσανατολισμού στα δοκίμια τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία είναι 83° , ενώ σε εκείνα που δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία, η αντίστοιχη μέση τιμή είναι 102° (αύξηση 23%).

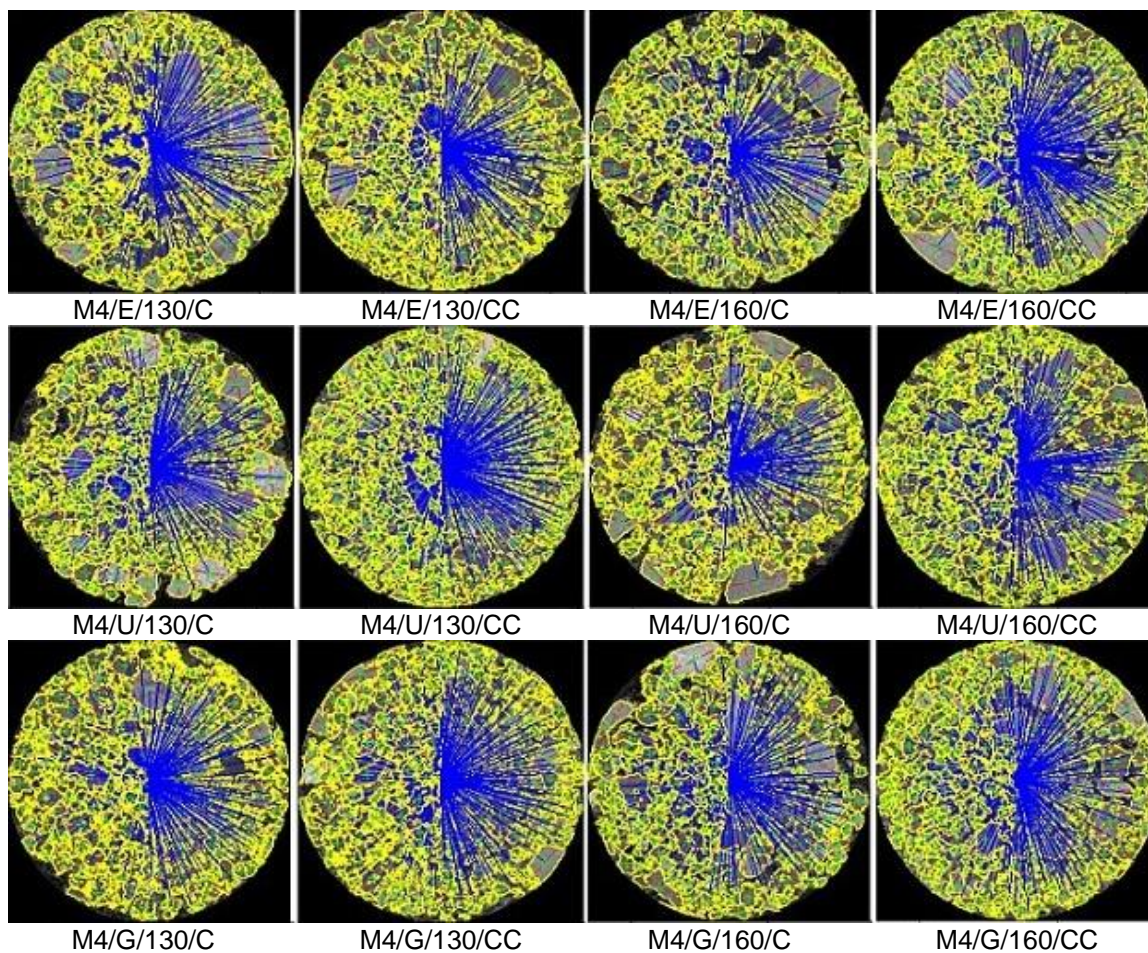
6.1.3.3 Ασφαλτόμιγμα M4

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M4 δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.12 Δεδομένα προσανατολισμού (δοκίμια M4)

Κωδικός δοκιμίου	δ	A
M4/E/130/C	94	6.5
M4/E/130/CC	123	9.1
M4/E/160/C	110	7.1
M4/E/160/CC	79	5.7
M4/U/130/C	102	7.2
M4/U/130/CC	93	0.9
M4/U/160/C	95	10.6
M4/U/160/CC	74	11.5
M4/G/130/C	93	7.2
M4/G/130/CC	103	9.8
M4/G/160/C	85	9.1
M4/G/16	86	11.8

Στο σχήμα 6.51 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M4 μετά τον υπολογισμό του προσανατολισμού των αδρανών.

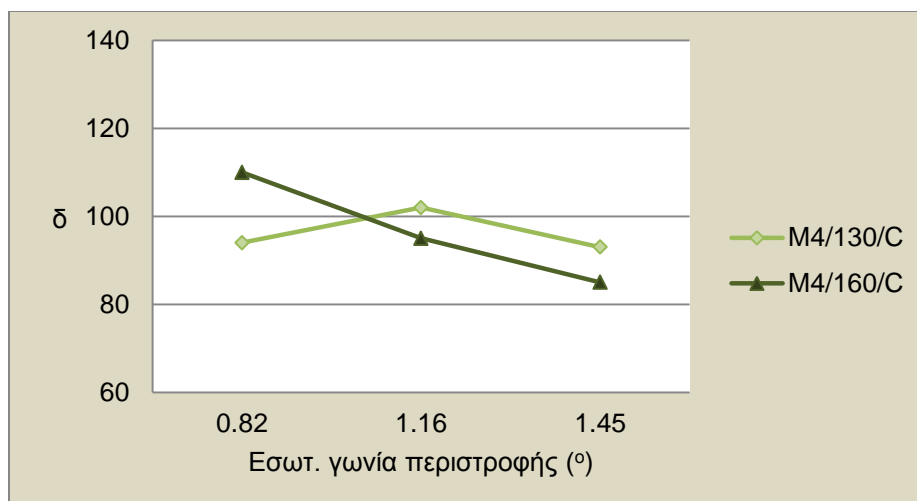


Σχήμα 6.51 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (δοκίμια M4)

6.1.3.3.1 Γωνία περιστροφής

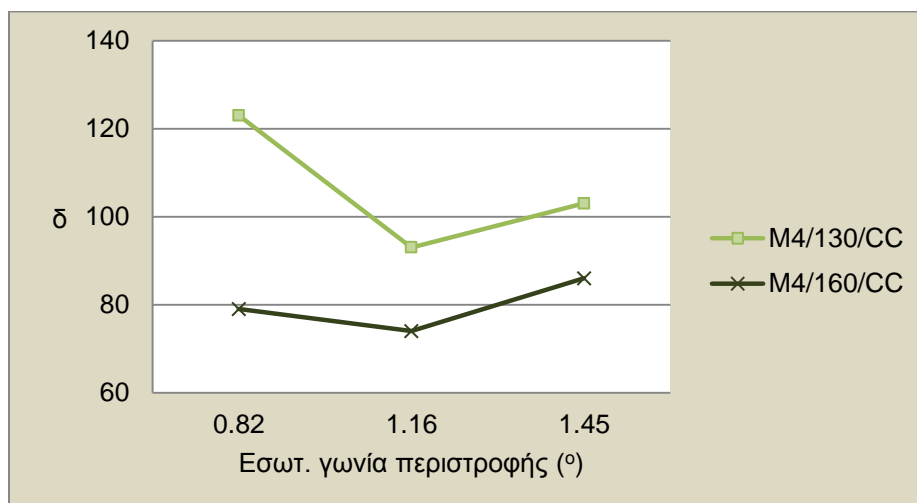
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνεται η επίδραση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής στη γωνία προσανατολισμού των αδρανών.

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 130°C και αρχικής διαμέτρου 100 mm, με αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16°, η γωνία προσανατολισμού αυξάνεται κατά 9%, ενώ με περαιτέρω αύξηση σε 1.45°, μειώνεται επίσης κατά 9%. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 160°, η αύξηση της γωνίας σε 1.16° και έπειτα 1.45° προκαλεί διαδοχικές μειώσεις της γωνίας προσανατολισμού κατά 14% και 11%, αντίστοιχα (σχήμα 6.52).

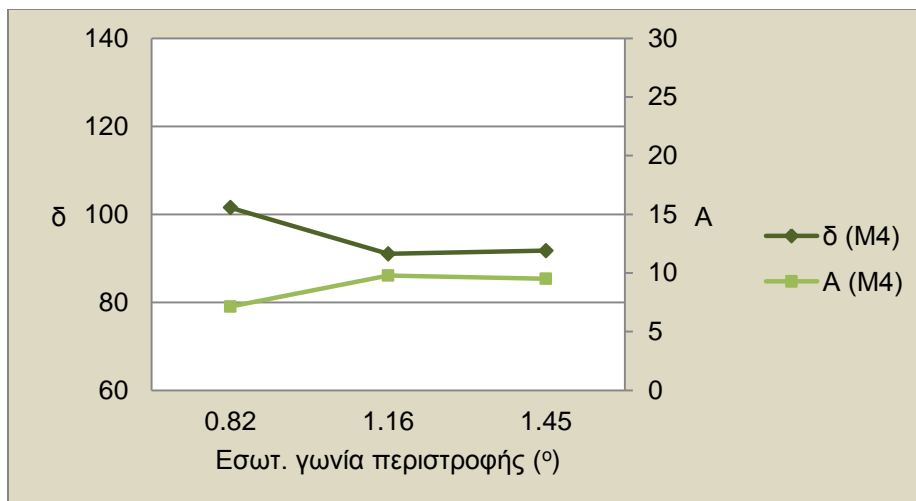


Σχήμα 6.52 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Στα δοκίμια θερμοκρασίας 130°C τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία, αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και στη συνέχεια σε 1.45° μειώνει τη γωνία προσανατολισμού κατά 24% και κατόπιν την αυξάνει κατά 11%, αντίστοιχα. Στα αντίστοιχα δοκίμια θερμοκρασίας 160°C, η αύξηση της γωνίας περιστροφής σε 1.16° επιφέρει μείωση της γωνίας προσανατολισμού κατά 6%, ενώ σε 1.45° επιφέρει αύξηση κατά 16% (σχήμα 6.53). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm, διαδοχική αύξηση της γωνίας περιστροφής από 0.82° σε 1.16° και μετά σε 1.45° προκαλεί έντονη μεταβλητότητα στη γωνία προσανατολισμού των αδρανών, ενώ στα αντίστοιχα αρχικής διαμέτρου 150 mm, διαπιστώνεται αρχική μείωση και κατόπιν αύξηση της γωνίας προσανατολισμού.



Σχήμα 6.53 Επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

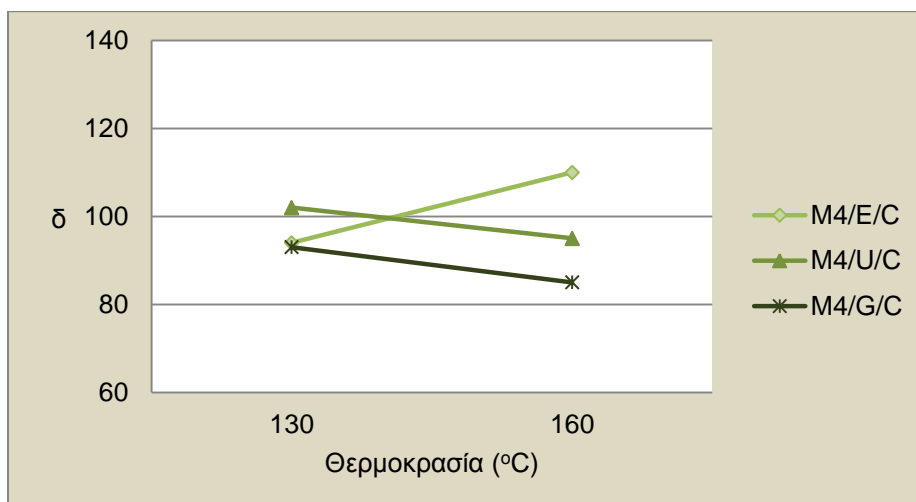


Σχήμα 6.54 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στον προσανατολισμό (δοκίμια M4)

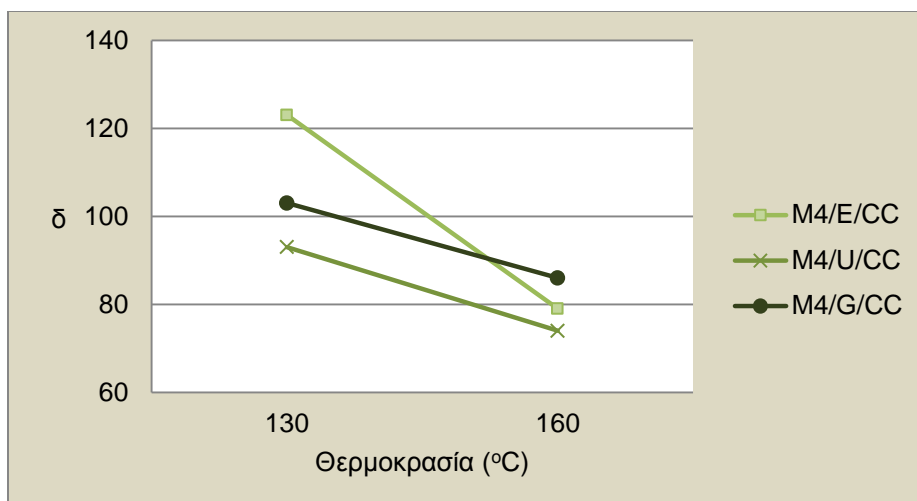
Όπως παρατηρείται στο σχήμα 6.54, η μέση μεταβολή της γωνίας περιστροφής, εκφράζεται με αρχική μείωση κατά 10% και στη συνέχεια, αμελητέα αύξηση της τάξης του 1%. Ακόμη, οι τιμές της παραμέτρου A δείχνουν ότι στις γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45° υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού των αδρανών.

6.1.3.3.2 Θερμοκρασία συμπύκνωσης

Στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm συμπυκνωμένα με γωνία 0.82°, η γωνία προσανατολισμού αυξήθηκε κατά 17% λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, ενώ στα δοκίμια γωνίας περιστροφής 1.16° και 1.45°, παρατηρήθηκε μείωση της γωνίας προσανατολισμού κατά 7% και 9%, αντίστοιχα (σχήμα 6.55)

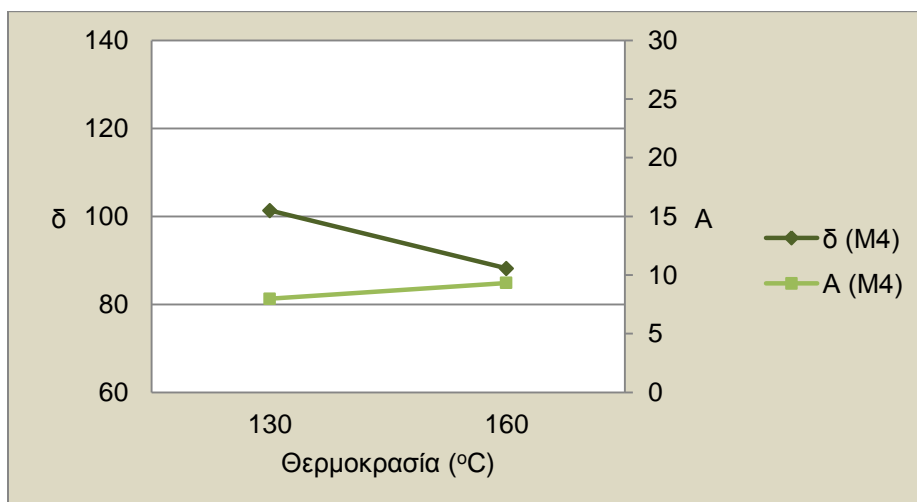


Σχήμα 6.55 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)



Σχήμα 6.56 Επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση της γωνίας προσανατολισμού κατά 36%, 20% και 17% στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm και γωνιών περιστροφής 0.82°, 1.16° και 1.45°, αντίστοιχα (σχήμα 6.56).

