

Αντοχή σε κόπωση ανακυκλωμένου με αφρώδη ασφαλτο μίγματος από φρεζαρισμένο ασφαλτοσκυρόδεμα και ΚΘΑ.

Σ. Κόλιας

Αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ

Α. Καραχάλιος, Μ. Κατσάκου, Ε. Κυρκιλή

Πολιτικοί Μηχανικοί ΕΜΠ

Λέξεις κλειδιά: ανακύκλωση, αφρώδη ασφαλτος, κόπωση, μέτρο δυσκαμψίας, αντιδιαμετρική θλίψη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης (επαναλαμβανόμενη αντιδιαμετρική θλίψη) σε δοκίμια ανακυκλωμένου με αφρώδη ασφαλτο μίγματος από φρεζαρισμένο ασφαλτοσκυρόδεμα και ΚΘΑ. Το ανακυκλωμένο υλικό προέρχεται από τον αυτοκινητόδρομο Αθηνών – Κορίνθου της παράκαμψης διωλιστηρίων. Παρουσιάζονται επίσης και τα αποτελέσματα των δοκιμών μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας (επαναλαμβανόμενη αντιδιαμετρική θλίψη) του παραπάνω μίγματος.

1. ΓΕΝΙΚΑ

Η ψυχρή ανακύκλωση των ασφαλτικών στρώσεων ενός οδοστρώματος μπορεί να γίνει με χρήση διάφορων συνδετικών υλικών ή συνδυασμό τους όπως : τσιμέντο, ασφαλτικό γαλακτώμα, αφρώδη ασφαλτο, ή με συνδυασμούς τσιμέντου σε μικρή ποσότητα και ασφαλτικού γαλακτώματος ή αφρώδους ασφάλτου. Η αφρώδης, ή διογκωμένη ασφαλτος παράγεται με την προσθήκη μικρού ποσοστού ψυχρού νερού σε θερμή ασφαλτο, με αποτέλεσμα την άμεση δημιουργία ασφαλτικού αφρού (διόγκωση της ασφάλτου έως και 15 φορές). Οι φυσικές ιδιότητες της ασφάλτου αλλάζουν προσωρινά, λόγω του ότι το νερό όταν έρθει σε επαφή με την θερμή ασφαλτο εξατμίζεται και ο ατμός εγκλωβίζεται σε πολλές μικρές ασφαλτικές φυσαλίδες. Γρήγορα όμως, ο αφρός υποχωρεί και η ασφαλτος ανακτά τις αρχικές της ιδιότητες. Πρέπει, επομένως, να γίνει γρήγορη και καλή ανάμιξη, ώστε η αφρώδης ασφαλτος να εξαπλωθεί σε όλο το μίγμα.

Κατά την ανάμιξη, η αφρώδης ασφαλτος περιβάλλει το λεπτό υλικό δημιουργώντας ένα είδος ασφαλτοπολτού – μαστίχας, που δεν είναι συνεχής σχηματίζεται σε τυχαίες θέσεις και ο οποίος τελικά αποτελεί το συνδετικό υλικό του μίγματος. Η τεχνική, επομένως, σταθεροποίησης με αφρώδη ασφαλτο έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν το μίγμα των αδρανών – καθαρών ή ανακυκλωμένων – έχει ένα επαρκές ποσοστό λεπτού υλικού - άμμου.

Η ασυνεχής παρουσία του συνδετικού υλικού καθιστά τα μίγματα με αφρώδη ασφαλτο λιγότερο ευαίσθητα στις θερμοκρασιακές μεταβολές σε σύγκριση με τα συμβατικά εν θερμώ ασφαλτομίγματα. Παράλληλα έχει παρατηρηθεί ότι τα αφρώδη ασφαλτομίγματα έχουν

μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο δυσκαμψίας από τα θερμά ασφαλτομίγματα για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (>30°C), Amir F. Bissada (1987).

Μία άλλη σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει κυρίως το μέτρο δυσκαμψίας και την ευστάθεια του μίγματος, είναι το ποσοστό του περιεχομένου νερού. Η διάρκεια συντήρησης/ωρίμανσης, και η μέθοδος συντήρησης/ωρίμανσης, των δοκιμίων αφρώδων ασφαλτομιγμάτων παίζουν ρόλο στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας και της εφελκυστικής αντοχής, κυρίως όσον αφορά την εξάτμιση του νερού και την θερμοκρασία.

Τα αφρώδη ασφαλτομίγματα έχουν μηχανικά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται κάπου ανάμεσα σε αυτά των συμβατικών εν θερμό ασφαλτομιγμάτων και των κατεργασμένων θραυστών αμμοχαλίκων. Τα μίγματα αυτά δεν έχουν πολλά χρόνια εφαρμογής και για αυτό το λόγο δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης.

2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΕ ΕΜΜΕΣΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΜΕ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη αφρώδων ασφαλτομιγμάτων ανακύκλωσης, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ. Το αφρώδες ασφαλτόμικρο που εξετάζεται προέρχεται από το ανακυκλωμένο υλικό των ασφαλτικών στρώσεων (πάχους περίπου 8cm) και μέρους των στρώσεων ΚΘΑ (πάχους περίπου 20cm) του αυτοκινητόδρομου Αθηνών-Κορίνθου. Στο ανακυκλωμένο υλικό προστέθηκε 3% αφρώδης άσφαλτος, 15-20% άμμος και 1% τσιμέντο. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού ήταν:

Κόσκινο (mm):	25	19	9.5	4.75	2	0.6	0.3	0.15	0.075
Διερχόμενο (%):	100	100	87	66	35	14	9	6	4.7

2.1. Παρασκευή δοκιμίων αφρώδους ασφαλτομίγματος ανακύκλωσης.

Μία ποσότητα υλικού αμέσως μετά την ανάμιξή του πίσω από το μηχάνημα ανακύκλωσης και πριν την συμπύκνωσή του τοποθετήθηκε σε αεροστεγείς σάκους και μεταφέρθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή δοκιμίων Marshall ύψους περίπου 60mm, ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

Όλο το υλικό αφαιρέθηκε από τους σάκους και αναμίχθηκε εκ νέου. Οι πλευρές του αναμικτήρα είχαν προηγουμένως ψεκαστεί με νερό, προκειμένου να μην διαφύγει νερό από το μίγμα προς τον αναμικτήρα. Στη συνέχεια απομακρύνθηκε το χονδρόκοκκο υλικό (αδρανή ή συσσωματώματα), που συγκρατείται από το κόσκινο Νο 5/8. Μετά το κοσκίνισμα το υλικό αναμίχθηκε εκ νέου ανά παρτίδες των 30 περίπου κιλών, αφού προηγουμένως ψεκάστηκαν και πάλι με νερό η πλευρές του αναμικτήρα. Κάθε φορά, το υλικό ήταν τοποθετημένο σε αεροστεγείς σάκους μέχρι την ανάμιξη. Τα δοκίμια συμπυκνώθηκαν στη μηχανή συμπύκνωσης Marshall εφαρμόζοντας 75 χτύπους ανά

βάση κυλινδρικού δοκιμίου. Μετά την συμπύκνωσή τους τοποθετήθηκαν σε επίπεδη επιφάνεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (23-25°C) για 4 ώρες, κατόπιν στο φούρνο στους 40°C επί 72 ώρες, και ακολούθως παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου επί τουλάχιστον 6 μήνες (σχετική υγρασία 55-65% και μέση ημερήσια θερμοκρασία 23-25°C).

