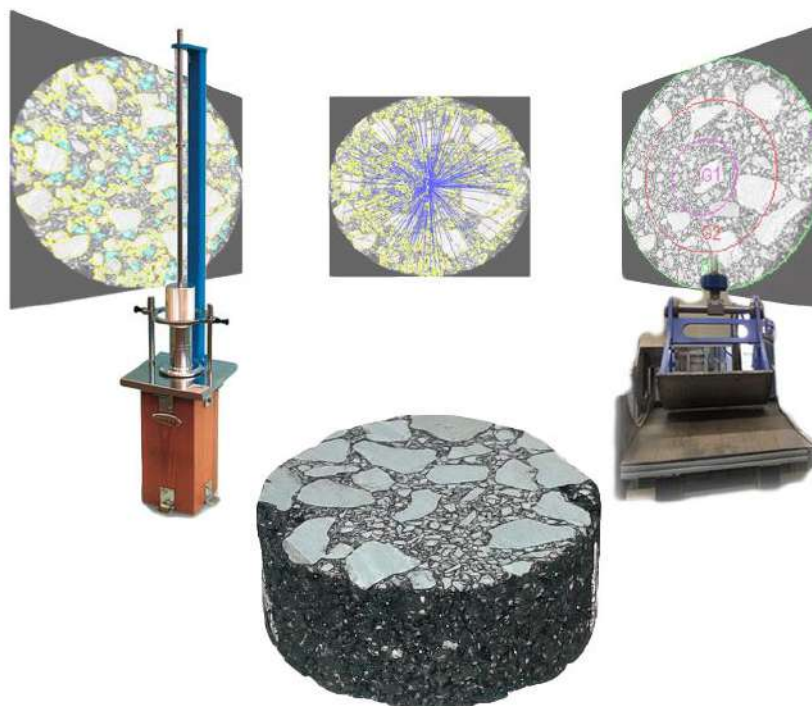




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΣΩ
ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ



ΠΑΝΟΥΡΓΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ, 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου πρόσφερε, καθώς και για τη συμβολή του στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Παναγιώτη Γεωργίου, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τις υποδείξεις του σε καίρια σημεία κατά τη συγγραφή της.

Τέλος, ευχαριστώ τον φίλο και συνάδελφο Σιδέρη Λάζαρο για τις συμβουλές και τη βοήθεια που πρόσφερε κατά την πορεία υλοποίησης της εν λόγω εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δυνατότητα προσομοίωσης της επιτόπου συμπίκνωσης των ασφαλτομιγμάτων στο έργο μέσω της συμπίκνωσης στο εργαστήριο καθιστά απαραίτητη την αναζήτηση της εργαστηριακής μεθόδου που επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων εργαστηριακών μεθόδων και της επιτόπου συμπίκνωσης μπορεί πλέον να επιτευχθεί με σύγχρονες τεχνικές που επικεντρώνονται στην εσωτερική δομή των μιγμάτων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η τεχνική ανάλυσης δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων δοκιμίων συμπυκνωμένων με τις μεθόδους Marshall και με κύλινδρο (τύπου Roller compactor), καθώς και πυρήνων οδοστρώματος με σκοπό τη μελέτη της εσωτερικής τους δομής, η οποία εκφράζεται με τα σημεία επαφής, τον προσανατολισμό και τον διαχωρισμό των αδρανών των ασφαλτομιγμάτων. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών μεταβλητών παραμέτρων των δύο εργαστηριακών μεθόδων και έγινε αναζήτηση της μεθόδου και του συνδυασμού παραμέτρων που προσεγγίζουν τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η εσωτερική δομή επηρεάζεται από τις μεταβολές των παραμέτρων της εργαστηριακής συμπίκνωσης. Από τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ των εργαστηριακών μεθόδων και της επιτόπου συμπίκνωσης προέκυψε ότι η συμπίκνωση με κύλινδρο προσεγγίζει καλύτερα την εσωτερική δομή των μιγμάτων στο έργο.

ABSTRACT

The ability of simulating field compaction of asphalt mixtures by means of laboratory compaction method creates the need to investigate which method better achieves the desired result. The comparative evaluation of different methods of laboratory and field compaction can nowadays be reached with modern techniques that focus in the internal structure of the asphalt mixtures. In the present study, a two-dimensional digital image analysis technique was applied in specimens compacted with the Marshall hammer and the steel segmented Roller as well as field cores in order to investigate the internal structure, in terms of contact points, orientation and segregation. The impact of variable parameters on the internal structure of the compacted specimens was studied for the two laboratory compaction methods and the method and combination of its parameters that best reproduce the field conditions was determined. The results of the analysis show that the internal structure of the specimens is influenced by the differentiation of the variable laboratory compaction parameters. Moreover, the comparative analysis between the laboratory compaction methods and field compaction revealed that the steel segmented Roller achieves a good approximation of field compaction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	10
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	11
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	12
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ	25
3.1 ΤΥΠΟΙ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	25
3.2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	27
3.3 ΠΥΡΗΝΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	29
3.4 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ.....	29
4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	31
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
4.1.1 Λήψη	31
4.1.2 Επεξεργασία	33
4.1.3 Ανάλυση	34
4.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ..	35
4.2.1 Λήψη	36
4.2.2 Προεπεξεργασία	37
4.2.3 Επεξεργασία	37
4.2.3.1 Φίλτρο Ενδιάμεσης Τιμής (Median Filter)	37
4.2.3.2 Φίλτρο Hmax	39
4.2.3.3 Μετασχηματισμός Watershed	40
4.2.3.4 Κατωφλίωση (Threshold).....	41
4.2.3.5 Λειτουργία του λογισμικού iPas 2.....	43
4.2.3.6 Παρατηρήσεις	45
4.2.4 Ανάλυση	50
4.2.4.1 Δείκτες Εσωτερικής Δομής Ασφαλτομίγματος	50
4.2.4.1.1 Σημεία Επαφής	50
4.2.4.1.2 Προσανατολισμός.....	54
4.2.4.1.3 Διαχωρισμός	56
4.2.4.2 Στατιστική ανάλυση εργαστηριακών δοκιμών	58
4.2.4.2.1 Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών	58
4.2.4.2.2 Διερεύνηση της επιρροής των μεταβλητών παραμέτρων.....	59
5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	60
5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ	60
5.1.1 Διερεύνηση της μεταβλητότητας του ποσοστού κενών	60
5.1.2 Μέθοδος συμπίκνωσης Marshall.....	63
5.1.2.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)	63
5.1.2.1.1 Σημεία Επαφής	63
5.1.2.1.2 Προσανατολισμός.....	66
5.1.2.1.3 Διαχωρισμός	68
5.1.2.2 Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)	70
5.1.2.2.1 Σημεία επαφής	70
5.1.2.2.2 Προσανατολισμός.....	73

5.1.2.2.3	Διαχωρισμός	75
5.1.2.3	Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου).....	77
5.1.2.3.1	Σημεία επαφής	77
5.1.2.3.2	Προσανατολισμός.....	80
5.1.2.3.3	Διαχωρισμός	82
5.1.2.4	Στατιστική ανάλυση	84
5.1.2.4.1	Μίγμα M1 (κλειστού τύπου).....	84
5.1.2.4.1.1	Σημεία επαφής	84
5.1.2.4.1.2	Προσανατολισμός	85
5.1.2.4.1.3	Διαχωρισμός	86
5.1.2.4.2	Μίγμα M2 (κλειστού τύπου).....	86
5.1.2.4.2.1	Σημεία επαφής	87
5.1.2.4.2.2	Προσανατολισμός	88
5.1.2.4.2.3	Διαχωρισμός	88
5.1.2.4.3	Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου).....	89
5.1.2.4.3.1	Σημεία επαφής	89
5.1.2.4.3.2	Προσανατολισμός	90
5.1.2.4.3.3	Διαχωρισμός	91
5.1.3	Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor)	92
5.1.3.1	Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)	92
5.1.3.1.1	Σημεία επαφής	92
5.1.3.1.2	Προσανατολισμός.....	95
5.1.3.1.3	Διαχωρισμός	97
5.1.3.2	Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου).....	99
5.1.3.2.1	Σημεία επαφής	99
5.1.3.2.2	Προσανατολισμός.....	102
5.1.3.2.3	Διαχωρισμός	104
5.1.3.3	Στατιστική ανάλυση	106
5.1.3.3.1	Μίγμα M1 (κλειστού τύπου).....	106
5.1.3.3.1.1	Σημεία επαφής	106
5.1.3.3.1.2	Προσανατολισμός	108
5.1.3.3.1.3	Διαχωρισμός	109
5.1.3.3.2	Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου).....	110
5.1.3.3.2.1	Σημεία επαφής	110
5.1.3.3.2.2	Προσανατολισμός	112
5.1.3.3.2.3	Διαχωρισμός	113
5.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	114
5.2.1	Συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων.....	114
5.2.1.1	Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)	115
5.2.1.1.1	Σημεία επαφής	115
5.2.1.1.2	Προσανατολισμός.....	116
5.2.1.1.3	Διαχωρισμός	117
5.2.1.2	Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)	119
5.2.1.2.1	Σημεία επαφής	119
5.2.1.2.2	Προσανατολισμός.....	120
5.2.1.2.3	Διαχωρισμός	121
5.2.1.3	Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου).....	122
5.2.1.3.1	Σημεία επαφής	122
5.2.1.3.2	Προσανατολισμός.....	123
5.2.1.3.3	Διαχωρισμός	124
5.2.2	Μέθοδος συμπίκνωσης Marshall και πυρήνες οδοστρώματος	126
5.2.2.1	Σημεία επαφής.....	126
5.2.2.2	Προσανατολισμός	128
5.2.2.3	Διαχωρισμός.....	129
5.2.3	Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor) και πυρήνες οδοστρώματος.....	130
5.2.3.1	Σημεία επαφής.....	131
5.2.3.2	Προσανατολισμός	133
5.2.3.3	Διαχωρισμός.....	134
6	ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	136

6.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	136
6.1.1	Μέθοδος συμπίκνωσης Marshall.....	136
6.1.2	Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor)	138
6.2	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	140
6.3	ΣΧΟΛΙΑ	141
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	143

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Κατανομή κενών αέρος κατά οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση δοκιμίων Marshall (Partl et al., 2007)	16
Σχήμα 2.2 Κατανομή κενών αέρος κορυφής δοκιμίων Roller (Partl et al., 2007).....	16
Σχήμα 2.3 Κατανομή κενών αέρος πυθμένα δοκιμίων Roller (Partl et al., 2007).....	16
Σχήμα 2.4 Επίδραση της μηχανικής δράσης της συμπίκνωσης και των τοιχωμάτων του καλουπιού στον προσανατολισμό των αδρανών (Iwama et al., 2007)	17
Σχήμα 2.5 Επίδραση κοπής δοκιμίου στον προσανατολισμό των αδρανών	18
Σχήμα 2.6 Σύγκριση γυροσκοπικής και μεθόδου Marshall με τους πυρήνες οδοστρώματος ως προς τον προσανατολισμό των αδρανών (Coenen et al., 2012).....	20
Σχήμα 2.7 Σύγκριση εργαστηριακών μεθόδων (γυροσκοπική, Marshall, Roller) και πυρήνων οδοστρώματος με κριτήριο τη γωνία προσανατολισμού των γραμμών προσέγγισης (Sefidmazgi and Bahia, 2014)	23
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης μιγμάτων M1, M2, M4.....	26
Σχήμα 3.2 Εργαστηριακή συσκευή συμπίκνωσης μεθόδου Roller (αριστερά) και Marshall (δεξιά)	27
Σχήμα 4.1 Ακτινογραφίες καθ' ύψος και τρισδιάστατη ανασύνθεση του δοκιμίου.....	31
Σχήμα 4.2 Οριζόντιες και κάθετες τομές δοκιμίου	32
Σχήμα 4.3 Βήματα μεθοδολογίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας δοκιμίου	35
Σχήμα 4.4 Επιφάνειες σάρωσης.....	36
Σχήμα 4.5 Γειτονιά 3x3 ενός εικονοστοιχείου	38
Σχήμα 4.6 Εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής.....	38
Σχήμα 4.7 Εφαρμογή φίλτρου Hmax.....	39
Σχήμα 4.8 Αναλογία εικόνας ασφαλομίγματος με τοπογραφικό ανάγλυφο	40
Σχήμα 4.9 Εφαρμογή μετασχηματισμού watershed	40
Σχήμα 4.10 Εφαρμογή καταωφλίωσης με δύο διαφορετικές τιμές καταωφλίου.....	42
Σχήμα 4.11 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας μέσω iPas.....	42
Σχήμα 4.12 Κριτήρια επεξεργασίας iPas	44
Σχήμα 4.13 Τελικώς επεξεργασμένες εικόνες δοκιμίου (πάνω) και αρχική εικόνα δοκιμίου (κάτω) με βάση τα κλάσματα $P_{sv}^{im}-P_{sv}$	46
Σχήμα 4.14 Τελικώς επεξεργασμένες εικόνες δοκιμίου (πάνω) και αρχική εικόνα δοκιμίου (κάτω) με βάση την οπτική επισκόπηση.....	48
Σχήμα 4.15 Υπολογισμός σημείων επαφής	50
Σχήμα 4.16 Εντοπισμός γραμμών προσέγγισης	51
Σχήμα 4.17 Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού γραμμής προσέγγισης	52
Σχήμα 4.18 Υπολογισμός μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση	53
Σχήμα 4.19 Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού	54
Σχήμα 4.20 Αντιστοίχιση αρμονικής συνάρτησης στο ιστόγραμμα γωνιών προσανατολισμού	55
Σχήμα 4.21 Παράμετροι δ και A της αρμονικής συνάρτησης	56
Σχήμα 4.22 Τμηματοποίηση οριζόντιας διατομής σε δακτυλίους.....	57
Σχήμα 4.23 Παράδειγμα υπολογισμού διαχωρισμού	57
Σχήμα 5.1 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M1 Marshall).....	63
Σχήμα 5.2 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M1 Marshall)	64
Σχήμα 5.3 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M1 Marshall).....	64

Σχήμα 5.4 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M1 Marshall)	65
Σχήμα 5.5 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M1 Marshall)	65
Σχήμα 5.6 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M1 Marshall)	66
Σχήμα 5.7 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M1 Marshall)	67
Σχήμα 5.8 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M1 Marshall)	67
Σχήμα 5.9 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M1 Marshall)	68
Σχήμα 5.10 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη $ S_H $ (M1 Marshall)	69
Σχήμα 5.11 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M2 Marshall)	70
Σχήμα 5.12 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M2 Marshall) ..	71
Σχήμα 5.13 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M2 Marshall)	71
Σχήμα 5.14 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M2 Marshall)	72
Σχήμα 5.15 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M2 Marshall)	72
Σχήμα 5.16 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M2 Marshall)	73
Σχήμα 5.17 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M2 Marshall)	74
Σχήμα 5.18 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M2 Marshall)	74
Σχήμα 5.19 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M2 Marshall)	75
Σχήμα 5.20 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη $ S_H $ (M2 Marshall)	76
Σχήμα 5.21 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M4 Marshall)	77
Σχήμα 5.22 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M4 Marshall) ..	78
Σχήμα 5.23 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M4 Marshall)	78
Σχήμα 5.24 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M4 Marshall)	79
Σχήμα 5.25 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M4 Marshall)	79
Σχήμα 5.26 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M4 Marshall)	80
Σχήμα 5.27 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M4 Marshall)	81
Σχήμα 5.28 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M4 Marshall)	81
Σχήμα 5.29 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M4 Marshall)	82
Σχήμα 5.30 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη $ S_H $ (M4 Marshall)	83
Σχήμα 5.31 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M1 Roller)	92
Σχήμα 5.32 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον αριθμό των σημείων επαφής (M1 Roller)	93
Σχήμα 5.33 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο μήκος επαφής αδρανών (M1 Roller)	93
Σχήμα 5.34 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M1 Roller)	93
Σχήμα 5.35 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη ISI (M1 Roller)	93
Σχήμα 5.36 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M1 Roller)	95
Σχήμα 5.37 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στη γωνία προσανατολισμού (M1 Roller)	96
Σχήμα 5.38 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο εύρος (M1 Roller)	96
Σχήμα 5.39 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M1 Roller)	97
Σχήμα 5.40 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη $ S_H $ (M1 Roller)	98
Σχήμα 5.41 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M4 Roller)	99

Σχήμα 5.42 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον αριθμό των σημείων επαφής (M4 Roller)	100
Σχήμα 5.43 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων μήκους επαφής (M4 Roller)	100
Σχήμα 5.44 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M4 Roller)	100
Σχήμα 5.45 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων δείκτη ISI (M4 Roller)	100
Σχήμα 5.46 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M4 Roller)	102
Σχήμα 5.47 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στη γωνία προσανατολισμού (M4 Roller)	103
Σχήμα 5.48 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο εύρος (M4 Roller)	103
Σχήμα 5.49 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M4 Roller)	104
Σχήμα 5.50 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη $ S_H $ (M4 Roller)	105
Σχήμα 5.51 Επεξήγηση απεικόνισης box plot (θηκογράμματος)	114
Σχήμα 5.52 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M1	115
Σχήμα 5.53 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M1	116
Σχήμα 5.54 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M1	117
Σχήμα 5.55 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M2	119
Σχήμα 5.56 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M2	120
Σχήμα 5.57 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M2	121
Σχήμα 5.58 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M4	122
Σχήμα 5.59 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M4	123
Σχήμα 5.60 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M4	124
Σχήμα 5.61 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	126
Σχήμα 5.62 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (Marshall & Πυρήνες Οδ/τος)	127
Σχήμα 5.63 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	127
Σχήμα 5.64 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	127
Σχήμα 5.65 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	128
Σχήμα 5.66 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	129
Σχήμα 5.67 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)	129
Σχήμα 5.68 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον αριθμό των σημείων επαφής (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	131
Σχήμα 5.69 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο μήκος επαφής αδρανών (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	132
Σχήμα 5.70 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	132
Σχήμα 5.71 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον δείκτη ISI (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	132
Σχήμα 5.72 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στη γωνία προσανατολισμού (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	133
Σχήμα 5.73 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο εύρος (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	134

Σχήμα 5.74 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον δείκτη $ S_H $ (Roller & Πυρήνες οδ/τος)	135
--	-----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες μιγμάτων M1, M2, M4	26
Πίνακας 3.2 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμών μεθόδου Marshall	28
Πίνακας 3.3 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμών μεθόδου Roller	28
Πίνακας 4.1 Παραμετρική διερεύνηση φίλτρων με βάση τα κλάσματα $P_{sv}^{im}-P_{sv}$	46
Πίνακας 4.2 Παραμετρική διερεύνηση φίλτρων με βάση την οπτική επισκόπηση.....	47
Πίνακας 5.1 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας για τη μέθοδο Marshall (τεστ Kruskal-Wallis).....	60
Πίνακας 5.2 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση των περασμάτων για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis).....	61
Πίνακας 5.3 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis)	61
Πίνακας 5.4 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της μεθόδου για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis).....	61
Πίνακας 5.5 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	84
Πίνακας 5.6 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	84
Πίνακας 5.7 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M1, μέθοδος Marshall).....	85
Πίνακας 5.8 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	85
Πίνακας 5.9 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	85
Πίνακας 5.10 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	86
Πίνακας 5.11 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)	86
Πίνακας 5.12 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	87
Πίνακας 5.13 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	87
Πίνακας 5.14 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M2, μέθοδος Marshall).....	87
Πίνακας 5.15 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	87
Πίνακας 5.16 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	88
Πίνακας 5.17 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	88
Πίνακας 5.18 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)	89
Πίνακας 5.19 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	89
Πίνακας 5.20 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	89
Πίνακας 5.21 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M4, μέθοδος Marshall).....	90
Πίνακας 5.22 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	90

Πίνακας 5.23 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	90
Πίνακας 5.24 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	91
Πίνακας 5.25 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)	91
Πίνακας 5.26 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών σημείων επαφής (M1 Roller)	94
Πίνακας 5.27 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών προσανατολισμού (M1 Roller)	96
Πίνακας 5.28 Ποσοστιαία μεταβολή δείκτη διαχωρισμού (M1 Roller)	98
Πίνακας 5.29 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών σημείων επαφής (M4 Roller)	101
Πίνακας 5.30 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών προσανατολισμού (M4 Roller)	103
Πίνακας 5.31 Ποσοστιαία μεταβολή δείκτη διαχωρισμού (M4 Roller)	105
Πίνακας 5.32 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	106
Πίνακας 5.33 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	107
Πίνακας 5.34 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	107
Πίνακας 5.35 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	107
Πίνακας 5.36 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	108
Πίνακας 5.37 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	108
Πίνακας 5.38 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (μίγμα M1, μέθοδος Roller)	109
Πίνακας 5.39 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	110
Πίνακας 5.40 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	110
Πίνακας 5.41 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	111
Πίνακας 5.42 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	111
Πίνακας 5.43 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	112
Πίνακας 5.44 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	112
Πίνακας 5.45 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $ S_H $ (μίγμα M4, μέθοδος Roller)	113

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η συμπίκνωση των ασφαλικών μιγμάτων αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα στάδια στην κατασκευή των οδοστρωμάτων, καθώς η συμβολή της στην μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος είναι καθοριστική. Κύριος στόχος της συμπίκνωσης είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής των αδρανών στο μίγμα. Ενώ η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων βασίζεται στις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλτομιγμάτων που παρασκευάζονται στο εργαστήριο μέσω διαφόρων μεθόδων συμπίκνωσης στο πεδίο η μηχανική συμπεριφορά τους και κατ' επέκταση η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος ενδέχεται να είναι διαφορετική (Λοΐζος, 2012). Έτσι τίθεται το ερώτημα ποια εργαστηριακή μέθοδος συμπίκνωσης προσομοιάζει καλύτερα τις συνθήκες συμπίκνωσης στο πεδίο.

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

Με βάση τις παραδοσιακές μεθόδους αξιολόγησης της συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων, που στηρίζονταν στην διερεύνηση της μακροσκοπικής συμπεριφοράς του μίγματος μέσω της πυκνότητας, δεν είναι δυνατό να εξηγηθεί η διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε δοκίμια ίδιων ογκομετρικών ιδιοτήτων. Σύγχρονες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να συνεισφέρουν στη λύση αυτού του ερευνητικού προβλήματος μέσω της μελέτης της εσωτερικής δομής των μιγμάτων χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης της ψηφιακής τους εικόνας. Η μελέτη της εσωτερικής δομής βασίζεται στη μέτρηση δεικτών που ποσοτικοποιούν τα χαρακτηριστικά του μίγματος και κάνουν δυνατή τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων συμπίκνωσης.

Σύμφωνα με τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί ποια εργαστηριακή μέθοδος συμπίκνωσης αναπαράγει καλύτερα τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης. Αξίζει να αναφερθεί ωστόσο ότι ενώ συστηματικές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τη γυροσκοπική συμπίκνωση, άλλες ευρέως διαδεδομένες

μέθοδοι συμπύκνωσης όπως η μέθοδος Marshall και η μέθοδος συμπύκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor) δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς. Κατά συνέπεια για να μπορεί να απαντηθεί το ερώτημα της προσομοίωσης της επιτόπου συμπύκνωσης μέσω του εργαστηρίου υπάρχει ανάγκη περαιτέρω διερευνήσεων στο σημείο αυτό.

1.2 Στόχοι και μεθοδολογία

Το ασφαλτόμιγμα αποτελείται από τρεις φάσεις: τα αδρανή, την άσφαλτο και τα κενά αέρος. Η εσωτερική δομή του ασφαλτομίγματος χαρακτηρίζεται από την κατανομή και την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των φάσεων και ποσοτικοποιείται με δείκτες, όπως είναι τα σημεία επαφής, ο προσανατολισμός και ο διαχωρισμός των αδρανών.

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

- ❖ η μελέτη της επίδρασης μεταβλητών παραμέτρων της εργαστηριακής συμπύκνωσης με τη μέθοδο Marshall και τη συμπύκνωση με κύλινδρο (τύπου Roller compactor) στα χαρακτηριστικά της εσωτερικής δομής (σημεία επαφής, προσανατολισμός, διαχωρισμός),
- ❖ η συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μεθόδων με την επιτόπου συμπύκνωση με τελικό στόχο την επιλογή της εργαστηριακής μεθόδου και του συνδυασμού παραμέτρων που επιτυγχάνει την καλύτερη κατά το δυνατόν προσέγγιση της συμπύκνωσης στο έργο.

Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακό πείραμα το οποίο περιελάμβανε την ανάλυση δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων δοκιμών ασφαλτομιγμάτων κλειστού και ημι-ανοικτού τύπου.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε λήψη μέσω σάρωσης εικόνων δοκιμών συμπυκνωμένων με τις μεθόδους Marshall και συμπύκνωσης με κύλινδρο διαφορετικών τύπων ασφαλτομίγματος. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων κάθε μεθόδου συμπύκνωσης, επιλέχθηκαν εργαστηριακά δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία συμπύκνωσης όσον αφορά τη μέθοδο Marshall, καθώς επίσης την ενέργεια συμπύκνωσης (αριθμός περασμάτων), τη μεθοδολογία και τη θερμοκρασία συμπύκνωσης όσον αφορά τη συμπύκνωση με κύλινδρο.

Ακολούθησε η επεξεργασία των ψηφιακών εικόνων των δοκιμών, ώστε να απομονωθούν τα αδρανή από τις υπόλοιπες φάσεις του μίγματος και στη συνέχεια μέσω ανάλυσης υπολογίστηκαν οι δείκτες για τον χαρακτηρισμό της εσωτερικής δομής.

Επίσης, 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 έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του εισαγωγικού κεφαλαίου.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** αποτελεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων προηγούμενων ερευνών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τη διερεύνηση της επίδρασης της συμπύκνωσης στην εσωτερική δομή ασφατομιγμάτων για διάφορες εργαστηριακές μεθόδους συμπύκνωσης.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφονται τα μίγματα τα οποία τέθηκαν υπό ανάλυση για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και η κωδικοποίηση τους.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την ανάλυση της εσωτερικής δομής των εργαστηριακών δοκιμών.

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

Στο **έκτο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα σχόλια-συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτείνονται εφαρμογές για περαιτέρω διερεύνηση.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανασκόπηση των ερευνών που σχετίζονται με την επίδραση των μεθόδων συμπίκνωσης, εργαστηριακών και επιτόπου, στην εσωτερική δομή ασφαλτομιγμάτων, δίνοντας έμφαση στις εργαστηριακές μεθόδους Marshall και κυλίνδρου μέσω της τεχνικής ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων. Σημειώνεται ότι οι τεχνικές ανάλυσης εικόνες διακρίνονται σε μη καταστρεπτικές με χρήση συστημάτων υπολογιστικής τομογραφίας ακτίνων Χ και σε καταστρεπτικές μέσω της ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων από τομές, οριζόντιες και κατακόρυφες, δοκιμίων ασφαλτομίγματος.

Yue and Morin (1996)

Στην έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε ψηφιακή ανάλυση δισδιάστατων εικόνων, οι οποίες προέκυψαν από σάρωση οριζόντιων και κατακόρυφων τομών δοκιμίων, με σκοπό τη διερεύνηση του προσανατολισμού των αδρανών λόγω της συμπίκνωσης στο εργαστήριο και στο έργο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δύο εργαστηριακές μέθοδοι συμπίκνωσης, η γυροσκοπική μέθοδος και η μέθοδος Marshall, και δύο μέθοδοι επιτόπου συμπίκνωσης για ένα συμβατικό θερμό ασφαλτόμιγμα πυκνής σύνθεσης. Όσον αφορά τη μέθοδο Marshall επιλέχθηκαν 100 κρούσεις της σφύρας με στόχο να διερευνηθεί η επιρροή στον προσανατολισμό των αδρανών στο μίγμα υπό ακραίες συνθήκες συμπίκνωσης. Τα δοκίμια για τη μέθοδο Marshall ήταν κυλινδρικά με διάμετρο 100 mm και ύψος 65 mm.

Τα δοκίμια που συμπτυνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall παρουσίασαν τυχαίο προσανατολισμό χονδρόκοκκων αδρανών σε αντίθεση με τις δύο μεθόδους επιτόπου συμπίκνωσης και την γυροσκοπική μέθοδο, για τις οποίες παρατηρήθηκε ότι ο μεγάλος άξονας των αδρανών εμφάνιζε την τάση να τοποθετείται οριζόντια. Να σημειωθεί ακόμη ότι οι διαφορές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αδρανών για τις διατομές κατά τις δύο διευθύνσεις επηρεάζονται από την κοκκομετρική διαβάθμιση, τα σχήματα των αδρανών και τη μέθοδο συμπίκνωσης. Σύμφωνα με τους μελετητές, τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι συμπίκνωση όμοια με αυτή που επιτυγχάνεται στο πεδίο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο με χρήση της μεθόδου Marshall.

Hunter et al. (2004)

Οι Hunter et al. (2004) μελέτησαν τον προσανατολισμό των αδρανών δοκιμίων ασφαλτομίγματος που συμπακνώθηκαν με τρεις διαφορετικές μεθόδους, γυροσκοπική, δονητική (vibratory) και με κύλινδρο. Για την μελέτη έγινε χρήση της τεχνικής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων. Το ασφαλτόμιγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν πυκνής σύνθεσης τύπου DBM και είχε μέγιστο ονομαστικό μέγεθος αδρανών 28 mm. Η θερμοκρασία συμπίκνωσης ορίστηκε στους 150 °C. Αναλύθηκαν 10 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm για κάθε μέθοδο συμπίκνωσης. Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δύο οριζόντιες τομές, προσφέροντας έτσι 4 εικόνες για κάθε δοκίμιο. Για τη συμπίκνωση με κύλινδρο τα δοκίμια ελήφθησαν με πυρηνοληψία από πλάκα διαστάσεων 300x300x100 mm.

Όσον αφορά τις δύο πρώτες μεθόδους, τη γυροσκοπική και τη δονητική, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι τα αδρανή εμφάνιζαν την τάση να προσανατολίζονται σε ομόκεντρη διεύθυνση. Αυτή η τάση γινόταν πιο έντονη για αδρανή μεγαλύτερου μεγέθους, καθώς επίσης και για τα πιο επιμήκη αδρανή. Σύμφωνα με τους μελετητές, αυτό πιθανά οφείλεται στην περιοριστική δράση των τοιχωμάτων του καλουπιού. Τα δοκίμια που συμπακνώθηκαν με τον κύλινδρο αντίθετα παρουσίασαν μικρότερο βαθμό προσανατολισμού των αδρανών κατά ομόκεντρη διεύθυνση. Μία εξήγηση που δόθηκε για αυτή τη διαπίστωση είναι ότι μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη περιορισμού που θα μπορούσαν να επιβάλουν τα τοιχώματα ενός καλουπιού στο οποίο θα τοποθετούνταν το ασφαλτόμιγμα. Επιπλέον, η διαδικασία της κοπής μπορεί να δημιούργησε τη λάθος αντίληψη ύπαρξης ψευδο-επιμήκων αδρανών στα όρια του δοκιμίου, δίνοντας την εντύπωση ότι κάποια αδρανή στην περιφέρεια του δοκιμίου είναι τοποθετημένα σε ομόκεντρη διεύθυνση. Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση τα αδρανή παρουσίασαν την τάση να τοποθετούνται οριζόντια για όλες τις μεθόδους συμπίκνωσης. Η τάση αυτή έγινε πιο έντονη με την εφαρμογή δόνησης στη συμπίκνωση με κύλινδρο.

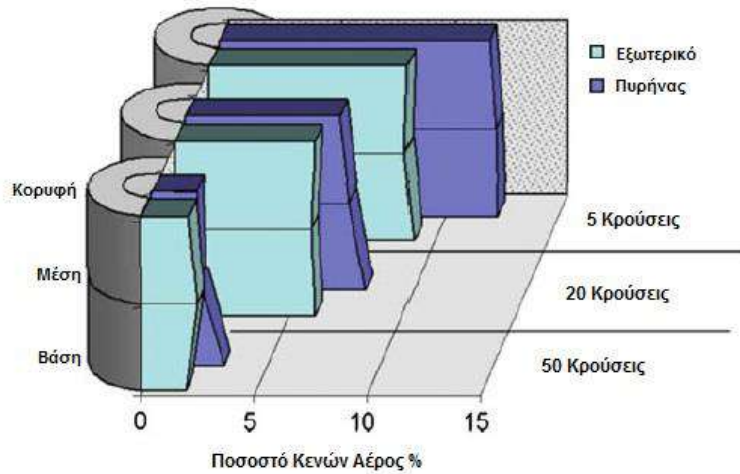
Partl et al. (2007)

Οι Partl et al. (2007) μελέτησαν τη μέθοδο Marshall και τη μέθοδο συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου LCPC rubber tire compactor) ως προς την κατανομή των κενών αέρος σε δοκίμια ασφαλτομίγματος κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση με χρήση συστήματος υπολογιστικής τομογραφίας ακτίνων Χ. Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκε ένα Ελβετικό συμβατικό ασφαλτικό σκυρόδεμα με μέγιστο ονομαστικό μέγεθος αδρανών στα 11 mm. Η θερμοκρασία συμπίκνωσης ορίστηκε στους 145 °C για κάθε μέθοδο

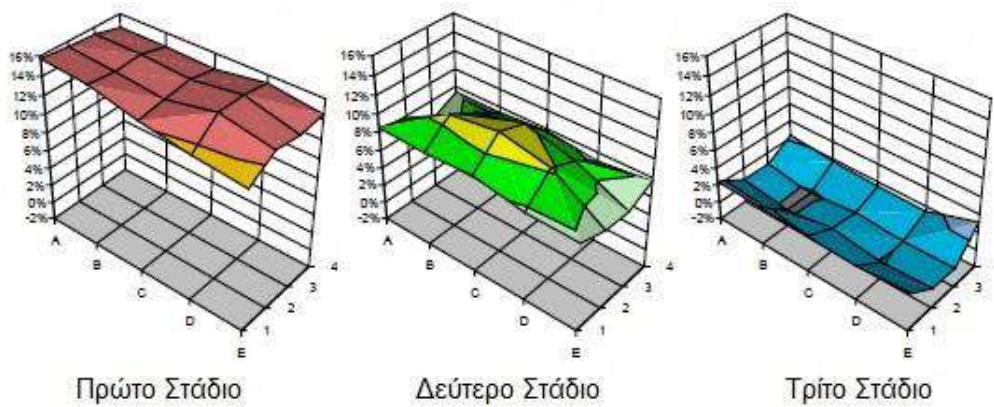
συμπύκνωσης. Όσον αφορά τη μέθοδο Marshall οι πτώσεις της σφύρας μεταβλήθηκαν σε τρία στάδια, στο πρώτο στάδιο ρυθμίστηκαν σε 5, στο δεύτερο σε 20 και στο τρίτο σε 50. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά διαμέτρου 100 mm και ύψους 76 mm. Για τη συμπύκνωση με κύλινδρο χρησιμοποιήθηκαν ορθογωνικά καλούπια διαστάσεων 100x180x500 mm, τα οποία χωρίστηκαν σε τρεις ζώνες συμπύκνωσης. Η συμπύκνωση πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο έγιναν δύο περάσματα του κυλίνδρου σε κάθε ζώνη με χαμηλότερη πίεση του ελαστικοφόρου κυλίνδρου (0.1 MPa) και του φορτίου κυλίνδρου (1 kN). Στα επόμενα δύο στάδια η πίεση του κυλίνδρου ορίστηκε στα 0.6 MPa και το φορτίο του στα 5 kN. Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκαν 8, 4 και 8 περάσματα αντίστοιχα σε κάθε ζώνη συμπύκνωσης, και στο τρίτο στάδιο 32, 16 και 32.

Όσον αφορά τη μέθοδο Marshall από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι υπήρξε σχετικά ομοιόμορφη κατανομή των κενών αέρος κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, αλλά ότι ο πυρήνας του πυθμένα των δοκιμών παρουσίασε μεγαλύτερο ποσοστό κενών αέρος της τάξης του 1%. Μεγαλύτερη διαφοροποίηση στα κενά αέρος παρατηρήθηκε μεταξύ πυρήνα και περιφέρειας των δοκιμών μετά το πρώτο στάδιο συμπύκνωσης της τάξης του 3.5%. Η διαφοροποίηση αυτή εξαφανίσθηκε ύστερα από την επιβολή των 20 πτώσεων της σφύρας. Στο σχήμα (2.1) απεικονίζεται η κατανομή των κενών αέρος κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση σε κάθε στάδιο συμπύκνωσης.

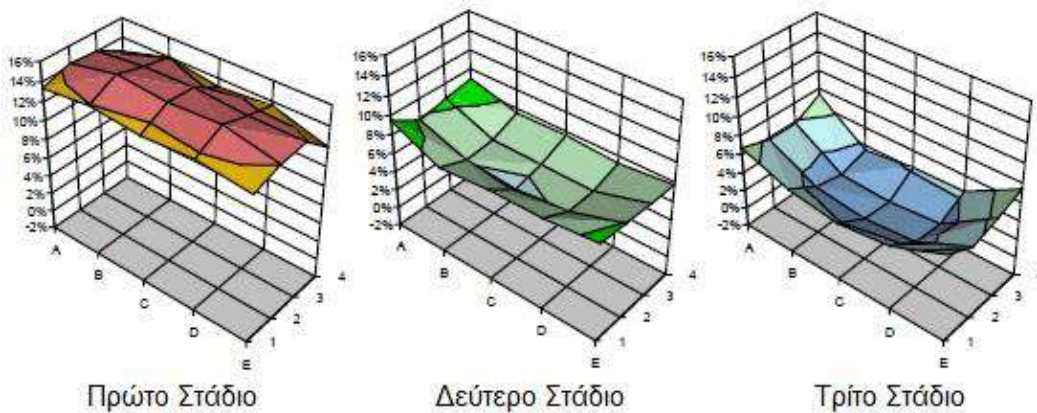
Η κατανομή των κενών αέρος στο πρώτο στάδιο συμπύκνωσης για τη συμπύκνωση με κύλινδρο προέκυψε ομοιόμορφη, αλλά με τον πυθμένα να είναι ελάχιστα πιο πυκνός, ιδιαίτερα κατά μήκος του δοκιμίου. Μετά το δεύτερο στάδιο η κατανομή των κενών αέρος έγινε ανομοιόμορφη με την ελάχιστη τιμή ποσοστού κενών αέρος να εντοπίζεται στο κέντρο του πυθμένα και τη μέγιστη στο κέντρο της κορυφής του δοκιμίου. Ύστερα από το τρίτο στάδιο ο πυθμένας ήταν λιγότερο συμπυκνωμένος σε σχέση με την κορυφή. Σε αυτό το στάδιο η περιοχή με την υψηλότερη πυκνότητα βρέθηκε κατά μήκος του κέντρου της κορυφής σε αντίθεση με τις γωνίες του πυθμένα που παρουσίασαν την μικρότερη συμπύκνωση. Στο σχήμα (2.2) απεικονίζεται η κατανομή αέρος στην κορυφή των δοκιμών που συμπυκνώθηκε με κύλινδρο και στο σχήμα (2.3) η κατανομή των κενών αέρος στον πυθμένα των δοκιμών.



Σχήμα 2.1 Κατανομή κενών αέρος κατά οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση δοκιμών Marshall (Partl et al., 2007)



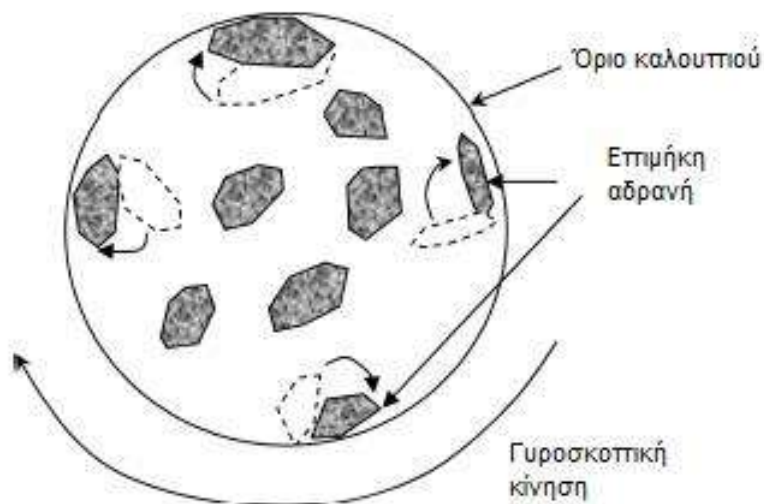
Σχήμα 2.2 Κατανομή κενών αέρος κορυφής δοκιμών Roller (Partl et al., 2007)



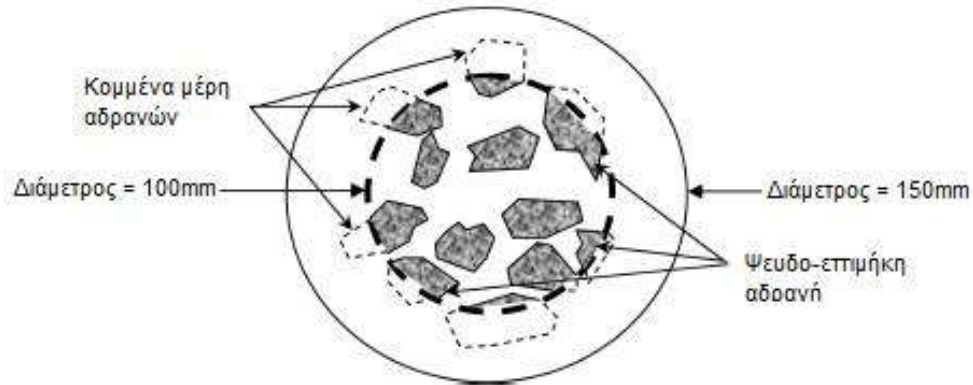
Σχήμα 2.3 Κατανομή κενών αέρος πυθμένα δοκιμών Roller (Partl et al., 2007)

Iwama et al. (2007)

Σε συνέχεια της έρευνας των Hunter et al. (2004) οι Iwama et al. (2007) μελετώντας τις ίδιες μεθόδους συμπύκνωσης υπό τις ίδιες συνθήκες επιβεβαίωσαν ύστερα από κατάλληλες πειραματικές διαδικασίες ότι όσον αφορά τη γυροσκοπική και την δονητική μέθοδο συμπύκνωσης τα τοιχώματα του καλουπιού επηρεάζουν καθοριστικά τον προσανατολισμό των αδρανών, καθώς σε συνδυασμό με την μηχανική δράση της συμπύκνωσης τα αδρανή τείνουν να τοποθετούνται σε ομόκεντρη διεύθυνση (σχήμα 2.4). Σημειώνεται ακόμη ότι ο ομόκεντρος προσανατολισμός των αδρανών διαφέρει από τον προσανατολισμό των αδρανών που συναντάται στο πεδίο και στη συμπύκνωση με κύλινδρο. Επιπλέον, με κατάλληλες πειραματικές διαδικασίες ελέγχθηκε η επιρροή της κοπής των δοκιμίων στον προσανατολισμό των αδρανών. Διαπιστώθηκε ότι τα κομμένα αδρανή στην περιφέρεια των δοκιμίων δημιουργούν λανθασμένη αντίληψη ως προς την γενική τάση προσανατολισμού των αδρανών (σχήμα 2.5). Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της προηγούμενης έρευνας που έδειχνε ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας δείχνουν ότι ο προσανατολισμός των αδρανών για τη γυροσκοπική και τη δονητική μέθοδο είναι πιο τυχαίος. Όσον αφορά τον προσανατολισμό των αδρανών κατά τη συμπύκνωση με κύλινδρο τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιήθηκαν σε σχέση με την προηγούμενη έρευνα, δηλαδή και πάλι διαπιστώθηκε κατά βάση τυχαίος προσανατολισμός των αδρανών.



Σχήμα 2.4 Επίδραση της μηχανικής δράσης της συμπύκνωσης και των τοιχωμάτων του καλουπιού στον προσανατολισμό των αδρανών (Iwama et al., 2007)



Σχήμα 2.5 Επίδραση κοπής δοκιμίου στον προσανατολισμό των αδρανών

Bessa et al. (2012)

Οι Bessa et al. (2012) μελέτησαν δοκίμια συμπακνωμένα με τη γυροσκοπική μέθοδο, καθώς και με κύλινδρο, ως προς τα σημεία επαφής, τον προσανατολισμό και τον διαχωρισμό των αδρανών με χρήση της τεχνικής ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων. Μελετήθηκαν δύο θερμά ασφαλτομίγματα πυκνής σύνθεσης, καθώς και ένα μίγμα ασυνεχούς διαβάθμισης τύπου SMA που συμπακνώθηκε μόνο με τη γυροσκοπική μέθοδο. Τα δοκίμια της συμπίκνωσης με κύλινδρο ελήφθησαν από πλάκες διαστάσεων 500x180x50 mm.

Σχετικά με τα σημεία επαφής των αδρανών των ασφαλτομιγμάτων που συμπακνώθηκαν με κύλινδρο διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια που ελήφθησαν από τις πλάκες είχαν υψηλότερο αριθμό σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών (ίσο με 298), της τάξης του +12%, σε σχέση με τον αριθμό των σημείων επαφής των δοκιμίων που συμπακνώθηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο (ίσο με 267) όσον αφορά το ένα μίγμα πυκνής σύνθεσης. Για το άλλο θερμό ασφαλτόμιγμα ο αριθμός των σημείων επαφής ήταν ίδιος και για τις δύο μεθόδους (ίσος με 278). Το ασφαλτόμιγμα τύπου SMA, επίσης, παρουσίασε υψηλό αριθμό σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών (ίσο με 298).