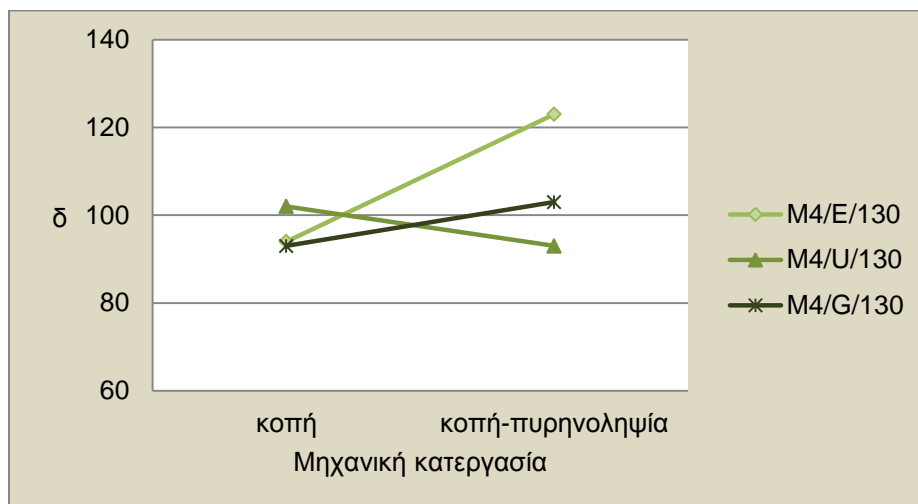


Σχήμα 6.57 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στον προσανατολισμό (δοκίμια M4)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, παρατηρείται τάση μείωσης της γωνίας προσανατολισμού με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία εκφράζεται μέσω της μέσης μείωσης της γωνίας προσανατολισμού κατά 13%. Η αύξηση της μέσης τιμής της παραμέτρου A υποδηλώνει μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού για συμπύκνωση σε θερμοκρασία 160°C (σχήμα 6.57).

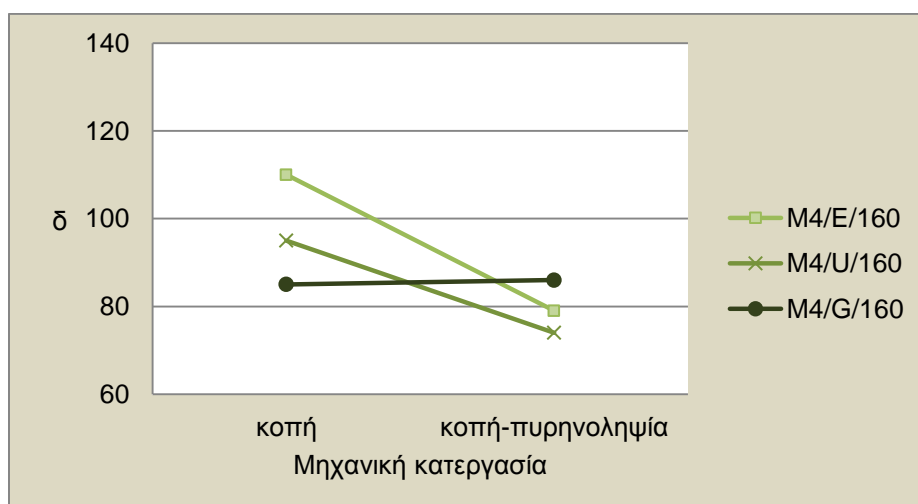
6.1.3.3.3 Μηχανική κατεργασία

Τα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 130°C και γωνίες 0.82°, 1.16° και 1.45°, εμφάνισαν αύξηση στη γωνία προσανατολισμού κατά 31%, μείωση 9% και αύξηση 11%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm (σχήμα 6.58).



Σχήμα 6.58 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 130°C)

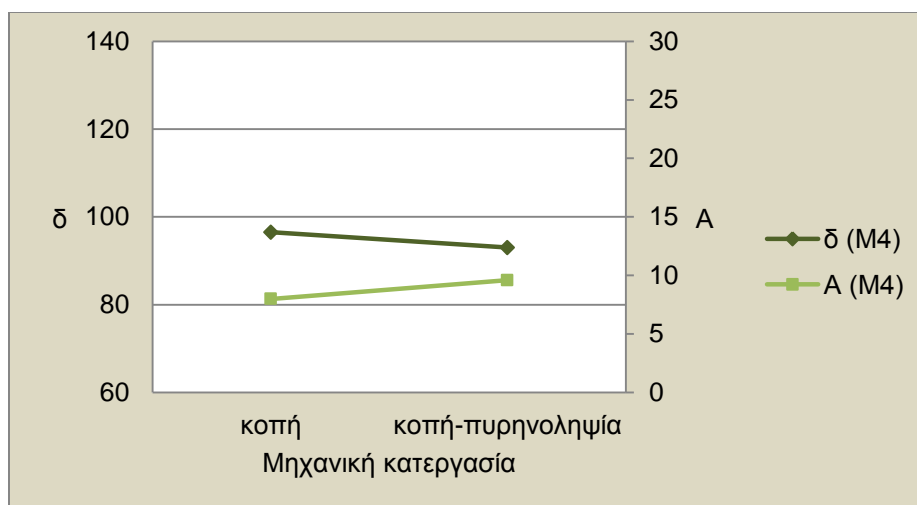
Στα δοκίμια συμπυκνωμένα σε θερμοκρασία 160°C και γωνίες περιστροφής 0.82° και 1.16° παρατηρήθηκε μείωση της γωνίας προσανατολισμού λόγω πυρηνοληψίας, κατά 28% και 22% αντίστοιχα, ενώ στα δοκίμια γωνίας 1.45° η γωνία προσανατολισμού παρέμεινε πρακτικά σταθερή (σχήμα 6.59).



Σχήμα 6.59 Επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4 θερμοκρασίας 160°C)

Συμπεραίνουμε, με βάση τα παραπάνω δεδομένα, ότι η γυροσκοπική συμπύκνωση παράγει δοκίμια με ανομοιομορφία μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού τμήματος, όσον αφορά στον προσανατολισμό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραμέτρου A στο σχήμα 6.60, εξετάζοντας ένα δοκίμιο το οποίο δεν προέρχεται από πυρηνοληψία, η κατανομή της κατεύθυνσης είναι περισσότερο τυχαία, ενώ στο αντίστοιχο δοκίμιο που προέρχεται από πυρηνοληψία, η τάση προσανατολισμού προς συγκεκριμένη γωνία είναι πιο έντονη.

Ακόμη, η μέση γωνία προσανατολισμού στα δοκίμια τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία είναι 97° , ενώ σε εκείνα που δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία, η αντίστοιχη μέση τιμή είναι 93° (μείωση 4%).



Σχήμα 6.60 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στον προσανατολισμό (δοκίμια M4)

6.1.3.4 Στατιστική Ανάλυση

Εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, της θερμοκρασίας, της πυρηνοληψίας, καθώς και των συνδυασμών τους ανά δύο, στα αποτελέσματα της γωνίας προσανατολισμού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο γενικό γραμμικό μοντέλο (general linear model - GLM):

$$\begin{aligned} \text{Γωνία προσανατολισμού} = f & (\text{γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχανική κατεργασία,} \\ & \text{γωνία περιστροφής} \times \text{θερμοκρασία,} \\ & \text{θερμοκρασία} \times \text{μηχανική κατεργασία,} \\ & \text{γωνία περιστροφής} \times \text{μηχανική κατεργασία}) \end{aligned}$$

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κάθε ασφαλτόμιγμα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, όπου οι στατιστικά σημαντικές παράμετροι (για τιμές p μικρότερες του 0.05) έχουν σημειωθεί με αστερίσκο.

Πίνακας 6.13 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	98649.833 ^a	10	9864.983	700.472	.001
Γωνία περιστροφής*	3124.500	2	1562.250	110.929	.009
Θερμοκρασία	.000	1	.000	.000	1.000
Μηχανική κατεργασία*	1008.333	1	1008.333	71.598	.014
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	91.500	2	45.750	3.249	.235
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	161.333	1	161.333	11.456	.077
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	277.167	2	138.583	9.840	.092
Σφάλμα	28.167	2	14.083		
Σύνολο	98678.000	12			

a. $R^2 = 1.000$ (Adjusted $R^2 = .998$)

* Στατιστικά σημαντική παράμετρος

Πίνακας 6.14 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	105261.833 ^a	10	10526.183	228.416	.004
Γωνία περιστροφής*	1898.167	2	949.083	20.595	.046
Θερμοκρασία	96.333	1	96.333	2.090	.285
Μηχανική κατεργασία *	1121.333	1	1121.333	24.333	.039
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	56.167	2	28.083	.609	.621
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	5.333	1	5.333	.116	.766
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	148.167	2	74.083	1.608	.383
Σφάλμα	92.167	2	46.083		
Σύνολο	105354.000	12			

a. $R^2 = .999$ (Adjusted $R^2 = .995$)

* Στατιστικά σημαντικό

Πίνακας 6.15 Ανάλυση διακύμανσης της γωνίας προσανατολισμού (δοκίμια M4)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	109329.500 ^a	10	10932.950	53.397	.019
Γωνία περιστροφής	274.500	2	137.250	.670	.599
Θερμοκρασία	520.083	1	520.083	2.540	.252
Μηχανική κατεργασία	36.750	1	36.750	.179	.713
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	1.167	2	.583	.003	.997
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	546.750	1	546.750	2.670	.244
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	219.500	2	109.750	.536	.651
Σφάλμα	409.500	2	204.750		
Σύνολο	109739.000	12			

a. $R^2 = .996$ (Adjusted $R^2 = .978$)

* Στατιστικά σημαντικό

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η γωνία περιστροφής και η πυρηνοληψία αποδείχτηκαν στατιστικά σημαντικές στον προσανατολισμό των αδρανών στα ασφαλτομίγματα M1 και M2, ενώ ο προσανατολισμός των αδρανών του μίγματος M4 δεν εμφάνισε στατιστική συσχέτιση με κάποια παράμετρο.

6.1.4 Διαχωρισμός

Η μεθοδολογία υπολογισμού και ποσοτικοποίησης του διαχωρισμού αναλύθηκε στο εδάφιο 5.3.3, όπου περιγράφηκε η εξωτερική και εσωτερική περιοχή της οριζόντιας κυκλικής διατομής του δοκιμίου και ορίστηκε η παράμετρος διαχωρισμού S_H . Στο παρόν εδάφιο, εξετάζεται η επιρροή της γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό των αδρανών, στα δοκίμια διαφορετικής αρχικής διαμέτρου.

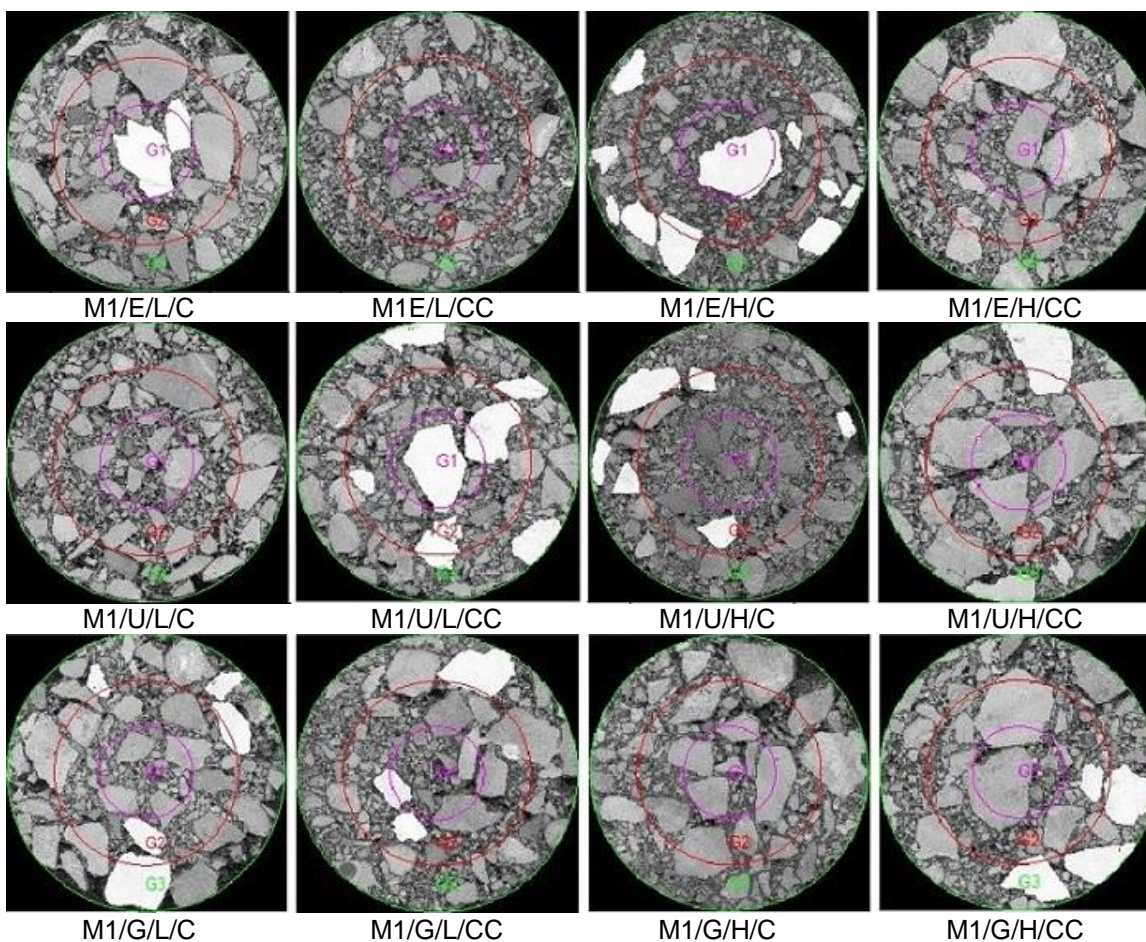
6.1.4.1 Ασφαλτόμιγμα M1

Τα αποτελέσματα της παραμέτρου διαχωρισμού S_H , που προέκυψαν από την ανάλυση ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.16 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M1)

Κωδικός δοκιμίου	S_H
M1/E/L/C	-15.1
M1/E/L/CC	-4.5
M1/E/H/C	-15.6
M1/E/H/CC	6.4
M1/U/L/C	-0.9
M1/U/L/CC	-15.1
M1/U/H/C	-1.1
M1/U/H/CC	5.8
M1/G/L/C	9.3
M1/G/L/CC	8.8
M1/G/H/C	-12.1
M1/G/H/CC	-6.0

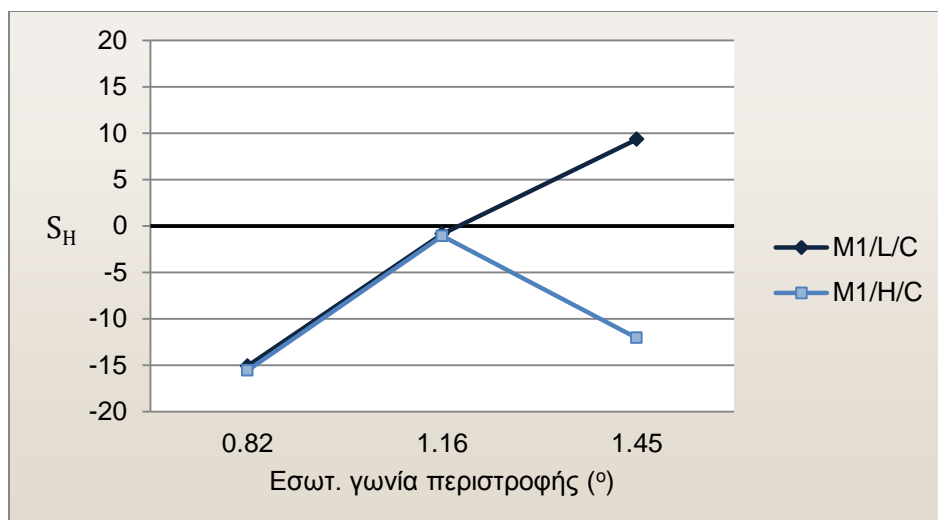
Στο σχήμα 6.61 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M1 μετά τον υπολογισμό του διαχωρισμού των αδρανών, μέσω των οποίων μπορεί να εξεταστεί ποιοτικά η μεταβολή της διαμέτρου των αδρανών μεταξύ εσωτερικής (G1 και G2) και εξωτερικής (G3) περιοχής της οριζόντιας κυκλικής διατομής.



