

# **ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΦΑΛΤΟΥ ΜΕ ΤΡΙΜΜΑ ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΗ- ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ**

**Χ.Β. Βλαχόπουλος**

*Μηχανικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

**Θ.Ε. Ματίκας**

*Αν. Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

**Γ. Σταμουλάκης**

*Πολιτικός Μηχανικός. Προϊστάμενος Τμήματος Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων Περιφέρειας Ηπείρου*

*Λέξεις κλειδιά: Τροποποιημένη ασφάλτος, ανακυκλούμενο ελαστικό*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Εργαστηριακές δοκιμές για τον έλεγχο και τη μελέτη τροποποιημένης ασφάλτου με τρίμμα ελαστικού πραγματοποιήθηκαν με μελέτη συνθέσεως ασφαλτοσκυροδέματος και ελέγχου σε ευστάθεια και παραμόρφωση κατά Marshall και προσδιορισμού φαινόμενου βάρους, κενών και συμπίκνωσης ασφαλτομιγμάτων. Παράλληλα, έλεγχος της ποιότητας των ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υπέρηχων χαμηλών συχνοτήτων. Βρέθηκε ότι από τις μετρήσεις τόσο με ποιοτικό έλεγχο όσο και με έλεγχο των ελαστικών ιδιοτήτων με τη μέθοδο των υπέρηχων στα ασφαλτομίγματα, καθιστά δυνατή τη μελέτη και την έρευνα των ιδιοτήτων της τροποποιημένης ασφάλτου με τρίμμα ανακυκλούμενου ελαστικού.

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το τρίμμα ελαστικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά εφαρμογών μεταξύ των οποίων είναι η τροποποίηση της ασφάλτου, προϊόν μεταποίησης της συμβατικής ασφάλτου με σκοπό την καλύτερη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων. Καλύτερη συμπεριφορά σημαίνει κυρίως αποτελεσματικότερη αντίσταση, στην παραμένουσα παραμόρφωση λόγω υπερφόρτωσης από μεγάλα φορτία και στη ρηγμάτωση λόγω εναλλαγής υψηλών – χαμηλών θερμοκρασιών. Η διάρκεια του χρόνου ζωής που

αυξάνεται, η μεγαλύτερη ασφάλεια οδήγησης που επιτυγχάνεται καθώς επίσης και ο περιβαλλοντικός παράγοντας, λόγω το ανακυκλούμενου ελαστικού που χρησιμοποιείται, συντελούν σε περαιτέρω έρευνα του υλικού, καθώς τα φαινόμενα δείχνουν ότι στο μέλλον θα είναι αναγκαία η χρήση του.

Ιστορικά, η ουσιαστική μελέτη της τροποποίησης της συμβατικής ασφάλτου ξεκινά στα μέσα της δεκαετίας του '60 από το μηχανικό Charles H. Mac Donald στις ΗΠΑ και καθώς το υλικό έδειχνε καλύτερη συμπεριφορά έναντι της κοινής ασφάλτου είχε ως αποτέλεσμα την περαιτέρω έρευνα αλλά και την χρήση της στην οδοποιία.

Στη συγκεκριμένη εργασία, έγιναν έλεγχοι σε εργαστηριακό επίπεδο που είχαν να κάνουν με την παρασκευή ασφαλτομίγματος και την δοκιμή σε ευστάθεια και παραμόρφωση κατά Marshall καθώς επίσης και μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους χαμηλών συχνοτήτων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος.

## 2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

### 2.1 Αδρανή, άσφαλτος και τρίμμα ελαστικού

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση ασφαλτομιγμάτων ήταν σκύρο, ψηφίδα και άμμος, τύπου 2 τραχείας υφής, με ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου 12,5 mm, για αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος. Η άσφαλτος ήταν του τύπου 50/70 pen και το ελαστικό επεξεργασμένο σε μορφή τριμματος με ονομαστικό μέγεθος μέγιστου κόκκου 2 mm.