Ως προς τον προσανατολισμό η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του δείκτη διανύσματος μεγέθους Δ_c , για τον οποίο η τιμή 0 υποδηλώνει τυχαίο προσανατολισμό των αδρανών, ενώ η τιμή 100 υποδεικνύει ότι τα αδρανή παρουσιάζουν έντονη τάση τοποθέτησης κατά μία συγκεκριμένη γωνία. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που ελήφθησαν από τις πλάκες παρουσίαζαν παρόμοια χαρακτηριστικά και προς τις δύο διευθύνσεις, οριζόντια

και κατακόρυφη, και για τα δύο θερμά ασφαλτομίγματα ως προς τον προσανατολισμό των αδρανών σε αντίθεση με τα δοκίμια της γυροσκοπικής μεθόδου που δεν εμφάνιζαν ίδιες τιμές του Δ_c κατά τις δύο διευθύνσεις.

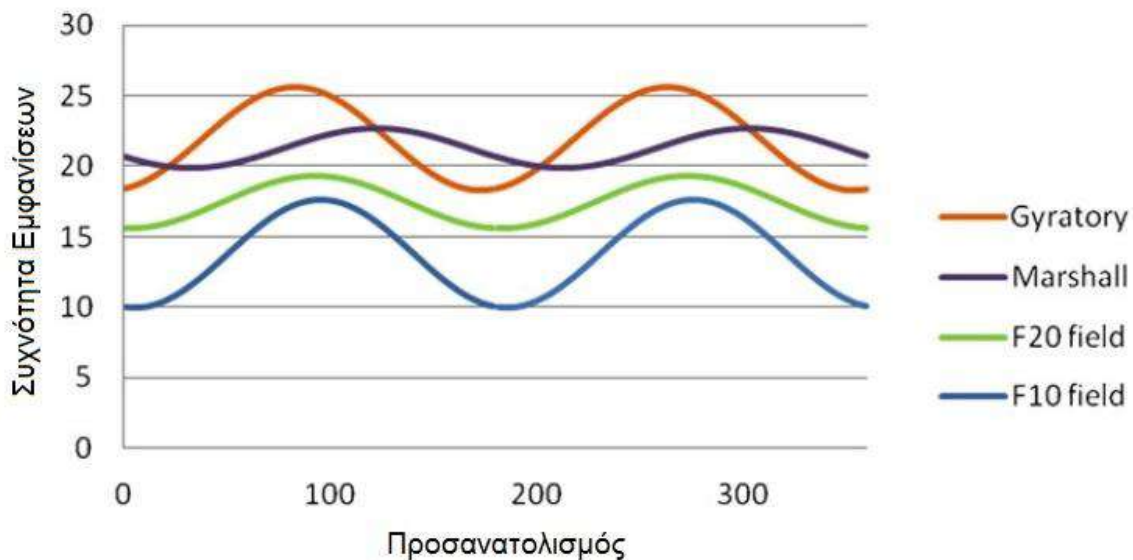
Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τον διαχωρισμό των αδρανών τα ασφαλτομίγματα που συμπυκνώθηκαν με κύλινδρο παρουσίασαν πιο ομοιόμορφη χωρική κατανομή των αδρανών σε σύγκριση με αυτά που συμπυκνώθηκαν με τη γυροσκοπική μέθοδο τα οποία παρουσίασαν εντονότερο φαινόμενο διαχωρισμού.

Coenen et al. (2012)

Μεταγενέστερη έρευνα των Coenen et al. (2012) μελέτησε τον προσανατολισμό των αδρανών δοκιμίων συμπυκνωμένων με τέσσερις εργαστηριακές μεθόδους συμπίκνωσης, συγκεκριμένα με τη γυροσκοπική, την Hveem, την Marshall και τη συμπίκνωση με κύλινδρο (τύπου steel segmented Roller), με χρήση της τεχνικής ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων μέσω του λογισμικού iPas. Έγιναν δύο οριζόντιες τομές σε κάθε κυλινδρικό δοκίμιο (διαμέτρου 100 mm), οπότε προέκυψαν 4 εικόνες για κάθε ένα. Επιπλέον, έγινε πυρηνοληψία κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 100 mm από ένα πειραματικό-δοκιμαστικό τμήμα με στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των δοκιμίων του εργαστηρίου με αυτά της επιτόπου συμπίκνωσης. Οι κωδικοί F10 και F20 αντιπροσωπεύουν δύο περιοχές του πειραματικού-δοκιμαστικού τμήματος από όπου έγινε η πυρηνοληψία. Η F10 ήταν στο μέσο μιας λωρίδας οδοστρώματος, ενώ η F20 στο σημείο που βρίσκονταν τα ίχνη των τροχών των οχημάτων. Έγινε λήψη ενός πυρήνα από κάθε περιοχή και ύστερα από κάθε πυρήνα, με κατάλληλες τομές, ελήφθησαν τρεις εικόνες. Οι τελικώς μετρούμενοι δείκτες προέκυψαν από τους μέσους όρους των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για το σύνολο των εικόνων κάθε μεθόδου.

Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις από την κάθε μέθοδο συμπίκνωσης στους δείκτες που μετρήθηκαν (γωνία προσανατολισμού, δ , και εύρος, A). Η μέθοδος Marshall είχε την χαμηλότερη τιμή για τον δείκτη A (2.78), που σημαίνει ότι είχε λιγότερο έντονη τάση προσανατολισμού των αδρανών κατά την επικρατούσα γωνία ($\delta=122^\circ$) σε σχέση με την γυροσκοπική που εμφάνιζε ιδιαίτερα έντονη τάση προσανατολισμού των αδρανών κατά τις 83° , δηλαδή σε ομόκεντρη διεύθυνση, με τιμή του δείκτη A ίση με 7.3. Όσον αφορά τη συμπίκνωση με κύλινδρο η επικρατούσα γωνία προσανατολισμού εντοπίστηκε στις 138° με τιμή εύρους ίση με 6.38. Από την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των

δοκιμίων του εργαστηρίου με τους πυρήνες της επιτόπου συμπίκνωσης φάνηκε ότι η γυροσκοπική μέθοδος έδωσε την καλύτερη προσέγγιση ως προς την επικρατούσα γωνία δ . Ωστόσο, το μεγάλο εύρος A που παρουσιάζουν τα αδρανή στη γυροσκοπική μέθοδο απέχει πολύ από τον χαμηλό δείκτη A (3.74) των πυρήνων της περιοχής F20, ο οποίος προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο Marshall. Η απεικόνιση των αρμονικών συναρτήσεων δίνει μία καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων (σχήμα 2.6). Σύμφωνα με το σχήμα, η γυροσκοπική προσεγγίζει καλύτερα την συμπίκνωση που επιτεύχθηκε στην περιοχή F10.



Σχήμα 2.6 Σύγκριση γυροσκοπικής και μεθόδου Marshall με τους πυρήνες οδοστρώματος ως προς τον προσανατολισμό των αδρανών (Coenen et al., 2012)

Hassan et al. (2012)

Οι Hassan et al. διερεύνησαν το 2012 δοκίμια συμπυκνωμένα με κύλινδρο (τύπου steel segmented Roller), καθώς και με τη γυροσκοπική και τη δονητική μέθοδο, ως προς τον προσανατολισμό και τον διαχωρισμό των αδρανών με χρήση συστήματος υπολογιστικής τομογραφίας ακτίνων Χ. Το εξεταζόμενο μίγμα ήταν ασυνεχούς διαβάθμισης και είχε μέγιστο μέγεθος κόκκου 20 mm. Η θερμοκρασία συμπίκνωσης επιλέχθηκε στους 135 ± 5 °C, ενώ ο αριθμός των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα για τη συμπίκνωση με κύλινδρο δεν αναφέρεται. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διάμετρο 100 mm και για τη συμπίκνωση με κύλινδρο ελήφθησαν με πυρηνοληψία από πλάκα διαστάσεων 300x300x100 mm. Στα δοκίμια έγιναν οριζόντιες σαρώσεις ανά 1mm καθ' ύψος, δηλαδή προέκυψαν 100 αποτυπώσεις οριζόντιας διατομής για κάθε δοκίμιο.

Το χαρακτηριστικό του προσανατολισμού των αδρανών ποσοτικοποιήθηκε μέσω του υπολογισμού του μέσου όρου των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών κάθε εικόνας οριζόντιας διατομής. Ουσιαστικά, υπολογίσθηκε ο μέσος όρος των γωνιών προσανατολισμού των οριζόντιων διατομών καθ' ύψος του δοκιμίου, αλλά και για κάθε οριζόντια διατομή κατά την ακτινική διεύθυνση οι μέσοι όροι των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών της περιφέρειας και του πυρήνα ξεχωριστά. Τιμή 0° της γωνίας προσανατολισμού δηλώνει ακτινικό προσανατολισμό των αδρανών, τιμή 90° δηλώνει ομόκεντρο προσανατολισμό και τιμή 45° δηλώνει τυχαίο προσανατολισμό. Ο μέσος όρος των γωνιών προσανατολισμού όλων των εικόνων καθ' ύψος υπολογίσθηκε στις 50° . Αυτό υποδεικνύει ότι τα αδρανή ήταν σχεδόν τυχαία τοποθετημένα από τον πυθμένα προς την κορυφή των δοκιμίων. Ωστόσο, ως προς την οριζόντια έννοια υψηλότεροι μέσοι όροι γωνιών προσανατολισμού παρατηρήθηκαν στην περιφέρεια σε σχέση με το κέντρο των δοκιμίων. Αυτό δείχνει ότι τα αδρανή στην περιφέρεια έτειναν να προσανατολίζονται ομόκεντρα σε αντίθεση με το κέντρο των δοκιμίων στο οποίο είχαν την τάση να προσανατολίζονται τυχαία. Σύμφωνα με τους μελετητές, αυτό πιθανά οφείλεται στην κοπή των δοκιμίων από την πλάκα που συμπυκνώθηκε μέσω κύλινδρου, καθώς στην περιφέρεια είναι δυνατόν η κοπή να δημιουργήσει ψευδο-επιμήκη αδρανή, και στην επίδραση του περιοριστικού ρόλου των τοιχωμάτων του καλουπιού για τις δύο άλλες μεθόδους συμπύκνωσης.

Όσον αφορά τον διαχωρισμό η ποσοτικοποίηση αυτού έγινε μέσω του δείκτη S_L . Μηδενική τιμή του δείκτη S_L δηλώνει ομοιογένεια στο μίγμα, θετική τιμή δηλώνει περισσότερα χονδρόκοκκα αδρανή στην περιφέρεια ή στην κορυφή του δοκιμίου και αρνητική τιμή περισσότερα αδρανή στο κέντρο ή στον πυθμένα. Όλα τα δοκίμια εμφάνισαν πιο χονδρόκοκκα αδρανή στον πυθμένα (Roller: $S_L = -17$), πιθανά λόγω της δράσης της βαρύτητας. Κατά την οριζόντια διεύθυνση για τη συμπύκνωση με κύλινδρο πιο χονδρόκοκκα αδρανή παρατηρήθηκαν στο κέντρο των δοκιμίων παρά στην περιφέρεια (Roller: $S_L = -18.4$). Είναι πολύ πιθανό το φαινόμενο του διαχωρισμού να οφείλεται και αυτό στη διαδικασία της κοπής.

Airey and Collop (2014)

Οι Airey and Collop μελέτησαν το 2014 τον προσανατολισμό και τον διαχωρισμό των αδρανών δοκιμίων συμπυκνωμένων με τρεις διαφορετικές εργαστηριακές μεθόδους, γυροσκοπική, δονητική (vibratory) και με κύλινδρο, μέσω της τεχνικής ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων. Η θερμοκρασία συμπύκνωσης ορίστηκε στους 150°C . Χρησιμοποιήθηκαν ασφατομίγματα πυκνής σύνθεσης τύπου DBM και HMB. Για τη

μέθοδο με κύλινδρο τα ασφαλτομίγματα τοποθετούνταν σε καλούπι διαστάσεων 300x300x100 mm από το οποίο λαμβάνονταν με πυρηνοληψία δύο κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm ή τέσσερα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm. Επιπλέον, μελετήθηκαν και πυρήνες οδοστρώματος για τους ίδιους τύπους ασφαλτομιγμάτων.

Ως προς τον προσανατολισμό των αδρανών των ασφαλτομιγμάτων η γυροσκοπική μέθοδος και η δονητική μέθοδος παρουσίασαν ως προς την οριζόντια έννοια πιο έντονη τάση προσανατολισμού των πιο χονδρόκοκκων αδρανών κατά ομόκεντρη διεύθυνση. Αντίθετα, η συμπύκνωση με κύλινδρο, καθώς και οι πυρήνες οδοστρώματος, εμφάνισαν τυχαίο προσανατολισμό των αδρανών. Σύμφωνα με τους ερευνητές, ο ομόκεντρος προσανατολισμός πιθανόν οφείλεται στην περιοριστική δράση των τοιχωμάτων του καλουπιού, καθώς και στην κοπή των δοκιμίων.

Τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με τη γυροσκοπική και την δονητική μέθοδο παρουσίασαν πιο έντονο φαινόμενο ακτινικού διαχωρισμού σε σχέση με την μέθοδο με κύλινδρο, αλλά λιγότερο έντονο από ότι παρατηρήθηκε για τους πυρήνες οδοστρώματος. Όσον αφορά τον διαχωρισμό των αδρανών μεταξύ περιφέρειας και πυρήνα των δοκιμίων κατά την οριζόντια διεύθυνση παρατηρήθηκε εντονότερη τάση διαχωρισμού για τη γυροσκοπική και τη δονητική μέθοδο σε σύγκριση με τη μέθοδο με κύλινδρο και τους πυρήνες οδοστρώματος. Οι μελετητές παρατηρούν ότι από τα αποτελέσματα προέκυψε εντονότερη συσχέτιση της συμπύκνωσης με κύλινδρο με την επιτόπου συμπύκνωση.

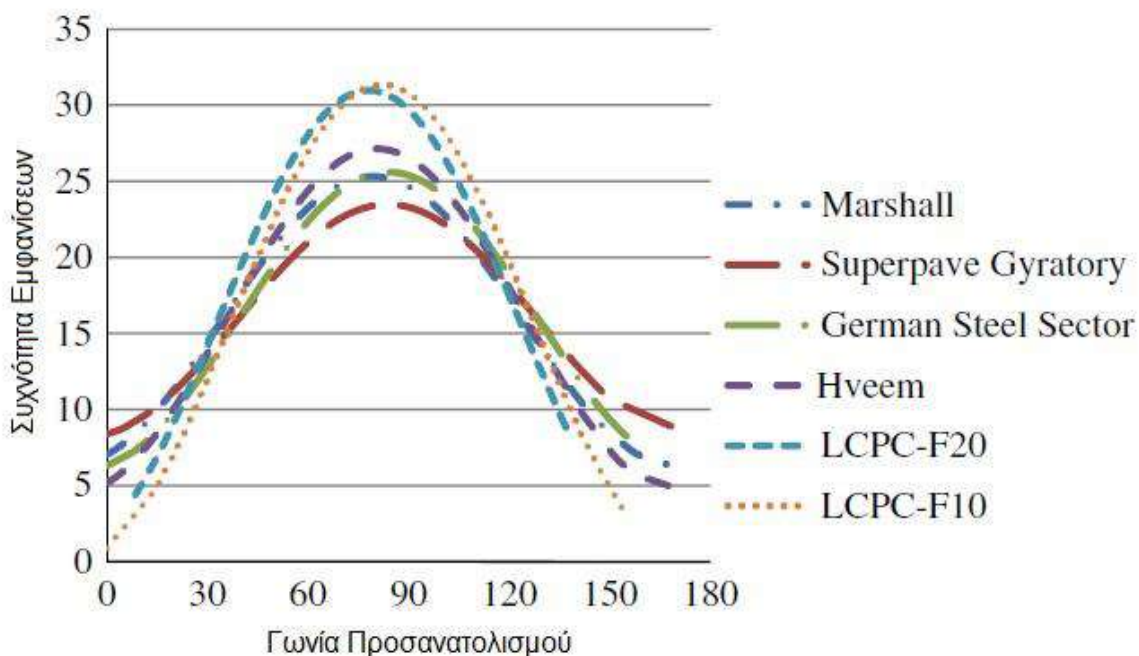
Sefidmazgi and Bahia (2014)

Οι Sefidmazgi and Bahia (2014) διερεύνησαν την εσωτερική δομή πέντε μεθόδων συμπύκνωσης, συγκεκριμένα της γυροσκοπικής, της Marshall, της Hveem, της συμπύκνωσης με κύλινδρο (τύπου steel segmented Roller) και της επιτόπου συμπύκνωσης, με χρήση της τεχνικής ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων μέσω του λογισμικού iPas 2. Τα δοκίμια κάθε μεθόδου ήταν ίδια με αυτά προηγούμενης έρευνας (Coenen et al., 2012) και η διαφοροποίηση των ερευνών εντοπίζεται στην ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στην μελέτη των Sefidmazgi and Bahia (2014) πραγματοποιήθηκε διερεύνηση νέων δεικτών για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της εσωτερικής δομής των ασφαλτομιγμάτων. Οι δείκτες αυτοί ήταν ο αριθμός των γραμμών προσέγγισης, το συνολικό μήκος των γραμμών προσέγγισης (TPL) και ο προσανατολισμός των γραμμών

προσέγγισης (Δ_c και AAA_c). Η γραμμή προσέγγισης αποτελείται από τα ενδιάμεσα pixels των αδρανών των οποίων οι περίμετροι βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή (SDT – surface distance threshold).

Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων η μέθοδος Marshall προσεγγίζει την συμπίκνωση στην περιοχή F20 μόνο για τον δείκτη AAA_c . Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τη συμπίκνωση με κύλινδρο. Η απεικόνιση της αρμονικής συνάρτησης των γωνιών προσανατολισμού των γραμμών προσέγγισης για τις διάφορες μεθόδους κάνει πιο κατανοητή την παραπάνω διαπίστωση (σχήμα 2.7). Παρόλο που οι μέθοδοι Marshall και συμπίκνωσης με κύλινδρο τείνουν να πλησιάσουν τα γραφήματα των αποτελεσμάτων του πεδίου, δεν επιτυγχάνεται ταύτιση. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η γυροσκοπική μέθοδος επιτυγχάνει καλύτερη προσομοίωση της συμπίκνωσης στην περιοχή F10 ως προς τον δείκτη του συνολικού μήκους των γραμμών προσέγγισης.



Σχήμα 2.7 Σύγκριση εργαστηριακών μεθόδων (γυροσκοπική, Marshall, Roller) και πυρήνων οδοστρώματος με κριτήριο τη γωνία προσανατολισμού των γραμμών προσέγγισης (Sefidmazgi and Bahia, 2014)

Συνοψίζοντας με βάση τα ευρήματα των ερευνών που αναφέρθηκαν προκύπτει ότι η διερεύνηση των μεθόδων Marshall και συμπίκνωσης με κύλινδρο επιδέχεται εμβάθυνσης τόσο ως προς την επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων συμπίκνωσης

στην εσωτερική δομή των ασφαλτομιγμάτων όσο και ως προς την συγκριτική αξιολόγηση των δύο αυτών εργαστηριακών μεθόδων με την επιτόπου συμπίκνωση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης της παρούσας διπλωματικής εργασίας με κατεύθυνση τη μελέτη της εσωτερικής δομής διαφορετικών τύπων ασφαλτομιγμάτων συμπτυκνωμένων με τις εργαστηριακές μεθόδους Marshall και κυλίνδρου υπό μεταβαλλόμενες παραμέτρους συμπίκνωσης με χρήση του λογισμικού ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων δοκιμίων iPas 2 και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από την ανάλυση πυρήνων οδοστρώματος.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

3.1 Τύποι ασφαλτομιγμάτων

Στη μελέτη συμπεριλήφθηκαν εργαστηριακά δοκίμια της μεθόδου Marshall και της μεθόδου συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου steel segmented Roller), καθώς 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. Να σημειωθεί ότι από εδώ και στο εξής όπου αναφέρεται στην παρούσα εργασία ο όρος μέθοδος Roller εννοείται η μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου steel segmented Roller).

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).

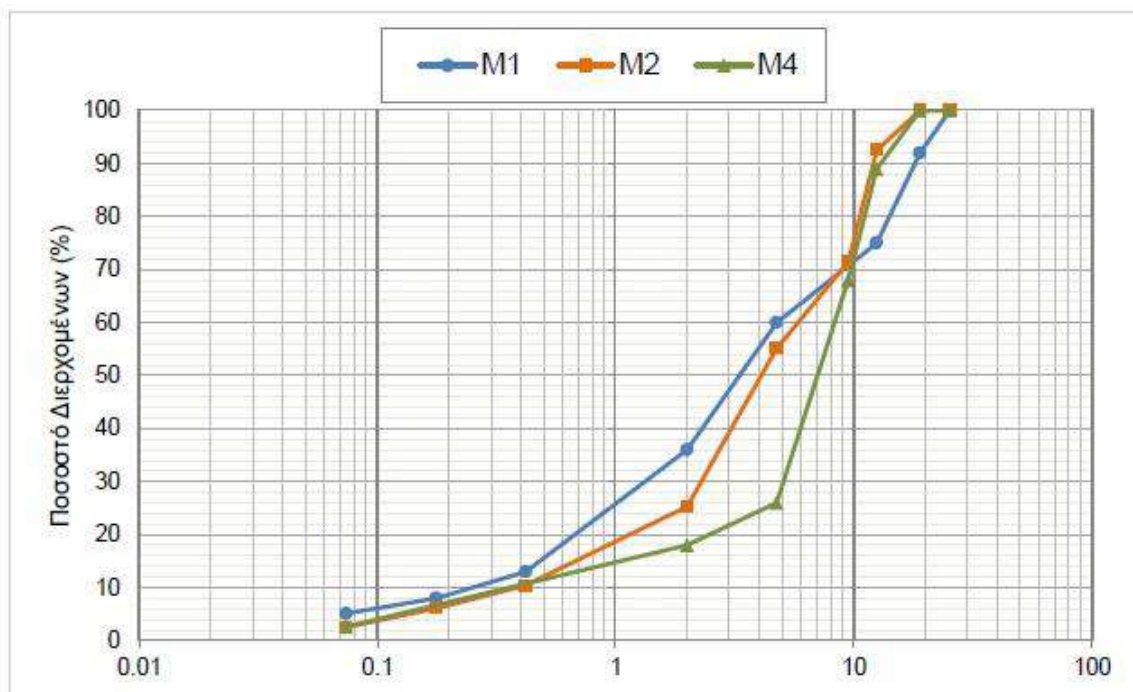
Το μίγμα M4 είναι σύνθεσης ημι-ανοικτού τύπου (ΤΣΥ), με τροποποιημένη άσφαλο με πολυμερή ελαστομερούς τύπου (SBS) σε ποσοστό 4% και ποσοστό ασφάλτου 4.5% κ.β. μίγματος. Τα αδρανή του μίγματος αποτελούνται από αδρανή μεταλλουργικής σκωρίας (steel slag) και ασβεστολιθικά αδρανή, με μέγεθος μέγιστου κόκκου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

Σημειώνεται ότι το μίγμα M2 συμπτυκνώθηκε μόνο με τη μέθοδο Marshall λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας υλικού. Επίσης, τα αποτελέσματα για τους πυρήνες ελήφθησαν από προγενέστερη μελέτη (Σιδέρης, 2014) και συμπληρώθηκαν με τον υπολογισμό κάποιων ακόμα δεικτών εσωτερικής δομής.

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 τις μεθόδους Marshall και Roller στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π., στο πλαίσιο της ερευνητικής δραστηριότητας του εργαστηρίου. Στο παρακάτω σχήμα (3.2) απεικονίζονται οι αντίστοιχες συσκευές του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.



Σχήμα 3.2 Εργαστηριακή συσκευή συμπίκνωσης μεθόδου Roller (αριστερά) και Marshall (δεξιά)

Η συσκευή Marshall αποτελείται από τρία μέρη: το βάθρο συμπίεσης και συγκράτησης του καλουπιού, το καλούπι και τη σφύρα. Κατά τη μέθοδο αυτή, η ενέργεια συμπίκνωσης στο υπό συμπίκνωση δοκίμιο, προσδίδεται με κρούση από την επαναλαμβανόμενη πτώση, χειροκίνητα ή αυτοματοποιημένα, σφύρας συγκεκριμένου βάρους από συγκεκριμένο ύψος. Για το μίγμα M1 ελέγχθηκαν οι θερμοκρασίες 125, 135, 145 °C, για το μίγμα M2 οι 125, 135, 150 °C και για το M4 οι 130, 140, 150, 160 °C. Οι κρούσεις της σφύρας καθορίζονται ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό συμπίκνωσης.

Η συσκευή Roller αποτελείται από μεταλλικό κύλινδρο, ο οποίος ασκεί πίεση στο προς συμπίκνωση ασφαλτόμιγμα μέσω υδραυλικού συστήματος. Η διαδικασία της συμπίκνωσης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και με τη βοήθεια ενός κέντρου ελέγχου ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των περασμάτων του κυλίνδρου και το μέγεθος του

φορτίου συμπύκνωσης. Το μίγμα M1 συμπυκνώθηκε σε 35, 45 και 55 περάσματα του κυλινδρικού τομέα, ενώ το M4 σε 45, 55 και 65. Μία τυπική τιμή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης εντοπίζεται στους 135 °C. Το M1 συμπυκνώθηκε σε θερμοκρασίες 135 και 145 °C, ενώ το M4 σε 130 και 160 °C. Επιπλέον, κατά τη μέθοδο Roller η συσκευή μπορεί να πραγματοποιήσει την συμπύκνωση μέσω του κυλινδρικού τομέα με τέσσερις τρόπους-μεθόδους: στατικά (S), δονητικά (V), στατικά-δονητικά (SV) και δονητικά-στατικά (VS). Η προσθήκη δόνησης είναι μία επιλογή με την οποία αυξάνεται το έργο συμπύκνωσης και προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες του πεδίου. Τα παραπάνω απεικονίζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες (3.2) και (3.3).

Πίνακας 3.2 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμών μεθόδου Marshall

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	TIMEΣ
	Marshall
Τύπος Ασφαλτομίγματος	M1, M2, M4
Θερμοκρασία	125-135-145 για M1, 125-135-150 για M2 και 130-140-150-160 για M4

Πίνακας 3.3 Μεταβλητές παράμετροι δοκιμών μεθόδου Roller

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	TIMEΣ
	Roller
Τύπος Ασφαλτομίγματος	M1, M4
Θερμοκρασία	135-145 για M1 και 130-160 για M4
Κτύποι/Περάσματα	35-45-55 για M1 και 45-55-65 για M4
Μέθοδος	S, SV, V, VS

Με βάση τις παραπάνω τιμές ελέγχθηκαν με τη μέθοδο Marshall για το μίγμα M1 έξι δοκίμια, για το μίγμα M2 έξι δοκίμια, για το μίγμα M4 οκτώ δοκίμια, ενώ με τη μέθοδο Roller ελέγχθηκαν για το μίγμα M1 εικοσιτέσσερα δοκίμια και για το μίγμα M4 εικοσιτέσσερα δοκίμια.

3.3 Πυρήνες οδοστρώματος

Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας και για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης των εργαστηριακών μεθόδων συμπύκνωσης με την συμπύκνωση που επιτυγχάνεται στο πεδίο ελήφθησαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης πυρήνων οδοστρώματος που είχαν υπολογισθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία (Σιδέρης, 2014) και τα οποία εμπλουτίστηκαν με τον υπολογισμό κάποιων πρόσθετων δεικτών εσωτερικής δομής, συγκεκριμένα του μήκους επαφής, του μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση και του δείκτη ISI. Οι εν λόγω δείκτες επεξηγούνται στην επόμενη ενότητα.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η συμπύκνωση στο πεδίο πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια. Μετά τη συμπύκνωση και πριν η οδός δοθεί σε κυκλοφορία, πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτική λήψη πυρήνων διαμέτρου 95 mm από χαρακτηριστικές θέσεις του οδοστρώματος. Συνολικά αναλύθηκαν επτά πυρήνες ασφαλτομίγματος M1, έξι πυρήνες ασφαλτομίγματος M2 και επτά πυρήνες ασφαλτομίγματος M4.

3.4 Κωδικοποίηση

Για να επιτευχθεί η διάκριση των δοκιμών μεταξύ τους, αλλά και η αναφορά στους διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων σε κάθε δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη ονοματολογία.

Για τη μέθοδο Marshall στο όνομα κάθε δοκιμίου συναντάμε πρώτα τη συντομογραφία του ασφαλτομίγματος, στη συνέχεια το κεφαλαίο γράμμα M που σημαίνει ότι το δοκίμιο συμπυκνώθηκε με τη μέθοδο Marshall, ύστερα και πάλι έναν τριψήφιο αριθμό που υποδηλώνει την θερμοκρασία συμπύκνωσης και, τέλος, ένα κεφαλαίο γράμμα (A, B ή C) που υποδηλώνει το δοκίμιο ελέγχου μεταξύ τριών ομοειδών ως προς τη συμπύκνωση δοκιμών. Για παράδειγμα, η ονομασία M1/M/130/A σημαίνει ότι το δοκίμιο του ασφαλτομίγματος M1 της μεθόδου Marshall συμπυκνώθηκε σε θερμοκρασία 130 °C και από τα τρία δοκίμια επιλέχθηκε το A.

Αντίστοιχα, στον κώδικα κάθε δοκιμίου της μεθόδου Roller εντοπίζεται αρχικά μία συντομογραφία που υποδηλώνει το ασφαλτόμιγμα, δηλαδή το “M1” σημαίνει ότι το δοκίμιο της εικόνας προέρχεται από συμπύκνωση του ασφαλτομίγματος M1. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας τριψήφιος αριθμός, ο οποίος υποδηλώνει την θερμοκρασία συμπύκνωσης του δοκιμίου. Ύστερα ακολουθούν ένα ή δύο κεφαλαία γράμματα, τα οποία δείχνουν την μεθοδολογία συμπύκνωσης του δοκιμίου, δηλαδή “S” για στατική,

“V” για δονητική, “SV” για συνδυασμό στατικής-δονητικής και “VS” για συνδυασμό δονητικής-στατικής. Μετά δηλώνεται με έναν διψήφιο αριθμό το πλήθος των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα της συσκευής και, τέλος, ένα κεφαλαίο γράμμα υποδηλώνει από ποιο τμήμα του καλουπιού έγινε η λήψη του δοκιμίου-πυρήνα. Για παράδειγμα, η ονομασία M1/135/SV/55/B σημαίνει ότι το δοκίμιο του ασφαλτομίγματος M1 συμπτυκνώθηκε στους 135 °C με συνδυασμό κατά σειρά στατικής-δονητικής συμπίκνωσης, 55 περάσματα του κυλινδρικού τομέα και από τα 4 τμήματα του καλουπιού (A, B, C, D) επιλέχθηκε (τυχαία) το B.

4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

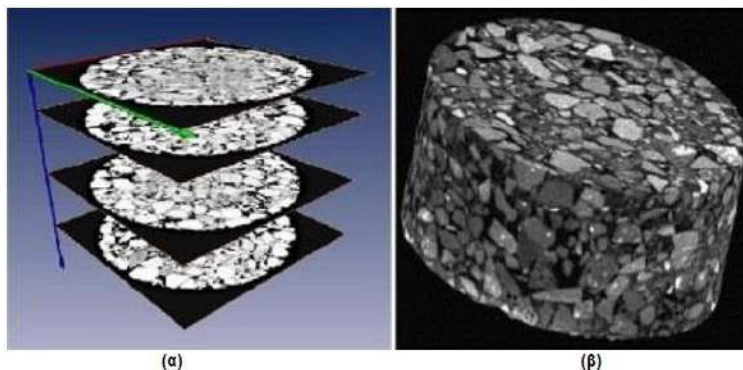
Η διαδικασία της ανάλυσης ψηφιακής εικόνας βασίζεται στις αρχές της Υπολογιστικής Όρασης και περιλαμβάνει την χρήση αλγορίθμων που παραλαμβάνουν τις ψηφιακές εικόνες ως δεδομένα εισόδου και, ύστερα από επεξεργασία, εξάγουν συμβολικές περιγραφές των εν λόγω οπτικών σκηνών, με σκοπό την παραγωγή σημαντικής πληροφορίας. Τρία είναι τα βασικά στάδια της εν λόγω διαδικασίας: λήψη, επεξεργασία και ανάλυση.

4.1.1 Λήψη

Η λήψη αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο μετατρέπεται ένα αντικείμενο, στην περίπτωση της παρούσας έρευνας ένα δοκίμιο ασφαλτομίγματος, σε ψηφιακή εικόνα. Υπάρχουν δύο μέθοδοι λήψης ψηφιακής εικόνας από ένα ασφαλτόμιγμα: οι καταστρεπτικές και οι μη καταστρεπτικές.

Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι

Η λήψη της εικόνας της εσωτερικής δομής πραγματοποιείται μέσω συστήματος Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων Χ (X-ray Computed Tomography). Η συσκευή σκανάρει περιμετρικά το δοκίμιο με τη βοήθεια των ακτίνων Χ σε διαφορετικά καθ' ύψος του δοκιμίου οριζόντια επίπεδα. Στη συνέχεια, η αλληλουχία των εικόνων που έχουν ληφθεί καθ' ύψος του δοκιμίου τοποθετούνται στη σειρά και λαμβάνεται μία τρισδιάστατη λεπτομερής ψηφιακή απεικόνιση της εσωτερικής δομής του δοκιμίου (σχήμα 4.1).



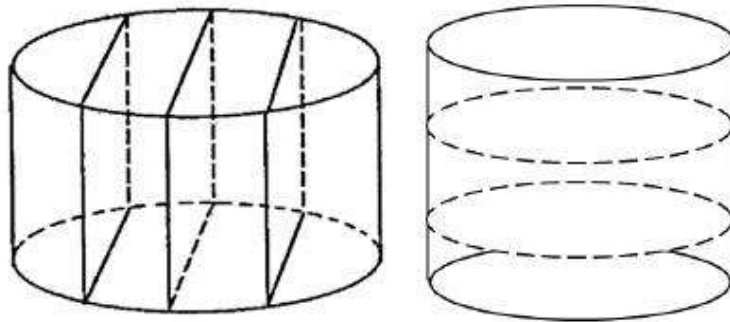
Σχήμα 4.1 Ακτινογραφίες καθ' ύψος και τρισδιάστατη ανασύνθεση του δοκιμίου

Σημαντικό πλεονέκτημα των μη καταστρεπτικών μεθόδων είναι η διατήρηση της ακεραιότητας του δοκιμίου.

Ωστόσο, η χρήση αποκλειστικά συστήματος ΥΤ ακτίνων Χ για τη λήψη της εικόνας του εσωτερικού του ασφαλτομίγματος αποτελεί πρόβλημα, καθώς ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι ιδιαίτερα ακριβός και ο χειρισμός του προϋποθέτει εξειδικευμένη τεχνογνωσία.

Καταστρεπτικές Μέθοδοι

Οι καταστρεπτικές μέθοδοι απαιτούν την κοπή του δοκιμίου, έτσι ώστε να γίνει η λήψη της εσωτερικής εικόνας του ασφαλτομίγματος. Η κοπή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά την οριζόντια είτε κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Οριζόντιες και κάθετες τομές δοκιμίου

Μετά την κοπή η λήψη της ψηφιακής εικόνας του δοκιμίου επιτυγχάνεται με τη χρήση επίπεδου ψηφιακού σαρωτή (scanner). Η διατομή του δοκιμίου τοποθετείται στον σαρωτή και λαμβάνεται απευθείας η δισδιάστατη εικόνα.

Η χρήση ψηφιακού σαρωτή δεν απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία ούτε υψηλό κόστος σε εξοπλισμό, συνεπώς είναι πιο προσιτή για έρευνα σε σύγκριση με τις μη καταστρεπτικές μεθόδους. Η ψηφιακή σάρωση προσφέρει στον ερευνητή τη δυνατότητα λήψης της εικόνας σε διαφορετικές αναλύσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της έρευνας και επιτρέπει την περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων μέσω κατάλληλων λογισμικών. Επιπλέον, προγενέστερες έρευνες έχουν δείξει ότι η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω της δισδιάστατης ανάλυσης ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα.

4.1.2 Επεξεργασία

Η επεξεργασία της ψηφιακής εικόνας αποσκοπεί στην βελτίωση της οπτικής της εμφάνισης (ποιότητα εικόνας) και στην προετοιμασία της για την μεταγενέστερη μέτρηση των διαφόρων χαρακτηριστικών της. Η εξαγωγή δεδομένων από την ψηφιακή εικόνα προϋποθέτει την σαφή απεικόνιση των χαρακτηριστικών της, ώστε να μην αφήνονται περιθώρια για σύγχυση ή αμφιβολία και να περιορίζονται κατά το μέγιστο δυνατό τα λάθη στις μετρήσεις.

Παρόλο που ανά τα χρόνια έχει εφαρμοστεί πληθώρα μεθοδολογιών επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων, η βασική αρχή που τις διέπει όλες είναι κοινή. Στην ψηφιακή εικόνα εφαρμόζονται μία σειρά από κατάλληλα φίλτρα και τελεστές επεξεργασίας με στόχο των προσδιορισμό και την τελική απομόνωση των περιοχών ενδιαφέροντος από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της εικόνας.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα μεγάλο εύρος φίλτρων για την επεξεργασία εικόνας, κάθε ένα από τα οποία υπηρετεί ένα διαφορετικό σκοπό. Ανάλογα, λοιπόν, με τους στόχους της έρευνας γίνεται και η επιλογή των κατάλληλων φίλτρων, καθώς και των κατάλληλων ρυθμίσεων και συνδυασμών αυτών. Για παράδειγμα, ο χρωματικός θόρυβος σε μία ψηφιακή εικόνα μπορεί να αυξομειωθεί με το φίλτρο noise reduction. Ωστόσο, κάθε φορά που αφαιρείται θόρυβος από την εικόνα, αφαιρούνται επίσης λεπτομέρειες και η εικόνα γίνεται πιο θολή. Συνεπώς, το μέγεθος του επιβαλλόμενου φίλτρου διόρθωσης του θορύβου θα πρέπει να καθορισθεί από τον ερευνητή και τους στόχους που έχει θέσει. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει ένα προκαθορισμένο μοτίβο επεξεργασίας της ψηφιακής εικόνας μέσω μίας προκαθορισμένης σειράς φίλτρων. Η επεξεργασία εξυπηρετεί την ερευνητική διαδικασία και τα φίλτρα καθορίζονται με βάση τους στόχους της τελευταίας.

Οι μεθοδολογίες επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας ασφατομίσματος 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 ανεπτυγμένους αλγόριθμους για την εφαρμογή φίλτρων επεξεργασίας και τελεστών. Απαιτείται μόνο η εισαγωγή ορισμένων δεδομένων από το χρήστη.
- ❖ 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.

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του λογισμικού iPas 2 (Image Processing and Analysis System), το οποίο χρησιμοποιεί ημι-αυτοματοποιημένο αλγόριθμο. Δέχεται ως είσοδο μια δισδιάστατη εικόνα συνοδευόμενη από συγκεκριμένες ιδιότητες του μίγματος και κατόπιν εφαρμόζεται μια σειρά από φίλτρα επεξεργασίας. 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).

4.1.3 Ανάλυση

Αφού ολοκληρωθεί ο ψηφιακός διαχωρισμός των αδρανών από τις υπόλοιπες φάσεις του ασφαλτομίγματος ακολουθεί η ανάλυση της εικόνας. Ουσιαστικά σε αυτό το στάδιο μετρώνται οι διάφοροι δείκτες εσωτερικής δομής του ασφαλτομίγματος με τη βοήθεια κατάλληλων μαθηματικών αλγορίθμων.

Πρακτικό ενδιαφέρον για τους μελετητές παρουσιάζει η κατανομή των αδρανών που αποτελούν τον σκελετό του ασφαλτομίγματος. Η αλληλεπίδραση τους περιγράφεται από τους εξής δείκτες:

- ❖ Σημεία επαφής (contact points), είναι τα σημεία όπου γειτονικά αδρανή εφάπτονται. Πέραν του αριθμού των σημείων επαφής είναι δυνατό να ληφθούν υπόψιν και άλλοι δείκτες που σχετίζονται με την επαφή των αδρανών, όπως το μήκος επαφής ή το πλήθος ή μήκος επαφής των σημείων γειτονικών αδρανών τα οποία έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και σχηματίζουν μία αλληλουχία (αλυσίδα) αδρανών που εφάπτονται, δηλαδή μετρώνται αδρανή τα οποία όντως δημιουργούν ένα σκελετό και δεν είναι απομονωμένα σε μικρές ομάδες.

- ❖ Προσανατολισμός (orientation), ο οποίος αναφέρεται στην διεύθυνση που είναι τοποθετημένα τα αδρανή σε σχέση με κάποιο προκαθορισμένο άξονα.
- ❖ Διαχωρισμός (segregation), που αφορά την χωρική κατανομή των αδρανών στην επιφάνεια του μίγματος ανάλογα με το μέγεθός τους.

4.2 Μεθοδολογία ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων δοκιμίων ασφαλομίγματος

Στο σχήμα (4.3) παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα της μεθοδολογίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας που ακολούθησε η παρούσα διπλωματική εργασία για την μελέτη των δοκιμίων ασφαλομίγματος. Κάθε επιμέρους στάδιο αναπτύσσεται λεπτομερώς στις ακόλουθες υποενότητες.

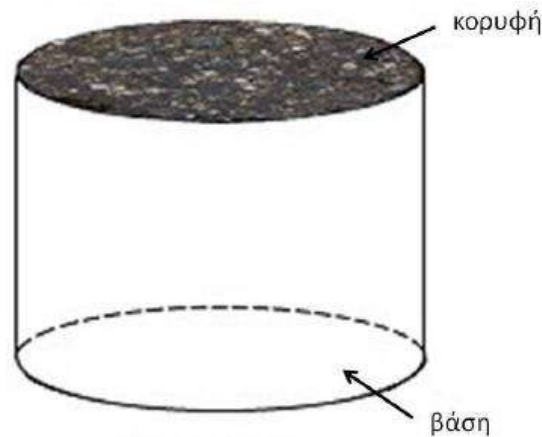


Σχήμα 4.3 Βήματα μεθοδολογίας ανάλυσης ψηφιακής εικόνας δοκιμίου

4.2.1 Λήψη

Η λήψη της ψηφιακής εικόνας των δοκιμίων των ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιήθηκε με ψηφιακό επίπεδο σαρωτή και συγκεκριμένα το μοντέλο HP Scanjet 3800.

Σχετικά με την ανάλυση της εικόνας (image resolution) ισχύει ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των pixels ανά ίντσα (pixels per inch), τόσο ακριβέστερη είναι η ψηφιακή απεικόνιση. Για τα μίγματα M1 και M2 επιλέχθηκε ανάλυση 600 ppi, ενώ για το μίγμα M4 επιλέχθηκε ανάλυση 1200 ppi, σύμφωνα με τις επιλογές στις ρυθμίσεις σάρωσης που παρουσιάζονται σε προγενέστερη έρευνα (Σιδέρης, 2014).



Σχήμα 4.4 Επιφάνειες σάρωσης

Επιπλέον, επιλέχθηκε σάρωση με το σύστημα απεικόνισης χρωματισμών million colors, καθώς οι υπόλοιπες προσφερόμενες επιλογές προσδίδουν μικρότερο αριθμό διαφορετικών χρωματισμών. Αυτό διαπιστώνεται από τη σύγκριση των χρωματικών ιστογραμμάτων για κάθε σύστημα απεικόνισης χρωματισμών, ενώ οι διαφορές στην ποιότητα της εικόνας είναι εμφανείς ακόμα και με γυμνό μάτι.

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

Μετά τον καθορισμό των βασικών ρυθμίσεων σαρώθηκαν για κάθε δοκίμιο δύο επιφάνειες, η κορυφή και η βάση, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.4).

4.2.2 Προεπεξεργασία

Σε αυτό το στάδιο η σκαναρισμένη εικόνα του δοκιμίου απομονώνεται από το περιβάλλον λευκό φόντο και εξαλείφονται οι ατέλειες περιμετρικά τη επιφάνειας. Αυτό επιτυγχάνεται αποκόπτοντας περιμετρικά το δοκίμιο (circular crop) και τοποθετώντας το σε ένα νέο μαύρο φόντο.

Η αλλαγή του χρώματος του φόντου γίνεται διότι, όπως θα φανεί παρακάτω, ύστερα από την επεξεργασία της εικόνας η απεικόνιση των αδρανών γίνεται με λευκό χρώμα, ενώ των υπόλοιπων φάσεων με μαύρο. Επειδή στην έρευνα το στοιχείο που μελετάται είναι η κατανομή των αδρανών είναι επιθυμητή η αποφυγή ενδεχόμενης σύγχυσης των λευκών αδρανών με ένα λευκό φόντο.

Επιπλέον, σε αυτό το βήμα εικόνες δοκιμίων που παρουσίαζαν μικρές ατέλειες, για παράδειγμα ξεχωριστά αδρανή που φαίνονταν ενωμένα ή θραυσμένα αδρανή που η ρωγμή δεν ήταν διακριτή, επεξεργάζονταν με τη βοήθεια του λογισμικού Adobe Photoshop για την εξάλειψη αυτών των ατελειών και την εξαγωγή ορθής πληροφορίας για τα χαρακτηριστικά τους από την μετέπειτα ανάλυση. Σε κάθε περίπτωση, οι διορθώσεις που έγιναν με το Photoshop δεν αλλοίωσαν την εικόνα της εσωτερικής δομής των δοκιμίων ασφαλομίγματος.