Παράλληλα με την παρασκευή δοκιμών Marshall ύψους περίπου 60mm, παρασκευάστηκαν και δοκίμια Marshall ύψους 40mm, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με μόνη διαφορά την εφαρμογή 50 κτύπων συμπύκνωσης ανά πλευρά κυλινδρικού δοκιμίου. Έτσι προέκυψαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 101mm και ύψους 60mm (μεγάλα δοκίμια) και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 101mm και ύψους 40mm (μικρά δοκίμια).

Τα λεπτά δοκίμια είχαν πυκνότητα κατά μέσο όρο ίση προς 2.077gr/cm³ και τα μεγάλα ίση προς 2.044gr/cm³, και επομένως η συμπύκνωση των δοκιμών ήταν ικανοποιητική. Παράλληλα, ο Συντελεστής Μεταβλητότητας των πυκνοτήτων υπολογίστηκε μικρότερος από 1%, γεγονός που φανερώνει ότι η συμπύκνωση των δοκιμών ήταν αρκετά ομοιόμορφη.

2.2. Εκτέλεση δοκιμών κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη. Διαγράμματα κόπωσης – Νόμοι κόπωσης

Από τα παραπάνω κυλινδρικά δοκίμια 14 με ύψος 60mm και 24 με ύψος 40mm χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη. Οι δοκιμές έγιναν στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ με την μηχανή Nottingham Asphalt Tester σύμφωνα με τις οδηγίες του Link Bitutest Project Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT). Η διαδικασία είναι η ίδια με αυτή των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων. Η θερμοκρασία των δοκιμών ήταν σταθερή και ίση με 23°C.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση κατά τις δοκιμές δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη λαμβάνει τιμές 5, 7 και 9 μm και όχι 5, 9, 13 και 17 μm, όπως προτείνουν οι οδηγίες για τα θερμά ασφαλτομίγματα. Η αλλαγή αυτή έγινε αναγκαστικά διότι όταν η ζητούμενη παραμόρφωση ξεπερνούσε τα 9μm το μέτρο δυσκαμψίας μειωνόταν σημαντικά πιθανότατα λόγω παραμόρφωσης του δοκιμίου πέραν της ελαστικής περιοχής. Επιπλέον σημειώνεται ότι οι δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια με ύψος 60mm δεν προβλέπονται από το πρωτόκολλο αλλά έγιναν σε μία προσπάθεια βαθύτερης διερεύνησης του θέματος.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα κόπωσης ως συνάρτηση της μέγιστης αρχικής εφελκυστικής ανηγμένης παραμόρφωσης $\varepsilon_{x\max}$ για τις δύο ομάδες δοκιμών ξεχωριστά. Στο Σχήμα 2 δίνεται το διάγραμμα κόπωσης για όλα τα δοκίμια αφρώδους ασφαλτομίγματος. Μετά από γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων προέκυψαν οι παρακάτω αλγόριθμοι κόπωσης :

Αλγόριθμος κόπωσης για αφρώδη ασφαλτομίγματα - Δοκίμια πάχους 40mm:

$$\varepsilon_{x\max} = 804.85 \times N^{-0.1728} \Rightarrow N = 6.67 \times 10^{16} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_{x\max}} \right)^{5.79}, R^2 = 0.7652 \quad (1)$$

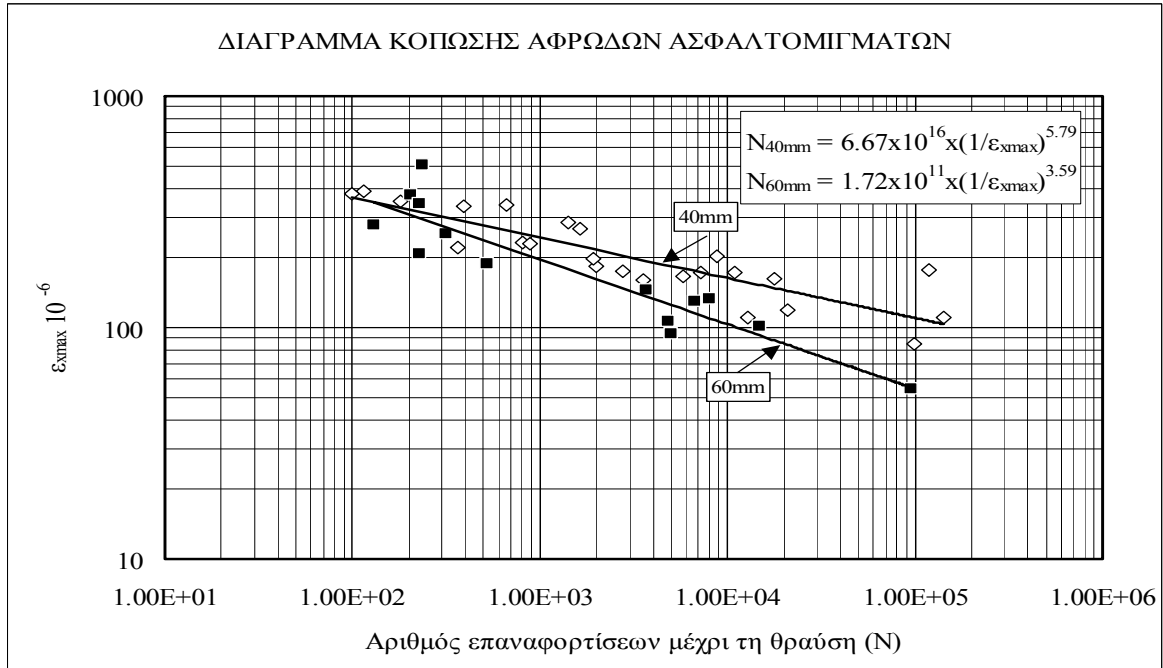
Αλγόριθμος κόπωσης για αφρώδη ασφαλτομίγματα - Δοκίμια πάχους 60mm:

$$\varepsilon_{x\max} = 1349 \times N^{-0.2789} \Rightarrow N = 1.72 \times 10^{11} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_{x\max}} \right)^{3.59}, R^2 = 0.8506 \quad (2)$$

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΓΙΑ ΑΦΡΩΔΗ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΑ – Όλα τα δοκίμια

$$\varepsilon_{x\max} = 900.69 \times N^{-0.1997} \Rightarrow N = 6.345 \times 10^{14} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_{x\max}} \right)^{5.01}, R^2 = 0.6953 \quad (3)$$

όπου, $\varepsilon_{x\max}$ =μέγιστη αρχική εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέσον του δοκιμίου, N =επαναλήψεις φορτίσεων μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.