Σχήμα 6.61 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M1)

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.62 παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα δοκίμια, τα οποία δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία.

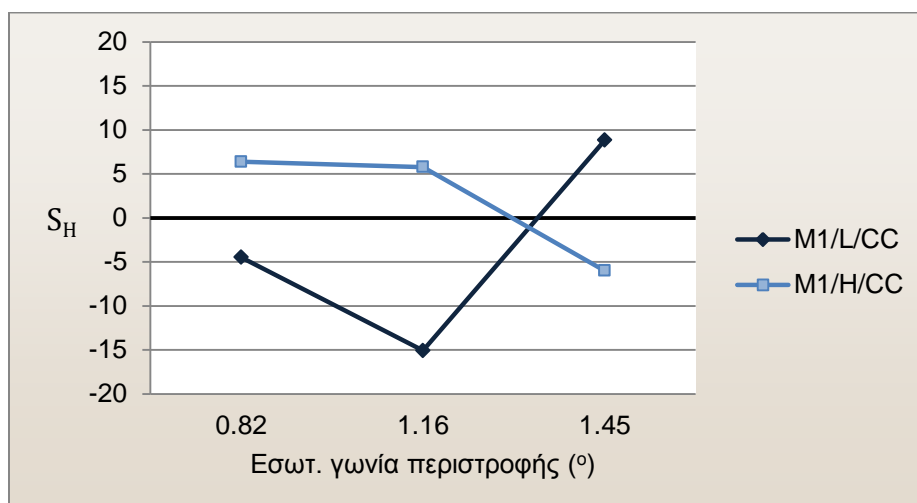
Η συμπύκνωση σε γωνία περιστροφής 1.16° ανεξαρτήτως θερμοκρασίας παράγει δοκίμια με ομοιογενή κατανομή των αδρανών ($S_H \leq |5|\%$), ενώ κατά τους υπόλοιπους συνδυασμούς παραμέτρων συμπύκνωσης τα δοκίμια παρουσίασαν φαινόμενα διαχωρισμού. Επίσης, παρατηρείται τάση συγκέντρωσης των χονδρόκοκκων στην εσωτερική περιοχή, όπως υποδηλώνουν οι αρνητικές, κατά κύριο λόγο, τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού.



Σχήμα 6.62 Επιρροή παραμέτρων συμπίκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

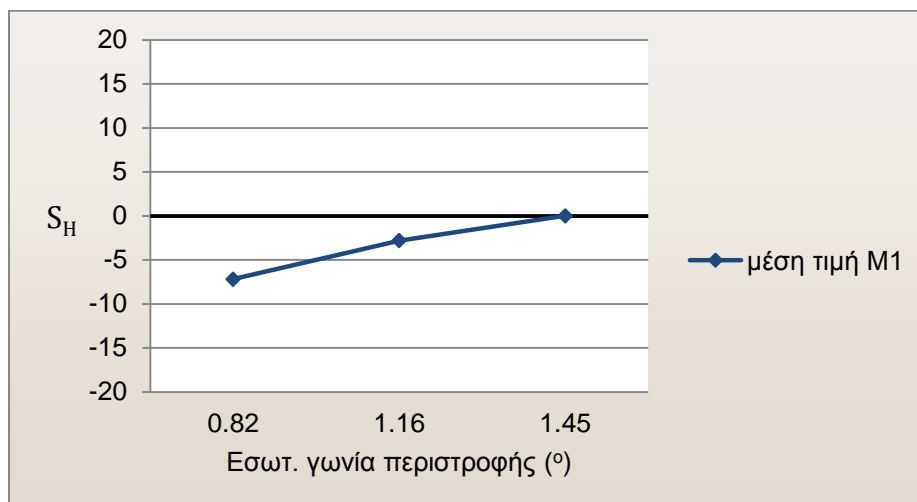
Στο σχήμα 6.63 εξετάζονται τα αντίστοιχα δοκίμια τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία δοκιμίου μεγαλύτερης διαμέτρου.

Στη θερμοκρασία 135°C παρατηρείται ανομοιομορφία στις γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45°, ενώ η συμπίκνωση με γωνία 0.82° δίνει ένα περισσότερο ομοιογενές μίγμα. Στα δοκίμια θερμοκρασίας 150°C σε όλες τις γωνίες περιστροφής παρατηρείται ομοιογενής κατανομή των αδρανών με τις τιμές του S_H να κυμαίνονται έως περίπου |5|%. Συγκεκριμένα στις γωνίες 0.82° και 1.16° υπάρχει τάση συγκέντρωσης των χονδροκόκκων αδρανών προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στη γωνία περιστροφής 1.45°.



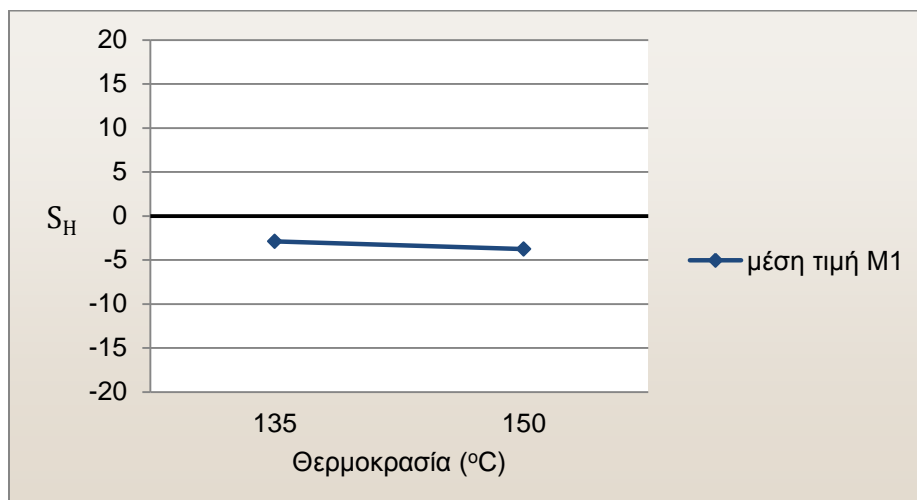
Σχήμα 6.63 Επιρροή παραμέτρων συμπίκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η μέση επιρροή των τριών μεταβλητών παραμέτρων των δοκιμών στις τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού S_H .



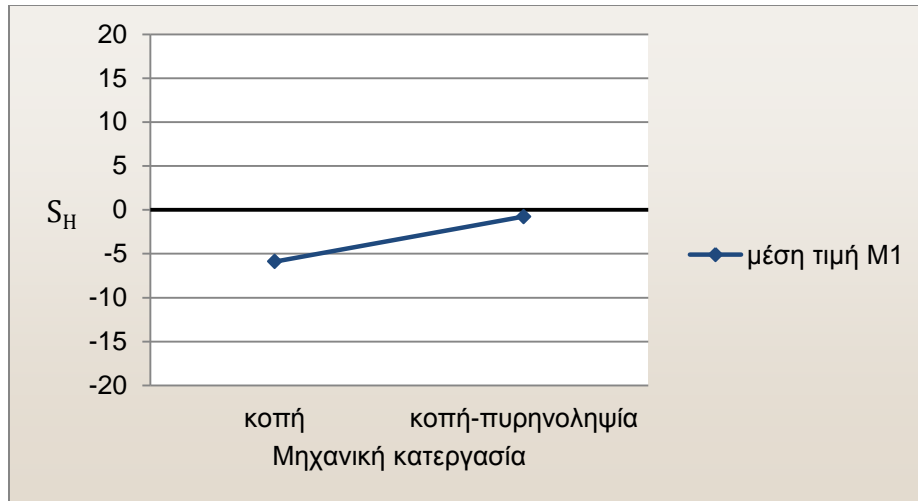
Σχήμα 6.64 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M1)

Μέσω της συμπύκνωσης με εσωτερικές γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45° παράγονται αρκετά ομοιογενή δοκίμια (σχήμα 6.64).



Σχήμα 6.65 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M1)

Εξετάζοντας την επιρροή της θερμοκρασίας, παρατηρείται, επίσης, μεγάλη ομοιογένεια της χωρικής κατανομής των αδρανών ανεξαρτήτως θερμοκρασίας (σχήμα 6.65).



Σχήμα 6.66 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M1)

Ομοίως όσον αφορά τη μηχανική κατεργασία τα δοκίμια που προέρχονται από πυρηνοληψία παρουσιάζουν ελαφρώς μεγαλύτερη ομοιογένεια (σχήμα 6.66), σε σχέση με τα - επίσης ομοιογενή - δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm.

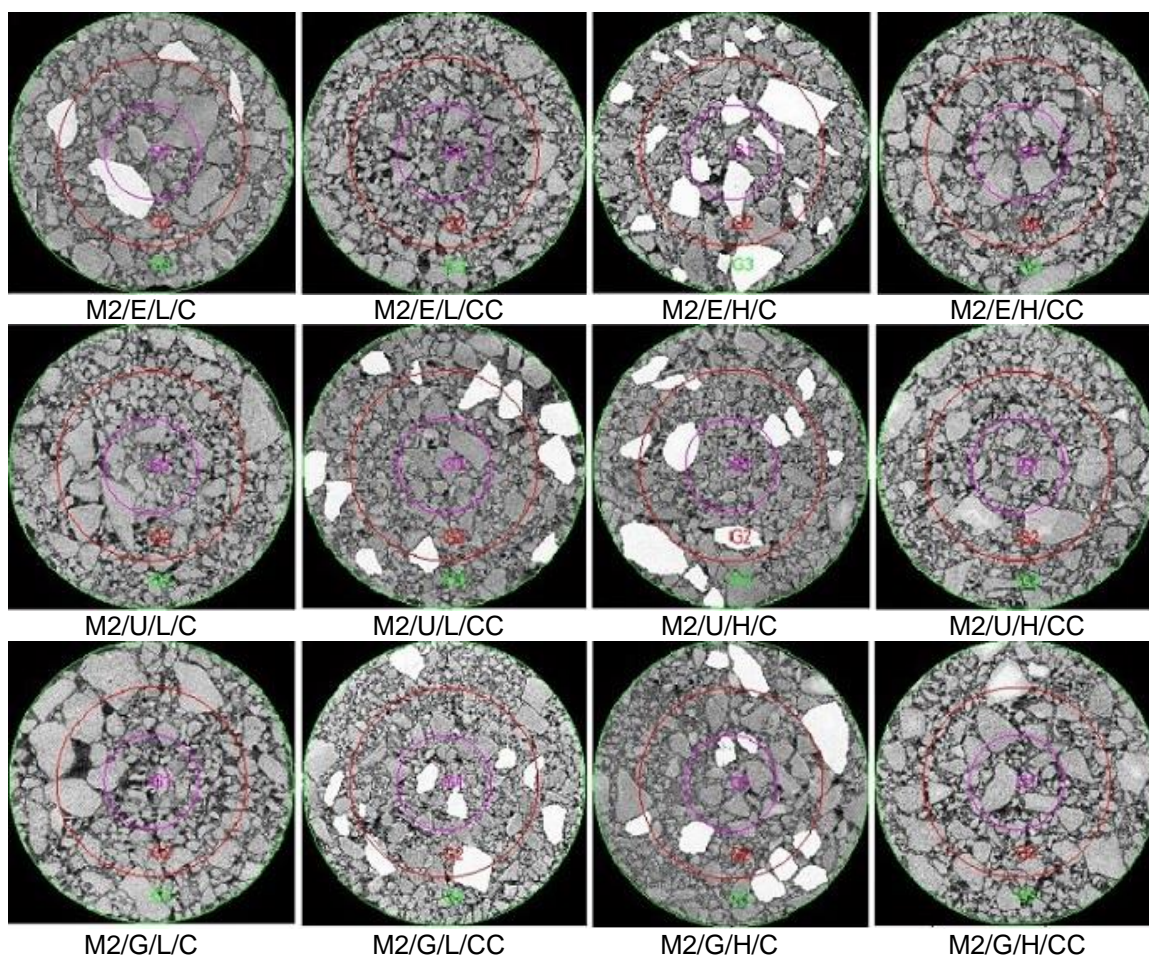
6.1.4.2 Ασφαλτόμιγμα M2

Τα αποτελέσματα της παραμέτρου διαχωρισμού S_H , που προέκυψαν από την ανάλυση ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμών του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.17 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M2)

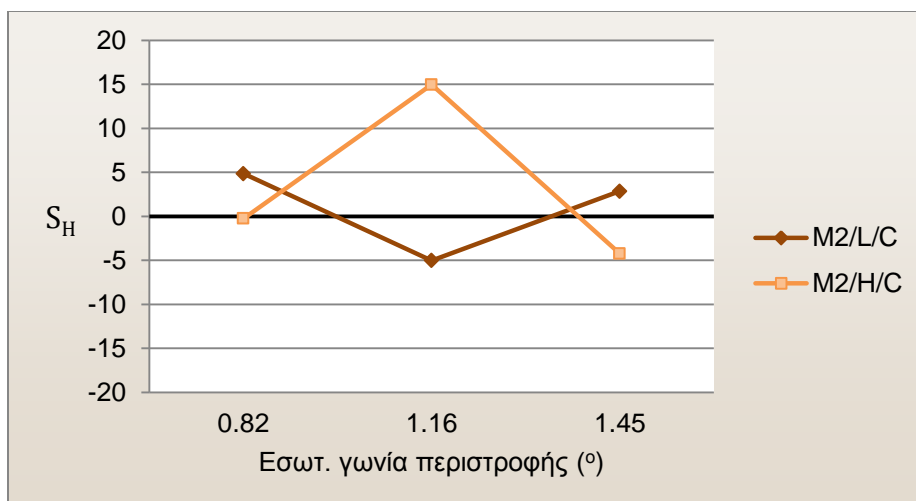
Κωδικός δοκιμίου	S_H
M2/E/L/C	4.9
M2/E/L/CC	2.8
M2/E/H/C	-0.3
M2/E/H/CC	-4.4
M2/U/L/C	-5.0
M2/U/L/CC	8.6
M2/U/H/C	15.0
M2/U/H/CC	10.6
M2/G/L/C	2.8
M2/G/L/CC	-8.2
M2/G/H/C	-4.2
M2/G/H/CC	-0.2

Στο σχήμα 6.67 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M2 μετά τον υπολογισμό του διαχωρισμού των αδρανών.



Σχήμα 6.67 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M2)

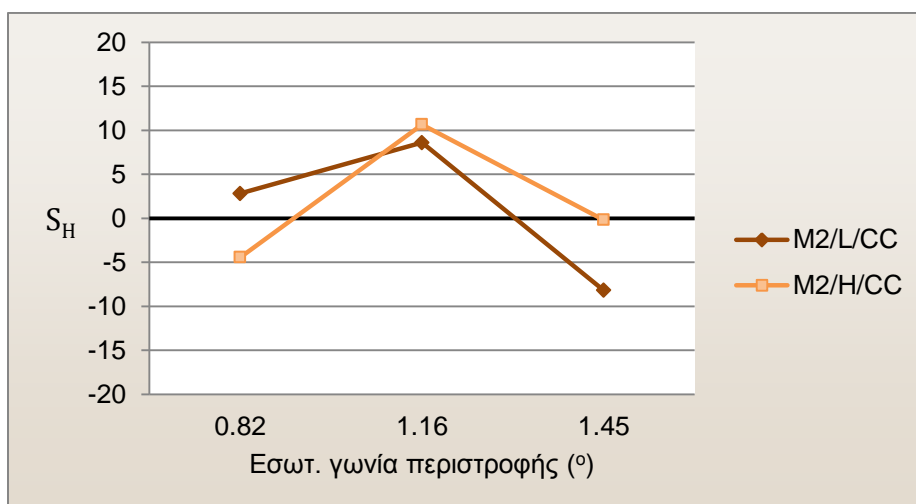
Στο διάγραμμα του σχήματος 6.68 παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στα δοκίμια τα οποία δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία. Όπως φαίνεται από τις τιμές του S_H (μικρότερες του |5|%) σχεδόν για κάθε συνδυασμό θερμοκρασίας – γωνίας περιστροφής, η διάμετρος των αδρανών δεν εμφανίζει σημαντική μεταβολή. Πιο συγκεκριμένα, η ομοιογένεια είναι μεγαλύτερη κατά τη συμπίκνωση στις γωνίες 0.82° και 1.45° για κάθε θερμοκρασία, όπως και σε γωνία 1.16° και θερμοκρασία 135°C .



