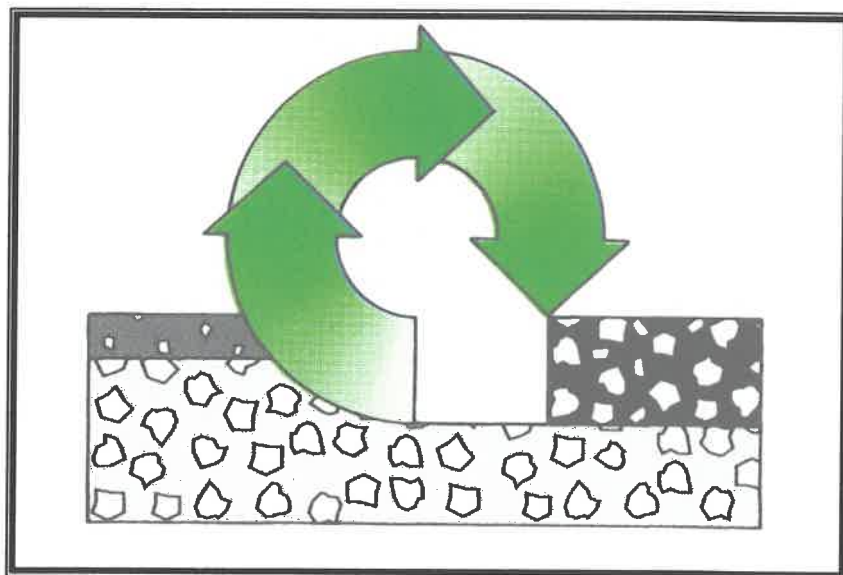




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΤΟΥ
ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ
ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΥΛΙΚΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

ΜΑΛΑΣ ΆΓΓΕΛΟΣ

ΚΟΥΚΟΣ ΆΓΓΕΛΟΣ

Επιβλέπων: Σ. ΚΟΛΙΑΣ – αναπληρωτής καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2003

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες στον κ. Κόλια Στυλιανό, επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, για τις γνώσεις και εμπειρίες που αποκομίσαμε στην περίοδο της συνεργασίας μας και κυρίως για την προσπάθειά του να μας καθοδηγήσει στους στόχους της διπλωματικής.

Επίσης, ευχαριστούμε θερμά τους Καραχάλιο Αναστάσιο, Ζόμπολα Κωνίνο, Κυρκιλή Πέπη και Κατσάκου Μάρθα για τη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση των δοκιμών.

Στην Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος εκφράζουμε την ευγνωμοσύνη μας για την παραχώρηση του εργαστηρίου της, ώστε να διεξαχθεί μέρος των μετρήσεων.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων στρώσεων οδοστρωμάτων με φρεζαρισμένο υλικό συναρτήσει της θερμοκρασίας. Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές αναλογίες θραυστού υλικού - φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (100 / 0, 75 / 25, 50 / 50, 25 / 75 και 0 / 100) σε δυο θερμοκρασίες, μέση 23 °C και υψηλή 40 °C. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πρισματικών δοκιμών ηλικίας μίας εβδομάδας σε κάμψη, μονοαξονική θλίψη και θλίψη ισοδύναμου κύβου. Από αυτές τις δοκιμές βρέθηκαν οι αντοχές κάμψης και θλίψης (πρίσματος και κύβου), καθώς και τα μέτρα ελαστικότητας κάμψης και θλίψης των μιγμάτων.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών επεξεργάστηκαν με βάση τις παραμέτρους της εργασίας – αναλογία του φρεζαρισμένου υλικού και θερμοκρασίας και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Τέλος, τα αποτελέσματα σχολιάστηκαν ως προς την εκτιμώμενη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων στρώσεων σε οδοστρώματα με επιπόνηση από κυκλοφορία αυτοκινήτων.

ABSTRACT

Cement recycled mixtures of milled bituminous materials and crushed aggregates in various proportions were tested in the laboratory. Specifically, five different proportions of crushed aggregates combined with milled bituminous concrete were tested (100 / 0, 75 / 25, 50 / 50, 25 / 75 and 0 / 100) in two temperatures, normal 23 °C and high 40 °C. Flexural, uni-axial prism & equivalent cube tests were performed in 7 days old specimens, in order to determine the effect of compressive & flexural strength, as well as the relevant modulus of elasticity.

The results of these tests are discussed in comparison to milled bituminous concrete ratio and the level of temperature. The effect of these mechanical properties on the traffic induced stresses was also investigated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελίδα
ΜΕΡΟΣ 1ο	
1.1 ΕΙΔΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	1
1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	7
1.3 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	13
1.4 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	18
1.5 ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΠΑΡΑΓΩΓΑ	23
1.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	28
1.7 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΦΘΟΡΕΣ	30
1.8 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	36
ΜΕΡΟΣ 2ο	
2.1 ΕΞΕΤΑΣΘΕΝΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	53
2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	65
2.3 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	70
ΜΕΡΟΣ 3ο	
3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	73
3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	78
3.3 ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	118
3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	134
3.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	137
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	138

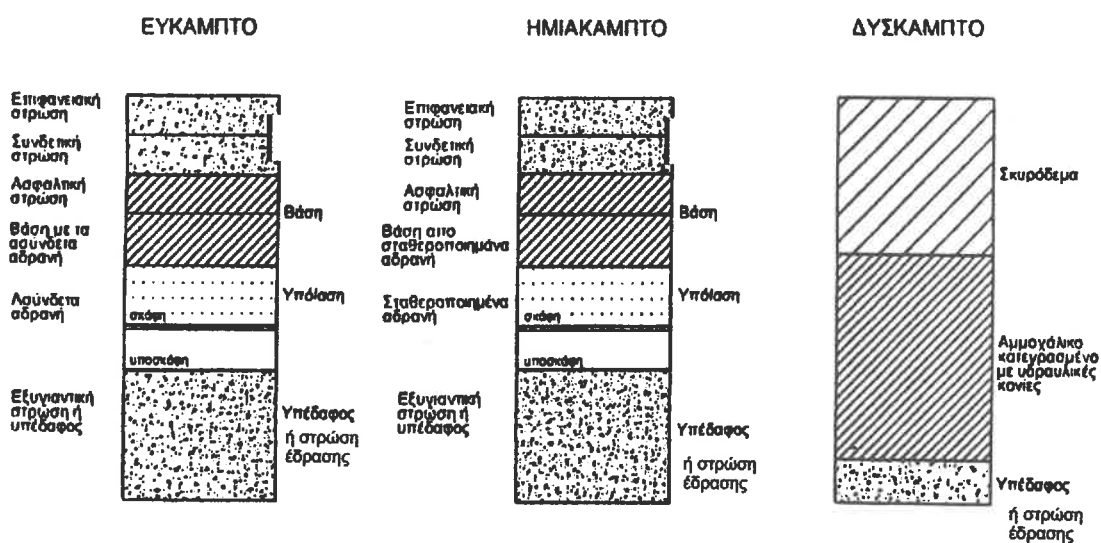
ΜΕΡΟΣ 1ο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.1: ΕΙΔΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Το φυσικό έδαφος δεν είναι ικανό να αντέξει τις καταπονήσεις που προέρχονται από την κυκλοφορία των οχημάτων, δεν έχει μεγάλη αντοχή στις κλιματολογικές επιδράσεις και δεν διαθέτει κατάλληλη επιφάνεια για σωστή πρόσφυση των τροχών των οχημάτων. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στην δημιουργία μιας κατασκευής, του οδοστρώματος, το οποίο αποτελείται από ορισμένες στρώσεις, με υλικό αυξημένης φέρουσας ικανότητας, με αντικειμενικό σκοπό να παραλάβουν τα φορτία της κυκλοφορίας και να τα μεταβιβάσουν μειωμένα όσο το δυνατό περισσότερο στο έδαφος. Έτσι αποφεύγονται οι παραμορφώσεις και μετακινήσεις στην εδαφική στρώση. Επιπλέον, προστατεύεται το έδαφος από τις κλιματολογικές επιδράσεις (παγετός - είσοδος του νερού στο εσωτερικό του οδοστρώματος που προκαλεί διάβρωση) και εξασφαλίζεται και μια επιφανειακή αντιολισθηρή στρώση.

Ανάλογα με τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής τους τα οδοστρώματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- ❑ Εύκαμπτα
- ❑ Ημιάκαμπτα
- ❑ Δύσκαμπτα



Σχήμα 1.1.1: Τυπικές τομές οδοστρωμάτων^[1]

ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Αποτελούνται από τρεις ομάδες στρώσεων την επιφανειακή, τη βάση και την υπόβαση. Ορισμένες φορές λόγω ύπαρξης πολύ ασθενούς υπεδάφους, κατασκευάζεται και μια εξυγιαντική στρώση μεταξύ υποβάσεως και υπεδάφους.



Σχήμα 1.1.2: Τομή ευκάμπτου οδοστρώματος

➤ Υπέδαφος ή στρώση έδρασης

Ονομάζεται η στρώση από το κατάλληλα διαμορφωμένο και συμπυκνωμένο έδαφος πάνω από το οποίο πρόκειται να τοποθετηθεί το οδόστρωμα. Η φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους είναι καθοριστικής σημασίας, δεδομένου ότι από αυτή εξαρτώνται τα πάχη των υπερκείμενων στρώσεων και είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως, του μεγέθους των κόκκων της συνεκτικότητας, της φυσικής υγρασίας και του βαθμού συμπύκνωσης του εδάφους ή του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιείται.^[17] Η φέρουσα ικανότητα μελετάται κυρίως με τον δείκτη CBR (Καλιφορνιακός δείκτης), ή τη δοκιμή φόρτισης με κυκλική πλάκα. Το συνηθέστερο βάθος θεωρείται ότι είναι 600 mm.

➤ Εξυγιαντική στρώση

Τοποθετείται ανάμεσα στο υπέδαφος και την υπόβαση όταν η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι μικρή ($CBR < 5 \%$). Αποτελείται από κοκκώδη υλικά, τα οποία αν χρειάζεται μπορεί να είναι και σταθεροποιημένα. Η σταθεροποίηση γίνεται συνήθως με τσιμέντο ή άσβεστο. Στοχεύει στο να αυξήσει την φέρουσα ικανότητα της στρώσεως ώστε να παραλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία. Το πάχος της στρώσης είναι μεταξύ 300-1000 mm.

➤ Υπόβαση

Η υπόβαση είναι μια στρώση μεταξύ εξυγιαντικής στρώσης και βάσης. Κατασκευάζεται συνήθως από συμπυκνωμένο αμμοχάλικο.

Σκοπός της είναι να :

- ❑ Μεταβιβάζει τα φορτία στο υπέδαφος
- ❑ Εξασφαλίζει την άνετη κυκλοφορία των οχημάτων του εργοταξίου και να προστατεύει τη στρώση εδράσεως από αυτά
- ❑ Προστατεύει τα υλικά της βάσης από ανάδυση αργίλου, ιλύς και διάφορων οργανικών υλικών.
- ❑ Λειτουργεί ως αποστραγγιστική στρώση των υδάτων ώστε να μην προκαλέσουν προβλήματα στο έδαφος
- ❑ Λειτουργεί ως αντιπαγετική στρώση του υπεδάφους

Το πάχος της υπόβασης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να έχουμε μειωμένες θλιπτικές και διατμητικές τάσεις στο υπέδαφος, προκαλούμενες από τα εργοταξιακά μηχανήματα ώστε να μην έχουμε αισθητές παραμορφώσεις.

➤ Βάση

Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες δομικές στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και κατασκευάζεται μεταξύ υπεδάφους και επιφανειακών ασφαλικών στρώσεων. Χαρακτηρίζεται από ένα αριθμό στρώσεων, των οποίων τα υλικά είναι αδρανή χωρίς συνδετικό. Τα αδρανή της βάσης είναι πάντοτε καλύτερης ποιότητας από αυτά της υποβάσεως.

Η λειτουργία της είναι να:

- ❑ Παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις
- ❑ Μειώνει στον επιθυμητό βαθμό τις θλιπτικές τάσεις ώστε να μπορούν να παραλειφθούν από την υπόβαση και το υπέδαφος και να μην προκαλούνται παραμορφώσεις
- ❑ Παρέχει στο οδοστρωμα δυσκαμψία και συμβάλλει στη μείωση των τάσεων στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης και επομένως να συμβάλλει στην αντοχή σε κόπωση της ασφαλικής στρώσης
- ❑ Δημιουργεί μια επίπεδη επιφάνεια όπου θα τοποθετηθούν οι επιφανειακές στρώσεις

Βασική προϋπόθεση για την καλή κατασκευή της βάσης είναι η επαρκής συμπίκνωση στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Το ποσοστό αυτό της υγρασίας δίνεται από την τροποποιημένη δόκιμη συμπίκνωσης Proctor. Η υγρασία του μίγματος πρέπει να αποκλίνει από την βέλτιστη $\pm 0,5\%$ και σε καμία περίπτωση από 1% ή μικρότερη από 2% από τη βέλτιστη.^[13]

➤ Επιφανειακή στρώση

Είναι η ανώτερη και κυριότερη στρώση του οδοστρώματος. Συνήθως συνίσταται από τον τάπητα κυκλοφορίας, τη συνδετική στρώση και την ασφαλική βάση. Ουσιαστικά παραλαμβάνει και κατανέμει τα φορτία της κυκλοφορίας στις υποκείμενες στρώσεις και προσδίδει στο οδόστρωμα δυσκαμψία και αντοχή σε κόπωση.

Ο τάπητας κυκλοφορίας, επειδή έρχεται σε επαφή με τους τροχούς των οχημάτων, πρέπει να παρέχει ασφαλή επιφάνεια κύλισης. Η στρώση αυτή θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- ❑ Να είναι ανθεκτική στα φορτία της κυκλοφορίας και τις καιρικές συνθήκες και να μην παραμορφώνεται
- ❑ Να παρέχει επιπεδότητα για ασφάλεια
- ❑ Να παρέχει καλή αντιολισθηρή επιφάνεια
- ❑ Να μειώνει αισθητά το θόρυβο

Η συνδετική στρώση είναι μια ενδιάμεση στρώση μεταξύ τάπητα κυκλοφορίας και ασφαλικής στρώσης και κατασκευάζεται ώστε να παρέχει μια καλή επίπεδη επιφάνεια κυκλοφορίας με τις επιθυμητές κλίσεις. Θα πρέπει να μην ρηγματώνεται εύκολα και να είναι σχεδόν αδιαπέραστη από το νερό. Συνδετική στρώση απαιτείται μόνο όταν ο τάπητας είναι πορώδης και η ασφαλική βάση μέσης ή ανοιχτής υφής.^[17]

Η ασφαλική βάση είναι μια πολύ σημαντική στρώση. Κατασκευάζεται με τρόπο τέτοιο ώστε να έχει:

- ❑ Μεγάλη δυσκαμψία
- ❑ Υψηλή αντοχή σε κόπωση
- ❑ Να μην υφίσταται εύκολα μόνιμες παραμορφώσεις.
- ❑ Μικρή διαπερατότητα από το νερό

ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Η ουσιαστική διαφοροποίηση των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων από τα εύκαμπτα είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας της βάσης και της υπόβασης που επιτυγχάνεται με σταθεροποίηση. Στη σταθεροποίηση κάνουμε χρήση συνδετικών υλικών όπως το τσιμέντο, το ασφαλτικό γαλάκτωμα και ο άσβεστος με ιπταμένη τέφρα. Σκοπός της είναι η αύξηση της αντοχής, αλλά και η χρησιμοποίηση εδαφικών υλικών που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για υλικά βάσης και υπόβασης.