### 2.2 Παρασκευή ασφαλτομιγμάτων

Στο εργαστήριο δημοσίων έργων της περιφέρειας Ηπείρου, παρασκευάστηκαν με υγρή διαδικασία (wet process) δύο τύποι ασφαλτομιγμάτων Marshall. Με τον όρο υγρή διαδικασία εννοούμε ότι το ελαστικό αναμιγνύεται πρώτα στην άσφαλτο και στη συνέχεια το μίγμα με τα αδρανή, σε αντίθεση με την ξηρή διαδικασία (dry process) που το ελαστικό αναμιγνύεται στα αδρανή πριν προστεθεί άσφαλτος.

Οι δύο τύποι ασφαλτομίγματος έχουν να κάνουν με την ποσότητα ασφάλτου και την ποσότητα του τριμματος ελαστικού που προστέθηκε. Συγκεκριμένα, στον πρώτο τύπο ασφαλτομίγματος (τύπος Ι), η ποσότητα της ασφάλτου παρέμενε σταθερή 4,5 % κ.β. αδρανών, ενώ αντίστοιχα μεταβάλλονταν την ποσότητα του ελαστικού σε ποσοστό 0-25% κ.β. της ασφάλτου παρασκευάζοντας έξι δοκίμια (εικόνα 1) με διαφορετικό κάθε

φορά ποσοστό τρίμματος ελαστικού. Στον δεύτερο τύπο ασφαλτομίγματος (τύπος II) μεταβάλλονταν το ποσοστό ασφάλτου 4-5,5% κ.β. αδρανών, διατηρώντας σταθερό το ποσοστό ελαστικού 15% κ.β. ασφάλτου παρασκευάζοντας έτσι τέσσερα δοκίμια.

Εικόνα 1 : Ασφαλτομίγματα Marshall



Η ανάμιξη του τρίμματος ελαστικού με την άσφαλτο έγινε στους 150 °C και για δύο λεπτά περίπου έως ότου υπάρχει καλή διασπορά του τρίμματος ελαστικού στην άσφαλτο. Τα δοκίμια συμπίεστηκαν με 50 κτύπους από κάθε πλευρά με το Marshall hammer. Τέλος, για τον τύπο I παρασκευάστηκαν τέσσερις σειρές δοκιμίων, ενώ για τον τύπο II δύο σειρές δοκιμίων.

### 3. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ & ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΤΑ MARSHALL - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα ασφαλτομίγματα των δύο τύπων που παρασκευάστηκαν ελέγχθηκαν σε ευστάθεια και παραμόρφωση με τη βοήθεια συσκευής Marshall του εργαστηρίου δημοσίων έργων της περιφέρειας Ηπείρου. Παράλληλα, υπολογίστηκε το φαινόμενο βάρος των ασφαλτομιγμάτων καθώς επίσης το ποσοστό κενών αέρος, το ποσοστό κενών συμπιεσμένων αδρανών και το ποσοστό κενών συμπιεσμένων αδρανών που πληρώθηκαν με άσφαλτο .

Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το φαινόμενο βάρος, τα κενά αέρος, της ευστάθειας και της παραμόρφωσης για τους δύο τύπους που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα ιδιοτήτων κατά Marshall για τον τύπο I