4.2.3 Επεξεργασία

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχει ένα μεγάλο εύρος φίλτρων που μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτίωση και την προετοιμασία της ψηφιακής εικόνας για την μετέπειτα ανάλυση της. Εδώ παρουσιάζονται τα φίλτρα που χρησιμοποιεί το λογισμικό iPas 2 και ως εκ τούτου είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

4.2.3.1 Φίλτρο Ενδιάμεσης Τιμής (Median Filter)

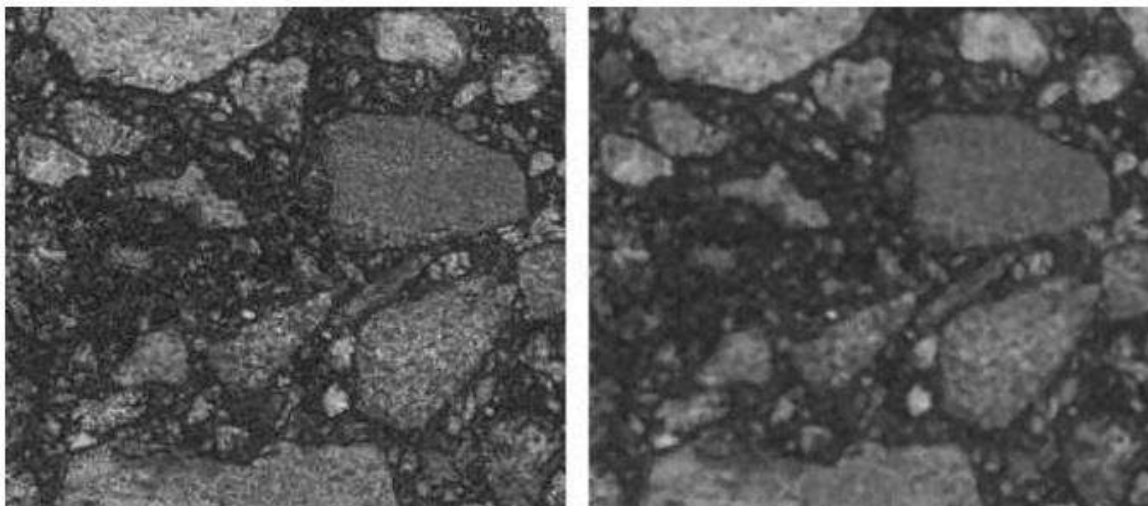
Ο όρος θόρυβος (noise) σε μία εικόνα αναφέρεται στις διακυμάνσεις που εμφανίζουν τα διάφορα εικονοστοιχεία (pixels) όσον αφορά την φωτεινότητα τους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θορύβου, όπως Gaussian noise, Uniform noise, Impulse noise, κ.τ.λ. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε μη επαρκή φωτισμό κατά τη λήψη της εικόνας, υψηλή θερμοκρασία, κακή ποιότητα λήψης ή χαμηλή ανάλυση και σε κάθε περίπτωση αποτελεί πρόβλημα, καθώς αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της εικόνας.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος υπάρχουν ψηφιακά φίλτρα που εισάγουν τεχνητό θόρυβο σε φωτογραφίες, κατά την επεξεργασία τους, με σκοπό για παράδειγμα την εξομάλυνση μιας περιοχής της εικόνας με διάχυση των εικονοστοιχείων σε αυτήν.

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

Σχήμα 4.5 Γειτονιά 3x3 ενός εικονοστοιχείου

Φίλτρο αυτής της κατηγορίας είναι το φίλτρο της ενδιάμεσης τιμής (median filter), ένα μη γραμμικό χωρικό φίλτρο εξομάλυνσης του θορύβου με χρήση της διαδικασίας κυλιόμενων παραθύρων-γειτονιών (sliding neighborhood operation). Αποτελεί 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 (4.5) απεικονίζεται η γειτονιά διαστάσεων 3x3 του pixel με συντεταγμένες (i, j).



Σχήμα 4.6 Εφαρμογή φίλτρου ενδιάμεσης τιμής

Αξίζει να σημειωθεί ότι το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής ενδείκνυται για την αντιμετώπιση του θορύβου Salt & Pepper, ο οποίος προσθέτει άσπρα και μαύρα pixels στην εικόνα με

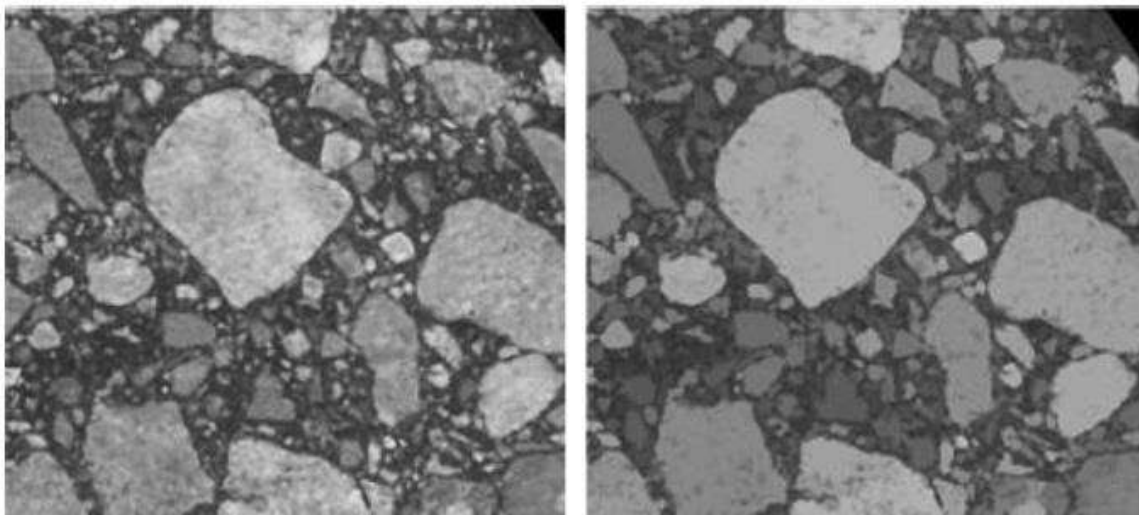
ομοιόμορφη κατανομή δημιουργώντας την εντύπωση διασκορπισμένου αλατιού και πιπεριού στην επιφάνεια της. Η διόρθωση δίνει αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα χωρίς να θολώνει πολύ την εικόνα.

Στο παραπάνω σχήμα (4.6) είναι φανερή η διαφορά στην ψηφιακή εικόνα μετά την επιβολή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής. Τα pixels που διακρίνονταν αρχικά με γυμνό μάτι έχουν εξομαλυνθεί με τα γειτονικά τους και η εικόνα έχει θολώσει ελάχιστα.

4.2.3.2 Φίλτρο Hmax

Οι έντονες διακυμάνσεις στο χρωματισμό που εντοπίζονται σε μία ψηφιακή εικόνα ασφαλτομίγματος δυσκολεύουν τη διαδικασία απομόνωσης των αδρανών από τις υπόλοιπες φάσεις του μίγματος. Αυτό το φαινόμενο δύναται να αντιμετωπιστεί με την τεχνική καταστολής των τοπικών μεγίστων, η οποία εξομαλύνει την ένταση της φωτεινότητας των pixels και εφαρμόζεται μέσω του φίλτρου Hmax.

Η λειτουργία του εν λόγω φίλτρου είναι απλή. Ο χρήστης δίνει μία μέγιστη οριακή τιμή φωτεινότητας H και οι τιμές φωτεινότητας που υπερβαίνουν το όριο αντικαθίστανται από την συγκεκριμένη τιμή H.



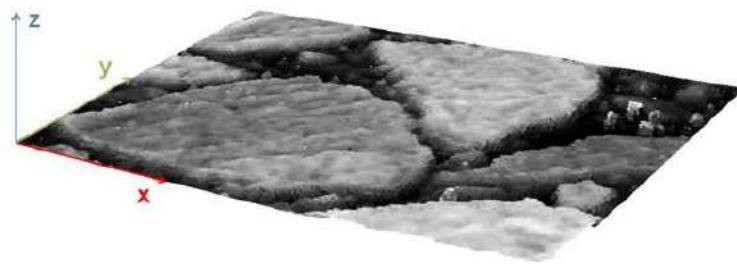
Σχήμα 4.7 Εφαρμογή φίλτρου Hmax

Όπως φαίνεται από το σχήμα (4.7) μετά την επιβολή του φίλτρου Hmax η ποικιλία χρωματισμών που εντοπίζεται στην επιφάνεια ενός αδρανούς ομαλοποιείται σε μία οριακή τιμή φωτεινότητας. Η επιφάνεια του αδρανούς διακρίνεται πλέον όλη με μία συγκεκριμένη απόχρωση του γκρι.

4.2.3.3 Μετασχηματισμός Watershed

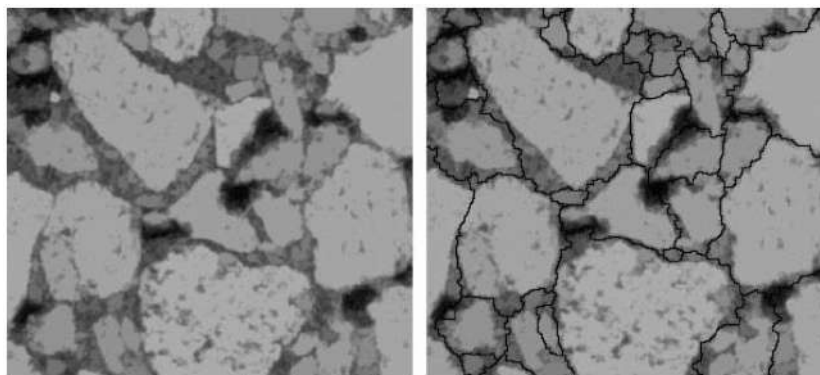
Το φίλτρο αυτό προσφέρει την δυνατότητα διαχωρισμού της ψηφιακής εικόνας σε περιοχές ενδιαφέροντος (regions of interest), δηλαδή την κατάτμηση της (image segmentation) σε ομοιογενή τμήματα σύμφωνα πάντα με κάποιο κριτήριο.

Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή πως μια εικόνα αποχρώσεων γκριζου (grayscale) είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψιν ως ένα τοπογραφικό ανάγλυφο (heightmap), όπου το ύψος του ανάγλυφου σε κάθε σημείο αντιστοιχεί στη φωτεινότητα του pixel στο συγκεκριμένο σημείο.



Σχήμα 4.8 Αναλογία εικόνας ασφαλτομίγματος με τοπογραφικό ανάγλυφο

Αν σε μία τρισδιάστατη εικόνα ασφαλτομίγματος θεωρηθεί ότι οι άξονες x και y ταυτίζονται με το οριζόντιο επίπεδο, ενώ ο άξονας z δείχνει την φωτεινότητα κάθε σημείου της επιφάνειας του ασφαλτομίγματος η βασική ιδέα του φίλτρου watershed μπορεί να γίνει πιο κατανοητή (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.9 Εφαρμογή μετασχηματισμού watershed

Στην παρούσα εργασία στόχος είναι η απομόνωση των αδρανών από τις υπόλοιπες φάσεις. Έργο του φίλτρου watershed είναι να παρουσιάσει τα αδρανή ως μεμονωμένες «νησίδες» που διαχωρίζονται μεταξύ τους με συνεχείς γραμμές (ridgelines) (σχήμα 4.9).

Ο αλγόριθμος του φίλτρου watershed όσον αφορά τη λειτουργία του στο λογισμικό iPas 2 δεν απαιτεί την εισαγωγή κάποιας τιμής από τον χρήστη σε αντίθεση με τα υπόλοιπα τρία φίλτρα που χρησιμοποιεί το λογισμικό. Με άλλα λόγια, η κατάτμηση της εικόνας γίνεται αυτόματα χωρίς την μεσολάβηση του χρήστη. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι αλλαγή στις τιμές που εισάγει ο χρήστης για τα υπόλοιπα φίλτρα επιφέρει αλλαγές και στον τρόπο που γίνεται η κατάτμηση της εικόνας με το φίλτρο watershed.

4.2.3.4 Κατωφλίωση (Threshold)

Με τη βοήθεια αυτού του φίλτρου η εικόνα χωρίζεται σε περιοχές ενδιαφέροντος μετατρεπόμενη σε δυαδική (binary), δηλαδή ασπρόμαυρη. Στην εν λόγω μελέτη οι περιοχές ενδιαφέροντος, δηλαδή τα αδρανή, μετά την επιβολή της κατωφλίωσης αποκτούν λευκό χρώμα, ενώ οι υπόλοιπες φάσεις απεικονίζονται με μαύρο χρώμα, καθιστώντας την κατάτμηση της εικόνας ακόμα πιο ξεκάθαρη και για τον απλό παρατηρητή.

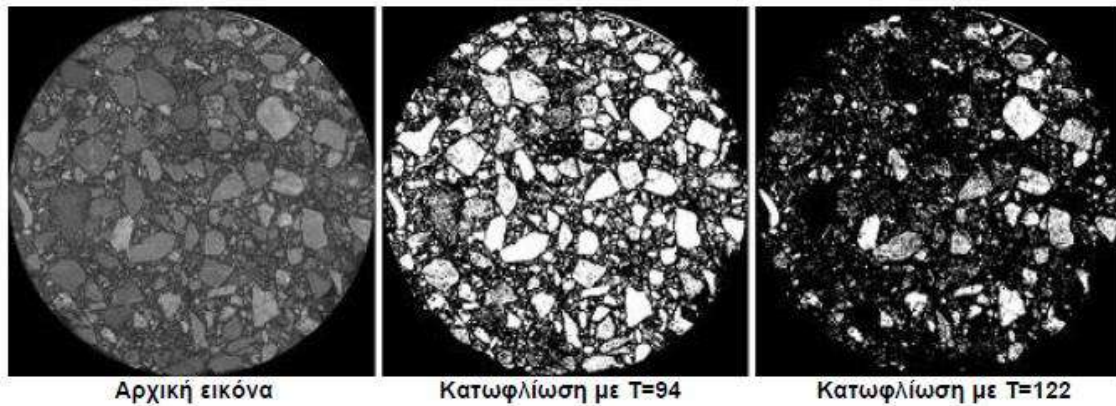
Το φίλτρο χρησιμοποιεί την εξίσωση:

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

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

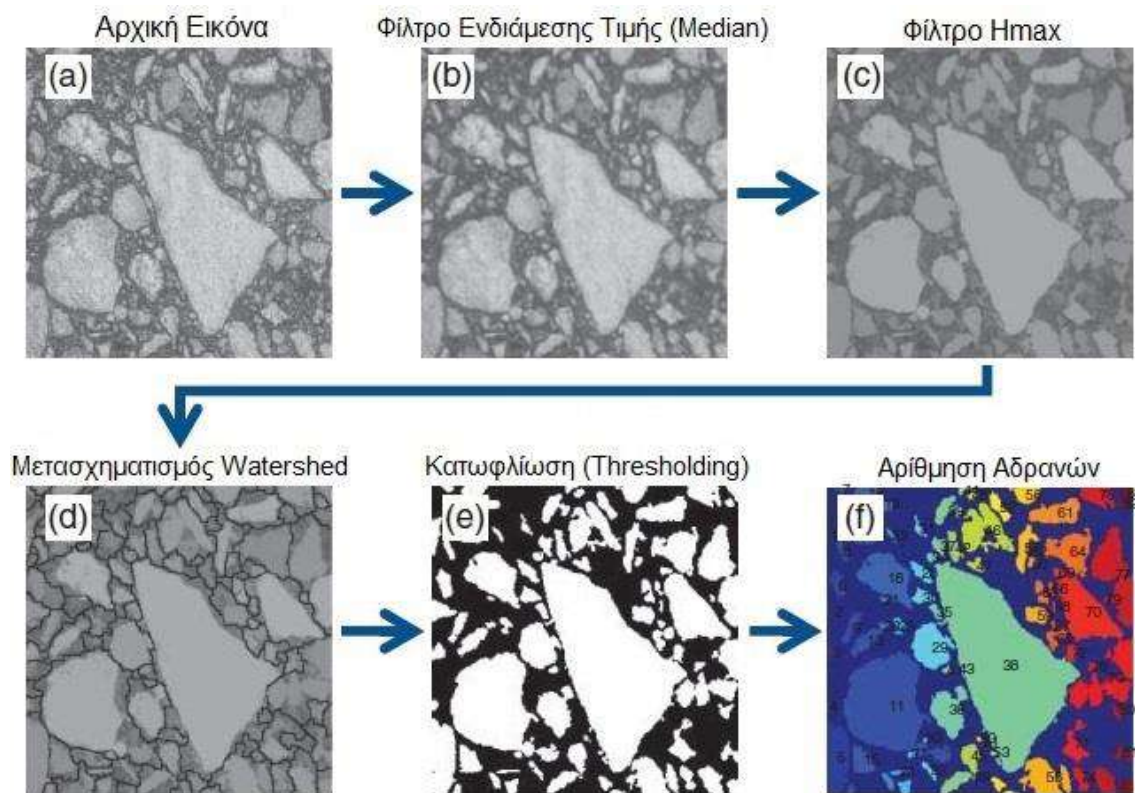
Κατά τη μέθοδο αυτή, οι τιμές φωτεινότητας των pixels της εικόνας εισόδου συγκρίνονται με την οριακή τιμή T κατωφλίου (threshold). Αν είναι μικρότερες, αντικαθίστώνται από την τιμή 0 (μαύρο), ενώ αν είναι μεγαλύτερες ή ίσες, αντικαθίστώνται από την τιμή 255 (λευκό). Το μαύρο (0) αντιπροσωπεύει την άσφαλο μαζί με τα κενά, ενώ το λευκό (255), τα αδρανή.

Η επιλογή της τιμής T επαφίεται στην κρίση του χρήστη όσον αφορά τη λειτουργία του φίλτρου εντός του λογισμικού iPas 2. Παρόλο που υπάρχουν διάφορες τεχνικές προσδιορισμού της πιο κατάλληλης τιμής T σε αυτή την εργασία η τελική επιλογή του T προέκυψε για κάθε δοκίμιο έπειτα από δοκιμές και με κριτήρια την οπτική επισκόπηση της τελικής επεξεργασμένης εικόνας, καθώς και κάποια μέτρα σύγκρισης που προσφέρει το λογισμικό και αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.10 Εφαρμογή κατωφλίωσης με δύο διαφορετικές τιμές κατωφλίου

Όπως φαίνεται και στο παράδειγμα του σχήματος (4.10), η διαφορά στην επεξεργασμένη εικόνα για διαφορετικές τιμές του T είναι εμφανής. Η τελική εικόνα με $T=94$ είναι σαφώς πιο αντιπροσωπευτική της αρχικής. Η κατωφλίωση με $T=122$ έχει εξαφανίσει πολλά αδρανή, αλλά και όσα φαίνονται έχουν αλλοιωμένα χαρακτηριστικά, δηλαδή λάθος εμβαδόν.



Σχήμα 4.11 Αλγόριθμος επεξεργασίας εικόνας μέσω iPas

Να σημειωθεί ακόμα ότι αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω στάδια γίνεται αρίθμηση των αδρανών (labeling) για λόγους ευχέρειας στην ταξινόμηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων (σχήμα 4.11).

4.2.3.5 Λειτουργία του λογισμικού iPas 2

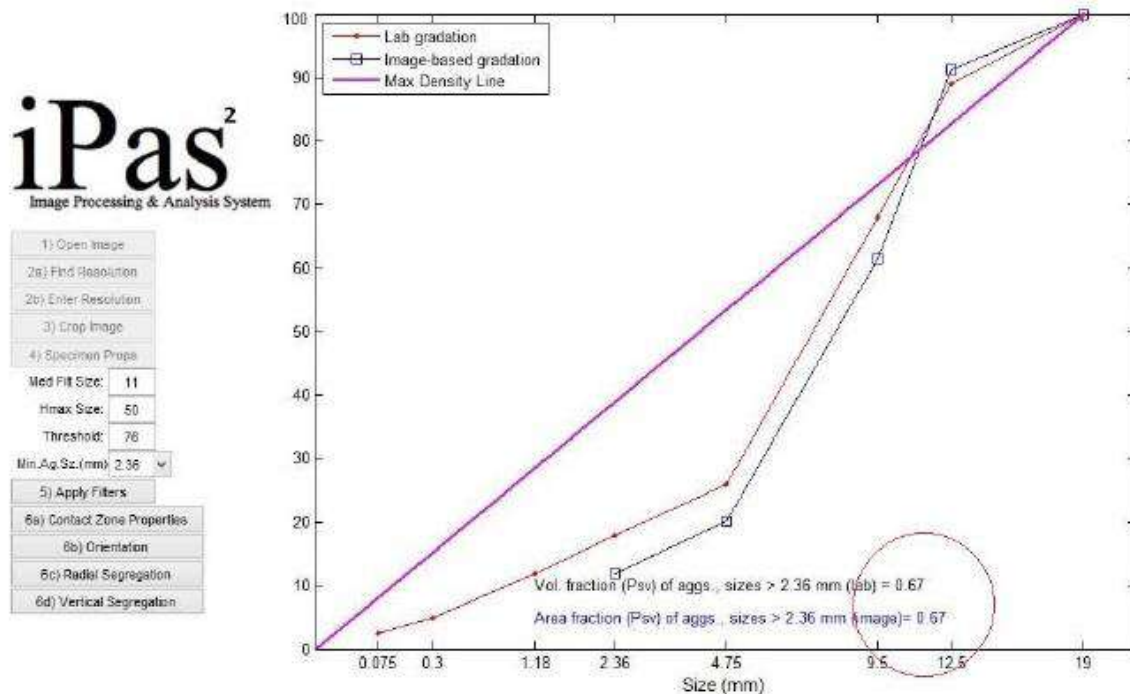
Το λογισμικό iPas εξειδικεύεται στην επεξεργασία και ανάλυση δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων ασφαλομίγματος. Αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ερευνών της ομάδας Task Group 2 (Technical Committee 237-SIB) υπό την αιγίδα της διεθνούς ένωσης RILEM, ως ευρύτερο μέλος της οποίας συμμετέχει και το Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π.

Η μεθοδολογία για την επιλογή φίλτρων στο iPas 2 είναι η εξής:

Αρχικά ο χρήστης είναι υποχρεωμένος να 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 κόσκινου (PR_i) και δημιουργείται το αντίστοιχο διάγραμμα.

Στη συνέχεια ο χρήστης καλείται να επιλέξει αυθαίρετα κάποιες τιμές για τα φίλτρα median, Hmax και threshold. Επιπλέον, ο χρήστης πρέπει να καθορίσει και το ελάχιστο μέγεθος αδρανούς (με βάση τα μεγέθη αδρανών που συμπεριλαμβάνονται στην κοκκομετρική διαβάθμιση), το οποίο θα ληφθεί υπόψιν στους μετέπειτα υπολογισμούς. Αυτό ζητείται για τον εξής λόγο: η ανάλυση (resolution) που έχει επιτευχθεί για την ψηφιακή εικόνα του δοκιμίου είναι συγκεκριμένη, δηλαδή τα pixels ανά mm στην εικόνα είναι σταθερά και εξαρτώνται από την ανάλυση που επιλέχθηκε στις ρυθμίσεις του σαρωτή. Μικροσκοπικά αδρανή (παιπάλη) είναι δύσκολο να γίνουν αντιληπτά από το λογισμικό κατά την ανάλυση εικόνας και αν ληφθούν υπόψιν η ανάλυση θα οδηγήσει σε σημαντικό ποσοστό λάθους. Ορίζοντας το ελάχιστο μέγεθος αδρανούς (minimum aggregate size) αποφεύγουμε τυχόν αστοχίες στην πληροφορία που εξάγουμε. Άλλωστε τα αδρανή που μας ενδιαφέρουν και συντελούν στη μηχανική συμπεριφορά του ασφαλομίγματος είναι τα πιο χονδρόκοκκα. Η απλουστευτική ταύτιση των μικροσκοπικών αδρανών με την άσφαλτο και τα κενά αέρα για την διευκόλυνση της έρευνας, λόγω του πρώιμου ακόμα σταδίου που βρίσκεται το λογισμικό ανάλυσης, αποτελεί μία ασφαλή θεώρηση.

Το λογισμικό υπολογίζει 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}).



Σχήμα 4.12 Κριτήρια επεξεργασίας iPas

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 να ταυτίζονται. Στο σχήμα (4.12) 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.

Οι κατασκευαστές προτείνουν να εισάγονται στο λογισμικό κάποιες αρχικές προκαθορισμένες (default) τιμές για κάθε φίλτρο. Στη συνέχεια ο χρήστης μεταβάλλοντας αυτές τις τιμές θα πρέπει να επιτύχει ταύτιση του εργαστηριακού κλάσματος και του κλάσματος που προέκυψε από την εικόνα (η ταύτιση των

κοκκομετρικών καμπυλών προτείνεται να αγνοείται ως κριτήριο επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού τιμών των φίλτρων).

4.2.3.6 Παρατηρήσεις

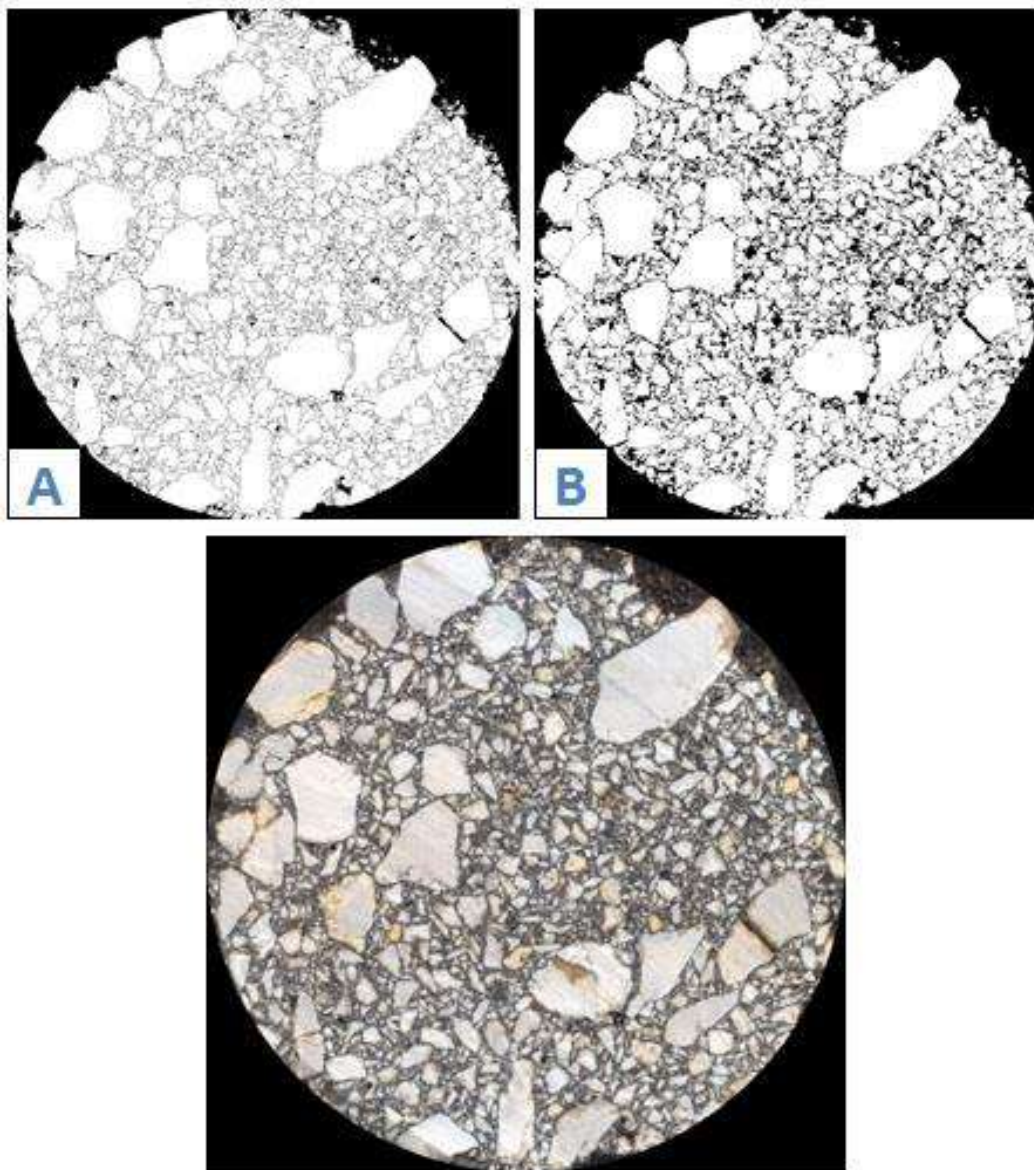
Με χρήση της εικόνας της κορυφής του δοκιμίου M1/M/135/B παρουσιάζεται παρακάτω μία διαδικασία διερεύνησης με σκοπό την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού τιμών των φίλτρων: αρχικά η διαδικασία βασίζεται στην ταύτιση μεταξύ των κλασμάτων $P_{sv}^{im}-P_{sv}$ και κατόπιν στην οπτική επισκόπηση της εικόνας του δοκιμίου σε κάθε βήμα επεξεργασίας της.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η σειρά των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, στη δεύτερη εμφανίζονται κωδικοποιημένα οι συνδυασμοί τιμών των φίλτρων, στην τρίτη και τέταρτη στήλη το εργαστηριακό κλάσμα (P_{sv}) και το κλάσμα που υπολογίζεται από την εικόνα (P_{sv}^{im}) του δοκιμίου αντίστοιχα. Η κωδικοποίηση στην δεύτερη στήλη έχει τη μορφή 5-40-95, όπου το 5 δείχνει την τιμή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής (median), το 40 είναι η τιμή του φίλτρου H_{max} και το 95 είναι η τιμή του φίλτρου της κατωφλίωσης (threshold). Το φίλτρο μετασχηματισμού watershed εφαρμόζεται αυτόματα, δηλαδή δεν απαιτεί την εισαγωγή κάποιας τιμής στο λογισμικό από τον χρήστη.

Παρατηρώντας τις επεξεργασμένες εικόνες του σχήματος (4.13), καθώς και τον πίνακα (4.1), γίνεται φανερό ότι η ταύτιση των κλασμάτων $P_{sv}^{im}-P_{sv}$ είναι δυνατόν να επιτευχθεί για παραπάνω του ενός συνδυασμού τιμών των φίλτρων. Ωστόσο, το αποτέλεσμα των τελικώς επεξεργασμένων εικόνων παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση. Στο παράδειγμα ο συνδυασμός τιμών φίλτρων 5-40-110 παράγει μία τελικώς επεξεργασμένη εικόνα (εικόνα Β) η οποία δείχνει ότι η μετατροπή της αρχικής εικόνας του δοκιμίου σε δυαδική (ασπρόμαυρη) ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην αλληλεμπλοκή των τριών φάσεων του μίγματος που παρατηρείται οπτικά στο δοκίμιο. Αντίθετα ο συνδυασμός 1-50-90 παράγει την εικόνα Α στην οποία το συνολικό εμβαδόν των αδρανών (το σύνολο των περιοχών με λευκό χρώμα) δεν συμπίπτει με τα αδρανή που φαίνονται στην αρχική εικόνα του δοκιμίου. Αν δεν είχε γίνει οπτική σύγκριση των επεξεργασμένων εικόνων με την αρχική εικόνα του δοκιμίου και η επιλογή του συνδυασμού τιμών των φίλτρων πραγματοποιούνταν μόνο με κριτήριο την ταύτιση των κλασμάτων $P_{sv}^{im}-P_{sv}$ πολύ πιθανά να είχε επιλεγθεί λάθος συνδυασμός τιμών των φίλτρων.

Πίνακας 4.1 Παραμετρική διερεύνηση φίλτρων με βάση τα κλάσματα P_{sv}^{im} - P_{sv}

	Συνδυασμοί Τιμών Φίλτρων	Κλάσμα από Εργαστήριο (P_{sv})	Κλάσμα από Εικόνα (P_{sv}^{im})
A	1-50-90	0,54	0,54
B	5-40-110	0,54	0,54



Σχήμα 4.13 Τελικώς επεξεργασμένες εικόνες δοκιμίου (πάνω) και αρχική εικόνα δοκιμίου (κάτω) με βάση τα κλάσματα P_{sv}^{im} - P_{sv}

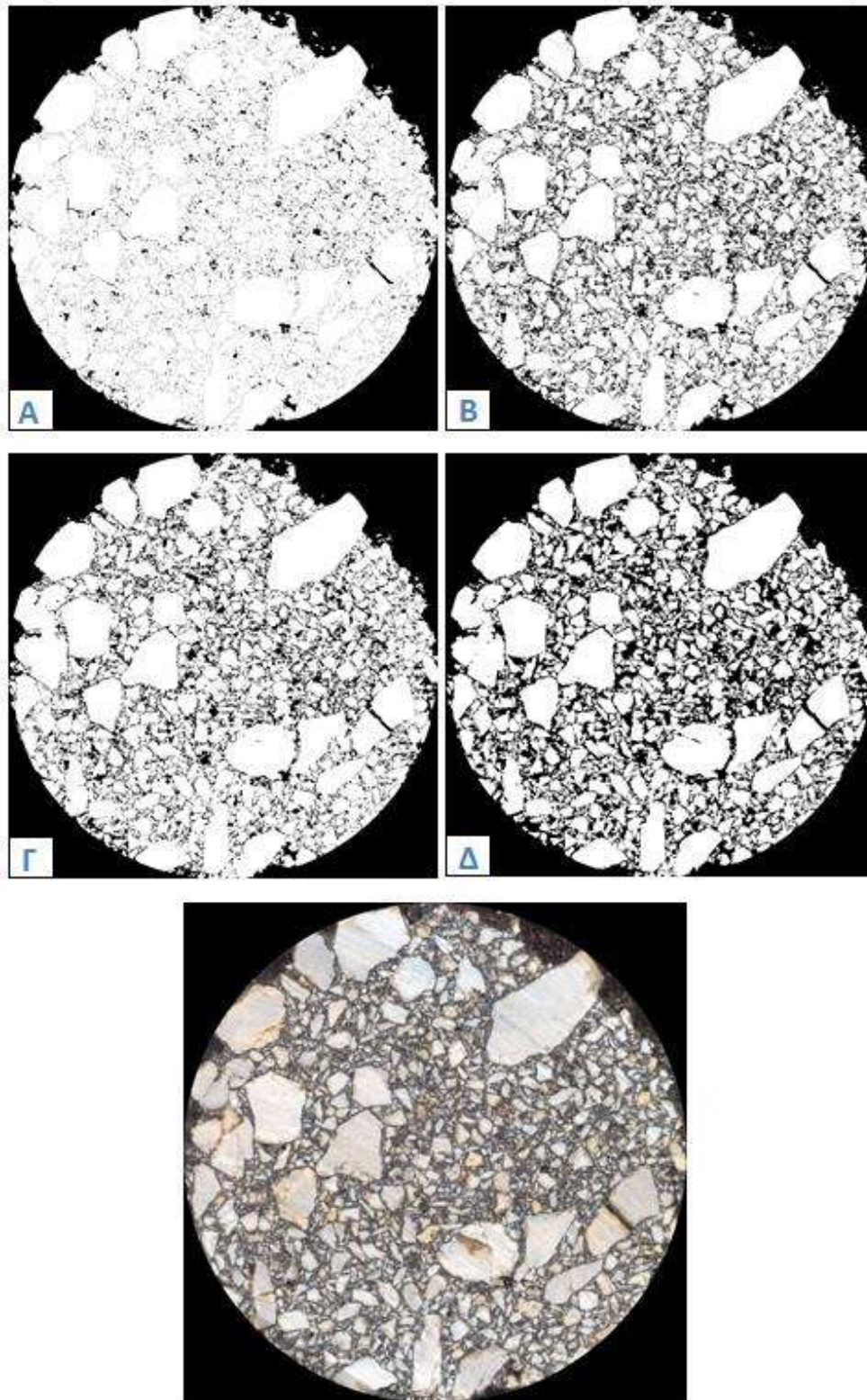
Στον πίνακα (4.2) παρουσιάζεται η σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού τιμών των φίλτρων με βάση την οπτική επισκόπηση. Στο σχήμα (4.14) παρουσιάζεται η τελικώς επεξεργασμένη εικόνα του δοκιμίου για κάθε συνδυασμό τιμών των φίλτρων του πίνακα, καθώς και η αρχική εικόνα του δοκιμίου.

Ξεκινώντας με τον συνδυασμό 5-40-95 παρατηρούμε ότι η επεξεργασμένη εικόνα Α δεν αναπαριστά σωστά την αρχική εικόνα του δοκιμίου, καθώς το συνολικό εμβαδόν των αδρανών που γίνεται αντιληπτό από το σύνολο των περιοχών με λευκό χρώμα δεν συμπίπτει με τα αδρανή που φαίνονται στην αρχική εικόνα. Διατηρώντας σταθερό το φίλτρο Hmax αυξάνουμε το φίλτρο της κατωφλίωσης από 95 σε 110 και τη μείωση του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής από 5 σε 1, αφού δεν εμφανίζεται έντονα το φαινόμενο του θορύβου στην αρχική εικόνα. Η εφαρμογή του συνδυασμού 1-40-110 παράγει την επεξεργασμένη εικόνα Β στην οποία τα αδρανή είναι πλέον πιο ευδιάκριτα. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα περιθώριο βελτίωσης της εικόνας. Διατηρώντας σταθερά τα υπόλοιπα φίλτρα αυξάνουμε το φίλτρο Hmax από 40 σε 80. Ο συνδυασμός 1-80-110 παράγει την επεξεργασμένη εικόνα Γ η οποία δεν φαίνεται να διαφοροποιείται οπτικά από την εικόνα Β. Διατηρούμε την τιμή 80 του φίλτρου Hmax και το φίλτρο ενδιάμεσης τιμής και αυξάνουμε την τιμή του φίλτρου της κατωφλίωσης από 110 σε 130 με στόχο την αύξηση των περιοχών με απόχρωση μαύρου χρώματος, δηλαδή γίνεται προσπάθεια πιο ικανοποιητικής αποτύπωσης της ασφάλτου και των κενών αέρος της αρχικής εικόνας. Παρατηρούμε ότι η επεξεργασμένη εικόνα Δ εμφανίζει τα αδρανή με πιο αντιπροσωπευτικό τρόπο σε σχέση με τις προηγούμενες εικόνες.

Με βάση παραπάνω είναι φανερό ότι η διαδικασία επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού τιμών των φίλτρων με βάση την οπτική επισκόπηση είναι υποκειμενική και επαφίεται στην κρίση και την εμπειρία του εκάστοτε χρήστη του λογισμικού. Επιπλέον, είναι διαδικασία χρονοβόρα, καθώς η έλλειψη άλλου κριτηρίου πέραν της οπτικής επισκόπησης δεν διασφαλίζει την ολοκλήρωση της διαδικασίας σε τέσσερα βήματα όπως στο παράδειγμα που προηγήθηκε.

Πίνακας 4.2 Παραμετρική διερεύνηση φίλτρων με βάση την οπτική επισκόπηση

	A	B	Γ	Δ
Συνδυασμοί Τιμών Φίλτρων	5-40-95	1-40-110	1-80-110	1-80-130



Σχήμα 4.14 Τελικώς επεξεργασμένες εικόνες δοκιμίου (πάνω) και αρχική εικόνα δοκιμίου (κάτω) με βάση την οπτική επισκόπηση

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, προτείνεται μία εκ νέου μεθοδολογία επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού φίλτρων σύμφωνα με την οποία:

Η επιλογή των φίλτρων αποτελεί μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία δοκιμών (trial and error) με στόχο τον περιορισμό των τιμών των φίλτρων μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε κάθε δοκιμή προτείνεται να ελέγχεται τόσο η ταύτιση των κλασμάτων $P_{sn}^{im} - P_{sn}$ όσο και η επεξεργασμένη εικόνα με βάση την οπτική επισκόπηση, έτσι ώστε ο ερευνητής να κατευθύνεται προς τον βέλτιστο συνδυασμό τιμών των φίλτρων. Η τελική επιλογή τιμών των φίλτρων θα πρέπει να παρουσιάζει σχετική ταύτιση των κλασμάτων, αλλά και μία κατωφλιωμένη εικόνα όπου δεν θα εξαφανίζονται αδρανή σημαντικού μεγέθους (δηλαδή αδρανή μεγέθους μεγαλύτερου από το minimum aggregate size που ορίζει ο ερευνητής) και όπου το εμβαδόν των αδρανών και οι υπόλοιπες φάσεις του μίγματος θα ταυτίζονται ικανοποιητικά με την αρχική εικόνα. Επιπλέον, όσον αφορά την κατάτμηση της εικόνας που επιτυγχάνεται μέσω του φίλτρου μετασχηματισμού watershed απαιτείται προσοχή ώστε να μην χωρίζονται συμπαγή αδρανή ή το ακριβώς αντίθετο, πολλά μικρά και λεπτόκοκκα αδρανή να θεωρούνται ως ένα συσσωμάτωμα.

Τέλος, σε κάποια δοκίμια ασφαλτομιγμάτων, σημαντικής δυσκολίας ανάλυσης, όπως τα δοκίμια του ασφαλτομίγματος M4 στην παρούσα έρευνα, τα κλάσματα μπορεί να παραπλανούν τον ερευνητή. Σε αυτή την περίπτωση καλό είναι η επιλογή των φίλτρων να γίνεται μόνο με βάση την οπτική επισκόπηση.

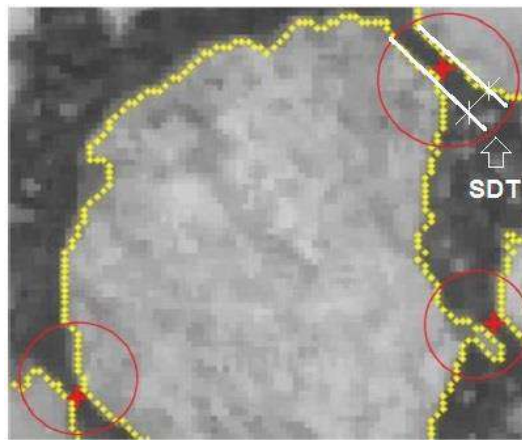
4.2.4 Ανάλυση

4.2.4.1 Δείκτες Εσωτερικής Δομής Ασφαλτομίγματος

Η ποσοτικοποίηση της εσωτερικής δομής του ασφαλτομίγματος επιτεύχθηκε με τη χρήση μίας σειράς δεικτών που καταδεικνύουν την κατανομή και την αλληλεπίδραση των αδρανών στο μίγμα. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι αυτοί που αφορούν τα σημεία επαφής και περιλαμβάνουν τον υπολογισμό του πλήθους των σημείων επαφής, το μήκος επαφής των αδρανών, το μήκος επαφής των αδρανών σε διακλάδωση, τον δείκτη ISI, καθώς και οι δείκτες που αναφέρονται στον προσανατολισμό και τον διαχωρισμό των αδρανών. Κάθε ένας από τους προαναφερθέντες δείκτες αναλύεται παρακάτω.

4.2.4.1.1 Σημεία Επαφής

Δύο αδρανή θεωρείται ότι βρίσκονται σε επαφή αν οποιαδήποτε δύο pixels που βρίσκονται στην περίμετρο της επιφάνειας των αδρανών απέχουν μεταξύ τους απόσταση μικρότερη από μία προκαθορισμένη από τον χρήστη τιμή, το SDT (surface distance threshold) (σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15 Υπολογισμός σημείων επαφής

Όσο αυξάνεται η τιμή του SDT τόσο περισσότερα αδρανή θεωρούνται από το λογισμικό ότι βρίσκονται σε επαφή. Ωστόσο, αύξηση της τιμής του SDT 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). Παρόμοια διερεύνηση, καθώς και λόγοι σύγκρισης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με προγενέστερες, οδήγησαν στην υιοθέτηση της τιμής των 0.5 mm για το μέγεθος 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). Φυσικά, η επιλογή αυτή ελέγχθηκε και με βάση την ανάλυση (resolution) των ψηφιακών εικόνων, ώστε το λογισμικό να δύναται να αναγνωρίσει τα αδρανή.

Τέλος, σημειώνεται ότι η συνολική ποσότητα που υπολογίζεται για τους ακόλουθους δείκτες για κάθε δοκίμιο και πυρήνα προκύπτει ως η μέση τιμή των ποσοτήτων που υπολογίζονται από τις δύο εικόνες (κορυφή και βάση).

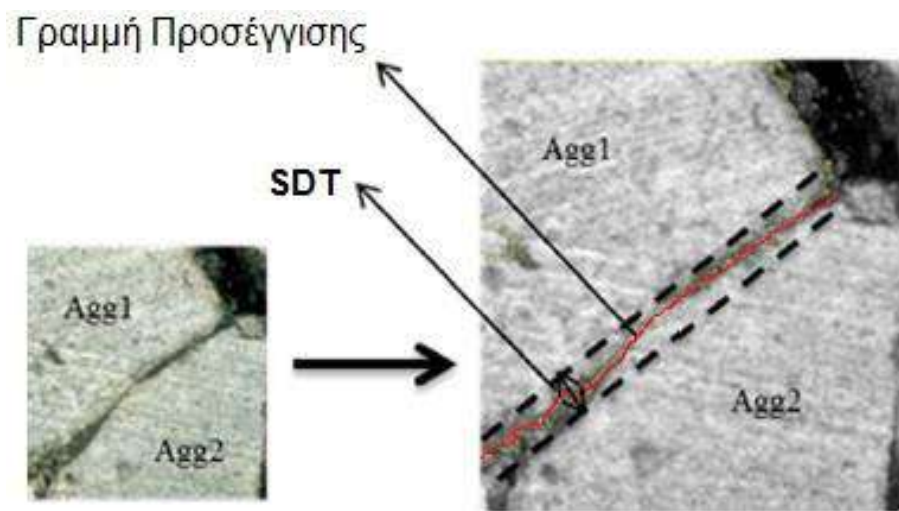
Αριθμός σημείων επαφής (Contact Points)

Ο δείκτης αυτός δίνει απλά το πλήθος των μεμονωμένων σημείων επαφής που εντοπίζονται μεταξύ των αδρανών σε ένα δοκίμιο.

Μήκος Επαφής (Contact Length)

Το μήκος επαφής προκύπτει από το άθροισμα των μηκών των γραμμών προσέγγισης (proximity zone lines) που εντοπίζονται μεταξύ των αδρανών του δοκιμίου.

Η γραμμή προσέγγισης αποτελείται από τα ενδιάμεσα pixels αδρανών των οποίων οι περίμετροι βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη του SDT.