Σχήμα 1. Διαγράμματα κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη δοκιμίων αφρώδους ασφαλτομίγματος. Διάκριση λεπτών – μεγάλων δοκιμίων.

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα του σχήματος 1 υπάρχει μία σαφής διάκριση μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων σε μικρά και μεγάλα. Ετσι για την ίδια ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_{x\max}$ τα μεγάλα δοκίμια αστοχούν σε μικρότερο αριθμό φορτίσεων από τα μικρά. Εκ πρώτης όψεως αυτό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει. Γενικά τα αποτελέσματα των δοκιμών κόπωσης θερμών ασφαλτομιγμάτων σε αντιδιαμετρική θλίψη υπό ελεγχόμενη τάση όταν παρουσιάζονται σε λογαριθμικό διάγραμμα $\sigma_{x\max} \sim N$ διαχωρίζονται ανάλογα με το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων, αλλά όταν παρουσιάζονται σε λογαριθμικό διάγραμμα $\varepsilon_{x\max} \sim N$ ενοποιούνται. Αυτό όμως ισχύει για δοκίμια ίδιων διαστάσεων όπου το μέτρο δυσκαμψίας μεταβάλλεται μόνο λόγω θερμοκρασίας.

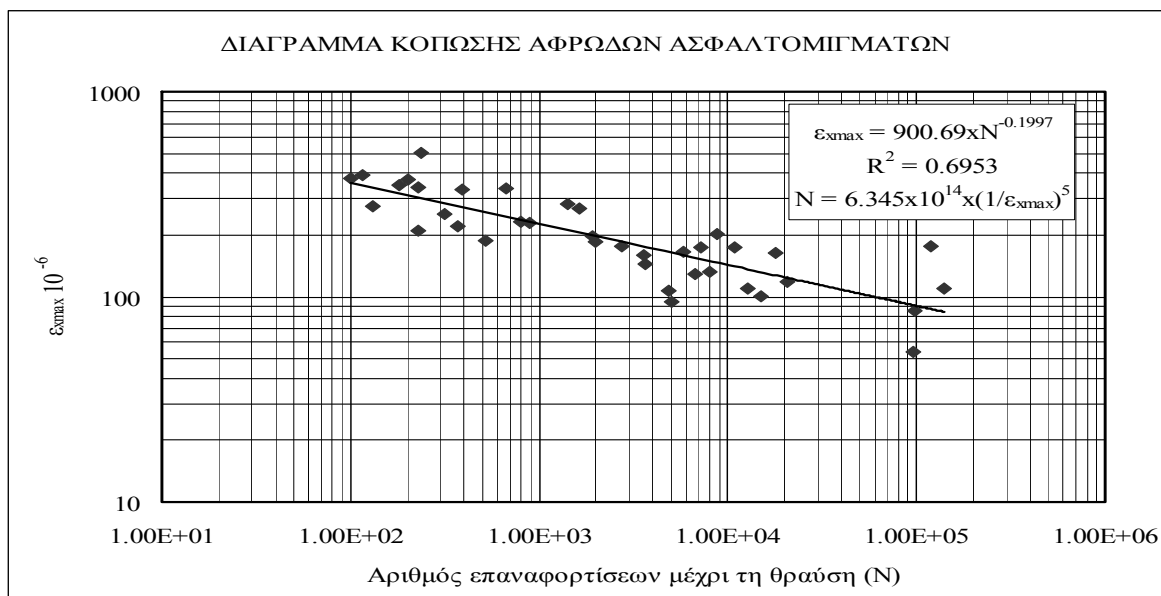
Τα αποτελέσματα της παρούσης έρευνας εισάγουν μία νέα παράμετρο στο μέγεθος της δυσκαμψίας (γεωμετρική δυσκαμψία) την παράμετρο του πάχους των δοκιμίων που όπως φαίνεται παίζει ρόλο. Σύμφωνα με τις οδηγίες του πρωτοκόλλου (ITFT) η $\varepsilon_{x\max}$ υπολογίζεται από την μέγιστη εφελκυστική τάση στο μέσον του δοκιμίου ($\sigma_{x\max}$) και από το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου (S_m) εφαρμόζοντας τη σχέση (4):

$$\varepsilon_{x\max} = \frac{\sigma_{x\max} \times (1 + 3 \times \nu)}{S_m} \quad (4)$$

όπου $\epsilon_{x\max}$ =μέγιστη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση, $\sigma_{x\max}$ =μέγιστη εφελκυστική τάση (MPa), ν =λόγος του Poisson, S_m =μέτρο δυσκαμψίας (MPa).

Όπως αναλύεται στην παρακάτω παράγραφο το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων που μετρήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη εξαρτάται από το πάχος – όσο μεγαλύτερο το πάχος τόσο μεγαλύτερο και το μέτρο δυσκαμψίας. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη ότι τα μικρά δοκίμια έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από ότι τα μεγάλα, είναι φανερό ότι αν τα μεγάλα δοκίμια είχαν την ίδια πυκνότητα με τα μικρά θα είχαν ακόμη μεγαλύτερο μέτρο δυσκαμψίας. Συμπεραίνεται επομένως ότι η διαφορά πάχους των δοκιμίων είναι σημαντική αιτία της διαφοράς του μέτρου δυσκαμψίας, επισκιάζοντας, για τα πειραματικά δεδομένα, την επίδραση της πυκνότητας. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από μεταγενέστερη έρευνα σε συμβατικά/θερμά ασφαλτομίγματα με την ίδια πυκνότητα.

Εκείνο που επίσης παρατηρείται είναι ότι οι καμπύλες κόπωσης μικρών και μεγάλων δοκιμίων διαφέρουν μεταξύ τους κυρίως ως προς την κλίση τους. Η κλίση των μεγάλων είναι μεγαλύτερη από την κλίση των μικρών δοκιμίων με αποτέλεσμα στα μεγάλα επίπεδα $\epsilon_{x\max}$ η αντοχή σε κόπωση - εκφρασμένη με τον αριθμό N - δεν διαφέρει ενώ στα μικρά επίπεδα $\epsilon_{x\max}$ η αντοχή των μεγάλων δοκιμίων παρουσιάζεται μικρότερη από αυτή των μικρών δοκιμίων.



Σχήμα 2. Διάγραμμα κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη δοκιμίων αφρώδους ασφαλτομίγματος. Όλα τα δοκίμια.

2.3. Μέτρα δυσκαμψίας

Σύμφωνα με τις οδηγίες εκτέλεσης των δοκιμών κόπωσης πρέπει να προηγηθούν δοκιμές μέτρησης μέτρου δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας σε συνάρτηση με την οριζόντια τάση $\sigma_{x\max}$ και εύκολα διακρίνεται ότι τα μέτρα δυσκαμψίας των μεγάλων δοκιμίων είναι στην πάνω περιοχή των μετρήσεων. Υπάρχει επομένως μία σαφής επιρροή του πάχους των δοκιμίων στο μέγεθος της δυσκαμψίας που κάθε φορά μετράται.

