

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΝΟ: 16381.

ΚΩ: 16260.



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ

ΜΑΡΘΑ ΚΑΤΣΑΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Σ. ΚΟΛΙΑΣ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2005

στη μητέρα και στον πατέρα μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Απευθύνονται ευχαριστίες στην Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδας, για την παραχώρηση δεδομένων ερευνητικού προγράμματος, στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου (ΕΚΕΤ) για τη διεξαγωγή ορισμένων από τις δοκιμές που παρουσιάζονται στη διατριβή και στο εργαστήριο Οδοποιίας για την παροχή της απαραίτητης υλικοτεχνικής υποδομής, τόσο για τη διεξαγωγή των δοκιμών όσο και για τη συγγραφή.

Ευχαριστώ τους κ.κ. Γ. Κανελλαΐδη, Καθηγητή ΕΜΠ και Α. Λοΐζο, Αν. Καθηγητή ΕΜΠ, μέλη της τριμελούς Επιτροπής, για τις υποδείξεις τους και τον χρόνο που αφιέρωσαν. Χωρίς τη βοήθειά τους, δε θα ήταν δυνατή η παρουσίαση της διατριβής αυτής στον παρόντα χρόνο.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα :

Τον συνάδελφο Τάσο Καραχάλιο, για τη βοήθειά του στη διεξαγωγή των δοκιμών και στην προετοιμασία ορισμένων από τα σχήματα που παρουσιάζονται, καθώς και για τη σημαντική συνδρομή του στην ανεύρεση βιβλιογραφίας.

Τη συνάδελφο Πέπη Κυρκιλή, για τη βοήθειά της στη διατριβή και για τη μακρόχρονη συνεργασία μας, η οποία υπήρξε αρμονική, δημιουργική και αποτέλεσε τη βάση για μία θερμή φιλία.

Τον Κώστα Ζόμπολα, για τη βοήθειά του τόσο στην παρασκευή των δοκιμών όσο και στη διεξαγωγή όλων των δοκιμών. Η προθυμία, η μεθοδικότητα και η επιμέλεια που επέδειξε καθιστούν τη συνεισφορά του πολύτιμη.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την κατανόηση που έδειξε για την "απουσία" μου κατά το κρίσιμο διάστημα της συγγραφής της διατριβής αυτής και για τη βοήθεια και την ηθική τους στήριξη. Χωρίς τη συμπαράσταση, την κατανόηση και την ανοχή τους, θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της διατριβής.

Για το τέλος, άφησα τον επιβλέποντα της διατριβής, κ. Στυλιανό Κόλια, Αν. Καθηγητή ΕΜΠ. Από το 1991 που ολοκλήρωσα την πρώτη φάση των σπουδών μου, με επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας τον ίδιο, είχα τη χαρά και την τιμή να συνεργάζομαι μαζί του. Στην μακρόχρονη συνεργασία μας υπήρξε ένας εξαιρετικός δάσκαλος, πάντα πρόθυμος να μεταφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του και ταυτόχρονα να δώσει το έναυσμα για περαιτέρω γόνιμες αναζητήσεις. Η παρουσία του και ο τρόπος δουλειάς του συντέλεσαν καθοριστικά στην απόφασή μου για την εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Για τη συμβολή του στη διατριβή αυτή και για όλα τα χρόνια της συνεργασίας μας, του οφείλω ένα θερμό ευχαριστώ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διατριβής είναι η διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος. Εξετάζεται ένα ευρύ φάσμα υλικών, που μπορεί να βρεθούν στην πράξη σε εργασίες επιτόπου ανακύκλωσης, με αναλογίες % κ.β. θραυστού αμμοχάλικου (ΘΑ) προς φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (ΦΑ) :

100/0 (100 % καθαρό αμμοχάλικο, ΚΘΑ), 75/25, 50/50, 25/75 και 0/100 (100 % αμιγές φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα). Τόσο το θραυστό όσο και το φρεζαρισμένο υλικό έχουν περίπου ίδιες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και μέγιστο κόκκο 19 mm.

Όλα τα μίγματα παρασκευάστηκαν με το ίδιο ποσοστό υγρασίας, με δύο ποσοστά τσιμέντου, 3 % και 5 % κ.β. αδρανών υλικών.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι :

- ο Αντοχή σε θλίψη (κύβου, ισοδύναμου κύβου, μονοαξονική πρίσματος)
- ο Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό
- ο Αντοχή σε κάμψη
- ο Αντοχή σε διάρρηξη (έμμεσος εφελκυσμός)
- ο Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, εφελκυσμό και σε κάμψη
- ο Αντοχή σε κόπωση από κάμψη (σε 3 υλικά 100/0, 50/50, 0/100)

Οι ανακυκλωμένες με τσιμέντο στρώσεις είναι εκείνες, που λόγω του σχετικά μεγάλου μέτρου ελαστικότητάς τους και του μεγάλου πάχους τους (συνήθως 20 - 35 cm) είναι οι πλέον δύσκαμπτες στρώσεις του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια στις στρώσεις αυτές αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις, κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος. Η ηλικία των 60 ημερών θεωρήθηκε ότι είναι αντιπροσωπευτική των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων, κατά τη φάση αυτή. Επίσης, τις πρώτες ημέρες μετά την κατασκευή, οι στρώσεις αυτές δεν είναι προστατευμένες (με ασφατικές στρώσεις) και κινδυνεύουν από πρόωμη ρηγμάτωση, κυρίως λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών καθ' ύψος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε και η ηλικία της μίας ημέρας για τη διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν.

Εκτός των μηχανικών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν, διερευνάται επίσης η επίδραση :

- ο Της μεταβολής της προέλευσης του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος
- ο Της μεταβολής της προέλευσης του θραυστού αμμοχαλικού
- ο Της παιτάλης που βρίσκεται προσκολλημένη στην επιφάνεια των αδρανών

Επίσης εξετάζεται :

- ο η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας των διαφόρων μιγμάτων, για να εκτιμηθεί η επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών στην συμπεριφορά των οδοστρωμάτων που κατασκευάζονται με τη μέθοδο αυτή.
- ο Ο ερπυσμός των διαφόρων μιγμάτων (για μία περιορισμένη χρονική διάρκεια φόρτισης - 48 έως 72 ώρες - σε ηλικία 1 και 35 ημερών) για να δοθούν τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση των θερμοκρασιακών τάσεων ημερήσιου κύκλου.

Αποδεικνύεται ότι, αντίθετα με τη συχνά εφαρμοζόμενη πρακτική, τα μίγματα αμμοχαλικού και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, που προέρχονται από εργασίες επιτόπου ανακύκλωσης συνήθων ευκάμπτων οδοστρωμάτων, πρέπει να θεωρούνται ως "νέα" υλικά οδοστρώσεως, με μηχανικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν από αυτά των κατεργασμένων με τσιμέντο αμμοχαλικών (ΚΘΑ). Τα πειραματικά αποτελέσματα έδωσαν τη δυνατότητα να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις και ερμηνείες σχετικά με την συμπεριφορά των ανακυκλωμένων μιγμάτων και τον μηχανισμό αστοχίας του υλικού στις διάφορες δοκιμές.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών επηρεάζονται από την περιεκτικότητα του μίγματος σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα.

Η επίδραση της περιεκτικότητας του μίγματος σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα εξετάζεται συστηματικά και εξάγεται το συμπέρασμα, ότι όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα αυξάνει :

- ο Η αντοχή γενικά μειώνεται.

Η αντοχή σε θλίψη μειώνεται εντονότερα από την αντοχή σε εφελκυσμό ή σε κάμψη. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε

εφελκυσμό ή σε κάμψη είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη σύνταξη ορθών Προδιαγραφών κατασκευής και οδηγιών σύνταξης μελέτης σύνθεσης και διαστασιολόγησης, έτσι ώστε τα υλικά αυτά να μην προδιαγράφονται μόνο με απαιτήσεις ως προς την αντοχή σε θλίψη, που είναι η συνήθης πρακτική.

- ο Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται.
Η μείωση είναι ταχύτερη από τη μείωση της αντοχής δηλ. ο λόγος E/f μειώνεται.
- ο Ο ερπυσμός αυξάνει. Επομένως, στον υπολογισμό των τάσεων από θερμοκρασιακές μεταβολές θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο μειωτικός αυτός παράγοντας, λόγω χαλάρωσης.
- ο Η παραμόρφωση κατά τη θραύση αυξάνει (μέγιστη παραμόρφωση σε εφελκυσμό και μέγιστο βέλος σε κάμψη). Ο λόγος f/E του υλικού αυξάνει και η επιρρέπεια σε ρηγμάτωση ελαττώνεται.
- ο Ο λόγος της αναπτυσσόμενης τάσης σ , προς την αντοχή f , φαίνεται ότι μειώνεται για τα εξετασθέντα μίγματα (σε ηλικία 60 ημερών) και τις εξετασθείσες περιπτώσεις οδοστρωμάτων. Μείωση του λόγου σ/f σημαίνει βελτίωση της απόκρισης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων στις διάφορες επιπονήσεις.

Συμπεράσματα ως προς την επίδραση της θερμοκρασίας :

- ο Αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή προκαλεί ανάλογη μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.
- ο Η μείωση των τιμών της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας είναι εντονότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος.

Συμπεράσματα ως προς τη μεταβλητότητα των υλικών :

- ο Τα χαρακτηριστικά των θραυστών υλικών που εξετάστηκαν επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου μίγματος, ενώ η αντοχή σε θλίψη μπορεί να μην επηρεάζεται. Η επικολημένη παιπάλη στην επιφάνεια των χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να επιφέρει μείωση της εφελκυστικής αντοχής κατά 45 % περίπου. Αντίθετα η

μεταβολή της προέλευσης του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, πρέπει όμως η έρευνα να επεκταθεί και σε ασφαλτομίγματα διαφορετικού τύπου από αυτά που εξετάστηκαν.

- ο Αποδεικνύεται ότι μεταβολές στα χρησιμοποιούμενα υλικά μπορεί να επιφέρουν σημαντικές και μη εύκολα προβλέψιμες διαφοροποιήσεις στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, άρα η μελέτη σύνθεσης πρέπει απαραίτητως να γίνεται με τα συγκεκριμένα υλικά που υπάρχουν στο προς ανακύκλωση οδόστρωμα. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη και η τυχόν μεταβλητότητα των επιτόπου υλικών του προς ανακύκλωση οδοστρώματος καθώς και η μεταβλητότητα του πάχους των στρώσεων.

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας παρέχουν ικανά στοιχεία για την εκτίμηση της μεταβλητότητας αυτής.

- ο Η μεταβλητότητα των δοκιμών κόπωσης είναι σημαντικά μειωμένη σε σύγκριση με τη μεταβλητότητα των κοινών κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες κοκκωδών υλικών. Αυτό είναι αξιοσημείωτο πλεονέκτημα που δυνατόν να επιφέρει μείωση του απαιτούμενου πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης, αν αποδειχθεί και από άλλες έρευνες.

Συμπεράσματα από τις δοκιμές σε κόπωση :

- ο Η γραμμή κόπωσης για το υλικό 100/0 είναι σύμφωνη με αποτελέσματα προγενέστερων ερευνών, γεγονός που προσδίδει αξιοπιστία στη μέθοδο δοκιμής που ακολουθήθηκε και στα αποτελέσματά της.
- ο Η καμπύλη κόπωσης για το υλικό 50/50 σε σύγκριση με το υλικό 100/0 παρουσιάζει μικρή δεξιόστροφη περιστροφή περί το σημείο ($N=1$, $\sigma/f=1$) και για αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων $N=10^6$ μικρότερο επίπεδο φόρτισης σ/f . Το ίδιο φαινόμενο, αλλά σε πιο έντονο βαθμό, παρατηρείται και για το υλικό (0,100).

Η πειραματική εργασία συμπληρώνεται με ανάλυση οδοστρώματων με τυπικές διατομές των ανακυκλωμένων οδοστρώματων και με μηχανικά χαρακτηριστικά εκείνα που προσδιορίστηκαν από την παρούσα εργασία. Με τον τρόπο αυτό γίνεται μία προσπάθεια προς την κατεύθυνση της διαστασιολόγησης και εκτίμησης της συμπεριφοράς των οδοστρώματων αυτών με εργαστηριακές δοκιμές.

SUMMARY

MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT BOUND RECYCLED MIXTURES OF CRUSHED AGGREGATES AND MILLED BITUMINOUS MATERIALS

The objective of the thesis is the investigation of the mechanical properties of mixtures of crushed aggregates (CA) and milled bituminous materials (MBM) recycled with cement. CA and MBM (milled bituminous asphaltic concrete) of similar grading and 19 mm max particle size, were mixed in the laboratory in proportions b.m 100/0 (conventional cement bound material) 75/25, 50/50, 25/75, and 0/100 with 3 % and 5 % b.m cement. The mixes produced in this way covered a wide range of materials, which can be used in deep in-situ cold recycling with cement. The water used was the same for all mixes 5.2 b.m of the dry materials plus cement.

The mechanical properties studied include:

- Compressive strength (cube, equivalent cube, uni-axial prism)
- Uni-axial tensile strength
- Flexural strength
- Cylinder splitting tensile strength
- Modulus of elasticity (in compression, tension, and flexure)
- Fatigue strength in flexure (for 3 mixes 100/0, 50/50, 0/100)

The pavement layers which are constructed using cement recycled materials are usually very stiff due to a) the relative high modulus of elasticity of these materials and b) the big thickness of the recycled layer (200 - 350 mm). Therefore, the stresses induced by traffic loading at the bottom of these layers determine the critical situation during the service life of the pavement. The age of 60 days was selected as the age representing the mechanical properties of the cement recycled material during this phase. The recycled layers are usually not covered by an asphalt layer during the first days after the compaction and this situation causes the development of temperature

common with conventional cemented layers. In order to be able to study the early age cracking susceptibility of cement recycled layers the mechanical properties of these materials were also investigated at an age of 1 day.

The research also includes the investigation of the influence of the following factors on the above mentioned properties:

- The change of the milled bituminous material source
- The change of the crushed aggregate source
- The presence of fine particle adhered on the coarse aggregate surface
- The temperature of the material during testing in order to estimate the effect of climatic conditions on the behaviour of cement recycled pavements

In addition, in order to produce the necessary data for the study of the effect of diurnal temperature induced stresses, creep tests in compression were also carried out for a limited loading duration (up to 48 or 72 hours) at an age of 1 and 35 days.

The main conclusion of the research is that contrary to the practice often followed, the cement recycled materials should be considered as "new" materials with their own material properties, which are different to those of the conventional cement bound granular materials. The laboratory tests gave the opportunity to identify and explain the reasons of these differences.

More specifically the most important conclusions of the research are:

Influence of MBM content :

Increase of the MBM content causes :

- Strength decrease
However, compressive strength decreases faster than tensile or flexural strength. This means that for the same compressive strength, the tensile strength or flexural strength is greater as the MBM content in the mix increases. This fact has serious implications for specification preparation and for mix design and pavement design instructions.
- Modulus of elasticity decrease.

The modulus decrease is faster than the strength decrease, i.e. the ratio E/f decreases.

- Creep increase. Therefore, this stress reducing factor should be taken into consideration in the computation of temperature induced stresses.
- Tensile or flexural strain at failure increase. The ratio f/E increases and crack susceptibility decreases.
- Decrease of the ratio σ/f of the traffic induced stresses σ to flexural strength f (for the materials tested and the pavement structures analysed). The decrease of the ratio σ/f means that the response of the recycled pavements to traffic stresses is improved.

Influence of specimen temperature :

- Temperature increase causes decrease on strength and modulus of elasticity. The rate of decrease of both strength and modulus does not seem to be different.
- The decrease in strength and modulus is greater the higher is the proportion of the MBM in the mix.

Influence of materials variability :

- Tensile strength and modulus of elasticity are strongly influenced by the crushed limestone characteristics (source, percentage of fine materials) while compressive strength may not be influenced. The fine material adhered on the medium and coarse aggregate surface may reduce the tensile strength up to 45 %. On the contrary the MBM source does not seem to significantly influence strength and modulus of elasticity. However, the research should be extended to MBM of different types of asphalt mixes.
- The changes of the materials used for recycling may cause considerable changes in the recycled material properties and therefore, it is very important to carry tests on the actual in-situ materials. The variability of the in-situ materials and layer thicknesses should be taken into consideration. The research results may be used to estimate the in-situ variability.
- The variability of the fatigue tests is significantly lower than the variability of the tests on conventional cement bound materials and this may result in reduced recycled layer thickness.

Influence of repeated flexural loading (fatigue tests) :

- The fatigue (S - N) line for material 100/0 is very close to lines of other research works for conventional cement bound granular materials and this increases the confidence on the tests carried out.
- The endurance curves for materials 50/50 show a small rotation through the point ($N=1$, $\sigma/f=1$) and for $N=10^6$ load repetitions the loading level σ/f decreases. Similar but bigger changes are found for the material 0/100.

The laboratory work is complemented by a systematic analysis of typical cement recycled pavement structures using modulus of elasticity values measured in the laboratory, in an attempt to contribute to a more precise pavement design and a better estimate of the performance of this type of pavements.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ (ΚΘΑ)	2
1.3 ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	5
1.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	10
2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΓΝΩΣΗΣ.....	16
2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟΔΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	16
2.1.1 Κατεργασμένα - σταθεροποιημένα με τσιμέντο αδρανή υλικά (συμβατικού τύπου).....	16
2.1.2 Ανακυκλωμένα με τσιμέντο υλικά ευκάμπτων οδοστρωμάτων	26
2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ	30
2.2.1 Δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό	30
2.2.2 Δοκιμή σε κάμψη	41
2.2.3 Δοκιμή σε κόπωση	44
3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	51
3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	51
3.1.1 Υλικά	52
3.1.2 Προετοιμασία των υλικών - Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	54
3.1.3 Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις μιγμάτων.....	59
3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	65
3.3 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ	67
3.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ - ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	67
3.5 ΔΟΚΙΜΕΣ.....	70
3.5.1 Δοκιμές σε θλίψη	70

3.5.1.1	Κύβου	70
3.5.1.2	Ισοδύναμου κύβου	70
3.5.1.3	Μονοαξονική θλίψη - Μέτρο ελαστικότητας	71
3.5.2	Δοκιμές σε εφελκυσμό	72
3.5.2.1	Κάμψη - Μέτρο ελαστικότητας	72
3.5.2.2	Διάρρηξη	75
3.5.2.3	Μονοαξονικός εφελκυσμός - Μέτρο ελαστικότητας ...	75
3.5.3	Δοκιμές σε κόπωση	83
3.6	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ	84
3.7	ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	84
3.8	ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	85
3.8.1	Συμπληρωματικές δοκιμές	87
4.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	90
4.1	ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	90
4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	113
4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	126
4.4	ΚΟΠΩΣΗ	131
5.	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	136
5.1	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΟΥΣ	136
5.1.1	Συμπεράσματα	145
5.2	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	147
5.2.1	Ηλικία μίας ημέρας	147
5.2.2	Ηλικία εξήντα ημερών	162
5.2.3	Έμμεσος εφελκυσμός (διάρρηξη)	177
5.2.4	Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των αδρανών του μίγματος στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας	181
5.3	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	196

5.3.1	Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή (θλίψη και διάρρηξη)	196
5.3.2	Επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή στην αντοχή (θλίψη, κάμψη) και στο μέτρο ελαστικότητας	209
5.4	ΕΡΠΥΣΜΟΣ.....	218
5.5	ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	224
6.	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ	232
6.1	ΥΛΙΚΟ Ι (100/0)	234
6.2	ΥΛΙΚΟ ΙΙΙ (50/50)	240
6.3	ΥΛΙΚΟ V (0/100)	245
6.4	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	249
6.5	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ	250
7.	ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	261
7.1	ΑΝΤΟΧΗ	261
7.2	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	274
7.3	ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	277
7.4	ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	281
8.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ	288
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ.....	288
8.2	ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ - ΑΝΤΟΧΕΣ.....	292
8.2.1	Τάσεις από φορτία οχημάτων	292
8.2.2	Εκτίμηση των θερμοκρασιακών τάσεων	301
8.3	ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΔΙΕΥΚΡΙΝΗΣΕΙΣ	305
8.3.1	Σύγκριση υλικών με κριτήριο το λόγο σ/ε	305
8.3.2	Παρατηρήσεις ως προς τους διορθωτικούς συντελεστές	313
9.	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	318
9.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	318

9.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	322
10.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	323

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Την τελευταία δεκαετία παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον για επιτόπου ανακύκλωση με τσιμέντο φθαρμένων ευκάμπτων οδοστρωμάτων, ιδιαίτερα στην Ισπανία, Γαλλία, Η.Π.Α, Αυστραλία, Γερμανία, Ν. Αφρική [PIARC 2002]. Το επιστημονικό και τεχνικό ενδιαφέρον για τη μέθοδο αυτή αντανakλάται στη διοργάνωση διεθνών επιστημονικών Σεμιναρίων ή Συμποσίων όπως στη Σαλαμάνκα 2001, στη Βαρσοβία 2002, και στο Παρίσι 2005, με ενδιάμεση οργάνωση διεθνούς Workshop για ανακύκλωση με τσιμέντο, στα πλαίσια του διεθνούς Συμποσίου για δρόμους από σκυρόδεμα, το 2004 στην Κωνσταντινούπολη.

Όπως στην ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης τεκμηριώνεται, Παράγραφος 2.1.2, υπάρχει σημαντική έλλειψη ολοκληρωμένων γνώσεων ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων με τσιμέντο υλικών των ευκάμπτων οδοστρωμάτων. Οι διάφορες εφαρμογές που έως τώρα έχουν πραγματοποιηθεί στηρίζονται σε περιορισμένης έκτασης ερευνητικές εργασίες, που αφορούν τη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής και, σε ορισμένες περιπτώσεις, σε πληροφορίες που αφορούν την κατασκευαστική μέθοδο που ακολουθήθηκε και τη συμπεριφορά του οδοστρώματος για ένα περιορισμένο αριθμό ετών, χωρίς όμως επέκταση σε ανάλυση της συμπεριφοράς αυτής. Οι οδηγίες για τη μελέτη ή ακόμη και οι προδιαγραφές κατασκευής που εφαρμόζονται, στηρίζονται στην πλούσια εμπειρία που υπάρχει από την κατασκευή και τη συμπεριφορά των κατεργασμένων ή σταθεροποιημένων αδρανών ή εδαφικών υλικών, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τις ιδιαιτερότητες των υλικών της ανακύκλωσης, Παράγραφος 1.2, [PIARC 2002, IECA 1999, Abdo 2001]. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί κυρίως στο ότι, οι εφαρμογές μέχρι τώρα έχουν κατά το πλείστον περιοριστεί σε οδοστρώματα με μικρή σχετικώς κυκλοφορία, με μικρό πάχος ανακυκλούμενης ασφατικής στρώσης, γεγονός που καθιστά σχετικά μικρό το ποσοστό συμμετοχής του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα. Η μέθοδος όμως πιστεύεται - και η μέχρι σήμερα εμπειρία υποδεικνύει -

ότι έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί για μία μεγάλη ποικιλία ποσοστών συμμετοχής φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα, όπως επίσης και σε οδοστρώματα με βαριά κυκλοφορία ή οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων. Για να γίνει όμως αυτό δυνατό, χρειάζεται πιο συστηματική έρευνα στις μηχανικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων με τσιμέντο υλικών, παράλληλα βέβαια με πειραματικές εφαρμογές σε πραγματικά οδοστρώματα.

Η διατριβή αυτή είναι μία προσπάθεια συμβολής στην κάλυψη ορισμένων ελλείψεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με :

- ο συστηματική εργαστηριακή έρευνα, η οποία περιλαμβάνει μετρήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών σε ένα ευρύ φάσμα ανακυκλωμένων με τσιμέντο υλικών
- ο ανάλυση των επιπλοκών οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν ανακυκλωμένες με τσιμέντο στρώσεις και μία πρώτη εκτίμηση της επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών που μετρήθηκαν στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων αυτών.

Στα επόμενα γίνεται ανάλυση των διαφορών των ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και ασύνδετου αμμοχαλικού από τα συμβατικά κατεργασμένα με τσιμέντο θραυστά αμμοχαλικά (ΚΘΑ) για να εστιαστεί η εργαστηριακή προσπάθεια στα κατάλληλα θέματα. Με βάση την επιπλοκή των ανακυκλωμένων με τσιμέντο οδοστρωμάτων, προσδιορίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά που πρέπει να μετρηθούν και να διερευνηθούν, καθώς και οι παράμετροι που πρέπει να εξετασθούν. Τελικά καθορίζονται και επιλέγονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πρέπει να εκτελεστούν λαμβάνοντας υπόψη και τις δυνατότητες του εργαστηρίου.

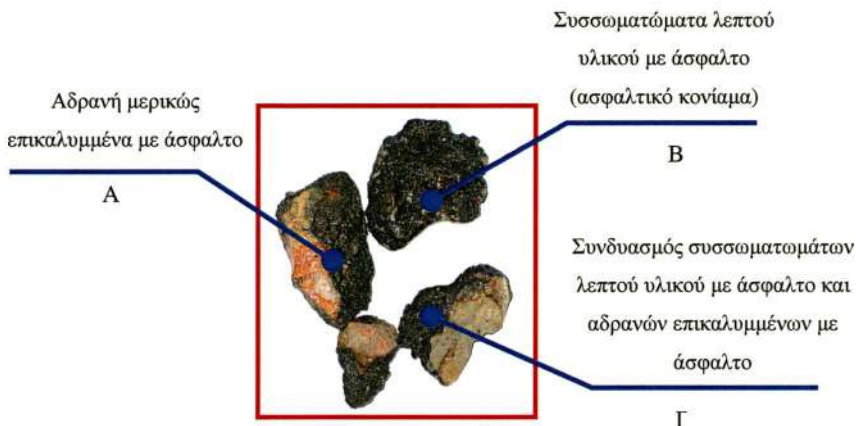
1.2 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΘΡΑΥΣΤΑ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ (ΚΘΑ)

Στη διατριβή αυτή ακολουθείται η ονοματολογία και οι ορισμοί που υιοθετήθηκαν στην Προσωρινή Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή ΠΕΤΕΠ 05-03-05-17-01

"Οδοστρώσια από τσιμεντόδετο ανακυκλωμένο μίγμα φρεζαρισμένων ασφατικών και υποκείμενων στρώσεων" [Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. - ΠΕΤΕΠ 05-03-05-17-01 2004].

Φρεζαρισμένο υλικό (Φ.Υ.) σύμφωνα με την Προσωρινή Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή, ΠΕΤΕΠ 05-0305-17-01, ορίζεται το υλικό που προκύπτει μετά τη διέλευση του ειδικού μηχανήματος ανακύκλωσης και μπορεί να αποτελείται από τα υλικά μίας ή περισσότερων στρώσεων του υπάρχοντος οδοστρώματος, δηλ. από θρυμματισμένο ασφαλτόμιγμα ή από μίγμα θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος με αναμοχλευμένο αμμοχάλικο ή άλλο υλικό που αποτελεί τις υποκείμενες του ασφαλτοτάπητα στρώσεις, χωρίς να έχουν ολοκληρωθεί οι διαδικασίες της ανακύκλωσης, δηλ. η ανάμιξη με τσιμέντο και νερό, η διάστρωση, η συμπίκνωση και η συντήρηση. Ειδικότερα, αν το υλικό που προκύπτει μετά τη διέλευση του μηχανήματος ανακύκλωσης αποτελείται μόνον από ασφαλτόμιγμα θα ονομάζεται φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, (Φ.Α.), [Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. - ΠΕΤΕΠ 05-03-05-17-01 2004].

Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα αποτελείται κυρίως από αδρανή υλικά, πλήρως ή μερικώς περιβεβλημένων με άσφαλτο, από συσσωματώματα λεπτών αδρανών υλικών με άσφαλτο καθώς και από συνδυασμό των δύο παραπάνω υλικών, Φωτ. 1.1, [Kolias and Katsakou 2004].



Φωτογραφία 1.1 : Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, [Kolias and Katsakou 2004]

Από προηγούμενη έρευνα [Kasselouri - Rigoroulou et al 2003], έχει αποδειχτεί ότι η συνάφεια του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος με το τσιμέντο δεν φαίνεται να διαφέρει ποιοτικά από εκείνη του θραυστού αμμοχάλικου με το τσιμέντο. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σταθεροποιημένου με τσιμέντο φρεζαρισμένου υλικού δεν διαφοροποιούνται από αυτά του κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου (Κ.Θ.Α.), με την εισαγωγή σημαντικού ποσοστού φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα. Πράγματι η παραδοχή αυτή γίνεται σε πολλές Προδιαγραφές, Πρότυπα ή Οδηγίες χωρών που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ψυχρής επιτόπου σε βάθος ανακύκλωσης ασφαλικών οδοστρωμάτων με τσιμέντο [MOPU 2001, Piarc 2002]. Εντούτοις, αυτό μόνο κατά προσέγγιση είναι αληθές, αφού το ΦΥ έχει σημαντικές διαφορές στα μηχανικά χαρακτηριστικά από τα αμμοχάλικα που αποτελούν τα αδρανή των ΚΘΑ.

Προφανώς, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ΦΑ) στο μίγμα, τόσο περισσότερο διαφοροποιούνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ανακυκλωμένου μίγματος από εκείνα των Κ.Θ.Α.

Ειδικότερα τα ΦΑ σε σύγκριση με τα συμβατικά αδρανή υλικά (αμμοχάλικα θραυστά ή συλλεκτά) παρουσιάζουν κυρίως τις ακόλουθες διαφορές :

Τα συσσωματώματα λεπτών αδρανών υλικών με άσφαλτο (ασφαλικό κονίαμα) έχουν μειωμένη αντοχή και μειωμένο μέτρο ελαστικότητας έναντι των συμβατικών συνήθων αδρανών υλικών οδοστρωσίας. Επίσης, τα αδρανή υλικά τα οποία είναι καλυμμένα με άσφαλτο, μπορεί μεν να αναπτύσσουν ικανοποιητική συνάφεια με τους κόκκους του τσιμέντου που τα περιβάλλει [Kasselouri - Rigoroulou et al 2003], επιτρέπουν όμως την ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια ασφάλτου με τσιμέντο - οι οποίες επηρεάζονται από το πάχος του υμένα της ασφάλτου που περιβάλλει τα αδρανή. Επιπλέον, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος επηρεάζονται από παράγοντες που επηρεάζουν τα ασφαλτομίγματα, κυρίως από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης.

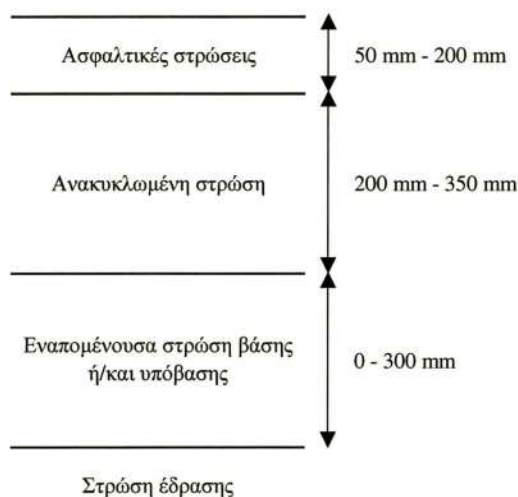
Είναι επομένως λογικά αναμενόμενο ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων με τσιμέντο Φρεζαρισμένων Υλικών θα είναι διαφορετικά από εκείνα των συμβατικών Κατεργασμένων με τσιμέντο Θραυστών Αμμοχαλικών και οι διαφορές θα επηρεάζονται τόσο από το ποσοστό του ΦΑ στο μίγμα όσο και από τη θερμοκρασία του μίγματος κατά τη στιγμή της επιπόνησης και από την ταχύτητα με την οποία εκδηλώνεται η επιπόνηση αυτή.

Ο κύριος σκοπός αυτής της διατριβής είναι η διερεύνηση των επιρροών αυτών και των συνεπειών τους στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων από ανακυκλωμένα με τσιμέντο φρεζαρισμένα υλικά.

1.3 ΕΠΙΠΟΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

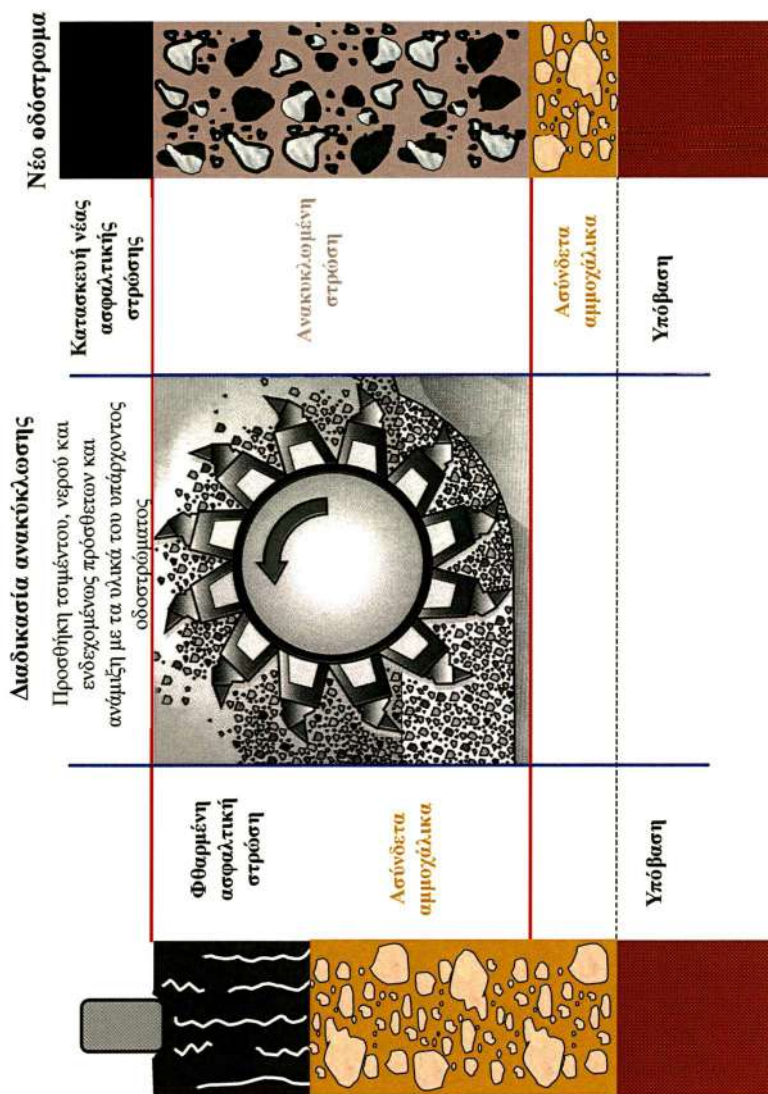
Τα ανακυκλωμένα με τσιμέντο εύκαμπτα οδοστρώματα [PIARC 2002] αποτελούνται συνήθως από : (Σχήμα 1.1)

- ο ασφαλτικές στρώσεις συνολικού πάχους συνήθως 50 mm - 150 mm
- ο την ανακυκλωμένη με τσιμέντο στρώση πάχους συνήθως 200 mm - 350 mm
- ο μία ή περισσότερες στρώσεις από την υπάρχουσα βάση ή υπόβαση του παλαιού οδοστρώματος, τα υλικά της οποίας συνήθως είναι αμμοχάλικα ή άλλα κοκκώδη υλικά με συνολικό πάχος κυμαινόμενο από 0 - 300 mm ή και περισσότερο
- ο από τη στρώση έδρασης του παλαιού οδοστρώματος



Σχήμα 1.1 : Τυπική διατομή ανακυκλωμένου οδοστρώματος

Η διαδικασία της ανακύκλωσης παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 : Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ανακύκλωσης

Η ανακυκλωμένη με τσιμέντο στρώση έχει μέτρο ελαστικότητας (σε αρηγμάτωση κατάσταση) σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των στρώσεων των ασύνδετων αμμοχάλικων και μεγαλύτερο ή τουλάχιστον ίσο με αυτό των ασφαλικών στρώσεων. Το μέτρο ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης σε συνδυασμό με το σχετικά μεγάλο πάχος της, καθιστά τη στρώση αυτή την πλέον δύσκαμπτη στρώση του οδοστρώματος, και επομένως τη στρώση η οποία αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων και κατά συνέπεια εκείνη στην οποία αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις. Οι κρίσιμες τάσεις αναπτύσσονται στον πυθμένα της στρώσης αυτής και είναι εφελκυστικές λόγω κάμψης. Οι τάσεις αυτές συνιστούν ένα από τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη του οδοστρώματος στη φάση της λειτουργίας του, που οδηγούν τη στρώση αυτή σε αστοχία από κόπωση. Καμπτικές είναι επίσης και οι τάσεις που αναπτύσσονται τις πρώτες ημέρες μετά την κατασκευή, λόγω παρεμποδιζόμενων μετακινήσεων (κυρτώσεων) που οφείλονται στην ανομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την έννοια του πάχους της στρώσης.

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε κόπωση επομένως, του ανακυκλωμένου με τσιμέντο υλικού, είναι τα μεγέθη εκείνα, που θα χαρακτηρίσουν την συμπεριφορά της στρώσης - και κατά συνέπεια και του οδοστρώματος - στην επιπόνηση από τα φορτία των κυκλοφορούντων εμπορικών οχημάτων (*οχήματα ωφέλιμου φορτίου >5 t*) [SETRA - LCPC 1997]. Τα μεγέθη αυτά είναι χρήσιμο να είναι γνωστά σε ηλικία που το οδόστρωμα βρίσκεται σε λειτουργία, επομένως σε ηλικία 2 - 3 μηνών.

Εκτός από τα φορτία της κυκλοφορίας, οι θερμοκρασιακές μεταβολές, κυρίως τις πρώτες ημέρες μετά την συμπύκνωση, επηρεάζουν τη μετέπειτα συμπεριφορά της στρώσης - και κατ' επέκταση του οδοστρώματος - κατά τη φάση λειτουργίας του. Αυτό συμβαίνει επειδή οι νεαρής ηλικίας τσιμεντόδετες γενικά στρώσεις (συμπεριλαμβανόμενων και των ανακυκλωμένων στρώσεων) συνήθως δεν είναι καλυμμένες με κάποια στρώση υλικού (ασφαλική) και επομένως υφίστανται την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και τις θερμοκρασιακές μεταβολές του ημερήσιου θερμοκρασιακού κύκλου. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές της θερμοκρασίας καθ' ύψος και επομένως ανομοιόμορφη καθ' ύψος διαστολή των ακραίων ινών της στρώσης και κατά συνέπεια κύρτωση της στρώσης. Όταν η θερμοκρασία στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη εκείνης του πυθμένα (συνήθως κατά την διάρκεια της ημέρας) η στρώση κυρτώνεται έτσι ώστε να

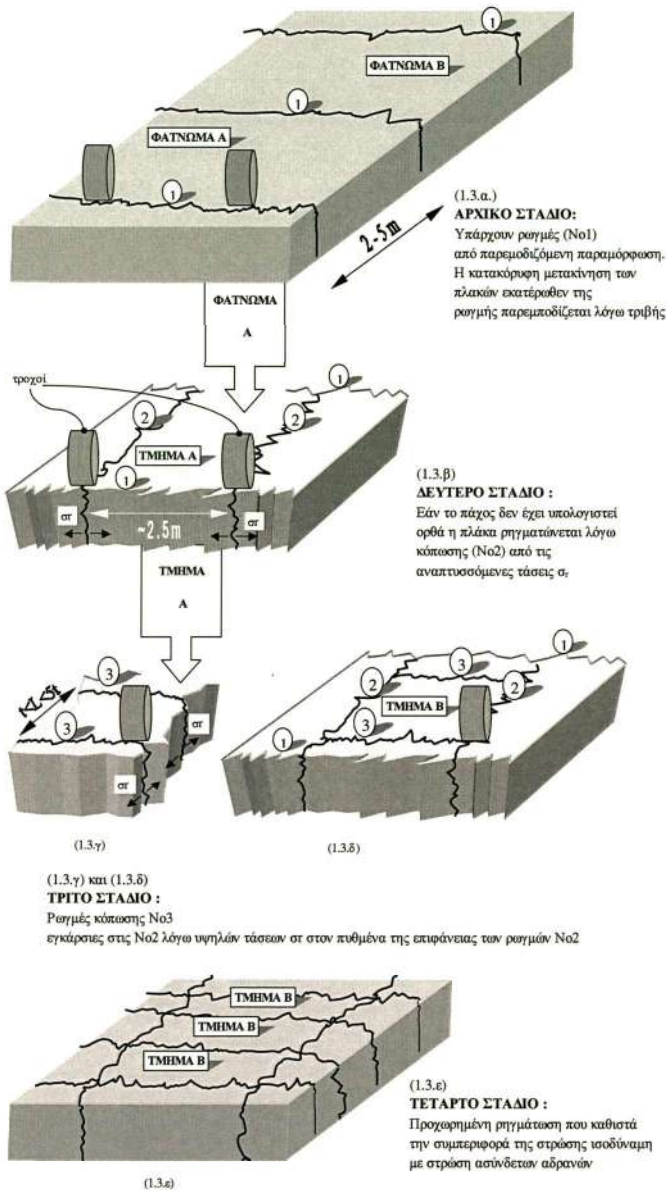
παρουσιάζει τα "κοίλα προς τα κάτω" ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν η θερμοκρασία στον πυθμένα είναι μεγαλύτερη εκείνης της επιφανείας (νύχτα). Οι κυρτώσεις αυτές παρεμποδίζονται λόγω ιδίου βάρους και οδηγούν στην ανάπτυξη καμπτικών τάσεων, [Eisenmann 1979, Κόλιας και Λοΐζος 1999].

Η ομοιόμορφη μεταβολή της θερμοκρασίας προκαλεί την ανάπτυξη οριζόντιων παραμορφώσεων, η πραγματοποίηση των οποίων παρεμποδίζεται λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής μεταξύ της τσιμεντόδετης στρώσης και της υποκείμενης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων. Οι τάσεις αυτές θεωρούνται συνήθως αξονικές ενώ στην πραγματικότητα είναι επίσης καμπτικές λόγω της εκκεντρότητας που υπάρχει μεταξύ του μέσου επιπέδου της τσιμεντόδετης στρώσης (όπου αναπτύσσονται οι παραμορφώσεις) και της διεπιφάνειας διαχωρισμού της τσιμεντόδετης στρώσης με την υποκείμενη στρώση όπου αναπτύσσονται οι δυνάμεις τριβής, [Κόλιας και Λοΐζος 1999].

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις από την παρεμπόδιση των παραμορφώσεων, μπορεί να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση των στρώσεων, λόγω των φαινομένων που περιγράφηκαν, δεδομένου ότι η εφελκυστική αντοχή του τσιμεντόδετου υλικού (συμπεριλαμβανόμενου και του ανακυκλωμένου υλικού), ιδίως σε μικρή ηλικία, είναι ελαττωμένη. Αυτός είναι ο κύριος λόγος στον οποίο αποδίδεται [Williams 1986] η πρόωρη ρηγμάτωση των τσιμεντόδετων γενικά στρώσεων. Η ρηγμάτωση αυτή συνήθως αναδύεται στην επιφάνεια και μπορεί να αλλοιώσει σημαντικά τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Μετά την πρώτη ρηγμάτωση των τσιμεντόδετων στρώσεων που λαμβάνει χώρα σε μικρή ηλικία (1 ή 2 ημέρες συνήθως) η στρώση παύει να είναι ολόσωμη και αποτελείται από σειρά πλακών μήκους που κυμαίνεται ανάλογα με την αντοχή των στρώσεων, συνήθως μεταξύ 3 m και 20 m [Williams 1986, Kolias 2000].

Κατά τη φάση της λειτουργίας του οδοστρώματος οι θερμοκρασιακές μεταβολές είναι μικρότερες διότι οι τσιμεντόδετες στρώσεις είναι πλέον καλυμμένες με μία στρώση ασφαλομίγματος, με πάχος που κυμαίνεται συνήθως από 100mm έως 200mm, ανάλογα με τη μελέτη του οδοστρώματος. Οι προκαλούμενες τάσεις κύρτωσης από ανομοιόμορφη καθ' ύψος κατανομή θερμοκρασίας πρέπει όμως να λαμβάνονται υπόψη, σε συνδυασμό με τις τάσεις από φορτία για να υπολογιστεί η διάρκεια λειτουργίας της στρώσεως χωρίς να προκληθεί ρηγμάτωση από κόπωση. Η αστοχία

από κόπωση της τσιμεντόδετης στρώσης ακολουθεί τα στάδια των ρηγματώσεων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3 [Kolias 2000] :



Σχήμα 1.3 : Προϊούσα ρηγματώση υποδιαστασιολογημένης τσιμεντόδετης στρώσης.
Προσαρμογή από ανακοίνωση [Kolias 2000]

Οι προκαλούμενες παραμορφώσεις λόγω μεταβολών της υγρασίας (ομοιόμορφων ή ανομοιόμορφων καθ' ύψος της διατομής, δηλ. συστολή ξήρανσης και διόγκωση λόγω διύγρυνσης) εκτιμάται ότι είναι μικρότερες εκείνων που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, διότι η ποσότητα του τσιμέντου είναι σχετικώς μικρή (συνήθως $80 - 120 \text{ Kg/m}^3$) και οι στρώσεις τις πρώτες μεν ημέρες υφίστανται εντατική συντήρηση τις επόμενες δε, πρέπει να έχουν καλυφθεί με κάποια ασφαλιστική στρώση.

Θα πρέπει να επισημανθεί όμως ότι τα φαινόμενα που προκαλούν αυτές τις παραμορφώσεις (θερμοκρασιακές ή υγρασιακές μεταβολές) είναι φαινόμενα τα οποία επενεργούν με πολύ μικρή ταχύτητα και επομένως οι αναπτυσσόμενες τάσεις υφίστανται κάποια χαλάρωση λόγω ερπυσμού.

Είναι φανερό λοιπόν ότι είναι απαραίτητη η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών της ανακυκλωμένης στρώσης, τόσο κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος, όσο και τις πρώτες ημέρες μετά την κατασκευή του.

1.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ο Αντοχή σε εφελκυσμό

Από τα διάφορα είδη αντοχής θεωρήθηκε ότι η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό - ως θεμελιώδες μέγεθος αντοχής - είναι η σημαντικότερη παράμετρος, διότι εκτός από τους θεωρητικούς λόγους που εκτίθενται στην Παράγραφο 2.2.1, η αστοχία των τσιμεντόδετων γενικά στρώσεων προκαλείται κυρίως από κάποιας μορφής εφελκυστική επιπόνηση (από κόπωση ή από πολύωρη στατική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση). Έχει αποδειχθεί [Kolias 1975, Williams 1986] ότι η αντοχή σε εφελκυσμό παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές των παραμέτρων των υλικών και της σύνθεσης των τσιμεντόδετων υλικών (ΚΘΑ, ΣΕΥ) και η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων αυτών στα ανακυκλωμένα με τσιμέντο ΦΥ αποτελεί βασικό σκοπό της παρούσας έρευνας. Σε επίρρωση των παραπάνω αναφέρεται ότι η άποψη αυτή, σε ότι αφορά τη δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, ακολουθείται και από τις Γαλλικές Οδηγίες Υπολογισμού Οδοστρωμάτων [SETRA - LCPC 1997].

Θα πρέπει όμως να τονισθεί ότι η επιπόνηση σε μονοαξονικό εφελκυσμό στην πράξη δεν είναι συχνή διότι συνήθως συνοδεύεται από κάποια μορφής εκκεντρότητα. Για τον λόγο αυτό, θεωρείται προτιμότερο να εξετάζονται σε μονοαξονικό εφελκυσμό οι

επιδράσεις των διαφόρων παραμέτρων που έχουν σχέση με τα υλικά, για λόγους ευαισθησίας δοκιμών - όπως προαναφέρθηκε - και για τα θέματα που σχετίζονται περισσότερο με υπολογισμό πάχους (κόπωση) οι δοκιμές να γίνονται σε κάμψη (Παράγραφος 1.4 - Κόπωση). Στην περίπτωση αυτή, η συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων σε λειτουργία είναι ευκολότερη, διότι συσχετίζονται δύο όμοιες επιπονήσεις (κάμψη στο εργαστήριο με καμπτική επιπόνηση στην πράξη). Αυτό ακολουθούν και οι προαναφερθείσες Γαλλικές Οδηγίες Υπολογισμού Οδοστρωμάτων, σύμφωνα με τις οποίες τα υλικά χαρακτηρίζονται από την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε μονοαξονικό εφελκυσμό ενώ η αντοχή σε κόπωση καθορίζεται με δοκιμές σε κάμψη.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100 mm x 100 mm x 500 mm, σε ηλικία 1 και 60 ημερών.

ο Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (Διάρρηξη)

Δεδομένων των δυσκολιών στην εκτέλεση των δοκιμών σε μονοαξονικό εφελκυσμό αποφασίστηκε παράλληλα να γίνουν και δοκιμές σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών ως μία εναλλακτική λύση που έχει γενική αποδοχή [SETRA - LCPC 1997] λόγω της ευκολίας της δοκιμής και του μικρού σχετικά μεγέθους των δοκιμών. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε αυτή η δοκιμή για τη διερεύνηση της επιρροής της θερμοκρασίας (0, 20 και 40 °C) στην αντοχή. Οι δοκιμές έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm, σε ηλικίες 2, 7 και 60 ημερών.

Σημειώνεται ότι για την επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή των ανακυκλωμένων με τσιμέντο φρεζαρισμένων υλικών με τη δοκιμή αυτή όσο και με τη δοκιμή σε θλίψη κύβου επιλέχθηκε η ηλικία των δύο ημερών (αντί της μίας ημέρας που πραγματοποιήθηκαν οι υπόλοιπες δοκιμές), επειδή κρίθηκε σκόπιμο ότι τα δοκίμια έπρεπε να παραμείνουν επί 24ωρο σε θάλαμο θερμοκρασίας ίσης με αυτήν της δοκιμής, ώστε να αποκτήσουν ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στη μάζα τους.

ο Αντοχή σε κάμψη

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικότερα στην Παράγραφο 1.3 η επιπόνηση των τσιμεντόδετων στρώσεων, είτε από τα φορτία των οχημάτων είτε από θερμοκρασιακές μεταβολές, είναι καμπτική και για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να

συμπεριληφθεί η δοκιμή αυτή στο πρόγραμμα τόσο των στατικών δοκιμών όσο και των δοκιμών σε κόπωση. Παράλληλα αποφασίστηκε να γίνει και ένας περιορισμένος αριθμός μετρήσεων του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη με μέτρηση του βέλους κάμψεως στο μέσον του ανοίγματος της δοκού. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι αρκετοί ερευνητές ή οργανισμοί οδοστρωμάτων θεωρούν ότι το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό της συμπεριφοράς του υλικού στις πραγματικές επιπονήσεις των στρώσεων των οδοστρωμάτων [NAASRA 1987, APRG 1996]. Οι δοκιμές έγιναν σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100 mm x 100 mm x 400 mm, σε ηλικία 1 και 60 ημερών.

ο Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη αποτελεί μέγεθος αναφοράς δεδομένης της καθολικής χρήσης της δοκιμής για όλα γενικώς τα τσιμεντόδετα υλικά (σκυρόδεμα, ΚΘΑ, ΣΕΥ) και επομένως συμπεριελήφθηκε στο πρόγραμμα των δοκιμών. Η δοκιμή έγινε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm ή σε τμήματα των πρισματικών δοκιμών μετά τις δοκιμές σε κάμψη ή εφελκυσμό με τη μέθοδο του ισοδυνάμου κύβου (ακμής 100 mm). Επίσης έγινε προσπάθεια εύρεσης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη πρισμάτων, σε ηλικία μίας ημέρας.

Οι δοκιμές σε θλίψη έγιναν σε ηλικία 1 (ή 2), 7 και 60 ημερών. Ταυτόχρονα εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή με δοκιμές στους 0, 20 και 40 °C για τις ηλικίες που προαναφέρθηκαν.

ο Μέτρο ελαστικότητας και καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων

Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σε θλίψη και σε εφελκυσμό καθώς και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των υλικών υπό φορτίο. Για να συγκριθούν τα διάφορα μίγματα μεταξύ τους, αλλά και για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων, είναι απαραίτητες οι πληροφορίες αυτές. Στο πρόγραμμα επομένως των μετρήσεων συμπεριελήφθηκε ο προσδιορισμός της καμπύλης $\sigma - \epsilon$ μέχρι θραύσεως για τις δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό ενώ για τις δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη οι μετρήσεις περιορίστηκαν μέχρι το 1/3 του αναμενόμενης τάσης θραύσης. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η χρησιμοποίηση του ίδιου δοκιμίου για μετρήσεις στην αρχή μεν σε θλίψη (μέχρι το 1/3 της αντοχής) και στη συνέχεια σε εφελκυσμό μέχρι θραύσης, με τη βοήθεια ειδικής διατάξεως που κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτό. Είναι ευρέως αποδεκτό



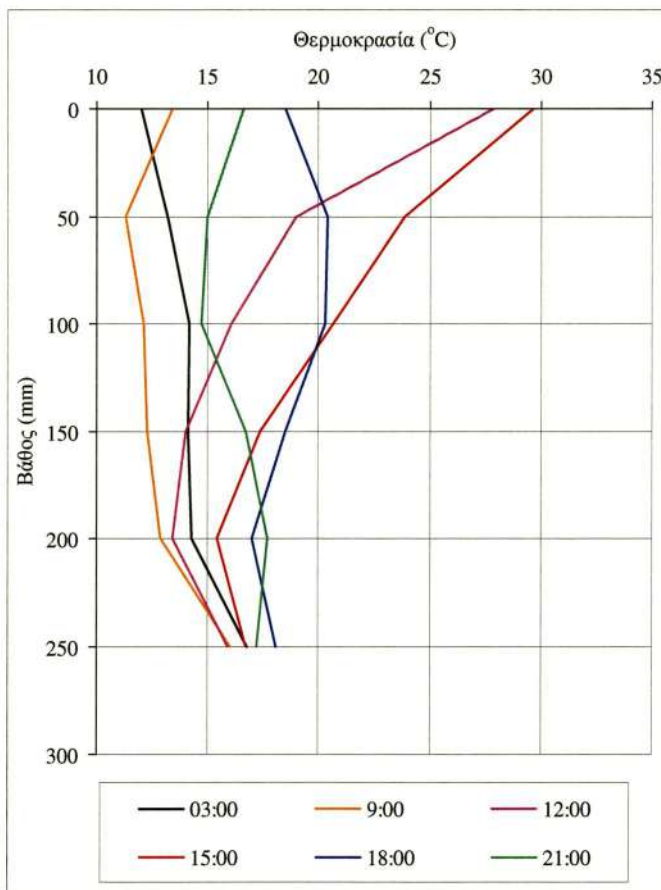
[Neville 1995] ότι η φόρτιση σε θλίψη μέχρι το $1/3$ της αντοχής δεν επιφέρει καμία φθορά στο σκυρόδεμα και τα λοιπά τσιμεντόδετα υλικά, τέτοια που να αλλοιώνει τη συμπεριφορά του σε μετέπειτα φορτίσεις [Kolias 1975, Κόλιας 1999]. Οι δοκιμές έγιναν σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$, σε ηλικία 1 και 60 ημερών. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε κάμψη γινόταν συνεχής καταγραφή του βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος με δύο ηλεκτρομηκυσιόμετρα. Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη προσδιορίστηκε με βάση τη θεωρία κάμψης ελαστικών υλικών, καίτοι αναγνωρίζεται ότι μπορούν να διατυπωθούν σοβαρές επιφυλάξεις ως προς την ορθότητα των παραδοχών της εν λόγω θεωρίας κυρίως για φορτία που υπερβαίνουν σημαντικά το $1/3$ του φορτίου θραύσης [Poronics 1998]. Δεδομένου ότι οι επιπλήξεις των τσιμεντόδετων στρώσεων (από φορτία ή από θερμοκρασιακές μεταβολές) είναι καμπτικές, πιστεύεται ότι το μέτρο ελαστικότητας αυτό αντιπροσωπεύει την απόκριση του υλικού καλύτερα από το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό ή σε θλίψη [NAASRA 1987]. Οι δοκιμές έγιναν σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, σε ηλικία 1 και 60 ημερών.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και κάμψη εξετάστηκε σε ηλικία 7 ημερών σε θερμοκρασίες 3, 23 και 35 °C.

ο Ερπυσμός

Η ημερήσια θερμοκρασιακή μεταβολή προκαλεί κύρτωση των τσιμεντόδετων στρώσεων, γεγονός που συνεπάγεται ανάπτυξη τάσεων λόγω παρεμπόδισης της παραμόρφωσης από το ίδιο βάρος της στρώσης. Το μέγεθος των τάσεων εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας. Θεωρείται ότι οι τάσεις αυτές είναι ο κύριος παράγοντας της πρόωρης ρηγμάτωσης των τσιμεντόδετων γενικά στρώσεων [Williams 1986, Κόλιας και Λοΐζος 1999, Kolias 2000] αφού σε μικρή ηλικία το υλικό δεν έχει αναπτύξει ακόμη αντοχή, ενώ το μέτρο ελαστικότητάς του είναι σχετικά υψηλό, και επομένως οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι σχετικά υψηλές. Σε μεγαλύτερη ηλικία η αντοχή έχει μεν αναπτυχθεί αρκετά ώστε να μην υπάρχει άμεσος κίνδυνος ρηγμάτωσης, εντούτοις όμως, στις τάσεις αυτές πρέπει να προστεθούν και οι τάσεις από τα φορτία της κυκλοφορίας (το οδόστρωμα βρίσκεται πλέον στη φάση λειτουργίας) οπότε ο συνδυασμός των δύο φορτίσεων μπορεί να προκαλέσει αστοχία του υλικού, ιδιαίτερα λόγω του μεγάλου αριθμού των επαναλήψεων που είναι συνέπεια της κυκλοφορίας.

Η ανάπτυξη διαφορών θερμοκρασίας μεταξύ άνω και κάτω επιφάνειας της στρώσης έδρασης γίνεται με πολύ αργό ρυθμό, Σχήμα 1.4 [Κόλιας 1994], η δε χρονική διάρκεια κατά την οποία η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά διατηρείται σε σχετικά υψηλές τιμές θα μπορούσε να ληφθεί ίση με 2 - 4 ώρες. Κατά τη διάρκεια αυτή, η προκαλούμενη παρεμπόδιση της θερμοκρασιακής παραμόρφωσης προκαλεί ανάπτυξη τάσεων, οι οποίες όμως δεν είναι σταθερές, επειδή λαμβάνει χώρα χαλάρωση που οφείλεται σε ερπυσμό.



Σχήμα 1.4 : 24ωρη κατανομή θερμοκρασίας κατά το πάχος του οδοστρώματος [Κόλιας 1994]

Το φαινόμενο του ερπυσμού είναι εντονότερο σε μικρή ηλικία και θεωρείται ότι θα εξαρτάται από το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να συμπεριληφθούν στο πρόγραμμα δοκιμών και δοκιμές ερπυσμού σε θλίψη σε μία θερμοκρασία αλλά σε δύο ηλικίες : μία μικρή (20 - 24 ώρες) και μία μεγάλη (35 ημέρες) που θα αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη φάση της λειτουργίας του. Οι δοκιμές έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm.

ο Κόπωση

Οι στρώσεις οδοστρωμάτων από τσιμεντόδετα ή ασφαλόδετα γενικώς υλικά επιπονούνται από τα φορτία της κυκλοφορίας κατά επαναλαμβανόμενο τρόπο, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες από τις τάσεις που μπορούν να επιφέρουν άμεση αστοχία του υλικού. Η επανάληψη όμως των τάσεων αυτών προκαλεί αστοχία του υλικού από κόπωση, γεγονός που αποτελεί την κύρια αιτία αστοχίας των οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν τσιμεντόδετες στρώσεις - λόγω του επαναλαμβανόμενου χαρακτήρα των φορτίσεων από την κυκλοφορία. Η αντοχή των ανακυκλωμένων υλικών σε κόπωση είναι επομένως από τις σημαντικότερες ιδιότητες των υλικών, διότι καθορίζει την απόκρισή τους σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση και επομένως τη συμπεριφορά της ανακυκλωμένης στρώσεως υπό την επίδραση των φορτίων της κυκλοφορίας. Μέχρι στιγμής δεν φαίνεται να υπάρχει δημοσιευμένη εργασία σχετικά με αντοχή σε κόπωση κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών που περιέχουν και φρεζαρισμένο ασφαλόμιγμα σε αντίθεση με τα συμβατικά κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά [Kolias 1975, Kolias and Williams 1978a, SETRA - LCPC 1997, White and Gnanendran 2003a]. Δεδομένου ότι η επιπόνηση των στρώσεων είναι καμπτική αποφασίστηκε να γίνουν οι δοκιμές σε κόπωση σε κάμψη παρόλες τις επιφυλάξεις που μπορούν να διατυπωθούν ως προς τη δοκιμή (Παράγραφος 2.2.2) και την ορθότητα του υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων. Εξάλλου αν γίνουν, παρόλες τις δυσκολίες της δοκιμής (Παράγραφος 2.2.1), δοκιμές κόπωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό [Kolias and Williams 1978a], τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν θα είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμα αφού σπανίως οι στρώσεις επιπονούνται σε καθαρό μονοαξονικό εφελκυσμό. Οι δοκιμές σε κόπωση από κάμψη έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν κάνοντας χρήση συντελεστών προσαρμογής (εργαστήριο - οδόστρωμα επιτόπου) [SETRA - LCPC 1997]. Οι δοκιμές σε κόπωση έγιναν σε ηλικία 60 ημερών.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΓΝΩΣΗΣ

2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟΔΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

2.1.1 ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ - ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ (ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ)

ο Ορισμοί - Εισαγωγή

Στη διατριβή αυτή τσιμεντόδετα υλικά ονομάζονται τα κατεργασμένα ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο πάσης φύσεως υλικά, συμπεριλαμβανομένων εδαφικών υλικών (σταθεροποιημένα με τσιμέντο εδαφικά υλικά, ΣΕΥ), αδρανών υλικών (κατεργασμένα θραυστά ή μη αμμοχάλικα, ΚΘΑ) ή βιομηχανικών παραπροϊόντων. Υπό την ευρεία έννοια της λέξης, στον ορισμό αυτό συμπεριλαμβάνονται και τα πάσης φύσεως σκυροδέματα, ως μία ξεχωριστή ή ειδική κατηγορία, στην οποία τα υλικά και το τσιμέντο πρέπει να ακολουθούν εξειδικευμένες απαιτήσεις σύνθεσης.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύνομη ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης σχετικά με τα υλικά αυτά, των οποίων το εύρος είναι πολύ μεγάλο, αλλά και η χρήση τους έχει πολύ μεγάλη ιστορία. Η ανασκόπηση αυτή περιορίζεται στα τσιμεντόδετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία εξαιρώντας τα σκυροδέματα συμβατικού τύπου.

Στο σημείο αυτό θα έπρεπε ίσως να διευκρινιστεί ότι με τον όρο σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά νοούνται συνήθως τα υλικά εκείνα για τα οποία η επεξεργασία με τσιμέντο (ανάμιξη, διαβροχή, συμπίκνωση, συντήρηση) αποσκοπεί κατά πρώτο λόγο στη βελτίωση της ευστάθειας του υλικού στις περιβαλλοντικές επιδράσεις και στις επιπλοήσεις των φορτίων της κυκλοφορίας. Τα υλικά αυτά διαφοροποιούνται από τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά στο ότι η κατεργασία αφορά κυρίως υλικά ανώτερης ποιότητας (συνήθως αμμοχάλικα θραυστά ή συλλεκτά), τα οποία στη φυσική τους κατάσταση είναι σταθερά και η κατεργασία τους με τσιμέντο αποσκοπεί

στη βελτίωσή τους και στην αναβάθμισή τους από απόψεως φέρουσας ικανότητας [Κόλιας και Λοΐζος 1999].

ο Σύνοψη ιστορική ανασκόπηση

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τις καταγεγραμμένες πρώτες εφαρμογές της μεθόδου της σταθεροποίησης/κατεργασίας με τσιμέντο. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι, όπως πολύ εύστοχα τονίζεται από τον Williams [1986], το τσιμέντο έχει μία ιστορία μεγαλύτερη από 170 χρόνια και στο διάστημα αυτό είναι πολύ πιθανόν ότι θα υπάρχουν και προγενέστερες μη καταγεγραμμένες χρήσεις. Στο σημείο αυτό θα μπορούσε επίσης να προστεθεί, ότι θεωρώντας ως ένα είδος τσιμέντου τις πρώτες υδραυλικές κονίες της αρχαιότητας (μίγματα ηφαιστιακών γαιών - ποζολανών - με άσβεστο), είναι επίσης πολύ πιθανόν ότι χρήσεις των πρώτων αυτών τσιμεντών θα μπορούσε να βρεθούν στα ρωμαϊκά οδοστρώματα αλλά και σε εφαρμογές των αρχαίων Ελλήνων.

Μετά τις παρατηρήσεις αυτές, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι οι πρώτες χρήσεις του τσιμέντου Πόρτλαντ για εφαρμογές σταθεροποιήσεων εδαφών τοποθετούνται το 1917 τόσο στην Αγγλία όσο και στις Η.Π.Α., με έκδοση σχετικών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας [Williams 1986]. Έκτοτε ακολουθείται μία πορεία προόδου, στην οποία ιδιαίτερη σημασία έχουν οι αρχικές εργασίες της Υπηρεσίας Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων της Νότιας Καρολίνας (South Carolina State Highway Department) που έθεσαν τα θεμέλια της επιστημονικής αντιμετώπισης του θέματος της σταθεροποίησης των εδαφών με τσιμέντο. Ακολουθούν οι ευρύτερες χρήσεις της μεθόδου κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκόσμιου πολέμου στις κυρίως εμπλεκόμενες χώρες (Αγγλία, Η.Π.Α, Γερμανία) αλλά και σε άλλες χώρες. Η μετά τον πόλεμο περίοδος διακρίνεται για την αλματώδη αύξηση των έργων οδοποιίας και αεροδρομίων σε όλες τις οικονομικά προηγμένες, αλλά και τις υπό ανάπτυξη χώρες, που είχε σαν αποτέλεσμα την ανάλογη αύξηση του ενδιαφέροντος και των εφαρμογών των τσιμεντόδετων υλικών. Σχετική με το θέμα αυτό Έκθεση της Διεθνούς Οργανώσεως PIARC [1983] αναφέρει ότι η μεγαλύτερη χρήση των υλικών αυτών παρατηρείται εκτός των Η.Π.Α, στη Γαλλία, Ισπανία, Ιταλία, Αγγλία και Ολλανδία. Άλλες, εκτός Ευρώπης, χώρες με εκτεταμένη χρήση είναι η Αυστραλία και η Ν. Αφρική.

Εκτενής ιστορική αναφορά περιέχεται στο σύγγραμμα του Williams [1986].

ο Μηχανικά χαρακτηριστικά τσιμεντόδετων υλικών

Αρχικά, όπως είναι φυσικό και όπως ακολουθήθηκε σε όλα τα θέματα της οδοποιίας, η χρήση του τσιμέντου με τα πάσης φύσεως υλικά για σταθεροποίηση ή κατεργασία ήταν εμπειρική, χωρίς εργαστηριακή μελέτη. Με την αύξηση όμως των εφαρμογών και την ανάπτυξη της μεθόδου, άρχισαν να εισάγονται κανόνες, τόσο για τη μελέτη του μίγματος όσο και για την κατασκευή. Έτσι διαμορφώθηκαν δύο διακριτοί τρόποι αντιμετώπισης του θέματος : η Αμερικανική σχολή και η Ευρωπαϊκή σχολή. Και οι δύο είχαν σκοπό την εξασφάλιση της δομικής επάρκειας του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του οδοστρώματος με τις επικρατούσες συνθήκες φόρτισης και συνθήκες περιβάλλοντος.

Η Αμερικανική σχολή στήριξε τις απαιτήσεις αυτές σε εξειδικευμένες δοκιμές ανθεκτικότητας : τις δοκιμές "κύκλων ύγρανσης - ξήρανσης" και τις δοκιμές "κύκλων ψύξης - απόψυξης" [ASTM D558-04, ASTM D560-03, PCA 1971]. Σύμφωνα με τις δοκιμές αυτές - οι οποίες εφαρμόζονται και σήμερα - δοκίμια με το υπό σταθεροποίηση υλικό υποβάλλονται σε επανειλημμένους κύκλους διαβροχής - ξήρανσης και ψύξης - απόψυξης. Μετά από κάθε κύκλο, τα δοκίμια υποβάλλονται σε αριθμό τυποποιημένων "βουρτσισμάτων" με ειδική συρματοβουρτσα. Μετά τη συμπλήρωση 12 κύκλων, μετράται η απώλεια βάρους των δοκιμίων, αφού αυτά προηγουμένως ξηρανθούν μέχρι σταθερού βάρους. Η απώλεια βάρους πρέπει να είναι μικρότερη από ορισμένες τιμές ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους, σύμφωνα με την κατάταξή του στο σύστημα AASHTO. Με τις δοκιμές αυτές εξασφαλίζεται, κάτω από σχετικά έντονες περιβαλλοντικές επιπονήσεις, η δομική σταθερότητα του υλικού, ανεξάρτητα από τα άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά του (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας).

Οι δοκιμές αυτές δεν σχεδιάστηκαν για να προσομοιώνουν τις πραγματικές περιβαλλοντικές δράσεις, αλλά περισσότερο για να προσομοιώνουν τις δράσεις συστολής - διαστολής που υφίσταται το υλικό κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του οδοστρώματος από τις θερμοκρασιακές και υγρασιακές μεταβολές [Williams 1986, Norling 1963, Catton 1962]. Ειδικότερα για αμμώδη ή αμμοχαλικώδη εδάφη προσδιορίστηκε [PCA 1971] ότι το υλικό ικανοποιεί τις δοκιμές ανθεκτικότητας, εφόσον η αντοχή του σε θλίψη σε ηλικία 7 ημερών είναι τουλάχιστον 1.7 MPa.

Η Ευρωπαϊκή σχολή στηρίζε τις απαιτήσεις σε απλές δοκιμές σε αντοχή σε θλίψη, με άμεση επιρροή από τον κλάδο της εδαφομηχανικής και γι' αυτό η αντοχή αυτή αναφέρεται πολλές φορές ως ανεμπόδιστη αντοχή σε θλίψη. Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται (λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά ή αμμοχαλικώδη εδαφικά υλικά ή θραυστά αμμοχάλικα) και με τις απαιτήσεις που τίθενται στη στρώση του οδοστρώματος, η αντοχή αυτή μεταβάλλεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι π.χ. οι Βρετανικές προδιαγραφές [1986] οι οποίες διέκριναν τρεις βασικές κατηγορίες :

1. τα σταθεροποιημένα λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά (soil-cement) με αντοχή σε θλίψη 7 ημερών 2.8 MPa (κυλινδρικά δοκίμια h/d 2:1) ή 3.5 MPa (κυβικά δοκίμια)
2. τα κατεργασμένα αμμοχάλικα (cement granular materials) με αντοχή σε θλίψη 7 ημερών 3.5 MPa (κυβικά δοκίμια)
3. το ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete) με αντοχή σε θλίψη 7 ημερών (μέση τιμή 3 δοκιμίων) min 7 MPa και max 14 MPa

Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι η ελάχιστη αντοχή των 2.8 MPa δεν διαφέρει σημαντικά από το όριο των 1.7 MPa που είχε προταθεί για αμμώδη υλικά, ώστε να ικανοποιούν τα κριτήρια των δοκιμών ανθεκτικότητας. Η αντοχή αυτή ερμηνεύεται από πολλούς ερευνητές [Williams 1986] ως μία λογική επαύξηση από την αντοχή των 1.7 MPa, που είχε αρχικά τεθεί ακολουθώντας την Αμερικανική εμπειρία, για να ληφθούν υπόψη οι αυξημένες απαιτήσεις από την κυκλοφορία.

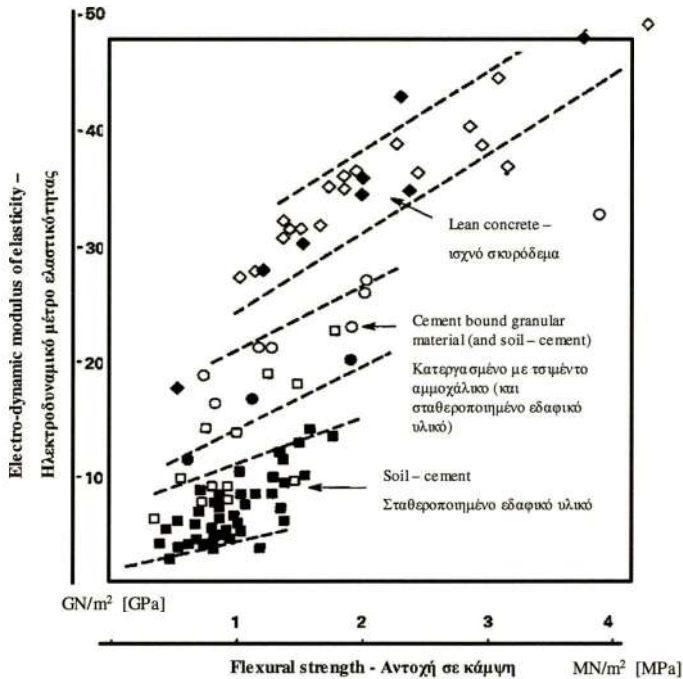
Προς τα μέσα της δεκαετίας του 1960, η ανάπτυξη των αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού των οδοστρωμάτων και ιδιαίτερα η εμφάνιση των πρώτων πινάκων και των πρώτων προγραμμάτων H/Y για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε πολυστρωματικά ελαστικά μέσα (αρχικά δύο ή τριών [Jones 1962, Peattie 1962] και μετέπειτα πολλών επάλληλων στρώσεων (π.χ. BISTRO [Peutz 1962], ELSYM [Kopperman et al 1986], BISAR [1973]), με τα οποία μπορούσε κατά προσέγγιση να προσομοιωθεί ένα οδόστρωμα, ώθησαν στη διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών αυτών στο εργαστήριο. Η ανθεκτικότητα του υλικού στους κύκλους διαβροχής - ξήρανσης και ψύξης - απόψυξης ή η αντοχή σε θλίψη δεν επαρκούν πλέον για την ανάλυση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος και την εκτίμηση της συμπεριφοράς του. Ήταν απαραίτητο να μετρηθούν η αντοχή σε κάμψη και σε εφελκυσμό, το μέτρο

ελαστικότητας, η συστολή (θερμική και ξήρανσης), η αντοχή σε επανειλημμένες φορτίσεις - κόπωση. Τα στοιχεία αυτά έπρεπε να συνδυαστούν με τα διάφορα υλικά για να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα, ως προς την διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων που περιελάμβαναν σταθεροποιημένες στρώσεις και ως προς τις απαιτήσεις που έπρεπε να τεθούν στις αντίστοιχες Προδιαγραφές για τα υλικά. Η περίοδος αυτή διακρίνεται από μία έντονη ερευνητική προσπάθεια, κυρίως στο εργαστήριο, που συνοδεύεται όμως και από παρατηρήσεις της συμπεριφοράς των εν λειτουργία οδοστρωμάτων. Θα μπορούσαν να αναφερθούν οι εργασίες στη Γαλλία στο Κεντρικό Εργαστήριο Γεφυρών και Οδοστρωμάτων LCPC [Bonnot 1972a, 1972b, 1975, 1977, Bonnot et al - 1976, 1977, Autret et al 1982], στις ΗΠΑ [Fossberg et al 1972a, Wang 1973, Mitchell and Monismith 1977, Pretorius and Monismith 1971, 1972, Larsen and Nussbaum 1967], στην Αγγλία [Lister 1972, Lilley and Williams 1973, Kolias 1975, Kolias and Williams 1978a, Kolias and Williams 1978b], Ιαπωνία [Kawamura 1970], Ν. Αφρική [Otte 1973a, 1973b, Marais et al 1973]. Στις εργασίες αυτές θα πρέπει να προστεθούν και οι εργασίες των Reinhold [1955] και Felt and Abrams [1957] που εκτελέστηκαν και δημοσιεύτηκαν πολύ νωρίτερα, πριν αναπτυχθεί το επιστημονικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον που αναφέρθηκε παραπάνω, και για τον λόγο αυτό δεν εκτιμήθηκαν τότε όσο τους άξιζε.

Πιστεύεται ότι τα κυριότερα συμπεράσματα από τις παραπάνω έρευνες είναι :

- ο Το μέτρο ελαστικότητας των τσιμεντόδετων υλικών είναι σχετικά μεγάλο, γεγονός που καθιστά τις στρώσεις των οδοστρωμάτων από τα υλικά αυτά αρκετά δύσκαμπτες. Αυτό έχει ως συνέπεια, ότι τα οδοστρώματα τα οποία περιλαμβάνουν στρώσεις αυτού του είδους, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους της στρώσεως και στην ορθή κατασκευή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επίτευξη του απαιτούμενου πάχους και της απαιτούμενης συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων, σε περίπτωση που πρέπει να κατασκευαστούν δύο επάλληλες στρώσεις. Η αντοχή σε κάμψη και η αντοχή σε κόπωση είναι μεγέθη που είναι απαραίτητα.
- ο Το μέτρο ελαστικότητας έχει μεγάλη εξάρτηση από το είδος και το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Είναι χαρακτηριστική η εξάρτηση της σχέσης αντοχής σε κάμψη - μέτρου ελαστικότητας από το είδος του κατεργασμένου/σταθεροποιημένου υλικού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, [Williams 1972].

Είναι φανερό ότι για την ίδια αντοχή σε κάμψη, το μέτρο ελαστικότητας - και επομένως οι αναπτυσσόμενες τάσεις στη στρώση - εξαρτώνται από το αν το κατεργασμένο υλικό είναι καθαρό θραυστό αμμοχάλικο που χρησιμοποιείται στα σκυροδέματα (ισχνό σκυρόδεμα), ή αμμοχάλικο, ή λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό.



- ◇ Lean concrete, laboratory values – Ισχνό σκυρόδεμα, εργαστηριακές τιμές
- ◆ Lean concrete, site values – Ισχνό σκυρόδεμα, επιτόπου τιμές
- CBGM, site values, coarse grained material – Κατεργασμένο με τσιμέντο χονδρόκοκκο αμμοχάλικο, επιτόπου τιμές
- CBGM, site values, sandy material – Κατεργασμένο με τσιμέντο αμμόδες υλικό, επιτόπου τιμές
- Soil-cement, sandy, nonplastic material, laboratory values – Σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό, μη πλαστικό, εργαστηριακές τιμές
- Soil-cement, fine grained, plastic material, laboratory values – Σταθεροποιημένο λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό, πλαστικό, εργαστηριακές τιμές

Σχήμα 2.1 : Μεταβολή του ηλεκτροδυναμικού μέτρου ελαστικότητας (συντονισμού) σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη, για κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά [Williams 1972].

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την αντοχή, και στοιχεία που εκφράζουν το είδος του υλικού που σταθεροποιείται/κατεργάζεται. Έχουν παρουσιαστεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας από την αντοχή του υλικού [NAASRA 1987] αλλά έχουν εφαρμογή για μία περιορισμένη κατηγορία υλικών. Οι Kolias and Williams [1984] παρουσίασαν δύο σχέσεις που έχουν γενική εφαρμογή για όλο το εύρος των υλικών που χρησιμοποιείται. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται, εκτός της αντοχής, είναι είτε ο λόγος της πυκνότητας ως προς τη βέλτιστη υγρασία είτε του μέτρου διαβάθμισης G . Και οι δύο παράμετροι εκφράζουν έμμεσα τη διαβάθμιση του υλικού από άποψη απόλυτου μεγέθους κόκκων αλλά και σχέσης μεταξύ των κόκκων.

$$E = (15.5 - 1.3G) (f_p)^{1/2} \quad [\text{GPa}]$$

$$E_d = 40(f_c)^{1/2} (D/1000\text{m})^{1.5} \quad [\text{GPa}]$$

Όπου : E, E_d στατικό και δυναμικό (συντονισμός) μέτρο ελαστικότητας

f_p, f_c αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και αντοχή κύβου [MPa]

αντίστοιχα

D φαινόμενη πυκνότητα [kg/m^3]

m βέλτιστη υγρασία % κ.β ξηρού υλικού

G μέτρο διαβάθμισης. Ισούται με το 1/100 του αθροίσματος των διερχόμενων ποσοστών από τα κόσκινα ανοίγματος 37.5 mm, 19.0 mm, 9.5 mm, 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm και 75 μm . Αντιπροσωπεύει τη μέση "ενεργό" διάμετρο των κόκκων.

- ο Τα σταθεροποιημένα/κατεργασμένα υλικά παρουσιάζουν, ανάλογα με τη σύστασή τους, διαφορετικές μεταβολές στις διαστάσεις τους - λόγω συστολής ξήρανσης, θερμοκρασιακής συστολοδιαστολής και ερπυσμού. Ο συντελεστής συστολοδιαστολής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον αντίστοιχο δείκτη των υλικών που σταθεροποιούνται. Ορισμένες μετρήσεις παρέχονται από τους Williams [1972], και Taylor and Williams [1981].

- ο Η συστολή ξήρανσης είναι - στα μεν υλικά που δεν περιέχουν λεπτόκοκκα υλικά - σχετικά μικρή, αφού εξαρτάται μόνο από τον όγκο του τσιμεντοπολτού [Marais et al 1973], αλλά στα υλικά που περιέχουν σχετικά μεγάλες ποσότητες λεπτόκοκκων συστατικών (αργίλου ή ύψος) παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης, το μέγεθος της οποίας όμως συχνά μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου λόγω της φυσικοχημικής δράσης αυτού [Pretorius and Monismith 1971, George 1972, Wang 1973]. Η συστολή εξαρτάται επίσης από τη μέθοδο της συμπίκνωσης και την ανισοτροπία του υλικού [Bofinger et al 1978]. Γενικά το μέγεθος της συστολής ξήρανσης είτε είναι σχετικά μικρό - της τάξης των 200×10^{-6} για "καθαρά υλικά" - είτε σχετικά μεγάλο - της τάξης των 1000×10^{-6} , για λεπτόκοκκα υλικά κυρίως, είναι ικανό να επιφέρει ρηγμάτωση των στρώσεων. Για τον λόγο αυτό επιβάλλεται να λαμβάνονται μέτρα αποφυγής της απότομης ξήρανσης του σταθεροποιημένου υλικού, έτσι ώστε το υλικό να προλάβει να αναπτύξει μεγαλύτερη αντοχή πριν λάβει χώρα η ξήρανση, και επομένως να ελαττωθεί η συστολή. Η ρηγμάτωση όμως λόγω ανομοιομόρφων θερμοκρασιακών μεταβολών καθ' ύψος της διατομής της στρώσης που προκαλούν κύρτωση στη σταθεροποιημένη στρώση δεν μπορεί να αποφευχθεί με κανένα πρακτικό μέσο. Οι σταθεροποιημένες/κατεργασμένες στρώσεις επομένως ρηγματώνονται αναπόφευκτα από συνδυασμό των παραπάνω δράσεων.
- ο Οι διελεύσεις των οχημάτων προκαλούν επανειλημμένες καμπτικές τάσεις στον πυθμένα των στρώσεων από σταθεροποιημένα/κατεργασμένα υλικά και επομένως η αντοχή σε κόπωση των υλικών είναι απαραίτητη γνώση για να διαστασιολογηθούν ορθά οι στρώσεις αυτές. Διεξοδικότερη αναφορά στις έρευνες σε κόπωση για τα υλικά αυτά παρουσιάζεται στην Παράγραφο 2.2.3.

Τις δεκαετίες 1970 και 1980 η εφαρμογή των σταθεροποιημένων στρώσεων είναι σημαντική. Παρουσιάζεται όμως το πρόβλημα της ανάδυσης των ρωγμών αυτών στην επιφάνεια του οδοστρώματος, το οποίο είχε σε ορισμένες περιπτώσεις πολύ μικρές επιπτώσεις, σε άλλες όμως οι επιπτώσεις θεωρήθηκαν πολύ σοβαρές. Ο τρόπος αντιμετώπισης των ρωγμών αυτών χαρακτηρίζεται από δύο διαφορετικές τεχνικές.

Η πρώτη χρησιμοποιεί σταθεροποιημένα /κατεργασμένα υλικά με σχετικώς χαμηλή αντοχή έτσι ώστε οι στρώσεις να ρηγματώνονται σε μικρές αποστάσεις και οι ρωγμές να έχουν μικρότερη τάση ανάδυσης στην επιφάνεια. Οι στρώσεις αυτές καλύπτονται με σχετικά μεγάλο πάχος ασφαλικών στρώσεων. Με τον τρόπο αυτό, οι θερμοκρασιακές μετακινήσεις των στρώσεων είναι μικρές διότι, αφενός μεν οι απόσταση μεταξύ των ρωγμών είναι μικρή και επομένως η μεταβολή του μήκους τους είναι μικρή, αφετέρου δε το πάχος των ασφαλικών στρώσεων προσφέρει αρκετή θερμική μόνωση για να μειώσει τις θερμικές μετακινήσεις. Επιπρόσθετα, η διάδοση της ρωγμής μέσα στο σχετικά μεγάλο αυτό πάχος απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο για να αναδυθεί στην επιφάνεια. Το ενεργό όμως μέτρο ελαστικότητας της στρώσης είναι μικρό (λόγω μικρής αντοχής και μικρής απόστασης μεταξύ ρωγμών) και επομένως η μείωση του απαιτούμενου πάχους ασφαλικών στρώσεων δεν είναι τόσο μεγάλη, και το οδόστρωμα αυτού του τύπου δεν αποτελεί ελκυστική εναλλακτική λύση από οικονομική άποψη.

Η δεύτερη τεχνική [SETRA - LCPC 1984, Kraemer and del Val 1990] χρησιμοποιεί μεγαλύτερης αντοχής κατεργασμένα υλικά (αντοχή σε θλίψη περίπου 6 - 8 MPa) και επιπρόσθετα απαιτεί να αποτελούνται από θραυστά αδρανή (ΚΘΑ) απαλλαγμένα από λεπτά συστατικά αργιλικής προέλευσης, σε συνδυασμό με συνολικό πάχος ασφαλικών στρώσεων που δεν υπερβαίνει συνήθως τα 150 mm. Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις δεν επαρκεί το μέγιστο πάχος κατεργασμένης στρώσης 250 mm που μπορεί να συμπτυκνωθεί επαρκώς σε μία στρώση, ώστε η στρώση να μην αστοχήσει πρόωρα από κόπωση, τα οδοστρώματα αυτά κατασκευάζονται σε δύο στρώσεις το πάχος των οποίων κυμαίνεται μεταξύ 150 mm και 250 mm. Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται για οδόστρωμα που αποτελείται από τις ασφαλικές στρώσεις ενοποιημένες σε μία στρώση, από δύο στρώσεις από κατεργασμένα/σταθεροποιημένα υλικά (ΚΘΑ, ΣΕΥ) και τη στρώση έδρασης. Επειδή η συνάφεια (συνεργασία) μεταξύ των δύο τσιμεντοδέτων στρώσεων είναι πολύ μεγάλης σημασίας για το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων στον πυθμένα των στρώσεων αυτών και επειδή τα πρακτικά κατασκευαστικά μέτρα, που προβλέπονται από τις προδιαγραφές, δεν είναι βέβαιο ότι θα ακολουθηθούν κατά τρόπο που να εξασφαλίζει πλήρη συνεργασία μεταξύ των δύο στρώσεων, ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους των στρώσεων γίνεται με το ημιάθροισμα των υπολογιζόμενων τάσεων κάμψεως στον πυθμένα για τις περιπτώσεις πλήρους συνεργασίας και μηδενικής

συνεργασίας. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει δομική επάρκεια στο οδόστρωμα, έναντι αστοχίας από κόπωση των τσιμεντόδετων στρώσεων και έναντι αστοχίας της στρώσης έδρασης από υπερβολική παραμόρφωση. Η ρηγμάτωση των τσιμεντόδετων στρώσεων δεν μπορεί να αποφευχθεί και αντιμετωπίζεται με έγκαιρη σφράγιση των ρωγμών με ειδικό ασφαλτόμιγμα που γεφυρώνει το άνοιγμα της ρωγμής χωρίς ανάγκη διάνοιξης της ρωγμής και χωρίς να δημιουργείται υπερύψωση της επιφάνειας, ικανής να προκαλέσει θόρυβο ή ενόχληση στα διερχόμενα αυτοκίνητα. Εντούτοις, η σφράγιση αυτή αποδείχθηκε ότι αποτελεί σημαντικό αισθητικό μειονέκτημα που προκαλεί την αίσθηση στους χρήστες ότι το οδόστρωμα έχει υποστεί σημαντική φθορά. Επιπλέον επειδή συχνά παραμελείται η έγκαιρη σφράγιση των ρωγμών, οι βλάβες γίνονται μεγαλύτερες, περισσότερο εμφανείς, και επιβαρύνουν το κόστος συντήρησης. Θα πρέπει επίσης να τονισθεί ότι ο τύπος αυτός του οδοστρώματος αποδείχθηκε ότι είναι ευαίσθητος σε τυχόν κακοτεχνίες.

Έγινε επίσης προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος αυτού με την παρεμβολή ειδικών παρεμβλημάτων (γεωφάσματα ή άλλα υλικά) ή ειδικών ασφαλτικών στρώσεων μεταξύ της ανώτερης επιφάνειας των τσιμεντόδετων στρώσεων και των ασφαλτικών στρώσεων. Η προσπάθεια αυτή απέδωσε σημαντικά αποτελέσματα σε σχέση με τη διερεύνηση του μηχανισμού της ανάδυσσης της ρηγμάτωσης, αλλά τα παρεμβλήματα και οι ειδικές ασφαλτικές στρώσεις δεν αποδείχθηκαν ιδιαίτερα αποτελεσματικές [RILEM 1989, 1993]. Τελικά αποδείχθηκε ότι το πλέον πρόσφορο μέτρο για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ανάδυσσης των ρωγμών είναι η λεγόμενη "προ-ρηγμάτωση" της στρώσης, η οποία προδιαγράφεται και εφαρμόζεται από καιρό στη Γερμανία με χρήση σχετικώς απλών μηχανικών μέσων [FGSV 999, 1996]. Στη Γαλλία πρόσφατα αναπτύχθηκαν ειδικά μηχανήματα, τα οποία, σε μικρό χρονικό διάστημα μορφώνουν - στη μερικώς συνήθως συμπτυκνωμένη στρώση - μία ρωγμή. Οι κατακόρυφες επιφάνειες της ρωγμής ψεκάζονται με ασφαλικό γαλάκτωμα έτσι ώστε, όταν συμπληρωθεί η συμπίκνωση και οι επιφάνειες της μορφωθείσας ρωγμής έρθουν σε επαφή, να μην συγκολληθούν μεταξύ τους και η ρωγμή να δράσει σαν αρμός. Σύμφωνα με μία άλλη τεχνική, αντί του ασφαλικού γαλακτώματος, εισάγεται ειδικό κυματοειδές πλαστικό φύλλο, το οποίο δημιουργεί την απαραίτητη διακοπή της συνέχειας του υλικού και ταυτόχρονα δημιουργεί, χάρις στο κυματοειδές σχήμα του πλαστικού, τις κατάλληλες συνθήκες για αλληλοεμπλοκή και συνεργασία των επιφανειών της ρωγμής. Η προρηγμάτωση εκτελείται κάθε 3-5 m με μικρή σχετικώς επιβάρυνση κόστους και ελάχιστη επιβάρυνση του χρόνου

συμπύκνωσης της στρώσης. Η μέθοδος της προρηγμάτωσης εκτονώνει την τάση για ρηγμάτωση και για ανάδυση αυτής στην επιφάνεια του οδοστρώματος, ενώ το υλικό μπορεί να έχει τις σχετικώς υψηλότερες αντοχές, (υψηλότερες από εκείνες που απαιτούνται στην παραπάνω αναφερθείσα "πρώτη τεχνική".) Με τη σχετικώς αυξημένη αυτή αντοχή, η συνεργασία των πλακών στις κατακόρυφες επιφάνειες της ρωγμής είναι πιο αποτελεσματική και διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ενώ το "ενεργό" μέτρο ελαστικότητας της στρώσης είναι - και διατηρείται - υψηλό, επιτρέποντας μείωση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων. Τα αποτελέσματα από μετρήσεις της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά στην ελαχιστοποίηση της ανάδυσης των ρωγμών, [Ellis et al 1997], γεγονός που συνετέλεσε στο να προδιαγράφεται υποχρεωτική προρηγμάτωση σε περιπτώσεις κατασκευής τσιμεντόδετων στρώσεων σχετικώς μεγάλης αντοχής (> από 6 MPa περίπου). Θεωρείται όμως απαραίτητο να υπάρξει επιβεβαίωση των αρχικών αποτελεσμάτων από μακροχρόνια παρακολούθηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων αυτών πριν εξαχθεί οριστικό συμπέρασμα.

2.1.2 ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΑ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με την Έκθεση της Επιτροπής PIARC 7/8 (2002), "Οδοστρώματα", "Ομάδα Εργασίας για ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση οδοστρωμάτων με τσιμέντο", η ανακύκλωση εμφανίζεται για πρώτη φορά μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο με την ονομασία Retread Process ("Διαδικασία Επανακατεργασίας") και αφορούσε επισκευή δευτερευουσών οδών με ασφαλικό γαλάκτωμα.

Σύμφωνα με τις απαντήσεις σε ένα ερωτηματολόγιο που η ίδια η Ομάδα Εργασίας κυκλοφόρησε στα μέλη της, [PIARC 1998], η ανακύκλωση με τσιμέντο χρονολογείται από το 1950 στην Αυστραλία, και στη δεκαετία του 1980 σε ορισμένες Ευρωπαϊκές χώρες όπως Αυστρία, Βέλγιο, Αγγλία ενώ από τις ΗΠΑ προήλθε η πληροφορία ότι η μέθοδος χρησιμοποιείται από το 1935.

Βιβλιογραφικά εντοπίστηκε "έκδοση" της PCA [1976] στην οποία δίνονται οδηγίες για την "επιτόπου σταθεροποίηση με τσιμέντο υλικού που προέρχεται από αποξήλωση, θρυμματισμό ευκάμπτων οδοστρωμάτων". Γίνεται "διάκριση" του ασφαλικού υλικού του οδοστρώματος σε "ενεργό" και σε "ανενεργό" ανάλογα με το

αν το ασφαλτόμγμα έχει υποστεί σημαντική γήρανση και έχει χάσει το μεγαλύτερο μέρος της ευκαμψίας του ή όχι. Υποδεικνύεται ότι όταν το ασφαλτόμγμα είναι ακόμη "ενεργό" πρέπει να απομακρύνεται, ενώ αν το ασφαλτικό υλικό έχει χάσει την ευκαμψία του είναι εύκολο να θρυμματιστεί και να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές υλικό στο μίγμα του σταθεροποιημένου εδάφους. Το πάχος της ασφαλτικής στρώσης και επομένως το ποσοστό του ασφαλτομίγματος στο ανακυκλωμένο μίγμα δεν φαίνεται να αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα, παρά μόνο ως προς τη δυσκολία θρυμματισμού του. Η σύνθεση του μίγματος (απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου και νερού) καθορίζεται σύμφωνα με τη γνωστή μέθοδο της PCA και η μέθοδος κατασκευής ακολουθεί τις οδηγίες της PCA [PCA 1970]. Για να γίνει μία τέτοια έκδοση από την PCA σημαίνει ότι η μέθοδος είχε ήδη αρκετές εφαρμογές στις ΗΠΑ.

Ακολουθεί δημοσίευση στο TRB Record των Alcock et al [1979] για ανάλογη εφαρμογή επίσης στις ΗΠΑ. Πρέπει να τονισθεί ότι οι εργασίες αυτές γίνονται με συνδυασμό αναμοχλευτικών και θρυμματιστικών μηχανημάτων και των υπαρχόντων μηχανημάτων για σταθεροποίηση εδαφών.

Το 1983, δημοσιεύεται από τους [Κόλιας, Βασιλείου, Γιώτης 1983] εργαστηριακή έρευνα, με την οποία αντιμετωπίζεται με γενικό τρόπο το θέμα της ανακύκλωσης και ιδιαίτερα των αναλογιών ανάμιξης αμμοχαλικού και θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος. Εξετάζεται η επίδραση του ποσοστού του θρυμματισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα στα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίκνωσης, στην αντοχή σε θλίψη και κάμψη και στο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (συντονισμός). Δίνονται επίσης και ορισμένες τιμές του δυναμικού λόγου του Poisson. Σημειώνεται ότι το ασφαλτόμγμα που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές, αποκτήθηκε με θρυμματισμό με ηλεκτρόσφουρα μεγάλων τεμαχίων ασφαλτοτάπητα που προήλθε από εργασίες ανακατασκευής οδοστρώματος στην Αθήνα (γιατί δεν υπήρχαν τότε σε χρήση μηχανήματα φρεζαρίσματος των ασφαλτομιγμάτων). Είχε προηγηθεί η πρωτοποριακή έρευνα των Patankar and Williams [1970] που αναδείκνυε τα ενδιαφέροντα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων ισχνού σκυροδέματος του οποίου :

- ο τα χονδρά αδρανή είχαν αντικατασταθεί με προεπιλημμένα με άσφαλτο αδρανή ή

- ο το νερό αναμιξέως είχε κατά 10 % ή 20 % αντικατασταθεί με ασφαλικό γαλάκτωμα.

Τη δεκαετία του 1980 αρχίζουν να αναπτύσσονται ειδικά μηχανήματα με μεγάλη αναμοχλευτική και θρυμματιστική ικανότητα (φρέζες), τα οποία μπορούσαν να θρυμματίσουν και να αναμιξούν επιτόπου το θρυμματισμένο - φρεζαρισμένο υλικό με τσιμέντο, υδράβεστο ή /και ποζολάνη ή με ασφαλικό γαλάκτωμα. Η ύπαρξη των μηχανημάτων αυτών δημιουργεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη της μεθόδου της επιτόπου βαθιάς ψυχρής ανακύκλωσης [Lefort 1997]. Ακολουθούν πολυάριθμες δοκιμαστικές κατασκευές και στη συνέχεια κανονικές εφαρμογές σε διάφορες χώρες όπως Γαλλία, Ισπανία, Αγγλία, ΗΠΑ, Αυστραλία [PIARC 2002].

Οι Kennedy and Clark [1986] περιγράφουν ενδιαφέρουσα δοκιμαστική εφαρμογή ανακύκλωσης με τσιμέντο με ασφαλική επάλειψη οπλισμένη με υάλινες ίνες. Οι Baroux et al [1988], Mennier [1989] και Sainton [1990, 1997] ανακοινώνουν παρατηρήσεις στις εφαρμογές ανακύκλωσης με τσιμέντο σε εθνικές οδούς στη Γαλλία με ειδικά μηχανήματα ανακύκλωσης ARC 600 και ARC 700, καθώς και ειδικές μεθόδους και υλικά ανακύκλωσης που καλύπτονται από διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Ανάλογες ανακοινώσεις εφαρμογών, πειραματικών ή μη, στο Βέλγιο την Αυστρία και τη Γερμανία παρουσιάζονται από τους Chomis and Jasienki [1994], Haslehner et al [1994], Kloubert [1995], Sion et al [1998]. Οι Eickshcen and Siebel [1994] και Sommer [1998] ανακοινώνουν την ιδιαίτερη χρήση που μπορεί να έχει η μέθοδος της ανακύκλωσης, προκειμένου να παρακαμφθούν οι κίνδυνοι από τις παλαιές στρώσεις μιγμάτων με πίσσα που ήταν σε χρήση σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και αμμοχαλικού και η επίδραση του είδους της φόρτισης και της θερμοκρασίας του δοκιμίου στα χαρακτηριστικά αυτά ερευνώνται από το Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ [Kolias 1996a, 1996b, Κόλιας και Κατσάκου 1996]. Στην παρούσα διατριβή θα γίνει σε πολλά σημεία εκτεταμένη αναφορά και σύγκριση αποτελεσμάτων στις προαναφερθείσες έρευνες, γιατί αποτελούν ουσιαστικά τις προκαταρκτικές δοκιμές του εργαστηριακού μέρους της διατριβής. Παρουσιάζονται αποτελέσματα αντοχών σε θλίψη, κάμψη και διάρρηξη καθώς και

μετρήσεις στατικού και δυναμικού (συντονισμός) μέτρου ελαστικότητας. Τα υλικά που εξετάζονται περιέχουν διαδοχικά μεταβαλλόμενο ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος, κατά το ίδιο σύστημα που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή. Εξετάζεται επίσης [Kolias 1996b, Κόλιας και Κατσάκου 1996] η επίδραση του τύπου της φόρτισης και της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων μιγμάτων με 5 % τσιμέντο.

Ο Lefort [1997] συνοψίζει τις εργασίες στη Γαλλία (SETRA - LCPC) σχετικά με την επιτόπου ψυχρή ανακύκλωση με υδραυλικές κονίες ή με ασφαλικό γαλάκτωμα. Παρέχονται λεπτομερείς οδηγίες για τις εργασίες ανακύκλωσης, συνδυασμένες με ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την κατάταξη - από απόψεως ομοιογένειας μίγματος (κατά μήκος και εγκάρσιως) των μηχανημάτων ανακύκλωσης - καθώς και πληροφορίες σχετικά με τη διαστασιολόγηση των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων. Ειδικότερα για την ανακύκλωση με υδραυλικές κονίες παρέχονται πληροφορίες για τιμές του μέτρου ελαστικότητας (κυμαίνονται από 10.000 MPa μέχρι 20.000 MPa) και της αντοχής σε εφελκυσμό (κυμαίνονται από 0.6 MPa μέχρι 1.2 MPa περίπου) σε ένα έτος (360 ημέρες) ή σε ορισμένες περιπτώσεις 2 έτη. Οι τιμές αφορούν εργαστηριακά δοκίμια και πυρήνες που λήφθηκαν από οδοστρώματα σε λειτουργία. Από τα σχετικά σχήματα που δίνονται, δεν φαίνεται να υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των εργαστηριακών τιμών και των τιμών από πυρήνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη Γαλλία προωθείται η σύνταξη Προτύπων σχετικά με την απόδοση των μηχανημάτων ανακύκλωσης από απόψεως ομοιογένειας μίγματος [NF P 98-711, NF P 98-712 NF P 98-713], γεγονός που είναι ενδεικτικό της σημασίας που αποδίδεται στο θέμα αυτό.

Ως προς το θέμα της διαστασιολόγησης των οδοστρωμάτων υιοθετείται ένα λεπτομερές, πλήρες αλλά και σχετικά πολύπλοκο σύστημα, σύμφωνα με το οποίο οι εργασίες ανακύκλωσης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ομοιογένεια του μίγματος που παράγει το ανακυκλωτικό μηχανήμα. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό του πάχους υιοθετούνται ορισμένες τιμές για το μέτρο ελαστικότητας, E , για την τάση σ_6 η οποία προκαλεί θραύση μετά από 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων, και την τυπική απόκλιση, S_h , του πραγματοποιούμενου πάχους στρώσεως σύμφωνα με τον ακόλουθο Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 : Συνιστώμενα μηχανικά χαρακτηριστικά [Lefort 1997]

Ποιότητα ανακύκλωσης	Κατηγορία χονδρόκοκκων αδρανών NF P 18-540	Κατηγορία άμμου NF P 18-540	Ομοιογένεια διαβάθμισης NF P 98-129	Κατηγορία κατεργασμένου αμμοχαλικού NF P 98-116	E (GPa)	σ_6 (MPa)	S _h (cm)
R1	C	a ή β	ναι	G3/G2	20	0.65	3
	Άλλες περιπτώσεις			G2	16	0.65	3
R2	C	a ή β	ναι	G2	16	0.65	4
	Άλλες περιπτώσεις			G1	11	0.65	4

2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ

2.2.1 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό είναι μία πολύ δύσκολη πρακτικά δοκιμή, με αποτέλεσμα να μην έχει ακόμα προτυποποιηθεί και να χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και πειραματικές διατάξεις για ερευνητικούς μόνο σκοπούς.

Στην παρούσα όμως διατριβή, η αντοχή σε καθαρό - μονοαξονικό - εφελκυσμό αποτελεί μία σημαντική παράμετρο (Παράγραφος 1.4) και επομένως η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου απαιτεί διερεύνηση σε βάθος. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης στις μεθόδους και τις διατάξεις εκτέλεσης δοκιμών σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε σκυρόδεμα και παρεμφερή υλικά, η οποία προηγήθηκε της τελικής επιλογής των μεθόδων και διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό του σκυροδέματος δεν είναι μέγεθος άμεσα απαιτούμενο για τη διαστασιολόγηση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με τη μέθοδο της συνολικής αντοχής, αλλά είναι απαραίτητο μέγεθος για τον υπολογισμό των ορίων για ρηγμάτωση κατά τον έλεγχο επιτελεστικότητας. Είναι πχ απαραίτητη για τον έλεγχο δεξαμενών ή άλλων εφελκόμενων φορέων, όπου η ρηγμάτωση του σκυροδέματος πρέπει να αποφευχθεί ή να ελεγχθεί πλήρως.

Στα οδοστρώματα η αντοχή σε εφελκυσμό ή/και η προκαλούμενη από αυτόν παραμόρφωση, αποτελούν κρίσιμο μέγεθος για όλα τα υλικά τα οποία αποτελούνται από κόκκους αδρανών υλικών συνδεδεμένους με συνδετικό υλικό όπως τσιμέντο, ασφαλτο, άσβεστο, ποζολανικά υλικά, ιπτάμενες τέφρες κ.α. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι στρώσεις των οδοστρωμάτων με τα παραπάνω υλικά επιπονούνται σε εφελκυσμό από κάμψη εξαιτίας της ακαμψίας των στρώσεων, λόγω του σχετικά μεγάλου μέτρου ελαστικότητας των συνδεδεμένων υλικών που τις αποτελούν.

Οι δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό είναι όμως πολύ δύσκολο να εκτελεστούν ως δοκιμές ρουτίνας, χαρακτηριστικό δε της δυσκολίας αυτής είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει τυποποιημένη δοκιμή σε εφελκυσμό. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται έμμεσες δοκιμές, ως εναλλακτική λύση, για να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά των υλικών σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Οι κυριότερες έμμεσες μέθοδοι είναι η δοκιμή σε κάμψη και η δοκιμή σε διάρρηξη (αντιδιαμετρική θλίψη).

Για τα τσιμεντόδετα υλικά πολύ συχνά χρησιμοποιείται η απλή δοκιμή σε θλίψη και για τα ασφαλτόδετα υλικά η δοκιμή Marshall, αν και οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τις δοκιμές αυτές δεν παρέχουν τις πληροφορίες που χρειάζονται. Οι μέθοδοι αυτές (αντοχή σε θλίψη, δοκιμή Marshall) εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις, λόγω της μεγάλης πείρας από τη μακροχρόνια χρήση τους, από την εποχή που η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και η μελέτη σύνθεσης των υλικών ήταν εμπειρική. Σήμερα όμως οι μέθοδοι αυτές αντικαθίστανται σταδιακά με έμμεσες μεθόδους, κυρίως δε με δοκιμές διάρρηξης ή δοκιμές κάμψης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τάσεως αυτής είναι η εισαγωγή από τις Γαλλικές Προδιαγραφές/οδηγίες [LCPC - SETRA 1997] για τα τσιμεντόδετα αμμοχάλικα (κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα) της δοκιμής σε μονοαξονικό εφελκυσμό για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής, καθώς και η καθολική αποδοχή της μέτρησης του μέτρου δυσκαμψίας σε αντιδιαμετρική θλίψη ή σε κάμψη για τα ασφαλτόδετα υλικά.