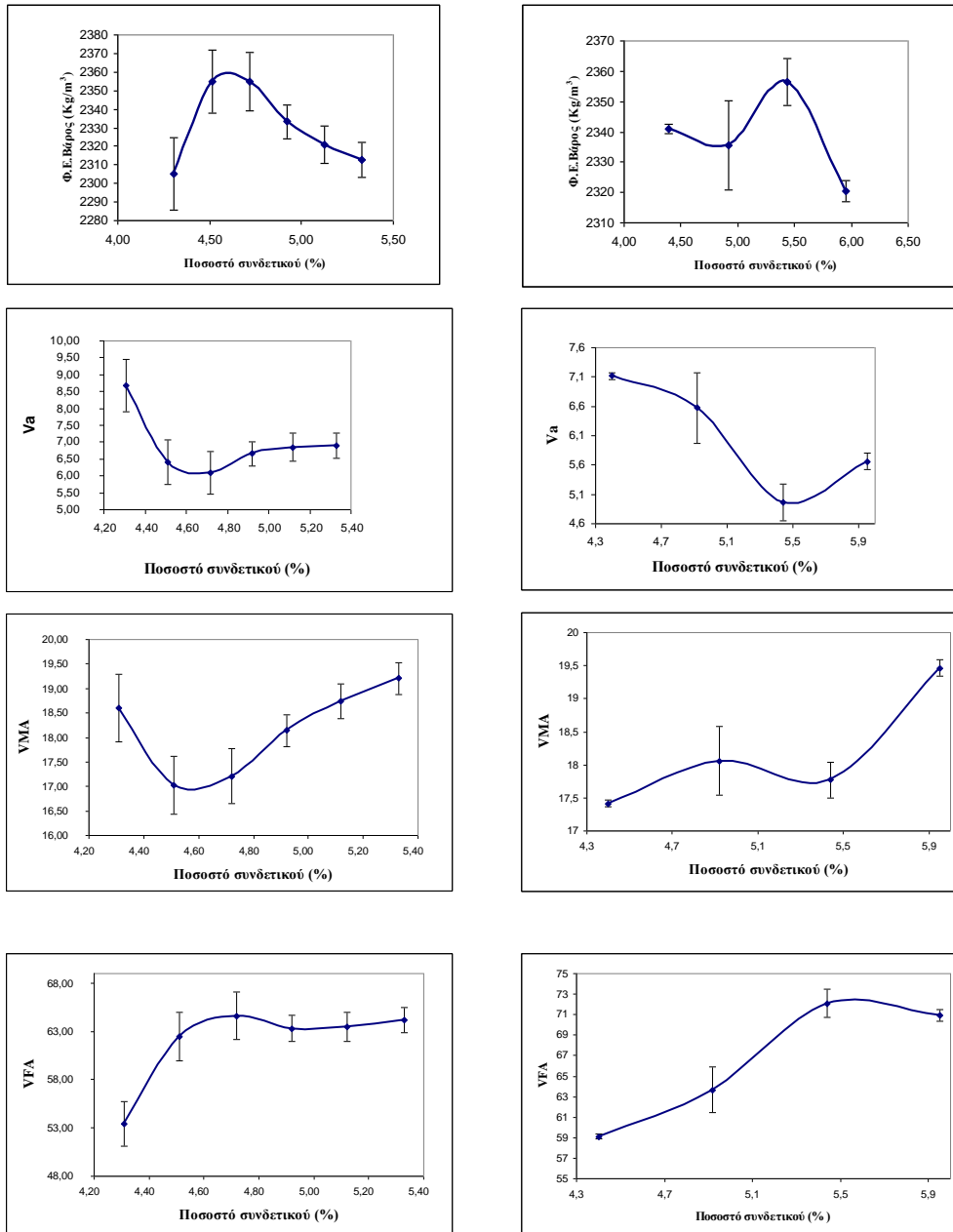
Μηχ. Ιδιότητες / Ποσοστό ελαστικού	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Φ.Ε.Β. (kg/m <sup>3</sup> )	2305	2355	2355	2333	2321	2313
Va (%)	8,68	6,41	6,10	6,66	6,85	6,89
VMA (%)	18,61	17,03	17,21	18,14	18,74	19,20
VFA (%)	53,41	62,45	64,61	63,31	63,47	64,16
Ευστάθεια (Lb)	2540	2650	2545	2225	2256	2247
Παραμόρφωση (0,01")	15,5	15,2	16,1	17,6	17,1	18,6