Επιπλέον από τα σχήματα αυτά διαπιστώνεται ότι κατά την αντιδιαμετρική θλίψη όσο μεγαλώνει η οριζόντια τάση τόσο μεγαλώνει και η δυσκαμψία και μάλιστα με μία τελείως γραμμική σχέση. Παράλληλα είναι σαφής η διάκριση των μετρήσεων σε αυτές που έγιναν με οριζόντια παραμόρφωση 5, 7 και 9μm.

Το μέτρο δυσκαμψίας κατά την αντιδιαμετρική θλίψη υπολογίζεται από την σχέση :

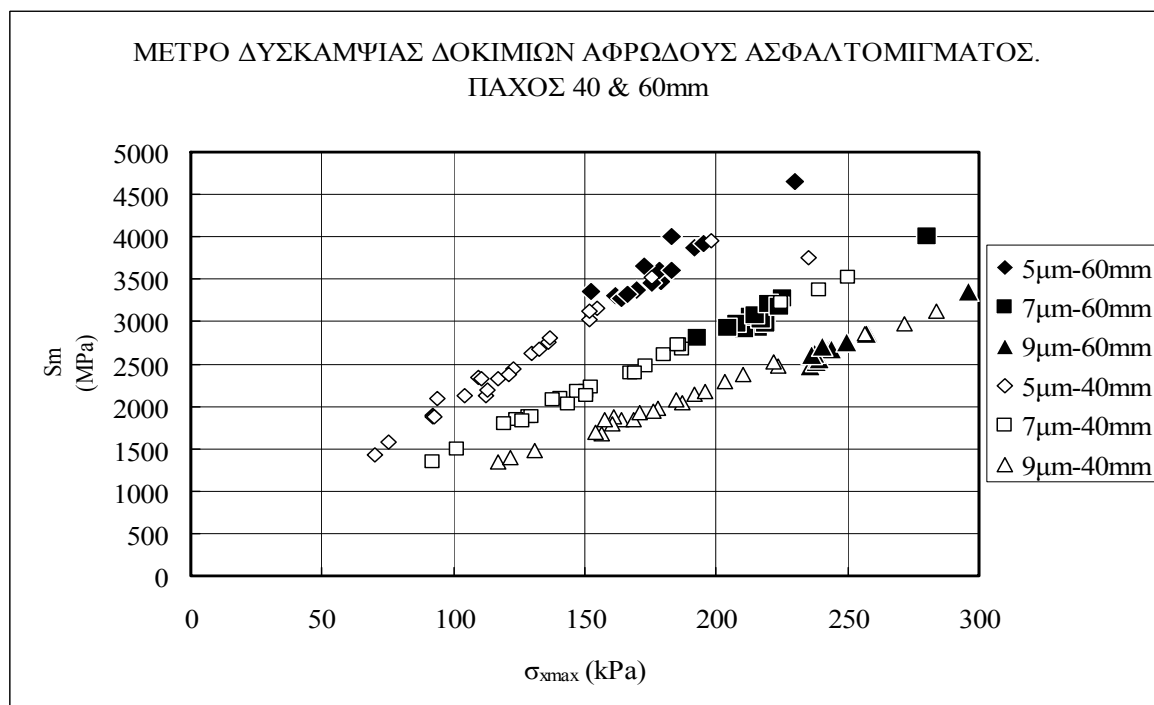
$$S_m = \frac{P \times (1 + 0.273 \times \nu)}{\Delta h \times t} \quad (5)$$

Και η οριζόντια εφελκυστική τάση στο μέσον του δοκιμίου και κάθετα προς τον άξονα φόρτισης θεωρείται ίση προς :

$$\sigma_{x \max} = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times t} \quad (6)$$

όπου S_m =μέτρο δυσκαμψίας (MPa), $\sigma_{x \max}$ =μέγιστη εφελκυστική τάση στο μέσο του δοκιμίου (MPa), P =κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο (N), ν =λόγος του Poisson, Δh =οριζόντια παραμόρφωση (mm), D =διάμετρος του δοκιμίου (mm), t =πάχος του δοκιμίου (mm).

Όταν επομένως ένα δοκίμιο φορτίζεται έτσι ώστε να αναπτύξει μία συγκεκριμένη οριζόντια παραμόρφωση (Δh) τότε όσο μεγαλύτερη δυσκαμψία έχει τόσο μεγαλύτερο φορτίο πρέπει να επιβληθεί από την μηχανή και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι και η απαιτούμενη τάση $\sigma_{x \max}$. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται η παραμόρφωση, όσο μεγαλύτερη είναι η ζητούμενη παραμόρφωση (Δh) για το ίδιο δοκίμιο τόσο μικρότερη είναι και η μετρούμενη δυσκαμψία με την προϋπόθεση ότι το φορτίο παραμένει σταθερό. Το φορτίο όμως δεν παραμένει σταθερό, αντίθετα με την αύξηση της παραμόρφωσης αυξάνει και αυτό επομένως αυξάνει και η οριζόντια τάση $\sigma_{x \max}$.



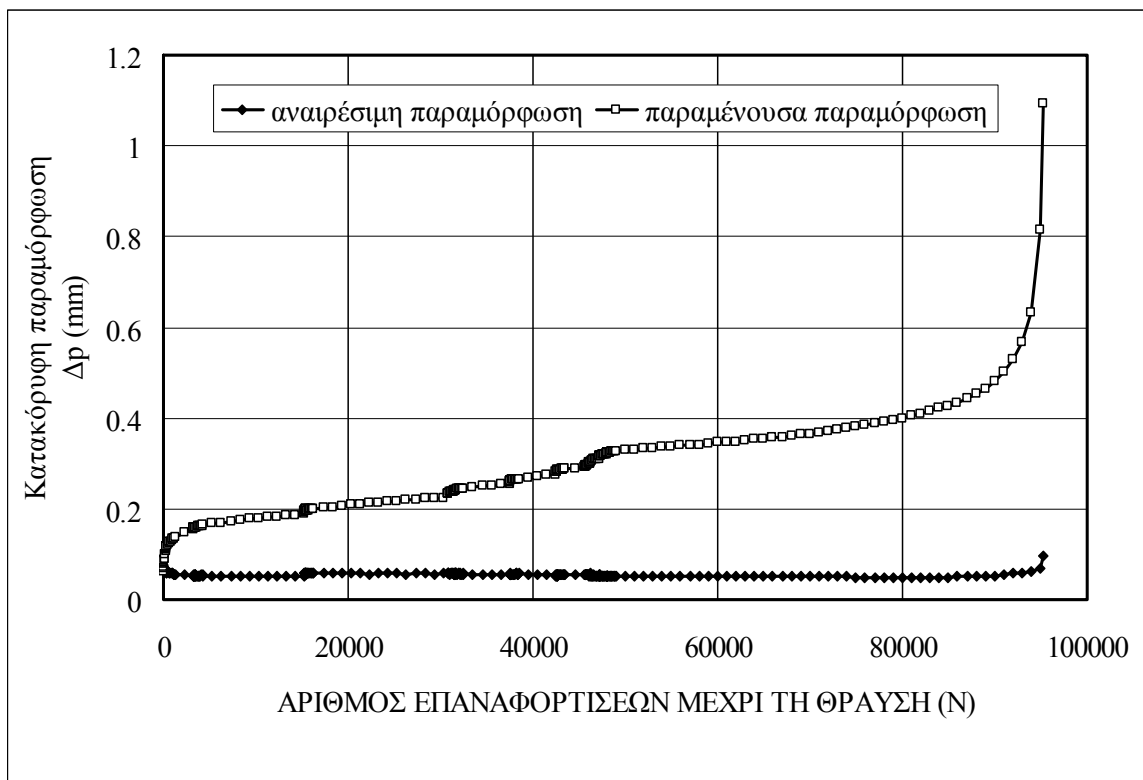
Σχήμα 3. Μεταβολή μέτρου δυσκαμψίας σε συνάρτηση με την μέγιστη εφελκυστική τάση.