Σχήμα 6.68 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

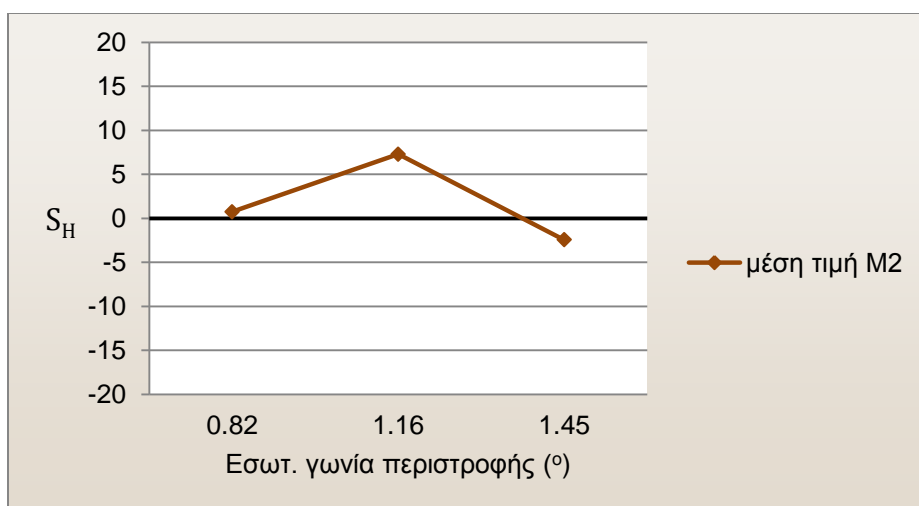
Στο διάγραμμα του σχήματος 6.69 ακολουθείται η ίδια διαδικασία, για τα δοκίμια τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία.

Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη ανομοιογένεια παρουσιάζεται στην γωνία περιστροφής 1.16° για κάθε θερμοκρασία. Αντιθέτως, στη γωνία 0.82° υπάρχει ομοιογένεια ανεξαρτήτως θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Τέλος, η συμπύκνωση με γωνία 1.45° και θερμοκρασία 150°C εμφανίζει απόλυτη ομοιομορφία στην κατανομή των αδρανών, κάτι που δεν ισχύει για το δοκίμιο ίδιας γωνίας και θερμοκρασίας 135°C.



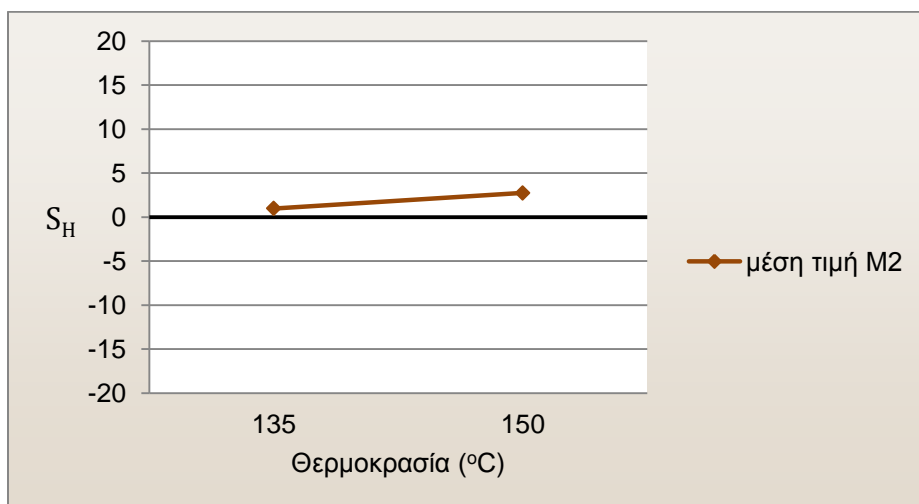
Σχήμα 6.69 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η μέση επιρροή των τριών μεταβλητών παραμέτρων των δοκιμών στις τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού S_H .



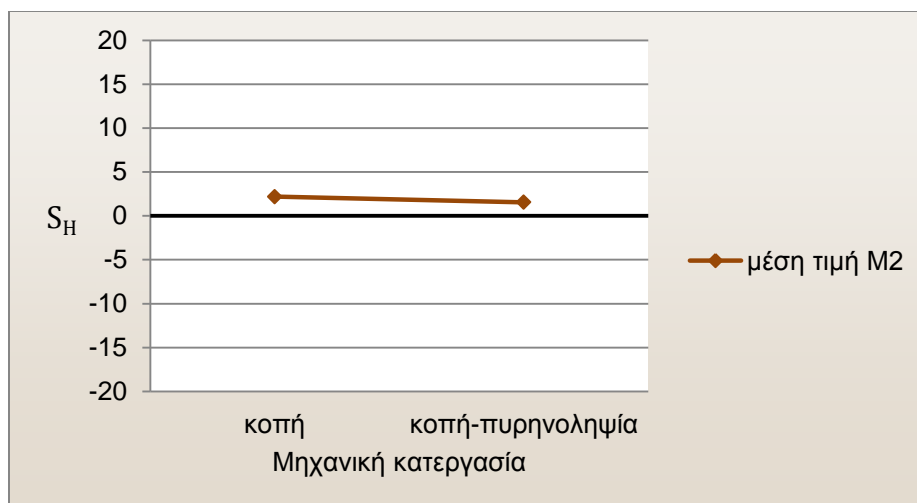
Σχήμα 6.70 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M2)

Μέσω της συμπύκνωσης με εσωτερικές γωνίες περιστροφής 0.82° και 1.45° παράγονται περισσότερο ομοιογενή δοκίμια (σχήμα 6.70).



Σχήμα 6.71 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M2)

Εξετάζοντας την επιρροή της θερμοκρασίας, παρατηρείται, επίσης, μεγάλη ομοιομορφία του μεγέθους των αδρανών ανεξαρτήτως θερμοκρασίας (σχήμα 6.71), διαπίστωση που είχε προκύψει και τα δοκίμια του μίγματος M1.



Σχήμα 6.72 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M2)

Επίσης ομοιογενής είναι η κατανομή των αδρανών στα δοκίμια διαφορετικής αρχικής διαμέτρου, όπως προκύπτει από το σχήμα 6.72. Συνοψίζοντας, δεν διαπιστώθηκε έντονα φαινόμενο διαχωρισμού των αδρανών κατά την εργαστηριακή συμπύκνωση του μίγματος M2.

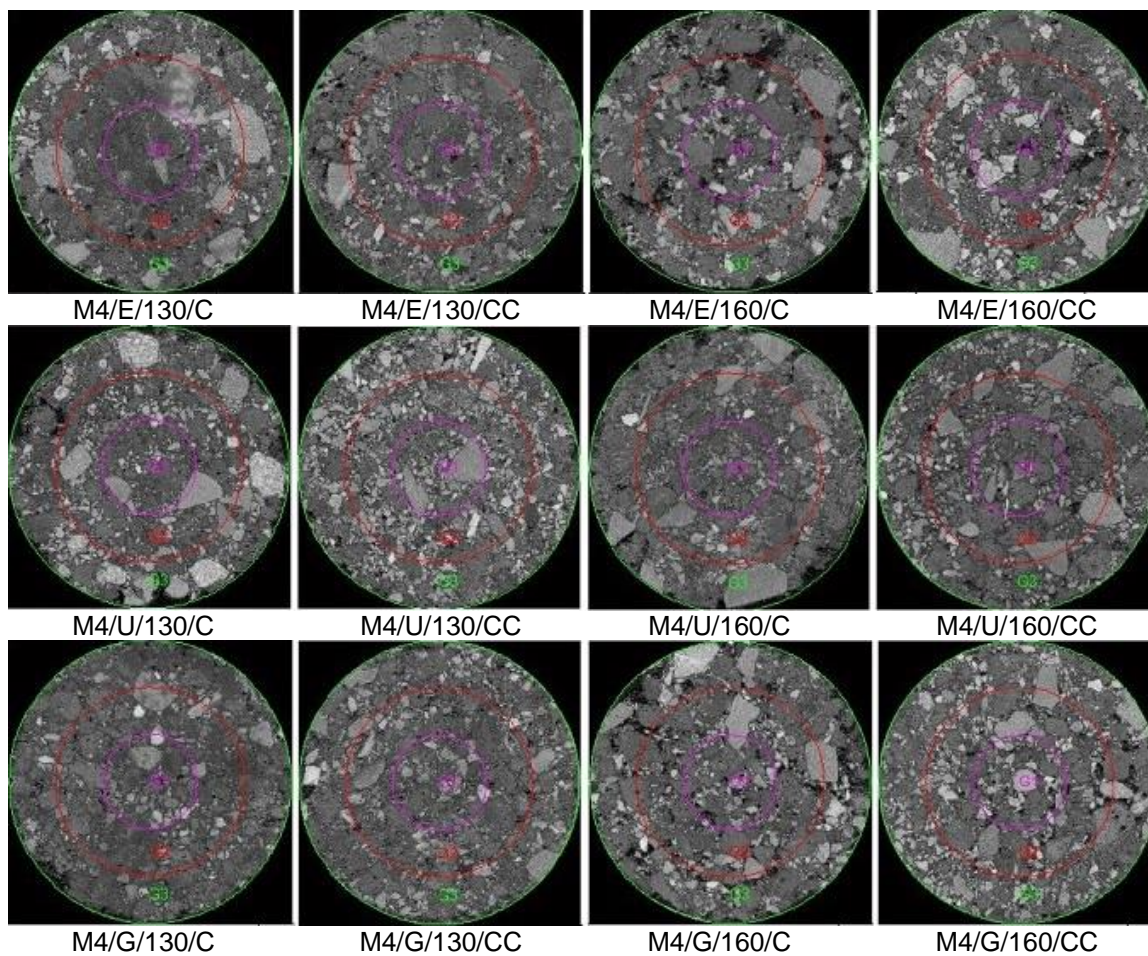
6.1.4.3 Ασφαλτόμιγμα M4

Τα αποτελέσματα της παραμέτρου διαχωρισμού S_H , που προέκυψαν από την ανάλυση ψηφιακής εικόνας των εργαστηριακών δοκιμίων του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.18 Παράμετρος διαχωρισμού (δοκίμια M4)

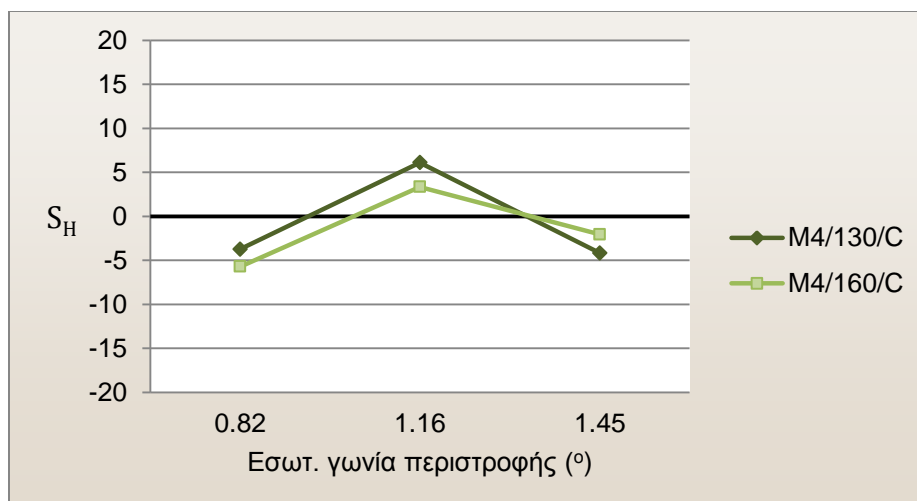
Κωδικός δοκιμίου	S_H
M4/E/130/C	-3.7
M4/E/130/CC	6.1
M4/E/160/C	-5.7
M4/E/160/CC	2.5
M4/U/130/C	6.1
M4/U/130/CC	-3.9
M4/U/160/C	3.3
M4/U/160/CC	-5.1
M4/G/130/C	-4.2
M4/G/130/CC	-11.4
M4/G/160/C	-2.1
M4/G/160/CC	-4.2

Στο σχήμα 6.73 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες των δοκιμών του μίγματος M4 μετά τον υπολογισμό του διαχωρισμού των αδρανών.



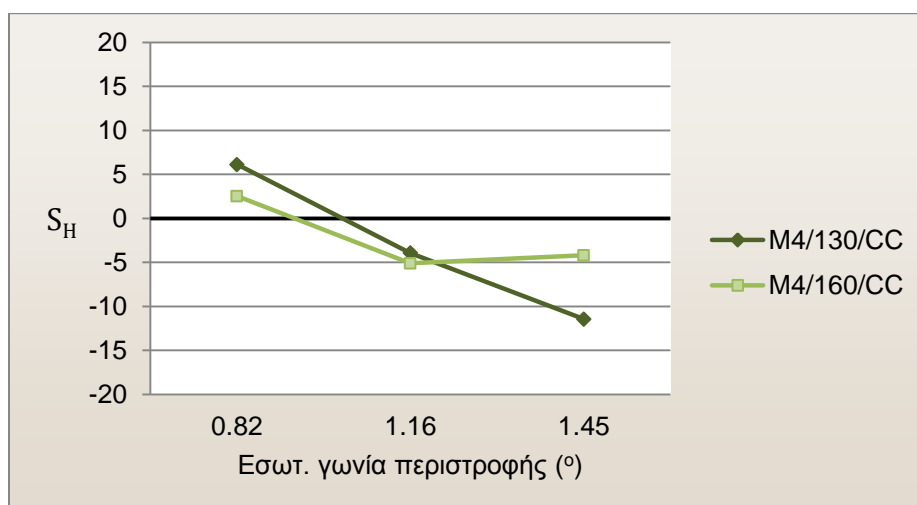
Σχήμα 6.73 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (δοκίμια M4)

Στο διάγραμμα του σχήματος 6.74 παρουσιάζεται η επίδραση της γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στα δοκίμια τα οποία δεν έχουν υποστεί πυρηνοληψία, ενώ η ίδια διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 6.75 για δοκίμια που προέρχονται από πυρηνοληψία.



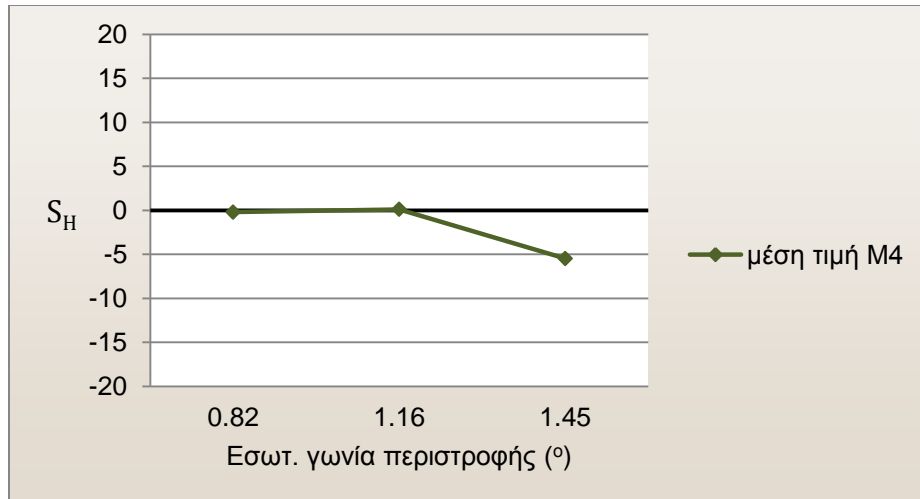
Σχήμα 6.74 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 100 mm)

Παρατηρούμε ότι σε όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας – γωνίας η εργαστηριακή συμπύκνωση παράγει δοκίμια με μεγάλη ομοιογένεια, γεγονός που εκφράζεται από τις τιμές της παραμέτρου S_H , οι οποίες κυμαίνονται από 2.2% έως 6.1%, κατά απόλυτη τιμή. Εξαιρεση αποτελεί ο συνδυασμός θερμοκρασίας 160°C, γωνίας περιστροφής 1.45° και αρχικής διαμέτρου 150 mm.