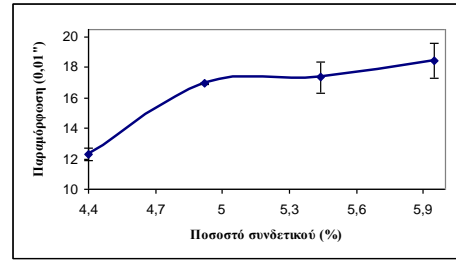
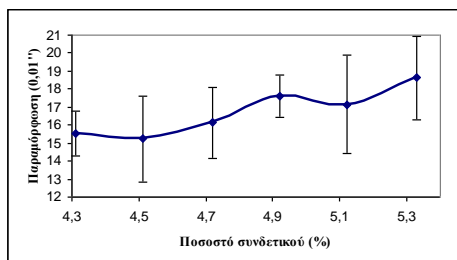
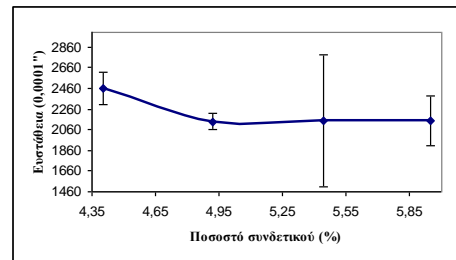
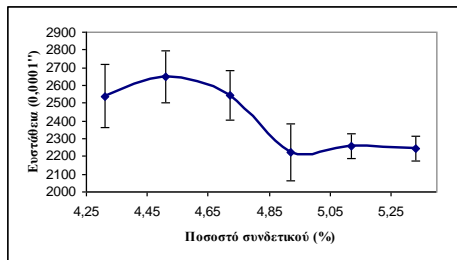
Πίνακας 2. Αποτελέσματα ιδιοτήτων κατά Marshall για τον τύπο II

Μηχ. Ιδιότητες / Ποσοστό ασφάλτου	4%	4,5%	5%	5,5%
Φ.Ε.Β. (kg/m <sup>3</sup> )	2341	2336	2357	2321
Va (%)	7,12	6,57	4,96	5,66
VMA (%)	17,42	18,06	17,77	19,47
VFA (%)	59,12	63,67	72,11	70,92
Ευστάθεια (Lb)	2459	2140	2146	2148
Παραμόρφωση (0,01")	12,3	16,95	17,35	18,45

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι οι μέσες τιμές των τεσσάρων σειρών δοκιμών για τον τύπο I και των δύο σειρών δοκιμών από τον τύπο II. Σύμφωνα με τους πίνακες 1 και 2 μπορούμε να σχηματίσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων κατά Marshall (σχήμα 1) συναρτήσει του ποσοστού συνδετικού (άσφαλτος + τρίμμα ελαστικού) κ.β. αδρανών για τους τύπους I και II.

Σχήμα 1. Διαγράμματα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων Marshall για τον τύπο I (αριστερά) και τον τύπο II (δεξιά)





Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι και οι δύο τύποι ακολουθούν χαρακτηριστικές πορείες καθώς το ποσοστό συνδετικού αυξάνεται. Μάλιστα οι καμπύλες ακολουθούν τις ίδιες χαρακτηριστικές πορείες και έχουν την μορφή που θα αναμενόταν για τη συμβατική άσφαλτο.

#### 4. ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Σε μια σειρά δοκιμών του τύπου I έγινε έλεγχος με υπέρηχους ακουστικής εκπομπής για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων. Οι μετρήσεις έγιναν με χρήση δύο αισθητήρων, ενός pulser και ενός receiver οι οποίοι τοποθετήθηκαν αντικριστά στις δύο επίπεδες επιφάνειες του κάθε δοκιμίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις μετρήσεις εφαρμόστηκαν υπέρηχοι συχνότητας,  $f=150$  KHz.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας έγινε μετρώντας τον χρόνο που έκανε το σήμα ξεκινώντας από τον pulser και φτάνοντας στον receiver και με τη βοήθεια του τύπου  $V = L / \Delta t$ , όπου  $V$  η ταχύτητα του υπερήχου,  $L$  το ύψος του δοκιμίου και  $\Delta t$  η διαφορά χρόνου από τον pulser στον receiver. Για κάθε δοκίμιο έγιναν πέντε μετρήσεις από διαφορετικά σημεία κρατώντας τη μέση τιμή αυτών.

Γνωρίζοντας την ταχύτητα του μπορούμε είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το μέτρο ελαστικότητας, με τη βοήθεια του τύπου