Συμπερασματικά οι δυσκαμψίες στα τρία επίπεδα οριζόντιας παραμόρφωσης (5, 7, 9μm) μετρούνται όχι υπό το ίδιο φορτίο/τάση. Όσο δηλαδή αυξάνει η ζητούμενη παραμόρφωση τόσο αυξάνει και το φορτίο/τάση με σύγχρονη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η σημασία της σχέσης μεταξύ φορτίου (P) - οριζόντιας παραμόρφωσης (Δh) – χρόνου φόρτισης (rise time), ή αλλιώς η σημασία της ταχύτητας φόρτισης (P/(rise time)) και της ταχύτητας παραμόρφωσης (Δh /(rise time)), παράμετροι που δεν διακρίνονται εύκολα από τις αναλυτικές σχέσεις που εφαρμόζονται στην αντιδιαμετρική θλίψη. Εάν η μεταβολή του Δh συνοδεύεται από τη μεταβολή του χρόνου φόρτισης έτσι ώστε η ταχύτητα παραμόρφωσης να παραμένει σταθερή, τότε τα αποτελέσματα των δοκιμών ίσως ήταν διαφορετικά.

Σύμφωνα με τις οδηγίες εκτέλεσης των δοκιμών κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη η δοκιμές πρέπει να εκτελούνται με σταθερό χρόνο φόρτισης 120msec. Έτσι και οι δοκιμές δυσκαμψίας εκτελούνται και αυτές με χρόνο φόρτισης 120msec προκειμένου να προσομοιωθεί η μεταβολή/μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.

2.4. Ελαστικές και παραμένουσες παραμορφώσεις. Μέτρα δυσκαμψίας.

Στο σχήμα 4 δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα μεταβολής των κατακόρυφων παραμορφώσεων του δοκιμίου σε σχέση με τις επαναλήψεις φόρτισης. Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια δοκιμής κόπωσης διακρίνονται σε αναιρέσιμες/ελαστικές και παραμένουσες.



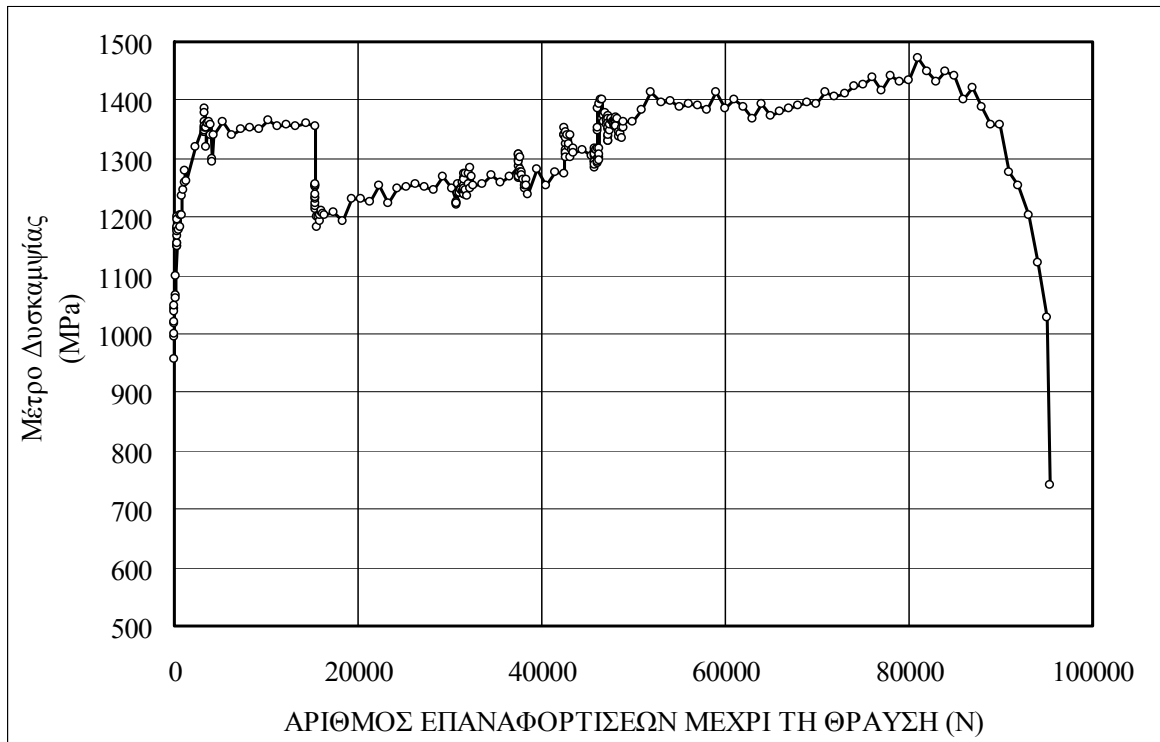
Σχήμα 4. Τυπικό διάγραμμα μεταβολής κατακορύφων παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.

Όπως παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια και καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής οι αναιρέσιμες κατακόρυφες παραμορφώσεις παραμένουν πρακτικά σταθερές και ίσες προς 0.1mm (μειώνονται πολύ ελαφρά) και λίγο πριν τη θραύση παρουσιάζουν μία απότομη αύξηση μέχρι τη θραύση. Αντίθετα, οι κατακόρυφες παραμένουσες παραμορφώσεις από την αρχή της δοκιμής αυξάνονται σταθερά, και κάποια στιγμή αυξάνονται σχεδόν ακαριαία μέχρι τη θραύση.