Τα μείγματα που παράγονται με τη σταθεροποίηση είναι μικρότερης αντοχής από ότι τα αντίστοιχα κανονικά σκυροδέματα και ασφαλτομίγματα. Η χρήση των σταθεροποιημένων υλικών εξασφαλίζει ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα και καλύτερη μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος, ιδιαιτέρως όταν η κοκκομετρία των αδρανών δεν είναι κατάλληλη. Η χρήση της σταθεροποίησης επιβάλλει ιδιαίτερο υπολογισμό του πάχους της βάσης και της υπόβασης. Η απόφαση της χρήσης ή όχι της σταθεροποίησης είναι κυρίως οικονομική.^[13]

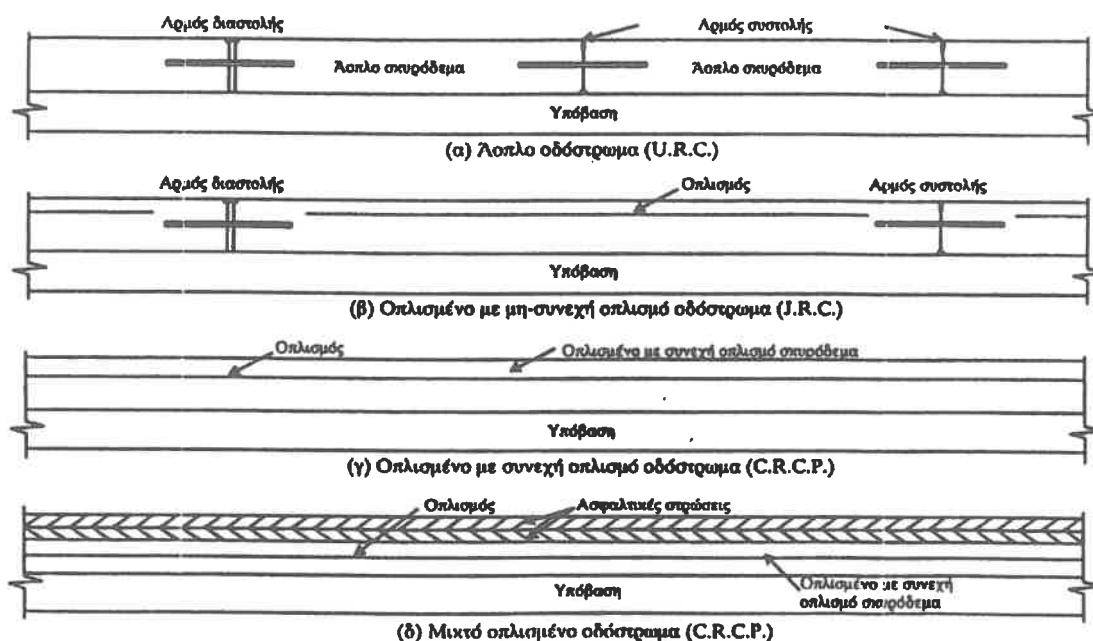
ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι οδοστρώματα με μεγάλη ακαμψία και κατασκευάζονται από άοπλο, οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Εδράζονται σε κατάλληλη στρώση η οποία ονομάζεται συνήθως υπόβαση, διότι η στρώση από σκυρόδεμα θεωρείται ότι αναλαμβάνει τον ρόλο των επιφανειακών στρώσεων και της βάσης. Η ανώτερη στρώση αποτελείται από μια πλάκα από σκυρόδεμα και η στρώση πάνω στην οποία θα εδρασθεί η πλάκα ονομάζεται υπόβαση.



Σχήμα 1.1.3: Τομή δυσκάμπτου οδοστρώματος

Λόγω της μεγάλης ακαμψίας που διαθέτουν, οι τοπικές καθιζήσεις που πιθανόν να εμφανιστούν κάτω από τα δύσκαμπτα οδοστρώματα δεν ανακλώνται στην επιφάνεια κυλίσεως και έτσι αποφεύγονται τα προβλήματα επιπεδότητας. Υπάρχουν διάφορα είδη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της πλάκας και του οπλισμού που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 1.1.4: Χαρακτηριστικές τομές δυσκάμπτων οδοστρωμάτων^[1]

Η κατασκευή άοπλου οδοστρώματος είναι σχετικά απλή και φθηνή, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα της εμφάνισης εγκάρσιων αρμών οι οποίοι αυξάνουν την πιθανότητα αστοχιών και καθιζήσεων. Το μειονέκτημα αυτό περιορίζεται με την χρήση συνεχούς οπλισμού ο οποίος όμως προκαλεί σημαντική αύξηση του κόστους του έργου και την ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό.

Στην Ελλάδα τα δύσκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιούνται αρκετά περιορισμένα κυρίως σε δάπεδα στάθμευσης αεροσκαφών και αυτοκίνητων, όπου υπάρχουν μεγάλα φορτία, σε μικρούς δρόμους που επαρκεί πρόχειρη κατασκευή, σε σταθμούς διοδίων και σε περιοχές όπου η παραγωγή ασφαλτομίγματος είναι δύσκολη.

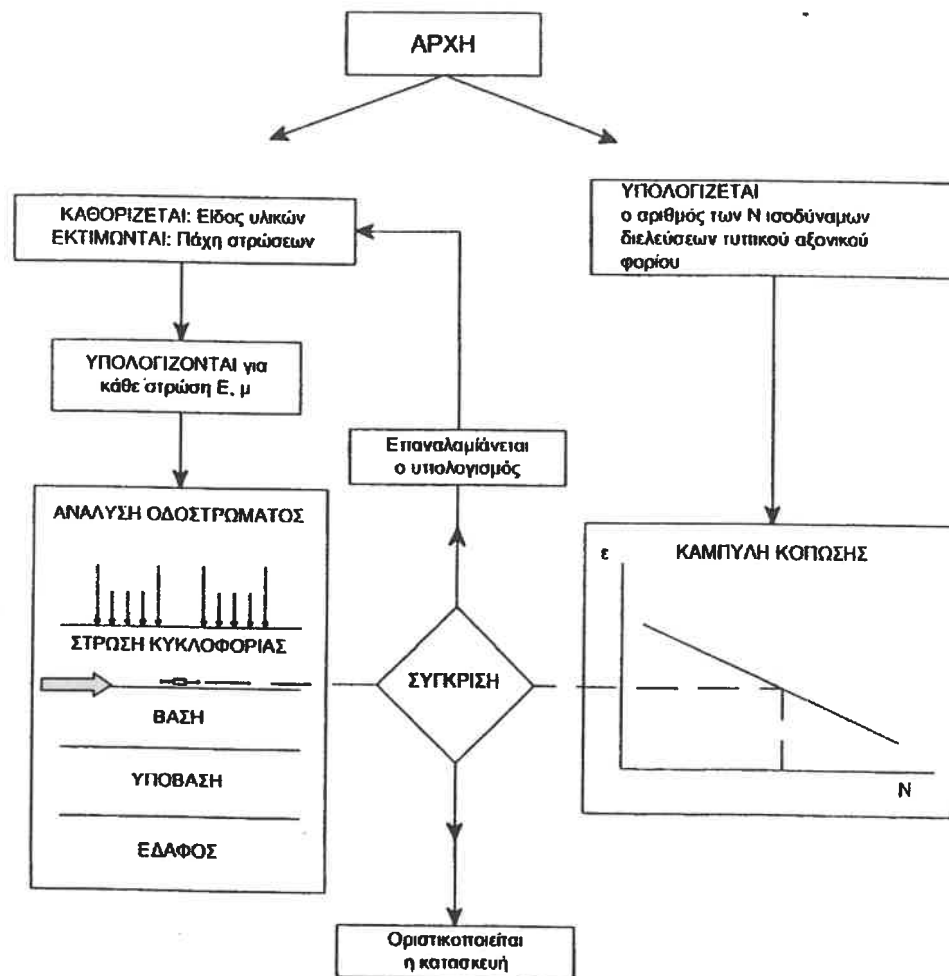
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Στον υπολογισμό των οδοστρωμάτων προσδιορίζουμε το είδος των υλικών, των αριθμό και τα πάχη των στρώσεων. Με τον υπολογισμό αυτό προσπαθούμε να επιτύχουμε τον επιθυμητό χρόνο ζωής του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη τις κυκλοφοριακές και κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Εκτός όμως από τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης, το επιβαλλόμενο φορτίο και τις κλιματολογικές συνθήκες, ένας άλλος παράγοντας που καθορίζει τη διαστασιολόγηση είναι το κόστος των υλικών και των συνεργείων κατασκευής. Μεγάλη σημασία θα πρέπει να δοθεί, επίσης, στον επιθυμητό χρόνο ζωής του έργου και στον τρόπο συντήρησης ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του κύριου του έργου και τις δυνατότητες για μελλοντική συντήρηση.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Τα στάδια υπολογισμού εύκαμπτου οδοστρώματος σε κόπωση της ασφαλτικής στρώσεως και σε αστοχία της στρώσης έδρασης (υπέδαφος) είναι τα εξής:

1. Εκλέγεται στατικό μοντέλο
2. Καθορίζονται οι φορτίσεις
3. Εκλέγονται τα είδη των υλικών και γίνεται μια πρώτη εκτίμηση του πάχους των στρώσεων
4. Καθορίζονται οι απαραίτητες για τον υπολογισμό ιδιότητες των υλικών
5. Υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε ορισμένα κρίσιμα σημεία
6. Συγκρίνονται οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες



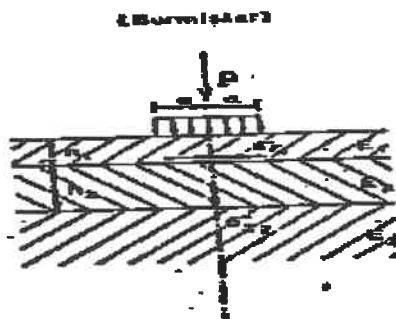
Σχήμα 1.2.1: Βασικές αρχές και στάδια υπολογισμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων⁽¹⁾

Τα κρίσιμα σημεία ενός ασφαλτικού οδοστρώματος που πρέπει να εξετάζονται με προσοχή είναι:

- Ο πυθμένας της ασφαλτικής στρώσης: Η αστοχία στο σημείο αυτό παρουσιάζεται από την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που οφείλεται στην κόπωση από κάμψη.
- Η επιφάνεια της στρώσης έδρασης: Η αστοχία στο σημείο αυτό οφείλεται στην κατακόρυφη παραμόρφωση εξαιτίας της υπερβολικής παραμόρφωσης.

Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα θεωρείται ότι έχει αστοχήσει όταν παρουσιάζονται παραμορφώσεις ή ρωγμές στην επιφάνεια κύλισης.

Για τη διαστασιολόγηση των ευκάμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως η θεωρία των πολλαπλών επάλληλων ελαστικών στρώσεων εδραζόμενων επί ελαστικού εδαφικού ημιχώρου (Burmister).



Σχήμα 1.2.2: Θεωρία Burmister

Θεωρία Burmister

Θεωρούμε ένα σύστημα πολλαπλών ελαστικών επαλλήλων στρώσεων που εδράζονται σε ελαστικό ημίχωρο. Οι στρώσεις έχουν άπειρες διαστάσεις κατά την οριζόντια έννοια και δεδομένο πάχος. Το μοντέλο αυτό ορίζεται πλήρως αν είναι γνωστό το μέτρο ελαστικότητας (E), ο λόγος Poisson (ν) και το πάχος της κάθε στρώσης.

Το πρότυπο αυτό μπορεί να απλοποιηθεί σε σύστημα τριών στρώσεων αν τα υλικά της βάσης και της υποβάσης δε διαφέρουν πολύ ποιοτικά. Μια ακόμα μεγαλύτερη απλοποίηση θα μπορούσε να γίνει αν όλα τα μη κατεργασμένα υλικά της βάσεως και της υποβάσεως θεωρηθούν ότι αποτελούν μέρος της στρώσης του εδάφους, όποτε προκύπτει σύστημα δυο στρώσεων. Η ακρίβεια, όμως, ενός τέτοιου συστήματος είναι μικρή.

Το σύστημα των επάλληλων στρώσεων βασίζεται στην παραδοχή ότι τα υλικά είναι ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Το γεγονός αυτό δεν είναι απολύτως ρεαλιστικό αλλά χρησιμοποιείται επειδή έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι για φορτίσεις όπως αυτές των αυτοκινήτων συμπεριφέρεται με αρκετή προσέγγιση σαν ελαστικό στρώμα.^[13]

Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη σαν φόρτιση ένα τυπικό αξονικό φορτίο (13 τόνων για την Ελλάδα) επί απλών ή διδύμων τροχών. Θα πρέπει όμως να γίνεται αναγωγή της μικτής κυκλοφορίας σε ισοδύναμες διελεύσεις, επειδή κάθε όχημα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίζει διαφορετικά το οδόστρωμα. Ο συντελεστής ισοδυναμίας των φορτίων δίνεται από τη σχέση:

$$\Sigma I = (P_i / P_t)^a$$

όπου P_i : το μέγιστο φορτίο ανά άξονα ομάδας I

P_t : το φορτίο του τυπικού άξονα t

a : αριθμός που εξαρτάται από την διάταξη των τροχών, τη σύνθεση των αξόνων, το είδος του οδοστρώματος και τα πάχη των στρώσεων

Οι συνολικές ισοδύναμες διελεύσεις υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\Sigma I \cdot \Delta = 365 \times (A \cdot A) \times (\Sigma I) \times (\Sigma A)$$

όπου $A \cdot A$: ο μέσος αριθμός αξόνων ανά ημέρα

ΣI : ο συντελεστής ισοδυναμίας

ΣA : ο συντελεστής αύξησης που δίνεται από τη σχέση:

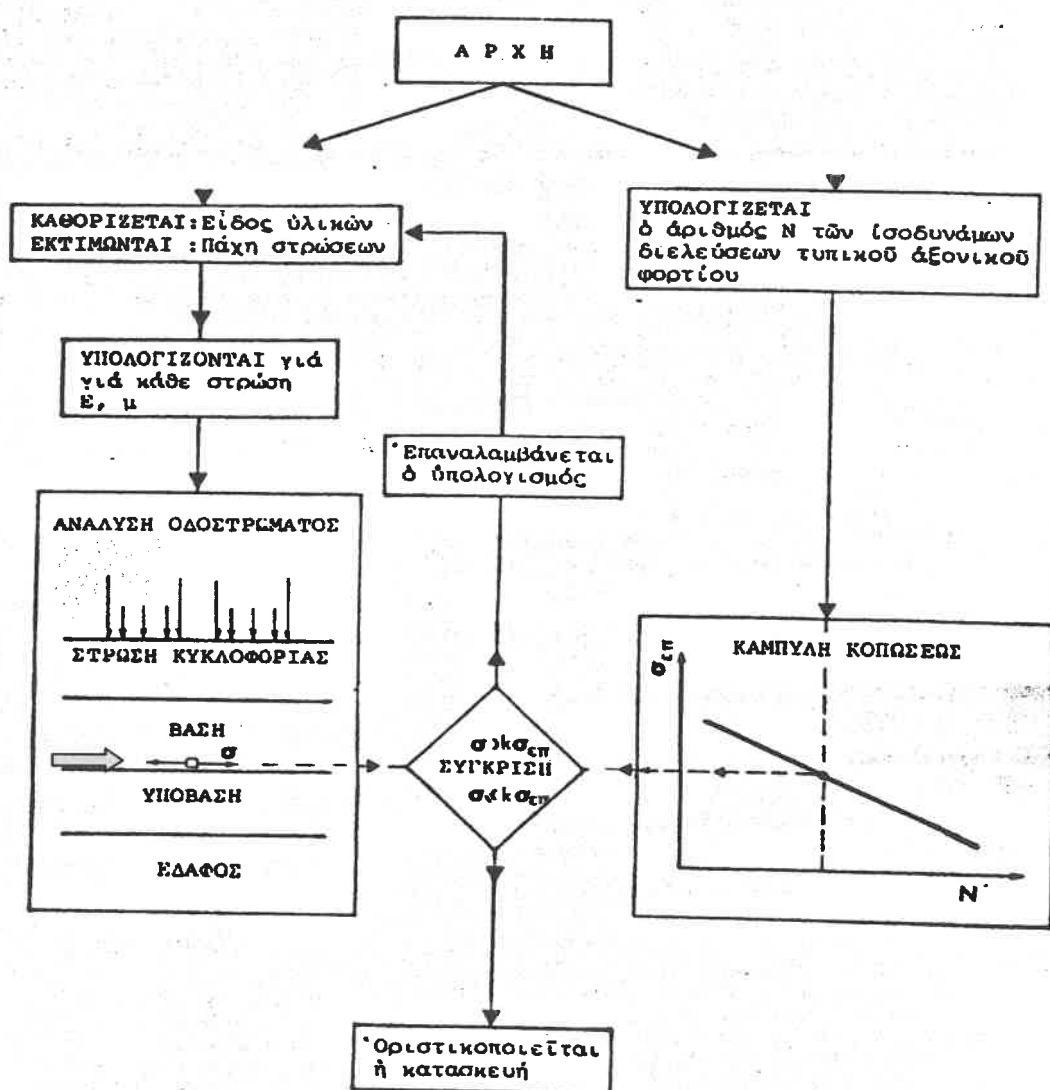
$$\Sigma A = [(1 + PA)^{ny} - 1] / PA$$

ny : η περίοδος υπολογισμού σε έτη

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Για τον υπολογισμό των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων, θα πρέπει εξ' αρχής να τονισθεί ότι διαφέρουν από τα εύκαμπτα ως προς τη δομική απόκριση στις επιπονήσεις και ως προς την συμπεριφορά τους εν γένει. Οι κατεργασμένες στρώσεις, λόγω της μεγάλης ακαμψίας που έχουν σε σχέση με την ασφαλική στρώση και τις στρώσεις από μη κατεργασμένα αμμοχάλικα, ή εδαφικά υλικά, μεταβάλλουν την κατανομή των επιπονήσεων στα διάφορα σημεία του οδοστρώματος, μεταθέτουν σε άλλες στρώσεις τα κρίσιμα σημεία και επιπροσθέτως λόγω ορισμένων ιδιοτεροτήτων τους (ρωγμές εξ' ανακλάσεως) προσδίδουν στο οδόστρωμα διαφορετική συμπεριφορά. Η διαστασιολόγηση επομένως των οδοστρωμάτων αυτών, διαφέρει από τη διαστασιολόγηση των άλλων τύπων οδοστρωμάτων.^[6]

Στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, επειδή οι στρώσεις έχουν μεγάλη ακαμψία, αναπτύσσονται τάσεις εφελκυσμού από κάμψη οι οποίες μπορεί να είναι κρίσιμες για τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Ο υπολογισμός σε αυτή την περίπτωση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η σταθεροποιημένη στρώση να μη ρηγματωθεί από κόπωση. Η συμπεριφορά των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών σε κόπωση εξετάζεται συνήθως σε κάμψη και προσεγγίζει περισσότερο τις συνθήκες επιπόνησης των στρώσεων αυτών. Ο έλεγχος του οδοστρώματος σε ρηγμάτωση από κόπωση των σταθεροποιημένων στρώσεων ακολουθεί την πορεία της εικόνας και η πορεία υπολογισμού είναι ανάλογη αυτής των ευκάμπτων.