Στο σημείο αυτό θα ήταν σκόπιμο να τονιστεί, ότι αυστηρά κρίνοντας τις δοκιμές των τσιμεντόδετων και γενικότερα των ψαθυρών υλικών, η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό είναι το μόνο "θεμελιώδες" μέγεθος αντοχής που - υπό την προϋπόθεση σωστής δοκιμής - μπορεί να οριστεί επακριβώς ως ο λόγος της μέγιστης δυνατής εφελκυστικής δύναμης προς την αντίστοιχη επιφάνεια πάνω στην οποία ασκείται. Η

αστοχία του υλικού στην περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα διότι εξαντλήθηκε η ικανότητά του να αναλάβει μεγαλύτερη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, δηλ. το υλικό αστοχεί σε εφελκυσμό (υπέρβαση της τάσης ή της παραμόρφωσης που το υλικό μπορεί να αναλάβει). Αντίθετα, στη δοκιμή σε θλίψη η αστοχία του υλικού δεν λαμβάνει χώρα λόγω υπέρβασης της θλιπτικής τάσης (ή παραμόρφωσης) που μπορεί να αναλάβει το υλικό, αλλά γιατί σε ορισμένα σημεία αναπτύχθηκαν εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις (ή παραμορφώσεις), οι οποίες τοπικά έλαβαν τιμές μεγαλύτερες από εκείνες που το υλικό μπορεί να αναλάβει. Άρα, η αστοχία σε θλίψη είναι αποτέλεσμα έμμεσης τοπικής αστοχίας σε εφελκυσμό και επομένως η υπολογιζόμενη αντοχή σε θλίψη, ως το πηλίκον της μέγιστης θλιπτικής δύναμης προς την αντίστοιχη επιφάνεια, είναι μέγεθος συμβατικά οριζόμενο και δεν είναι "θεμελιώδες".

Η αντοχή σε κάμψη, όπως και η αντοχή σε διάρρηξη είναι "συμβατικά οριζόμενα" μεγέθη. Η αντοχή σε διάρρηξη πέραν των παραπάνω παρατηρήσεων, προκύπτει από διαξονικός και σε ορισμένες περιπτώσεις τριαξονικός φορτιζόμενο δοκίμιο και επομένως δεν αποτελεί "θεμελιώδες" μέγεθος.

Για τους παραπάνω λόγους, παρόλες τις δυσκολίες που παρουσιάζονται στις δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό, ποτέ δεν έπαυσαν οι προσπάθειες των ερευνητών να αναπτύξουν μία σωστή και πρακτικά εφαρμόσιμη δοκιμή.

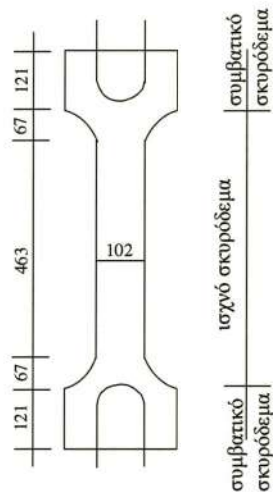
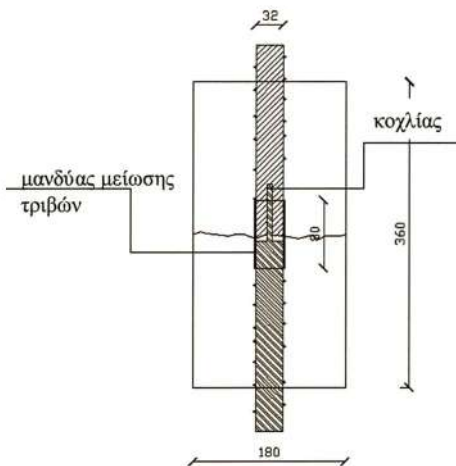
Οι κυριότερες δυσκολίες αφορούν τις εκκεντρότητες και τις συγκεντρώσεις τάσεων που μπορεί η δοκιμή να εισάγει στο δοκίμιο. Και οι δύο δημιουργούνται από τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν το δοκίμιο με τα σημεία από όπου θα ασκηθούν οι εφελκυστικές δυνάμεις από τη μηχανή δοκιμής.

Οι εκκεντρότητες στην επιβολή των δυνάμεων εφελκυσμού αλλοιώνουν την μονοαξονικότητα της δοκιμής εισάγοντας παρασιτικές ροπές, οι οποίες μεταβάλλουν την ομοιόμορφη κατανομή των εφελκυστικών τάσεων που επιδιώκεται, σε ανομοιόμορφη ή καμπτική κατανομή. Το πρόβλημα αυτό ελαχιστοποιήθηκε με τη χρησιμοποίηση στα 2 σημεία σύνδεσης του δοκιμίου με τη μηχανή δοκιμής :

- ο κατάλληλων συνδέσμων με σφαιρικές αρθρώσεις που επιτρέπουν στροφή στο χώρο
- ο αλυσίδων ή εύκαμπτων χαλύβδινων καλωδίων

Οι συγκεντρώσεις τάσεων δημιουργούνται στα σημεία επαφής με το δοκίμιο του μηχανισμού σύνδεσης του δοκιμίου - συνήθως κάποιας μορφής αρπάγης - με τη μηχανή δοκιμής ή στα σημεία όπου αυξάνεται απότομα η διατομή του δοκιμίου για να επιτραπεί η σύνδεση του δοκιμίου με τη μηχανή δοκιμής χωρίς κίνδυνο τοπικής θραύσης. Η επιτυχία της δοκιμής εξαρτάται από το μέγεθος των τάσεων αυτών. Με βάση τα διάφορα συστήματα που έχουν μέχρι σήμερα χρησιμοποιηθεί οι δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό μπορεί να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες :

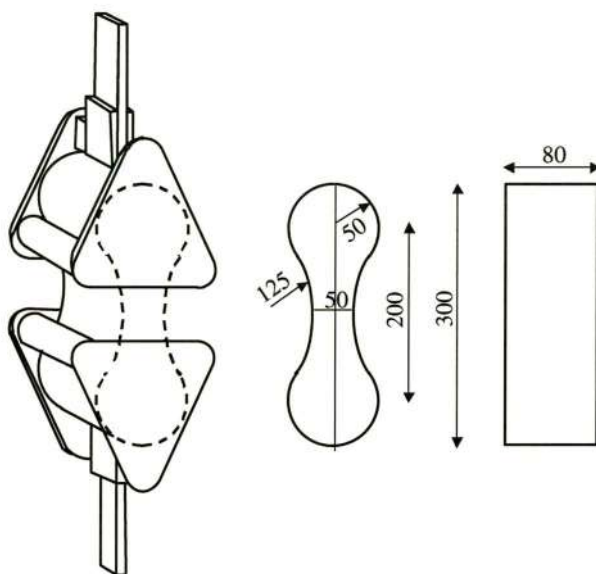
- ο Δοκιμές με δοκίμια τα οποία διαθέτουν στα άκρα τους ενσωματωμένο οπλισμό με τον οποίο επιτυγχάνεται τοπική ενίσχυση του υλικού και ταυτόχρονα σύνδεση με τα σημεία επιβολής του φορτίου. Τέτοιας μορφής δοκίμια δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με τα υλικά και τη μέθοδο συμπίκνωσης που χρησιμοποιούνται στη διατριβή αυτή και γι' αυτό τα συστήματα αυτά δεν εξετάζονται περαιτέρω, Σχήματα 2.2 και 2.3.



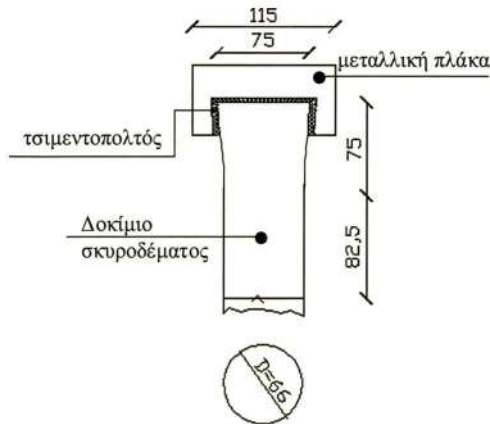
Σχήμα 2.2 : Ειδικής μορφής δοκίμιο εφελκυσμού κατά Peltier [Halabi 1962]

Σχήμα 2.3 : Ειδικής μορφής δοκίμιο εφελκυσμού κατά Patankar and Williams [1970]

- ο Δοκιμές με δοκίμια τα οποία κατασκευάζονται με αυξημένη διατομή στα άκρα, έτσι ώστε οι οποιοσδήποτε συγκεντρώσεις τάσεων, που δημιουργούνται στα σημεία σύνδεσης με τη μηχανή δοκιμής, να μην επηρεάζουν την κατανομή των τάσεων στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και η θραύση να λαμβάνει χώρα στο κεντρικό αυτό τμήμα, Σχήματα 2.4 και 2.5. Για να μην δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή αλλαγής της διατομής (όπως πχ στα δοκίμια σχήματος οκτώ) θα πρέπει η αλλαγή αυτή να γίνεται σταδιακά. Για να αποφεύγεται μεγάλη συχνότητα θραύσεων στην περιοχή της μεταβαλλόμενης διατομής θα πρέπει το κεντρικό τμήμα με σταθερή διατομή να έχει αυξημένο μήκος έτσι ώστε, στατιστικά, να υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα θραύσεως στο τμήμα αυτό.



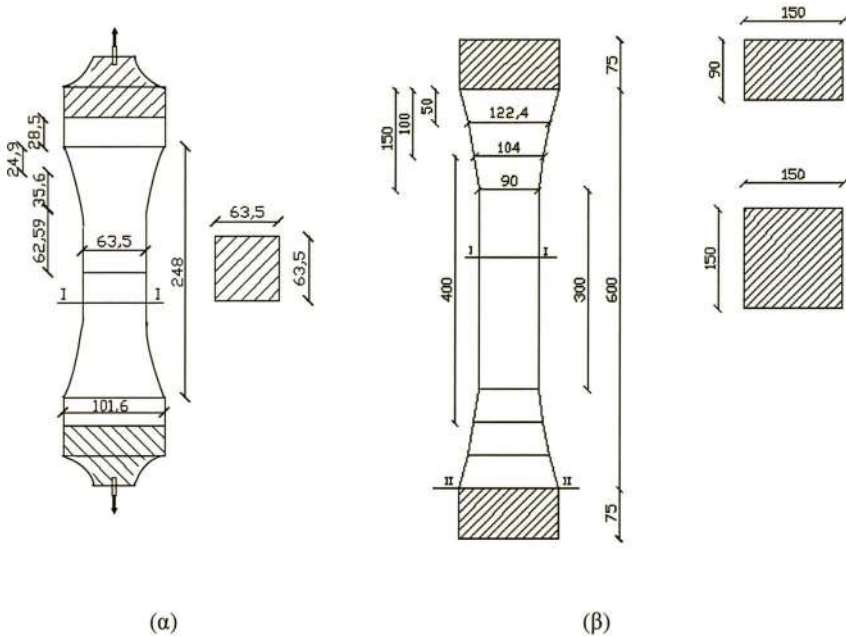
Σχήμα 2.4 : Δοκίμιο εφελκυσμού σχήματος 8 κατά Komlos [1970]



Σχήμα 2.5 : Δοκίμιο εφελκυσμού διευρυμένης διατομής κατά Elvery and Haroun [1968]

Η απαιτούμενη σταδιακή μεταβολή της διατομής επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ειδικών καλουπιών με κατάλληλη καμπυλότητα γεγονός που :

- παρουσιάζει πρόσθετο κόστος λόγω της κατασκευής ειδικών καλουπιών
 - μειώνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των δοκιμών και σε άλλες δοκιμές, πχ χρησιμοποίηση των ίδιων δοκιμών για δοκιμές σε κάμψη και για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας με δοκιμές συντονισμού
 - είναι δυνατόν να δημιουργήσει σημαντικές δυσκολίες στην παρασκευή των δοκιμών, όπως πχ στην έρευνα αυτή όπου η συμπίκνωση των δοκιμών γίνεται με δονητική ηλεκτρόσφυρα
 - ένας σημαντικός αριθμός θραύσεων λαμβάνει χώρα στο τμήμα με μεταβλητή διατομή γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες στον υπολογισμό της επιφάνειας θραύσεως
- ο Δοκιμές με δοκίμια, στα άκρα των οποίων επικολλούνται χαλύβδινες πλάκες με χρήση ισχυρών συγκολλητικών υλικών (εποξειδικές ρητίνες), οι οποίες φέρουν τους κατάλληλους συνδέσμους για τη σύνδεση με τη μηχανή δοκιμής, Σχήμα 2.6 α, β.



Σχήμα 2.6 : Δοκίμιο διευρυμένης διατομής στα άκρα, με συγκόλληση μεταλλικής πλάκας κατά Hughes and Chapman [1963] (α) και Rüsck and Hilsdorf [1963] (β)

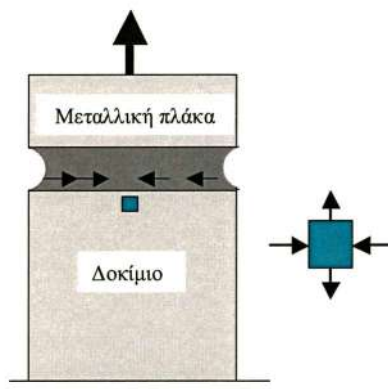
Η μέθοδος δοκιμής αυτή έχει τα ακόλουθα μειονεκτήματα :

- απαιτείται αποκοπή με πριόνι τμήματος από τα άκρα του δοκιμίου, έτσι ώστε η επιφάνεια του δοκιμίου να είναι απαλλαγμένη από το ασθενούς αντοχής λεπτό κονίαμα που περιβάλλει τα αδρανή, τα δε τελευταία να παρουσιάζουν μία καθαρή, επίπεδη κατά το δυνατόν επιφάνεια, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική συγκόλληση με την εποξειδική ρητίνη. Τόσο η αποκοπή όσο και η συγκόλληση καθώς και ο καθαρισμός των μεταλλικών πλακών από την εποξειδική ρητίνη είναι διαδικασίες χρονοβόρες και έχουν σημαντικό κόστος
- η διαδικασία κοπής και συγκόλλησης διαφοροποιεί τις συνθήκες συντήρησης του δοκιμίου από τις συνθήκες που βρισκόταν πριν αρχίσει η προετοιμασία του για δοκιμή σε εφελκυσμό, και το γεγονός αυτό

μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες δεδομένης της ευαισθησίας της δοκιμής σε εφελκυσμό στις συνθήκες συντήρησης. Επιπλέον, απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις για να μην ξηρανθεί και μικρορηγματωθεί το κεντρικό τμήμα του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης της εποξειδικής ρητίνης. Για την περίπτωση που απαιτείται συγκόλληση με υγρή επιφάνεια δοκιμίου πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικές εποξειδικές ρητίνες.

Οι δοκιμές αυτές χαρακτηρίζονται από αυξημένο αριθμό θραύσεων στην περιοχή κοντά στη συγκολλημένη επιφάνεια γεγονός που αποδόθηκε :

- σε μικρορηγματώση λόγω συστολής ξήρανσης των δοκιμίων για τις περιπτώσεις που οι προφυλάξεις έναντι ξήρανσης δεν ήταν ικανοποιητικές
- στην ανάπτυξη τριαξονικής εντατικής κατάστασης (εφελκυσμός κατά την αξονική διεύθυνση και θλίψη κατά τις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις) λόγω των διαφορετικών λόγων του Poisson εποξειδικής ρητίνης εξεταζόμενου υλικού και μεταλλικής πλάκας, Σχήμα 2.7.



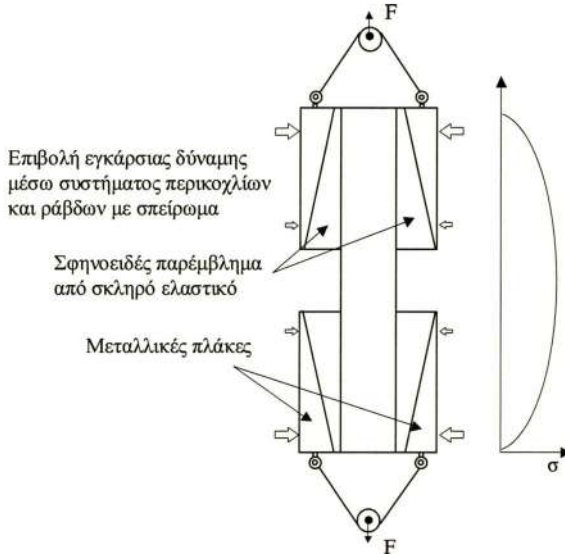
Σχήμα 2.7 : Επιπόνηση του δοκιμίου στην περιοχή κοντά στην συγκολλημένη πλάκα

- στη λανθασμένη συγκόλληση των μεταλλικών πλακών (πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και να έχουν συγκολληθεί έτσι ώστε το κέντρο της διατομής τους να συμπίπτει με το αντίστοιχο του δοκιμίου)

Για την αποφυγή των θραύσεων κοντά στη συγκολλημένη επιφάνεια οι μεταλλικές πλάκες κατασκευάζονται έτσι ώστε να έχουν μία εσοχή βάθους λίγων χιλιοστών και τέτοιων εγκάρσιων διαστάσεων που να εισέρχεται το δοκίμιο στην εσοχή και να επιβοηθείται η ορθή (κεντρική) τοποθέτησή του. Σε συνδυασμό με ειδικές διατάξεις συγκράτησης/σύσφιξης εξασφαλίζεται αφενός μεν η παραλληλία των πλακών και αφετέρου η όσο το δυνατόν μικρότερου πάχους στρώση συγκολλητικής εποξειδικής ρητίνης, γεγονός που μειώνει σημαντικά την ανάπτυξη τριαξονικού πεδίου τάσεων ικανού να προκαλέσει θραύση κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης.

- ο Δοκιμές κατά τις οποίες το δοκίμιο συνδέεται με τη μηχανή δοκιμής μέσω κάποιου συστήματος αρπάγης. Το σύστημα αυτό, διαμέσου μεταλλικών στελεχών που έρχονται σε επαφή με τα ακραία τμήματα του δοκιμίου, δημιουργούν ένα πεδίο τάσεων τριβής στην παράπλευρη επιφάνεια των ακραίων τμημάτων του, και μέσω αυτής μεταβιβάζουν την εφελκυστική δύναμη στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Η ανάπτυξη των τάσεων τριβής εξασφαλίζεται συνήθως με τους ακόλουθους τρόπους :
 - μέσω θλιπτικής δύναμης που ασκείται στην παράπλευρη επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία σε ορισμένα συστήματα είναι ανάλογη της ασκούμενης εφελκυστικής δύναμης. Για την αύξηση του συντελεστή τριβής μεταξύ πλάκας και επιφάνειας δοκιμίου, η επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας που έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο υφίσταται ειδική επεξεργασία στο μηχανουργείο για την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας (Παράγραφος 3.5.2., Σχήμα 3.10, Φωτογραφία 3.5).
 - μέσω σφηνοειδούς διατάξεως που δημιουργείται είτε από την κεκλιμένη τοποθέτηση των κατά μήκος πλακών (Παράγραφος 3.5.2.α, Σχήμα 3.12, Φωτογραφία 3.8), είτε από το σφηνοειδές σχήμα του παρεμβλήματος που τοποθετείται μεταξύ των πλακών αυτών και των παράπλευρων επιφανειών του δοκιμίου, Σχήμα 2.8, [Petersson 1981]. Στην πρώτη

περίπτωση το κενό μεταξύ των κεκλιμένων πλακών της αρπάγης και του δοκιμίου πληρούται με κονίαμα ταχείας ανάπτυξης αντοχής, στη δε δεύτερη περίπτωση, το παρέμβλημα αποτελείται από σφηνοειδούς σχήματος τεμάχιο σκληρού ελαστικού.



Σχήμα 2.8 : Διάταξη εφελκυσμού μέσω ελαστικού σφηνοειδούς παρεμβλήματος από ελαστικό, κατά Petersson [1981]

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- χρησιμοποιούνται δοκίμια πρισματικά χωρίς ιδιαίτερα σχήματα και επομένως δίνεται η δυνατότητα να γίνουν και άλλες δοκιμές (θλίψη πρισμάτων ή κύβων) στα τεμάχια του δοκιμίου μετά τη θραύση σε εφελκυσμό
- δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία (συγκολλήσεις, αποκοπές των άκρων των δοκιμίων κλπ), και δεν μεταβάλλονται σημαντικά οι συνθήκες συντήρησης, διότι ο χρόνος προετοιμασίας είναι ελάχιστος και μόνο στη μέθοδο της σφηνοειδούς διάταξης με χρήση κονιάματος ταχείας ανάπτυξεως αντοχής ο απαιτούμενος χρόνος είναι περίπου μία ώρα.

Οι δοκιμές αυτές έχουν φυσικά και τα μειονεκτήματά τους, τα σπουδαιότερα από τα οποία είναι :

- οι τάσεις τριβής που αναπτύσσονται στις παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου και
- η αναγκαία εγκάρσια τάση, η οποία πρέπει να ασκηθεί, ώστε να είναι δυνατόν να αναπτυχθεί η τάση από τριβή

Οι τάσεις τριβής δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες μέσα στη μάζα του δοκιμίου. Στην παράπλευρη επιφάνεια - όπου και αναπτύσσονται - έχουν τη μέγιστη τιμή και σταδιακά μειώνονται κατά την έννοια του βάθους ως προς το άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Είναι ως εκ τούτου φυσικό οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στην περιοχή των πλακών της αρπάγης να παρουσιάζουν ανομοιομορφία κατανομής, δηλ. συγκεντρώσεις τάσεων. Ομοίως οι εγκάρσιες τάσεις που πρέπει να ασκηθούν, δημιουργούν στην περιοχή των πλακών της αρπάγης πρόσθετη θλιπτική τάση κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επομένως το πεδίο των τάσεων στην περιοχή της αρπάγης είναι αφενός μεν διαξονικό (εφελκυσμός-θλίψη) αφετέρου δε, παρουσιάζει συγκέντρωση αξονικών εφελκυστικών τάσεων. Ο συνδυασμός αυτός είναι ικανός να επιφέρει θραύσεις εντός των αρπαγών με μειωμένη εφελκυστική τάση. Οι Johnston and Sidwell [1968] αρχικά και εν συνεχεία οι Kolias and Williams [1978b] έδειξαν για σκυροδέματα οι πρώτοι και για κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά οι δεύτεροι, ότι η διάταξη είναι ικανοποιητική. Οι τελευταίοι συνέστησαν τα χρησιμοποιούμενα μίγματα να περιέχουν αδρανή με max διάσταση κόκκου τουλάχιστον 16 mm, έτσι ώστε οι συγκεντρώσεις τάσεων που προκαλούνται από την αρπάγη να μην υπερβαίνουν τις συγκεντρώσεις τάσεων που προκαλούνται στη μάζα του υλικού από τα αδρανή αυτά.

- ο Δοκιμές με τις οποίες χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις και ειδικού σχήματος δοκίμια [Todd 1958]. Είναι φανερό ότι στην περίπτωση της διατριβής αυτής, τέτοιες διατάξεις δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, κυρίως λόγω δυσκολιών στη συμπύκνωση και για τον λόγο αυτό δεν γίνεται περαιτέρω σχολιασμός.

2.2.2 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της δοκιμής σε κάμψη, όσον αφορά σκυρόδεμα και σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά, αφού για σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά που περιέχουν και φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα δεν φαίνεται να υπάρχει δημοσιευμένη εργασία.

Η δοκιμή σε κάμψη πραγματοποιείται με τη φόρτιση, μέχρι θραύσεως, πρισματικού δοκιμίου μεγάλου μήκους (συνήθως 400 mm) είτε στο μέσον του [ASTM C293-02, ΕΛΟΤ - EN 12390.05] είτε στα τρίτα του ανοίγματος από τις στηρίξεις (μήκους 300 mm) [ASTM C78-02, ASTM D1635-00, DIN 1048, NF P18-408, ΕΛΟΤ - EN 12390.05]. Ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη στηρίζεται στη θεωρία ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως γραμμικώς ελαστικό μέχρι θραύσης και η σχέση με την οποία εξάγεται η αντοχή στηρίζεται ακριβώς στην παραδοχή αυτή.

Η αντοχή σε κάμψη, f_{fl} , υπολογίζεται από τη σχέση [ΕΛΟΤ - EN 12390.05] :

$$f_{fl} = \frac{FL}{d_1 d_2^2}, \quad \text{όπου } F \text{ το φορτίο, } L \text{ η απόσταση μεταξύ των επιφανειών επιβολής του φορτίου, } d_1, d_2 \text{ οι διαστάσεις του δοκιμίου.}$$

Για τις χρησιμοποιούμενες διαστάσεις δοκιμίων η σχέση απλοποιείται σε :

$$f_{fl} = \frac{3F}{d^2}$$

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τις σχέσεις [Huang 1993] :

$$Es = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \quad (1)$$

χωρίς διόρθωση για την αναπτυσσόμενη διάτμηση

όπου : P το φορτίο, L η απόσταση μεταξύ των επιφανειών επιβολής του φορτίου, b και h οι διαστάσεις του δοκιμίου, Δ το βέλος κάμψης

Λαμβάνοντας υπόψη τη διόρθωση για την αναπτυσσόμενη διάτμηση η σχέση (1) γίνεται :

$$Es = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \left[1 + \frac{216h^2(1+\nu)}{115L^2} \right] \quad (2)$$

όπου ν ο λόγος του Poisson του υλικού.

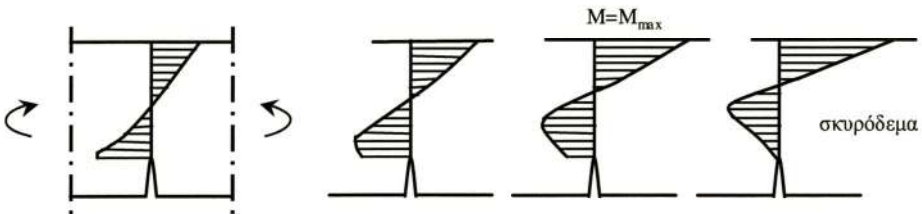
Για τις χρησιμοποιούμενες διαστάσεις δοκιμίων η σχέση (1) γίνεται :

$$Es = \frac{621P}{108d\Delta}$$

και η σχέση (2) γίνεται :

$$Es = \frac{621P}{108d\Delta} \left[1 + \frac{216(1+\nu)}{648} \right]$$

Έχει όμως αποδειχθεί ότι ούτε το σκυρόδεμα [Holiday 1966] ούτε τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά [Reinhold 1955, Balmer 1958, Williams 1962], λόγω του ότι είναι σύνθετα υλικά, συμπεριφέρονται ως γραμμικώς ελαστικά μέχρι τη θραύση τους. Η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος του δοκιμίου δεν είναι γραμμική, για μεγάλα φορτία, και κατά συνέπεια οι υπολογιζόμενες τάσεις θραύσης υπερεκτιμούν την πραγματική εφελκυστική αντοχή του υλικού, Σχήμα 2.9 [Hilleborg et al 1976].



Σχήμα 2.9 : Αναπτυσσόμενες τάσεις καμπτόμενης διατομής σκυροδέματος [Hilleborg et al 1976]

Επιπλέον, έχει βρεθεί [Metcalf 1966, Abeles 1969, Welch 1966] ότι σε σχετικά υψηλά επίπεδα φόρτισης (50 - 70 % του μέγιστου φορτίου) δημιουργούνται ρωγμές στις εξωτερικές ίνες της εφελκυσμένης ζώνης. Η διάδοση των ρωγμών αυτών επιβραδύνεται από το υλικό που βρίσκεται πιο κοντά στον ουδέτερο άξονα και αναλαμβάνει μικρότερες τάσεις, άρα το δοκίμιο συνεχίζει να αναλαμβάνει πρόσθετο φορτίο. Ο σχηματισμός αυτών των ρωγμών αναιρεί την υποτιθέμενη γραμμική κατανομή τάσεων και οδηγεί σε πλασματική εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής.

Πολλοί ερευνητές υποστηρίζουν τα παραπάνω συμπεράσματα στηριζόμενοι σε πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα [Guerrin 12965, Rüsch and Hilsdorf 1963, Pincus and Gesund 1965, Făcăoaru et al 1969]. Τα αποτελέσματα των ερευνών παρουσιάζονται από τον Welch [1966] όσον αφορά ισχνοσκυρόδεμα και από τον Metcalf [1966] όσον αφορά σταθεροποιημένα εδαφικά υλικά. Και οι δύο καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι δημιουργούνται μικρορηγματώσεις στις εξωτερικές ίνες του δοκιμίου, οι οποίες όμως, δεν επιφέρουν απαραίτητα την άμεση θραύση του.

Πιστεύεται, ότι η μέτρηση του βέλους κάμψης είναι η αιτία των διαφορών στα μέτρα ελαστικότητας που παρατηρούνται σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα όταν γίνεται σύγκριση με παλαιότερες δημοσιεύσεις. Τα δοκίμια υφίστανται σημαντικές υποχωρήσεις στις στηρίξεις και επομένως, αν η μέτρηση του βέλους γίνεται από σταθερό σημείο, τότε στη μέτρησή της συμπεριλαμβάνεται και η υποχώρηση του δοκιμίου στις στηρίξεις. Στις περιπτώσεις αυτές, το υπολογιζόμενο μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερο του πραγματικού. Για να αποφευχθεί αυτό πρέπει να ακολουθηθεί μία από τις ακόλουθες μεθόδους μέτρησης :

- ο Μέτρηση του βέλους με τα μηχανοσκόπετρα στηριγμένα σε γέφυρα (όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, Παράγραφος 3.5.2.1, Φωτογραφία 3.4) η οποία στηρίζεται σε μη παραμορφώσιμα σημεία του δοκιμίου, αλλά παρακολουθεί την υποχώρηση των στηρίξεων του δοκιμίου. Η στήριξη αυτή πρέπει να είναι ασφαλής και να μην επιτρέπει μετακινήσεις της γέφυρας κατά τη δοκιμή.
- ο Μέτρηση του βέλους από σταθερό σημείο εκτός του δοκιμίου. Στη μέθοδο αυτή πρέπει να γίνεται ταυτόχρονη μέτρηση των υποχωρήσεων των στηρίξεων του δοκιμίου και αφαίρεση του μέσου όρου τους από το βέλος κάμψης.

Σε πολλές από τις παλαιότερες δημοσιεύσεις δεν είναι σαφές αν έχει ληφθεί υπόψη η διόρθωση λόγω επιρροής της διάτμησης. Η επιρροή αυτή εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοκιμίου και μπορεί να λαμβάνει σημαντικές τιμές, πχ 1.4 για διαστάσεις δοκιμίου 100 mm * 100 mm * 400 mm, με φόρτιση στα 2/3 του ανοίγματος (300 mm).

Παρόλες τις επιφυλάξεις που διατυπώθηκαν ως προς τη δοκιμή, η επιτόνηση των τσιμεντόδετων στρώσεων είτε από τα φορτία των οχημάτων είτε από θερμοκρασιακές μεταβολές είναι καμπτική, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 1.3 και η καμπτική αντοχή θεωρείται σημαντικό χαρακτηριστικό του υλικού για τον υπολογισμό του πάχους της στρώσης [Lister 1972, NAASRA 1987]. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε να συμπεριληφθεί η δοκιμή αυτή στο πρόγραμμα τόσο των στατικών δοκιμών όσο και των δοκιμών σε κόπωση.

2.2.3 ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Η κόπωση των ανακυκλωμένων με τσιμέντο στρώσεων είναι σημαντική μια που στις στρώσεις αυτές, λόγω του σχετικά μεγάλου μέτρου ελαστικότητάς τους, αναπτύσσονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις λόγω οχημάτων και θερμοκρασιακών μεταβολών. Στην Παράγραφο αυτή ακολουθεί σύντομη ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης σχετικά με τη δοκιμή σε κόπωση σε κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά, αφού δεν φαίνεται να υπάρχει δημοσιευμένη εργασία για κόπωση σχετικά με τα υλικά που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, (Παράγραφος 1.4).

Η πρώτη πιθανόν δημοσίευση για κόπωση σε εφελκυσμό σταθεροποιημένων υλικών έγινε από τον Bofinger [1965] αλλά επειδή οι δοκιμές έγιναν σε μικρή ηλικία και η συχνότητα φορτίσεων ήταν σχετικώς μικρή (1 Hz και 0.2 Hz) τα αποτελέσματα πιστεύεται ότι έχουν επηρεαστεί από την αύξηση της αντοχής κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επίσης το σύστημα προφύλαξης των δοκιμών από εξάτμιση του περιεχόμενου νερού και επομένως από τη συστολή ξήρανσης δεν ήταν ικανοποιητικό [Bofinger 1969]. Επομένως τα αποτελέσματα φαίνεται ότι δεν είναι αξιόπιστα και ορισμένα από τα συμπεράσματα έρχονται σε αντίθεση με συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί για το άοπλο σκυρόδεμα. Σε μεταγενέστερη έρευνα του ιδίου [Bofinger 1969] διορθώνονται ορισμένα από τα μειονεκτήματα της αρχικής έρευνας και εξάγονται

συμπεράσματα ορισμένα από τα οποία - όχι όμως όλα - είναι σύμφωνα με την επικρατούσα γνώση για το σκυρόδεμα.

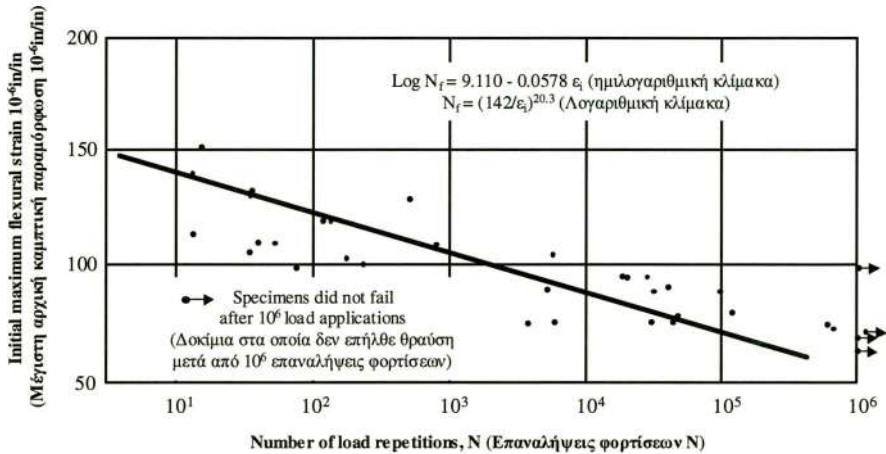
Δοκιμές σε κόπωση σε θλίψη σε σταθεροποιημένη με τσιμέντο άμμο αναφέρονται από τον Gregg [1967]. Οι δοκιμές έγιναν με συχνότητα φόρτισης 0.333 Hz (20 κύκλοι/min) σε δοκίμια ηλικίας 2, 4, 7 και 14 ημερών. Η φόρτιση έγινε για διάφορους λόγους επιβαλλόμενης τάσης σ προς την αντοχή του δοκιμίου f κατά την έναρξη της δοκιμής. Παρατηρήθηκε ότι ο αριθμός των φορτίσεων που προκαλούν αστοχία αυξάνει όσο μειώνεται ο λόγος σ/f και κάτω ενός ορίου 0.5 δεν επέρχεται θραύση. Η ύπαρξη ορίου κόπωσης θα πρέπει όμως να αποδοθεί στο ότι τα δοκίμια κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρουσίαζαν αύξηση της αντοχής τους λόγω ωρίμανσης και επομένως το όριο αυτό δεν είναι πραγματικό.

Αναλυτική μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση 3 κατηγοριών εδαφών (A - 1 - b, A - 2 - 4, A - 4 - 3 κατά AASHTO) παρουσίασαν οι Larsen and Nussbaum [1967]. Οι δοκιμές έγιναν σε κάμψη σε πρισματικά δοκίμια μήκους 711 mm ή 1524 mm πλάτους 152.4 mm και ύψους 101.6 mm, 152.4 mm, 203.2 mm και 254 mm. Τα δοκίμια εδράζονταν σε στρώσεις Neopren έτσι ώστε να προσομοιάζεται ένα έδαφος έδρασης με μέτρο αντίστασης ίσο προς 27130 kN/m³ έως 54260 kN/m³ (100 - 200 pci). Στα δοκίμια είχαν τοποθετηθεί μία σειρά από ωρολογιακά μηχανισιόμετρα με τα οποία μετρούνται οι βυθίσεις του δοκιμίου σε διάφορες αποστάσεις από το κέντρο από τις οποίες υπολογίστηκε η ακτίνα καμπυλότητας του δοκιμίου. Διακρίνονται δύο είδη ακτίνων καμπυλότητας : η ακτίνα καμπυλότητας κατά τη θραύση R_c και η ακτίνα καμπυλότητας R , η οποία αναπτύσσεται για ένα φορτίο και μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται σε διαγράμματα παρόμοια με τα συνήθη διαγράμματα Wöhler (σ/f - N) ως διαγράμματα R_c/R - N και η εξίσωση κόπωσης έχει τη μορφή :

$R_c/R = a N^{-b}$ όπου οι συντελεστές a και b χαρακτηρίζουν τα υλικά.

Οι Pretorius and Monismith [1972] έκαναν δοκιμές σε κόπωση σε κάμψη, με φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματος, σε σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά, με συχνότητα 2 Hz. Πριν από τη δοκιμή σε κόπωση, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τουλάχιστον 500 κύκλους, σε φορτίο περίπου 38 % της στατικής αντοχής σε κάμψη. Μετρήθηκαν

οι παραμορφώσεις στις επάνω και κάτω επιφάνειες των δοκιμών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται είτε υπό μορφή μέγιστης καμπτικής παραμόρφωσης, ϵ_i , είτε υπό μορφή καμπτικής τάσης, σ_i , σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων (N). Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής δίνονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 : Αποτελέσματα δοκιμών σε κόπωση σε κάμψη, ανηγμένα στην αρχική καμπτική παραμόρφωση κατά Pretorius and Monismith [1972]

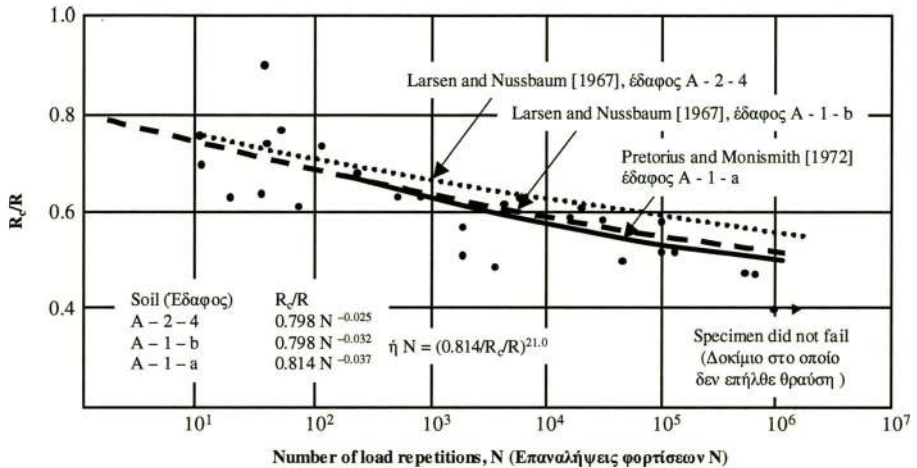
Προέκυψαν οι ακόλουθες σχέσεις γραμμικών παλινδρομήσεων :

$$\text{Log } N = 9.110 - 0.0578 \epsilon_i$$

$$\text{Log } N = 7.481 - 0.0168 \sigma_i$$

Οι καμπτικές παραμορφώσεις παραμένουν περίπου σταθερές για μεγάλο ποσοστό της διάρκειας ζωής σε κόπωση, πέραν του οποίου αυξάνουν συνεχώς. Ο ρυθμός της αύξησης γίνεται εντονότερος, όσο πλησιάζει η αστοχία του υλικού. Αντιθέτως, δοκίμια που δεν αστόχησαν σε 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων, παρουσιάζουν περίπου σταθερές παραμορφώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Αν τα δοκίμια αυτά υποβληθούν εκ νέου σε κόπωση με μεγαλύτερο λόγο σ/f , παρουσιάζουν ίδια πορεία παραμορφώσεων με τα δοκίμια που δεν έχουν δοκιμαστεί σε κόπωση. Ο αριθμός των επαναλήψεων φορτίσεων σε αυτήν την περίπτωση, ακολουθεί την καμπύλη κόπωσης και υποδεικνύει ότι η προγενέστερη κόπωση με μικρότερο επίπεδο επιβαλλόμενης τάσης πρακτικά δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά σε κόπωση του υλικού. Οι Pretorius and Monismith [1972] εξέφρασαν τα αποτελέσματά τους και υπό μορφή

διαγραμμάτων $R_c/R - N$, Σχήμα 2.11 και επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα των Larsen and Nussbaum [1967].



Σχήμα 2.11 : Σύγκριση αποτελεσμάτων Larsen and Nussbaum με εκείνα των Pretorius and Monismith [1972]

Οι Shen and Mitchell [1967, 1971] διεξήγαγαν δοκιμές κόπωσης σε θλίψη και σε κάμψη σε αμμώδες υλικό σταθεροποιημένο με 7 % τσιμέντο και σε ιλυοαργιλώδες έδαφος σταθεροποιημένο με 13 % τσιμέντο. Οι δοκιμές έγιναν σε μικρή ηλικία (κυρίως 7 ημέρες) και για τον λόγο αυτό η επίδραση της ωρίμανσης πιστεύεται ότι επηρέασε τα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε επίσης μείωση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (resilient modulus) σε θλίψη με την αύξηση των επαναλήψεων των φορτίσεων μέχρις μίας κατώτατης τιμής πέραν της οποίας το μέτρο άρχιζε πάλι να αυξάνει. Η επίδραση της ηλικίας ήταν σημαντική στην αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων φορτίσεων για την επίτευξη της ελάχιστης τιμής του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης. Παρατηρήθηκε ότι 24000 επαναλήψεις φορτίσεων σε επίπεδο ίσο με το 15 % της "στατικής" αντοχής αύξησε την αντοχή σε θλίψη κατά 10 % για τη σταθεροποιημένη άμμο, ενώ για το σταθεροποιημένο ιλυοαργιλώδες έδαφος η αντοχή αυξήθηκε κατά 8 % - 15 % όταν το φορτίο ήταν 80 % του φορτίου θραύσεως. Το γεγονός αυτό προκαλεί ορισμένες σοβαρές επιφυλάξεις για την ορθότητα του τελευταίου συμπεράσματος δεδομένου ότι για φορτία του επιπέδου του 80 % είναι

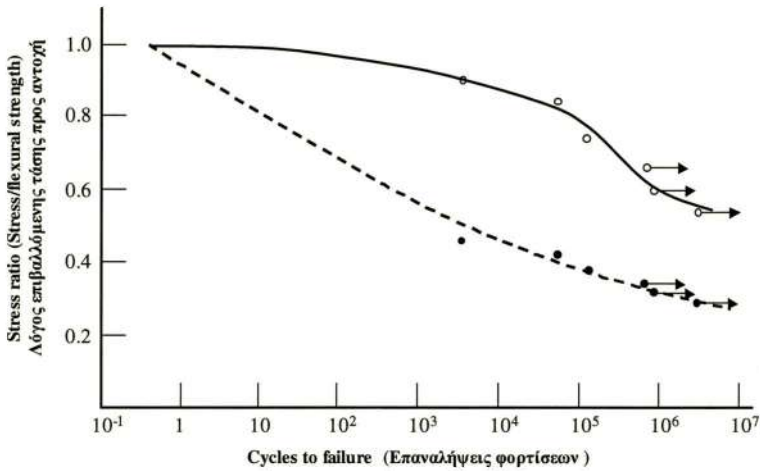
γνωστό, τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για τα σταθεροποιημένα υλικά, ότι προκαλούνται ανεπανόρθωτες βλάβες [Neville 1995, Kolias 1975]. Αντίθετα δεν παρατηρήθηκε μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ή της αντοχής στις δοκιμές σε κάμψη. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη για το αμμόδες υλικό βρέθηκε σημαντικά μεγαλύτερο του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη ενώ για το υλοαργιλώδες έδαφος δεν παρατηρήθηκε τέτοια διαφορά.

Ο Obi [1971, 1972] παρουσίασε επίσης επαναλαμβανόμενες δοκιμές σε θλίψη σε τρία λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά σταθεροποιημένα με τσιμέντο. Το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης μετά από 10^4 φορτίσεις κάτω από την κρίσιμη τιμή δεν παρουσίασε καμία μεταβολή, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των Shen and Mitchell [1967, 1971] αλλά είναι σύμφωνο με τα ισχύοντα για το σκυρόδεμα [Neville 1995]. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε επαναλαμβανόμενη θλίψη του Moriarty [1969] επιβεβαιώνουν εκείνα του Obi.

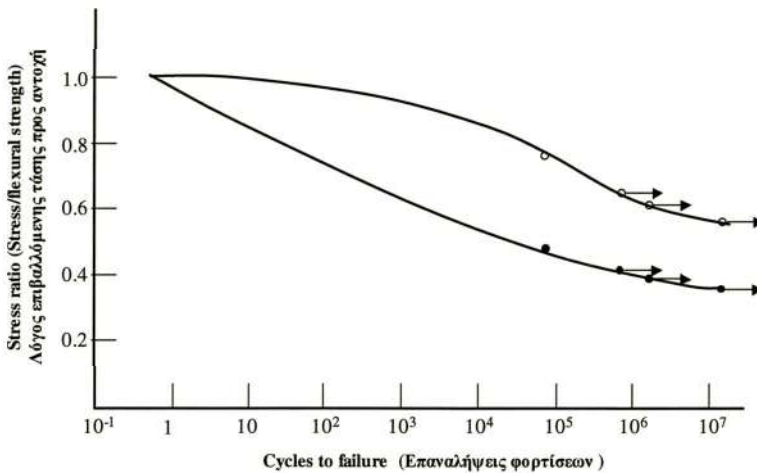
Δοκιμές σε κόπωση σε μονοαξονικό εφελκυσμό παρουσίασαν οι [Kolias 1975 και Kolias and Williams 1978a] για δύο υλικά : ένα θραυστό αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο (ΚΘΑ), και ένα σχετικά πιο λεπτόκοκκο αμμοχαλικώδες εδαφικό υλικό. Στο Σχήμα 2.12 φαίνονται τα αποτελέσματα μόνον για το ΚΘΑ. Στο Σχήμα 2.13 δίνονται τα αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης σε κάμψη σε άοπλο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οδοστρώματων από σκυρόδεμα [Raithby 1980]. Από τη σύγκριση των Σχημάτων 2.11 και 2.12 παρατηρείται αξιοσημείωτη σύμπτωση τόσο ως προς τη μορφή αλλά και ως προς τις προβλεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων για δεδομένο λόγο σ/φ. Οι δοκιμές στο σκυρόδεμα έγιναν περίπου το ίδιο χρονικό διάστημα στο Κρατικό Εργαστήριο Οδικών Ερευνών στην Αγγλία (TRRL) [Galloway and Raithby 1979].

Σημειώνεται επίσης ότι τα διαγράμματα Wöhler δεν είναι ευθείες γραμμές αλλά παρουσιάζουν ελαφρώς σιγμοειδή μορφή. Επίσης παρουσιάζεται και μία άλλη γραμμή κόπωσης που στηρίζεται στον λόγο επιβαλλόμενης τάσης σ προς την αντοχή f , η οποία προσδιορίζεται από στατική φόρτιση με ταχύτητα επιβολής τάσεως ίση ή σχεδόν ίση με εκείνη που επιβάλλεται κατά τη δοκιμή κόπωσης και όχι εκείνη που επιβάλλουν τα πρότυπα για την "στατική" φόρτιση. Σημειώνεται επίσης ότι και οι Γαλλικές Οδηγίες [SETRA - LCPC 1997] για τον υπολογισμό των οδοστρώματων

χρησιμοποιούν ως βασική σχέση κόπωσης παρόμοια σχέση με παραπλήσια αποτελέσματα.



Σχήμα 2.12 : Δοκιμές κόπωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό [Kolias and Williams 1978a]



Σχήμα 2.13 : Δοκιμές κόπωσης σε κάμψη [[Galloway and Raithby 1979]

Το 1998 ο Roßberg [1998] δημοσίευσε αποτελέσματα για δοκιμές σε κόπωση σε διάρρηξη υλικών με αναλογία καθαρού αμμοχάλικου/φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα 80/20 τα οποία ανακυκλώνονται με γαλάκτωμα 4 % (ή 6 %) και με τσιμέντο (0 %, 2 %, 4% και 6 %). Τα αποτελέσματα εκφράζονται υπό μορφή :

$N = k \sigma^n$, όπου k και n σταθερές για κάθε υλικό.

Παρουσιάζονται επίσης καμπύλες κόπωσης σκυροδέματος και ασφαλτομιγμάτων. Οι καμπύλες κόπωσης των υλικών που εξετάστηκαν λαμβάνουν ενδιάμεση θέση μεταξύ του σκυροδέματος και εκείνης του ασφαλτομίγματος. Υπάρχει ένδειξη ότι η κλίση των καμπυλών των εξεταζόμενων υλικών μεταβάλλεται ανάλογα με τα ποσοστά των σταθεροποιητών. Σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζεται κόπωση για υλικά σταθεροποιημένα μόνο με τσιμέντο.

3. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Στην πράξη, τόσο τα πάχη όσο και η ποιότητα των υλικών των παλαιών οδοστρωμάτων παρουσιάζουν συχνά σημαντικές διακυμάνσεις από τμήμα σε τμήμα, γεγονός που εισάγει αναπόφευκτα σημαντική ανομοιομορφία στο ανακυκλωμένο μίγμα [PIARC 2002].

Στην επιλογή των υλικών για την παρούσα έρευνα κρίθηκε σκόπιμο να προσδιοριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός ευρέως φάσματος μιγμάτων που θα κάλυπτε :

- ο το σύνθετος εύρος υλικών που απαντώνται στην πράξη
- ο την παραπάνω ανομοιομορφία
- ο τη δυνατότητα θεωρητικής διερεύνησης των αποτελεσμάτων

Για τον σκοπό αυτό κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστούν πέντε υλικά με διαφοροποιούμενα διαδοχικά ποσοστά θραυστού αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, ξεκινώντας από μίγμα αποτελούμενο από αμιγές θραυστό αμμοχάλικο (υλικό I, Πίνακας 3.1) αντικαθιστώντας διαδοχικά μέρος αυτού με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, έως ότου προκύψει το υλικό V που αποτελείται από αμιγές φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα.

Τα μίγματα που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Ο πρώτος αριθμός δίπλα από την ονομασία του μίγματος (αποκαλούμενα υλικά I έως V) αναφέρεται στο % ποσοστό κ.μ. θραυστού αμμοχάλικου (ΘΑ) και ο δεύτερος στο % ποσοστό κ.μ. του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος.

Πίνακας 3.1 : Μίγματα που εξετάστηκαν

Συμβολισμός Υλικού (μίγματος)	Ποσοστό (%) κατά μάζα θραυστού αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος	
	Καθαρό αμμοχάλικο	Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα
I (100/0)	100	0
II (75/25)	75	25
III (50/50)	50	50
IV (25/75)	25	75
V (0/100)	0	100

Στην πράξη, κατά κανόνα, εκτιμάται ότι οι εργασίες ανακύκλωσης σπανίως πρόκειται να οδηγήσουν σε μίγμα τύπου V (υλικό 0/100) (αμιγές φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα). Εντούτοις, επιλέχθηκε η εξέταση του μίγματος αυτού, όπως και του υλικού I (100/0) (αμιγές καθαρό αμμοχάλικο) για λόγους πληρότητας και συστηματικής διερεύνησης της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών των "νέων υλικών" που μπορεί να προκύψουν από τη διαδικασία της ανακύκλωσης, σε όλο το εύρος των μιγμάτων, από το Κ.Θ.Α (υλικό I) έως το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (υλικό V), έτσι ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά των ανακυκλωμένων στρώσεων, δεδομένης της εγγενούς μεταβλητότητάς τους.

3.1.1 ΥΛΙΚΑ

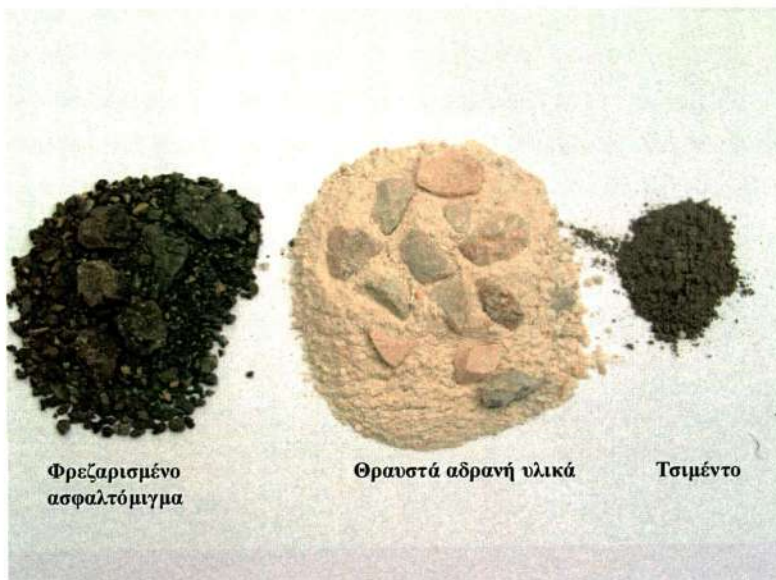
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των μιγμάτων είναι (Φωτογραφία 3.1) :

- ο Τσιμέντο τύπου II 35

Ως αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν :

- ο Θραυστό αμμοχάλικο Δυτικής Αττικής (το οποίο θα συμβολίζεται ως ΘΑ).
- ο Φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (το οποίο θα συμβολίζεται ως ΦΑ). Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα προήλθε από οδόστρωμα της περιοχής Αθηνών, ΠΤΠ Α 265.

- ο Για τη βελτίωση της κοκκομετρικής διαβάθμισης του μίγματος των θραυστών αδρανών απαιτήθηκε η χρησιμοποίηση θραυστής ψηφίδας (Ψ) 6.35/4.76 (1/4" - No. 4).



Φωτογραφία 3.1 : Υλικά δοκιμών

Το θραυστό αμμοχάλικο που χρησιμοποιείται στις εργασίες ανακύκλωσης, προέρχεται κυρίως από το υπάρχον υλικό των στρώσεων που βρίσκονται αμέσως κάτω από τις ασφαλτικές στρώσεις. Επομένως, το υλικό αυτό είναι υλικό ΠΤΠ Ο155 [1966], το οποίο πιθανόν και να έχει μολυνθεί με λεπτόκοκκο αργιλώδες υλικό κατά τη διάρκεια της χρήσεως του οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτό έγινε κατ' αρχήν προμήθεια υλικού που προέρχεται από προκαταρκτική διαλογή δύο κλασμάτων σε λατομείο (άμμος, χονδρόκοκκο υλικό (γαρμπίλι και χαλίκια)), τα οποία προορίζονται για ασύνδετα υλικά βάσεων (ΠΤΠ Ο155) και όχι για σκυρόδεμα.

Από δοκιμές αντοχής σε θλίψη όμως σε προκαταρκτικά μίγματα υλικού Ι (100/0), διαπιστώθηκε ότι η διασπορά των αποτελεσμάτων ήταν σημαντική και οφειλόταν κυρίως σε μεταβολές των χαρακτηριστικών της άμμου στην παρτίδα που

προσκομίστηκε. Έτσι, έγινε δοκιμή ισοδύναμου άμμου (περίπου 70 %) από την οποία δεν υπήρξε ένδειξη για ύπαρξη μη επιτρεπόμενου ποσοστού αργίλου στην άμμο.

Παρόλα τα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου και προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα από τη διατριβή, θα πρέπει να διασφαλιστεί κάποια αποδεκτή ομοιομορφία και επαναληψιμότητα αποτελεσμάτων, για να μην χρειασθεί να αυξηθεί υπέρμετρα ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών. Σημειώνεται ότι λόγω της απαιτούμενης μεγάλης ποσότητας υλικών, δεν ήταν πρακτικά δυνατόν να επιχειρηθεί ομογενοποίηση της άμμου (ή των άλλων κλασμάτων) στο εργαστήριο.

Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε η αντικατάσταση της άμμου (4.76/0) που αρχικά είχε προσκομιστεί, και παρουσίαζε σημαντικές μεταβολές χαρακτηριστικών μέσα στην ποσότητα που προσκομίστηκε, με θραυστή άμμο, η οποία παρουσίαζε μεγαλύτερη ομοιομορφία χαρακτηριστικών στην ίδια παρτίδα. Θα πρέπει όμως να παρατηρηθεί ότι όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.2 η περιεκτικότητα σε υλικό διερχόμενο από το κόσκινο ανοίγματος 75 μ m είναι σχετικά μεγάλο (24%), ποσοστό κατά πολύ μεγαλύτερο από το μέγιστο επιτρεπόμενο για άμμο σκυροδέματος (16 %), αλλά ανεκτό για υλικά οδοστρώσας. Η επίδραση της αυξημένης ποσότητας παιπάλης αποφασίστηκε ότι έπρεπε να εξεταστεί σε ξεχωριστή έρευνα, Παράγραφος 5.2.4.

Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (περίπου 10t) προσκομίστηκε όπως προέκυπτε από τα μηχανήματα φρεζαρίσματος και χωρίστηκε σε 3 κλάσματα (άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι) στο εργαστήριο με κοσκίνισμα από ειδικά τελάρα με χαλύβδινο πλέγμα τετραγωνικών ανοιγμάτων κατάλληλου μεγέθους με σκοπό να διευκολύνουν την εργασία χωρισμού του ΦΑ σε κλάσματα.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές ήταν από την ίδια παρτίδα παραγωγής.

3.1.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ – ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ

Το θραυστό αμμοχάλικο (ΘΑ) ξηραίνεται σε θερμοκρασία 105 °C και χωρίζεται σε δύο κλάσματα :

ΘΑ χονδρόκοκκο : 19.05/4.76 mm (3/4" - No. 4)

ΘΑ άμμος : 4.76/0 mm (< No. 4)

Το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (ΦΑ) στεγνώνεται σε περιβάλλον εργαστηρίου (RH $\approx$ 60%, 20 ± 2 °C) και χωρίζεται σε τρία κλάσματα :

ΦΑ χαλίκι : 19.05/12.7 mm (3/4" - 1/2")

ΦΑ γαρμπίλι : 12.7/4.76 mm (1/2" - No. 4)

ΦΑ άμμος : 4.76/0 mm (< No. 4)

Σημειώνεται ότι τα φρεζαρισμένα υλικά δεν μπορούν να ξηρανθούν στους 105 °C, διότι θα αλλοιωθεί η άσφαλτος και θα συγκολληθούν οι κόκκοι.

Ο μέγιστος κόκκος τόσο για το θραυστό χαλίκι όσο και για το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, επιλέχθηκε να είναι 19 mm, επειδή για πρακτικούς λόγους επιλέχθηκε η μικρότερη διάσταση των δοκιμών να είναι 100 mm. Σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές, η μέγιστη διάσταση του κόκκου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1/3 [ASTM C192/C192M-02] ή το 1/3.5 [prEN 12356] ή 1/4 [NORDTSET 1984] από την ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου. Επομένως για 100 mm min διάσταση δοκιμίου, επιτρέπεται μέγιστος κόκκος 33 mm [ASTM C192/C192M-02] ή 28.5 mm [prEN 12356] ή 25mm [NORDTSET 1984].

Η μέγιστη διάσταση κόκκου αδρανούς αποφασίστηκε να είναι σημαντικά μικρότερη (19 mm) από τα παραπάνω όρια για τους ακόλουθους λόγους :

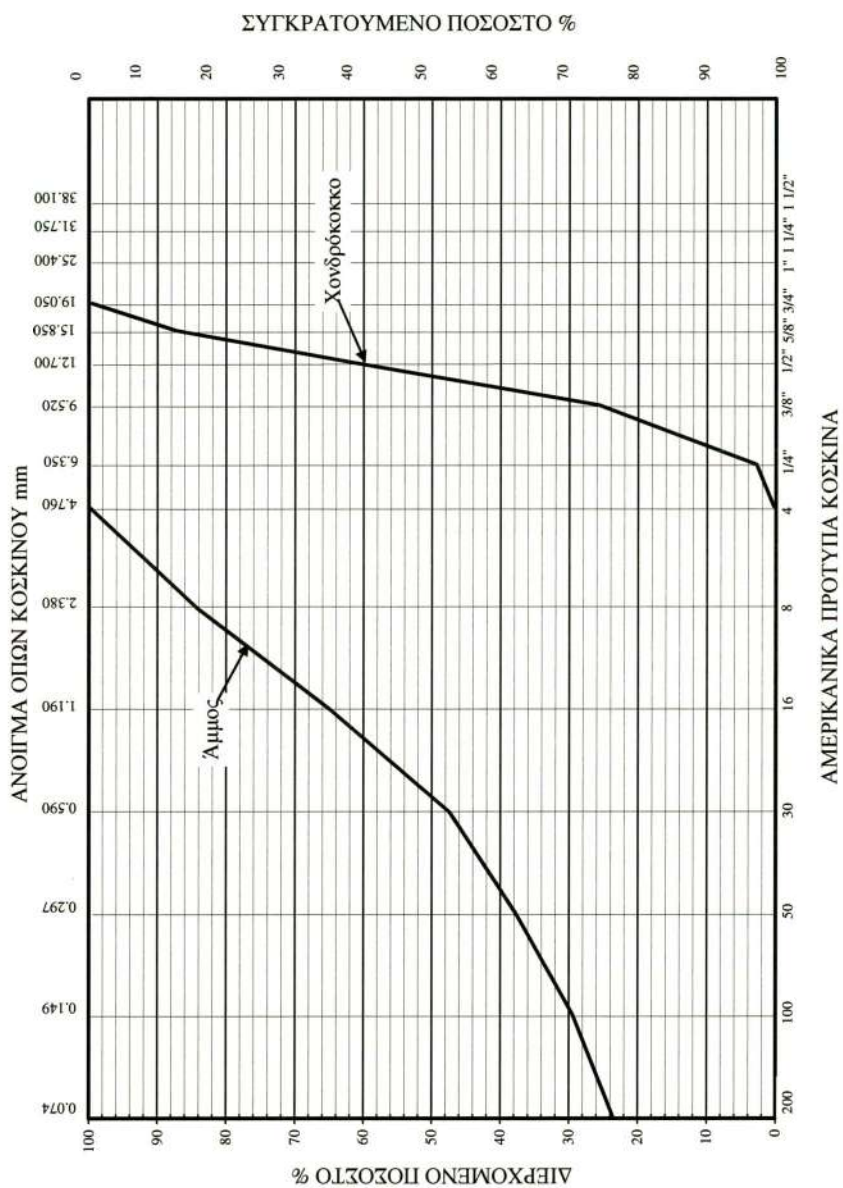
- ο Η απόμιξη του υλικού κατά τη διάρκεια των χειρισμών για την παρασκευή των δοκιμών είναι μικρότερη, όσο μικρότερος είναι ο κόκκος του αδρανούς. Άρα με τη μείωση του μέγιστου κόκκου θα υπάρχει μεγαλύτερη ομοιογένεια στα δοκίμια. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ιδιαίτερα ότι γενικώς τα κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά και τα ανακυκλωμένα με τσιμέντο υλικά λόγω της μικρής ποσότητας τσιμέντου που περιέχουν και της μικρής συνήθως περιεκτικότητας σε αδρανή μικρών διαστάσεων (< 0.150 mm) έχουν τελικά μικρή ποσότητα "κονιάματος" και επομένως τα μίγματα αυτά είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε διαχωρισμό (απόμιξη) σε σύγκριση με τα συνήθη σκυροδέματα, τα οποία διαθέτοντας μεγαλύτερη ποσότητα "κονιάματος" παρουσιάζουν συνήθως πιο σταθερά μίγματα.
- ο Η κατανομή των τάσεων είναι πιο ομοιόμορφη άρα και η διασπορά των αποτελεσμάτων μικρότερη. Στην περίπτωση των ανακυκλωμένων μιγμάτων, η επίδραση του μέγιστου κόκκου στην ομοιομορφία των αποτελεσμάτων αναμένεται να είναι μεγαλύτερη απ' ότι στο σκυρόδεμα ή σε συμβατικού

τύπου τσιμεντόδετα υλικά, λόγω της μεγάλης διαφοράς του μέτρου ελαστικότητας των καθαρών αδρανών έναντι των αδρανών από ασφαλτικό κονίαμα.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των θραυστών και των φρεζαρισμένων υλικών δίνονται στον Πίνακα 3.2. Τα αντίστοιχα διαγράμματα κοκκομετρικής ανάλυσης δίνονται στα Σχήματα 3.1 και 3.2.

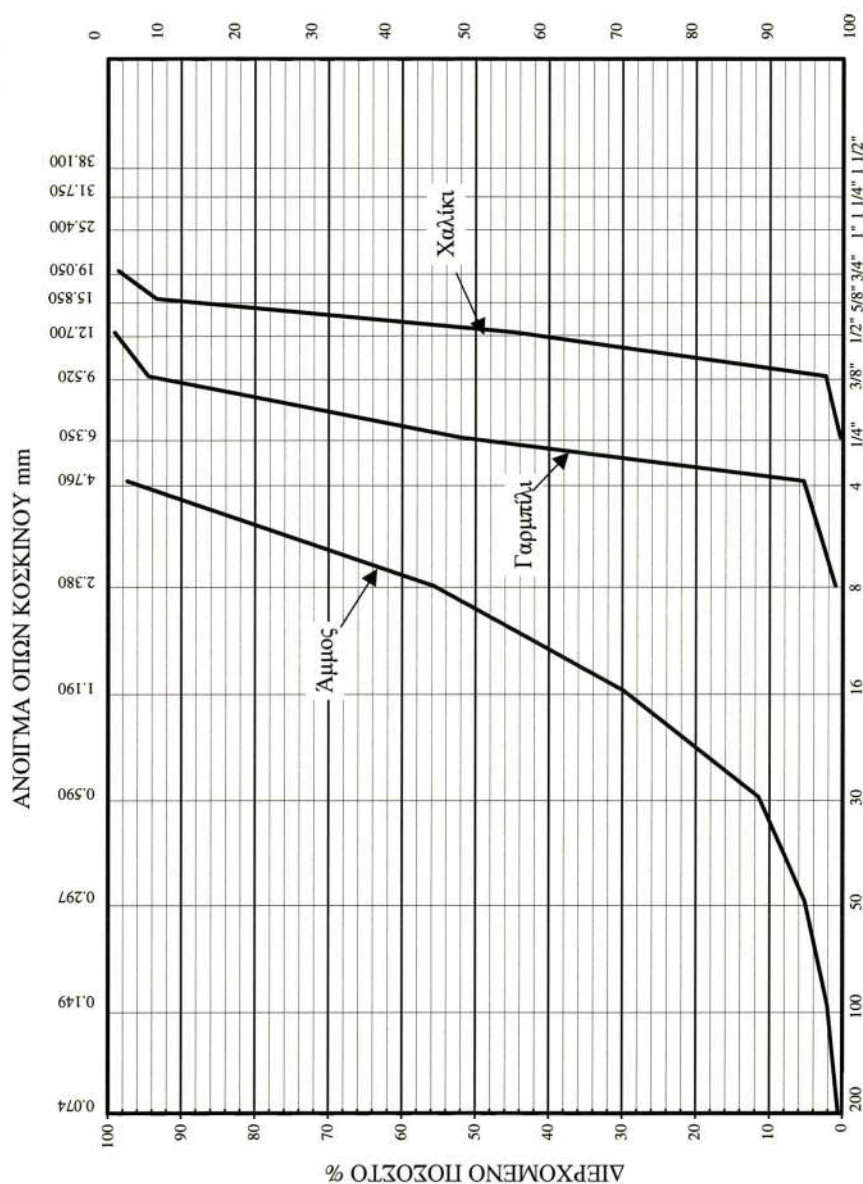
Πίνακας 3.2 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις θραυστών και φρεζαρισμένων υλικών

Κόσκινο	Άνοιγμα κόσκινου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)				
		Θραυστά υλικά		Φρεζαρισμένα υλικά		
		Χονδρόκοκκο	Άμμος	Χαλίκι	Γαρμπίλι	Άμμος
3/4"	19.05	100		99		
5/8"	15.85	87		93		
1/2"	12.7	61		45	99	
3/8"	9.52	26		2	95	
1/4"	6.35	3		0	52	
No 4	4.76	0	100		5	97
No 8	2.38		84		1	56
No 16	1.19		65			30
No 30	0.59		47			12
No 50	0.297		38			5
No 100	0.149		30			2
No 200	0.074		24			1



Σχήμα 3.1 : Κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστών αδρανών υλικών

ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ %



ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΟΣΚΙΝΑ

Σχήμα 3.2 : Κοκκομετρική διαβάθμιση φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.1 παρασκευάστηκαν πέντε υλικά, I έως V, με ποσοστά καθαρού αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (κατά μάζα αδρανών υλικών του μίγματος), βλ. Πίνακα 3.1.

Τα παραπάνω μίγματα παρασκευάστηκαν με δύο ποσοστά τσιμέντου 3 και 5 % κ.β. ξηρού υλικού. Το ποσοστό 3 % επιλέχθηκε ως το minimum ποσοστό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εργασίες εν ψυχρώ ανακύκλωσης [MOPU 2001, Milton and Earland 1999], όσο και σε εργασίες παρασκευής ΚΘΑ [MOPU 2001, Milton and Earland 1999, NF P 98-116] για την παραγωγή μίγματος με ομοιόμορφη κατανομή τσιμέντου στη μάζα του, ενώ το ποσοστό 5 % είναι ένα ποσοστό μάλλον στην ανώτερη περιοχή των συνήθως χρησιμοποιούμενων ποσοστών.

Το νερό αναμίξεως αναφέρεται ως ποσοστό κ.β. του μίγματος ξηρού υλικού ($\Theta A + \Phi A + \Psi$) + τσιμέντου. Το ποσοστό αυτό είναι 5.2 % και είναι κοινό και για τα 5 υλικά. Ο προσδιορισμός του απαιτούμενου ποσοστού νερού περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.

3.1.3 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΙΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Οι αναλογίες, κατά βάρος, των υλικών που τελικά επιλέχθηκαν για το μίγμα των αδρανών του υλικού I (100/0) - 100 % θραυστό αμμοχάλικο - και το μίγμα των αδρανών του υλικού V (0/100) - 100% φρεζαρισμένο ασφαλτόμικμα - δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3 : Αναλογίες (%) κ.μ. θραυστών και φρεζαρισμένων αδρανών υλικών στα μίγματα που εξετάστηκαν

Κλάσματα (mm)	Αναλογίες υλικών % κ.μ.				
	Υλικό Ι (100/0)	Υλικό ΙΙ (75/25)	Υλικό ΙΙΙ (50/50)	Υλικό ΙV (25/75)	Υλικό V (0/100)
Θραυστό χονδρόκοκκο (19.05/4.76)	55.0	30.0	20.0	10.0	-
Θραυστή ψηφίδα (4.76/0)	5.0	3.75	2.5	1.25	-
Θραυστή άμμος (4.76/0)	40.0	41.25	27.5	13.75	-
Φρεζαρισμένο χαλίκι (19.05/12.7)	-	7.5	15.0	22.5	30.0
Φρεζαρισμένο γαρμπύλι (12.7/4.76)	-	3.75	7.5	11.25	15.0
Φρεζαρισμένη άμμος (4.76/0)	-	13.75	27.5	41.25	55.0

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις του μίγματος Ι (100 % θραυστό αμμοχάλικο) και του μίγματος V (100 % φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα) δίνονται στον Πίνακα 3.4. Τα διαγράμματα κοκκομετρικής ανάλυσης για τα υλικά αυτά δίνονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 3.1.1 στην κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος του θραυστού αμμοχάλικου (μίγμα Ι) προστέθηκε ψηφίδα 1/4" - No. 4 σε ποσοστό 5 % του συνολικού μίγματος των αδρανών, ώστε να μην υπάρχει ασυνέχεια στην κοκκομετρική καμπύλη. Η ασυνέχεια της κοκκομετρικής διαβάθμισης οφείλεται στην ποιότητα των χονδρόκοκκων αδρανών.

Χωρίς την προσθήκη της ψηφίδας η κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος στο κλάσμα 1/4" - No. 4 δίνεται με διακεκομμένη γραμμή, ενώ η διορθωμένη διαβάθμιση

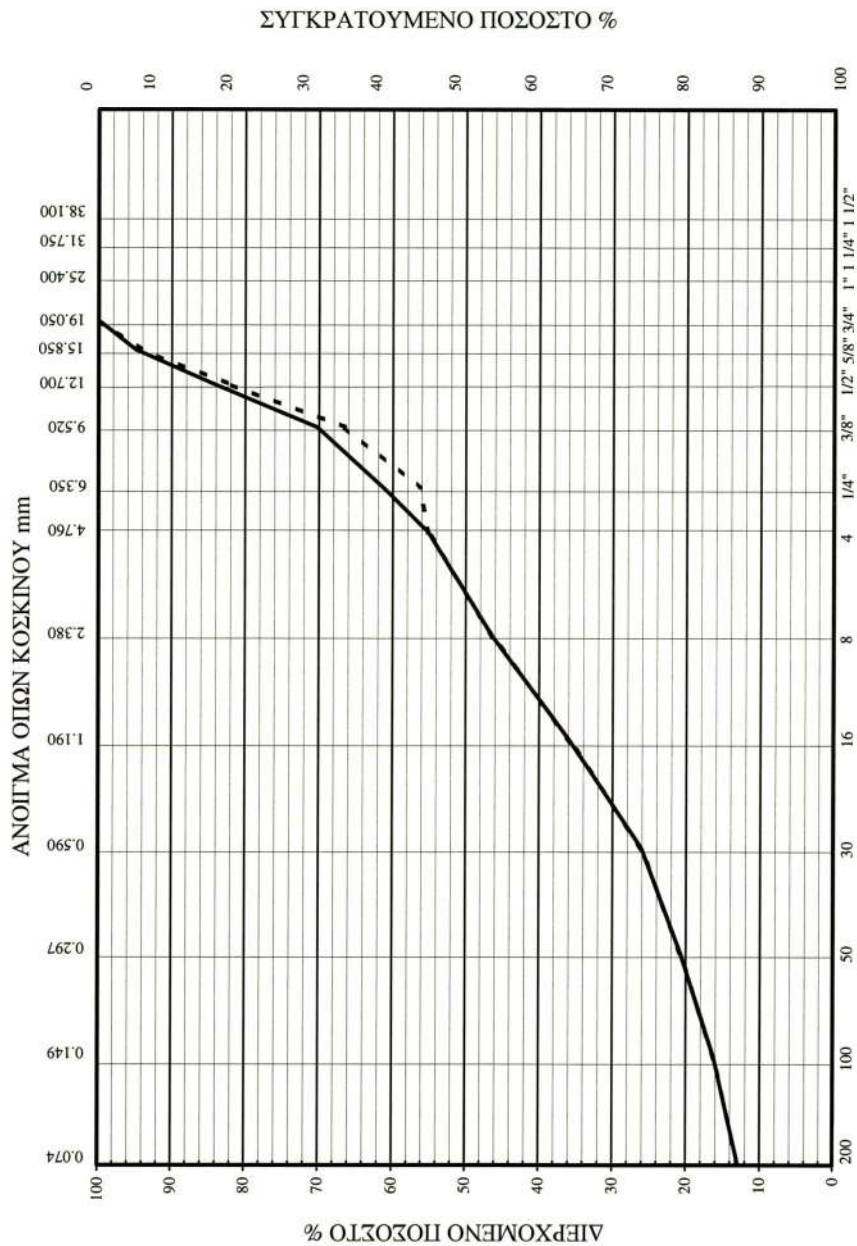
δίνεται με συνεχή γραμμή (Σχ. 3.3). Παρατηρείται ότι χωρίς τη χρήση της ψηφίδας η διαβάθμιση παρουσιάζει μικρή ασυνέχεια (οριζόντια γραμμή).

Οι αναλογίες υλικών για τα μίγματα των αδρανών των υλικών II, III και IV προέκυψαν από τα υλικά I και V και δίνονται επίσης στον Πίνακα 3.3.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των μιγμάτων II, III και IV δίνονται ομοίως στον Πίνακα 3.4, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα κοκκομετρικής ανάλυσης στο Σχήμα 3.5.

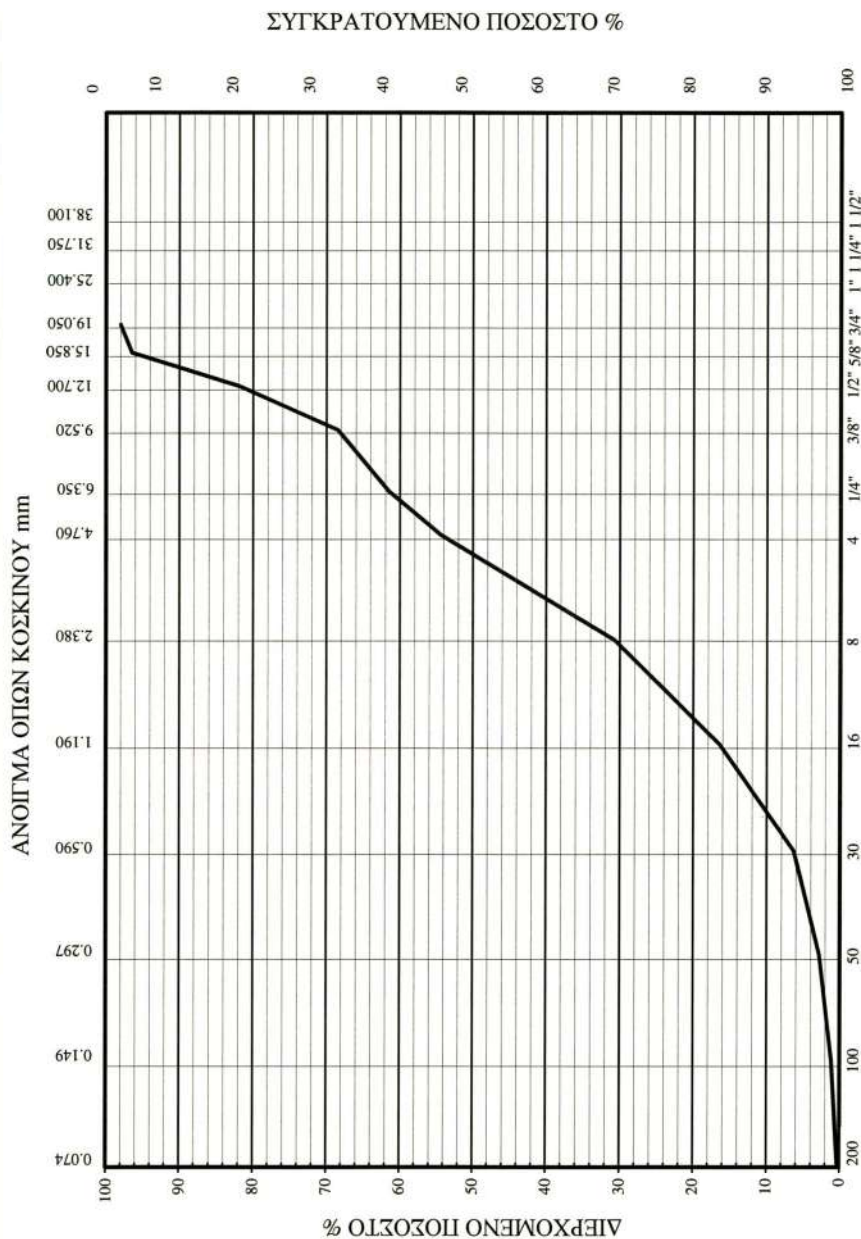
Πίνακας 3.4 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις υλικών I έως V

Κόσκινο	Άνοιγμα κόσκινου (mm)	Κοκκομετρική διαβάθμιση				
		Υλικό I (100/0)	Υλικό II (75/25)	Υλικό III (50/50)	Υλικό IV (25/75)	Υλικό V (0/100)
3/4"	19.05	100	99	99	98	98
5/8"	15.85	95	95	96	96	96
1/2"	12.7	85	84	83	83	82
3/8"	9.52	70	70	69	69	68
1/4"	6.35	61	61	61	61	61
No 4	4.76	55	55	55	55	54
No 8	2.38	46	42	39	35	31
No 16	1.19	36	31	26	21	16
No 30	0.59	26	21	16	11	6
No 50	0.297	21	16	12	7	3
No 100	0.149	16	12	9	5	1
No 200	0.074	13	10	7	3	0



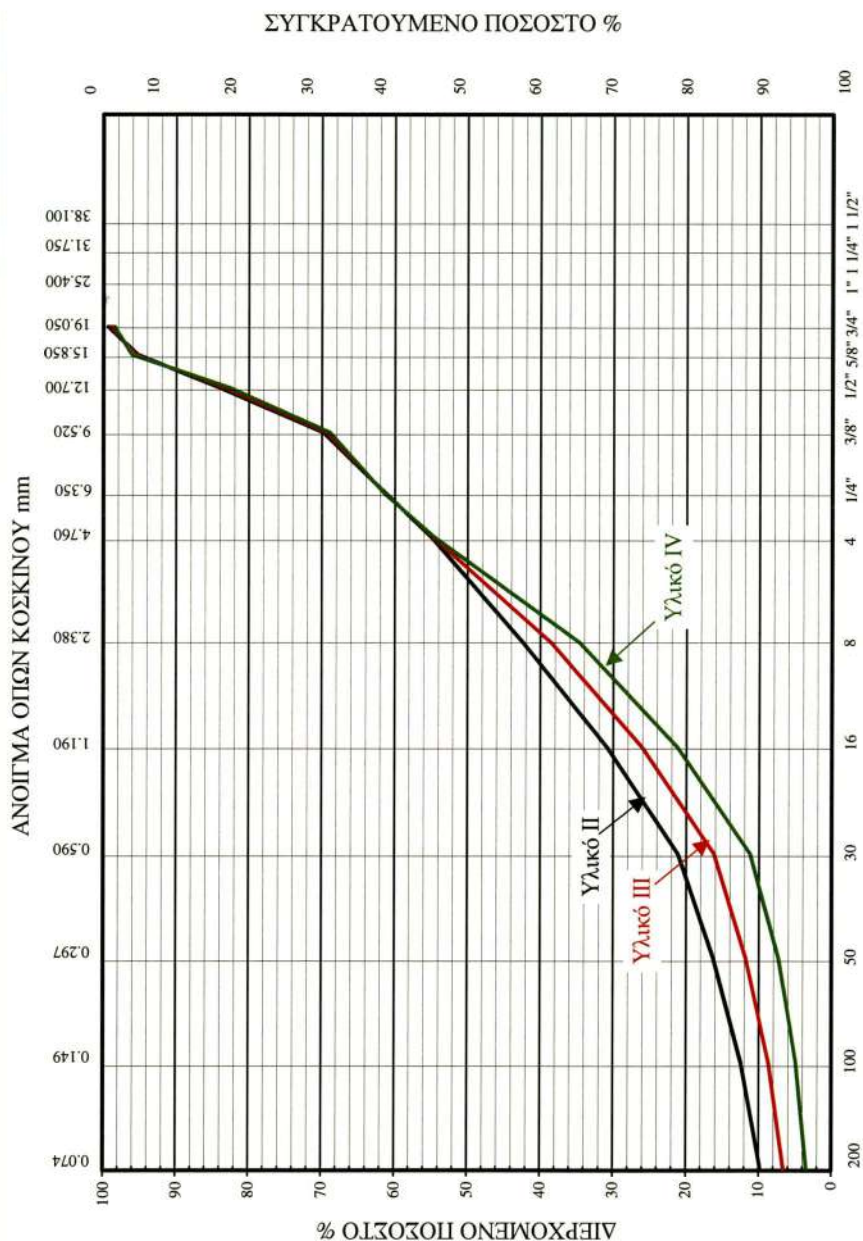
ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΟΣΚΙΝΑ

Σχήμα 3.3 : Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού Ι (100/0)



ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΟΣΚΙΝΑ

Σχήμα 3.4 : Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού V (0/100)



ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΟΣΚΙΝΑ

Σχήμα 3.5 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις υλικών II (75/25), III (50/50) και IV (25/75)

3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παρασκευάστηκαν δοκίμια των ακόλουθων τύπων :

- ο Κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm
- ο Κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm
- ο Πρισματικά δοκίμια : Για καθαρό εφελκυσμό 100 * 100* 500 mm (Δοκάρια)
Για κάμψη (στατική ή δυναμική φόρτιση) : 100 * 100
* 400 mm
Για ερπυσμό 100 * 100 * 200 mm

Σε ορισμένες μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν πρισματικά δοκίμια, τα οποία προήλθαν από κοπή και μόρφωση σε πρισματικά δοκίμια των επιμηκέστερων τεμαχίων που προέκυψαν μετά τη δοκιμή του εφελκυσμού ή κάμψης.

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμών είναι η ακόλουθη :

Αρχικά ζυγίζονται τα αδρανή υλικά (θραυστά και φρεζαρισμένα) σε ζυγό δυνατότητας ανάγνωσης 20 gr, και τοποθετούνται στον αναμικτήρα. Τα τοιχώματα του αναμικτήρα πριν από την τοποθέτηση των αδρανών ψεκάζονται, ώστε να μην διαφύγει νερό από το μίγμα προς τα τοιχώματα.

Ακολουθεί η ζύγιση του τσιμέντου και του νερού, με ζυγό δυνατότητας ανάγνωσης 0.1 gr. Το νερό ζυγίζεται σε δοχείο, το οποίο έχει προηγουμένως βραχεί, γιατί συγκρατείται επιφανειακό νερό στο τοιχώματά του.

Ακολουθεί ξηρή ανάμιξη των αδρανών υλικών και μετά την ομογενοποίησή τους προστίθεται ικανή ποσότητα νερού, ώστε να διαβραχούν πλήρως τα αδρανή και η ανάμιξη συνεχίζεται για 1 min περίπου.

Η ανάμιξη σταματά και τα αδρανή παραμένουν στον αναμικτήρα για 15 - 20 λεπτά περίπου, ώστε να απορροφήσουν το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρασίας απορρόφησης. Στο διάστημα αυτό, ο αναμικτήρας παραμένει σκεπασμένος με πλαστικά φύλλα, ώστε να αποτρέπεται η εξάτμιση του νερού από τη μάζα των αδρανών.

Μετά την πάροδο του εικοσάλεπτου, ακολουθεί επανανάμιξη, με προσθήκη του τσιμέντου και του υπόλοιπου νερού, μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του μίγματος.

Στη συνέχεια, το υλικό τοποθετείται στις κατάλληλες μήτρες, σε δύο στρώσεις, ίσου περίπου πάχους (τόσο για τα κυβικά και τα πρισματικά δοκίμια, όσο και για τα κυλινδρικά) και συμπτυνώνεται.

Όλες οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών ήταν χυτοσιδηρές.

Η συμπίκνωση γίνεται με ηλεκτρόσφουρα, με εφαρμογή ταυτόχρονα δόνησης και πίεσης, μέχρις αρνήσεως [ΕΛΟΤ - EN 13286.51, 2004]. Η ηλεκτρόσφουρα είναι εφοδιασμένη με δονητικό στέλεχος, στο άκρο του οποίου είναι προσαρμοσμένη μεταλλική πλάκα διαστάσεων :

- ο 97*97 mm για τα κυβικά δοκίμια
- ο Διαμέτρου 97 mm για τα κυλινδρικά δοκίμια
- ο 97*140 mm για τα πρισματικά δοκίμια

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ηλεκτρόσφουρας και της εφαρμογής δόνησης στην επιφάνεια του ασυμπύκνωτου υλικού εξασκείται ταυτόχρονα κατακόρυφη δύναμη μέσω της ηλεκτρόσφουρας στην επιφάνεια της προς συμπίκνωση στρώσης ίση περίπου με 20 kg, για περίπου 2 - 4 s. Σε περίπτωση πρισματικών δοκιμών η δόνηση - πίεση επαναλαμβάνεται για άλλα 2 - 4 s σε διαφορετική θέση.

Για πλήρη συμπίκνωση κάθε στρώσης συνήθως απαιτούνται 3 - 5 επαναλήψεις δόνησης - πίεσης σε διαφορετική θέση κάθε φορά. (Η επίτευξη πλήρους συμπτυνώσεως επιτυγχάνεται όταν η μετακίνηση του υλικού είναι μόνο οριζόντια).

Η επιφάνεια της κατώτερης στρώσης αναμοχλεύεται με αιχμηρό μεταλλικό αντικείμενο (πχ κατσαβίδι) σε βάθος 2 - 5 mm πριν από τη διάστρωση της δεύτερης στρώσης, σε μια προσπάθεια να εξασφαλιστεί καλή συνάφεια μεταξύ των δύο στρώσεων και να αποφευχθεί ο σχηματισμός διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ τους.

Πριν τη διάστρωση της δεύτερης στρώσης, τοποθετείται μεταλλική επέκταση καθ' ύψος του καλουπιού (ύψος $\approx$ 2 - 2.5 cm), ειδικά κατασκευασμένη για τον σκοπό αυτό, για να συγκρατεί το αρχικά ασυμπύκνωτο υλικό που απαιτείται, έτσι ώστε το τελικό συμπτυνωμένο ύψος του δοκιμίου να είναι το απαιτούμενο.

Μετά το πέρας της κύριας συμπίκνωσης το ύψος του δοκιμίου πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το απαιτούμενο. Απαγορεύεται η προσθήκη υλικού στο

δοκίμιο μετά το πέρας της συμπίκνωσης, γιατί το υλικό που θα προστεθεί δεν θα αποκτήσει την απαιτούμενη συνάφεια με το υλικό της υποκείμενης στρώσης.

Το υπερβάλλον ύψος αποξέεται ελαφρώς και η τελική επιφάνεια του δοκιμίου διαμορφώνεται με τοποθέτηση επίπεδης μεταλλικής άκαμπτης πλάκας (διαστάσεων μεγαλύτερων από τις εσωτερικές διαστάσεις του καλουπιού) στην επιφάνεια του συμπυκνωμένου υλικού και άσκηση πρόσθετης δόνησης - πίεσης για 2 - 5 sec. Η πλάκα απομακρύνεται με οριζόντια περιστροφική κίνηση για να μην απομακρυνθούν μαζί και τυχόν τεμάχια υλικού που έχουν προσκολληθεί.

Η πυκνότητα του νωπού δοκιμίου εκτιμάται από το βάρος του και τις διαστάσεις των καλουπιών.

3.3 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

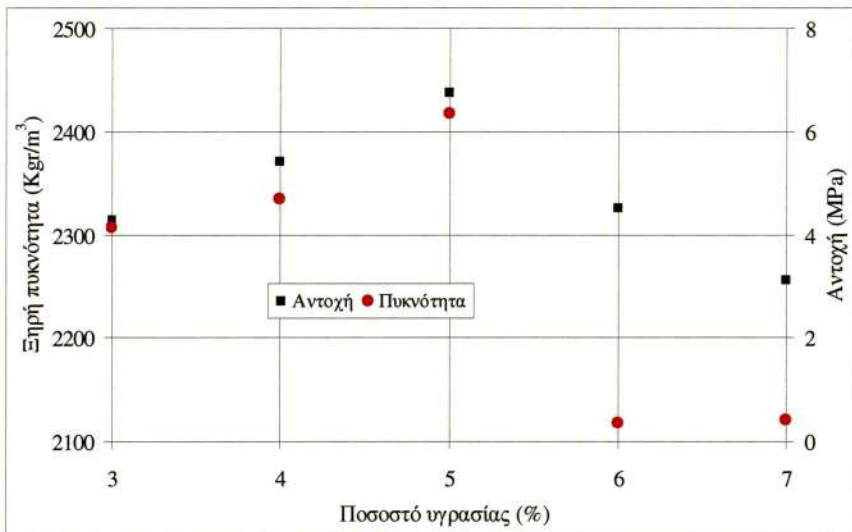
Τα δοκίμια μετά τη συμπίκνωση, παραμένουν σε θάλαμο συντήρησης, θερμοκρασίας 20 ± 2 °C και σχετικής υγρασίας RH > 95%, σκεπασμένα με πλαστικά φύλλα και υγρές λινάτσες, ώστε να αποτραπεί η εξάτμιση του νερού από την επιφάνειά τους, μέχρι την επόμενη ημέρα, που ξεκαλουπώνονται. Μετά το ξεκαλούπωμα, ζυγίζονται και ή δοκιμάζονται (αν η δοκιμή πραγματοποιείται σε ηλικία μίας ημέρας) ή τοποθετούνται στο θάλαμο συντήρησης μέχρι τη δοκιμή τους (ή μέχρι την προετοιμασία για τη δοκιμή, αν η δοκιμή πραγματοποιείται σε διαφορετική θερμοκρασία). Κατά την παραμονή τους στο θάλαμο συντήρησης τα δοκίμια παραμένουν τυλιγμένα με πλαστική μεμβράνη ώστε να αποτρέπεται η εξάτμιση του νερού από την επιφάνειά τους. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι για την αποφυγή στρέβλωσης, τα πρισματικά δοκίμια (10*10*50 cm) τοποθετούνται επάνω σε σχετικώς άκαμπτες ξύλινες ή γυάλινες πλάκες.

3.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ - ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

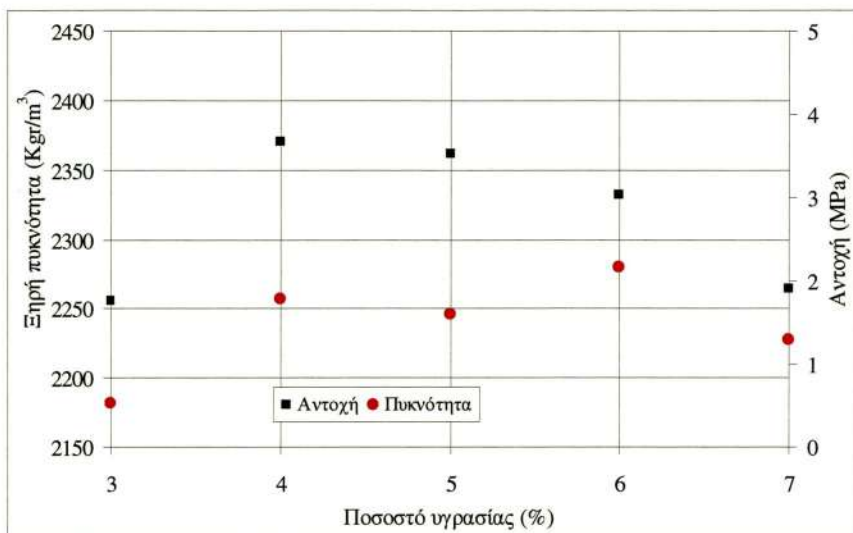
Όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν, για όλα τα μίγματα, περιέχουν ίδιο ποσοστό υγρασίας. Για την εύρεση του ποσοστού υγρασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπίκνωσης, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 13286.04 [2003].

Για τα υλικά I, III και V (μίγματα 100/0,50/50, 0/100) παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 10 cm με σταθερό ποσοστό τσιμέντου (3 %) και διάφορα ποσοστά υγρασίας. Για κάθε ποσοστό υγρασίας παρασκευάστηκαν δύο δοκίμια. Σε όλα τα δοκίμια έγινε μέτρηση της υγρής πυκνότητάς τους και δοκιμή σε θλίψη σε ηλικία μίας ημέρας. Τα διαγράμματα αντοχής και ξηρής πυκνότητας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας δίνονται στα Σχήματα 3.6, 3.7 και 3.8 για τα υλικά I, III και V αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι τόσο η αντοχή όσο και η πυκνότητα παρουσιάζουν μέγιστη τιμή για κάποιο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, ενώ για μικρότερα ή μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας οι τιμές μικραίνουν, όπως είναι αναμενόμενο.

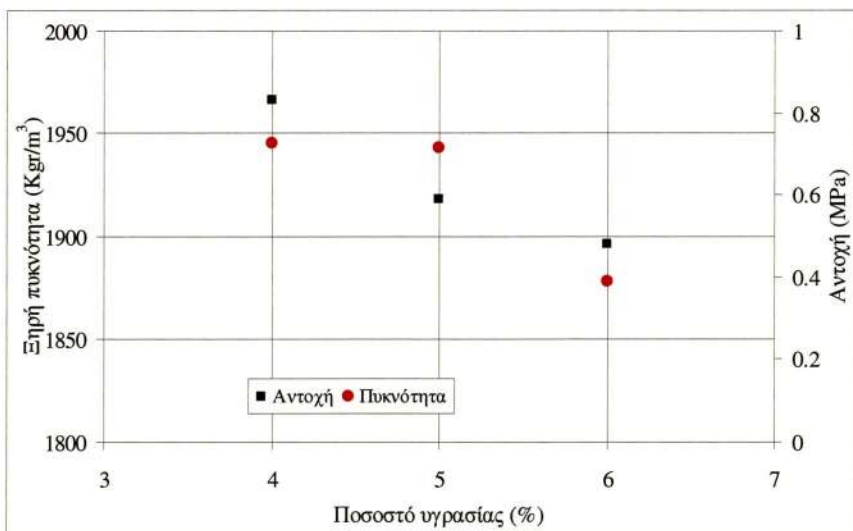
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, αποφασίστηκε η χρήση ποσοστού υγρασίας 5.2 % για όλα τα υλικά (I - V). Το ποσοστό αυτό (λίγο μεγαλύτερο από το βέλτιστο) επιλέχθηκε, για πρακτικούς λόγους, ώστε τα δοκίμια να παρουσιάζουν πιο ομαλή και κλειστή επιφάνεια, και να είναι πιο εύκολη η παρασκευή τους.



Σχήμα 3.6 : Διάγραμμα αντοχής - πυκνότητας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας (%) για το υλικό I (100/0)



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα αντοχής - πυκνότητας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας (%) για το υλικό III (50/50)



Σχήμα 3.8 : Διάγραμμα αντοχής - πυκνότητας σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας (%) για το υλικό V (0/100)

3.5 ΔΟΚΙΜΕΣ

3.5.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Οι δοκιμές σε θλίψη κύβων και ισοδύναμων κύβων πραγματοποιούνται με μηχανή δοκιμής MTS, μέγιστου φορτίου 100 kN. Η μηχανή διαθέτει σερβο-υδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου που ρυθμίζεται μέσω H/Y και ειδικής σερβοβαλβίδας υψηλής απόκρισης με κλειστό κύκλωμα αναπληροφόρησης (closed feedback control loop). Με το σύστημα αυτό, η εντολή που δίνεται στη μηχανή ελέγχεται συνεχώς σε σχέση με την απόκριση, και αυτόματα δίνεται μέσω του H/Y εντολή αυτόματης διόρθωσης (αν απαιτείται). Οι δοκιμές που δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν με τη μηχανή MTS (λόγω του περιορισμού του μέγιστου φορτίου), πραγματοποιούνται σε μηχανή δοκιμής TONI μέγιστου φορτίου 600 kN, σταθερής ταχύτητας επιβολής φορτίου.

Η ταχύτητα φόρτισης για τις δοκιμές σε θλίψη είναι 0.6 MPa/sec, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.03 [2001].

3.5.1.1 Κύβου

Για τις δοκιμές αυτές παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm.

3.5.1.2 Ισοδύναμου κύβου

Μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό ή/και σε κάμψη, το ένα (το επιμηκέστερο) ή και τα δύο τμήματα των πρισματικών δοκιμών που προέκυψαν μετά τη θραύση, χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή ισοδύναμου κύβου, Φωτογραφία 3.2



Φωτογραφία 3.2 : Δοκιμή ισοδύναμου κύβου

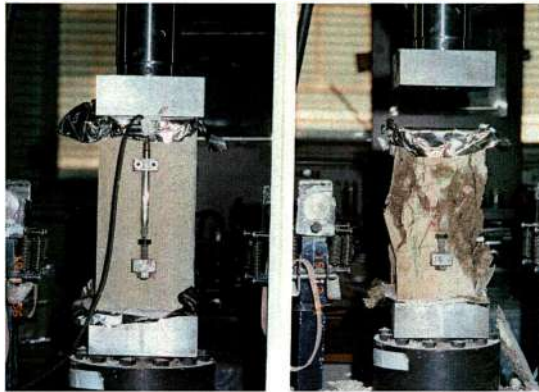
3.5.1.3 Μονοαξονική θλίψη - Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια με μηχανή δοκιμής MTS, με ταχύτητα επιβολής φορτίου 0.6 kN/sec. Μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη πραγματοποιήθηκε σε :

- ο Πρισματικά δοκίμια, διαστάσεων 100mm*100mm*200mm, τα οποία είτε παρασκευάστηκαν ειδικά για τον σκοπό αυτό είτε προήλθαν μετά από κοπή και λείανση των επιμηκέστερων τμημάτων των πρισματικών δοκιμίων που απέμειναν μετά τη δοκιμή σε κάμψη ή σε εφελκυσμό
- ο Πρισματικά δοκίμια, διαστάσεων 100mm*100mm*500mm, πριν από τη δοκιμή τους σε εφελκυσμό, σε φορτίο ίσο περίπου με το 1/3 του αναμενόμενου φορτίου θραύσεως.

Πιο συγκεκριμένα, για την ηλικία της μίας ημέρας και για το ποσοστό τσιμέντου 3 % πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη, σε πρίσματα 100 mm * 100 mm * 200 mm, με μηχανή δοκιμής MTS, μέγιστου φορτίου 100 kN. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη με την αντοχή σε θλίψη κύβου και ισοδύναμου κύβου βρέθηκε ότι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη. Το ίδιο ισχύει και από τη σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας σε θλίψη σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό. Οι λόγοι στους οποίους αποδίδεται αυτή η διαφορά περιγράφονται αναλυτικά στην Παράγραφο 5.2.1. Για τον λόγο αυτό, οι δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη περιορίστηκαν μόνο στην εύρεση του μέτρου ελαστικότητας για την ηλικία των εξήντα ημερών. (Για την ηλικία αυτή, δεν παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια. Τα πρισματικά δοκίμια προέκυψαν από κοπή των επιμηκέστερων πρισματικών δοκιμίων 100 mm * 100mm * 500 mm μετά τη δοκιμή τους σε εφελκυσμό).

Η μέτρηση των παραμορφώσεων πραγματοποιήθηκε με δύο επαγωγικά ηλεκτρομηκυσνόμετρα (LVDT's), κατάλληλα προσαρμοσμένα, στο μέσον του ύψους του δοκιμίου, σε δύο αντιδιαμετρικές επιφάνειές του και σε μήκος 100mm, όπως φαίνεται στην Φωτογραφία 3.3, στην οποία φαίνεται επίσης το δοκίμιο μετά τη θραύση του.

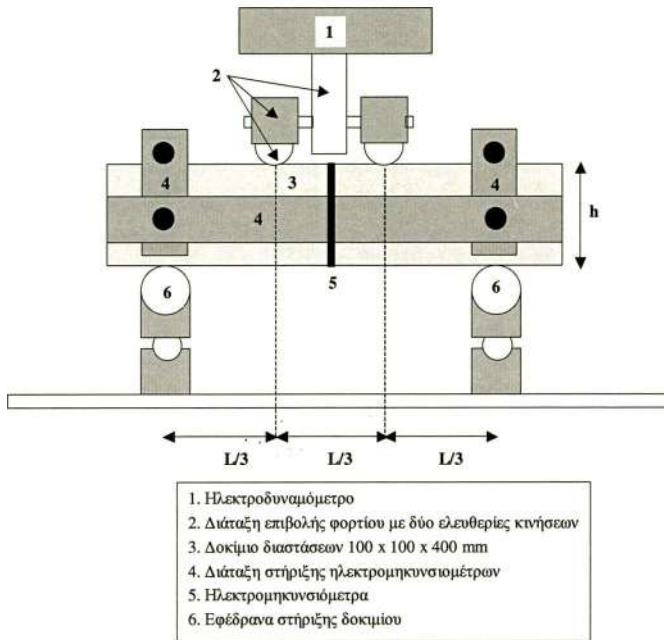


Φωτογραφία 3.3 : Δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη πρίσματος, σύστημα στήριξης των LVDT's - θραύση δοκιμίου

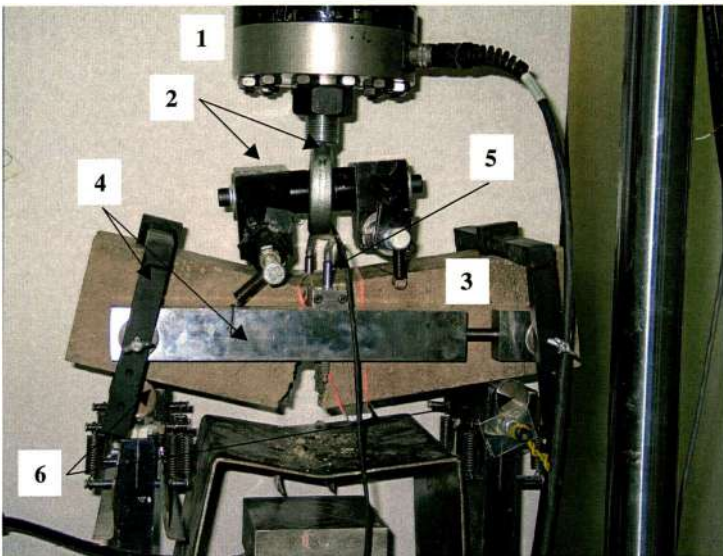
3.5.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

3.5.2.1 Κάμψη - Μέτρο ελαστικότητας

Οι δοκιμές σε κάμψη πραγματοποιήθηκαν με μηχανή δοκιμών MTS, μέγιστου φορτίου 100 kN. Για την έδραση του δοκιμίου στη μηχανή δοκιμής κατασκευάστηκαν δύο μεταλλικές άκαμπτες πλάκες, οι οποίες στηρίζονται ακλόνητα στο πλαίσιο της μηχανής. Στο επάνω μέρος των πλακών αυτών μέσω σφαιρικής άρθρωσης, προσαρμίζονται κύλινδροι στους οποίους εδράζεται το δοκίμιο. Το φορτίο καταγράφεται με τη βοήθεια ηλεκτροδυναμόμετρου μέγιστου φορτίου 25 kN, στο οποίο είναι προσαρμοσμένη η διάταξη για την επιβολή του φορτίου, Σχήμα 3.9, Φωτογραφία 3.4.



Σχήμα 3.9 : Σχηματική διάταξη δοκιμής σε κάμψη



Φωτογραφία 3.4 : Διάταξη δοκιμής σε κάμψη

Η φόρτιση γίνεται στα τρίτα του ανοίγματος του δοκιμίου, σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.05 [2001], με ταχύτητα 0.2 kN/s (0.06 MPa/s). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται το βέλος κάμψης του δοκιμίου, για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη. Για τη μέτρηση του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκαν δύο επαγωγικά ηλεκτρομηκυστόμετρα, τα οποία προσαρμόστηκαν κατακόρυφα στις δύο ελεύθερες παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου, στο μέσον του μήκους του, με τη βοήθεια ειδικής διάταξης που κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτό, Φωτογραφία 3.4. Η διάταξη - γέφυρα - στηρίζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου που φορτίζεται, ακριβώς επάνω από τις επιφάνειες στήριξης του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό η διάταξη παρακολουθεί τη βύθιση του δοκιμίου, λόγω παραμόρφωσής του στις στηρίξεις, έτσι ώστε οι παραμορφώσεις που μετρώνται κατά τη διάρκεια της δοκιμής να μην προσαυξάνονται από τις τυχόν υποχωρήσεις του δοκιμίου στις επιφάνειες στήριξης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις του βέλους κάμψης έγιναν αρχικά με μία διάταξη στήριξης (Σχήμα 3.9), η οποία δεν παρείχε απόλυτη σταθερότητα των μηχανοσυστημάτων. Αποδείχθηκε μετά από αριθμό δοκιμών ότι οι κραδασμοί από τη λειτουργία του υδραυλικού συστήματος της μηχανής μεταδίδονταν στο πλαίσιο της μηχανής και τελικά στα μηχανοσυστήματα μέσω της γέφυρας, με αποτέλεσμα τα μηχανοσυστήματα να παρουσιάζουν ένα είδος ανεπιθύμητου θορύβου. Για τον λόγο αυτό, προώθησης της έρευνας, έγινε αλλαγή του πλαισίου δύο φορές και άλλες δύο φορές έγιναν μικρομεταβολές. Οι αλλαγές συνίσταντο στη μεταβολή της μεθόδου στήριξης της γέφυρας και στη μέθοδο συνεργασίας των δύο οριζόντιων τμημάτων της (Φωτογραφία 3.4, σημείο 4).

Οι μετρήσεις σε 60 ημέρες έγιναν με βελτιωμένο τύπο γέφυρας και γι' αυτό οι μικροανωμαλίες στο διάγραμμα "σ - βέλους κάμψης" έχουν ελαχιστοποιηθεί και η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι αυξημένη.