Η παρουσία των παραμενουσών παραμορφώσεων είναι αναπόφευκτη λόγω της παλμικής φύσης του επαναλαμβανόμενου φορτίου και του φαινομένου του ερπυσμού που παρατηρείται και στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Αναπτύσσονται μάλιστα πολύ περισσότερο στην περιοχή επαφής των πλακών φόρτισης όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Χαρακτηριστικό όμως είναι ότι οι παραμένουσες είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αναιρέσιμες. Δηλαδή, το μίγμα που εξετάζεται αποτελείται από : ανακυκλωμένο ασφαλτικό και ανακυκλωμένο σταθεροποιημένο υλικό στο οποίο προστέθηκε αφρώδης άσφαλτος, τσιμέντο και άμμος. Το συνδετικό υλικό του μίγματος είναι κυρίως ο ασφαλτοπολτός ο οποίος όμως δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος και δεν περιβάλλει όλα τα αδρανή (καθαρά ή συσσωματώματα). Με την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου είναι πολύ πιθανόν τα μη συνδεδεμένα αδρανή να μετακινούνται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων, επιπλέον εκείνων που οφείλονται στο ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Θα μπορούσε η καμπύλη μεταβολής των παραμενουσών παραμορφώσεων να χωριστεί σε τέσσερα τμήματα τα οποία στο σύνολο τους φανερώνουν τα στάδια αλλαγής των χαρακτηριστικών του υλικού λόγω της επαναλαμβανόμενης φόρτισης: (α) *μεγάλης αρχικής αύξησης*: Οι πρώτες επαναλήψεις θλιπτικού φορτίου προκαλούν μικρομετακινήσεις των ασύνδετων κόκκων οι οποίοι πλησιάζουν ο ένας τον άλλον καλύπτοντας τα κενά μεταξύ τους. Η ύπαρξη των κενών διευκολύνει την μετακίνηση αυτή γι' αυτό και οι παραμορφώσεις αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό, (β) *σταθερής γραμμικής αύξησης*: Οι επιπλέον επαναλήψεις του θλιπτικού φορτίου τείνουν να προκαλέσουν επιπλέον μικρομετακινήσεις οι οποίες όμως δεν συμβαίνουν λόγω των τριβών μεταξύ των κόκκων. Οι παραμορφώσεις που καταγράφονται είναι ουσιαστικά του ασφαλτοπολτού ή γενικότερα του συνδεδεμένου τμήματος του υλικού γι' αυτό και αυξάνονται με σταθερό ρυθμό, (γ) *μεταβαλλόμενης καμπύλης αύξησης*: Τα ανομοιόμορφα κατανεμημένα στοιχεία του ασφαλτοπολτού ρηγματώνονται σταδιακά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρορωγμών στο δοκίμιο οι οποίες όσο προχωρά η δοκιμή αρχίζουν να διαδίδονται όλο και περισσότερο, (δ) *κατακόρυφης ραγδαίας αύξησης*. Το μήκος των ρωγμών αυξάνεται ραγδαία, οι ρωγμές γίνονται τελείως ασταθής και τελικά οδηγούν στη θραύση του υλικού.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται και ένα μέτρο παρόμοιο με το μέτρο δυσκαμψίας, το οποίο όμως επειδή εκτιμάται με βάση την κατακόρυφη παραμόρφωση και όχι την οριζόντια δεν είναι το μέτρο δυσκαμψίας του δοκιμίου. Η μεταβολή του όμως στο βαθμό που παρομοιάζει την μεταβολή της δυσκαμψίας του υλικού παρουσιάζει ενδιαφέρον. Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή αυτή σε σχέση με τις επαναφορτίσεις. Παρατηρείται ότι αρχικά το μέτρο αυξάνει υποδηλώνοντας ελαφρώς κάποια «σταθεροποίηση» του υλικού. Στη συνέχεια το μέτρο είναι πρακτικά σταθερό και κατόπιν αυξάνει σταθερά μέχρι όπου αυξηθεί έντονα οπότε και συμβαίνει η θραύση του δοκιμίου. Επιπλέον παρατηρείται ότι η απότομη αύξηση των παραμορφώσεων μονίμων και αναιρέσιμων είναι σύγχρονη με την απότομη μείωση του μέτρου, όπως ακριβώς αναμένεται λόγω αύξησης της ρηγμάτωσης. Αυτό διακρίνεται και σε αρκετές περιπτώσεις γρήγορης θραύσης του δοκιμίου (μικρού αριθμού N - μεγάλης σ_{xmax}) όπου το μέτρο μειώνεται σχεδόν από την αρχή της δοκιμής ακριβώς διότι η ρηγμάτωση λαμβάνει μέρος αρκετά νωρίς.

Σημειώνεται ότι έγινε και εφαρμογή του απλοποιημένου Λόγου Ενέργειας με σκοπό την εκτίμηση του αριθμού επαναφορτίσεων που θεωρούνται ότι σηματοδοτούν την αρχή της ρηγμάτωσης, δεν παρουσιάζεται όμως στην συγκεκριμένη ανακοίνωση λόγω περιορισμένου χώρου.



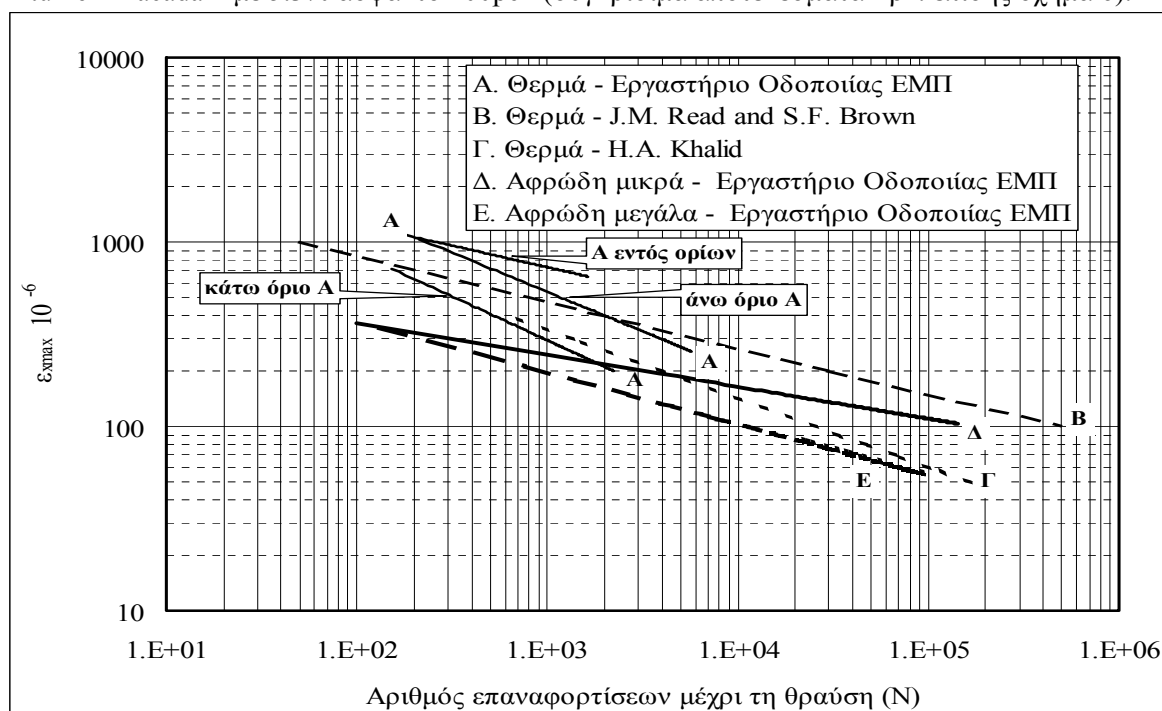
Σχήμα 5. Τυπικό διάγραμμα μεταβολής καταγραφόμενου μέτρου δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης.