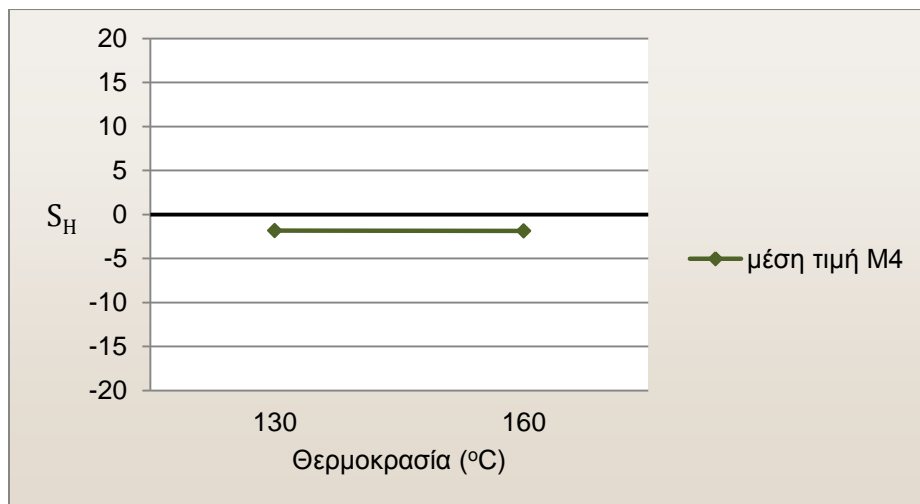


Σχήμα 6.75 Επιρροή παραμέτρων συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4 αρχικής διαμέτρου 150 mm)

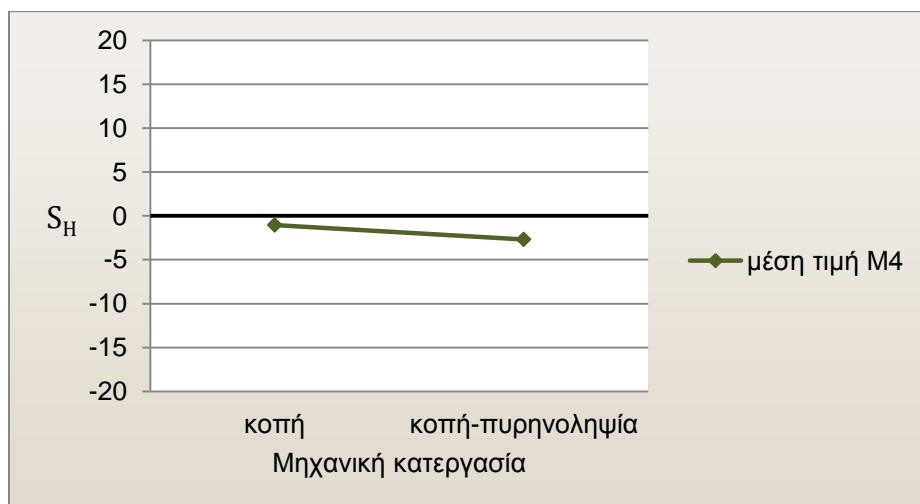
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η μέση επιρροή των τριών μεταβλητών παραμέτρων των δοκιμίων, στις τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού S_H .



Σχήμα 6.76 Μέση επιρροή εσωτερικής γωνίας περιστροφής στο διαχωρισμό (δοκίμια M4)



Σχήμα 6.77 Μέση επιρροή θερμοκρασίας συμπύκνωσης στο διαχωρισμό (δοκίμια M4)



Σχήμα 6.78 Μέση επιρροή μηχανικής κατεργασίας στο διαχωρισμό (δοκίμια M4)

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα για το μίγμα M4, οποιοσδήποτε συνδυασμός παραμέτρων συμπύκνωσης και αρχικής διαμέτρου οδηγεί σε ομοιογενή δοκίμια, όπως διαπιστώνεται από τις μέσες τιμές της παραμέτρου S_H , οι οποίες είναι της τάξης του |5|%.

6.1.4.4 Στατιστική Ανάλυση

Εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα της εσωτερικής γωνίας περιστροφής, της θερμοκρασίας, της μηχανικής κατεργασίας, καθώς και των συνδυασμών τους ανά δύο, στα αποτελέσματα της παραμέτρου διαχωρισμού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο γενικό γραμμικό μοντέλο (*general linear model - GLM*):

Παράμετρος διαχωρισμού $S_H = f$ (γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία, γωνία περιστροφής × θερμοκρασία, θερμοκρασία × μηχ. κατεργασία, γωνία περιστροφής × μηχ. κατεργασία)

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κάθε ασφαλτόμιγμα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες, όπου οι στατιστικά σημαντικές παράμετροι (για τιμές p μικρότερες του 0.05) έχουν σημειωθεί με αστερίσκο.

Πίνακας 6.19 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	2012.635 ^a	10	201.264	7.773	.119
Γωνία περιστροφής	82.822	2	41.411	1.599	.385
Θερμοκρασία	17.763	1	17.763	.686	.495
Μηχανική κατεργασία	244.803	1	244.803	9.455	.091
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	855.872	2	427.936	16.527	.057
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	196.830	1	196.830	7.602	.110
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	279.582	2	139.791	5.399	.156
Σφάλμα	51.785	2	25.893		
Σύνολο	2064.420	12			

a. $R^2 = .975$ (Adjusted $R^2 = .849$)

* Στατιστικά σημαντική παράμετρος

Πίνακας 6.20 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	444.213 ^a	10	44.421	.652	.737
Γωνία περιστροφής	197.607	2	98.803	1.451	.408
Θερμοκρασία	9.363	1	9.363	.138	.746
Μηχανική κατεργασία	1.333	1	1.333	.020	.902
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	150.327	2	75.163	1.104	.475
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	2.083	1	2.083	.031	.877
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία	41.687	2	20.843	.306	.766
Σφάλμα	136.167	2	68.083		
Σύνολο	580.380	12			

a. $R^2 = .765$ (Adjusted $R^2 = .408$)

* Στατιστικά σημαντικό

Πίνακας 6.21 Ανάλυση διακύμανσης της παραμέτρου διαχωρισμού (δοκίμια M4)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p
Μοντέλο	342.995 ^a	10	34.300	12.217	.078
Γωνία περιστροφής	78.662	2	39.331	14.009	.067
Θερμοκρασία	.008	1	.008	.003	.963
Μηχανική κατεργασία	7.841	1	7.841	2.793	.237
Γωνία Περιστροφής × Θερμοκρασία	33.455	2	16.727	5.958	.144
Θερμοκρασία × Μηχ. κατεργασία	2.167	1	2.167	.772	.472
Γωνία Περιστροφής × Μηχ. κατεργασία*	179.422	2	89.711	31.954	.030
Σφάλμα	5.615	2	2.807		
Σύνολο	348.610	12			

a. $R^2 = .984$ (Adjusted $R^2 = .903$)

* Στατιστικά σημαντικό

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καμία από τις παραμέτρους δεν αποδείχτηκε στατιστικά σημαντική στο διαχωρισμό. Εξαίρεση αποτελεί ο συνδυασμός γωνίας περιστροφής – μηχανικής κατεργασίας, ο οποίος αποτελεί στατιστικά σημαντικό παράγοντα στο διαχωρισμό των αδρανών στο ασφαλτόμιγμα M4. Άλλωστε, όπως ήδη διαπιστώθηκε, ανεξαρτήτως των τιμών των μεταβλητών παραμέτρων η γυροσκοπική μέθοδος τα παράγει δοκίμια με μεγάλη ομοιογένεια στην χωρική κατανομή των αδρανών.

6.2 Πυρήνες οδοστρώματος

Στην ενότητα αυτή διερευνήθηκε η προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου, συγκρίνοντας την εσωτερική δομή των πυρήνων και των εργαστηριακών δοκιμίων, αντίστοιχων ασφαλτομιγμάτων.

6.2.1 Σημεία επαφής

6.2.1.1 Ασφαλτόμιγμα M1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.22 Σημεία επαφής (πυρήνες M1)

Κωδικός πυρήνα	Σημεία επαφής
M1/1/F	84
M1/12/F	98
M1/13/F	86
M1/14/F	109
M1/15/F	94
M1/16/F	89
M1/20/F	65

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων των σημείων επαφής στους πυρήνες M1 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.23 και 6.24.

Πίνακας 6.23 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M1)

		<i>πυρήνες M1</i>
<i>N</i>		7
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	89.286
	<i>Std. Deviation</i>	13.635
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.206
	<i>Positive</i>	.119
	<i>Negative</i>	-.206
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.546
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>		<u>.927</u>

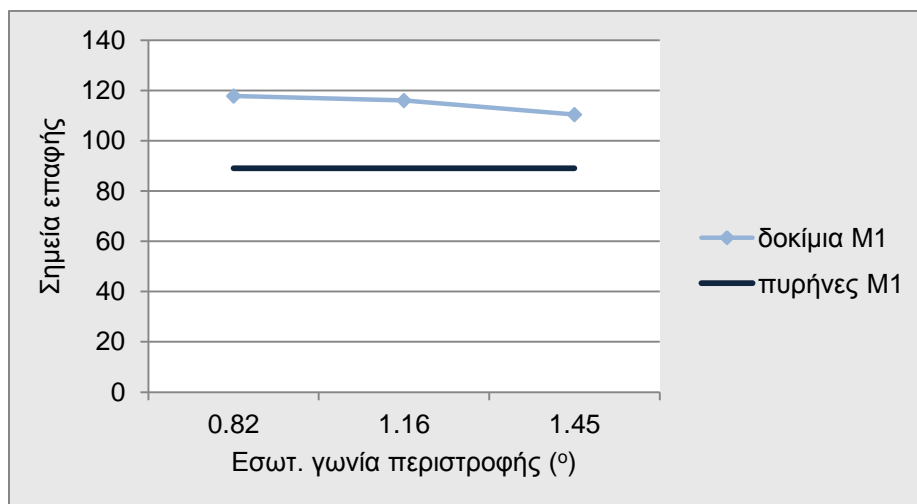
a. Test distribution is Normal.

Πίνακας 6.24 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M1)

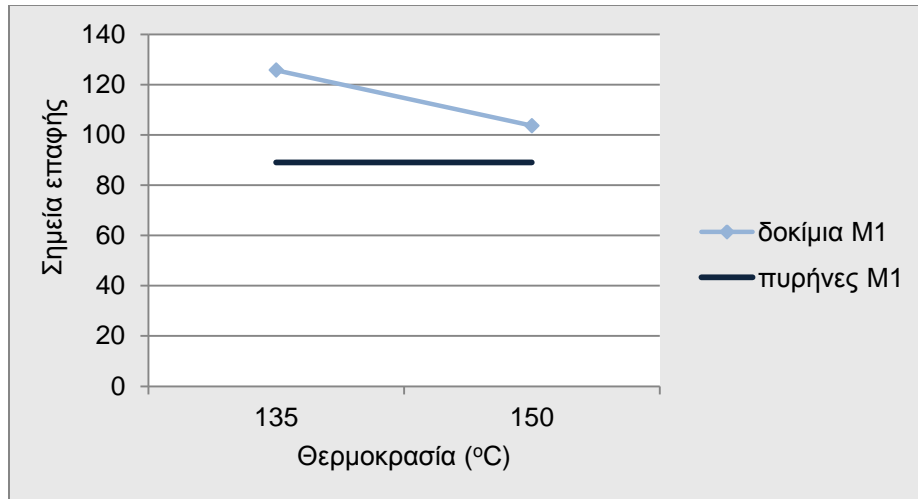
	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
πυρήνες M1	7	89.29	13.63	65.00	109.00

Το παρατηρηθέν επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] έχει την τιμή 0.927, επομένως συμπεραίνουμε ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των σημείων επαφής για τους πυρήνες θα είναι ο μέσος όρος με τιμή 89.

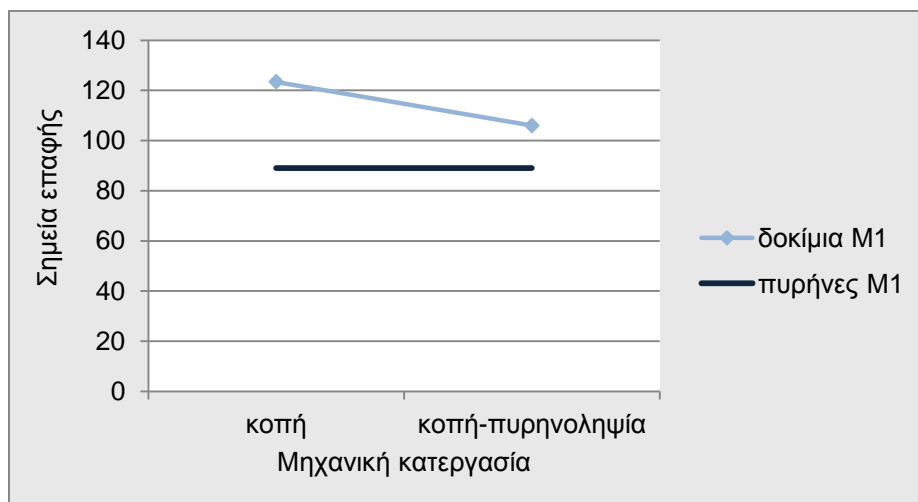
Στα ακόλουθα διαγράμματα αντιπαραβάλλονται οι μέσες τιμές των σημείων επαφής των δοκιμών με την μέση τιμή των σημείων επαφής των πυρήνων, για κάθε μεταβλητή παράμετρο. Εξετάζονται ξεχωριστά για κάθε παράμετρο (εσωτερική γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επί τόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.79 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμών – πυρήνων M1 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.80 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης



Σχήμα 6.81 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, η εργαστηριακή συμπύκνωση παράγει μίγματα με περισσότερες επαφές μεταξύ των αδρανών. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι δοκίμια συμπυκνωμένα με γωνία περιστροφής 1.45° και θερμοκρασία 150°C τα οποία προέρχονται από πυρηνοληψία προσεγγίζουν με τη μικρότερη απόκλιση τη δομή των πυρήνων.

6.2.1.2 Ασφαλτόμιγμα M2

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M2 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.25 Σημεία επαφής (πυρήνες M2)

Κωδικός πυρήνα	Σημεία επαφής
M2/27/F	79
M2/29/F	102
M2/32/F	103
M2/37/F	90
M2/38/F	97
M2/40/F	123

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων των σημείων επαφής στους πυρήνες M2 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.26 και 6.27.

Πίνακας 6.26 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M2)

		πυρήνες M2
<i>N</i>		6
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	99.000
	<i>Std. Deviation</i>	14.738
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.226
	<i>Positive</i>	.226
	<i>Negative</i>	-.115
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.554
<u>Asymp. Sig. (2-tailed)</u>		<u>.918</u>

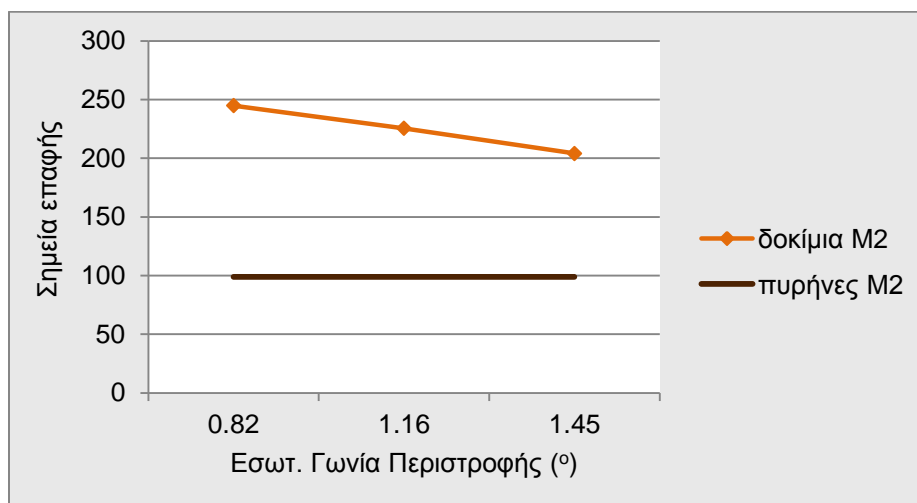
a. Test distribution is Normal.