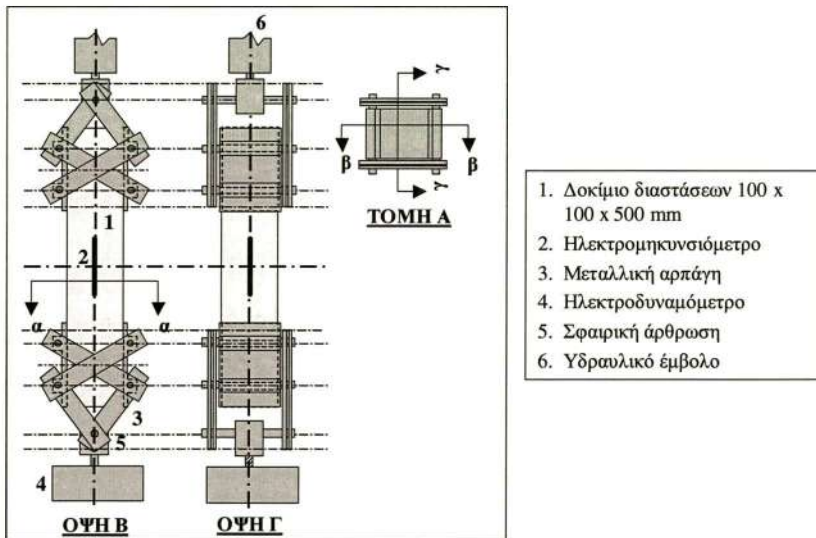
Τελικά κατασκευάστηκε ειδική γέφυρα σε μηχανουργείο με μεγάλη ακρίβεια (Φωτογραφία 3.4), έτσι ώστε η σύνδεση των οριζόντιων τμημάτων να γίνεται με τρόπο που να ελαχιστοποιείται η δυνατότητα σχετικής κατακόρυφης μετακίνησης των δύο τμημάτων ενώ επιτρέπεται η οριζόντια σχετική μετακίνηση, σχεδόν χωρίς τριβή. Με τη γέφυρα αυτή έγιναν οι μετρήσεις της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας (Παράγραφος 5.3.2).

3.5.2.2 Διάρρηξη

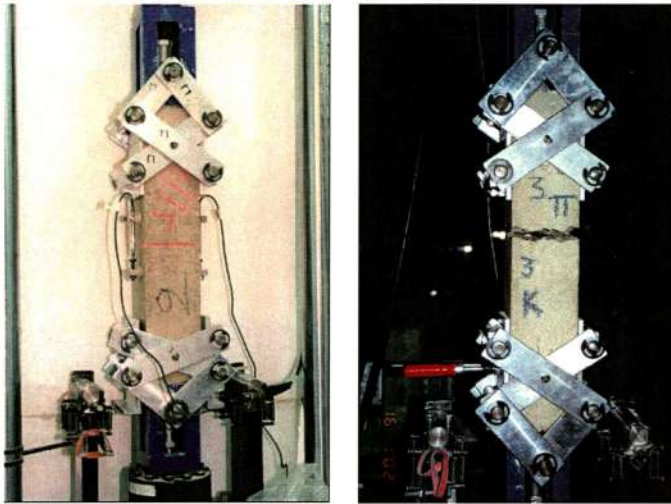
Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι κυλινδρικά διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm. Η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.06 [2000]. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ, με μηχανή δοκιμής ELE ADR 3000. μέγιστου φορτίου 3000 kN, με τα ίδια υλικά που πραγματοποιήθηκαν και οι δοκιμές στο ΕΜΠ.

3.5.2.3 Μονοαξονικός εφελκυσμός - Μέτρο ελαστικότητας

Η πλειονότητα των δοκιμών σε μονοαξονικό εφελκυσμό (εκτός των δοκιμών ηλικίας μίας ημέρας με ποσοστό τσιμέντου 3 %) πραγματοποιήθηκε με τη μηχανή δοκιμής MTS. Η άσκηση του φορτίου πραγματοποιήθηκε με ειδικά κατασκευασμένες για τον σκοπό αυτό αρπάγες, Σχήμα 3.10 και Φωτογραφία 3.5.



Σχήμα 3.10 : Σχηματική διάταξη επιβολής φορτίου στις δοκιμές εφελκυσμού

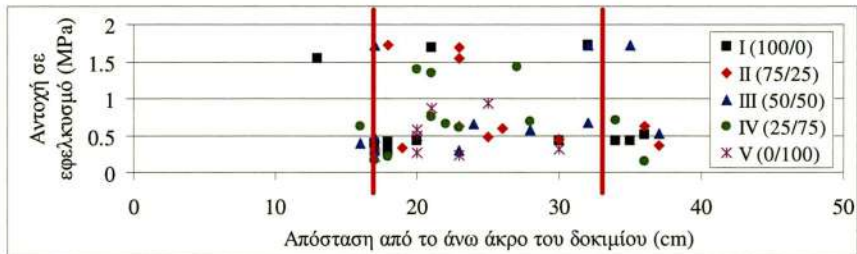


Φωτογραφία 3.5 : Διάταξη για τη δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό (κατά την κατακόρυφη διεύθυνση)

Οι αρπάγες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.10 διαθέτουν σφαιρική άρθρωση για την αποφυγή εκκεντροτήτων φόρτισης. Οι πλάκες με τις οποίες έρχονται σε επαφή οι δύο παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου, στην εσωτερική πλευρά τους φέρουν ραβδώσεις, οι οποίες αυξάνουν την τριβή στις επιφάνειες στήριξης του δοκιμίου και αποτρέπουν την ολίσθηση του δοκιμίου κατά τη φόρτιση.

Η πλήρης διερεύνηση της συσκευής παρουσιάζεται από τους [Kolias and Williams 1978b] και όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 2.2.1, έχει αποδειχθεί ότι δεν υποεκτιμά την εφελκυστική αντοχή, εφόσον ο μέγιστος κόκκος του εξεταζόμενου υλικού υπερβαίνει τα 16 mm περίπου. Σε επίρρωση των αποτελεσμάτων αυτών, στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται οι αντοχές κάθε δοκιμίου, από όλα τα εξετασθέντα υλικά, σε σχέση με τη θέση θραύσεως και τη θέση των αρπαγών. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των θραύσεων είναι εκτός αρπάγης (62.5 %) με 19.6 % και 16.1 % των θραύσεων να λαμβάνουν χώρα μέσα ή πολύ κοντά στην άνω και κάτω αρπάγη αντίστοιχα. Εάν οι αντοχές θεωρηθούν για κάθε υλικό και ποσοστό τσιμέντου ξεχωριστά, δεν παρατηρείται μείωση της αντοχής, όταν η θραύση γίνεται εντός της αρπάγης. Αν οι συγκεντρώσεις τάσεων στα άκρα της αρπάγης επηρέαζαν τα αποτελέσματα, τότε οι θραύσεις εντός των αρπαγών θα έδειχναν μειωμένη αντοχή,

γεγονός που δεν συμβαίνει. Άρα δεν υπάρχει τέτοια επιρροή και η καταγεγραμμένη αντοχή είναι η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό.



Σχήμα 3.11 : Αποστάσεις επιφανειών θραύσης από το άνω άκρο του δοκιμίου για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν

Η επιβολή του φορτίου γίνεται με σταθερή ταχύτητα, 0.2 kN/s. Το φορτίο καταγράφεται με τη βοήθεια ηλεκτροδυναμόμετρου μέγιστου φορτίου 10 kN.

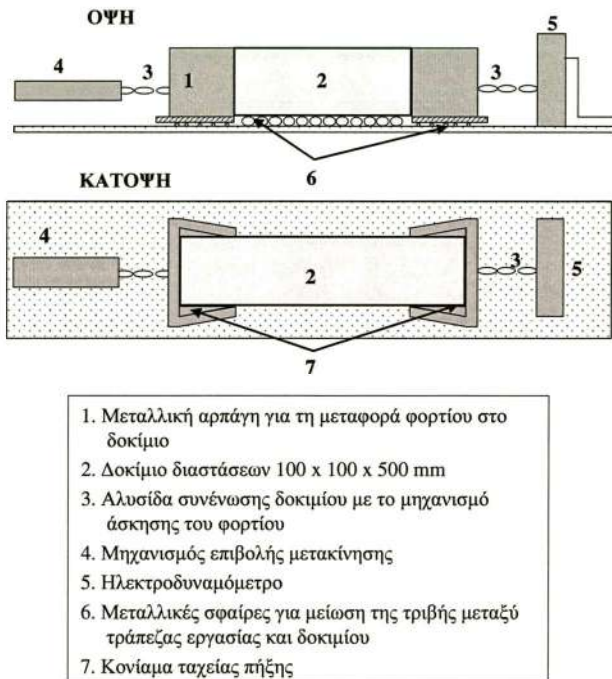
Παράλληλα με την καταγραφή του φορτίου μετρώνται και οι παραμορφώσεις για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε καθαρό εφελκυσμό. Στο μέσον του ύψους του δοκιμίου και σε μήκος 100 mm προσαρμόζονται κατακόρυφα επαγωγικά ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (LVDT's), με τη διάταξη που φαίνεται στη Φωτογραφία 3.5, σε δύο παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου για την μέτρηση των παραμορφώσεων.

Πριν από τη δοκιμή σε εφελκυσμό, στο δοκίμιο επιβάλλεται θλίψη και μετρούνται οι παραμορφώσεις για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου σε θλίψη. Στο δοκίμιο ασκείται θλίψη μέσω ειδικά κατασκευασμένων μεταλλικών πλακών που προσαρμόζονται στις αρπάγες. Οι πλάκες αυτές τοποθετούνται ταυτόχρονα με τις αρπάγες για τη δοκιμή σε εφελκυσμό. Η διάταξη αυτή κατασκευάστηκε έτσι ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο χρόνος που απαιτείται μεταξύ της δοκιμής σε θλίψη και σε εφελκυσμό στο ίδιο δοκίμιο, όσο και μεταξύ των δοκιμών. Ο χρόνος που θα απαιτείτο για την επανατοποθέτηση του δοκιμίου και των αρπαγών για τον εφελκυσμό μετά τη δοκιμή σε θλίψη είναι σημαντικός και για τις περιπτώσεις δοκιμών ηλικίας μίας ημέρας κρίσιμος.

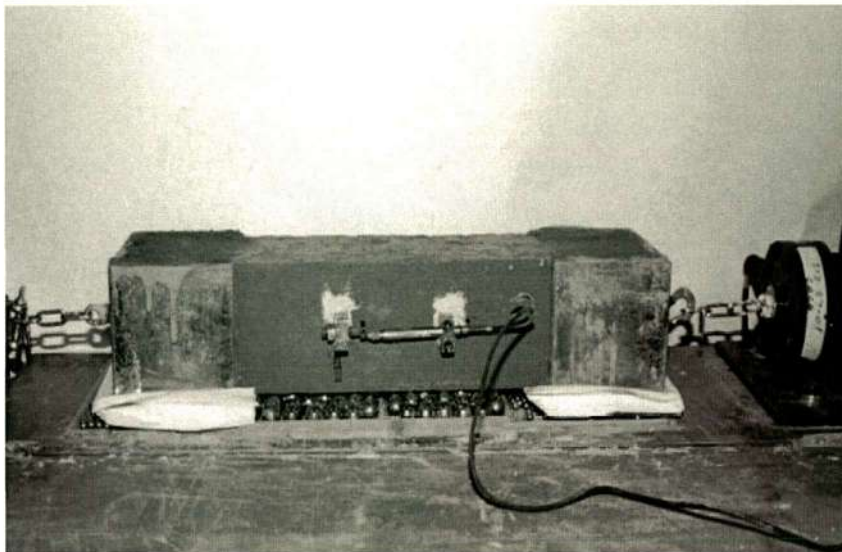
Για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη η επιβολή του φορτίου γίνεται με σταθερή ταχύτητα, μέχρι το τρίτον του φορτίου θραύσης (το οποίο είναι γνωστό από δοκιμές σε θλίψη κύβου).

α. Μονοαξονικός εφελκυσμός - Μέτρο ελαστικότητας για ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 3 %

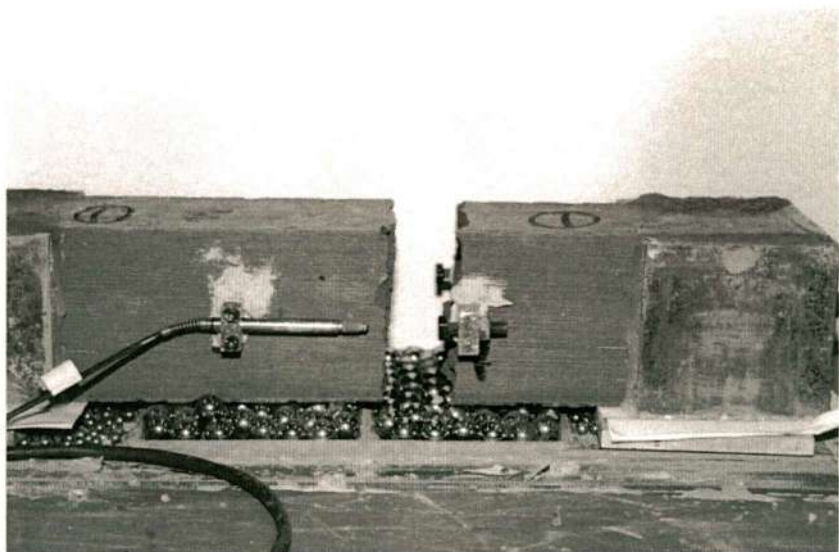
Λόγω της πολύ μικρής αναμενόμενης αντοχής των δοκιμών και του μεγάλου όγκου τους (100mm*100mm*500mm) το δοκίμιο πρέπει να βρίσκεται σε οριζόντια θέση κατά τη δοκιμή, διότι θα επέλθει θραύση λόγω ιδίου βάρους αν τοποθετηθεί κατακόρυφο στη μηχανή δοκιμής. Έτσι, οι δοκιμές αυτές δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν με τη μηχανή δοκιμής MTS. Ο εφελκυσμός για την ηλικία της μίας ημέρας και για ποσοστό τσιμέντου 3% πραγματοποιείται με ειδική διάταξη, που κατασκευάστηκε ειδικά για τον σκοπό αυτό. Η διάταξη της συσκευής δοκιμής δίνεται στο Σχήμα 3.12, Φωτογραφίες 3.6, 3.7.



Σχήμα 3.12 : Σχηματική διάταξη δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια ηλικίας μίας ημέρας

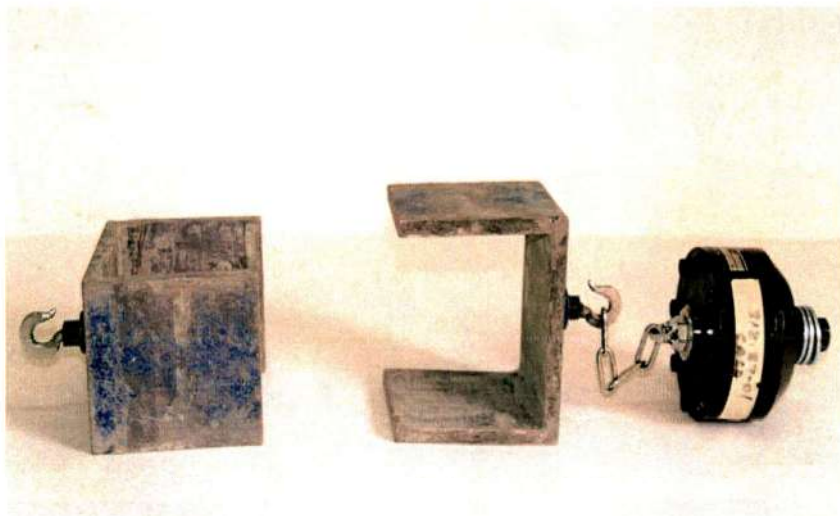


Φωτογραφία 3.6 : Οριζόντια διάταξη δοκιμής σε μονοαξονικό εφελκυσμό



Φωτογραφία 3.7 : Οριζόντια διάταξη δοκιμής σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Για την άσκηση του επιβαλλόμενου φορτίου στο δοκίμιο και τη στήριξή του κατασκευάστηκαν μεταλλικά πλαίσια σχήματος περίπου "λοξού" Π, τα οποία προσαρμόζονταν στα δύο άκρα του δοκιμίου και σε μήκος 11 cm, βλ. Σχήμα 3.12, Φωτογραφία 3.8.



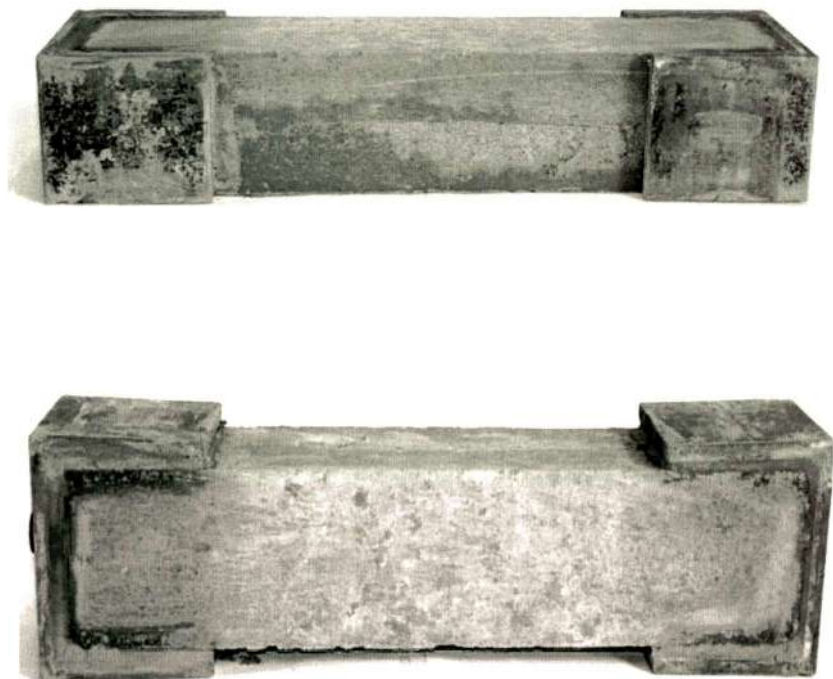
Φωτογραφία 3.8 : Αρπάγες για την εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου - Ηλεκτροδυναμόμετρο

Για τη μείωση των τριβών στην επιφάνεια έδρασης του δοκιμίου με τη διάταξη δοκιμής, κάτω από το δοκίμιο τοποθετούνται μεταλλικές σφαίρες, βλ. Φωτ. 3.9. Στην περιοχή των αρπαγών το δοκίμιο εδράζεται σε μεταλλικές πλάκες (έτσι ώστε να μπορούν οι παράπλευρες επιφάνειες των αρπαγών να πληρωθούν με epaco χωρίς αυτό να απλώνεται στην επιφάνεια στήριξης του δοκιμίου). Άρα, οι σφαίρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο κατάλληλα επιλεγμένων διαμέτρων (μία για τις περιοχές των αρπαγών και μία για το υπόλοιπο μήκος του δοκιμίου) ώστε τελικά το δοκίμιο να είναι οριζόντιο και να εδράζεται σε όλο το μήκος του σε σφαίρες.



Φωτογραφία 3.9 : Βάση κύλισης δοκιμών με μεταλλικά σφαιρίδια για την μείωση των τριβών

Το κενό μεταξύ των αρπαγών και του δοκιμίου πληρώνεται με ταχύπηκτο τσιμεντοκονίαμα (Emaco), Φωτογραφία 3.10. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμαστικές φορτίσεις με διάφορα υλικά πλήρωσης (πχ. διογκωμένη πολυστερίνη, εποξειδική ρητίνη) μέχρι να επιλεγεί το Emaco. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ότι το υλικό πλήρωσης έπρεπε να αποκτά ικανοποιητική αντοχή, (τέτοια ώστε να μην αποκολλάται το δοκίμιο από τις αρπάγες κατά τη δοκιμή), σε μικρό χρόνο, (το πολύ μία ώρα). Τόσο η διογκωμένη πολυστερίνη, όσο και η εποξειδική ρητίνη χρειάζονται αρκετές ώρες ώστε η αντοχή που αναπτύσσουν να είναι τέτοια που θα αποτρέπει την αποκόλληση του δοκιμίου από τις αρπάγες. Επιπλέον, η εποξειδική ρητίνη παρουσιάζει το πρόβλημα της επίπονης και χρονοβόρας αποκόλλησής της από τις αρπάγες. Έτσι τελικά επιλέχθηκε το Emaco, με το οποίο ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί η δοκιμή σε εφελκυσμό σε μισή ώρα περίπου από την εφαρμογή του. Στον χρόνο αυτό το δοκίμιο παρέμενε τυλιγμένο με μεμβράνη, ώστε να αποτρέπεται η εξάτμιση του νερού από την επιφάνειά του.



Φωτογραφία 3.10 : Πλήρωση των κενών μεταξύ δοκιμίου και αρπάγων με ταχύπηκτο τσιμεντοκονίαμα

Οι αρπάγες ενώνονται με αλυσίδες, για την αποφυγή εκκεντροτήτων φόρτισης, από τη μία πλευρά με τον μηχανισμό άσκησης του εφελκυστικού φορτίου και από την άλλη με το ηλεκτροδυναμόμετρο (load cell), μέγιστου φορτίου 50 kN.

Στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου και σε μήκος 100 mm προσαρμόζονταν επαγωγικά ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (LVDT's), σε δύο παράπλευρες επιφάνειες του δοκιμίου για τη μέτρηση των παραμορφώσεων, Φωτογραφίες 3.6 και 3.7.

Σημειώνεται ότι το δοκίμιο, λόγω της πολύ μικρής αντοχής του και του κινδύνου ρηγμάτων της - λόγω του μεγάλου βάρους και όγκου του - ξεκαλουπωνόταν απευθείας στη διάταξη δοκιμής.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα μετακίνησης, που ισοδυναμεί με ταχύτητα φόρτισης του δοκιμίου περίπου 2 kN/min, (0.033 kN/s), όπως αυτή υπολογίστηκε από τα αρχεία, στα οποία κατά τη διάρκεια της δοκιμής γίνεται συνεχής καταγραφή του φορτίου και των παραμορφώσεων.

Η πλειονότητα των θραύσεων έλαβε χώρα στο ελεύθερο μήκος μακριά από τις αρπάγες, προς το μέσον του δοκιμίου, πλην δύο περιπτώσεων, που η θραύση του δοκιμίου έγινε στα άκρα του "λοξού" Π της αρπάγης. Άρα, με τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται ότι δεν επιβάλλονταν σημαντικές πρόσθετες παρασυνετικές τάσεις στα σημεία στήριξης του δοκιμίου και η αντοχή που καταγράφεται είναι μία αποδεκτή προσέγγιση της ορθής εφελκυστικής τάσης.

Σημειώνεται ότι η πλήρης διερεύνηση της πειραματικής διάταξης θεωρήθηκε εκτός των ορίων της διατριβής αυτής. Στην παρούσα έρευνα ενδιαφέρει περισσότερο η σχετική μεταβολή των τιμών της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ των υλικών και λιγότερο η απόλυτα ακριβής τιμή της εφελκυστικής αντοχής.

3.5.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Για τις δοκιμές σε κόπωση η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια με αυτήν της στατικής κάμψης. Η φόρτιση που επιβλήθηκε είναι ημιτονοειδής, με συχνότητα 10 Hz. Το ελάχιστο επιβαλλόμενο φορτίο είναι 0.10 kN, ενώ το εύρος της φόρτισης προσδιορίζεται από την αντοχή σε κάμψη, για κάθε υλικό. Στις δοκιμές αυτές το δοκίμιο παρέμενε τυλιγμένο με πλαστική μεμβράνη, (εκτός από τις επιφάνειες έδρασης και επιβολής φορτίου για να μην υπάρχει ολίσθηση) ώστε να αποτρέπεται η απώλεια υγρασίας κατά τη δοκιμή (η οποία, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης, μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες). Επιλέχθηκε οι δοκιμές να γίνονται με συχνότητα 10 Hz αντί του 1 Hz, ώστε ο χρόνος διάρκειας της κάθε δοκιμής να είναι ο μικρότερος δυνατός, (η διάρκεια των δοκιμών σε αυτές τις περιπτώσεις είναι περίπου 33 ώρες).

Κατά τη δοκιμή καταγράφεται αυτόματα ο αριθμός των επαναλήψεων φορτίσεων (10 καταγραφές/s), καθώς και το βέλος κάμψης στο $\min$ φορτίο για όλες τις επαναλήψεις φορτίσεων. Ακόμη, σε ορισμένες επιλεγμένες επαναλήψεις φορτίσεων, καταγράφεται ο πλήρης κύκλος φόρτισης - αποφόρτισης τόσο για το φορτίο, όσο και για το βέλος κάμψης.

3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ

Η έρευνα περιελάμβανε επίσης και την επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή, στη θλιπτική και στην εφελκυστική αντοχή (έμμεσος εφελκυσμός). Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε θλίψη κύβου και δοκιμές σε διάρρηξη κυλίνδρου. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ, με τα ίδια υλικά που πραγματοποιήθηκαν και οι υπόλοιπες δοκιμές στο ΕΜΠ. Εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας των 0 °C, 20 °C και 35 °C. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν στο θάλαμο συντήρησης στη συνθήκη θερμοκρασία (20 ± 2 °C) και μία ημέρα πριν τη δοκιμή τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον με θερμοκρασία ίση με αυτήν της δοκιμής. Η θερμοκρασία των 20 °C επιλέχθηκε για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις υπόλοιπες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ. Οι άλλες δύο θερμοκρασίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών που μπορεί να παρουσιαστεί στο οδόστρωμα, τόσο στην φάση της κατασκευής όσο και στη λειτουργία του. Ταυτόχρονα με την επίδραση της θερμοκρασίας εξετάστηκε και η επίδραση της ηλικίας δοκιμής (Δύο, επτά και εξήντα ημέρες, Παράγραφος 3.7).

3.7 ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Επιλέχθηκαν δύο ηλικίες για τις βασικές δοκιμές της διατριβής αυτής - αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας - μία και εξήντα ημέρες.

Η νεαρή ηλικία επιλέχθηκε για τη διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών αυτών υπό την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών (όταν το οδόστρωμα δεν δέχεται φόρτιση από κυκλοφορία) αφού οι ρωγμές λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών δημιουργούνται σε μικρή ηλικία (1 έως 2 ημέρες), όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.3. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων υλικών σε νεαρή ηλικία (1-2 ημέρες περίπου) είναι επομένως

απαραίτητα στοιχεία για να διερευνηθεί ο μηχανισμός ρηγμάτωσης και να εκτιμηθεί η επιρρέπεια σε ρηγμάτωση των ανακυκλωμένων στρώσεων σε σχέση με εκείνη των στρώσεων από συμβατικά κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα.

Επίσης, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.4, και για να είναι δυνατή ταυτόχρονα η επίδραση της θερμοκρασίας επιλέχθηκε η ηλικία των δύο ημερών για τον έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη κυλίνδρου) και τη θλιπτική αντοχή κύβου. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές για το υλικό V πραγματοποιήθηκαν σε ηλικία 3 ημερών.

Η ηλικία των εξήντα ημερών είναι η ηλικία στην οποία το υλικό μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει αντιπροσωπευτικές ιδιότητες για τη φάση της λειτουργίας του οδοστρώματος. Εκτός από τις ηλικίες αυτές επιλέχθηκε και η ηλικία των επτά ημερών για τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό μια που οι επτά ημέρες είναι η "ηλικία αναφοράς", για την οποία διεξάγεται η μελέτη σύνθεσης και στην οποία αναφέρονται οι προδιαγραφές.

3.8 ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Η διαφορά των κύριων δοκιμών από τις πρόσθετες δοκιμές είναι ότι πραγματοποιήθηκαν με τσιμέντο του ίδιου τύπου μεν (II 35), αλλά από άλλη παρτίδα παραλαβής και επομένως τα μετρηθέντα μεγέθη έχουν αυτή την πρόσθετη πηγή μεταβλητότητας όταν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη της κύριας έρευνας. Εξαίρεση αποτελούν οι συμπληρωματικές δοκιμές οι οποίες περιελάμβαναν δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τσιμέντο από την ίδια παρτίδα, όπως τα δοκίμια της κύριας έρευνας.

Εκτός από τις δοκιμές που αναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες προγραμματισμένες πρόσθετες δοκιμές :

- ο Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας. Έγιναν δοκιμές κάμψης και θλίψης πρισματικών δοκιμίων. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη μηχανή δοκιμής MTS, μέγιστου φορτίου 100 kN. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών - τόσο σε κάμψη, όσο και σε μονοαξονική θλίψη - τοποθετήθηκαν ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (όπως αναφέρεται στην Παράγραφοι 3.5.2.1 και 3.5.1.3) για τη μέτρηση των παραμορφώσεων και την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας. Διερευνήθηκε η επίδραση της

θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή, με δοκιμές σε θερμοκρασίες 3 °C, 23 °C και 40 °C. Οι ακραίες θερμοκρασίες (± 3 °C και 40 °C) επιλέχθηκαν με κριτήριο την εργαστηριακή υποδομή του εργαστηρίου Οδοποιίας. Κάθε δοκίμιο τοποθετείτο στο περιβάλλον με προβλεπόμενη θερμοκρασία για τουλάχιστον 12 ώρες. Μετά μεταφερόταν, με κατάλληλη μόνωση, στη μηχανή δοκιμής. Ο χρόνος προετοιμασίας του δοκιμίου πάνω στη μηχανή είχε ελαχιστοποιηθεί, έτσι ώστε η έναρξη της δοκιμής γινόταν σε λιγότερο από 3 λεπτά από την τοποθέτηση του δοκιμίου στη μηχανή. Η θερμοκρασία του δοκιμίου στο τέλος της δοκιμής δεν διέφερε της προβλεπόμενης περισσότερο από 0.2 °C. Η διαφορά αυτή εξακριβωνόταν με δίδυμο δοκίμιο, στο μέσον της μάζας του οποίου είχε τοποθετηθεί ηλεκτρονικό θερμόμετρο. Το δίδυμο δοκίμιο υφίστατο την ίδια θερμική διεργασία με το εξεταζόμενο δοκίμιο.

ο Ερπυσμός

Οι δοκιμές ερπυσμού έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ειδικά πλαίσια δοκιμών ερπυσμού με ελατήρια [ASTM C512 2002], στα οποία - μέσω υδραυλικού γρύλου - επιβάλλεται στα δοκίμια δεδομένο φορτίο, ελεγχόμενο μέσω ηλεκτροδυναμόμετρου. Το φορτίο επιβάλλεται, μέσω των ήδη παραμορφωμένων ελατηρίων, με χαλύβδινες πλάκες φόρτισης. Στο πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθούν ταυτόχρονα περισσότερα του ενός δοκίμια, εν σειρά (το ένα πάνω στο άλλο), υπό την προϋπόθεση ότι οι επιφάνειες των δοκιμών που έρχονται σε επαφή είναι παράλληλες και σχετικά λείες, ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη δυνάμεων τριβής ανάμεσά τους. Στα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκαν 3 δοκίμια, ανάμεσα στα οποία είχαν τοποθετηθεί φύλλα μολύβδου πάχους περίπου 1 mm, ώστε να ελαχιστοποιηθούν, κατά το δυνατόν, οι επιπτώσεις από τυχόν ανωμαλίες των επιφανειών των δοκιμών που έρχονται σε επαφή. Σημειώνεται ότι στα δοκίμια με τα συγκεκριμένα υλικά δεν μπορεί να γίνει λείανση της επιφανείας τους, με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για το σκυρόδεμα. Στα δοκίμια επιβλήθηκε φορτίο ίσο με το 1/3 του φορτίου θραύσης. Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων, τοποθετούνται στα δοκίμια ειδικά μεταλλικά τεμάχια (πούλιες) σε τρεις γενέτειρες των δοκιμών ανά 120°, σε απόσταση 50 mm

εκατέρωθεν του μέσου του ύψους του δοκιμίου, ώστε να μπορεί να γίνει μέτρηση με το όργανο DEMEC. Το όργανο αυτό αποτελείται από μηχανικό μηχανοσκόμτρο ωρολογιακού τύπου, ένα σύστημα μοχλών και δύο ακίδες, εκ των οποίων η μία παραμένει ακλόνητη και η άλλη μετακινείται. Η μέτρηση των ερπυστικών παραμορφώσεων γίνεται με την τοποθέτηση των ακίδων του DEMEC στις ήδη προσαρμοσμένες στο δοκίμιο πούλιες.

Έγιναν δοκιμές σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων υλικών I (100/0) έως V (0/100) με τσιμέντο 5 %, σε ηλικία μίας ημέρας σε θερμοκρασία 23 °C, και δοκιμές σε ηλικία 35 ημερών σε θερμοκρασίες 23 °C, και 40 °C. Για την επίτευξη των δοκιμών σε θερμοκρασία 40 °C, λόγω της μεγάλης διάρκειας των δοκιμών οι δοκιμές έγιναν σε θερμοκρασία ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Χρησιμοποιήθηκαν θερμαντικά σώματα και γινόταν συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Έτσι με τη χρήση χρονοδιακόπτη για τη λειτουργία των θερμαντικών σωμάτων επιτεύχθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C.

3.8.1 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών και για την πληρέστερη ερμηνεία τους προέκυψε η ανάγκη πραγματοποίησης των ακόλουθων δοκιμών :

- ο Επαναληπτικές δοκιμές, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες οι αρχικές δοκιμές παρουσιάζουν μη αναμενόμενα αποτελέσματα
- ο Διερεύνηση της επίδρασης των χαρακτηριστικών των θραυστών αδρανών και του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στην αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων (Παράγραφος 5.21 και 5.2.2) βρέθηκε ότι η εφελκυστική αντοχή του υλικού I (100/0) - σε καθαρό εφελκυσμό και σε κάμψη - είναι μειωμένη σε σχέση με το υλικό II, (Παράγραφος 5.2.1 και 5.2.2), ενώ γενικά η αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα οδηγεί σε μείωση της αντοχής. Τα αποτελέσματα της αντοχής σε διάρρηξη, που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο EKET, παρουσιάζουν το ίδιο φαινόμενο. Έτσι, τα αποτελέσματα των δοκιμών (ΕΜΠ και EKET) θεωρήθηκαν αξιόπιστα, και έγινε μία

προσπάθεια διερεύνησης του φαινομένου αυτού. Για τον λόγο αυτό, έγιναν συμπληρωματικές δοκιμές σε εφελκυσμό και θλίψη και εύρεση των αντίστοιχων μέτρων ελαστικότητας σε δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τις ίδιες αναλογίες σύνθεσης, αλλά με διαφορετικά αδρανή υλικά. Χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικά είδη θραυστών υλικών, ΘΑ1 και ΘΑ2, και 2 φρεζαρισμένα ασφαλομίγματα, ΦΑ1 και ΦΑ2, προερχόμενα από διαφορετικές εργασίες ανακύκλωσης. Ταυτόχρονα, για τη διερεύνηση της επίδρασης της παιπάλης των θραυστών υλικών, παρασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς παιπάλη (Παράγραφος 5.2.4).

- ο Σαν μία πρώτη προσπάθεια - περιορισμένης έκτασης - αποτύπωσης της μικροδομής του κατεργασμένου υλικού φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και θραυστών αδρανών με τσιμέντο, και ιδιαίτερα της διεπιφάνειας σκληρυμένου τσιμεντοπολτού/κονιάματος με ασφατικές επιφάνειες, έγινε μία πετρογραφική εξέταση ενός δοκιμίου υλικού ΙΙΙ (50/50). Επειδή στο εργαστήριο Οδοποιίας δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο δοκιμών ΕΚΕΤ.

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται συνοπτικά η διάθρωση του πειραματικού μέρους. Φαίνονται όλες οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, οι συνθήκες των δοκιμών και τα εξετασθέντα υλικά.

Πίνακας 3.5 : Συνοπτικός πίνακας δοκιμών

ΚΥΡΙΑ ΕΡΕΥΝΑ							
Υλικά I (100/0) II (75/25) III (50/50) IV (25/75) V (0/100)	Τσιμέντο 3 % 5 %	1 ημέρα		Αντοχή			ΕΜΠ
				Θλίψη κύβου ισοδύναμου κύβου	Εφελκυσμός	Κάμψη	
				Μέτρο ελαστικότητας Θλίψη - Εφελκυσμός - Κάμψη			
		2 ημέρες *	0 °C ** 20 °C 35 °C **	Αντοχή Θλίψη κύβου Διάρρηξη			ΕΚΕΤ
		7 ημέρες	0 °C ** 20 °C 35 °C **	Αντοχή Θλίψη κύβου Διάρρηξη			
	60 ημέρες	0 °C ** 20 °C 35 °C **	Αντοχή Θλίψη κύβου Διάρρηξη				
	1 ημέρα	20 °C	Αντοχή			ΕΜΠ	
			Θλίψη κύβου ισοδύναμου κύβου	Εφελκυσμός	Κάμψη		
			Μέτρο ελαστικότητας Θλίψη Εφελκυσμός Κάμψη				
Υλικά I (100/0) III (50/50) V (0/100)	Τσιμέντο 3 % 5 %	60 ημέρες	23 °C	Κόπωση			ΕΜΠ
ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ							
Υλικά I (100/0) II (75/25) III (50/50) IV (25/75) V (0/100)	Τσιμέντο 5 %	7 ημέρες	3.5 °C **	Αντοχή			ΕΜΠ
			20 °C	Θλίψη ισοδύναμου κύβου Κάμψη			
			40 °C **				
			3.5 °C **	Μέτρο ελαστικότητας			
			20 °C	Θλίψη Κάμψη			
			40 °C **				
Υλικά I (100/0) II (75/25) III (50/50) IV (25/75) V (0/100)	Τσιμέντο 5 %	1 ημέρα	23 °C	Ερπυσμός			ΕΜΠ
		35 ημέρες	23 °C	Ερπυσμός			
			40 °C				
ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ							
Υλικά I (100/0) II (75/25) III (50/50)	Τσιμέντο 5 %	60 ημέρες	20 °C	Συνδυασμοί υλικών ΘΑ1 - ΦΑ1 ΘΑ1 - ΦΑ2 ΘΑ2 - ΦΑ1 ΘΑ2 - ΦΑ2 ΠΘΑ1 - ΦΑ1 ΠΑΘ1 - ΦΑ2	Αντοχή Θλίψη ισοδ. κύβου Εφελκυσμός		ΕΜΠ
					Μέτρο ελαστικότητας Θλίψη Εφελκυσμός		
Υλικό III (50/50)		Τσιμέντο 3 %		Πετρογραφική εξέταση			ΕΚΕΤ

* Ηλικία δοκιμής 3 ημέρες για το υλικό V (0/100)

** Δεν έγιναν δοκιμές για το υλικό I (100/0)

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (αντοχών, μέτρων ελαστικότητας, βέλους κάμψης, ή $\max \varepsilon$ κατά τη θραύση) παρουσιάζονται υπό μορφή Πινάκων, συγκεντρωτικών (περιέχουν τους μέσους όρους ανά εξετασθέν ανάμιγμα) και αναλυτικών (περιέχουν όλες τις μετρήσεις για κάθε ανάμιγμα) όπως επεξηγείται από τον ακόλουθο Πίνακα 4.0 :

Πίνακας 4.0 : Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Πίνακας	Είδος	Ηλικία	Τσιμέντο % κ.β.
4.1	Συγκεντρωτικός	1	3
4.2	Συγκεντρωτικός	1	5
4.3	Συγκεντρωτικός	60	3
4.4	Συγκεντρωτικός	60	5
4.5	Αναλυτικός	1	3
4.6	Αναλυτικός	1	5
4.7	Αναλυτικός	60	3
4.8	Αναλυτικός	60	5

Τα αποτελέσματα των αντοχών σε θλίψη δίνονται με στρογγύλευση 0.1 MPa, παρότι το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 13286.41 [2003] αναφέρει ότι τα αποτελέσματα θα δίνονται με στρογγύλευση 0.1 MPa για αντοχές μικρότερες των 5 MPa και 0.5 MPa για αντοχές μεγαλύτερες των 5 MPa.

Τα αποτελέσματα των αντοχών σε κάμψη δίνονται με στρογγύλευση 0.01 MPa, παρότι το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.05 αναφέρει ότι τα αποτελέσματα θα δίνονται με ακρίβεια 0.1 MPa.

Τα αποτελέσματα των αντοχών σε εφελκυσμό δίνονται με στρογγύλευση 0.01 MPa.

Τα μέτρα ελαστικότητας δίνονται με προσέγγιση με στρογγύλευση 100 MPa, παρότι το Πρότυπο Bs 1881 : Part 121 : 1983 αναφέρει ότι τα αποτελέσματα θα δίνονται με

προσέγγιση 100 MPa για τιμές μικρότερες των 10.000 MPa και 500 MPa για τιμές μεγαλύτερες των 10.000 MPa.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη που δίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2 δεν είναι μέσοι όροι, αλλά τιμή από ένα μόνο δοκίμιο, όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 4.5 και 4.6.

Στους Πίνακες 4.5 - 4.8 δίνονται επίσης οι Μέσοι Όροι, $\bar{X}$, οι τυπικές αποκλίσεις, σ , και οι συντελεστές μεταβλητότητας, CV (%), για κάθε ανάμιγμα. Σημειώνεται ότι οι τιμές για τους μέσους όρους δίνονται με την ακρίβεια που περιγράφηκε προηγουμένως, αφού όμως έχουν υπολογιστεί με τις ακριβείς τιμές (πριν τη στρογγυλοποίηση).

Στους Πίνακες δίνονται επίσης η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ($\max \delta$) καθώς και η μέγιστη τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης, ($\max \epsilon$), οι οποίες καταγράφηκαν κατά την στιγμή που η θραύση ελάμβανε χώρα (σε κάμψη και εφελκυσμό). Σημειώνεται ότι η μέτρηση αυτή από τη φύση της δεν μπορεί να είναι πολύ ακριβής.

Για ευκολία στην ανάγνωση των Πινάκων 4.1 - 4.4 όλες οι δοκιμές που γράφονται στην ίδια γραμμή, έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια που προέρχονται από το ίδιο ανάμιγμα.

Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη καθώς και των ισοδύναμων κύβων που έχουν προκύψει από τα δοκίμια της κάμψης και των αντίστοιχων πρισμάτων (όπου υπάρχουν) δίνονται σε διαφορετικές γραμμές.

Επίσης, σημειώνεται ότι σε όσες περιπτώσεις τα αποτελέσματα ενός μίγματος (υλικού) παρουσίασαν κάποια μη αναμενόμενη μεταβολή σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των άλλων μιγμάτων, οι δοκιμές επαναλήφθηκαν και τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες σε ξεχωριστή γραμμή.

Πίνακας 4.1 : Μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 3 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)					Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				max ε	Εφ/σμός		
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι	Πρίσματα			Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
I (100/0)	0.16		4.1	5.6	1.7		61.9E-06	4900	900	
I (100/0)	0.12		5.9	5.1	1.6		70.6E-06	3400	600	
I (100/0)		0.33		6.1	2.0					
II (75/25)	0.20		4.7	5.3	1.7		63.4E-06	4400	1200	
II (75/25)		0.34		5.0	2.2				1800	4900
III (50/50)	0.16		4.0	3.7	1.4		129.0E-06	2900	1400	
III (50/50)		0.33		4.0	1.9				1300	
IV (25/75)	0.17		3.4	3.3	1.4		120.3E-06	2900	1300	
IV (25/75)		0.23		3.1	1.2				800	3300
V (0/100)	0.03		1.0	1.2	0.4		213.0E-06	500	700	
V (0/100)		0.12		1.5	0.5				700	

Πίνακας 4.2 : Μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 5 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι					
I (100/0)	0.42		10.4	11.4	122.0E-06		8500	7800	
I (100/0)		0.48		7.1		35.0E-03			7600
II (75/25)	0.33			7.6	247.0E-06		3800	4500	
II (75/25)		0.52		6.2					
III (50/50)	0.30		6.0	6.6	337.0E-06		3100	3200	
III (50/50)		0.44		4.3		46.0E-03			4900
IV (25/75)	0.17		4.1	3.6	411.0E-06		1100	1400	
IV (25/75)		0.33		2.6		97.3E-03			3100
V (0/100)	0.23		3.4	3.1	492.0E-06		1100	1500	
V (0/100)		0.32		2.5		60.5E-03			5200

Πίνακας 4.3 : Μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλικία εξήντα ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα	
I (100/0)	0.35		14.7	12.2	111.5E-06		11000	8600	6900	
I (100/0)	0.44			11.8	148.3E-06		10000	10000		
I (100/0)		1.41		13.5		3.21E-02				18800
II (75/25)	0.56		10.3	9.3	198.0E-06		8000	8000	7500	
II (75/25)	0.50			9.6	249.3E-06		6000	9100		
III (50/50)	0.62		8.7	7.7	257.3E-06		6800	6700		
III (50/50)	0.47			7.1	334.7E-06		3900	5200		
III (50/50)		1.38		7.6		4.00E-02				13400
IV (25/75)	0.69		6.6	5.8	296.7E-06		4700	4800		
IV (25/75)	0.65			5.8	340.7E-06		4700	5100		
V (0/100)	0.42		4.1	3.7	454.0E-06		2000	2700		
V (0/100)	0.40			3.6	317.5E-06		3200	2900		
V (0/100)		0.95		3.4		8.24E-02				5100

Πίνακας 4.4 : Μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλικία εξήντα ημερών και ποσοστό τοιμέντου 5 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα	
										Κάμψη
I (100/0)	1.65		21.5	22.8	90.7E-06		23200	28300	25900	32600
I (100/0)		3.32		23.6		2.86E-02				
II (75/25)	1.66		16.4	16.4	152.3E-06		19500	16200	17200	
III (50/50)	1.72		12.8	12.3	172.7E-06		14400	14900	12900	
III (50/50)		3.39		14.2		7.90E-02				17500
IV (25/75)	1.39		10.0	9.9	203.7E-06		9800	10400	9100	
V (0/100)	0.80		7.1	6.7	529.7E-06		3900	5000		
V (0/100)		2.68		8.4		15.0E-02				8000

Πίνακας 4.5 : Μεμονωμένα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλιακία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 3 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)						Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη			max ε		Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
I (100/0)	0.15		Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι	Πρίσματα	Εφ/σμός		4800	900	
	0.19		3.9	5.4	2.0	65.9E-06		4400	900	
	0.15		4.3	6.0	1.4	63.5E-06		5500		
				6.1		56.2E-06				
X				6.2						
				4.6						
	0.16		4.1	5.6	1.7	61.9E-06		4900	900	
	0.02			0.64		5.0E-06		557		
cv (%)	13.5			11.4		8.2		11.4		
I (100/0)	0.12		5.9	5.1	1.6	61.6E-06		2600	600	
	0.12		5.8	5.3	1.6	87.9E-06		4000	600	
	0.11			5.1		62.3E-06		3600		
				4.6						
X				5.5						
	0.12		5.9	5.1	1.6	70.6E-06		3400	600	
	0.06			0.31		14.9E-06		721		
	4.9			6.0		21.2		21.2		
I (100/0)		0.31		5.9	2.1				900	
		0.35		5.8	2.0				1200	
		0.31		6.5			22.2E-03			8900
		0.33		6.1	2.0				1100	
X		0.025		0.40						
		7.7		6.6						
cv (%)										

Πίνακας 4.5 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)					max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη					Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
II (75/25)	0.20		4.7	5.2	1.5	46.4E-06		4200	1200	
	0.20		4.9	4.9	1.8	78.7E-06		5100	1100	
	0.20		4.4	5.3		65.3E-06	77.8E-03	4000		
				5.7						
				5.3						
X	0.20		4.7	5.3	1.7	63.4E-06		4400	1200	
σ	0.003		0.23	0.29		16.2E-06		586		
εν (%)	1.6		4.9	5.5		25.5		13.2		
II (75/25)		0.32		4.6	2.2				2100	
		0.34		5.1	2.2				1400	
		0.35		5.2						4900
X		0.34		5.0	2.2			1800		
σ		0.017		0.34						
εν (%)		4.90		6.9						
III (50/50)	0.17		3.8	3.8	1.4	114.0E-06		3800	1500	
	0.16		4.1	3.5	1.3	159.0E-06		2000	1300	
	0.15		4.2	3.8		114.0E-06		2900		
				3.5						
				3.7						
				3.9						
X	0.16		4.0	3.7	1.4	129.0E-06		2900	1400	
σ	0.009		0.19	0.18		26.0E-06		900		
εν (%)	5.80		4.8	4.8		20.1		31.0		

Πίνακας 4.5 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)					max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη		Πρίσματα			Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
III (50/50)		0.32		4.1	1.9				1200	
		0.33		3.9	1.9				1300	
		0.34		4.1						
	X	0.33		4.0	1.9				1300	
σ		0.007		0.14						
cv (%)		2.2		3.4						
IV (25/75)	0.19		3.7	3.4	1.4	141.0E-06		3000		
	0.17		3.4	3.1	1.5	90.0E-06		3000	1300	
	0.17		3.2	3.3		130.0E-06		2800		
				3.2						
				3.4						
				3.3						
X	0.17		3.4	3.3	1.4	120.3E-06		2900	1300	
σ	0.011		0.26	0.12		26.8E-06		115		
cv (%)	6.5		7.4	3.8		22.3		3.9		
IV (25/75)		0.23		3.3	1.3				800	
		0.24		2.9	1.1				700	
		0.22		3.0			49.7E-03			3300
	X	0.23		3.1	1.2				800	
σ		0.009		0.17						
cv (%)		3.9		5.4						

Πίνακας 4.5 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)					max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη					Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι	Πρίσματα					
V (0/100)	0.04		0.8	1.4	0.4	145.0E-06		600	700	
	0.03		1.0	1.1	0.4	126.0E-06		400	600	
	0.03		1.0	1.1		369.0E-06		500		
				1.2						
				1.2						
X	0.03		1.0	1.2	0.4	213.0E-06		500	700	
σ	0.010		0.10	0.14		135.0E-06		100		
cv (%)	30.6		10.1	11.4		63.0		20.0		
V (0/100)		0.13		1.4	0.5				700	
		0.14		1.3	0.5				700	
		0.11		1.7						
X		0.12		1.5	0.5				700	
σ		0.013		0.18						
cv (%)		10.6		12.7						

Πίνακας 4.6 : Μεμονωμένα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλικά ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 5 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)			max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη			Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
I (100/0)	0.43		Κόβοι	10.9	11.4	112.0E-06	11200	8200
	0.41			10.6	10.6	121.0E-06	6700	7100
	0.43			9.7	10.8	134.0E-06	7500	8200
					11.5			
					12.3			
					11.7			
X	0.42		10.4	11.4	122.0E-06	8500	7800	
σ	0.012		0.64	0.62	11.0E-06	2400	635	
cv (%)	2.7		6.2	5.5	9.0	28.0	8.1	
		0.47		6.7				
I (100/0)		0.44		6.9				
		0.54		7.7	35.0E-03			7600
X		0.48		7.1				
σ		0.052		0.54				
cv (%)		10.8		7.6				
II (75/25)	0.36		8.0	7.7	274.0E-06	4600	5300	
	0.31		7.2	7.7	230.0E-06	3400	4400	
	0.33		7.4	7.7	237.0E-06	3500	3900	
				7.5				
				7.6				
				7.6				
X	0.33		7.5	7.6	247.0E-06	3800	4500	
σ	0.024		0.41	0.07	23.6E-06	654	709	
cv (%)	7.3		5.5	0.9	9.6	17.2	15.6	

Πίνακας 4.6 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
II (75/25)		0.55		6.2					
		0.51		6.2					
		0.49		6.2					
	X	0.52		6.2					
σ		0.03		0.02					
cv (%)		5.7		0.3					
III (50/50)	0.29		6.0	6.5	374.0E-06		2700	3000	
	0.32		5.9	6.8	264.0E-06		4100	2800	
	0.29		6.1	6.5	372.0E-06		2600	3800	
				7.4					
				6.3					
				6.1					
X	0.30		6.0	6.6	337.0E-06		3100	3200	
σ	0.018		0.07	0.46	63.0E-06		852	529	
cv (%)	6.1		1.1	7.0	18.7		27.3	16.5	
III (50/50)		0.42		4.5					
		0.42		3.9					
		0.47		4.4		46.0E-3			4900
X		0.44		4.3					
σ		0.032		0.34					
cv (%)		7.3		8.0					

Πίνακας 4.6 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)			max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη Κόβοι Ισοδ. Κόβοι			Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
IV (25/75)	0.17		4.0	4.2	422.0E-06	1100	1400	
	0.14		4.1	3.5	433.0E-06	700	1300	
	0.21		4.2	3.0	377.0E-06	1400	1400	
				3.5				
				3.7				
				3.8				
X	0.17		4.1	3.6	411.0E-06	1100	1400	
σ	0.032		0.07	0.4	29.6E-06	328	58	
cv (%)	18.6		1.6	10.8	7.2	31.2	4.2	
IV (25/75)		0.33		2.6				
		0.33		2.7				
		0.35		2.6	97.3E-03			3100
X		0.33		2.6				
σ		0.013		0.10				
cv (%)		3.8		3.9				

Πίνακας 4.6 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι					
V (0/100)	0.21		3.0	2.9	422.0E-06		1000	1400	
	0.23		3.7	2.9	515.0E-06		900	1500	
	0.26		3.4	2.8	540.0E-06		1200	1700	
				3.2					
				3.1					
X	0.23		3.4	3.1	492.0E-06		1100	1500	
σ	0.029		0.37	0.23	62.2E-06		153	153	
εν (%)	12.8		11.1	7.6	12.6		14.8	10.3	
V (0/100)		0.30		2.2					
		0.30		2.7					
		0.36		2.8		60.5E-03		5200	
X		0.32		2.5					
σ		0.037		0.32					
εν (%)		11.5		12.7					

Πίνακας 4.7 : Μεμονωμένα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλίκια εξήντα ημερών και ποσοστό τιμέντρου 3 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα	
I (100/0)	0.43		14.7	12.0	138.0E-06		11600	9500	7400	
	0.27		14.7	12.1	85.0E-06		10300	8000	6600	
			14.6	12.7				8300	6900	
X	0.35		14.7	12.2	111.5E-06		11000	8600	6900	
σ			0.10	0.36				804	404	
cv (%)			0.7	2.9				9.4	5.8	
I (100/0)	0.39			12.0	103.0E-06		12500	10400		
	0.51			12.5	167.0E-06		8500	11000		
	0.42			12.9	175.0E-06		9100	9200		
				11.7						
				10.1						
				11.6						
X	0.44			11.8	148.3E-06		10000	10000		
σ	0.065			0.96	39.5E-06		2139	944		
cv (%)	15.0			8.1	26.6		21.3	9.3		
I (100/0)		1.36		15.2		2.59E-02				21300
		1.74		13.9		3.03E-02				20300
		1.37		13.8		5.27E-02				13500
		1.18		12.9		1.95E-02				20200
				11.9						
				13.6						
X		1.41		13.5		3.21E-02				18800
σ		0.235		1.10		14.4E-03				3609
cv (%)		16.6		8.2		45.0				19.2

Πίνακας 4.7 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κόβοι	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα
II (75/25)	0.62		10.3	9.5	216.0E-06		7300	8500	8600
	0.44		11.1	8.6	250.0E-06		5400	6500	5300
	0.62		9.6	9.8	128.0E-06		11300	9000	8900
	0.56		10.3	9.3	198.0E-06		8000	8000	7500
σ	0.102		0.76	0.64	63.0E-06		3011	1323	2010
cv (%)	18.1		7.4	7.0	31.8		37.6	16.5	26.6
II (75/25)	0.59			9.3	276.0E-06		5300	6800	
	0.47			8.6	120.0E-06		9300	9100	
	0.45			9.3	352.0E-06		3600	11500	
				10.3					
				10.0					
X				10.3					
	0.50			9.6	249.3E-06		6000	9100	
	0.074			0.679	118.3E-06		2953	2375	
	14.8			7.1	47.4		49.0	26.1	
III (50/50)	0.52		8.1	7.2	208.0E-06		6900	6000	
	0.65		9.0	7.8	319.0E-06		6600	7400	
	0.68		8.9	8.2	245.0E-06		6800	6700	
				8.4					
				7.9					
X				7.0					
	0.62		8.7	7.7	257.3E-06		6800	6700	
	0.084		0.47	0.54	56.0E-06		175	725	
	13.6		5.4	7.0	22.0		2.6	10.9	

Πίνακας 4.7 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα
III (50/50)	0.57			7.4	207.0E-06		4300	4400	
	0.47			6.7	262.0E-06		3600	5000	
	0.39			7.0	535.0E-06		3800	6300	
				6.9					
				7.3					
				7.2					
X	0.47			7.1	334.7E-06		3900	5200	
σ	0.090			0.28	175.0E-06		333	977	
εν (%)	19.0			3.9	52.5		8.6	18.7	
III (50/50)		1.37		7.4		3.74E-02			14000
		1.37		7.4		5.18E-02			13100
		1.44		7.8		3.61E-02			13600
		1.35		7.6		3.47E-02			12900
				7.9					
				7.6					
				7.5					
X		1.38		7.6		4.00E-02			13400
σ		0.041		0.19		7.9E-03			504
εν (%)		2.9		2.5		19.8			3.8

Πίνακας 4.7 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη	
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα
IV (25/75)	0.62		6.8	5.6	334.0E-06		4100	4500	
	0.71		6.7	6.3	273.0E-06		5100	4500	
	0.75		6.4	5.7	283.0E-06		5100	5400	
				5.8					
				5.6					
X				5.7					
	0.69		6.6	5.8	296.7E-06		4700	4800	
	0.065		0.18	0.27	32.0E-06		577	520	
	9.4		2.8	4.6	11.0		12.2	10.8	
IV (25/75)	0.68			5.7	267.0E-06		6100	5800	
	0.61			5.8	323.0E-06		4400	4700	
	0.66			5.9	432.0E-06		3700	4800	
				5.8					
				5.8					
X				5.7					
	0.65			5.8	340.7E-06		4700	5100	
	0.040			0.07	84.0E-06		1234	608	
	6.2			1.2	24.6		26.3	11.9	

Πίνακας 4.7 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε Εφ/σμός	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		
			Κόβου	Ισοδ. Κόβου				Δοκάρια	Πρίσματα	
V (0/100)			4.2	3.6						
	0.41		3.9	3.3	473.0E-06		1700	2700		
	0.43		4.1	3.6	435.0E-06		2200	2600		
				3.7						
				3.7						
X				4.1	3.7	454.0E-06		2000	2700	
σ			0.17	0.25						
cv (%)			4.2	6.7						
V (0/100)	0.31			3.7	329.0E-06		2500	2400		
	0.49			3.6	306.0E-06		3900	3500		
				4.1				3000		
				3.6						
				3.3						
X				3.3						
σ	0.40			3.6	317.5E-06		3200	2900		
cv (%)				0.32				553		
				9.0				18.9		

Πίνακας 4.7 (συνέχεια)

Μέγεθος	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Κόβου	Θλίψη Ισοδ. Κόβου	Εφ/σμός		Εφ/σμός	Θλίψη Δοκάρια	Κάμψη
V (0/100)		0.93		3.4		8.67E-02			5000
		0.88		3.3		7.89E-02			4600
		0.97		3.1		8.39E-02			5000
		1.02		3.2		8.00E-02			5900
				3.6					
				3.3					
X				3.6					
				3.5					
		0.95		3.4		8.24E-02			5100
		0.06		0.18		3.6E-03			550
εν (%)		6.5		5.2		4.4			10.7

Πίνακας 4.8 : Μεμονωμένα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής και μέτρου ελαστικότητας για ηλκία εξήντα ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα	
I (100/0)	1.53		22.4	24.6	73.0E-06		22500	29000	26200	
	1.69		20.9	22.1	123.0E-06		21400	27400	24000	
	1.18		21.1	21.8	76.0E-06		25700	28600	27500	
X	1.65		21.5	22.8	90.7E-06		23200	28300	25900	
σ	0.101		0.82	1.50	28.0E-06		2205	764	1769	
cv (%)	6.1		3.8	6.6	30.9		9.5	2.9	6.8	
I (100/0)		3.46		23.0		2.97E-02				33900
		3.26		22.9		2.78E-02				54500 *
		3.37		22.4		3.10E-02				32100
		3.17		23.7		2.57E-02				31800
				23.0						
				23.4						
				25.3						
X		3.32		23.6		2.86E-02				32600
σ		0.127		1.06		2.30E-03				1153
cv (%)		3.8		4.5		8.1				3.5
II (75/25)	1.69		16.3	16.0	153.0E-06		21100	13200	19500	
	1.55		16.7	16.5	162.0E-06		18900	19400	16800	
	1.73		16.3	16.8	142.0E-06		18400	16000	15200	
X	1.66		16.4	16.4	152.3E-06		19500	16200	17200	
σ	0.095		0.26	0.38	10.0E-06		1408	3105	2177	
cv (%)	5.7		1.6	2.3	6.6		7.2	19.2	12.7	

Πίνακας 4.8 (συνέχεια)

Μίγμα	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)			
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Θλίψη				Εφ/σμός	Θλίψη		Κάμψη
			Κόβοι	Ισοδ. Κόβοι				Δοκάρια	Πρίσματα	
III (50/50)	1.72		12.2	12.7	153.0E-06		15200	16300	14500	
	1.72		13.1	11.8	168.0E-06		13800	14500	13300	
	1.72		13.1	12.5	197.0E-06		14200	14000	11000	
X	1.72		12.8	12.3	172.7E-06		14400	14900	12900	
σ	0.0		0.50	0.45	22.4E-06		749	1218	1803	
cv (%)	0.0		3.9	3.7	13.0		5.2	8.2	13.9	
III (50/50)		3.64		13.3		6.99E-02				19100
		3.52		12.8		9.30E-02				17700
		3.02		14.8		8.20E-02				15700
		3.38		13.9		7.13E-02				16900
				15.0						
				14.5						
X				14.6						
				14.7						
		3.39		14.2		7.90E-02				17500
σ		0.262		0.79		11.0E-03				1452
cv (%)		7.8		5.5		13.6				8.4
IV (25/75)	1.40		10.3	9.9	206.0E-06		9500	10300	8900	
	1.34		10.1	9.7	197.0E-06		9200	10000	8800	
	1.43		9.7	10.0	208.0E-06		10800	10900	9700	
X	1.39		10.0	9.9	203.7E-06		9800	10400	9100	
σ	0.047		0.28	0.16	5.9E-06		869	454	493	
cv (%)	3.4		2.7	1.6	2.9		8.8	4.4	5.4	

Πίνακας 4.8 (συνέχεια)

Μέγεθος	Αντοχή (MPa)				max ε	Βέλος κάμψης (mm)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Εφελκυσμός	Κάμψη	Κόβου	Θλίψη Ισοδ. Κόβου			Εφ/σμός	Θλίψη Δοκάρια	Κάμψη
V (0/100)	0.93		7.8	6.7	421.0E-06		4200	5600	
	0.58		6.7	7.1	525.0E-06		3600	4500	
	0.87		6.6	6.7	643.0E-06		3800	5000	
				6.9					
				6.5					
X				6.7					
	0.80		7.1	6.7	529.7E-06		3900	5000	
	0.189		0.67	0.21	111.1E-06		312	550	
	23.7		9.5	3.1	21.0		8.1	11.0	
		2.70		8.8		15.2E-02			7800
V (0/100)		2.89		8.4		14.7E-02			8100
		2.56		8.9		15.2E-02			8300
		2.57		8.5		14.9E-02			7800
				8.3					
				8.5					
X				8.0					
				8.2					
		2.68		8.4		15.0E-02			8000
		0.154		0.30		2.5E-03			189
		5.8		3.5		1.6			2.3

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Τα αποτελέσματα της επίδρασης της θερμοκρασίας στην αντοχή σε διάρρηξη και στη θλιπτική αντοχή κύβου, σε σχέση με τη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή (0 °C, 20 °C και 35 °C) και την ηλικία (2, 7 και 60 ημέρες) δίνονται στους Πίνακες 4.9 έως 4.16.

Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων δίνονται στους Πίνακες 4.9 και 4.10 για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα.

Στους Πίνακες 4.11 έως 4.13 δίνονται τα μεμονωμένα αποτελέσματα για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικίες 2, 7 και 60 ημερών αντίστοιχα, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα για ποσοστό τσιμέντου 5 % δίνονται στους Πίνακες 4.14 έως 4.16. Στους Πίνακες 4.11 έως 4.16 δίνονται και οι Μέσοι όροι, τυπικές αποκλίσεις και συντελεστές μεταβλητότητας για κάθε μίγμα και δοκιμή.

Τα αποτελέσματα δίνονται με την ακρίβεια που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.1.

Πίνακας 4.9 : Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη και διάρρηξη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δοκιμής και την ηλικία, για ποσοστό τσιμέντου 3 % (Μέσοι Όροι)

Μίγμα	Ηλικία	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
		Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
		0	20	35	0	20	35
I (100/0)	2		7.0			0.40	
II (75/25)	2	9.2	8.4	7.8	0.66	0.67	0.57
III (50/50)	2	4.7	4.0	3.6	0.29	0.28	0.28
IV (25/75)	2	2.6	2.1	1.6	0.18	0.18	0.17
V (0/100)	3	2.2	1.6	1.2	0.15	0.14	0.13
I (100/0)	7		8.7			0.52	
II (75/25)	7	8.0	6.8	7.0	0.52	0.50	0.48
III (50/50)	7	6.5	4.8	4.3	0.50	0.37	0.36
IV (25/75)	7	4.2	2.9	2.6	0.32	0.26	0.21
V (0/100)	7	3.2	2.4	1.9	0.26	0.22	0.19
I (100/0)	60		13.8			0.70	
II (75/25)	60	10.1	8.5	7.5	0.86	0.84	0.80
III (50/50)	60	7.6	5.9	5.5	0.69	0.58	0.55
IV (25/75)	60	5.6	5.2	3.5	0.72	0.44	0.42
V (0/100)	60	4.4	3.4	2.3	0.48	0.28	0.28

Πίνακας 4.10 : Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη και διάρρηξη σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δοκιμής και την ηλικία, για ποσοστό τσιμέντου 5 % (Μέσοι Όροι)

Μίγμα	Ηλικία	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
		Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
		0	20	35	0	20	35
I (100/0)	2		9.2			0.59	
II (75/25)	2	8.3	7.3	7.0	0.61	0.57	0.57
III (50/50)	2	6.5	5.4	4.8	0.47	0.45	0.45
IV (25/75)	2	4.1	4.1	3.3	0.38	0.35	0.33
V (0/100)	3	3.6	3.0	2.3	0.39	0.28	0.25
I (100/0)	7		12.6			0.72	
II (75/25)	7	10.2	10.0	7.9	1.03	0.97	0.88
III (50/50)	7	9.4	7.6	6.9	0.81	0.72	0.61
IV (25/75)	7	7.5	5.3	4.4	0.68	0.46	0.38
V (0/100)	7	5.3	4.2	2.9	0.46	0.38	0.28
I (100/0)	60		18.7			1.42	
II (75/25)	60	15.3	12.3	12.1	1.52	1.47	1.41
III (50/50)	60	14.5	9.2	8.0	1.37	0.84	0.69
IV (25/75)	60	9.2	6.4	5.0	0.94	0.72	0.60
V (0/100)	60	7.3	5.0	3.5	0.83	0.58	0.40

Πίνακας 4.11 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικία 2 ημερών (υλικά I, II, III IV) ή 3 ημερών (υλικό V)

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		7.6			0.35	
		6.6			0.41	
		6.8			0.44	
<i>X</i>		7.0			0.40	
<i>σ</i>		0.58			0.048	
<i>cv (%)</i>		8.3			12.2	
II (75/25)	9.5	8.1	7.5	0.69	0.77	0.64
	8.9	8.8	8.0	0.64	0.57	0.50
	9.2	8.4	7.8	0.66	0.67	0.57
<i>X</i>						
<i>σ</i>						
<i>cv (%)</i>						
III (50/50)	5.1	3.8	3.7	0.30	0.29	0.28
	4.5	4.0	3.6	0.30	0.26	0.25
	4.6	4.2	3.5	0.27	0.28	0.30
<i>X</i>	4.7	4.0	3.6	0.29	0.28	0.28
<i>σ</i>	0.35	0.18	0.11	0.017	0.013	0.026
<i>cv (%)</i>	7.3	4.6	3.1	5.9	4.7	9.2
IV (25/75)	2.7	1.9	1.6	0.18	0.16	0.16
	2.6	2.3	1.5	0.18	0.21	0.17
	2.6	2.0	1.7	0.17	0.18	0.19
<i>X</i>	2.6	2.1	1.6	0.18	0.18	0.17
<i>σ</i>	0.07	0.16	0.10	0.006	0.024	0.020
<i>cv (%)</i>	2.6	7.8	6.1	3.2	13.1	11.5
V (0/100) *	2.2	1.6	1.3	0.14	0.12	0.14
	2.5	1.6	1.0	0.16	0.13	0.10
	2.1	1.6	1.4	0.16	0.16	0.16
<i>X</i>	2.2	1.6	1.2	0.15	0.14	0.13
<i>σ</i>	0.20	0.04	0.20	0.014	0.022	0.028
<i>cv (%)</i>	9.1	2.2	16.4	9.0	16.2	20.8

* Ηλικία 3 ημερών

Πίνακας 4.12 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικία 7 ημερών

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		7.9			0.52	
		9.7			0.57	
		8.5			0.47	
<i>X</i>		8.7			0.52	
<i>σ</i>		0.91			0.054	
<i>cv (%)</i>		10.4			10.3	
II (75/25)	8.1	7.3	7.1	0.57	0.48	0.50
	8.1	6.6	7.1	0.41	0.48	0.44
	7.8	6.6	6.9	0.59	0.55	0.49
<i>X</i>	8.0	6.8	7.0	0.52	0.50	0.48
<i>σ</i>	0.16	0.44	0.08	0.095	0.041	0.031
<i>cv (%)</i>	2.0	6.4	1.2	18.2	8.1	6.5
III (50/50)	6.9	4.8	4.1	0.49	0.39	0.37
	6.3	4.9	4.3	0.50	0.44	0.35
	6.4	4.6	4.6	0.50	0.27	0.37
<i>X</i>	6.5	4.8	4.3	0.50	0.37	0.36
<i>σ</i>	0.33	0.15	0.26	0.006	0.088	0.016
<i>cv (%)</i>	5.0	3.1	5.9	1.2	24.1	4.3
IV (25/75)	4.4	3.3	2.5	0.34	0.24	0.16
	3.9	2.8	2.7	0.27	0.29	0.20
	4.3	2.8	2.6	0.35	0.24	0.27
<i>X</i>	4.2	2.9	2.6	0.32	0.26	0.21
<i>σ</i>	0.27	0.27	0.13	0.041	0.033	0.055
<i>cv (%)</i>	6.4	9.2	5.0	12.8	12.8	26.4
V (0/100)	2.9	2.7	2.0	0.25	0.17	0.20
	3.5	2.0	1.7	0.29	0.24	0.17
	3.1	2.5	1.9	0.25	0.23	0.18
<i>X</i>	3.2	2.4	1.9	0.26	0.22	0.19
<i>σ</i>	0.30	0.37	0.16	0.026	0.040	0.015
<i>cv (%)</i>	9.4	15.3	8.3	10.1	18.3	8.1

Πίνακας 4.13 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικία 60 ημερών

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		13.3			0.73	
		13.8			0.64	
		14.2			0.74	
<i>X</i>		13.8			0.70	
<i>σ</i>		0.45			0.06	
<i>cv (%)</i>		3.2			8.3	
II (75/25)	8.2	8.4	7.1	0.86	0.88	0.83
	10.4	8.4	7.6	0.67	0.79	0.89
	11.8	8.6	7.8	1.05	0.85	0.69
<i>X</i>	10.1	8.5	7.5	0.86	0.84	0.80
<i>σ</i>	1.82	0.12	0.33	0.190	0.049	0.104
<i>cv (%)</i>	17.9	1.5	4.4	22.1	5.8	13.0
III (50/50)	8.3	6.8	6.0	0.67	0.57	0.59
	6.7	5.5	5.1	0.72	0.57	0.57
	7.7	5.2	5.5	0.66	0.60	0.50
<i>X</i>	7.6	5.9	5.5	0.69	0.58	0.55
<i>σ</i>	0.80	0.86	0.43	0.031	0.017	0.048
<i>cv (%)</i>	10.6	14.6	7.8	4.5	3.0	8.7
IV (25/75)	5.7	5.3	3.6	0.73	0.41	0.42
	5.4	4.7	3.0	0.74	0.48	0.43
	5.7	5.5	3.8	0.70	0.43	0.41
<i>X</i>	5.6	5.2	3.5	0.72	0.44	0.42
<i>σ</i>	0.16	0.42	0.37	0.019	0.036	0.011
<i>cv (%)</i>	2.9	8.1	10.6	2.7	8.1	2.6
V (0/100)	4.5	3.1	2.3	0.43	0.27	0.32
	3.6	3.8	2.5	0.52	0.25	0.25
	5.2	3.3	2.2	0.49	0.31	0.27
<i>X</i>	4.4	3.4	2.3	0.48	0.28	0.28
<i>σ</i>	0.78	0.35	0.15	0.046	0.031	0.039
<i>cv (%)</i>	17.7	10.2	6.2	9.7	11.1	13.8

Πίνακας 4.14 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 5 % και ηλικία 2 ημερών (υλικά I, II, III IV) ή 3 ημερών (υλικό V)

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κόβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		8.3			0.64	
		10.1			0.61	
		9.4			0.50	
<i>X</i>		9.2			0.59	
<i>σ</i>		0.93			0.072	
<i>cv</i> (%)		10.0			12.4	
II (75/25)	8.2	7.2	6.8	0.56	0.59	0.55
	8.4	7.4	7.1	0.66	0.55	0.59
<i>X</i>	8.3	7.3	7.0	0.61	0.57	0.57
<i>σ</i>						
<i>cv</i> (%)						
III (50/50)	7.1	6.0	5.0	0.52	0.45	0.50
	6.7	5.3	4.9	0.50	0.44	0.49
	5.9	4.8	4.4	0.39	0.46	0.35
<i>X</i>	6.5	5.4	4.8	0.47	0.45	0.45
<i>σ</i>	0.63	0.60	0.30	0.069	0.010	0.084
<i>cv</i> (%)	9.6	11.1	6.3	14.7	2.2	18.9
IV (25/75)	3.7	4.2	3.4	0.40	0.34	0.32
	4.4	4.0	3.4	0.36	0.35	0.36
	4.1	4.1	3.1	0.39	0.36	0.30
<i>X</i>	4.1	4.1	3.3	0.38	0.35	0.33
<i>σ</i>	0.35	0.06	0.21	0.020	0.009	0.030
<i>cv</i> (%)	8.6	1.6	6.2	5.2	2.6	9.0
V (0/100) *	3.7	2.9	2.3	0.41	0.25	0.27
	3.5	3.2	2.2	0.32	0.30	0.28
	3.6	3.0	2.4	0.43	0.29	0.19
<i>X</i>	3.6	3.0	2.3	0.39	0.28	0.25
<i>σ</i>	0.12	0.17	0.09	0.06	0.02	0.05
<i>cv</i> (%)	3.3	5.6	4.0	16.0	7.9	20.0

* Ηλικία 3 ημερών

Πίνακας 4.15 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 5 % και ηλικία 7 ημερών

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		12.2			0.79	
		13.0			0.72	
		12.7			0.66	
<i>X</i>		12.6			0.72	
<i>σ</i>		0.42			0.07	
<i>cv (%)</i>		3.3			9.2	
II (75/25)	10.3	10.4	7.8	1.09	1.03	0.85
	10.2	9.5	8.1	0.97	0.91	0.91
	10.2	10.0	7.9	1.03	0.97	0.88
<i>X</i>						
<i>σ</i>						
<i>cv (%)</i>						
III (50/50)	9.5	8.0	6.6	0.80	0.63	0.50
	9.6	7.1	6.9	0.72	0.80	0.67
	9.1	7.7	7.1	0.92	0.74	0.67
<i>X</i>	9.4	7.6	6.9	0.81	0.72	0.61
<i>σ</i>	0.26	0.47	0.29	0.103	0.084	0.096
<i>cv (%)</i>	2.8	6.2	4.2	12.7	11.5	15.7
IV (25/75)	8.7	4.9	4.2	0.69	0.42	0.39
	6.2	5.6	4.4	0.76	0.50	0.41
	7.6	5.3	4.7	0.60	0.45	0.34
<i>X</i>	7.5	5.3	4.4	0.68	0.46	0.38
<i>σ</i>	1.28	0.31	0.24	0.077	0.042	0.038
<i>cv (%)</i>	17.1	6.0	5.4	11.2	9.1	10.0
V (0/100)	4.9	4.0	2.7	0.44	0.41	0.24
	5.1	4.4	2.7	0.47	0.37	0.30
	5.8	4.2	3.1	0.47	0.36	0.31
<i>X</i>	5.3	4.2	2.9	0.46	0.38	0.28
<i>σ</i>	0.44	0.21	0.22	0.015	0.026	0.039
<i>cv (%)</i>	8.3	4.9	7.6	3.2	6.8	13.6

Πίνακας 4.16 : Μεμονωμένα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 5 % και ηλικία 60 ημερών

Μίγμα	Θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)			Διάρρηξη (MPa)		
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		
	0	20	35	0	20	35
I (100/0)		18.1			1.36	
		20.1			1.44	
		17.8			1.46	
<i>X</i>		18.7			1.42	
<i>σ</i>		1.28			0.055	
<i>cv (%)</i>		6.8			3.9	
II (75/25)	16.0	12.0	11.8	1.63	1.63	1.37
	14.4	11.7	12.4	1.45	1.16	1.32
	15.6	13.0	12.0	1.48	1.62	1.54
<i>X</i>	15.3	12.3	12.1	1.52	1.47	1.41
<i>σ</i>	0.84	0.69	0.27	0.095	0.268	0.112
<i>cv (%)</i>	5.5	5.6	2.3	6.3	18.2	8.0
III (50/50)	18.7	9.3	8.2	1.42	0.98	0.66
	12.3	9.7	8.4	1.35	0.75	0.70
	12.6	8.6	7.5	1.33	0.79	0.71
<i>X</i>	14.5	9.2	8.0	1.37	0.84	0.69
<i>σ</i>	3.63	0.55	0.44	0.044	0.121	0.029
<i>cv (%)</i>	25.0	5.9	5.5	3.2	14.4	4.2
IV (25/75)	9.4	6.4	4.9	1.06	0.79	0.52
	8.9	6.9	5.1	0.83	0.65	0.61
	9.2	5.8	4.9	0.92	0.73	0.66
<i>X</i>	9.2	6.4	5.0	0.94	0.72	0.60
<i>σ</i>	0.23	0.57	0.15	0.114	0.071	0.072
<i>cv (%)</i>	2.5	8.9	2.9	12.2	9.9	12.0
V (0/100)	7.1	4.3	3.2	0.82	0.52	0.38
	6.9	5.6	4.0	0.82	0.58	0.41
	7.8	5.2	3.4	0.84	0.65	0.42
<i>X</i>	7.3	5.0	3.5	0.83	0.58	0.40
<i>σ</i>	0.46	0.64	0.39	0.010	0.063	0.020
<i>cv (%)</i>	6.3	12.8	11.0	1.2	10.9	4.9

Στους Πίνακες 4.17 - 4.20 δίνονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής (πρίσματος, ισοδύναμου κύβου) και της αντοχής σε κάμψη, καθώς και των αντίστοιχων μέτρων ελαστικότητας, σε σχέση με τη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή (3.5 °C, 24 °C και 40 °C). Στον Πίνακα 4.17 δίνονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων, ενώ στους Πίνακες 4.18 - 4.20 δίνονται τα μεμονωμένα αποτελέσματα για τις θερμοκρασίες 3.5 °C, 24 °C και 40 °C αντίστοιχα. Στους Πίνακες αυτούς δίνονται οι μέσοι όροι, τυπικές αποκλίσεις και συντελεστές μεταβλητότητας για κάθε μίγμα και δοκιμή. Σημειώνεται ότι η επιλογή των θερμοκρασιών έγινε λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους πρακτικούς παράγοντες που επέτρεπαν ομοιόμορφη και εύκολη εξασφάλιση της θερμοκρασίας στα δοκίμια. Έτσι η θερμοκρασία των 24 °C ήταν εκείνη που επικρατούσε στο εργαστήριο κατά την εκτέλεση των δοκιμών. Η θερμοκρασία των 3.5 °C και των 40 °C ήταν οι θερμοκρασίες που ήταν δυνατόν να επιτευχθούν με τα διαθέσιμα μέσα.

Πίνακας 4.17 : Μέσοι όροι αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής) και μέτρων ελαστικότητας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Μίγμα	Θερμοκρασία (°C)	Αντοχή (MPa)			Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
		Κάμψη	Ισοδύναμοι κύβοι	Πρίσματα	Θλίψη	Κάμψη
II (75/25)	3.5	2.24	13.3	8.5	17500	21300
III (50/50)	3.5	2.24	11.5	7.9	14000	18200
IV (25/75)	3.5	1.92	10.2	6.8	11300	15500
V (0/100)	3.5	1.94	8.8	7.0	11200	12500
I (100/0)	24	2.28	16.3	9.0	24800	27800
II (75/25)	24	2.13	13.2	7.4	16500	20200
III (50/50)	24	2.00	9.9	6.1	11500	15000
IV (25/75)	24	1.56	6.9	4.5	7900	9300
V (0/100)	24	1.44	5.9	4.2	5000	6800
II (75/25)	40	1.95	11.3	6.6	15200	19300
III (50/50)	40	1.75	7.6	5.3	10000	12200
IV (25/75)	40	1.52	6.3	4.0	6500	8700
V (0/100)	40	1.20	4.5	2.8	4100	5600

Πίνακας 4.18 : Μεμονωμένα αποτελέσματα αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής) και μέτρων ελαστικότητας για θερμοκρασία κατά τη δοκιμή 3.5 °C

Μίγμα	Θερμοκρασία (°C)	Αντοχή (MPa)			Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
		Κάμψη	Ισοδύναμοι κύβοι	Πρίσματα	Θλίψη	Κάμψη
II (75/25)	3.5	2.23	13.0	8.5	16500	21000
		2.24	13.0	8.5	19000	21500
			13.5	8.5	17000	
			13.0	8.5		
			13.5			
			13.5			
<i>X</i>		2.24	13.3	8.5	17500	21300
<i>σ</i>			0.27	0.00	1323	
<i>cv (%)</i>			2.1	0.0	7.6	
III (50/50)	3.5	2.38	11.5	7.5	13500	18000
		2.28	12.0	8.0	14500	18500
		2.07	11.5	8.0	14000	18000
			11.5	8.0		
			11.0			
			11.5			
<i>X</i>		2.24	11.5	7.9	14000	18200
<i>σ</i>		0.2	0.32	0.25	500	289
<i>cv (%)</i>		7.1	2.7	3.2	3.6	1.6
IV (25/75)	3.5	2.01	10.0	6.5	11500	16500
		1.94	10.5	7.0	11000	14500
		1.82	10.0	7.0		
			10.0	6.5		
			10.5			
			10.0			
<i>X</i>		1.92	10.2	6.8	11300	15500
<i>σ</i>		0.1	0.26	0.29	354	
<i>cv (%)</i>		5.0	2.5	4.3	3.1	
V (0/100)	3.5	2.10	9.0	7.0	11500	12500
		1.89	9.0	7.0	10000	12000
		1.82	8.5	7.0	12000	11500
			8.5	7.0		
			9.0			
			8.5			
<i>X</i>		1.94	8.8	7.0	11200	12000
<i>σ</i>		0.1	0.27	0.00	1041	500
<i>cv (%)</i>		7.5	3.1	0.0	9.3	4.2

Πίνακας 4.19 : Μεμονωμένα αποτελέσματα αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής) και μέτρων ελαστικότητας για θερμοκρασία κατά τη δοκιμή 24 °C

Μίγμα	Θερμοκρασία (°C)	Αντοχή (MPa)			Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
		Κάμψη	Ισοδύναμοι κύβοι	Πρίσματα	Θλίψη	Κάμψη
I (100/0)	24	2.30	16.0	9.0	22500	28500
		2.24	15.5	8.5	22500	28500
		2.29	18.5	10.0	29500	26500
			18.0	8.5		
			15.0			
			15.0			
<i>X</i>		2.28	16.3	9.0	24800	27800
<i>σ</i>		0.0	1.54	0.71	4041	1154
<i>cv (%)</i>		1.4	9.4	7.9	16.3	4.1
II (75/25)	24	2.23	13.0	7.0	17500	20500
		2.05	13.5	8.0	16000	19500
		2.12	13.0	6.5	16000	20500
			12.5	8.0		
			13.5			
			13.5			
<i>X</i>		2.13	13.2	7.4	16500	20200
<i>σ</i>		0.1	0.41	0.75	866	577
<i>cv (%)</i>		4.3	3.1	10.2	5.2	2.9
III (50/50)	24	2.04	10.0	6.0	12000	15000
		2.00	9.5	6.5	11500	14500
		1.97	9.5	7.0	11000	15500
			10.0	5.0		
			10.5			
			10.0			
<i>X</i>		2.00	9.9	6.1	11500	15000
<i>σ</i>		0.0	0.38	0.85	500	500
<i>cv (%)</i>		1.8	3.8	13.9	4.3	3.3
IV (25/75)	24	1.49	7.5	4.1	8500	9200
		1.52	7.0	4.7	7200	9000
		1.66	7.0	4.7	8000	9800
			6.5	4.5		
			7.0			
			6.5			
<i>X</i>		1.56	6.9	4.5	7900	9300
<i>σ</i>		0.1	0.38	0.28	656	416
<i>cv (%)</i>		5.8	5.4	6.3	8.3	4.5
I (0/100)	24	1.43	6.5	4.2	5300	6500
		1.35	6.0	4.2	5000	6900
		1.53	5.5	4.2	4800	7100
			5.5	4.0		
			6.0			
			6.0			
<i>X</i>		1.44	5.9	4.2	5000	6800
<i>σ</i>		0.1	0.38	0.10	252	306
<i>cv (%)</i>		6.3	6.4	2.4	5.0	4.5

Πίνακας 4.20 : Μεμονωμένα αποτελέσματα αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής) και μέτρων ελαστικότητας για θερμοκρασία κατά τη δοκιμή 40 °C

Μίγμα	Θερμοκρασία (°C)	Αντοχή (MPa)			Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
		Κάμψη	Ισοδύναμοι	Πρίσματα	Θλίψη	Κάμψη
II (75/25)	40	1.82	11.0	7.0	15500	18000
		1.98	11.5	7.0	14500	20000
		2.05	11.5	6.5	15500	20000
			11.5	6.0		
			11.0			
			11.0			
<i>X</i>		1.95	11.3	6.6	15200	19300
<i>σ</i>		0.1	0.27	0.48	577	1154
<i>cv (%)</i>		6.0	2.4	7.2	3.8	6.0
III (50/50)	40	1.78	7.5	5.0	10500	13000
		1.67	7.5	5.0	10000	13000
		1.80	7.5	5.5	9700	10500
			7.5	5.5		
			8.0			
			7.5			
<i>X</i>		1.75	7.6	5.3	10000	12200
<i>σ</i>		0.1	0.20	0.29	404	1443
<i>cv (%)</i>		4.0	2.7	5.5	4.0	11.9
IV (25/75)	40	1.49	6.0	3.9	6000	8600
		1.55	6.0	4.0	7000	8400
			6.0	3.9	6500	9100
			6.0	4.1		
			6.5			
			7.0			
<i>X</i>		1.52	6.3	4.0	6500	8700
<i>σ</i>			0.42	0.10	500	360
<i>cv (%)</i>			6.7	2.4	7.7	4.1
V (0/100)	40	1.14	4.5	2.8	3700	5400
		1.26	4.4	2.9	4600	5700
		1.19	4.5	2.8	3900	5600
			4.5			
			4.3			
			4.5			
<i>X</i>		1.20	4.5	2.8	4100	5600
<i>σ</i>		0.1	0.08	0.06	473	153
<i>cv (%)</i>		5.0	1.9	2.0	11.5	2.7

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στον Πίνακα 4.21 δίνονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων των δοκιμών της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό και των αντίστοιχων μέτρων ελαστικότητας που πραγματοποιήθηκαν στα υλικά που περιγράφονται στην Παράγραφο 5.2.4. Στον Πίνακα 4.22 δίνονται τα μεμονωμένα αποτελέσματα των δοκιμών.

Πίνακας 4.21 : Μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών αντοχής και μέτρων ελαστικότητας

Συμβολισμός υλικού	Αντοχή (MPa)		Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός
A0	22.7	1.79	25300	32500
A25	16.8	1.69	22100	21200
A50	13.6	1.73	15700	14500
B25	16.5	1.78	16100	16600
B50	12.6	1.22	17200	14700
Γ0	22.1	2.60	35900	39000
Γ25	18.0	1.85	25000	20500
Γ50	14.1	1.73	18200	16000
Δ25	16.6	1.86	23100	20400
Δ50	14.3	1.71	17700	16100
E0	27.4	2.40	40000	42700
E25	17.7	1.86	24200	24300
E50	14.6	1.99	19900	16800
ΣΤ25	17.4	2.03	25100	24800
ΣΤ50	13.7	1.80	15700	15500

Πίνακας 4.22 : Μεμονωμένα αποτελέσματα δοκιμών αντοχής και μέτρων ελαστικότητας

Συμβολισμός υλικού	Αντοχή (MPa)		Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός
A0	22.6	1.78	28700	28700
	24.2	1.77	30200	35900
	22.5	1.83	17100	32000
	21.6			33300
<i>X</i>	22.7	1.79	25300	32500
<i>σ</i>	1.08	0.033	7170	2973
<i>cv (%)</i>	4.7	1.9	28.3	9.2
A25	16.7	1.77	22900	21800
	17.2	1.60	21100	20800
	16.5	1.60	22300	21300
		1.77		21000
<i>X</i>	16.8	1.69	22100	21200
<i>σ</i>	0.34	0.100	916	446
<i>cv (%)</i>	2.0	5.9	4.1	2.1
A50	13.6	1.75	16500	15700
	13.2	1.74	15200	12300
	13.6	1.71	15400	14500
	13.9			15300
<i>X</i>	13.6	1.73	15700	14500
<i>σ</i>	0.32	0.022	691	1533
<i>cv (%)</i>	2.3	1.3	4.4	10.6
B25	16.5	1.86	17000	15800
	15.7	1.74	16600	17100
	16.8	1.74	15000	17800
	16.9		16000	15700
<i>X</i>	16.5	1.78	16100	16600
<i>σ</i>	0.54	0.069	873	1002
<i>cv (%)</i>	3.3	3.9	5.4	6.0

Πίνακας 4.22 (συνέχεια)

Συμβολισμός υλικού	Αντοχή (MPa)		Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός
B50	12.4	1.15	15800	14000
	12.0	1.25	17900	16800
	13.7	1.27	19400	15100
	12.4	1.20	15500	12900
<i>X</i>	<i>12.6</i>	<i>1.22</i>	<i>17200</i>	<i>14700</i>
<i>σ</i>	<i>0.74</i>	<i>0.054</i>	<i>1842</i>	<i>1664</i>
<i>cv (%)</i>	<i>5.8</i>	<i>4.4</i>	<i>10.7</i>	<i>11.3</i>
Γ0	20.0	2.65	34600	36200
	24.2	2.61	37100	41900
	22.5	2.55	36300	38900
	21.6		35600	
<i>X</i>	<i>22.1</i>	<i>2.60</i>	<i>35900</i>	<i>39000</i>
<i>σ</i>	<i>1.75</i>	<i>0.049</i>	<i>1051</i>	<i>2840</i>
<i>cv (%)</i>	<i>7.9</i>	<i>1.9</i>	<i>2.9</i>	<i>7.3</i>
Γ25	17.8	2.05	24100	20800
	18.2	1.77	26800	20500
	18.4	1.72	24900	22500
	17.6		24400	18400
<i>X</i>	<i>18.0</i>	<i>1.85</i>	<i>25000</i>	<i>20500</i>
<i>σ</i>	<i>0.37</i>	<i>0.176</i>	<i>1231</i>	<i>1703</i>
<i>cv (%)</i>	<i>2.1</i>	<i>9.5</i>	<i>4.9</i>	<i>8.3</i>
Γ50	14.3	1.78	16900	13900
	13.9	1.73	16600	15700
	13.7	1.80	20200	17700
	14.3	1.61	19200	16600
<i>X</i>	<i>14.1</i>	<i>1.73</i>	<i>18200</i>	<i>16000</i>
<i>σ</i>	<i>0.32</i>	<i>0.086</i>	<i>1742</i>	<i>1603</i>
<i>cv (%)</i>	<i>2.3</i>	<i>5.0</i>	<i>9.6</i>	<i>10.0</i>

Πίνακας 4.22 (συνέχεια)

Συμβολισμός υλικού	Αντοχή (MPa)		Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός
$\Delta 25$	16.0	1.75	23000	20900
	17.5	1.91	25700	21000
	16.6	1.99	23300	20100
	16.5	1.80	20500	19700
X	16.6	1.86	23100	20400
σ	0.61	0.107	2116	610
cv (%)	3.7	5.8	9.1	3.0
$\Delta 50$	14.2	1.70	19200	16600
	14.0	1.79	15800	15000
	15.0	1.63	17500	16600
	13.8		18400	
X	14.3	1.71	17700	16100
σ	0.54	0.078	1436	904
cv (%)	3.8	4.6	8.1	5.6
E0	26.2	2.30	38500	39300
	27.7	2.29	41600	43000
	27.8	2.51		45900
X	27.4	2.40	40000	42700
σ	0.82	0.127		3308
cv (%)	3.0	5.3		7.7
E25	17.6	1.82	23800	24200
	17.4	1.94	24300	26400
	17.9	1.77	23300	22200
	18.0	1.89	25400	
X	17.7	1.86	24200	24300
σ	0.29	0.075	917	2111
cv (%)	1.7	4.0	3.8	8.7

Πίνακας 4.22 (συνέχεια)

Συμβολισμός υλικού	Αντοχή (MPa)		Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
	Θλίψη	Εφελκυσμός	Θλίψη	Εφελκυσμός
E50	14.5	1.88	20100	16800
	14.3	2.06	19200	15800
	14.5	2.03	20300	17800
	14.9	2.01		16700
<i>X</i>	14.6	1.99	19900	16800
<i>σ</i>	0.26	0.082	608	830
<i>cv (%)</i>	1.8	4.1	3.1	4.9
ΣΤ25	17.7	2.02	25800	24500
	17.7	1.99	25100	25900
	17.3	2.08	24400	24000
	17.0		25200	24900
<i>X</i>	17.4	2.03	25100	24800
<i>σ</i>	0.36	0.048	603	802
<i>cv (%)</i>	2.1	2.4	2.4	3.2
ΣΤ50	14.2	1.83	16300	17200
	13.3	1.80	15300	15000
	13.7	1.81	15500	14300
	13.5	1.76		
<i>X</i>	13.7	1.80	15700	15500
<i>σ</i>	0.37	0.028	519	1513
<i>cv (%)</i>	2.7	1.6	3.3	9.8

4.4 ΚΟΠΩΣΗ

Στον Πίνακα 4.23 δίνονται τα αποτελέσματα κόπωσης για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν. Στον Πίνακα εκτός από τον αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων, δίνεται ο λόγος σ/f , καθώς και η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε. Επίσης δίνεται, για κάθε επίπεδο φόρτισης, η τυπική απόκλιση των τιμών του λογαρίθμου των επαναλήψεων φορτίσεων.

Πίνακας 4.23 : Αποτελέσματα κόπωσης

α/α	Μίγμα	Ποσοστό τσιμέντου (%)	Επίπεδο φόρτισης (σ/f)	Φορτίο (kN)	Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N)	Τυπική απόκλιση των τιμών $\log N$, ανά σ/f
1	I (100/0)	3	0.90	4.47	4	0.22
2	I (100/0)	3	0.90	4.47	7	
3	I (100/0)	3	0.90	4.47	11	
4	I (100/0)	3	0.80	3.98	1783	0.51
5	I (100/0)	3	0.80	3.98	519	
6	I (100/0)	3	0.80	3.98	450	
7	I (100/0)	3	0.80	3.98	99	
8	I (100/0)	3	0.70	3.48	1222	1.19
9	I (100/0)	3	0.70	3.48	580	
10	I (100/0)	3	0.70	3.48	701	
11	I (100/0)	3	0.70	3.48	2041	
12	I (100/0)	3	0.70	3.48	5095	
13	I (100/0)	3	0.70	3.48	12236	
14	I (100/0)	3	0.70	2.99	5561	
15	I (100/0)	3	0.70	2.99	959974	
16	I (100/0)	3	0.70	2.99	11373	
17	I (100/0)	3	0.70	2.99	998332	
18	I (100/0)	3	0.70	2.99	353837	
19	I (100/0)	3	0.70	3.52	60015	
20	I (100/0)	3	0.70	3.52	49361	
21	I (100/0)	3	0.70	3.52	1249813	
23	I (100/0)	3	0.60	2.98	140877	0.74
24	I (100/0)	3	0.60	2.98	13880	
25	I (100/0)	3	0.60	2.98	11209	
26	I (100/0)	3	0.60	2.98	25885	
27	I (100/0)	3	0.60	2.98	408825	
28	I (100/0)	3	0.60	2.98	507978	

Πίνακας 4.23 (συνέχεια)

α/α	Μίγμα	Ποσοστό τσιμέντου (%)	Επίπεδο φόρτισης (σ/f)	Φορτίο (kN)	Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N)	Τυπική απόκλιση των τιμών log N, ανά σ/f
1	III (50/50)	3	0.75	3.46	15984	0.67
2	III (50/50)	3	0.75	3.46	100574	
3	III (50/50)	3	0.75	3.46	89724	
4	III (50/50)	3	0.75	3.46	3303	
5	III (50/50)	3	0.75	3.46	6228	
6	III (50/50)	3	0.70	3.22	3746	0.62
7	III (50/50)	3	0.70	3.22	10814	
8	III (50/50)	3	0.70	3.22	2972	
9	III (50/50)	3	0.70	3.22	10823	
10	III (50/50)	3	0.70	3.22	47346	
11	III (50/50)	3	0.70	3.22	132409	
12	III (50/50)	3	0.70	3.22	55000	
13	III (50/50)	3	0.70	3.22	76367	
14 *	III (50/50)	3	0.60	2.76	972922	1.07
15	III (50/50)	3	0.60	2.76	670925	
16	III (50/50)	3	0.60	2.76	67539	
17	III (50/50)	3	0.60	2.76	706566	
18	III (50/50)	3	0.60	2.76	30791	
19	III (50/50)	3	0.60	2.76	5674	
20	III (50/50)	3	0.60	2.76	2276	
1	V (0/100)	3	0.90	2.85	359	0.17
2	V (0/100)	3	0.90	2.85	560	
3	V (0/100)	3	0.90	2.85	796	
4	V (0/100)	3	0.80	2.54	784	0.65
5	V (0/100)	3	0.80	2.54	383	
6	V (0/100)	3	0.80	2.54	128	
7	V (0/100)	3	0.80	2.54	3506	
8	V (0/100)	3	0.80	2.54	4448	
9	V (0/100)	3	0.70	2.22	50320	0.25
10	V (0/100)	3	0.70	2.22	55689	
11	V (0/100)	3	0.70	2.22	188231	
12	V (0/100)	3	0.70	2.22	127907	
13	V (0/100)	3	0.70	2.22	126603	
14	V (0/100)	3	0.60	1.9	534786	0.22
15	V (0/100)	3	0.60	1.9	567068	
16	V (0/100)	3	0.60	1.9	184530	
17	V (0/100)	3	0.60	1.9	353221	

* Δεν επήλθε θραύση του δοκιμίου

Πίνακας 4.23 (συνέχεια)

α/α	Μίγμα	Ποσοστό τσιμέντου (%)	Επίπεδο φόρτισης (σ/f)	Φορτίο (kN)	Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N)	Τυπική απόκλιση των τιμών log N, ανά σ/f
1	I (100/0)	5	0.75	8.84	55506	0.57
2	I (100/0)	5	0.75	8.84	777888	
3	I (100/0)	5	0.75	8.84	228716	
4	I (100/0)	5	0.70	7.74	279521	0.25
5*	I (100/0)	5	0.70	7.74	890831	
6	I (100/0)	5	0.70	7.74	843645	
7	I (100/0)	5	0.70	7.74	926845	
8	I (100/0)	5	0.60	6.62	1084668	0.03
9*	I (100/0)	5	0.60	6.62	1200000	
1	III (50/50)	5	0.90	8.51	63	0.51
2	III (50/50)	5	0.90	8.85	112	
3	III (50/50)	5	0.90	8.55	273	
4	III (50/50)	5	0.90	7.88	1039	
5	III (50/50)	5	0.90	7.88	675	
6	III (50/50)	5	0.84	8.63	2430	0.76
7	III (50/50)	5	0.80	8.4	567	
8	III (50/50)	5	0.80	8.4	46463	
9	III (50/50)	5	0.80	7.46	11780	
10	III (50/50)	5	0.80	7.85	2929	
11	III (50/50)	5	0.80	7	16639	
12	III (50/50)	5	0.80	7	38510	
13	III (50/50)	5	0.80	7.84	937	
14	III (50/50)	5	0.80	7.84	1184	
15	III (50/50)	5	0.70	7.91	703	0.60
16	III (50/50)	5	0.70	7.91	65050	
17	III (50/50)	5	0.70	7.91	4538	
18	III (50/50)	5	0.70	7.91	3191	
19	III (50/50)	5	0.70	7.91	5857	
20	III (50/50)	5	0.70	7.91	500	

* Δεν επιήλθε θραύση του δοκιμίου

Πίνακας 4.23 (συνέχεια)

α/α	Μίγμα	Ποσοστό τσιμέντου (%)	Επίπεδο φόρτισης (σ/φ)	Φορτίο (kN)	Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N)	Τυπική απόκλιση των τιμών $\log N$, ανά σ/φ
21	III (50/50)	5	0.70	7.91	7423	0.60
22	III (50/50)	5	0.70	7.91	2389	
23	III (50/50)	5	0.70	7.34	8934	
24	III (50/50)	5	0.70	7.34	33588	
25	III (50/50)	5	0.70	7.34	70635	
26	III (50/50)	5	0.70	7.34	36832	
27	III (50/50)	5	0.70	7.34	7629	
28	III (50/50)	5	0.70	7.34	11877	
29	III (50/50)	5	0.70	7.34	17606	
30	III (50/50)	5	0.70	7.34	1153	
31	III (50/50)	5	0.70	7.34	56100	
32	III (50/50)	5	0.70	7.34	44518	
33	III (50/50)	5	0.70	7.34	10511	
34	III (50/50)	5	0.70	7.34	34361	
35	III (50/50)	5	0.70	7.34	20029	
36	III (50/50)	5	0.70	7.34	8010	
37	III (50/50)	5	0.70	7.34	11054	
38	III (50/50)	5	0.70	6.94	5160	
39	III (50/50)	5	0.70	6.53	20540	
40	III (50/50)	5	0.70	7.46	1820	
41	III (50/50)	5	0.60	6.78	79110	0.77
42	III (50/50)	5	0.60	6.18	898876	
43	III (50/50)	5	0.60	6.18	4318	
44	III (50/50)	5	0.60	6.18	25215	
45	III (50/50)	5	0.60	5.89	102550	
46	III (50/50)	5	0.60	5.65	109110	
47	III (50/50)	5	0.50	4.92	916750	0.32
48	III (50/50)	5	0.50	4.92	875290	
49	III (50/50)	5	0.50	4.38	2870770	
50	III (50/50)	5	0.50	4.9	899420	
51	III (50/50)	5	0.50	4.9	1701170	
52	III (50/50)	5	0.50	4.9	3531850	
53*	III (50/50)	5	0.50	4.9	5071430	

* Δεν επήλθε θραύση του δοκιμίου

Πίνακας 4.23 (συνέχεια)

α/α	Μίγμα	Ποσοστό τσιμέντου (%)	Επίπεδο φόρτισης (σ/f)	Φορτίο (kN)	Αριθμός επαναλήψεων φορτίσεων (N)	Τυπική απόκλιση των τιμών $\log N$, ανά σ/f
1	V (0/100)	5	0.70	6.09	5376	0.58
2	V (0/100)	5	0.70	6.09	5886	
3	V (0/100)	5	0.70	6.09	782	
4	V (0/100)	5	0.70	6.09	213	
5	V (0/100)	5	0.70	6.09	469	
6	V (0/100)	5	0.70	6.09	957	
7	V (0/100)	5	0.60	5.22	2924	
8	V (0/100)	5	0.60	5.22	1793	
9	V (0/100)	5	0.60	5.22	7114	
10	V (0/100)	5	0.60	4.27	6568	
11	V (0/100)	5	0.60	4.27	14323	
12	V (0/100)	5	0.60	4.27	8392	
13	V (0/100)	5	0.60	4.27	63614	
14	V (0/100)	5	0.60	4.27	37839	
15	V (0/100)	5	0.60	4.27	61343	

5 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΟΥΣ

Τα αποτελέσματα σχολιάζονται καταρχήν ως προς την ακρίβειά τους, με βάση τον συντελεστή μεταβλητότητας, για να εκτιμηθεί τόσο ο βαθμός αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων αυτών καθ' εαυτών, όσο και των συγκρίσεων και των συμπερασμάτων που θα επακολουθήσουν σε επόμενες παραγράφους. Τα αποτελέσματα ελέγχονται ως προς την επαναληψιμότητά τους με βάση Πρότυπα που αναφέρονται σε σκυρόδεμα και όχι σε μίγματα φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και καθαρού αμμοχάλικου, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν ακόμη Πρότυπα για τα ανακυκλωμένα υλικά, τα δε Πρότυπα που αναφέρονται στα κατεργασμένα/σταθεροποιημένα υλικά δεν έχουν στοιχεία επαναληψιμότητας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στα Σχήματα 5.1 έως 5.8 για τις δοκιμές που υπάρχουν περισσότεροι από ένας συντελεστές μεταβλητότητας για κάποιο υλικό, έχει υπολογιστεί και παρουσιάζεται στα Σχήματα ο σταθμισμένος συντελεστής μεταβλητότητας που δίνεται από τη σχέση :

$$cv = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)cv_1^2 + (n_2 - 1)cv_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

όπου : n_i είναι το πλήθος των δοκιμών της i σειράς αποτελεσμάτων και

cv_i ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας.

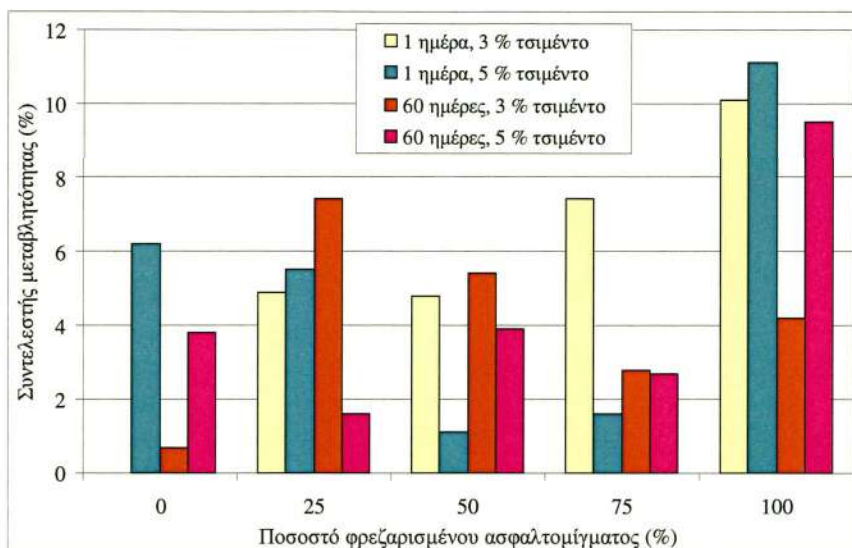
Οι συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε θλίψη κύβων δίνονται στο Σχήμα 5.1 και κυμαίνονται μεταξύ 0.7 και 11.1 %. Αναλυτικότερα για την ηλικία της μίας ημέρας οι συντελεστές μεταβλητότητας παρουσιάζονται ελαφρώς μεγαλύτεροι από εκείνους για ηλικία 60 ημερών. Η ένδειξη αυτή είναι προς τη σωστή κατεύθυνση, γιατί σε ηλικία μίας ημέρας τυχόν διαφορές στη θερμοκρασία του μίγματος κατά την παρασκευή του, και επομένως από τη θερμοκρασία των συστατικών του μίγματος (αδρανή, νερό, τσιμέντο) η οποία δεν ήταν δυνατόν να διατηρηθεί σταθερή σε όλο το

διάστημα της παρασκευής των διαφόρων μιγμάτων και της συντήρησης (μεταξύ δοκιμών) θα πρέπει να επηρεάζουν τις μετρήσεις περισσότερο από ότι στην περίπτωση των 60 ημερών. Η θερμοκρασία του θαλάμου συντήρησης διατηρείτο περίπου σταθερή, αλλά η θερμοκρασία του μίγματος παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα μιας ημέρας. Επομένως ορισμένες διαφορές από τα αναμενόμενα αποτελέσματα θα μπορούσαν να αποδοθούν σε σημαντικό ποσοστό στον λόγο αυτό.