Σχήμα 1.2.3: Βασικές αρχές και στάδια υπολογισμού ημιακάμπτων οδοστρώματων

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα έχουν μικρό αριθμό στρώσεων γιατί το σκυρόδεμα είναι υλικό με συγκριτικά μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και σημαντική αντοχή σε κάμψη. Έτσι οι τάσεις από τα φορτία αναλαμβάνονται από το σκυρόδεμα και κατανέμονται σε μεγάλη έκταση μειωμένες.

Η διαδικασία υπολογισμού των δυσκάμπτων οδοστρωμάτων είναι η ακόλουθη:

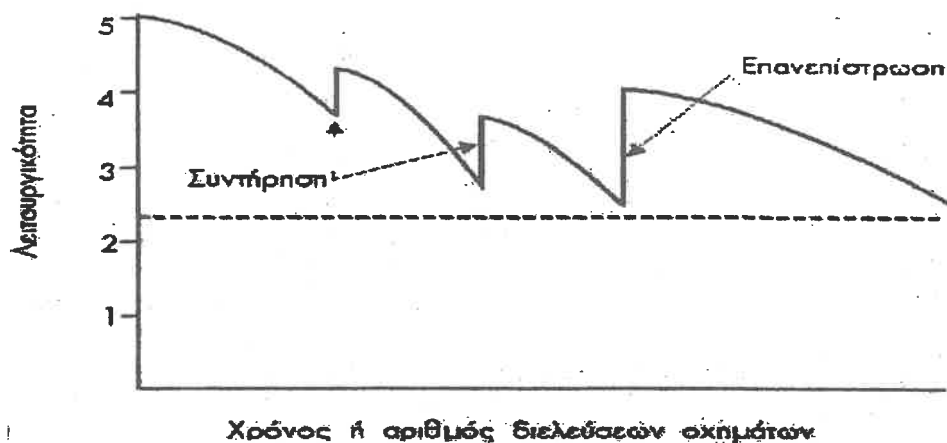
1. Καθορισμός του μηχανικού προσομοιώματος που παριστά το οδόστρωμα
2. Καθορισμός του είδους, της έντασης και της διάρκειας των επιπονήσεων που προβλέπεται να υποστεί το οδόστρωμα
3. Εκτίμηση του πάχους των διαφόρων στρώσεων του οδοστρώματος, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson των υλικών των στρώσεων
4. Ανάλυση της εντατικής κατάστασης (τάσεις, παραμορφώσεις, υποχωρήσεις) που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα υπό την επίδραση των επιπονήσεων
5. Έλεγχος της επάρκειας του οδοστρώματος έτσι ώστε να μην παρουσιάσει αστοχία κατά τη διάρκεια της προβλεπόμενης χρήσης σε καμιά στρώση του οδοστρώματος και στη στρώση έδρασης. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η γνώση του νόμου της κόπωσης του σκυροδέματος.^[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.3: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Τα οδοστρώματα σχεδιάζονται για κάποιο αριθμό ετών ώστε να παραλάβουν επαρκώς τα φορτία σε αυτό το χρονικό διάστημα. Ο δείκτης λειτουργικότητας PSI εκφράζει το επίπεδο εξυπηρέτησης του χρήστη, δηλαδή την άνεση και την ασφάλεια που του παρέχει το συγκεκριμένο οδόστρωμα. Εξαρτάται από τη μεταβολή της κλίσης, τις ρηγματώσεις, τα μπαλώματα και το βάθος της αυλάκωσης. Ο κύριος του έργου είναι αυτός που αποφασίζει πως θα διαχειρισθεί το έργο, δηλαδή ποιόν θα θεωρήσει ως ελάχιστο αποδεκτό δείκτη λειτουργικότητας. Η απόφαση αυτή καθορίζει ουσιαστικά αν το έργο θα αποδώσει κέρδος ή όχι.

Το επίπεδο εξυπηρέτησης ενός οδοστρώματος με την πάροδο του χρόνου σταδιακά μειώνεται. Για να βελτιωθεί ή να διατηρηθεί σε ένα επιθυμητό επίπεδο απαιτείται συντήρηση. Η έναρξη της συντήρησης και η συχνότητα αυτής διασφαλίζουν την επίτευξη του αρχικού στόχου, δηλαδή το οδόστρωμα να παρέχει ικανοποιητικό επίπεδο εξυπηρέτησης σε όλη τη διάρκεια της ζωής του.

Ταυτόχρονα είναι αναγκαία η συστηματική και έγκαιρη συντήρηση και αποκατάσταση του οδοστρώματος, προτού δηλαδή το επίπεδο εξυπηρέτησης λάβει την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή, ώστε να αποφευχθεί η δυσανάλογη αύξηση του κόστους συντήρησης με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 1.3.1: Μεταβολή της λειτουργικότητας με το χρόνο ^[1]

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η συστηματική προσέγγιση όλων των προβλημάτων που συνδέονται με τη λειτουργία, βελτίωση, συντήρηση και ανακατασκευή της οδού εκφράζεται μέσω των συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων. Είναι ένα σύστημα που προσομοιώνει και προβλέπει την φθορά των οδοστρωμάτων σε βάθος χρόνου και βοηθά την λήψη αποφάσεων σχετικά με εργασίες που πρέπει να γίνουν ή να αποφευχθούν σε ένα οδικό δίκτυο ή σε επιμέρους τμήματα αυτού. Προσομοιώνεται δηλαδή η εξέλιξη των δεικτών της κατάστασης του οδοστρώματος, όπως η ομαλότητα, οι αυλακώσεις και οι ρωγμές στην διάρκεια του χρόνου και παράλληλα, μέσα από μία διαδικασία βελτιστοποίησης, επιλέγονται οι βέλτιστες λύσεις συντήρησης, που είναι και το τελικό προϊόν των Σ.Δ.Ο.^[15]

Στα περισσότερα από τα συστήματα αυτά η αντιμετώπιση των προβλημάτων και η διαχείριση τεχνικών και οικονομικών δεδομένων πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα:

- Το επίπεδο δικτύου όπου καθορίζονται οι γενικοί στόχοι και η πολιτική του ελάχιστου κόστους.
- Το επίπεδο έργου όπου προσδιορίζεται για κάθε έργο η καταλληλότερη τεχνική επέμβαση.

Τα συστήματα διαχείρισης έχουν αρχίσει να καθιερώνονται για τους ακόλουθους λόγους :

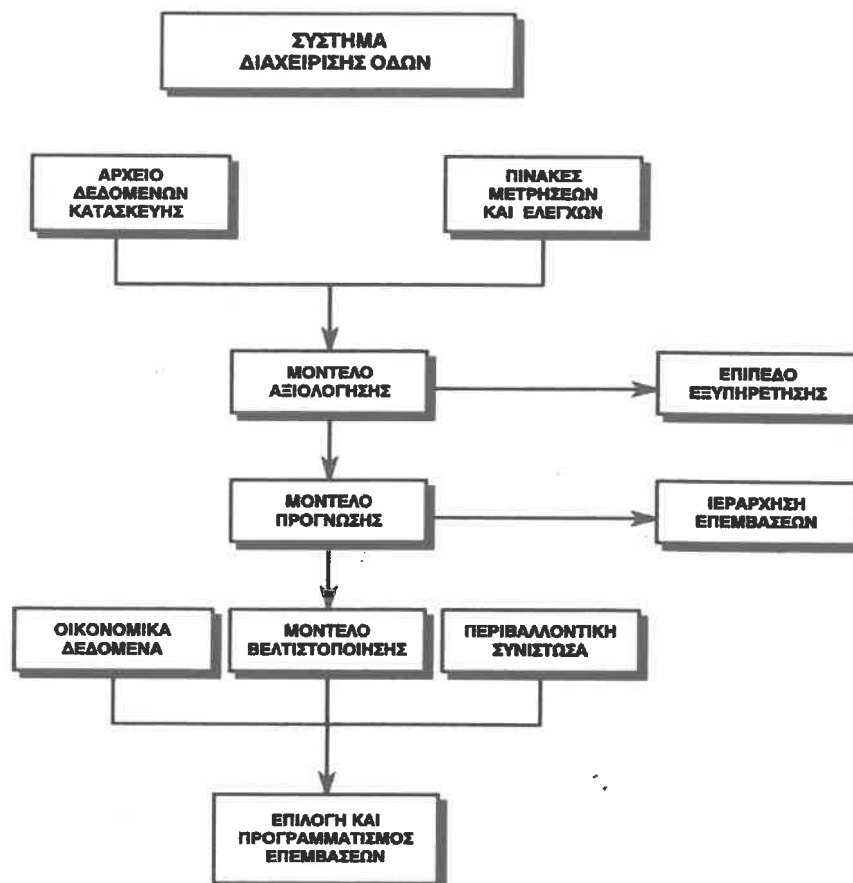
- ❑ Ραγδαία ανάπτυξη του οδικού δικτύου.
- ❑ Η γήρανση αυτού και η ανάγκη διατήρησης του σε ένα επίπεδο λειτουργικότητας.
- ❑ Ανάπτυξη νέων μεθόδων και υλικών για την συντήρηση των οδοστρωμάτων.
- ❑ Απαίτηση γενικότερα για εξοικονόμηση ενέργειας στα τεχνικά έργα.
- ❑ Επαναχρησιμοποίηση υλικών οδοστρωμάτων με μεθόδους ανακύκλωσης.
- ❑ Αύξηση του κόστους συντήρησης.

- Συνειδητοποίηση ότι οι κοινωνικές δραστηριότητες και το περιβάλλον επηρεάζονται άμεσα από την κατάσταση του οδοστρώματος.
- Ανάπτυξη μηχανημάτων προηγμένης τεχνολογίας για την αντικειμενική καταγραφή της κατάστασης του οδοστρώματος.

Σκοπός ενός συστήματος διαχείρισης θα πρέπει να είναι η μεγιστοποίηση των καθαρών οικονομικών ωφελειών σε σχέση με τους οικονομικούς περιορισμούς που επιβάλλονται με:

- Την κατάλληλη διαχείριση του διαθέσιμου κεφαλαίου.
- Τον προγραμματισμό των έργων βελτίωσης σύμφωνα με το διαθέσιμο κεφάλαιο.
- Τον καθορισμό των επιδράσεων των διαφόρων εναλλακτικών τρόπων συντήρησης, βελτίωσης του δικτύου στο κόστος του ιδιοκτήτη (το δημόσιο) και στο κόστος του χρήστη.
- Τον καθορισμό στην επίδραση στο κόστος του χρήστη της ενδεχόμενης καλής ή μη καλής ποιότητας κατασκευής.
- Την αντικειμενική επιλογή της προσφορότερης εναλλακτικής λύσης, βασισμένη καθαρά στη σύγκριση του κόστους και του οφέλους.
- Συνειδητοποίηση της εφαρμογής μεθόδων διαχείρισης και στην οδοποιία.^[17]

Το σύστημα πρέπει να προσφέρει στον Τεχνικό Διευθυντή του Δικτύου μία ποικιλία από συγκροτημένες επιλογές και να επιτρέπει την σύγκριση μεταξύ των επιπτώσεων εκ των ως άνω επιλογών σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Τα Σ.Δ.Ο περιέχουν μεθόδους και μοντέλα τα οποία βοηθούν στην επιλογή της κατάλληλης λύσης.



Σχήμα 1.3.2: Διάγραμμα Συστήματος Διαχείρισης Οδοστρωμάτων ^[12]

Μια σημαντική ατέλεια των περισσότερων εν χρήση συστημάτων διαχείρισης είναι η αδυναμία τους να προσδιορίσουν ποσοτικά τη σχέση μεταξύ κατάστασης οδοστρώματος και επιπτώσεων, θετικών και αρνητικών σε όλα τα εμπλεκόμενα μέρη: τεχνικές υπηρεσίες, χρήσεις και κοινωνικό σύνολο. Συχνά προδιαγράφονται στόχοι τεχνικού χαρακτήρα υπό στενή οπτική γωνία π.χ. ένας ποιοτικός δείκτης να μη πάρει χαμηλότερη τιμή από μια οριακή, χωρίς να εξετάζονται οι συνολικές επιπτώσεις της συγκεκριμένης απαίτησης. Σημαντικά μειονεκτήματα, εξ άλλου, είναι η έλλειψη μεθόδου ποσοτικής συσχέτισης του κόστους χρηστών με τις ενέργειες διαχείρισης.

Συνοπτικά, τα συστήματα διαχείρισης δεν έχουν ακόμη εξοπλισθεί με τα κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία, ούτως ώστε η βελτιστοποίηση των τεχνικών εργασιών να

αποβαίνει προς όφελος των χρηστών και του κοινωνικού συνόλου. Ωστόσο αποτελούν την καλύτερη προσέγγιση στο πρόβλημα της συντήρησης, βελτίωσης και αξιοποίησης του επενδεδυμένου τεχνικού έργου σε οδικές κατασκευές και παρέχουν δυνατότητες ορθολογικού προγραμματισμού των επικείμενων επεμβάσεων με ευεργετικά αποτελέσματα, τόσο για την ποιότητα των κατασκευών, όσο και για την οικονομία των έργων.^[12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.4: ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

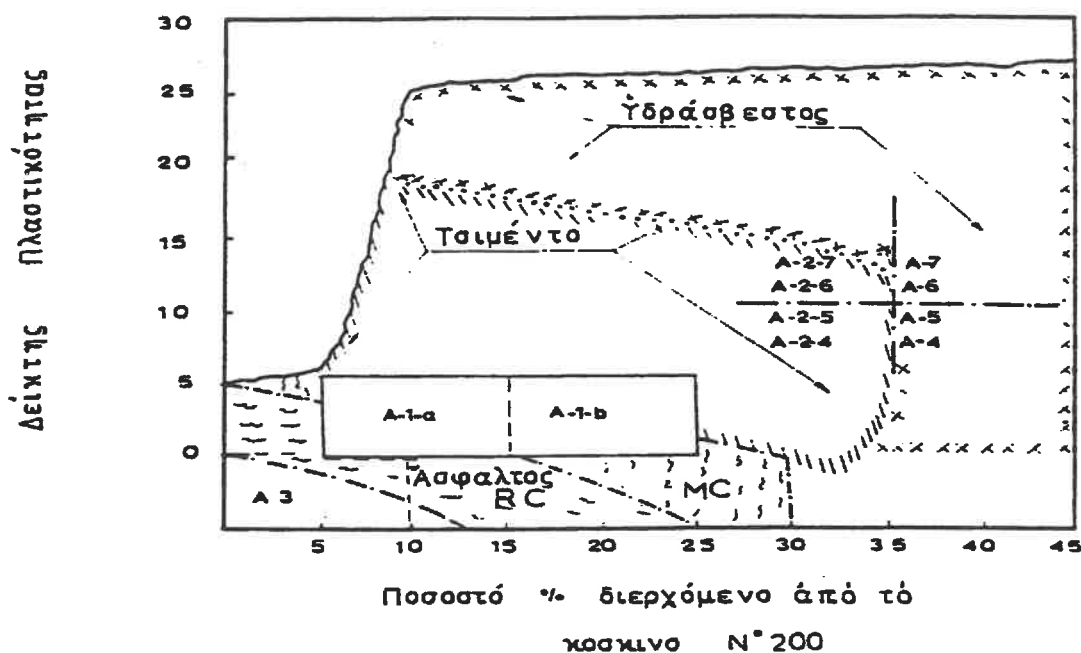
Με τον όρο αυτό εννοούμε την ειδική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται, το υλικό για να βελτιωθούν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά η οποία συνίσταται, στην ανάμιξη του εδαφικού υλικού με άλλο υλικό ή με ειδικά υλικά που λέγονται "σταθεροποιητές", την διάστρωση του στα προβλεπόμενα πάχη, την συμπίκνωση του και ενδεχομένως την "προστασία" του για ορισμένο χρόνο από εξωτερικές επιδράσεις.