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

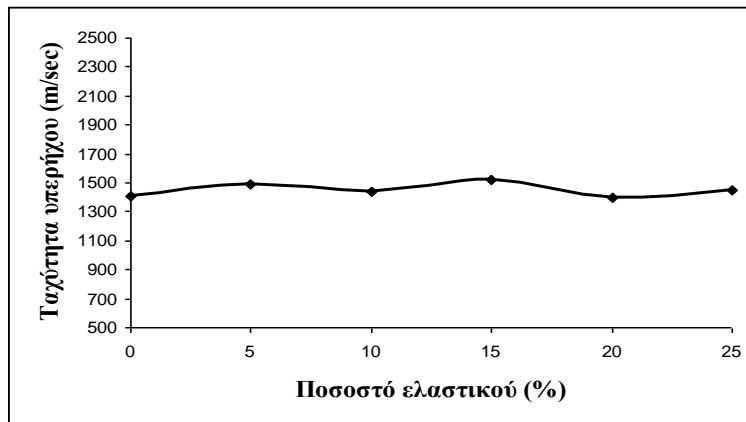
όπου  $\rho$  = πυκνότητα (έχει υπολογιστεί ως φαινόμενο βάρος μετά την παρασκευή των ασφαλτομιγμάτων) και  $E$  = μέτρο Young.

Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων του χρόνου διάδοσης των υπερήχων,  $\Delta t$ , από τη μια άκρη του δοκιμίου στην άλλη φαίνονται στον Πίνακα 3, καθώς επίσης και η ταχύτητα των υπερήχων και το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτομιγμάτων (Matikas et al. 1998).

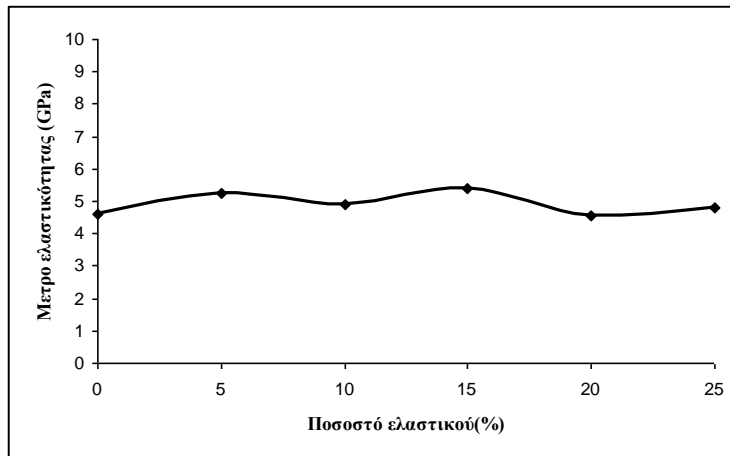
Πίνακας 3. Αποτελέσματα μετρήσεων με υπερήχους

Ποσοστό ελαστικού	0%	5%	10%	15%	20%	25%
$\Delta t$ ( $\mu\text{sec}$ )	46,75	43,55	45,05	43,15	47,30	46,15
$V$ (m/sec)	1407	1490	1443	1525	1400	1447
$E$ (Gpa)	4,58	5,26	4,92	5,42	4,57	4,82

Με βάση τον πίνακα 3 σχηματίζεται τα διαγράμματα της ταχύτητας και του μέτρου ελαστικότητας (σχήμα 2 και 3) συναρτήσει του ποσοστού σε ελαστικό στην άσφαλτο.



Σχήμα 2. Διάγραμμα ταχύτητας υπερήχων συναρτήσει ποσοστού ελαστικού



Σχήμα 3. Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει ποσοστού ελαστικού

Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό ελαστικού στην άσφαλτο η ταχύτητα υπέρηχων στο κάθε δοκίμιο δεν αλλάζει ουσιαστικά και είναι  $1460 \pm 60$  m/sec. Η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα δοκίμια ασφαλτομίγματος είναι αμελητέα αν ληφθεί υπ' όψη ότι το σφάλμα της μέτρησης είναι περίπου  $\pm 50$  m/sec. Το ίδιο συμβαίνει και για το μέτρο ελαστικότητας το οποίο και αυτό δεν παρουσιάζει ουσιαστική μεταβολή συναρτήσει της αύξησης του ποσοστού σε ελαστικό στα δοκίμια, και είναι  $5,0 \pm 0,4$  GPa.