Για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας, και για όσες δοκιμές αναφέρουν τα Πρότυπα τέτοια στοιχεία, έγινε χρήση του Προτύπου [ASTM C670].

Τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη (κύβων, ισοδύναμων κύβων και πρισματικών δοκιμών) εξετάζονται ως προς την επαναληψιμότητά τους, με βάση το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.03 [2001]. Προφανώς ο έλεγχος επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων με το Πρότυπο είναι δυσμενέστερος, μια που το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 12390.03 αφορά αντοχή σε θλίψη δοκιμών σκυροδέματος. (Το Πρότυπο ΕΛΟΤ - EN 13286.41 που αναφέρεται σε κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά δεν αναφέρει στοιχεία επαναληψιμότητας). Το σκυρόδεμα είναι υλικό πιο ομοιόμορφο, άρα με μικρότερη μεταβλητότητα, από τα εξεταζόμενα στην παρούσα έρευνα υλικά. Η μεγαλύτερη ανομοιομορφία του κατεργασμένου με τσιμέντο φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος έναντι του σκυροδέματος αποδίδεται κυρίως στην ανομοιομορφία του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος (Παράγραφος 1.2) και στην πολύ μικρή ποσότητα του συνδετικού υλικού (τσιμέντο) στο μίγμα. Η μικρή συνεκτικότητα/εργασιμότητα των κατεργασμένων ή ανακυκλωμένων μιγμάτων ευνοεί σημαντικά τον διαχωρισμό του σε σύγκριση με το σκυρόδεμα συμβατικού τύπου.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι το Πρότυπο αναφέρεται σε ηλικία 28 ημερών, άρα προφανώς ο έλεγχος για την ηλικία της μίας ημέρας είναι σαφώς δυσμενέστερος δεδομένου ότι στις μικρές ηλικίες η επίδραση των αναπόφευκτων διαφορών στη συντήρηση (θερμοκρασία, υγρασία) κάθε δοκιμίου είναι αναλογικά πολύ μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά παρατηρείται ότι για την ηλικία της μίας ημέρας και για ποσοστό τσιμέντου 3 %, 3 από τα 6 μίγματα πληρούν τις απαιτήσεις επαναληψιμότητας, ενώ για ποσοστό τσιμέντου 5 % η απαίτηση πληροίται από 3 στα 5 μίγματα. Για την ηλικία των 60 ημερών μόνο 1 στα 5 μίγματα δεν πληροί τις απαιτήσεις επαναληψιμότητας του Προτύπου, τόσο για ποσοστό τσιμέντου 3 % όσο και για ποσοστό τσιμέντου 5 %.

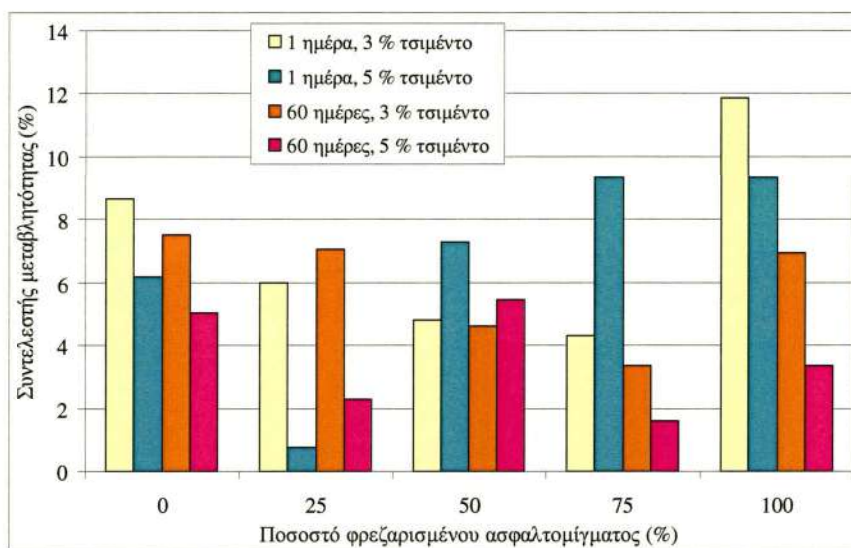


Σχήμα 5.1 : Συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε θλίψη κύβου

Οι συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων δίνονται στο Σχήμα 5.2 και κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τους αντίστοιχους των κύβων (μεταξύ 0.3 % και 12.7 %), γεγονός το οποίο συνηγείται στην ομοιομορφία παρασκευής κυβικών και πρισματικών δοκιμίων, δεδομένου ότι οι δοκιμές ισοδύναμου κύβου προέρχονται από τμήματα επιμηκύτερων δοκιμίων μετά τη δοκιμή τους σε εφελκυσμό ή κάμψη. Οι συντελεστές μεταβλητότητας είναι μικρότεροι στην ηλικία των 60 ημερών από εκείνους στην ηλικία της μίας ημέρας, όπως παρατηρήθηκε και για την αντοχή σε θλίψη κύβου.

Αντιθέτως, η επαναληψιμότητα των ισοδύναμων κύβων είναι χειρότερη από αυτή των κύβων για την ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 5 %, όπου μόνο 3 στα 10 μίγματα πληρούν την απαίτηση επαναληψιμότητας του Προτύπου ΕΛΟΤ - EN 12390.03 [2001] και για την ηλικία των 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 % όπου μόνο 4 στα 13 μίγματα πληρούν την απαίτηση επαναληψιμότητας. Για ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 3 % το κριτήριο της επαναληψιμότητας ικανοποιείται στα 7 από τα 11 μίγματα και για ηλικία εξήντα ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 % πληροίται στα 6 από τα 8 μίγματα.

Αυτή η διαφορά μεταξύ αποτελεσμάτων κυβικών δοκιμίων και αποτελεσμάτων ισοδύναμου κύβου θα μπορούσε να αποδοθεί εν μέρει στο γεγονός ότι μεταξύ της θραύσης των πρισμάτων σε εφελκυσμό ή κάμψη και της θραύσης των ισοδύναμων κύβων μεσολαβούσε χρονικό διάστημα το οποίο δεν ήταν σταθερό για όλα τα δοκίμια, γιατί εξαρτάτο από τον χρόνο που ολοκληρώνονταν οι δοκιμές σε εφελκυσμό ή κάμψη. Κατά το διάστημα που παρέμεναν τα τμήματα των δοκιμίων στο εργαστήριο, εν αναμονή της εκτέλεσης της δοκιμής ισοδύναμου κύβου, τα δοκίμια ήταν σκεπασμένα με πλαστικά φύλλα, αλλά η προστασία αυτή ήταν ανομοιόμορφη και σε συνδυασμό με τον μεταβλητό χρόνο αναμονής είναι δυνατόν να συντέλεσε στη χειροτέρευση της επαναληψιμότητας.

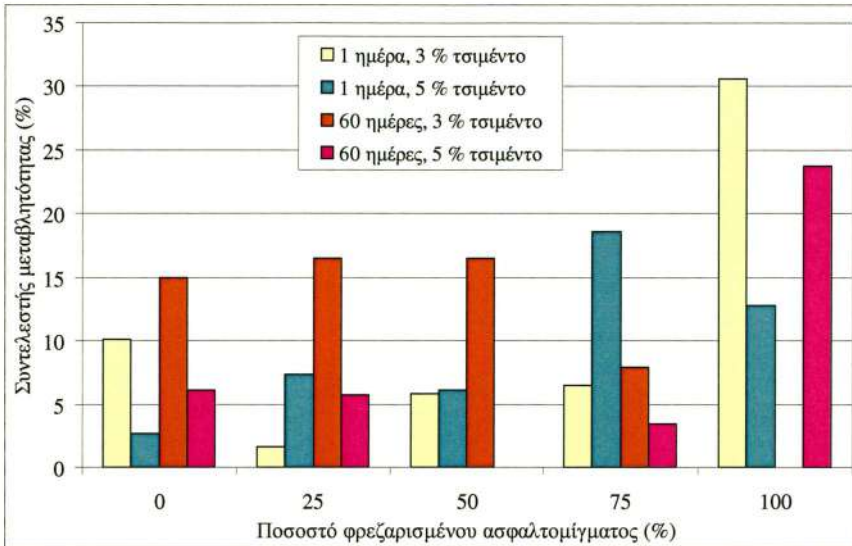


Σχήμα 5.2 : Συντελεστές μεταβλητότητας για τη θλιπτική αντοχή ισοδύναμου κύβου

Σχολιάζοντας γενικά τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη μπορούμε να πούμε ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας της παρούσας έρευνας είναι εντός του εύρους των τιμών που παρουσιάστηκαν σε έρευνα που αφορούσε κατεργασία/σταθεροποίηση αμμοχάλικων ή εδαφικών υλικών με τσιμέντο [Kolias 1975] και μικρότεροι από αυτούς που παρουσιάστηκαν σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε με ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα σταθεροποιημένο με διάφορα υλικά [White and Gnanedran 2003b]. Η

επαναληψιμότητα της δοκιμής σε θλίψη δεν φαίνεται να παρουσιάζει εξάρτηση τόσο από την ηλικία της δοκιμής όσο και από το ποσοστό του τσιμέντου.

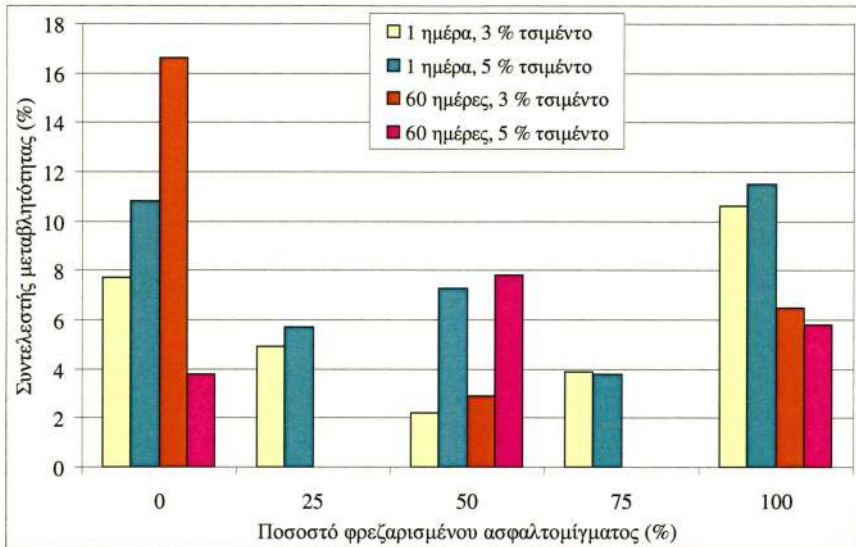
Για την εφελκυστική αντοχή, δεν υπάρχουν δεδομένα ελέγχου της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων, μια που η δοκιμή αυτή δεν έχει καν προτυποποιηθεί, όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 2.2.1. Στο Σχήμα 5.3 δίνονται οι συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Παρατηρείται ότι με εξαίρεση το υλικό V που παρουσιάζει υψηλούς συντελεστές μεταβλητότητας (30.6 % για ηλικία μίας ημέρας και ποσοστό τσιμέντου 3 % και 23.7 % για ηλικία εξήντα ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %), για τα υπόλοιπα μίγματα οι συντελεστές μεταβλητότητας κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα με αυτούς της αντοχής σε θλίψη (0% έως 19 %), γεγονός που συνηγορεί στο συμπέρασμα ότι η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε δεν παρουσιάζει αυξημένες πηγές μεταβλητότητας. Η μεγάλη μεταβλητότητα του υλικού V για την ηλικία της μίας ημέρας και για ποσοστό τσιμέντου 3% θα μπορούσε να αποδοθεί αφενός μεν στην πολύ μικρή αντοχή (της τάξης του 0.04 MPa) και αφετέρου στη διαφορετική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή αυτή σε σχέση τις υπόλοιπες δοκιμές (βλ. Παρ. 3.5.2.3.α). Για την ηλικία των 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5% ο μεγάλος συντελεστής μεταβλητότητας οφείλεται σε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο με μεγάλη απόκλιση από τα υπόλοιπα. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας σε μονοαξονικό εφελκυσμό είναι εντός του εύρους των τιμών προγενέστερης έρευνας για κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά [Kolias 1975].



Σχήμα 5.3 : Συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε εφελκυσμό

Στα ίδια επίπεδα με τους συντελεστές μεταβλητότητας σε θλίψη κυμαίνονται και οι συντελεστές μεταβλητότητας σε κάμψη (από 2.2 % έως 11.5 %) που δίνονται στο Σχήμα 5.4, με εξαίρεση την ηλικία των εξήντα ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 % (16.6 %). Η επαναληψιμότητα των αντοχών σε κάμψη ελέγχεται σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C78-02 [1994] για σκυρόδεμα αφού στα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά Πρότυπα δεν υπάρχουν δεδομένα ελέγχου της επαναληψιμότητας των δοκιμών. Για την ηλικία της μίας ημέρας μόνο ένα στα πέντε μίγματα και δύο στα πέντε μίγματα δεν πληρούν το κριτήριο του Προτύπου για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα, ενώ για την ηλικία των 60 ημερών το κριτήριο δεν ικανοποιείται μόνο από ένα μίγμα για ποσοστό τσιμέντου 3 %.

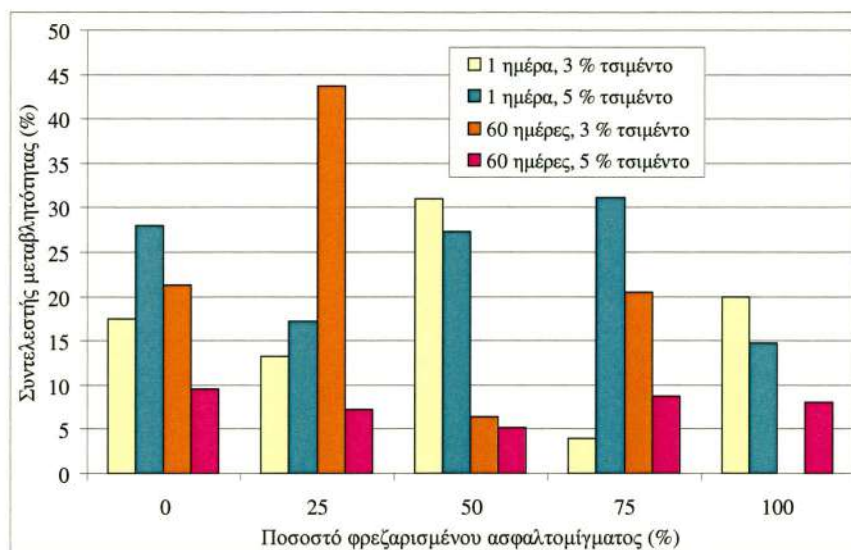
Οι συντελεστές μεταβλητότητας της παρούσας έρευνας κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με αυτούς που αναφέρονται σε έρευνες για σκυρόδεμα [Greer 1983, Roesler and Barenberg 1999].



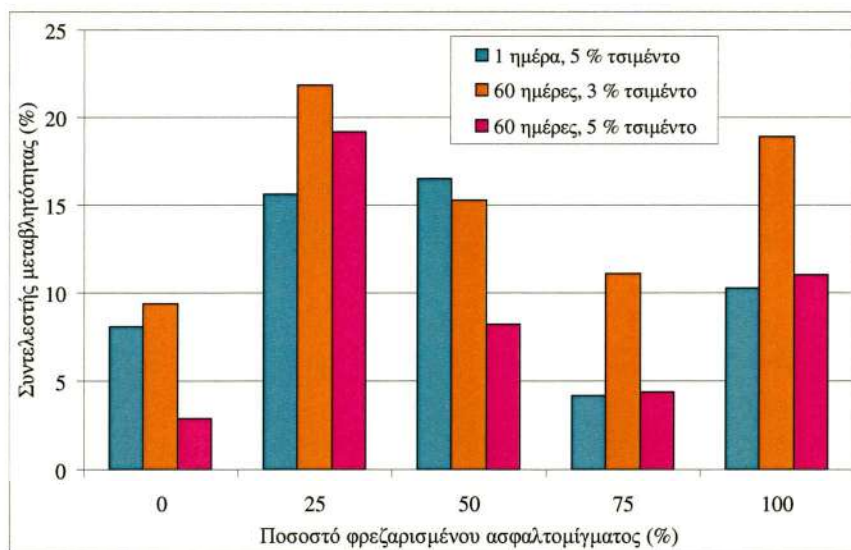
Σχήμα 5.4 : Συντελεστές μεταβλητότητας για την αντοχή σε κάμψη

Οι συντελεστές μεταβλητότητας στις δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.5 έως 5.9.

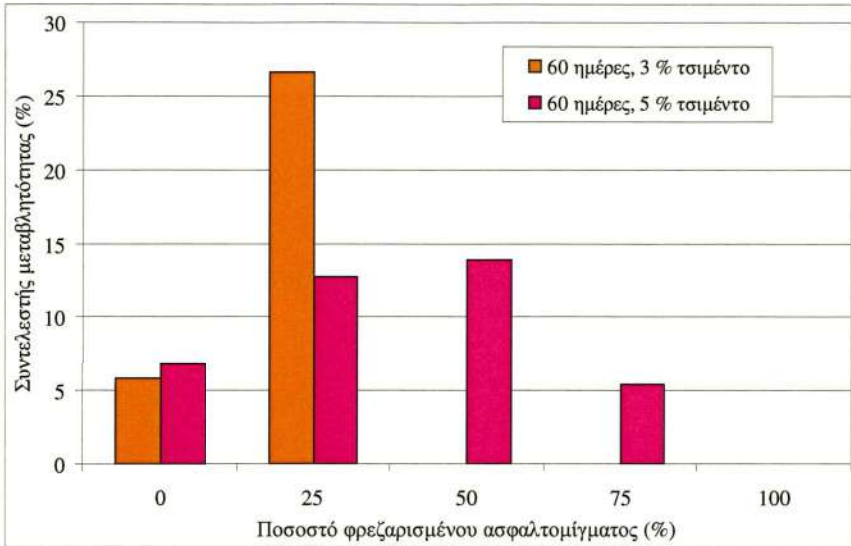
- ο σε εφελκυσμό και σε θλίψη όπως προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τα ίδια δοκίμια (100*100*500) δοκαριών (Σχήματα 5.5 και 5.6 αντίστοιχα)
- ο σε θλίψη πρισμάτων (Σχήμα 5.7)
- ο σε κάμψη (Σχήμα 5.8).



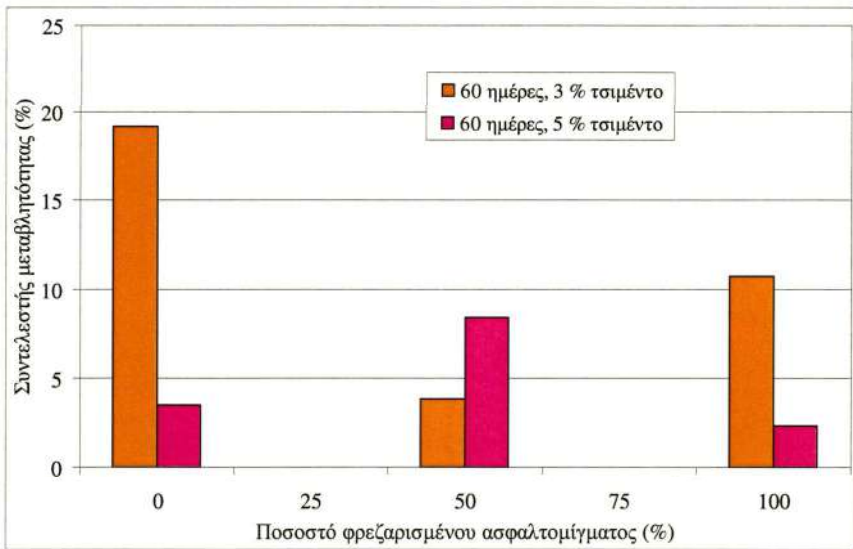
Σχήμα 5.5 : Συντελεστές μεταβλητότητας για το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό



Σχήμα 5.6 : Συντελεστές μεταβλητότητας για το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη δοκαριών



Σχήμα 5.7 : Συντελεστές μεταβλητότητας για το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη πρισμάτων



Σχήμα 5.8 : Συντελεστές μεταβλητότητας για το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι και για τις δοκιμές που αναφέρονται στους Πίνακες 4.9 έως 4.16 (που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ), οι συντελεστές μεταβλητότητας κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές μεταβλητότητας για τη θλιπτική αντοχή κυμαίνονται γενικά από 1 % έως 18 % περίπου, τόσο για ποσοστό τσιμέντου 3 % , όσο και για 5 %. Εξαίρεση αποτελεί η δοκιμή σε θερμοκρασία 5 °C για το υλικό ΙΙΙ (50/50) που παρουσιάζει συντελεστή μεταβλητότητας 25 %. Ομοίως, για την αντοχή σε διάρρηξη οι συντελεστές μεταβλητότητας κυμαίνονται από 1. % έως 26.4 % ή 20 %, για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας για την ίδια ηλικία και το ίδιο ποσοστό τσιμέντου δεν μεταβάλλονται σημαντικά σε σχέση με τη θερμοκρασία κατά τη δοκιμή.

Ομοίως, οι συντελεστές μεταβλητότητας για τις δοκιμές που αναφέρονται στους Πίνακες 4.17 - 4.20, κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τους υπόλοιπους. Συγκεκριμένα, για την αντοχή σε κάμψη κυμαίνονται μεταξύ 1.4 % και 7.5 %, για την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου από 1.9 % έως 9.4 %, για την αντοχή σε θλίψη πρίσματος από 0 % έως 13.9 %, και για το μέτρο ελαστικότητας από 3.1 % έως 16.3 % (θλίψη) και από 1.6 % έως 12.6 % (κάμψη).

5.1.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία επαναληψιμότητας και συντελεστή μεταβλητότητας για τα υπό εξέταση υλικά και επίσης ότι η διατριβή αυτή δεν σχεδιάστηκε για να διερευνήσει το θέμα αυτό, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν ασφαλή και λεπτομερή συμπεράσματα. Καίτοι ο σκοπός του προηγούμενου σχολιασμού ήταν να αποκτηθεί γενική εικόνα της ομοιομορφίας και της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων ο σχετικά μεγάλος συνολικός αριθμός δοκιμών παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής ορισμένων συμπερασμάτων :

- ο Τα κατεργασμένα με τσιμέντο μίγματα φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και αμμοχάλικου παρουσιάζουν σημαντική ανομοιομορφία, όχι όμως σημαντικά διαφορετική από εκείνη των κατεργασμένων με τσιμέντο αμμοχάλικων (ΚΘΑ), ούτε πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των σκυροδεμάτων. Ο σχολιασμός

των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα την ανομοιομορφία αυτή. Η κυριότερη πηγή ανομοιομορφίας αποδίδεται στη μικρή ποσότητα τσιμέντου που χρησιμοποιείται (3 % - 5 % κ.μ 70 - 120 kg/m³) και στην επιρρέπεια σε απόμιξη των μιγμάτων λόγω της σύνθεσής τους.

- ο Η ανομοιομορφία, η οποία αναμένεται να παρουσιάσουν τα μίγματα αυτά επιτόπου - και όχι στο εργαστήριο - θα είναι σημαντικά μεγαλύτερη, επιβάλλοντας στατιστική αντιμετώπιση των θεμάτων της μελέτης σύνθεσης, των ελέγχων συμμόρφωσης και του υπολογισμού του απαιτούμενου πάχους. Είναι σκόπιμο κατά την εκτέλεση διαφόρων έργων με ανακύκλωση αυτού του είδους να συλλέγονται στοιχεία ανομοιομορφίας για να χρησιμοποιηθούν στα επόμενα έργα μετά από κατάλληλη επεξεργασία.

5.2 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στις επόμενες παραγράφους σχολιάζονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων των δοκιμών των Πινάκων 4.1 έως 4.4.

5.2.1 ΗΛΙΚΙΑ ΜΙΑΣ ΗΜΕΡΑΣ

Τα αποτελέσματα σχολιάζονται καταρχήν ως προς την επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού στο μίγμα στην :

- ο Αντοχή σε θλίψη κύβου, Σχήμα 5.9
- ο Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου, Σχήμα 5.10
- ο Αντοχή σε θλίψη - πρίσματα (Μονοαξονική αντοχή σε θλίψη), Σχήμα 5.11
- ο Αντοχή σε εφελκυσμό, Σχήμα 5.12
- ο Αντοχή σε κάμψη, Σχήμα 5.13

Και στο :

- ο Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, Σχήμα 5.14
- ο Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, Σχήμα 5.15
- ο Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, Σχήμα 5.16

Γενικά παρατηρείται μείωση τόσο της αντοχής όσο και του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα. Το θέμα αυτό θα σχολιαστεί σε πολλές περιπτώσεις στο κείμενο της διατριβής αυτής, με αναλυτικότερη αναφορά στο κεφάλαιο του γενικού σχολιασμού των αποτελεσμάτων, Παράγραφος 7.

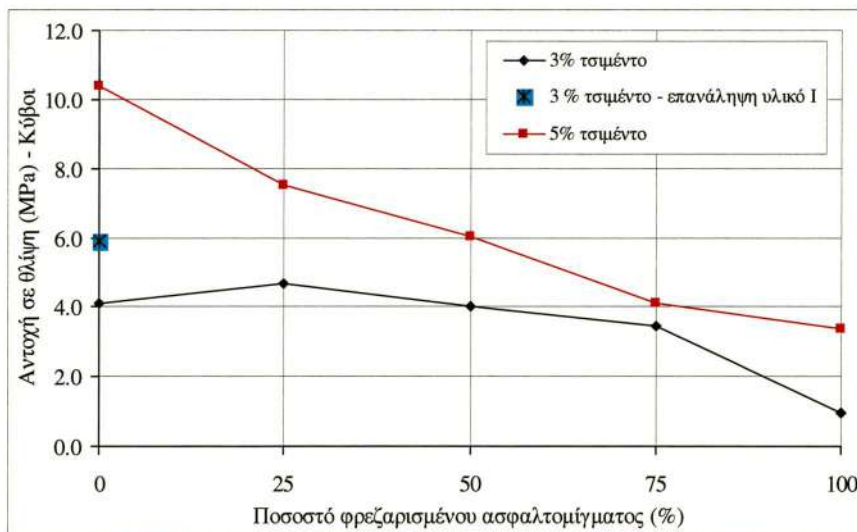
Γενικά, οι τιμές της αντοχής σε θλίψη σε 1 ημέρα και με ποσοστό τσιμέντου 3 % είναι αρκετά υψηλές : περίπου 5, 4, 3 και 1 MPa για ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος 25 %, 50 %, 75 % και 100 % αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές είναι κοντά ή μέσα στα όρια των απαιτήσεων των προδιαγραφών για σταθεροποιημένα/κατεργασμένα υλικά [Milton and Earland 1999, MOPU 2001, APRG 1996] για ηλικία 7 ημερών και ότι το ποσοστό 3 % είναι το μικρότερο ποσοστό σταθεροποιητή που επιτρέπεται στην πράξη να χρησιμοποιείται για λόγους

ομοιομορφίας της ανάμιξης επιτόπου. Το γεγονός αυτό θα σχολιαστεί περαιτέρω στην Παράγραφο 5.2.3.

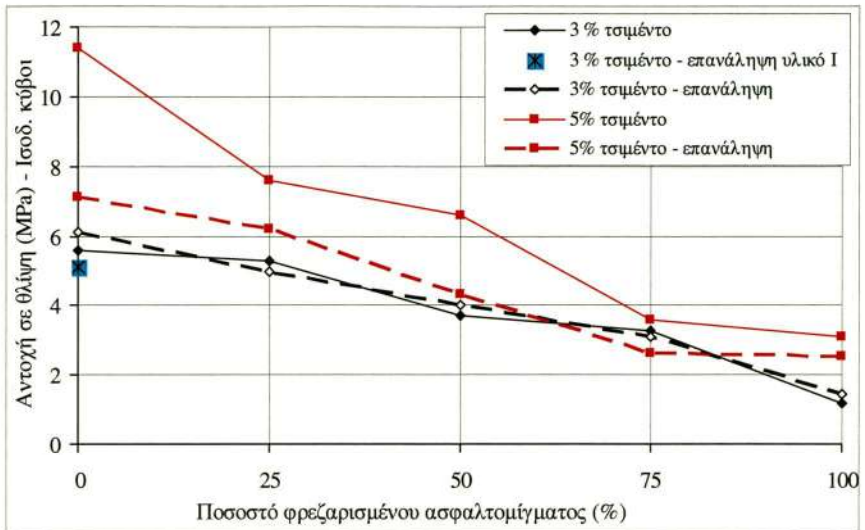
Παρατηρείται επίσης ότι η διαφορά αντοχών κύβου και ισοδύναμου κύβου (εκτός μίας περίπτωσης για το υλικό 100/0) είναι πολύ μικρή (πχ. για ποσοστό τσιμέντου 3 % η ποσοστιαία διαφορά σε σχέση με την αντοχή κύβου είναι 13.7 % για το υλικό II (75/25), 7.7 % για το υλικό III (50/50) και 25.3 % για το υλικό V (0/100) ενώ για ποσοστό τσιμέντου 5 % οι διαφορές είναι 9.8 % για το υλικό III και 12.2 % για το υλικό IV).

Στα Σχήματα 5.17, 5.18 και 5.19, 5.20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της μεταβολής της αντοχής σε θλίψη (κύβου ή ισοδύναμου κύβου) και του μέτρου ελαστικότητας, όπως αυτό προσδιορίστηκε με τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν, για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 %.

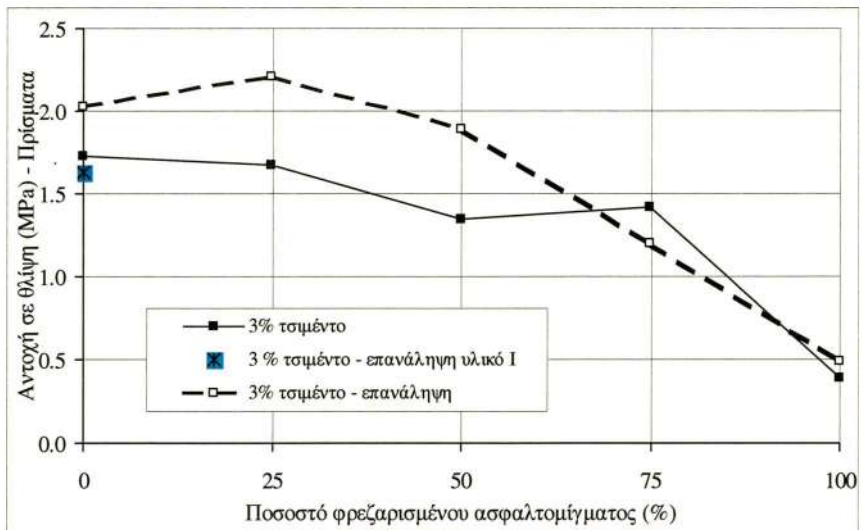
Παρέχεται επίσης η δυνατότητα να αποκτηθεί μία εικόνα του μεγέθους της μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητας, με τα αποτελέσματα των επαναληπτικών δοκιμών. Στο Σχήμα 5.18 π.χ, φαίνεται ότι η μεταβλητότητα μεταξύ αναμιγμάτων μπορεί να υπερβαίνει τη διαφορά μεταξύ αντοχής κύβου και ισοδύναμου κύβου.



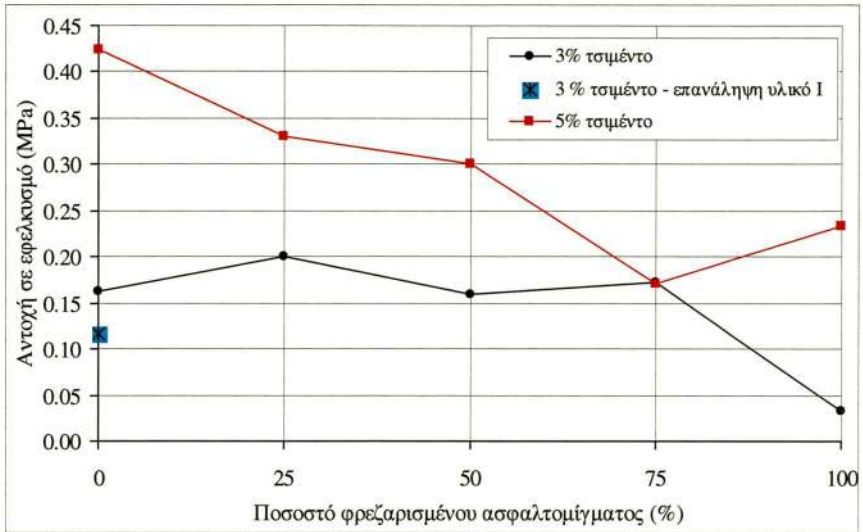
Σχήμα 5.9 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κύβων ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



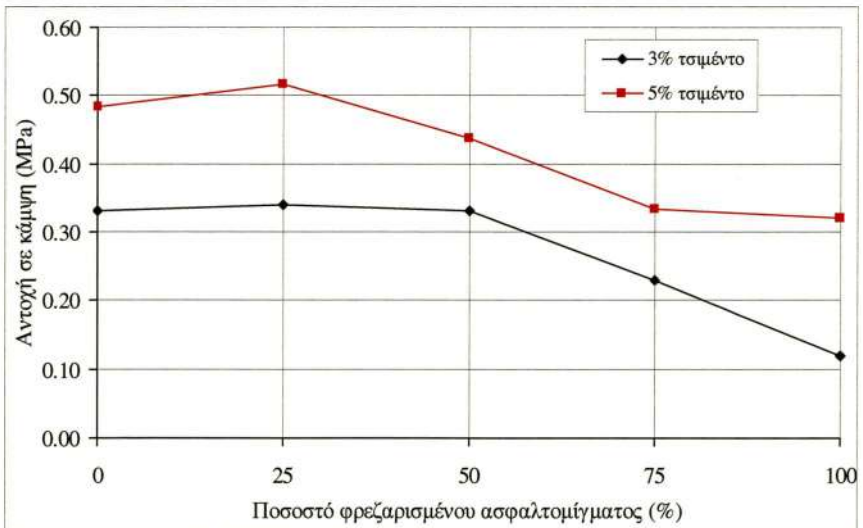
Σχήμα 5.10 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



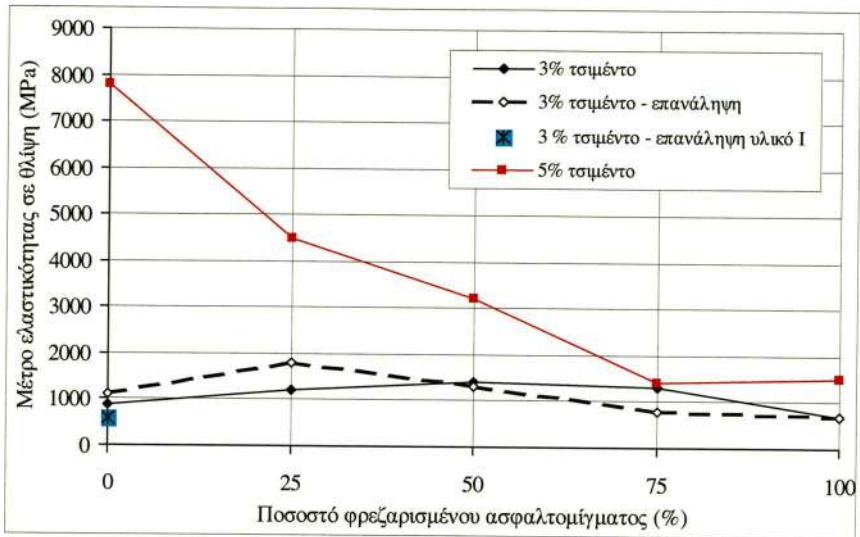
Σχήμα 5.11 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη πρισμάτων τσιμέντου 3 % και ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



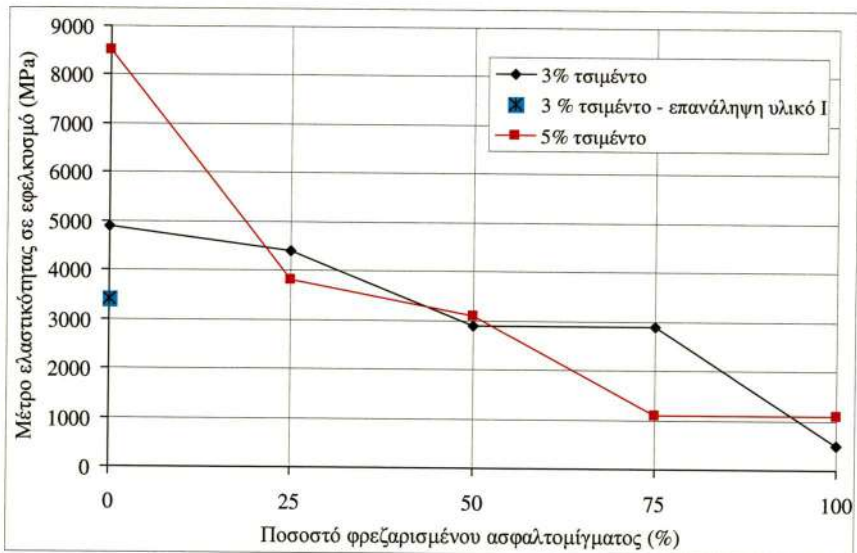
Σχήμα 5.12 : Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



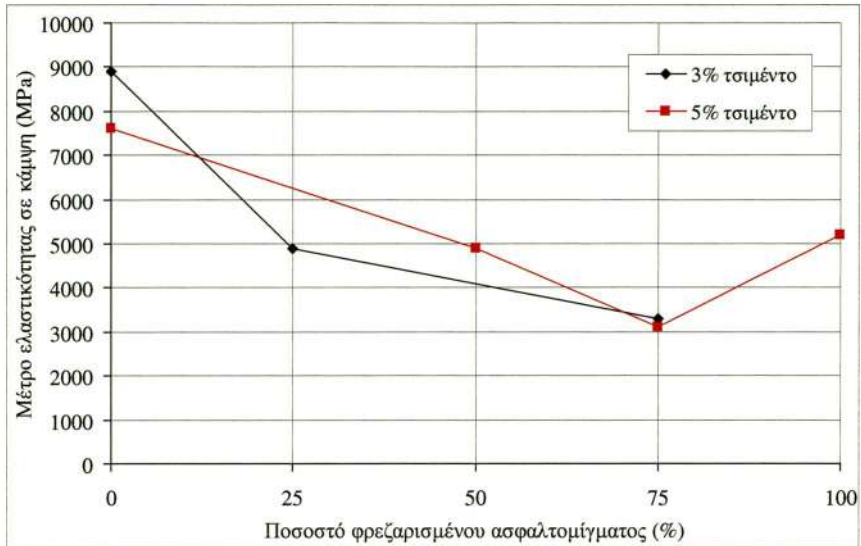
Σχήμα 5.13 : Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.14 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

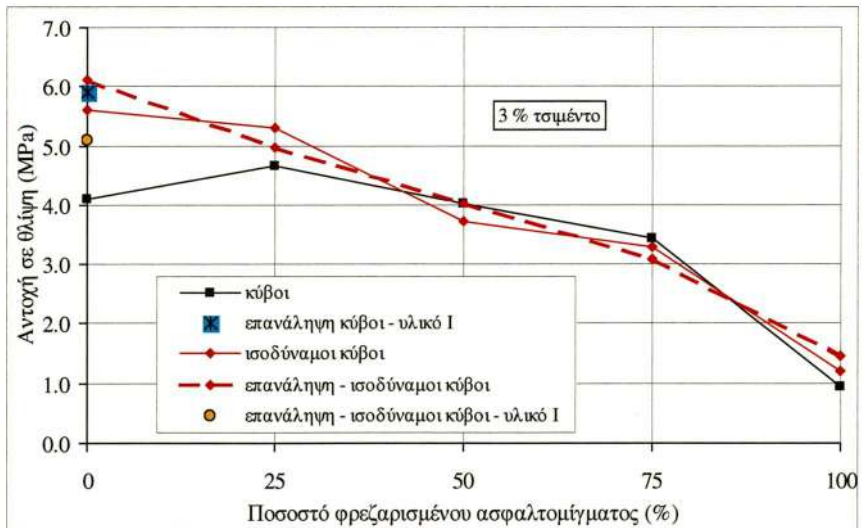


Σχήμα 5.15 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε εφελκυσμό ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

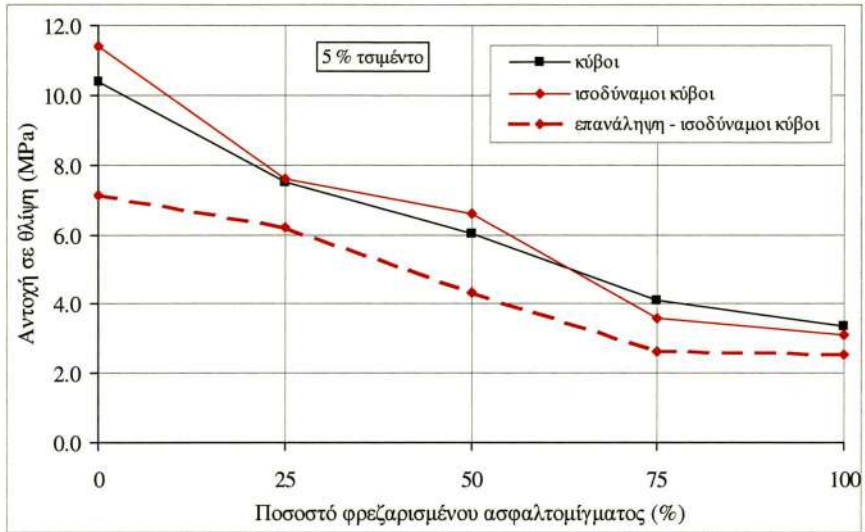


Σχήμα 5.16 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

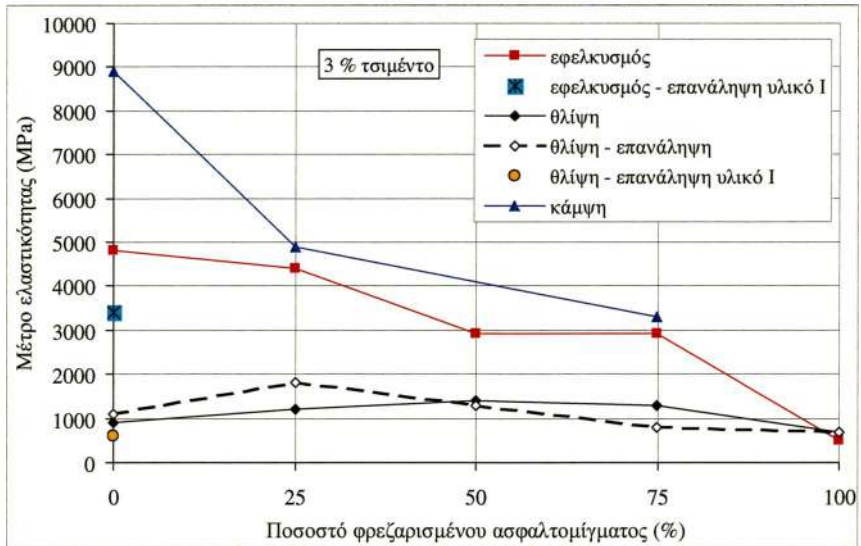
* Το διάγραμμα στηρίζεται σε μία τιμή ανά ποσοστό Φ.Α, όχι σε Μ.Ο.



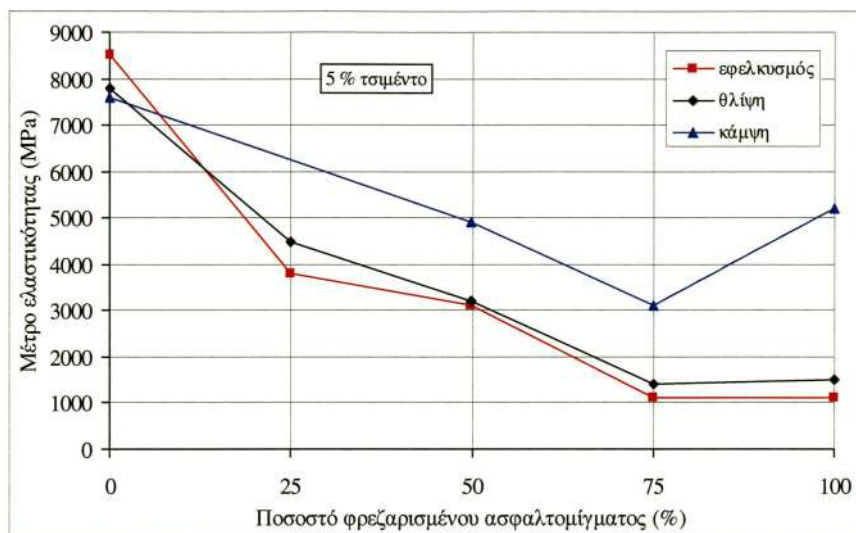
Σχήμα 5.17 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)



Σχήμα 5.18 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 5 %)



Σχήμα 5.19 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)



Σχήμα 5.20 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ηλικίας 1 ημέρας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 5 %)

Από τη σύγκριση των τιμών των αντοχών σε θλίψη κύβου ή ισοδύναμου κύβου στα Σχήματα 5.9 και 5.10 με τη μονοαξονική θλιπτική αντοχή (πρίσματα) Σχήμα 5.11 προκύπτει ότι η αντοχή πρίσματος είναι σημαντικά μικρότερη από την αντοχή κύβου ή ισοδύναμου κύβου, σε βαθμό που καταρχήν δεν φαίνεται ότι μπορεί να δικαιολογηθεί από την ύπαρξη τριαξονικού πεδίου τάσεων στα κυβικά δοκίμια και γι' αυτό κρίνεται σκόπιμο να διερευνηθεί περισσότερο. Για τον λόγο αυτό, οι δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη επαναλήφθηκαν σε νέα πρισματικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν για τον σκοπό αυτό. Τα επαναληπτικά αποτελέσματα τόσο της αντοχής σε θλίψη, όσο και του αντίστοιχου μέτρου ελαστικότητας δεν διαφέρουν από τις αρχικές δοκιμές στα Σχήματα 5.11 και 5.14 αντίστοιχα.

Ο λόγος της αντοχής πρίσματος προς την κυβική αντοχή είναι, για ποσοστό τσιμέντου 3 %, περίπου 0.4, γεγονός που δημιουργεί ορισμένες επιφυλάξεις ως προς την ακρίβεια των δοκιμών των πρισμάτων. Είναι γνωστό ότι ο λόγος αυτός μειώνεται με τη μείωση της αντοχής. Έτσι, ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ), [ΥΠΕΧΩΔΕ 1997] δέχεται ότι ο λόγος μειώνεται από 0.87 για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 45 MPa σε 0.76 για αντοχή 12 MPa και προγενέστερη έρευνα

[Kolias 1975] για κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά αναφέρει συντελεστή 0.63 για κυβική αντοχή 6 MPa. Ο λόγος 0.4 της έρευνας αυτής είναι πράγματι πολύ μικρότερος από την παραπάνω τιμή, και οι επιφυλάξεις φαίνεται ότι είναι επομένως εύλογες.

Πράγματι, διαπιστώθηκε ότι η άσκηση του φορτίου στο δοκίμιο από τη μηχανή δεν ήταν κεντρική. Η μηχανή δεν διαθέτει σφαιρική άρθρωση και έτσι γινόταν απίσωση (καπέλωμα) του δοκιμίου με τοποθέτηση σιδηρόστοκου στις δύο επιφάνειες στήριξης του δοκιμίου στη μηχανή και ελαφριά προφόρτιση του δοκιμίου μέχρι την πήξη του σιδηρόστοκου. Όμως, παρατηρήθηκε ότι κατά την προφόρτιση και μέχρι την πήξη του σιδηρόστοκου και την εκτέλεση της δοκιμής, το δοκίμιο μετακινείτο οριζόντια, με αποτέλεσμα η επιβολή του φορτίου να μην είναι κεντρική. Η μικρότερη του αναμενόμενου μονοαξονική αντοχή θα μπορούσε επομένως να αποδοθεί στην ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων κατά τη δοκιμή. Αυτό επιβεβαιώθηκε με την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυσιόμετρων σε δύο αντιδιαμετρικές επιφάνειες του δοκιμίου από την οποία διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός μεταβολής των παραμορφώσεων δεν είναι ο ίδιος και στις δύο πλευρές του δοκιμίου.

Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψη πρισματικών δοκιμίων όσο και του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη για την ηλικία της μίας ημέρας και για ποσοστό τσιμέντου 3 % δεν θεωρούνται επαρκώς αξιόπιστα ώστε να γίνει περαιτέρω αξιολόγηση των διαφορετικών τιμών όταν συγκρίνονται τα αποτελέσματα στο σύνολό τους και δεν λαμβάνονται υπόψη, (Παράγραφος 7). Για τον ίδιο λόγο, στο Σχήμα 5.17 δεν περιλαμβάνονται οι αντοχές των πρισματικών δοκιμίων.

Έτσι τελικά αποφασίστηκε να μην διερευνηθεί περαιτέρω το θέμα, δεδομένου ότι το φαινόμενο αυτό ήταν μεμονωμένο για το ποσοστό τσιμέντου 3 % και αφορούσε μόνο τις μονοαξονικές δοκιμές σε θλίψη (πρισματικών δοκιμίων). Για την ηλικία των 60 ημερών αποφασίστηκε η δοκιμή σε θλίψη πρισμάτων να γίνει μέχρι το 1/3 του φορτίου θραύσης, για τον υπολογισμό μόνον του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη με πρίσματα και όχι για την εύρεση της μονοαξονικής αντοχής. Για την τοποθέτηση του δοκιμίου στη μηχανή ακολουθήθηκε άλλη μέθοδος (απίσωση του δοκιμίου μόνον από τη μία πλευρά και προσαρμογή μεταλλικής σφαίρας μεταξύ του δοκιμίου και της μηχανής). Η διάταξη αυτή δοκιμάστηκε με την τοποθέτηση μηκυσιόμετρων σε δύο αντιδιαμετρικές επιφάνειες του δοκιμίου και βρέθηκε ότι οι παραμορφώσεις είναι της

ίδιας τάξης. Δεν μετρήθηκε η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις το φορτίο θραύσης υπερέβαινε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο της μηχανής MTS.

Ως προς την επίδραση του ποσοστού του τσιμέντου, παρατηρείται ότι η αντοχή σε θλίψη και σε εφελκυσμό παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου, όπως είναι αναμενόμενο. Αντίθετα, το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και σε κάμψη δεν παρουσιάζει αισθητή μεταβολή και σε ορισμένες περιπτώσεις το μέτρο ελαστικότητας για 3 % τσιμέντο είναι μεγαλύτερο εκείνου για 5 %. Επιπλέον, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 0.03 kN/s για τσιμέντο 3 %, σε σύγκριση με την ταχύτητα 0.2 kN/s για τσιμέντο 5 %, γεγονός που θα έπρεπε κανονικά να αυξήσει τη διαφορά των μέτρων ελαστικότητας υπέρ του τσιμέντου 5 %, πράγμα που δεν επαληθεύεται από τα αποτελέσματα. Αυτό αποδίδεται σε ανακριβή καταγραφή των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής και για τον λόγο αυτό οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για 3 % τσιμέντο δίνονται με σοβαρές επιφυλάξεις ως προς την ακρίβειά τους.

Από το Σχήμα 5.12 παρατηρείται ότι για το ποσοστό τσιμέντου 3 %, η εφελκυστική αντοχή του μίγματος I (100/0) είναι μικρότερη από την αντοχή του μίγματος II (75/25), γεγονός που κατ' αρχήν θεωρήθηκε ως μη αναμενόμενο, δεδομένου ότι σε προηγούμενες έρευνες [Kolias 1996a - 1996b, Κόλιας και Κατσάκου 1996] που αφορούσαν περιορισμένες σε αριθμό δοκιμές αντοχής σε θλίψη, σε διάρρηξη και σε κάμψη καθώς και μετρήσεις του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (συντονισμός) η αντοχή (σε θλίψη, κάμψη και διάρρηξη) για καθαρό αμμοχάλικο (μίγμα I) κατεργασμένο με 5 % τσιμέντο ήταν μεγαλύτερη εκείνης του μίγματος II (75/25). Επειδή και τα αποτελέσματα των εξήντα ημερών παρουσιάζουν το ίδιο φαινόμενο για το ποσοστό τσιμέντου 3 % (Παράγραφος 5.2.2), επαναλήφθηκαν όλες οι δοκιμές για το μίγμα I. Από την επανάληψη, παρατηρείται ότι ενώ η αντοχή σε θλίψη των κυβικών δοκιμών αυξήθηκε σε σχέση με τις αρχικές δοκιμές (Σχήμα 5.9), δεν συμβαίνει το ίδιο με την αντοχή σε εφελκυσμό (Σχήμα 5.12) και με τη θλιπτική αντοχή των ισοδυνάμων κύβων (Σχήμα 5.10), (η διαφορά αυτή όμως δεν είναι σημαντική). Από τον Πίνακα 4.5 (μεμονωμένες τιμές, 1 ημέρα, 3 %) παρατηρείται επίσης ότι για τα επαναληπτικά αποτελέσματα οι συντελεστές μεταβλητότητας τόσο για τα αποτελέσματα των

ισοδύναμων κύβων όσο και για τον εφελκυσμό είναι σημαντικά μικρότεροι απ' ότι για τις αρχικές δοκιμές.

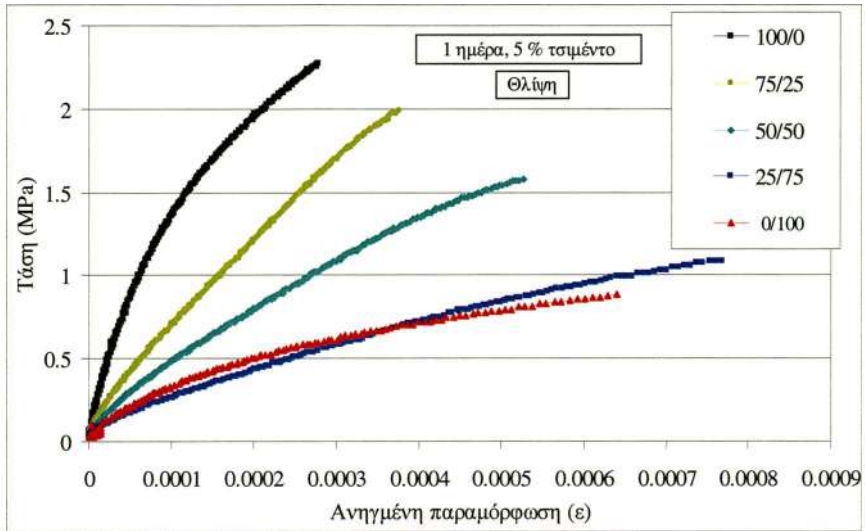
Έτσι τελικά αποδόθηκε αυτή η, μικρή έστω, πτώση της αντοχής του μίγματος I σε σχέση με το μίγμα II, σε ιδιομορφία του συγκεκριμένου υλικού. Υπέρ της άποψης αυτής συνηγορεί και το γεγονός ότι τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη (Σχήμα 5.13) παρουσιάζουν την ίδια ιδιομορφία και για τα δύο ποσοστά τσιμέντου. Πλήρης επιβεβαίωση του συμπεράσματος αυτού γίνεται αν ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα των αντοχών σε διάρρηξη (Σχήματα 5.42 και 5.43), τα οποία προέκυψαν από το εργαστήριο EKET, με διαφορετική δοκιμή (έμμεσου εφελκυσμού) αλλά με τα ίδια υλικά.

Η ιδιομορφία αυτή διερευνήθηκε περαιτέρω και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται εκτενέστερα στην Παράγραφο 5.2.4.

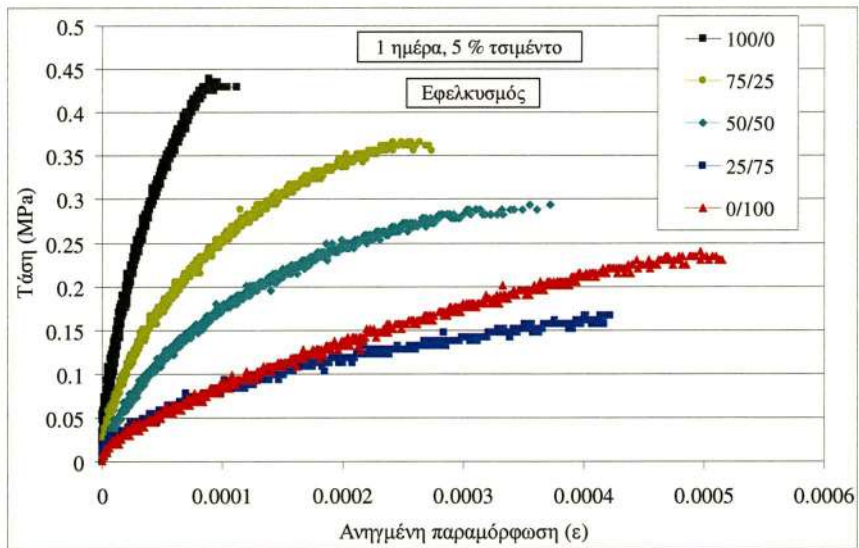
Από το Σχήμα 5.20 παρατηρείται ότι τα μέτρα ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό διαφέρουν ελάχιστα.

Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη έχει την ίδια τιμή με εκείνα σε θλίψη και εφελκυσμό για το υλικό I (100/0), αλλά είναι σημαντικά μεγαλύτερο για μεγαλύτερα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος. Πρέπει όμως να τονισθεί πάλι, ότι οι μετρήσεις αυτές ήταν προκαταρκτικές, έγιναν σε ένα μόνο δοκίμιο από κάθε μίγμα, και επομένως θα απαιτηθούν περισσότερες δοκιμές για να ποσοτικοποιηθεί η διαφορά. Σχολιασμός ως προς την τιμή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό γίνεται στην Παράγραφο 7.

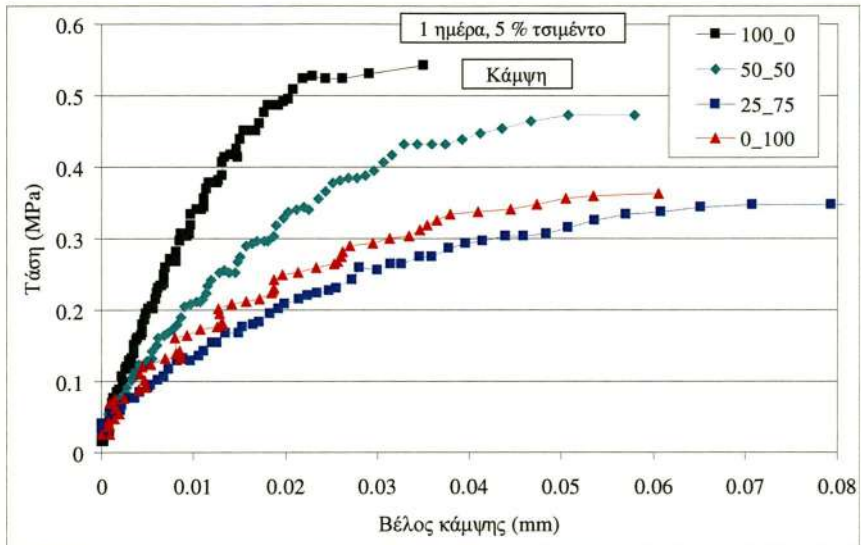
Στα Σχήματα 5.21 και 5.22 παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) για τα 5 υλικά (100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100) που εξετάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό για ποσοστό τσιμέντου 5% (μέχρι 1/3 του φορτίου θραύσης για τη θλίψη, μέχρι θραύσης για τον εφελκυσμό). Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται τυπικό διάγραμμα τάσεων - βέλους κάμψης μέχρι τη θραύση του δοκιμίου σε κάμψη.



Σχήμα 5.21 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για τη δοκιμή σε θλίψη ηλικίας μίας ημέρας για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)
* Φόρτιση μέχρι 1/3 του φορτίου θραύσης



Σχήμα 5.22 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για τη δοκιμή σε εφελκυσμό ηλικίας μίας ημέρας για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)



Σχήμα 5.23 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - βέλους κάμψης για τη δοκιμή σε εφελκυσμό ηλικίας μίας ημέρας για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)

Παρατηρείται ότι καταρχήν και τα τρία διαγράμματα παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ομοιότητες, όπως :

- ο γενική ομοιότητα στο σχήμα
- ο ευθύγραμμο κλάδο $\sigma - \epsilon$ μέχρι περίπου το 1/3 της αντοχής για όλα τα υλικά, I - V.
- ο Βαθμιαία δεξιόστροφη περιστροφή του διαγράμματος όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού, η οποία δηλώνει και τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Η περιστροφή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι το ποσοστό 75 %, πέραν αυτού όμως δεν φαίνεται να υπάρχει μεταβολή.

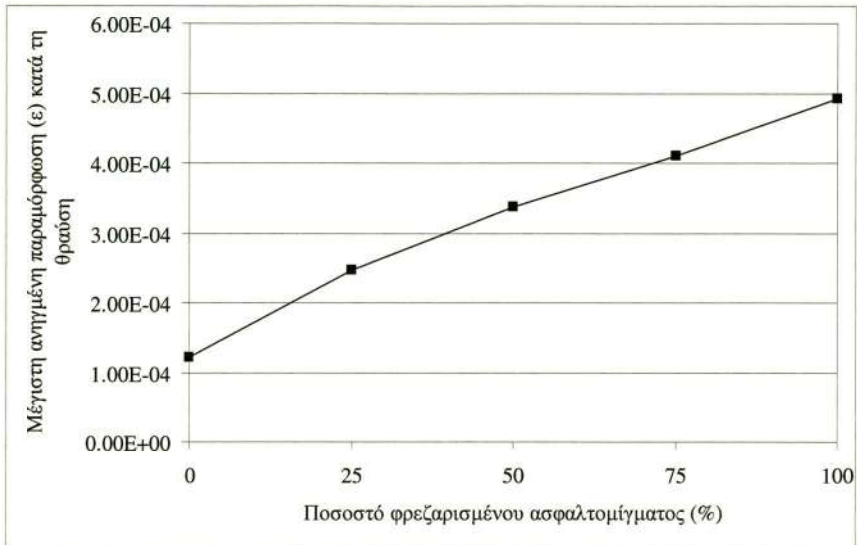
Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 : Ποσοστιαία μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των υλικών I - V, ηλικίας 1 ημέρας με ποσοστό τσιμέντου 5 %

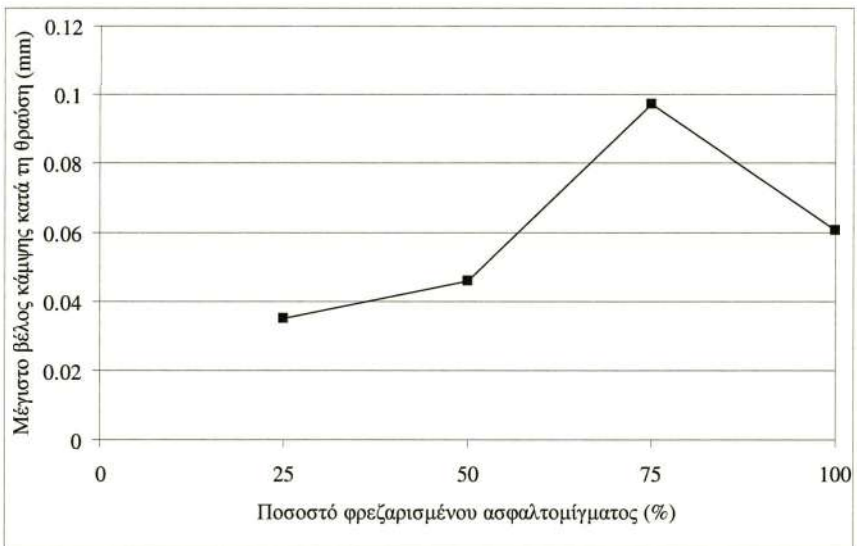
Υλικό	I	II	III	IV	V
Ε θλίψη (MPa)	7800	4500	3200	1400	1500
Μείωση (%)		42.3	28.9	56.3	-
Ε εφελκυσμός (MPa)	8500	3800	3100	1100	1100
Μείωση (%)		55.3	18.4	64.5	0
Ε κάμψη (MPa)	7600	-	4900	3100	5200
Μείωση (%)		-	-	36.7	-

Η μέγιστη παραμόρφωση κατά τη θράυση στη δοκιμή σε εφελκυσμό αυξάνει σημαντικά όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού, Σχήμα 5.24, γεγονός που είναι ενδεικτικό της αυξημένης παραμορφωσιμότητας του υλικού. Δεδομένου ότι ο λόγος νερό προς τσιμέντο, N/T, είναι σταθερός για όλα τα μίγματα, δηλαδή η συνδετική ικανότητα/αντοχή του τσιμεντοπολτού είναι η ίδια σε όλα τα μίγματα, η μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα που παρατηρείται, πρέπει να αποδοθεί στη μεγαλύτερη παραμόρφωση που παρέχει στο μίγμα το αυξανόμενο ποσοστό των φρεζαρισμένων κόκκων του ασφαλτομίγματος. Σε σύγκριση με το μίγμα I (0 % φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα) η τιμή της $\max \epsilon$ σχεδόν διπλασιάζεται με την προσθήκη 50 % φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και υπερτριπλασιάζεται όταν το ποσοστό γίνει 100 % (μίγμα V).

Το ίδιο παρατηρείται γενικά και στο βέλος κάμψεως, Σχήμα 5.25, με μία εξαίρεση - "ανωμαλία" στην τιμή του βέλους στο υλικό IV (25/75) ή στο υλικό V (0/100). Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι το διάγραμμα του Σχήματος 5.25 βασίζεται σε μεμονωμένες τιμές (και όχι σε μέσες τιμές τριών συνήθως δοκιμών που είναι βασισμένα τα άλλα Σχήματα) και γι' αυτό είναι μειωμένης αξιοπιστίας.



Σχήμα 5.24 : Μεταβολή της μέγιστης μετρηθείσας ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση για τη δοκμή σε εφελκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

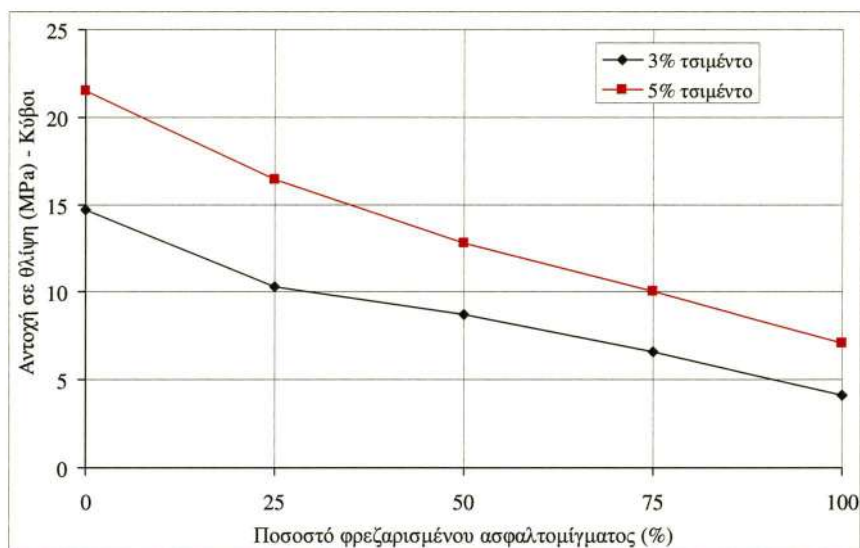


Σχήμα 5.25 : Μεταβολή του μέγιστου μετρηθέντος βέλους κάμψης κατά τη θραύση σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

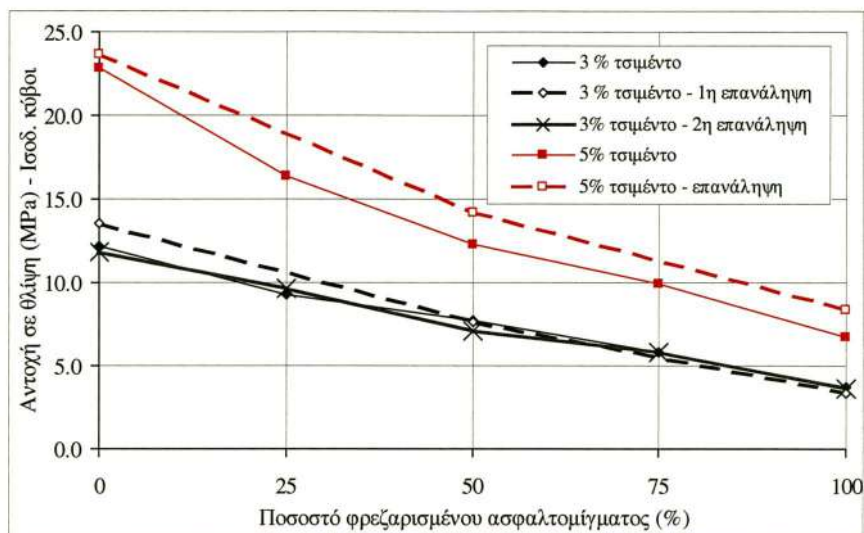
5.2.2 ΗΛΙΚΙΑ ΕΞΗΝΤΑ ΗΜΕΡΩΝ

Η επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζεται στο :

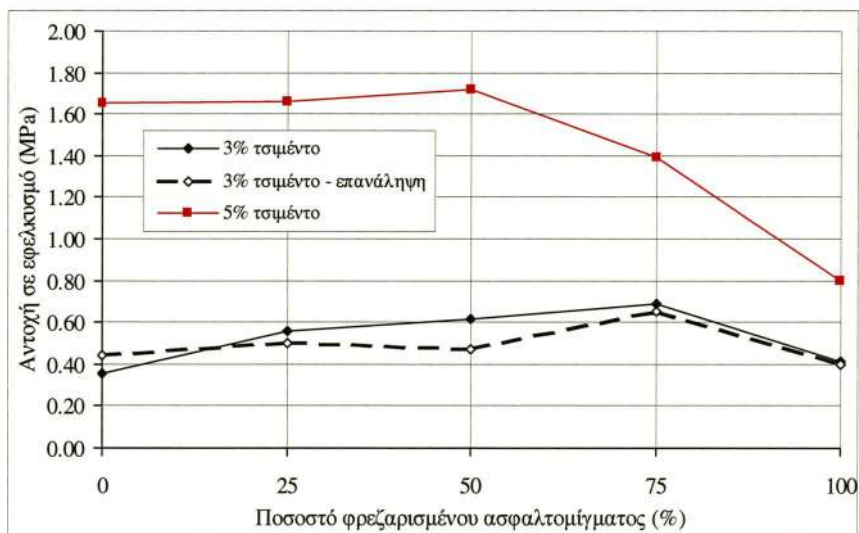
- ο Σχήμα 5.26 σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη κύβου
- ο Σχήμα 5.27 σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου
- ο Σχήμα 5.28 σε σχέση με τη αντοχή σε εφελκυσμό
- ο Σχήμα 5.29 σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη
- ο Σχήμα 5.30 σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη
- ο Σχήμα 5.31 σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό
- ο Σχήμα 5.32 σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη



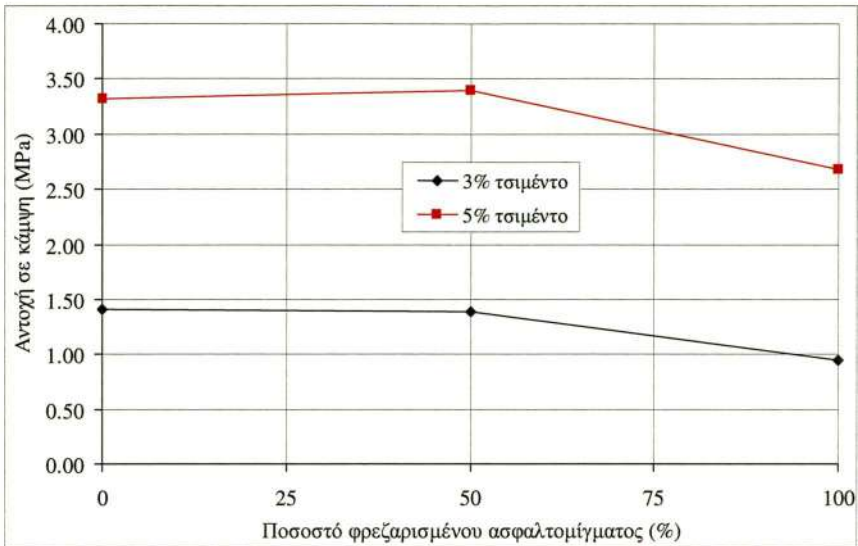
Σχήμα 5.26 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κύβων ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



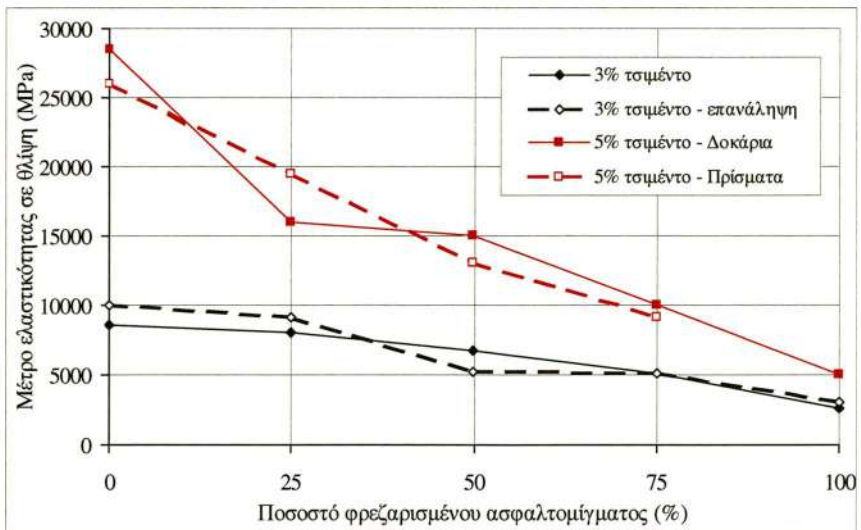
Σχήμα 5.27 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



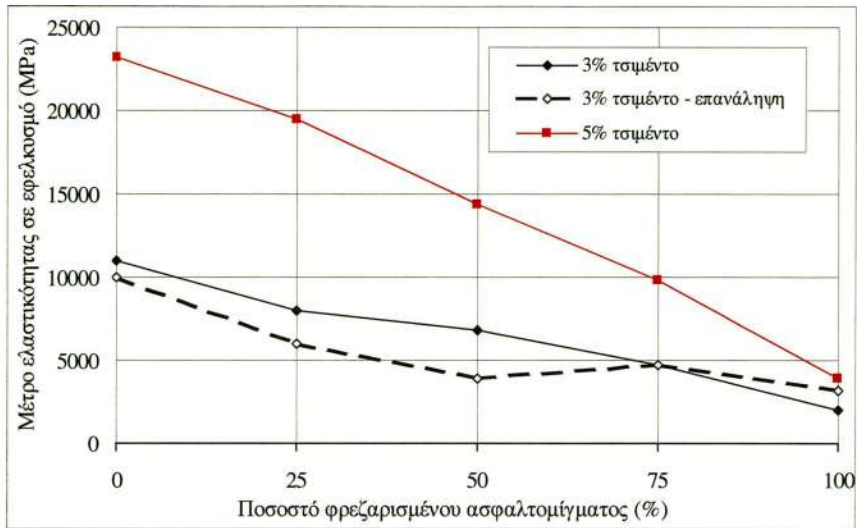
Σχήμα 5.28 : Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



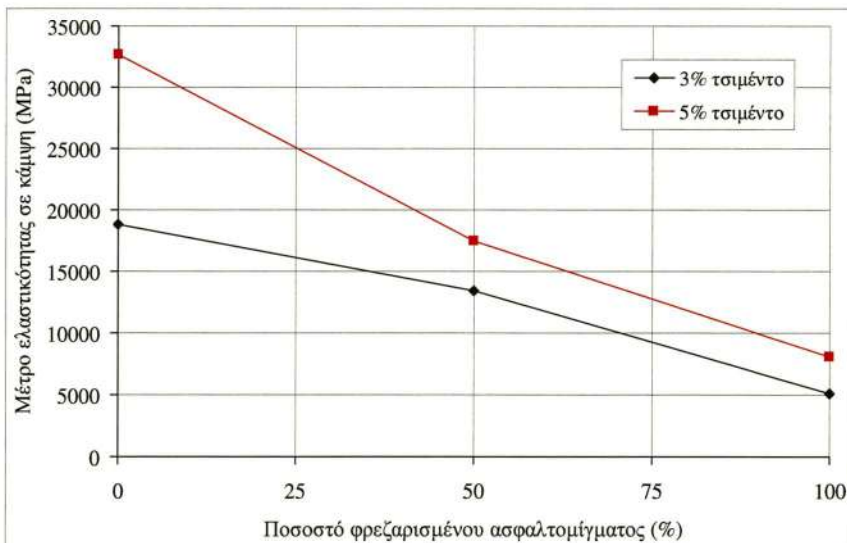
Σχήμα 5.29 : Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.30 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.31 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε εφελκυσμό ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.32 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την αντοχή σε εφελκυσμό (Σχήμα 5.28) και την αντοχή σε κάμψη (Σχήμα 5.29) η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει. Τα αποτελέσματα αυτά είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα των δοκιμών μίας ημέρας και σύμφωνα με προγενέστερες έρευνες [Kolias 1996a - 1996b, Κόλιας και Κατσάκου 1996]. Επίσης, πρόσφατη Γαλλική έρευνα των Mathias et al [2004] που αφορούσε σκυροδέματα οδοστρωμάτων, στα οποία μέρος των αδρανών αντικαταστάθηκε με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, επιβεβαιώνει πλήρως τα συμπεράσματα αυτής της διατριβής.

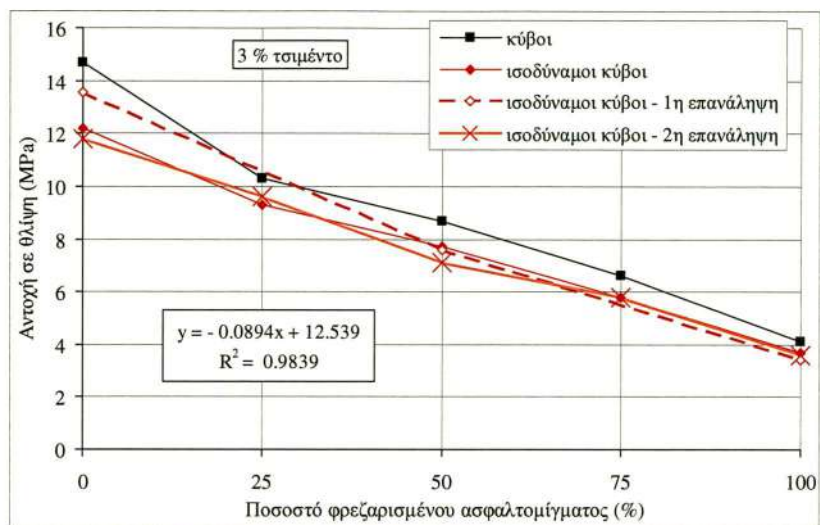
Εντούτοις, παρατηρείται στο Σχήμα 5.28 ότι για αύξηση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος μέχρι ποσοστού 75 % για μίγματα με 3 % τσιμέντο και μέχρι 50 % για μίγματα με 5 % τσιμέντο, η αντοχή αυξάνεται, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των αντοχών σε κάμψη μέχρι ποσοστού ασφαλτομίγματος 50 %, Σχήμα 5.29 και από τις δοκιμές σε διάρρηξη, Σχήματα 5.42 και 5.43, για ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 25 %. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μία ημέρα (Παράγραφος 5.2.1, Σχήματα 5.12 και 5.13), για 25 % φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, παρουσίασαν επίσης αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό (για 3 % τσιμέντο) και σε κάμψη και αποδόθηκαν σε ιδιομορφία του υλικού. Στις προγενέστερες έρευνες όμως, στο ίδιο εργαστήριο, [Kolias 1996a - 1996b, Κόλιας και Κατσάκου 1996], δεν παρουσιάστηκε αύξηση της αντοχής σε κάμψη ή διάρρηξη. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και δεδομένης της σημασίας της αντοχής σε εφελκυσμό στη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων, αποφασίστηκε να επαναληφθούν οι δοκιμές με νέες πλήρεις σειρές μιγμάτων (I έως V) για ποσοστό τσιμέντου 3 %.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 5.28 από το οποίο γίνεται φανερό ότι επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των αρχικών δοκιμών και ότι πράγματι παρουσιάζεται αύξηση της εφελκυστικής αντοχής για ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος μέχρι 75 %. Σημειώνεται επίσης ότι, αντίθετα με την αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και σε κάμψη (Σχήματα 5.31 και 5.32) δεν παρουσιάζει το ίδιο φαινόμενο αλλά μειώνεται βαθμιαία, όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος. Αυτό σημαίνει ότι η αιτία που προκαλεί αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού (καμπύλη $\sigma - \epsilon$) στα πρώτα στάδια της φόρτισης αλλά μόνο όταν το φορτίο έχει αποκτήσει υψηλές τιμές, και πιθανότατα το υλικό δεν συμπεριφέρεται πλέον ελαστικά.

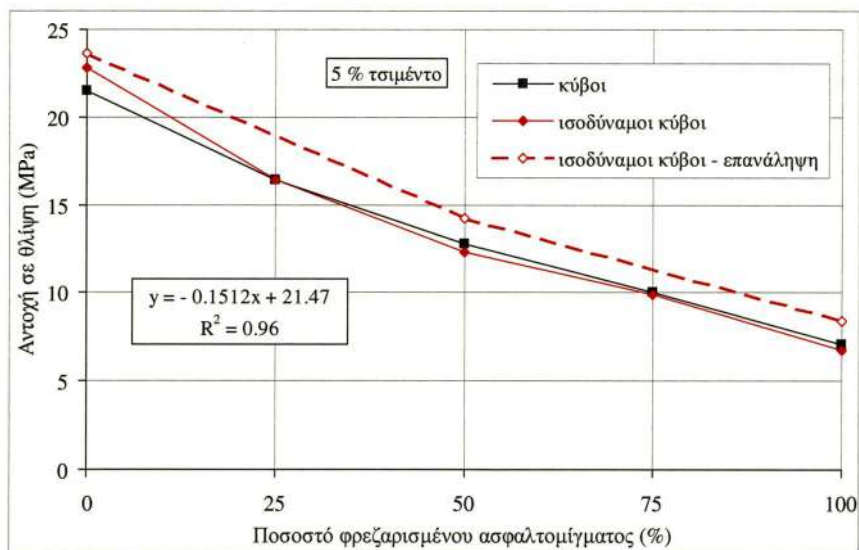
Η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής αποδόθηκε σε ιδιομορφία του θραυστού υλικού αλλά αποφασίστηκε να διερευνηθεί περαιτέρω και να καταβληθεί προσπάθεια εντόπισης της αιτίας με μία δευτερεύουσα έρευνα της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται εκτενέστερα στην Παράγραφο 5.2.4.

Από το Σχήμα 5.30 για 5 % τσιμέντο παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη το οποίο μετρήθηκε σε δοκίμια 100 mm x 100 mm x 500 mm (δοκάρια) πριν από τη δοκιμή σε εφελκυσμό, Παράγραφος 3.5.2.3, και εκείνο που προσδιορίστηκε σε θλίψη από πρίσματα που προέκυψαν με κοπή και απίσωση με σιδηρόστοκο των τμημάτων του δοκιμίου μετά τη δοκιμή του σε εφελκυσμό, δεν διαφέρουν σημαντικά. Το γεγονός ότι τα μέτρα ελαστικότητας των πρισματικών δοκιμίων (μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό) δεν διαφέρουν από αυτά των δοκαριών, επιβεβαιώνει τη θεωρία ότι κατά τη δοκιμή σε εφελκυσμό αναπτύσσεται μία μόνο ρωγμή η οποία επεκτεινόμενη προκαλεί θραύση του δοκιμίου ενώ το υπόλοιπο τμήμα αυτού δεν έχει υποστεί καμία ουσιαστική φθορά (αναπτύσσονται μικρορηγματώσεις οι οποίες όμως δεν επιφέρουν μετρήσιμη μείωση στην αντοχή). Σε αντίθετη περίπτωση η φθορά θα έπρεπε να εκδηλωθεί σε μειωμένο μέτρο ελαστικότητας των πρισμάτων έναντι των δοκαριών, [Hillerborg et al 1976, Bache and Vinding 1990]. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της μιας ημέρας έδωσαν μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας πρισματικών δοκιμίων που είχαν παρασκευαστεί για τον σκοπό αυτό, και το αίτιο εντοπίστηκε στη μετακίνηση του δοκιμίου κατά την απίσωση (καπέλωμα).

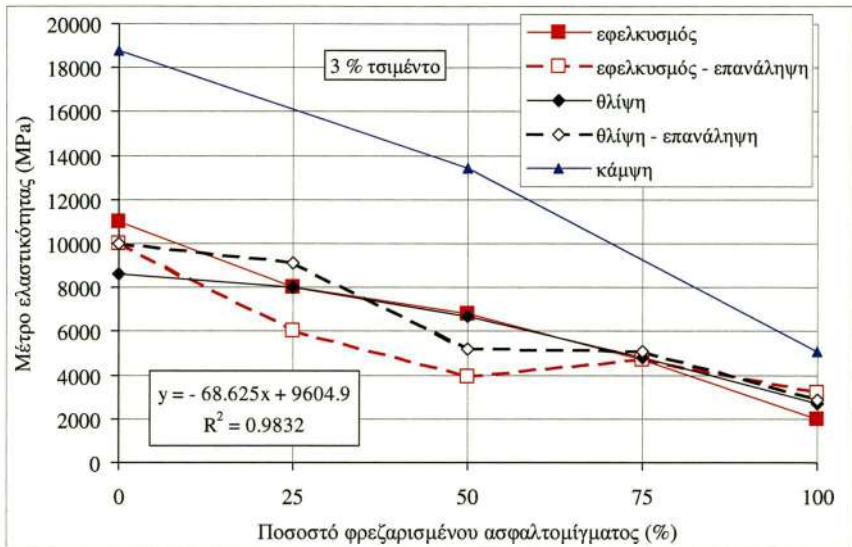
Στα Σχήματα 5.33, 5.34 και 5.35, 5.36 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της μεταβολής της θλιπτικής αντοχής (κύβου ή ισοδύναμου κύβου) και του μέτρου ελαστικότητας για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα.



Σχήμα 5.33 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)

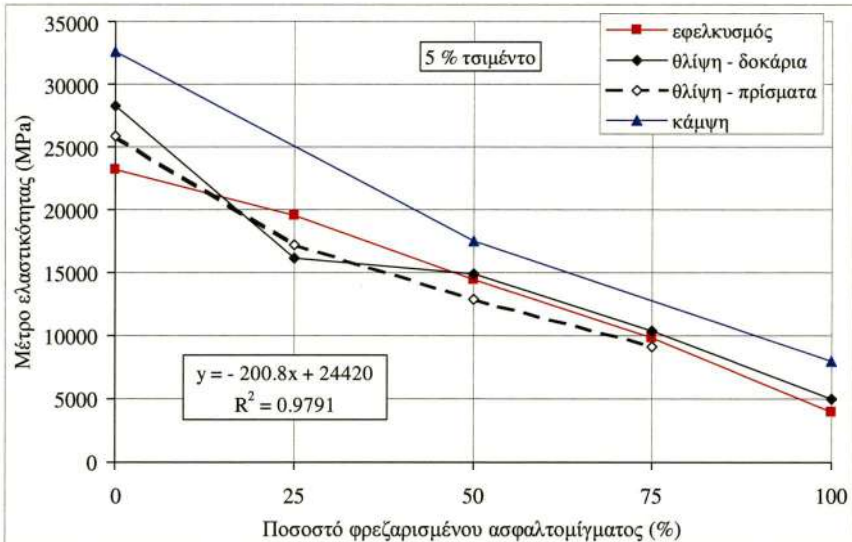


Σχήμα 5.34 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 5 %)



Σχήμα 5.35 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)

* Για την ευθεία παλινδρόμησης δεν έχει ληφθεί υπόψη το ME σε κάμψη



Σχήμα 5.36 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 5 %)

* Για την ευθεία παλινδρόμησης δεν έχει ληφθεί υπόψη το ME σε κάμψη

Λόγω του αυξημένου αριθμού αποτελεσμάτων παρέχεται η δυνατότητα να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα με μεγαλύτερη εμπιστοσύνη :

- ο Γενικά, οι επαναλήψεις των δοκιμών έδωσαν αποτελέσματα που διαφέρουν λίγο από τα αρχικά, γεγονός που αυξάνει την εμπιστοσύνη στις δοκιμές
- ο Παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης της μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητας, εκφραζόμενη ως η ποσοστιαία διαφορά δύο τιμών από διαφορετικά αναμίγματα από τον μέσο όρο τους.

Μεταξύ αναμιγμάτων
μεταβλητότητα

Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου (60 ημέρες)	1.5 % έως 5 %, τσιμέντο 3 % 7 % έως 11 %, τσιμέντο 5 %
---	---

Σημειώνεται ότι για την ηλικία της μίας ημέρας η μεταβλητότητα είναι πολύ μεγαλύτερη :	3 % έως 11 %, τσιμέντο 3 %
--	----------------------------

	10 % έως 20 %, τσιμέντο 5 %
--	-----------------------------

Αντοχή σε εφελκυσμό	3.5 % έως 13.5 %, τσιμέντο 3 %
---------------------	--------------------------------

Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη	3.5 % έως 12.6 %, τσιμέντο 3 %
------------------------------	--------------------------------

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	14 % έως 27 %, τσιμέντο 3 %
----------------------------------	-----------------------------

- ο Η αντοχή κύβων και η αντοχή ισοδύναμων κύβων δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά όπως και στην περίπτωση των αποτελεσμάτων σε ηλικία μίας ημέρας (Σχήμα 5.17 και 5.18). Το θέμα αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στην Παράγραφο 7.
- ο Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη δεν διαφέρει ουσιαστικά από το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό. Το θέμα αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στην Παράγραφο 7.
- ο Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη ή σε εφελκυσμό. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη δεν έχει υπολογιστεί η επίδραση της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης. Ο διορθωτικός συντελεστής που προκύπτει είναι 1.4 και επομένως η διαφορά αυτή είναι ακόμη πιο σημαντική.
- ο Λόγω του ικανοποιητικού αριθμού αποτελεσμάτων - τα οποία σημειώνεται ότι είναι μέσες τιμές από τρεις δοκιμές (δοκίμια) και στην περίπτωση της αντοχής σε κάμψη και του αντίστοιχου μέτρου ελαστικότητας από τέσσερα δοκίμια - είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι εξισώσεις παλινδρόμησης που συσχετίζουν

την αντοχή ή το μέτρο ελαστικότητας ως συνάρτηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος για 3 % και 5 % τσιμέντο αντίστοιχα. Οι εξισώσεις παλινδρόμησης παρουσιάζονται στα αντίστοιχα σχήματα και είναι οι ακόλουθες :

- ο Για την αντοχή σε θλίψη
 - Για τσιμέντο 3% $f_{ck} = - 0.0904p + 12.604$ $R^2 = 0.9492$
 - Για τσιμέντο 5% $f_{ck} = - 0.149p + 21.458$ $R^2 = 0.955$
- ο Για το μέτρο ελαστικότητας
 - Για τσιμέντο 3% $E = - 69.1p + 9640$ $R^2 = 0.8764$
 - Για τσιμέντο 5% $E = - 203p + 24475$ $R^2 = 0.9455$

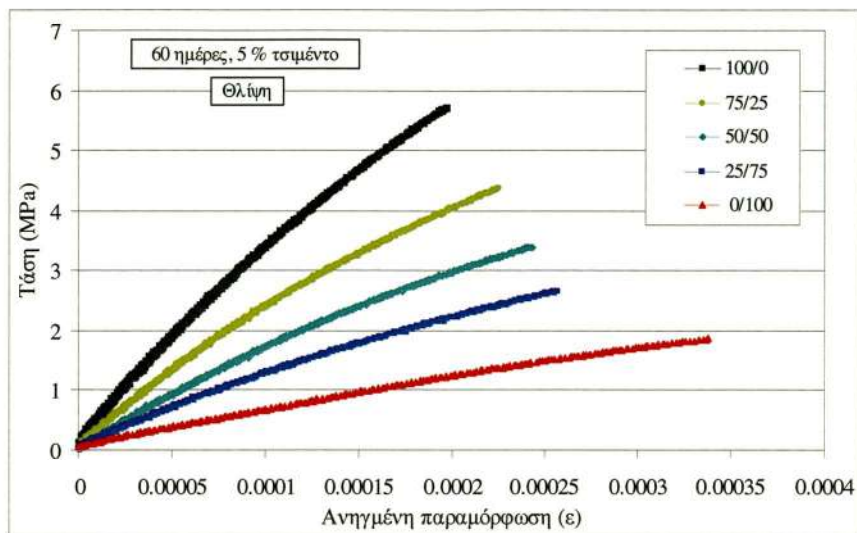
όπου :

f_{ck} , = αντοχή

E = μέτρο ελαστικότητας

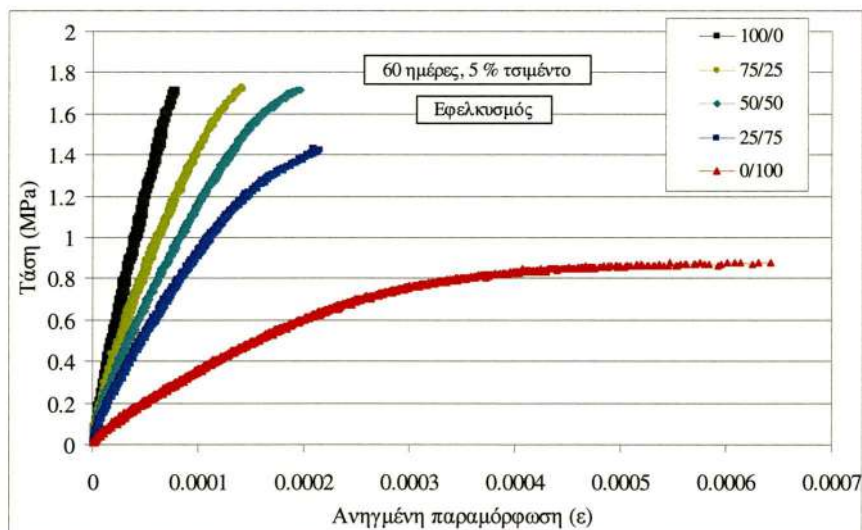
p = ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος κ.β.

Στα Σχήματα 5.37 και 5.38 παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) των δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού. (Υπενθυμίζεται ότι τα διαγράμματα $\sigma - \epsilon$ σε θλίψη έγιναν μέχρι το 1/3 του φορτίου θραύσης και για τον λόγο αυτό δεν είναι πλήρη). Το Σχήμα 5.39 παρουσιάζει τυπικό διάγραμμα τάσεων - βέλους κάμψεως ($\sigma - \delta$) των δοκιμών κάμψης.

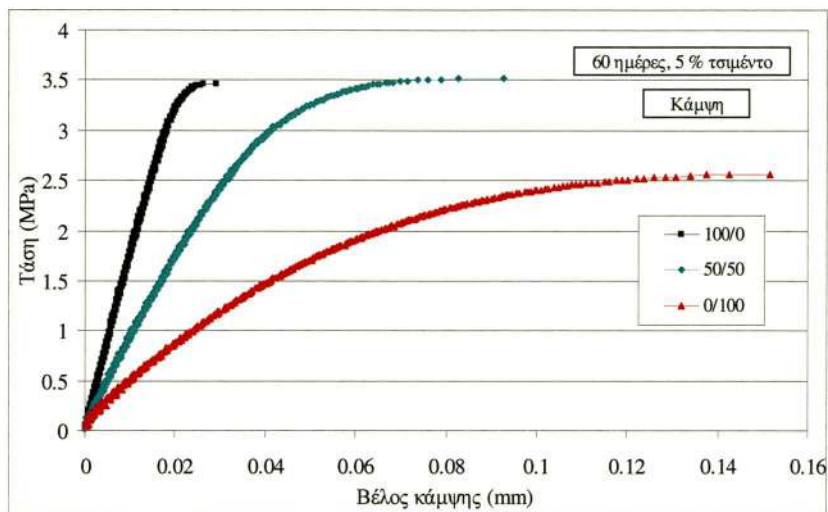


Σχήμα 5.37 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για τη δοκιμή σε θλίψη ηλικίας εξήντα ημερών για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)

* Φόρτιση μέχρι 1/3 του φορτίου θραύσης



Σχήμα 5.38 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για τη δοκιμή σε εφελκυσμό ηλικίας εξήντα ημερών για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)



Σχήμα 5.39 : Τυπικό διάγραμμα τάσεων - βέλους κάμψης για τη δοκιμή σε κάμψη ηλικίας εξήντα ημερών για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (τσιμέντο 5 %)

Στα Σχήματα 5.37 - 5.39 παρατηρείται :

- ο Γενική ομοιότητα των διαγραμμάτων
- ο ευθύγραμμο κλάδο $\sigma - \epsilon$ μέχρι περίπου το 1/3 της αντοχής για όλα τα υλικά, I - V
- ο Βαθμιαία στροφή του διαγράμματος $\sigma - \epsilon$ ή $\sigma - \delta$ προς τα δεξιά όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνεται. Η στροφή αυτή είναι ενδεικτική της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας όπως φαίνονται στους ακόλουθους Πίνακες 5.2 και 5.3, για τσιμέντο 3 % και 5 % αντίστοιχα.
- ο Σημαντική αλλαγή στην καμπυλότητα του διαγράμματος $\sigma - \epsilon$ στον εφελκυσμό ή $\sigma - \delta$ στην κάμψη, κοντά στο σημείο θραύσης, όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, γεγονός ενδεικτικό της βαθμιαίας αύξησης της παραμορφωσιμότητας του υλικού και της μεταβολής του είδους της θραύσης από καθαρώς ψαθυρή (I (100/0)) σε σημαντικά λιγότερο ψαθυρή (V 0/100)).

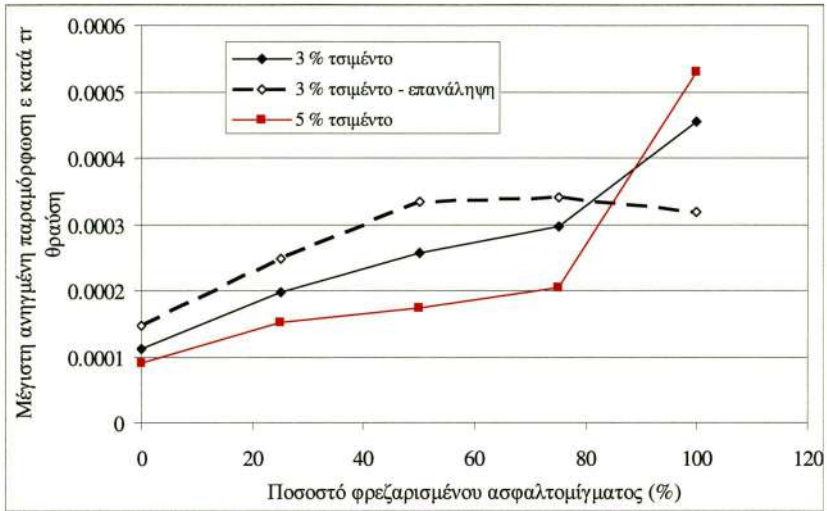
Πίνακας 5.2 : Ποσοστιαία μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των υλικών I - V, ηλικίας 60 ημερών με ποσοστό τσιμέντου 3 %

Υλικό	I	II	III	IV	V
Ε θλίψη (MPa)	9300	8550	5950	5100	2800
Μείωση (%)		8.1	30.4	14.3	45.1
Ε εφελκυσμός (MPa)	10500	7000	5350	4700	2600
Μείωση (%)		33.3	23.5	12.1	44.7
Ε κάμψη (MPa)	18800	-	13400	-	5100
Μείωση (%)		28.7		61.9	

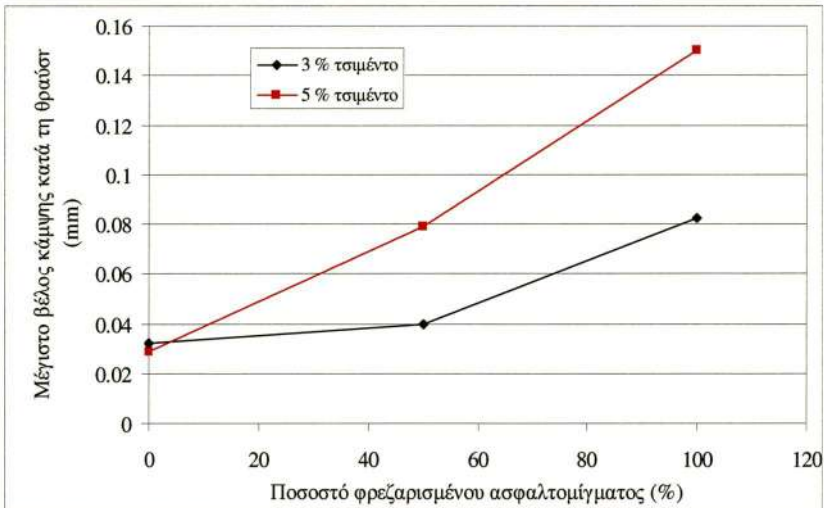
Πίνακας 5.3 : Ποσοστιαία μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των υλικών I - V, ηλικίας 60 ημερών με ποσοστό τσιμέντου 3 %

Υλικό	I	II	III	IV	V
Ε θλίψη (MPa)	28300	16200	14900	10400	5000
Μείωση (%)		42.8	8	30.2	51.2
Ε εφελκυσμός (MPa)	23200	19500	14400	9800	3900
Μείωση (%)		15.9	26.2	31.9	60.2
Ε κάμψη (MPa)	32600	-	17500	-	8000
Μείωση (%)		46.3		54.3	

Η μέγιστη μετρηθείσα παραμόρφωση κατά τη θραύση στη δοκιμή σε εφελκυσμό αυξάνει σημαντικά όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού, Σχήμα 5.40, γεγονός που είναι ενδεικτικό της αυξημένης παραμορφωσιμότητας του υλικού - αποδιδόμενης στην αύξηση της ποσότητας των φρεζαρισμένων ασφαλικών αδρανών στο μίγμα. Το ίδιο παρατηρείται και στο βέλος κάμψης, Σχήμα 5.41.



Σχήμα 5.40 : Μεταβολή της μέγιστης μετρηθείσας ανηγμένης παραμόρφωσης κατά τη θραύση για τη δοκιμή σε εφελκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.41 : Μεταβολή του μέγιστου μετρημένου βέλους κάμψης κατά τη θραύση σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Οι τιμές της $\max \varepsilon$ για το μίγμα I (0 % φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα) κυμαίνονται από $62 * 10^{-6}$ έως $122 * 10^{-6}$ και είναι σύμφωνες με τις τιμές που έχουν αναφερθεί για κατεργασμένα με τσιμέντο θραυστά αμμοχάλικα [Williams 1986] και για σκυρόδεμα [Kaplan 1963, Byfors 1982]. Οι σχετικά υψηλές τιμές ($122 * 10^{-6}$) αποδίδονται στην πιθανότητα να έγινε καταγραφή τη στιγμή του αποχωρισμού των δύο τεμαχίων του δοκιμίου, η οποία και να επηρέασε την τιμή της $\max \varepsilon$. Στον ίδιο λόγο αποδίδεται και η ιδιαίτερα υψηλή τιμή της $\max \varepsilon$ για το υλικό V (0/100) για ποσοστό τσιμέντου 5 %. Σημειώνεται ότι λόγω της φύσεως αυτής της μέτρησης και της υπάρχουσας εμπειρίας από ανάλογες μετρήσεις σε σκυρόδεμα, αναμενόταν πολύ μεγαλύτερη διασπορά αποτελεσμάτων από τη διασπορά που παρατηρήθηκε.

Οι τιμές για ηλικία δοκιμίων 1 ημέρας έχουν μεγαλύτερη σημασία γιατί επηρεάζουν τη ρηγμάτωση των πρώτων ημερών, η οποία είναι καθοριστική για τη μετέπειτα συμπεριφορά των στρώσεων. Οι τιμές για την ηλικία των 60 ημερών αφορούν τη συμπεριφορά των στρώσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αλλά δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφορά με τα αποτελέσματα της 1 ημέρας.

5.2.3 ΕΜΜΕΣΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ (ΔΙΑΡΡΗΞΗ)

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικότερα στην Παράγραφο 3.6, διερευνήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή των υλικών Ι έως V, για ηλικίες 2, 7 και 60 ημερών. Οι δοκιμές σε διάρρηξη (έμμεσος εφελκυσμός) πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ, με τα ίδια υλικά (αδρανή και τσιμέντο) που χρησιμοποιήθηκαν και για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ. Για την ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μεταξύ των δύο εργαστηρίων, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σε θλίψη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στην Παράγραφο 4.2, στους Πίνακες 4.9 - 4.16. Ο σχολιασμός της ακρίβειας των δοκιμών δίνεται στην Παράγραφο 5.1.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή εξετάζεται στην Παράγραφο 5.3.1. Στην Παράγραφο αυτή εξετάζεται μόνο η σχέση της αντοχής (θλιπτικής και εφελκυστικής) σε σχέση με την ηλικία.

Τα Σχήματα 5.42 και 5.43 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμών κυβικών δοκιμών σε θλίψη και κυλινδρικών δοκιμών σε διάρρηξη σε θερμοκρασία 20 °C, για ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα.

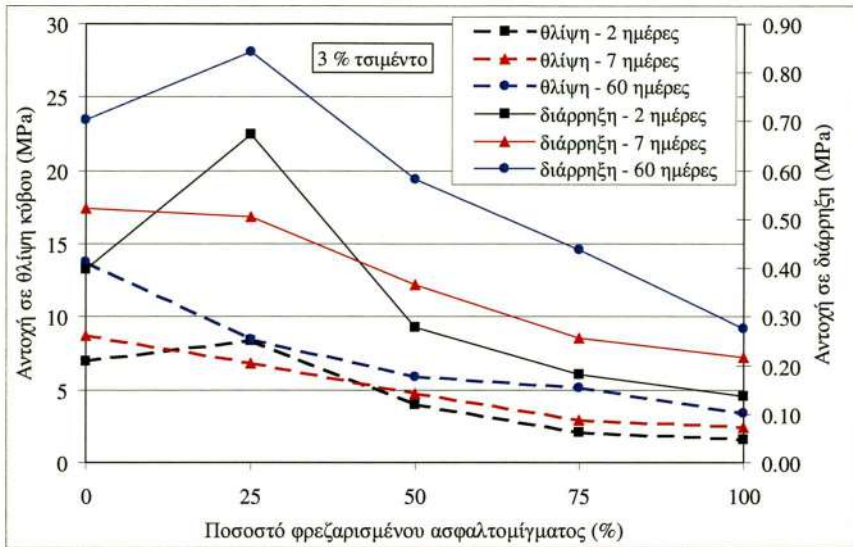
Σε κάθε Σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό - διάρρηξη - (πλήρεις γραμμές) και της αντοχής σε θλίψη (διακεκομμένες γραμμές) για τρεις ηλικίες δοκιμών 2, 7 και 60 ημερών.

Παρατηρείται ότι η αντοχή σε θλίψη μειώνεται βαθμιαία όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει, με εξαίρεση την ηλικία δύο ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %, όπου παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής μέχρι ποσοστού φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 25 %. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα για το υλικό ΙΙ στηρίζονται μόνο σε δύο δοκίμια.