Πραγματοποιείται όταν τα χαρακτηριστικά των υλικών (πχ κοκκοδιαβάθμιση, πλαστικότητα, περιεχόμενη υγρασία, φέρουσα ικανότητα) δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις. Με την διαδικασία αυτή και την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών που επιτυγχάνεται, αυξάνει η ευστάθεια του υλικού σε επιδράσεις φορτίων και σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Επιπλέον, όταν οι απαιτήσεις της κυκλοφορίας είναι μεγάλες (πχ. αυτοκινητόδρομοι) τότε το απαιτούμενο πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι μεγάλο, διότι διαφορετικά η αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδράσης είναι τόσο δυσμενής που καθορίζει μικρή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Στις περιπτώσεις αυτές επιβάλλεται να εξετασθεί αν είναι οικονομικά συμφέρον να αναβαθμισθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων βάσεως και υποβάσεως με κατεργασία των υλικών με υδραυλικές κονίες. Τα οδοστρώματα αυτά ονομάζονται ημιάκαμπτα για να υποδηλωθεί η σχετικά μεγάλη ακαμψία των κατεργασμένων υλικών που συνιστούν τη βάση και συχνά και την υπόβαση.

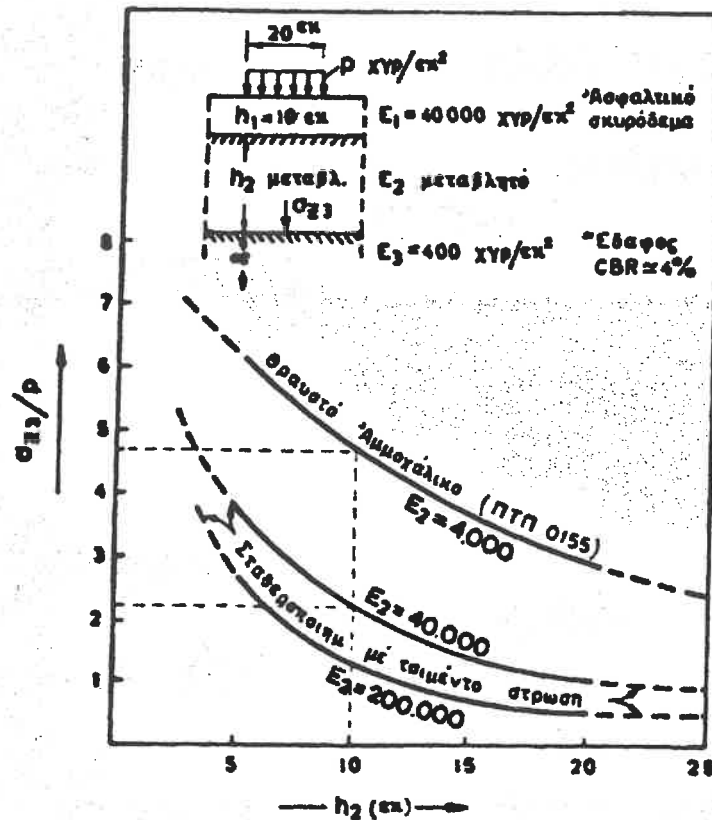
Οι μηχανικοί για αυτό το λόγο θα πρέπει να ακολουθήσουν διορατική στάση έναντι στην απόφαση επιλογής του κατάλληλου μέσου σταθεροποίησης. Τα διάφορα είδη σταθεροποίησης παρουσιάζονται στο σχήμα 1.4.1. Μια τέτοια απόφαση είναι συνδεδεμένη με:

- Το θέμα του κόστους των σταθεροποιητικών μέσων θα αποτελεί πάντα πρωτεύουσας σημασίας
- Τη διαθεσιμότητα ορισμένων σταθεροποιητικών μέσων
- Τα χαρακτηριστικά των σταθεροποιητικών μέσων, όπου ορισμένα είναι περισσότερο δραστικά από άλλα σε συγκεκριμένο τύπο υλικών
- Την πολιτική κάποιων φορέων διαχείρισης οδικών δικτύων. Εφαρμόζουν αυστηρή πολιτική επηρεαζόμενες από παλαιότερες εμπειρίες.



Σχήμα 1.4.1: Έκλογή του κατάλληλου είδους σταθεροποίησης^[1]

Στο σχήμα 1.4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης που αναπτύσσεται στη βάση της ανακυκλωμένης στρώσης. Ο ρυθμός μείωσης της κατακόρυφης τάσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης γίνεται συνεχώς μικρότερος όσο το πάχος της 2^{ης} στρώσεως αυξάνει (η καμπύλη τείνει προς την οριζόντια). Αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι πρακτικά και οικονομικά δυνατόν να μειωθούν οι τάσεις σ_{z3} πέραν ορισμένου ορίου, εφόσον το πάχος της ασφαλτικής στρώσης παραμένει σταθερό και το χρησιμοποιούμενο υλικό για τη 2^η στρώση είναι θραυστό αμμοχάλικο ($E_2=400 \text{ MPa} = 4000 \text{ kg/cm}^2$). Αν όμως γίνει αναβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών της 2^{ης} στρώσεως με κατεργασία τους με υδραυλικές κονίες τότε, επειδή το μέτρο ελαστικότητας E_2 αυξάνει σημαντικά, οι αναπτυσσόμενες τάσεις σ_{z3} μειώνονται σε μεγάλο βαθμό και συνήθως εξασφαλίζεται το οδόστρωμα έναντι αστοχίας της στρώσης έδρασης.



Σχήμα 1.4.2: Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης συναρτήσει του πάχους της 2^{ης} στρώσης

Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών μπορεί να γίνει με μία από τις ακόλουθες μεθόδους:

- ☐ Μηχανική σταθεροποίηση
- ☐ Σταθεροποίηση με άσβεστο
- ☐ Σταθεροποίηση με τσιμέντο
- ☐ Σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα και ασβέστη ή και τσιμέντο.
- ☐ Σταθεροποίηση με μεταλλουργικές σκωρίες (σκωρίες υψικαμίνων)
- ☐ Σταθεροποίηση με άσφαλτο
- ☐ Σταθεροποίηση με χημικές ουσίες

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΗ

Συνίσταται σε ανάμιξη ασβέστη με τα εδαφικά υλικά με συνθήκες βέλτιστης υγρασίας και σε συμπύκνωση του μίγματος. Το ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος ασβέστου είναι το υδροξείδιο του ασβεστίου.

Η μέθοδος σταθεροποίησης με ασβέστη χρησιμοποιείται για κατασκευή στρώσεων εδράσεως, στρώσεων επιχωμάτων και σπανιότερα για κατασκευή υποβάσεων οδοστρωμάτων με ελαφριά κυκλοφορία. Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη με μέτρια ή μεγάλη πλαστιμότητα και σε διογκούμενα αργιλικά εδάφη.

Η χρήση της έχει ως αποτέλεσμα:

- ❑ Αύξηση της βέλτιστης υγρασίας για συμπύκνωση, ούτως ώστε παρέχεται η δυνατότητα συμπυκνώσεως εδαφών τα οποία έχουν υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης
- ❑ Αύξηση του Ορίου Πλαστιμότητας (PL), δηλαδή αύξηση της υγρασίας εκεί που η υπέρβαση της οποίας θα μεταβάλει την κατάσταση υλικού από ημιστερεά σε πλαστική
- ❑ Μείωση του Δείκτη Πλαστιμότητας (PI)
- ❑ Βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών όπως CBR, αντοχή, μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης, αντοχή σε κόπωση κτλ.
- ❑ Βελτίωση της ανθεκτικότητας του υλικού στην επίδραση του παγετού

ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΚΟΝΙΕΣ

Συνίσταται στην ανάμιξη του υλικού με έναν από τους ακόλουθους σταθεροποιητές:

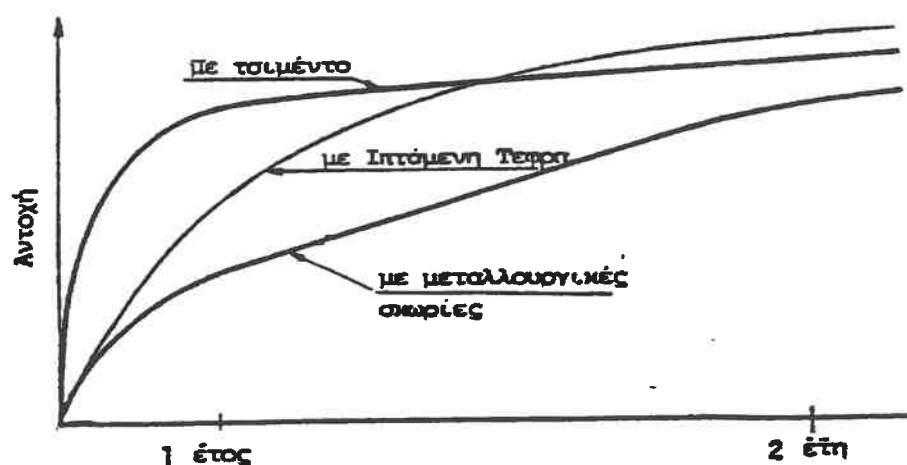
- ❑ Τσιμέντο
- ❑ Ιπτάμενη τέφρα και υδράσβεστο
- ❑ Μεταλλουργική σκωρία και υδράσβεστο

Συγχρόνως με την ανάμιξη του υλικού με ένα από τους παραπάνω σταθεροποιητές, γίνεται ανάμιξη και με νερό, έτσι ώστε το μίγμα να αποκτήσει την βέλτιστη υγρασία για συμπύκνωση. Σημειώνεται ότι για κάθε είδος σταθεροποίησης, κατεργασίας, η επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού βαθμού συμπυκνώσεως επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του μίγματος. Στο σχήμα 1.4.3 παρουσιάζονται οι αντοχές συνάρτηση του χρόνου για της διάφορες υδραυλικές κονίες. Η περιεκτικότητα σε νερό

του μίγματος είναι υπεραρκετή για να γίνουν οι απαιτούμενες χημικές αντιδράσεις, ώστε το μίγμα να αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή, η οποία εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό του σταθεροποιητή και τον βαθμό συμπυκνώσεως που θα επιτευχθεί.

Το μίγμα διαστρώνεται στα προβλεπόμενα πάχη με τις κλίσεις και επικλήσεις που προβλέπει η μελέτη και συμπυκνώνεται με οδοστρωτήρες. Μετά το πέρας της συμπυκνώσεως η στρώση πρέπει να προστατεύεται για 7 ημέρες από βαρέα φορτία και από εξάτμιση του νερού. Η προστασία από εξάτμιση γίνεται με κάλυψη από αδιάβροχη μεμβράνη ή με διατήρηση της επιφάνειας υγρής με συνεχές κατάβρεγμα. Η εργασία αυτή είναι απαραίτητη γιατί, όπως και στο σκυρόδεμα, απώλεια νερού σημαίνει ανεπάρκεια νερού για ολοκλήρωση της ενυδάτωσης του σταθεροποιητή, διακοπή της χημικής αντίδρασης και μικρότερη τελική αντοχή του μίγματος. Επίσης απώλεια νερού από εξάτμιση συνεπάγεται συρρίκνωση και ρηγμάτωση της στρώσης.

Η υδραυλική κονία συνδέει τους κόκκους του υλικού μεταξύ τους και σχηματίζει ένα νέο υλικό παραπλήσιο με σκυρόδεμα μικρής σχετικά αντοχής. Η συνεκτικότητα του νωπού μίγματος είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την συμπύκνωσή του με κοινούς οδοστρωτήρες.



Σχήμα 1.4.3: Μεταβολή της αντοχής με το χρόνο για διάφορα είδη κονιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.5: ΑΣΦΑΛΤΟΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΠΑΡΑΓΩΓΑ

ΑΡΓΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

Το αργό πετρέλαιο προέρχεται από φυσικούς και θαλάσσιους οργανισμούς οι οποίοι πριν από εκατομμύρια χρόνια εναποτέθηκαν σε πολύ μεγάλα πάχη, μαζί με λάσπη και κομμάτια βράχων, στον πυθμένα των ωκεανών. Υπό την επίδραση του υπερκείμενου βάρους σχηματίσθηκαν υδατογενή πετρώματα. Το αλατούχο - λιμνώδες περιβάλλον αποσάθρωσε την οργανική ύλη, με την επίδραση των υψηλών πιέσεων, θερμοκρασιών, βακτηριδιακής δράσης και πιθανότατα ακτινοβολίας, η οποία τελικά μετατράπηκε σε υδρογονάνθρακες της μορφής του αργού πετρελαίου.

Περαιτέρω εναποθέσεις σε νεότερους χρόνους σχημάτισαν νέα στρώματα πετρωμάτων τα οποία πίεσαν το αργό πετρέλαιο να ανέλθει δια μέσου πορωδών πετρωμάτων στην επιφάνεια της γης. Στο σημείο που τα πορώδη πετρώματα ήταν υπερκαλυμμένα από μη-πορώδη πετρώματα, το αργό πετρέλαιο μαζί με αέρια σχημάτιζε τεράστιες υπόγειες δεξαμενές. Εκεί παρέμεινε και παραμένει μέχρι τελικής εξορύξεως.

Αναλόγως της αρχικής σύστασης της οργανικής ύλης και των συνθηκών που επικράτησαν, το αργό πετρέλαιο απέκτησε τις δικές του φυσικές και χημικές ιδιότητες. Έτσι, κάθε πετρελαιοπαραγωγική περιοχή παράγει το δικό της τύπο αργού πετρελαίου. Η μορφή του αργού πετρελαίου διαφέρει από μαύρο παχύρρευστο έως καστανόξανθο λεπτόρρευστο υγρό.^[13]

ΦΥΣΙΚΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ

Η φυσική άσφαλτος προέρχεται από φυσική μετάλλαξη του αργού πετρελαίου κάτω από την επίδραση βακτηριδίων. Συνέπεια αυτού είναι να μειωθεί η περιεκτικότητα του αργού πετρελαίου σε κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες και σε ελαφρά έλαια και να γίνει έτσι περισσότερο βαρύ και παχύρρευστο παίρνοντας τη μορφή της ασφάλτου.^[16]

ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ

Η πετρελαϊκή άσφαλτος είναι παράγωγο κλασματικής απόσταξης αργού πετρελαίου. Η άσφαλτος, παράγεται από το υπόλειμμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου κατόπιν περαιτέρω αποστάξεως. Από τη δεύτερη απόσταση παράγονται διάφοροι τύποι ασφάλτων που χρησιμοποιούνται σε έργα οδοποιίας και έργα

αεροδρομίων (άσφαλτος οδοστρωσίας).

Ο τύπος της ασφάλτου που θα παραχθεί καθορίζεται τόσο από την προέλευση του αργού πετρελαίου όσο και από τις συνθήκες υποπίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στη στήλη απόσταξης. Παραγωγή πετρελαϊκής ασφάλτου κατάλληλης για την οδοποιία γίνεται μόνο από το αργό πετρέλαιο ορισμένων περιοχών.

Η κατά μάζα σύνθεση της ασφάλτου είναι:

- Άνθρακας 82 - 88 %
- Υδρογόνο 8 - 11 %
- Θείο 0 - 6 %
- Οξυγόνο 0 - 1,5 %
- Άζωτο 0 - 1 %

Η σύνθεση της ασφάλτου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και δεν έχει γίνει προς το παρόν δυνατό να συσχετισθεί η ρεολογική συμπεριφορά της με τα στοιχεία της χημικής ανάλυσής της. Η άσφαλτος διαχωρίζεται σε τέσσερις χημικές ομάδες συστατικών: ασφατένια, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, κορεσμένοι υδρογονάνθρακες και ρητίνες. Από τα οποία μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα.