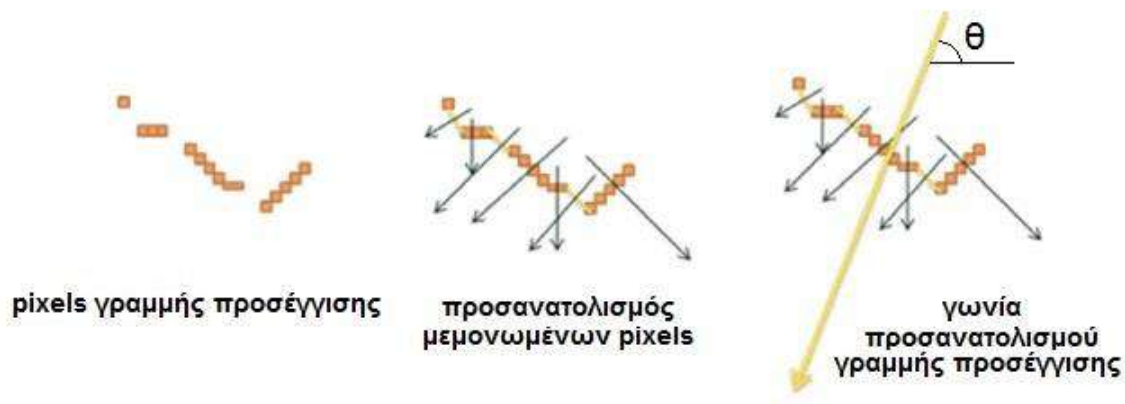


Σχήμα 4.16 Εντοπισμός γραμμών προσέγγισης

Το ενδιάμεσο (midpoint) pixel ενός ζεύγους γειτονικών αδρανών που βρίσκονται σε επαφή θεωρείται ως σημείο της γραμμής προσέγγισης. Με άλλα λόγια, η αλληλουχία των ενδιάμεσων pixels μεταξύ δύο αδρανών δημιουργούν την γραμμή προσέγγισης της (proximity zone line) (σχήμα 4.16), (Sefidmazgi and Bahia, 2014).

Προφανώς η γραμμή προσέγγισης σε ένα δοκίμιο δεν είναι μία ενιαία γραμμή, αλλά ένα πλήθος γραμμών (που στο τέλος των υπολογισμών αθροίζονται και δίνουν το μήκος επαφής) και αυτό οφείλεται στην τραχεία και ακανόνιστη επιφάνεια των αδρανών.

Με τον καθορισμό των γραμμών προσέγγισης είναι πλέον δυνατόν να υπολογιστεί και ο προσανατολισμός των γραμμών προσέγγισης. Τα συνεχόμενα pixels των γραμμών προσέγγισης ενώνονται με μία ίσια γραμμή και ουσιαστικά η κάθετος σε αυτή δίνει την γωνία προσανατολισμού της γραμμής προσέγγισης (proximity zone orientation) ως προς τον οριζόντιο άξονα (σχήμα 4.17). Το μέγεθος αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην μέτρηση των αντοχών του οδοστρώματος. Αν η διεύθυνση κατά την οποία ασκείται ένα φορτίο στο οδόστρωμα είναι παράλληλη με την πλειοψηφία των γωνιών προσανατολισμού του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος τότε το οδόστρωμα έχει σημαντικά αυξημένες αντοχές, καθώς η αλληλεμπλοκή των αδρανών στο μίγμα είναι πιο ευνοϊκή.

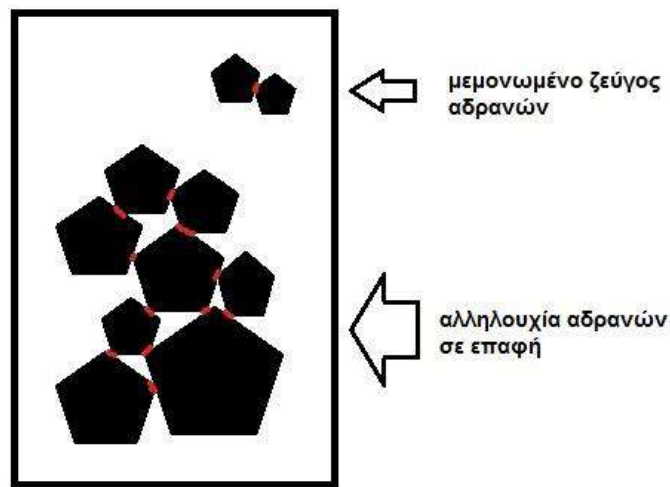


Σχήμα 4.17 Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού γραμμής προσέγγισης

Μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (Contact Length in Branches)

Το μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση είναι το άθροισμα μηκών των γραμμών προσέγγισης, των οποίων τα αδρανή αλληλοεμπλέκονται δημιουργώντας μία αλληλουχία επαφών. Αν υπάρχουν δύο γειτονικά αδρανή σε επαφή, αλλά αποκομμένα

από το πλήθος των υπόλοιπων αδρανών σε επαφή, αυτά δεν αποτελούν κομμάτι της αλληλουχίας και δεν λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς (σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18 Υπολογισμός μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση

Το μέγεθος αυτό έχει σημασία, καθώς δείχνει την ουσιαστική αλληλεμπλοκή των αδρανών, δηλαδή δίνει μία εικόνα της ενδεχόμενης αντοχής που θα αναπτύξει το συμπυκνωμένο ασφαλτόμιγμα, η οποία προέρχεται από τον σκελετό των αδρανών. Η κύρια αντοχή σε ένα ασφαλτόμιγμα εντοπίζεται στην επαφή των αδρανών μεταξύ τους. Όσο περισσότερα είναι τα σημεία επαφής τόσο αυξάνει η αντοχή του μίγματος. Ωστόσο, μεμονωμένα ζεύγη αδρανών σε επαφή δεν συμβάλουν στον ίδιο βαθμό στην αντοχή του μίγματος σε σχέση με μία αλληλουχία αδρανών σε επαφή.

Αντίστοιχα σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται οι γωνίες προσανατολισμού των γραμμών προσέγγισης σε διακλάδωση.

Δείκτης ISI (Internal Structure Index)

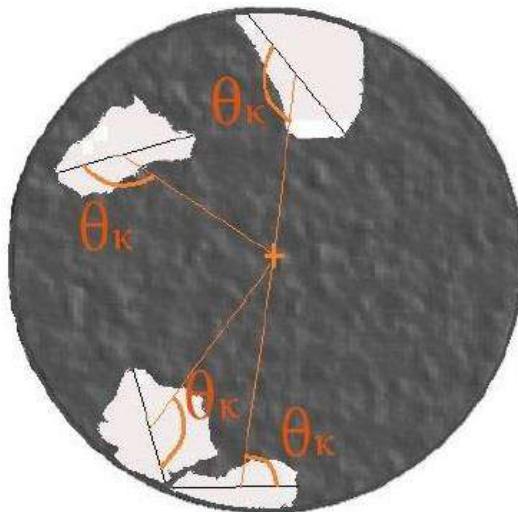
Ένας ακόμα δείκτης για την μελέτη των χαρακτηριστικών της εσωτερικής δομής των ασφαλτομιγμάτων προκύπτει από τον συνδυασμό δύο προαναφερθέντων δεικτών, του μήκους επαφής σε διακλάδωση και των γωνιών προσανατολισμού των γραμμών προσέγγισης (Sefidmazgi, 2011). Αυτός ο δείκτης ονομάζεται ISI σε συντομογραφία και ολογράφως μεταφράζεται ως Δείκτης Εσωτερικής Δομής. Η απλοϊκή ονομασία του είναι πιθανό να προκαλέσει σύγχυση. Για τον λόγο αυτό από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται απλά ως δείκτης ISI. Η εξίσωση του δείκτη ISI δίνεται παρακάτω:

$$ISI = \sum_{i=1}^N \text{Contact length}_i * \sin(AAA_{Ci}) \quad (4.2)$$

, όπου Contact length_i είναι το μήκος επαφής σε διακλάδωση για το i ζεύγος επαφής και AAA_{Ci} η αντίστοιχη γωνία προσανατολισμού της γραμμής προσέγγισης του ζεύγους.

4.2.4.1.2 Προσανατολισμός

Ο προσανατολισμός εκφράζεται μέσω της γωνίας προσανατολισμού των αδρανών του ασφαλτομίγματος. Ως γωνία προσανατολισμού ενός αδρανούς ορίζεται η γωνία θ_k που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας του αδρανούς και του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει το κέντρο του μεγάλου άξονα του αδρανούς με το κέντρο του κυκλικού δοκιμίου ασφαλτομίγματος (Angle from the Radial Axis). Η γωνία αυτή κυμαίνεται από μεταξύ 0° και 179° (σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.19 Υπολογισμός γωνίας προσανατολισμού

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της γωνίας προσανατολισμού και με έναν ακόμα τρόπο. Ο δεύτερος τρόπος μετράει τη γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας του αδρανούς και το ευθύγραμμο τμήμα που διέρχεται από το κέντρο του μεγάλου άξονα και είναι κάθετο σε έναν σταθερό οριζόντιο άξονα εκτός του κυκλικού δοκιμίου (Angle from Horizontal axis). Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μπορεί να επιφέρει σύγχυση, διότι ενώ στην πρώτη περίπτωση η μέτρηση γίνεται με ένα καθορισμένο σταθερό σημείο (το κέντρο του κυκλικού δοκιμίου, με οποιονδήποτε τρόπο και αν περιστραφεί το δοκίμιο, δεν αλλάζει θέση) στη δεύτερη περίπτωση μία ενδεχόμενη περιστροφή του κυκλικού δοκιμίου θα δώσει εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα καθώς θα έχει μεταβληθεί και η

θέση του οριζόντιου άξονα αναφοράς. Γι' αυτόν το λόγο, η παρούσα εργασία χρησιμοποίησε την πρώτη μέθοδο.

Με σκοπό την ποσοτικοποίηση του εν λόγω δείκτη, καθώς και τη διευκόλυνση και απλούστευση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, 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:

$$\text{freq}_{\text{ham}} = \text{freq}_{\text{ave}} (1 + a \cdot \cos^2 \theta + 2b \cdot \sin \theta \cos \theta - a \cdot \sin^2 \theta) \quad (4.3)$$

$$\text{όπου } a = \left[2 \sum_{\kappa=1}^N \cos(2\theta_{\kappa}) \right] / N$$

$$b = \left[2 \sum_{\kappa=1}^N \sin(2\theta_{\kappa}) \right] / N$$

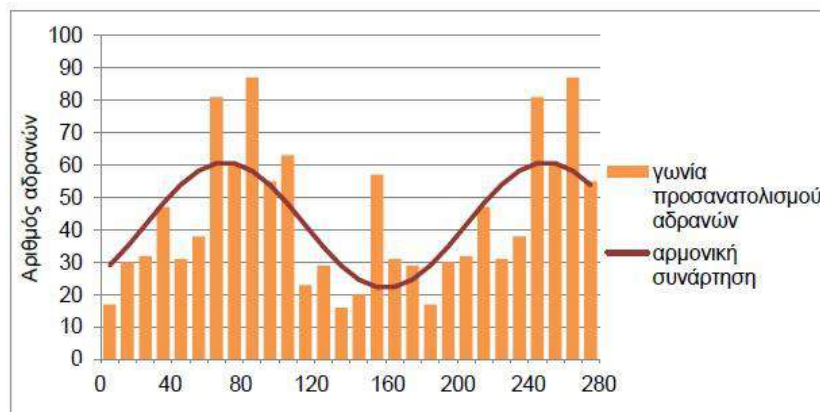
$$\text{freq}_{\text{ave}} = N / N_d$$

και θ_{κ} η γωνία που σχηματίζει ο μεγάλος άξονας του αδρανούς με την ακτίνα

N ο συνολικός αριθμός των αδρανών στην εικόνα

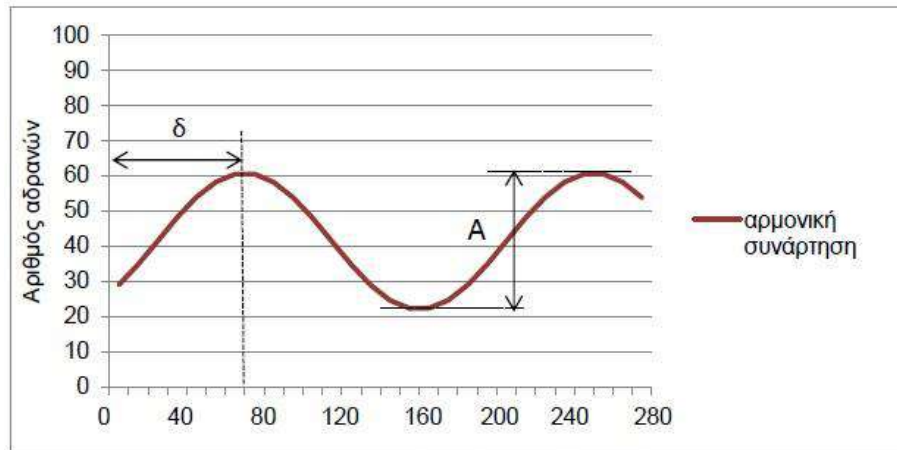
N_d ο αριθμός των γωνιών θ_{κ} που υπολογίζονται στις αρμονικές

Ο αριθμός N_d των γωνιών θ_{κ} 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 ισούται με 180, όσο και το εύρος τιμών της γωνίας προσανατολισμού. Στο σχήμα (4.20) παρουσιάζεται η αντιστοίχιση της αρμονικής συνάρτησης στα δεδομένα μιας κατανομής γωνιών προσανατολισμού.



Σχήμα 4.20 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 (4.21).



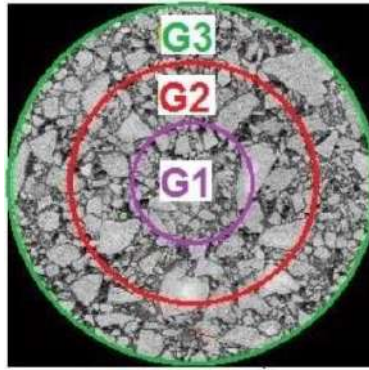
Σχήμα 4.21 Παράμετροι δ και A της αρμονικής συνάρτησης

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 μέγιστου και του ελάχιστου της αρμονικής συνάρτησης, δηλαδή το εύρος. 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.

4.2.4.1.3 Διαχωρισμός

Για την ποσοτικοποίηση του διαχωρισμού, πραγματοποιείται τμηματοποίηση της κυκλικής διατομής σε τρεις δακτυλίους, διαιρώντας την ακτίνα R_{im} της διατομής σε τρία ίσα μέρη. 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 4.22).



Σχήμα 4.22 Τμηματοποίηση οριζόντιας διατομής σε δακτυλίους

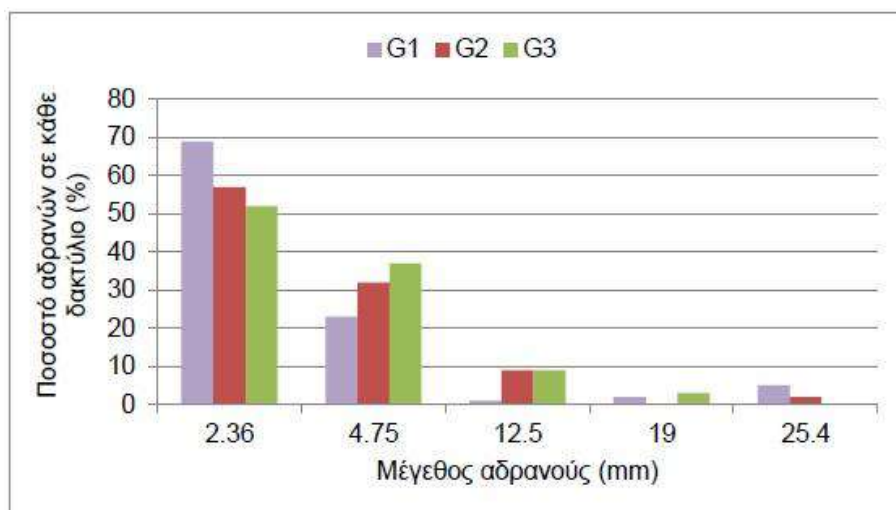
Ο διαχωρισμός υπολογίζεται με βάση τη διάμετρο των αδρανών. Προσδιορίζονται τα αδρανή που ανήκουν σε κάθε έναν από τους τρεις δακτυλίους της επιφάνειας. Για κάθε διαφορετικό μέγεθος αδρανών, υπολογίζεται το ποσοστό (επί του συνόλου των αδρανών της συγκεκριμένης διαμέτρου) που βρίσκεται σε κάθε δακτύλιο.

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:

$$S_H = (D_{out}/D_{in} - 1) * 100\% \quad (4.4)$$

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

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



Σχήμα 4.23 Παράδειγμα υπολογισμού διαχωρισμού

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.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η ιδιότητα του δείκτη S_H να λαμβάνει και αρνητικές τιμές οδηγεί στην αποφυγή υιοθέτησης μέσων τιμών στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ πιθανά παραπλανητικό. Με άλλα λόγια, αν σε ένα δοκίμιο η τιμή του δείκτη στην κορυφή είναι -15%, ενώ στη βάση 15%, τότε η μέση τιμή θα έδινε αποτέλεσμα ίσο με το 0, κάτι τέτοιο θα υποδήλωνε ομοιογένεια για τα αδρανή του συγκεκριμένου δοκιμίου πράγμα το οποίο δεν θα ίσχυε στην πραγματικότητα. Για τους παραπάνω λόγους στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της απόλυτης τιμής του δείκτη S_H , δηλαδή χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης $|S_H|$.

4.2.4.2 Στατιστική ανάλυση εργαστηριακών δοκιμών

4.2.4.2.1 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 το μη παραμετρικό στατιστικό τεστ ανεξαρτήτων δειγμάτων Kruskal-Wallis. Ο αριθμός των δειγμάτων, στα οποία χωρίστηκαν τα δοκίμια, διαμορφώθηκε ανάλογα με τον αριθμό των διαφορετικών τιμών της κάθε παραμέτρου.

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.

4.2.4.2.2 Διερεύνηση της επιρροής των μεταβλητών παραμέτρων

Η στατιστική σημαντικότητα της επιρροής των παραμέτρων ελέγχθηκε για κάθε έναν από τους δείκτες εσωτερικής δομής σύμφωνα με την ανάλυση διακύμανσης (analysis of variance - ANOVA). Η ανάλυση έγινε για τα δοκίμια κάθε ασφατομίγματος και εργαστηριακής μεθόδου συμπύκνωσης ξεχωριστά, καθώς υπάρχει διαφοροποίηση στις μεταβλητές παραμέτρους.

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

{Δείκτης Εσωτ. Δομής} = f (παράμετρος 1, παράμετρος 2, παράμετρος 3, παράμετρος 1 × παράμετρος 2, παράμετρος 1 × παράμετρος 3, παράμετρος 2 × παράμετρος 3)

Προφανώς για την μέθοδο Marshall όπου υπάρχει μόνο μία μεταβλητή παράμετρος η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

{Δείκτης Εσωτ. Δομής} = f (παράμετρος 1)

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο εξετάζεται η στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων διακριτών μεταβλητών [θερμοκρασία (Marshall/Roller), περάσματα (Roller), μέθοδος (Roller)] και των συνδυασμών τους ανά δύο (για τη μέθοδο Roller μόνο), 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 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που συγκεντρώθηκαν από την επεξεργασία και την ανάλυση των ψηφιακών εικόνων των δοκιμών ασφαλτομίγματος σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

5.1 Επίδραση παραμέτρων συμπίκνωσης στην εσωτερική δομή

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζεται η επίδραση των διαφόρων μεταβλητών παραμέτρων (περάσματα/θερμοκρασία/μέθοδος) στους δείκτες εσωτερικής δομής των μίγμάτων. Για αποφυγή συγχύσεων η παρουσίαση γίνεται ιεραρχικά με την εξής σειρά: μέθοδος συμπίκνωσης (Marshall/Roller), ασφαλτόμιγμα (M1/M2/M4), δείκτης εσωτερικής δομής (σημεία επαφής, προσανατολισμός, διαχωρισμός).

5.1.1 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. Στον ακόλουθο πίνακα (5.1) παρουσιάζεται το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας για κάθε μίγμα της μεθόδου Marshall ξεχωριστά. Η ομαδοποίηση των κενών αέρος των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με βάση τη θερμοκρασία συμπίκνωσης (grouping variable). Η ανάλυση έγινε με χρήση του τεστ Kruskal-Wallis.

Πίνακας 5.1 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας για τη μέθοδο Marshall (τεστ Kruskal-Wallis)

	Κενά M1	Κενά M2	Κενά M4
χ^2	4,706	4,318	5,500
Βαθμοί Ελευθερίας	2	2	3
Στατιστική Σημαντικ.	,095	,115	,139

Μεταβλητή: Θερμοκρασία Συμπίκνωσης

Η διαφοροποίηση του ποσοστού των κενών ανάμεσα στα δοκίμια διαφορετικής θερμοκρασίας της μεθόδου Marshall δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική σύμφωνα με τη ανάλυση για κανένα από τα τρία ασφαλτομίγματα. Οι τιμές του παρατηρηθέντος

επιπέδου στατιστικής σημαντικότητας προέκυψαν μεγαλύτερες του 0.05 (διάστημα εμπιστοσύνης 95%) στα δοκίμια όλων των ασφαλτομιγμάτων.

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές του επιπέδου στατιστικής σημαντικότητας για ομαδοποίηση των κενών αέρος των δοκιμών των μιγμάτων M1 και M4 της μεθόδου Roller με βάση τις μεταβλητές παραμέτρους. Συνεπώς, έχουμε τρεις πίνακες αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν σε ομαδοποίηση με βάση την θερμοκρασία συμπίκνωσης, τα περάσματα του κυλινδρικού τομέα και τη μέθοδο. Η ανάλυση έγινε με χρήση του τεστ Kruskal-Wallis.

Πίνακας 5.2 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση των περασμάτων για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis)

	Κενά M1	Κενά M4
χ^2	1,759	3,499
Βαθμοί Ελευθερίας	2	2
Στατιστική Σημαντικ.	,415	,174
Μεταβλητή: Πέρασματα		

Πίνακας 5.3 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της θερμοκρασίας για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis)

	Κενά M1	Κενά M4
χ^2	,442	13,259
Βαθμοί Ελευθερίας	1	1
Στατιστική Σημαντικ.	,506	,000
Μεταβλητή: Θερμοκρασία Συμπίκνωσης		

Πίνακας 5.4 Έλεγχος επιρροής ποσοστού κενών στη διερεύνηση της μεθόδου για τη μέθοδο Roller (τεστ Kruskal-Wallis)

	Κενά M1	Κενά M4
χ^2	1,565	1,365
Βαθμοί Ελευθερίας	3	3
Στατιστική Σημαντικ.	,667	,714
Μεταβλητή: Μέθοδος		

Ο έλεγχος της επιρροής του ποσοστού των κενών των δοκιμίων ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, τα περάσματα και την μέθοδο για το μίγμα M1 και τη μέθοδο Roller έδειξε ότι δεν παρατηρείται στατιστικά σημαντική μεταβολή, με τις τιμές του παρατηρηθέντος επίπεδου στατιστικής σημαντικότητας να είναι μεγαλύτερες του 0.05 σε όλες τις περιπτώσεις.

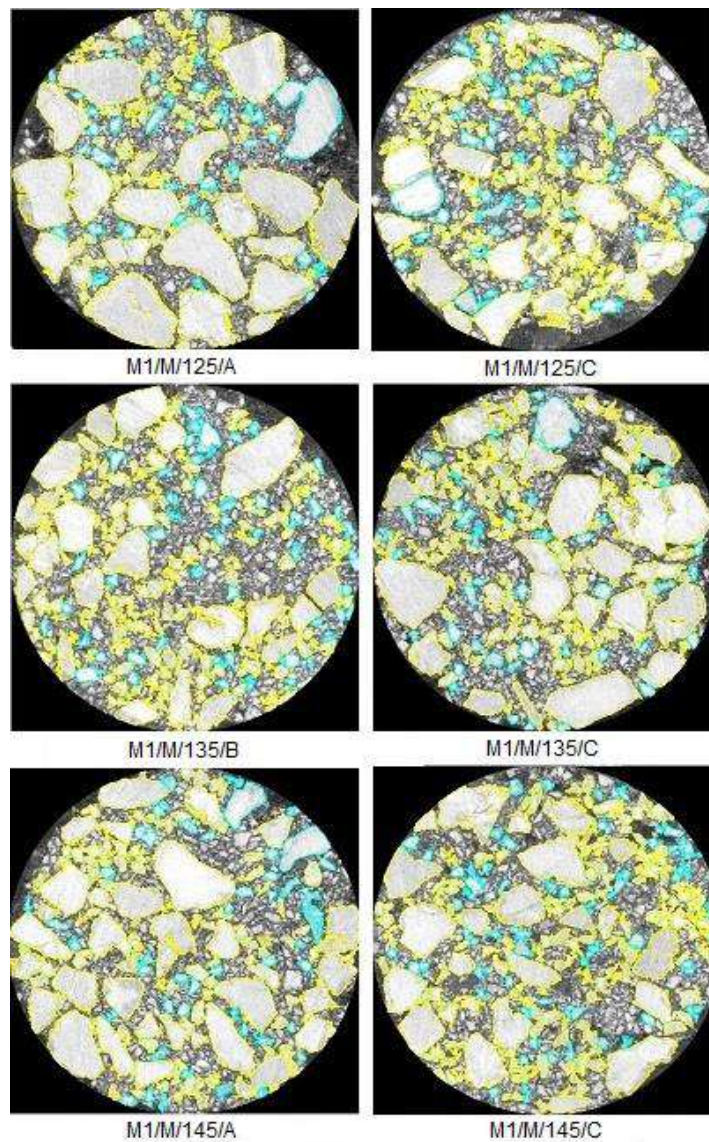
Αντίστοιχα αποτελέσματα προέκυψαν όσον αφορά το μίγμα M4 και την επιρροή των παραμέτρων των περασμάτων και της μεθόδου συμπύκνωσης, με εξαίρεση την θερμοκρασία για την οποία προέκυψε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των κενών των δοκιμίων.

5.1.2 Μέθοδος συμπύκνωσης Marshall

5.1.2.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

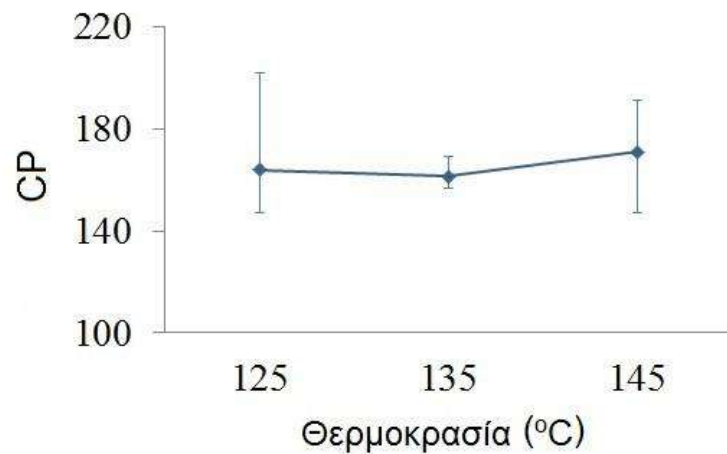
5.1.2.1.1 Σημεία Επαφής

Στο ακόλουθο σχήμα (5.1) απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών. Να σημειωθεί ότι σε κάθε αντίστοιχο συγκεντρωτικό σχήμα της ενότητας 5 που ακολουθεί παρακάτω έχουν επιλεγεί κάποιες από τις αντιπροσωπευτικότερες εικόνες εκ των δύο που αναλύθηκαν για κάθε δοκίμιο.



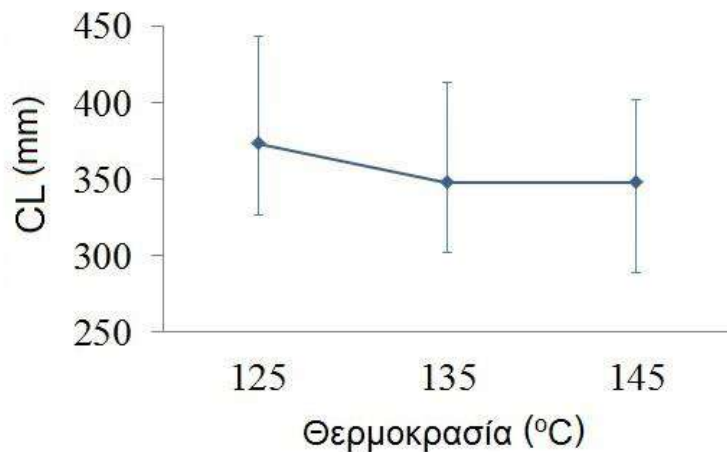
Σχήμα 5.1 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M1 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους δείκτες των σημείων επαφής για το μίγμα M1 της μεθόδου Marshall.



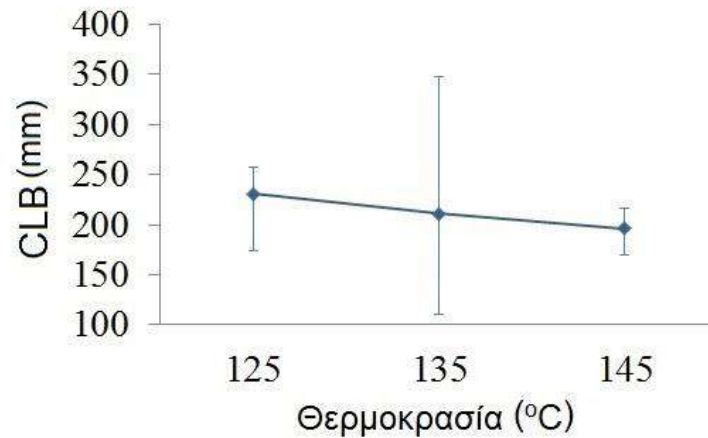
Σχήμα 5.2 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M1 Marshall)

Η αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση του αριθμού των σημείων επαφής (CP) από 164 σε 161, δηλαδή μείωση της τάξης του 2%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C αύξησε τα σημεία επαφής από 161 σε 171, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 6% (σχήμα 5.2).



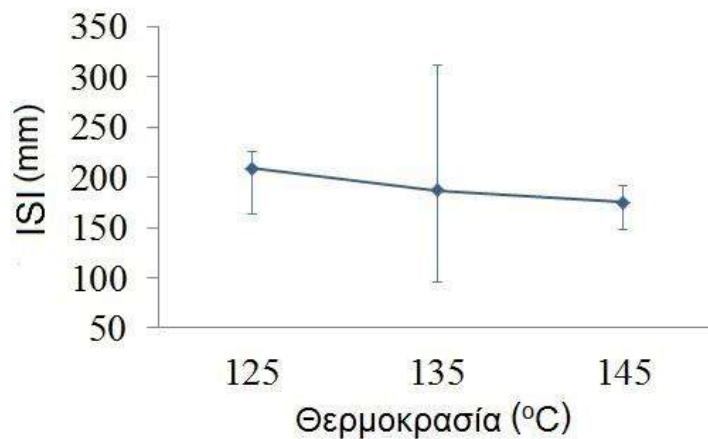
Σχήμα 5.3 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M1 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C μείωσε το μήκος επαφής (CL) από 374 mm σε 348 mm, δηλαδή μείωση 7%. Από τους 135 στους 145 °C παρατηρήθηκε σταθερότητα στο μήκος επαφής στα 348 mm (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.4 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M1 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση το μήκος επαφής σε διακλάδωση (CLB) από 231 σε 211 mm, δηλαδή μείωση 9%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C μείωσε περαιτέρω το μήκος από 211 σε 197 mm, δηλαδή μείωση 7% (σχήμα 5.4).



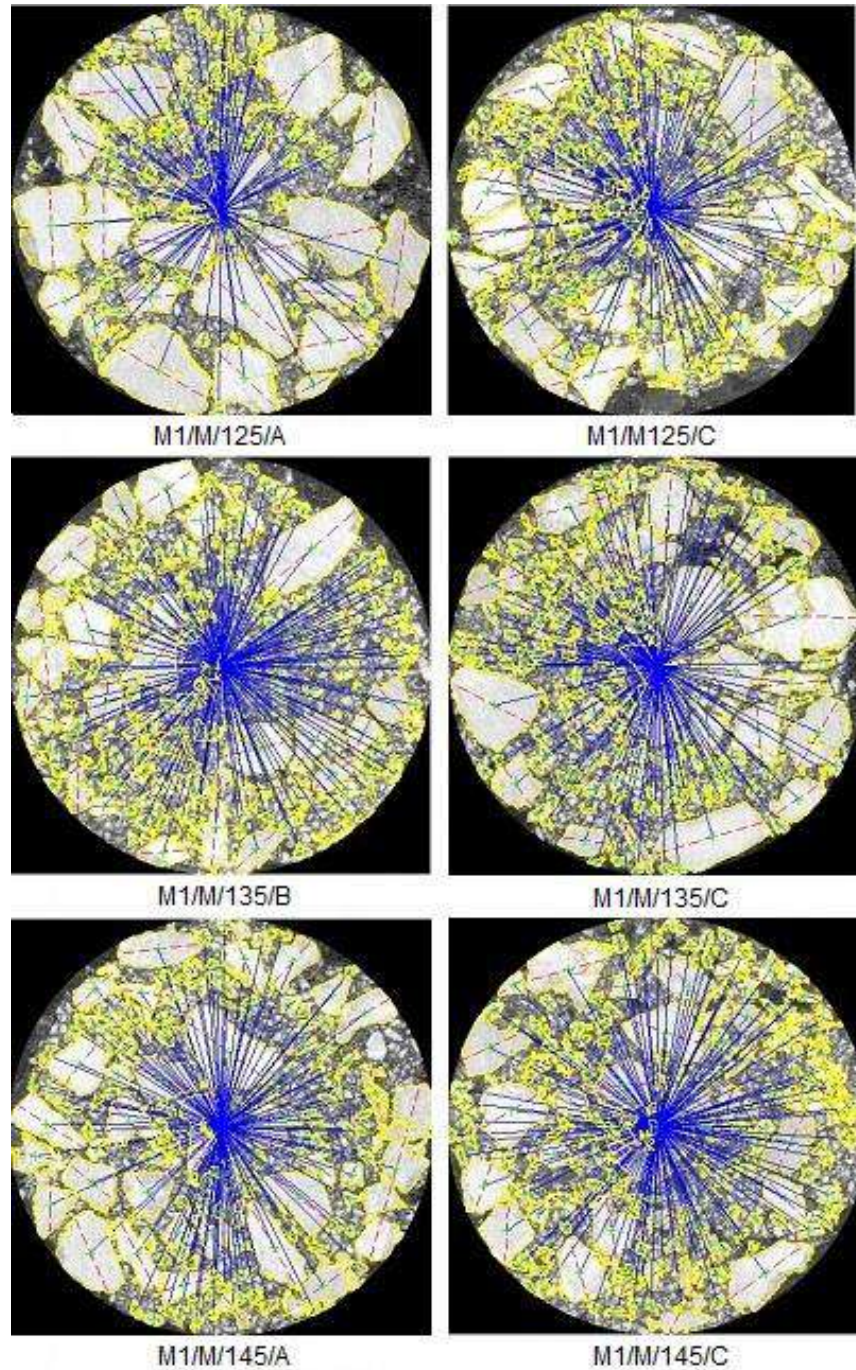
Σχήμα 5.5 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M1 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση τον δείκτη ISI από 209 σε 187 mm, δηλαδή μείωση 11%. Αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C οδήγησε σε μείωση από 187 σε 175 mm, δηλαδή μείωση 6% (σχήμα 5.5).

Συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας επέφερε μείωση στην αλληλεμπλοκή των αδρανών κρίνοντας από τους δείκτες μήκος επαφής, μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση και ISI.

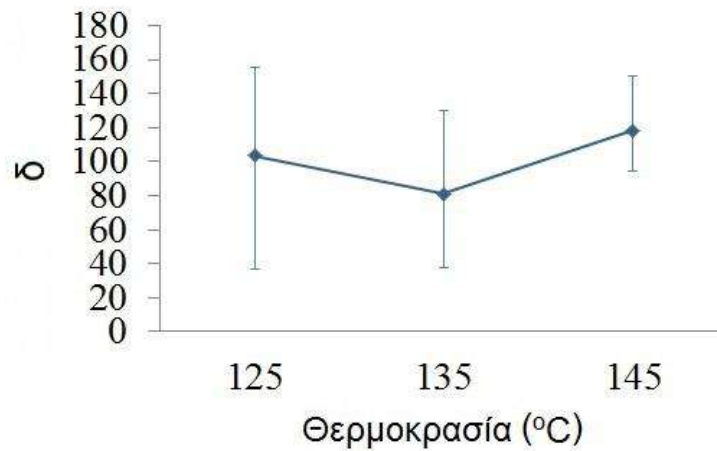
5.1.2.1.2 Προσανατολισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.6) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



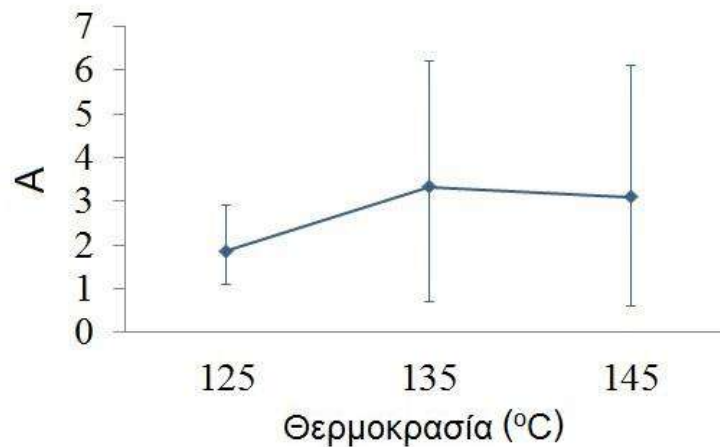
Σχήμα 5.6 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M1 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους δείκτες προσανατολισμού για το μίγμα M1 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.7 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M1 Marshall)

Η αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση της γωνίας δ από 104° σε 81°, δηλαδή μείωση της τάξης του 22%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C αύξησε την επικρατούσα γωνία από 81° σε 119°, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 47% (σχήμα 5.7).



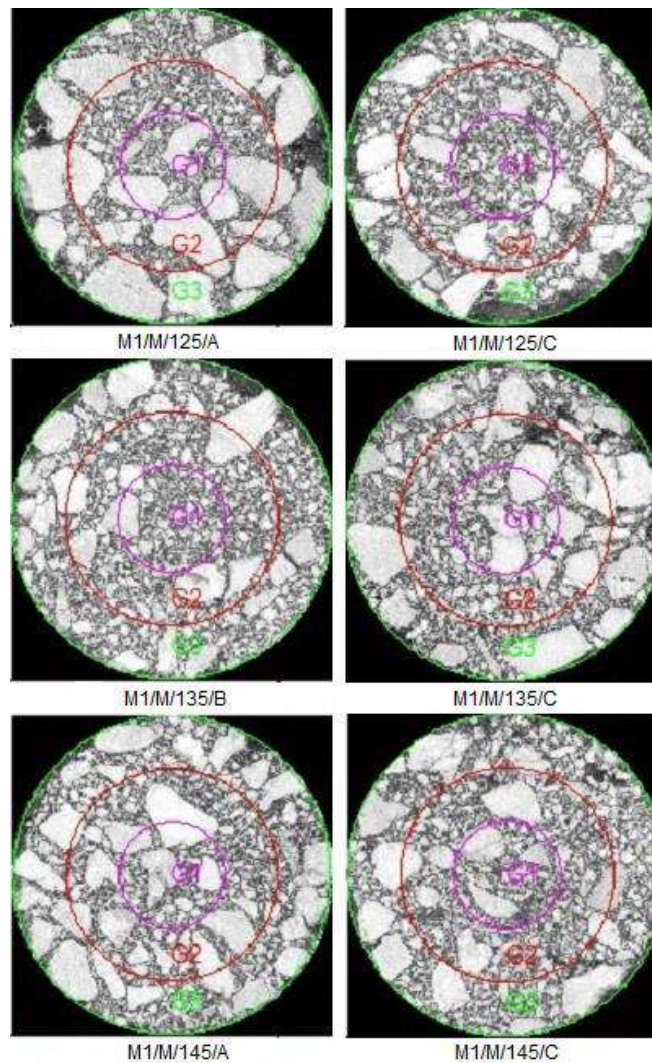
Σχήμα 5.8 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M1 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε αύξηση το A από 1.9 σε 3.3, δηλαδή αύξηση 78%. Αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C οδήγησε σε μείωση από 3.3 σε 3.1, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 7% (σχήμα 5.8).

Η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν μεταβάλλει σταθερά τους δείκτες, δηλαδή δεν έχουμε μόνο καθοδική ή ανοδική πορεία των μετρήσεων, αλλά αυξομείωση αυτών. Στους 135 °C παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή στο A που σημαίνει ότι τα αδρανή παρουσιάζουν την πιο ισχυρή τάση να προσανατολίζονται υπό γωνία 81°. Να σημειωθεί ότι στους 145 °C επιτεύχθηκε σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων ($\delta=119^\circ$, $A=3.1$) με αυτά της έρευνας των Coenen et al. (2012) ($\delta=122^\circ$, $A=2.78$).

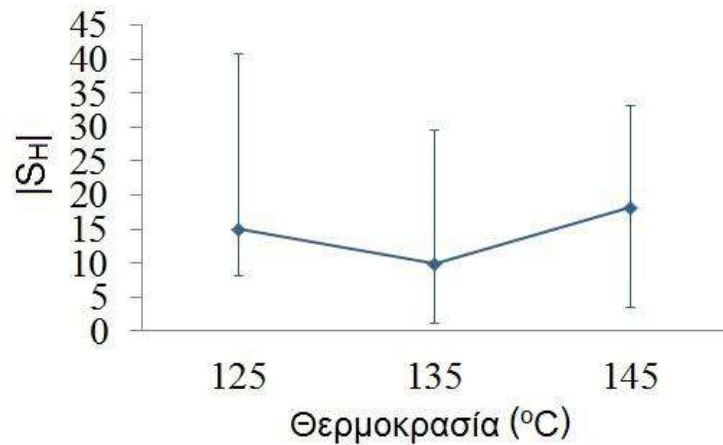
5.1.2.1.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.9) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών σε ζώνες. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.9 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M1 Marshall)

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον δείκτη διαχωρισμού για το μίγμα M1 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.10 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη |S_H| (M1 Marshall)

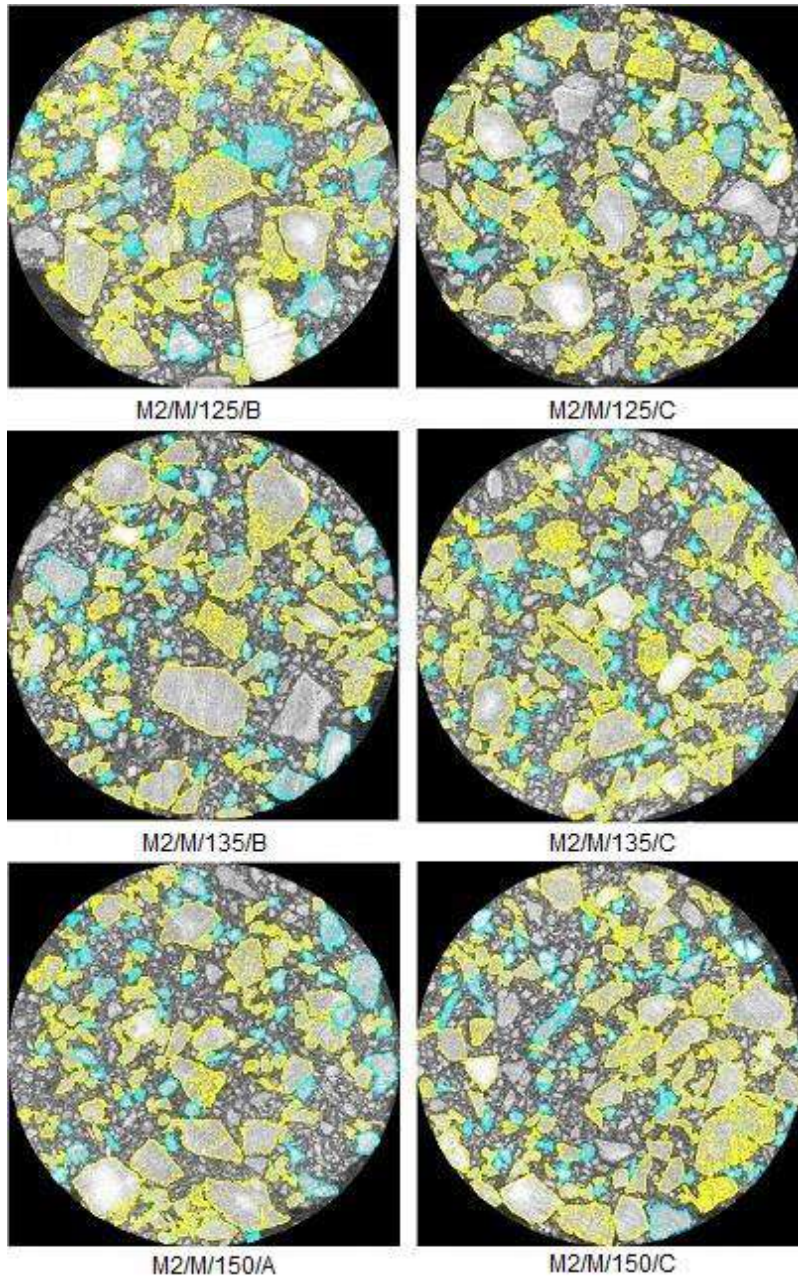
Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση τον δείκτη |S_H| από 15 σε 9.9, δηλαδή μείωση 34%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 145 °C αύξησε τον δείκτη από 9.9 σε 18.2, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 84% (σχήμα 5.10).