Πίνακας 6.27 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M2)

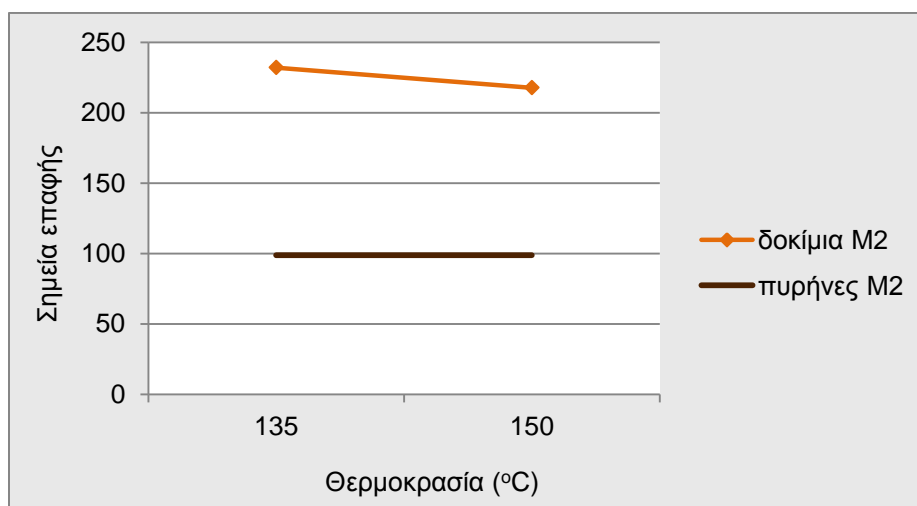
	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
πυρήνες M2	6	99.00	14.74	79.00	123.00

Το παρατηρηθέν επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] έχει την τιμή 0.918, επομένως συμπεραίνουμε ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των σημείων επαφής για τους πυρήνες θα είναι ο μέσος όρος με τιμή 99.

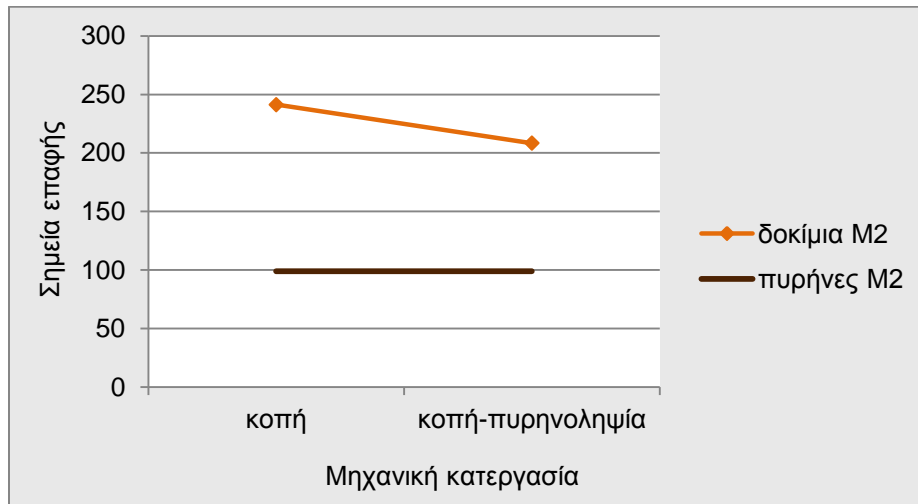
Μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων εξετάζονται για κάθε παράμετρο (εσωτ. γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επιτόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.82 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.83 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης



Σχήμα 6.84 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στην γυροσκοπική μέθοδο συμπύκνωσης και την επιτόπου συμπύκνωση, με τη γυροσκοπική μέθοδο να παράγει δοκίμια με αρκετά περισσότερα σημεία επαφής. Η συμπύκνωση δοκιμίου αρχικής διαμέτρου 150 mm με εσωτερική γωνία περιστροφής 1.45° και σε θερμοκρασία 150°C είναι η πλησιέστερη προσέγγιση της επιτόπου, διαπίστωση όμοια με αυτή που προέκυψε και στο μίγμα M1.

6.2.1.3 Ασφαλτόμιγμα M4

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M4 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.28 Σημεία επαφής (πυρήνες M4)

Κωδικός πυρήνα	Σημεία επαφής
M4/7/F	67
M4/8/F	62
M4/13/F	100
M4/14/F	89
M4/17/F	69
M4/18/F	80
M4/21/F	82

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων των σημείων επαφής στους πυρήνες M2 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.29 και 6.30.

Πίνακας 6.29 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (σημεία επαφής πυρήνων M4)

		<i>πυρήνες M4</i>
<i>N</i>		7
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	78.429
	<i>Std. Deviation</i>	13.427
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.187
	<i>Positive</i>	.187
	<i>Negative</i>	-.118
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.496
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>		.967

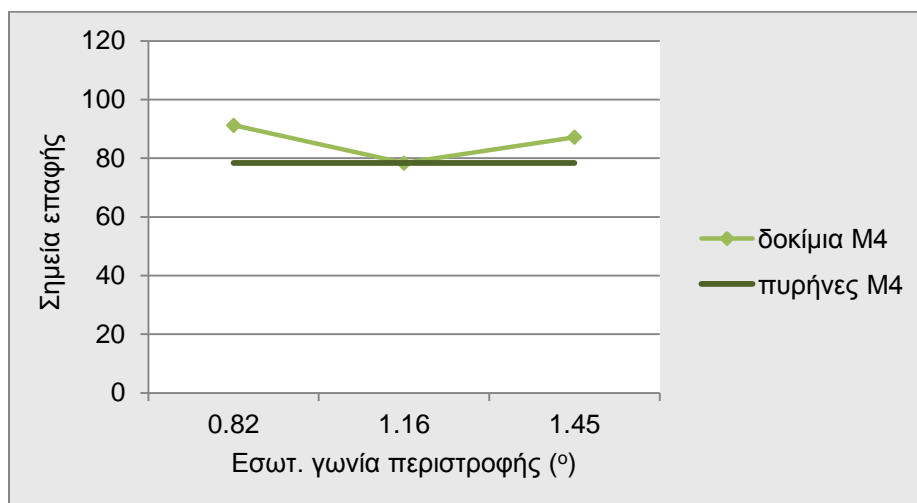
a. Test distribution is Normal.

Πίνακας 6.30 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (σημεία επαφής πυρήνων M4)

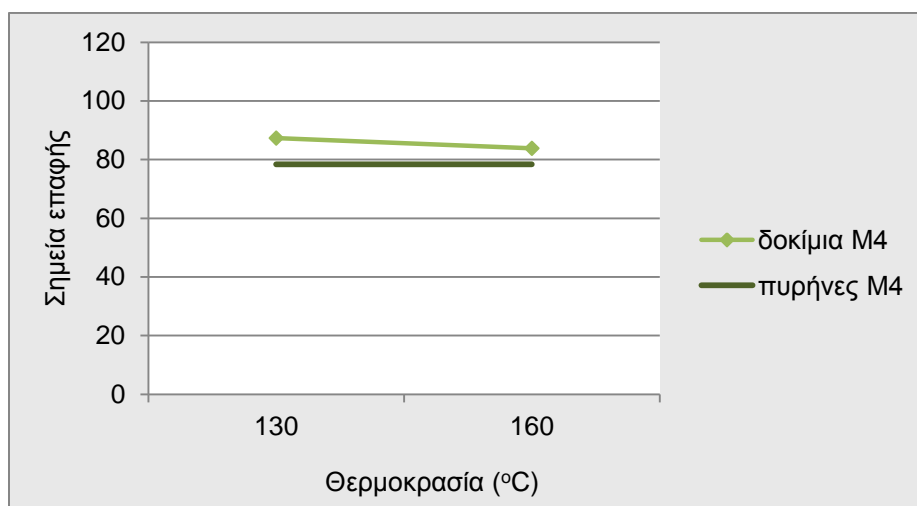
	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
<i>πυρήνες M4</i>	7	78.43	13.43	62.00	100.00

Το παρατηρηθέν επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] έχει την τιμή 0.918, επομένως συμπεραίνουμε ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των σημείων επαφής για τους πυρήνες θα είναι ο μέσος όρος με τιμή 78.

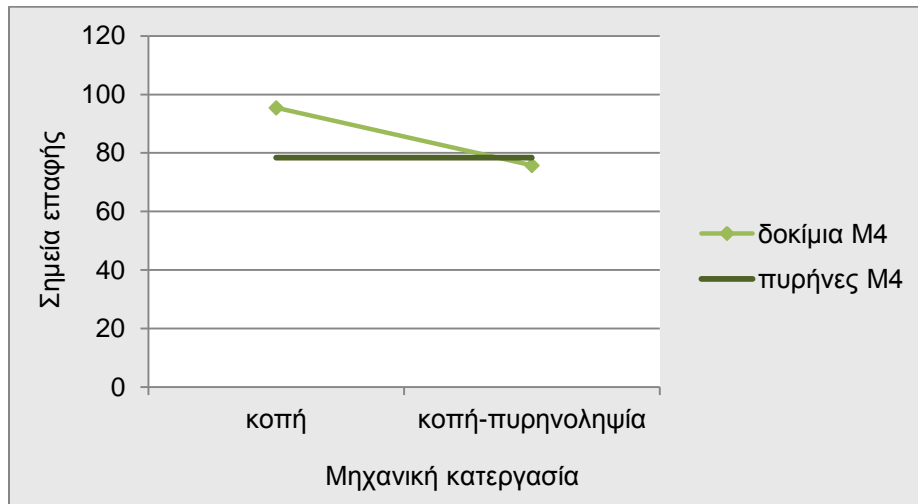
Μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων εξετάζονται για κάθε παράμετρο (εσωτ. γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επιτόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.85 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.86 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης



Σχήμα 6.87 Σύγκριση σημείων επαφής δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Με βάση τα ανωτέρω διαγράμματα, η γυροσκοπική μέθοδος και η επιτόπου συμπίκνωση παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα στα σημεία επαφής στο ασφαλτόμιγμα M4. Ωστόσο, η καλύτερη προσέγγιση της επιτόπου συμπίκνωσης επιτυγχάνεται για συμπίκνωση δοκιμίου με γωνία περιστροφής 1.16° και θερμοκρασία 160°C το οποίο προέρχεται από πυρηνοληψία.

6.2.2 Προσανατολισμός

6.2.2.1 Ασφαλτόμιγμα M1

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.31 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M1)

Κωδικός πυρήνα	δ
M1/1/F	87
M1/12/F	94
M1/13/F	71
M1/14/F	94
M1/15/F	80
M1/16/F	71
M1/20/F	118

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων προσανατολισμού (παράμετρος δ) στους πυρήνες M1 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.32 και 6.33.

Πίνακας 6.32 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M1)

		δ (πυρήνες M1)
<i>N</i>		7
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	88.1429
	<i>Std. Deviation</i>	16.54719
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.175
	<i>Positive</i>	.175
	<i>Negative</i>	-.150
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.462
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>		<u>.983</u>

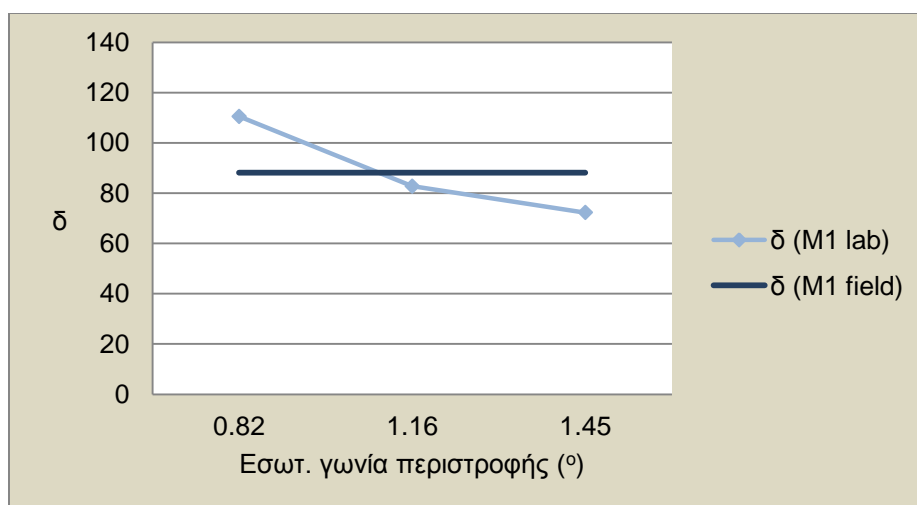
a. Test distribution is Normal.

Πίνακας 6.33 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M1)

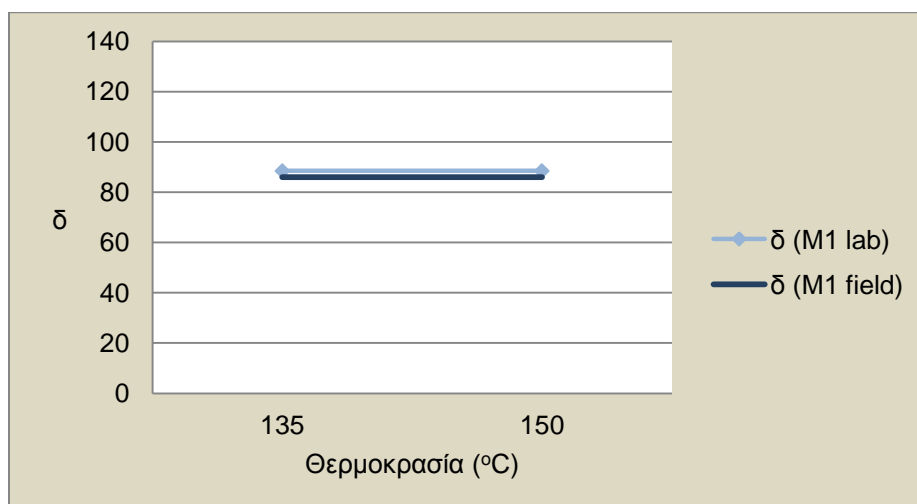
	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
δ (πυρήνες M1)	7	88.1429	16.54719	71.00	118.00

Το παρατηρηθέν επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] και στις δύο περιπτώσεις παίρνει τιμές κοντά στο 1, επομένως τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των δ και A για τους πυρήνες θα είναι οι μέσες τιμές τους, 88 και 6.14, αντίστοιχα. Αξίζει να τονιστεί ότι η μέση γωνία προσανατολισμού των πυρήνων προέκυψε 88° , που σημαίνει ότι τα αδρανή προσανατολίζονται κατά ομόκεντρη διεύθυνση λόγω της επιτόπου συμπύκνωσης.

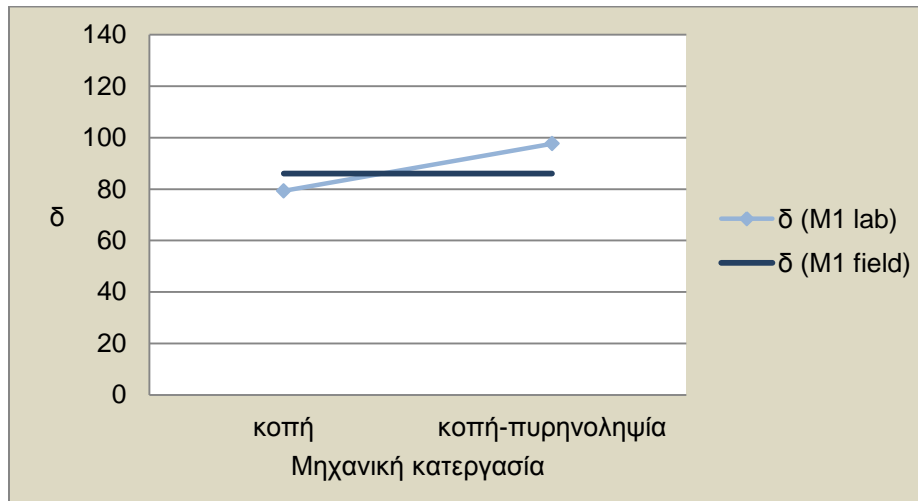
Στα ακόλουθα διαγράμματα εξετάζονται ξεχωριστά για κάθε παράμετρο (εσωτ. γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επιτόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.88 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.89 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης



Σχήμα 6.90 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M1 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Από τα διαγράμματα των σχημάτων 6.88, 6.89 και 6.90 διαπιστώνεται ότι ο προσανατολισμός των αδρανών στα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τον προσανατολισμό στους πυρήνες οδοστρώματος. Η βέλτιστη προσέγγιση, όμως, επιτυγχάνεται για συμπύκνωση με εσωτερική γωνία περιστροφής 1.16° στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας. Άλλωστε η ανάλυση διακύμανσης δεν κατέδειξε τη θερμοκρασία ως στατιστικά σημαντικό παράγοντα.