Η άσφαλτος με περαιτέρω επεξεργασία, όπως να οξειδωθεί, να γαλακτωματοποιηθεί ή να διαλυθεί με διαλύτες, αποκτά νέες ιδιότητες. Στην πρώτη περίπτωση παράγεται η οξειδωμένη άσφαλτος, στη δεύτερη το ασφαλικό γαλάκτωμα και στην τρίτη το ασφαλικό διάλυμα. Τέλος, στην άσφαλτο οδοστρωσίας μπορεί να προστεθούν διάφορα χημικά πρόσθετα (βελτιωτικά) και να παραχθεί η τροποποιημένη άσφαλτος.

ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΣΦΑΛΤΟΣ

Με τη βελτίωση που επέρχεται στις ιδιότητες της ασφάλτου βελτιώνεται και η αντίστοιχη συμπεριφορά του μίγματος (άσφαλτος - αδρανές) και κατ' επέκταση η ποιότητα της κατασκευής. Έτσι έχουμε καλύτερη συμπεριφορά στις θερμοκρασιακές μεταβολές, αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας και ταυτόχρονη βελτίωση της ελαστικότητας και της συγκολλητικής της ικανότητας. Τα χημικά βελτιωτικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα ελαστομερή, τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα (-ρητίνες), τα οξειδωτικά μεταλλικά άλατα και οι ίνες.

Οι τροποποιημένες ασφαλτοι έχουν υψηλό κόστος παραγωγής και διάθεσης. Αυτό δε θα πρέπει να είναι αποτρεπτικός παράγοντας διότι δε θα πρέπει να συγκρίνεται αποσπασματικά το κόστος αυτών με την άσφαλτο, αλλά το συνολικό κόστος του οδοστρώματος ανηγμένο σε ετήσιο κόστος κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική

διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ

Για να αναμιχθεί η ασφαλτος με τα αδρανή πρέπει να είναι σε ρευστή κατάσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ασφαλτικών διαλυμάτων. Τα ασφαλτικά διαλύματα είναι προϊόντα ανάμιξης ασφάλτου και διαλυτών, όπως βενζίνη, φωτιστικό πετρέλαιο, νάφθα, ή άλλων λιγότερο πτητικών διαλυτών (έλαια). Η παρουσία λοιπόν των διαλυτών αντικαθιστά ένα μέρος της θερμότητας που απαιτείται για να γίνει η ασφαλτος εργάσιμη. Μετά την ανάμιξή τους με αδρανή ή ψεκασμό αυτών επί επιφανειών, οι διαλύτες αρχίζουν να εξατμίζονται αφήνοντας μόνη την ασφαλτο να λειτουργήσει ως συνδετικό υλικό.

Θα πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι τα ασφαλτικά διαλύματα είναι ενεργειακά ασύμφορα και περιβαλλοντικά επιβλαβή. Κατά την παραγωγή τους χρησιμοποιείται διαλύτης, ο οποίος εξατμίζεται στο περιβάλλον μετά την ανάμιξη του διαλύματος με αδρανή ή τον ψεκασμό αυτού στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Με την εξάτμιση του διαλύτη σπαταλάται ενέργεια και επιδεινώνεται η ατμοσφαιρική ρύπανση. Με βάση τα παραπάνω, τα τελευταία 15 περίπου χρόνια η χρήση των ασφαλτικών διαλυμάτων σε πολλές χώρες του εξωτερικού άρχισε να περιορίζεται ή ακόμη και να απαγορεύεται.^[7,8]

ΑΣΦΑΛΤΙΚΑ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΑ

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα είναι προϊόντα γαλακτωματοποίησης της ασφάλτου με νερό. Το νερό είναι η συνεχής ή εσωτερική φάση και η ασφαλτος η ασυνεχής ή εξωτερική φάση, τα σωματίδια της οποίας βρίσκονται σε μόνιμη αιώρηση μέσα στο νερό. Η τυπική αναλογία ασφάλτου και νερού είναι 60%-40%. Κατά το στάδιο της γαλακτωματοποίησης με την προσθήκη χημικού προσθέτου που ονομάζεται γαλακτωματοποιητής επιτυγχάνεται, με την ομοιόμορφη φόρτιση, η αιώρηση των σωματιδίων της ασφάλτου.

Ανάλογα με την επιφανειακή φόρτιση των σωματιδίων, τα ασφαλτικά γαλακτώματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα κατιονικά (ή όξινα), όπου τα σωματίδια είναι φορτισμένα θετικά και τα ανιονικά (ή αλκαλικά), όπου τα σωματίδια της ασφάλτου είναι φορτισμένα αρνητικά. Στα ασφαλτικά γαλακτώματα ανιονικού τύπου το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε, ήταν το «ξέπλυμα» των αδρανών από ασφαλτο στην περίπτωση που έβρεχε σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την εφαρμογή τους. Το γεγονός αυτό οφειλόταν στην "επαναγαλακτωματοποίηση" του συνδετικού υλικού λόγω μη πλήρους διάσπασης του γαλακτώματος. Η εμφάνιση όμως των κατιονικών γαλακτωμάτων εξάλειψε το παραπάνω πρόβλημα και τα ασφαλτικά

γαλακτώματα άρχισαν να κερδίζουν και πάλι την εμπιστοσύνη των χρηστών.

Το γεγονός ότι τα ασφαλτικά γαλακτώματα έχουν χαμηλό ιξώδες συγκρινόμενα με τα ασφαλτικά διαλύματα αλλά και με την άσφαλο απορρέει τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

- ❑ Είναι από άποψη δαπάνης ενέργειας πιο συμφέροντα
- ❑ Έχουν την δυνατότητα να επικαλύπτουν, επιτυχώς, με άσφαλο υγρά αδρανή ή υγρές επιφάνειες
- ❑ Συμβάλλουν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- ❑ Καθιστούν τις ασφαλτικές εργασίες ασφαλέστερες
- ❑ Επιταχύνουν την παραγωγικότητα του συνεργείου κατασκευής
- ❑ Αποτρέπουν ορισμένες κατασκευαστικές αστοχίες όπως ολίσθηση ταπήτων, ανάδυση ασφάλτου και περαιτέρω οξείδωση της ασφάλτου από παρατεταμένη θέρμανση αυτής, και
- ❑ Επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στις εργασίες συγκολλητικής και προεπάλειψης.^[16]

Στα ασφαλτικά γαλακτώματα απαιτούνται δυο βασικές ιδιότητες σε διαφορετικά στάδια όμως της χρήσης τους. Η πρώτη ιδιότητα απαιτείται κατά την αποθήκευση ενώ η δεύτερη κατά την εφαρμογή. Θα πρέπει να είναι "σταθερά" ώστε να μπορούν να αποθηκευθούν για κάποιο χρονικό διάστημα αλλά και να μεταφερθούν στο έργο δίχως να διασπασθούν. Επίσης, θα πρέπει να έχουν το κατάλληλο ιξώδες ώστε να μπορούν να ψεκασθούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και δίχως ιδιαίτερη θέρμανση. Τέλος, θα πρέπει να επικολλώνται καλά επί των αδρανών και να διασπώνται με τον επιθυμητό ρυθμό διάσπασης.

ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΟΠΟΙΗΤΕΣ

Οι γαλακτωματοποιητές για τα ανιονικά γαλακτώματα είναι λιπαρά οξέα που σαπωνοποιούνται αντιδρώντας με το υδροξείδιο του νατρίου ή του καλίου. Για τα κατιονικά γαλακτώματα οι γαλακτωματοποιητές είναι συνήθως μονοαμίνες, διαμίνες, αμιδοαμίνες, πολυαμίνες ή ιμιδαζολίνες που διαλύονται με οξέα (υδροχλωρικό ή οξικό) πριν τη γαλακτωματοποίηση.

Κάθε μόριο γαλακτωματοποιητή έχει δύο ομάδες. Την υδρόφοβο ή ελαιοφιλική που είναι μη πολική και διαλύεται στην άσφαλο και την υδροφιλική που είναι πολική και η οποία διαλύεται στο νερό. Κατά την γαλακτωματοποίηση τα μόρια του γαλακτωματοποιητή επικάθονται στα μικροσκοπικά σφαιρίδια της ασφάλτου με αποτέλεσμα η επιφάνεια αυτών, λόγω της πολικότητας υδρόφιλου μέρους, να φορτίζεται ομοιόμορφα. Ως

επακόλουθο, αναπτύσσονται ωστικές δυνάμεις μεταξύ των σφαιριδίων με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η συγκόλληση αυτών και να διατηρείται η μόνιμη αιώρηση αυτών μέσα στη συνεχή υδάτινη φάση και έτσι να δημιουργείται το ασφαλτικό γαλάκτωμα. Αναλόγως της πολικότητας του υδροφιλικού μέρους τα γαλακτώματα χαρακτηρίζονται ως κατιονικά ή ανιονικά.^[16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.6: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επιδρά άμεσα στη λειτουργία του οδοστρώματος. Μια ξαφνική μεταβολή της θερμοκρασίας συνεπάγεται επιπρόσθετες τάσεις με αποτέλεσμα να εμφανίζονται παραμορφώσεις που έχουν ως επακόλουθο να δημιουργούνται ρωγμές, ανοίγματα ή εκπινάξεις δαπέδων από σκυρόδεμα. Η ύπαρξη βροχής επιδεινώνει ακόμα περισσότερο την κατάσταση του οδοστρώματος. Οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού μπορούν να προκαλέσουν ανάδυση της ασφάλτου στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία παραμορφωμένης ή ολισθηρής επιφάνειας κυλίσεως, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν ρωγμές στον ασφαλοτάπητα αν ο τύπος της ασφάλτου είναι σκληρός.

Η κυριότερη επίδραση, όμως, της θερμοκρασίας είναι η μεταβολή που επιφέρει στα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασφαλομιγμάτων (μέτρο δυσκαμψίας, αντοχή σε κόπωση), τα οποία επηρεάζουν άμεσα την συμπεριφορά του οδοστρώματος.

ΒΡΟΧΗ

Οι αρχικοί παράγοντες, που ελέγχουν την περιεκτικότητα υγρασίας κάτω από το οδόστρωμα, είναι η βροχόπτωση, το βάθος της στάθμης του ύδατος και η θερμοκρασία. Η βροχόπτωση επιδρά περισσότερο στη στρώση έδρασης του οδοστρώματος. Αυξάνει την υγρασία η οποία είναι ένα παράγοντας που καθορίζει την αντοχή του. Αύξηση της υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα απώλεια αντοχής, ενώ η ελάττωση επφέρει την εμφάνιση ρωγμών λόγω συστολής.

ΠΑΓΕΤΟΣ (μακροχρόνια παραμονή σε θερμοκρασία $< 0^{\circ}\text{C}$)

Οι κυριότερες από τις καταστρεπτικές επιδράσεις του παγετού στα οδοστρώματα είναι:

- Η μείωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους εξαιτίας την αύξησης της περιεκτικότητας σε υγρασία καυτά την περίοδο της τήξεως των πάγων
- Η διόγκωση από τον παγετό

Για αυτό το λόγο θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα στους μήνες του χρόνου όπου έχουμε ύπαρξη πάγων. Θα πρέπει να παρεμποδίζεται το νερό να εισχωρήσει μέσα στην κρίσιμη περιοχή. Αυτό πραγματοποιείται με επιφανειακή αποχέτευση και στεγανές μονωτικές ζώνες. Η κυριότερη προφύλαξη συνίσταται στην κατασκευή αντιπαγετικής στρώσης από υλικά κοκκώδη και διαπερατά, τα οποία δημιουργούν μια «μονωτική» στρώση και παρεμποδίζουν την διείσδυση της χαμηλής θερμοκρασίας σε βάθη όπου το ευρισκόμενο εδαφικό υλικό μπορεί να υποστεί παγοπληξία (διόγκωση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.7: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΦΘΟΡΕΣ ^[12]

Ονομάζονται επιφανειακές φθορές, οι βλάβες που εμφανίζονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος, οι οποίες χωρίς να καθιστούν απαγορευτική την διέλευση οχημάτων, συνιστούν λειτουργικές αστοχίες οδοστρώματος ή ακόμη ενδείξεις μιας επικείμενης σοβαρότερης βλάβης. Η εμφάνιση τους στην επιφάνεια του οδοστρώματος δημιουργεί προβλήματα κυκλοφοριακής άνεσης και οδικής ασφάλειας λιγότερο ή περισσότερο σημαντικά ανάλογα με τον τύπο και την έκταση της φθοράς.

Η καταγραφή των επιφανειακών φθορών σε διάφορα τμήματα ενός οδικού δικτύου είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί, είτε με οπτική επιθεώρηση από στελέχη των Υπηρεσιών Δημοσίων Έργων, είτε με την βοήθεια φωτογραφικών μηχανημάτων (πχ GERPHO) τα οποία προσαρμόζονται κατάλληλα σε οχήματα και αποτυπώνουν πολύ μεγαλύτερα τμήματα οδού (100-200 χλμ/ημέρα). Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων είναι ένα εγχείρημα ιδιαίτερα λεπτό, γιατί η αναπαράσταση μιας βλάβης είναι πολύ δύσκολο να αποδοθεί πιστά από μια αριθμητική τιμή και ένα χαρακτηριστικό.

Η γένεση των φθορών οφείλεται είτε σε εγγενή προβλήματα μηχανικής ανεπάρκειας του σώματος της οδού, είτε στην επενέργεια των φορτίων κυκλοφορίας επί της επιφάνειας του οδοστρώματος, είτε στην επίδραση των κλιματικών φαινομένων. Συνήθως οι βλάβες οφείλονται σε συνδυασμένη δράση των γενεσιουργών αιτιών.

Ανάλογα με την μορφή τους οι επιφανειακές φθορές διακρίνονται σε:

- ❑ παραμορφώσεις (αυλακώσεις, κοιλώματα, τοπικές διογκώσεις)
- ❑ ρωγμές (διαμήκεις, εγκάρσιες, παραβολικές, αλλιγατορικές)
- ❑ αποσυνθέσεις (αποφλοιώσεις, αποσπάσεις αδρανών, αποκολλήσεις συνδετικού υλικού)
- ❑ αναδύσεις (ασφάλτου, ύδατος)

Πίνακας 1.7.1: Είδη φθορών ^[12]

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	ΡΩΓΜΕΣ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ
αυλακώσεις	διαμήκεις	αποφλοιώσεις
κοιλώματα	εγκάρσιες	αποσυνθέσεις
διογκώσεις	παραβολικές	εξιδρώσεις
επωθήσεις	αλλιγατορικές	διαβρώσεις
κυματώσεις	ανακλάσεως	τοπικές επισκευές
στρεβλώσεις	διατρήσεις	αντλήσεις ύδατος
ρυτιδώσεις	πολυγώνου	αποκαλύψεις

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των φθορών αυτών πραγματοποιείται με διαφορετική μέθοδο για κάθε μια από αυτές, ανάλογα με το αν ο χαρακτήρας της είναι γραμμικός (μήκος), εκτεταμένος (επιφάνεια), ή τοπικός (αριθμός φθορών). Έτσι για κάθε τμήμα εξεταζόμενης οδού προσδιορίζεται αντίστοιχα:

- ❑ το ποσοστό του μήκους της οδού που παρουσιάζει διαμήκεις ρωγμές και αυλακώσεις
- ❑ το ποσοστό της επιφάνειας που εμφανίζει φθορές για τις αλλιγοδικές ρωγμές
- ❑ ο αριθμός των διατρήσεων, τοπικών βυθίσεων, εγκάρσιων και παραβολικών ρωγμών στο εξεταζόμενο τμήμα της οδού

ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ ΦΘΟΡΩΝ

Στον κατάλογο που ακολουθεί αναφέρονται οι συνηθέστερες επιφανειακές φθορές και τα πιθανά αίτια που τις προκαλούν. Η μέθοδος που έχει επιλεγεί για την διάκριση τους σε κατηγορίες είναι από τις πιο απλές.

Στον Πίνακα 1.7.2 δίδονται τα πιθανά αίτια φθορών, ανάλογα με την φύση και την προέλευση τους. Όπως προαναφέρθηκε, συνήθως η συνδυασμένη δράση δύο ή περισσοτέρων αιτιών οδηγεί σε αστοχία κατασκευής. Ακόμη, κάθε απόπειρα συσχέτισης, ενός είδους φθοράς με ένα συγκεκριμένο αίτιο δεν μπορεί να έχει παρά ένα ενδεικτικό χαρακτήρα. Ο εντοπισμός των φαινομένων που προκαλούν τις βλάβες στα οδοστρώματα είναι σε κάθε περίπτωση ένα θέμα μελέτης που αντιμετωπίζεται υπεύθυνα από τον εξειδικευμένο Μηχανικό.