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.

Τα αποτελέσματα της παρούσης έρευνας συγκρίνονται καταρχήν με τα αποτελέσματα έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ και περιλαμβάνει δοκιμές κόπωσης συμβατικών ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα – Σ.Κόλιας (1995). Στα πλαίσια της παραπάνω έρευνας εξετάστηκαν σε κόπωση 3 συμβατικά ασφαλτομίγματα Α265 στρώση κυκλοφορίας τύπου Γ στο άνω, μέσω και κάτω όριο της κοκκομετρικής διαβάθμισης με 5-6% άσφαλτο 100pen. Οι δοκιμές κόπωσης έγιναν σε αντιδιαμετρική θλίψη υπό ελεγχόμενη τάση στην ίδια μηχανή του Nottingham Asphalt Tester σύμφωνα με τις οδηγίες του Link Bitutest Project Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) και σε θερμοκρασίες 25°C και 30°C. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, ο τύπος του ασφαλτομίγματος καθώς και η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντοχή κόπωσης του μίγματος.

Στο σχήμα 6 διακρίνονται οι καμπύλες κόπωσης των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων της παλαιότερης έρευνας και των αφρώδων ασφαλτομιγμάτων της παρούσης. Όπως παρατηρείται, οι καμπύλες των συμβατικών ασφαλτομιγμάτων είναι πιο πάνω από αυτές των αφρώδων - για το ίδιο ϵ_{xmax} ο αριθμός N του αφρώδους ασφαλτομίγματος είναι μικρότερος από τον αριθμό N του συμβατικού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και η μεγαλύτερη κλίση των συμβατικών καμπυλών - για $\epsilon_{xmax}=100 \times 10^{-6}$ τα συμβατικά ασφαλτομίγματα αστοχούν γρηγορότερα από τα αφρώδη, ενώ για $\epsilon_{xmax}=300 \times 10^{-6}$ τα συμβατικά ασφαλτομίγματα αστοχούν αργότερα από τα αφρώδη. Η

σημαντική διαφοροποίηση των καμπυλών των συμβατικών μιγμάτων λόγω διαφορετικής κοκκομετρίας δηλώνει την αδυναμία ορισμού μίας και μοναδικής καμπύλης κόπωσης για όλα τα συμβατικά ασφαλτομίγματα και την σκοπιμότητα ορισμού μίας ζώνης καμπυλών κόπωσης. Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα στο κάτω όριο αυτής της ζώνης βρίσκονται τα ασφαλτομίγματα αφρώδους ασφάλτου. Η συμπεριφορά σε κόπωση συμβατικών ασφαλτομιγμάτων που χρησιμοποιούνται στην Μ. Βρετανία έχει διερευνηθεί και από τους J.M.Read και S.F.Brown (1994) με την εκτέλεση δοκιμών κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη υπό ελεγχόμενη τάση στην συσκευή NAT. Ανάμεσα στους διάφορους τύπους ασφαλτομιγμάτων που εξετάστηκαν ήταν και μίγματα Dense Bitumen Macadam με 4.7% άσφαλτο 100pen (συγκρίσιμα αποτελέσματα - βλ. Σχήμα 6). Παράλληλα με την μελέτη των Read-Brown, δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη ελεγχόμενης τάσης εκτελέστηκαν και από τον Η.Α. Khalid (2000), σε ασφαλτομίγματα Dense Bitumen Macadam με 5.3% άσφαλτο 100pen (συγκρίσιμα αποτελέσματα - βλ. επίσης σχήμα 6).

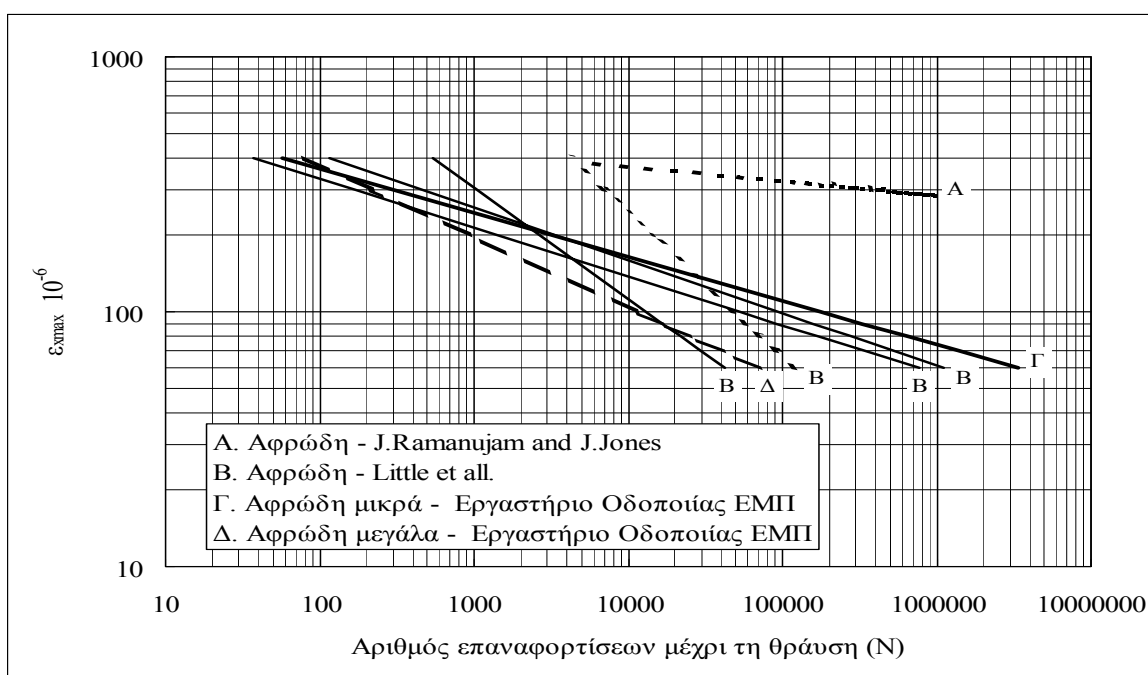


Σχήμα 6. Σύγκριση νόμων κόπωσης συμβατικών και αφρώδων ασφαλτομιγμάτων δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη

Δεδομένης της διαφοροποίησης λόγω κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι αναμενόμενη και η διαφοροποίηση των καμπυλών λόγω ποσοστού ασφάλτου και άλλων ενδεχομένως διαφορών μεταξύ των μιγμάτων του σχήματος 6, που δεν είναι δυνατόν να διερευνηθούν επί του παρόντος ελλείψει περισσότερων στοιχείων σχετικών με την σύνθεση των μιγμάτων και προέλευση των υλικών. Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα αποτελέσματα της ελληνικής έρευνας κόπωσης συμβατικών ασφαλτομιγμάτων συμπίπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αποτελέσματα των αγγλικών ερευνών. Η γενική εικόνα του σχήματος 6 είναι ότι οι καμπύλες συμβατικών ασφαλτομιγμάτων με "κοινά χαρακτηριστικά" διαμορφώνουν μία ζώνη καμπυλών στο κάτω όριο της οποίας φαίνεται να ανήκουν τα αφρώδη ασφαλτομίγματα. Γεγονός που ενισχύεται και από τις παρατηρήσεις του A.F. Bissada (1987), που υποστηρίζει ότι η αντοχή σε κόπωση των αφρώδων ασφαλτομιγμάτων είναι μικρότερη από την αντοχή των εν θερμώ ασφαλτομιγμάτων. Αντίθετα, οι S. Maccarrone, G. Holleran και D.J. Leonard (1993), αναφέρουν ότι τα χαρακτηριστικά κόπωσης των συμβατικών είναι παρόμοια με αυτά των αφρώδων, πράγμα που σύμφωνα με το σχήμα 6 μπορεί να συμβεί για μικρά επίπεδα ανηγμένων παραμορφώσεων.