Και για αυτόν τον δείκτη η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν οδηγεί σε κάποια σταθερή τάση. Επιπλέον, η διακύμανση των αποτελεσμάτων είναι σημαντική και συνεπώς είναι δύσκολο να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα. Σε καμία από τις τρεις θερμοκρασίες συμπίκνωσης δεν μπορεί να αγνοηθεί το φαινόμενο του διαχωρισμού, καθώς ο δείκτης |S_H| είναι πάντα μεγαλύτερος της τιμής 5.

5.1.2.2 Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)

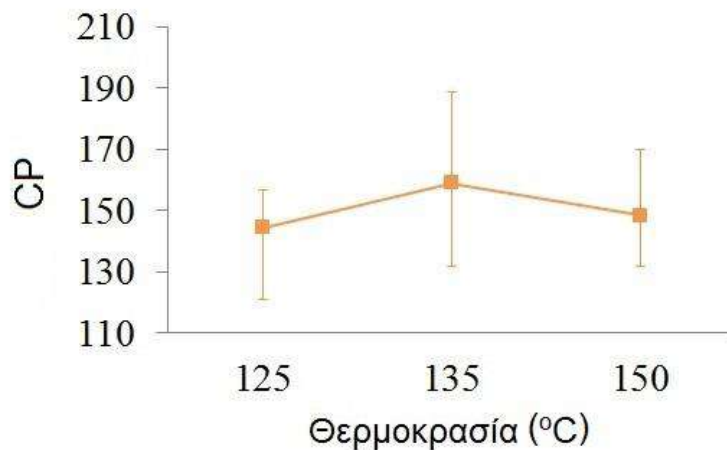
5.1.2.2.1 Σημεία επαφής

Στο ακόλουθο σχήμα (5.11) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M2 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



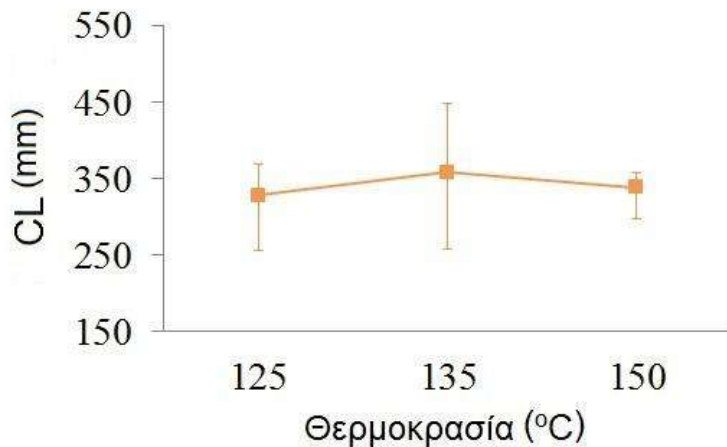
Σχήμα 5.11 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M2 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους δείκτες των σημείων επαφής για το μίγμα M2 της μεθόδου Marshall.



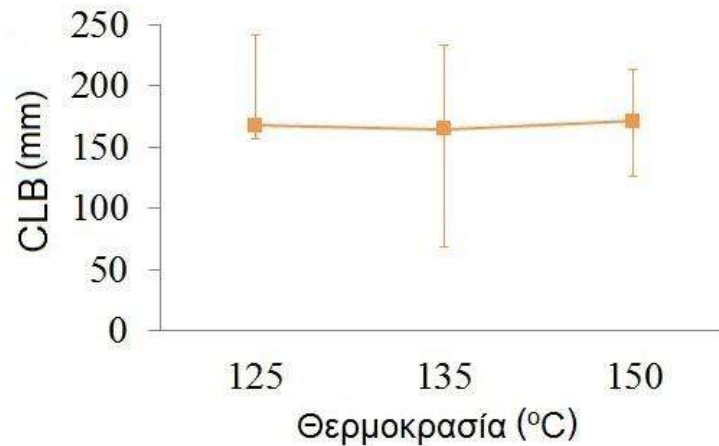
Σχήμα 5.12 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M2 Marshall)

Η αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε αύξηση του αριθμού των σημείων επαφής (CP) από 145 σε 159, δηλαδή αύξηση της τάξης του 10%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C μείωσε τα σημεία επαφής από 159 σε 149, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 6% (σχήμα 5.12).



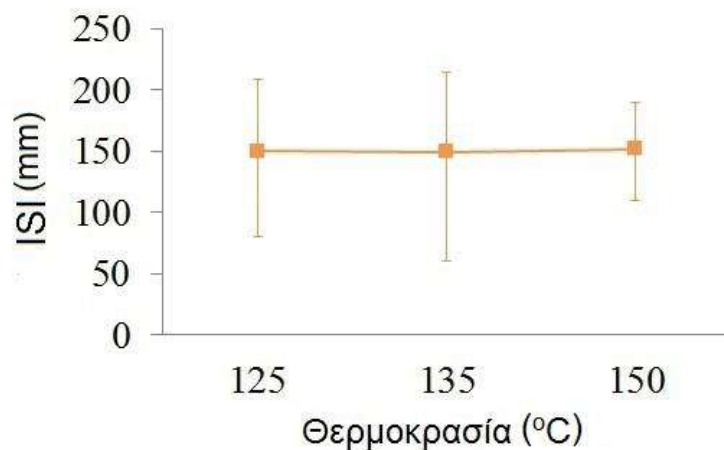
Σχήμα 5.13 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M2 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C αύξησε το μήκος επαφής (CL) από 328 σε 359 mm, δηλαδή αύξηση 9%. Από τους 135 στους 150 °C παρατηρήθηκε μείωση στο μήκος επαφής στα 339 mm, δηλαδή μείωση 6% (σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.14 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M2 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση του μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση (CLB) από 168 σε 165 mm, δηλαδή μείωση 2%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C αύξησε το μήκος από 165 σε 172 mm, δηλαδή αύξηση της τάξης του 4% (σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.15 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M2 Marshall)

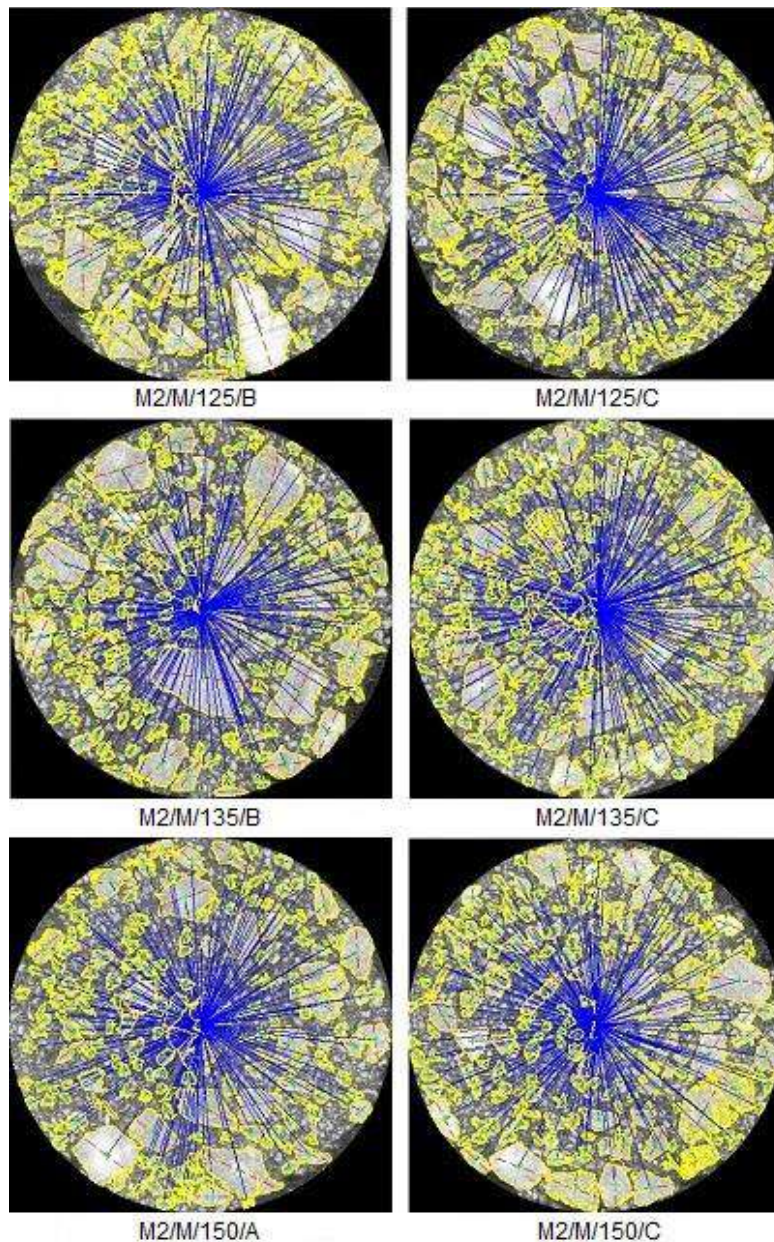
Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C διατήρησε σταθερό τον δείκτη ISI στα 150 mm. Αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C οδήγησε σε αύξηση από 150 σε 152 mm, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 1% (σχήμα 5.15).

Οι εντονότερες μεταβολές εντοπίζονται στον αριθμό των σημείων επαφής και στο μήκος επαφής, δηλαδή η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση των δεικτών κατά 10%,

ενώ περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση αυτών των δεικτών κατά 6%. Οι δείκτες CLB και ISI δεν φαίνεται να επηρεάζονται από τη θερμοκρασία.

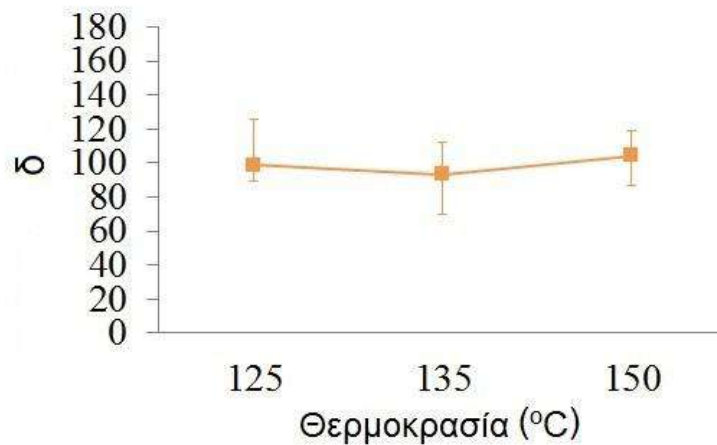
5.1.2.2.2 Προσανατολισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.16) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M2 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



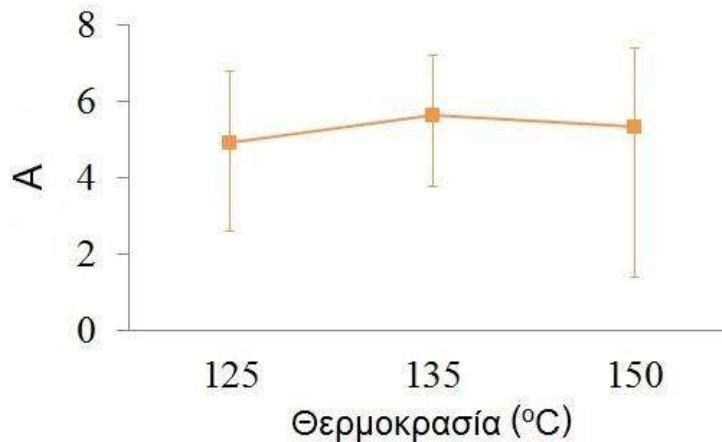
Σχήμα 5.16 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M2 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στους δείκτες προσανατολισμού για το μίγμα M2 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.17 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M2 Marshall)

Η αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε μείωση της γωνίας προσανατολισμού δ από 99° σε 94°, δηλαδή μείωση της τάξης του 5%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C αύξησε την επικρατούσα γωνία από 94° σε 105°, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 12% (σχήμα 5.17).



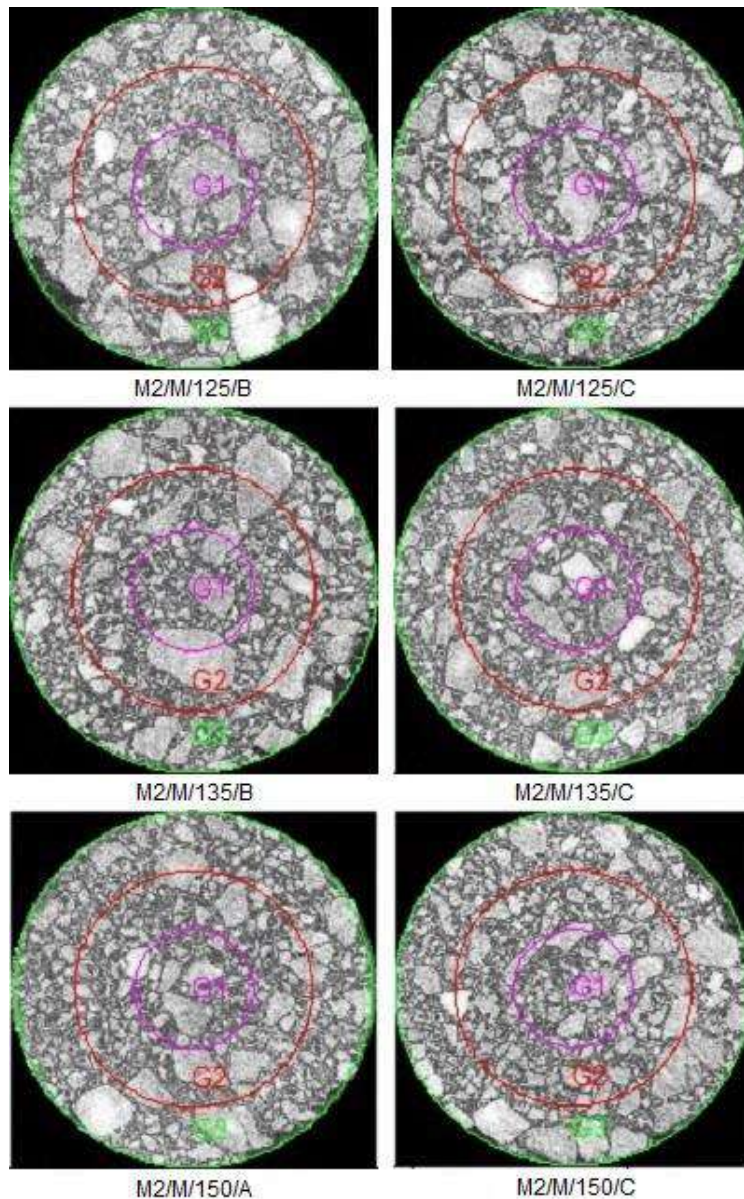
Σχήμα 5.18 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M2 Marshall)

Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε αύξηση του εύρους Α από 4.9 σε 5.6, δηλαδή αύξηση 15%. Αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C οδήγησε σε μείωση από 5.6 σε 5.3, δηλαδή μείωση 5% (σχήμα 5.18).

Συμπερασματικά στους 135 °C παρατηρείται εντονότερη τάση των αδρανών να τοποθετούνται υπό γωνία 94°, δηλαδή σε ομόκεντρη διεύθυνση. Μάλιστα τα αποτελέσματα σε αυτή τη θερμοκρασία δεν παρουσιάζουν έντονη διακύμανση.

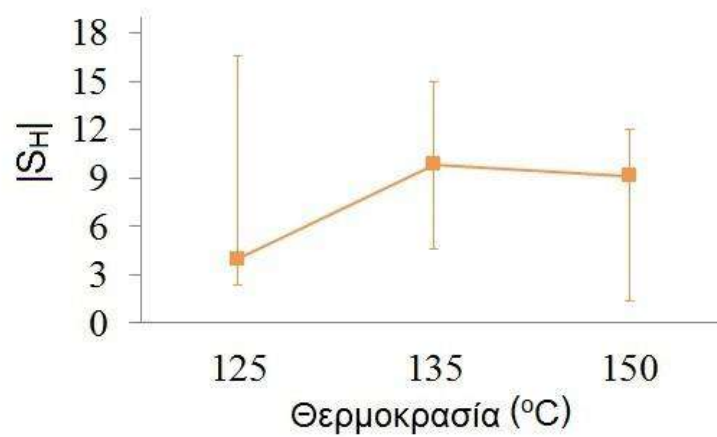
5.1.2.2.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.19) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M2 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών σε ζώνες. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.19 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M2 Marshall)

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον δείκτη διαχωρισμού για το μίγμα M2 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.20 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη $|S_H|$ (M2 Marshall)

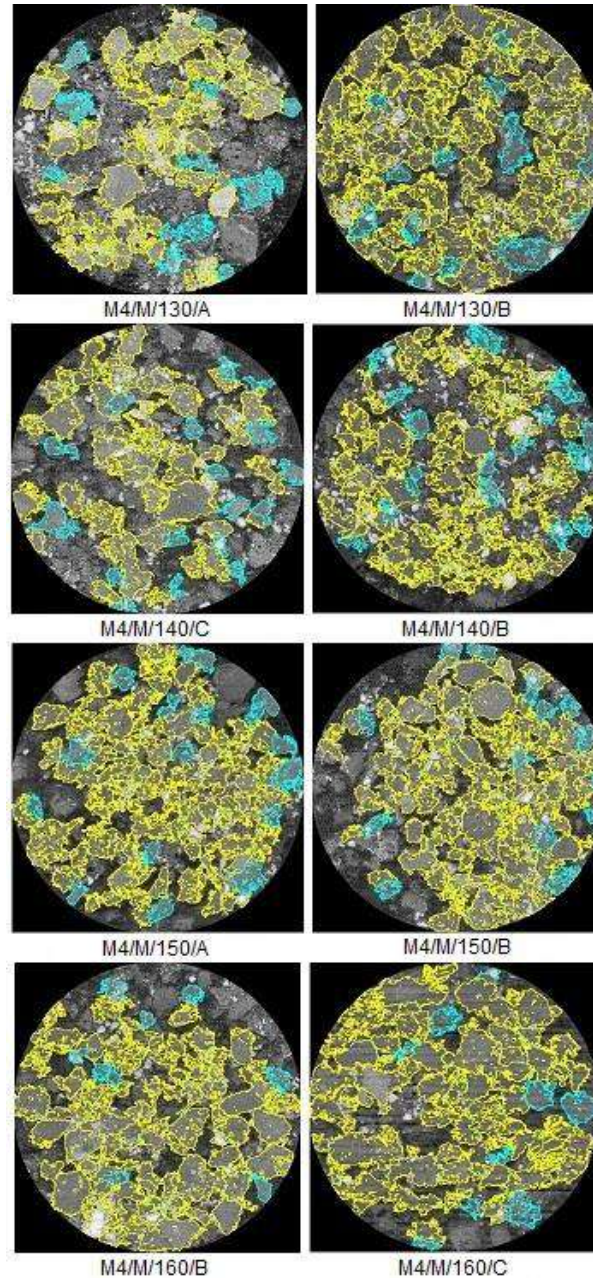
Αύξηση της θερμοκρασίας από 125 σε 135 °C οδήγησε σε αύξηση του δείκτη $|S_H|$ από 4 σε 9.9, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 148%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από 135 σε 150 °C μείωσε τον δείκτη από 9.9 σε 9.2, δηλαδή μείωση 7% (σχήμα 5.20).

Παρατηρούμε ότι στις πιο υψηλές θερμοκρασίες το φαινόμενο του διαχωρισμού είναι αρκετά έντονο και δεν μπορεί να αγνοηθεί ($|S_H| > 5$) σε σχέση με τον διαχωρισμό στους 125 °C, που ουσιαστικά έχουμε ομοιογένεια ($|S_H| < 5$). Ωστόσο, η διακύμανση των τιμών των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι είναι μεγάλη, ιδιαίτερα στους 125 °C.

5.1.2.3 Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

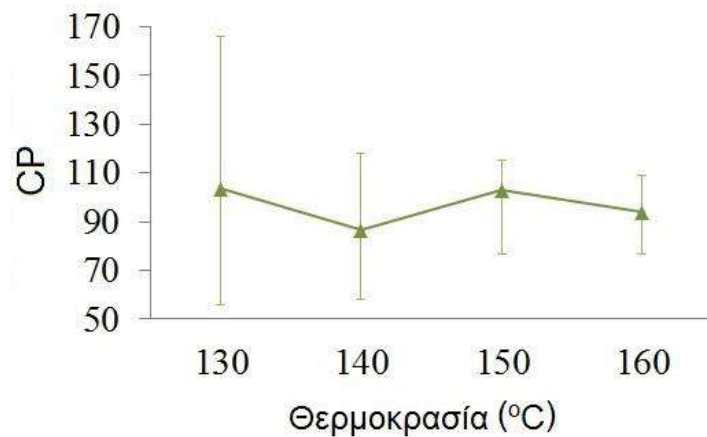
5.1.2.3.1 Σημεία επαφής

Στο ακόλουθο σχήμα (5.21) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



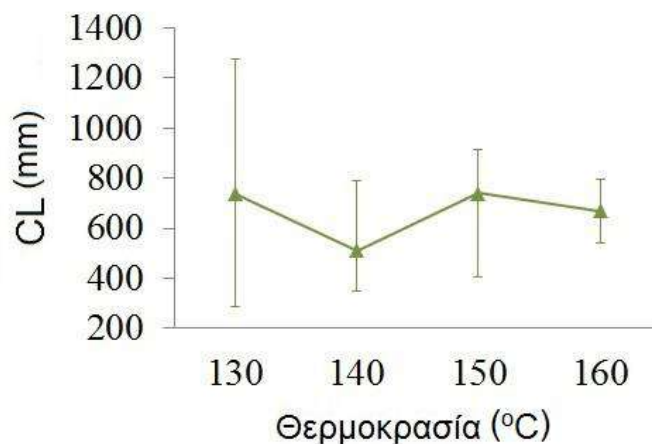
Σχήμα 5.21 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M4 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους δείκτες των σημείων επαφής για το μίγμα M4 της μεθόδου Marshall.



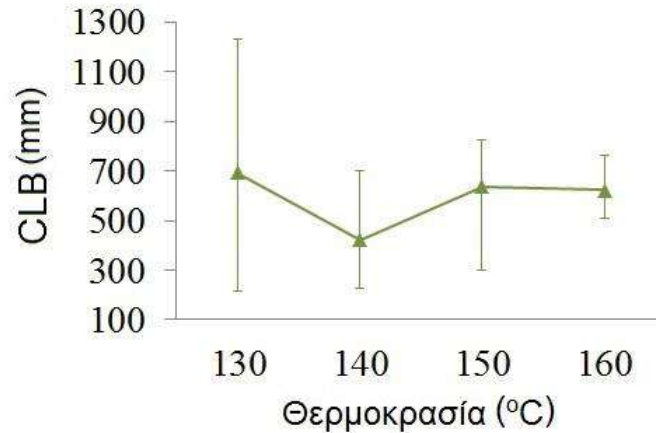
Σχήμα 5.22 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (M4 Marshall)

Για αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C έχουμε μείωση των σημείων επαφής (CP) από 104 σε 87, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 16%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε αύξηση από 87 σε 103, δηλαδή αύξηση 18%, και από 150 στους 160 °C μείωση από 103 σε 94, δηλαδή μείωση της τάξης του 9% (σχήμα 5.22).



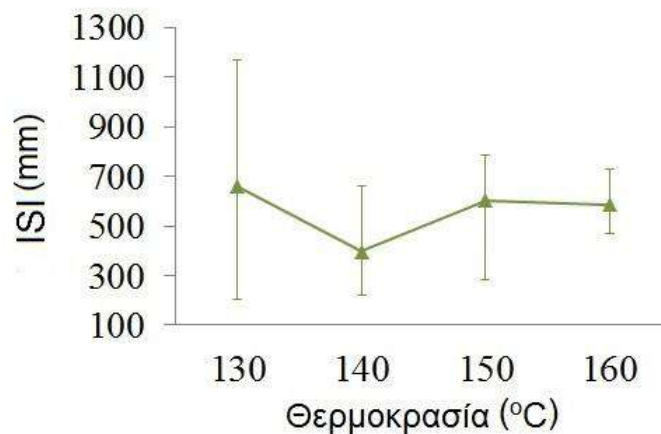
Σχήμα 5.23 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (M4 Marshall)

Αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C προκαλεί μείωση του μήκους επαφής (CL) από 737 σε 511 mm, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 31%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε αύξηση από 511 σε 740 mm, δηλαδή αύξηση 45%, και από 150 στους 160 °C μείωση από 740 σε 671 mm, δηλαδή μείωση 9% (σχήμα 5.23).



Σχήμα 5.24 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M4 Marshall)

Για αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C έχουμε μείωση του μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση (CLB) από 693 σε 424 mm, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 39%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε αύξηση από 424 σε 637 mm, 50%, και από 150 στους 160 °C μείωση από 637 σε 623 mm, δηλαδή μείωση 2% (σχήμα 5.24).



Σχήμα 5.25 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (M4 Marshall)

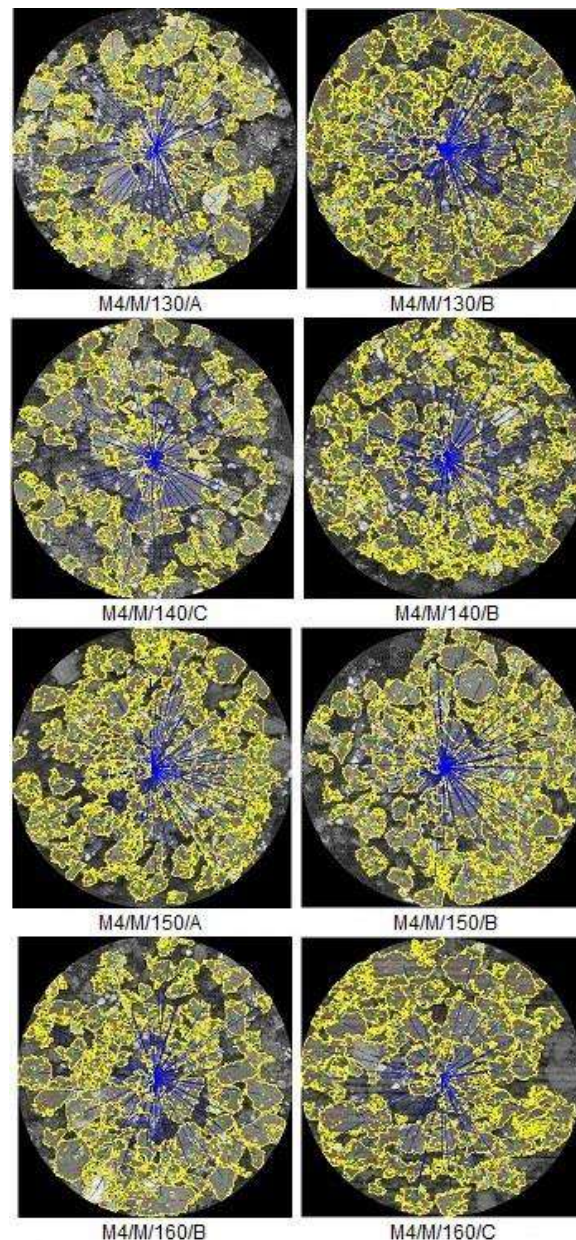
Αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C προκαλεί μείωση του δείκτη ISI από 660 σε 398 mm, δηλαδή ποσοστιαία μείωση 40%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε αύξηση από 398 σε 603 mm, δηλαδή αύξηση 52%, και από 150 στους 160 °C μείωση από 603 σε 587 mm, δηλαδή μείωση 3% (σχήμα 5.25).

Στην περίπτωση του M4 η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν προκαλεί κάποια σταθερή τάση μεταβολής των σημείων επαφής. Επιπλέον, η διακύμανση των αποτελεσμάτων

δυσκολεύει την εξαγωγή συμπεράσματος. Η έντονη μεταβλητότητα δικαιολογείται λόγω της δυσκολίας ανάλυσης των εικόνων των δοκιμών του μίγματος M4.

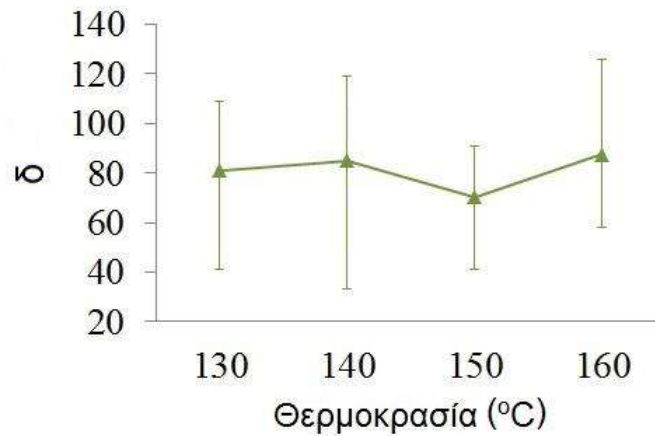
5.1.2.3.2 Προσανατολισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.26) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



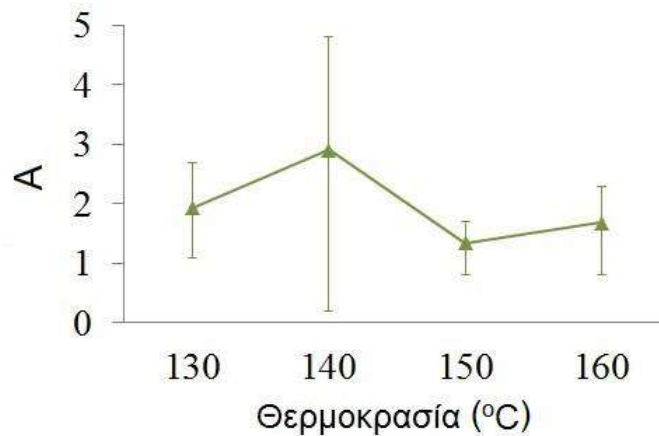
Σχήμα 5.26 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M4 Marshall)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους δείκτες προσανατολισμού για το μίγμα M4 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.27 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (M4 Marshall)

Για αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C έχουμε αύξηση της γωνίας προσανατολισμού δ από 81° σε 85°, δηλαδή αύξηση 5%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε μείωση από 85° σε 71°, δηλαδή μείωση 17%, και από 150 στους 160 °C αύξηση από 71° σε 88°, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 24% (σχήμα 5.27).



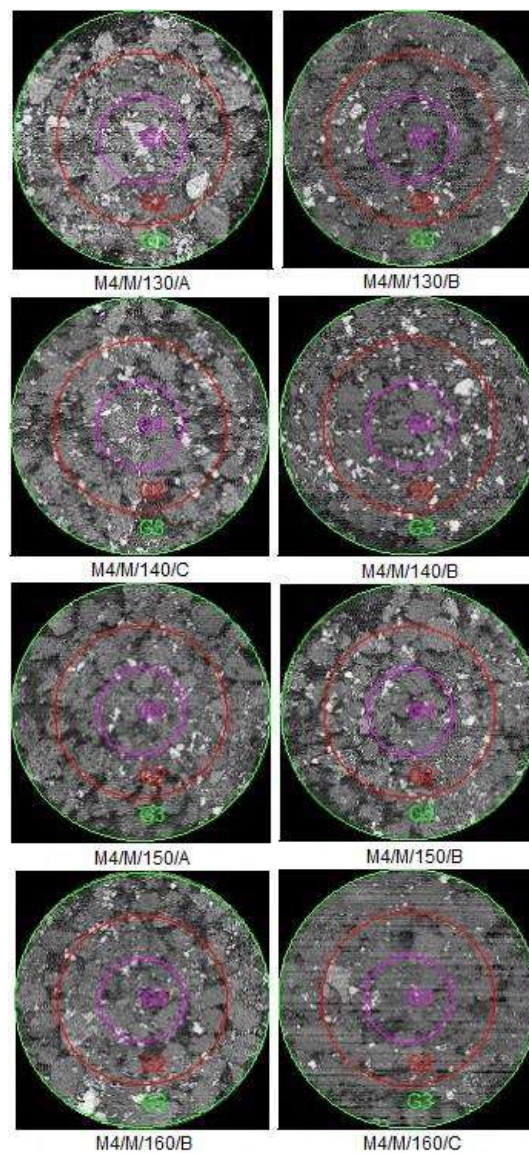
Σχήμα 5.28 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (M4 Marshall)

Αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C προκαλεί αύξηση του εύρους A από 1.9 σε 2.9, δηλαδή αύξηση 51%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε μείωση από 2.9 σε 1.4, δηλαδή μείωση 54%, και από 150 στους 160 °C αύξηση από 1.4 σε 1.7, δηλαδή αύξηση της τάξης του 25% (σχήμα 5.28).

Ενώ η εντονότερη τάση τοποθέτησης των αδρανών εντοπίζεται στους 140 °C και συμβαίνει για γωνία 85°, η μεγάλη διακύμανση των αποτελεσμάτων δημιουργεί αμφιβολία για την ύπαρξη της τάσης αυτής. Και εδώ η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν προκαλεί σταθερή μεταβολή στους δείκτες.

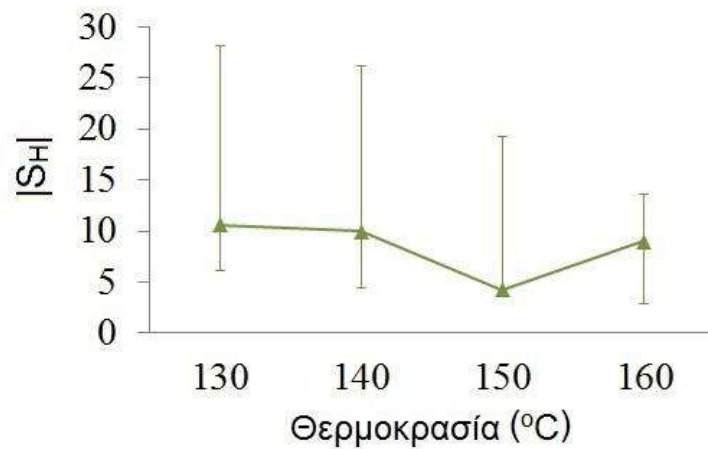
5.1.2.3.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.29) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall. Στις εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών σε ζώνες. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.29 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M4 Marshall)

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η επιρροή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης στον δείκτη διαχωρισμού για το μίγμα M4 της μεθόδου Marshall.



Σχήμα 5.30 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη |S_H| (M4 Marshall)

Για αύξηση θερμοκρασίας από τους 130 στους 140 °C έχουμε μείωση του δείκτη |S_H| από 10.6 σε 10, δηλαδή μείωση 6%. Από τους 140 στους 150 °C έχουμε μείωση από 10 σε 4.3, δηλαδή μείωση 57%, και από 150 στους 160 °C αύξηση από 4.3 σε 9, δηλαδή ποσοστιαία αύξηση 109% (σχήμα 5.30).

Στους 150 °C έχουμε ουσιαστικά ομοιογένεια, αλλά με τη μέγιστη τιμή των αποτελεσμάτων να φτάνει και την τιμή 20. Η μικρότερη διακύμανση στα αποτελέσματα παρατηρείται στους 160 °C με τον διαχωρισμό όμως να μην δύναται να αγνοηθεί.

5.1.2.4 Στατιστική ανάλυση

Εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα της θερμοκρασίας στα αποτελέσματα των διαφόρων δεικτών εσωτερικής δομής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το γενικό γραμμικό μοντέλο (general linear model - GLM):

Δείκτης Εσωτερικής Δομής = f (θερμοκρασία)

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

5.1.2.4.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τα δοκίμια του μίγματος M1 της μεθόδου Marshall.

5.1.2.4.1.1 Σημεία επαφής

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής.

Πίνακας 5.5 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	97,000	2	48,500	,572	,616
Σφάλμα	254,500	3	84,833		
Σύνολο	164693,000	6			
Διορθ. Σύνολο	351,500	5			

Πίνακας 5.6 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	868,723	2	434,362	,640	,587
Σφάλμα	2035,485	3	678,495		
Σύνολο	766242,210	6			
Διορθ. Σύνολο	2904,208	5			

Πίνακας 5.7 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	1212,783	2	606,392	,309	,755
Σφάλμα	5894,525	3	1964,842		
Σύνολο	27884,397	6			
Διορθ. Σύνολο	7107,308	5			

Πίνακας 5.8 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	1189,333	2	594,667	,382	,711
Σφάλμα	4668,000	3	1556,000		
Σύνολο	223218,000	6			
Διορθ. Σύνολο	5857,333	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τα σημεία επαφής, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.1.2 Προσανατολισμός

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τον προσανατολισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.9 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	1425,000	2	712,500	3,641	,158
Σφάλμα	587,000	3	195,667		
Σύνολο	63218,000	6			
Διορθ. Σύνολο	2012,000	5			

Πίνακας 5.10 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	2,476	2	1,238	,281	,773
Σφάλμα	13,197	3	4,399		
Σύνολο	61,490	6			
Διορθ. Σύνολο	15,674	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, η θερμοκρασία συμπίκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τον προσανατολισμό, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.1.3 Διαχωρισμός

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης ως προς τον δείκτη διαχωρισμού των αδρανών.

Πίνακας 5.11 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού |S_H| (μίγμα M1, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	70,990	2	35,495	,438	,681
Σφάλμα	243,125	3	81,042		
Σύνολο	1549,650	6			
Διορθ. Σύνολο	314,115	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, η θερμοκρασία συμπίκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη διαχωρισμού, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.2 Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τα δοκίμια του μίγματος M2 της μεθόδου Marshall.

5.1.2.4.2.1 Σημεία επαφής

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής.

Πίνακας 5.12 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	224,333	2	112,167	,515	,642
Σφάλμα	653,000	3	217,667		
Σύνολο	137080,000	6			
Διορθ. Σύνολο	877,333	5			

Πίνακας 5.13 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	944,053	2	472,027	,118	,893
Σφάλμα	12033,335	3	4011,112		
Σύνολο	714419,430	6			
Διορθ. Σύνολο	12977,388	5			

Πίνακας 5.14 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	48,686	2	24,343	,009	,991
Σφάλμα	8178,661	3	2726,220		
Σύνολο	177820,078	6			
Διορθ. Σύνολο	8227,347	5			

Πίνακας 5.15 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	7,000	2	3,500	,002	,998
Σφάλμα	6260,500	3	2086,833		
Σύνολο	142169,000	6			
Διορθ. Σύνολο	6267,500	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M2, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τα σημεία επαφής, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.2.2 Προσανατολισμός

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τον προσανατολισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.16 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	121,000	2	60,500	,836	,514
Σφάλμα	217,000	3	72,333		
Σύνολο	59144,000	6			
Διορθ. Σύνολο	338,000	5			

Πίνακας 5.17 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	,531	2	,265	,409	,696
Σφάλμα	1,946	3	,649		
Σύνολο	170,911	6			
Διορθ. Σύνολο	2,477	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M2, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τον προσανατολισμό, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.2.3 Διαχωρισμός

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τον δείκτη διαχωρισμού των αδρανών.

Πίνακας 5.18 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού $|S_H|$ (μίγμα M2, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	40,823	2	20,412	2,994	,193
Σφάλμα	20,450	3	6,817		
Σύνολο	413,940	6			
Διορθ. Σύνολο	61,273	5			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M2, η θερμοκρασία συμπίκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη διαχωρισμού, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.3 Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τα δοκίμια του μίγματος M4 της μεθόδου Marshall.

5.1.2.4.3.1 Σημεία επαφής

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής.

Πίνακας 5.19 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	394,500	3	131,500	,192	,897
Σφάλμα	2739,000	4	684,750		
Σύνολο	78018,000	8			
Διορθ. Σύνολο	3133,500	7			

Πίνακας 5.20 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	69096,874	3	23032,291	,330	,806
Σφάλμα	279392,305	4	69848,076		
Σύνολο	3883762,630	8			
Διορθ. Σύνολο	348489,179	7			

Πίνακας 5.21 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	82904,626	3	27634,875	,395	,765
Σφάλμα	280189,117	4	70047,279		
Σύνολο	3188895,161	8			
Διορθ. Σύνολο	363093,743	7			

Πίνακας 5.22 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	77530,375	3	25843,458	,402	,760
Σφάλμα	257255,500	4	64313,875		
Σύνολο	2864911,000	8			
Διορθ. Σύνολο	334785,875	7			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M4, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τα σημεία επαφής, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.3.2 Προσανατολισμός

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τους δείκτες που αφορούν τον προσανατολισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.23 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	337,000	3	112,333	,251	,857
Σφάλμα	1787,000	4	446,750		
Σύνολο	54612,000	8			
Διορθ. Σύνολο	2124,000	7			

Πίνακας 5.24 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	2,714	3	,905	,760	,572
Σφάλμα	4,763	4	1,191		
Σύνολο	38,603	8			
Διορθ. Σύνολο	7,477	7			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M4, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά κανέναν από τους δείκτες που σχετίζονται με τον προσανατολισμό, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.2.4.3.3 Διαχωρισμός

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης ως προς τον δείκτη διαχωρισμού των αδρανών.

Πίνακας 5.25 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού |S_H| (μίγμα M4, μέθοδος Marshall)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Θερμοκρασία	48,570	3	16,190	,525	,688
Σφάλμα	123,450	4	30,863		
Σύνολο	743,240	8			
Διορθ. Σύνολο	172,020	7			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M4, η θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη διαχωρισμού, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

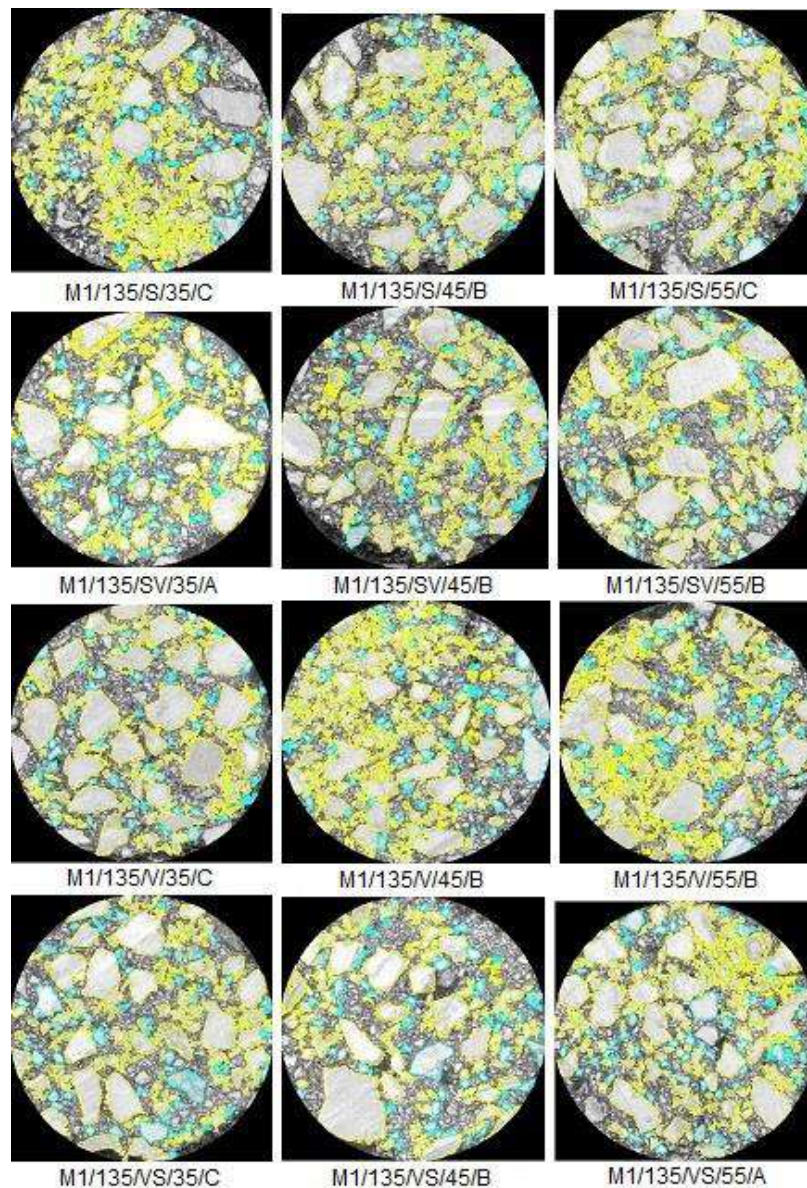
Συνοπτικά με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που παρατέθηκαν παραπάνω προκύπτει ότι η θερμοκρασία δεν αποτελεί στατιστικά σημαντική παράμετρο ως προς τους διάφορους δείκτες εσωτερικής δομής για κανένα ασφαλτόμιγμα συμπυκνωμένο με τη μέθοδο Marshall. Με άλλα λόγια, παρά το γεγονός ότι διαφορετική θερμοκρασία συμπύκνωσης μεταβάλλει τους διάφορους δείκτες εσωτερικής δομής, η μεταβολή αυτή δεν είναι έντονη.