Πίνακας 1.7.2: Είδη και αίτια φθορών^[12]

ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ	ΚΛΙΜΑ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΛΙΚΩΝ	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ
μεγάλο μέγεθος φορτίων	υψηλή θερμοκρασία	υποδιαστασιολόγηση στρώσεων οδοστρωσίας	κοκκομετρία εκτός προδιαγραφών	ανεπαρκής συμπίκνωση
μεγάλη διάρκεια φόρτισης	χαμηλή θερμοκρασία	υπερβολικά μικρό πάχος ασφαλοτότητα	αδρανή ανεπαρκούς αντοχής σε φθορά και απότριψη	κακή συγκόλληση
εφαπτομενικές συνιστώσες	παγετός			χαμηλή θερμοκρασία ασφαλομίγματος κατά την διάστρωση
αριθμός επαναλήψεων	κακή απορροή		εσφαλμένη σύνθεση μίγματος	
μικρό πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας	ανεπαρκής αποστράγγιση		ανεπαρκής ανάμιξη	

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Αυλακώσεις (rutting) είναι οι μόνιμες αξονικές παραμορφώσεις του ασφαλοτότητα που σχηματίζονται στα ίχνη των τροχών. Παρατηρούνται συνήθως σε ασφαλικά οδοστρώματα που φέρουν βαρεία κυκλοφορία, ενώ στην δημιουργία τους συντελούν και οι υψηλές θερμοκρασίες.

Πιθανά αίτια: ανεπαρκής φέρουσα ικανότητα στρώσεων οδοστρωσίας, κακή ποιότητα ασφαλοτοπατήτων, χαμηλό ιξώδες, υψηλές θερμοκρασίες.

Κοιλώματα (depressions) είναι τοπικές βυθίσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος. Παρατηρούνται συχνά στα ίχνη των τροχών.

Η δημιουργία τους οφείλεται σε μηχανική ανεπάρκεια των στρώσεων οδοστρωσίας, κακές συνθήκες αποστράγγισης, έλλειψη εγκιβωτισμού.

Διογκώσεις (bumps) είναι τοπικές ανυψώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος. Πιθανά αίτια είναι οι υψηλές θερμοκρασίες και ο ερπυσμός, ενώ συχνά εμφανίζονται σε ζώνη πεδήσεως των οχημάτων όπου ασκούνται μεγάλα εφαπτομενικά φορτία.

Επωθήσεις (shoving) είναι παραμορφώσεις καμπύλης μορφής που σχηματίζονται κατά την διεύθυνση της κίνησης. Οφείλονται στην δράση των εφαπτομενικών φορτίων σε συνδυασμό με την ανεπαρκή συγκόλληση του ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας.

Ρυτιδώσεις (corrugations) ή "κυματοειδής λαμαρίνα" είναι παραμορφώσεις εν είδει κύματος πυκνής και κανονικής διάταξης κατά την εγκάρσια έννοια της οδού. Παρατηρούνται συχνά σε χαλικοστρωτα οδοστρώματα χωρίς ασφαλοτάπητα.

Η μικρή αντοχή σε σχέση με τα φορτία κυκλοφορίας είναι το βασικό αίτιο για την εμφάνισή τους. Στα ασφαλτικά οδοστρώματα η εμφάνισή τους σχετίζεται με τοπικές αποκολλήσεις της στρώσεων κυκλοφορίας λόγω υψηλών εφαπτομενικών φορτίων.

Κυματώσεις (wave) Είναι παραμορφώσεις κυματοειδούς μορφής ανάλογες με τις ρυτιδώσεις με την διαφορά ότι παρουσιάζονται συνήθως σε αραιή και ακανόνιστη διάταξη. Το μέγεθος τους είναι μεγαλύτερο από εκείνο των ρυτιδώσεων.

ΡΗΓΜΑΤΩΣΕΙΣ

Διαμήκειες ρωγμές (longitudinal cracking) είναι ρωγμές, σχεδόν ευθύγραμμες, κατά την έννοια του μήκους της οδού, που συχνά εμφανίζονται κοντά στον άξονα ή στο άκρο του οδοστρώματος.

Τα αίτια που τις προκαλούν αναφέρονται συνήθως σε κατασκευαστικές αστοχίες: κακή συναρμογή των λωρίδων κατά την διάστρωση, διαπλάτυνση οδοστρώματος, ανεπαρκής εγκιβωτισμός, υποχώρηση υποκειμένων στρώσεων, παγοπληξία.

Εγκάρσιες ρωγμές (transverse cracking) κάθετες στον άξονα της οδού, παρουσιάζονται κυρίως σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα λόγω θερμικών συστολών του τσιμέντου.

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα η εμφάνισή τους υποδηλώνει ανεπάρκεια φέρουσας ικανότητας των υποκειμένων στρώσεων ή τοπική αστοχία

Παραβολικές ρωγμές (slippage) κατά την διεύθυνση της κυκλοφορίας προκαλούνται από ισχυρά επαπτομενικά φορτία σε ζώνες πεδήσεως και μεγάλων κατά μήκος κλίσεων.

Αллигаторικές ρωγμές (alligator cracking) είναι ρηγματώσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος υπό μορφή δέρματος κροκοδείλου. Είναι χαρακτηριστικές ρωγμές που συναντώνται τόσο στα ασφαλτικά, όσο και στα οδοστρώματα εκ σκυροδέματος.

Η εμφάνισή τους συνδέεται με μειωμένη αντοχή και υποδιαστασιολόγηση των στρώσεων κυκλοφορίας και οδοστρώσας καθώς και με φαινόμενα παγοπληξίας. Η ανάπτυξη αστοχιών τύπου αллигаторικών ρωγμών μεγάλου εύρους σε εκτεταμένη επιφάνεια του οδοστρώματος υποδηλώνει τελικό στάδιο ζωής της οδού.

Ρωγμές πολυγώνου (block cracking) είναι ρηγματώσεις ανάλογες με τις προηγούμενες, σε μεγαλύτερο μέγεθος. Αίτια η μικρή αντοχή του οδοστρώματος σε συνδυασμό με μεγάλα φορτία κυκλοφορίας.

Τοπικές διατρήσεις ή λακκούβες (spalls) ή φωλιές (potholes) συνιστούν αποτέλεσμα καθολικής θραύσεως και καταστροφής του επιφανειακού ασφαλτοτάπητα και σχηματισμό λάκκων.

Αίτια είναι η τοπικά μειωμένη αντοχή υποκειμένων στρώσεων, η ανεπαρκής αποστράγγιση και το μικρό πάχος ασφαλτοτάπητα.

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΑΛΛΟΙΩΣΕΙΣ

Αποφλοιώσεις (peeling) είναι τοπικές ή εκτεταμένες ζώνες όπου ο επιφανειακός τάπητας κυκλοφορίας έχει αποκολληθεί και αποσπασθεί από την υποκείμενη ασφατική στρώση. Ως αίτια θα πρέπει να θεωρηθούν η κακή συγκόλληση των στρώσεων σε συνδυασμό με τις ισχυρές τάσεις στην διεπιφάνεια των ανωτέρων στρώσεων.

Αποσυνθέσεις (wethering) είναι βλάβες της δομής του ασφαλτοτάπητα ή του σκυροδέματος, όπου το συνδετικό υλικό, άσφαλτος ή τσιμέντο οξειδώνεται και αποκολλάται από τα αδρανή. Επακολουθεί η απόσπαση (ravelling) των αδρανών και η τοπική ή καθολική καταστροφή της επιφάνειας κυκλοφορίας.

Αίτια η κακή σύνθεση του μίγματος και εκτέλεση των εργασιών επί του οδοστρώματος. Διάστρωση και συμπίκνωση υπό ακατάλληλες θερμοκρασιακές συνθήκες.

Εξίδρωση (bleeding) είναι το φαινόμενο ανάδυσης ασφάλτου. Το φαινόμενο παρατηρείται σε ασφαλοτάπητες ασφαλτικών μιγμάτων και επαλείψεων. Οφείλεται σε υπερβολική αναλογία συνδετικού υλικού και υψηλές θερμοκρασίες.

Αντληση (pumping) είναι η ανάδυση ύδατος και λεπτόκοκκου υλικού στην επιφάνεια κυκλοφορίας. Παρατηρείται κυρίως σε οδοστρώματα εκ πλακών σκυροδέματος, όπου οι αρμοί προσφέρουν διόδους ροής σε ποσότητες εγκλωβισμένου νερού. Η ανάδυση του νερού πραγματοποιείται υπό την δράση των φορτίων των οχημάτων. Οφείλεται σε κακή απορροή και αποστράγγιση καθώς και σε ακατάλληλη κοκκομετρική σύνθεση των στρώσεων του οδοστρώματος.

Διάβρωση (stripping) είναι η εμφάνιση σκύρων στην επιφάνεια κυκλοφορίας λόγω απόσπασης και καταστροφής του συνδετικού υλικού. Οφείλεται σε κακή κοκκομετρική διαβάθμιση και ανεπαρκή πρόσφυση του συνδετικού επί των αδρανών.

Τοπικές επισκευές ή μπαλώματα (patching) είναι επικαλύψεις και επουλώσεις λάκκων με επεμβάσεις τοπικού χαρακτήρα. Λόγω της ανισοσταθμίας που συχνά εμφανίζεται στο σημείο επέμβασης, οι επισκευές αυτές θεωρούνται από πολλά συστήματα αξιολόγησης οδοστρωμάτων ως επιφανειακές αστοχίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.8: ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ

Η ιδέα της ανακύκλωσης ως μέτρο αποκατάστασης των οδοστρωμάτων είναι σχετικά καινούργια. Ανταγωνίζεται την κλασική τεχνική της αποκατάστασής τους μέσω ενίσχυσης του υπάρχοντος οδοστρώματος με ασφαλτόμιγμα, αμμοχάλικο κατεργασμένο με τσιμέντο ή σκυρόδεμα. Και οι δύο μέθοδοι αποσκοπούν στην αποκατάσταση της λειτουργικότητας και πολύ συχνά στην αύξηση της δομικής ικανότητας του οδοστρώματος, με τη διαφορά ότι η πρώτη εκμεταλλεύεται τα υπάρχοντα υλικά και μεταβάλλει λιγότερο το επίπεδο του ήδη υπάρχοντος δρόμου. Η εφαρμογή της αποσκοπεί στην αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η μείωση των διαθέσιμων κονδυλίων, η δυσκολία προμήθειας πρώτων υλών, η εξοικονόμηση ενέργειας και η προστασία του περιβάλλοντος.

Η ανακύκλωση είναι μια μέθοδος κατά την οποία πραγματοποιείται επαναχρησιμοποίηση υλικών από τα υπάρχοντα φθαρμένα οδοστρώματα. Σκοπός της είναι η μετατροπή ενός φθαρμένου οδοστρώματος σε μια κατασκευή η οποία να πληροί όλες τις απαιτήσεις. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ασφατικές στρώσεις, σε στρώσεις από ασύνδετα υλικά καθώς επίσης και σε ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης κατακερματίζεται ο δρόμος μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος και σε αυτό το υλικό προστίθεται ένα συνδετικό υλικό (τσιμέντο, γαλάκτωμα, αφρώδης άσφαλτος), νερό, πιθανόν αδρανή (για σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση) και ενίοτε κάποιο χημικό πρόσθετο. Δημιουργείται δηλαδή ένα ομοιογενές μίγμα, το οποίο διαστρώνεται, συμπυκνώνεται και συντηρείται κατάλληλα, αποτελώντας τη βάση ή μια στρώση ενός νέου οδοστρώματος με μεγαλύτερη δομική αντοχή.



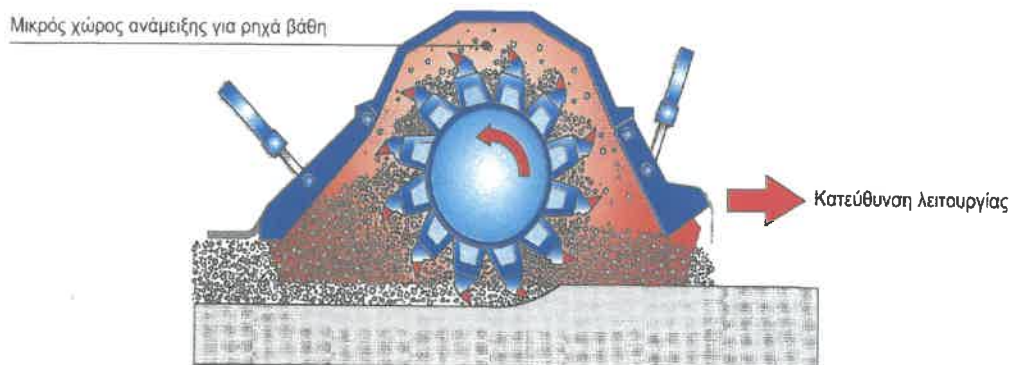
Εικόνα 1.8.1: Σύστημα ανακύκλωσης οδοστρωμάτων ^[4]

ΕΙΔΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η ανακύκλωση διαφοροποιείται ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται (εν θερμώ ή εν ψυχρώ), το είδος των συνδετικών υλικών (τσιμέντο, άσβεστος, ασφαλτικό γαλάκτωμα και αφρώδης άσφαλτος) και τον τρόπο παραγωγής των υλικών (επί τόπου, σε εγκατάσταση). Διακρίνεται στις εξής βασικές κατηγορίες: επιφανειακή ανακύκλωση, ανακύκλωση εν θερμώ, ανακύκλωση εν ψυχρώ και την ανακύκλωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ανακύκλωση επιφανειακής στρώσης

Πραγματοποιείται απόξεση –φρεζάρισμα- και απομάκρυνση του ασφαλτομίγματος σε βάθος 20 έως 25 χιλιοστά. Το υλικό συγκεντρώνεται και επαναχρησιμοποιείται για σταθεροποιημένες ή μη σταθεροποιημένες βάσεις, για την κατασκευή ρείθρων ή ακόμα και επιφανειακών στρώσεων αφού πρώτα στο φρεζαρισμένο υλικό προστεθεί νέο συνδετικό υλικό και αδρανή. Στην ανώτερη στρώση συνήθως διαστρώνεται νέο θερμό ασφαλτόμιγμα. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εκπομπή σκόνης.



Εικόνα 1.8.2: Διάταξη απόξεσης επιφανειακής στρώσης ^[4]

Ανακύκλωση εν Θερμώ

Ορίζεται ως η διαδικασία του κατακερματισμού –φρεζαρίσματος- του οδοστρώματος, σε βάθος μεγαλύτερο των 20 με 25 χιλιοστών. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάμιξη του φρεζαρισμένου υλικού εν θερμώ με την προσθήκη νέων υλικών σε περίπτωση όπου η κοκκομετρική διαβάθμιση δεν είναι ικανοποιητική.

Χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση και ποιοτική αναβάθμιση των παλαιών οδοστρωμάτων. Σε αντίθεση με τις άλλες μορφές ανακύκλωσης, με την ανακύκλωση εν θερμώ βελτιώνεται αισθητά και η αντοχή του οδοστρώματος. Η ανακύκλωση αυτής της

μορφής συνήθως εκτελείται στις ασφαλτικές στρώσεις, πλην όμως μπορεί να επεκταθεί και στις στρώσεις από ασύνδετα αδρανή. Στην περίπτωση αυτή, στα ασύνδετα αδρανή προστίθεται άσφαλτος και το μίγμα επανατοποθετείται ως σταθεροποιημένη βάση. Έτσι, επέρχεται ουσιαστικότερη ενίσχυση του οδοστρώματος με αποτέλεσμα να μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερο αριθμό τυπικών αξόνων.^[10]



Εικόνα 1.8.3: Συρμός μηχανημάτων για θερμή ανακύκλωση ^[4]

Η ανάμιξη γίνεται είτε επί της οδού, είτε σε μόνιμη εγκατάσταση.

Η εν θερμώ ανακύκλωση επί τόπου μπορεί να εκτελεστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

α) Επαναδιάστρωση (repave)

Η επιφάνεια του παλαιού οδοστρώματος θερμαίνεται με ειδικά μηχανήματα (στους 110 με 130 °C), κατόπιν αναμοχλεύεται σε βάθος συνήθως 20 έως 30 mm, εξομαλύνεται και πάνω σε αυτή διαστρώνεται νέο ασφαλτόμιγμα σε ποσότητα επαρκή για την επίτευξη του τελικού επιθυμητού πάχους. Αμέσως μετά τη διάστρωση, νέο και παλαιό ασφαλτόμιγμα συμπυκνώνονται μαζί και κατόπιν το οδόστρωμα δίνεται στην κυκλοφορία.