Μία άλλη ερευνητική εργασία σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων με αφρώδη άσφαλτο εκτελέστηκε από τους D.N.Little, J.W.Button και J.A.Epps (TRR911). Στην εργασία αυτή μεταξύ άλλων εξετάστηκαν 4 διαφορετικά μίγματα των οποίων υπολογίστηκε το μέτρο δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη και η αντοχή σε κόπωση σε κάμψη υπό ελεγχόμενη τάση. Τα αδρανή των ασφαλτομιγμάτων ήταν φυσικά αδρανή για τα τρία μίγματα και αδρανή "εργαστηριακών προδιαγραφών" για το τέταρτο μίγμα. Το μέτρο δυσκαμψίας των εξεταζομένων μιγμάτων στους 20°C κυμαίνεται μεταξύ 700 και 3500MPa. Σύμφωνα με τις δοκιμές μέτρου δυσκαμψίας, που προηγήθηκαν των δοκιμών κόπωσης, κατά Μέσο Ορο το μέτρο δυσκαμψίας των αφρώδων ασφαλτομιγμάτων της παρούσας εργασίας κυμαίνονται από 1500 – 4500MPa, δηλαδή είναι σχετικά μέσα στο εύρος 700-3500MPa,

Στο σχήμα 7 συγκρίνονται οι καμπύλες κόπωσης των Little et all (δοκιμές κόπωσης σε κάμψη) και οι καμπύλες κόπωσης της παρούσης έρευνας (δοκιμές κόπωσης σε αντιδιαμετρική θλίψη), λαμβάνοντας βέβαια υπόψη το γεγονός ότι πρόκειται για διαφορετικές δοκιμές. Εύκολα διακρίνεται η τάση των καμπυλών να σχηματίζουν μία κοινή ζώνη, με εξαίρεση, ίσως, την διακεκομμένη καμπύλη που αντιστοιχεί στο μίγμα με το χαμηλότερο μέτρο δυσκαμψίας (700MPa) και στο μίγμα με αδρανή "εργαστηριακών προδιαγραφών", όπως αναφέρεται, και όχι φυσικών που είχαν τα υπόλοιπα μίγματα. Παράλληλα στην εργασία των Little et all. γίνεται και μία σύγκριση με τον νόμο κόπωσης που διέπει διάφορα συμβατικά ασφαλτομίγματα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης δεν ήταν και τόσο ενθαρρυντικά για τα αφρώδη ασφαλτομίγματα. Η αντοχή σε κόπωση των αφρώδων ασφαλτομιγμάτων παρουσιάστηκε πολύ χαμηλότερη από αυτή των συμβατικών και συμπερασματικά τα αφρώδη ασφαλτομίγματα κρίθηκαν κατάλληλα για υλικά στρώσεων βάσης και υπόβασης.



Σχήμα 7. Σύγκριση νόμων κόπωσης αφρώδων ασφαλτομιγμάτων δοκιμές σε αντιδιαμετρική θλίψη και σε κάμψη.

Οι J.M. Ramanujam και J.D.Jones (2000) αναφέρουν δοκιμές κόπωσης σε κάμψη σε αφρώδη ασφαλτομίγματα, των οποίων τα μέτρα δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη κυμαίνονται μεταξύ 3800MPa έως 10500MPa. Η καμπύλη κόπωσης διακρίνεται στην πάνω περιοχή του σχήματος 7 πιθανότατα λόγω του ότι οι δοκιμές ήταν υπό ελεγχόμενη παραμόρφωση και των ιδιαίτερα

μεγάλων μέτρων δυσκαμψίας. Αλλωστε όπως αναφέρεται και από τους ίδιους η αντοχή των εξεταζομένων αφρωδών ασφαλτομιγμάτων δείχνει στην εργασία αυτή να είναι μεγαλύτερη από των συμβατικών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις σε έμμεσο εφελκυσμό από αντιδιαμετρική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων. Τα αποτελέσματα γενικά είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα άλλων ανάλογων ερευνών. Η καμπύλη κόπωσης επηρεάζεται σημαντικά από το ύψος του δοκιμίου, παρατήρηση που επιβεβαιώθηκε επίσης και σε ανάλογες δοκιμές με θερμά ασφαλτομίγματα. Γενικά φαίνεται ότι η καμπύλη κόπωσης των αφρωδών ασφαλτομιγμάτων που εξετάστηκαν είναι προς την περιοχή του κατώτερου ορίου της ζώνης των καμπυλών κόπωσης των θερμών ασφαλτομιγμάτων. Υποδεικνύεται έτσι ότι η συμπεριφορά τους σε κόπωση είναι υποδεέστερη εκείνης των θερμών ασφαλτομιγμάτων, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλες ανάλογες έρευνες.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Bissada, Amir F., 1987. Structural response of foamed –asphalt -sand mixtures in hot environments. *Asphalt Materials and Mixtures, Washington DC*, TRB TRR1115, pp. 134-149.

Khalid, H. A., 2000. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials. *Materials and Structures*, V33, pp.457-465.

Κόλιας, Σ., Κατσάκου, Μ., Κυρκιλή Ε., 1995. Αντοχή σε κόπωση ελληνικών ασφαλτομιγμάτων. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, ΤΕΕ – Περιφερειακό τμήμα Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας, Λάρισα, Τόμος Ι, σελ. 376-385.

Link Bitutest Project Indirect Tensile Fatigue Test (ITFT) Protocol version 1.0.

Little, D. N., Button, J. W., Epps, J. A., Structural properties of laboratory mixtures containing foamed asphalt and marginal aggregates, *TRR911*, pp104.

Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard, D. J., 1993. Bitumen stabilization – A new approach to recycling pavements. *AAPA Members Conference*.

Ramanujam, J. M., Jones, J. D., 2000. Characterisation of foamed bitumen stabilization. *Road System & Engineering Technology Forum*

Read, J. M., Brown, S. F., 1994. Fatigue characterisation of bituminous mixes using a simplified test method. *Performance and durability of bituminous materials, Proc. of Symposium, Un. Leeds*.