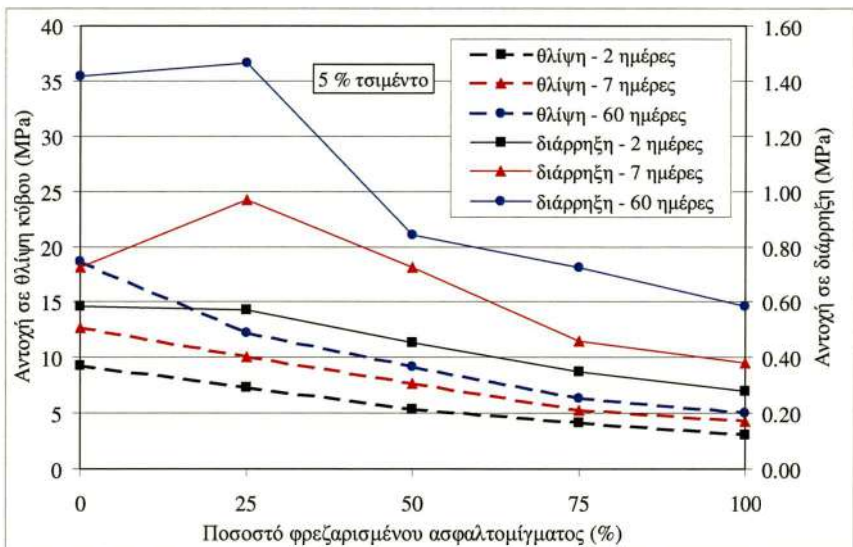
Στα Σχήματα 5.44 και 5.45 δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ και στο ΕΚΕΤ, για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 % και 5 % αντίστοιχα. Με τα Σχήματα αυτά παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης της μεταξύ αναμιγμάτων και της μεταξύ εργαστηρίων μεταβλητότητας.

Η ποσοστιαία διαφορά των τιμών των αντοχών των δύο εργαστηρίων από τον μέσο όρο τους κυμαίνεται περίπου στο 15 %. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλή, αν ληφθεί υπόψη ότι για την επαναληψιμότητα δοκιμών σκυροδέματος το EN 206 [2000] δέχεται τιμή 15 %.

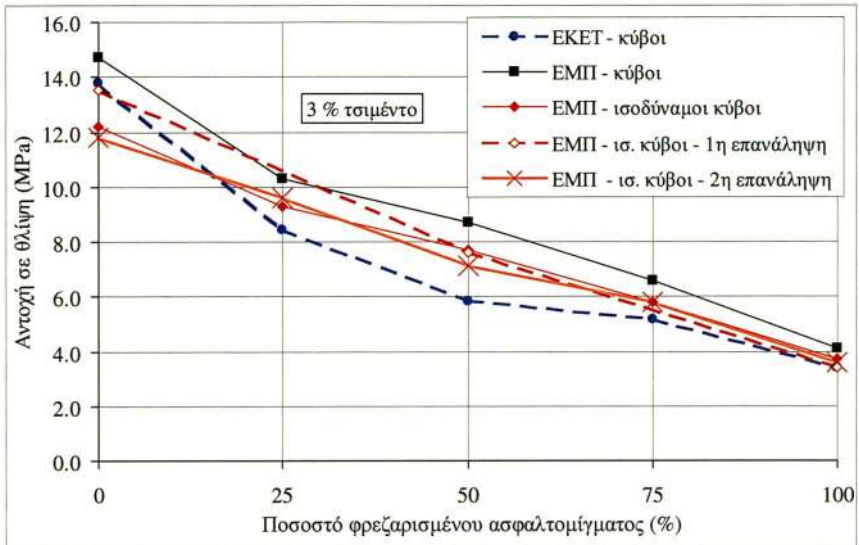
Η αντοχή σε θλίψη κύβων παρέχει τη δυνατότητα να κριθεί η αντοχή σε σχέση με τις απαιτήσεις των Προδιαγραφών για κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα (απαιτούμενη ελάχιστη αντοχή 5 - 10 MPa) ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο εδαφικά υλικά (απαιτούμενη ελάχιστη αντοχή 1.5 - 4.5 MPa) [Milton and Earland 1999, MOPU 2001, APRG 1996]. Παρατηρείται ότι για το υλικό I (100/0 κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο) το ποσοστό του 3 % είναι επαρκές (αντοχή 8.7 MPa, Σχήμα 5.42) ενώ το ποσοστό του 5 % δίνει αντοχή στο ανώτατο όριο που επιτρέπουν οι Αγγλικοί Κανονισμοί (αντοχή 12.6 MPa, Σχήμα 5.43). Για το υλικό V (0/100) στο άλλο άκρο των εξεταζόμενων υλικών που μπορεί να χαρακτηριστεί ως κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο ή όπως συνήθως γίνεται στην Ισπανία, ως σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό η αντοχή για 3 % τσιμέντο είναι ανεπαρκής (αντοχή 2.4 MPa, Σχήμα 5.42) και για 5 % τσιμέντο είναι οριακά ανεπαρκής (αντοχή 4.2 MPa, Σχήμα 5.43). Σημειώνεται ότι στις απαιτήσεις των Προδιαγραφών για την επιτόπου αντοχή, πρέπει να προστεθεί ένα περιθώριο αντοχής, περίπου το διπλάσιο της εκτιμώμενης τυπικής απόκλισης επιτόπου (2σ), για να υπολογιστεί η εργαστηριακή αντοχή η οποία θα εξασφαλίσει την απαιτούμενη ελάχιστη αντοχή επιτόπου. Συμπεραίνεται ότι η επιλογή των ποσοστών τσιμέντου 3% και 5% ήταν επιτυχής για τη διεξαγωγή της διατριβής. Οι επιφυλάξεις οι οποίες διατυπώθηκαν στην Παράγραφο 5.2.1, ως προς την πρόβλεψη της αντοχής των 7 ημερών από την αντοχή της μίας ημέρας, αίρονται. Η αντοχή σε διάρρηξη (έμμεσος εφελκυσμός) παρουσιάζει επίσης μείωση όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει, αλλά με μία αξιοσημείωτη εξαίρεση στο ποσοστό 25 % φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, στο οποίο η αντοχή παρουσιάζει αύξηση αντί για μείωση. Το γεγονός αυτό είναι σύμφωνο με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού και κάμψης της κύριας έρευνας (Σχήματα 5.12 και 5.13, μία ημέρα και Σχήματα 5.28 και 5.29, εξήντα ημέρες). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντοχή σε θλίψη δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο εργαστηρίων, θεωρείται ότι υπάρχει "αυξημένη" αξιοπιστία στα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ και η ιδιομορφία αυτή σχολιάζεται εκτενέστερα στην Παράγραφο 5.2.2 και 5.2.4.



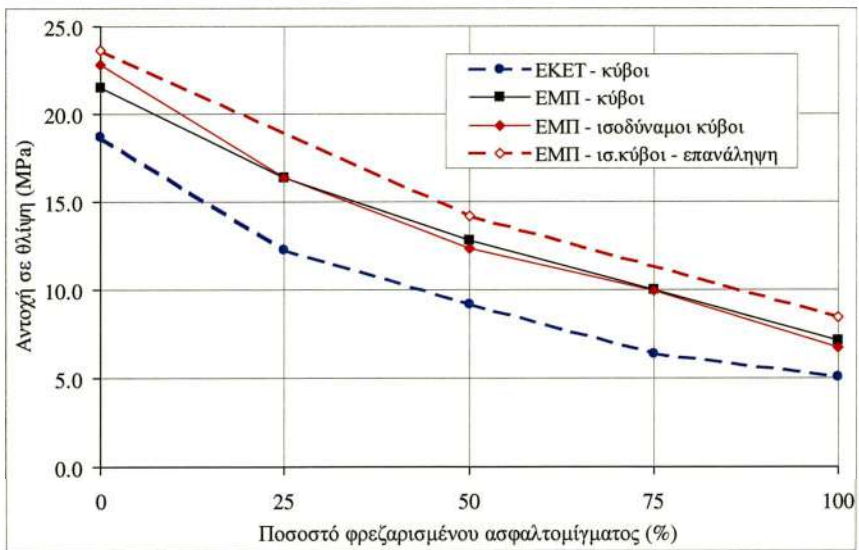
Σχήμα 5.42 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κύβων και διάρρηξης κυλίνδρων σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)



Σχήμα 5.43 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κύβων και διάρρηξης κυλίνδρων σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 5 %)



Σχήμα 5.44 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)



Σχήμα 5.45 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ηλικίας 60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (τσιμέντο 3 %)

5.2.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΤΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Όπως έχει ήδη επισημανθεί στις προηγούμενες παραγράφους, η μείωση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού Ι σε σχέση με το υλικό ΙΙ δεν είναι αναμενόμενη. Επειδή η μείωση αυτή παρατηρείται στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΜΠ και επιβεβαιώνονται από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΚΕΤ, η μείωση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί συστηματικό λάθος στην εκτέλεση των δοκιμών και αποδόθηκε σε ιδιομορφία των συγκεκριμένων υλικών (Παράγραφος 5.2.3). Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε η περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου αυτού, σε μία συμπληρωματική έρευνα [Κόλιας et al, 2005a].

Τα θραυστά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των μιγμάτων (Παράγραφος 3.1.1) ήταν υλικά προοριζόμενα για υλικά βάσεων και υποβάσεων (Ο 155). Σημειώνεται ότι η άμμος περιείχε μεγάλο ποσοστό παιπάλης - 24 % (Παράγραφος 3.1.2, Πίνακας 3.2). Το χαλίκι και το γαρμπίλι είχαν εμφανώς προσκολλημένη στην επιφάνειά τους παιπάλη. Επειδή με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα, η μείωση της εφελκυστικής αντοχής έχει αποδοθεί σε ιδιομορφία του συγκεκριμένου υλικού, αποφασίστηκε η παρασκευή δοκιμών και με άλλου τύπου θραυστά αδρανή, προοριζόμενα για σκυρόδεμα, ώστε να εξεταστεί η επίδραση τόσο της προέλευσης όσο και του ποσοστού του λεπτόκοκκου υλικού - παιπάλης - των θραυστών αδρανών υλικών, στην αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό και στα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας. Ταυτόχρονα, αποφασίστηκε να εξεταστεί η επίδραση της προέλευσης του ασφαλτομίγματος στην αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας με τη χρησιμοποίηση ενός δεύτερου φρεζαρισμένου υλικού.

Έτσι, ως θραυστά αδρανή χρησιμοποιήθηκαν :

- ο Τα θραυστά αδρανή της κύριας έρευνας (άμμος προοριζόμενη για σκυρόδεμα και χονδρόκοκκα αδρανή προοριζόμενα για ασύνδετα υλικά βάσεων οδοστρωμάτων (Ο 155), (Παράγραφος 3.1.2.), τα οποία θα συμβολίζονται ως Θραυστό Αμμοχάλικο 1 (ΘΑ1)
- ο Θραυστά αδρανή προοριζόμενα για σκυρόδεμα (άμμος και χονδρόκοκκα), τα οποία θα συμβολίζονται ως Θραυστό Αμμοχάλικο 2 (ΘΑ2)

- ο Τα θραυστά αδρανή της κύριας έρευνας, από τα χονδρόκοκκα αδρανή των οποίων (χαλίκι, γαρμπίλι) απομακρύνθηκε από την επιφάνειά τους η παιπάλη με πλύσιμο, χωρίς να αλλάξει κάποιο άλλο στοιχείο του υλικού (ΠΘΑ 1).

Ως ανακυκλωμένα υλικά χρησιμοποιήθηκαν δύο φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα (ΦΑ1, ΦΑ2) που προήρχοντο από διαφορετικές εργασίες ανακύκλωσης στην Αττική (και στις δύο περιπτώσεις ασφαλτόμιγμα κλειστού τύπου Α265). Το ΦΑ1 είναι το φρεζαρισμένο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην κύρια έρευνα.

Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των ΘΑ2 (υλικό Ι - 100/0) και ΦΑ2 (υλικό V - 0/100) δίνονται στον Πίνακα 5.4, μαζί με εκείνες των ήδη χρησιμοποιηθέντων υλικών ΘΑ1 (υλικό Ι - 100/0) και ΦΑ1 (υλικό V - 0/100), για να διευκολυνθεί η σύγκριση.

Πίνακας 5.4 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις υλικών ΘΑ2 - ΦΑ2 και ΘΑ1 - ΦΑ1

Κόσκινο	Άνοιγμα κόσκινου (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)			
		ΘΑ2	ΦΑ2	ΘΑ1	ΦΑ1
3/4"	19.05	99	100	100	98
5/8"	15.85	95	97	95	96
1/2"	12.7	83	81	85	82
3/8"	9.52	70	69	70	68
1/4"	6.35	60	61	61	61
No 4	4.76	55	54	55	54
No 8	2.38	43	27	46	31
No 16	1.19	32	18	36	16
No 30	0.59	24	12	26	6
No 50	0.297	18	5	21	3
No 100	0.149	13	3	16	1
No 200	0.074	9	2	13	0

Σημειώνεται ότι η άμμος του ΘΑ2 έχει περιεκτικότητα σε παιπάλη 16 %, έναντι 24 % του ΘΑ1. Ακόμη, το γαρμπίλι και το χαλίκι του υλικού ΘΑ1 είχαν εμφανώς προσκολλημένη στην επιφάνειά τους παιπάλη, ενώ τα αντίστοιχα κλάσματα του υλικού ΘΑ2 δεν παρουσίαζαν μακροσκοπικά την ίδια εικόνα. Σημειώνεται ακόμη, ότι οι διαφορές στη διαβάθμιση των υλικών ΘΑ1 και ΘΑ2 είναι πολύ μικρές (έως μία εκατοστιαία μονάδα) στο χονδρόκοκκο κλάσμα (>2.38 mm) ενώ είναι μεγαλύτερες

στο λεπτότερο κλάσμα ($< 2.38 \text{ mm}$) (4 εκατοστιαίες μονάδες στα κόσκινα με άνοιγμα οπής 0.074 mm και 1.19 mm).

Η έρευνα περιορίστηκε σε ένα ποσοστό τσιμέντου, 5 % και σε τρία ποσοστά ανάμιξης θραυστού αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 100/0 - καθαρό αμμοχάλικο, 75/25 και 50/50. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν από την ίδια παρτίδα, με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην κύρια έρευνα. Τα μίγματα που εξετάστηκαν δίνονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 : Μίγματα που εξετάστηκαν

Συμβολισμός υλικού	Ποσοστό κ.μ. (%) θραυστού αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος		Χαρακτηριστικά μίγματος αδρανών υλικών	
	Θραυστό αμμοχάλικο	Φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα	Θραυστό αμμοχάλικο	Φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα
A0	100	0	ΘΑ1	ΦΑ1
A A25	75	25		
A A50	50	50		
B B25	75	25	ΘΑ1	ΦΑ2
B B50	50	50		
Γ0	100	0	ΘΑ2	ΦΑ1
Γ Γ25	75	25		
Γ Γ50	50	50		
Δ Δ25	75	25	ΘΑ2	ΦΑ2
Δ Δ50	50	50		
E0	100	0	* ΠΘΑ1	ΦΑ1
E E25	75	25		
E E50	50	50		
ΣΤ ΣΤ25	75	25	* ΠΘΑ1	ΦΑ2
ΣΤ ΣΤ50	50	50		

* ΠΘΑ1 : ΘΑ1, από τα χονδρόκοκκα αδρανή του οποίου έχει απομακρυνθεί η παιτάλη, με πλύσιμο

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών των διαφόρων μιγμάτων είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς την επίδραση των ακόλουθων υπό εξέταση παραγόντων, όπως παρουσιάζεται αναλυτικότερα στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6 : Σύγκριση μιγμάτων και εξαγόμενα συμπεράσματα

Σύγκριση μιγμάτων	Συμπεράσματα ως προς την επίδραση
A - B, Γ - Δ, E - ΣΤ	της προέλευσης του φρεζαρισμένου υλικού για ποσοστά στο μίγμα 25% και 50% (Σύγκριση των μιγμάτων A25 - B25, A50 - B50, Γ25 - Δ25, Γ50 - Δ50, E25 - ΣΤ25, E50 - ΣΤ50)
A - Γ, B - Δ	της προέλευσης των ασύνδετων αδρανών υλικών σε μίγματα με ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα 0%, 25% και 50% (Σύγκριση των μιγμάτων A0 - Γ0, A25 - Γ25, A50 - Γ50, B25 - Δ25, B50 - Δ50)
A - E, B - ΣΤ	της παιτάλης, η οποία είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια των κόκκων στο γαρμπίλι και το χαλίκι σε μίγματα με ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 0%, 25% και 50% (Σύγκριση των μιγμάτων A0 - E0, A25 - E25, A50 - E50, B25 - ΣΤ25, B50 - ΣΤ50)

Τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό, με τη μηχανή δοκιμής MTS, με ταυτόχρονη μέτρηση των παραμορφώσεων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό, με την τεχνική που ακολουθήθηκε στα δοκίμια της κύριας έρευνας (Παράγραφος 3.5.2.3). Μετά τη δοκιμή σε εφελκυσμό, έγινε και μέτρηση της θλιπτικής αντοχής ισοδύναμου κύβου, σε τμήματα των επιμηκύτερων πρισματικών δοκιμών. Όλες οι δοκιμές έγιναν σε ηλικία εξήντα ημερών.

Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων των δοκιμών δίνονται στον Πίνακα 4.21, ενώ τα μεμονωμένα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 4.22, στην Παράγραφο 4.3.

Καταρχήν, πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας είναι αξιοσημείωτα μικροί, μικρότεροι από αυτούς των αντίστοιχων δοκιμών της κύριας έρευνας. Συγκεκριμένα, για την αντοχή σε θλίψη κυμαίνονται από 1.7 % έως 7.9 %, για την αντοχή σε εφελκυσμό από 1.3 % έως 9.5 %, ενώ για τα μέτρα ελαστικότητας από 2.4 % έως 27.9 % και από 2.1 % έως 11.3 % για τη θλίψη και τον εφελκυσμό αντίστοιχα, με μέση τιμή 7 % περίπου.

Στα Σχήματα 5.46 και 5.47 δίνονται τα αποτελέσματα για την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα και στα Σχήματα 5.48 και 5.49 δίνονται τα μέτρα ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα, σε συνάρτηση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος.

Στα Σχήματα 5.46 έως 5.49 έχουν συμπεριληφθεί επίσης και τα αποτελέσματα της κύριας έρευνας, των υλικών I (100/0) έως III (50/50) για την ίδια ηλικία δοκιμής και ποσοστό τσιμέντου (60 ημέρες, 5 % τσιμέντο), ως ένα κριτήριο επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων και ως μία τιμή της μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητας. Για το δύσκολο έργο της εκτίμησης του αν οι παρατηρούμενες διαφορές είναι σημαντικές ή όχι η μεταβλητότητα θα αποτελέσει το βασικό κριτήριο. Έτσι οι διαφορές, ανηγμένες ως ποσοστό της μέσης τιμής που παρατηρήθηκαν, δίνονται στον Πίνακα 5.7 και συγκρίνονται με τις τιμές της μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητας που εξήχθησαν από όλες τις σχετικές δοκιμές στην Παράγραφο 5.2.2. Σημειώνεται ότι στον Πίνακα η μεταβλητότητα από όλες τις δοκιμές (Παράγραφος 5.2.2, στήλη 3) συμπεριλαμβάνει τις δοκιμές σε όλα τα υλικά που εξετάστηκαν I (100/0) έως V (0/100), ενώ η μεταβλητότητα από τις δοκιμές της Παραγράφου αυτής (στήλη 2) περιλαμβάνει δοκιμές μόνο για τα υλικά I (100/0) έως III (50/50).

Πίνακας 5.7 : Παρατηρηθείσες μεταβλητότητες στις δοκιμές

Δοκιμή (1)	Μεταβλητότητα		
	Από τις δοκιμές της Παραγράφου αυτής (%) (2)	Από όλες τις δοκιμές (%) (Παράγραφος 5.2.2) (3)	Τιμές που υιοθετούνται ως κριτήριο για σύγκριση Μ.Ο. (4)
Αντοχή σε θλίψη	1.2 - 2.9	7 - 11	10
Αντοχή σε εφελκυσμό	0.3 - 3.5	3.5 - 13.5	12
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη	3.4 - 13.9	3.5 - 12.6	14
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	0 - 16.7	14 - 27	20

Παρατηρείται ότι η μεταβλητότητα στις αντοχές από τις δοκιμές της παραγράφου αυτής (στήλη 2) είναι πλησίον του κάτω ορίου των τιμών της μεταβλητότητας από όλες τις δοκιμές (στήλη 3), ενώ στα μέτρα ελαστικότητας είναι εντός των ορίων από

όλες τις δοκιμές. Οι μεγαλύτερες τιμές μεταβλητότητας που παρουσιάζει η στήλη 3 του Πίνακα 5.7 σε σύγκριση με τη στήλη 2 αποδίδεται στο γεγονός ότι η στήλη 3:

- ο Περιλαμβάνει και τη μεταβλητότητα των υλικών IV (25/75) και V (0/100)
- ο Προέρχεται από μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων.

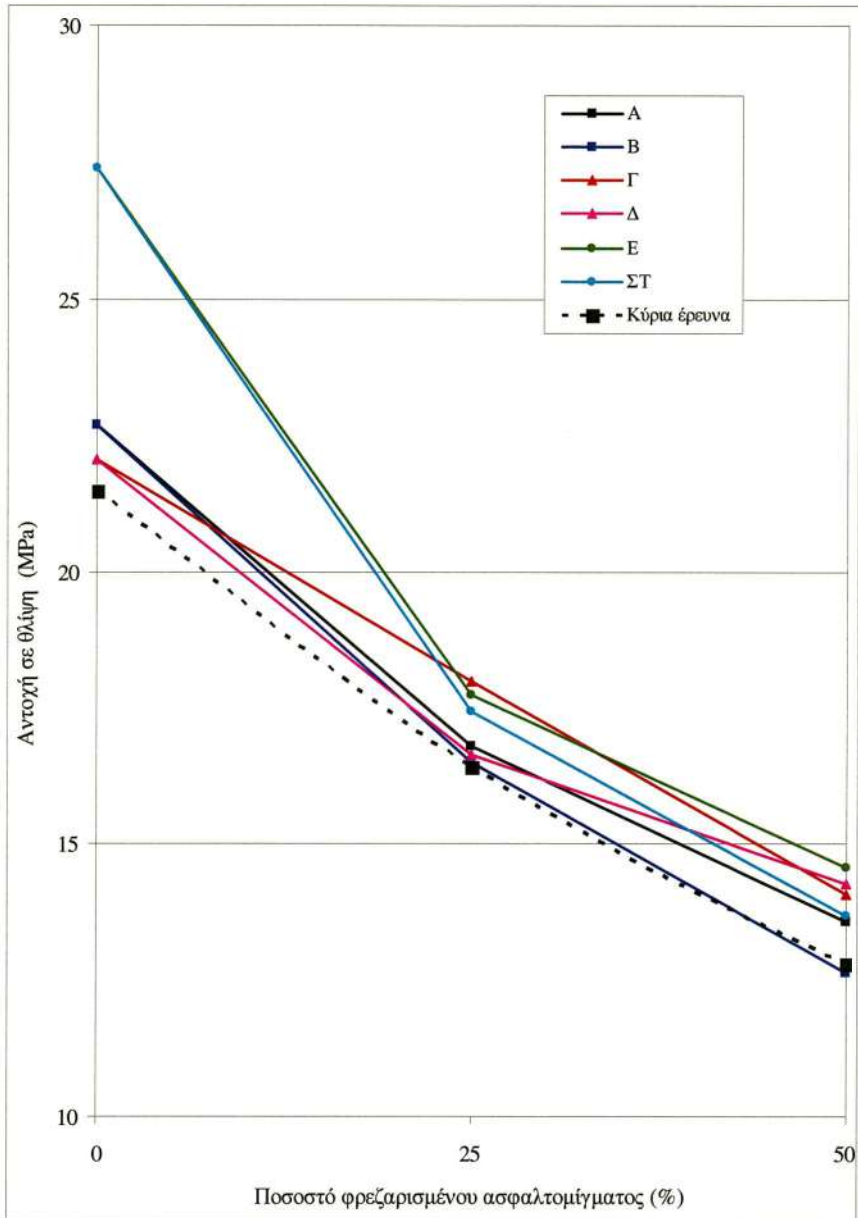
Τελικά ως κριτήρια για την εκτίμηση της ύπαρξης ή μη διαφοράς στα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται οι τιμές της 4ης στήλης του Πίνακα, οι οποίες είναι λίγο μεγαλύτερες από τις τιμές των δοκιμών της Παραγράφου αυτής αλλά δεν λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές που παρατηρήθηκαν σε όλες τις δοκιμές, διότι τότε η σύγκριση θα ήταν ιδιαίτερα αυστηρή.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται δύο τιμές της ποσοστιαίας μεταβολής του εξεταζόμενου μεγέθους :

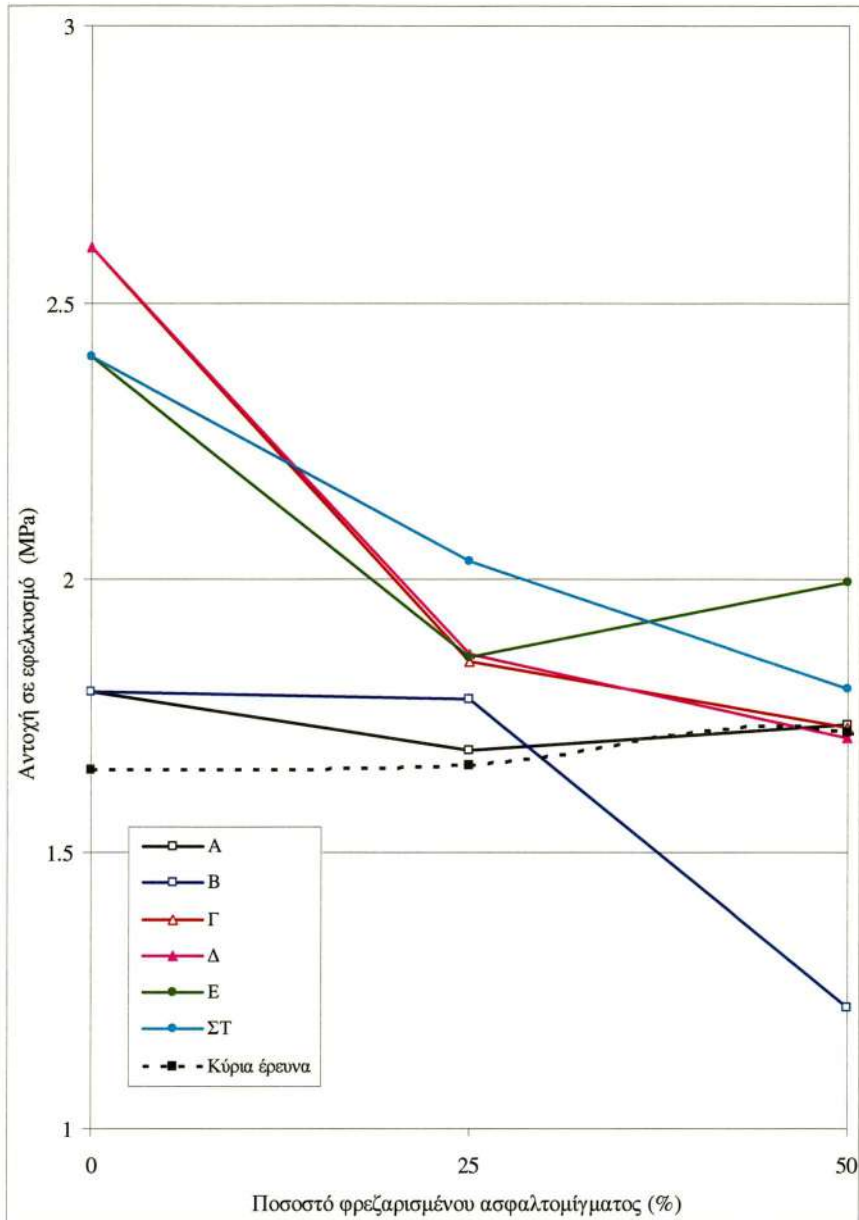
- ο Μεταβολή ανηγμένη στην τιμή του πρώτου μεγέθους που εξετάζεται και δείχνει το ποσοστό της μεταβολής από την τιμή του πρώτου μεγέθους
- ο Μεταβολή ανηγμένη στη μέση τιμή των δύο εξεταζόμενων μεγεθών και συγκρίνεται με τις τιμές της μεταβλητότητας (στήλη 4) του Πίνακα 5.7.

Στη σύγκριση που θα ακολουθήσει μεταξύ των διαφόρων τιμών, αν η ποσοστιαία διαφορά βρεθεί μεγαλύτερη από εκείνη του Πίνακα 5.7 - στήλη 4, τότε θα μπορούσε να λεχθεί ότι η επίδραση της εξεταζόμενης παραμέτρου είναι σημαντική, εφόσον η στατιστική σύγκριση επιβεβαιώνει το γεγονός.

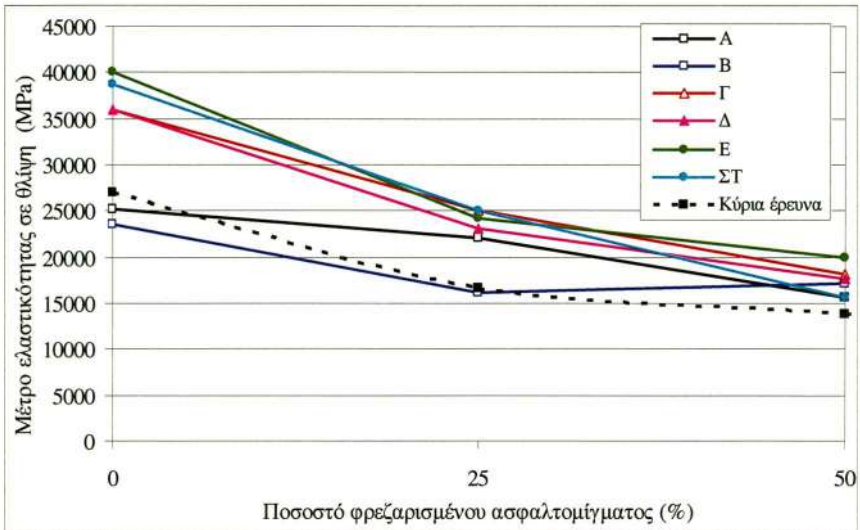
Επιπλέον για να διευκολυνθεί η σύγκριση στον Πίνακα 5.8, υποδεικνύεται με αστερίσκους (***) αν ο στατιστικός έλεγχος της ισότητας ή μη των μέσων όρων που έγινε με τη δοκιμή Student (με άνισες τυπικές αποκλίσεις) σε επίπεδο σημαντικότητας 95 % (μονόπλευρος έλεγχος) απέδειξε ότι η διαφορά των ΜΟ είναι στατιστικώς σημαντική. Ο έλεγχος αυτός θεωρείται επιβληθητικός και πιστεύεται ότι δεν μπορεί να υποστηρίξει από μόνος του με βεβαιότητα μία απόφαση για ύπαρξη διαφοράς ή μη επειδή στηρίζεται σε σχετικώς μικρό αριθμό δοκιμών. Πολλές φορές με τον έλεγχο αυτό, υπάρχει κίνδυνος να εξαχθούν λανθασμένα αποτελέσματα ύπαρξης στατιστικώς σημαντικής διαφοράς ενώ η διαφορά των μέσων όρων είναι σχετικώς μικρή, (όταν τυχαίνει η διασπορά των επιμέρους μεμονωμένων τιμών των δύο ομάδων να είναι μικρή οπότε ο στατιστικός έλεγχος γίνεται ιδιαίτερα ευαίσθητος).



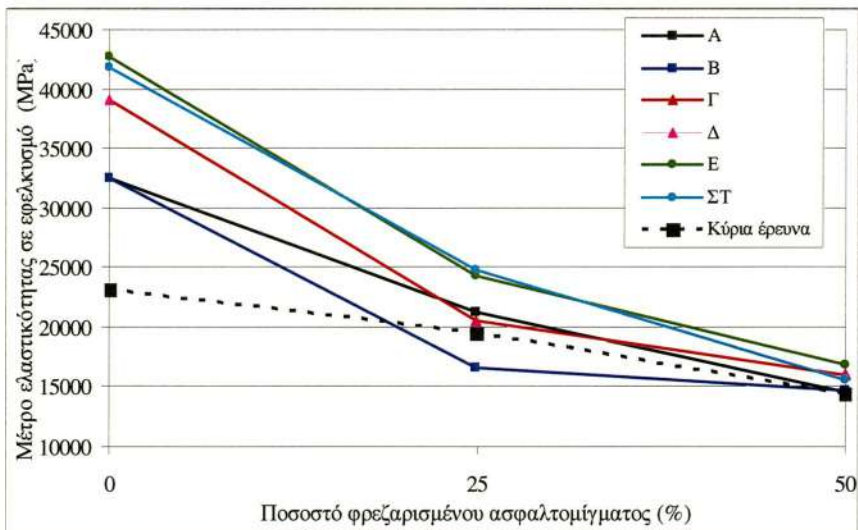
Σχήμα 5.46 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη ισοδύναμου κύβου σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.47 : Μεταβολή της αντοχής σε εφέλκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.48 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 5.49 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε εφελκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Πίνακας 5.8 : Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών

Σύγκριση υλικών							
Συγκρινόμενο μέγεθος	A - B	Γ - Δ	E - ΣΤ	A - Γ	B - Δ	A - E	B - ΣΤ
Αντοχή σε θλίψη Σχήμα 5.46	A25 - B25 1.9 % (1.9 %) *****	Γ25 - Δ25 7.5 % (7.8 %) *****	E25 - ΣΤ25 1.7 % (1.7 %)	A0 - Γ0 2.8 % (2.9 %)	B25 - Δ25 -0.9 % (0.9 %)	A0 - E0 -19.8 % (18.0 %) *****	B25 - ΣΤ25 -5.7 % (5.5 %) *****
				A25 - Γ25 -7.1 % (6.8 %) *****		A25 - E25 1.9 % (1.9 %)	
	A50 - B50 6.9 % (7.1 %) *****	Γ50 - Δ50 -1.4 % (1.4 %)	E50 - ΣΤ50 6.2 % (6.4 %) *****	A50 - Γ50 -3.7 % (3.6 %) *****	B50 - Δ50 -12.9 % (12.1 %) *****	A50 - E50 -7.4 % (7.2 %) *****	B50 - ΣΤ50 -8.2 % (7.9 %) *****
Αντοχή σε εφελκυσμό Σχήμα 5.47	A25 - B25 1.4 % (1.4 %)	Γ25 - Δ25 -0.7 % (0.7 %)	E25 - ΣΤ25 -9.5 % (9.0 %) *****	A0 - Γ0 -45.0 % (36.7 %) *****	B25 - Δ25 -4.6 % (4.5 %)	A0 - E0 -32.0 % (27.6 %) *****	B25 - ΣΤ25 -14.1 % (13.2 %) *****
				A25 - Γ25 -9.7 % (9.2 %)		A25 - E25 -10.1 % (9.6 %) *****	
	A50 - B50 29.7 % (34.9 %) *****	Γ50 - Δ50 1.2 % (1.2 %)	E50 - ΣΤ50 9.7 % (10.2 %) *****	A50 - Γ50 0.4 % (0.4 %)	B50 - Δ50 -40.1 % (34.4 %) *****	A50 - E50 -15.0 % (14.0 %) *****	B50 - ΣΤ50 -47.7 % (38.5 %) *****
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη Σχήμα 5.48	A25 - B25 26.9 % (31.1 %) *****	Γ25 - Δ25 7.7 % (8.0 %)	E25 - ΣΤ25 -3.8 % (3.8 %)	A0 - Γ0 -41.7 % (34.7 %)	B25 - Δ25 -43.2 % (35.5 %) *****	A0 - E0 -58.1 % (45.1 %) *****	B25 - ΣΤ25 -55.6 % (43.5 %) *****
				A25 - Γ25 -13.3 % (12.5 %)		A25 - E25 -9.5 % (9.1 %) *****	
	A50 - B50 -9.2 % (8.8 %)	Γ50 - Δ50 2.7 % (2.8 %)	E50 - ΣΤ50 21.0 % (23.4 %) *****	A50 - Γ50 -16.1 % (14.9 %)	B50 - Δ50 -0.1 % (0.1 %)	A50 - E50 -26.5 % (23.4 %) *****	B50 - ΣΤ50 8.5 % (8.8 %)
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό Σχήμα 5.49	A25 - B25 21.8 % (24.4 %) *****	Γ25 - Δ25 0.6 % (0.6 %)	E25 - ΣΤ25 -2.3 % (2.3 %)	A0 - Γ0 -20.1 % (18.3 %) *****	B25 - Δ25 -23.0 % (20.7 %) *****	A0 - E0 -31.6 % (27.6 %) *****	B25 - ΣΤ25 -49.5 % (39.7 %) *****
				A25 - Γ25 3.2 % (2.3 %)		A25 - E25 -14.3 % (13.4 %)	
	A50 - B50 -1.7 % (1.7 %)	Γ50 - Δ50 -0.6 % (0.6 %)	E50 - ΣΤ50 7.6 % (7.9 %)	A50 - Γ50 -10.6 % (10.0 %)	B50 - Δ50 -9.3 % (8.9 %)	A50 - E50 -16.1 % (14.9 %) *****	B50 - ΣΤ50 -5.4 % (5.3 %)

Μεταβολή $X_i - Y_i$ % ως προς X_i , (Μεταβολή $X_i - Y_i$ % ως προς $MO X_i - Y_i$)

***** Τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95 % (μονόπλευρος έλεγχος), σύμφωνα με τη δοκιμή t - Student

Η επίδραση της προέλευσης του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος εκτιμάται με σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων Α - Β, Γ - Δ, και Ε - ΣΤ.

- ο Η αντοχή σε θλίψη δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.46, και αυτό ενισχύεται από τον Πίνακα 5.8, από όπου γίνεται φανερό ότι η μέγιστη διαφορά είναι μόνο 7.5 % (για τα μίγματα Γ25 - Δ25).
- ο Η αντοχή σε εφελκυσμό αλλά και το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό επίσης δεν φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά, Σχήμα 5.47, Σχήμα 5.49 και Πίνακας 5.8 όπου παρουσιάζονται μικρές ποσοστιαίες διαφορές εκτός από δύο περιπτώσεις : μία για την αντοχή (Α50 - Β50, 29.7 %) και μία για το μέτρο ελαστικότητας (Α25 - Β25, 21.8 %). Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη επίσης παρουσιάζει μικρές σχετικές διαφορές (Σχήμα 5.42, Πίνακας 5.7) αλλά με δύο εξαιρέσεις (Α25 - Β25, 26.9 % και Ε50 - ΣΤ50, 21.0 %).

Γενικά οι διαφορές που βρέθηκαν δεν διαφέρουν ουσιαστικά από τη μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητα (πλην λίγων εξαιρέσεων) και επομένως μπορεί να λεχθεί ότι με τη μεταβλητότητα της παρούσας έρευνας δεν μπορεί διαπιστωθεί διαφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα δύο φρεζαρισμένα ασφαλτομίγματα προέρχονταν από ασφαλτόμιγμα Α265 κλειστού τύπου και οι φρέζες που χρησιμοποιήθηκαν παρήγαγαν φρεζαρισμένο υλικό με πολύ μικρή διαφορά στη διαβάθμιση και στα ποσοστά των διαφόρων ειδών ασφαλικών κόκκων. Θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστούν φρεζαρισμένα υλικά που παρουσιάζουν διαφορετικά ποσοστά κόκκων ασφαλικού κονιάματος και αδρανών επαληθμένων με άσφαλο.

Η επίδραση της προέλευσης του θραυστού υλικού ΘΑ1 και ΘΑ2 στα μίγματα εκτιμάται με σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων Α - Γ και Β - Δ.

- ο Η αντοχή σε θλίψη, Σχήμα 5.46, δεν φαίνεται να επηρεάζεται αφού και στον Πίνακα 5.8 οι ποσοστιαίες μεταβολές δεν υπερβαίνουν το 12.9 %.
- ο Η αντοχή σε εφελκυσμό αντιθέτως φαίνεται ότι επηρεάζεται σημαντικά, Σχήμα 5.47, αφού σε δύο περιπτώσεις οι ποσοστιαίες μεταβολές είναι μεγαλύτερες από 40 % (Α0 - Γ0, Β50 - Δ50). Οι εφελκυστικές αντοχές γενικά για το υλικό Γ ή Δ με θραυστό υλικό ΘΑ2 είναι μεγαλύτερες εκείνων με θραυστό υλικό

- ΘΑ1. Η διαφορά μειώνεται όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει.
- ο Τα μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και σε εφελκυσμό επίσης παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές 41.7 % και 20.1 % αντίστοιχα. Μεγαλύτερες τιμές έχουν τα μίγματα Β και Δ με κοινό χαρακτηριστικό το θραυστό υλικό ΘΑ2. Οι διαφορές και στην περίπτωση αυτή ελαττώνονται όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού αυξάνει.

Σημειώνεται ότι και τα δύο θραυστά αδρανή (ΘΑ1 και ΘΑ2) είναι ασβεστολιθικά, από διαφορετικό όμως λατομείο, και διαφέρουν ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση στα ποσοστά των κόκκων που είναι μικρότεροι από 2.38 mm κατά 3 εκατοστιαίες μονάδες πλην της παιπάλης που διαφέρουν κατά 4 εκατοστιαίες μονάδες. Ο μηχανισμός μείωσης της αντοχής σε εφελκυσμό και των μέτρων ελαστικότητας - ενώ η αντοχή σε θλίψη δεν φαίνεται να μειώνεται - θα μπορούσε να αποδοθεί σε μείωση της συνάφειας με τα αδρανή που μπορεί να προκαλέσει το μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών, και ιδιαίτερα της παιπάλης, αν ληφθεί υπόψη ότι το υλικό ΘΑ1 είχε αδρανή με εμφανώς επικολημένη παιπάλη στην επιφάνειά τους. Σε επίρρωση της υπόθεσης αυτής παρατηρείται ότι η εφελκυστική αντοχή του υλικού Γ (με θραυστό υλικό ΘΑ2) πλησιάζει τις αντοχές των υλικών Ε και ΣΤ που έχουν υλικό πλυμένο ΘΑ1 (ΠΘΑ1), άρα χωρίς καθόλου παιπάλη στην επιφάνεια του χονδρόκοκκου κλάσματος.

Η επίδραση της παιπάλης η οποία είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια των χονδρόκοκκων αδρανών (γαμπίλι, χαλίκι) εκτιμάται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μιγμάτων Α - Ε και Β - ΣΤ, (τα θραυστά αδρανή των υλικών Ε και ΣΤ προέρχονται από το ΘΑ1 με πλύσιμο του χονδρόκοκκου κλάσματος).

- ο Η αντοχή σε θλίψη παρουσιάζει, Σχήμα 5.46, γενικώς αύξηση για τα υλικά Ε και ΣΤ που περιέχουν πλυμένο θραυστό αμμοχάλικο, ΠΘΑ1, η οποία είναι μικρή σχετικώς για τις περιπτώσεις που το μίγμα περιέχει φρεζαρισμένο ασφαλτόμειγμα αλλά αξιοσημείωτη, 18.0 %, για την περίπτωση που το μίγμα δεν περιέχει φρεζαρισμένο ασφαλτόμειγμα, Πίνακας 5.8. Το μίγμα αυτό, Ε0, παρέχει άμεσα την επίδραση της προσκολλημένης παιπάλης αφού δεν

επηρεάζεται από την παρουσία φρεζαρισμένου υλικού. Το γεγονός αυτό έχει παρατηρηθεί και στο σκυρόδεμα [Neville 1995].

- ο Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη, Σχήμα 5.48, παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές (58.1 %, 55.6 %, 26.5 %, Πίνακας 5.8) για τα υλικά που περιέχουν πλυμένο θραυστό αμμοχάλικο ΠΘΑ1, με τη μεγαλύτερη διαφορά στα μίγματα Α0 - Ε0 με μηδενικό ποσοστό φρεζαρισμένου ασφατομίγματος. Παρατηρείται επίσης και σαφής τάση ελάττωσης των διαφορών, όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού αυξάνει.
- ο Η αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (Σχήμα 5.47 και Σχήμα 5.49) παρουσιάζουν επίσης μεγάλες αυξήσεις 47.7 % και 49.5 % αντίστοιχα, (Πίνακας 5.8) για τα υλικά που περιέχουν πλυμένο θραυστό αμμοχάλικο, με μεγάλες επίσης διαφορές στα μίγματα χωρίς φρεζαρισμένο ασφατομίγμα.

Η συμπεριφορά αυτή με γενική μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σε περιπτώσεις "μη καθαρών αμμοχαλικών" έχει παρατηρηθεί και σε προγενέστερη έρευνα [Kolias and Williams 1978a] σε υλικά που είχαν την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση αλλά διέφεραν στο ότι το ένα ήταν φυσικό - συλλεκτό υλικό ενώ το άλλο προήλθε από σύνθεση υλικών ορυχείου (άμμος γαρμπίλι, χαλίκι). Το συλλεκτό υλικό είχε εμφανώς προσκολλημένη παιπάλη στην επιφάνεια των αδρανών ενώ το υλικό που δημιουργείται με ανασύνθεση δεν παρουσίαζε προσκολλημένη παιπάλη στην επιφάνεια των αδρανών.

Γενικά παρατηρείται ότι η επίδραση της προέλευσης του θραυστού υλικού, και ιδιαίτερα η επίδραση της παιπάλης που είναι προσκολλημένη στην επιφάνεια των χονδρόκοκκων υλικών, φαίνεται ότι ελαττώνεται όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού στο μίγμα. Αυτό αποδίδεται κυρίως στους ακόλουθους λόγους:

- ο Με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφατομίγματος, μειώνεται το ποσοστό του θραυστού υλικού, και επομένως και η επίδρασή του στα μηχανικά χαρακτηριστικά του μίγματος
- ο Ένα ποσοστό του λεπτού υλικού (συμπεριλαμβανομένης και της προσκολλημένης στην επιφάνεια των χονδρών αδρανών παιπάλης) πιστεύεται

ότι δεσμεύεται από τις ασφαλικές επιφάνειες του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και με τον τρόπο αυτό εξουδετερώνεται η βλαπτική δράση της παιπάλης στη συνάφεια τσιμέντου - αδρανών. Η δέσμευση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της ανάμιξης αλλά και κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, όπου οι ασφαλικές επιφάνειες των κόκκων του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος έρχονται σε επαφή με τους κόκκους των αδρανών που έχουν επικολλημένη παιπάλη στην επιφάνειά τους.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού Α αλλά και του υλικού Β (με κοινό χαρακτηριστικό το θραυστό υλικό ΘΑ1) δεν μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού (στο υλικό Β έχουμε μία μικρή μείωση από Β0 σε Β25 αλλά η αντοχή δεν μειώνεται στο Β50) επιβεβαιώνοντας έτσι για ακόμη μία φορά τα αποτελέσματα της κύριας έρευνας (διακεκομμένη γραμμή). Τα υλικά όμως Γ, Δ, Ε και ΣΤ διαφέρουν από τα Α, Β και της κύριας έρευνας διότι περιέχουν υλικό ΘΑ2 ή το πλυμένο υλικό ΠΘΑ1, δηλαδή διαφέρουν ως προς την επικολλημένη παιπάλη στα αδρανή. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη μείωση της εφελκυστικής αντοχής με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου αμμοχαλικού, όπως θεωρητικά θα έπρεπε να αναμένεται, διότι τα αδρανή του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος έχουν προφανώς μικρότερη αντοχή από τα θραυστά αδρανή ή η αντοχή συνάφειας είναι μικρότερη. Αυτή η ιδιαίτερη συμπεριφορά των υλικών της κύριας έρευνας (σε αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη (ΕΜΠ) και διάρρηξη (ΕΚΕΤ)), η οποία επαναλήφθηκε και στα υλικά Α και Β δεν μπορεί να αποδοθεί σε τυχαίους λόγους οφειλόμενους στην αναπόφευκτη μεταβλητότητα των δοκιμών σε εφελκυσμό. Όλα τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν αναλυτικά παραπάνω, συνηγορούν στη μετά βεβαιότητας αποδοχή της ιδιαιτερότητας του θραυστού υλικού ΘΑ1 και ειδικότερα στην ύπαρξη επικολλημένης παιπάλης στην επιφάνεια των χονδρόκοκκων αδρανών.

Το θέμα παρουσιάζει θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για ακόμα πληρέστερη διερεύνηση, με προσπάθεια ποσοτικοποίησης και ποιοτικής διαφοροποίησης της επικολλημένης παιπάλης (ποσότητα, είδος, μορφή και μέγεθος κόκκων προσκολλημένης παιπάλης).

Ανακεφαλαιωτικά συμπεραίνεται ότι :

- ο Η επίδραση της προέλευσης του φρεζαρισμένου υλικού (εφόσον αυτό προέρχεται από διαφορετικές μεν θέσεις αλλά από ασφαλτόμειγμα A265 κλειστού τύπου) είναι μέσα στα όρια της μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητας και επομένως μπορεί να λεχθεί ότι δεν φαίνεται να επηρεάζει την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων μιγμάτων σημαντικά.
- ο Η επίδραση της "καθαρότητας" του θραυστού αμμοχάλικου, όπως αυτή εκφράζεται με την περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό και ιδιαίτερα σε παιπάλη, είναι σημαντική για την αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη. Τα καθαρότερα θραυστά υλικά δίνουν μεγαλύτερες τιμές αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, ιδιαίτερα όταν το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομείγματος είναι μηδενικό.
- ο Η επίδραση της παιπάλης που είναι επικολλημένη στην επιφάνεια των χονδρών αδρανών είναι καθοριστική και μειώνει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό και τα μέτρα ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό.
- ο Η βλαβερή επίδραση της επικολλημένης παιπάλης μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να εξουδετερωθεί από την ύπαρξη φρεζαρισμένου υλικού στο μίγμα μέχρι ποσοστού 50 % περίπου.

5.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

5.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ (ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΡΡΗΞΗ)

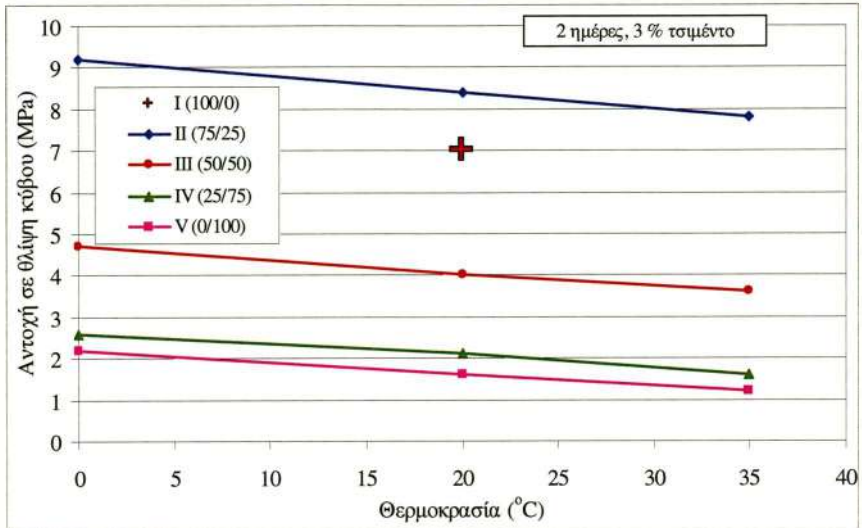
Η επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε δοκιμές θλίψης κύβου και σε δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού (διάρρηξη), όπως περιγράφηκε στις Παραγράφους 3.5.2.2, 3.6 και 3.7.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στους Πίνακες 4.9 - 4.16 (Μέσοι όροι και μεμονωμένα αποτελέσματα) στην Παράγραφο 4.2. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων των δοκιμών σχολιάζεται στην Παράγραφο 5.1. Η επίδραση της ηλικίας στην αντοχή κύβου και κυλίνδρου σε διάρρηξη, για τη θερμοκρασία των 20 °C δίνεται στην Παράγραφο 5.2.4. Εδώ σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στο σύνολό τους.

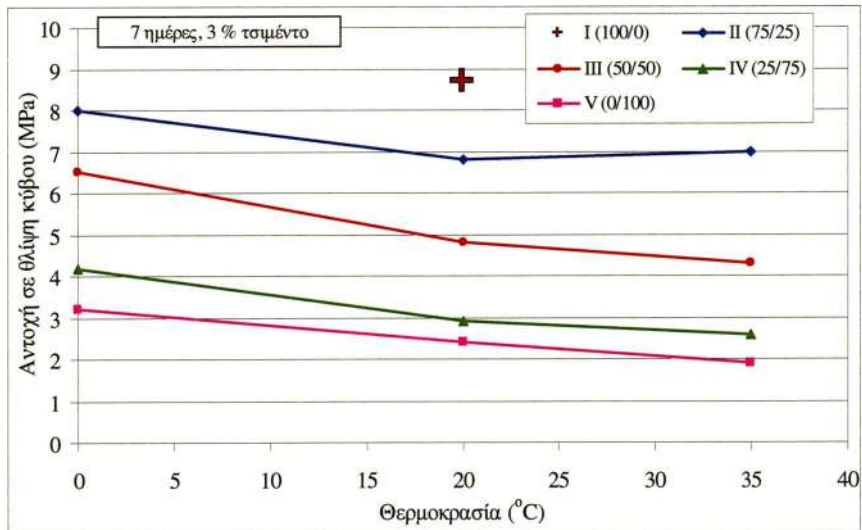
Στα Σχήματα 5.50 - 5.52 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή στη θλιπτική αντοχή κύβου για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικίες 2 (ή 3 για το υλικό V), 7 και 60 ημερών αντίστοιχα, για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν (I - V). Τα Σχήματα 5.53 - 5.55 είναι αντίστοιχα των Σχημάτων 5.50 - 5.52 για ποσοστό τσιμέντου 5 %.

Στα Σχήματα 5.56 - 5.58 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε διάρρηξη για ποσοστό τσιμέντου 3 % και στα Σχήματα 5.59 - 5.61 για 5 % αντίστοιχα, για όλες τις ηλικίες και τα υλικά που εξετάστηκαν.

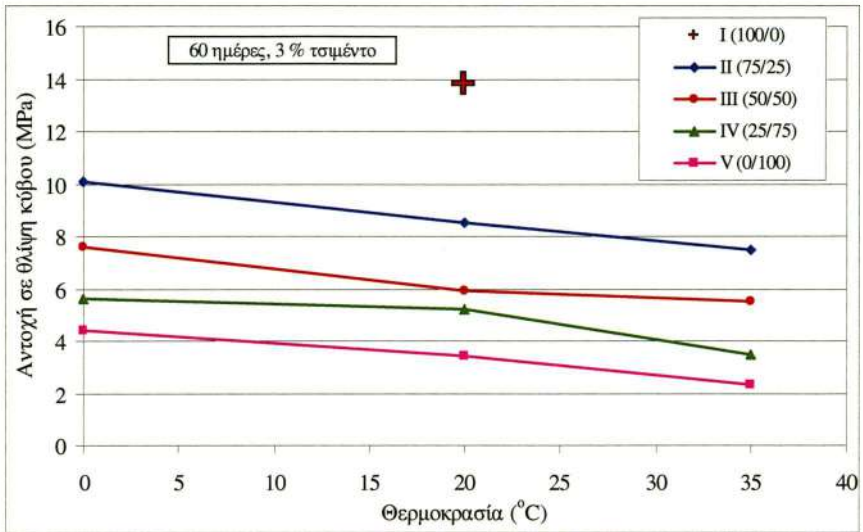
Στα Σχήματα 5.62 - 5.64 φαίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου και της αντοχής σε διάρρηξη για τις θερμοκρασίες 0 °C, 20 °C και 35 °C, σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα, για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικίες 2 (ή 3 για το υλικό V), 7 και 60 ημερών. Στα Σχήματα 5.65 - 5.67 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ποσοστό τσιμέντου 5 % αντίστοιχα.



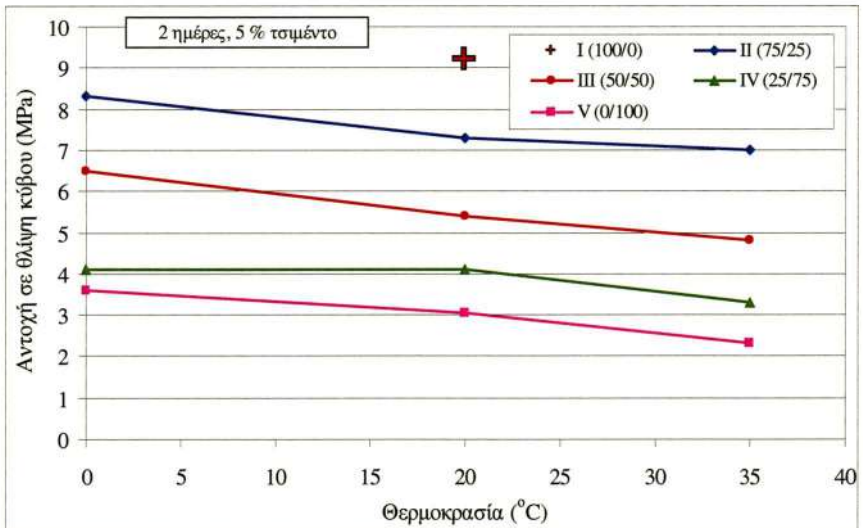
Σχήμα 5.50 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 2 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



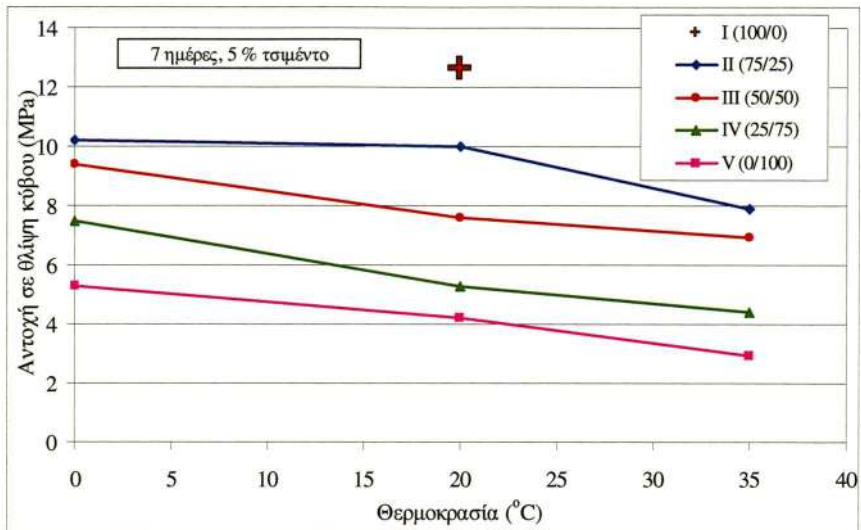
Σχήμα 5.51 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 7 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



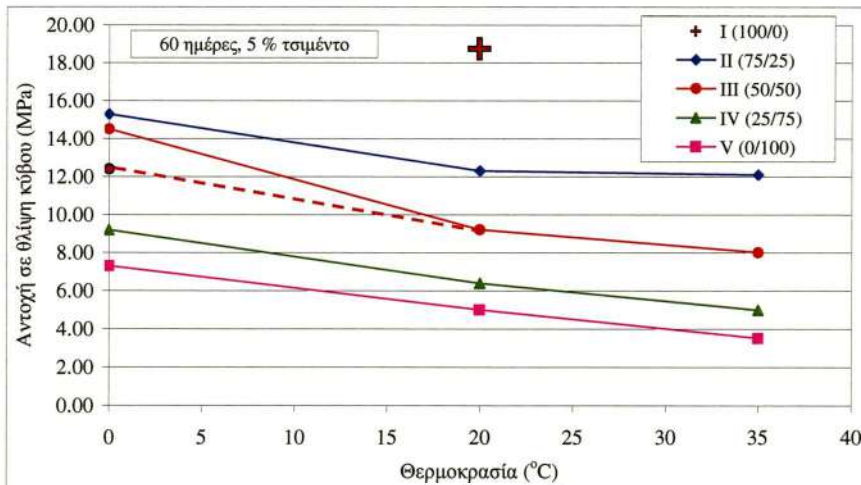
Σχήμα 5.52 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



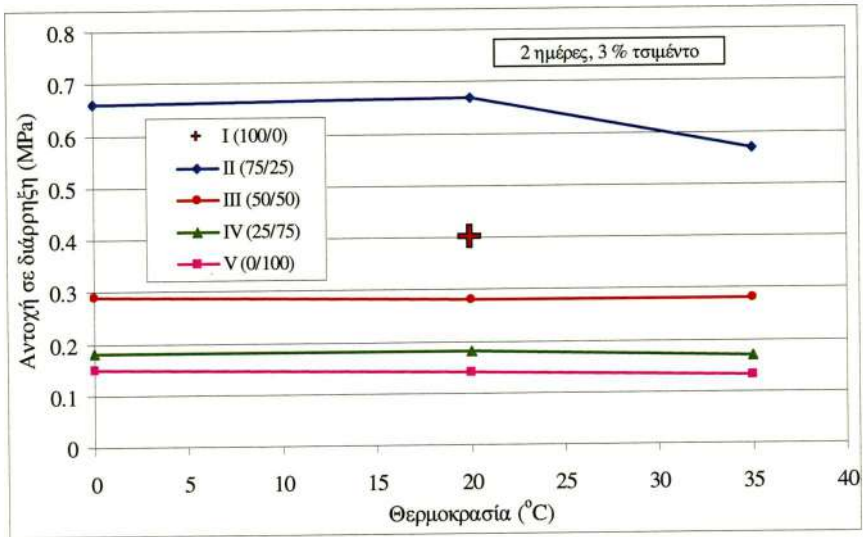
Σχήμα 5.53 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 2 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



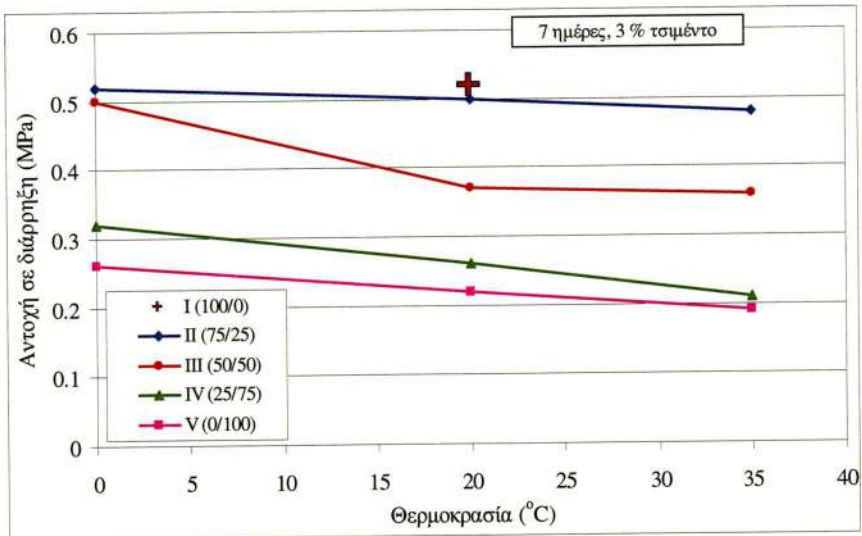
Σχήμα 5.54 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 7 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



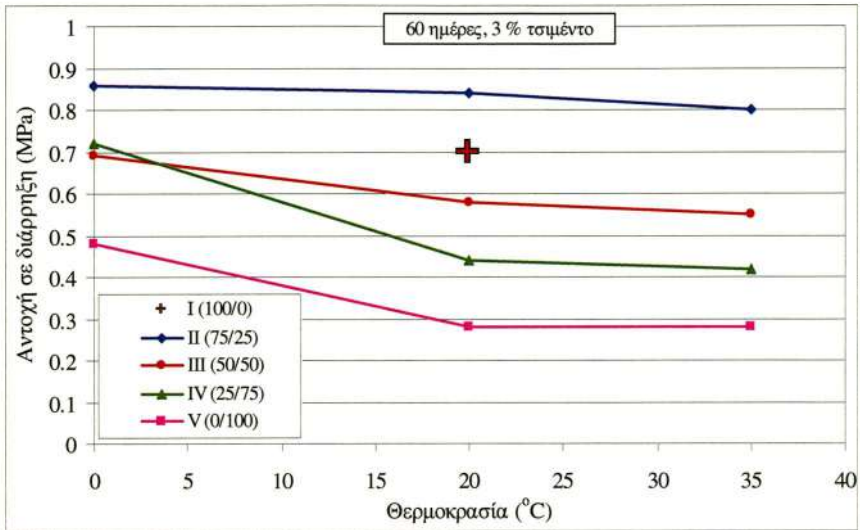
Σχήμα 5.55 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



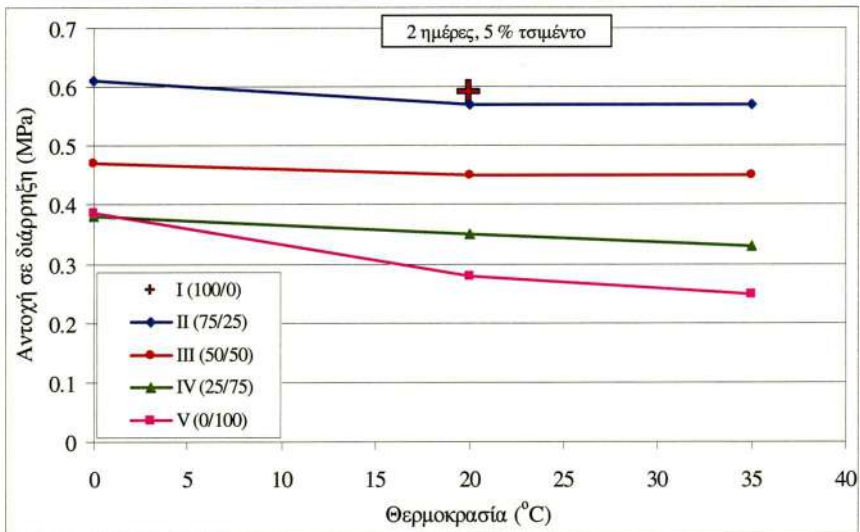
Σχήμα 5.56 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου (έμμεσος εφελκυσμός) σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 2 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



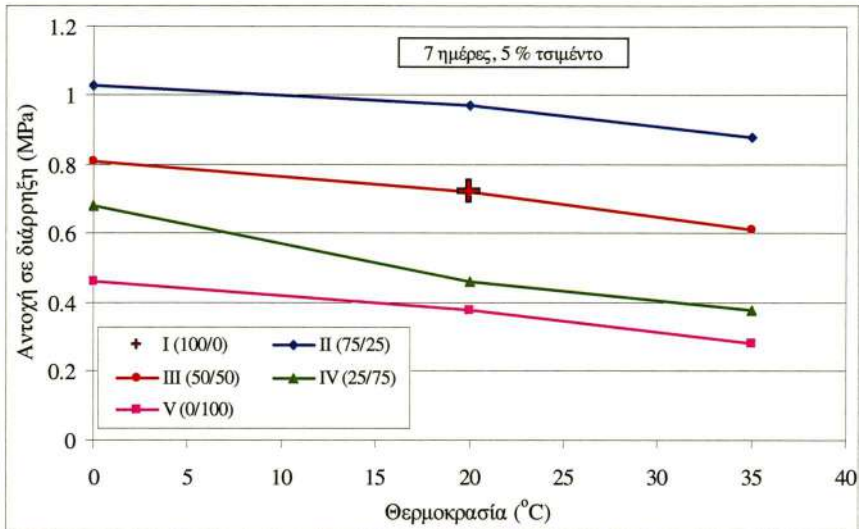
Σχήμα 5.57 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 7 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



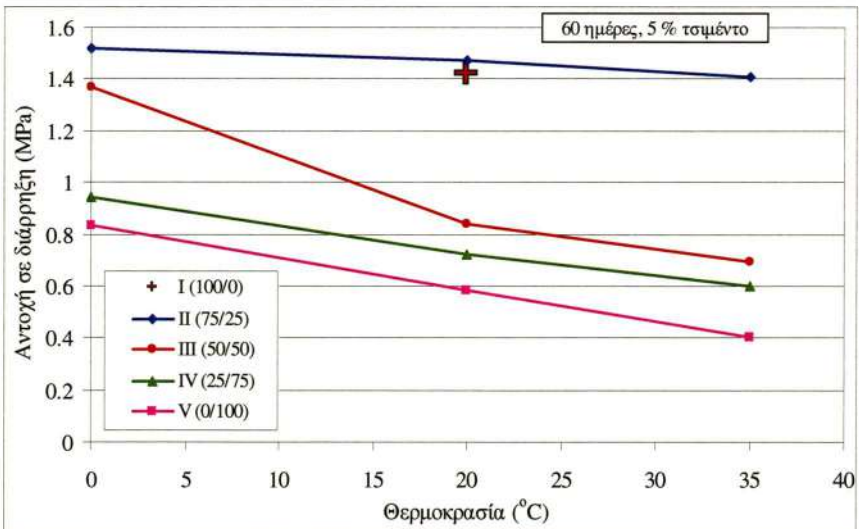
Σχήμα 5.58 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %



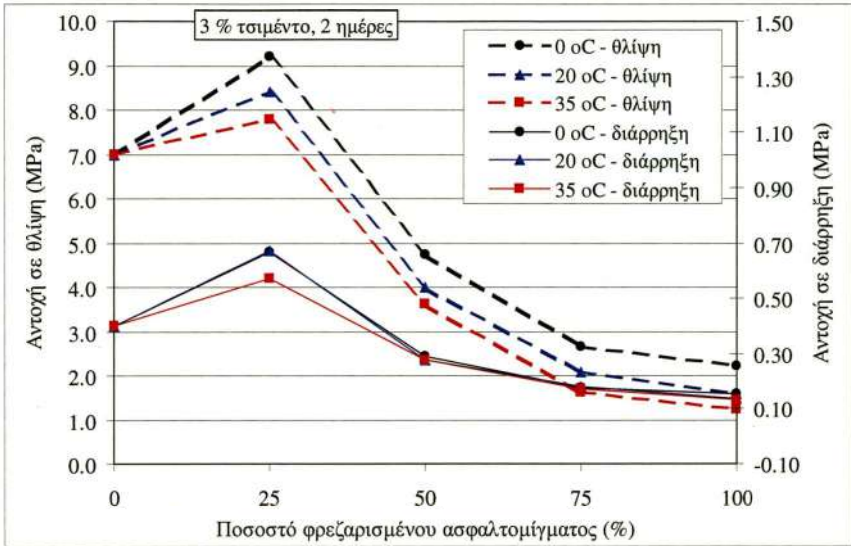
Σχήμα 5.59 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 2 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



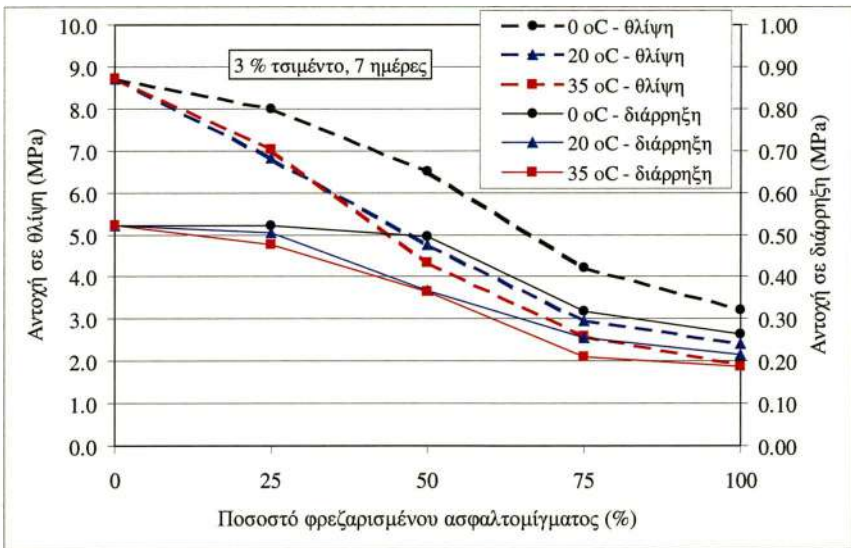
Σχήμα 5.60 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 7 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



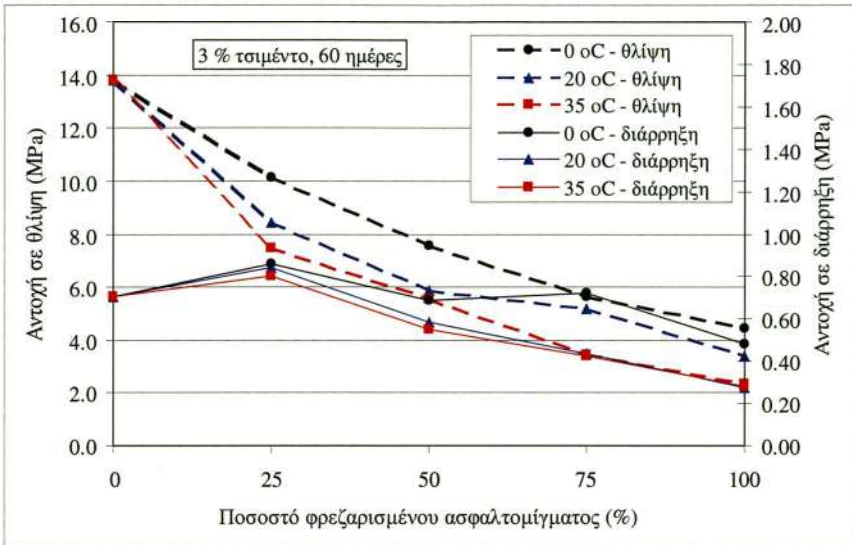
Σχήμα 5.61 : Μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής, για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %



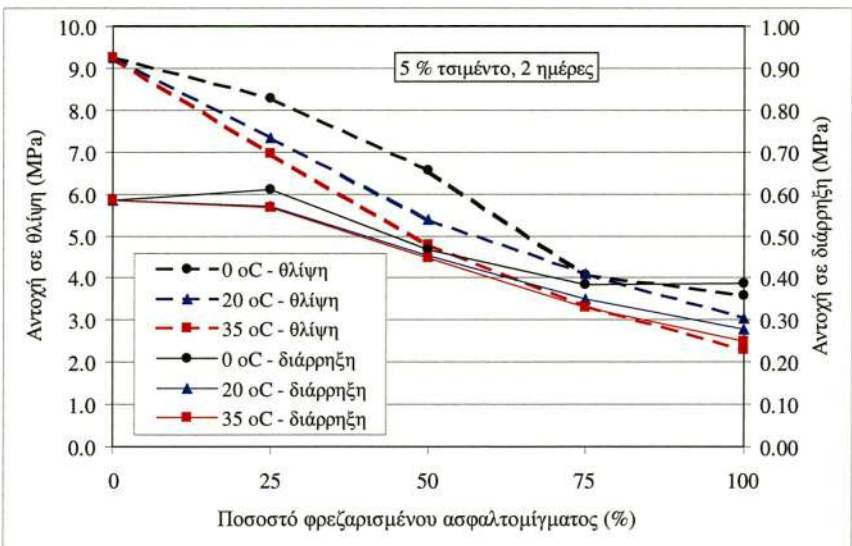
Σχήμα 5.62 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 3 %, ηλικία 2 ημέρες



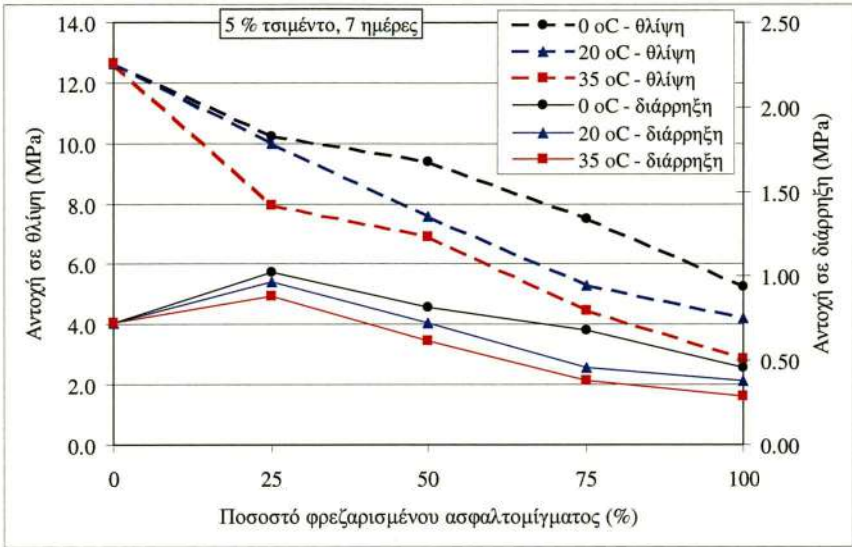
Σχήμα 5.63 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 3 %, ηλικία 7 ημέρες



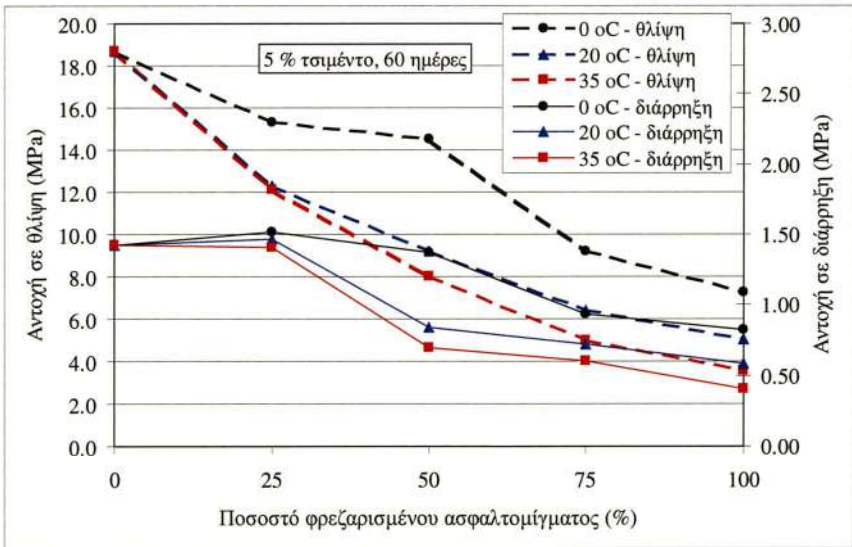
Σχήμα 5.64 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 3 %, ηλικία 60 ημέρες



Σχήμα 5.65 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 5 %, ηλικία 2 ημέρες



Σχήμα 5.66 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 5 %, ηλικία 7 ημέρες



Σχήμα 5.67 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη και σε διάρρηξη σε σχέση με το ποσοστό ΦΑ, για θερμοκρασίες 0, 20 και 35 °C - Τσιμέντο 5 %, ηλικία 60 ημέρες

Από τα Σχήματα 5.50 - 5.55 διαπιστώνεται ότι η θλιπτική αντοχή μειώνεται, όσο αυξάνει η θερμοκρασία της δοκιμής. Παρατηρείται μία αξιοσημείωτη ομοιότητα των διαγραμμάτων συσχέτισης αντοχής σε θλίψη και θερμοκρασίας για διάφορες ηλικίες, ποσοστά τσιμέντου και ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος. Οι γραμμές μεταβολής της αντοχής με τη θερμοκρασία για διάφορα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος είναι σχεδόν παράλληλες, υποδεικνύοντας έτσι ότι η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σχεδόν η ίδια για όλα τα εξετασθέντα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και για το εύρος των θερμοκρασιών που εξετάστηκαν. Υπάρχουν φυσικά και εξαιρέσεις, όπως στο Σχήμα 5.51 και το Σχήμα 5.54 για το υλικό II (75/25) για τσιμέντο 3 % και 5 % αντίστοιχα, όπου τα σημεία αυτά στηρίζονται σε δύο μόνο δοκιμές, ή στο Σχήμα 5.55 για το υλικό III (50/50) και τσιμέντο 5 %. Το "ανώμαλο" αυτό σημείο αποδίδεται σε μία ασυνήθιστα μεγάλη τιμή αντοχής (18.7 MPa), η οποία αν εξαιρεθεί, επαναφέρει τη γραμμή στον γενικό κανόνα (διακεκομμένη γραμμή).

Η αντοχή σε διάρρηξη, Σχήματα 5.56 - 5.61, γενικά μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία κατά τη δοκιμή. Βέβαια, η μείωση της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος δεν είναι τόσο σαφής πάντα, όπως στην περίπτωση της θλίψης, (Σχήμα 5.56 υλικό II - που στηρίζεται μόνο σε δύο αποτελέσματα, άρα είναι μειωμένης ακρίβειας, Σχήμα 5.57 υλικό III - συντελεστής μεταβλητότητας 24.1 %, Σχήμα 5.58 υλικά IV και V, Σχήμα 5.59 υλικό V, Σχήμα 5.61 υλικά II και III).

Η μείωση της αντοχής σε σχέση με τη θερμοκρασία θα έπρεπε να είναι εντονότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα, λόγω της μείωσης του μέτρου δυσκαμψίας και κατά συνέπεια του ιξώδους της ασφάλτου των κόκκων του φρεζαρισμένου υλικού. Υπό σταθερή επομένως τάση, το ποσοστό του μίγματος που αποτελείται από φρεζαρισμένο ασφαλομίγμα αναλαμβάνει μικρότερη τάση, συνεπώς το υπόλοιπο τμήμα αναλαμβάνει μεγαλύτερη τάση, γεγονός που το οδηγεί σε πρόωρη αστοχία.

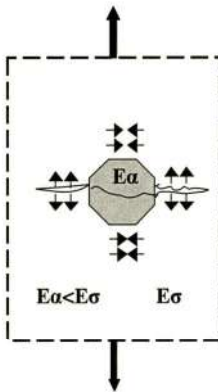
Η δοκιμή σε θλίψη εκτιμάται ότι πιθανόν να επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμοκρασία σε σχέση με τη δοκιμή σε εφελκυσμό. Αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι η αστοχία σε εφελκυσμό λαμβάνει χώρα άμεσα σχεδόν μόλις αναπτυχθεί μία ρωγμή,

η οποία στην περίπτωση ύπαρξης φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα σχηματίζεται πιο γρήγορα απ' ότι αναμένεται όταν η θερμοκρασία αυξηθεί, διότι το ΦΑ αναλαμβάνει μικρότερο φορτίο λόγω ελαττωμένου μέτρου δυσκαμψίας (Σχήμα 5.68α). Στην περίπτωση της δοκιμής σε θλίψη η αστοχία προέρχεται από έμμεση υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής και αντοχής συνάφειας, με ρωγμές όμως αναπτυσσόμενες κάθετα προς τη διεύθυνση της επιβολής της δύναμης, και επομένως η ανάπτυξή τους και η επέκτασή τους είναι δυσκολότερη. Αντίθετα στη δοκιμή σε εφελκυσμό, οι εφελκυστικές τάσεις είναι παράλληλες προς την επιβαλλόμενη δύναμη και η αναπτυσσόμενη ρωγμή είναι κάθετη προς τη δύναμη [Lusche 1972], με αποτέλεσμα το άνοιγμά της και η επέκτασή της να είναι ευκολότερη αφού επηρεάζεται άμεσα από την επιβαλλόμενη τάση και παραμόρφωση (Σχήμα 5.68β). Στην περίπτωση όμως της δοκιμής σε διάρρηξη (έμμεσου εφελκυσμού) λόγω του αναπτυσσόμενου διαξονικού (και πιθανώς τριαξονικού) εντατικού πεδίου, το οποίο στο κέντρο του δοκιμίου και σε αρκετό τμήμα της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου είναι εφελκυσμός - θλίψη, θα έπρεπε κανονικά να παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας των αδρανών από φρεζαρισμένο ασφαλομίγμα. Στην παρούσα έρευνα υπάρχει κάποια ένδειξη για αύξηση της κλίσης όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα, για ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικίες 7 και 60 ημερών, Σχήμα 5.57 και 5.58, και κυρίως από το Σχήμα 5.61 για ποσοστό τσιμέντου 5 % και ηλικία 60 ημερών. Όμως, με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα και θα πρέπει να γίνουν περισσότερες δοκιμές.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η δοκιμή σε διάρρηξη παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα (επαναληψιμότητα 14 % βάσει του ASTM C496/C496M-04) και αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, όσον αφορά τον αριθμό των δοκιμών που πρέπει να γίνουν για την εξαγωγή πλήρως τεκμηριωμένων αποτελεσμάτων.

Από τα Σχήματα 5.62 - 5.67 παρατηρείται ότι γενικά, ενώ η αντοχή σε θλίψη μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα (με εξαίρεση το ποσοστό τσιμέντου 3 % και ηλικία μίας ημέρας για τα υλικά I και II), δεν συμβαίνει το ίδιο και με την αντοχή σε διάρρηξη. Για όλα τα υλικά, όλες τις θερμοκρασίες και όλες τις ηλικίες δοκιμής παρατηρείται μείωση (σημαντική στις περισσότερες περιπτώσεις) της αντοχής του υλικού I σε σχέση με το υλικό II.

Αυτό αποδίδεται στη μείωση της επιβλαβούς επίδρασης της παιπάλης στη συνάφεια τσιμέντου - αδρανών, όταν αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού (25 %), όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 5.2.4.

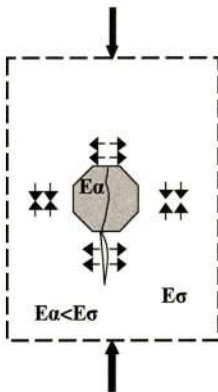


Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις με διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης δύναμης.

Η ρωγμή που σχηματίζεται επεκτείνεται μέσα στο μικρότερης αντοχής αδρανές από ασφαλικό κονίαμα.

Ρωγμή κάθετη προς τη διεύθυνση της δύναμης. Ταχύτερη επέκταση.

Σχήμα 5.68α : Απλοποιημένο στοιχειώδες τμήμα δοκιμίου σε εφελκυσμό με αδρανή μέτρον ελαστικότητας E_a μικρότερου από το μέτρο ελαστικότητας E_σ του συνδετικού υλικού, $E_a < E_\sigma$



Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις με διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση της ασκούμενης δύναμης

Η αναπτυσσόμενη ρωγμή έχει κατ' αρχήν διεύθυνση παράλληλη προς την ασκούμενη δύναμη. Αργή επέκταση.

Επέκταση μέσα από το αδρανές που συνήθως έχει μικρότερη αντοχή από το συνδετικό μέσον.

Σχήμα 5.68β : Απλοποιημένο στοιχειώδες τμήμα δοκιμίου σε θλίψη με αδρανή μέτρον ελαστικότητας E_a μικρότερου από το μέτρο ελαστικότητας του συνδετικού υλικού E_σ , $E_a < E_\sigma$

5.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ (ΘΛΙΨΗ, ΚΑΜΨΗ) ΚΑΙ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Σε μία πρόσθετη έρευνα (Παράγραφος 3.8), [Κόλιας et al, 2005β], και για την πληρέστερη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή στην αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, παρασκευάστηκαν δοκίμια πρισματικά διαστάσεων 100 mm * 100 mm * 400 mm (για κάμψη) και 100 mm * 100 mm * 200 mm (για θλίψη) με ποσοστό τσιμέντου 5 %. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κάμψη και σε θλίψη πρίσματος, σε ηλικία 7 ημερών, στις οποίες ταυτόχρονα μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις για την εύρεση των αντίστοιχων μέτρων ελαστικότητας. Μετά τη δοκιμή σε κάμψη, στα τμήματα των δοκιμών κάμψης έγινε δοκιμή ισοδύναμου κύβου.

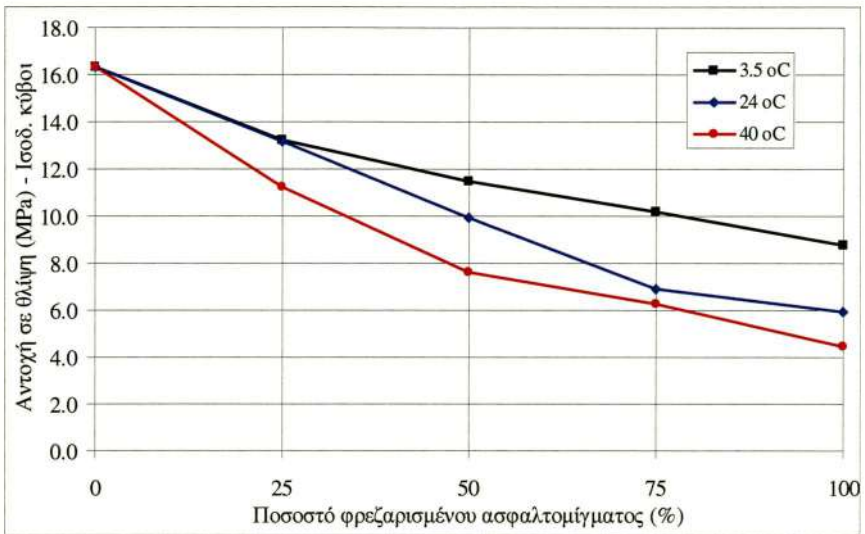
Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στην Παράγραφο 4.2, στους Πίνακες 4.17 (Μ.Ο) και 4.18 - 4.20 (μεμονωμένα αποτελέσματα). Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, ως προς την ακρίβειά τους, δίνεται στην Παράγραφο 5.1.

Όλα τα Σχήματα δίνονται με δύο μορφές :

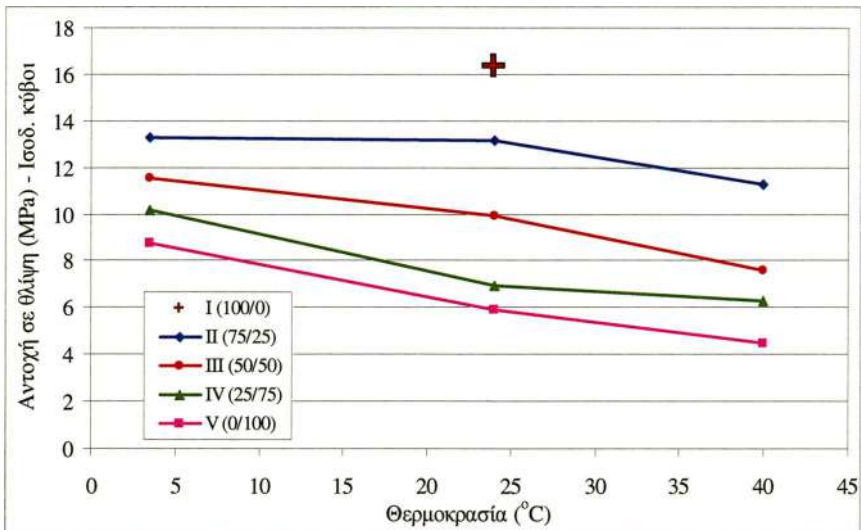
- ο Μεταβολή της αντοχής ή του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (για όλες τις θερμοκρασίες που εξετάστηκαν)
- ο Μεταβολή της αντοχής ή του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία δοκιμής (για όλα τα υλικά που εξετάστηκαν).

Στα Σχήματα 5.69 - 5.70 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας της δοκιμής στην αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου για διάφορα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα. Στα Σχήματα 5.71 - 5.72 και 5.73 - 5.74 φαίνεται αντίστοιχα η επίδραση της θερμοκρασίας του δοκιμίου στη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη πρίσματος και στην κάμψη.

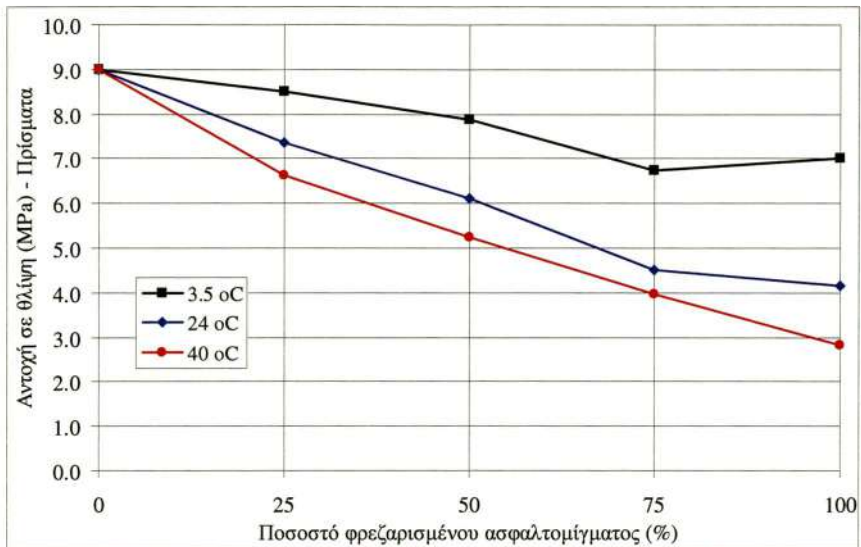
Στα Σχήματα 5.75 - 5.78 φαίνεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη (Σχήματα 5.75 - 5.76) και κάμψη (Σχήματα 5.77 - 5.78).



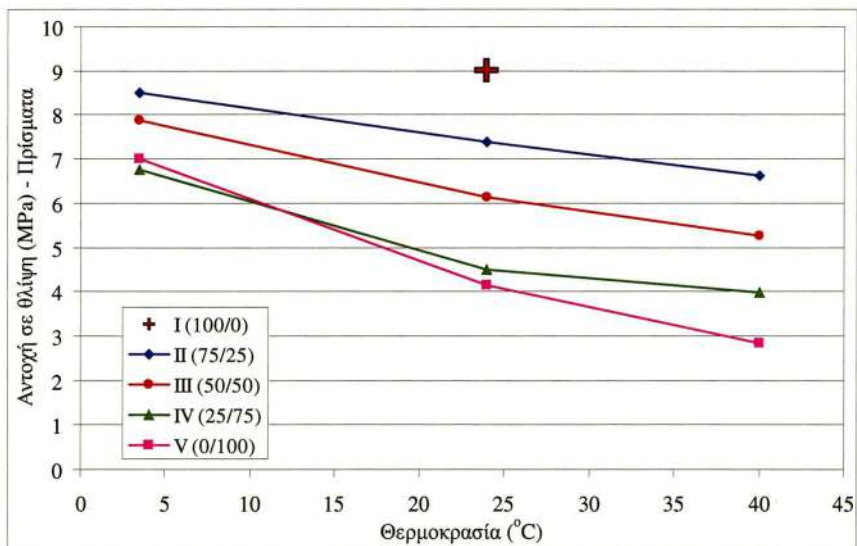
Σχήμα 5.69 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για θερμοκρασίες 3.5, 24 και 40 °C



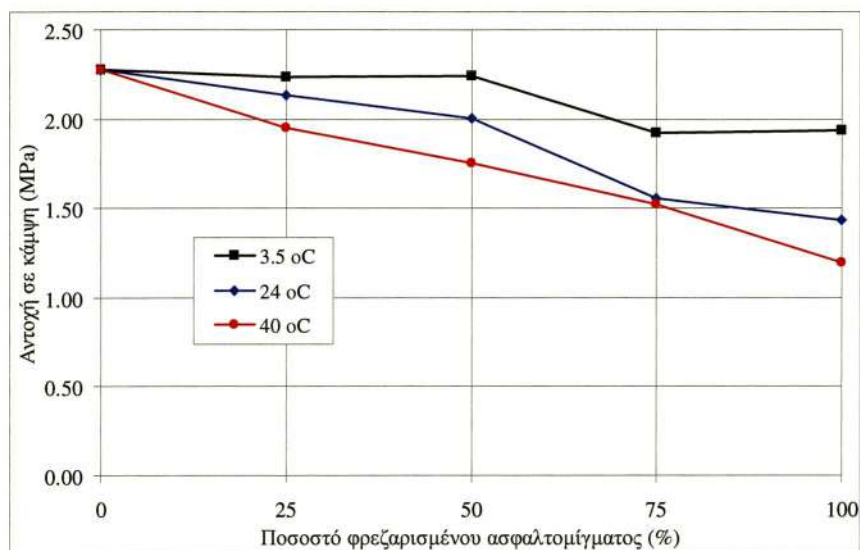
Σχήμα 5.70 : Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων (στα διάφορα μίγματα που εξετάστηκαν)



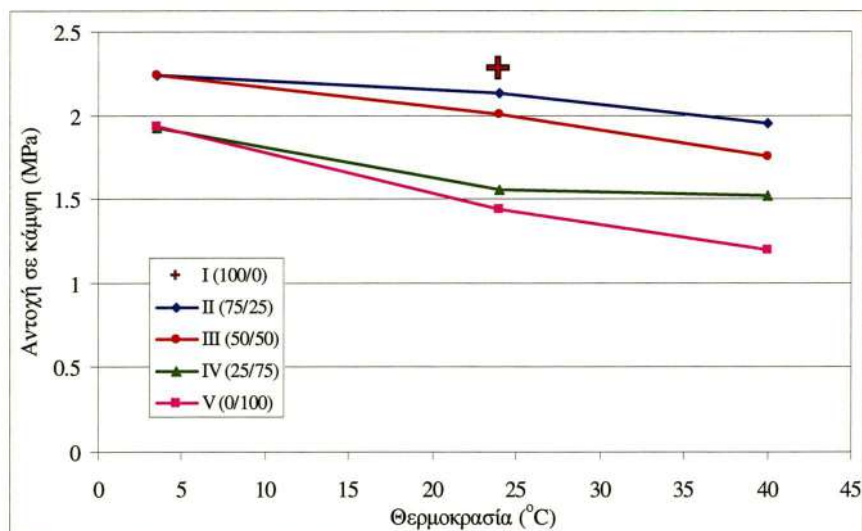
Σχήμα 5.71 : Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη πρισμάτων σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για θερμοκρασίες 3.5, 24 και 40 °C



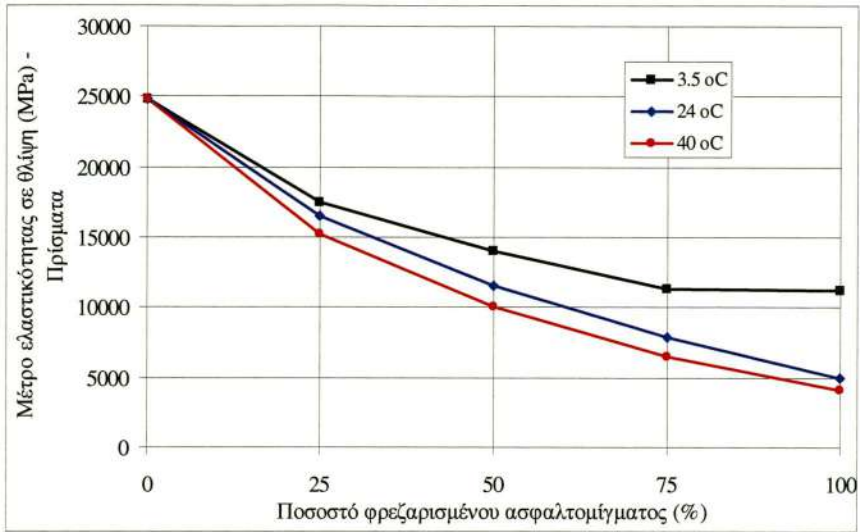
Σχήμα 5.72 : Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε θλίψη πρισμάτων (στα διάφορα μίγματα που εξετάστηκαν)



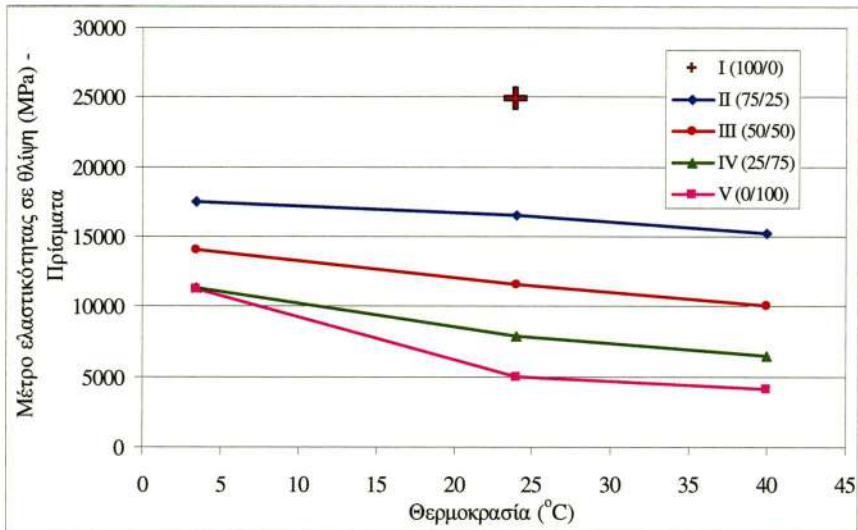
Σχήμα 5.73 : Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για θερμοκρασίες 3.5, 24 και 40 °C



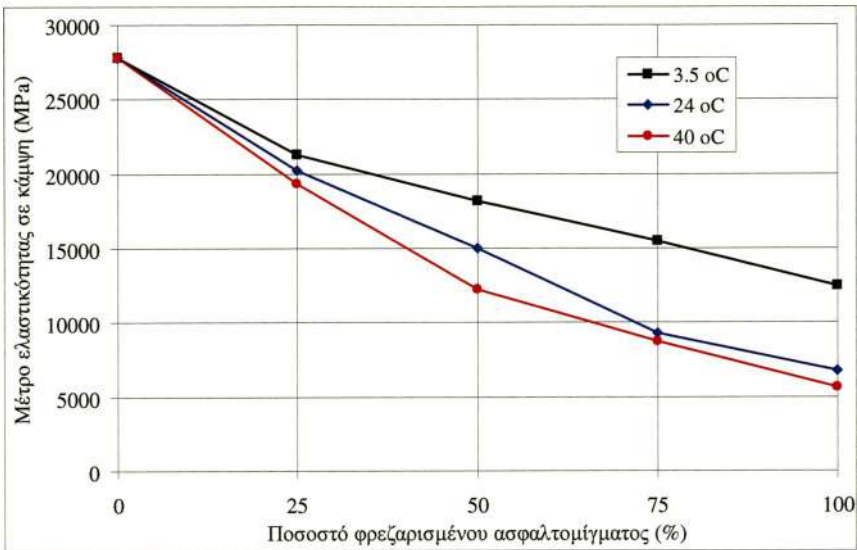
Σχήμα 5.74 : Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε κάμψη (στα διάφορα μίγματα που εξετάστηκαν)



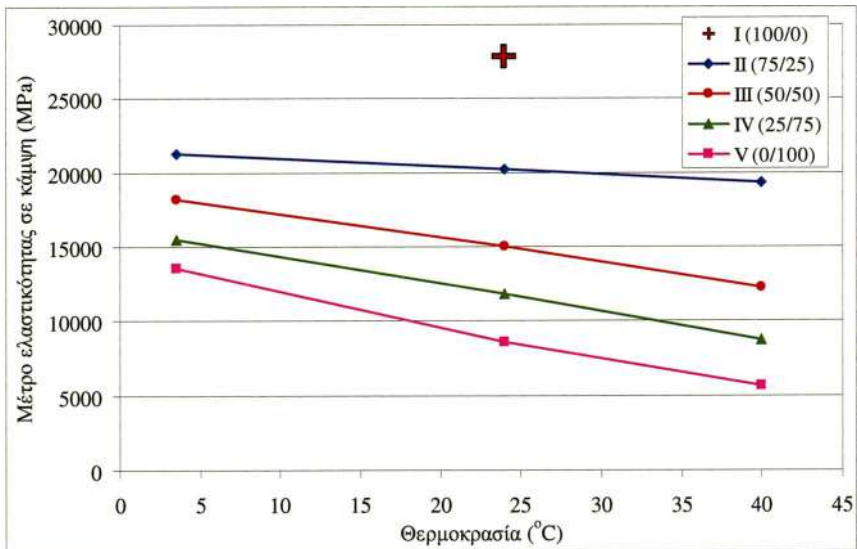
Σχήμα 5.75 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για θερμοκρασίες 3.5, 24 και 40 °C



Σχήμα 5.76 : Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (στα διάφορα μίγματα που εξετάστηκαν)



Σχήμα 5.77 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για θερμοκρασίες 3.5, 24 και 40 °C



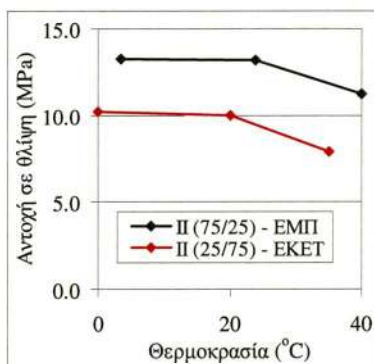
Σχήμα 5.78 : Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (στα διάφορα μίγματα που εξετάστηκαν)

Από τα Σχήματα παρατηρείται κατ' αρχήν, ότι όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, τόσο μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας.

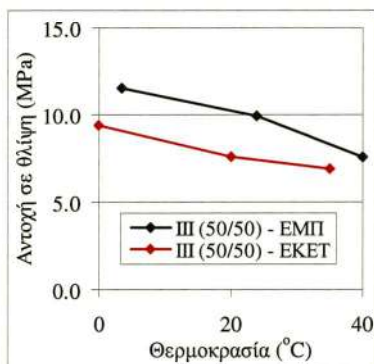
Επίσης παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τόσο την αντοχή όσο και το μέτρο ελαστικότητας. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα. Αυτό είναι αναμενόμενο, επειδή τα αδρανή υλικά του μίγματος δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία ενώ οι κόκκοι του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αποτελούνται από ασφαλτικό κονίαμα ή από κόκκους αδρανών περιβεβλημένους από ασφαλτόμιγμα ή από συνδυασμό των δύο προηγούμενων περιπτώσεων, επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της Παραγράφου αυτής με τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.1 παρατηρείται γενικά ότι η συμπεριφορά των υλικών είναι παρόμοια και στις δύο έρευνες. Μικρές σχετικές διαφορές ως προς το ύψος των τιμών μπορεί να αποδοθούν στο ότι το τσιμέντο είναι μεν του ίδιου τύπου, αλλά από διαφορετική παρτίδα παραλαβής.

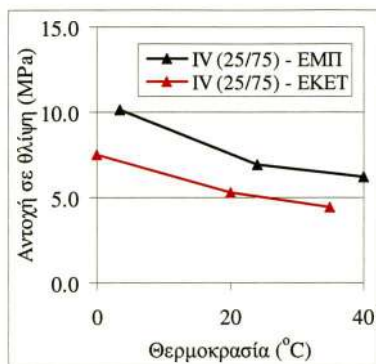
Πιο συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.79 - 5.82 φαίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τη θερμοκρασία για κάθε ένα από τα υλικά II - V, που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 5.54 - ΕΚΕΤ (Παράγραφος 5.3.1) και 5.70 - ΕΜΠ (Παράγραφος 5.3.2).



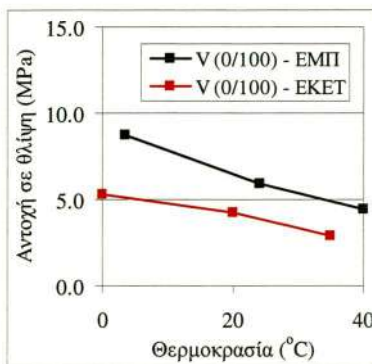
Σχήμα 5.79 : Αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό II



Σχήμα 5.80 : Αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό III



Σχήμα 5.81 : Αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό IV



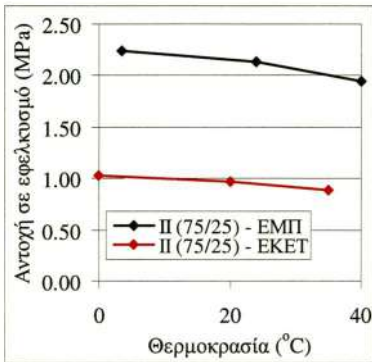
Σχήμα 5.82 : Αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό V

Σημειώνεται ότι το Σχήμα 5.54 αναφέρεται σε θλιπτική αντοχή κύβου (ΕΚΕΤ) και το Σχήμα 5.70 σε θλιπτική αντοχή ισοδύναμου κύβου (ΕΜΠ). Από τη σύγκριση των Σχημάτων παρατηρείται ότι οι κλίσεις των ευθειών αντοχή - θερμοκρασία είναι σχεδόν οι ίδιες και για τις δύο έρευνες, με εξαίρεση το υλικό V (0/100). Ειδικά για το υλικό II είναι αξιοσημείωτη η ταύτιση. Το γεγονός αυτό προσδίδει αυξημένη εμπιστοσύνη στις μετρήσεις, μια που η σύγκριση αφορά δοκιμές που έγιναν σε διαφορετικά εργαστήρια, (ΕΚΕΤ και ΕΜΠ).