5.1.3 Μέθοδος συμπύκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor)

5.1.3.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

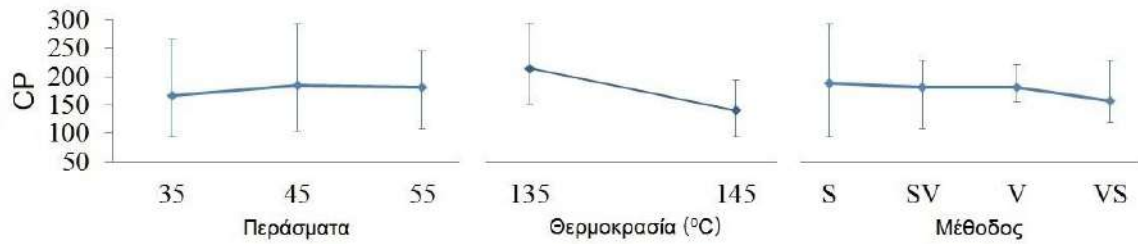
5.1.3.1.1 Σημεία επαφής

Στο ακόλουθο σχήμα (5.31) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.31 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M1 Roller)

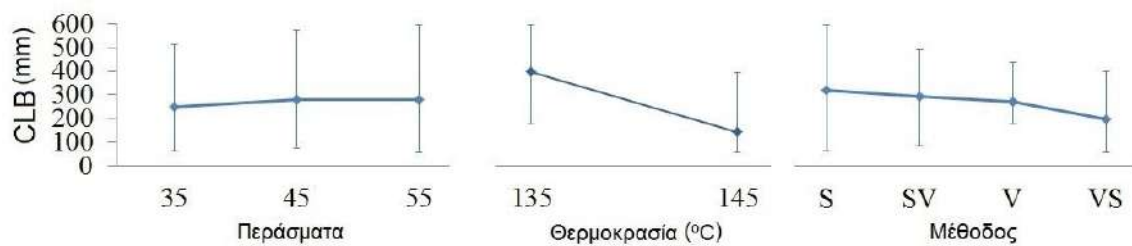
Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στους δείκτες των σημείων επαφής για το μίγμα M1 της μεθόδου Roller.



Σχήμα 5.32 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον αριθμό των σημείων επαφής (M1 Roller)



Σχήμα 5.33 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο μήκος επαφής αδρανών (M1 Roller)



Σχήμα 5.34 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M1 Roller)



Σχήμα 5.35 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη ISI (M1 Roller)

Πίνακας 5.26 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών σημείων επαφής (M1 Roller)

Περάσματα	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
35	167	-	398	-	248	-	225	-
45	185	11%	451	13%	281	14%	255	13%
55	181	-2%	436	-3%	281	0%	255	0%
Θερμοκρασία	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
135	214	-	552	-	397	-	363	-
145	140	-35%	305	-45%	143	-64%	127	-65%
Μέθοδος	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
S	189	-	468	-	321	-	290	-
SV	181	-4%	453	-3%	292	-9%	266	-8%
V	182	1%	431	-5%	273	-7%	247	-7%
VS	158	-13%	362	-16%	195	-29%	178	-28%

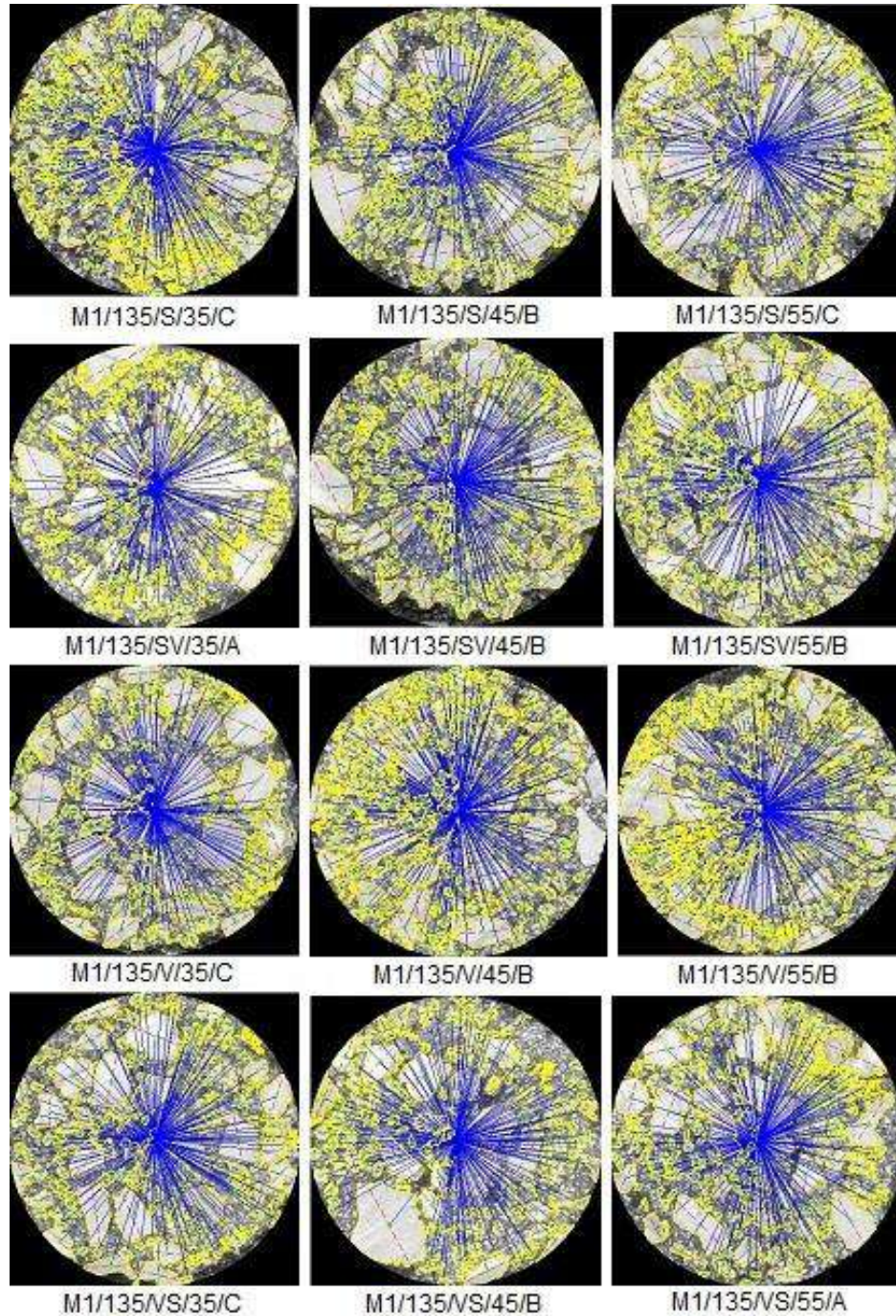
Όσον αφορά τα περάσματα, αύξηση των περασμάτων από 35 σε 45 παρουσιάζει αύξηση των δεικτών κατά περίπου 10%. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση των περασμάτων από 45 σε 55 φαίνεται να μην επηρεάζει τους δείκτες, μήκος επαφής αδρανών και διακλάδωση και ISI, ενώ και για τα σημεία επαφής και το μήκος επαφής η ποσοστιαία μείωση είναι πολύ μικρή, δηλαδή της τάξης του 3%.

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει κάθε έναν από τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής, η οποία μείωση είναι μεγάλη ποσοστιαία, όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες.

Η μεταβολή της μεθόδου από στατική (S) σε στατική-δονητική (SV) σε δονητική (V) και ύστερα σε δονητική-στατική (VS) παρουσιάζει συνεχή μείωση της τάξης του 8% στους δείκτες, ενώ η VS δείχνει να επιφέρει τις πιο χαμηλές τιμές στους δείκτες.

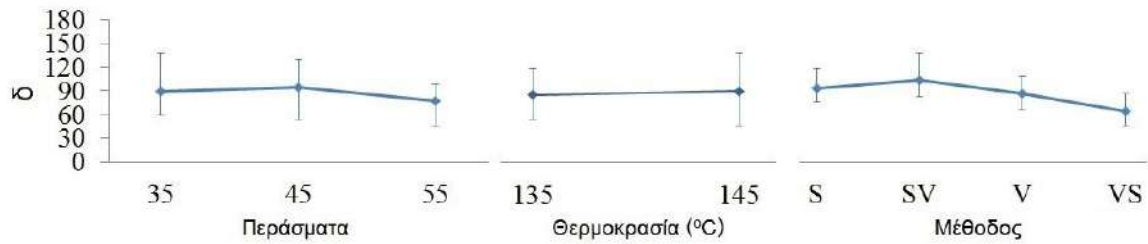
5.1.3.1.2 Προσανατολισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.36) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

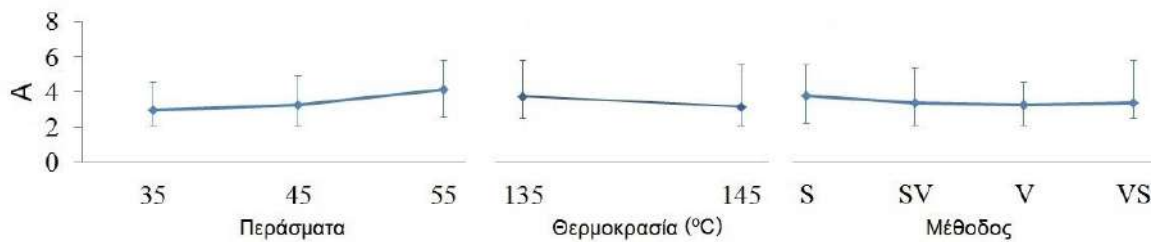


Σχήμα 5.36 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M1 Roller)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στους δείκτες προσανατολισμού για το μίγμα M1 της μεθόδου Roller.



Σχήμα 5.37 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στη γωνία προσανατολισμού (M1 Roller)



Σχήμα 5.38 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο εύρος (M1 Roller)

Πίνακας 5.27 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών προσανατολισμού (M1 Roller)

Περάσματα	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
35	89	-	3,0	-
45	95	6%	3,3	10%
55	77	-19%	4,1	27%
Θερμοκρασία	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
135	85	-	3,7	-
145	89	5%	3,2	-15%
Μέθοδος	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
S	93	-	3,8	-
SV	104	12%	3,4	-11%
V	86	-18%	3,3	-3%
VS	65	-25%	3,4	2%

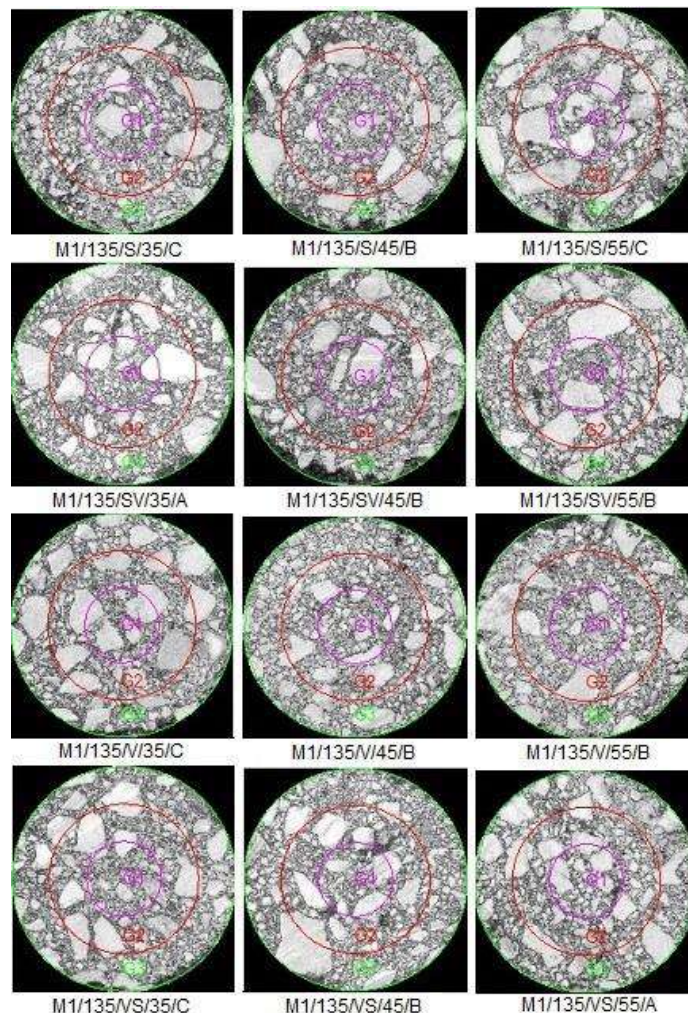
Ενώ στα 35 και 45 περάσματα παρατηρείται η τάση των αδρανών να τοποθετούνται με γωνία 90° περίπου, η αύξηση των περασμάτων σε 55 μείωσε την γωνία στις 77° και αύξησε απότομα τον δείκτη A στην μεγαλύτερη τιμή 4.1, πράγμα που σημαίνει εντονότερη τάση των αδρανών να προσανατολίζονται κατά αυτή τη γωνία. Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν μεταβάλλει ουσιαστικά την γωνία προσανατολισμού, η οποία

διατηρείται κοντά στις 90° περίπου. Αντίστοιχα το εύρος, δηλαδή ο δείκτης A, δεν μεταβάλλεται σημαντικά.

Ωστόσο, η μεταβολή της μεθόδου επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην γωνία προσανατολισμού, όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες. Κοντά στις 90° δίνει αποτέλεσμα η στατική (S) ή η δονητική (V) μέθοδος. Αντίθετα ο συνδυασμός των δύο δίνει ακραίες τιμές στα αποτελέσματα.

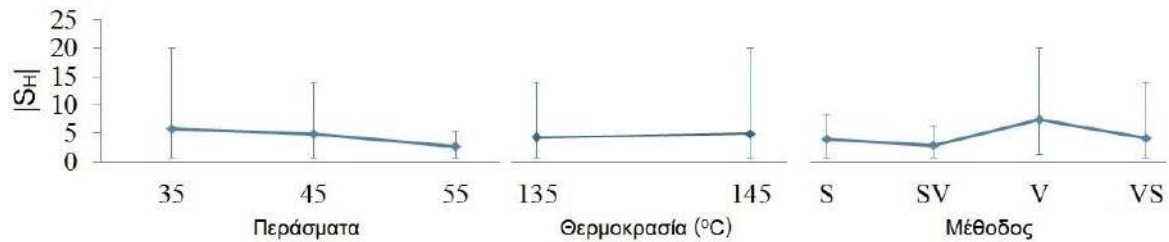
5.1.3.1.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.39) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος κλειστού τύπου M1 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών σε ζώνες. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.39 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M1 Roller)

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη διαχωρισμού για το μίγμα M1 της μεθόδου Roller.



Σχήμα 5.40 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη $|S_H|$ (M1 Roller)

Πίνακας 5.28 Ποσοστιαία μεταβολή δείκτη διαχωρισμού (M1 Roller)

Περάσματα	$ S_H $	Μεταβολή
35	5,9	-
45	4,9	-16%
55	2,7	-46%
Θερμοκρασία	$ S_H $	Μεταβολή
135	4,3	-
145	5,0	16%
Μέθοδος	$ S_H $	Μεταβολή
S	3,9	-
SV	3,0	-24%
V	7,4	148%
VS	4,2	-44%

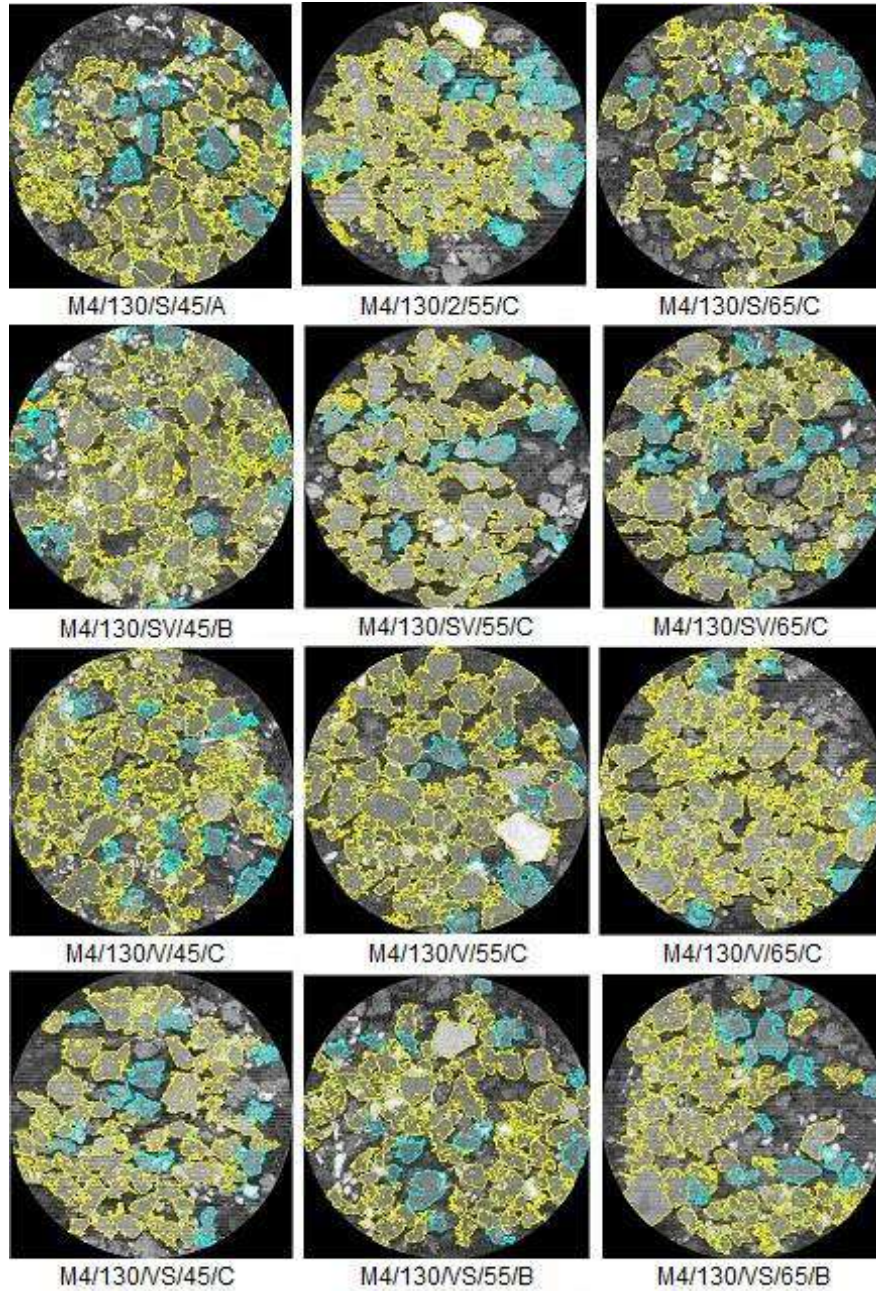
Η αύξηση των περασμάτων από 45 σε 55 καθίσταται πολύ σημαντική, καθώς μειώνει τον δείκτη $|S_H|$ στην τιμή 2.7, αρκετά πιο χαμηλά από το 5, που υποδεικνύει ομοιογένεια στο συμπυκνωμένο δοκίμιο. Μάλιστα η διακύμανση των αποτελεσμάτων στα 55 περάσματα είναι πολύ μικρή, πράγμα που σημαίνει ότι η τιμή 2.7 είναι αξιόπιστη.

Μικρότερο $|S_H|$ και εύρος τιμών αποτελεσμάτων εντοπίζεται στους 135 °C, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας στους 145 °C ανεβάζει το $|S_H|$ στο 5, δηλαδή έχουμε εντονότερο φαινόμενο διαχωρισμού. Μεγαλύτερη ομοιογένεια παρατηρείται για την στατική και την στατική-δονητική μέθοδο, ενώ το εντονότερο φαινόμενο διαχωρισμού εντοπίζεται στη δονητική μέθοδο, αλλά και με πιο μεγάλη διακύμανση των τιμών των αποτελεσμάτων.

5.1.3.2 Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

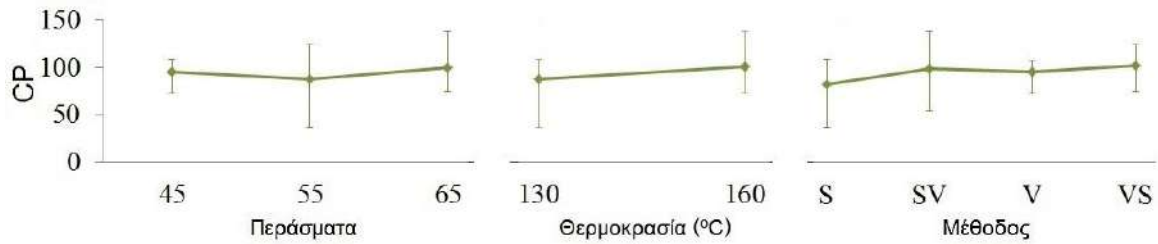
5.1.3.2.1 Σημεία επαφής

Στο ακόλουθο σχήμα (5.41) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των σημείων επαφής μεταξύ των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

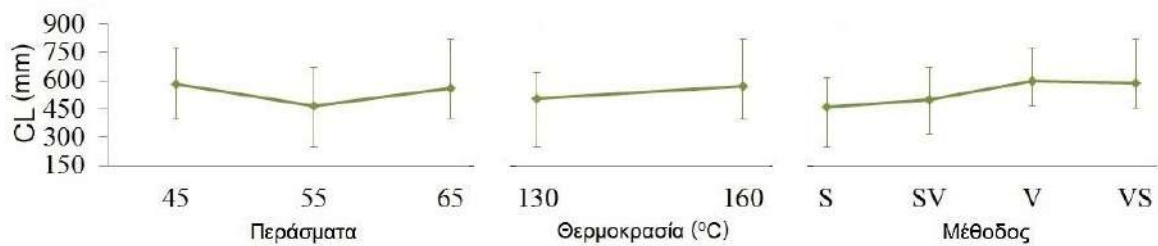


Σχήμα 5.41 Εικόνες υπολογισμού σημείων επαφής (M4 Roller)

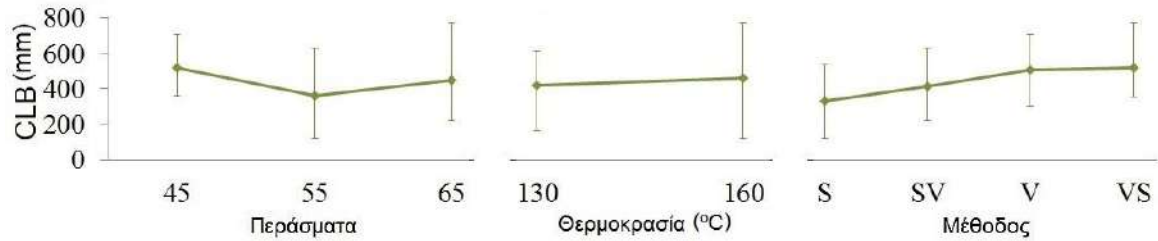
Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στους δείκτες των σημείων επαφής για το μίγμα M4 της μεθόδου Roller.



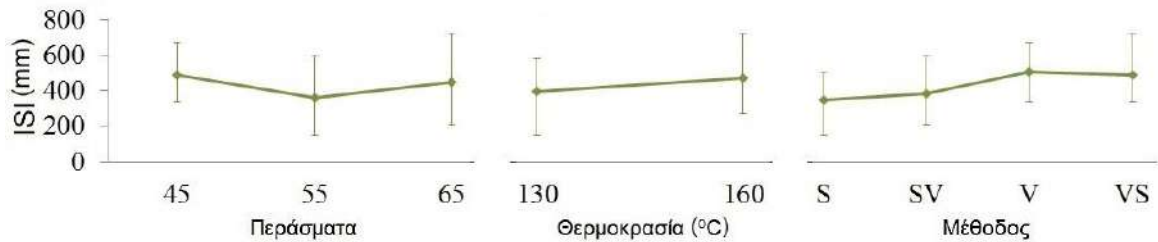
Σχήμα 5.42 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον αριθμό των σημείων επαφής (M4 Roller)



Σχήμα 5.43 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων μήκους επαφής (M4 Roller)



Σχήμα 5.44 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση (M4 Roller)



Σχήμα 5.45 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων δείκτη ISI (M4 Roller)

Πίνακας 5.29 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών σημείων επαφής (M4 Roller)

Περάσματα	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
45	96	-	583	-	522	-	491	-
55	87	-9%	466	-20%	361	-31%	364	-26%
65	100	15%	560	20%	447	24%	448	23%
Θερμοκρασία	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
130	88	-	503	-	423	-	396	-
160	101	15%	570	14%	463	10%	472	19%
Μέθοδος	CP	Μεταβολή	CL	Μεταβολή	CLB	Μεταβολή	ISI	Μεταβολή
S	82	-	460	-	330	-	352	-
SV	98	20%	499	9%	416	26%	388	10%
V	95	-3%	600	20%	506	22%	507	31%
VS	102	7%	587	-2%	520	3%	489	-4%

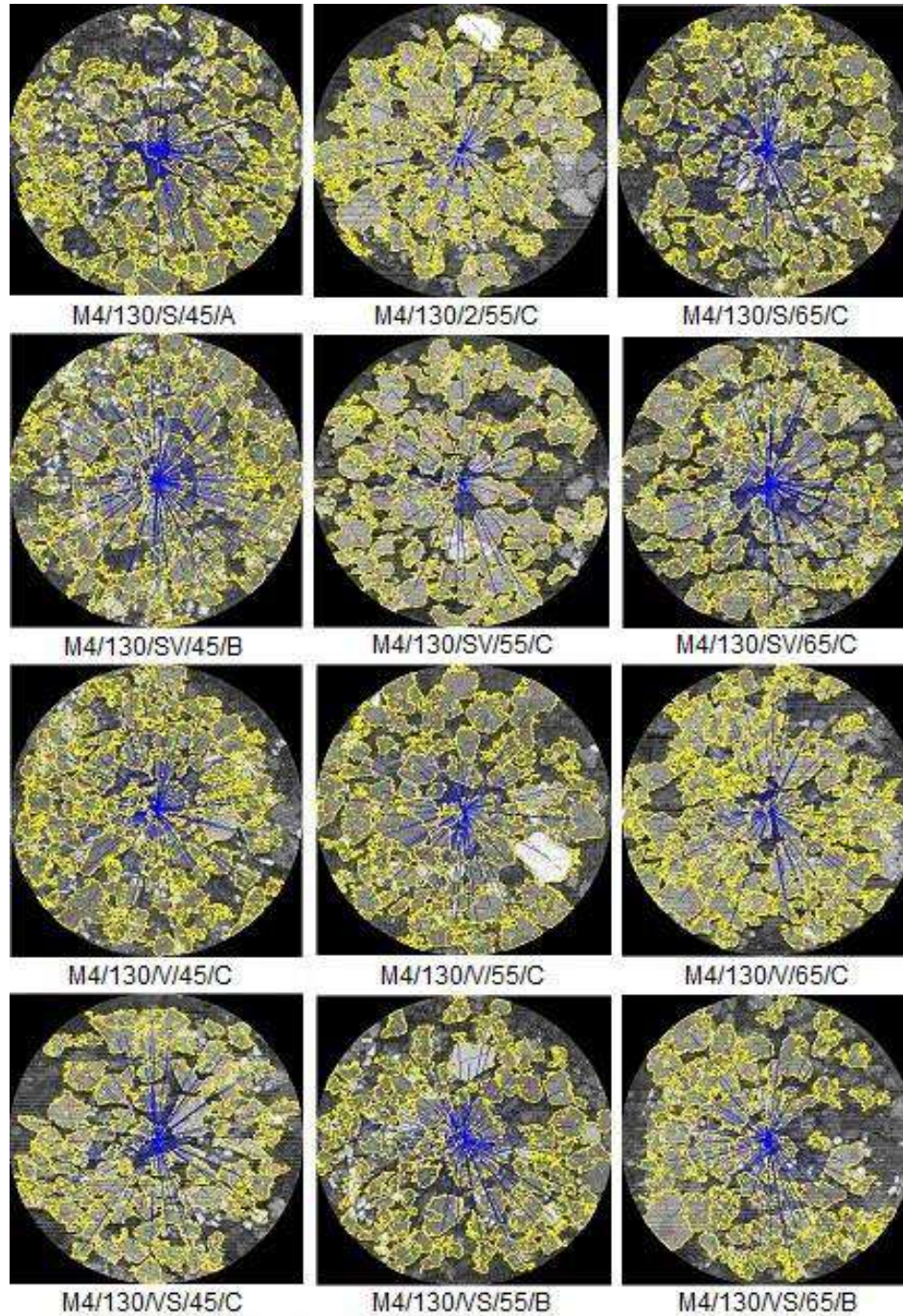
Η αύξηση των περασμάτων από 45 σε 55 μειώνει σημαντικά τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής, ενώ αύξηση του αριθμού των περασμάτων από 55 σε 65 οδηγεί σε αύξηση της τάξης του 20% περίπου για τους δείκτες.

Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 130 στους 160 °C οδηγεί σε αύξηση όλων των εν λόγω δεικτών.

Η μεταβολή της μεθόδου από στατική (S) σε στατική-δονητική (SV) σε δονητική (V) και ύστερα σε δονητική-στατική (VS) οδηγεί τους δείκτες σε μία ανοδική κατά βάση πορεία με ελάχιστα σημεία να παρουσιάζουν μικρή ποσοστιαία μείωση, όπως φαίνεται και από τους πίνακες.

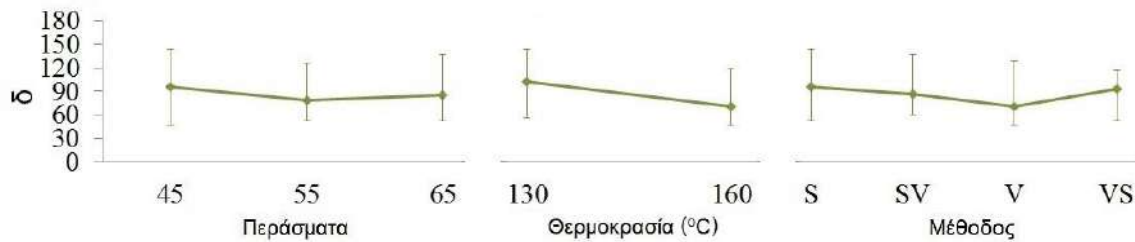
5.1.3.2.2 Προσανατολισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.46) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο εντοπισμός των γωνιών προσανατολισμού των αδρανών. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

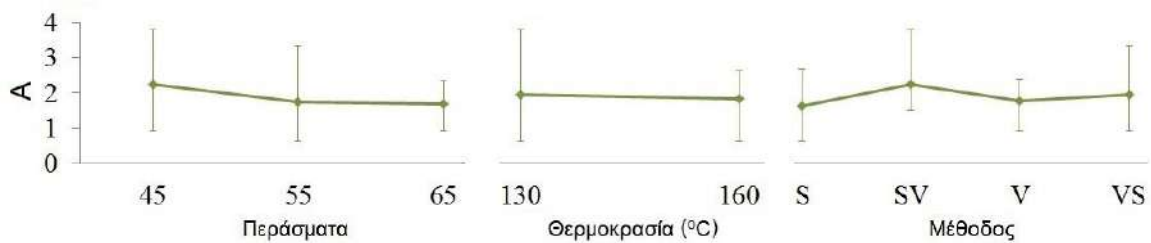


Σχήμα 5.46 Εικόνες υπολογισμού προσανατολισμού (M4 Roller)

Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στους δείκτες προσανατολισμού για το μίγμα M4 της μεθόδου Roller.



Σχήμα 5.47 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στη γωνία προσανατολισμού (M4 Roller)



Σχήμα 5.48 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στο εύρος (M4 Roller)

Πίνακας 5.30 Ποσοστιαία μεταβολή δεικτών προσανατολισμού (M4 Roller)

Περάσματα	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
45	96	-	2,3	-
55	79	-18%	1,7	-23%
65	85	7%	1,7	-3%
Θερμοκρασία	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
130	103	-	1,9	-
160	71	-31%	1,8	-5%
Μέθοδος	δ	Μεταβολή	A	Μεταβολή
S	96	-	1,6	-
SV	87	-10%	2,2	38%
V	71	-18%	1,8	-21%
VS	93	30%	2,0	11%

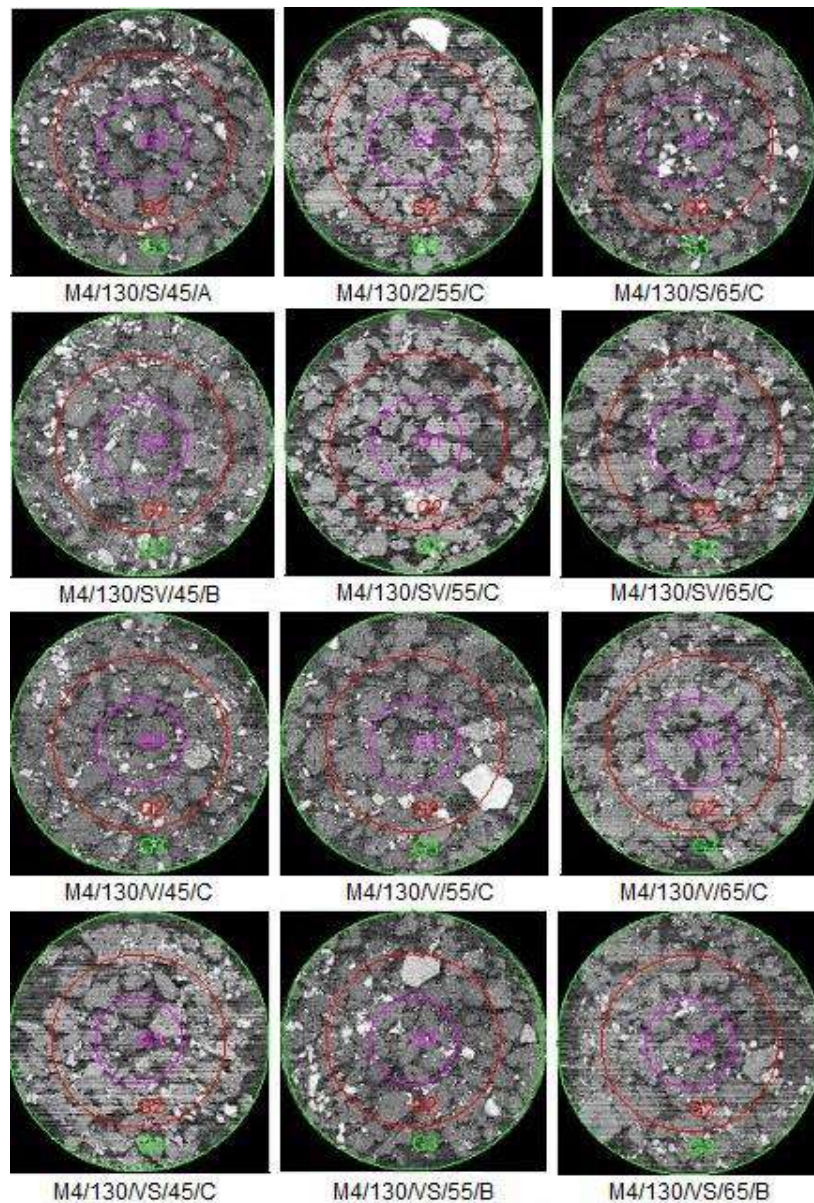
Στα 45 περάσματα η γωνία προσανατολισμού πλησιάζει τις 90° με τον δείκτη A να λαμβάνει την υψηλότερη τιμή, δηλαδή η επικρατούσα γωνία για αυτόν τον αριθμό περασμάτων παρουσιάζει την εντονότερη τάση.

Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση στην γωνία προσανατολισμού κατά 30°, ενώ ο δείκτης A παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστος.

Όλες οι μέθοδοι δίνουν αποτέλεσμα με γωνία προσανατολισμού περί τις 90° περίπου με εξαίρεση την δονητική, η οποία έχει επικρατούσα γωνία στις 71° . Την ισχυρότερη τάση προσανατολισμού των αδρανών στην αντίστοιχη γωνία έχει η στατική-δονητική μέθοδος.

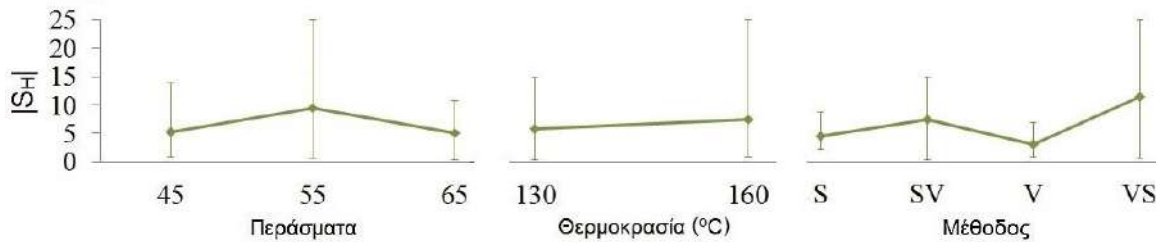
5.1.3.2.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα (5.49) απεικονίζονται εικόνες που προέκυψαν από την ανάλυση των δοκιμών του ασφαλτομίγματος ημι-ανοικτού τύπου M4 συμπυκνωμένων με την μέθοδο Roller. Στις εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των αδρανών σε ζώνες. Στη συνέχεια ακολουθούν λεπτομερώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.49 Εικόνες υπολογισμού διαχωρισμού (M4 Roller)

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη προσανατολισμού για το μίγμα M4 της μεθόδου Roller.



Σχήμα 5.50 Επιρροή μεταβλητών παραμέτρων στον δείκτη |S_H| (M4 Roller)

Πίνακας 5.31 Ποσοστιαία μεταβολή δείκτη διαχωρισμού (M4 Roller)

Περάσματα	S _H	Μεταβολή
45	5,3	-
55	9,4	76%
65	5,1	-46%
Θερμοκρασία	S _H	Μεταβολή
130	5,7	-
160	7,5	31%
Μέθοδος	S _H	Μεταβολή
S	4,6	-
SV	7,5	62%
V	3,0	-60%
VS	11,4	278%

Στα 55 περάσματα παρατηρείται εντονότερα το φαινόμενο του διαχωρισμού με σημαντική όμως διακύμανση στα αποτελέσματα.

Αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση και στον δείκτη |S_H| της τάξης του 30%.

Η δονητική μέθοδος προσφέρει την μεγαλύτερη ομοιογένεια στο συμπυκνωμένο δοκίμιο και μάλιστα με μικρή διακύμανση στα αποτελέσματα.

5.1.3.3 Στατιστική ανάλυση

Εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα της θερμοκρασίας, των περασμάτων και της μεθόδου στα αποτελέσματα των διαφόρων δεικτών εσωτερικής δομής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το γενικό γραμμικό μοντέλο (general linear model - GLM):

{Δείκτης Εσωτ. Δομής} = f (περάσματα, θερμοκρασία, μέθοδος, περάσματα × θερμοκρασία, περάσματα × μέθοδος, θερμοκρασία × μέθοδος)

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.

5.1.3.3.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τα δοκίμια του μίγματος M1 της μεθόδου Roller.

5.1.3.3.1.1 Σημεία επαφής

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής.

Πίνακας 5.32 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	1487,250	2	743,625	,260	,780
Θερμοκρασία *	32930,042	1	32930,042	11,501	,015
Μέθοδος	1729,792	3	576,597	,201	,892
Περάσματα x Μέθοδος	3753,083	6	625,514	,218	,957
Θερμοκρασία x Μέθοδος	4147,125	3	1382,375	,483	,706
Περάσματα x Θερμοκρασία	2461,083	2	1230,542	,430	,669
Σφάλμα	17179,250	6	2863,208		
Σύνολο	820903,000	24			
Διορθ. Σύνολο	63687,625	23			

Πίνακας 5.33 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	12111,558	2	6055,779	,252	,785
Θερμοκρασία *	364918,682	1	364918,682	15,179	,008
Μέθοδος	9804,285	3	3268,095	,136	,935
Περάσματα x Μέθοδος	52578,542	6	8763,090	,365	,878
Θερμοκρασία x Μέθοδος	36680,818	3	12226,939	,509	,691
Περάσματα x Θερμοκρασία	53342,091	2	26671,045	1,109	,389
Σφάλμα	144241,909	6	24040,318		
Σύνολο	5080886,100	24			
Διορθ. Σύνολο	673677,885	23			

Πίνακας 5.34 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	6055,577	2	3027,788	,142	,870
Θερμοκρασία *	389280,935	1	389280,935	18,292	,005
Μέθοδος	11096,752	3	3698,917	,174	,910
Περάσματα x Μέθοδος	59469,495	6	9911,583	,466	,813
Θερμοκρασία x Μέθοδος	45698,266	3	15232,755	,716	,578
Περάσματα x Θερμοκρασία	60744,540	2	30372,270	1,427	,311
Σφάλμα	127687,128	6	21281,188		
Σύνολο	2450199,739	24			
Διορθ. Σύνολο	700032,693	23			

Πίνακας 5.35 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	4680,750	2	2340,375	,133	,878
Θερμοκρασία *	332290,667	1	332290,667	18,898	,005
Μέθοδος	9401,000	3	3133,667	,178	,907
Περάσματα x Μέθοδος	48272,250	6	8045,375	,458	,818
Θερμοκρασία x Μέθοδος	36572,333	3	12190,778	,693	,589
Περάσματα x Θερμοκρασία	52204,083	2	26102,042	1,484	,299
Σφάλμα	105498,917	6	17583,153		
Σύνολο	2029520,000	24			
Διορθ. Σύνολο	588920,000	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, μόνο η θερμοκρασία συμπύκνωσης επηρεάζει σημαντικά τους δείκτες που σχετίζονται με τα σημεία επαφής, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα της, υπολογίστηκε μικρότερη της τιμής 0.05.

5.1.3.3.1.2 Προσανατολισμός

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τους δείκτες που αφορούν τον προσανατολισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.36 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	1280,083	2	640,042	1,011	,419
Θερμοκρασία	121,500	1	121,500	,192	,677
Μέθοδος	547,667	3	182,556	,288	,833
Περάσματα x Μέθοδος	4982,583	6	830,431	1,311	,375
Θερμοκρασία x Μέθοδος	776,833	3	258,944	,409	,753
Περάσματα x Θερμοκρασία	630,750	2	315,375	,498	,631
Σφάλμα	3799,917	6	633,319		
Σύνολο	194492,000	24			
Διορθ. Σύνολο	12139,333	23			

Πίνακας 5.37 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα *	6,016	2	3,008	6,758	,029
Θερμοκρασία	1,870	1	1,870	4,202	,086
Μέθοδος	3,289	3	1,096	2,463	,160
Περάσματα x Μέθοδος	4,852	6	,809	1,817	,243
Θερμοκρασία x Μέθοδος *	6,920	3	2,307	5,183	,042
Περάσματα x Θερμοκρασία	1,279	2	,639	1,437	,309
Σφάλμα	2,670	6	,445		
Σύνολο	313,248	24			
Διορθ. Σύνολο	26,897	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, τα περάσματα, καθώς και ο συνδυασμός θερμοκρασίας και μεθόδου, επηρεάζουν

σημαντικά τον δείκτη του εύρους A, αφού σε κάθε μία από τις δύο αυτές περιπτώσεις η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μικρότερη της τιμής 0.05

5.1.3.3.1.3 Διαχωρισμός

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τον δείκτη που αφορά τον διαχωρισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.38 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού |S_H| (μίγμα M1, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	33,378	2	16,689	,739	,517
Θερμοκρασία	2,734	1	2,734	,121	,740
Μέθοδος	114,811	3	38,270	1,694	,267
Περάσματα x Μέθοδος	46,353	6	7,725	,342	,891
Θερμοκρασία x Μέθοδος	17,388	3	5,796	,257	,854
Περάσματα x Θερμοκρασία	143,553	2	71,776	3,177	,115
Σφάλμα	135,571	6	22,595		
Σύνολο	1004,390	24			
Διορθ. Σύνολο	493,786	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, καμία μεταβλητή παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη διαχωρισμού, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.3.3.2 Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τα δοκίμια του μίγματος M4 της μεθόδου Roller.

5.1.3.3.2.1 Σημεία επαφής

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής.

Πίνακας 5.39 Ανάλυση διακύμανσης σημείων επαφής CP (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	677,250	2	338,625	,944	,440
Θερμοκρασία	1027,042	1	1027,042	2,864	,142
Μέθοδος	186,792	3	62,264	,174	,910
Περάσματα x Μέθοδος	2481,083	6	413,514	1,153	,433
Θερμοκρασία x Μέθοδος	2204,125	3	734,708	2,049	,209
Περάσματα x Θερμοκρασία	2503,083	2	1251,542	3,491	,099
Σφάλμα	2151,250	6	358,542		
Σύνολο	223859,000	24			
Διορθ. Σύνολο	11230,625	23			

Πίνακας 5.40 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής CL (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	61193,429	2	30596,714	1,339	,331
Θερμοκρασία	27497,709	1	27497,709	1,203	,315
Μέθοδος	47564,674	3	15854,891	,694	,589
Περάσματα x Μέθοδος	75857,798	6	12642,966	,553	,755
Θερμοκρασία x Μέθοδος	13010,785	3	4336,928	,190	,900
Περάσματα x Θερμοκρασία	25362,466	2	12681,233	,555	,601
Σφάλμα	137104,524	6	22850,754		
Σύνολο	7296477,466	24			
Διορθ. Σύνολο	387591,385	23			

Πίνακας 5.41 Ανάλυση διακύμανσης μήκους επαφής αδρανών σε διακλάδωση CLB (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	103857,033	2	51928,517	1,148	,378
Θερμοκρασία	9971,119	1	9971,119	,220	,655
Μέθοδος	101338,774	3	33779,591	,747	,563
Περάσματα x Μέθοδος	131246,233	6	21874,372	,484	,801
Θερμοκρασία x Μέθοδος	12088,823	3	4029,608	,089	,963
Περάσματα x Θερμοκρασία	3770,062	2	1885,031	,042	,959
Σφάλμα	271431,621	6	45238,603		
Σύνολο	5343263,253	24			
Διορθ. Σύνολο	633703,664	23			

Πίνακας 5.42 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη ISI (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	66449,250	2	33224,625	1,218	,360
Θερμοκρασία	34580,042	1	34580,042	1,268	,303
Μέθοδος	77696,792	3	25898,931	,949	,474
Περάσματα x Μέθοδος	88074,083	6	14679,014	,538	,765
Θερμοκρασία x Μέθοδος	12203,792	3	4067,931	,149	,927
Περάσματα x Θερμοκρασία	14673,583	2	7336,792	,269	,773
Σφάλμα	163677,083	6	27279,514		
Σύνολο	4980503,000	24			
Διορθ. Σύνολο	457354,625	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M4, καμία μεταβλητή παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.1.3.3.2 Προσανατολισμός

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τους δείκτες που αφορούν τον προσανατολισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.43 Ανάλυση διακύμανσης γωνίας προσανατολισμού δ (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	1227,250	2	613,625	1,441	,308
Θερμοκρασία *	5953,500	1	5953,500	13,983	,010
Μέθοδος	1814,000	3	604,667	1,420	,326
Περάσματα x Μέθοδος	6196,750	6	1032,792	2,426	,153
Θερμοκρασία x Μέθοδος	1167,167	3	389,056	,914	,488
Περάσματα x Θερμοκρασία	1246,750	2	623,375	1,464	,303
Σφάλμα	2554,583	6	425,764		
Σύνολο	201816,000	24			
Διορθ. Σύνολο	20160,000	23			

Πίνακας 5.44 Ανάλυση διακύμανσης εύρους A (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	1,561	2	,781	1,109	,389
Θερμοκρασία	,059	1	,059	,084	,782
Μέθοδος	3,527	3	1,176	1,670	,271
Περάσματα x Μέθοδος	3,270	6	,545	,774	,618
Θερμοκρασία x Μέθοδος	,954	3	,318	,452	,726
Περάσματα x Θερμοκρασία	,158	2	,079	,112	,896
Σφάλμα	4,224	6	,704		
Σύνολο	99,975	24			
Διορθ. Σύνολο	13,752	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M4, μόνο η θερμοκρασία συμπύκνωσης επηρεάζει σημαντικά τη γωνία προσανατολισμού δ, καθώς η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα της, υπολογίστηκε μικρότερη της τιμής 0.05.