Το μηχάνημα που χρησιμοποιείται στη επαναδιάστρωση αποτελείται από σύστημα θέρμανσης της επιφάνειας, σύστημα υποδοχής ασφαλτομίγματος, σύστημα μεταφορικών ταινιών για μεταφορά του ασφαλτομίγματος, αναμοχλευτή, λεπίδα και διαστρωτήρα.

β) Επανάμιξη (remix)

Στην περίπτωση αυτή στο φρεζαρισμένο παλαιό ασφαλτόμιγμα προστίθεται νέα άσφαλτος και αδρανή, αναμιγνύονται επί της οδού και επαναδιαστρώνονται. Το παλαιό ασφαλτόμιγμα, που εξάγεται μετά την απόξεση του οδοστρώματος,

προωθείται με τη βοήθεια ατέρμονα κοχλία και λεπίδας με μεταφορική ταινία και μεταφέρεται στον αναμίκτη. Στον αναμίκτη, που συνήθως αποτελείται από δύο οριζόντιους άξονες με πτερύγια, προστίθενται οι προκαθορισμένες από τη σύνθεση ποσότητες αδρανών και ασφάλτου. Το τελικό μίγμα μεταφέρεται με κατάλληλο σύστημα, ή εκβάλλει απευθείας, στον διαστρωτήρα, απ' όπου διαστρώνεται και συμπυκνώνεται.

Όλα τα στάδια των εργασιών γίνονται από ένα συρμό μηχανημάτων, ενώ η τροφοδοσία των αδρανών γίνεται από φορτηγά, τα οποία εκφορτώνουν στο εμπρόσθιο μέρος του συρμού. Η τροφοδοσία της ασφάλτου γίνεται από δεξαμενή που είναι τοποθετημένη σε κατάλληλο σημείο του συρμού. Επίσης, ο συρμός φέρει και σύστημα θέρμανσης των αδρανών, πριν αυτά διοχετευθούν στον αναμίκτη. Το μηχανήμα που χρησιμοποιείται για την ανακύκλωση με επανάμιξη είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται και στην επαναδιάστρωση, με μόνη τη διαφορά ότι σε αυτό προσαρμόζεται το σύστημα ανάμιξης.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ποιότητα και η ομοιομορφία του μίγματος που παράγεται, η οποία δεν μπορεί να είναι τόσο καλή σε σύγκριση με το μίγμα που παράγεται σε μόνιμη εγκατάσταση. Παράλληλα, ο ποιοτικός έλεγχος του τελικού μίγματος στην περίπτωση που προστεθούν νέα υλικά δεν μπορεί να είναι τόσο αποτελεσματικός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι εργασίες και τα στάδια κατασκευής γίνονται εν κινήσει, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος τροποποίησης της σύνθεσης σε περίπτωση που εξάγονται μη επιθυμητά αποτελέσματα.^[10]

γ) Αναμόρφωση (reshape)

Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις κατασκευαστικού λάθους κλίσης ή επιπεδότητας. Η άσφαλτος θα πρέπει να ικανοποιεί τη μελέτη σύνθεσης. Η επιφάνεια θερμαίνεται στους 130 °C, στη συνέχεια αναμοχλεύεται σε βάθος 30 ως 40 mm και επαναδιαστρώνεται χωρίς να προστεθεί κανένα νέο υλικό. Η αναμόχλευση γίνεται με τα μηχανήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και η διάστρωση γίνεται με διαστρωτήρα ή grader.

Κατά την ανακύκλωση σε μόνιμη εγκατάσταση το παλαιό ασφαλτόμιγμα φρεζάρεται και μεταφέρεται στο χώρο όπου θα γίνει η επεξεργασία. Εκεί αποθηκεύεται σε σωρούς και ελέγχεται η κοκκομετρική του διαβάθμιση. Μέγιστο επιτρεπτό όριο διαμέτρου αδρανούς ορίζονται τα 50 mm. Μετά την παραπάνω προετοιμασία του μίγματος ένα ποσοστό του παλαιού ασφαλτομίγματος αναμιγνύεται με νέα άσφαλτο και αδρανή, έτσι ώστε το τελικό μίγμα να έχει τις ιδιότητες του επιθυμητού ασφαλτομίγματος.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα μίγματος, επιδιορθώνονται όλες οι επιφανειακές φθορές του τάπητα, επέρχεται ουσιαστική βελτίωση της δομικής ικανότητας του οδοστρώματος, αποκαθίστανται οι κλίσεις του οδοστρώματος και αποκαθίσταται πλήρως η αντιστοιχιστική ικανότητα της επιφανείας.

Ανακύκλωση εν ψυχρώ

Ανακύκλωση εν ψυχρώ είναι η διαδικασία του θρυμματισμού του παλαιού οδοστρώματος σε βάθος μεγαλύτερο των 25 mm. Στη συνέχεια γίνεται η ανάμιξη είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την προσθήκη κατάλληλων σταθεροποιητικών υλικών (γαλακτωμάτων, αφρώδης ασφάλτου, τσιμέντου) είτε σε μόνιμη εγκατάσταση με την προσθήκη νέων υλικών (αδρανή και σταθεροποιητικό υλικό). Στην ανάπτυξη της μεθόδου αυτής συνέβαλαν οι ανάγκες που προέκυψαν μετά την πετρελαϊκή κρίση καθώς και αναγκαιότητα προστασία του περιβάλλοντος.

Η ψυχρή επιτόπου ανακύκλωση περιλαμβάνει τρεις κατηγορίες:

α) ανακύκλωση σε βάθος

Είναι η ανακύκλωση που πραγματοποιείται σε βάθος πάνω από 150 χιλιοστά. Η ανακύκλωση στρώσης μεγάλου βάθους είναι κατάλληλη για την ενίσχυση υπάρχοντος καταπονημένου οδοστρώματος με λεπτή ή χοντρή ασφατική στρώση. Όλες οι ασφατικές στρώσεις και ένα μέρος της βάσης από ασύνδετα αδρανή συνολικού βάθους έως 300 mm κατακερματίζονται σε τεμάχια μεγίστης διάστασης 50mm και ψεκάζονται με σταθεροποιητικό υλικό. Το προϊόν αυτό αποτελεί το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί η σταθεροποιημένη βάση. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιθανόν να προστίθεται και μικρή ποσότητα νέων αδρανών. Στη συνέχεια κατασκευάζεται η επιφανειακή στρώση, η οποία για δρόμους ελαφράς κυκλοφορίας μπορεί να είναι μία λεπτή στρώση θερμού ασφαλτομίγματος, ενώ για δρόμους βαριάς κυκλοφορίας απαιτείται τόσο μία ασφατική βάση όσο και μία επιφανειακή ασφατική στρώση.



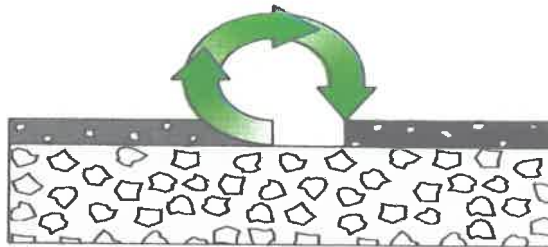
Σχήμα 1.8.4: Ανακύκλωση σε βάθος ^[4]

β) επιφανειακή ανακύκλωση

Η επιφανειακή ανακύκλωση, πραγματοποιείται για την εξαφάνιση των επιφανειακών ρηγματώσεων αλλά και για τη βελτίωση της ποιότητας κύλισης σε περιπτώσεις επιφανειακών ανωμαλιών, τροχαυλακώσεων κλπ.

Στην περίπτωση της ανακύκλωσης σε μερικό βάθος, μόνο ένα μέρος των ασφαλικών στρώσεων, συνήθως από 80 mm έως 150 mm, κατακερματίζεται και ανακυκλώνεται. Μετά την προσθήκη ασφαλικού γαλακτώματος ή άλλου υλικού για σταθεροποίηση επιτυγχάνεται ένα τελικό προϊόν ικανό να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επιφανειακής στρώσης ή ως υλικό βάσης. Η υποκατηγορία αυτή της ανακύκλωσης κερδίζει συνεχώς έδαφος και είναι σήμερα η πλέον διαδεδομένη στην κατηγορία της ψυχρής ανακύκλωσης.

Με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζεται με σχετικά μικρό κόστος, βελτίωση στη δομική ικανότητα του οδοστρώματος λόγω της επιρροής της μεταγενέστερης ασφαλικής στρώσης, όπου συνήθως τοποθετείται και περιορισμός της εισόδου του νερού στις κατώτερες στρώσεις που συμβάλλει στην παράταση της ζωής του.



Σχήμα 1.8.5: Επιφανειακή ανακύκλωση ^[4]

γ) ανακύκλωση οδοστρωμάτων μόνο από ασύνδετο αμμοχάλικο.

Η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων από ασύνδετο αμμοχάλικο πραγματοποιείται σε βάθος έως 200 mm. Περιλαμβάνει την ανακύκλωση του υπάρχοντος υλικού, την προσθήκη ασφαλικού γαλακτώματος, αφρώδης ασφάλτου, υδράσβεστου ή τσιμέντου και τέλος την εφαρμογή ενός λεπτοτάπητα κυκλοφορίας (slurry seal).

Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η απουσία εκπομπής σκόνης κατά τη διέλευση οχημάτων, η ασφάλεια και σταθερότητα της επιφανειακής στρώσης κατά την διάρκεια βροχής και το χαμηλό κόστος κατασκευής.

Πίνακας 1.8.1: Κατηγορίες επιτόπιας ανακύκλωσης- ανακύκλωσης σε μόνιμη εγκατάσταση

ΕΠΙΤΟΠΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ		ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΕ ΜΟΝΙΜΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	
ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
αναμόρφωση (reshape)	θέρμανση, αναμόχλευση παλαιού ασφαλτοτάπητα, επανάμιξη και διάστρωση χωρίς προσθήκη νέου υλικού	εγκατάσταση ασυνεχούς λειτουργίας (batch plant)	διαδοχική και χωριστή θέρμανση ανακυκλωνόμενου υλικού, ξήρανση αδρανών και ανάμιξη
αναδιάστρωση (repave)	θέρμανση, αποξήλωση παλαιού ασφαλτοτάπητα και εγκάρσια αναδιάστρωση, εν συνεχεία διάστρωση νέου ασφαλτομίγματος και κυλίνδρωση	εγκατάσταση συνεχούς λειτουργίας (continuous operation)	θέρμανση υλικών και ανάμιξη σε ειδικό τύμπανο, θέρμανση κλασσική ως 140° και περαιτέρω θέρμανση μέσω μικροκυμάτων.
επανάμιξη (remix)	θέρμανση, αποξήλωση παλαιού ασφαλτοτάπητα, ανάμιξη με νέα υλικά και κυλίνδρωση	εγκατάσταση μικροκυμάτων (microwave)	
ανακύκλωση εν ψυχρώ (cold-mix recycling)	αποξήλωση, διάσπαση παλαιού ασφαλτοτάπητα, προσθήκη γαλακτώματος, ανάμιξη, διάστρωση και κυλίνδρωση.		

Ανακύκλωση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Ανακύκλωση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η διαδικασία θραύσης της πλάκας του δύσκαμπτου οδοστρώματος και η επαναχρησιμοποίηση του κατακερματισμένου σκυροδέματος ως χονδρόκοκκου αδρανούς για την παραγωγή νέου σκυροδέματος ή τη δημιουργία βάσης. Το υλικό μετά τη θραύση του μεταφέρεται σε συγκεκριμένο χώρο, καθαρίζεται από αλλά υλικά όπως ο σπλισμός και θρυμματίζεται για να αποκτήσει αδρανή με μεγέθη εντός των επιτρεπτών ορίων.

Κατά τη θραύση χρησιμοποιούνται ειδικά σφυροφόρα μηχανήματα. Η απομάκρυνση του σπλισμού γίνεται χειρωνακτικά κατά την πρώτη θραύση και με τη χρήση ειδικών μηχανημάτων (μαγνητικών) κατά τη δεύτερη θραύση στο εργοτάξιο. Οι σπαστήρες που χρησιμοποιούνται είναι ενισχυμένοι σιαγονοφόροι σπαστήρες και σφυροφόροι σπαστήρες.

Η μέθοδος της ανακύκλωσης αυτής χρησιμοποιείται σε κράτη με αναπτυγμένη τεχνολογία κατασκευής δύσκαμπτων οδοστρωμάτων τα οποία επιδιώκουν οικονομία στα φυσικά αποθέματα αδρανών για περιβαλλοντικούς λόγους.



Εικόνες 1.8.6 - 1.8.7: Αυτοματοποιημένες διατάξεις ανακύκλωσης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ^[4]

Πίνακας 1.8.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων ανακύκλωσης

Κατηγορία ανακύκλωσης		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Επιφανειακή		Βελτιώνεται η επιπεδότητα της οδού. Αποκαθίστανται πτυχώσεις - αυλακώσεις, ανάδυση και οξειδωση ασφάλτου. Βελτιώνεται η συνοχή με τον υπερκείμενο τάπητα. Βελτιώνεται η ανπολισθηρή ικανότητα. Αποφεύγεται η υπερύψωση ερυθράς. Μικρή παρενόχληση στην κυκλοφορία.	Μη βελτίωση δομικής ικανότητας. Μηχάνημα απόξεσης δεν είναι αποδοτικό για ασφαλτόμιγμα με μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας ή για κόκκους αδρανών >25mm Εκπομπή σκόνης.
Εν Θερμώ	Επί της Οδού	Θεραπεύονται όλες οι επιφανειακές κακώσεις. Βελτιώνεται η ποιότητα οδήγησης. Εκμηδενίζονται οι ρωγμές ανάκλασης. Βελτιώνεται η δομική ικανότητα.	Ποιοτικός έλεγχος όχι τόσο καλός. Παρενόχληση της κυκλοφορίας. Κόστος μηχανημάτων φρεζαρίσματος. Συχνή συντήρηση μηχανημάτων φρεζαρίσματος.
	Μόνιμη Εγκατάσταση	Βελτιώνεται η ποιότητα οδήγησης. Θεραπεύονται οι κακώσεις. Επέρχεται ουσιαστική βελτίωση δομικής ικανότητας. Εκμηδενίζονται οι ρωγμές ανάκλασης. Καλός ποιοτικός έλεγχος. Αποτελεσματική διόρθωση των κλίσεων.	Μεγαλύτερη παρενόχληση στην κυκλοφορία. Πιθανότητα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από συγκρότημα παραγωγής.
Εν ψυχρώ	Επί της οδού	[Όπως και στην εν θερμώ ανακύκλωση] Εξοικονόμηση περισσότερης ενέργειας. Σχεδόν μηδενική ατμοσφαιρική ρύπανση. Χαμηλότερο κόστος.	[Όπως και στην εν θερμώ ανακύκλωση] Απαιτείται ωρίμανση του μίγματος για περισσότερη ευστάθεια. Απαιτείται ασφατική επάλειψη ή διάστρωση ασφατικής επιφανειακής στρώσης από θερμό ασφαλτόμιγμα.
	Μόνιμη Εγκατάσταση	[Όπως και στην εν ψυχρώ ανακύκλωση] Καλύτερος ποιοτικός έλεγχος. Επιφανειακή επάλειψη ή τάπητας μπορεί να αποφευχθούν.	[Όπως και στην εν ψυχρώ ανακύκλωση] Μεγαλύτερη παρενόχληση στην κυκλοφορία.
Δύσκαμπτα οδοστρώματα		Δεν έχω εναπόθεση παλαιών πλακών. Περιορίζεται η έλλειψη αδρανών για ορισμένες χώρες. Αυξάνεται η αντίσταση σε ψύξη - θέρμανση σε σχέση με ορισμένα φυσικά αδρανή.	Υψηλό πορώδες. Εάν χρησιμοποιηθεί ως άμμος μειώνεται η εργασιμότητα του μίγματος και αυξάνεται η ποσότητα του τσιμέντου στο μίγμα. Η ύπαρξη σιδήρου αυξάνει το μηχανικό και εργατικό κόστος θραύσης.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Για την κατασκευή ενός δρόμου με τη μέθοδο της επαναχρησιμοποίησης υλικών χρησιμοποιούνται κοινά μηχανήματα οδοποιίας όπως:

- ❑ φορτηγά αυτοκίνητα
- ❑ συμπυκνωτές
- ❑ οδοστρωτήρες
- ❑ ισοπεδωτήρες (grader)

Εκτός όμως από αυτό το μηχανικό εξοπλισμό είναι απαραίτητη και η χρήση εξειδικευμένων μηχανημάτων όπως :

- ❑ φρέζα (milling machine)

Κινείται πάνω σε τροχούς ή ερπύστριες και μέσω περιστρεφόμενου οδοντωτού τύμπανου αποξέει – θρυμματίζει – φρεζάρει το οδόστρωμα. Το πλάτος του τύμπανου κυμαίνεται από 1 έως 3,5 μέτρα, ενώ το βάθος φθάνει έως και τα 35 εκατοστά. Συνήθως, προτιμάται το εύρος του τύμπανου να είναι από 1,3 m έως 2 m. Το βάθος του φρεζαρίσματος εξαρτάται από την απόσταση του τυμπάνου από την επιφάνεια του οδοστρώματος και από τον τύπο των κοπτικών εργαλείων. Η ταχύτητα κίνησης κατά τη λειτουργία του μηχανήματος είναι συνήθως 3 έως 12 m ανά λεπτό.