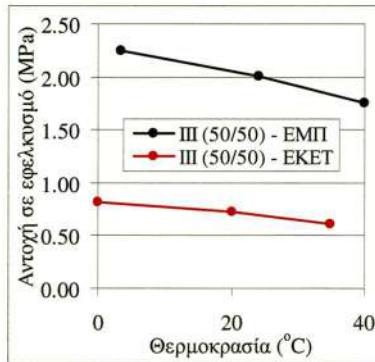
Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι για εύρος θερμοκρασίας από 0 °C έως 40 °C περίπου, η επίδραση της θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Η ακριβής τιμή της θλιπτικής αντοχής εξαρτάται από το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα, από το ποσοστό και τον τύπο του τσιμέντου και από την ηλικία.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην εφελκυστική αντοχή. Στα Σχήματα 5.83 - 5.86 γίνεται σύγκριση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σε σχέση με τη θερμοκρασία για κάθε ένα από τα υλικά II - V, που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 5.60 (Παράγραφος 5.3.1) και 5.73 (Παράγραφος 5.3.2). Σημειώνεται ότι το Σχήμα 5.60 αναφέρεται σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) και το Σχήμα 5.74 σε αντοχή σε κάμψη. Παρόλο που τα Σχήματα 5.83 - 5.86 αναφέρονται σε διαφορετικές δοκιμές, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί και σε διαφορετικά εργαστήρια, παρατηρείται, όπως και στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής, μία αξιοσημείωτη ταύτιση της κλίσης της ευθείας, για κάθε υλικό. Στο υλικό V, η διαφορά της κλίσης που παρουσιάζεται είναι

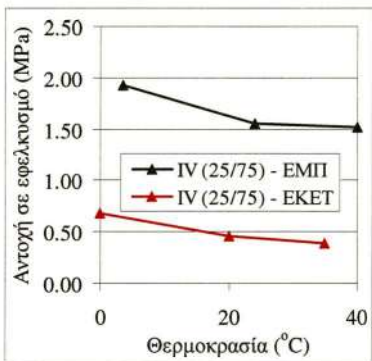
η μεγαλύτερη από όλα τα υπόλοιπα υλικά, η οποία αποδίδεται στο ότι το υλικό αυτό παρουσιάζει γενικώς τη μεγαλύτερη διασπορά.



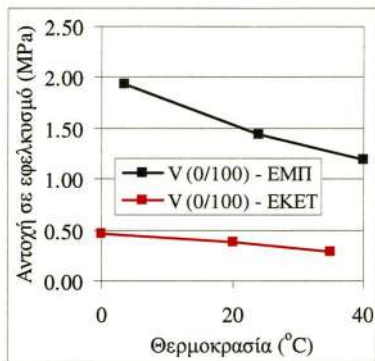
Σχήμα 5.83 : Αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό II



Σχήμα 5.84 : Αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό III



Σχήμα 5.85 : Αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό IV



Σχήμα 5.86 : Αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με τη θερμοκρασία για το υλικό V

Σημειώνεται ότι ανάλογη επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας παρατηρήθηκε σε έρευνα για σκυροδέματα οδοστρωμάτων [Mathias et al 2004].

5.4 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Οι δοκιμές ερπυσμού πραγματοποιήθηκαν στο 1/3 του φορτίου θραύσης, σε δοκίμια ηλικίας 1 και 35 ημερών, σε θερμοκρασία 23 °C. Επιπλέον, στην ηλικία των 35 ημερών οι δοκιμές έγιναν και σε θερμοκρασία 40 °C. Στα Σχήματα 5.87 - 5.88 φαίνονται οι ερπυστικές παραμορφώσεις για τα υλικά I (100/0) έως V (0/100) ηλικίας 1 ημέρας και 35 ημερών αντίστοιχα, σε θερμοκρασία 23 °C, ενώ στο Σχήμα 5.89 φαίνεται ο ερπυσμός για θερμοκρασία 40 °C.

Για την ηλικία των 35 ημερών στο υλικό V (0/100) κατά τη διάρκεια της δοκιμής επήλθε πρόωρη θραύση του δοκιμίου (και για τις δύο θερμοκρασίες δοκιμής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο φαινόμενο για το υλικό αυτό παρουσιάστηκε αργότερα και σε άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε με άλλο σύστημα δοκιμής (με τη μηχανή δοκιμής MTS).

Οι αιτίες ερπυστικών παραμορφώσεων στα ανακυκλωμένα με τσιμέντο υλικά είναι δύο :

- ο τσιμεντοπολτός (σκληρυμένος)
- τα φρεζαρισμένα αδρανή, και ιδιαίτερα τα τμήματα αυτών που αποτελούνται από ασφαλικό κονίαμα.

Λόγω του μικρού ποσοστού τσιμέντου (5 % κ.β) η ποσότητα τσιμέντου ανά m^3 συμπκνωμένου μίγματος είναι μόνο 120 kg/m^3 περίπου και η ποσότητα του τσιμεντοπολτού περίπου 255 kg/m^3 σε σύγκριση με 490 kg/m^3 τσιμεντοπολτού στα κοινά σκυροδέματα με 300 kg/m^3 τσιμέντο. Επομένως, ο ερπυσμός λόγω τσιμεντοπολτού θα είναι σχετικά μικρός - άρα το μίγμα I (100/0) θα έχει μικρό ερπυσμό - ενώ αντίθετα αναμένεται να είναι μεγαλύτερος στα μίγματα που περιέχουν φρεζαρισμένο υλικό διότι θα προστεθεί και η συμβολή του ερπυσμού των ασφαλικών αδρανών.

Πράγματι αυτό είναι φανερό στα Σχήματα 5.87 - 5.88.

Είναι επίσης φανερό ότι οι ερπυστικές παραμορφώσεις ελαχιστοποιούνται (η κλίση του διαγράμματος γίνεται περίπου οριζόντια) πολύ νωρίς για το υλικό I (100/0) και στις δύο ηλικίες που εξετάστηκαν σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Για τα άλλα υλικά κάτι τέτοιο δεν είναι εμφανές διότι ακόμη και το υλικό II (75/25) παρουσιάζει κάποια

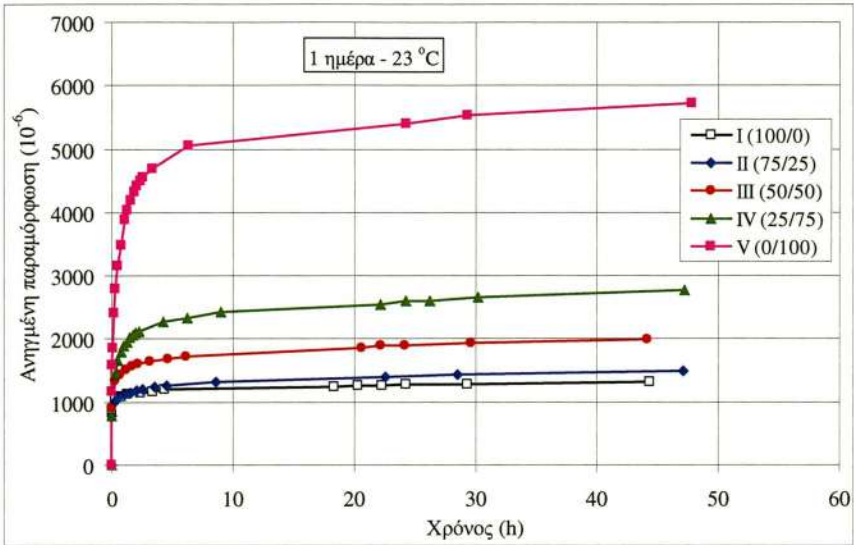
κλίση, έστω μικρή, χωρίς να φαίνεται ότι υπάρχει τάση για οριζοντίωση, ενώ για το υλικό V(0/100) η κλίση είναι εμφανής ακόμη και μετά από σχεδόν 50 ώρες φόρτισης.

Ως προς το ακριβές ύψος των τιμών διατηρούνται κάποιες επιφυλάξεις. Οι τιμές που δίνονται παρουσιάζονται υψηλότερες από αυτές που παρατηρήθηκαν σε μεταγενέστερη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο. Στην παρούσα έρευνα δεν ενδιαφέρει τόσο πολύ το απόλυτο ύψος των τιμών του ερπυσμού, όσο η σύγκριση των τιμών μεταξύ των διαφόρων υλικών που εξετάστηκαν. Πιστεύεται ότι οι τιμές επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο, σε περίπτωση ύπαρξης συστηματικού σφάλματος κατά την εκτέλεση της δοκιμής, και η σύγκριση των υλικών που παρατίθεται είναι σωστή.

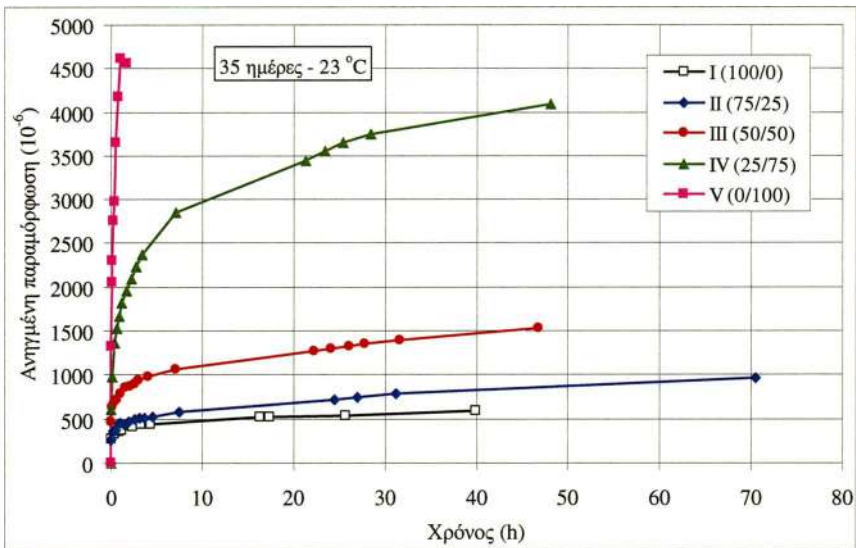
Το υλικό I (100/0) παρουσιάζει σχετικώς μικρές τιμές, ενώ οι ερπυστικές παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος, αφού, όπως έχει ήδη λεχθεί, στην παραμόρφωση συμβάλλει πλέον και η παραμόρφωση του φρεζαρισμένου υλικού. Επίσης, όπως αναμένετο, οι τιμές για την ηλικία των 28 ημερών, με εξαίρεση το υλικό IV (25/75), είναι μικρότερες από αυτές της μίας ημέρας, λόγω της συνεχιζόμενης ενυδάτωσης του τσιμέντου και της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας.

Από το Σχήμα 5.89 παρατηρείται ότι ο ερπυσμός του υλικού II (75/25) είναι μεγαλύτερος αυτού των υλικών III (50/50) και IV (25/75). Διατηρείται κάποια επιφύλαξη ως προς τη δοκιμή του υλικού II.

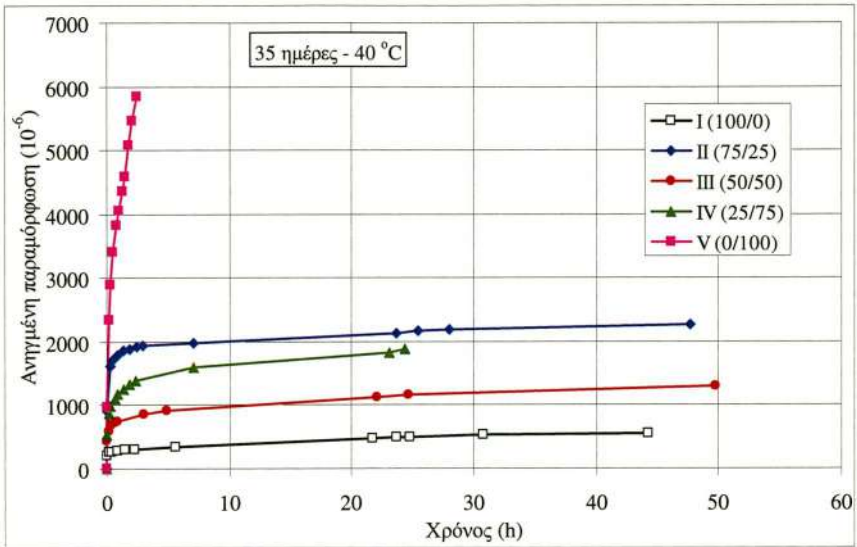
Στα Σχήματα 5.90 - 5.94 δίνονται οι ερπυστικές παραμορφώσεις για κάθε ένα από τα υλικά I έως V και για τις δύο ηλικίες που εξετάστηκαν και για όλες τις θερμοκρασίες δοκιμής.



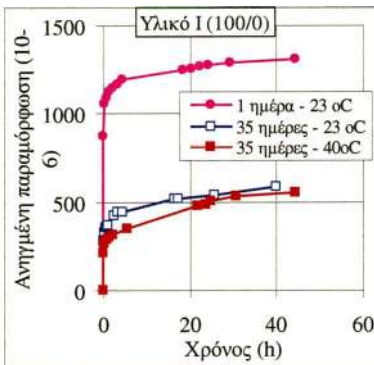
Σχήμα 5.87 : Ερπυστικές παραμορφώσεις, για ηλικία δοκιμής 1 ημέρας



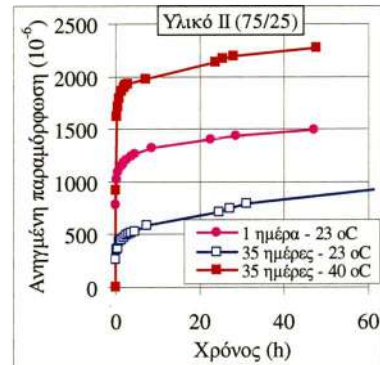
Σχήμα 5.88 : Ερπυστικές παραμορφώσεις, για ηλικία δοκιμής 35 ημερών
Θερμοκρασία 23 °C



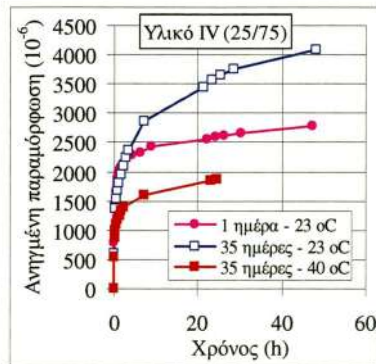
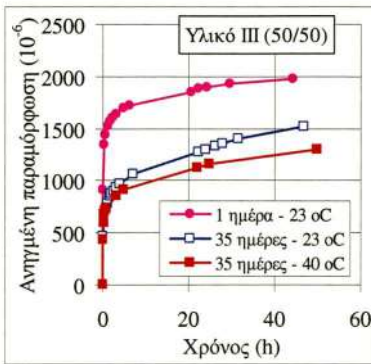
Σχήμα 5.89 : Ερπυστικές παραμορφώσεις, για ηλικία δοκιμής 35 ημερών
Θερμοκρασία 40 °C



Σχήμα 5.90 : Ερπυστικές παραμορφώσεις
υλικού I (100/0)

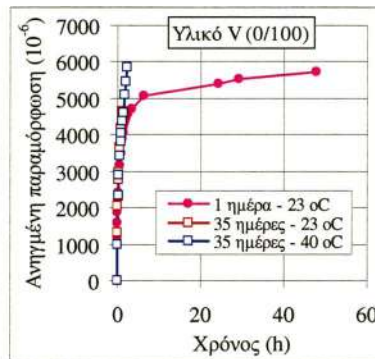


Σχήμα 5.91 : Ερπυστικές παραμορφώσεις
υλικού II (75/25)



Σχήμα 5.92 : Ερπυστικές παραμορφώσεις υλικού III (50/50)

Σχήμα 5.93 : Ερπυστικές παραμορφώσεις υλικού IV (25/75)



Σχήμα 5.94 : Ερπυστικές παραμορφώσεις υλικού I (0/100)

Από τα Σχήματα 5.90 - 5.94 παρατηρείται ότι η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πρακτικά πολύ μικρή για το υλικό I (100/0), όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ είναι σημαντική για τα υπόλοιπα υλικά που περιέχουν και φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. Για το μίγμα II (75/25) (Σχήμα 5.91) -για το οποίο εκφράστηκαν ήδη αμφιβολίες για τη δοκιμή σε θερμοκρασία 40 °C παρατηρείται ότι η επίδραση της θερμοκρασίας είναι σημαντικότερη από την επίδραση της ηλικίας.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη διατριβή αυτή στηρίζονται σε πολύ μικρό αριθμό δοκιμών και προφανώς απαιτούνται περισσότερες δοκιμές για την παρουσίαση αποτελεσμάτων με μεγαλύτερη εμπιστοσύνη στην ακρίβεια των τιμών τους. Οι δοκιμές αυτές θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερη χρονική διάρκεια και να επεκταθούν και σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών, μια που το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία.

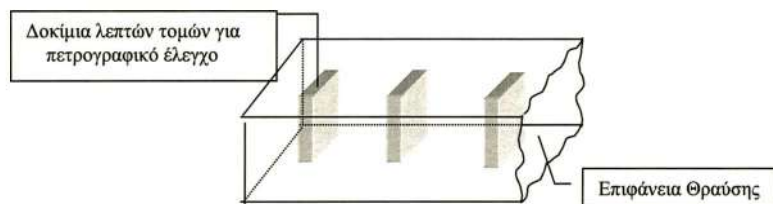
Οι ερπυστικές παραμορφώσεις είναι άθροισμα των ερπυστικών παραμορφώσεων του τσιμεντοπολτού και των ερπυστικών παραμορφώσεων των φρεζαρισμένων ασφαλτικών αδρανών. Εντούτοις, οι ερπυστικές παραμορφώσεις του τσιμεντοπολτού εξαρτώνται από το μέτρο ελαστικότητάς του και επομένως από την ηλικία του, ενώ των ασφαλτικών αδρανών είναι ανεξάρτητες από την ηλικία. Επομένως, το ποσοστό του ερπυσμού που οφείλεται στον ερπυσμό της ασφαλτικής φάσης θα είναι ανεξάρτητο της ηλικίας επιβολής του φορτίου και θα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ύψος του φορτίου. Αντιθέτως η συμβολή του τσιμεντοπολτού στον ερπυσμό εξαρτάται έντονα από την ηλικία, τον λόγο N/T και συγκριτικά πολύ λίγο από τη θερμοκρασία. Ο λόγος N/T (συνήθως N/T είναι 1 έως 1.4) δεν είναι μέγεθος που μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων στις περιπτώσεις ανακυκλώσεων - γιατί η ποσότητα του νερού καθορίζεται από τις δοκιμές συμπυκνώσεως του μίγματος - και δεν σχολιάζεται περαιτέρω.

Σε μικρή ηλικία (1 - 2 ημέρες) επειδή ο ερπυσμός του τσιμεντοπολτού είναι σχετικά μεγάλος θα μεταφέρεται φορτίο από τον τσιμεντοπολτό στα θραυστά αδρανή και στα αδρανή από φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα και επομένως οι τάσεις που αρχικά θα αναλαμβάνουν αυτά τα αδρανή θα αυξάνουν, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των ερπυστικών παραμορφώσεων των ασφαλτικών αδρανών. Σε μεγάλη ηλικία, στην οποία ο ερπυσμός του τσιμεντοπολτού είναι σχετικά μικρός, το κύριο μέρος των παραμορφώσεων θα οφείλεται στα φρεζαρισμένα ασφαλτικά αδρανή. Για σταθερό φορτίο με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται, λόγω χαλάρωσης, μεταβίβαση συνεχώς μεγαλύτερου φορτίου στα αδρανή αλλά και στον τσιμεντοπολτό. Το φαινόμενο χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

5.5 ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.8.1, έγινε μία πετρογραφική εξέταση ενός δοκιμίου υλικού ΙΙΙ (50/50). Το δοκίμιο παρασκευάστηκε στο εργαστήριο Οδοποιίας, με ποσοστό τσιμέντου 3 % και δοκιμάστηκε σε κάμψη σε ηλικία 60 ημερών. Μετά τη δοκιμή, το ένα τμήμα του δοκιμίου στάλθηκε στο εργαστήριο ΕΚΕΤ για πετρογραφικό έλεγχο.

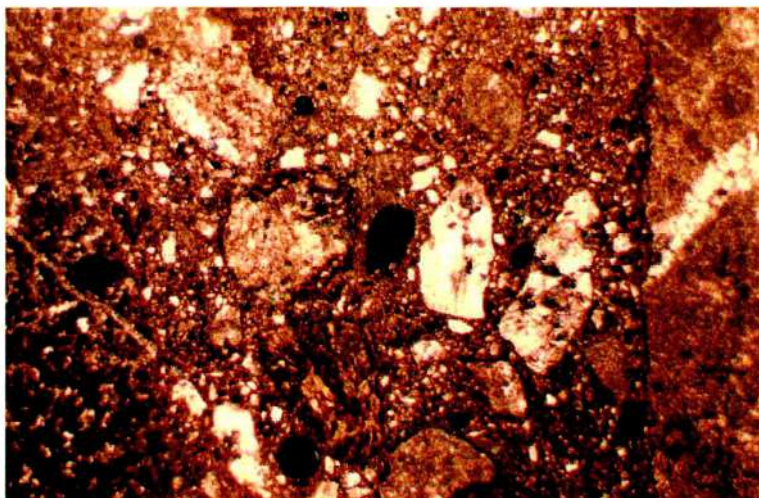
Για πληρέστερη αποτύπωση της μικροδομής του δοκιμίου και βάσει του Προτύπου [ASTM C856-04], πραγματοποιήθηκαν 3 τομές. Οι δύο τομές έγιναν προς τα άκρα του τμήματος του δοκιμίου και η τρίτη στη μέση του. Οι τομές έχουν διαστάσεις 45 mm * 45 mm * 25mm, Σχήμα 5.95.



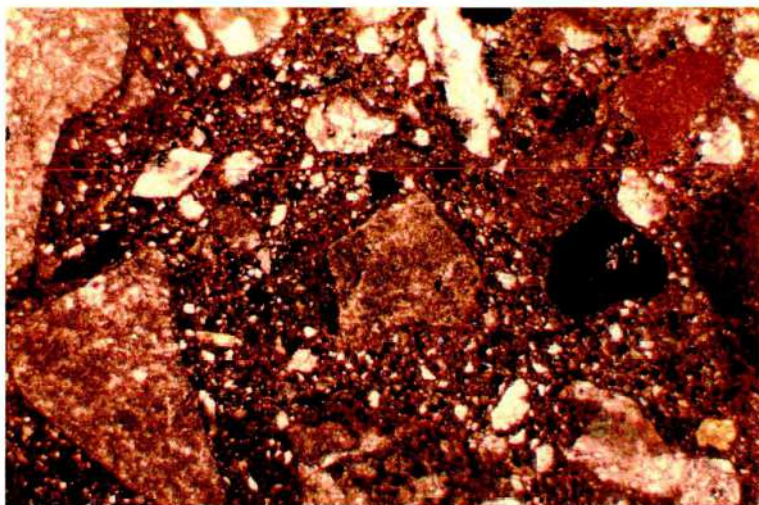
Σχήμα 5.95 : Περιοχές λήψης των δοκιμίων για τον πετρογραφικό έλεγχο, από το αρχικό δοκίμιο

Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του υλικού δίνονται στις Φωτογραφίες 5.1 έως 5.11. Τα κυριότερα συμπεράσματα από τον πετρογραφικό έλεγχο είναι :

- ο Τα ασβεστολιθικά αδρανή ξεχωρίζουν με ιδιαίτερη ευκρίνεια από τα αδρανή του ασφαλτομίγματος, ιδιαίτερα στα μεγάλου μεγέθους αδρανή, λόγω της επικάλυψης της ασφάλτου στην περιφέρεια των αδρανών του ασφαλτομίγματος και την απουσία αυτής στα θραυστά αδρανή. Η επικάλυψη μπορεί να είναι λεπτό υμένιο ασφάλτου ή μικρού πάχους στρώμα ασφάλτου αναμεμιγμένης με λεπτά αδρανή (Φωτογραφίες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα).

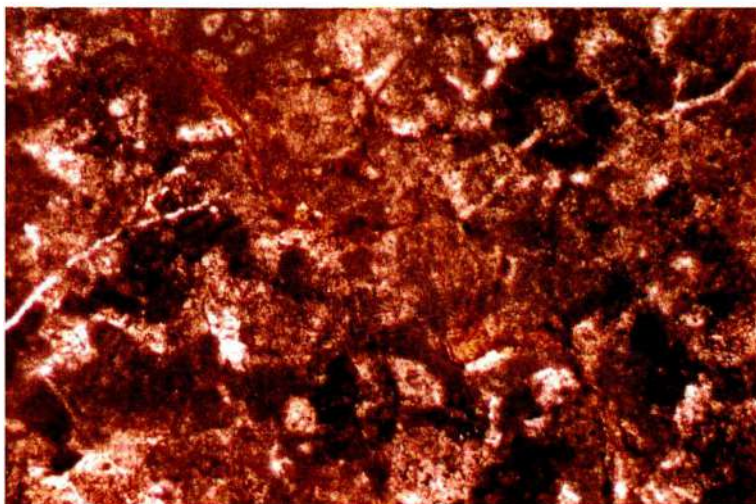


Φωτογραφία 5.1 : Αδρανές φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος με εμφανή επικάλυψη της περιμέτρου τους από άσφαλτο και "καθαρά" θραυστά αδρανή x32, x Nickols



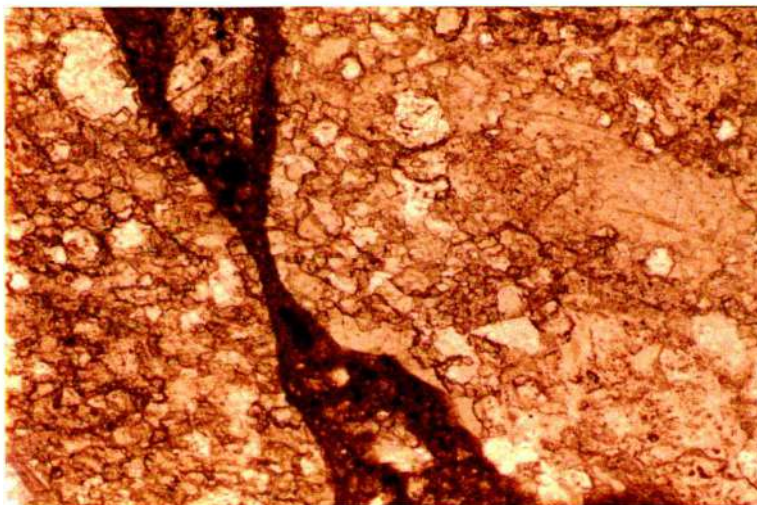
Φωτογραφία 5.2 : Αδρανές φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος με επικάλυψη ασφάλτου (στο κέντρο της φωτογραφίας), σε περιοχή με "καθαρά" θραυστά αδρανή

- ο Στα μεγάλου μεγέθους αδρανή του ασφαλτομίγματος, ενώ η δομή τους φαίνεται συμπαγής, διακρίνονται φλεβίδια τα οποία υποδηλώνουν διείσδυση ασφάλτου σε μικρορηγματώσεις αυτών (Φωτογραφία 5.3).

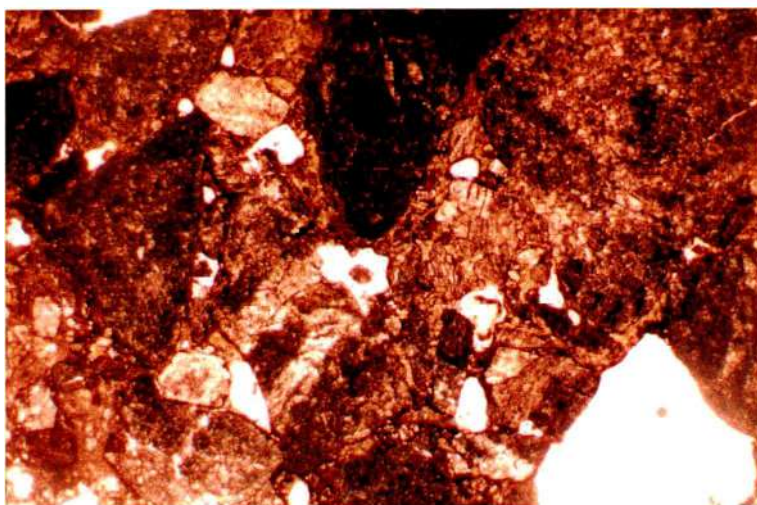


Φωτογραφία 5.3 : "Φλεβίδιο" ασφάλτου που έχει διεισδύσει στην κυρίως μάζα ασβεστολιθικού αδρανούς (x100)

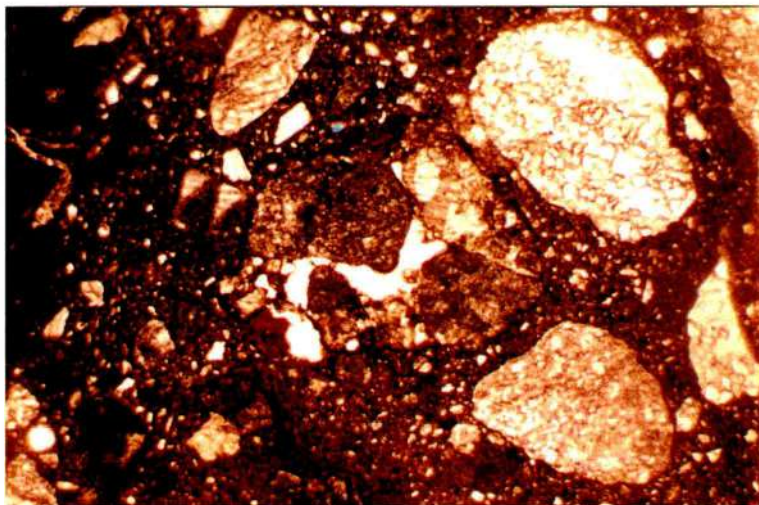
- ο Η συνάφεια των αδρανών (ασφαλτικών και θραυστών) με το συνδετικό υλικό (τσιμεντοπολτός) κρίνεται πολύ ικανοποιητική (Φωτογραφία 5.4).
- ο Τα ακανόνιστου σχήματος κενά αέρος δεν είναι πολύ μεγάλα, και εντοπίζονται σε περιοχές με μεγάλη περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα, το οποίο φαίνεται να εμπεριείχε στη μάζα του τα κενά αυτά. (Φωτογραφίες 5.5 και 5.6). Τα κενά που περιέχονται στη μάζα του υλικού αυτού, δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένα σε σχέση με το σκυρόδεμα. Στην μάζα του τσιμεντοπολτού εμφανίζονται κενά σε ποσοστό ανάλογο του συμβατικού σκυροδέματος (Φωτογραφίες 5.7 και 5.8).



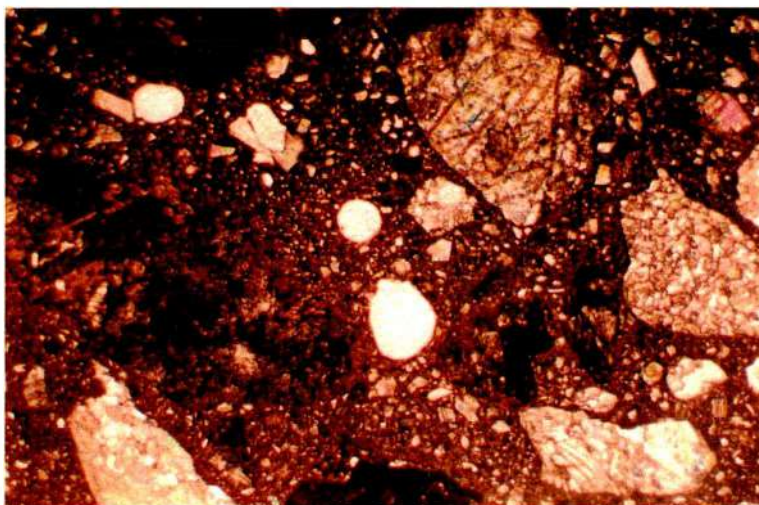
Φωτογραφία 5.4 : Ενδεικτική φωτογραφία της καλής συνάφειας πηγματος και μεγάλων ασβεστολιθικών αδρανών (x100)



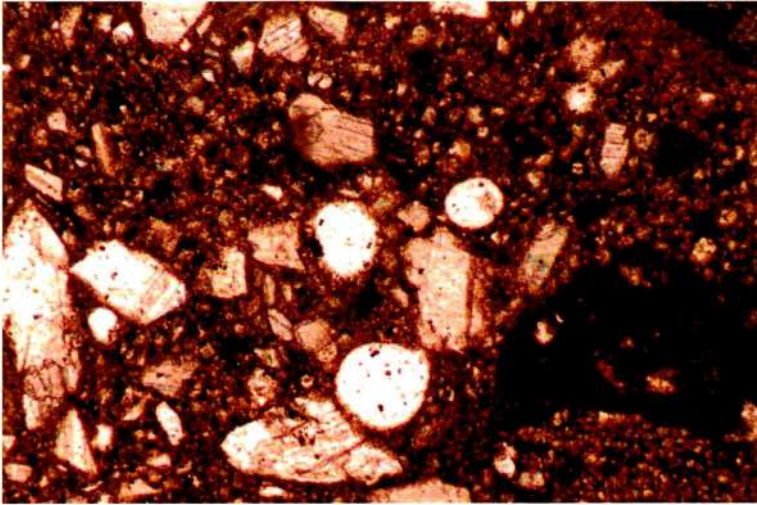
Φωτογραφία 5.5 : Κενά αέρος σε περιοχή πλούσια σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα (x32)



Φωτογραφία 5.6 : Συσσωμάτωμα ασφαλτικού κονιάματος (στο κέντρο της φωτογραφίας) με κενά αέρος στη μάζα του (x32)

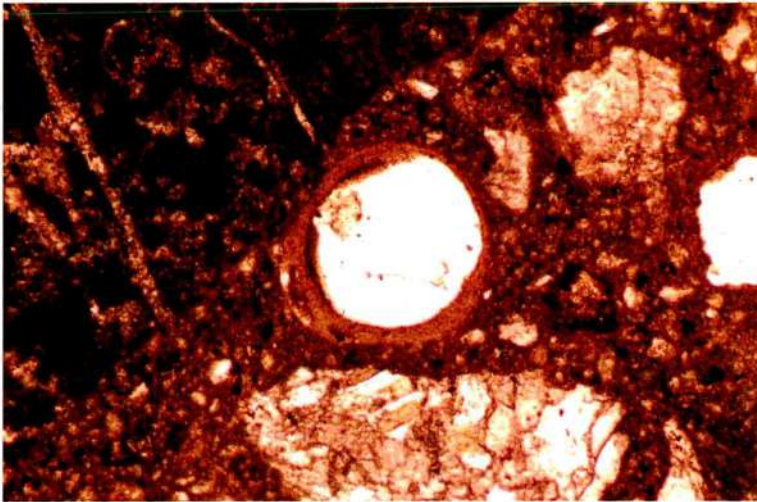


Φωτογραφία 5.7 : Πόροι αέρα (entrained air) στην κυρίως μάζα του πηγματος (x32)



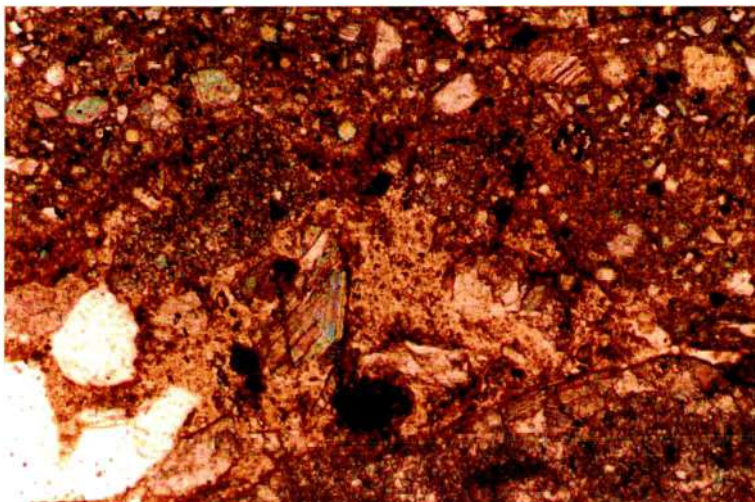
Φωτογραφία 5.8 : Κανονική κατανομή μικρών πόρων αέρα (x100)

- ο Στην εσωτερική περίμετρο μερικών πόρων αέρα διακρίνεται υμένιο ασφάλτου (Φωτογραφία 5.9).

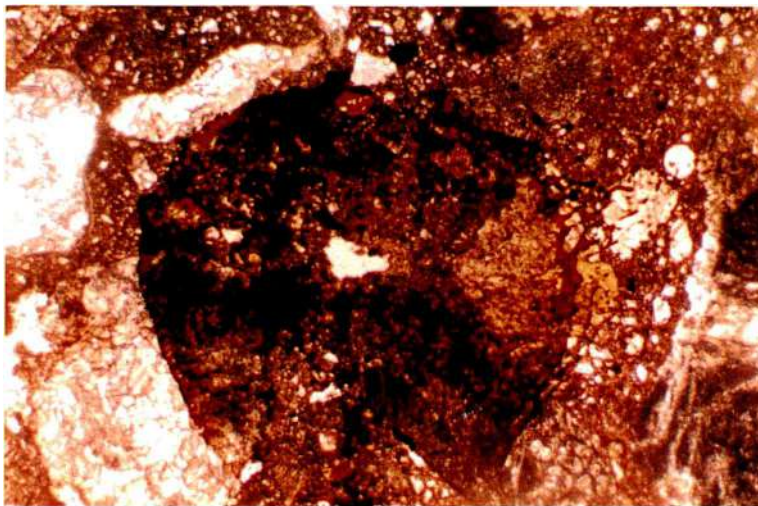


Φωτογραφία 5.9 : Πόρος αέρα με εσωτερικό "υμένιο" ασφάλτου (x100)

- ο Τα συσσωματώματα ασφάλτοκονιάματος φαίνεται να έχουν την ίδια σύσταση με αυτήν που συναντάται στην επιφάνεια μεγάλων αδρανών. Στα συσσωματώματα δεν φαίνεται να έχει εισχωρήσει συνδετικό υλικό (τσιμεντοπολτός). Η περιεκτικότητα των συσσωματωμάτων σε άσφαλτο διαφοροποιείται, προσδίδοντας σε άλλα σχετικά "αραιή" σύσταση (Φωτογραφία 5.10) και σε άλλα πιο πυκνή (Φωτογραφία 5.11).



Φωτογραφία 5.10 : : Ασφαλτικό συσσωμάτωμα "αραιής" σύστασης, με κενά αέρος στη μάζα του (x100)



Φωτογραφία 5.11 : : Ασφαλτικό συσσωμάτωμα "πυκνής" σύστασης, στο κέντρο (x32)

- ο Στην κυρίως μάζα του τσιμεντοπολτού και στη διεπιφάνεια αδρανών - πύλματος δεν ανιχνεύονται μικρορηγματώσεις.
- ο Η ομοιογένεια - ομοιομορφία του υλικού κρίνεται ικανοποιητική.

6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ

Συνολικά δοκιμάστηκαν σε κόπωση :

- ο Για ποσοστό τσιμέντου 3 %
 - Υλικό I (100/0) 28 δοκίμια
 - Υλικό III (50/50) 20 δοκίμια
 - Υλικό V (0/100) 17 δοκίμια
- ο Για ποσοστό τσιμέντου 5 %
 - Υλικό I (100/0) 9 δοκίμια
 - Υλικό III (50/50) 53 δοκίμια
 - Υλικό V (0/100) 15 δοκίμια

Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους τοποθετήθηκαν πάνω σε γυάλινες πλάκες πάχους περίπου 5 mm για την αποφυγή τυχόν στρεβλώσεων, τυλίχτηκαν με πλαστικά φύλλα για παρεμπόδιση της εξάτμισης και τοποθετήθηκαν στον θάλαμο συντήρησης. Τα δοκίμια παρέμειναν στον θάλαμο 60 ± 2 ημέρες μέχρι τη δοκιμή τους σε κόπωση. Κατά την διάρκεια των δοκιμών σε κόπωση η θερμοκρασία του περιβάλλοντος διατηρείτο στους 23 ± 0.5 °C. Πιστεύεται ότι στην ηλικία των 60 ημερών έχει πραγματοποιηθεί η ενυδάτωση του τσιμέντου σε τέτοιο βαθμό, ώστε η παραμονή των δοκιμών στη μηχανή μέχρι 2 - 4 ημέρες δεν συνεπάγεται μετρήσιμη αύξηση της αντοχής, γεγονός που αν συνέβαινε θα μπορούσε να αλλοιώσει τα αποτελέσματα.

Η αντοχή σε κάμψη είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του εύρους φόρτισης σε κόπωση. Έτσι, από κάθε ανάμιγμα δεν δοκιμάστηκαν όλα τα δοκίμια σε κόπωση. Ένας αριθμός δοκιμών χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της αντοχής σε κάμψη. Στις δοκιμές σε κόπωση μετρήθηκε το βέλος κάμψης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Οι δοκιμές έγιναν με "ελεγχόμενη τάση", δηλαδή επιβάλλεται ένα ελάχιστο φορτίο στο δοκίμιο, περίπου 0.10 - 0.15 MPa - που εξασφαλίζει και τη σταθερότητα του δοκιμίου στη θέση του κατά τη δοκιμή - και εν συνεχεία το φορτίο μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, με συχνότητα 10 Hz, από το ελάχιστο αυτό φορτίο μέχρι το μέγιστο

φορτίο που καθορίζεται για κάθε δοκιμή έτσι ώστε ο λόγος σ/f (της επιβαλλόμενης τάσης προς την αντοχή) να είναι ο προβλεπόμενος. Δεν επιλέχθηκε η εναλλακτική δοκιμή της ελεγχόμενης παραμόρφωσης, επειδή οι ανακυκλωμένες με τσιμέντο στρώσεις, λόγω του μεγάλου πάχους και του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, είναι οι πλέον άκαμπτες στρώσεις του οδοστρώματος και η μορφή επιπόνησης της στρώσης αυτής είναι υπό ελεγχόμενη τάση [Monismith and Deacon 1969].

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στον Πίνακα 4.23 και στα Σχήματα 6.1 - 6.15.

Στον Πίνακα παρουσιάζονται και οι τυπικές αποκλίσεις του $\log N$ για κάθε επίπεδο φόρτισης. Παρατηρείται ότι γενικά, το υλικό I (100/0) παρουσιάζει τυπικές αποκλίσεις με τιμές κοντά στο 1, τιμή η οποία είναι σύμφωνη με τις Γαλλικές Οδηγίες [SETRA - LCPC 1997]. Είναι αξιοσημείωτο ότι για τα μίγματα που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα η τυπική απόκλιση είναι σημαντικά μικρότερη του 1, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις τιμές του Mathias et al [2004] για δοκιμές κόπωσης σε σκυρόδεμα, μέρος των αδρανών του οποίου είχε αντικατασταθεί με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. Σημειώνεται ότι σε έρευνα κόπωσης σε σκυρόδεμα [Antrim and McLaughlin 1959] αναφέρεται ότι το σκυρόδεμα με αερακτικό παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη μεταβλητότητα αποτελεσμάτων.

Κατ' αρχήν παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα Σχήματα $\sigma/f - \log N$ για τα μεμονωμένα αποτελέσματα και εν συνεχεία για τους μέσους όρους των επαναλήψεων φορτίσεων για κάθε επίπεδο φόρτισης σ/f , όπως εφαρμόστηκαν από τους [Kolias 1975, Galloway and Raithby 1979].

Επίσης εξετάζεται και η περίπτωση που η ευθεία παλινδρόμησης "υποχρεωθεί" να διέρχεται από το σημείο (0,1), υιοθετώντας το σημείο αυτό από τις Γαλλικές Οδηγίες [SETRA - LCPC 1997], οι οποίες δίνουν τη σχέση :

$$\sigma/f = 1 + \beta \log N.$$

6.1 ΥΛΙΚΟ Ι (100/0)

ο Τσιμέντο 3 %

Το Σχήμα 6.1 δίνει τα μεμονωμένα αποτελέσματα για το υλικό Ι (100/0) για ποσοστό τσιμέντου 3 % και το Σχήμα 6.2 για τους μέσους όρους των επαναλήψεων των φορτίσεων, για κάθε επίπεδο φόρτισης.

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

- Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 0.8845 - 0.0445 \log N \quad (6.1) \quad (\mu\pi\lambda\epsilon \text{ γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0706 \log N \quad (6.2) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

- Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

$$\sigma/f = 0.9693 - 0.0693 \log N \quad (6.3) \quad (\mu\pi\lambda\epsilon \text{ γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0770 \log N \quad (6.4) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.62, 0.58, 0.55 και 0.54 αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα είναι απολύτως σύμφωνα με τις προγενέστερες Αγγλικές έρευνες που αφορούν κατεργασμένα με τσιμέντο υλικά [Kolias 1975, Galloway and Raithby 1979] σύμφωνα με τις οποίες για 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων το επίπεδο σ/f είναι 0.60 και 0.62 αντίστοιχα. Οι Γαλλικές Οδηγίες [SETRA - LCPC 1997] δίνουν για 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων, σ/f 0.524. Τα αποτελέσματα τόσο της παρούσας διατριβής, όσο και των προγενέστερων ερευνών παρουσιάζουν μικρή διαφορά με τις Γαλλικές οδηγίες, οι οποίες φαίνονται συντηρητικές. Ως προς την κλίση της ευθείας των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας παρατηρείται διαφορά από αυτές των προγενέστερων ερευνών που αναφέρθηκαν (για 10^5 επαναλήψεις φορτίσεων το επίπεδο σ/f της παρούσας έρευνας είναι 0.66 έναντι 0.78 (Αγγλικές έρευνες), 0.60 (Γαλλικές Οδηγίες). Επομένως η γραμμή κόπωσης της παρούσας διατριβής, στην περιοχή αυτή, είναι μεταξύ εκείνων των Γαλλικών Οδηγιών και των δύο Αγγλικών ερευνών.

Η κλίση της ευθείας της διατριβής (0.0504 από Σχέση 6.1) επηρεάζεται από τα αποτελέσματα των δοκιμών για επίπεδο φόρτισης $\sigma/f = 0.90$. Επειδή οι δοκιμές για

το επίπεδο αυτό στηρίζονται σε πολύ μικρό αριθμό δοκιμών, 3, πιστεύεται ότι αν υπήρχαν περισσότερα αποτελέσματα για το επίπεδο αυτό η κλίση της ευθείας θα μεγάλωνε. Εάν υιοθετηθεί η άποψη των Γαλλικών Οδηγιών ότι η ευθεία παλινδρόμησης πρέπει να διέρχεται από το σημείο (0,1), τότε η εξίσωση κόπωσης είναι η 6.2. Στην περίπτωση αυτή η κλίση της ευθείας γίνεται 0.0706, και στην περίπτωση των μέσων όρων (Σχήμα 6.2, Σχέση 6.4) γίνεται 0.770, πλησιάζοντας αξιοσημείωτα τα αποτελέσματα των άλλων ερευνών.

ο Τσιμέντο 5 %

Για το ποσοστό τσιμέντου 5 %, παρατηρείται, Σχήμα 6.3, ότι δεν υπάρχει διαφορά ως προς τον συνολικό αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων, ούτε ως προς τα αποτελέσματα για ποσοστό τσιμέντου 3 %, ούτε και ως προς τις προγενέστερες έρευνες (για 10^6 επαναλήψεις φορτίσεων, $\sigma/f = 0.60$). Επειδή οι δοκιμές έγιναν μόνον για δύο επίπεδα φόρτισης, και δεν υπάρχουν αποτελέσματα για μικρό αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων, δεν κρίθηκε σκόπιμο να σχεδιαστεί η ευθεία παλινδρόμησης.

ο Ενοποιημένα αποτελέσματα

Αφού τα αποτελέσματα εκφράζονται υπό μορφή $\sigma/f - \log N$, δεν θα πρέπει να υπάρχει διαφορά αν στο διάγραμμα τοποθετηθούν σημεία που αντιστοιχούν σε δοκίμια με μικρή διαφορά ως προς το ποσοστό τσιμέντου (3 % - 5 %). Έτσι, στο Σχήμα 6.4 φαίνονται ενοποιημένα όλα τα αποτελέσματα του υλικού I (100/0), ανεξαρτήτως ποσοστού τσιμέντου (μεμονωμένα αποτελέσματα) και στο Σχήμα 6.5 οι μέσοι όροι, για κάθε επίπεδο φόρτισης.

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

• Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 0.8642 - 0.0360 \log N \quad (6.5) \quad (\text{μπλε γραμμή})$$

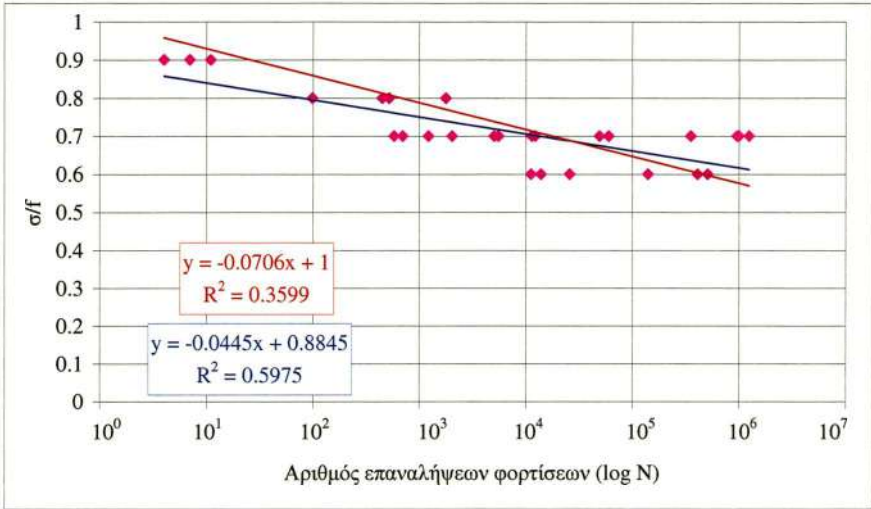
$$\sigma/f = 1 - 0.0639 \log N \quad (6.6) \quad (\text{κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1)})$$

• Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

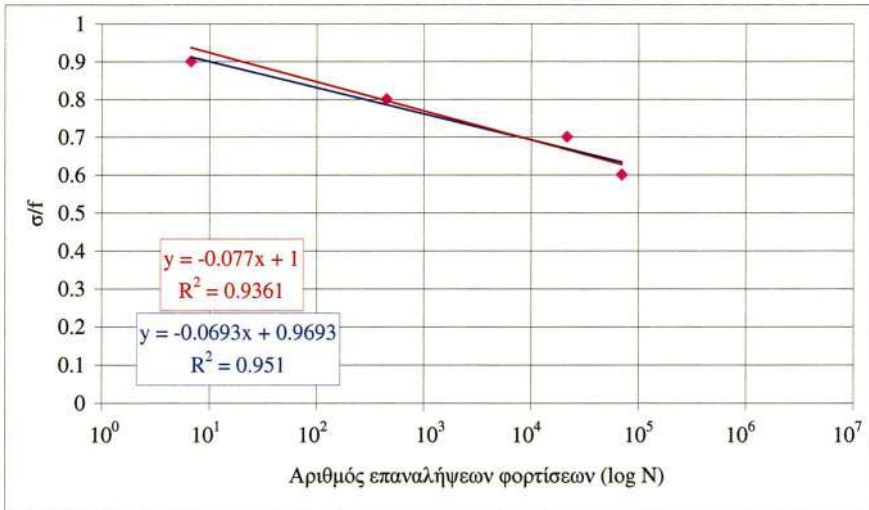
$$\sigma/f = 0.937 - 0.0457 \log N \quad (6.7) \quad (\text{μπλε γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0583 \log N \quad (6.8) \quad (\text{κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1)})$$

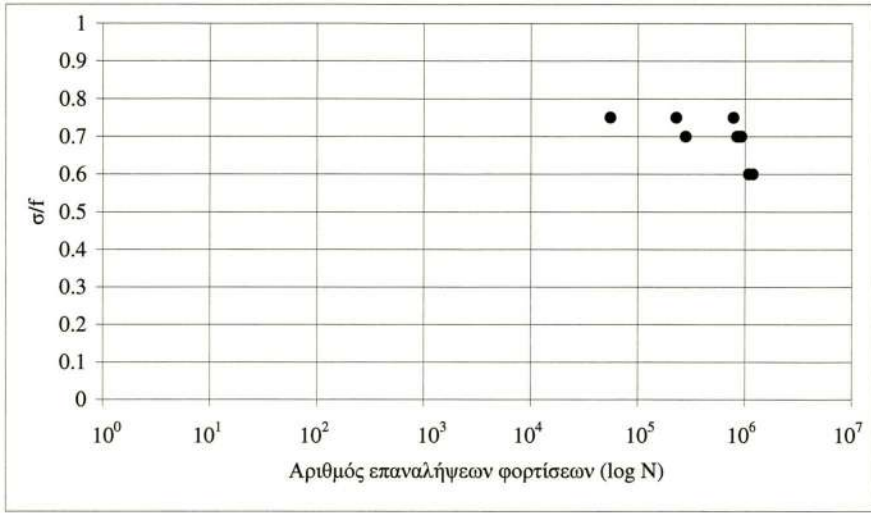
Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.65, 0.62, 0.66 και 0.65 αντίστοιχα.



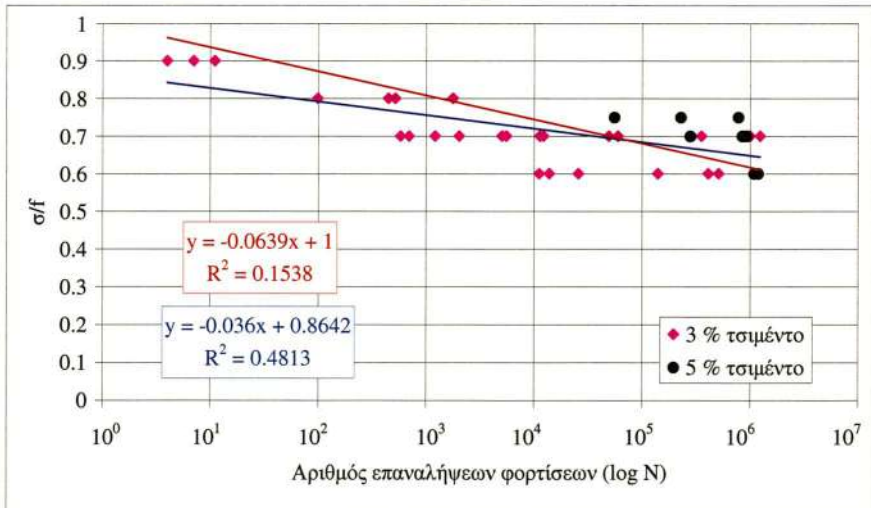
Σχήμα 6.1 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού I (100/0), τσιμέντο 3 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



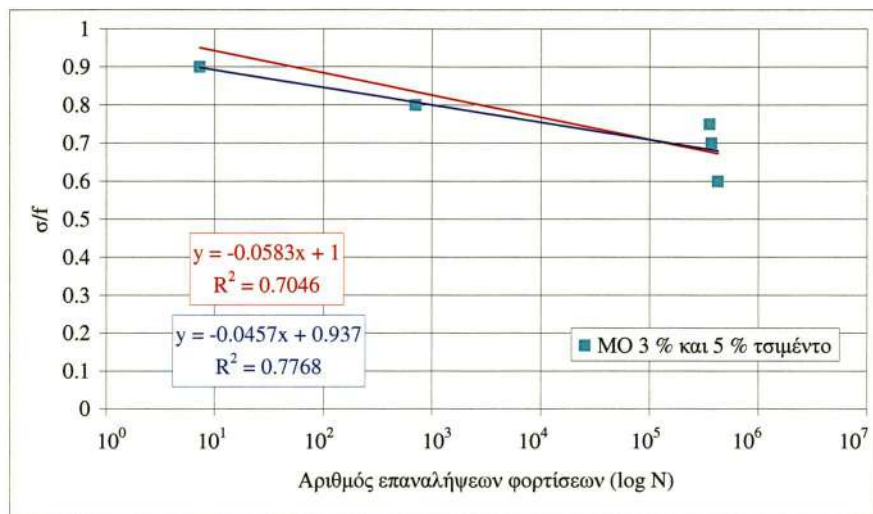
Σχήμα 6.2 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού I (100/0), τσιμέντο 3 %, Μέσοι όροι



Σχήμα 6.3 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού I (100/0), τσιμέντο 5 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.4 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού I (100/0), μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.5 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού Ι (100/0), Μέσοι όροι

Παρατηρείται ότι με ενοποιημένα τα αποτελέσματα για 3 % και 5 % τσιμέντο, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων το επίπεδο σ/f εξακολουθεί να είναι αξιοσημείωτα σύμφωνο με τις Αγγλικές έρευνες, ενώ για 10^5 είναι 0.68 (μεμονωμένα αποτελέσματα) και 0.71 (μέσοι όροι), δηλαδή παρουσιάζεται μεταξύ των 0.78 [Kolias 1975, Galloway and Raithby 1979] και του 0.60 [SETRA - LCPC 1997]. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι και οι δύο προηγούμενες Αγγλικές έρευνες παρουσίαζαν έντονης μορφής σιγμοειδείς καμπύλες κόπωσης. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι οι Γαλλικές έρευνες για κόπωση γίνονται σε τραπεζοειδούς μορφής δοκίμια, τα οποία πακτώνονται στο φαρδύτερο άκρο τους και φορτίζονται στο άλλο άκρο. Δεν είναι γνωστό αν οι δοκιμές αυτές δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα από τις δοκιμές σε αμφιέριστες δοκούς με φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματός τους.

Πιστεύεται ότι τα ενοποιημένα διαγράμματα για τσιμέντο 3% και 5% παρέχουν μεγαλύτερη εμπιστοσύνη γιατί στηρίζονται σε μεγαλύτερο αριθμό δοκιμών.

Συμπεράσματα :

- ο Λαμβάνοντας υπόψη τη δεδομένη μεγάλη μεταβλητότητα των δοκιμών κόπωσης και τη διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων κάμψης, τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά και παρέχουν αυξημένη εμπιστοσύνη και για τα

αποτελέσματα των άλλων υλικών. (Ενας από τους λόγους που έγιναν οι δοκιμές σε κόπωση στο υλικό I (100/0) είναι για να κριθεί η αξιοπιστία των δοκιμών της έρευνας αυτής, μια που μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του υλικού αυτού με άλλες έρευνες). Λεπτομερής σύγκριση με τα αποτελέσματα των άλλων ερευνών δείχνει ότι η καμπύλη κόπωσης της διατριβής αυτής είναι μεταξύ των καμπυλών των Αγγλικών ερευνών και εκείνων των Γαλλικών Οδηγιών και πιο κοντά προς τις πρώτες.

- ο Οι γραμμές παλινδρόμησης, που προκύπτουν κατά Raithby, από τους μέσους όρους επαναλήψεων φορτίσεων σε κάθε επίπεδο φόρτισης σ/f δεν επηρεάζονται από τυχόν ακραίες τιμές των μεμονωμένων αποτελεσμάτων και για το λόγο αυτό πιστεύεται ότι είναι προτιμητέες. Φυσικά, απαιτούνται πολύ περισσότερες συγκρίσεις, προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα με την απαιτούμενη βεβαιότητα. Επίσης παρατηρείται ότι η τιμή του σταθερού όρου της παλινδρόμησης πλησιάζει περισσότερο στην περίπτωση των μέσων όρων προς την τιμή 1.
- ο Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι υπάρχουν ορισμένου ερευνητές, όπως πχ. Eisenmann [1979], [Galloway and Raithby 1979], οι οποίοι αναφέρουν ότι η γραμμή παλινδρόμησης της κόπωσης δεν πρέπει να έχει σταθερό όρο ίσο με 1, διότι είναι πιο αντιπροσωπευτικό να τεθεί ο όρος $\sigma/f \cong 0.80$, για $N = 1$, όσο είναι και η αντοχή μακράς διάρκειας του υλικού. Αυτό πιστεύεται όμως ότι ισχύει για δοκιμές χωρίς ανάπαυλες φόρτισης. Για τις περιπτώσεις όμως εφαρμογής νόμων κόπωσης για οδοστρώματα - όπου οι φορτίσεις γίνονται συχνά με μεγάλες ανάπαυλες φόρτισης - πιστεύεται ότι είναι πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικής κατάστασης η σταθερά της γραμμής παλινδρόμησης να είναι ίση με 1, όπως ακολουθείται και στις Γαλλικές Οδηγίες.

6.2 ΥΛΙΚΟ ΙΙΙ (50/50)

ο Τσιμέντο 3 %

Το Σχήμα 6.6 δίνει τα μεμονωμένα αποτελέσματα για το υλικό ΙΙΙ (50/5) για ποσοστό τσιμέντου 3 %.

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

- Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 0.7866 - 0.0242 \log N \quad (6.9) \quad (\mu\pi\lambda\epsilon \text{ γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0701 \log N \quad (6.10) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.64 και 0.58 αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι επειδή τα αποτελέσματα είναι για τρία επίπεδα φόρτισης ($\sigma/f = 0.75$, 0.70 και 0.60) και δεν υπάρχουν θραύσεις για μικρό αριθμό επαναλήψεων φορτίσεων N , η ακρίβεια της παλινδρόμησης είναι μειωμένη, παρόλο που η προβλεπόμενη τιμή $\sigma/f = 0.64$ για $N = 10^6$ δεν φαίνεται υπερβολική. Στην περίπτωση αυτή, η πρόσθετη απαίτηση να διέρχεται η γραμμή από το σημείο (0,1) δίνει ορθότερη κλίση. Η παλινδρόμηση δεν μπορεί να επιτύχει ακριβέστερη κλίση επειδή τα τρία επίπεδα φόρτισης δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ οι αντίστοιχες επαναλήψεις φορτίσεων έχουν μεγάλη διασπορά.

ο Τσιμέντο 5 %

Το Σχήμα 6.7 δίνει τα μεμονωμένα αποτελέσματα για το υλικό ΙΙΙ (50/50) για ποσοστό τσιμέντου 5 % και το Σχήμα 6.8 για τους μέσους όρους των επαναλήψεων των φορτίσεων, για κάθε επίπεδο φόρτισης.

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

- Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 1.0331 - 0.0801 \log N \quad (6.11) \quad (\mu\pi\lambda\epsilon \text{ γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0727 \log N \quad (6.12) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

- Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

$$\sigma/f = 1.1621 - 0.109 \log N \quad (6.13) \quad (\mu\pi\lambda\epsilon \text{ γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0739 \log N \quad (6.14) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.55, 0.56, 0.51 και 0.56 αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα κόπωσης του υλικού αυτού, για ποσοστό τιμέντου 5 %, στηρίζονται σε μεγάλο αριθμό δοκιμών, 53, αριθμός που καθιστά τα αποτελέσματα πολύ αξιόπιστα.

ο Ενοποιημένα αποτελέσματα

Στο Σχήμα 6.9 δίνονται ενοποιημένα τα αποτελέσματα κόπωσης για το υλικό III (50/50), ανεξαρτήτως ποσοστού τιμέντου (μεμονωμένα αποτελέσματα) και στο Σχήμα 6.10 δίνονται οι μέσοι όροι.

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

• Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 0.9968 - 0.0712 \log N \quad (6.15) \quad (\text{μπλε γραμμή})$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0719 \log N \quad (6.16) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

• Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

$$\sigma/f = 1.1745 - 0.1093 \log N \quad (6.17) \quad (\text{μπλε γραμμή})$$

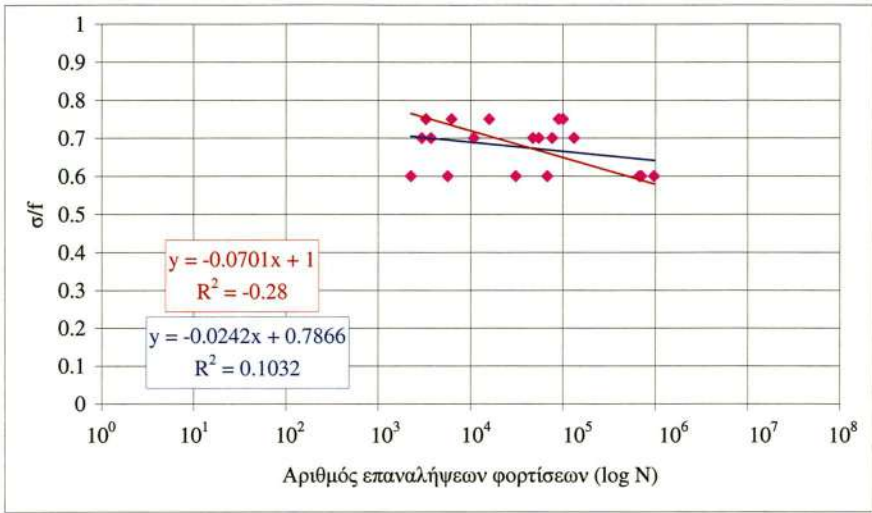
$$\sigma/f = 1 - 0.0712 \log N \quad (6.18) \quad (\text{κόκκινη γραμμή} - \text{διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο } (0,1))$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.57, 0.57, 0.52 και 0.57 αντίστοιχα.

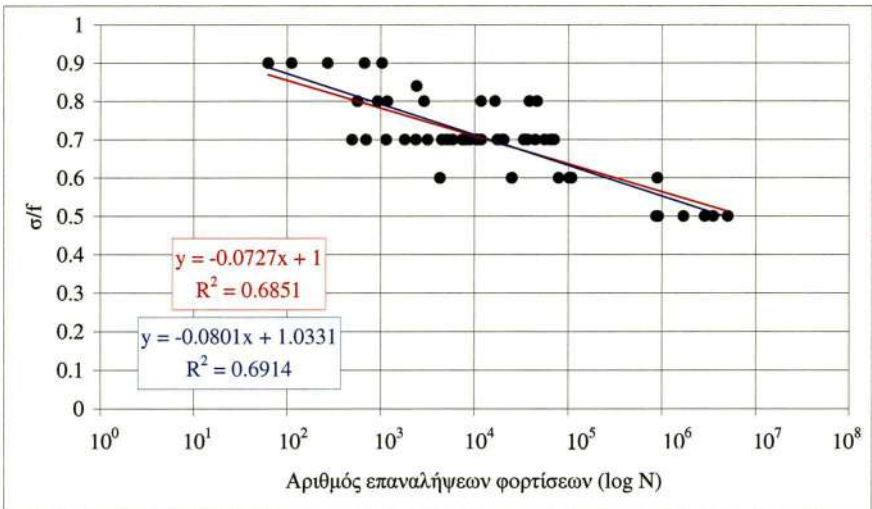
Συμπεραίνεται ότι το υλικό III (50/50) παρουσιάζει κάποια μικρή μείωση της τιμής σ/f για $N = 10^6$, σε σύγκριση με το υλικό I (100/0).

Η μείωση αυτή είναι : 12.3 % και 8.0 % (μεμονωμένα αποτελέσματα)

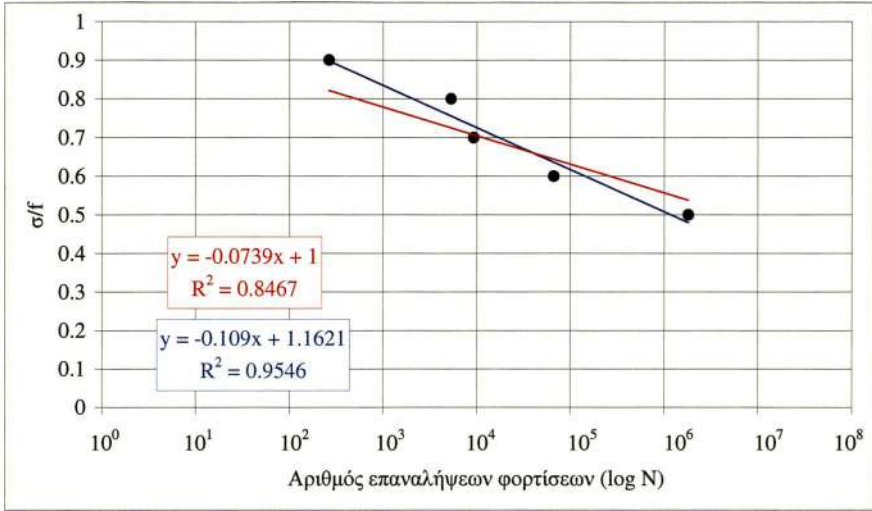
21.2 % και 12.3 % (μέσοι όροι).



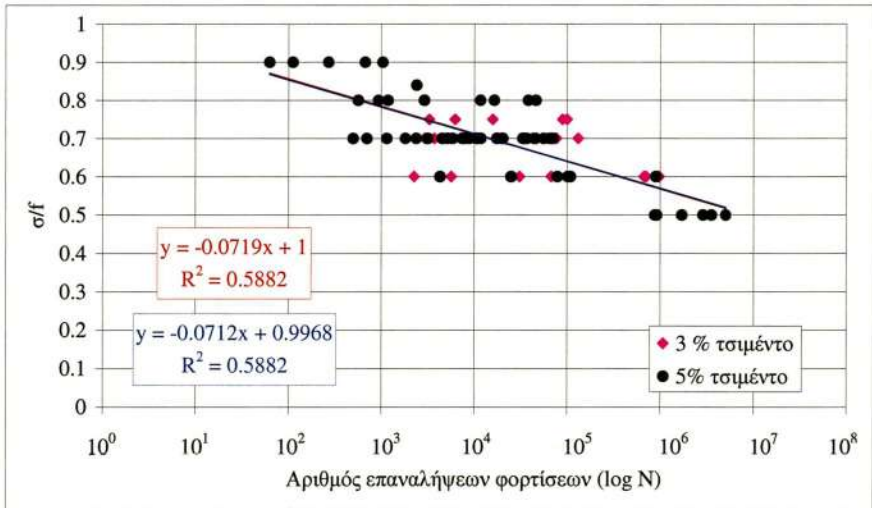
Σχήμα 6.6 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού ΙΙΙ (50/50), τσιμέντο 3 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



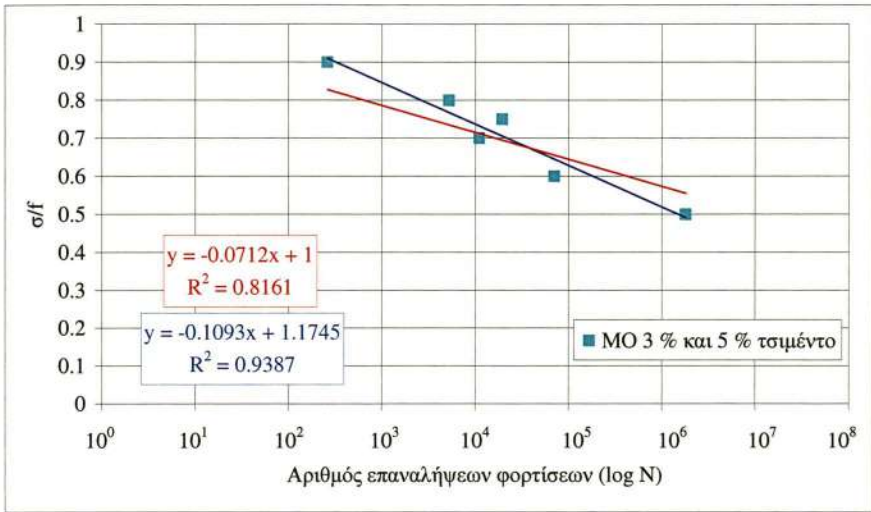
Σχήμα 6.7 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού ΙΙΙ (50/50), τσιμέντο 5 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.8 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού III (50/50), τσιμέντο 5 %, Μέσοι όροι



Σχήμα 6.9 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού III (50/50), μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.10 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού ΙΙΙ (50/50), Μέσοι όροι

6.3 ΥΛΙΚΟ V (0/100)

ο Τσιμέντο 3%

Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 6.11 (μεμονωμένα αποτελέσματα) και Σχήματα 6.12 (μέσοι όροι N για κάθε επίπεδο φόρτισης σ/f).

Οι εξισώσεις παλινδρόμησης είναι :

- Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 1.0486 - 0.0744 \log N \quad (6.19) \text{ (μπλε γραμμή)}$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0637 \log N \quad (6.20) \text{ (κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1))}$$

- Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

$$\sigma/f = 1.0998 - 0.0861 \log N \quad (6.21) \text{ (μπλε γραμμή)}$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0636 \log N \quad (6.22) \text{ (κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1))}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.60, 0.62, 0.58 και 0.62 αντίστοιχα.

ο Τσιμέντο 5%

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.13, αλλά επειδή αντιστοιχούν σε δύο μόνο επίπεδα φόρτισης δεν εξάγεται γραμμή παλινδρόμησης.

ο Ενοποιημένα αποτελέσματα

Στα Σχήματα 6.14 και 6.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα $\sigma/f - \log N$ για 3 % και 5 % τσιμέντο ενοποιημένα, ως μεμονωμένα αποτελέσματα και ως μέσοι όροι. Οι αντίστοιχες εξισώσεις των σχέσεων παλινδρόμησης είναι :

- Μεμονωμένα αποτελέσματα

$$\sigma/f = 0.9078 - 0.0547 \log N \quad (6.23) \text{ (μπλε γραμμή)}$$

$$\sigma/f = 1 - 0.0766 \log N \quad (6.24) \text{ (κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1))}$$

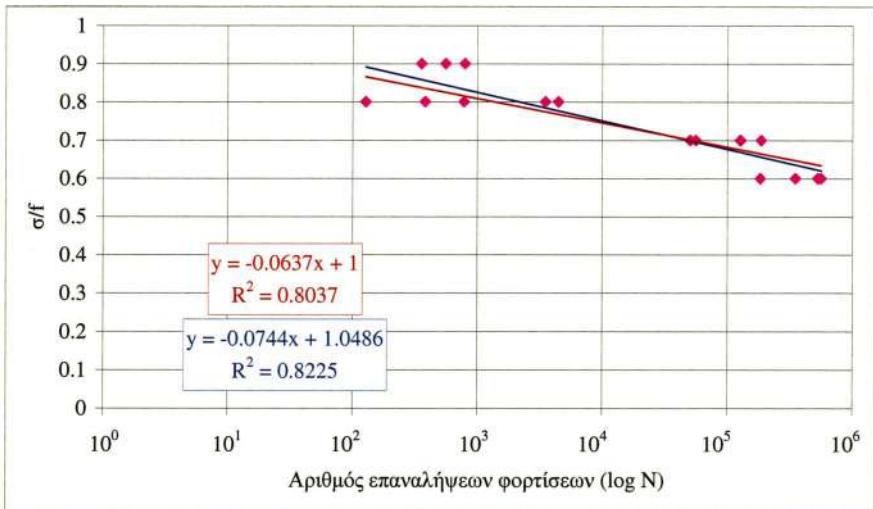
- Μέσοι όροι επαναλήψεων φορτίσεων

$$\sigma/f = 1.2174 - 0.12925 \log N \quad (6.25) \text{ (μπλε γραμμή)}$$

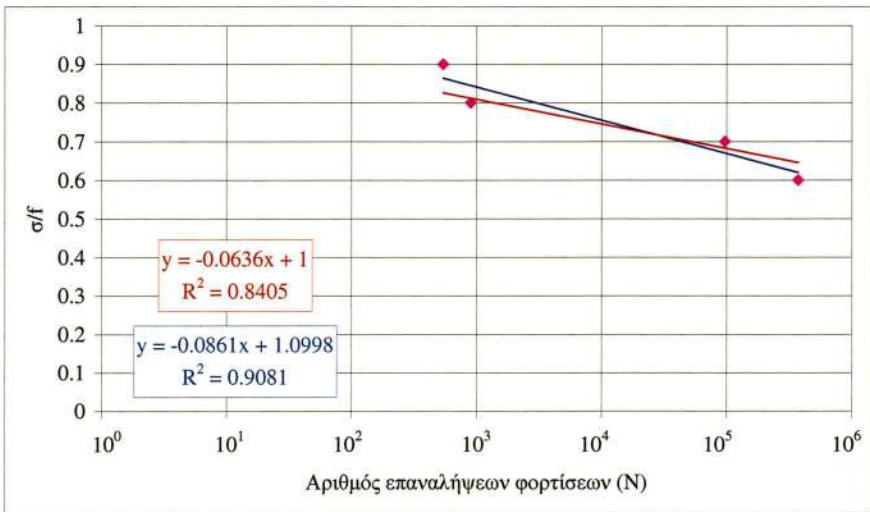
$$\sigma/f = 1 - 0.0722 \log N \quad (6.26) \quad (\text{κόκκινη γραμμή - διέρχεται υποχρεωτικά από το σημείο (0,1)})$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, για $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων, το επίπεδο σ/f προκύπτει ίσο με 0.58, 0.543, 0.54 και 0.56 αντίστοιχα.

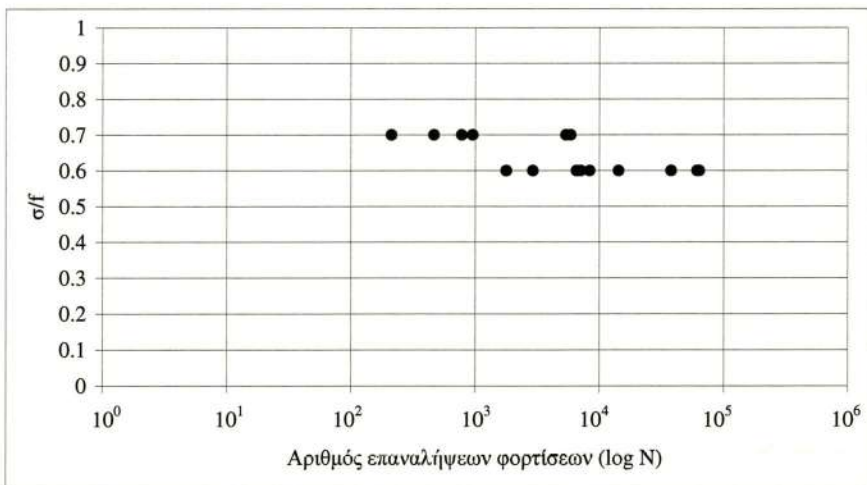
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.14 τα αποτελέσματα για τσιμέντο 5 %, σε σχέση με εκείνα με 3 % τσιμέντο, είναι εμφανώς σε θέσεις χαμηλότερες και με μικρότερες τιμές N δηλ. προβλέπουν εμφανώς μικρότερη αντοχή σε κόπωση. Προφανώς αυτό οφείλεται στη γνωστή διασπορά των δοκιμών σε κόπωση. Δεδομένης της αβεβαιότητας αυτής, πιστεύεται ότι τα ενοποιημένα αποτελέσματα παρέχουν αυξημένη εμπιστοσύνη. Τα αποτελέσματα αυτά παρέχουν ενδείξεις ότι το επίπεδο σ/f μειώνεται σε τιμές 0.58 έως 0.54. Φυσικά παραμένουν οι επιφυλάξεις για τα αποτελέσματα για 3 % τσιμέντο τα οποία παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες, που δεν διαφέρουν ουσιαστικά από τις τιμές του υλικού I.



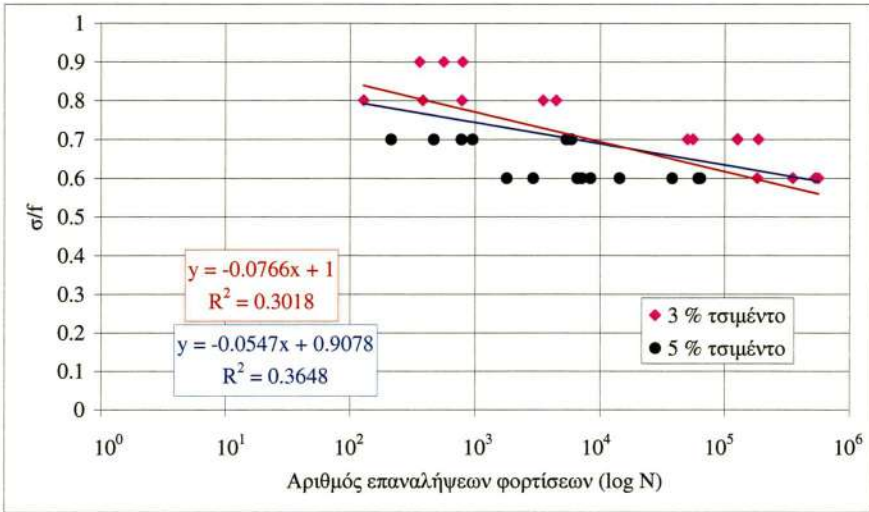
Σχήμα 6.11 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού V (0/100), τσιμέντο 3 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



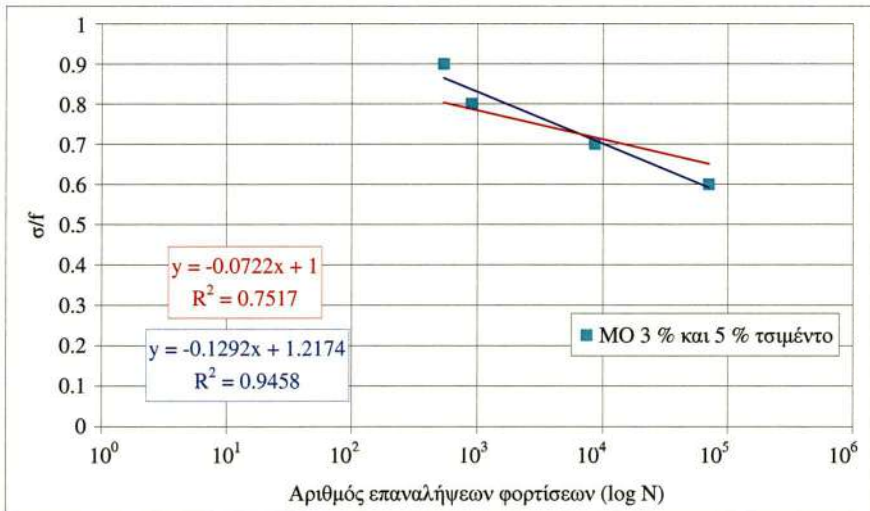
Σχήμα 6.12 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού V (0/100), τσιμέντο 3 %, Μέσοι όροι



Σχήμα 6.13 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού V (0/100), τσιμέντο 5 %, μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.14 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού V (0/100), μεμονωμένα αποτελέσματα



Σχήμα 6.15 : Αποτελέσματα κόπωσης υλικού V (0/100), Μέσοι όροι

6.4 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα :

Η αντοχή σε κόπωση των ανακυκλωμένων υλικών που εξετάστηκαν έχει τη μορφή :

$$\sigma/f = \alpha + \beta \log N$$

Η τιμή του σταθερού όρου, α , μπορεί να ληφθεί ίση με 1, η δε κλίση β του διαγράμματος έχει τιμή που κυμαίνεται από :

$$\beta = 0.0583 \quad \text{για το υλικό I (100/0)}$$

$$\beta = 0.0711 \quad \text{για το υλικό III (50/50)}$$

$$\beta = 0.0721 \quad \text{για το υλικό V (0/100)}$$

Υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι η τιμή του επιπέδου φόρτισης για $N = 10^6$ φορτίσεις μειώνεται όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα αυξάνει :

Έτσι:

$$\text{Για υλικά I (100/0)} \quad \sigma/f = 0.65$$

$$\text{Για υλικά III (50/50)} \quad \sigma/f = 0.57$$

$$\text{Για υλικά V (0/100)} \quad \sigma/f = 0.56.$$

Η τυπική απόκλιση των τιμών $\log N$ θα μπορούσε να ληφθεί ίση με 0.60.

Πρόσφατη έρευνα του LCPC [Mathias et al 2004] για σκυροδέματα στα οποία αντικαταστάθηκε μέρος των αδρανών με φρεζαρισμένο ασφαλτόμικμα επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα αυτά.

6.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ

Η συμπεριφορά του δοκιμίου διερευνάται με την ανάλυση του βέλους κάμψεως κατά τη διάρκεια των δοκιμών κόπωσης.

Σημειώνεται ότι η καταγραφή του βέλους κάμψεως (καταγραφή δύο τιμών στο μέσον του ανοίγματος της δοκού επί των δύο κατακόρυφων επιφανειών του δοκιμίου) σε όλους του κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης στις δοκιμές κόπωσης δεν ήταν πρακτικά δυνατός λόγω του κορεσμού του ηλεκτρονικού συστήματος από το πλήθος των καταγραφόμενων στοιχείων. Για τον λόγο αυτό καταγράφηκε η μεταβολή του βέλους, για 10 κύκλους με 50 μετρήσεις για κάθε κύκλο, για τους 10 πρώτους κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης, μετά από τον 90ο έως τον 100ο, και μετά κάθε 1000 κύκλους. (Με άλλα λόγια έγινε πλήρης καταγραφή της μεταβολής του βέλους, για κάθε κύκλο από τον 1ο έως τον 10ο κύκλο, από τον 90ο έως τον 100ο κύκλο, από τον 1990ο έως τον 1000ο κ.ο.κ).

Επιπλέον καταγραφόταν σε κάθε κύκλο φόρτισης και η τιμή του βέλους, για φορτίο λίγο μεγαλύτερο του ελάχιστου, περίπου 0.3 kN, για να καταγραφεί και ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων φορτίσεων.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές τυπικές περιπτώσεις.

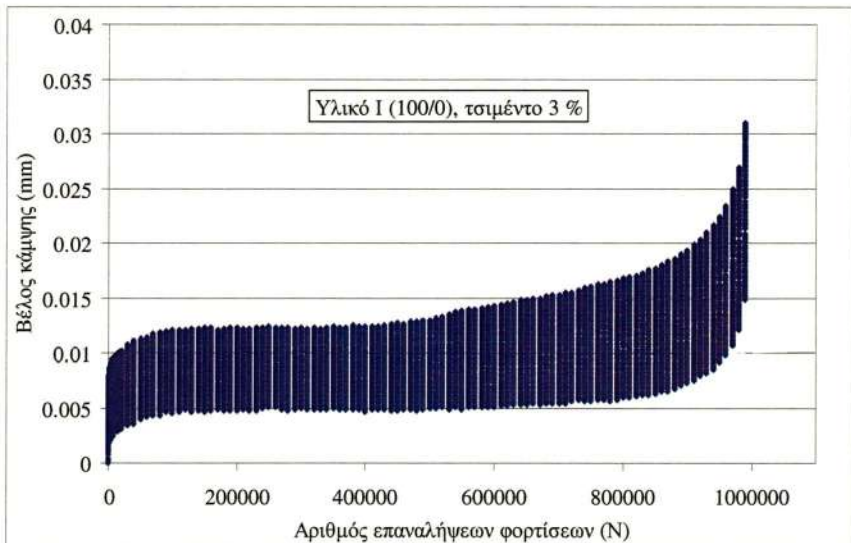
ο Υλικό Ι, τσιμέντο 3 %

Στο Σχήμα 6.16 παρουσιάζονται ως μία παχιά κατακόρυφη γραμμή οι 10 πλήρεις καταγραφές της μεταβολής του βέλους κάμψεως (μέσος όρος των δύο μετρήσεων ανά LVDT). Παρουσιάζονται όλες οι καταγραφές που έγιναν για ένα δοκίμιο το οποίο δοκιμάστηκε σε επανειλημμένες φορτίσεις με $\sigma/f = 0.70$ και αστόχησε μετά από 998.332 επαναλήψεις φορτίσεων. Το κάτω σημείο της παχιάς γραμμής παριστά την τιμή του βέλους για φόρτιση $\sigma_{\min} = 0.04$ MPa ενώ το ανώτερο σημείο παριστά την τιμή του βέλους για την επιβαλλόμενη μέγιστη τάση $\sigma_{\max} = 0.9$ MPa. Το μήκος της γραμμής παριστά την ελαστική - αναίρεσιμη παραμόρφωση (βέλος) του δοκιμίου για φόρτιση από $\sigma_{\min}$ σε $\sigma_{\max}$. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο παρουσιάζει αρχικά μία αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης μέχρι περίπου τις 100.000 επαναφορτίσεις (διάρκεια δοκιμών 2 ώρες 50'). Στη συνέχεια η μόνιμη αυτή παραμόρφωση παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι περίπου τις 700.000 επαναφορτίσεις (διάρκεια δοκιμών 19 ώρες 27') και μετά αρχίζει εκ νέου να μεγαλώνει με ρυθμό αυξανόμενο ο

οποίος από τις 900.000 περίπου επαναφορτίσεις και μετά γίνεται μεγάλος και οδηγεί στη θραύση του δοκιμίου.

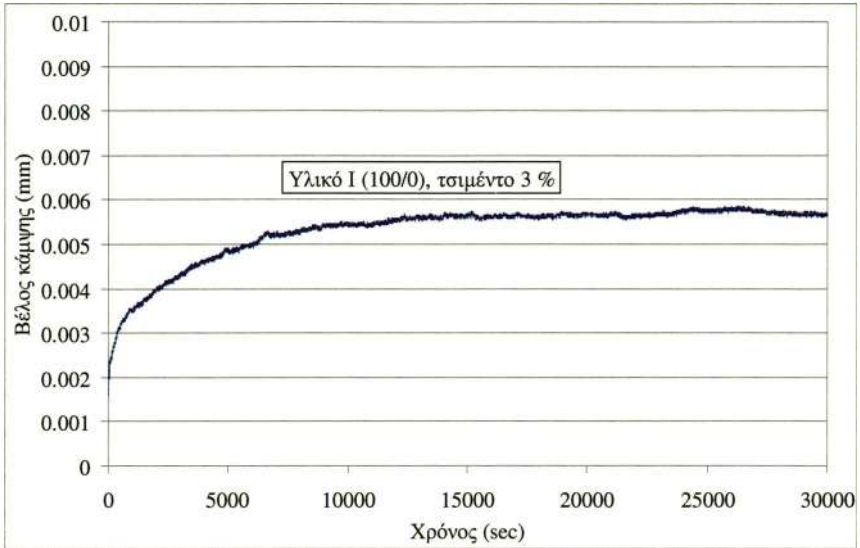
Η μόνιμη αυτή παραμόρφωση έχει κοινά χαρακτηριστικά με την ερπυστική παραμόρφωση αφού οι φορτίσεις δεν περιλαμβάνουν ανάπαυλες φορτίσεων.

Παρατηρείται επίσης ότι οι ελαστικές/αναιρούμενες παραμορφώσεις παραμένουν σταθερές μέχρι περίπου τις 400.000 επαναφορτίσεις μετά τις οποίες παρατηρείται αύξηση, στην αρχή μικρή μέχρι περίπου τις 700.000 φορτίσεις, και μετά η αύξηση γίνεται ραγδαία μέχρι τη θραύση. Η αύξηση της ελαστικής /αναιρέσιμης παραμόρφωσης (υπό σταθερό min και max φορτίο) υποδηλώνει τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας και την έναρξη ρηγμάτωσης του δοκιμίου. Οι επαναφορτίσεις από τις 400.000 μέχρι 700.000 πιστεύεται ότι είναι οι αναγκαίες φορτίσεις για την αργή προώθηση της/των ρωγμής/ων μετά το πέρας των οποίων (700.000) η διάδοση μίας ρωγμής γίνεται ταχύτερα μέχρις ότου η ρωγμή γίνει ασταθής και οδηγήσει σε άμεση θραύση.

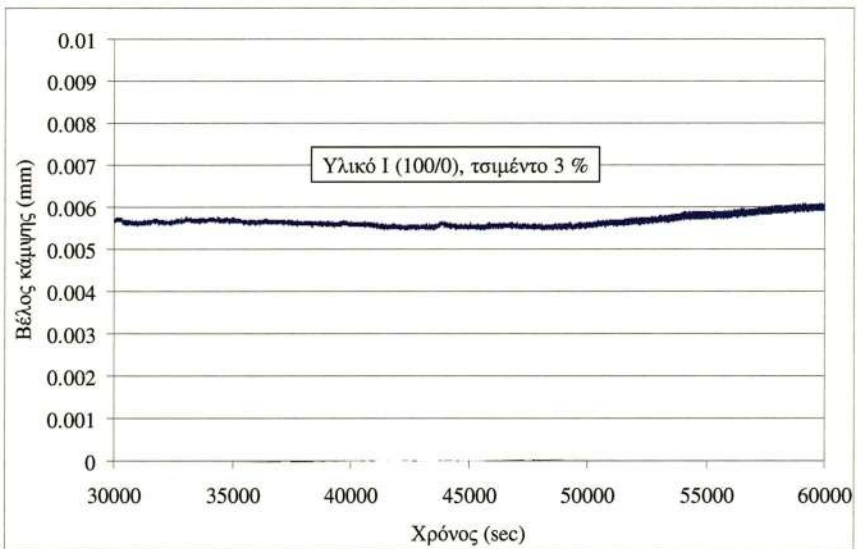


Σχήμα 6.16 : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του βέλους κάμψης για διάφορες επαναλήψεις φορτίσεων

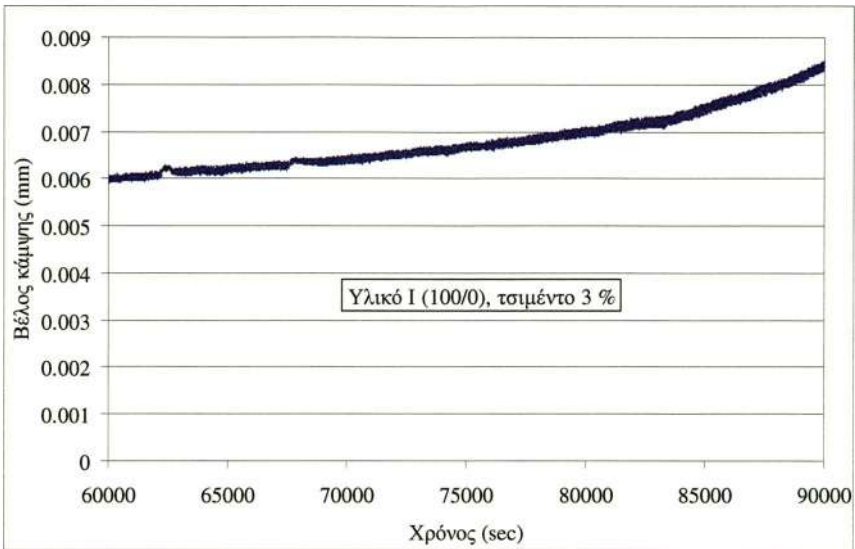
Στο Σχήμα 6.17 α, β, γ, δ, παρουσιάζεται το βέλος κάμψης του ίδιου δοκιμίου ($\sigma/f = 0.70$, $N = 998.332$, Σχήμα 6.16), για φορτίο ίσο προς 0.25 kN (0.075 MPa), το οποίο καταγραφόταν συνεχώς ως δύο τιμές (μέσος όρος μετρήσεων 2 LVDT). Σημειώνεται ότι η κλίμακα του άξονα Y δεν είναι κοινή σε όλα τα παραπάνω Σχήματα. (Στο Σχήμα 6.18 φαίνονται ενοποιημένα τα διαγράμματα 6.17 α, β, γ, δ). Επειδή το φορτίο αυτό πολύ λίγο διαφέρει από το ελάχιστο φορτίο των 0.1 kN το μετρούμενο βέλος για το φορτίο αυτό ελάχιστα διαφέρει του βέλους για το ελάχιστο φορτίο και επομένως οι παρατηρήσεις που προέρχονται από τη μεταβολή του σε συνάρτηση με τον αριθμό N των επαναλήψεων φορτίσεων ή τον χρόνο από την αρχή της δοκιμής, είναι ισοδύναμες με εκείνες που θα προέκυπταν αν καταγραφόταν συνεχώς το βέλος για το ελάχιστο φορτίο. Τα διαγράμματα του Σχήματος 6.17 παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της συνεχούς καταγραφής και επομένως είναι δυνατόν μέσω αυτών να γίνουν ακριβέστερες διακρίσεις των διαφόρων μεταβολών. Με τη βοήθεια του Σχήματος αυτού επιβεβαιώνονται οι προηγούμενες παρατηρήσεις. Έτσι παρατηρείται ότι το βέλος για την ελάχιστη τιμή της φόρτισης αυξάνει ραγδαία στην αρχή των φορτίσεων, εν συνεχεία ο ρυθμός αύξησης ελαττώνεται και μετά περίπου από 10.000 sec (100.000 επαναφορτίσεις) το βέλος παραμένει σχεδόν σταθερό μέχρι τις 550.000 επαναφορτίσεις (ή 55.000 sec). Από το σημείο αυτό περίπου αρχίζει μία ελαφριά - αρχικά - αύξηση του βέλους, η οποία στις 800.000 επαναφορτίσεις (80.000 sec) γίνεται μεγαλύτερη και πολύ μεγαλύτερη μετά τις 980.000 επαναφορτίσεις με ραγδαία αύξηση στις προηγούμενες της θραύσεως φορτίσεις. Όλα αυτά τα στάδια θα μπορούσαν να αποδοθούν σε σταδιακές μεταβολές του υλικού λόγω της επαναλαμβανόμενης μορφής επιβαλλόμενης εντατικής κατάστασης. Έτσι, το στάδιο της μικρής αύξησης του βέλους από τις 550.000 επαναφορτίσεις και μετά, σηματοδοτεί την ανάπτυξη μικρορηγματώσεων, οι οποίες είναι "σταθερής φύσεως" δηλ. προωθούνται/ διαδίδονται με αργό ρυθμό με την επιβολή εξωτερικού φορτίου επαναλαμβανόμενης μορφής. Η μικρή αύξηση του ρυθμού αύξησης του βέλους που παρατηρείται μετά τις 800.000 επαναφορτίσεις θεωρείται ότι σηματοδοτεί την περαιτέρω διάδοση των ρωγμών και τον σχηματισμό άλλων, ενώ η ραγδαία αύξηση του βέλους μετά τις 980.000 επαναφορτίσεις αποδίδεται στη ραγδαία αύξηση του μήκους των ρωγμών μέχρις ότου μία καταστεί ασταθής και επιφέρει θραύση του δοκιμίου.



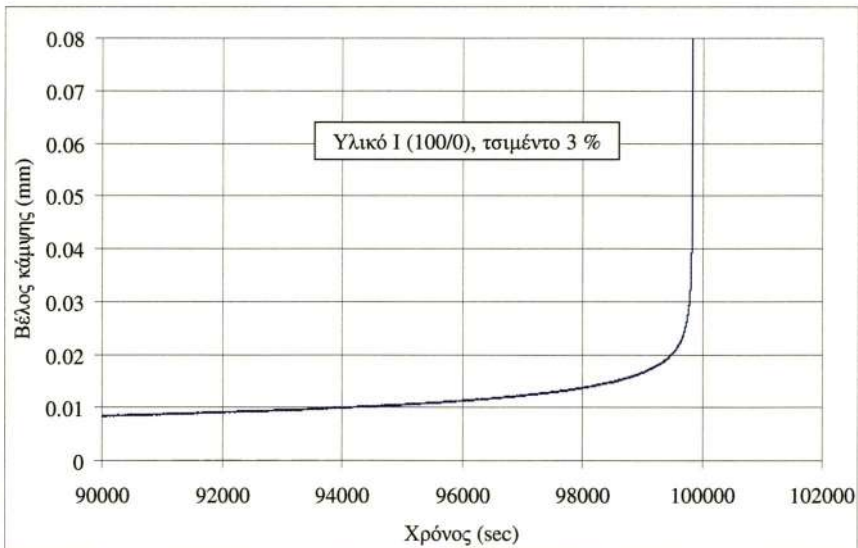
Σχήμα 6.17α : Μεταβολή του βέλους κάμψης για το min φορτίο, σε σχέση με το χρόνο



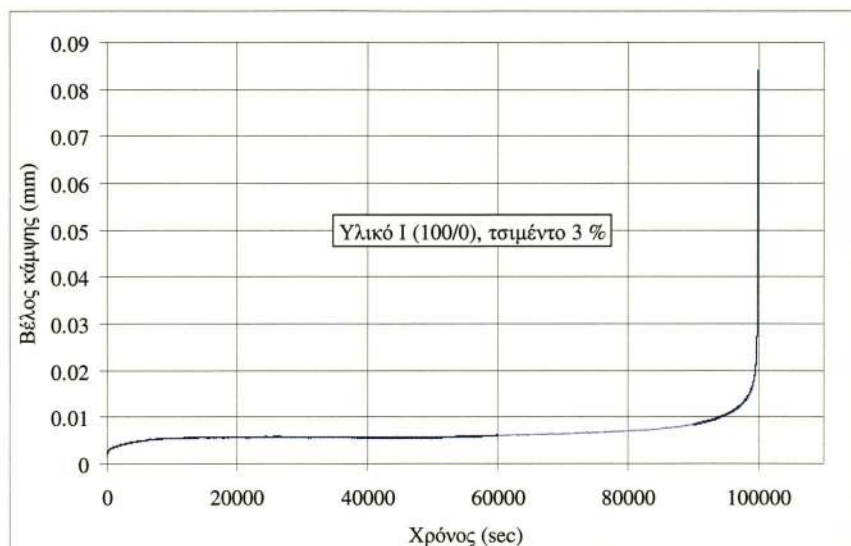
Σχήμα 6.17β : (Συνέχεια του Σχήματος 6.17α)



Σχήμα 6.17 γ : (Συνέχεια του Σχήματος 6.17β)



Σχήμα 6.17δ : (Συνέχεια του Σχήματος 6.17γ)

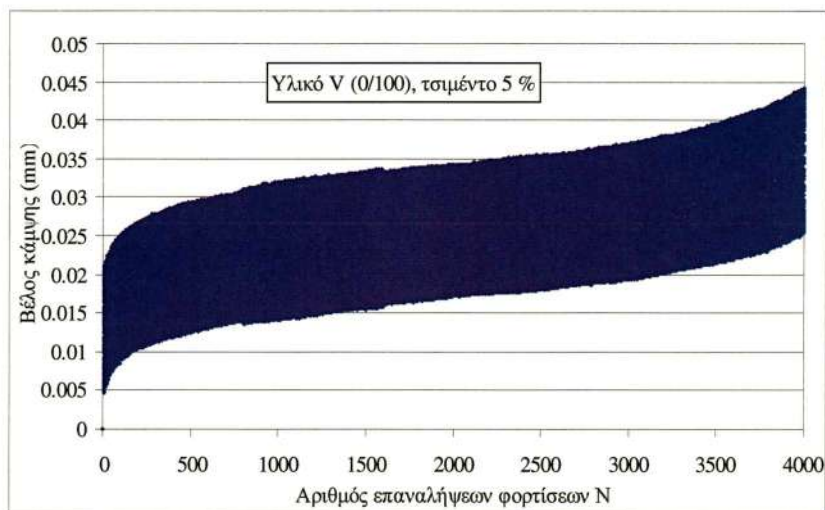


Σχήμα 6.18 : Μεταβολή του βέλους κάμψης για το min φορτίο, σε σχέση με τον χρόνο

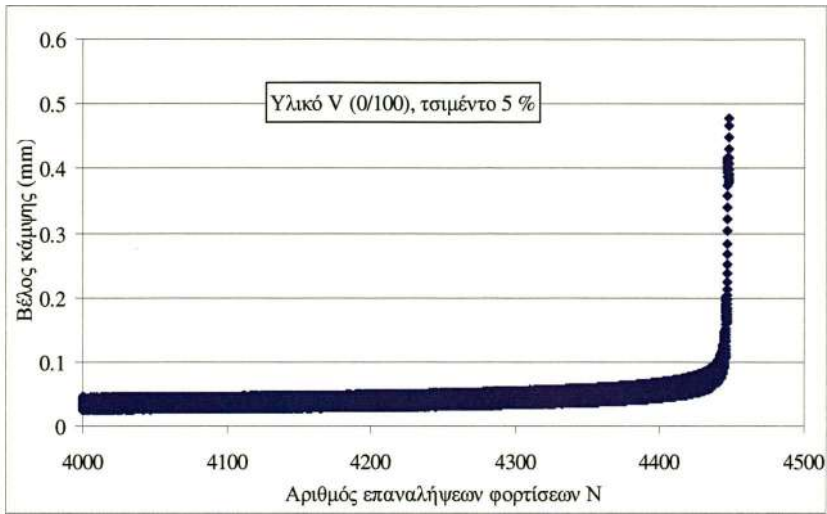
ο Υλικό V, τσιμέντο 5 %

Στο Σχήμα 6.19 α, β φαίνονται οι πλήρεις καταγραφές των βελών κάμψης, δοκιμίου με $s/f = 0.80$ και $N = 4.448$. Στο Σχήμα 6.20 φαίνονται ενοποιημένα τα Σχήματα 6.19 α και β, αλλά η κλίμακα του άξονα Y δεν είναι η μέγιστη (αυτή του Σχήματος 6.19β) γιατί το μήκος των κατακόρυφων γραμμών θα ήταν πολύ μικρό και δεν θα ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν οι διαφορές. Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται το βέλος κάμψης, του ίδιου δοκιμίου, για το min φορτίο κατά τη δοκιμή. Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του υλικού V (0 % θραυστό αμμοχάλικο, 100 % φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα) διαφέρει από εκείνη του υλικού I (100 % θραυστό αμμοχάλικο) στο γεγονός ότι δεν υπάρχει το στάδιο κατά το οποίο το βέλος για το ελάχιστο φορτίο (μόνιμη παραμόρφωση) διατηρείται σταθερό. Αντιθέτως, μετά την αρχική έντονη αύξηση του βέλους στις πρώτες επαναφορτίσεις (περίπου 600) ακολουθεί το στάδιο της συνεχούς αύξησης του βέλους με σταθερό ρυθμό αύξησης μέχρι περίπου τις 3.500 επαναφορτίσεις μετά τις οποίες ο ρυθμός παύει να είναι σταθερός, γίνεται συνεχώς αυξανόμενος για να ακολουθήσει ραγδαία αύξηση μετά

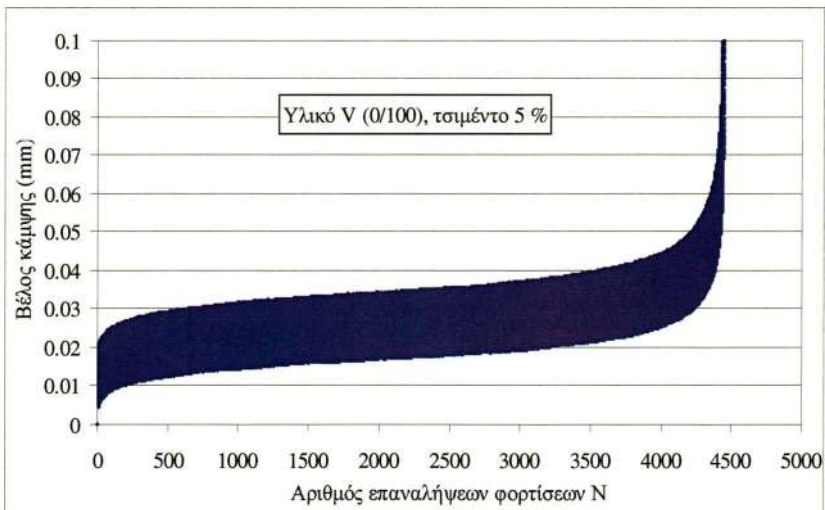
τις 4.000 επαναφορτίσεις που σηματοδοτούν την έναρξη της ταχείας διάδοσης των ρωγμών και την επικείμενη θραύση του δοκιμίου. Οι ελαστικές (αναιρέσιμες) παραμορφώσεις παραμένουν αρχικά, κατά το μάλλον ή ήττον, σταθερές, ακολούθως μετά περίπου 1.000 επαναφορτίσεις αρχίζουν να αυξάνουν με πολύ αργό ρυθμό (έναρξη και μικρή διάδοση ρηγμάτωσης) μέχρι περίπου τις 4.000 επαναφορτίσεις, μετά τις οποίες η αύξηση είναι εμφανώς εντονότερη σηματοδοτώντας την έναρξη της ταχείας διάδοσης των ρωγμών και την επικείμενη θραύση του δοκιμίου. Ως προς τη μεταβολή των ελαστικών/αναιρέσιμων παραμορφώσεων η συμπεριφορά του υλικού V δεν διαφέρει εκείνης του υλικού I. Η διαφορά εντοπίζεται κυρίως στη συνεχή αύξηση της μόνιμης παραμόρφωσης και στην απουσία σταδίου με σταθερό βέλος που χαρακτηρίζει το υλικό I. Αυτό θα πρέπει να συνδυαστεί με τα αποτελέσματα του ερπυσμού, όπου στο υλικό I (100/0) παρατηρήθηκε ότι οι ερπυστικές παραμορφώσεις - μετά την αρχική αύξηση - σταθεροποιούνται γρήγορα και δεν παρουσιάζουν ουσιαστική αύξηση. Αντίθετα, στο υλικό V (0/100) οι ερπυστικές παραμορφώσεις παρουσιάζουν συνεχή αύξηση, όπως και τα αντίστοιχα διαγράμματα βέλους κάμψης στην κόπωση.