6.2.2.2 Ασφαλτόμιγμα M2

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M2 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.34 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M2)

Κωδικός πυρήνα	δ
M2/27/F	82
M2/29/F	106
M2/32/F	76
M2/37/F	112
M2/38/F	74
M2/40/F	82

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων προσανατολισμού (παράμετρος δ) στους πυρήνες M2 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.35 και 6.36. Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] και στις δύο περιπτώσεις παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 0.05. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των παραμέτρων προσανατολισμού δ και A για τους πυρήνες θα είναι οι μέσες τιμές τους, 89 και 6.17, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.35 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M2)

		δ (πυρήνες M2)
<i>N</i>		6
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	88.6667
	<i>Std. Deviation</i>	16.18229
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.326
	<i>Positive</i>	.326
	<i>Negative</i>	-.191
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.800
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>		.545

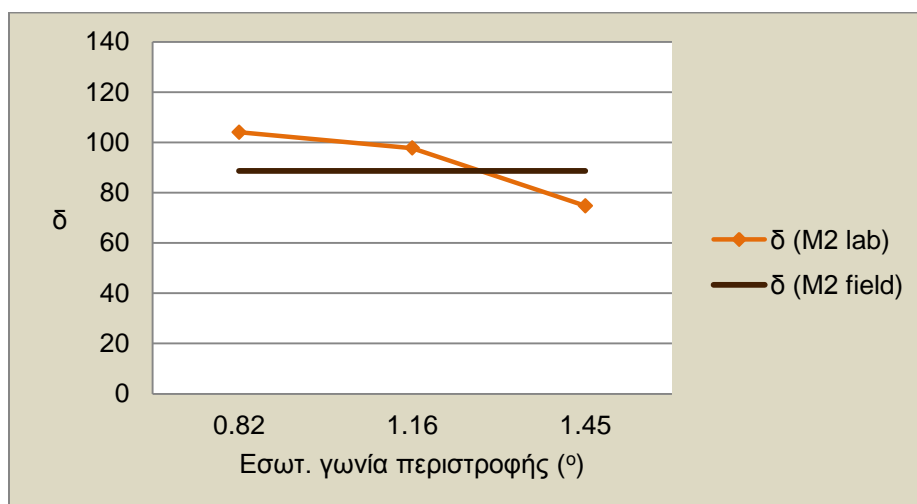
a. Test distribution is Normal.

Πίνακας 6.36 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M2)

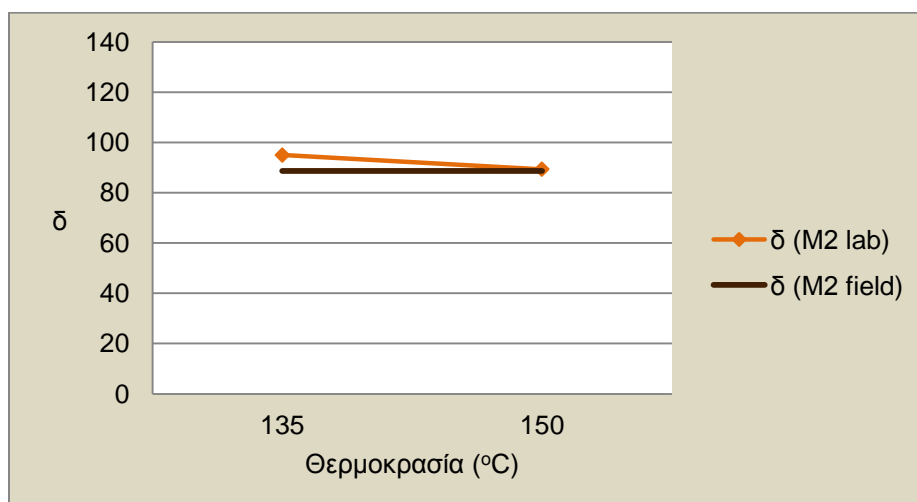
	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
δ (πυρήνες M2)	6	88.6667	16.18229	74.00	112.00

Η μέση γωνία προσανατολισμού των πυρήνων προέκυψε 89°, που σημαίνει ότι τα αδρανή προσανατολίζονται κατά ομόκεντρη διεύθυνση λόγω της επιτόπου συμπύκνωσης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στους πυρήνες του μίγματος M1.

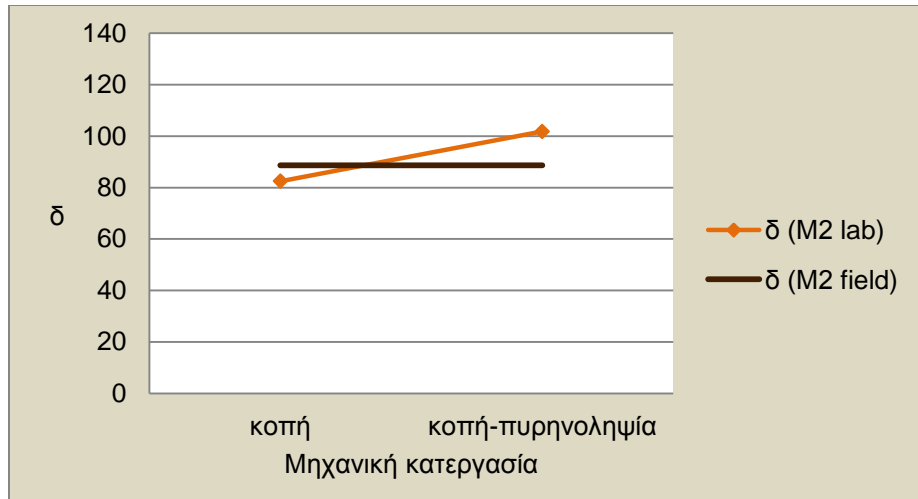
Μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων εξετάζονται για κάθε παράμετρο (εσωτ. γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επιτόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.91 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.92 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης



Σχήμα 6.93 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M2 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, διαπιστώνεται ότι στο μίγμα M2 ο προσανατολισμός των αδρανών στα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου παρουσιάζει ομοιότητα με τον προσανατολισμό στους πυρήνες οδοστρώματος. Η βέλτιστη προσέγγιση των δύο μεθόδων συμπύκνωσης επιτυγχάνεται για συμπύκνωση με εσωτερική γωνία περιστροφής 1.16° και θερμοκρασία 150°C στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 100 mm. Παρόμοιο συμπέρασμα προέκυψε και στην ανάλυση των πυρήνων M1.

6.2.2.3 Ασφαλτόμιγμα M4

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας των πυρήνων του ασφαλτομίγματος M4 δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.37 Γωνία προσανατολισμού (πυρήνες M4)

Κωδικός πυρήνα	δ
M4/7/F	81
M4/8/F	94
M4/13/F	77
M4/14/F	112
M4/17/F	90
M4/18/F	99
M4/21/F	80

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων προσανατολισμού (παράμετρος δ) στους πυρήνες M4 παρουσιάζονται στους πίνακες 6.38 και 6.39.

Πίνακας 6.38 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M4)

		δ (πυρήνες M4)
<i>N</i>		7
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	90.4286
	<i>Std. Deviation</i>	12.44799
	<i>Most Extreme Differences</i>	
	<i>Absolute</i>	.204
	<i>Positive</i>	.204
	<i>Negative</i>	-.140
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.540
<u>Asymp. Sig. (2-tailed)</u>		<u>.932</u>

a. Test distribution is Normal.

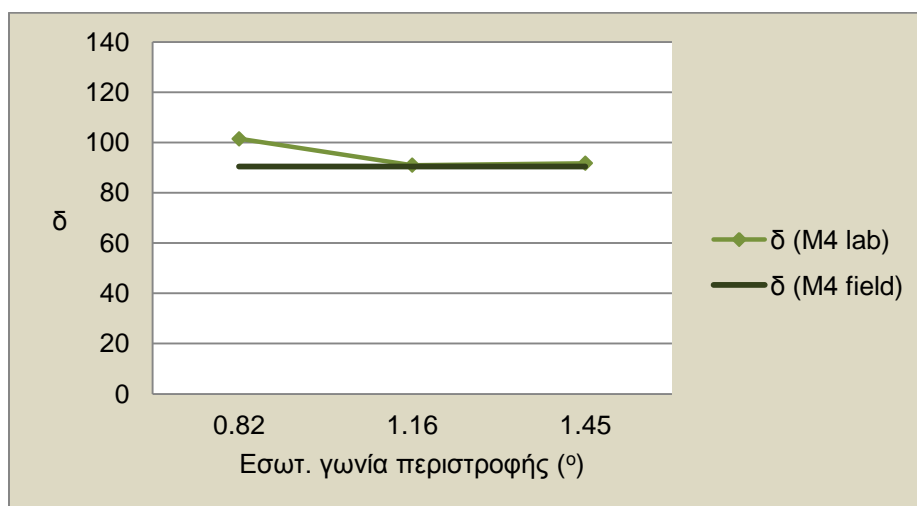
Πίνακας 6.39 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (γωνία προσανατολισμού πυρήνων M4)

	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
δ (πυρήνες M4)	7	90.4286	12.44799	77.00	112.00

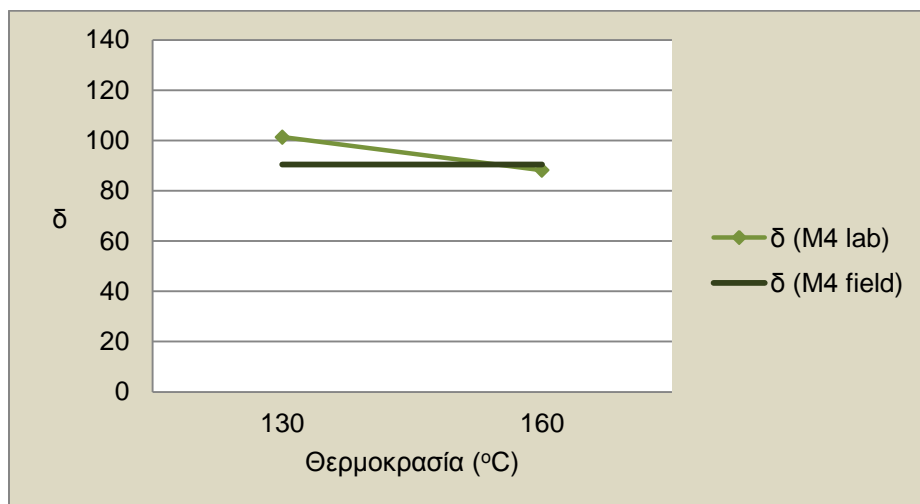
Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] και στις δύο περιπτώσεις παίρνει τιμές μεγαλύτερες κοντά στην τιμή 1, επομένως ισχύει η υπόθεση κανονικότητας των δεδομένων. Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμή των παραμέτρων προσανατολισμού δ και A για τους πυρήνες θα είναι οι μέσες τιμές τους, 90 και 7.8, αντίστοιχα.

Αξίζει να τονιστεί ότι η μέση γωνία προσανατολισμού των πυρήνων προέκυψε 90° , που σημαίνει ότι τα αδρανή προσανατολίζονται κατά ομόκεντρη διεύθυνση λόγω της επιτόπου συμπύκνωσης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στους πυρήνες των μιγμάτων M1 και M2, όπου η γωνία προσανατολισμού είναι περίπου ίση με 90° . Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η επιτόπου συμπύκνωση προκαλεί ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών.

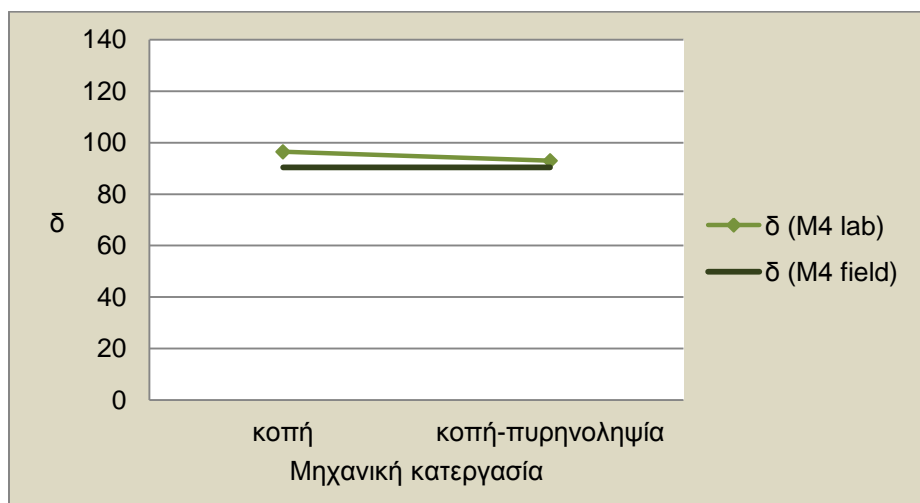
Μέσω των παρακάτω διαγραμμάτων εξετάζονται για κάθε παράμετρο (εσωτ. γωνία περιστροφής, θερμοκρασία, μηχ. κατεργασία) οι τιμές στις οποίες παρατηρείται σύγκλιση της γυροσκοπικής μεθόδου και της επιτόπου συμπύκνωσης.



Σχήμα 6.94 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο την εσωτερική γωνία περιστροφής



Σχήμα 6.95 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη θερμοκρασία συμπίκνωσης



Σχήμα 6.96 Σύγκριση προσανατολισμού δοκιμίων – πυρήνων M4 με κριτήριο τη μηχανική κατεργασία

Ο προσανατολισμός των αδρανών του μίγματος M4 προσεγγίζει ικανοποιητικά τον προσανατολισμό των αντίστοιχων πυρήνων, όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα των σχημάτων 6.94, 6.95 και 6.96. Η συμπίκνωση με εσωτερικές γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45° και θερμοκρασία 160°C προσεγγίζει επακριβώς τον προσανατολισμό στην επιτόπου συμπίκνωση, ανεξαρτήτως αρχικής διαμέτρου των δοκιμίων.

6.2.3 Διαχωρισμός

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της εικόνας των πυρήνων όλων των ασφαλτομιγμάτων, σχετικά με την παράμετρο διαχωρισμού S_H , παρουσιάζονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Πίνακας 6.40 Παράμετρος διαχωρισμού (πυρήνες M1, M2, M4)

Κωδικός πυρήνα	S_H	Κωδικός πυρήνα	S_H	Κωδικός πυρήνα	S_H
M1/1/F	13.2	M2/27/F	7.9	M4/7/F	2.5
M1/12/F	-4.6	M2/29/F	4.3	M4/8/F	-8.2
M1/13/F	-2.9	M2/32/F	4.6	M4/13/F	3.7
M1/14/F	3.9	M2/37/F	-4.2	M4/14/F	-3.9
M1/15/F	1.1	M2/38/F	-8.6	M4/17/F	5.8
M1/16/F	-3.3	M2/40/F	6.0	M4/18/F	-8.6
M1/20/F	-15			M4/21/F	7.7

Τα αποτελέσματα του ελέγχου κανονικότητας των δεδομένων διαχωρισμού των πυρήνων δίνονται στους πίνακες 6.41 και 6.42.