5.1.3.3.2.3 Διαχωρισμός

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης της στατιστικής σημαντικότητας των μεταβλητών παραμέτρων ως προς τον δείκτη που αφορά τον διαχωρισμό των αδρανών.

Πίνακας 5.45 Ανάλυση διακύμανσης δείκτη διαχωρισμού |S_H| (μίγμα M4, μέθοδος Roller)

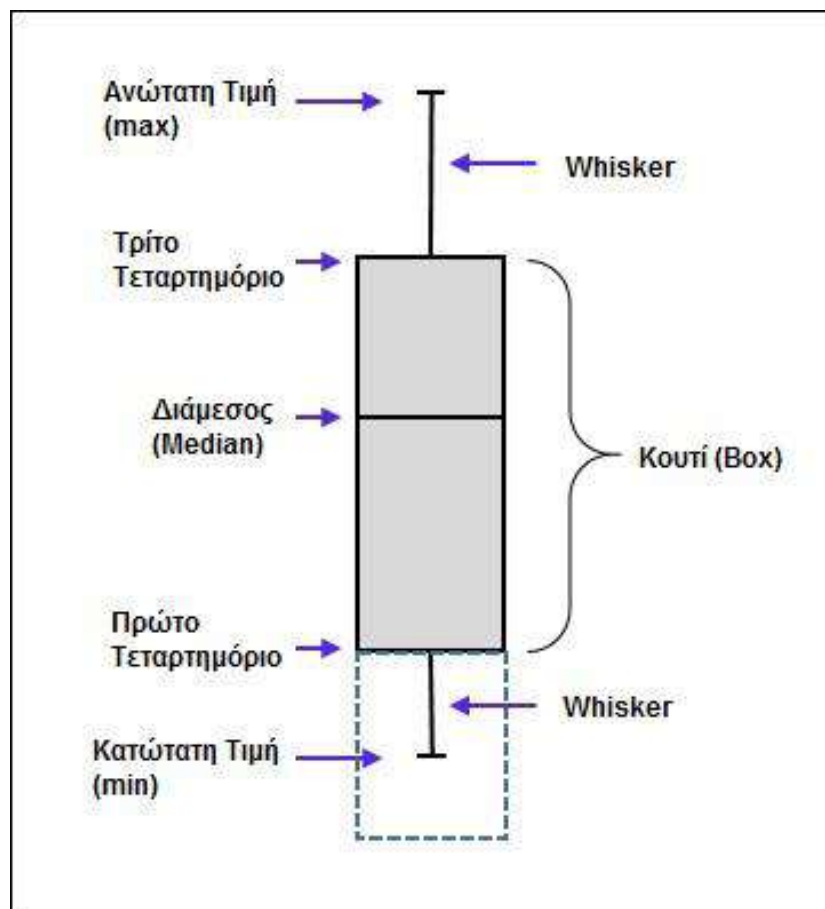
Προέλευση Διακύμανσης	Άθροισμα Τετραγώνων SS	Βαθμοί Ελευθερίας df	Μέσο Άθροισμα Τετραγώνων MS	Κριτήριο F	Πιθανότητα Sig.
Περάσματα	93,423	2	46,711	1,085	,396
Θερμοκρασία	18,727	1	18,727	,435	,534
Μέθοδος	4,875	3	1,625	,038	,989
Περάσματα x Μέθοδος	290,297	6	48,383	1,124	,445
Θερμοκρασία x Μέθοδος	101,117	3	33,706	,783	,545
Περάσματα x Θερμοκρασία	21,161	2	10,580	,246	,790
Σφάλμα	258,226	6	43,038		
Σύνολο	1841,200	24			
Διορθ. Σύνολο	787,825	23			

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, όσον αφορά το ασφαλτόμιγμα M1, καμία μεταβλητή παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη διαχωρισμού, καθώς σε κάθε περίπτωση η πιθανότητα Sig., δηλαδή η στατιστική σημαντικότητα, υπολογίστηκε μεγαλύτερη της τιμής 0.05.

5.2 Σύγκριση εργαστηριακών μεθόδων σε σχέση με την επιτόπου συμπύκνωση

5.2.1 Συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων

Για λόγους συγκριτικής αξιολόγησης των δύο εργαστηριακών μεθόδων συμπύκνωσης μεταξύ τους, καθώς και σε σχέση με την επιτόπου συμπύκνωση, γίνεται απεικόνιση των αποτελεσμάτων με γραφική παρουσίαση μέσω θηκογραμμάτων (box plots). Η κορυφή και η βάση του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου παριστάνουν αντίστοιχα το άνω και κάτω τεταρτημόριο, δηλαδή το τρίτο και το πρώτο τεταρτημόριο, των αποτελεσμάτων. Η γραμμή εντός του ορθογώνιου δείχνει την διάμεσο (median) των μετρήσεων, δηλαδή το δεύτερο τεταρτημόριο. Η άνω και κάτω προέκταση με τη μορφή ευθυγράμμου τμήματος εκτός του ορθογώνιου δείχνουν την ανώτατη (max) και την κατώτατη (min) αντίστοιχα τιμή των μετρήσεων, με άλλα λόγια δείχνουν το εύρος των αποτελεσμάτων. Η προεκτάσεις αυτές ονομάζονται “whiskers”.



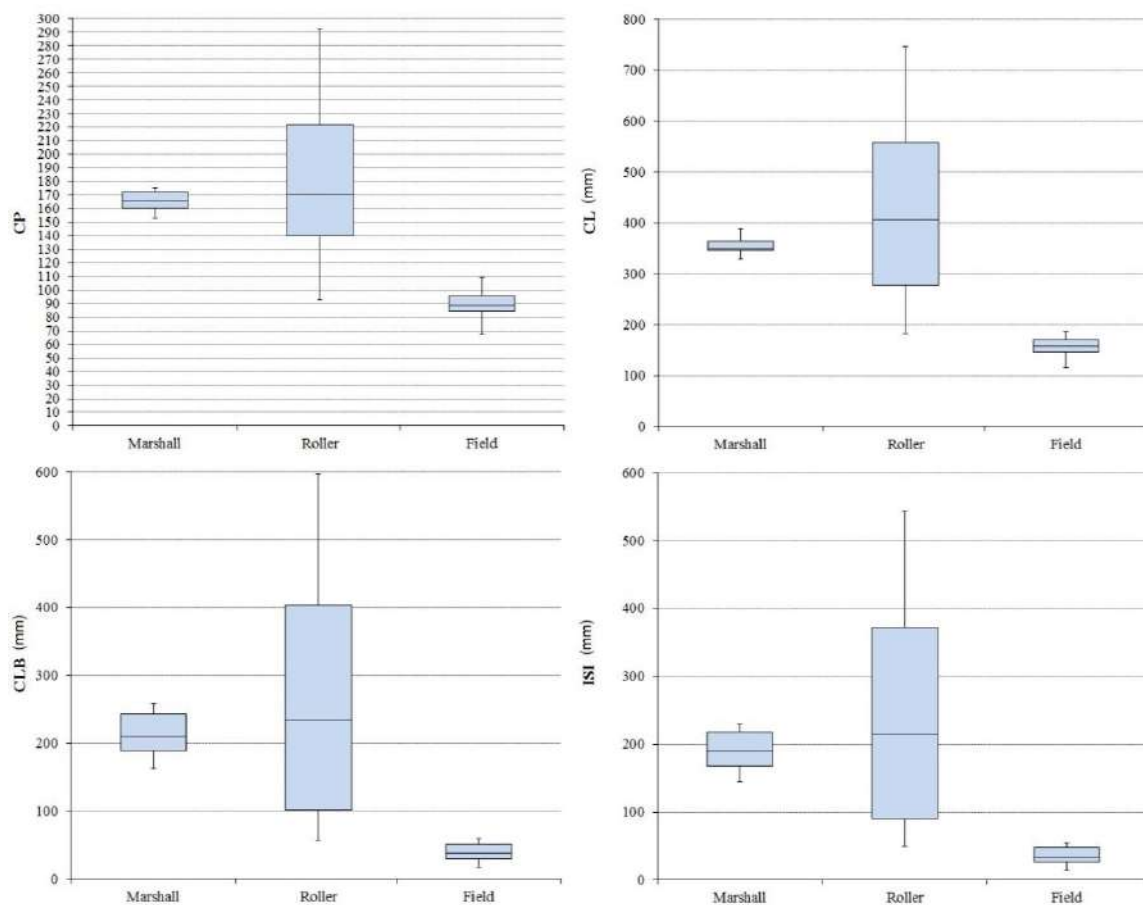
Σχήμα 5.51 Επεξήγηση απεικόνισης box plot (θηκογράμματος)

Στα σχήματα των επόμενων ενοτήτων παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των δύο μεθόδων συμπύκνωσης και των πυρήνων οδοστρώματος για όλα τα μίγματα. Στον κατακόρυφο άξονα δίνονται οι διάφοροι δείκτες εσωτερικής δομής, ενώ στον οριζόντιο οι μέθοδοι συμπύκνωσης.

5.2.1.1 Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

5.2.1.1.1 Σημεία επαφής

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M1 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τα σημεία επαφής.



Σχήμα 5.52 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M1

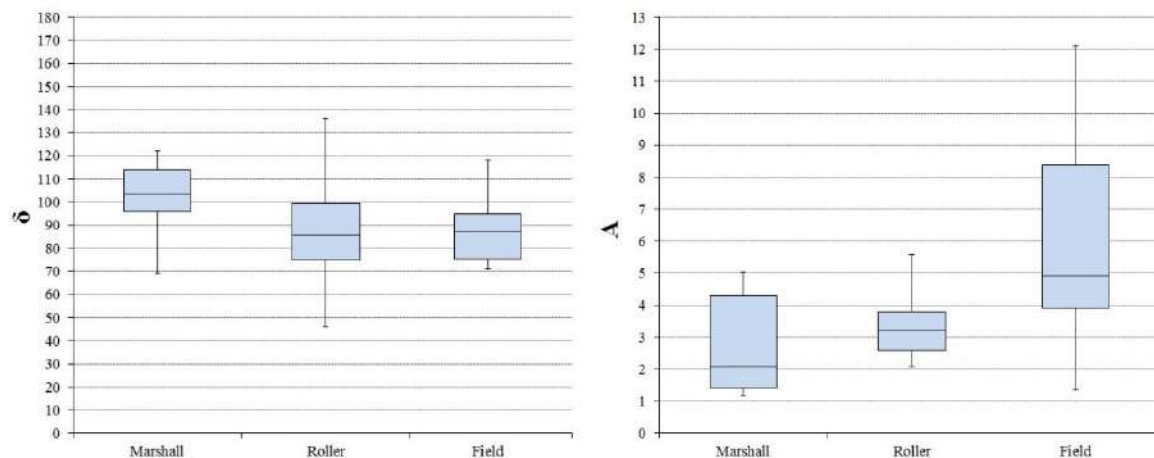
Με κριτήριο τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου Marshall εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση σε σχέση με

αυτά της μεθόδου Roller, που παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος τιμών. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στο ότι ο αριθμός των δοκιμών που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall είναι πολύ μικρότερος από αυτά που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Roller.

Παρατηρώντας την διάμεσο των θηκογραμμάτων βλέπουμε ότι τόσο η μέθοδος Marshall, όσο και η Roller, απέχουν αρκετά από τα αποτελέσματα των πυρήνων οδοστρώματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ως προς τον αριθμό των σημείων επαφής η διάμεσος των αποτελεσμάτων της μεθόδου Marshall έχει τιμή 166, της Roller 170 και των πυρήνων οδοστρώματος 89.

5.2.1.1.2 Προσανατολισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M1 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τον προσανατολισμό.



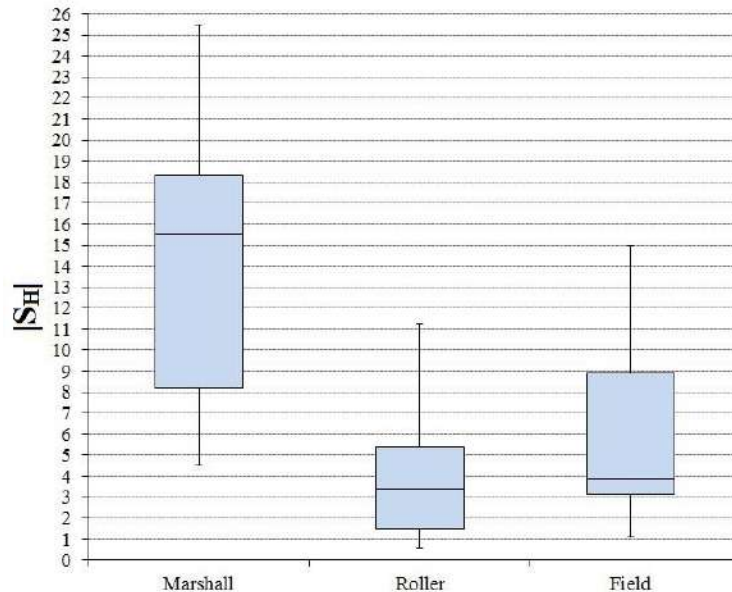
Σχήμα 5.53 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M1

Ως προς τον προσανατολισμό η μέθοδος Roller πλησιάζει σαφώς περισσότερο την επιτόπου συμπύκνωση με κριτήριο την επικρατούσα γωνία προσανατολισμού. Η τιμή του δείκτη δ για τη μέθοδο Roller είναι 86° , για τους πυρήνες οδοστρώματος 87° , ενώ για τη Marshall 104° . Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι τιμές του πρώτου και τρίτου τεταρτημρίου της Roller και των πυρήνων οδοστρώματος ως προς τον δείκτη δ σχεδόν ταυτίζονται. Ο δείκτης A για τη μέθοδο Roller προσεγγίζει καλύτερα την τιμή του A των

πυρήνων οδοστρώματος σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή του δείκτη της μεθόδου Marshall.

5.2.1.1.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M1 και αφορούν τα αποτελέσματα του δείκτη διαχωρισμού.



Σχήμα 5.54 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M1

Όσον αφορά το φαινόμενο του διαχωρισμού τα αποτελέσματα της μεθόδου Roller (διάμεσος ίση με 3) και πάλι προσεγγίζουν καλύτερα αυτά των πυρήνων οδοστρώματος (διάμεσος ίση με 4). Τα αποτελέσματα της μεθόδου Marshall (διάμεσος ίση με 16) παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Η πλειοψηφία των 24 δοκιμών της μεθόδου Roller του μίγματος M1 παρουσίασε ομοιογένεια κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αντίθετα, ο περιορισμένος αριθμός των 6 δοκιμών της μεθόδου Marshall του μίγματος M1 παρουσίασε μεγάλο εύρος τιμών ως προς τον δείκτη διαχωρισμού που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 26, κάτι που υποδηλώνει έντονο φαινόμενο διαχωρισμού κατά την οριζόντια έννοια για την συγκεκριμένη μέθοδο συμπίκνωσης.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης της εσωτερικής δομής των δοκιμών που συμπυκνώθηκαν στο εργαστήριο σε σχέση με τα δοκίμια της επιτόπου συμπίκνωσης

προκύπτει ότι η μέθοδος συμπύκνωσης με κύλινδρο προσεγγίζει καλύτερα την συμπύκνωση στο πεδίο, τουλάχιστον όσον αφορά στον προσανατολισμό των αδρανών.

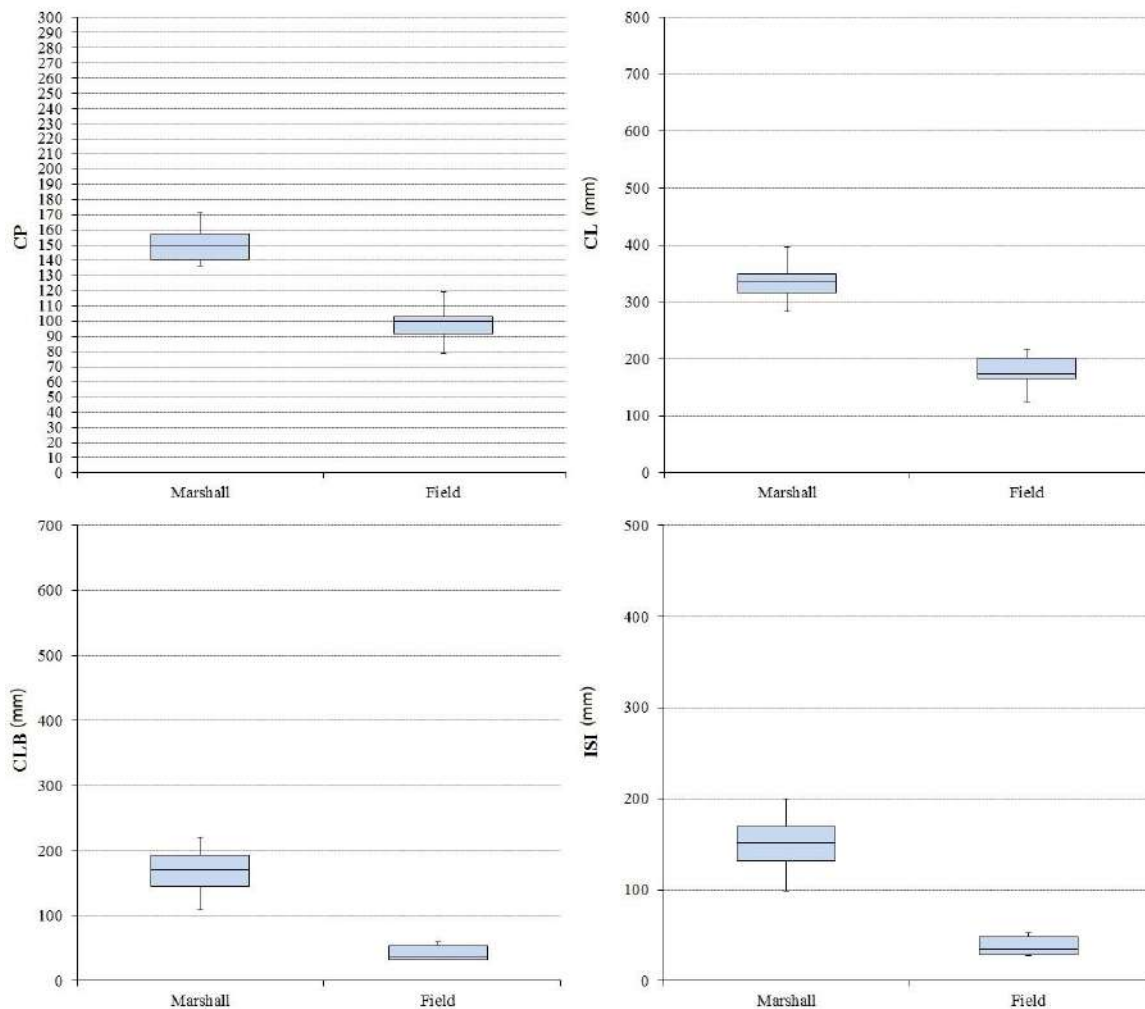
Συγκεκριμένα, με βάση τη διάμεσο του δείκτη δ προκύπτει ότι τα αδρανή έχουν την τάση να τοποθετούνται ομόκεντρα. Αυτή η διαπίστωση συμφωνεί εν μέρει με την έρευνα των Hassan et al. (2012) που συμπέρανε ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών για την μέθοδο Roller κατά την οριζόντια διεύθυνση στην περιφέρεια των δοκιμών. Αντίθετα οι έρευνες των Hunter et al. (2004) και Iwama et al. (2007) συμπέραναν ότι τα συμπυκνωμένα δοκίμια με τη μέθοδο Roller παρουσίασαν κατά βάση τυχαίο προσανατολισμό των αδρανών. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μελέτης των Coenen et al. (2012) η μέθοδος Roller παρουσίασε ως επικρατούσα γωνία τις 138° , τιμή η οποία αποκλίνει πολύ από τη διάμεσο του θηκογράμματος της μεθόδου Roller για τον δείκτη δ , η οποία υπολογίζεται στις 86° .

Όσον αφορά τον διαχωρισμό με βάση την τιμή της διάμεσου προκύπτει ομοιογένεια κατά την οριζόντια διεύθυνση για τα δοκίμια της μεθόδου συμπύκνωσης με κύλινδρο. Ακόμα και το τρίτο τεταρτημόριο του θηκογράμματος της μεθόδου Roller βρίσκεται κοντά στην τιμή 5, οπότε παρά το γεγονός ότι η μέγιστη τιμή των αποτελεσμάτων για τον δείκτη διαχωρισμού εντοπίζεται στο 20 η διακύμανση μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν είναι σημαντική. Τα αποτελέσματα της έρευνας των Bessa et al. (2012) συμφωνούν ότι τα ασφαλτομίγματα που συμπυκνώθηκαν με κύλινδρο παρουσίασαν πιο ομοιόμορφη χωρική κατανομή των αδρανών. Με αυτό το εύρημα έρχεται σε αντίθεση μία παλιότερη μελέτη των Hassan et al. (2012), σύμφωνα με την οποία τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με κύλινδρο παρουσίασαν έντονο φαινόμενο διαχωρισμού κατά την οριζόντια διεύθυνση με τον δείκτη διαχωρισμού να λαμβάνει την τιμή -18.4, που υποδηλώνει περισσότερα χονδρόκοκκα αδρανή στον πυρήνα του δοκιμίου.

5.2.1.2 Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)

5.2.1.2.1 Σημεία επαφής

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα της μεθόδου Marshall, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M2 και αφορούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεικτών που σχετίζονται με τα σημεία επαφής.



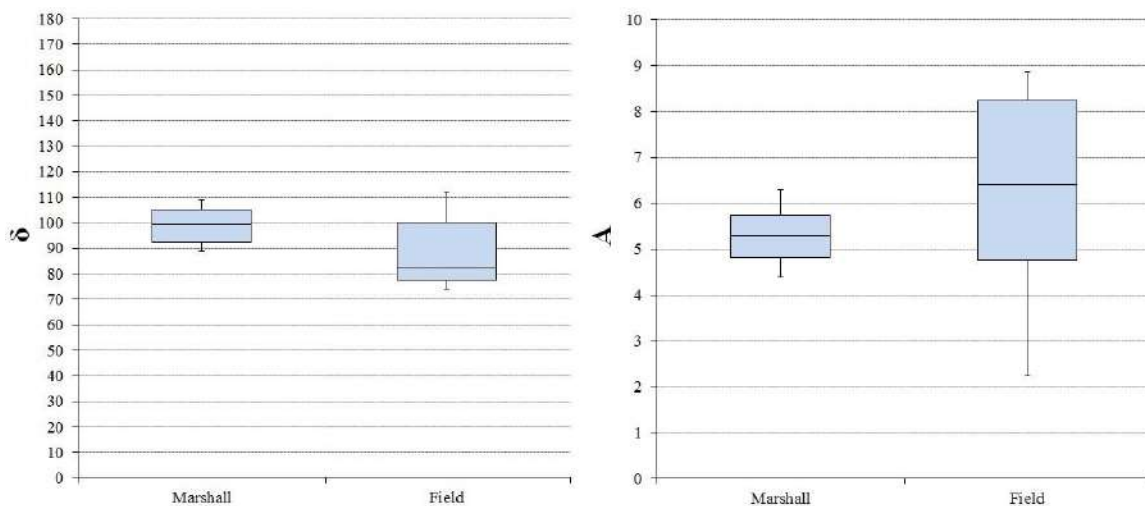
Σχήμα 5.55 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M2

Για το μίγμα M2 δεν εξετάστηκε η συμπίκνωση με τη μέθοδο Roller, οπότε η μόνη σύγκριση που δύναται να γίνει είναι μεταξύ μεθόδου Marshall και επιτόπου συμπίκνωσης και περιορίζεται στις ακόλουθες παρατηρήσεις.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα (5.55), όσον αφορά τους δείκτες των σημείων επαφής, παρά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου Marshall δεν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση απέχουν αρκετά ως προς αυτά των πυρήνων οδοστρώματος. Ενδεικτικά για τον αριθμό των σημείων επαφής υπολογίστηκε η διάμεσος για τη μέθοδο Marshall ίση με 150, ενώ για τους πυρήνες οδοστρώματος μόλις 100, με τα πρώτα και τρίτα τεταρτημόρια σε αντίστοιχα μεγάλη απόκλιση.

5.2.1.2.2 Προσανατολισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα της μεθόδου Marshall, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M2 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τον προσανατολισμό.

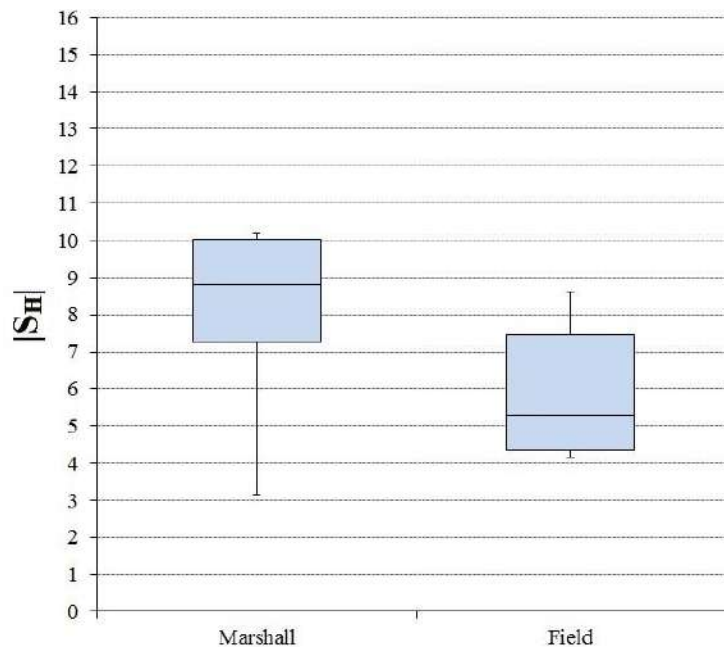


Σχήμα 5.56 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M2

Ως προς την επικρατούσα γωνία κρίνοντας από την διάμεσο των αποτελεσμάτων η μέθοδος Marshall προσανατολίζει τα αδρανή κατά γωνία 100° σε σχέση με την επιτόπου συμπίκνωση που τα αδρανή προσανατολίζονται σε γωνία 82° . Να σημειωθεί ότι για τον εν λόγω δείκτη δ οι τιμές των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παρουσιάζουν μικρή διακύμανση για τα δοκίμια της μεθόδου Marshall με αντίστοιχα υψηλή τιμή της διαμέσου του εύρους A (ίση με 5). Αυτό υποδηλώνει ότι το σύνολο των 6 δοκιμών του μίγματος M2 που συμπτυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall παρουσιάζουν έντονη τάση προσανατολισμού κατά τις 100° περίπου.

5.2.1.2.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα της μεθόδου Marshall, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου M2 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τον διαχωρισμό.



Σχήμα 5.57 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M2

Ο δείκτης διαχωρισμού διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ Marshall και Field, καθώς στην πρώτη η διάμεσος του δείκτη $|S_H|$ πλησιάζει την τιμή 9, ενώ η επιτόπου συμπίκνωση πλησιάζει το 5. Με άλλα λόγια, η μέθοδος Marshall παρουσιάζει έντονο φαινόμενο διαχωρισμού σε σύγκριση με την επιτόπου συμπίκνωση που εμφανίζει πιο ομοιογενή χωρική κατανομή των αδρανών.

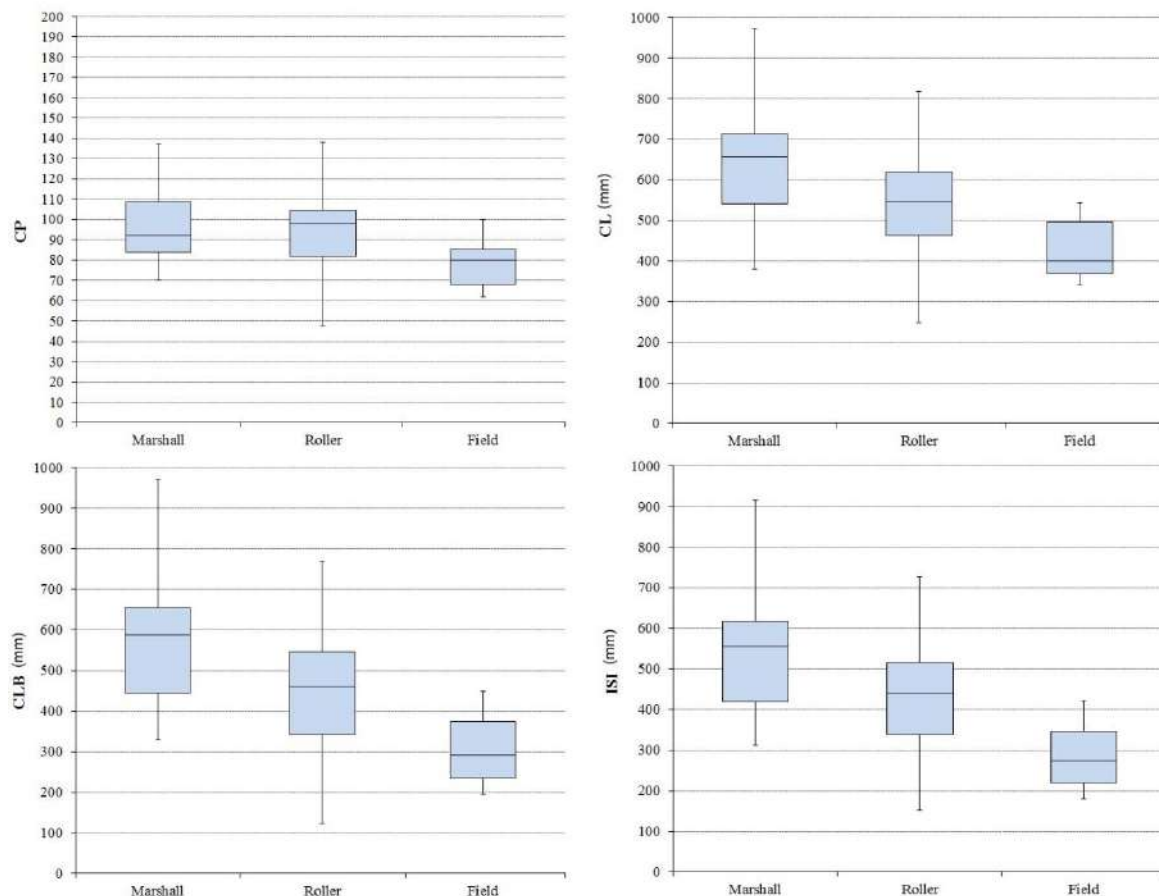
Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος Marshall δεν αναπαράγει ικανοποιητικά τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης για το μίγμα M2. Αυτή η διαπίστωση συμφωνεί με την έρευνα των Yue and Morin (1996), από την οποία προέκυψε ότι συμπίκνωση όμοια με αυτή που επιτυγχάνεται στο πεδίο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο με τη μέθοδο Marshall, καθώς δεν υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ως προς τον προσανατολισμό των αδρανών. Ωστόσο, υπάρχουν και μελέτες που προτείνουν περαιτέρω διερεύνηση της συγκεκριμένης εργαστηριακής μεθόδου συμπίκνωσης, όπως των Coenen et al. (2012) και των Sefidmazgi and Bahia (2014). Σύμφωνα με τους

Coenen et al. (2012) η μέθοδος Marshall παρουσίασε χαμηλό δείκτη A (ίσο με 2.78) που προσέγγισε το εύρος A των πυρήνων της περιοχής F20 του πεδίου ($A=3.74$). Οι Sefidmazgi and Bahia (2014) διαπίστωσαν ότι η μέθοδος Marshall προσεγγίζει ως προς τον δείκτη AAA_c τους πυρήνες της περιοχής F20 του πεδίου.

5.2.1.3 Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

5.2.1.3.1 Σημεία επαφής

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τα σημεία επαφής.



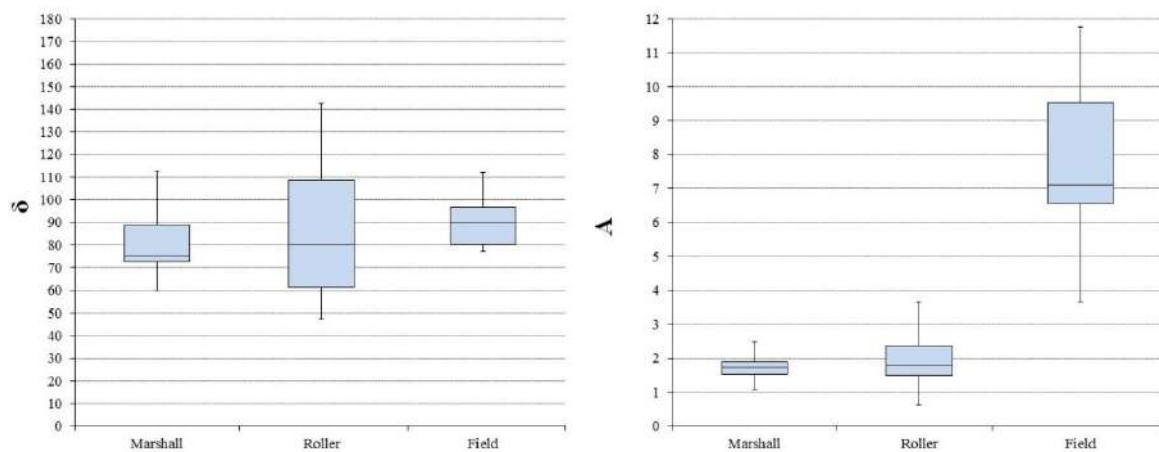
Σχήμα 5.58 Θηκογράμματα δεικτών σημείων επαφής μίγματος M4

Για τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής φαίνεται από το σχήμα (5.58) ότι η μέθοδος Roller προσεγγίζει καλύτερα την επιτόπου συμπίκνωση συγκριτικά με τη

μέθοδο Marshall, για την οποία παρατηρείται μεγάλη διακύμανση τιμών. Διακύμανση παρατηρείται επίσης και όσον αφορά τα δοκίμια της μεθόδου Roller, ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη συνολικά η δυσκολία κατά την ανάλυση λόγω της ιδιαιτερότητας του μίγματος ως προς τη σύσταση του (αδρανή σκωρίας).

5.2.1.3.2 Προσανατολισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 και αφορούν τα αποτελέσματα των δεικτών που σχετίζονται με τον προσανατολισμό.



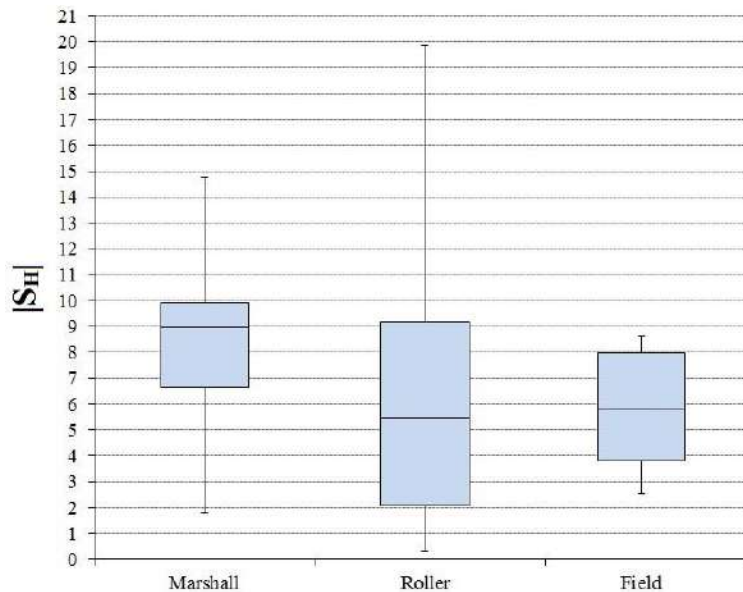
Σχήμα 5.59 Θηκογράμματα δεικτών προσανατολισμού μίγματος M4

Ως προς τον προσανατολισμό η διάμεσος της μεθόδου Roller, η οποία προσδιορίστηκε στις 81° , προσεγγίζει τη γωνία προσανατολισμού, ίση με 90° , των αδρανών των πυρήνων του οδοστρώματος. Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί το μεγάλο εύρος του πρώτου και τρίτου τεταρτημόριου του θηκογράμματος της μεθόδου Roller. Αυτό υποδηλώνει ποικιλομορφία ως προς την επικρατούσα γωνία προσανατολισμού για τα δοκίμια της μεθόδου Roller του μίγματος M4. Η μέθοδος Marshall ακολουθεί αμέσως μετά με διάμεσο για την γωνία προσανατολισμού που βρίσκεται στις 76° .

Όσον αφορά τον δείκτη εύρους A οι διάμεσοι των μεθόδων Marshall και Roller σχεδόν ταυτίζονται κοντά στην τιμή 2. Ωστόσο, η διάμεσος του A για τους πυρήνες οδοστρώματος βρίσκεται στην τιμή 7, πράγμα που φανερώνει μεγάλη απόκλιση. Επιπλέον, η τιμή της διαμέσου για τον δείκτη A της μεθόδου Roller υποδηλώνει λιγότερο έντονη τάση προσανατολισμού των αδρανών κατά την επικρατούσα γωνία, η οποία ούτως ή άλλως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παρουσιάζει έντονη διακύμανση.

5.2.1.3.3 Διαχωρισμός

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα θηκογράμματα των μεθόδων Marshall και Roller, καθώς και των πυρήνων οδοστρώματος (Field), για το ασφαλτόμιγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 και αφορούν τα αποτελέσματα του δείκτη διαχωρισμού.



Σχήμα 5.60 Θηκογράμματα δείκτη διαχωρισμού μίγματος M4

Ο δείκτης $|S_H|$ της μεθόδου Roller (διάμεσος ίση με 6) σχεδόν ταυτίζεται ως προς την διάμεσο των αποτελεσμάτων της επιτόπου συμπύκνωση (διάμεσος ίση με 5). Ωστόσο, η διακύμανση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Roller είναι αρκετά μεγάλη με την μέγιστη τιμή του δείκτη να εντοπίζεται στο 25.

Για το ασφαλτόμιγμα M4, με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, η μέθοδος Roller φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα τις συνθήκες συμπύκνωσης που εντοπίζονται στο πεδίο. Ωστόσο, έχει σημασία να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα δεν ταυτίζονται απόλυτα.

Η ιδιαιτερότητα της σύστασης του ασφαλτομίγματος M4 απαιτεί προσεκτική μελέτη των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και αποφυγή βιαστικών συμπερασμάτων. Παρατηρείται αρκετά καλή προσέγγιση της επιτόπου συμπύκνωσης από τη μέθοδο Roller για τους δείκτες προσανατολισμού και διαχωρισμού.

Σχετικά με τον προσανατολισμό τα αδρανή τείνουν να προσανατολίζονται κατά σχεδόν ομόκεντρη διεύθυνση ($\delta=81^\circ$) με χαμηλό δείκτη A, δηλαδή λιγότερο έντονη τάση. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με προγενέστερες έρευνες, όπως των Hassan et

al. (2012) που συμπέρανε ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών για την μέθοδο Roller κατά την οριζόντια διεύθυνση στην περιφέρεια των δοκιμίων. Ωστόσο, στην ίδια έρευνα αναφέρεται ότι ο ομόκεντρος αυτός προσανατολισμός των αδρανών πιθανά να οφείλεται στην διαδικασία της κοπής των δοκιμίων και είναι πιθανό το συμπέρασμα αυτό να είναι λανθασμένο κατά ένα βαθμό. Η μελέτη των Coenen et al. (2012) παρουσίασε ως επικρατούσα γωνία των αδρανών των ασφαλομιγμάτων που συμπυκνώθηκαν με κύλινδρο τις 138° .

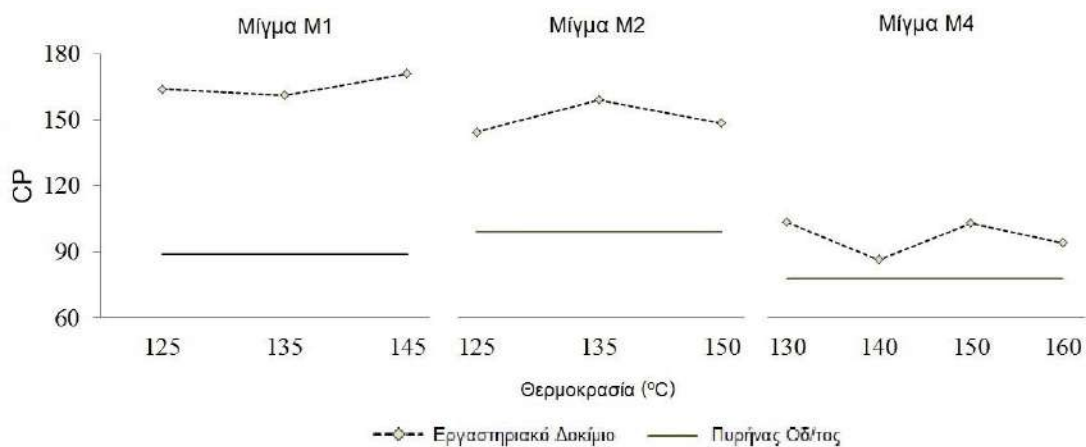
Ως προς τον διαχωρισμό, η διάμεσος του δείκτη $|S_H|$ πλησιάζει αρκετά την τιμή 5, η οποία υποδηλώνει ομοιογένεια ως προς τη χωρική κατανομή των αδρανών. Αυτό συμφωνεί με παλιότερες έρευνες, όπως των Hunter et al. (2004) και των Bessa et al. (2012), που απέδειξαν ότι μίγματα συμπυκνωμένα με τη μέθοδο Roller παρουσιάζουν σε μικρό βαθμό το φαινόμενο διαχωρισμού των αδρανών.

5.2.2 Μέθοδος συμπίκνωσης Marshall και πυρήνες οδοστρώματος

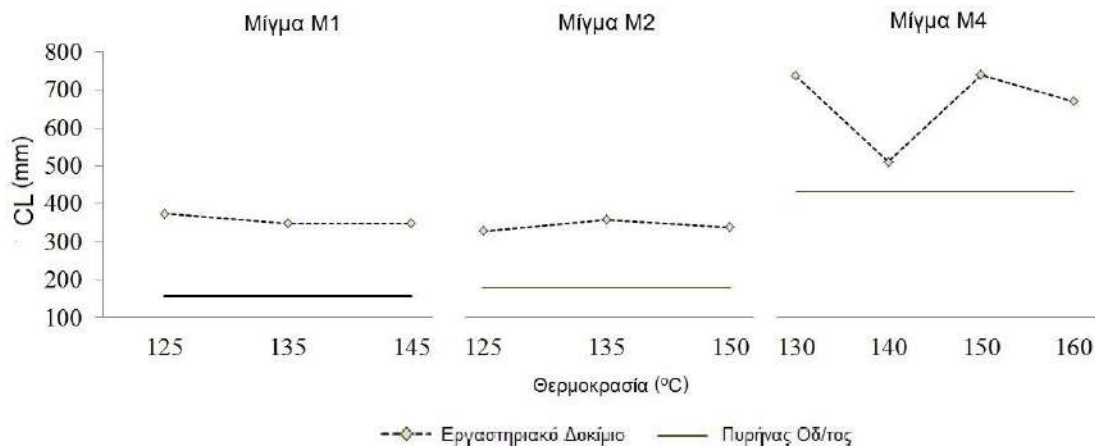
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή των μέσων όρων των διαφόρων δεικτών για τα δοκίμια όλων των μιγμάτων (κλειστού και ημι-ανοικτού τύπου) που έχουν συμπτυκνωθεί με τη μέθοδο Marshall με μεταβλητή παράμετρο μόνο τη θερμοκρασία. Σε κάθε σχήμα απεικονίζεται και ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για τους πυρήνες οδοστρώματος.