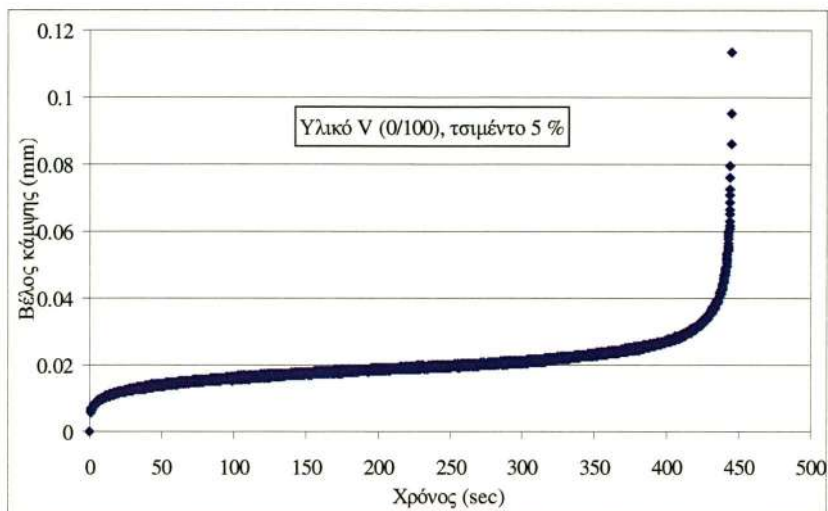
Σχήμα 6.19α : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του βέλους κάμψης για διάφορες επαναλήψεις φορτίσεων



Σχήμα 6.19β : Συνέχεια του Σχήματος 6.19α



Σχήμα 6.20 : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του βέλους κάμψης για διάφορες επαναλήψεις φορτίσεων



Σχήμα 6.21 : Μεταβολή του βέλους κάμψης, για το min φορτίο, σε σχέση με τον χρόνο

ο Υλικό III, τσιμέντο 5 %

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 6.22 και 6.23 η συμπεριφορά του υλικού III είναι ενδιάμεση εκείνης του I και του V. Είναι χαρακτηριστικό ότι και στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει στάδιο όπου το βέλος κάμψεως για το ελάχιστο επιβαλλόμενο φορτίο να διατηρείται σταθερό με τη διαφορά όμως ότι η μεταβολή του είναι αρκετά μικρή για να γίνει αμέσως αντιληπτή.

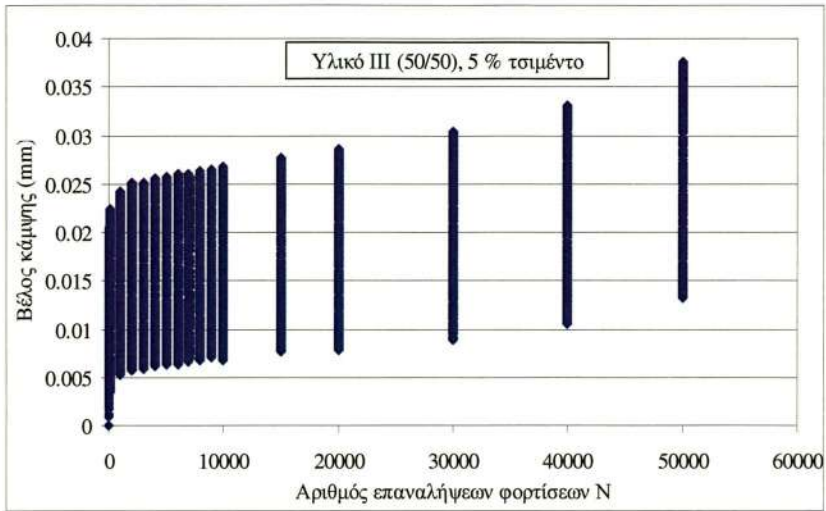
Από τα παραπάνω αποδεικνύεται η ορθότητα των λόγων στους οποίους αποδόθηκε η διαφορετική συμπεριφορά σε κόπωση των υλικών I, III, και V, η οποία αναπτύχθηκε προηγουμένως. Η διαφορά μεταξύ του υλικού I από τα υλικά III και V οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη κόκκων οι οποίοι συνίστανται από συσσωματώματα αδρανών συνδεδεμένων με ασφαλτικό υλικό - κόκκοι ασφαλτοκονιάματος - ή επίσης αδρανών που περιβάλλονται από ασφαλτικό υλικό. Οι κόκκοι αυτοί υπό την επίδραση του εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης στη δοκιμή κόπωσης παραμορφώνονται, ενώ οι κόκκοι από "καθαρό" αδρανές υλικό (υλικό I) παραμορφώνονται ελάχιστα λόγω του μεγάλου μέτρου ελαστικότητάς τους. Η κατανομή των εσωτερικών τάσεων στα υλικά I (100/0) και στα υλικά III (50/50) και - ακόμη περισσότερο - στα V (0/100) είναι για τον λόγο αυτό πολύ διαφορετική, η

διαφορά εξαρτάται από το ποσοστό των συσσωματωμάτων ασφαλτοκονιάματος. Ταυτόχρονα λόγω της φύσεως της δοκιμής φόρτισης (επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης - αποφόρτισης με ένα μόνιμο πάντα ελάχιστο φορτίο και με απουσία ανάπαυλας φορτίσεως κατά τη διάρκεια της οποίας το φορτίο είναι μηδενικό) προκαλεί μόνιμες παραμορφώσεις στα συσσωματώματα από ασφαλτοκονίαμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση των τάσεων στο συνδετικό υλικό (τσιμεντοπολτό). Γίνεται επομένως φανερό ότι η συμπεριφορά σε κόπωση των υλικών III και V δεν μπορεί παρά να είναι διαφορετική από εκείνη του υλικού I και να παρουσιάζει μικρότερο αριθμό επαναφορτίσεων για το ίδιο επίπεδο φόρτισης σ/f .

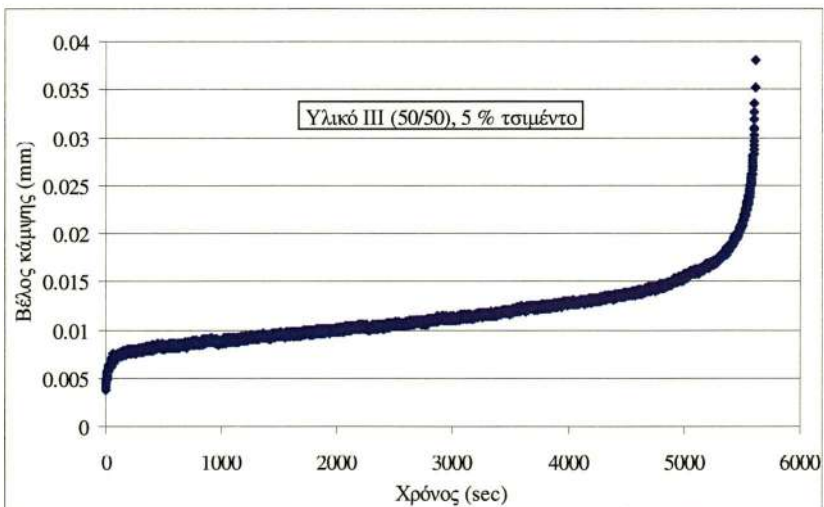
Στην πράξη όμως σπανίως - αν όχι ποτέ - οι φορτίσεις ακολουθούν η μία την άλλη χωρίς ανάπαυλες μεταξύ τους. Επομένως τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι δυσμενή και δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες φόρτισης στα οδοστρώματα. Είναι επομένως αναγκαίο να ερευνηθεί σε βάθος το θέμα της επίδρασης της ανάπαυλας των φορτίσεων στη συμπεριφορά σε κόπωση των μιγμάτων που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα.

Θεωρείται επίσης αναγκαίο να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των δοκιμών δεδομένου ότι :

- ο η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των υλικών που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία.
- ο η θερμοκρασία του οδοστρώματος μεταβάλλεται έντονα τόσο κατά τη διάρκεια του 24ώρου όσο και ετησίως.



Σχήμα 6.22 : Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του βέλους κάμψης, για διάφορες επαναλήψεις φορτίσεων



Σχήμα 6.23 : Μεταβολή του βέλους κάμψης, για το min φορτίο, σε σχέση με τον χρόνο

7. ΓΕΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πρέπει καταρχήν να σημειωθεί ότι, όταν γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων γενικά των δοκιμών μιας ημέρας (σύγκριση μεταξύ ποσοστών τσιμέντου ή ποσοστών φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η σημαντική εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία του μίγματος κατά την παρασκευή του, και επομένως από τη θερμοκρασία των συστατικών του μίγματος (αδρανή, νερό, τσιμέντο) η οποία δεν ήταν δυνατόν να διατηρηθεί σταθερή σε όλο το διάστημα της παρασκευής των διαφόρων μιγμάτων. Η θερμοκρασία του θαλάμου συντήρησης διετηρείτο περίπου σταθερή, αλλά η θερμοκρασία του μίγματος παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα μιας ημέρας. Επομένως ορισμένες διαφορές από τα αναμενόμενα αποτελέσματα θα μπορούσαν να αποδοθούν σε σημαντικό ποσοστό στο λόγο αυτό.

7.1 ΑΝΤΟΧΗ

Η επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζεται στο :

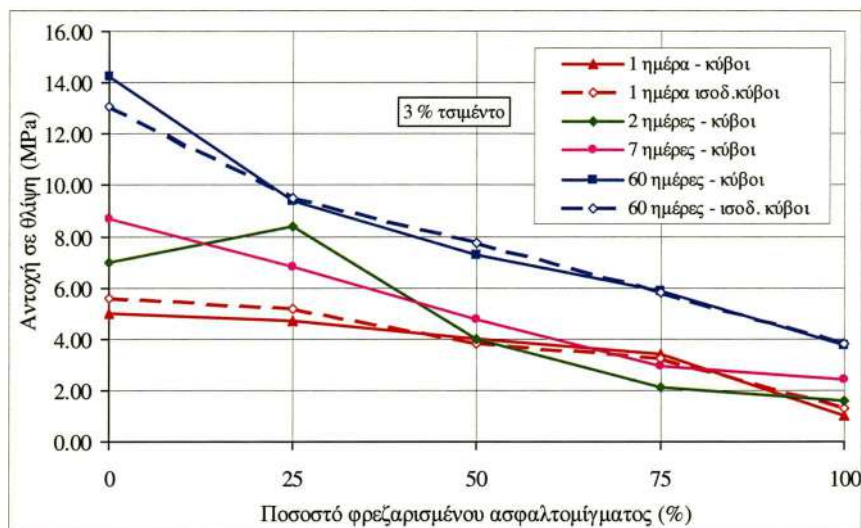
- ο Σχήμα 7.1 σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη, για ποσοστό τσιμέντου 3 %
- ο Σχήμα 7.2 σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη, για ποσοστό τσιμέντου 5 %
- ο Σχήμα 7.3 σε σχέση με την αντοχή σε εφελκυσμό
- ο Σχήμα 7.4 σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη

Σημειώνεται ότι σε όλα τα Σχήματα δίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων, για όποιες δοκιμές υπάρχουν επαναλήψεις. Ακόμα, όπου είναι εφικτό, δίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων της κύριας έρευνας με τις δευτερεύουσες (Παράγραφος 5.2.4, 5.3.2) καθώς και με αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ΕΚΕΤ (Παράγραφος 5.3.1).

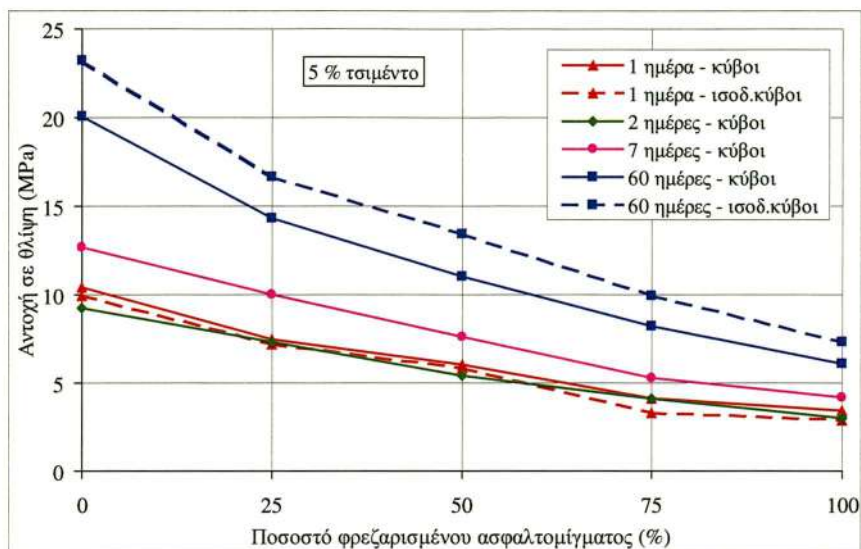
Έτσι στα Σχήματα 7.1 και 7.2 για την αντοχή κύβου ηλικίας 60 ημερών δίνεται ο σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων των εργαστηρίων ΕΜΠ και ΕΚΕΤ. Στα Σχήματα 7.2 και 7.3 και 7.10, για ηλικία 60 ημερών και αντοχή ισοδύναμου

κύβου (Σχήμα 7.2), αντοχή σε εφελκυσμό (Σχήμα 7.3), μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και σε εφελκυσμό (Σχήμα 7.10) δίνεται ο σταθμισμένος Μ.Ο. των δοκιμών της κύριας έρευνας και της έρευνας που περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.2.4 (για τα υλικά Ι (100/0), ΙΙ (75/25) και ΙΙΙ (50/50)).

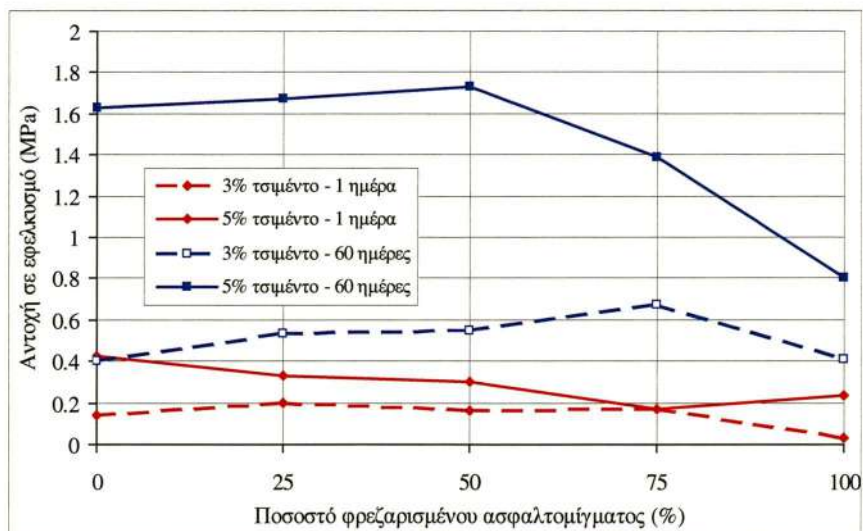
Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στα Σχήματα 7.1 και 7.2 για την αντοχή ισοδύναμου κύβου ηλικίας 60 ημερών έχουν προστεθεί τα αποτελέσματα των ισοδύναμων κύβων που έχουν προκύψει μετά τη δοκιμή σε κόπωση. Τα αποτελέσματα έχουν αυξημένη αξιοπιστία, επειδή ο αριθμός των δοκιμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος, 30 αποτελέσματα για τα υλικά ΙΙ (75/25) και ΙΙΙ (50/50) τσιμέντο 5 %, 50 αποτελέσματα για τα υλικά ΙΙ (75/25) και ΙΙΙ (50/50) τσιμέντο 3 %, 140 αποτελέσματα για το υλικό Ι (100/0) τσιμέντο 3 %.



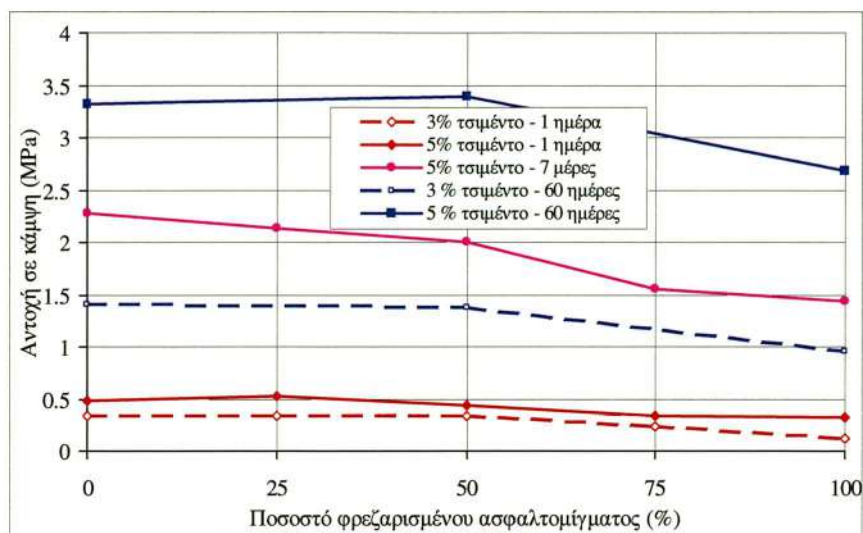
Σχήμα 7.1 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για ποσοστό τσιμέντου 3 %



Σχήμα 7.2 : Μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, για ποσοστό τσιμέντου 5 %



Σχήμα 7.3 : Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος



Σχήμα 7.4 : Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν (και για τα δύο ποσοστά τσιμέντου και για όλες τις ηλικίες), όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, τόσο μειώνονται γενικά οι τιμές των αντοχών και των μέτρων ελαστικότητας.

Πράγματι είναι αναμενόμενο η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των μιγμάτων αμμοχαλικού και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος να μειώνονται όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει. Ο κυριότερος λόγος εκτιμάται ότι είναι το γεγονός ότι το φρεζαρισμένο ασφαλτόμικγμα αποτελείται από κόκκους ασφαλτικού κονιάματος ή κόκκους που έχουν πλήρως ή εν μέρει επικαλυφθεί με ασφαλτόμικγμα ή από κόκκους που είναι συνδυασμός των παραπάνω ειδών, (Παράγραφος 1.2, Φωτογραφία 1.1). Οι κόκκοι από ασφαλτικό κονίαμα έχουν μικρότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας και επομένως αναμένεται να επηρεάζουν ανάλογα την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του μίγματος. Τα άλλα είδη των κόκκων επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά κατά το ποσοστό της επιφάνειάς τους που είναι καλυμμένο με ασφαλτικό κονίαμα ή με υμένα από ασφαλτικό συνδετικό υλικό. Ο υμένας από ασφαλτικό συνδετικό υλικό επιτρέπει μεγαλύτερες μετακινήσεις και ολισθήσεις ενώ θραύεται στη διεπιφάνειά του σε μικρότερο φορτίο απ' ότι ο τσιμεντοπολτός που έχει καλύψει ένα καθαρό αδρανές. Είναι επομένως

αναμενόμενο, να μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας από την ύπαρξη τέτοιων κόκκων μέσα στο ανακυκλωμένο μίγμα.

Είναι αξιοσημείωτο ότι στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και έρευνες σε σκυρόδεμα κατά την οποία μέρος των αδρανών αντικαταστάθηκε με λάστιχο [Eldin and Senouci 1993, Torcu I. 1995, Khatib et al 1999]. Με βάση τις έρευνες αυτές, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε διάρρηξη μειώνονται μέχρι 80 % για 100 % αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών με λάστιχο και μέχρι 60 % για 100 % αντικατάσταση της άμμου.

Σε ανάλογα συμπεράσματα καταλήγει επίσης έρευνα των Mathias et al [2004], που αφορούσε σκυροδέματα οδοστρωμάτων.

Από τα Σχήματα 7.1 και 7.2 παρατηρείται ότι η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής (κύβου ή ισοδύναμου κύβου) συναρτήσει του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού είναι μεγαλύτερη για ποσοστό τσιμέντου 5 % από ότι για 3 %. (Η παρατηρούμενη αύξηση της αντοχής για ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος 25 % και τσιμέντο 3 % (Σχήμα) δεν αξιολογείται ιδιαίτερα, δεδομένου ότι δεν παρατηρείται ανάλογη μεταβολή για καμία άλλη ηλικία δοκιμής, ούτε και για ποσοστό τσιμέντου 5 %).

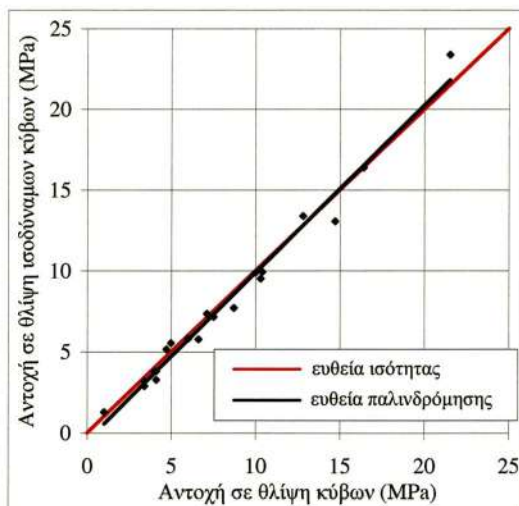
Επίσης, η μεταβολή αυτή συνήθως είναι εντονότερη για μικρά ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και ηπιότερη για μεγαλύτερα ποσοστά, όπως παρατηρήθηκε και σε προγενέστερες έρευνες [Kolias 1996a, Κόλιας και Κατσάκου 1996], Παράγραφος 2.1.2. Η μορφή της καμπύλης στην έρευνα αυτή και στις προγενέστερες είναι παρόμοια, αν και στις προγενέστερες η κλίση της καμπύλης είναι εντονότερη από το υλικό I μέχρι το υλικό III και ηπιότερη από το III μέχρι το IV. Ως προς το ύψος των τιμών παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας δεν διαφοροποιούνται σημαντικά από αυτά των προγενέστερων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές των αντοχών διπλασιάζονται από τη μία στις εξήντα ημέρες και για τα δύο ποσοστά τσιμέντου. Φυσικά, η εξέλιξη των αντοχών με το χρόνο επηρεάζεται πρωτίστως από την εξέλιξη των αντοχών του τσιμέντου (στην παρούσα διατριβή τσιμέντο ισοδύναμο με CEM II 32.5 N).

Παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή κύβου (Σχήμα 7.1) δεν διαφέρει σημαντικά από τη θλιπτική αντοχή ισοδύναμου κύβου (Σχήμα 7.2). Η μέγιστη διαφορά είναι 8.9 % για ποσοστό τσιμέντου 5 %, ηλικία 60 ημερών για το υλικό ΙΙΙ (Σχήμα 7.2).

Η μικρή διαφορά της αντοχής σε θλίψη κύβων και ισοδύναμων κύβων φαίνεται και από το Σχήμα 7.5, στο οποίο έχει σχεδιαστεί και η γραμμή ισότητας (κλίση 45°), για ευκολία στη σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και η ευθεία παλινδρόμησης με την αντίστοιχη εξίσωση. Παρατηρείται ότι οι αντοχές κύβου και ισοδύναμου κύβου δεν διαφέρουν πρακτικά καθόλου μεταξύ τους.

Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξε έρευνα για σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά [Kolias 1975]. Θεωρητικά η αντοχή ισοδύναμου κύβου θα έπρεπε να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη ($\cong 5$ %) εκείνης του κύβου λόγω της επιρροής (παρεμπόδισης παραμόρφωσης) του τμήματος που εκτείνεται πέραν των διαστάσεων του κύβου [Neville, 1995], αλλά τα πειραματικά αποτελέσματα δεν επιβεβαιώνουν πάντοτε το συμπέρασμα αυτό [Porovics 1967].



Σχήμα 7.5 : Συσχέτιση της θλιπτικής αντοχής κύβων και ισοδύναμων κύβων

Τα αποτελέσματα σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Σχήμα 7.3) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος

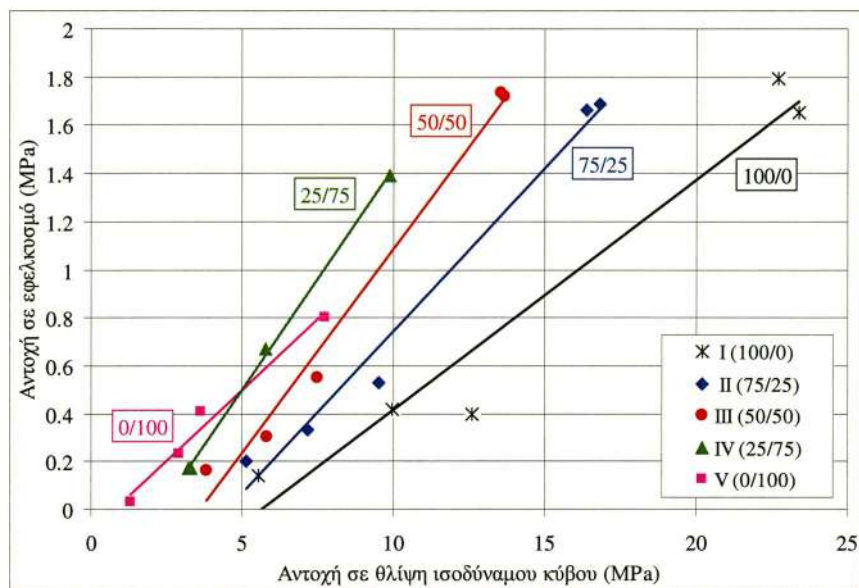
στο μίγμα δεν υπάρχει μείωση της αντοχής, όπως αναμένετο. Το θέμα έχει ήδη σχολιαστεί σε προηγούμενες Παραγράφους (5.2.1 - 5.2.4). Η ιδιομορφία αυτή αποδίδεται στα χονδρόκοκκα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία ήταν εμφανώς επικαλυμμένα με παιπάλη, η οποία μείωσε αναλογικά περισσότερο την αντοχή, για ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος 0 %. Εκτενής σχολιασμός της ιδιομορφίας αυτής δίνεται στην Παράγραφο 5.2.4.

Στο Σχήμα 7.4 παρατηρείται περίπου το ίδιο φαινόμενο για την αντοχή σε κάμψη, όπως και στον εφελκυσμό, (η αντοχή είναι σταθερή για ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος 0 % έως 50 %). Ως προς το ύψος των τιμών της αντοχής σε κάμψη για τη μία ημέρα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά στις τιμές των αντοχών για τα δύο ποσοστά τσιμέντου, αντίθετα με τις εξήντα ημέρες όπου οι αντοχές για το ποσοστό τσιμέντου 5 % είναι υπερδιπλάσιες από ότι για το ποσοστό τσιμέντου 3 %.

Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στον μικρό βαθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου για την ηλικία της μίας ημέρας που δεν επιτρέπει να γίνει αισθητή η διαφορετική ποσότητα τσιμέντου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής με τα αποτελέσματα προγενέστερων [Kolias 1996a, Κόλιας και Κατσάκου 1996], παρατηρείται ότι η μορφή της καμπύλης διαφέρει σημαντικά από το υλικό I έως το υλικό III (για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω). Οι τιμές των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής είναι λίγο μεγαλύτερες στα υλικά III και IV από αυτές των προγενέστερων ερευνών, ενώ υπάρχει σύμπτωση τιμών για το μίγμα I.

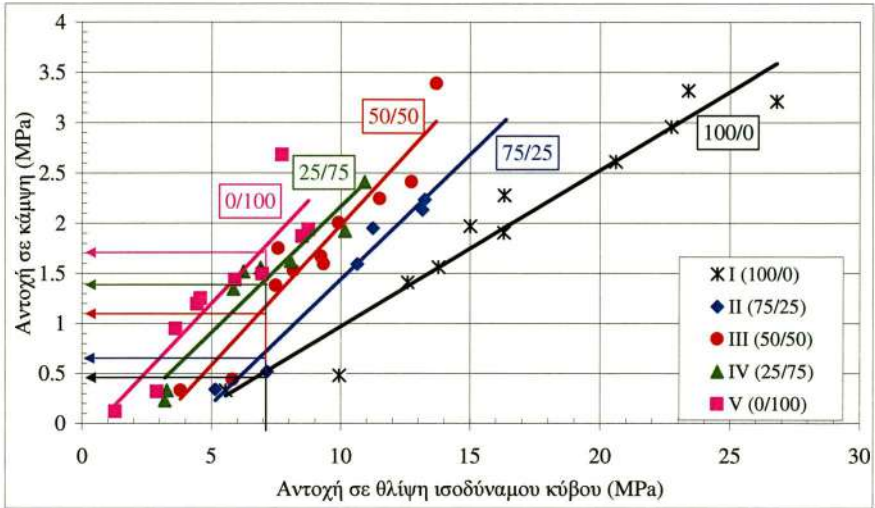
Στα Σχήματα 7.6 και 7.7 φαίνεται η συσχέτιση της αντοχής σε εφελκυσμό και της αντοχής σε κάμψη αντίστοιχα, ως προς την αντοχή σε θλίψη. Στα Σχήματα φαίνονται επίσης οι ευθείες παλινδρόμησης για τα υλικά I (100/0) έως V (0/100) που εξετάστηκαν. Σημειώνεται ότι στα Σχήματα έχουν προστεθεί και τα αποτελέσματα άλλων ερευνών [Kolias 1996a, Kolias and Williams 1978a]. Σημειώνεται ότι το Σχήμα 7.7 περιλαμβάνει επίσης και αποτελέσματα σε διαφορετικές θερμοκρασίες, (Παράγραφος 5.3.2).

Στο Σχήμα 7.8 δίνεται η συσχέτιση της αντοχής σε διάρρηξη ως προς την αντοχή σε θλίψη, για όλες τις θερμοκρασίες κατά τη δοκιμή.



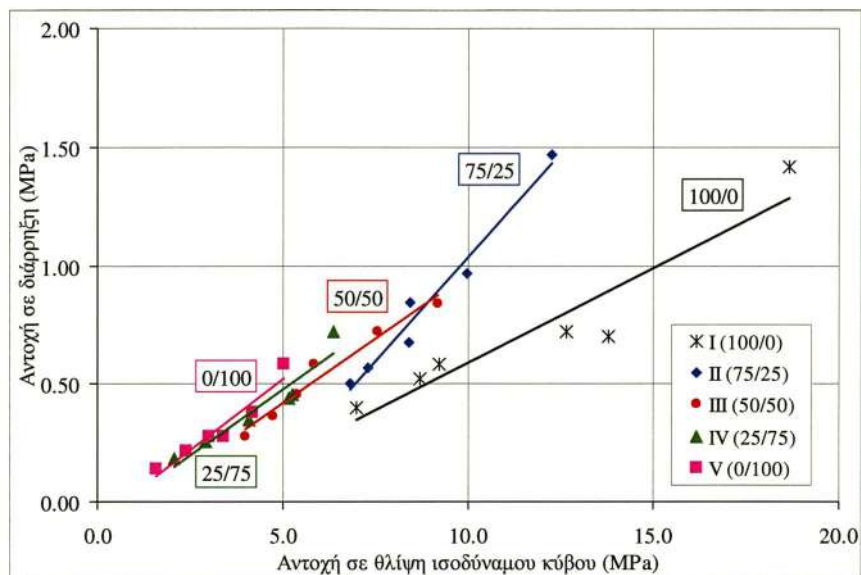
Υλικά	Ευθείες παλινδρόμησης	
I (100/0)	$y = 0.0958x - 0.5406$	$R^2 = 0.9502$
II (75/25)	$y = 0.1696x - 0.6128$	$R^2 = 0.9852$
III (50/50)	$y = 0.1696x - 0.6128$	$R^2 = 0.9852$
IV (25/75)	$y = 0.1837x - 0.4187$	$R^2 = 0.9989$
V (0/100)	$y = 0.1182x - 0.0924$	$R^2 = 0.9775$

Σχήμα 7.6 : Συσχέτιση της αντοχής σε εφελκυσμό ως προς την αντοχή σε θλίψη (ισοδύναμου κύβου)



Υλικά	Ευθείες παλινδρόμησης	
I (100/0)	$y = 0.1556x - 0.5868$	$R^2 = 0.941$
II (75/25)	$y = 0.2489x - 1.0532$	$R^2 = 0.9695$
III (50/50)	$y = 0.2799x - 0.8231$	$R^2 = 0.9068$
IV (25/75)	$y = 0.2517x - 0.3525$	$R^2 = 0.9167$
V (0/100)	$y = 0.2733x - 0.1709$	$R^2 = 0.8203$

Σχήμα 7.7 : Συσχέτιση της αντοχής σε κάμψη ως προς την αντοχή σε θλίψη (ισοδύναμου κύβου)



Υλικά	Ευθείες παλινδρόμησης	
I (100/0)	$y = 0.08x - 0.2086$	$R^2 = 0.8967$
II (75/25)	$y = 0.1753x - 0.7183$	$R^2 = 0.9697$
III (50/50)	$y = 0.1097x - 0.1323$	$R^2 = 0.9639$
IV (25/75)	$y = 0.1129x - 0.0876$	$R^2 = 0.9086$
V (0/100)	$y = 0.1208x - 0.0851$	$R^2 = 0.9267$

Σχήμα 7.8 : Συσχέτιση της αντοχής σε διάρρηξη ως προς την αντοχή σε θλίψη (ισοδύναμου κύβου)

Γενικά από τα Σχήματα 7.6 και 7.7 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος η ευθεία παλινδρόμησης μετατοπίζεται και στρέφεται προς τον άξονα των Υ. Τα αποτελέσματα γενικά επιβεβαιώνονται από το Σχήμα 7.8, στο οποίο παρουσιάζεται η συσχέτιση της αντοχής σε διάρρηξη με την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου. Στο Σχήμα αυτό παρατηρείται επίσης ότι όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος είναι μεγαλύτερο, τόσο στρέφεται η ευθεία παλινδρόμησης αριστερόστροφα και ταυτόχρονα μετατοπίζεται προς τα αριστερά. Η μεγαλύτερη κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης του υλικού II (75/25) σε σχέση με τα υλικά III (50/50), IV (25/75) και V (0/100) αποδίδεται στη διασπορά της δοκιμής σε διάρρηξη [ΕΛΟΤ - EN 13386.42 2003]. Εξαιρέση αποτελούν επίσης τα υλικά IV(25/75) και V (0/100) για τον εφελκυσμό (Σχήμα 7.7). Η συμπεριφορά των υλικών αυτών, λόγω του μεγάλου ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στη μάζα τους, είναι παρόμοια και είναι δύσκολο να ανιχνευτούν σαφείς διαφορές στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

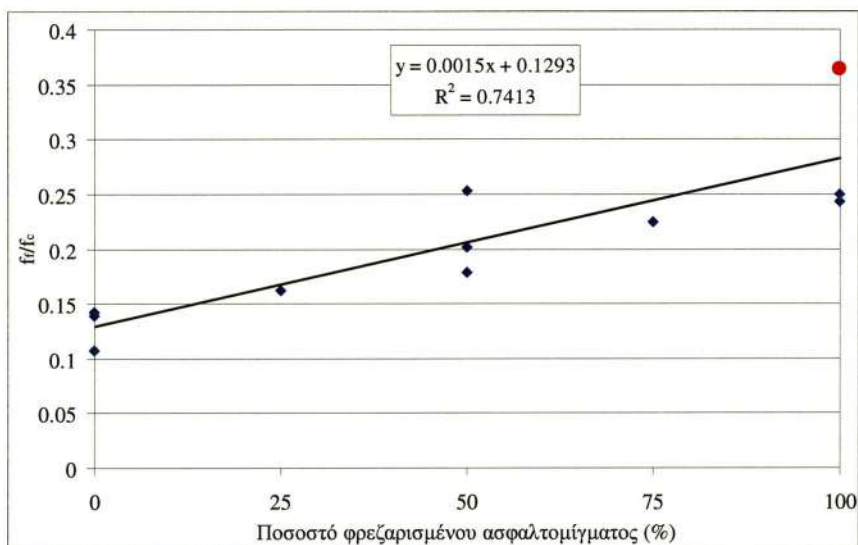
Τα αποτελέσματα των προγενέστερων ερευνών που δίνονται στα Σχήματα 7.6 και 7.7 για το υλικό I (100/0) [Kolias and Williams 1978a, Kolias 1996a] επιβεβαιώνουν την ευθεία παλινδρόμησης του υλικού αυτού.

Η αύξηση της κλίσης των ευθειών παλινδρόμησης με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος σημαίνει ότι για την ίδια αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό ή κάμψη αυξάνει, όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος.

Εφόσον το χαρακτηριστικό αυτό επιβεβαιωθεί και για άλλα ασφαλομίγματα θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στις προδιαγραφές κατασκευής οι οποίες κατατάσσουν τις κατηγορίες των ανακυκλωμένων με τσιμέντο υλικών ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη [Milton and Earland 1999], ακολουθώντας την πρακτική που εφαρμόζεται για τα κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα. Η παρατηρούμενη διαφορά είναι πολύ σημαντική για να θεωρηθεί ότι είναι απλώς "υπέρ της ασφαλείας", όπως διατυπώθηκε στα Workshops στην Salamanca και στην Istanbul, [Kolias et al 2001, Kolias and Katsakou 2004]. Για αντοχή σε θλίψη 7 MPa, η αντοχή σε κάμψη του συμβατικού καθαρού κατεργασμένου με τσιμέντο αμμοχάλικου είναι 0.5 MPa περίπου, ενώ είναι περίπου ίση με 1.1 MPa και με 1.7 MPa όταν περιέχει 50 % και 100 % φρεζαρισμένο ασφαλόμιγμα αντίστοιχα.

Δεδομένης της τάσης σήμερα σε πολλές Προδιαγραφές σταθεροποιημένων υλικών [NAASRA 1987, MOPU 2001] να προδιαγράφονται γενικά αντοχές σε θλίψη μικρότερες από 5 MPa πιστεύεται ότι θα ήταν καλό να επεκταθούν τα διαγράμματα αυτά (Σχήματα 7.6 - 7.8) και για θλιπτικές αντοχές 2 ή 3 MPa.

Στο Σχήμα 7.9 δίνεται η μεταβολή του λόγου της καμπτικής προς τη θλιπτική αντοχή σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος.



Σχήμα 7.9 : Μεταβολή του λόγου της αντοχής σε κάμψη προς την αντοχή σε θλίψη (f_t/f_c) σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 7.9 δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα αποτελέσματα για ηλικία 1 ημέρας. Αν στο Σχήμα δεν ληφθεί υπόψη το σημείο που είναι σημειωμένο με κόκκινο η εξίσωση παλινδρόμησης γίνεται :

$$y = 0.012 x + 0.1236, R^2 = 0.8081.$$

Παρατηρείται ότι με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος ο λόγος f_t/f_c αυξάνει. Δηλαδή, με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου

ασφαλτομίγματος, τόσο η θλιπτική όσο και η καμπτική αντοχή μειώνονται, αλλά η θλιπτική αντοχή μειώνεται πιο γρήγορα. Αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, βάσει των Σχημάτων 7.6 και 7.7, ότι για την ίδια αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε κάμψη είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και ενισχύει τις επιφυλάξεις που διατυπώθηκαν προηγουμένως σχετικά με τις Βρετανικές και Ισπανικές Προδιαγραφές, οι οποίες κατατάσσουν τα ανακυκλωμένα υλικά [Milton and Earland 1999, IECA 1999, MOPU 2001] με βάση μόνον την αντοχή σε θλίψη.

Οι Γαλλικές Οδηγίες υπολογισμού [SETRA - LCPC 1997] συμμερίζονται την παραπάνω επιφύλαξη και κατατάσσουν τα κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες υλικά και τα ανακυκλωμένα υλικά σε 5 κατηγορίες, G1 - G5, ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε ηλικία 360 ημερών. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, αλλά για μηχανικά χαρακτηριστικά 60 ημερών (αντί 360 ημερών), τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες :

Υλικό I (100/0)	: Κατηγορία G4
Υλικό II (75/25)	: Κατηγορία G4
Υλικό III (50/50)	: Κατηγορία G4
Υλικό IV (25/75)	: Κατηγορία G4
Υλικό V (0/100)	: Κατηγορία G3

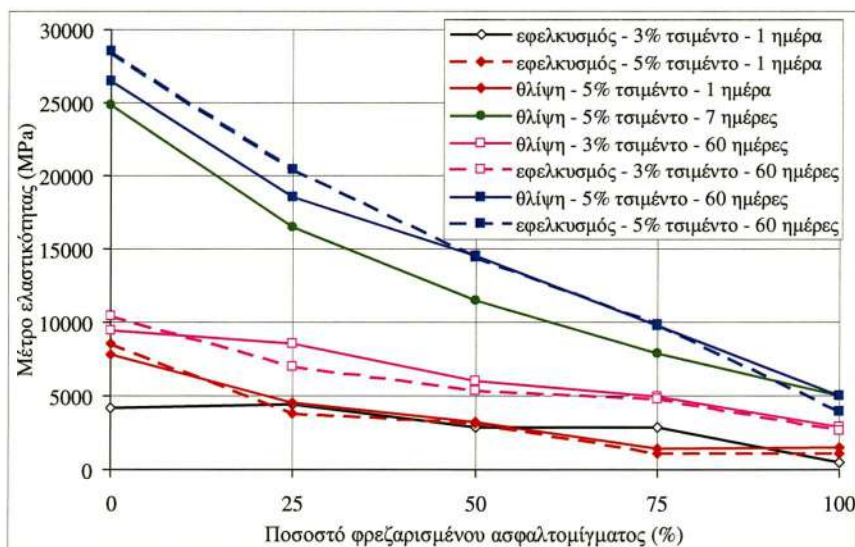
Ο Lefort [1997] στη Γαλλία, στο πλαίσιο ερευνών για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς ανακυκλωμένων με τσιμέντο οδοστρωμάτων, διαπίστωσε - με μετρήσεις σε καρότα - ότι όλα τα εξετασθέντα υλικά ανήκουν στην κατηγορία G4.

7.2 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

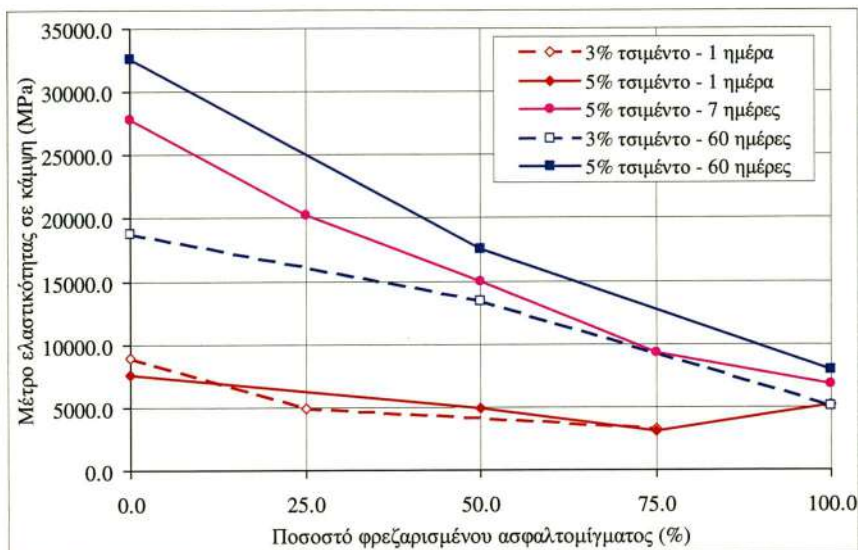
Η επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζεται στο :

- ο Σχήμα 7.10 σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη
- ο Σχήμα 7.11 σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη

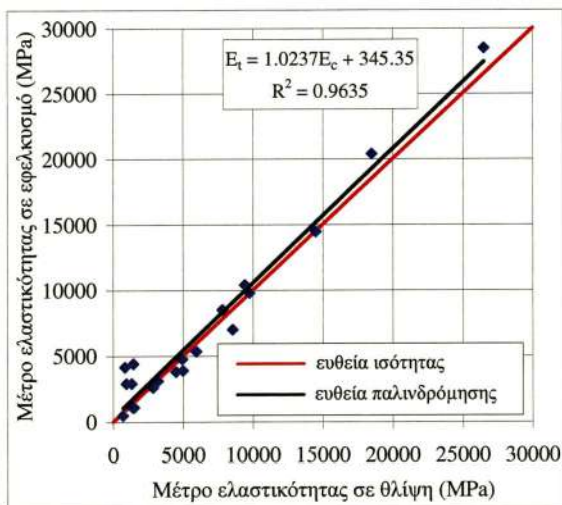
Από το Σχήμα 7.10 παρατηρείται μία πολύ καλή ταύτιση των μέτρων ελαστικότητας σε θλίψη και σε εφελκυσμό, για όλες τις ηλικίες που εξετάστηκαν. Το ίδιο φαίνεται και στο Σχήμα 7.12, στο οποίο φαίνεται η σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας σε θλίψη και σε εφελκυσμό. Στο Σχήμα έχει σχεδιαστεί και η ευθεία παλινδρόμησης και η ευθεία ισότητας για ευκολία στη σύγκριση. Παρατηρείται ότι τα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό είναι λίγο μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της θλίψης, αλλά η διαφορά αυτή είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 7.10 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

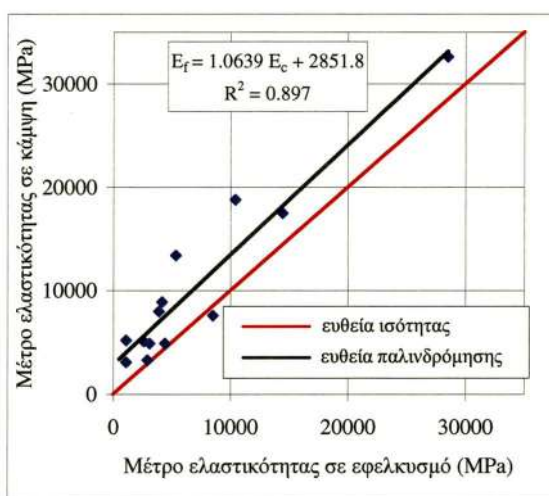


Σχήμα 7.11 : Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

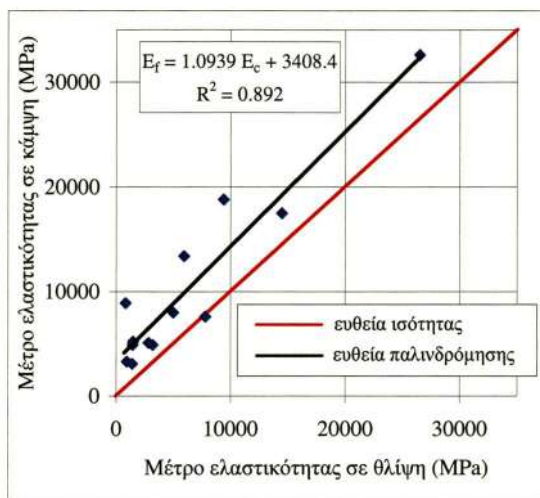


Σχήμα 7.12 : Συσχέτιση των μέτρων ελαστικότητας σε εφελκυσμό και σε θλίψη

Το θέμα της ισότητας ή μη των μέτρων ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό αποτέλεσε αντικείμενο προβληματισμού και διερεύνησης στο παρελθόν [Metcalf 1966, Larsen and Nussbaum 1967, Pretorius 1970, Bofinger 1970, Wang and Huston 1970, Patankar and Williams 1970, Smith 1972, Fossberg et al 1972a, 1972b, Bonnot 1972a, Kolias 1975]. Από τα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν στο TRRL το 1978 από τους Kolias and Williams [1978a] σε σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά επίσης επιβεβαιώνεται ότι τα μέτρα ελαστικότητας σε θλίψη και εφελκυσμό είναι πρακτικώς ίσα. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των προγενέστερων ερευνών και συμπεραίνουν ότι τα μέτρα ελαστικότητας είναι ίσα. Αντίθετα παρατηρείται ότι τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και σε θλίψη, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.13 και 7.14 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.13 : Συσχέτιση των μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη και σε εφελκυσμό

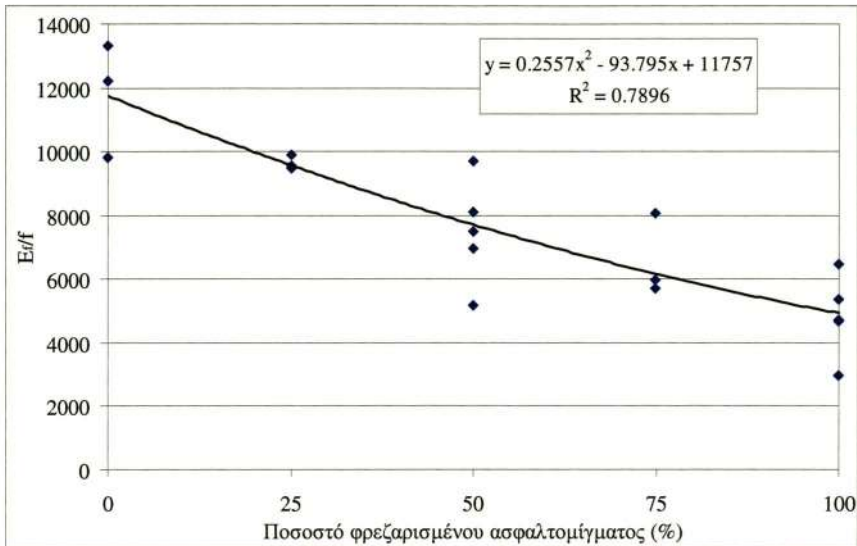


Σχήμα 7.14 : Συσχέτιση των μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη και σε θλίψη

Το θέμα της σχέσης του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη με τα μέτρα ελαστικότητας σε μονοαξονική καταπόνηση (θλίψη ή εφελκυσμός) δεν έχει διερευνηθεί πλήρως. Στις παλαιότερες δημοσιεύσεις δεν είναι βέβαιο αν έχει γίνει διόρθωση λόγω των παραμορφώσεων (βέλους) από τη συμβολή των διατμητικών τάσεων και σε άλλες δεν είναι βέβαιο αν στη μέτρηση του βέλους κάμψης αφαιρείται η υποχώρηση του δοκιμίου στις στηρίξεις (Παράγραφος 2.2.2). Έτσι, ο Popovics [1998] αναφέρει ότι το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη είναι μεγαλύτερο του αντίστοιχου σε θλίψη, γεγονός που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, αλλά πιστεύεται ότι χρειάζονται και άλλα πειραματικά δεδομένα για πλήρη επιβεβαίωση.

7.3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στο Σχήμα 7.15 δίνεται ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη ως προς την αντοχή σε κάμψη (E/f) σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφατομίγματος στο μίγμα. Σημειώνεται ότι στο Σχήμα έχουν συμπεριληφθεί τα αποτελέσματα για τις 7 και τις 60 ημέρες, για όλες τις θερμοκρασίες και για τα δύο ποσοστά τσιμέντου.



Σχήμα 7.15 : Μεταβολή του λόγου E/f σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Παρατηρείται, ότι όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει, τόσο μειώνεται ο λόγος E/f . Βέβαια, η διασπορά που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό αποδίδεται τόσο στη διασπορά της δοκιμής σε κάμψη όσο και στη διασπορά του μέτρου ελαστικότητας που συμπεριλαμβάνει και τις ανακρίβειες μέτρησης του βέλους κάμψης. Ο λόγος E/f επομένως, αφού συμπεριλαμβάνει τις προηγούμενες διασπορές, είναι επόμενο να έχει μεγάλη μεταβλητότητα ($\sigma^2 = \sigma_{\delta\kappa}^2 + \sigma_E^2$).

Έχει ήδη λεχθεί, ότι με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος στο μίγμα, μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας. Η μείωση του λόγου E/f υποδηλώνει, ότι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται πιο γρήγορα σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη. Αυτό αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο ότι η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων, και επομένως το μέτρο ελαστικότητας, επηρεάζεται από την ύπαρξη του φρεζαρισμένου υλικού από τα πρώτα στάδια της φόρτισης. Η αντοχή όμως, είναι μία ιδιότητα του υλικού, η οποία προϋποθέτει ανάπτυξη καταρχήν μικρορηγματώσεων και εν συνεχεία ασταθών ρηγματώσεων, οι

οποίες αναπτύσσονται όταν το φορτίο έχει υπερβεί το 70 % - 75 % του φορτίου θραύσης [Neville 1995].

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η επίδραση της θερμοκρασίας δεν φαίνεται να είναι διαφορετική στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας. (Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 5.4, φαίνεται ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι ανάλογη με τη μείωση της αντοχής).

Επειδή το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζει άμεσα τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε ένα σύστημα επάλληλων ελαστικών στρώσεων, όπως τα οδοστρώματα, είναι επόμενο να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις ανακυκλωμένες στρώσεις θα μειώνονται, όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει, δηλαδή θα πρέπει καταρχήν να μειώνεται και ο λόγος σ/f . Επειδή όμως η τιμή του σ/f εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ του ρυθμού μείωσης των δύο μεγεθών, σ και f , θα πρέπει αυτό να διερευνηθεί με υπολογισμό των τάσεων σ για δεδομένο, πειραματικό, μέτρο ελαστικότητας E και να υπολογιστεί ο λόγος σ/f για την αντίστοιχη τιμή της αντοχής f .

Στον Πίνακα 7.1 δίνονται οι παλινδρομήσεις για όλα τα μεγέθη που μετρήθηκαν. Σημειώνεται ότι δίνονται με διαφορετικό χρώμα, όσα από τα εξετασθέντα μεγέθη έχουν περισσότερες από μία επαναλήψεις, (για όλα τα υλικά).

Για τις περισσότερες από τις δοκιμές του Πίνακα 7.1, η συσχέτιση είναι αρκετά ικανοποιητική. Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις, ειδικά για τον εφελκυσμό και τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας, αλλά αυτό οφείλεται στην ιδιομορφία των χονδρόκοκκων θραυστών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, και στην παρατηρηθείσα μείωση της εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής για τα μίγματα με 0 % ή μικρό ποσοστό φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (Παράγραφος 5.24).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα προήρχετο από δρόμο με πολυετή λειτουργία πριν από την ανακατασκευή του και επίσης παρέμεινε περισσότερο από 1 έτος σε φρεζαρισμένη κατάσταση μέσα στο εργαστήριο. Κατά το διάστημα αυτό το ασφατικό συνδετικό θα πρέπει να είχε υποστεί σημαντική

οξειδωση και γήρανση ώστε οι συγκολλητικές του ιδιότητες να είχαν σημαντικά μειωθεί και το μέτρο δυσκαμψίας του να είχε αυξηθεί.

Πίνακας 7.1 : Συσχετίσεις των μετρηθέντων μεγεθών συναρτήσει του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Εξεταζόμενο μέγεθος	Ηλικία	Ευθεία παλινδρόμησης			
		Τσιμέντο 3 %		Τσιμέντο 5 %	
Αντοχή σε θλίψη κύβου	1	$y = -0.0005x^2 + 0.0103x + 4.8766$	$R^2 = 0.9728$	$y = 0.0005x^2 - 0.1153x + 10.331$	$R^2 = 0.9946$
	7	$y = 0.0003x^2 - 0.0997x + 8.8429$	$R^2 = 0.9919$	$y = 0.0004x^2 - 0.1235x + 12.72$	$R^2 = 0.9975$
	60	$y = 0.0007x^2 - 0.1684x + 13.882$	$R^2 = 0.9806$	$y = 0.0009x^2 - 0.226x + 19.887$	$R^2 = 0.997$
Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου	1	$y = -0.0003x^2 - 0.0156x + 5.5689$	$R^2 = 0.9813$	$y = 0.0004x^2 - 0.1131x + 9.9337$	$R^2 = 0.9835$
	7	-	-	$y = 0.0005x^2 - 0.1607x + 16.521$	$R^2 = 0.9939$
	60	$y = 0.0003x^2 - 0.1236x + 12.863$	$R^2 = 0.9926$	$y = 0.0009x^2 - 0.2431x + 22.899$	$R^2 = 0.994$
Αντοχή σε εφελκυσμό	1	$y = -4E-05x^2 + 0.003x + 0.14$	$R^2 = 0.8824$	$y = 2E-05x^2 - 0.0044x + 0.4266$	$R^2 = 0.8748$
	7	-	-	-	-
	60	$y = -8E-05x^2 + 0.0084x + 0.3829$	$R^2 = 0.7164$	$y = -0.0002x^2 + 0.0112x + 1.5949$	$R^2 = 0.9796$
Αντοχή σε κάμψη	1	$y = -4E-05x^2 + 0.0017x + 0.3289$	$R^2 = 0.9908$	$y = -1E-05x^2 - 0.0006x + 0.5014$	$R^2 = 0.8484$
	7	-	-	$y = -3E-05x^2 - 0.0059x + 2.2941$	$R^2 = 0.9566$
	60	$y = -8E-05x^2 + 0.0034x + 1.41$	$R^2 = 1$	$y = -0.0002x^2 + 0.0092x + 3.32$	$R^2 = 1$
Αντοχή σε διάρρηξη	7	$y = -2E-06x^2 - 0.0033x + 0.542$	$R^2 = 0.951$	$y = -8E-05x^2 + 0.0028x + 0.7941$	$R^2 = 0.7872$
	60	$y = -6E-05x^2 + 0.0005x + 0.7503$	$R^2 = 0.8949$	$y = 2E-05x^2 - 0.0112x + 1.5084$	$R^2 = 0.8738$
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη	1	$y = -0.2229x^2 + 19.086x + 936.43$	$R^2 = 0.8226$	$y = 0.72x^2 - 134.8x + 7720$	$R^2 = 0.9876$
	7	-	-	$y = 1.3943x^2 - 332.23x + 24523$	$R^2 = 0.9971$
	60	$y = -0.1029x^2 - 56.514x + 9551.4$	$R^2 = 0.9802$	$y = 0.6571x^2 - 272.71x + 26021$	$R^2 = 0.925$
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό	1	$y = -0.4343x^2 + 8.2286x + 4187.1$	$R^2 = 0.9191$	$y = 0.9257x^2 - 162.57x + 8177.1$	$R^2 = 0.9604$
	7	-	-	-	-
	60	$y = 0.4057x^2 - 111.97x + 10097$	$R^2 = 0.664$	$y = 0.6514x^2 - 304.34x + 28184$	$R^2 = 0.9967$
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη	1	$y = 1.7067x^2 - 202.67x + 8900$	$R^2 = 1$	$y = 0.8291x^2 - 111.49x + 7714.5$	$R^2 = 0.8593$
	7	$y = 1.1086x^2 - 322.46x + 27786$	$R^2 = 0.9976$	$y = 1.1086x^2 - 322.46x + 27786$	$R^2 = 0.9973$
	60	$y = -0.58x^2 - 79x + 18800$	$R^2 = 1$	$y = 0.6571x^2 - 272.71x + 26021$	$R^2 = 0.9925$

7.4 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα ανακυκλωμένα με τσιμέντο υλικά ευκάμπτων οδοστρωμάτων στη γενική τους μορφή είναι σύνθετα υλικά, αποτελούμενα από :

- α. σκληρυμένο τσιμεντοπολτό (πήγμα)
- β. αδρανή υλικά
- γ. φρεζαρισμένα ασφαλτικά υλικά (που επίσης διακρίνονται σε ασφαλτικό κονίαμα, αδρανή εν μέρει ή εν όλω καλυμμένα με ασφαλτικό υμένα, και από συνδυασμό αυτών Παράγραφος 1.2)

Στα υλικά αυτά θα μπορούσαν επίσης να συμπεριληφθούν τα κενά συμπύκνωσης (αναπόφευκτα κατά την παρασκευή) που είναι ξηρά ή περιέχουν νερό σε διάφορους βαθμούς κορεσμού και ακόμη, σε πολύ μικρότερη κλίμακα, τα κενά του πήγματος (πορώδες πήγματος) και το νερό του πήγματος.

Θεωρώντας σε μία αρχική αδρομερή εξέταση μόνο τα πρώτα τρία υλικά (α, β, γ) πιστεύεται ότι μπορεί να γίνουν μερικές πρώτες παρατηρήσεις ως προς τη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων υλικών για :

- ο το αρχικό στάδιο της φόρτισης (γραμμή σ - ε, μέτρο ελαστικότητας)
- ο το τελικό στάδιο της φόρτισης (γραμμή σ - ε, αστοχία, αντοχή)
- ο το είδος της φόρτισης (ταχύτητα φόρτισης, στατική φόρτιση, επαναλαμβανόμενη φόρτιση, μόνιμη - ερπυστική - φόρτιση)
- ο την επίδραση της θερμοκρασίας

Σε σύγκριση με τα κοινά αδρανή υλικά, όλα τα είδη των "αδρανών" από φρεζαρισμένο ασφαλτικό συμβάλλουν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων του δοκιμίου δεδομένου ότι :

- ο τα ασφαλτικά κονιάματα έχουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας και παραμορφώνονται περισσότερο
- ο τα καλυμμένα με ασφαλτικό υμένα αδρανή επιτρέπουν στη διεπιφάνεια μεγαλύτερες παραμορφώσεις

Τα μίγματα I (100/0) και V (0/100) έχουν το ίδιο ποσοστό τσιμέντου και νερού - τον ίδιο λόγο N/T, άρα και την ίδια συνδετική ικανότητα - και κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που διαφέρουν πολύ λίγο. Διαφέρουν ουσιαστικά μόνο ως προς το είδος του "αδρανούς" υλικού που στην περίπτωση του υλικού I είναι θραυστό αμμοχάλικο ενώ στην περίπτωση του υλικού V είναι φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα.

Έτσι, θεωρώντας ότι το μέτρο ελαστικότητας του μίγματος E σχετίζεται με τα μέτρα ελαστικότητας του μίγματος I (100/0), $E(I) = 23200 \text{ MPa}$ και του μίγματος V (0/100), $E(V) = 3900 \text{ MPa}$, με την αναλογική σχέση :

$$E = E(I) p(I) + E(V) p(1 - I) \quad (1)$$

όπου $p(I)$ είναι οι αναλογίες ανάμιξης του υλικού I (100/0) και $p(1 - I)$ οι αναλογίες ανάμιξης του υλικού V (0/100)

προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές του μέτρου ελαστικότητας των υλικών II (75/25), III (50/50) και IV (25/75), Πίνακας 7.2 :

Πίνακας 7.2 : Εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των υλικών II (75/25) - IV (25/75)

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)		
	Υπολογιστικά από σχέση (1)	Πειραματικά	Διαφορά (%)
II (75/25)	18375	19500	6.0
III (50/50)	13350	14400	6.0
IV (25/75)	8725	9800	12.3

Παρατηρείται ότι η προβλεψιμότητα της σχέσης (1) είναι πολύ ικανοποιητική, όπως θα έπρεπε να αναμένεται, αφού η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας είναι γραμμική (Σχήμα 7.10).

Αν θεωρήσουμε κατά τον ίδιο τρόπο τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη για τις θερμοκρασίες, 3.5 °C, 23 °C, και 40 °C και ότι, για τους ίδιους λόγους, μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση για το ίδιο επίπεδο θερμοκρασιών προκύπτουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις, Πίνακας 7.3.

Πίνακας 7.3 : Εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας υλικών II (75/25) έως IV (25/75) για θερμοκρασίες 3.5 °C και 40 °C

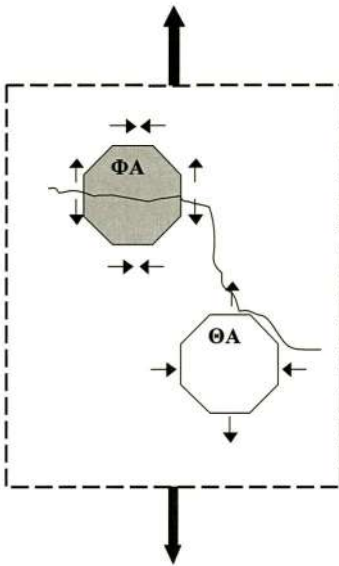
Υλικό	Μέτρα ελαστικότητας (MPa)					Διαφορές (%)	
	Πειραματικά			Εκτιμηθέντα			
	Θερμοκρασία (°C)			Θερμοκρασία (°C)		Θερμοκρασία (°C)	
	3.5 °C	23 °C	40 °C	3.5 °C	40 °C	3.5 °C	40 °C
I (0/100)	27800	27800	27800	-	-	-	-
II (75/25)	21300	20200	19300	23975	22250	-12.6	-15.3
III (50/50)	18200	15000	12200	20150	16700	-10.7	-36.9
IV (25/75)	15500	9300	8700	16325	11150	-5.3	-28.2
V (0/100)	12500	6800	5600	-	-	-	-

Όπως φαίνεται από τις ποσοστιαίες διαφορές των τιμών που μετρήθηκαν από εκείνες που εκτιμήθηκαν, η ακρίβεια εκτίμησης είναι σημαντικά μικρότερη, αλλά θα πρέπει να κριθεί λαμβάνοντας υπόψη την μεταξύ αναμιγμάτων μεταβλητότητα, οπότε μόνον οι δύο εκτιμήσεις για 40 °C και για 75 % ή 50 % ΦΑ δεν είναι ικανοποιητικές.

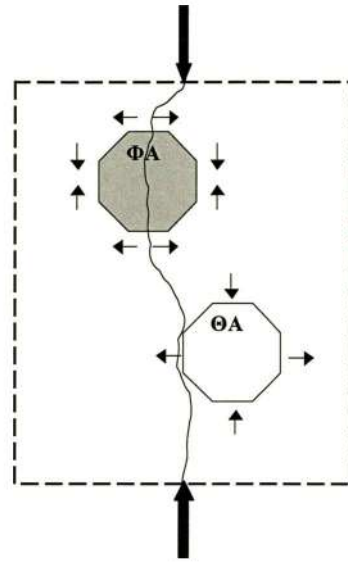
Η εκτίμηση αυτή είναι αδρομερής και βασίζεται στη γνώση των μέτρων ελαστικότητας των δύο ακραίων περιπτώσεων αναλογιών σύνθεσης 100/0 και 0/100, για τις οποίες απαιτείται προηγούμενη εργαστηριακή μέτρηση. Πιστεύεται ότι παρουσιάζει ενδιαφέρον, θεωρητικό και πρακτικό, η ανάπτυξη προσομοιώματος εκτίμησης που θα στηρίζεται στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας των αδρανών (καθαρών και φρεζαρισμένων) και του μέτρου ελαστικότητας του τσιμεντοπολτού κατά τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για το σκυρόδεμα, Reuss Voigt, Hirsh, Counto Hashin et al [Hobbs 1973]. Η ανάπτυξη όμως ενός τέτοιου προσομοιώματος θεωρείται ότι είναι εκτός των ορίων της διατριβής.

Η θεώρηση των ανακυκλωμένων υλικών ως συνθέτων υλικών, όπως έγινε παραπάνω, δεν βοηθάει μόνο στην εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας αλλά και στο να γίνει καλύτερα αντιληπτή η συμπεριφορά τους σε φορτίσεις.

Στα Σχήματα 7.16 και 7.17 παρουσιάζεται ο θεωρηθείς μηχανισμός θραύσεως του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό.



Σχήμα 7.16 : Θεωρηθείς μηχανισμός θραύσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό



Σχήμα 7.17 : Θεωρηθείς μηχανισμός θραύσης σε μονοαξονική θλίψη

Γίνεται φανερό, ότι λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας και της μικρής σχετικά αντοχής των κόκκων από ασφαλτικό κονίαμα, η ρωγμή διέρχεται μέσα από το "αδρανές" αυτό, διαχωρίζοντάς το σε δύο τεμάχια, [Lusche 1972]. Τέτοιου είδους ρωγμές παρατηρήθηκαν σε πολλές δοκιμές. Παρατηρήθηκαν όμως και ρωγμές περιμετρικές των αδρανών (στο τμήμα που η κατανομή των τάσεων το επέβαλε). Δεν έγινε όμως συστηματική επιθεώρηση των θραύσεων, ούτε προσπάθεια συστηματικής εξακρίβωσης του είδους του ασφαλτικού αδρανούς στην επιφάνεια θραύσης, δηλαδή αν αυτό ήταν μικτό ή αδρανές καλυμμένο με ασφαλτικό υλικό και πόσο ήταν το πάχος της επικάλυψης. Όπως στα κοινά σκυροδέματα η διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού ("μεταβατική ή περιαδρανιακή ζώνη") επιδρά στην αντοχή και στο διάγραμμα $\sigma - \epsilon$, [Metha 1986], έτσι και στα υλικά αυτά πιστεύεται ότι η επικάλυψη με άσφαλτο των αδρανών επηρεάζει την αντοχή, το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ και το μέτρο ελαστικότητας. Ίσως η επικάλυψη των αδρανών με άσφαλτο και ταυτόχρονα η ύπαρξη αδρανών με μικρό μέτρο ελαστικότητας (όπως τα φρεζαρισμένα ασφαλτικά) να οδηγήσει σε παρασκευή σκυροδεμάτων με μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα. Θα πρέπει όμως να διερευνηθεί το θέμα αυτό σε βάθος.

Για τον λόγο αυτό πιστεύεται ότι είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να διερευνηθεί το θέμα της συνάφειας του τσιμεντοπολτού με τα φρεζαρισμένα ασφαλτικά αδρανή. Ιδιαίτερα θα πρέπει να μελετηθεί το πότε υπάρχει αστοχία συνάφειας, δηλαδή οι δύο επιφάνειες αποκολλούνται και πότε υπάρχει θραύση του ασφαλτικού κονιάματος ή πότε υπάρχει σχίσσιμο του ασφαλτικού υμένα (αστοχία ασφαλτικού συνδετικού).

Με το προσομοίωμα αυτό είναι επίσης δυνατόν να ερμηνευθούν και τα φαινόμενα της επίδρασης της ταχύτητας φόρτισης [Kolias 1996b] αλλά και του ερπυσμού, ο οποίος είναι μία ακραία περίπτωση του θέματος της ταχύτητας φόρτισης. Οι παραμορφώσεις του ασφαλτικού συνδετικού υλικού, επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία και την ταχύτητα φόρτισης. Σε μεγάλες ηλικίες οι παραμορφώσεις (και ο ερπυσμός) του τσιμεντοπολτού είναι πολύ μικρές, συγκριτικά με εκείνες των φρεζαρισμένων ασφαλτικών αδρανών, και επομένως υπό σταθερό φορτίο, θα υπάρχει μεταβίβαση τάσεων από το φρεζαρισμένο ασφαλτόμειγμα στον τσιμεντοπολτό, άρα πιθανόν να επέλθει πρόωρη αστοχία του υλικού. Οι ίδιες παρατηρήσεις μπορεί να γίνουν και στην περίπτωση μεγάλης θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή. Αντίθετα, σε μικρές ηλικίες και η συμπεριφορά του τσιμεντοπολτού επηρεάζεται από την ταχύτητα φόρτισης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ερπυσμού. Η αστοχία μπορεί να επέλθει είτε από υπέρβαση της αντοχής του τσιμεντοπολτού είτε από αστοχία των ασφαλτικών αδρανών, λόγω μεταβίβασης τάσεων από τον τσιμεντοπολτό.

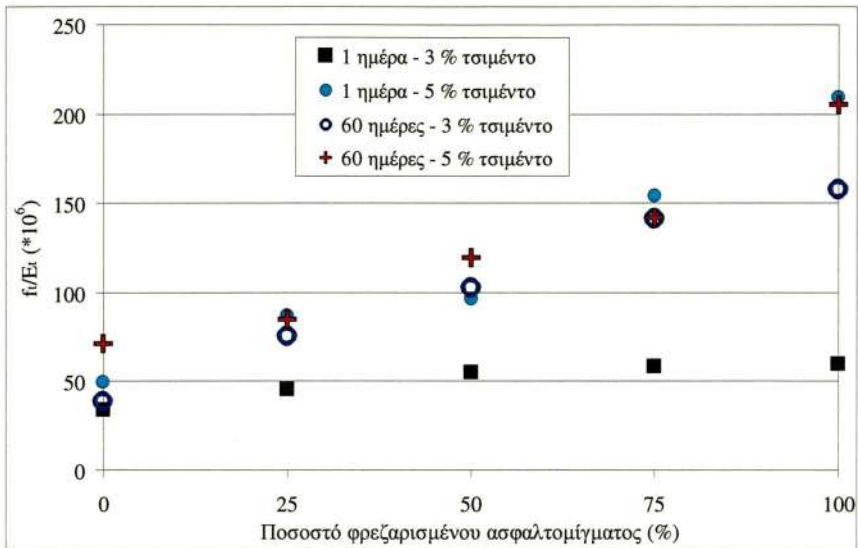
Σε περιπτώσεις πολύ χαμηλής θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή, επειδή το μέτρο δυσκαμψίας και η αντοχή του ασφαλτομείγματος αυξάνουν, και πλησιάζουν ή υπερβαίνουν αυτά του τσιμεντοπολτού, το κρίσιμο υλικό μπορεί να είναι ο τσιμεντοπολτός.

Θεωρείται σκόπιμο να συστηθεί περαιτέρω έρευνα για την επιβεβαίωση και κυρίως την ποσοτικοποίηση των παραπάνω εκτιμήσεων.

Ο κυριότερος παράγοντας που επιδρά στην επιρρέπεια σε ρηγμάτωση των σταθεροποιημένων με τσιμέντο στρώσεων λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής, f_t , προς το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας E_t , [Taylor and Williams 1981, Williams 1986]. Όσο ο λόγος f_t/E_t αυξάνει, τόσο μικρότερη είναι η επιρρέπεια σε ρηγμάτωση του υλικού. Πράγματι, από το Σχήμα 7.18 φαίνεται ότι ο λόγος f_t/E_t αυξάνει, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομείγματος στο μίγμα. Εκτιμάται επομένως, ότι με βάση το

παραπάνω κριτήριο, η επιρρέπεια σε ρηγμάτωση είναι μικρότερη, όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος αυξάνει. Επομένως ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών στην ασφαλτική στρώση κύλισης από ανάδυση, στα οδοστρώματα που περιλαμβάνουν στρώσεις από ανακυκλωμένο με τσιμέντο μίγμα ασφαλτομίγματος και αδρανών υλικών θα είναι σημαντικά μειωμένος, σε σχέση με τα οδοστρώματα που περιλαμβάνουν στρώσεις από κατεργασμένο με τσιμέντο καθαρό αμμοχάλικο. Ο κίνδυνος αυτός θα είναι μικρότερος όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος είναι μεγαλύτερο. Η αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης κατά τη θραύση σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Σχήμα 5.40) και του μέγιστου βέλους κατά την κάμψη (Σχήμα 5.41) είναι στοιχεία που συνηγορούν υπέρ της άποψης αυτής. Πιστεύεται όμως, ότι το οριστικό συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί μετά από παρακολούθηση της συμπεριφοράς πραγματικών οδοστρωμάτων σε λειτουργία.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι στην πραγματικότητα ο κίνδυνος ρηγμάτωσης για τα μίγματα που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμικμα θα είναι ακόμη μικρότερος διότι οι θερμοκρασιακές τάσεις αναπτύσσονται με αργό ρυθμό και έχουν μεγάλη διάρκεια επιβολής, ακολουθώντας τους ρυθμούς ανάπτυξης της θερμοκρασίας. Για τον λόγο αυτό η επίδραση του ερπυσμού στη χαλάρωση των επιβαλλόμενων τάσεων είναι σημαντική. Τα μίγματα με μεγάλο ποσοστό ΦΑ παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο ερπυσμό από τα μίγματα Ι (100 % καθαρό αμμοχάλικο) και επομένως οι θερμοκρασιακές τάσεις θα είναι πολύ μικρότερες στα μίγματα που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμικμα σε σύγκριση με τα μίγματα που δεν περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμικμα.



Σχήμα 7.18 : Μεταβολή του λόγου της εφελκυστικής αντοχής προς το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, f_t/E_t , σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

8 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της συμπεριφοράς των ανακυκλωμένων με τσιμέντο οδοστρωμάτων, με βάση τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των ανακυκλωμένων υλικών που μετρήθηκαν και αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια.

Θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, ότι η διερεύνηση αυτή γίνεται με τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που έχουν προσδιοριστεί στο εργαστήριο και όχι με τιμές που μετρήθηκαν σε οδοστρώματα εν λειτουργία. Είναι όμως γνωστό [LCPC - SETRA 1994] από κατασκευές με κατεργασμένα/σταθεροποιημένα υλικά ότι οι τιμές ορισμένων μηχανικών χαρακτηριστικών είναι μειωμένες κατά ένα ποσοστό όταν μετρούνται σε στρώσεις οδοστρωμάτων εν λειτουργία από τις τιμές που μετρούνται στο εργαστήριο. Αυτό αποδίδεται σε πολλούς παράγοντες, όπως στην εγγενή διαφορά μεταξύ εργαστηρίου και εργοταξίου (ομοιομορφία υλικών), αλλά ο κυριότερος παράγοντας πιστεύεται ότι είναι οι αλλοιώσεις που υφίσταται το υλικό κατά τη λειτουργία του από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και από τις επιδράσεις της κυκλοφορίας. Δυστυχώς στη χώρα μας δεν υπάρχει εμπειρία από ανάλογες κατασκευές, ούτε εντοπίστηκε σχετική δημοσιευμένη πληροφορία για ανακυκλωμένα οδοστρώματα και γι' αυτό δεν μπορεί να γίνει εκτίμηση των διαφορών αυτών. Η ανάλυση που ακολουθεί γίνεται με αυτή την επιφύλαξη. Για τον ίδιο λόγο δεν είναι δυνατόν η παρούσα διατριβή να επεκταθεί σε σύνταξη "συστάσεων" που αφορούν τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων αυτών.

Στον Πίνακα 8.1 δίνονται οι τιμές που μετρήθηκαν στη Γαλλία σε πυρήνες που λήφθηκαν από ανακυκλωμένα οδοστρώματα [Lefort 1997, PIARC 2002]. Παρατηρείται ότι η τιμή των 20.000 MPa, που αφορά υλικά καλής ποιότητας και ομοιογένειας, τα οποία ανακυκλώθηκαν με μηχανήματα με πολύ καλή απόδοση σε

ομοιογενή ανάμιξη, δεν διαφέρει ουσιαστικά από τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας της διατριβής αυτής, για ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού 25 %, που είναι ένα σύνθηες στην πράξη ποσοστό (Σχήμα 7.11). Παρατηρείται επίσης η σημαντική επίδραση της ικανότητας του ανακυκλωτικού μηχανήματος να αναμίζει ομοιογενώς τα υλικά στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας.

Πίνακας 8.1 : Προτεινόμενες τιμές του μέτρου ελαστικότητας (ηλικία 365 ημέρες) για τον σχεδιασμό ανακυκλωμένων με τσιμέντο στρώσεων

Χαρακτηριστικά ανακύκλωσης		Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)
Υπάρχοντα υλικά	Εκτέλεση	
Αδρανή καλής ποιότητας, ομοιογενή με συνεχή διαβάθμιση	Διανεμητής τσιμέντου υψηλής ακρίβειας και υψηλής απόδοσης ανακυκλωτής (και κατά την εγκάρσια διεύθυνση)	20.000
Άλλες περιπτώσεις	Διανεμητής τσιμέντου υψηλής ακρίβειας και υψηλής απόδοσης ανακυκλωτής (και κατά την εγκάρσια διεύθυνση)	16.000
Αδρανή καλής ποιότητας, ομοιογενή με συνεχή διαβάθμιση	Άλλες περιπτώσεις	16.000
Άλλες περιπτώσεις	Άλλες περιπτώσεις	11.000

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων με τσιμεντόδετες στρώσεις μπορεί να γίνεται με τις εργαστηριακές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών κάνοντας χρήση συντελεστών "προσαρμογής" που λαμβάνουν υπόψη :

- ο τη διαφορετική εντατική επιπόνηση της στρώσης του οδοστρώματος (τριαξονική επιπόνηση) από την επιπόνηση του υλικού στο εργαστήριο
- ο την ύπαρξη ανάπαυλας στις φορτίσεις από τις διελεύσεις των οχημάτων στις δοκιμές κόπωσης σε αντίθεση με τη συνεχή - χωρίς ανάπαυλα - φορτίσεις στις δοκιμές κόπωσης στο εργαστήριο
- ο τη μεταβολή της θερμοκρασίας σε ημερήσια και ετήσια βάση
- ο την ύπαρξη ρωγμών από παρεμποδιζόμενη μετακίνηση, παρότι αυτές θα είναι περιορισμένες σε σχέση με τα κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα, ή θα έχουν ελαχιστοποιηθεί σε περίπτωση που υιοθετηθεί η τεχνική της

"προρηγμάτωσης". Η ύπαρξη ρωγμών προκαλεί αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο επίπεδο της ρωγμής

Στη διαστασιολόγηση θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η αναπόφευκτη μεταβλητότητα των υλικών άρα και των χαρακτηριστικών τους (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε κόπωση ($\sigma/f - N$)) αλλά και της κατασκευής (πάχος στρώσης).

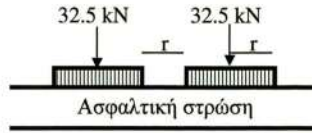
Η ανάλυση των οδοστρωμάτων με ανακυκλωμένη στρώση στη διατριβή αυτή, έγινε θεωρώντας ένα εύρος κατασκευών οι οποίες περιλαμβάνουν όλα τα πάχη των στρώσεων (ανακυκλωμένων στρώσεων και ασφαλικών υπερκείμενων στρώσεων) που συνήθως χρησιμοποιούνται και όλο το εύρος των μέτρων ελαστικότητας που αναμένεται να έχουν τα ανακυκλωμένα υλικά. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1.

E1 = 1.000, 10.000 MPa	h1 = 100, 150 mm
E2 = 5.000 - 30.000 MPa (βήμα 5.000 MPa)	h2 = 200, 250, 300, 350 mm
E3 : 50, 100, 150 MPa	

Σχήμα 8.1 : Παράμετροι ανακυκλωμένου οδοστρώματος που εξετάστηκαν

Το μέτρο δυσκαμψίας της ασφαλικής επίστρωσης εξετάστηκε θεωρώντας ότι λαμβάνει δύο ακραίες τιμές (1.000 MPa στην περίπτωση πολύ υψηλής θερμοκρασίας, 40 °C και επί το δυσμενέστερον 10.000 MPa στην περίπτωση χαμηλής θερμοκρασίας, 10 °C).

Ως φορτίο υπολογισμού της εντατικής κατάστασης θεωρήθηκε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο απλού άξονα 13 t επί διπλών τροχών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2, $r = 0.125$ mm, $p = 0.662$ MPa.



Σχήμα 8.2 : Τυπικό φορτίο άξονα 13 tn, με διπλούς τροχούς

Η ανάλυση της εντατικής κατάστασης έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος H/Y BISAR με παραδοχή γραμμικώς ελαστικών υλικών στρώσεων με πλήρη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων.

Υπολογίστηκε μόνο η οριζόντια τάση στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης, διότι όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των ανακυκλωμένων υλικών είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερες από το μέτρο δυσκαμψίας/μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης και επομένως η ασφαλτική στρώση θα επιπονείται σε θλίψη και η ανακυκλωμένη σε εφελκυσμό (από κάμψη) (εκτός από την περίπτωση για $E_1 = 10.000 \text{ MPa}$ και $E_2 = 5.000 \text{ MPa}$). Ο πυθμένας της ανακυκλωμένης επομένως στρώσης θα είναι η κρίσιμη περιοχή για το οδόστρωμα. Άλλη κρίσιμη περιοχή θα είναι η επιφάνεια της στρώσης έδρασης αλλά, λόγω του σχετικά μεγάλου μέτρου ελαστικότητας των ανακυκλωμένων υλικών, η πιθανότητα να αποτελέσει δυσμενέστερο σημείο η στρώση έδρασης είναι πολύ μικρή. Θα πρέπει επίσης να παρατηρηθεί ότι η στρώση στην οποία εδράζονται οι ανακυκλωμένες στρώσεις (είτε αυτή είναι η παλαιά στρώση έδρασης του ανακυκλωθέντος οδοστρώματος είτε είναι μέρος της υπόβασης του παλαιού οδοστρώματος) έχει συνήθως αυξημένη φέρουσα ικανότητα ($\text{CBR} > 20 \%$) διότι η κυκλοφορία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του οδοστρώματος επέφερε συμπληρωματική συμπίκνωση [Piarce 2002, IECA 1999]. Στην ανάλυση που ακολουθεί λήφθηκαν υπόψη τιμές CBR ίσες με 5 %, 10 % και 15 %, επί το δυσμενέστερον. Σημειώνεται ότι στη χώρα μας, σε πολλά οδοστρώματα, οι συνθήκες στράγγισης του οδοστρώματος δεν είναι πολύ καλές, και στις περιπτώσεις αυτές η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης θα είναι μειωμένη.

8.2 ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ - ΑΝΤΟΧΕΣ

8.2.1 ΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Στα Σχήματα 8.3 - 8.8 φαίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στην ανακυκλωμένη στρώση σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αυτής (για διάφορα πάχη της ανακυκλωμένης στρώσης), σε οδόστρωμα με πάχος ασφαλτικής στρώσης 10 cm και μέτρο ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης 1.000 MPa (Σχήματα 8.3, 8.5 και 8.7) ή 10.000 MPa (Σχήματα 8.4, 8.6 και 8.8). Το οδόστρωμα εδράζεται σε έδαφος με CBR = 5 % (Σχήματα 8.3, 8.4), CBR = 10 % (Σχήματα 8.5, 8.6) και CBR = 15 % (Σχήματα 8.7, 8.8).

Τα Σχήματα 8.9 - 8.14 είναι αντίστοιχα των 8.3 - 8.8, για πάχος ασφαλτικής στρώσης 15 cm.

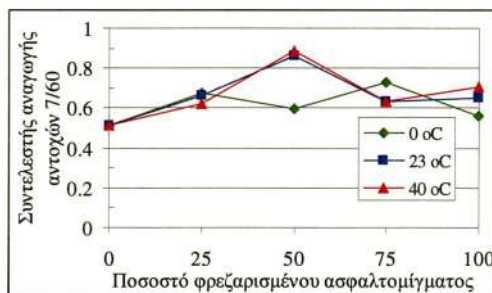
Σε όλα τα προηγούμενα Σχήματα δίνονται επίσης οι εκτιμώμενες αντοχές σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη, που έχουν προκύψει από τα εργαστηριακά αποτελέσματα (με κόκκινο σταυρό δίνονται τα αποτελέσματα για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 % και με κίτρινο σταυρό για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %).

Οι δοκιμές της κύριας έρευνας έγιναν σε ηλικία 60 ημερών, για μία όμως θερμοκρασία (περιβάλλοντος). Επίσης η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε κάμψη και στο αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας (Παράγραφος 5.3.2), πραγματοποιήθηκε σε ηλικία 7 ημερών. Έτσι, για να συμπεριληφθούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα στα παραπάνω Σχήματα, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές :

Ως προς την αντοχή

- ο Για τα αποτελέσματα της κύριας έρευνας έγινε θερμοκρασιακή αναγωγή των αντοχών ηλικίας 60 ημερών, με βάση τη μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη (Παράγραφος 5.3.1), ίδιας ηλικίας (60 ημέρες), για θερμοκρασίες 0 °C, 20 °C και 40 °C. Η αναγωγή αυτή μπορεί να θεωρηθεί σχετικά ακριβής, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 5.3.2. Στα Σχήματα 5.83 - 5.86 έγινε σύγκριση των αντοχών σε διάρρηξη και σε κάμψη. Παρόλο που τα Σχήματα αναφέρονται σε διαφορετικές εφελκυστικές αντοχές, (κάμψη και διάρρηξη) και έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά εργαστήρια, η μεταβολή των αντοχών σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι ανάλογη (παρόμοια κλίση).

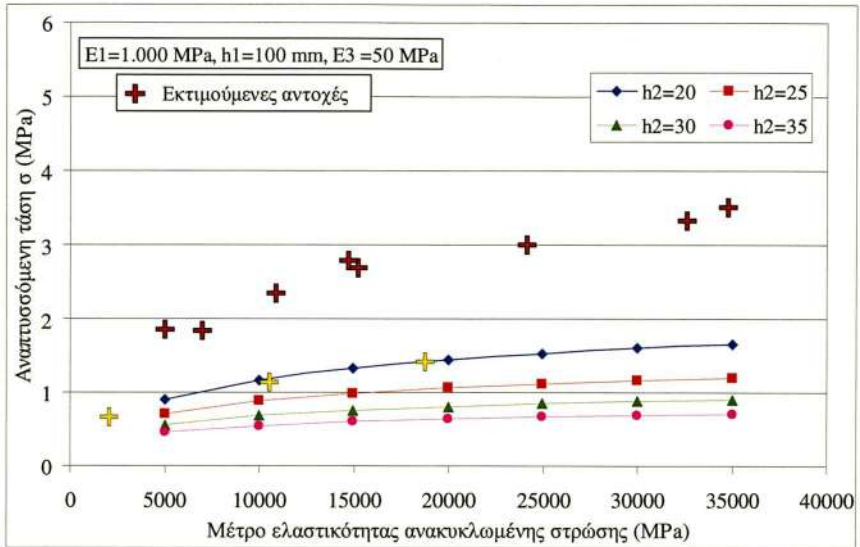
- ο Για τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.2, (γνωστή μεταβολή της αντοχής για διάφορες θερμοκρασίες και ηλικία 7 ημερών) η ηλικιακή αναγωγή της αντοχής σε 60 ημέρες (κατά τη φάση λειτουργίας του οδοστρώματος) γίνεται πάλι με βάση τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.1, αφού είναι γνωστή η μεταβολή της αντοχής σε διάρρηξη για ηλικία 60 ημερών σε σχέση με την ηλικία 7 ημερών. Η αντοχή σε κάμψη θεωρείται ότι ακολουθεί περίπου την ίδια πορεία εξέλιξης αντοχής. Στο Σχήμα 8.15 δίνεται ο λόγος της αντοχής σε διάρρηξη ηλικίας 7 προς 60 ημερών, για θερμοκρασίες 0 °C, 20 °C και 35 °C. Παρατηρείται ότι με εξαίρεση το υλικό III (50/50) ο λόγος κυμαίνεται από 0.60 έως 0.75. Η αναγωγή της αντοχής σε κάμψη 7 ημερών σε ηλικία 60 ημερών, που το οδοστρώματα βρίσκεται σε φάση λειτουργίας, γίνεται με συντελεστή 0.65.



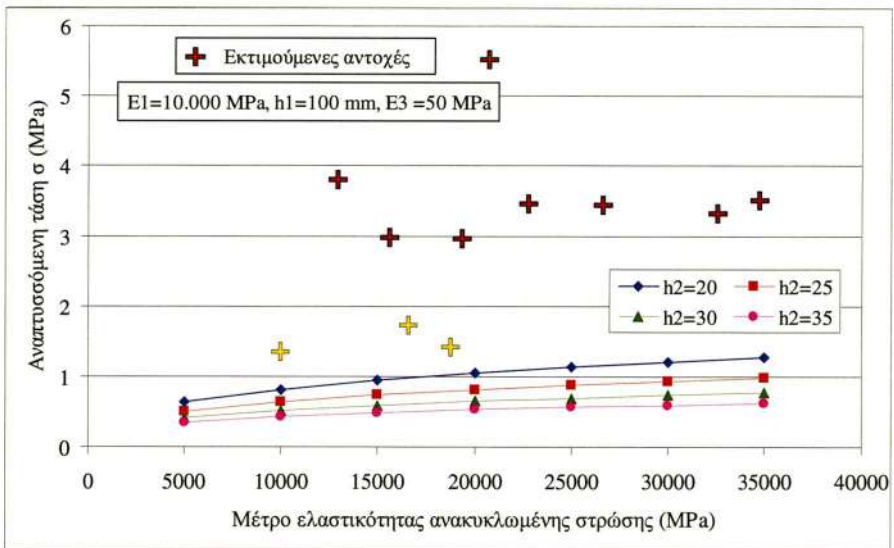
Σχήμα 8.15 : Συντελεστής αναγωγής αντοχών 7/60 ημερών σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Ως προς τα μέτρα ελαστικότητας

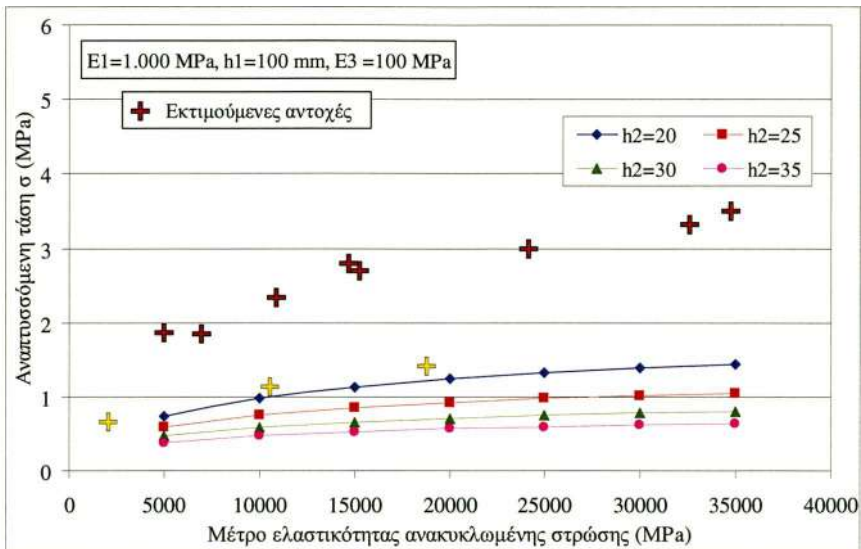
- ο Θεωρήθηκε ότι η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι ανάλογη, ανεξάρτητη από την ηλικία δοκιμής. Έτσι, έγινε θερμοκρασιακή αναγωγή των αποτελεσμάτων της κύριας έρευνας, βάσει των αποτελεσμάτων της Παραγράφου 5.3.2.
- ο Για τα μέτρα ελαστικότητας της Παραγράφου 5.3.2, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία στη διατριβή αυτή, ώστε να γίνει ηλικιακή αναγωγή. Η αναγωγή γίνεται με συντελεστή 0.80, με βάση αποτελέσματα παλαιότερης έρευνας [Kolias 1975].



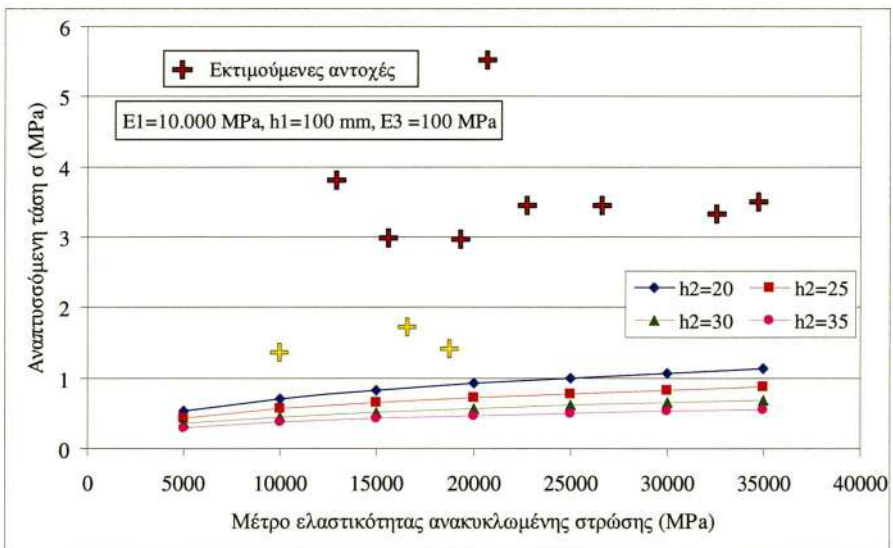
Σχήμα 8.3 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 50 \text{ MPa}$)



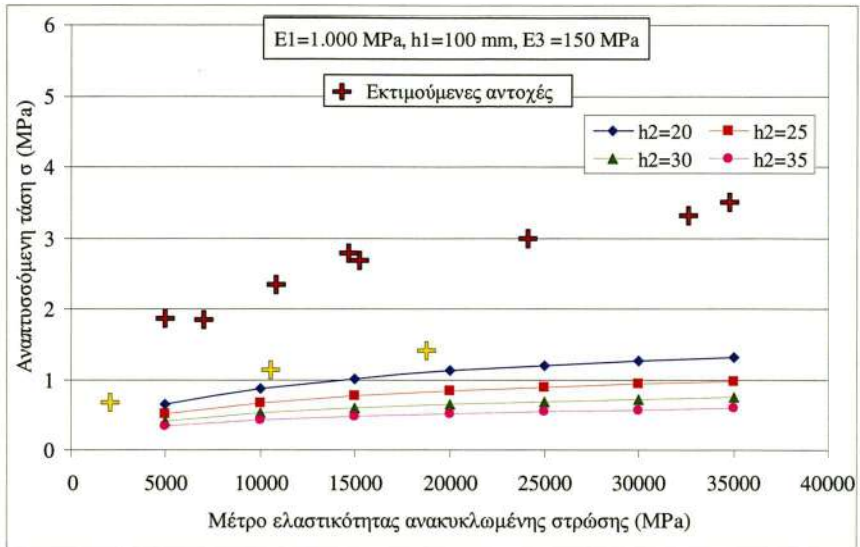
Σχήμα 8.4 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 50 \text{ MPa}$)



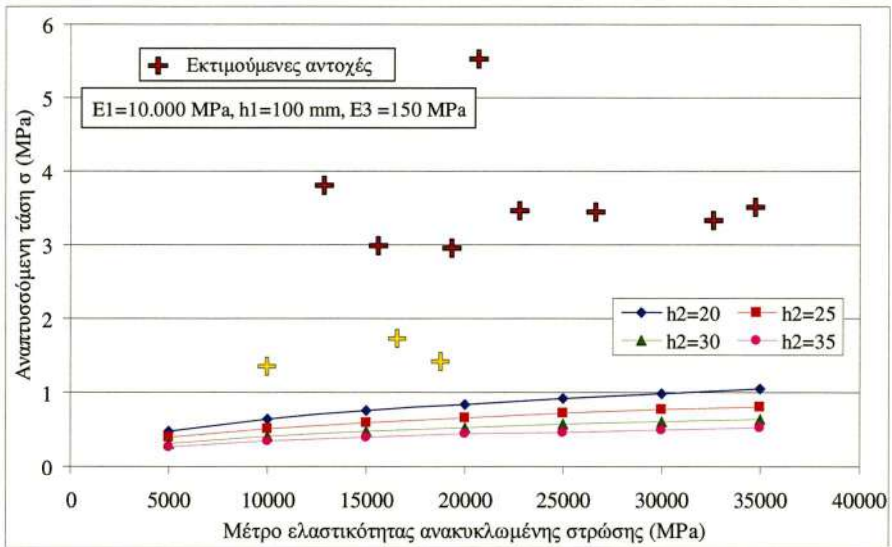
Σχήμα 8.5 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 100$ MPa)



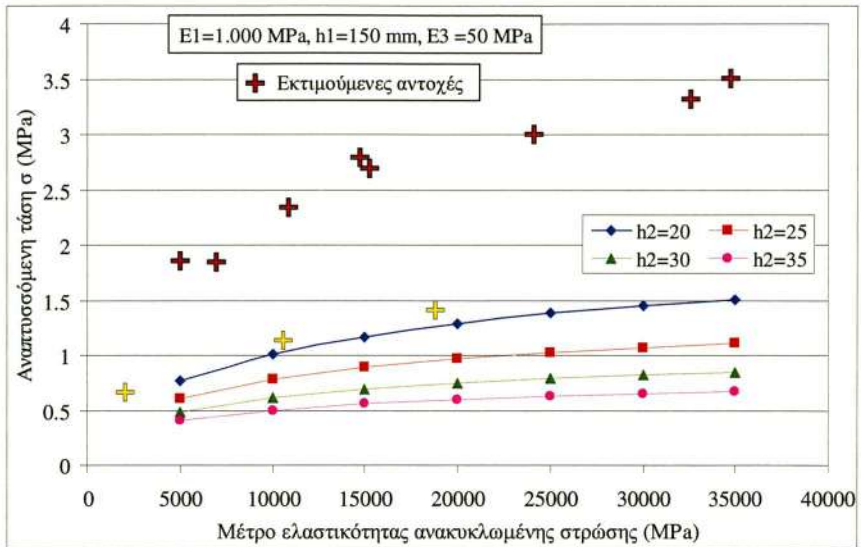
Σχήμα 8.6 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 100$ MPa)



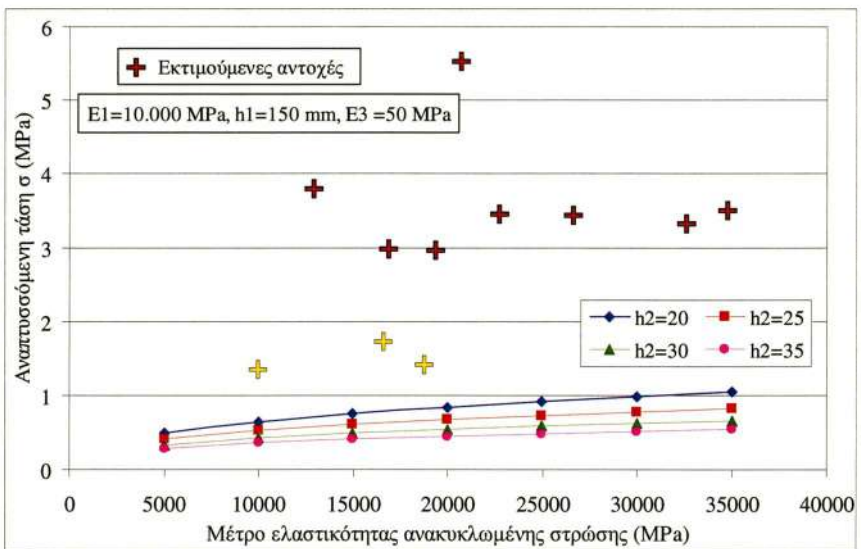
Σχήμα 8.7 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 150$ MPa)



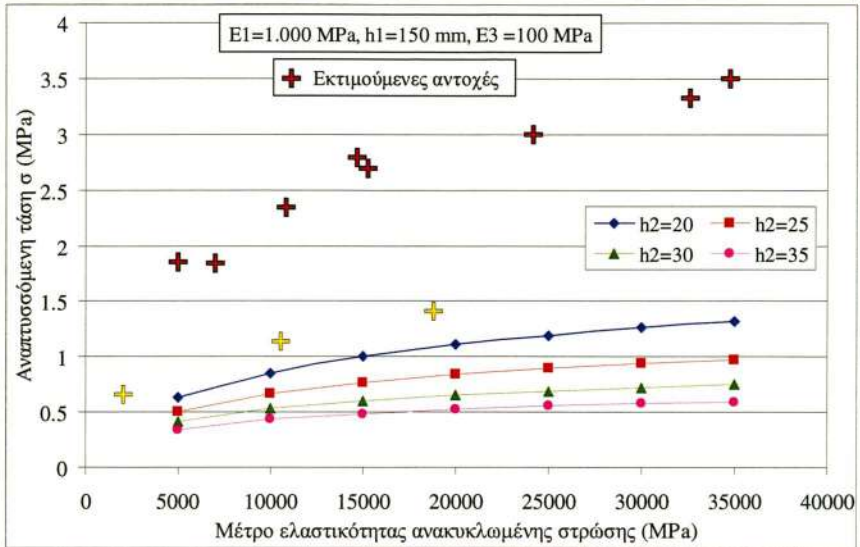
Σχήμα 8.8 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 150$ MPa)



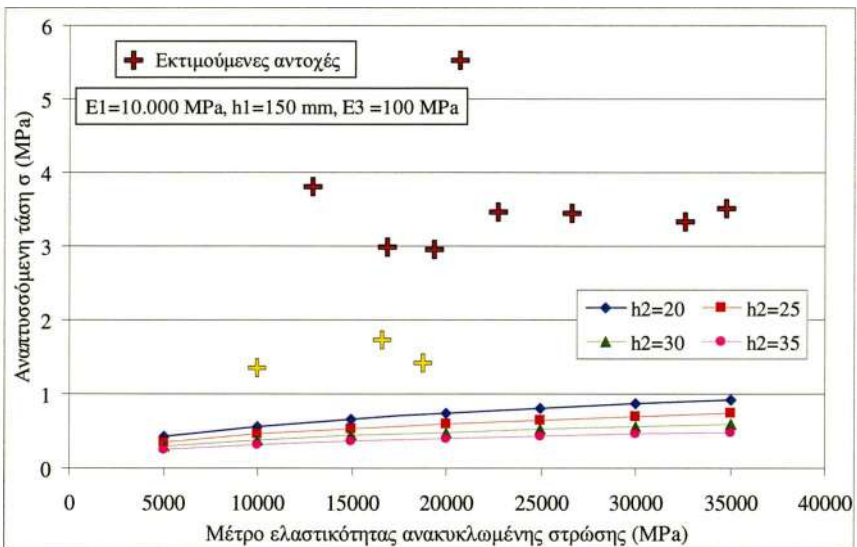
Σχήμα 8.9 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50$ MPa)



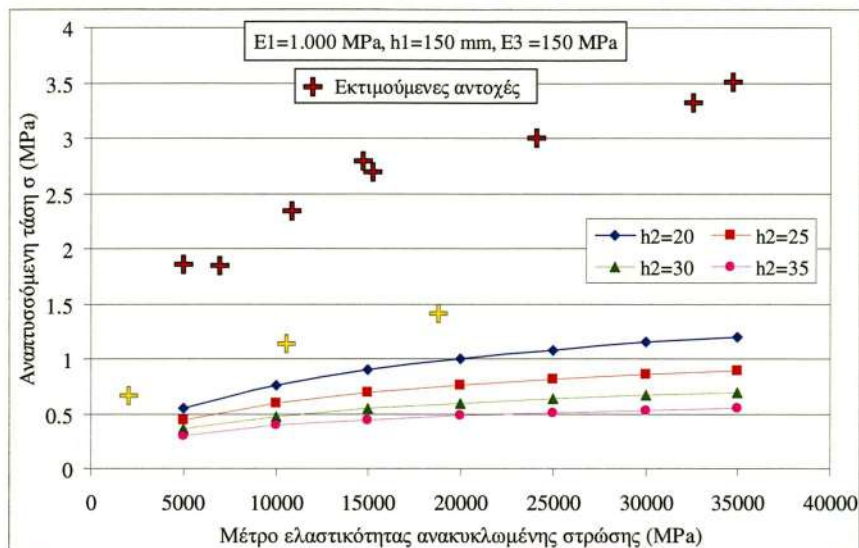
Σχήμα 8.10 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50$ MPa)



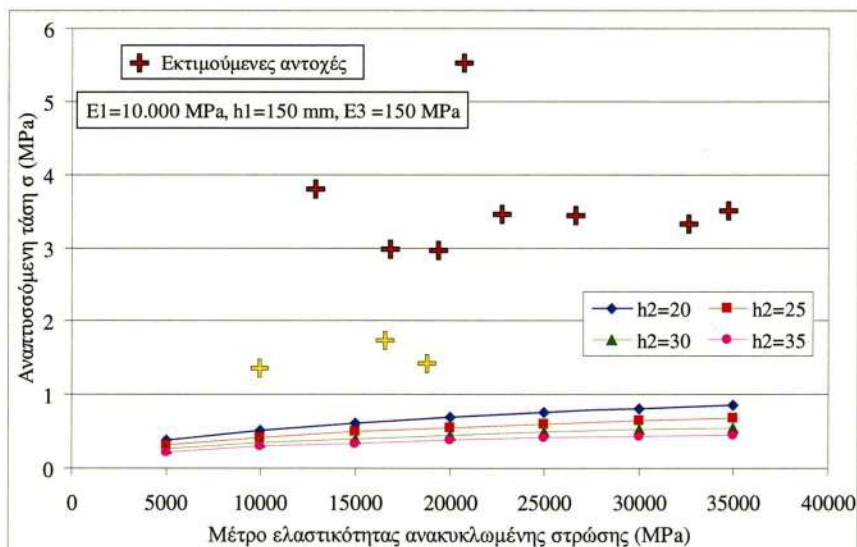
Σχήμα 8.11 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 100$ MPa)



Σχήμα 8.12 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 100$ MPa)



Σχήμα 8.13 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 150$ MPa)



Σχήμα 8.14 : Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 150$ MPa)

Καταρχήν, πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα Σχήματα έχουν την ίδια κλίμακα στους άξονες Υ, για ευκολία στη σύγκριση.

Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται ότι :

- ο οι αναπτυσσόμενες τάσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης αυξάνουν, όσο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης. Ο ρυθμός αύξησης της τάσης ελαττώνεται, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης και όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας της.
- ο οι τάσεις μειώνονται :
 - όσο αυξάνει το μέτρο δυσκαμψίας/ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης
 - όσο αυξάνει το πάχος της ασφαλικής στρώσης
 - όσο αυξάνει το μέτρο δυσκαμψίας της στρώσης έδρασης

Ως προς τις εκτιμώμενες εργαστηριακές τιμές πρέπει καταρχήν να γίνει η παρατήρηση, ότι παρόλο που τόσο η αναγωγή των αντοχών, όσο και των μέτρων ελαστικότητας έγιναν με δύο διαφορετικούς τρόπους, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Παρατηρείται ότι οι αντοχές μειώνονται, όσο μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας (και για τα δύο ποσοστά τσιμέντου). Αντίθετα, για $E_1 = 10.000 \text{ MPa}$ η μείωση αυτή δεν είναι τόσο σαφής. Επίσης υπάρχουν και εξαιρέσεις. Το σημείο που δεν συμβαδίζει με τα υπόλοιπα είναι αυτό για μέτρο ελαστικότητας 20.700 MPa και εκτιμώμενη αντοχή 5.3 MPa . Αυτό αναφέρεται στο υλικό III (50/50). Πράγματι, η αντοχή σε κάμψη του υλικού αυτού είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν του υλικού I (100/0), Σχήμα 7.4. Άρα, πρέπει να τονιστεί πάλι πόσο τα εργαστηριακά αποτελέσματα μπορούν να επηρεάσουν τα τελικά συμπεράσματα ως προς το απαιτούμενο πάχος.

Ως προς το ύψος των εκτιμώμενων αντοχών, παρατηρείται ότι για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 % οι αντοχές είναι μεγαλύτερες από τις αναπτυσσόμενες τάσεις, όταν το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης είναι υψηλό (10.000 MPa), ενώ όταν το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης είναι μικρό (1.000 MPa) και ταυτόχρονα το πάχος της είναι μικρό (100 mm) για μικρά μέτρα ελαστικότητας (υλικά IV (25/75) και V (0/100)) οι αντοχές είναι οριακά μεγαλύτερες από τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Συμπεραίνεται ότι για ποσοστό τσιμέντου 3 %, οι

αντοχές είναι ανεπαρκείς. Πρέπει πάντως να επισημανθεί, ότι οι εκτιμώμενες αντοχές δίνονται ως μέτρο σύγκρισης. Το ύψος των τιμών, έτσι ώστε το περιθώριο ασφαλείας να είναι επαρκές, μπορεί να καθοριστεί εύκολα στη μελέτη σύνθεσης του μίγματος, σε συνάρτηση με το ποσοστό τσιμέντου.

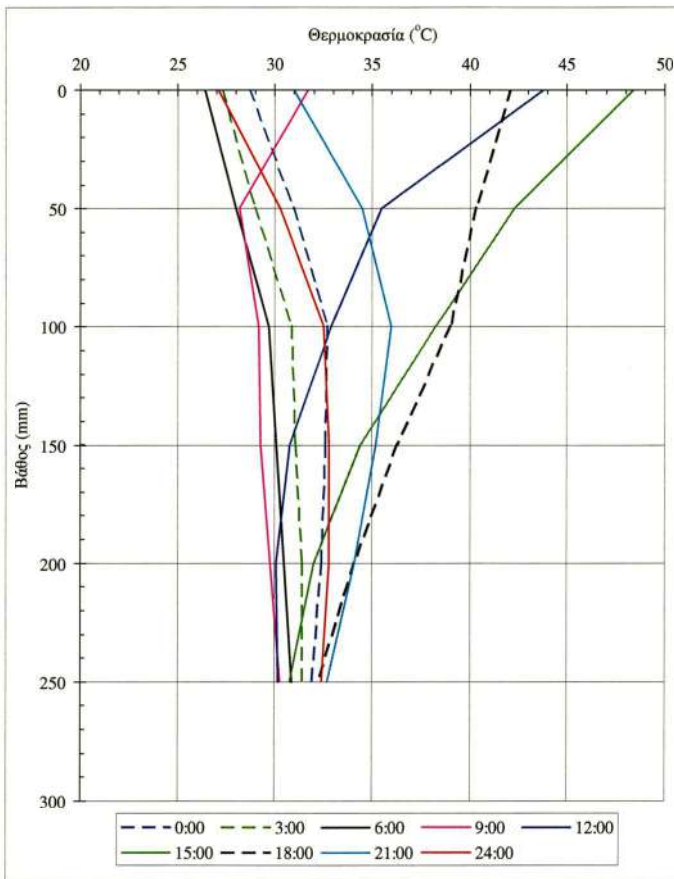
Στο περιθώριο αντοχής που παρατηρείται στα παραπάνω Σχήματα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντοχή σε κόπωση, και ιδιαίτερα ο λόγος των αναπτυσσόμενων τάσεων σ προς την αντοχή f . Πειράματα σε κόπωση δεν φαίνεται να είναι γνωστά, πλην αυτών που παρουσιάζονται στη διατριβή αυτή, τα οποία δεν κρίνονται επαρκή για να γίνει πλήρης η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα των δοκιμών κόπωσης και του κατασκευαζόμενου πάχους (Παράγραφος 6). Για το λόγο αυτό και για να υπάρχει κάποια αυξημένη ασφάλεια στη διαστασιολόγηση, λόγω των παραπάνω "κενών γνώσεων", πιστεύεται ότι ο λόγος σ/f για επαναλήψεις φορτίσεων μεγαλύτερες από 10^6 , θα πρέπει να μην υπερβαίνει το 0.50 ή το 0.45.

8.2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει προσπάθεια εκτίμησης των τάσεων που αναπτύσσονται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, κατά την έννοια του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης. Ο υπολογισμός θα είναι πολύ προσεγγιστικός και έχει σκοπό να εκτιμήσει την τάξη μεγέθους των αναπτυσσόμενων τάσεων και όχι να προβεί σε καθοριστικό - για την εκλογή του πάχους της στρώσεως - υπολογισμό. Αυτό είναι εκτός των ορίων της διατριβής αυτής και συγχρόνως δεν διατίθενται οι απαραίτητες πληροφορίες (ημερήσιες και ετήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές, συντελεστές συστολοδιαστολής των ανακυκλωμένων υλικών κλπ) όπως και το κατάλληλο λογισμικό.

Κατ' αρχήν γίνεται η παραδοχή ότι μεταξύ της άνω και κάτω ίνας της ανακυκλωμένης στρώσης αναπτύσσεται ευθύγραμμη θερμοκρασιακή διαφορά, της μορφής του Σχήματος 8.16. Θεωρώντας ότι η ασφαλική στρώση που επικαλύπτει την ανακυκλωμένη στρώση έχει συνολικό πάχος 100 mm και ότι η θερμοκρασιακή κατανομή δεν θα μεταβληθεί σημαντικά αν τα κατώτερα από το επίπεδο -100 mm στρώματα της στρώσης δεν είναι από ασφαλτόμιγμα (όπως στην περίπτωση του Σχήματος 8.16) αλλά από ανακυκλωμένο υλικό, προκύπτει ότι η διαφορά

θερμοκρασίας μεταξύ του επιπέδου -100mm και -250 mm είναι περίπου 7 °C. Επομένως η ανά μονάδα πάχους της στρώσης μεταβολή της θερμοκρασίας είναι $7/150 = 0.046$ °C/mm. Η σταθεροποιημένη στρώση είναι συνήθως πάχους 200 mm - 350 mm και όπως φαίνεται από το Σχήμα - αλλά και έχει αποδειχθεί σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα - η διαφορά θερμοκρασίας είναι ηπιότερη όταν λαμβάνεται σε μεγαλύτερα βάθη. Για τον λόγο αυτό τελικά θεωρείται για τις ανακυκλωμένες στρώσεις διαφορά θερμοκρασίας 0.03 °C/mm.



Σχήμα 8.16 : Κατανομή θερμοκρασιακών μεταβολών 24ώρου κατά το βάθος ασφαλτικής στρώσης

Ο υπολογισμός των θερμοκρασιακών τάσεων θα γίνει με τη βοήθεια της προσεγγιστικής μεθόδου Eisenmann [Eisenmann 1979, Κόλιας και Λοΐζος 1999].

Το κρίσιμο μήκος δίνεται, παραλείποντας την επίδραση του ιδίου βάρους της υπερκείμενης στρώσης, από τη σχέση :

$$l_{kp} = 200 * h * \sqrt{a * \Delta t * E}$$

Αν το l_{kp} προκύψει μικρότερο από την απόσταση προρηγμάτωσης που μπορεί να εφαρμοστεί, η οποία είναι συνήθως 3 m - 4 m, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν θα είναι ίσες με την τάση πλήρους παρεμπόδισης της θερμοκρασιακής ύψωσης (ανύψωσης), ή ακόμη δυσμενέστερα, αυξημένες κατά 20 %. Οι τάσεις πλήρους παρεμπόδισης της ανύψωσης υπολογίζονται από τη σχέση :

$$\sigma_{\pi} = \frac{1}{2(1-\nu)} a * \Delta t * h * E \quad (8.1)$$

Η σχέση αυτή για :

- ο λόγο του Poisson $\nu = 0.25$
- ο συντελεστή συστολοδιαστολής $\alpha = 2*10^{-5}$ (λήφθηκε διπλάσιος από την τιμή που λαμβάνεται για σκυρόδεμα με καθαρά ασβεστολιθικά αδρανή σε μία προσπάθεια προσέγγισης του συντελεστή για ανακυκλωμένα μίγματα που περιέχουν φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα)
- ο μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta t = 0.03$ °C/mm και
- ο πάχος ανακυκλωμένης στρώσης $h = 300$ mm

απλοποιείται στην :

$$\sigma_{\pi} = 0.00012 E \quad (8.2)$$

Σε περίπτωση που το l_{kp} προκύψει μεγαλύτερο από την απόσταση προρηγμάτωσης, L , η οποία θεωρείται ίση με 3 m, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν δίνονται από τη σχέση 8.3:

$$\sigma = \left[\frac{L - 400}{0.9 l_{kp}} \right]^2 \sigma_{\pi} \quad (8.3)$$

για την περίπτωση που ικανοποιείται το κριτήριο :

$$L - 2/3 c < 0.9 l_{kp}$$

Πρέπει όμως να τονισθεί ότι οι σχέσεις 8.1 και 8.3 δεν λαμβάνουν υπόψη την επιρροή του βάρους της ασφαλτικής στρώσης.

Οι θερμοκρασιακές τάσεις αναπτύσσονται με αργό ρυθμό και επιβάλλονται για ένα χρονικό διάστημα περίπου 2 - 4 ωρών, ακολουθώντας τις αντίστοιχες θερμοκρασιακές μεταβολές. Κατά το διάστημα αυτό, το ανακυκλωμένο υλικό θα υφίσταται ερπυστικές παραμορφώσεις και επομένως, θα υπάρχει - λόγω του φαινομένου της χαλάρωσης - μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Για να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο αυτό, ακολουθείται προσεγγιστική μέθοδος - χρησιμοποιούμενη στους στατικούς υπολογισμούς - κατά την οποία η τιμή του μέτρου ελαστικότητας στη σχέση 8.2, λαμβάνεται η τιμή του μέτρου που προσδιορίζεται μετά από 2 ώρες στις δοκιμές ερπυσμού. Για να χρησιμοποιηθούν τα μέτρα ελαστικότητας της κύριας έρευνας, υπολογίστηκε από τις δοκιμές ερπυσμού ένας συντελεστής μείωσης του αρχικού μέτρου ελαστικότητας, E_{10} (για χρόνο = 0) σε μέτρο ελαστικότητας μετά από 2 ώρες φόρτισης, E_{12} . Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος συντελεστής για τα μέτρα ελαστικότητας 1 και 60 ημερών, αυτός της 1 ημέρας, γιατί ο συντελεστής από τις 60 ημέρες κρίθηκε αναξιόπιστος. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1 : Εκτίμηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιακών τάσεων στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης πάχους 300 mm, για ηλικία 1 και 60 ημερών

Υλικό	E_{10} (MPa)	l_{kp} (m)	Συντελεστής μείωσης (%)	E_{12} (MPa)	σ θερμ. (MPa)	Αντοχή (MPa)
1 ημέρα						
I (100/0)	7600	3.5	24	5750	0.474	0.42
III (50/50)	4900	-	43	2800	0.336	0.3
V (0/100)	5200	-	72	1450	0.174	0.23
60 ημέρες						
I (100/0)	32600	7.3	24	24800	0.466	3.32
III (50/50)	17500	4.6	43	10000	0.473	3.39
V (0/100)	8000	-	72	2250	0.27	2.68

Από τις τιμές του Πίνακα 8.1 μπορούμε να πούμε ότι για την ηλικία της 1 ημέρας τα υλικά Ι (100/0) και ΙΙΙ (50/50) "φαίνεται" ότι ρηγματώνονται, ενώ το υλικό V (0/100) οριακά δεν ρηγματώνεται. Για τις 60 ημέρες κανένα από τα υλικά δεν ρηγματώνεται λόγω θερμοκρασιακών τάσεων, αλλά το περιθώριο ασφαλείας αυξάνει με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος. Στην ηλικία αυτή, οι θερμοκρασιακές τάσεις πρέπει να προστεθούν σε αυτές που προκύπτουν από φορτία λόγω οχημάτων. Λόγω όμως του προσεγγιστικού τρόπου υπολογισμού των θερμοκρασιακών τάσεων δεν αποτολμήθηκε να γίνει καμία επαλληλία.

Τονίζεται για άλλη μία φορά, ότι οι τιμές του Πίνακα 8.1 παρέχουν απλώς μία ένδειξη της τάξης μεγέθους των θερμοκρασιακών τάσεων, μια που για τον πληρέστερο υπολογισμό των θερμοκρασιακών τάσεων πρέπει εκτός από τα θερμοκρασιακά δεδομένα από πραγματικά οδοστρώματα εν λειτουργία, να διατίθεται και το κατάλληλο πρόγραμμα υπολογισμού.

8.3 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΔΙΕΥΚΡΙΝΗΣΕΙΣ

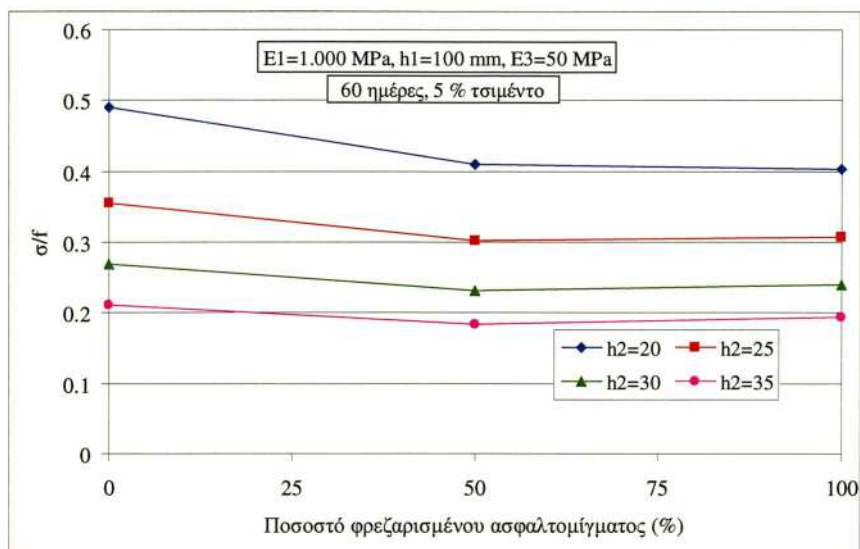
8.3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΝ ΛΟΓΟ σ/f

Στα επόμενα γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης του σ/f , με το πρόγραμμα BISAR, με βάση όλα τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Η ανάλυση έγινε θεωρώντας το οδόστρωμα του Σχήματος 8.1, ενώ ως μέτρα ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης χρησιμοποιήθηκαν τα εργαστηριακά αποτελέσματα.

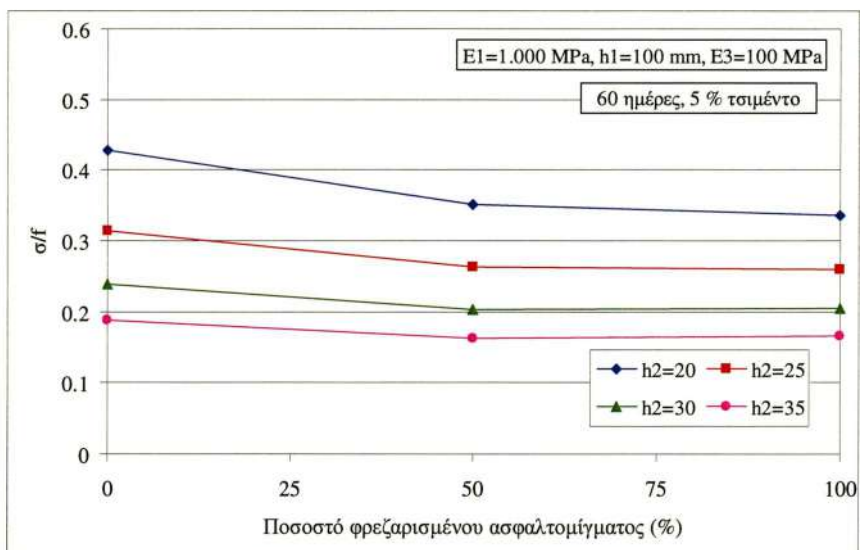
Στα Σχήματα 8.17 - 8.19 δίνεται ο λόγος σ/f βάσει των εργαστηριακών αποτελεσμάτων για ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 5 %, για $E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm και $E_3 = 50, 100$ και 150 αντίστοιχα. Τα Σχήματα 8.20 - 8.22 είναι αντίστοιχα των 8.17 - 8.19 για $h_1 = 150$ mm.

Στα Σχήματα 8.23 - 8.28 δίνεται ο λόγος σ/f για $E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm και $E_3 = 50, 100$ και 150 αντίστοιχα ενώ ως μέτρα ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης χρησιμοποιήθηκαν τα εργαστηριακά αποτελέσματα της Παραγράφου 5.3.2 (για τα οποία υπάρχουν δεδομένα σε 3 θερμοκρασίες) για $h_1 = 100$ mm (Σχήματα 8.23, 8.24 και 8.25) και $h_1 = 150$ mm (Σχήματα 8.26, 8.27 και 8.28).

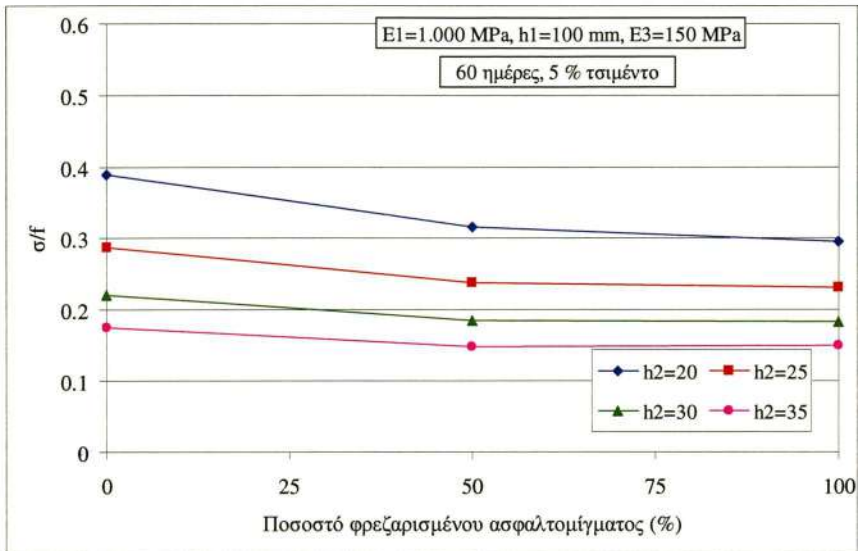
Τα υπόλοιπα Σχήματα (ηλικία 60 ημερών και ποσοστό τσιμέντου 3 %, καθώς και για ηλικίες 1 και 7 ημερών) δίνονται στο Παράρτημα.



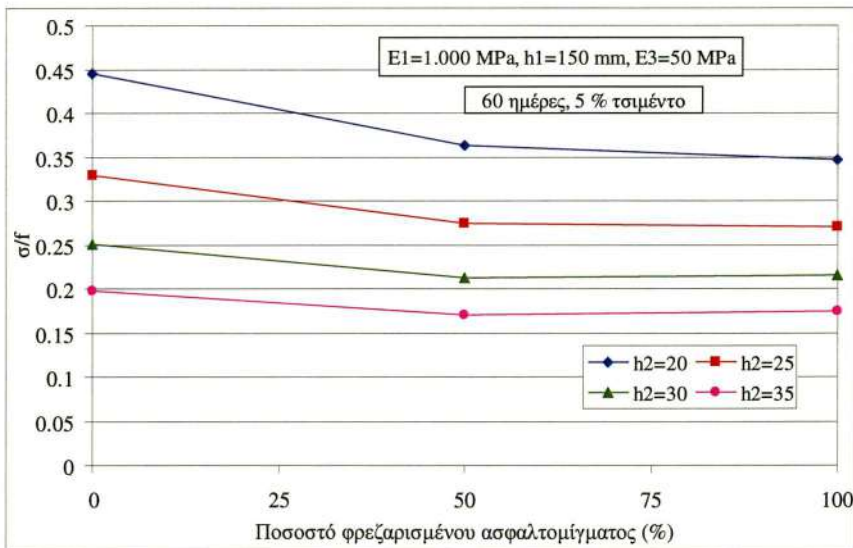
Σχήμα 8.17 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$,
 $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 50 \text{ MPa}$)



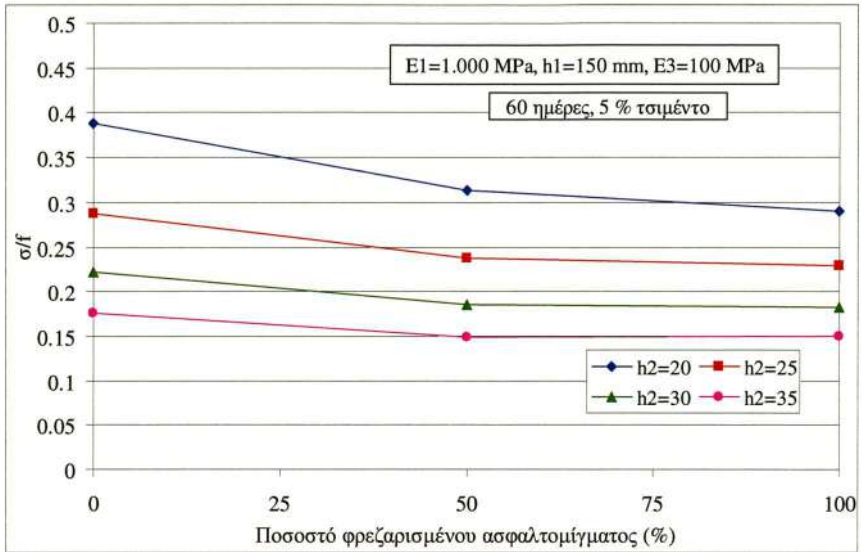
Σχήμα 8.18 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$,
 $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 100 \text{ MPa}$)



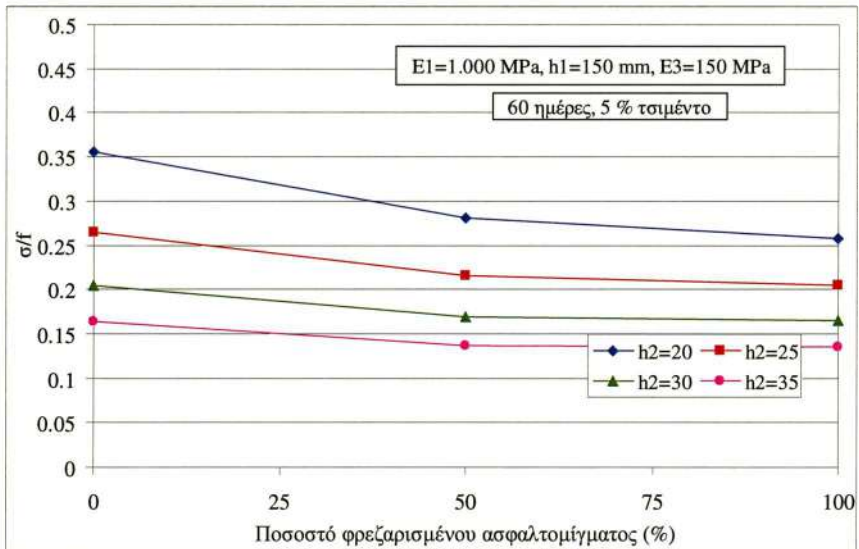
Σχήμα 8.19 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 150 \text{ MPa}$)



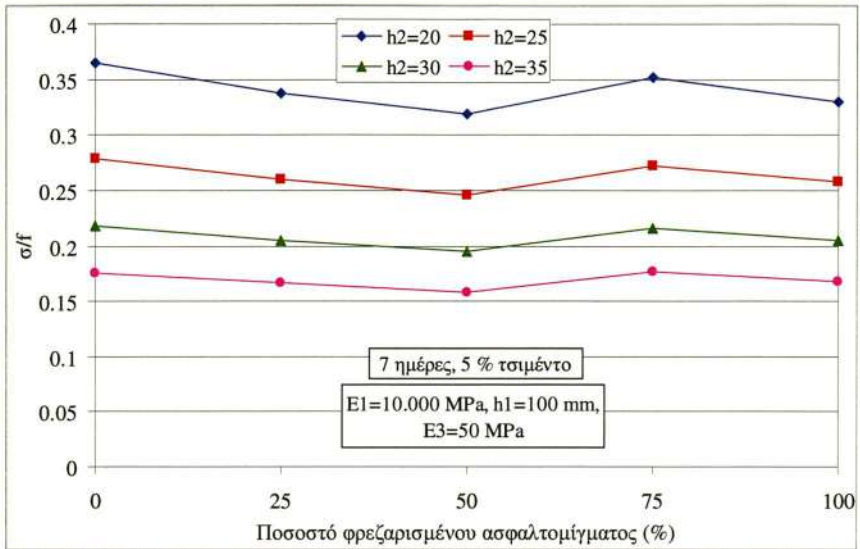
Σχήμα 8.20 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 150 \text{ mm}$, $E_3 = 50 \text{ MPa}$)



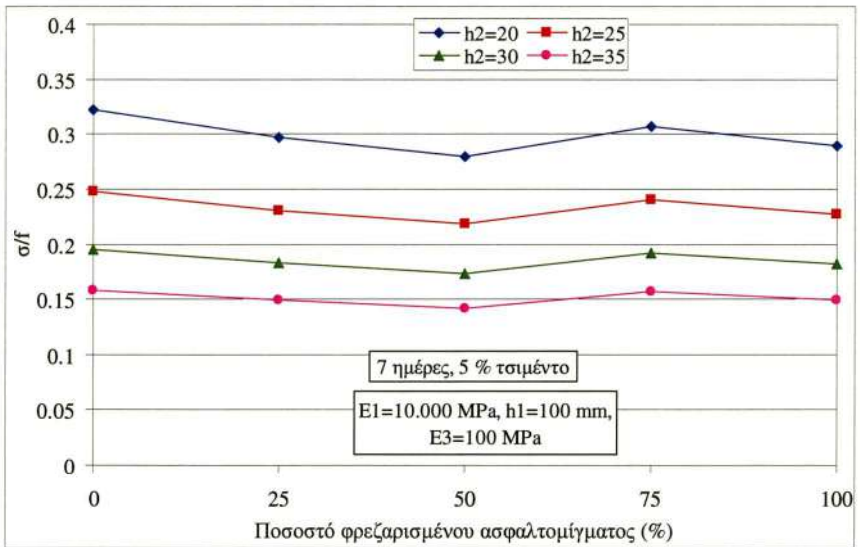
Σχήμα 8.21 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 150 \text{ mm}$, $E_3 = 100 \text{ MPa}$)



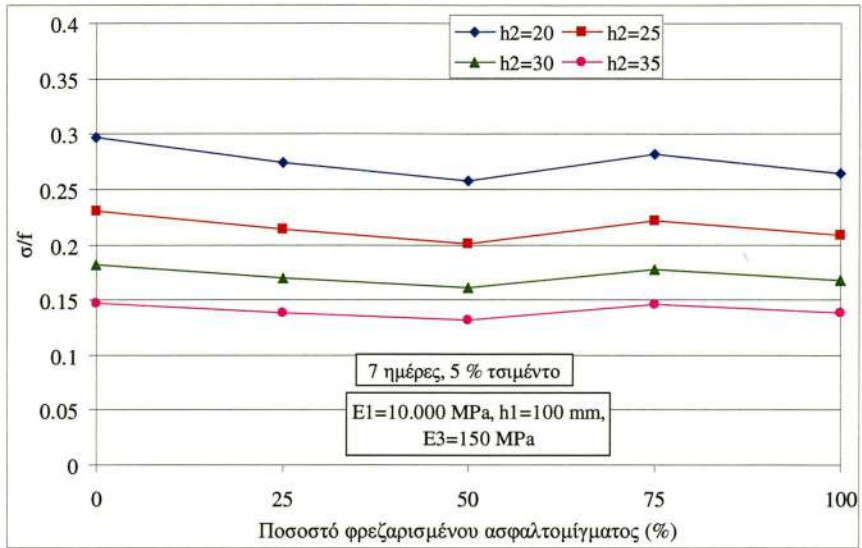
Σχήμα 8.22 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 150 \text{ mm}$, $E_3 = 150 \text{ MPa}$)



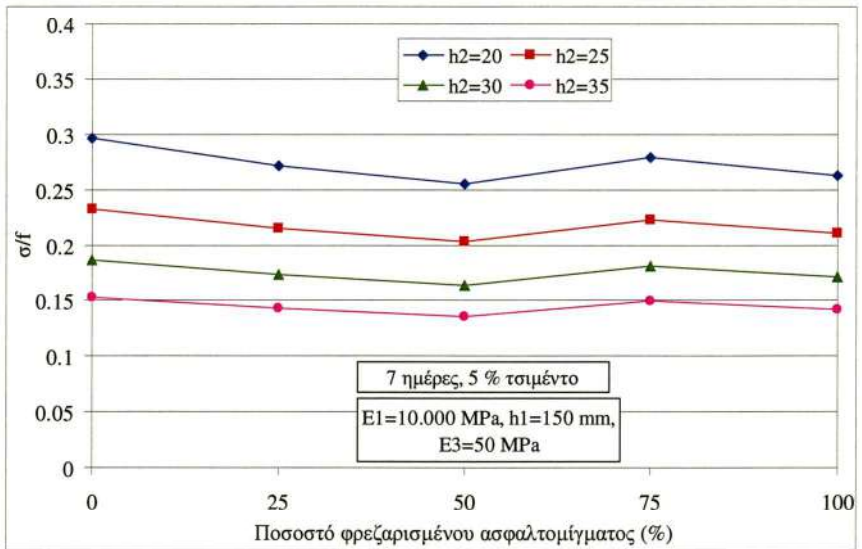
Σχήμα 8.23 : Λόγος σ/ϵ στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa,
 $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 50$ MPa)



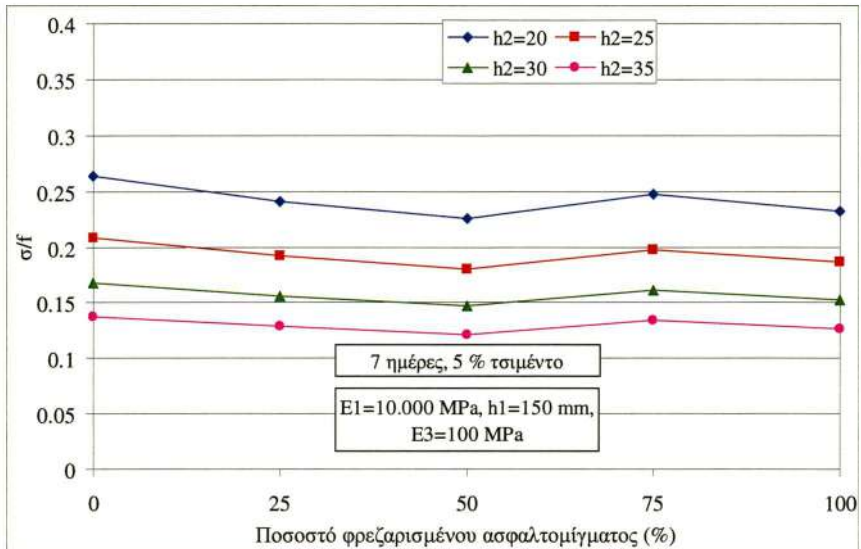
Σχήμα 8.24 : Λόγος σ/ϵ στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa,
 $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 100$ MPa)



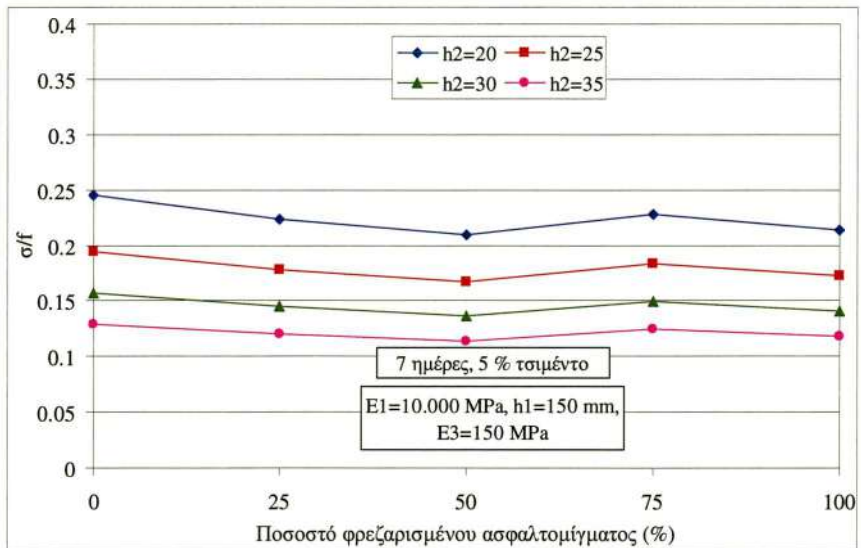
Σχήμα 8.25 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 150$ MPa)



Σχήμα 8.26 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50$ MPa)



Σχήμα 8.27 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 100$ MPa)

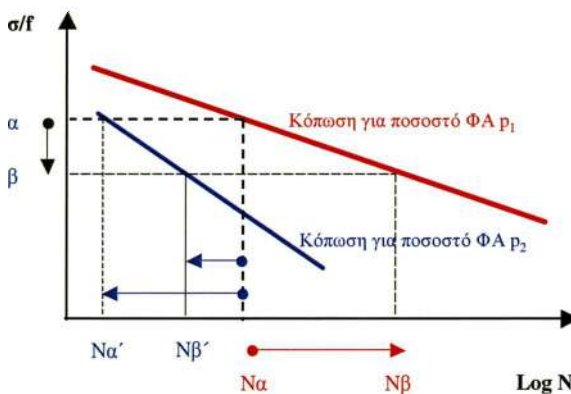


Σχήμα 8.28 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 10.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 150$ MPa)

Παρατηρείται ότι για την ηλικία των 60 ημερών ο λόγος σ/f μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος στο μίγμα. Η μείωση του λόγου σ/f δεν είναι τόσοσ σαφής για ποσοστό τσιμέντου 3 % και για μικρότερες ηλικίες δοκιμής και αυτό αποδίδεται :

- ο Για τις μικρότερες ηλικίες δοκιμής στη μεγαλύτερη μεταβλητότητα της αντοχής f .
- ο Για το ποσοστό τσιμέντου 3 % στο διαφορετικό ρυθμό μείωσης των σ και f . Το μέτρο ελαστικότητας που προσδιορίζει την αναπτυσσόμενη τάση, σ , για ποσοστό τσιμέντου 3 % και το ύψος της αντοχής f αντιστοιχούν στην περιοχή του διαγράμματος με τη μεγαλύτερη μεταξύ τους απόκλιση.

Η μείωση του λόγου σ/f για δεδομένη καμπύλη κόπωσης οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό επιτρεπόμενων διελεύσεων N . Στο Σχήμα 8.29 για επίπεδο φόρτισης $\sigma/f = \alpha$ έχουμε αριθμό επιτρεπόμενων διελεύσεων N_{α} (κόκκινη καμπύλη κόπωσης). Μείωση το λόγου σ/f από α σε β οδηγεί σε αύξηση των N , από N_{α} σε N_{β} . Αν όμως η καμπύλη κόπωσης με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος αλλάξει κλίση και ταυτόχρονα περιστραφεί ως προς τον άξονα Y (μπλε καμπύλη κόπωσης) για επίπεδο φόρτισης $\sigma/f = \alpha$ το N_{α} ελαττώνεται σημαντικά, σε N_{α}' . Η ταυτόχρονη μείωση όμως του σ/f από α σε β οδηγεί σε σημαντικά μικρότερη μείωση του N από N_{α} σε N_{β}' . Έτσι, η αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος οδηγεί σε ελάττωση από N_{α} σε N_{β}' , οι οποίες όμως είναι σημαντικά μεγαλύτερες του N_{α}' , που θα ίσχυε αν δεν υπήρχε μείωση του λόγου σ/f .

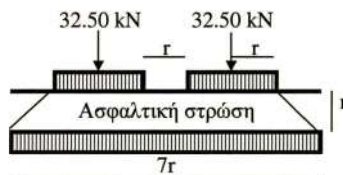


Σχήμα 8.29 : Επίδραση του λόγου σ/f στον υπολογισμό των επιτρεπόμενων φορτίσεων από κόπωση

8.3.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΥΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

Τα προγράμματα επίλυσης ελαστικών επάλληλων στρώσεων, όπως το BISAR, υπολογίζουν τάσεις για ελαστικές στρώσεις (απείρων διαστάσεων κατά την έννοια του οριζόντιου επιπέδου). Στην περίπτωση όμως ύπαρξης ρωγμής (πιθανότητα που δεν μπορεί να αποκλειστεί) οι τάσεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο της ρωγμής δεν μπορούν να προσδιοριστούν με τα προγράμματα αυτά. Για τον λόγο αυτό προτείνεται να χρησιμοποιηθεί διορθωτικός (επαυξητικός) συντελεστής στις τάσεις που προσδιορίζονται από το BISAR. Ο συντελεστής αυτός βασίζεται στη σχέση μεταξύ τάσεων στο "μέσον", σ_{μ} , και τάσεων στην "ακμή", σ_a , που υπολογίζονται κατά Westergaard και Westergaard - Losberg [Κόλιας και Λοΐζος 1999] για πλάκα από άκαμπτο υλικό εδραζόμενη σε έδαφος με CBR = 15 % επί το δυσμενέστερον (σε CBR = 15 % αντιστοιχεί $k = 6 \times 10^{-2} \text{ N/mm}^2$ [PCA 1967]). Στην περίπτωση αυτή πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι μεταξύ ανακυκλωμένης στρώσης και επιφάνειας επαφής του διδύμου τροχού μεσολαβεί η ασφαλικτή στρώση, το πάχος της οποίας λαμβάνεται ίσο με 125 mm ίσο με την ακτίνα επαφής του τροχού. Θεωρώντας μία γωνία κατανομής του φορτίου 45° προκύπτει ότι το φορτίο που εφαρμόζεται στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης είναι, Σχήμα 8.30, επί ενός κύκλου με ακτίνα επαφής :

$$\frac{1}{2} \cdot 7r = 3.5 r.$$

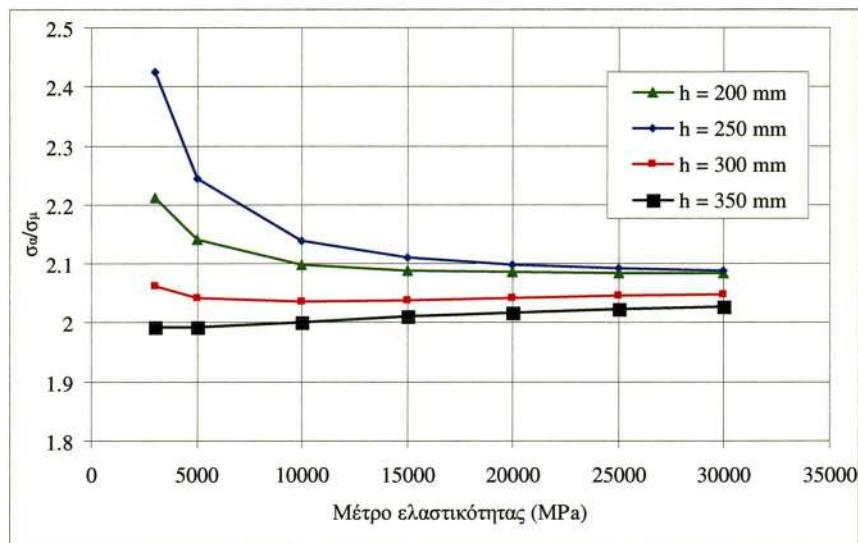


Σχήμα 8.30 : Παραδοχή κατανομής πιέσεων στην επιφάνεια της ανακυκλωμένης στρώσης από φορτίο τυπικού άξονα 13 tn

Θεωρώντας κατά προσέγγιση ότι η πίεση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε ακτίνα 3.5 r προκύπτει:

$$p = 65000 / (\pi (3.5 \cdot 125)^2) = 0.108 \text{ MPa}$$

Στο Σχήμα 8.31 φαίνεται ο λόγος σ_a/σ_m , ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 2 και 2.1. Δεδομένου ότι θα υπάρχει συνεργασία μεταξύ των τμημάτων της στρώσης, λόγω αλληλοεμπλοκής των επιφανειών και της αναπτυσσόμενης τριβής, ο συντελεστής αυτός εκτιμάται ότι θα μπορούσε να λάβει μικρότερες τιμές από 2 αλλά για να εκτιμηθεί με ακρίβεια μία τέτοια μείωση χρειάζονται μετρήσεις σε πραγματικά οδοστρώματα. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν με φόρτιση πλακών ή με το FWD εκατέρωθεν μιας τέτοιας ρωγμής κατά προτίμηση τον χειμώνα οπότε, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας και της συνεπαγόμενης συστολής, το "άνοιγμα" της ρωγμής θα είναι μεγαλύτερο και η συνεργασία μικρότερη.



Σχήμα 8.31 : Λόγος των τάσεων στην ακμή προς τις τάσεις στο μέσον, σ_a/σ_m , σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης

Σύμφωνα με τις Γαλλικές οδηγίες υπολογισμού οδοστρωμάτων [LCPC - SETRA 1994] η επιτρεπόμενη τάση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma(N) k_r k_c k_s k_d$$

όπου

σ (N)	η τάση θραύσης για N επαναλήψεις φορτίσεων
k_r k_c k_s k_d	συντελεστές "προσαρμογής" των υπολογισμών και των εργαστηριακών δεδομένων

Στα επόμενα θα γίνει μία προσπάθεια εκτίμησης των συντελεστών αυτών για να προσδιορισθεί κατά προσέγγιση και η επίδρασή τους στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων αλλά, δεδομένου ότι δεν υπάρχει τρόπος ελέγχου αυτών από μετρήσεις επί τόπου, δεν θα επιχειρηθεί η χρησιμοποίησή τους για υπολογισμό του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης.

Οι τιμές των συντελεστών προσαρμογής προκύπτουν μετά από παρατηρήσεις της συμπεριφοράς αντιστοίχων οδοστρωμάτων και λαμβάνουν υπόψη τους, κατά ομάδες, διάφορες παραμέτρους ως ακολούθως :

k_r : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μεταβλητότητα των δοκιμών κόπωσης, τη μεταβλητότητα της κατασκευής της στρώσης - ως προς τη μεταβλητότητα του πάχους - και τις συνέπειές του στις αναπτυσσόμενες τάσεις, και προϋποθέτει την υιοθέτηση ενός επιπέδου εμπιστοσύνης του υπολογισμού, δηλ. ότι με τα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη, η πιθανότητα να αστοχήσει το οδόστρωμα είναι p %.

$$k_r = 10^{-S Z_b}$$

Η συνολική τυπική απόκλιση είναι το άθροισμα των τυπικών αποκλίσεων :

- της δοκιμής σε κόπωση σ_N και
- της τυπικής αποκλίσεως της επίδρασης της μεταβλητότητας του πάχους στην αναπτυσσόμενη τάση, η οποία είναι ίση με το γινόμενο της τυπικής απόκλισης του πάχους σ_h επί τη μεταβολή της τάσεως ανά μονάδα πάχους στρώσεως $c = 0.02 \text{ cm}^{-1}$ πολλαπλασιασμένης με την κλίση του διαγράμματος κόπωσης $1/b = -15$.

$$S = [\sigma_N^2 + (c^2/b^2)\sigma_h^2]^{0.5}$$

Στην παρούσα διατριβή διαπιστώθηκε από τις δοκιμές κόπωσης ότι η τυπική απόκλιση του λογαρίθμου των φορτίσεων N είναι μικρή, περί το 0.6, (Παράγραφος 6), αλλά - μέχρι να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα και με άλλες δοκιμές - επί το δυσμενέστερον, λαμβάνεται ίση με 1.

Επίσης θεωρείται ότι η κλίση της καμπύλης κόπωσης είναι $b = -1/15$, όπως προτείνεται από τις Γαλλικές Οδηγίες για κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα, μια που από το Κεφάλαιο 6 βρέθηκε ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στην κλίση, έναντι των Γαλλικών Οδηγιών.

Η τυπική απόκλιση λόγω της μεταβλητότητας του πάχους s_h ισούται με 4 cm [Lefort 1997].

Η πιθανότητα αστοχίας λαμβάνεται ίση με 5 %, οπότε ο συντελεστής της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $Z = -1.645$.

Τελικά η συνολική τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$S = \left[1 + \left(\frac{0.02^2}{\left(-\frac{1}{15} \right)^2} \right) * 4^2 \right]^{0.5} = 1.562$$

Με τα δεδομένα αυτά προκύπτει :

$$k_r = 0.674$$

k_c : συντελεστής προσαρμογής από το μαθηματικό προσομοίωμα υπολογισμού στο πραγματικό οδόστρωμα. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει την τιμή 1.4 για κατεργασμένα με τσιμέντο αμμοχάλικα και πιστεύεται ότι μπορεί να διατηρηθεί ο ίδιος και στην περίπτωση των ανακυκλωμένων υλικών.

k_d : συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τις τυχόν ασυνέχειες στη στρώση και κατά τις Γαλλικές οδηγίες ισούται με :

1/1.25 για υλικά G4 και G5

1 για υλικά G2 και G3

Τα υλικά της παρούσας διατριβής αποδείχθηκαν ότι ανήκουν στην κατηγορία G4 όπως και οι μετρήσεις του LCPC [Lefort 1997] απέδειξαν για κατασκευές στη Γαλλία.

k_s : συντελεστής προσαρμογής που λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 1 για εδάφη των οποίων η φέρουσα ικανότητα είναι αυξημένη, ($CBR \geq 12\%$), λόγω της μακρόχρονης κυκλοφορίας των οχημάτων.

Τελικά, η επιτρεπόμενη τάση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_{t,ad} = 0.755 \sigma (N).$$

9. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

9.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πιστεύεται ότι το σπουδαιότερο, ίσως, συμπέρασμα από τη διατριβή αυτή είναι ότι τα μίγματα αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, που προέρχονται από επιτόπου ανακυκλώσεις συνήθων ευκάμπτων οδοστρωμάτων, πρέπει να θεωρούνται ως "νέα" υλικά, με τα δικά τους μηχανικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι διαφορετικά από εκείνα των κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες κοκκωδών υλικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζονται από την περιεκτικότητα του μίγματος σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα και από τις παραμέτρους που επιδρούν στα χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος. Ως εκ τούτου, τα υλικά αυτά θα μπορούν να καταταχθούν μεταξύ των δύσκαπτων τιμεντόδετων υλικών (σκυρόδεμα, ΚΘΑ) και των εύκαπτων ασφαλτομιγμάτων.

Πιο συγκεκριμένα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

ο Επίδραση του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος

Με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος :

- Μειώνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, αλλά η μείωση του μέτρου ελαστικότητας είναι αναλογικά μεγαλύτερη από εκείνη της αντοχής. Ο λόγος επομένως E/f μειώνεται.
- Μειώνεται εντονότερα η αντοχή σε θλίψη από την αντοχή σε εφελκυσμό ή σε κάμψη. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό ή σε κάμψη είναι μεγαλύτερη, όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος είναι μεγαλύτερο. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στις Προδιαγραφές και να μην προδιαγράφεται το υλικό μόνον με απαιτήσεις ως προς την αντοχή σε θλίψη.

- Από τις δοκιμές σε κόπωση, υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι το επίπεδο φόρτισης που αντιστοιχεί σε $N = 10^6$ επαναλήψεις φορτίσεων μειώνεται ($\sigma/f = 0.57$ και 0.54 για τα υλικά III (50/50) και V (0/100) αντίστοιχα, έναντι 0.65 για το υλικό I (100/0).
 - Ο ερπυσμός αυξάνει
 - Ο λόγος της αναπτυσσόμενης τάσης σ , προς την αντοχή f , φαίνεται ότι μειώνεται για τα εξετασθέντα μίγματα (σε ηλικία 60 ημερών) και τις εξετασθείσες περιπτώσεις οδοστρωμάτων. Μείωση του λόγου σ/f σημαίνει βελτίωση της απόκρισης των ανακυκλωμένων οδοστρωμάτων στις διάφορες επιπονήσεις.
- ο Επίδραση της θερμοκρασίας :
- Αύξηση της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά τη δοκιμή προκαλεί ανάλογη μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.
 - Η μείωση των τιμών της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας είναι εντονότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος.
- ο Μεταβλητότητα των υλικών :
- Τα χαρακτηριστικά των θραυστών υλικών που εξετάστηκαν επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου μίγματος, ενώ η αντοχή σε θλίψη μπορεί να μην επηρεάζεται. Η επικολλημένη παιπάλη στην επιφάνεια των χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να επιφέρει μείωση της εφελκυστικής αντοχής κατά 45 % περίπου. Αντίθετα η μεταβολή της προέλευσης του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, πρέπει όμως η έρευνα να επεκταθεί και σε ασφαλτομίγματα διαφορετικού τύπου από αυτά που εξετάστηκαν.
 - Αποδεικνύεται λοιπόν ότι μεταβολές στα χρησιμοποιούμενα υλικά μπορεί να επιφέρουν σημαντικές και μη εύκολα προβλέψιμες διαφοροποιήσεις στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, άρα η μελέτη σύνθεσης πρέπει απαραίτητως να γίνεται με τα συγκεκριμένα υλικά που υπάρχουν στο προς ανακύκλωση οδόστρωμα. Πρέπει επίσης

να λαμβάνεται υπόψη και η τυχόν μεταβλητότητα των επιτόπου υλικών του προς ανακύκλωση οδοστρώματος καθώς και η μεταβλητότητα του πάχους των στρώσεων.

Η μεταβλητότητα των δοκιμών κόπωσης είναι σημαντικά μειωμένη σε σύγκριση με τη μεταβλητότητα των κοινών κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες κοκκωδών υλικών. Αυτό είναι αξιοσημείωτο πλεονέκτημα που δυνατόν να επιφέρει μείωση του απαιτούμενου πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης, αν αποδειχθεί και από άλλες έρευνες.

- ο Από τη διατριβή αυτή θα μπορούσε να προταθούν οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών ανακυκλωμένων με τσιμέντο (CEM II BM 32.5 R) που δίνονται στον Πίνακα 9.1, για διάφορες αναλογίες φρεζαρισμένου ασφαλοτόμιγματος και θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών. Οι τιμές αυτές δίνονται ως κατά προσέγγιση "αντιπροσωπευτικές" τιμές, αλλά κάθε χρήση τους πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και επιφύλαξη, λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες παρατηρήσεις για την επίδραση του είδους και της ποιότητας των συστατικών υλικών. Ο Πίνακας αυτός δίνεται με τη ρητή αυτή επιφύλαξη.

Πίνακας 9.1 : Προσεγγιστικές "αντιπροσωπευτικές" τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών

Υλικό	Ηλικία					
	1 ημέρα		7 ημέρες		60 ημέρες	
	Τσιμέντο		Τσιμέντο		Τσιμέντο	
	3 %	5 %	3 %	5 %	3 %	5 %
Αντοχή σε θλίψη (MPa)						
I (100/0)	5.0 - 5.5	9.5 - 10.5	8.0 - 9.0	12.0 - 12.5	13.0 - 15.0	20.0 - 22.0
II (75/25)	4.5 - 5.0	7.0 - 7.5	6.5 - 7.5	9.5 - 10.0	9.0 - 11.0	10.4 - 16.0
III (50/50)	3.5 - 4.0	5.5 - 6.0	4.5 - 5.0	7.0 - 7.5	7.0 - 9.0	11.0 - 13.0
IV (25/75)	3.0 - 3.5	3.0 - 3.5	2.5 - 3.0	5.0 - 5.5	5.0 - 6.0	8.0 - 10.0
V (0/100)	1 - 1.5	2.5 - 3.5	2.0 - 3.0	4.0 - 4.5	3.0 - 4.0	6.0 - 7.5
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)						
I (100/0)	0.10 - 0.15	0.40 - 0.45	-	-	0.35 - 0.60	1.50 - 1.70
II (75/25)	0.15 - 0.25	0.30 - 0.35	-	-	0.40 - 0.55	1.50 - 1.70
III (50/50)	0.15 - .020	0.25 - 0.35	-	-	0.4 - 0.55	1.50 - 1.70
IV (25/75)	0.15 - .020	0.15 - 0.20	-	-	0.6 - 0.7	1.30 - 1.50
V (0/100)	0.025 - 0.035	0.20 - 0.25	-	-	0.3 - 0.4	0.7 - 0.9

Πίνακας 9.1 συνέχεια

Υλικό	Ηλικία					
	1 ημέρα		7 ημέρες		60 ημέρες	
	Τσιμέντο		Τσιμέντο		Τσιμέντο	
	3 %	5 %	3 %	5 %	3 %	5 %
Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) (MPa)						
I (100/0)	0.35 - 0.70	0.5 - 0.6	0.5 - 0.6	0.7 - 1.0	0.65 - 0.90	1.35 - 1.50
II (75/25)	0.35 - 0.70	0.5 - 0.6	0.45 - 0.55	0.7 - 1.0	0.65 - 0.9	1.35 - 1.50
III (50/50)	0.25 - 0.30	0.4 - 0.5	0.3 - 0.4	0.6 - 0.8	0.5 - 0.6	0.8 - 0.9
IV (25/75)	0.15 - 0.20	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.4 - 0.5	0.4 - 0.5	0.65 - 0.75
V (0/100)	0.10 - 0.20	0.2 - 0.35	0.15 - 0.25	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.5 - .6
Αντοχή σε κάμψη (MPa)						
I (100/0)	0.3 - 0.4	0.45 - 0.60	-	-	1.35 - 1.45	3.0 - 4.0
II (75/25)	0.3 - 0.4	0.45 - 0.60	-	-	-	-
III (50/50)	0.3 - 0.4	0.4 - 0.5	-	-	1.35 - 1.45	3.0 - 4.0
IV (25/75)	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	-	-	-	-
V (0/100)	0.15 - 0.15	0.25 - 0.35	-	-	0.9 - 1.0	2.0 - 3.0
Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (ή σε θλίψη) (MPa)						
I (100/0)	3500 - 4500	7500 - 8500		24500 - 25000	9500 - 10500	26500 - 28500
II (75/25)	4000 - 5000	7000-8500		16000 - 17000	7000 - 8500	18500 - 20500
III (50/50)	2500 - 3500	5000 - 6000		11000 - 12000	5000 - 6000	14000 - 16000
IV (25/75)	2500 - 3500	4000 - 5000		7500 - 8500	4500 - 5000	9000 - 11000
V (0/100)	300 - 1000	2000 - 3000		4500 - 5500	2500 - 3000	3500 - 5500
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (MPa)						
I (100/0)	8500 - 9500	7000 - 8000	-	27500 - 28500	18000 - 19500	31000 - 33000
II (75/25)	4500 - 5500	7000 - 8000	-	19500 - 20500	16000 - 19500	25000 - 33000
III (50/50)	2500 - 4500	4500 - 5500	-	14500 - 15500	12500 - 14000	17000 - 18000
IV (25/75)	2500 - 5500	2500 - 5500	-	8000 - 10000	4000 - 7000	7000 - 12000
V (0/100)	2500 - 5500	2500 - 5500	-	6000 - 8000	400 - 5500	7000 - 9000
Δf θλίψη/ $^{\circ}\text{C}$ (MPa/ $^{\circ}\text{C}$)						
II (75/25)	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
III (50/50)	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04
IV (25/75)	0.03	0.04	0.05	0.08	0.05	0.07
V (0/100)	0.03	0.04	0.05	0.08	0.05	0.09
ΔE θλίψη/ $^{\circ}\text{C}$ (MPa/ $^{\circ}\text{C}$)						
II (75/25)				100		
III (50/50)				100		
IV (25/75)				150		
V (0/100)				200		
σ_6						
I (100/0)					0.650	
III (50/50)					0.573	
V (0/100)					0.567	
$\sigma/f = 1 - \alpha \log N$						
I (100/0)	-	-	-	-	1 - 0.0583 log N	
III (50/50)	-	-	-	-	1 - 0.0712 log N	
V (0/100)	-	-	-	-	1 - 0.0722 log N	

9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην εκτέλεση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της διατριβής αυτής διαπιστώθηκε η ανάγκη για τις ακόλουθες περαιτέρω έρευνες :

- ο Επίδραση του είδους του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, αλλά και του μεγέθους του μέγιστου κόκκου αυτού, στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων μιγμάτων.
- ο Μέτρηση του συντελεστή συστολοδιαστολής των ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων με διάφορα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, σε διάφορες ηλικίες και με διάφορα ποσοστά τσιμέντου.
- ο Επιβεβαίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση των ανακυκλωμένων μιγμάτων με μεγαλύτερο αριθμό δοκιμών και διάφορα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος μεταξύ 0 % και 50 %, που είναι και στην πράξη το εύρος μέσα στο οποίο κυμαίνονται τα διάφορα ανακυκλωμένα μίγματα και επέκταση των δοκιμών σε κόπωση στη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας. Περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς σε ερπυσμό των ανακυκλωμένων μιγμάτων, με ιδιαίτερη έμφαση στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού και στην επίδραση της θερμοκρασίας.
- ο Διερεύνηση της επιρρέπειας σε ρηγμάτωση και της επίδρασης του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, με ειδικά σχεδιασμένα πειράματα.
- ο Διερεύνηση σε βάθος του μηχανισμού θραύσης των διαφόρων μιγμάτων και ανάπτυξη κατάλληλου προς τούτο προσομοιώματος. Ανάπτυξη μαθηματικού προσομοιώματος εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας από τα χαρακτηριστικά και τις αναλογίες σύνθεσης των συστατικών υλικών.
- ο Περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και της ταχύτητας φόρτισης στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων μιγμάτων.
- ο Επέκταση της έρευνας μιγμάτων με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα και αμμοχάλικο και στην περίπτωση σκυροδεμάτων (με μεγαλύτερη αντοχή και περιεκτικότητα σε τσιμέντο από εκείνη των συμβατικών ΚΘΑ). Τα σκυροδέματα αυτά λόγω μειωμένου μέτρου ελαστικότητας και μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας ενδέχεται να παρουσιάζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κοινά σκυροδέματα για περιπτώσεις κατασκευής οδοστρωμάτων.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdo, J., (2001), *"Reciclado de firmes con cemento : aspectos generales"*, Proc. 1st Int. Symposium on Subgrade Stabilisation and In situ Pavement Recycling using Cement, Salamanca, Spain.
2. Abeles, P.W., (1969), *"Written discussion on a paper by Jenkins, G.M."*, Proc. of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference, Structure, Solid Mechanics and Engineering design, Part 1.
3. Alcock, W.H., Robins, E.G., Taylor, J.E., (1979), *"Cold recycling of failed flexible pavements with cement"*, TRB Record 734.
4. Antim, J, McLaughlin J., (1959), *"Fatigue study of air-entrained concrete"*, ACI Journal, No. 11, Vol. 30.
5. ASTM C78-02, *"Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)"*.
6. ASTM C293-02, (2002), *"Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)"*.
7. ASTM C192/C192M-02, (2002), *"Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory"*.
8. ASTM C496/C496M-04, (2004), *"Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens"*.
9. ASTM C512-02, (2002), *"Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression"*.

10. ASTM C670, (2003), *"Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials"*.
11. ASTM C856-04, (2004), *"Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete"*.
12. ASTM D558-04, (2004), *"Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures"*.
13. ASTM D560-03, (2003), *"Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures"*.
14. ASTM D1635-00, (2000), *"Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading"*.
15. Austroads Pavement Research Group, 1996, APRG Technical Note 5, *"In-situ deep-lift recycling of pavements using cementitious binders"*.
16. Autret, P., de Boissoudy, A., Marchand, J.P., (1982), *"ALIZE III : or how to introduce experimental values obtained from the observation of insitu behaviour of materials and their mechanical properties measured in the laboratory into the theoretical structural design model"*, 5th Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
17. Bache, H.H., Vinding, I., (1990), *"Fracture mechanics in design of concrete pavements"*, 2nd Int. Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements, Spain 1990.
18. Balmer, G.G., (1958), *"Shear strength and elastic properties of soil-cement mixture under triaxial loading"*, Proc. of the American Society for Testing and Materials, Vol. 58.

19. Baroux, R., Morel, G., Valeux, J.C., (1988), *"Retraitement au ciment d'anciennes chaussées"*, Etude de l' atelier de reconditionnement de chaussées, ARC 600, Révue Général des Routes et des Aérodrômes, 651.
20. Bofinger, H.E., (1965), *"The fatigue behaviour of soil-cement"*, Journal of the Australian Road Research Board, Vol. 2, No. 4.
21. Bofinger, H.E., (1969), *"Further studies on the tensile fatigue of soil-cement"*, Journal of the Australian Road Research Board, Vol. 4, No. 1.
22. Bofinger, H.E., (1970), *"The measurement of the tensile properties of soil-cement"*, Ministry of Transport, RRL Report, LR 365, Crowthorne.
23. Bofinger, H.E., Hassan, H.O., Williams, R.I.T., (1978), *"The shrinkage of fine-grained soil-cement"*, TRRL Supplementary Report 398, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
24. Bonnot, J., (1972a), *"Assessing the properties of materials for the structural design of pavements"*, 3rd Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
25. Bonnot, J., (1972b), *"Author's response to discussion"*, 3rd Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 2, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
26. Bonnot, J., (1975), *"Review of the conventional cement-gravel technique"*, Bull. Liaison Labo P. et Ch., No. 77.
27. Bonnot, J., (1977), *"Contribution to discussion"*, 4th Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 2, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

28. Bonnot, J., Paute, J.L., (1976), "*Renouveau des assises des chaussées en grave-cément*", Annales de l' Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, No. 345.
29. Bonnot, J., Autret, P., de Boissoudy, A., (1977), "*Design of asphalt layers for pavements*", 4th Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
30. BS 1881 : Part 121, 1983, "*British Standard. Testing Concrete. Part 121 : Method for the determination of static modulus of elasticity in compression*", British Standards Institution.
31. Byfors, J., (1982), "General report", Int. Conference on concrete at early ages, Vol. II, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Presses de l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
32. Catton, M.D., (1963), "*Chairman's discussion of papers on soil-cement*", Highway Research Record, 36, Washington.
33. Chomis, M., Jasienski A., (1994), "*Le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment - Le chantier experimental de Messancy (Belgique)*", 7th Int. Symposium on Concrete Roads, Wien, Session III.
34. Dept. of Transport, Scottish Development Dept., Welsh Office, Dept. of the Environment for Northern Ireland, (1986), "*Specification for highway works - Part 3 - Series 1000 : Road pavements - Concrete and cement bound materials*", London.
35. DIN 1048, Bl. 1 bis 3, (1972), "*Prüfverfahren für beton*" (German Standards for testing concrete), Deutsche Normen.
36. Eickschen, E., Siebel, E., (1994), "*The reuse of old pitch containing asphalt in cement bound base courses depending on the level of harmful substances*", 7th Int. Symposium on Concrete Roads, Wien, Session III.

37. Eisenmann, J., (1979), *"Betonfahrbahnen"*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Germany.
38. Eldin, N.N., Senouci, A.B., (1993), *"Observations on rubberized concrete behaviour"*, Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol 15, ASTM.
39. Ellis S.J., Megan M.A., Wilde L.A., (1997), *"Constuction of full-scale trials to evaluate the performance of induced cracked CBM roadbases"*, TRL Report 289.
40. Elvery, R.H., Haroun, W.A., (1968), "A direct tensile test for concrete under long or short-term loading", Magazine of Concrete Research, Vol. 20, No. 63.
41. Făcăoaru, I., Tannenbaum, M., Stanculescu, G., (1969), *"Studies on the deformation and cracking of concrete under uni-axial stress fields"*, Paper 55, Int. Conference on Structure, Soil Mechanics and Engineering design, Southampton University.
42. Felt, E.J., Abrams, M.S., (1957), *"Strength and elastic properties of compacted soil-cement mixtures"*, Development Dept. Bulletin No. D16, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, reprinted from ASTM Special Technical Publication No. 206.
43. FGSV 999, ZTVT-StB 95, (1996), *"Zusätzliche technische vertragsbedingungen und richtlinien für tragschichten im straßenbau"*.
44. Fossberg, P.E., Mitchell, J.K., Monismith, C.L., (1972), *"Load-deformation characteristics of a pavement with cement-stabilized base and asphalt concrete surfacing"*, 3rd Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

45. Galloway, J.W., Raithby, K.D., (1979), "*Effects of range of loading on flexural strength and fatigue performance of concrete*", TRRL LR 547, Transport and Road Research Laboratory.
46. George, K.P., (1972), "*Mechanism of shrinkage cracking of soil-cement bases*", Highway Research Record, 442, Washington.
47. Greer, W.C., (1983), "*Variation of laboratory concrete flexural strength tests*", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, Vol. 5, No. 2.
48. Gregg, J.S., (1967), "*The significance of compressive, tensile and flexural strength tests in the design of cement-stabilised pavement foundations*", Proc. of the 4th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Cape Town, South Africa.
49. Guerrin, A., (1965), "*Traité de béton armé*", Paris, Dunod.
50. Halabi, A.K., (1962), "*Recherches expérimentales systématiques sur la resistance á la traction des bétons*" (Systematic experimental research on the tensile strength of concrete), Revue des Matériaux de construction, No. 561.
51. Haslehner, W., Litzka, J., Mitterbauer, H., (1994), "*Reconstruction of low volume roads in Austria using cement stabilization mixed in place*", 7th Int. Symposium on Concrete Roads, Wien, Session III.
52. Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P. E., (1976), "*Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*", Cement and Concrete Research, Vol. 6, 1976 in Shah, S. P., Swartz, S. E., Ouyang C., (1995), "*Fracture Mechanics of concrete : Applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials*", John Wiley & Sons, inc.

53. Hobbs, D.W., (1973), *"The strength and deformation of concrete under short-term loading : A review"*, Technical Report 42, No.484, Cement and Concrete Association.
54. Huang, Y. H., (1993), *"Pavement analysis and design"*, Prentice Hall.
55. Hughes, B.P., Chapman, G.P., (1963), "Direct tensile test for concrete using modern adhesives", RILEM Bulletin No. 26.
56. Instituto Espanol del Cemento y sus aplicaciones - IECA, (1999), *"Manual de firmes reciclados in situ con cemento"*, Jofré C., Kraemer C., Diaz Minguela J., Madrid, Spain.
57. Johnston, C.D., Sidwell, E.H., (1968), *"Testing concrete in tension and compression"*, Magazine of Concrete Research, 20.
58. Jones, A., (1962), *"Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems"*, Highway Research Board, Bulletin 342, Washington.
59. Jong, D.L., Peutz, M.G.F, Korswagen, A.R., (1973), "Computer program bisar", External Report, AMSR.0006.73, Shell Research B.V.
60. Khatib, Z., Bayomy, F., (1999), *"Rubberized Portland cement concrete"*, Journal of Materials in Civil Engineering.
61. Kaplan, M.F., (1963), *"Strains and stresses of concrete at initiation of cracking and near failure"*, Journal of American Concrete Institute, 60, No. 7.
62. Kasselouri - Rigopoulou, V., Kolias, S., Louvardi, M., Karahalios A., (2003), *"Study of the Hydration Products of Mixtures of Cement and Asphalt Emulsion Used in Recycling Works of Flexible Pavements "*, Proc. of the Int. Conference on "Role of Cement Science in Sustainable Development", Dundee, Scotland.

63. Kawamura, M., (1970), *"Fundamental studies on the fabric of soil-cement mixture and its mechanical properties"*, Ph. D. Thesis, Kanazawa University and Kyoto University, Japan.
64. Kennedy, J., Clark, A., (1986), *"Reconstruction trial for East Sussex County Council on mix-in-place recycling with cement and glass fibre - reinforced surface dressing"*, Cement and Concrete Association, Technical report No. 556.
65. Kloubert, H.J., (1995), *"Mix-in place Recycling"*, Strassen und Tiefbau ,49.
66. Kolias, S., (1975), *"Evaluation of the strength and elastic properties of cement stabilized materials"*, Ph. D. Thesis, University of Surrey, U.K.
67. Kolias, S., (1996a), *"Mechanical properties of cement - treated mixtures of milled bituminous concrete and crushed aggregates"*, Materials and Structures, Vol. 29.
68. Kolias, S., (1996b), *"The influence of the type of loading and temperature on the modulus of elasticity of cement-bound mixes of milled bituminous concrete and crushed aggregates"*, Materials and Structures, Vol. 29.
69. Kolias, S., (2000), *"The performance of pavements incorporating layers of hydraulically bound granular materials of low strength"*, Workshop on Induced cracking of cement-bound bases, Vienna, Austria.
70. Kolias, S., Williams, R.I.T., (1978a), *"Cement-bound road materials : Strength and elastic properties measured in the laboratory"*, TRRL Supplementary Report 344, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

71. Kolias, S., Williams, R.I.T., (1978b), "*Uni-axial Tension Tests on Cement-Stabilised Granular Materials*", ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 4.
72. Kolias, S., Williams, R.I.T., (1984), "*Estimation of the modulus of elasticity of cement stabilized materials*", Geotechnical Testing Journal, ASTM, 7.
73. Kolias, S., Katsakou, M., Kaloidas, V., (2001), "*Mechanical properties of flexible pavement materials recycled with cement*", Proc. of the 1st Int. Symposium on Subgrade stabilisation and in situ pavement recycling using cement, Vol. 2, Session 4, Spain, Salamanca.
74. Kolias, S. and Katsakou, M., (2004), "*Mechanical properties of cement bound recycled materials*", 9th Int. Symposium on concrete roads, Workshop 2, In-situ recycling with cement, Istanbul, Turkey.
75. Komlos, K., (1970), "*Comments on the long - term tensile strength of plain concrete*", Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 73.
76. Kopperman, S., Tiller, G., Tseng, M., (1986), "ELSYM5, Interactive Microcomputer Version, User's Manual", Report No. FHWA-RD-89-143, Federal Highway Administration, in Huang, Y., (1993), "Pavement analysis and design", Prectice Hall.
77. Kraemer C., del Val, M.A., (1990), "*Firmes*", Catedra de Caminos Y Aeropuertos, Escuela tecnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain.
78. Larsen, T.J., Nussbaum, P.J., (1967), "*Fatigue of soil-cement*", Journal of the PCA, Research and Development Dept, Bulletin No. D119, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

79. Lefort, M., (1997), *"Le point sur le retraitement en place à froid des anciennes chaussées"*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 212.
80. Lilley A.A., Williams, R.I.T., (1973), *"Cement-stabilized materials in Great Britain"*, Highway Research Record, 442, Washington.
81. Lister, N.W., (1972), *"Design and performance of cement-bound bases"*, Journal, Institution of Highway Engineers, 19.
82. Lusche, M., (1972), *"Beitrag zum bruchmechanismus von auf druck beanspruchtem normal - und leichtbeton mit geschlossenem gefüge"*, Schriftenreihe der zementindustrie, Heft 39, Beton - Verlag GmbH, Düsseldorf.
83. Marais, C.P., Otte, E., Bloy, L.A.K., (1973), *"The effect of grading on lean-mix concrete"*, Highway Research Record 441, Washington.
84. Mathias, V., Sedran,T., de Larrard, F., (2004), *"Recycling Reclaimed Asphalt Pavement in Concrete Roads"*, RILEM Int. Workshop "Use of recycled materials in buildings and structures", Barcelona.
85. Metcalf, J.B., (1966), *"Flexure tests on small soil-cement beams"*, Australian Road Research Board, Procs. Vol. 3, Part 2.
86. Mehta, P.K., (1986), *"Concrete structure : Properties, and Materials"*, Prentice -Hall, Inc.
87. Mennier, Y., (1989), *"In situ road retread in France and overseas using ARC 700 process"*, Revue Général des routes at des Aérodomes, No 669.

88. Milton, L.J., Earland, M.G., (1999), *"Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling"*, TRL Report 386.
89. Mitchell, J.K., Monismith, C.L., (1977), *"A thickness design procedure for pavements with cement stabilized bases and thin asphalt surfacings"*, 4th Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Proc. Vol. 1, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
90. Mitchell, J.K., Shen, C.K., (1967), *"Soil-cement properties determined by repeated loading in relation to bases for flexible pavements"*, Proc. of the 2nd Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.
91. MOPU - Pliego de Prescripciones Tecnicas Generales para Obras de Conservacion de Carreteras, (2001), *"21. Reciclado in situ con cemento de capas de firme"*, Spain.
92. Monismith, C.L., Deacon, J.A., (1969), Journal of Transportation Engineering Division, ASCE, 95.
93. Moriarty, J.P., (1969), *"Volume changes in cement - stabilised samples under static and repeated loading"*, Constructional Review, Technical Supplement 1.
94. NAASRA, (1987), *"Pavement Design, A guide to the structural design of road pavements"*, National Association of Australian State Road Authorities.
95. Neville, A.M., (1995), *"Properties of concrete"*, Longman Group Ltd, 4th Edition, U.K.
96. NT Build 201, (1984), *"Concrete - Making and curing of moulded test specimens for strength tests"*, NORDTEST

97. Norling, L.T., (1963), *"Standard Laboratory tests for soil-cement : Development, purpose and history of use"*, Highway Research Record ,36, Washington.
98. NF P 98-116, (2000), *"Assises de chaussées, Graves traités aux liants hydrauliques"*, Norme Française.
99. NF P 98-711, (1993), *"Matériels pour la construction et l' entretien des routes - Traitement en place ou retraitement : Matériels de préparation des sols et de stockage des liants pulvérulents - Terminologie"*, Norme Française.
100. NF P 98-712, (1993), *"Matériels pour la construction et l' entretien des routes Traitement en place ou retraitement : Epandeurs de liants pulvérulents et malaxeurs de sol en place - Terminologie"*, Norme Française.
101. NF P 98-713, (1993), *"Matériels pour la construction et l'entretien des routes - Traitement en place ou retraitement fraiseuses - Terminologie"*, Norme Française.
102. NF P 18-408, (1981), *"Détermination des caractéristiques macaniques des bétons. Essai de traction par fëndage"* (Determination of mechanical characteristics of concrete. Tensile splitting test), Norme Française Homologuée.
103. Obi, B.C.A., (1971), *"Cement stabilised bases save money"*, Highways Design and Consruction.
104. Obi, B.C.A., (1972), *"Soil-cement bases under thin bituminous surfacing"*, Transportation Engineering Journal, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. TE2.

105. Otte, E., (1973a), *"A tentative approach to the design of pavements having cement-treated layers"*, NIRR-PCI Symposium on cement-treated crusher-run bases, Johannesburg.
106. Otte, E., (1973b), *"The performance of two pavements containing cement-treated crusher-run bases"*, NIRR-PCI Symposium on cement-treated crusher-run bases, Johannesburg.
107. Patankar, V.D., Williams, R.I.T., (1970), *"Bitumen in dry lean concrete"*, Highways and Traffic Engineering, Vol. 38, 1721.
108. PCA, Portland Cement Association, (1942), *"Soil tests for design of runways pavements"* in CUR (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving), Aanbeveling 36, *"Ontwerpen van elastisch ondersteunde betonvloeren en-verhardingen"*, 2000.
109. PCA, Portland Cement Association, (1970), *"Soil-Cement Construction Handbook"*, EB003S.
110. PCA, Portland Cement Association, (1971), *"Soil-Cement Laboratory Handbook"*, Skokie, Illinois, USA.
111. PCA, Portland Cement Association, (1976), *"Recycling Failed Flexible Pavements with Cement"*, IS197.01S, Portland Cement Association.
112. Peattie, K.R., (1962), *"Stress and Strain Factors for Three-Layers Elastic Systems"*, Highway Research Board, Bulletin 342, Washington.
113. Petersson, P.E., (1981), *"Direct tensile tests on prismatic concrete specimens"*, Cement and Concrete Research, Vol. 11.
114. Peutz, M.G.F., Van Kempen, H.P.M., Jones, A., (1968), *"Layered systems under normal surface roads"*, Highway Research Board, Record No. 228, 34.

115. PIARC, (1983), Technical Committee *"report on flexible roads"*, Permanent Int. Association of Road Congresses, 17th World Road Congress, Sydney, Australia.
116. PIARC, (1998), Technical Committee S-C4, *"Cement recycling"* : Answers to the questionnaire on in situ recycling of existing pavements with cement, Brussels.
117. PIARC, Technical committee 7/8 "Road Pavements", (2002), *"Cold in-place recycling of pavements with cement"*, Seminar on road pavement recycling, Draft Guidelines, Warsaw, Poland.
118. Pincus, G., Gesund, H., (1965), *"Evaluating the tensile strength of concrete"*, Materials Research and Standards.
119. Popovics, S., (1967), *"Relations between various strengths of concrete"*, Highway Research Board, Record 210.
120. Popovics, S., (1998), *"Strength and related properties of concrete"*, J. Wiley & Sons.
121. prEN 12356, (1997), *"Testing concrete. Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds for strength tests"*.
122. Pretorius, P.C., Monismith, C.L., (1971), *"Prediction of shrinkage stresses in pavements containing soil-cement bases"*, Highway Research Record, 362.
123. Pretorius, P.C., (1970), *"Design considerations for pavements containing soil-cement bases"*, Ph.D thesis, University of California.

124. Pretorius, P.C., Monismith, C.L., (1972), *"Fatigue crack formation and propagation in pavements containing soil-cement bases"*, Highway Research Record, 362.
125. RILEM, (1989), 1st Int. Conference on *"Reflective Cracking Assesment and Control"*, Technical Committee TC 97 - GCR, Liege
126. RILEM, (1993), Rigo, J.M., Degeimbre, R., Franken, L., Editors, 2nd Int. Conference on *"Reflective Cracking Assesment and Control"*, Proceedings, E & FN SPON.
127. Raithby, K.D., (1980), *"Behaviour of concrete under fatigue loading"*, a reprint from Developments in Concrete Technology - 1, Chapter 3, Lydon, F.D., Applied Science Publishers ltd.
128. Reinhold, P., (1955), *"Elastic behaviour of soil-cement mixtures"*, Bulletin 108, Highway Research Board, Washington.
129. Roesler, J. R., Barenberg, E. J., (1999), *"Effect of static and fatigue cracking on concrete strain measurements"*, TRR 1684.
130. Roßberg, K., Nkwonkman, E., (1998), *"Erste ergebnisse von ermüdungsversuchen an Kaltrecyclinggemischen mit zement und bitumen als bindemittel"*, Kolloquium "Prüfung und Bewertung von Konstruktionsschichten im Straßenbau", Dresden.
131. Rüsç, H., Hilsdorf, H., (1963), *"Verformungseigenschaften von beton unter zentrischen zugspannungen"* (Deformation properties of concrete under axial tensile stress), Bericht No. 44 des MPA Bauwesen der TH München.
132. Sainton, A., (1990), *"The road retreatment plant ARC 700"*, 6th Int. Symposium on Concrete Roads", Vol. A II, Madrid.

133. Sainton, A., (1997), "*Cold in-place recycling of old flexible roads with the Flexocim process*", Revue Général des routes at des Aérodrodromes, No. 757.
134. SETRA - LCPC, (1984), "*Mémento des Specifications Françaises - Chaussées*", Ministère des Transports, Direction des Routes, Service d' Etudes Techniques des Routes se Autoroutes, SETRA, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris, France.
135. SETRA - LCPC, (1997), "*French design manual for pavement structures. Guide technique*", Ministère de l' Equipement, des Transports et du Logement, Paris, France.
136. Shen, C.K., Mitchell, J.K., (1966), "*Behaviour of soil-cement in repeated compression and flexure*", Highway Research Board.
137. Sion, P., Chomis, M., Verbrugge, J.C., (1998), "*The Belgian experience with stabilization by recycling in situ with cement*", 8th Int. Symposium on Concrete Roads, Lisbon.
138. Smith (1972), "*Characterization of asphalt concrete and cement-treated granular base course*", Materials Research and Development Incorporated, Okland, California.
139. Sommer, H., (1998), "*Recycling with cement on the motorway Salzburg-Vienna*", 8th Int. Symposium on Concrete Roads, Lisbon.
140. Taylor, G.D., Williams, R.I.T., (1981), "*Restrained thermal contraction in lean concrete roadbases*", Highways and Public Works, Vol. 49, No. 1856.
141. Todd, J.D., (1955), "The determination of tensile stress-strain curves for concrete", Institution of Civil Engineers, Proc. Vol. 4, Part I.
142. Topçu, I.B., (1995), "*The properties of rubberized concretes*", Cement and Concrete Association, Vol. 25, No. 2.

143. Wang, M.C., Huston, M.T., (1972), *"Direct tensile stress and strain of a cement stabilized soil"*, Highway Research Record, No. 379, Highway Research Board.
144. Wang, J.W.H., (1973), *"Use of additives and expansive cements for shrinkage crack control in soil-cement : A review"*, Highway Research Record, 442, Washington.
145. Welch, G.B., (1966), *"Tensile strains in unreinforced concrete beams"*, Magazine of Concrete Research, Vol. 18, No. 54.
146. White, G., Gnanendran, C., (2003a) *"The characterization of cementitious insitu stabilized pavement materials : The past, the present and the future"*, 21st ARRB Conference.
147. White, G., Gnanendran. C. T., (2003b), *"Variability in unconfined compression strength of pavement materials stabilized with cementitious binders"*, 21st ARRB Conference.
148. Williams, R.I.T., (1962), *"The effect of cement content on the strength and elastic properties of dry lean concrete"*, Cement and Concrete Association, Technical Report TRA/323.
149. Williams, R.I.T., (1972), *"Properties of cement stabilized materials"*, Journal, Institution of Highway Engineers, 19.
150. Williams R.I.T., (1986), *"Cement-treated pavements. Materials, design and construction"*, Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K.
151. ΕΛΟΤ - EN 206.01, (2001), *"Concrete - Part 1 : Specification, performance, production and conformity"*, Εθνικός τίτλος : *"Σκυρόδεμα - Μέρος 1: Προδιαγραφή, επίδοση, παραγωγή και συμμόρφωση"*.

152. ΕΛΟΤ - EN 13286.04, (2003), *"Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 4 : Test methods for laboratory reference density and water content - Vibrating hammer"* Εθνικός τίτλος : *"Μίγματα μη σταθεροποιημένα και σταθεροποιημένα με υδραυλικές κονίες - Μέρος 4 : Εργαστηριακές μέθοδοι δοκιμής αναφορικά με τη φαινόμενη πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε νερό - Δονητική σφύρα"*.
153. ΕΛΟΤ - EN 13286.41, (2003), *"Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures"*, Εθνικός τίτλος : *"Μίγματα μη σταθεροποιημένα και σταθεροποιημένα με υδραυλικές κονίες - Μέρος 41: Μέθοδος δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες μιγμάτων"*
154. ΕΛΟΤ - EN 13286-42, (2003), *"Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 42: Test method for the determination of the indirect tensile strength of hydraulically bound mixtures"*, Εθνικός τίτλος : *"Μίγματα μη σταθεροποιημένα και σταθεροποιημένα με υδραυλικές κονίες - Μέρος 42: Μέθοδος δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες μιγμάτων"*
155. ΕΛΟΤ - EN 13286-51, (2004), *"Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 51: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using vibrating hammer compaction"* , Εθνικός τίτλος : *"Ασύνδετα αμμοχάλικα και μίγματα κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες - Μέρος 51 : Μέθοδος παρασκευής δοκιμίων μιγμάτων κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες με τη χρήση δονητικής σφύρας"*.
156. ΕΛΟΤ - EN 12390.03, (2001), *"Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens"*, Εθνικός τίτλος : *"Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 3: Αντοχή σε θλίψη δοκιμίων"*.

157. ΕΛΟΤ - EN 12390.05, (2001), *"Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens"*, Εθνικός τίτλος : *"Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 5: Αντοχή σε κάμψη δοκιμίων"*
158. ΕΛΟΤ - EN 12390.06, (2000), *"Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens"*, Εθνικός τίτλος : *"Δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος - Μέρος 6: Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δοκιμίων"*
159. Κόλιας, Σ., Επιστημονικός Υπεύθυνος, (1994), *"Υπολογισμός πάχους νέων οδοστρωμάτων και αξιολόγηση υφιστάμενων με τη βοήθεια της συσκευής FWD του ΚΕΔΕ"*, Ερευνητικό Πρόγραμμα, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, ΕΜΠ.
160. Κόλιας, Σ., (1999), *"Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος"*, ΕΜΠ, ΔΠΜΣ "Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών"
161. Κόλιας, Σ., Βασιλείου, Κ., Γιώτης, Α., (1983), *"Δυνατότητα ανακυκλώσεως και ενισχύσεως ασφαλτικών οδοστρωμάτων με κατεργασία με τσιμέντο"*, Δελτίο ΚΕΔΕ, Νο. 3 - 4.
162. Κόλιας, Σ., Κατσάκου, Μ., *"Μηχανικά χαρακτηριστικά κατεργασμένων με τσιμέντο μιγμάτων φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος και αμμοχάλικου"*, 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη.
163. Κόλιας, Σ., Λοΐζος, Α., (1999), *"Σημειώσεις οδοστρωμάτων"*, ΕΜΠ, Τομέας Μεταφορών κ. Συγκ. Υποδομής.
164. Κόλιας, Σ., Αυλωνίτη, Κ., Κατσάκου, Μ., (2002), *"Μηχανικά χαρακτηριστικά κατεργασμένων με τσιμέντο μιγμάτων αμμοχάλικου και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος"*, 3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη.

165. Κόλιας, Σ., Κατσάκου, Μ., Αναγνωστόπουλος, Β., (2005α), " *Επίδραση του είδους των αδρανών και της παιπάλης στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος και θραυστών αμμοχαλίκων*", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
166. Κόλιας, Σ., Μαχαίρας, Ε., Κατσάκου, Μ., (2005β), " *Επίδραση της θερμοκρασίας κατά τη δοκιμή, στα μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων με τσιμέντο μιγμάτων θραυστού αμμοχαλίκου και φρεζαρισμένου ασφαλομίγματος*", 2^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος.
167. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., ΠΤΠ Ο155, 1966, " *Κατασκευή βάσεων οδοστρωμάτων δι' αδρανών υλικών σταθεροποιημένου τύπου*".
168. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. - Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ, (2004), " *Οδοστρώσια από τσιμεντόδετο ανακυκλωμένο μίγμα φρεζαρισμένων ασφαλικών και υποκείμενων στρώσεων*", ΠΕΤΕΠ 05-03-05-17-01.
169. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., ΓΓΔΕ, ΚΕΔΕ, (1997), " *Κανονισμός τεχνολογίας σκυροδέματος, αιτιολογική έκθεση ΚΤΣ*", Εγκύκλιος Ε7.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

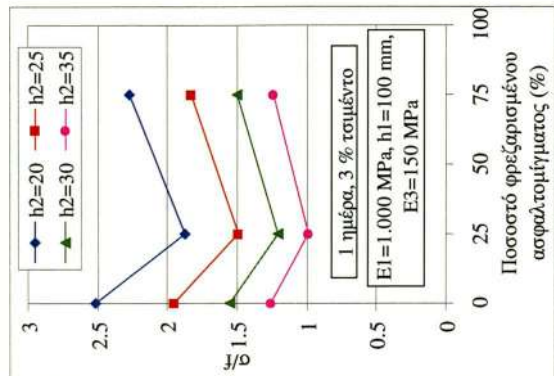
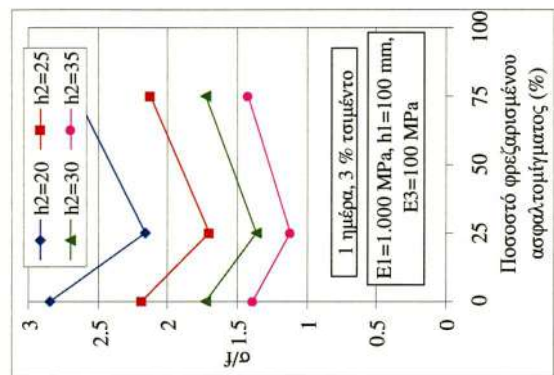
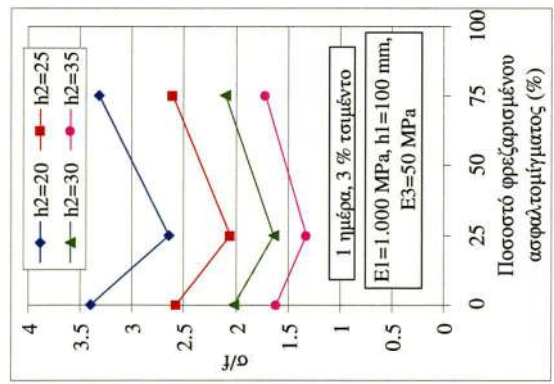
**Λόγοι αναπτυσσόμενων τάσεων προς αντοχές ανακυκλωμένων υλικών
σε διάφορα οδοστρώματα**

Λόγοι αναπτυσσόμενων τάσεων στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης προς τις αντοχές σε κάμψη ανακυκλωμένων μιγμάτων, για τα οδοστρώματα του Σχήματος Π.1.

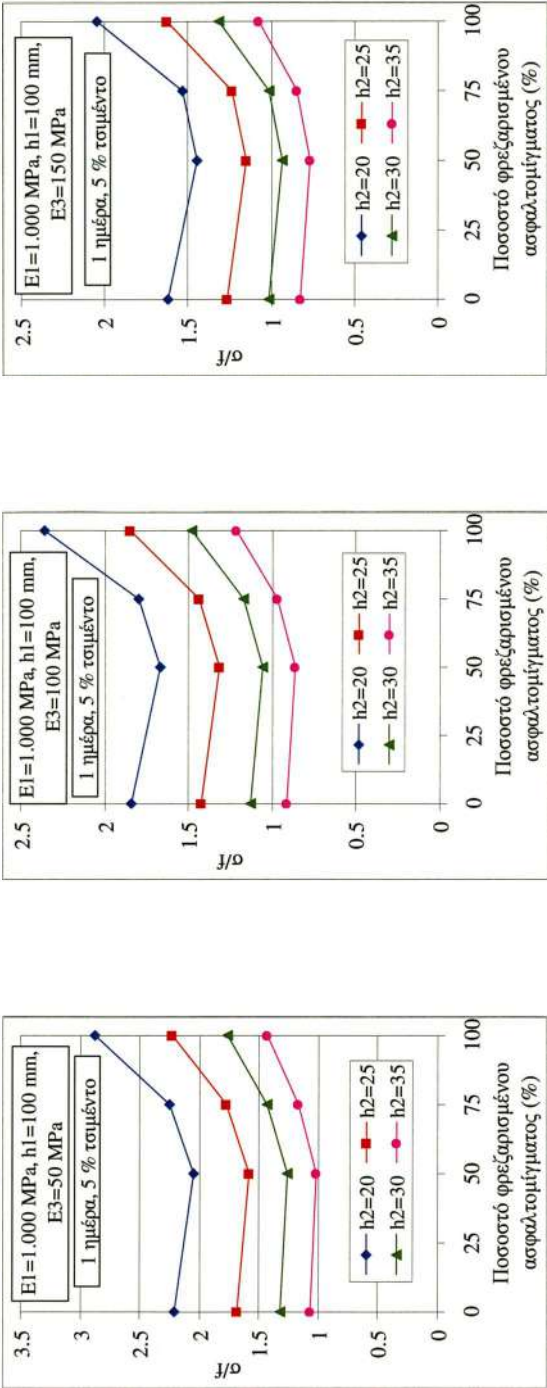
E1 = 1.000 MPa	h1 = 100, 150 mm
E2 εργαστηριακά αποτελέσματα	h2 = 200, 250 300, 350 mm
E3 : 50, 100, 150 MPa	

Σχήμα Π.1 : Οδοστρώματα που εξετάστηκαν

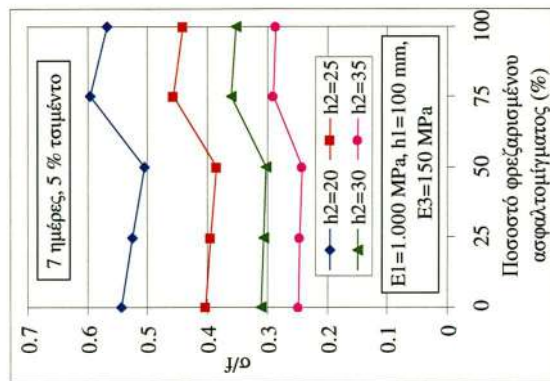
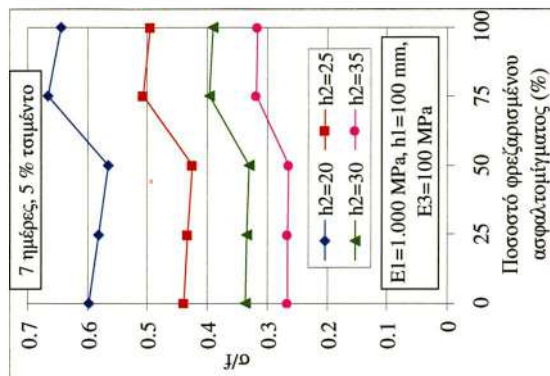
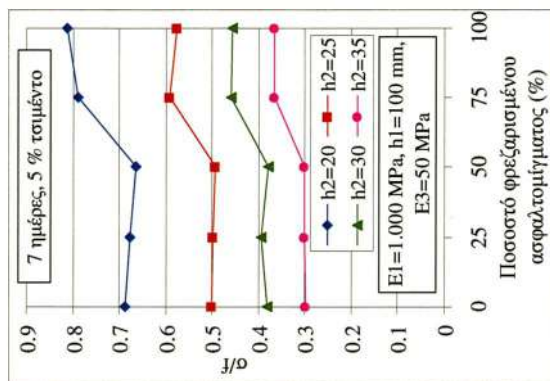
Το Παράρτημα αυτό παρέχει ορισμένα συμπληρωματικά στοιχεία της Παραγράφου 8.3.1.



Σχήμα Π. 2 : Λόγος δ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 50, 100, 150 \text{ MPa}$) Ηλικία 1 ημέρα, ποσοστό τσιμέντου 3 %

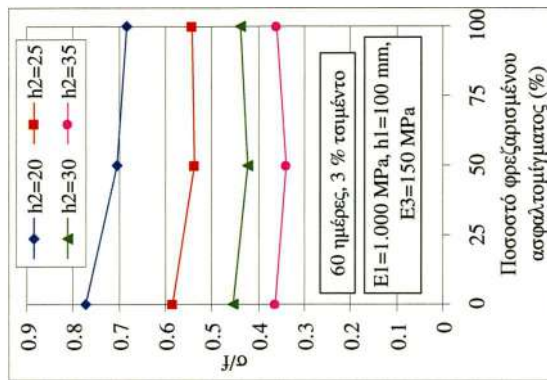
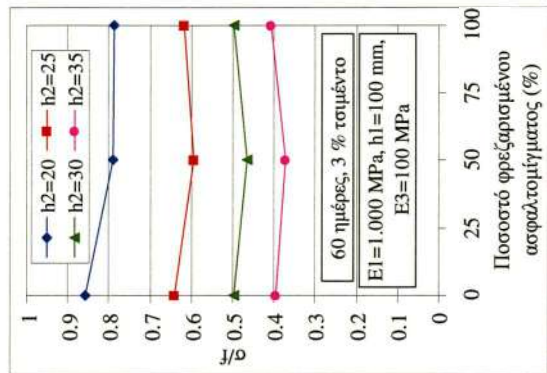
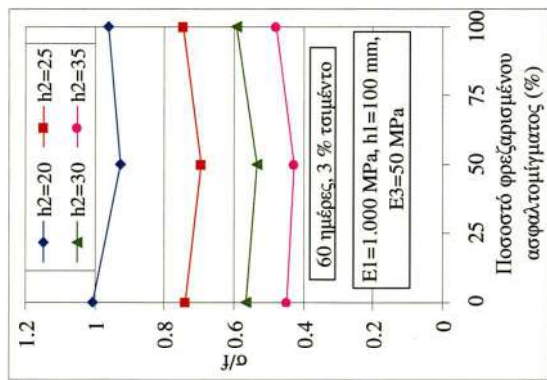


Σχήμα Π.3 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}$, $h_1 = 100 \text{ mm}$, $E_3 = 50, 100, 150 \text{ MPa}$)
Ηλικία 1 ημέρα, ποσοστό τσιμέντου 5 %



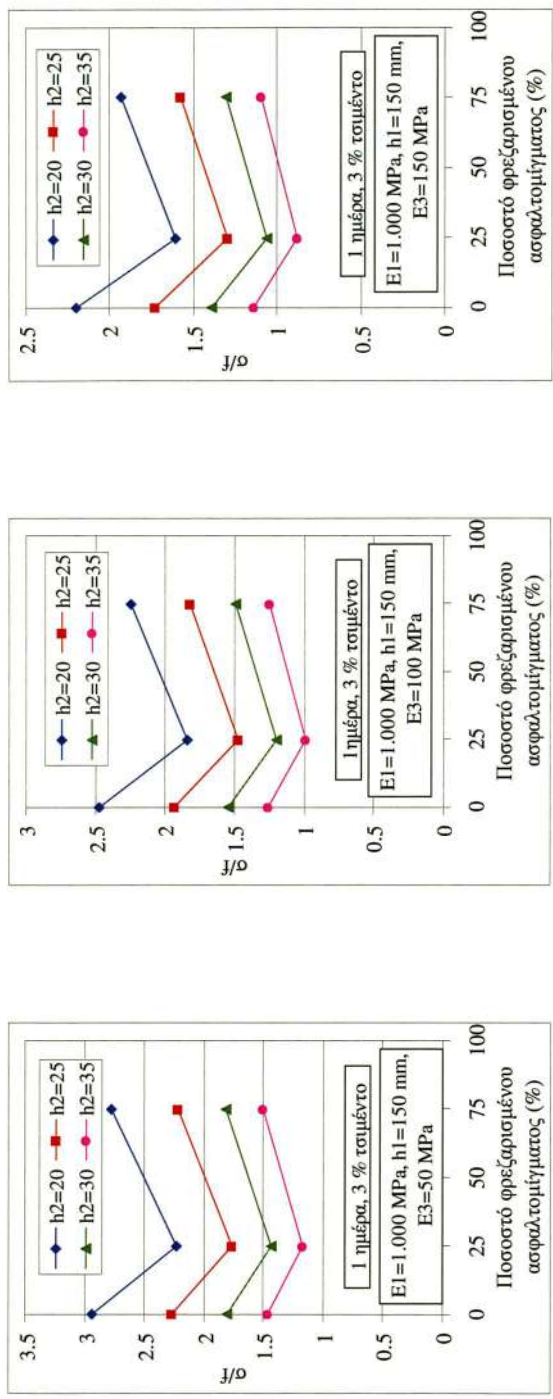
Σχήμα Π.4 : Λόγος σ/σ_0 στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 100$ mm, $E_3 = 50, 100, 150$ MPa)

Ηλικία 7 ημέρες, ποσοστό τσιμέντου 5 %



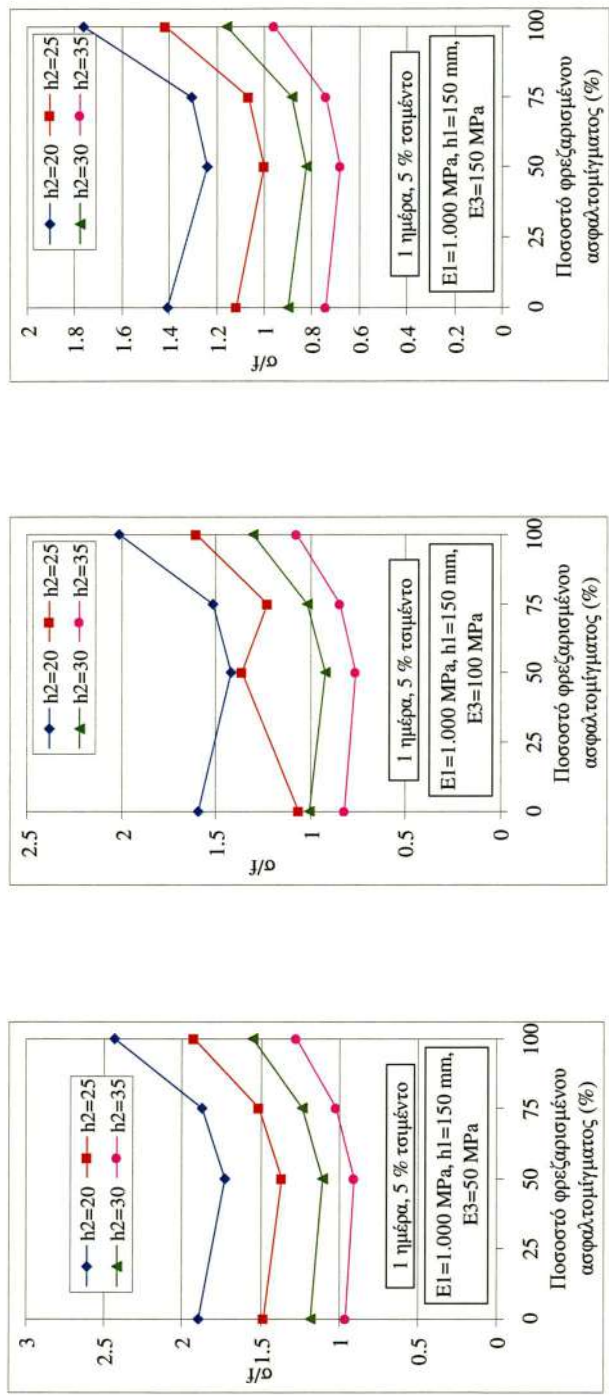
Σχήμα Π.5 : Λόγος σ/f στον ποθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000 \text{ MPa}, h_1 = 100 \text{ mm}, E_3 = 50, 100, 150 \text{ MPa}$)

Ηλικία 60 ημέρες, ποσοστό τσιμέντου 3 %



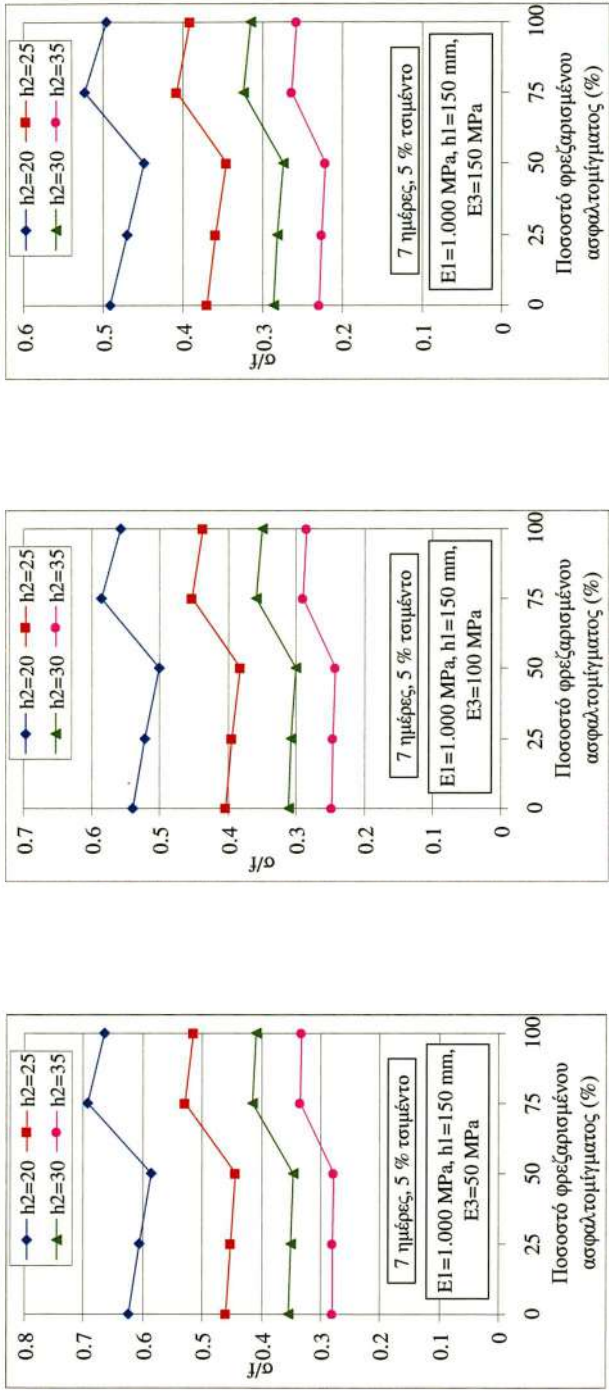
Σχήμα Π.6 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50, 100, 150$ MPa)

Ηλικία 1 ημέρα, ποσοστό τιμμέντου 3 %



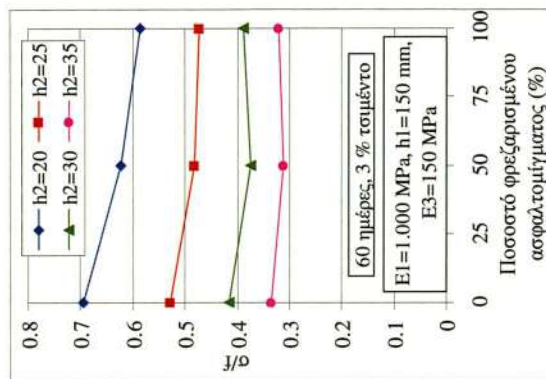
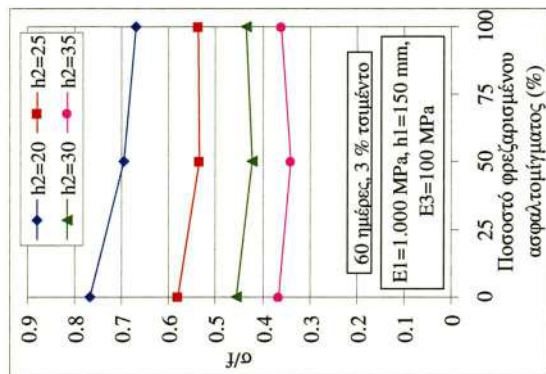
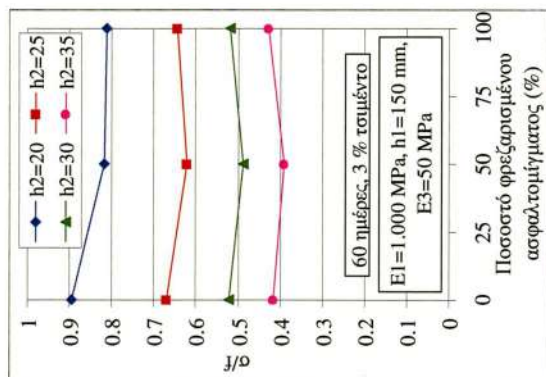
Σχήμα Π.7 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50, 100, 150$ MPa)

Ηλικία 1 ημέρα, ποσοστό τσιμέντου 5 %



Σχήμα Π.8 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50, 100, 150$ MPa)

Ηλικία 7 ημέρες, ποσοστό τσιμέντου 5 %



Σχήμα Π.9 : Λόγος σ/f στον πυθμένα ανακυκλωμένης στρώσης ($E_1 = 1.000$ MPa, $h_1 = 150$ mm, $E_3 = 50, 100, 150$ MPa)
Ηλικία 60 ημέρες, ποσοστό τσιμέντου 5 %