## 5. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τον υπολογισμό του φαινόμενου ειδικού βάρους και των κενών ασφαλτομίγματος, παρατηρούσαμε συνεχώς ότι η 3<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων του τύπου I, αν και οι καμπύλες του ήταν σωστές μορφολογικά, είχε μικρότερες τιμές από τους άλλες 3 σειρές δοκιμίων και οι καμπύλες του ήταν πιο χαμηλά η πιο ψηλά από τις άλλες. Επίσης στον τύπο II και για άσφαλτο με 4,5%, για όλες τις μετρήσεις σχεδόν υπήρχε απόκλιση για τη 2<sup>η</sup> σειρά δοκιμίων οπότε και βγάζουμε το συμπέρασμα ότι υπήρξε σφάλμα κατά την παρασκευή του. Το παράδοξο είναι ότι στις μετρήσεις για ευστάθεια και παραμόρφωση, οι συγκεκριμένες σειρές (σειρά 3<sup>η</sup> τύπος I και σειρά 2<sup>η</sup> τύπος II) ήταν και οι ιδανικότερες ως προς τη μορφή των καμπυλών, όπως παρατηρήθηκε από τα διαγράμματα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων για τον τύπο II έπρεπε να είχαμε την παρουσία και άλλων δοκιμίων και όχι



μόνο δύο ώστε να βγάξουμε ασφαλέστερα συμπεράσματα. Το ίδιο ισχύει και για τον έλεγχο με υπερήχους, για το λόγο του ότι ελέγχθηκε μόνο μια σειρά δοκιμών και έτσι δε μπορούμε να εγγυηθούμε ορθά συμπεράσματα.

Όλες οι σειρές ασφαλτομιγμάτων που παρασκευάσαμε με τη μέθοδο Marshall, ακολουθούσαν χαρακτηριστικές πορείες όπως φαίνονται στα διαγράμματα που παραθέσαμε από τους υπολογισμούς που κάναμε και αναλύσαμε αλλά και από τις δοκιμές Marshall.

Ενώ στα μίγματα που δε χρησιμοποιήσαμε τριμμένο ελαστικό τα κενά αέρος βρισκόταν εντός των ορίων των Τεχνικών Οδηγιών του Υπ.Πε.Χω.Δ.Ε. (8-12 % κ.ο.), τα κενά αέρος που μετρήσαμε στο ασφαλτόμιγμα με τρίμα ελαστικού ήταν της τάξης του 4-7 % κ.ο., ποσοστό που βρίσκεται εκτός των παραπάνω ορίων. Αυτό ερμηνεύεται λόγω της παρουσίας του τρίματος ελαστικού το οποίο κλείνει τα κενά αέρος στο ασφαλτόμιγμα. Έτσι, για την παρασκευή τροποποιημένου ασφαλτομίγματος με κενά αέρος εντός των παραπάνω ορίων, θα πρέπει να μεταβάλουμε τις αναλογίες της ασφάλτου και του ελαστικού στο μίγμα. Πιθανές λύσεις είναι η μείωση του ποσοστού ασφάλτου στο μίγμα, μεταβολή του ποσοστού, γεωμετρίας και κοκκομετρίας του ελαστικού, κ.α. Βέβαια, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι τέτοιου τροποποιήσεις θα έχουν αρνητική επίπτωση σε άλλες κρίσιμες ιδιότητες του ασφαλτομίγματος.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι μετρήσεις έδειξαν ότι όλα τα ασφαλτομίγματα που παρασκευάσαμε βρίσκονται μέσα στα όρια των προδιαγραφών πλην των κενών αέρος. Αν λάβουμε υπόψη το γεγονός ότι μέσα στα όρια των προδιαγραφών βρίσκονται και οι ιδιότητες των υλικών (κοκκομετρίες αδρανών - τρίματος ελαστικού, δοκιμές ασφάλτου – αδρανών κτλ) μπορούμε να πούμε ότι τα ασφαλτομίγματα που παρασκευάσαμε είναι κατάλληλα προς χρήση στην οδοποιία.