5.2.2.1 Σημεία επαφής

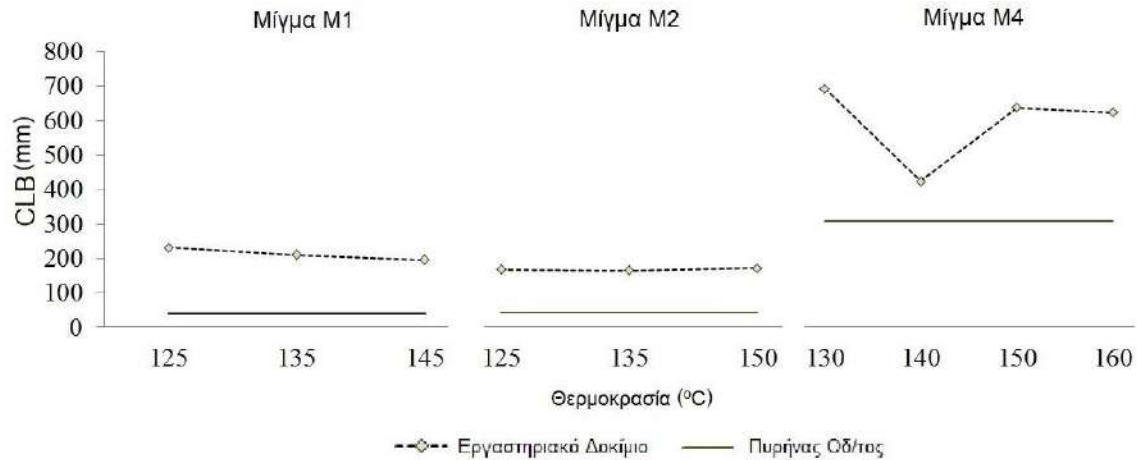
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των δεικτών που αφορούν τα σημεία επαφής ως προς την μεταβολή της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπτυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος.



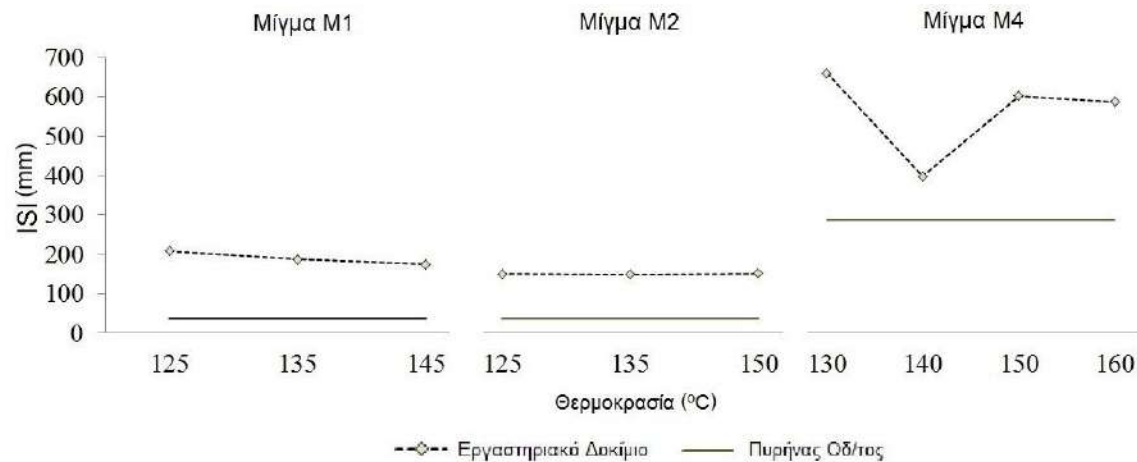
Σχήμα 5.61 Επιρροή θερμοκρασίας στον αριθμό των σημείων επαφής (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.62 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών (Marshall & Πυρήνες Οδ/τος)



Σχήμα 5.63 Επιρροή θερμοκρασίας στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.64 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη ISI (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)

Για το μίγμα κλειστού τύπου M1 παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία συμπίκνωσης που προσεγγίζει περισσότερο τις τιμές των δεικτών των πυρήνων οδοστρώματος εντοπίζεται στους 135 ή 145 °C.

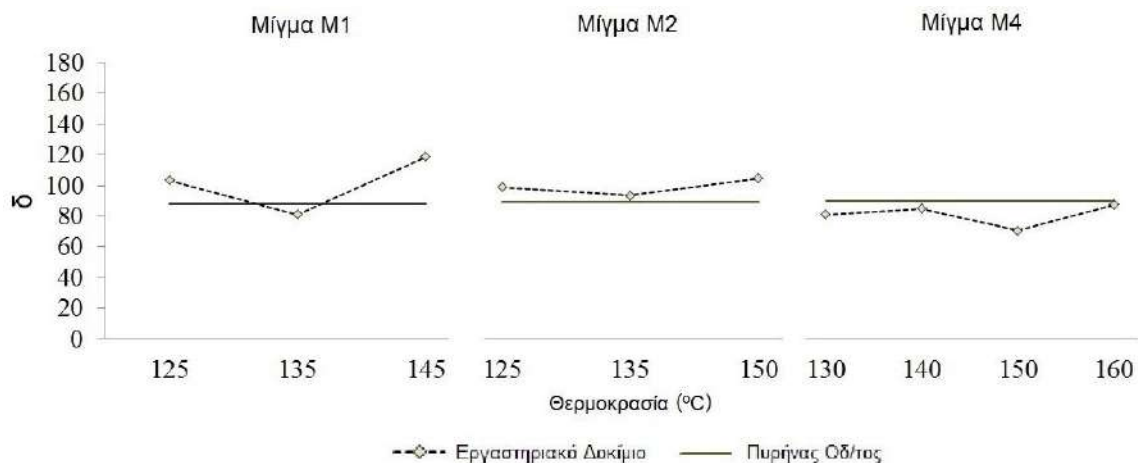
Για το μίγμα κλειστού τύπου M2 οι δείκτες CLB και ISI δεν προσφέρουν τη δυνατότητα εξαγωγής ασφαλούς συμπεράσματος, οπότε με βάση το CP και CL καταλήγουμε στις θερμοκρασίες 125 ή 150 °C, με την τελική επιλογή της πιο κατάλληλης να κρίνεται από τους δείκτες του προσανατολισμού και του διαχωρισμού.

Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 η θερμοκρασία που πλησιάζει τα αποτελέσματα της επιτόπου συμπύκνωσης είναι ξεκάθαρα οι 140 °C.

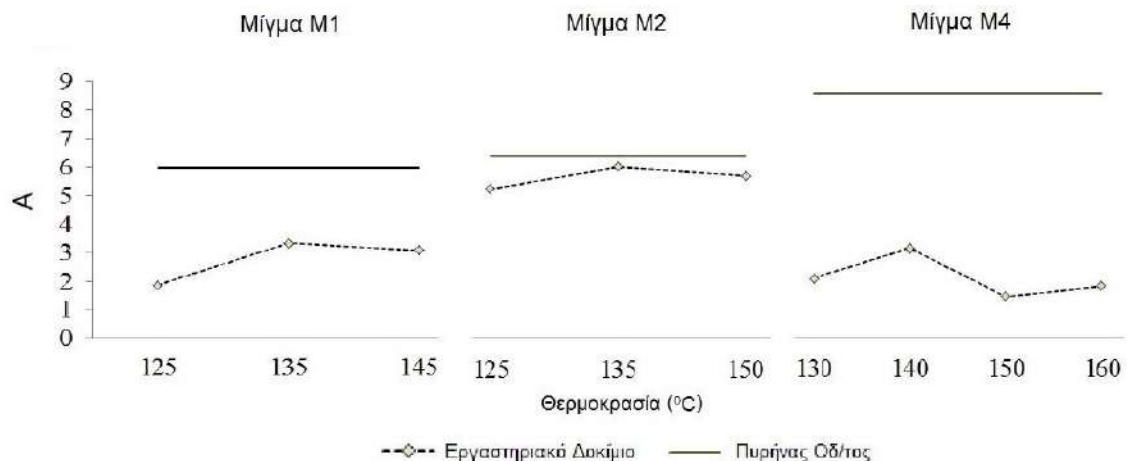
Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί ως τώρα δεν δίνουν κάποια λεπτομερή πληροφορία ως προς τα σημεία επαφής ασφαλτομιγμάτων συμπυκνωμένων με τη μέθοδο Marshall.

5.2.2.2 Προσανατολισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών που αφορούν τον προσανατολισμό ως προς την μεταβολή της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος.



Σχήμα 5.65 Επιρροή θερμοκρασίας στη γωνία προσανατολισμού (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.66 Επιρροή θερμοκρασίας στο εύρος (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)

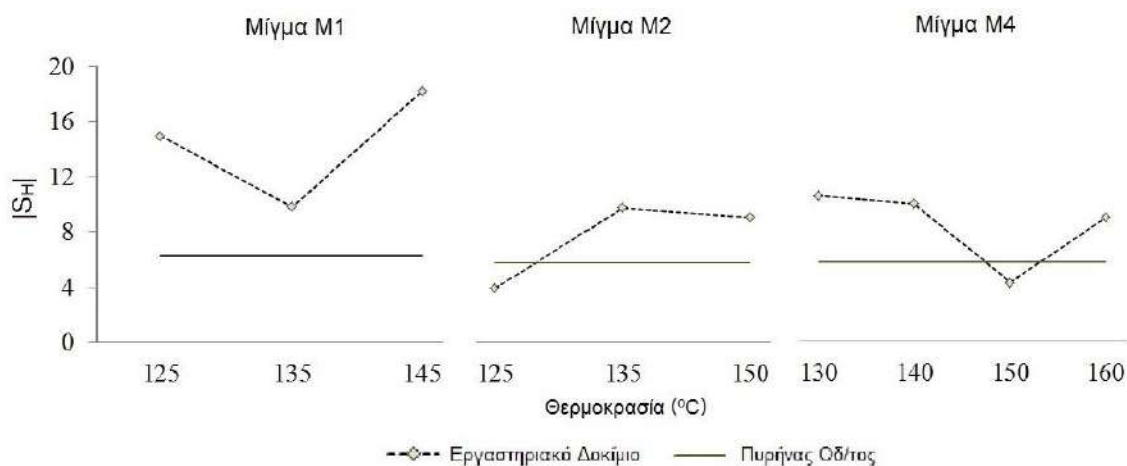
Για το μίγμα κλειστού τύπου M1 η γωνία προσανατολισμού προσεγγίζει τις επιτόπου συνθήκες στους 135 °C, θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται και η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη A, δηλαδή εμφανίζεται εντονότερη τάση.

Αντίστοιχα για το μίγμα κλειστού τύπου M2 η θερμοκρασία που δίνει τα πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα εντοπίζεται στους 135 °C. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τις θερμοκρασίες συμπίκνωσης που κρίθηκαν κατάλληλες για τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής (125 ή 150 °C), αλλά επειδή οι δείκτες CLB και ISI δεν εμφανίζουν μεγάλες μεταβολές για τις διάφορες θερμοκρασίες, μπορούμε να επιλέξουμε τελικά ως πιο κατάλληλη θερμοκρασία τους 135 °C.

Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 τα αποτελέσματα και εδώ συγκλίνουν στην επιλογή των 140 °C ως πιο κατάλληλης θερμοκρασίας συμπίκνωσης.

5.2.2.3 Διαχωρισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών που αφορούν τον διαχωρισμό ως προς την μεταβολή της παραμέτρου της θερμοκρασίας συμπίκνωσης. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Marshall, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος

**Σχήμα 5.67 Επιρροή θερμοκρασίας στον δείκτη διαχωρισμού $|S_H|$ (Marshall & Πυρήνες οδ/τος)**

Σύμφωνα με το σχήμα (5.67) η πιο κατάλληλη θερμοκρασία συμπίκνωσης για το μίγμα κλειστού τύπου M1, σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα των προηγούμενων ενοτήτων, εντοπίζεται τελικώς στους 135 °C.

Για το μίγμα κλειστού τύπου M2 τα αποτελέσματα της εργαστηριακής συμπίκνωσης πλησιάζουν αυτά των πυρήνων οδοστρώματος σε θερμοκρασία 125 °C, αν και στις θερμοκρασίες των 135 και 150 °C δεν προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση. Συνεπώς τελική επιλογή καθίσταται η θερμοκρασία συμπίκνωσης στους 135 °C.

Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 η πιο αντιπροσωπευτική θερμοκρασία εντοπίζεται στους 150 °C ως προς τον δείκτη διαχωρισμού. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψιν και τους υπόλοιπους δείκτες επιλέγεται τελικά ως πιο κατάλληλη θερμοκρασία συμπίκνωσης οι 140 °C.

Με εξαίρεση το μίγμα M4 τα αποτελέσματα των υπόλοιπων μιγμάτων συμφωνούν με αυτά προηγούμενων ερευνών που καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η συμπίκνωση με τη μέθοδο Marshall δημιουργεί ανομοιογενή μίγματα.

5.2.3 Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor) και πυρήνες οδοστρώματος

Αντίστοιχα σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται σε σχήματα η μεταβολή των μέσων όρων των διαφόρων δεικτών εσωτερικής δομής των δοκιμών των μιγμάτων κλειστού και ημι-ανοικτού τύπου, M1 και M4 αντίστοιχα, που έχουν συμπτυκνωθεί με τη μέθοδο Roller. Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τη σύγκριση μεταξύ της μεθόδου Roller και των πυρήνων οδοστρώματος για κάθε δείκτη εσωτερικής δομής.

Τα γραφήματα φανερώνουν την συνδυαστική επίδραση που έχουν τα περάσματα του κυλινδρικού τομέα και η θερμοκρασία συμπίκνωσης στις μέσες τιμές των δεικτών εσωτερικής δομής της μεθόδου Roller. Η οριζόντια γραμμή σε κάθε σχήμα δείχνει την μέση τιμή του αντίστοιχου δείκτη εσωτερικής δομής για τους πυρήνες οδοστρώματος.

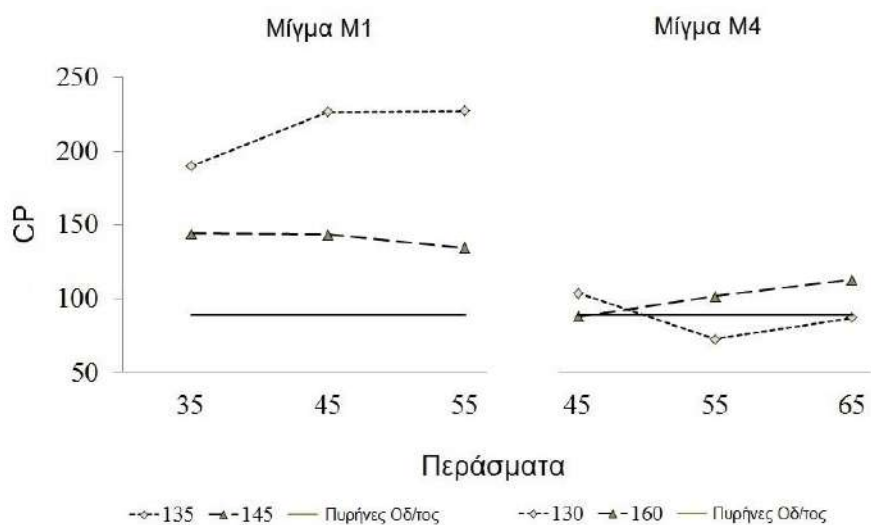
Στον οριζόντιο άξονα των γραφημάτων που ακολουθούν παρουσιάζονται τα περάσματα του κυλινδρικού τομέα και στον κατακόρυφο άξονα οι διάφοροι δείκτες εσωτερικής δομής.

Η επιλογή παρουσίασης της επίδρασης μόνο των δύο μεταβλητών παραμέτρων συμπίκνωσης (περάσματα, θερμοκρασία) και η αφομοίωση της επιρροής της μεθόδου

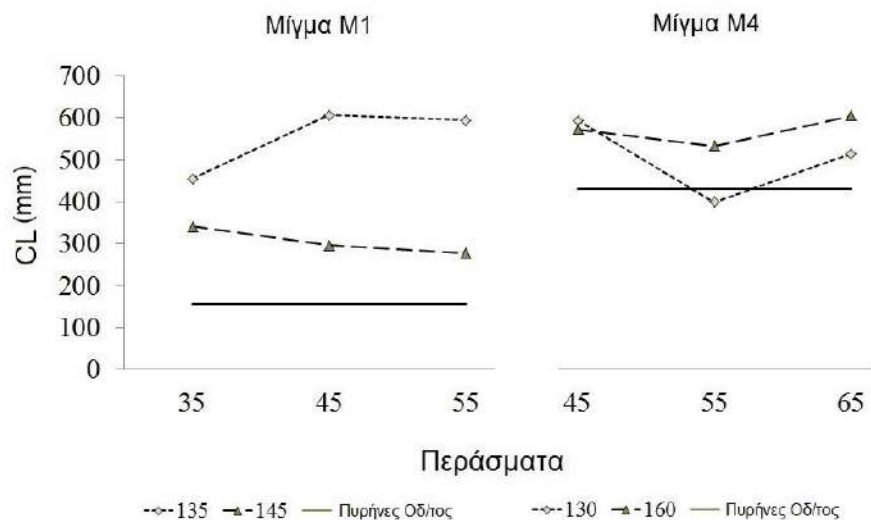
στους δείκτες έγινε με βάση το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας κάθε παραμέτρου στους διάφορους δείκτες που προέκυψε από την διαδικασία της στατιστικής ανάλυσης.

5.2.3.1 Σημεία επαφής

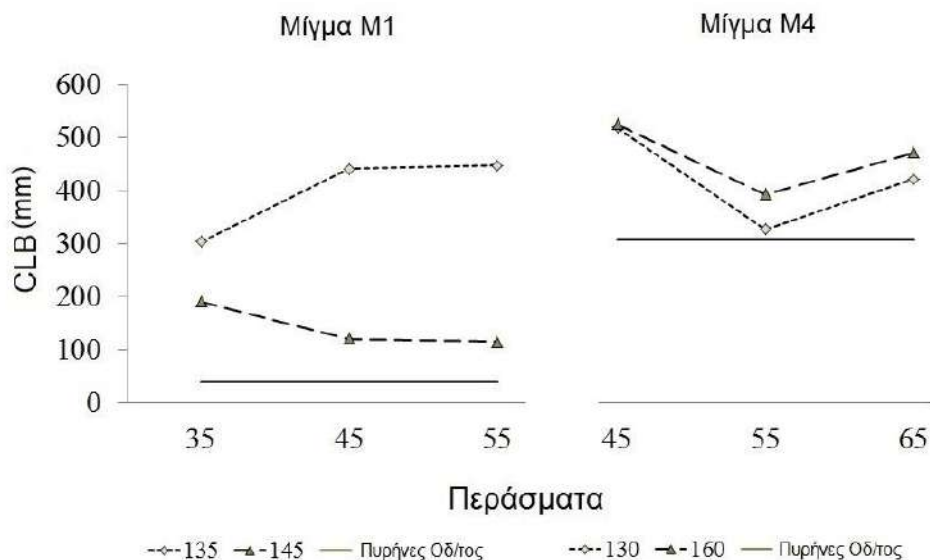
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών που αφορούν τα σημεία επαφής ως προς την μεταβολή των παραμέτρων της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπτυκνώθηκαν με τη μέθοδο Roller, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος.



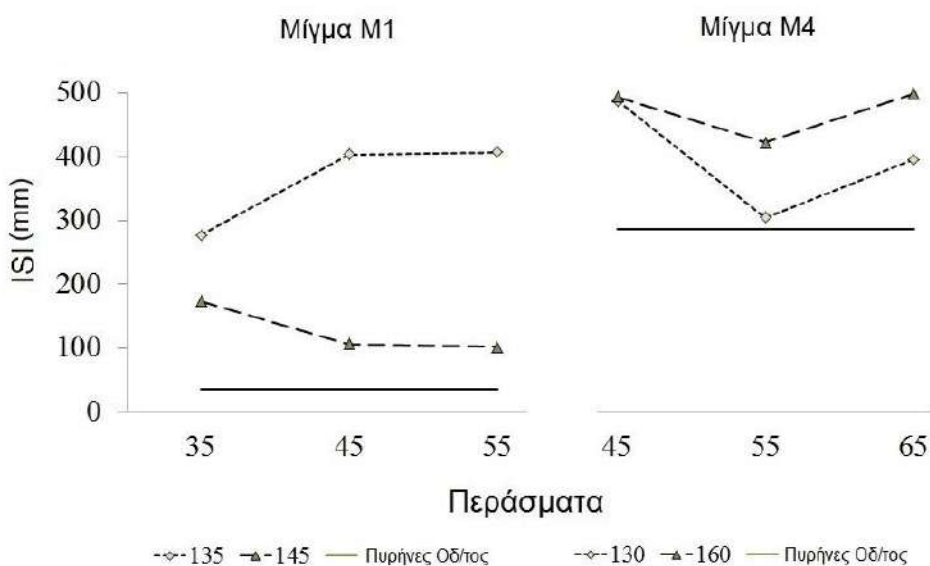
Σχήμα 5.68 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον αριθμό των σημείων επαφής (Roller & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.69 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο μήκος επαφής αδρανών (Roller & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.70 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο μήκος επαφής αδρανών σε διακλάδωση (Roller & Πυρήνες οδ/τος)



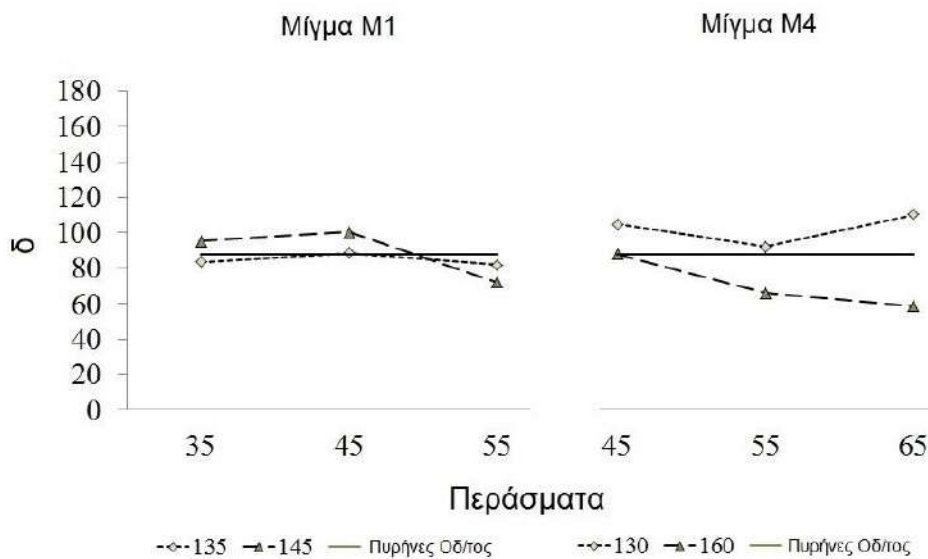
Σχήμα 5.71 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον δείκτη ISI (Roller & Πυρήνες οδ/τος)

Για το μίγμα κλειστού τύπου M1 ως πιο αντιπροσωπευτικός συνδυασμός παραμέτρων κρίνεται η θερμοκρασία στους 145 °C και ο αριθμός των περασμάτων στα 55.

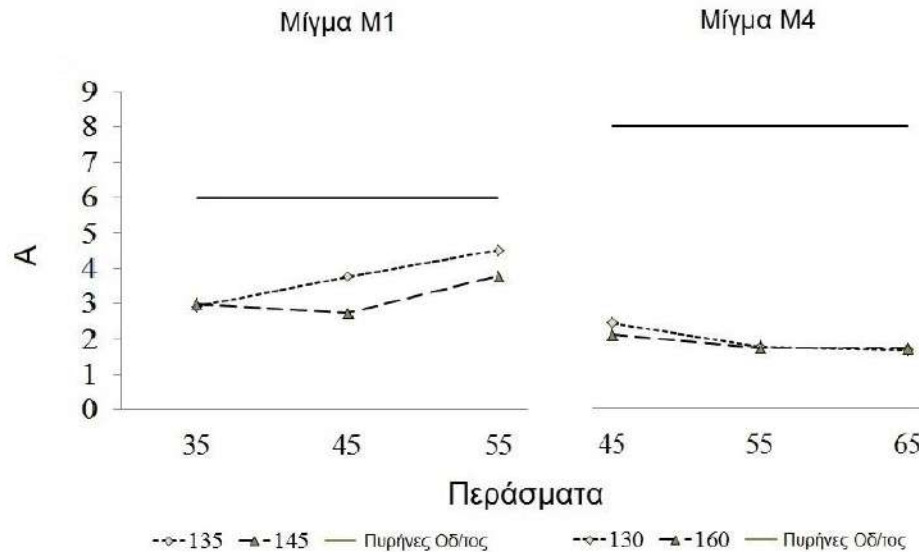
Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 ο πλέον κατάλληλος συνδυασμός εντοπίζεται για θερμοκρασία στους 130 °C και 55 περάσματα του κυλινδρικού τομέα.

5.2.3.2 Προσανατολισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών που αφορούν τον προσανατολισμό ως προς την μεταβολή των παραμέτρων της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπτυκνώθηκαν με τη μέθοδο Roller, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος.



Σχήμα 5.72 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στη γωνία προσανατολισμού (Roller & Πυρήνες οδ/τος)



Σχήμα 5.73 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στο εύρος (Roller & Πυρήνες οδ/τος)

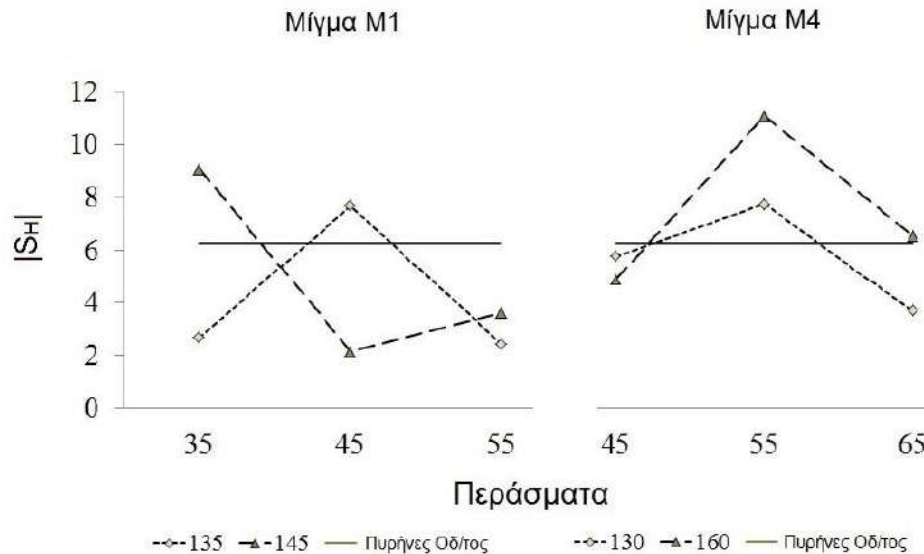
Για το μίγμα κλειστού τύπου M1 οι συνδυασμοί θερμοκρασία στους 145 °C και 55 περάσματα ή θερμοκρασία στους 135 °C και 45 περάσματα δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα, λαμβάνοντας υπόψιν και τους δύο δείκτες του προσανατολισμού.

Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 ως προς τον προσανατολισμό οι συνδυασμοί θερμοκρασίας στους 130 °C και περασμάτων στα 55 ή θερμοκρασίας στους 160 °C και περασμάτων στα 45 δίνει το πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα.

Και για τη μέθοδο Roller για τα δύο μίγματα παρατηρούμε την επικρατούσα γωνία στις παραπάνω επιλεγμένες θερμοκρασίες συμπίκνωσης να προσεγγίζει την τιμή των 90°. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με παλιότερες έρευνες, όπως είναι του Coenen et al. (2012), Hunter et al. (2004) και Hassan et al. (2012), οι οποίες υποστηρίζουν ότι τα αδρανή της μεθόδου Roller παρουσιάζουν πιο τυχαία τοποθέτηση.

5.2.3.3 Διαχωρισμός

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων όρων των δεικτών που αφορούν τον προσανατολισμό ως προς την μεταβολή των παραμέτρων της θερμοκρασίας συμπίκνωσης και των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα. Τα γραφήματα περιγράφουν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια των ασφαλτομιγμάτων που συμπυκνώθηκαν με τη μέθοδο Roller, αλλά και αυτά των πυρήνων οδοστρώματος.



Σχήμα 5.74 Επιρροή θερμοκρασίας και περασμάτων στον δείκτη $|S_H|$ (Roller & Πυρήνες οδ/τος)

Με κριτήριο τον δείκτη $|S_H|$, καθώς και τα ευρήματα των προηγούμενων ενοτήτων, για το μίγμα κλειστού τύπου M1 δύο είναι τελικά οι πιο αντιπροσωπευτικοί συνδυασμοί παραμέτρων συμπύκνωσης. Ο πρώτος εντοπίζεται σε θερμοκρασία 145 °C και 55 περάσματα, ενώ ο δεύτερος σε θερμοκρασία 135 °C και 45 περάσματα.

Ως προς τον δείκτη $|S_H|$ για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 ο πιο αντιπροσωπευτικός συνδυασμός εντοπίζεται σε θερμοκρασία 130 °C και 45 περάσματα. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαπιστώσεις των προηγούμενων ενοτήτων που αφορούν τους υπόλοιπους δείκτες ο τελικός συνδυασμός ο οποίος προσεγγίζει αρκετά καλά τις επιτόπου συνθήκες συμπύκνωσης εντοπίζεται σε θερμοκρασία 130 °C και 55 περασμάτων, καθώς και εναλλακτικά σε θερμοκρασία 160 °C και 45 περασμάτων.

6 ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η επίδραση μεταβλητών παραμέτρων συμπίκνωσης στην εσωτερική δομή εργαστηριακών δοκιμίων Marshall και τύπου Roller compactor. Επίσης πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των εργαστηριακών μεθόδων και της επιτόπου συμπίκνωσης.

Χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη μεθοδολογία ανάλυσης δισδιάστατων ψηφιακών εικόνων ασφαλομίγματος 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.

6.1 Επίδραση μεταβλητών παραμέτρων των εργαστηριακών μεθόδων συμπίκνωσης στην εσωτερική δομή των ασφαλομιγμάτων

6.1.1 Μέθοδος συμπίκνωσης Marshall

❖ Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

Σε γενικές γραμμές η μέγιστη τιμή για όλους τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής παρουσιάστηκε στους 125 °C. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση των δεικτών που αφορούν αδρανή που βρίσκονται σε διακλάδωση (CLB και ISI).

Ως προς τον προσανατολισμό τα αδρανή έχουν την τάση να προσανατολίζονται ομόκεντρα για τις θερμοκρασίες συμπίκνωσης 125 και 135 °C, ενώ για περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας η γωνία προσανατολισμού δ αποκλίνει σημαντικά από τις 90°. Επίσης, στους 135 °C παρατηρείται η εντονότερη τάση προσανατολισμού των αδρανών κατά την αντίστοιχη επικρατούσα γωνία δ.

Η αύξηση της θερμοκρασίας δεν προκάλεσε μονοσήμαντη μεταβολή όσον αφορά τον δείκτη διαχωρισμού $|S_H|$, ο οποίος εμφανίζει μεγάλη διακύμανση με βάση τις τιμές των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν ενδείξεις διαχωρισμού, καθώς η τιμή του δείκτη $|S_H|$ προέκυψε μεγαλύτερη του 5% για κάθε τιμή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης.

❖ Μίγμα M2 (κλειστού τύπου)

Όλοι οι δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής παρουσίασαν μέγιστη τιμή στους 135 °C. Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης δεν επηρέασε τους δείκτες CLB και ISI.

Παρά τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης με βάση τις τιμές του δ παρατηρείται γενικά ομόκεντρος προσανατολισμός των αδρανών χωρίς σημαντικές μεταβολές. Εξαίρεση αποτελεί η υψηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 150 °C για την οποία υπολογίστηκε $\delta=105^\circ$.

Στους 125 °C παρατηρήθηκε ομοιογενής χωρική κατανομή των αδρανών. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης προκάλεσε σημαντική αύξηση του δείκτη διαχωρισμού με τιμές οι οποίες υπερβαίνουν το 5%. Να σημειωθεί επίσης ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων όσον αφορά τον δείκτη $|S_H|$ παρουσίασαν μεγάλη διακύμανση.

❖ Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

Η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης δεν προκαλεί σαφή τάση μεταβολής για κανέναν από τους δείκτες εσωτερικής δομής.

Μέγιστες τιμές των δεικτών που αφορούν τα σημεία επαφής παρατηρήθηκαν στους 130 και 150 °C.

Τα αδρανή προσανατολίζονται σε ομόκεντρη διεύθυνση για όλες τις τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης πλην των 150 °C για την οποία η γωνία προσανατολισμού αποκλίνει από τις 90°. Μέγιστη τιμή του εύρους A εντοπίζεται στους 140 °C.

Γενικά ισχύει $|S_H|>5\%$ για όλες τις θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 150 °C όπου παρατηρείται ομοιογενής χωρική κατανομή των αδρανών. Αντίστοιχα με τα μίγματα M1 και M2 σημειώνεται ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων της ανάλυσης όσον αφορά τον δείκτη διαχωρισμού παρουσίασαν μεγάλη διακύμανση.

Συνοψίζοντας η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης επιφέρει μεταβολές στα σημεία επαφής και γενικά οι χαμηλότερες θερμοκρασίες δημιουργούν δοκίμια με περισσότερα σημεία επαφής. Επίσης τα δοκίμια έχουν την τάση να προσανατολίζονται περίπου ομόκεντρα με γωνία που κυμαίνεται μεταξύ 80° και 100°. Σημειώνεται ότι το

εύρημα αυτό έρχεται σε αντίθεση με αποτελέσματα προγενέστερων ερευνών σύμφωνα με τα οποία παρατηρήθηκε τυχαίος προσανατολισμός των αδρανών σε δοκίμια της μεθόδου Marshall (Yue and Morin, 1996) και ο μέσος όρος των γωνιών προσανατολισμού μιγμάτων συμπυκνωμένων με την μέθοδο Marshall υπολογίστηκε ίσος με 122° (Coenen et al., 2012). Επίσης τα αδρανή παρουσιάζουν χωρική ανομοιογένεια για όλες τις θερμοκρασίες συμπίκνωσης και μεγάλη διακύμανση το οποίο επιβεβαιώνεται από τη στατιστική ανάλυση. Ειδικότερα με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης προέκυψε ότι η θερμοκρασία δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος.

6.1.2 Μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο (τύπου Roller compactor)

❖ Μίγμα M1 (κλειστού τύπου)

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά όλους τους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής. Αντίθετα, η αύξηση των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα από 35 σε 45 έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εν λόγω δεικτών, ενώ περαιτέρω αύξηση των περασμάτων δεν επιφέρει ουσιαστική μεταβολή. Όσον αφορά τη μέθοδο συμπίκνωσης η εφαρμογή στατικής μεθόδου (S) δημιουργεί δοκίμια με τα περισσότερα σημεία επαφής, ενώ η εφαρμογή συνδυασμού δονητικής-στατικής μεθόδου (VS) παράγει δοκίμια με τα πιο λίγα σημεία επαφής.

Όσον αφορά τον προσανατολισμό των αδρανών η αύξηση της θερμοκρασίας συμπίκνωσης προκαλεί μικρή αύξηση της γωνίας προσανατολισμού δ , η τιμή της οποίας προσεγγίζει γενικά τις 90° , τιμή που υποδηλώνει ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών. Σε ομόκεντρη διεύθυνση προσανατολίζονται τα αδρανή για 35 και 45 περάσματα του κυλινδρικού τομέα, ενώ περαιτέρω αύξηση των περασμάτων προκαλεί απόκλιση της γωνίας δ από τις 90° . Όσον αφορά τη μέθοδο συμπίκνωσης γωνία προσανατολισμού της τάξης των 90° παρατηρείται για την στατική (S) και τη δονητική (V).

Όσον αφορά τον διαχωρισμό η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπίκνωσης δεν επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη $|S_H|$, η τιμή του οποίου διατηρείται γενικά κάτω από 5%. Αύξηση των περασμάτων προκαλεί μείωση του υπόψη δείκτη, το οποίο ενδεχομένως οφείλεται στο ότι η αύξηση του αριθμού των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα επιτυγχάνει καλύτερη ζύμωση του ασφαλτομίγματος. Επιπλέον, στα 45 και 55 περάσματα παρατηρείται ομοιογενής χωρική κατανομή

των αδρανών. Για μεταβολή της μεθόδου δεν παρουσιάζεται σαφής τάση μεταβολής του $|S_H|$. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης $|S_H|$ λαμβάνει γενικά τιμές μικρότερες του 5%, το οποίο υποδηλώνει ομοιογένεια ως προς τη χωρική κατανομή των αδρανών. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί η δονητική μέθοδος V για την οποία ο δείκτης λαμβάνει τιμή που υπερβαίνει το 5%.

❖ Μίγμα M4 (ημι-ανοικτού τύπου)

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση των επαφών μεταξύ των αδρανών, ενώ η αύξηση των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα δεν προκαλεί μονοσήμαντη μεταβολή των εν λόγω δεικτών. Μέγιστη τιμή για κάθε δείκτη που αφορά τα σημεία επαφής παρατηρήθηκε για τη δονητική-στατική μέθοδο (VS) και ελάχιστη τιμή για τη στατική (S), συμπεριφορά ακριβώς αντίστροφη από αυτή του μίγματος M1.

Η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης προκάλεσε σημαντική μείωση της γωνίας προσανατολισμού δ . Στους 130 °C η γωνία δ λαμβάνει τιμή που προσεγγίζει τις 90° και υποδηλώνει ομόκεντρο προσανατολισμό αδρανών. Η αύξηση των περασμάτων του κυλινδρικού τομέα δεν προκαλεί σαφή τάση μεταβολής του δείκτη δ , ωστόσο οι τιμές της γωνίας δ υποδηλώνουν ομόκεντρη διεύθυνση των αδρανών. Επιπλέον, ισχύει γενικά ότι $\delta \approx 90^\circ$ για όλες τις μεθόδους με εξαίρεση την δονητική (V).

Τέλος, παρατηρείται αύξηση του δείκτη $|S_H|$ για αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Στα 45 και στα 65 περάσματα παρατηρείται ομοιογενής χωρική κατανομή των αδρανών. Αντίστοιχα ως προς τη μέθοδο ισχύει $|S_H| < 5\%$ για τη στατική (S) και τη δονητική (V).

Με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης η επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στους δείκτες που αφορούν τα σημεία επαφής αναφορικά με το μίγμα M1 προέκυψε στατιστικά σημαντική. Επίσης, στατιστικά σημαντική προέκυψε και η επιρροή των περασμάτων, καθώς και του συνδυασμού θερμοκρασίας συμπύκνωσης και μεθόδου, όσον αφορά τον προσανατολισμό των αδρανών με βάση τον δείκτη εύρους A για το ίδιο μίγμα. Όσον αφορά το μίγμα M4 στατιστικά σημαντική προέκυψε μόνο η επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τον δείκτη δ της γωνίας προσανατολισμού.

6.2 Συγκριτική αξιολόγηση εργαστηριακών μεθόδων με την επιτόπου συμπίκνωση

Η συγκριτική αξιολόγηση των εργαστηριακών μεθόδων ως προς τον προσανατολισμό έδειξε ότι η μέθοδος Roller προσεγγίζει την επιτόπου συμπίκνωση με βάση τον δείκτη της επικρατούσας γωνίας δ , η οποία υποδηλώνει κατά βάση ομόκεντρο προσανατολισμό των αδρανών. Αντίθετα, προγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι ασφαλομίγματα συμπτυκνωμένα με κύλινδρο παρουσίασαν κατά βάση τυχαίο προσανατολισμό αδρανών (Iwama et al., 2007, Coenen et al., 2012, και Airey and Collop, 2014).

Σχετικά με τον διαχωρισμό παρά τη μεγάλη διακύμανση των τιμών των αποτελεσμάτων της ανάλυσης το εύρος των τιμών της μεθόδου Roller προσεγγίζει τις τιμές των πυρήνων οδοστρώματος για τα μίγματα M1 και M4. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των δοκιμών της μεθόδου Roller για τον δείκτη $|S_H|$ υποδηλώνουν ομοιογενή χωρική κατανομή των αδρανών. Αντίστοιχα, προγενέστερες μελέτες παρατήρησαν ομοιόμορφη χωρική κατανομή των αδρανών κατά την οριζόντια διεύθυνση των δοκιμών για ασφαλομίγματα συμπτυκνωμένα με κύλινδρο (Bessa et al., 2012, και Airey and Collop, 2014).

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, προκύπτει ότι η μέθοδος συμπίκνωσης με κύλινδρο αναπαράγει καλύτερα τις συνθήκες της επιτόπου συμπίκνωσης.

Επίσης, με βάση τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης ο συνδυασμός παραμέτρων για τον οποίο επιτυγχάνεται προσέγγιση της επιτόπου συμπίκνωσης με βάση τις εργαστηριακές μεθόδους συμπίκνωσης Marshall και Roller περιγράφεται ακόλουθα.

Όσον αφορά τη μέθοδο Marshall για τα μίγματα κλειστού τύπου, M1 και M2, προσέγγιση της επιτόπου συμπίκνωσης επιτυγχάνεται μέσω συμπίκνωσης σε θερμοκρασία 135 °C, ενώ για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 σε θερμοκρασία 140 °C.

Η συμπίκνωση με κύλινδρο (τύπου Roller compactor) προσεγγίζει καλύτερα την επιτόπου συμπίκνωση για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων. Συγκεκριμένα, για το μίγμα κλειστού τύπου M1 κατάλληλοι συνδυασμοί παραμέτρων κρίνονται είτε ο συνδυασμός θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους 145 °C και 55

περασμάτων είτε εναλλακτικά ο συνδυασμός θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους 135 °C και 45 περασμάτων.

Για το μίγμα ημι-ανοικτού τύπου M4 οι συνδυασμοί παραμέτρων που προσεγγίζουν ικανοποιητικά την επιτόπου συμπίκνωση είναι είτε ο συνδυασμός θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους 130 °C και 55 περασμάτων είτε θερμοκρασίας συμπίκνωσης στους 160 C° και 45 περασμάτων

Αξίζει να επισημανθεί ότι με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν έχει πραγματοποιηθεί αντίστοιχη παραμετρική διερεύνηση όσον αφορά τις μεθόδους συμπίκνωσης Marshall και Roller με σκοπό την προσέγγιση των συνθηκών της επιτόπου συμπίκνωσης.

6.3 Σχόλια

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε εκτεταμένα η επιρροή μεταβλητών παραμέτρων συμπίκνωσης των εργαστηριακών μεθόδων Marshall και Roller, οι οποίες δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, στην εσωτερική δομή τριών τύπων ασφαλτομίγματος, καθώς και η συγκριτική αξιολόγηση των εργαστηριακών μεθόδων με την επιτόπου συμπίκνωση.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω της τεχνικής της ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων δοκιμών ασφαλτομίγματος. Στην προσπάθεια βελτίωσης των ήδη γνωστών μεθοδολογιών ανάλυσης, προτάθηκε τροποποίηση της μεθοδολογίας επεξεργασίας της εικόνας ασφαλτομίγματος με σκοπό τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Παράλληλα, διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα της τεχνικής ανάλυσης εικόνας σε μίγμα αδρανών σκωρίας με σκουρόχρωμα αδρανή τα οποία δεν διαφοροποιούνται χρωματικά συγκρινόμενα με την άσφαλο.

Η τεχνική ψηφιακής ανάλυσης δισδιάστατων εικόνων δοκιμών αποδείχτηκε σχετικά απλή, οικονομική και γρήγορη σαν μέθοδος. Δεν απαιτεί ιδιαίτερη τεχνογνωσία από τον χρήστη και πραγματοποιείται με τη βοήθεια σαρωτή και ηλεκτρονικού υπολογιστή, συσκευών ευρέως διαθέσιμων.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν εικόνες που προήλθαν από οριζόντιες τομές των δοκιμών. Με σκοπό την περαιτέρω μελέτη προτείνεται η ανάλυση εικόνων

κατακόρυφων τομών δοκιμίων, ώστε να μελετηθούν το μήκος και ο προσανατολισμός των ζωνών εγγύτητας καθ' ύψος, καθώς και ο διαχωρισμός των αδρανών.

Για την εμβάθυνση στο αντικείμενο 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.

Επίσης χρήσιμες πληροφορίες στο θέμα αυτό μπορούν να εξαχθούν μέσω της τρισδιάστατης ανάλυσης της εσωτερικής δομής των δοκιμίων με χρήση συστήματος Υπολογιστικής Τομογραφίας ακτίνων Χ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Λοΐζος Α., (2012). Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων, Αθήνα.
2. Σιδέρης Λ., (2014). “Διερεύνηση της συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων μέσω της τεχνικής ανάλυσης ψηφιακής εικόνας”.
3. Airey G. D. and Collop A.C., (2014). “Mechanical and structural assessment of laboratory- and field-compacted asphalt mixtures” *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2014.925551.
4. Bessa S. I., Veronica T. F., Branco C. and Soares J. B., (2012). “Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations” *Construction and Building Materials*, 37, 370–378.
5. 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.
6. Hassan N. A., Airey G. D., Khan R. and Collop A. C., (2012). “Nondestructive characterisation of the effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and segregation using X-ray computed tomography” *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5 (2), 84-92.
7. 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.
8. Ibrahim A., Mahmoud E. and Ali T., (2012). “Investigation of relationships between high strength self consolidating concrete compressive strength and macroscopic internal structure” *Construction and Building Materials*, 38, 1161–1169.
9. Iwama M., Airey G. D. and Hunter A. E., (2007). “Influence of asphalt mixture compaction method and specimen size on internal structure and mechanical properties” In: Loizos A, Scarpas T, Al-Qadi I (eds) *Advanced characterisation of*

- pavement and soil engineering materials. Taylor & Francis Group, London, 1063–1073.
10. Partl M. N., Flisch A. and Jönsson M., (2007). "Comparison of laboratory compaction methods using X-ray computer tomography" Road Materials and Pavement Design, 8 (2), 139-164.
 11. Sefidmazgi R. N. and Bahia H., (2014). "Effect of compaction conditions on aggregate packing using 2-dimensional image analysis and the relation to performance of HMA" Materials and Structures, 47, 1313–1324.
 12. 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.
 13. 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.