Πίνακας 6.41 Τεστ Kolmogorov-Smirnov ελέγχου κανονικότητας δεδομένων (παράμετρος διαχωρισμού πυρήνων M1, M2, M4)

		S_H (πυρήνες M1)	S_H (πυρήνες M2)	S_H (πυρήνες M4)
<i>N</i>		7	6	7
<i>Normal Parameters^a</i>	<i>Mean</i>	-1.0857	1.6667	-.1429
	<i>Std. Deviation</i>	8.63972	6.52677	6.69748
<i>Most Extreme Differences</i>	<i>Absolute</i>	.199	.323	.225
	<i>Positive</i>	.155	.170	.171
	<i>Negative</i>	-.199	-.323	-.225
<i>Kolmogorov-Smirnov Z</i>		.527	.792	.595
<i>Asymp. Sig. (2-tailed)</i>		.944	.557	.871

a. Test distribution is Normal.

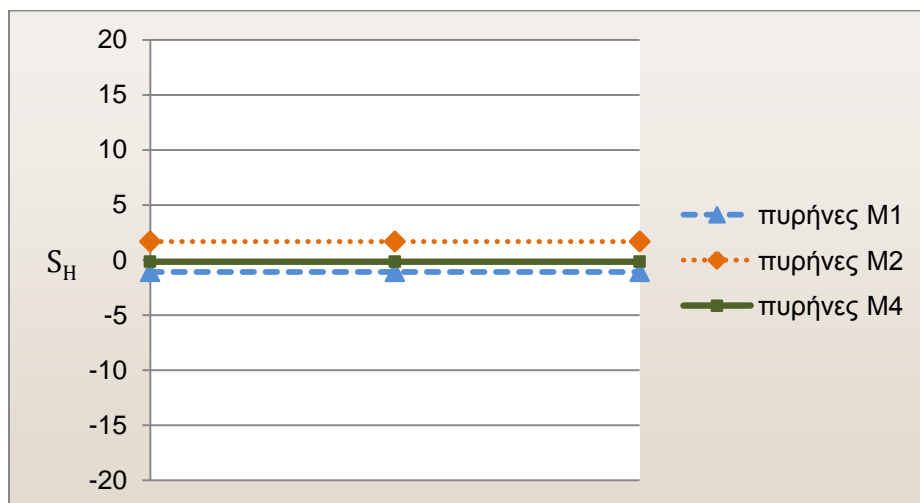
Πίνακας 6.42 Περιγραφικά στατιστικά δεδομένα (παράμετρος διαχωρισμού πυρήνων M1, M2, M4)

	<i>N</i>	<i>Mean</i>	<i>Std. Deviation</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>
S_H (πυρήνες M1)	7	-1.0857	8.63972	-15.00	13.20
S_H (πυρήνες M2)	6	1.6667	6.52677	-8.60	7.90
S_H (πυρήνες M4)	7	-.1429	6.69748	-8.60	7.70

Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας [Asymp. Sig. (2-tailed)] στους πυρήνες των τριών μιγμάτων παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 0.05, επομένως δεν απορρίπτεται η υπόθεση κανονικής κατανομής των δεδομένων της παραμέτρου διαχωρισμού S_H . Συνεπώς, ως αντιπροσωπευτική τιμές της παραμέτρου S_H των πυρήνων των μιγμάτων M1, M2 και M4, θα είναι οι μέσες τιμές, -1.1, 1.7 και -0.1, αντίστοιχα.

Να σημειωθεί ότι οι τιμές κοντά στο μηδέν της παραμέτρου S_H των πυρήνων, όπως αυτές προέκυψαν μετά τη στατιστική ανάλυση, υποδηλώνουν ότι κατά την επιτόπου συμπύκνωση δεν παρατηρείται φαινόμενο διαχωρισμού των αδρανών.

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται σχηματικά η μέση τιμή της παραμέτρου κάθε μίγματος (σχήμα 6.97).



Σχήμα 6.97 Μέσες τιμές της παραμέτρου διαχωρισμού (πυρήνες M1, M2, M4)

Με δεδομένο ότι η ανάλυση των εργαστηριακών δοκιμών κατέδειξε την ικανότητα της γυροσκοπικής μεθόδου να συμπυκνώνει δοκίμια με μεγάλη ομοιογένεια χωρικής κατανομής των αδρανών ανεξαρτήτως εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων, συμπεραίνουμε ότι όσον αφορά το διαχωρισμό, η γυροσκοπική μέθοδος προσεγγίζει την επιτόπου συμπύκνωση σε ικανοποιητικό βαθμό.

7 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκε η επίδραση μεταβλητών παραμέτρων στην εσωτερική δομή εργαστηριακών δοκιμίων της γυροσκοπικής μεθόδου, καθώς και η σύνδεση της γυροσκοπικής και της επιτόπου συμπύκνωσης.

Χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία ανάλυσης δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων ασφαλτομίγματος για το χαρακτηρισμό της εσωτερικής δομής τους, μέσω των σημείων επαφής, του προσανατολισμού και του διαχωρισμού. Από την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

7.1 Σημεία επαφής

- Η αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής έδειξε να μειώνει τις επαφές μεταξύ των αδρανών στα μίγματα M1 και M2, ενώ στο μίγμα M4 παρουσιάστηκε αρχική μείωση και κατόπιν αύξηση των επαφών. Η επιρροή της εσωτερικής γωνίας περιστροφής αποδείχτηκε στατιστικά σημαντική όσον αφορά στα σημεία επαφής των δοκιμίων του μίγματος M2.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης παρατηρήθηκε τάση μείωσης των σημείων επαφής, η οποία αποδείχτηκε στατιστικά σημαντική για τα δοκίμια του μίγματος M1.

Κατά τη σύγκριση των δοκιμίων διαμέτρου 100 mm με τα αντίστοιχα δοκίμια ίδιας διαμέτρου που προέρχονται από πυρηνοληψία, παρατηρήθηκε έντονη διαφοροποίηση των επαφών. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε μείωση των σημείων επαφής στα δοκίμια που αποτελούν προϊόν πυρηνοληψίας δοκιμίων διαμέτρου 150 mm. Η επίδραση αυτή αποδείχτηκε στατιστικά σημαντική για όλα τα μίγματα.

- Συγκρινόμενα με τους πυρήνες, τα εργαστηριακά δοκίμια παρουσίασαν γενικά περισσότερα σημεία επαφής σε όλα τα μίγματα. Προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης επιτεύχθηκε για συμπύκνωση δοκιμίων αρχικής διαμέτρου 150 mm σε υψηλή θερμοκρασία.

7.2 Προσανατολισμός

- Η αύξηση της εσωτερικής γωνίας περιστροφής οδηγεί σε στατιστικά σημαντική μείωση της γωνίας προσανατολισμού στα μίγματα M1 και M2. Στο μίγμα M4 δεν παρατηρήθηκε σαφής τάση. Επίσης η τάση προσανατολισμού προς συγκεκριμένη γωνία ήταν εντονότερη στις γωνίες περιστροφής 1.16° και 1.45° .

Η θερμοκρασία έδειξε να μην επηρεάζει σημαντικά τον προσανατολισμό των αδρανών, προκαλώντας μικρές μεταβολές στην μέση γωνία προσανατολισμού, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τη στατιστική ανάλυση. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, μεγαλύτερη ομοιογένεια προσανατολισμού σε υψηλές θερμοκρασίες $150/160^\circ\text{C}$.

Διαφοροποίηση παρατηρήθηκε μεταξύ των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 100 mm και των δοκιμών αρχικής διαμέτρου 150 mm. Η μηχανική κατεργασία αποδείχτηκε στατιστικά σημαντική παράμετρος επίδρασης στον προσανατολισμό όσον αφορά στα μίγματα M1 και M2. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στα δοκίμια που προέρχονται από πυρηνοληψία παρατηρήθηκε προσανατολισμός των αδρανών προς μεγαλύτερη γωνία. Ακόμη, η ομοιογένεια προσανατολισμού ήταν εντονότερη στα δοκίμια αρχικής διαμέτρου 150 mm, υποδηλώνοντας ότι κατά τη γυροσκοπική συμπύκνωση τα αδρανή στο εξωτερικό τμήμα ενός δοκιμίου προσανατολίζονται περισσότερο τυχαία σε σχέση με το εσωτερικό τμήμα.

- Μέσω της ανάλυσης των πυρήνων διαπιστώθηκε ότι κατά την επιτόπου συμπύκνωση τα αδρανή προσανατολίζονται κατά ομόκεντρη διεύθυνση, δηλαδή σε γωνία 90° . Η σύγκριση με τα εργαστηριακά δοκίμια έδειξε ότι κατά τη συμπύκνωση με γωνία περιστροφής 1.16° και υψηλές θερμοκρασίες ($150/160^\circ\text{C}$), ο προσανατολισμός των αδρανών προσεγγίζει τον προσανατολισμό των αδρανών των πυρήνων.

7.3 Διαχωρισμός

- Γενικά, διαπιστώθηκε ότι μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου συμπυκνώνονται ομοιογενή δοκίμια ως προς τη χωρική κατανομή, ανεξαρτήτως των τιμών των παραμέτρων συμπύκνωσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την στατιστική ανάλυση.

- Η ανάλυση του διαχωρισμού στους πυρήνες έδειξε μεγάλη ομοιογένεια χωρικής κατανομής. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της γυροσκοπικής και της επιτόπου συμπύκνωσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και οι δύο μέθοδοι παράγουν εξίσου ομοιογενή μίγματα.

7.4 Σχόλια

Γενικά παρατηρήθηκε έντονη διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής κατά τη μεταβολή των παραμέτρων συμπύκνωσης στα μίγματα M1 και M2, ασβεστολιθικών αδρανών, με σημαντικότερη τη μηχανική κατεργασία. Το μίγμα M4, που περιλαμβάνει αδρανή σκωρίας παρουσίασε μικρότερη μεταβλητότητα στην εσωτερική δομή συγκριτικά με τα μίγματα M1 και M2. Το γεγονός αυτό είναι πιθανό να οφείλεται είτε στη διαφοροποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αδρανών της σκωρίας σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή είτε λόγω της χρήσης τροποποιημένης ασφάλτου στο μίγμα M4.

Η σύγκριση των πυρήνων με τα εργαστηριακά δοκίμια έδειξε ότι η συμπύκνωση σε υψηλή θερμοκρασία, της τάξεως των 150°C και εσωτερική γωνία περιστροφής 1.16°, γωνία η οποία προτείνεται από τα αμερικανικά πρότυπα, προσεγγίζει καλύτερα τις συνθήκες της επιτόπου συμπύκνωσης. Όσον αφορά το είδος της μηχανικής κατεργασίας, τα αποτελέσματα δεν ήταν καθοριστικά.

Στη παρούσα διερεύνηση, βρέθηκε ότι ο προσανατολισμός των αδρανών στους πυρήνες είναι κατά ομόκεντρη διεύθυνση (γωνία 90°), επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα προγενέστερων διεθνών μελετών. Ωστόσο, όσον αφορά στον προσανατολισμό, σε αντίθεση με αποτελέσματα αντίστοιχων ερευνών σχετικά με την προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης, η οποία επετεύχθη με εξωτερική γωνία περιστροφής 1.50°, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι η καλύτερη προσέγγιση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας εσωτερική γωνία περιστροφής 1.16° (αντίστοιχη εξωτερική γωνία 1.25°), καθώς και υψηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης, στοιχείο το οποίο δεν έχει διερευνηθεί συστηματικά μέχρι στιγμής.

Η μελέτη του διαχωρισμού έδειξε πως κατά τη γυροσκοπική μέθοδο και την επιτόπου συμπύκνωση δεν παρουσιάζονται φαινόμενα διαχωρισμού. Σημειώνεται ότι όσον αφορά το φαινόμενο του διαχωρισμού τα αποτελέσματα προγενεστέρων ερευνών έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Επιπροσθέτως, η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης

μειώνει τα σημεία επαφής, διαπίστωση η οποία έρχεται σε αντίθεση με τα ευρήματα αντιστοιχών ερευνών.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, στην προσπάθεια βελτίωσης των ήδη γνωστών μεθοδολογιών, προτάθηκε τροποποίηση της μεθοδολογίας επεξεργασίας της εικόνας ασφαλτομίγματος με σκοπό τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Επιπροσθέτως, εξετάστηκε η επίδραση της μηχανικής κατεργασίας στην εσωτερική δομή, παράμετρος η οποία δεν έχει μελετηθεί εκτενώς σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Επίσης, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας περιστροφής και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής, η οποία μέχρι στιγμής δεν είχε επιχειρηθεί. Παράλληλα, διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα της τεχνικής ανάλυσης εικόνας σε μίγματα αδρανών σκωρίας. Αντίστοιχη ανάλυση δεν έχει πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, πιθανότατα λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζει η επεξεργασία των εικόνων των συγκεκριμένων μιγμάτων, όπου τα σκουρόχρωμα αδρανή δεν διαφοροποιούνται χρωματικά συγκρινόμενα με την άσφαλτο.

Με σκοπό την περαιτέρω μελέτη της εργαστηριακής συμπύκνωσης, προτείνεται η διερεύνηση του συσχετισμού των χαρακτηριστικών της εσωτερικής δομής με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο η μεταβολή των χαρακτηριστικών της εσωτερικής δομής σχετίζεται με τη μηχανική συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων. Επιπλέον, η προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης θα μπορούσε να εξεταστεί και με την ανάλυση δοκιμίων συμπυκνωμένων με άλλες δημοφιλείς εργαστηριακές μεθόδους, όπως για παράδειγμα με μέθοδο Marshall ή με κύλινδρο τύπου Roller Compactor. Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα θα μπορούσαν να προκύψουν μέσω της τρισδιάστατης ανάλυσης της εσωτερικής δομής των δοκιμίων, με χρήση συστήματος Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων Χ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λοΐζος, Α. (2012). Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων. Αθήνα.
- Υφαντής, Β. (2013). Διερεύνηση της συμπύκνωσης ασφαλτομιγμάτων μέσω της γυροσκοπικής μεθόδου. Αθήνα.
- Coenen, A., Kutay, M. E., Sefidmazgi, R. N. and Bahia, H. (2012). "Aggregate structure characterisation of asphalt mixtures using two-dimensional image analysis." *Road Materials and Pavement Design*, 13 (3), 433-454.
- Hunter, A. E., Airey, G. D. and Collop, C. A. (2004). "Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory Compacted Asphalt Specimens." *Transportation Research Record*, 1891, 8-15.
- Kutay, M. E., Arambula, E., Gibson, N. and Youtcheff, J. (2010). "Three-dimensional image processing methods to identify and characterise aggregates in compacted asphalt mixtures." *International Journal of Pavement Engineering*, 11 (6), 511-528.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T. (1999a). "Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis." *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 13 (2), 88-95.
- Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. and Harman, T. (1999b). "Quantifying Laboratory Compaction Effects on the Internal Structure of Asphalt Concrete." *Transportation Research Record*, 1681, 179-185.
- Masad, E., Jandhyala, V., Dasgupta, N., Somadevan, N. and Shashidhar, N. (2002). "Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14 (2), 122-129.
- Sefidmazgi, R. N., Tashman, L. and Bahia, H. (2012). "Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis." *Road Materials and Pavement Design*, 13 (1), 21-37.
- Tashman, L., Masad, E., Peterson, B. and Saleh, H. (2001). "Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of Superpave gyratory compaction to field conditions." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 70, 605-645.

Tashman, L., Masad, E., D'Angelo, J., Bukowski, J. and Harman, T. (2002). "X-ray Tomography to Characterize Air Void Distribution in Superpave Gyratory Compacted Specimens." *International Journal of Pavement Engineering*, 3 (1), 19-28.

Wang, L. B., Frost, J. D. and Lai, J. S. (2004). "Three-Dimensional Digital Representation of Granular Material Microstructure from X-Ray Tomography Imaging." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18 (1), 28-35.

Yue, Z. Q. and Morin, I. (1996). "Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23 (2), 480-489.

Zeleeuw, H. and Papagiannakis, A. (2011). "A volumetrics thresholding algorithm for processing asphalt concrete X-ray CT images." *International Journal of Pavement Engineering*, 12 (6), 543-551.