Η μέθοδος Marshall έχει πιστοποιηθεί μόνο για τα κοινά ασφαλτομίγματα. Το γεγονός ότι με τη μεθοδολογία Marshall δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του βέλτιστου ποσοστού σε ασφαλτο λόγω της χρήσης τρίματος ελαστικού αποτελεί μειονέκτημα στην όλη πειραματική διαδικασία. Συνεπώς, ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων με τη μέθοδο Marshall δεν ενδείκνυται για τον προσδιορισμό του «ιδανικότερου» τροποποιημένου ασφαλτομίγματος. Επίσης, πρόκειται να γίνουν πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του πορώδους και του φαινόμενου ειδικού βάρους ώστε να εμβαθύνουμε στην κάλυψη του κριτηρίου αυτού, το οποίο πιθανώς θα πρέπει να αναθεωρηθεί.

Με τη μέθοδο Marshall απλά διαπιστώσαμε ότι τα ασφαλτομίγματα που παρασκευάστηκαν συμπεριφέρονται ανάλογα με τα συμβατικά και είναι ικανά προς χρήση στην οδοποιία. Τα τροποποιημένα ασφαλτομίγματα θα πρέπει στη συνέχεια να ελεγχθούν ως προς θεμελιώδεις μηχανικές ιδιότητες όπως μέτρο δυσκαμψίας, αντοχή σε κόπωση κτλ, ώστε να αντισταθούν έναντι των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων όσον αφορά τις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα.

Τέλος, παρατηρήσαμε ότι η ταχύτητα των υπερήχων αλλά και το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτομιγμάτων, το οποίο μετρήθηκε με τη μέθοδο των υπερήχων και βρέθηκε να έχει τιμή 5 GPa, δεν παρουσιάζουν αξιόλογη μεταβολή ως προς το ποσοστό ελαστικού στην άσφαλτο, το δε σφάλμα που παρατηρήθηκε βρίσκεται στα όρια του σφάλματος της μεθόδου και οφείλεται στην ανομοιομορφία των δοκιμίων του ασφαλτομίγματος.

Η βελτιστοποίηση της τροποποίησης ασφάλτου με τρίμμα ανακυκλούμενου ελαστικού θα πρέπει να συνδυαστεί τόσο με πειραματικές μετρήσεις πορώδους σε δείγματα, όσο και με επί τόπου έλεγχο της συμπεριφοράς της τροποποιημένης με τρίμμα ανακυκλούμενου ελαστικού ασφάλτου στην οδοποιία. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε ο έλεγχος αυτών των μιγμάτων με άλλες μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου, όπως υπέρυθρη θερμογραφία και γεωραντάρ, των οποίων η χρήση έχει πρόσφατα διαδοθεί στον έλεγχο ποιότητας ασφαλτοταπήτων (Moropoulou et al, 2000, Moropoulou et al, 2001, Moropoulou et al, 2002).

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ASTM D 1559-89. Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, 1989 (AASHTO T 245-97 (1998))
- ASTM D 3203-94, Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Bituminous Paving Mixtures, 1998 (AASHTO T 69-97 (1998))
- Weidong Cao, Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process, (2006)
- Νικολαΐδης Α., Οδοποιία, Οδοστρώματα – Υλικά Έλεγχος Ποιότητας, 2<sup>η</sup> έκδοση, Κκεφ. 4,6  
ΕΛ.ΠΑΕ, Οικονομοτεχνική Μελέτη, Αθήνα, (2002).
- Υπ.Πε.Χω.Δ.Ε., Μελέτη Τεχνικών Οδηγιών του Υπ.Πε.Χω.Δ.Ε τύπος 2 -2,5mm Τραχείας Υφής.
- Matikas T. E., P. Karpur, S. Shamasundar, "Measurement of the Dynamic Elastic Moduli of Porous Titanium Aluminide Compacts", Journal of Material Science, 32 (1997) 1099-1103.
- Moropoulou, A., Kouï, M., Avdelidis, N.P. and Kakaras K., "Inspection of airport runways and asphalt pavements using long-wave infrared thermography", Proceedings of SPIE -- Volume 4020, Thermosense XXII, R.B. Dinwiddie, D.H. LeMieux, Eds., 302-309 (2000).
- Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Kouï, M., Kakaras, K., "An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements", NDT&E International, 34(5) (2001) 329-335.
- Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Kouï, M., Aggelopoulos, A., Karmis, P., "Infrared Thermography and ground penetrating radar for airport pavements assessment", Nondestructive Testing and Evaluation, 18(1) (2002) 37-42.