Ακόμα έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει τα υλικά που εξάγονται, με τη βοήθεια ενός συστήματος μεταφορικών ταινιών στην περίπτωση της ανακύκλωσης σε μόνιμη εγκατάσταση.



Εικόνα 1.8.8: Τύμπανο^[4]



Εικόνα 1.8.9: Σύστημα μεταφορικών ταινιών^[4]

□ Σύστημα θέρμανσης της επιφάνειας

Η θέρμανση της επιφάνειας μπορεί να γίνει μέσω υπέρθερμου συμπιεσμένου αέρα και υπέρυθρων ακτινών (μικροκυμάτων). Η θερμοκρασία που απαιτείται ρυθμίζεται, και για τα δύο συστήματα, μεταβάλλοντας ανάλογα το ύψος της θερμαντικής εστίας (πλάκας), την ταχύτητα κίνησης του μηχανήματος ή τον αριθμό των θερμαντικών πηγών. Το σύστημα αυτό, για λόγους ευκολίας, μπορεί να είναι ενσωματωμένο στην φρέζα.



Εικόνα 1.8.10: Μηχάνημα ανακύκλωσης με ενσωματωμένη θερμαντική εστία ^[4]

□ Λεπιδοφόρο μηχανήμα (planer)

Είναι grader με ειδικά σκληρυνμένη λεπίδα. Η απόξεση με το μηχανήμα αυτό γίνεται σχεδόν πάντοτε αφού η επιφάνεια προθερμανθεί. Ορισμένες μέρες μόνο του καλοκαιριού μπορεί να μη χρησιμοποιηθεί προθέρμανση της επιφανείας, πλην όμως η απόδοση αλλά και η ποιότητα της εργασίας δεν θα είναι η ίδια με αυτή που θα υπήρχε αν είχε προθερμανθεί η επιφάνεια.

Η απόξεση με λεπιδοφόρο μηχανήμα χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις προσωρινής αποκατάστασης των πτυχώσεων, της παραμόρφωσης του οδοστρώματος ή της ανάδυσης της ασφάλτου, καθώς επίσης και στην αποξήλωση ασφαλικών επαλείψεων και ψυχρών ή θερμών λεπτοταπήτων.

Λεπιδοφόρα μηχανήματα για επιφανειακή ανακύκλωση διατίθενται ως μία μονάδα ή ως δύο, δηλαδή με το σύστημα θέρμανσης ενσωματωμένο ή ξεχωριστά. Επίσης, σε ορισμένες χώρες διατίθενται τα μηχανήματα αυτά και με σύστημα δόνησης στη λεπίδα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μηχανήματα αυτά να είναι σε θέση να αποξύσουν σε βάθος μέχρι και 50mm, με μεγάλη ευκολία. Ένα άλλο πλεονέκτημα στην περίπτωση χρησιμοποίησης λεπίδας με δόνηση είναι ότι η αποκαλυφθείσα επιφάνεια είναι πιο αδρή, με αποτέλεσμα να διασφαλίζεται η πρόσφυση της νέας επίστρωσης. ^[10]

❑ ειδικός αναμοχλευτής (scarifier)

Έχει ειδικά κοπτικά εργαλεία που περιστρέφονται στο κάθετο άξονα. Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των επιφανειακών ανωμαλιών του οδοστρώματος και λειτουργεί πάντοτε με προθέρμανση της επιφάνειας. Το βάθος κοπής καθορίζεται από την απόσταση ανάμεσα στην επιφάνεια του δρόμου και τα κοπτικά εργαλεία.

ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η εν ψυχρώ ανακύκλωση επί της οδού περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

➤ κατακερματισμό του παλαιού οδοστρώματος

Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση και κατακερματισμό του οδοστρώματος μπορεί να είναι ένας διαμορφωτήρας (grader), μία μπουλντόζα με δόντια, ή ένα ρίπερ, μαζί με έναν αναμοχλευτή με κοπτικά εργαλεία που περιστρέφονται στον κάθετο άξονα, ή από μόνη της μία φρέζα.

➤ προσθήκη ασφαλτικού γαλακτώματος

➤ προσθήκη νέων αδρανών

Πραγματοποιείται συνήθως στην περίπτωση ανάμιξης σε μόνιμο συγκρότημα.

➤ ανάμιξη και διάστρωση

Το μηχάνημα που χρησιμοποιείται στην απλούστερη περίπτωση για την ανάμιξη και τη διάστρωση είναι ο διαμορφωτήρας (grader). Τα τελευταία χρόνια για λόγους κυρίως εντατικοποίησης της εργασίας έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αυτοκινούμενα μηχανήματα παραγωγής και διάστρωσης στα οποία η τροφοδοσία γίνεται από χοάνη υποδοχής ή από σειράδιο.

➤ αερισμό του μίγματος

Σκοπός του αερισμού είναι η εξάτμιση κάποιας ποσότητας ύδατος έτσι ώστε το υλικό να αποκτήσει τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία και η συμπίκνωση να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στις περιπτώσεις αυτές, το ανακυκλούμενο ασφαλτόμιγμα τοποθετείται σε σειράδιο επί της οδού και με τη βοήθεια διαμορφωτήρα (grader), διαστρώνεται σε αλληπάλληλες λεπτές στρώσεις μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό συνολικό πάχος.

➤ συμπίκνωση

Γίνεται με το διαδοχικό πέρασμα ενός οδοστρωτήρα μεγάλου βάρους και ενός δονούμενου με διπλό τύμπανο. Συχνότατα χρησιμοποιούνται πυρηνικές συσκευές

για τον έλεγχο της υγρασίας και της πυκνότητας του μίγματος κατά την συμπίκνωση.

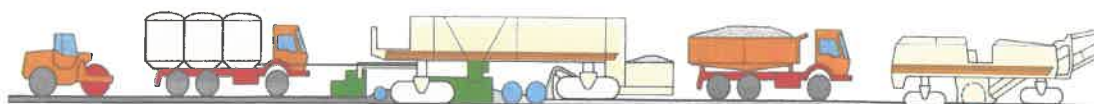
➤ ωρίμανση

Η εκτέλεση εργασιών της κατασκευής της επιφανειακής στρώσης θα πρέπει να γίνεται μετά την πάροδο κάποιου χρονικού διαστήματος, έτσι ώστε η συνολική υγρασία που εμπεριέχεται στο μίγμα να μειώνεται στο 1% με 2%

➤ διάστρωση τάπητα ή ασφαλτικής επάλειψης

Οι παραπάνω εργασίες μπορούν να γίνουν από ένα και μόνο μηχάνημα γνωστό ως συρμός ή τρένο, το οποίο επιπλέον φέρει και ειδικό σπαστήρα για την περαιτέρω μείωση του μεγέθους των τεμαχίων του ανακατωμένου ασφαλτομίγματος.

Το μηχάνημα αυτό ουσιαστικά αποτελείται από μια σειρά απλούστερων μηχανημάτων συνδεδεμένα κατάλληλα με ένα κεντρικό μηχάνημα, τον ανακυκλωτή, το οποίο τα ωθεί ή τα έλκει. Η διάταξη των μηχανημάτων παρουσιάζεται στο Σχ 1.8.11



Εικόνα 1.8.11: Διάταξη μηχανημάτων εν ψυχρώ ανακύκλωσης ^[4]

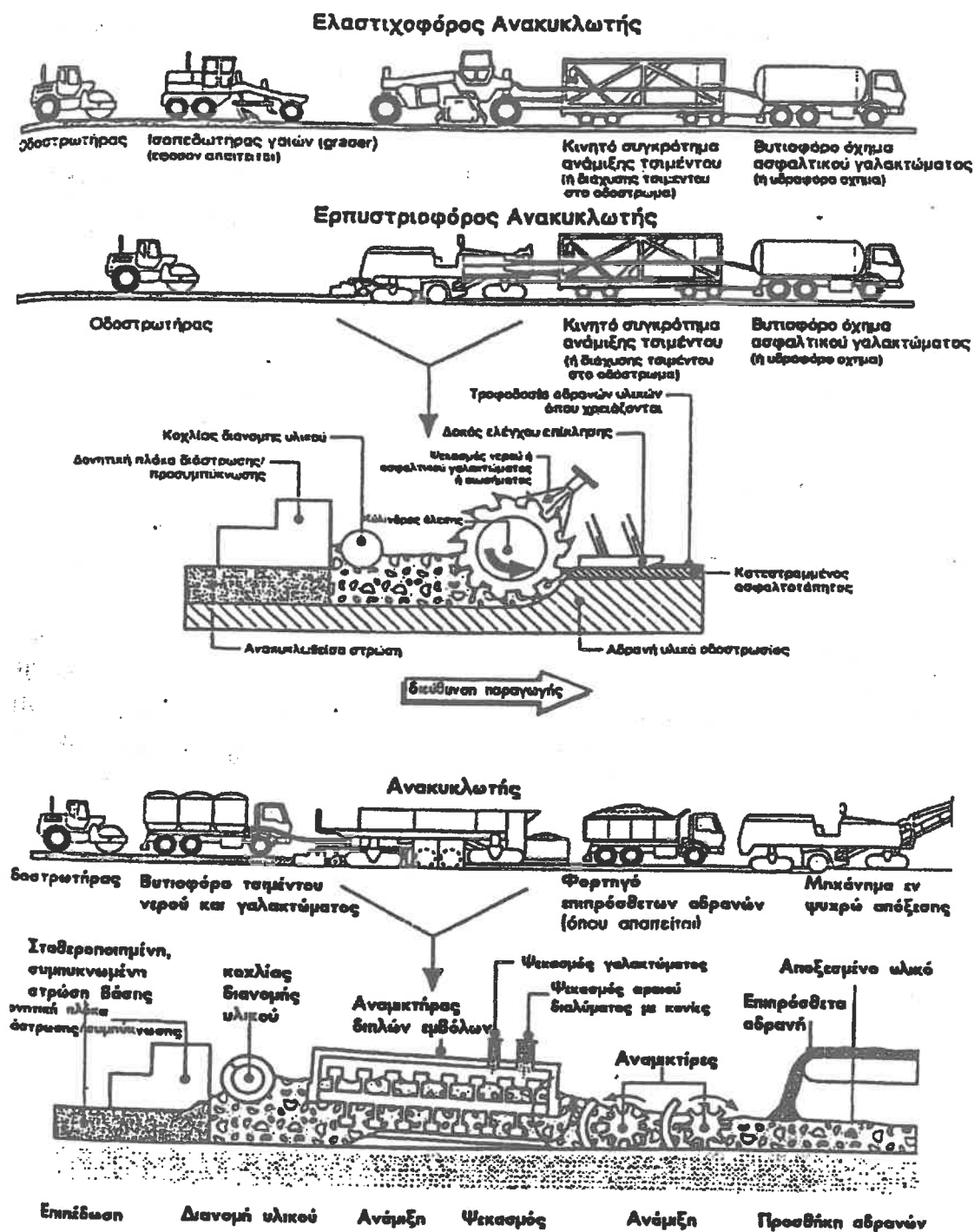
Ο ανακυκλωτήρας αποτελείται από ένα κύλινδρο με μεγάλο αριθμό ειδικών κοπτικών εξαρτημάτων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ο θρυμματισμός και η ανάμιξη. Το τύμπανο ρυθμίζεται να περιστρέφεται και να αποξέει το υφιστάμενο οδόστρωμα στο επιθυμητό βάθος. Καθώς ο θρυμματισμός προχωράει, νερό από βυτιοφόρο όχημα, εισέρχεται στον κύλινδρο ανάμιξης. Η ακριβής ποσότητα νερού καθορίζεται από μικρό-επεξεργαστή ελεγχόμενης αντλίας. Έτσι, αναμειγνύεται το νερό ταυτόχρονα με το θρυμματισμένο υλικό και επιτυγχάνεται η βέλτιστη υγρασία για συμπίκνωση.

Με ανάλογο τρόπο προστίθενται και τα σταθεροποιητικά υλικά, όπως το τσιμέντο (slurry), το ασφαλικό γαλάκτωμα και η άσβεστος αν και τα υλικά που είναι σε μορφή σκόνης συνήθως διασκορπίζονται μέσω φορτηγού που προπορεύεται του αναμικτήρα, ώστε όταν περάσει ο κύλινδρος άλεσης να τα αναμίξει. Ο ανακυκλωτήρας έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζεται ώστε να διαστρώνει το υλικό σύμφωνα με τις απαιτούμενες κλίσεις, επικλήσεις και πάχη.

Τέλος, ακολουθεί κατάλληλος οδοστρωτήρας ο οποίος συμπυκνώνει το μίγμα. Ο αριθμός των διελεύσεων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του έργου, όπως είναι το πάχος και ο επιθυμητός βαθμός συμπυκνώσεως.

Το μειονέκτημα αυτού του μηχανήματος είναι ο όγκος του, ο οποίος το κάνει να υστερεί σε ευελιξία σε σύγκριση με τα άλλα μηχανήματα καθώς και το γεγονός ότι είναι πολύ δαπανηρό στην απόκτησή του και στο κόστος συντήρησής του.

ΤΥΠΙΚΗ ΟΜΑΔΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ



Εικόνα 1.8.12: Τυπική ομάδα μηχανημάτων κατασκευής οδοστρωμάτων με ανακύκλωση υλικών

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΤΟΠΙΑΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Τα πλεονεκτήματα την επιτόπιας εν ψυχρώ ανακύκλωσης είναι τα ακόλουθα:

➤ Μειωμένος χρόνος

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του έργου είναι μικρότερος από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο αποκατάστασης και με αυτό τον τρόπο έχουμε γρήγορη αποκατάσταση της κυκλοφορίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εργασίες γίνονται συντονισμένα με τον κατάλληλο εξοπλισμό, ο οποίος δίνει την δυνατότητα εργασίας ακόμα και σε άσχημες καιρικές συνθήκες, αλλά με αυξημένο κόστος.

➤ Ασφάλεια

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το επίπεδο ασφάλειας που μπορεί να επιτευχθεί. Ο συρμός μπορεί να κυκλοφορήσει στο πλάτος μίας μόνο λωρίδας κυκλοφορίας, επιτρέποντας με ασφάλεια την κυκλοφορία των οχημάτων στο άλλο ρεύμα. Επιπλέον, λόγω της συντονισμένης εργασίας όλων των μηχανημάτων, ο χρόνος περάτωσης είναι μικρότερος με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος έκθεσης σε κίνδυνο τόσο των αυτοκινητιστών όσο και των εργατών. Κατά συνέπεια το υψηλό επίπεδο ασφάλειας οδηγεί σε μείωση του κινδύνου ατυχημάτων.

➤ Ποιότητα κατασκευής

Η ποιότητα του τελικού οδοστρώματος είναι πολύ καλή, ενώ αυξάνεται και η διάρκεια ζωής του εν συγκρίσει με τις κλασσικές μεθόδους επισκευής του. Άλλωστε, η άλεση των φρεζαρισμένων υλικών πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια γεγονός που βελτιώνει τις ιδιότητες του οδοστρώματος. Η ανάμιξη των υλικών με τους σταθεροποιητές και το νερό ελέγχεται ηλεκτρονικά και διαχέεται κατά μήκος όλου του πλάτους του κυλίνδρου, με τη βοήθεια μιας σειράς ακροφυσίων, με αποτέλεσμα την καλή ομοιογένεια. Επίσης, οι κλίσεις και τα πάχη ελέγχονται ηλεκτρονικά με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται τα λάθη.

➤ Προστασία περιβάλλοντος

Χρησιμοποιούνται παλαιά υλικά (φρεζαρισμένα) τα οποία δεν λαμβάνονται εκ νέου από το περιβάλλον (διατήρηση φυσικών πόρων), ενώ δεν έχουμε περαιτέρω επιβάρυνση εξαιτίας της απόρριψης των φθαρμένων υλικών όπως συμβαίνει με τις άλλες μεθόδους εξυγίανσης του οδοστρώματος. Έτσι, επιτυγχάνεται η προστασία του περιβάλλοντος, ξοδεύεται λιγότερη ενέργεια για την επιδιόρθωση του οδοστρώματος

και μειώνεται η εκπομπή ρύπων και η όχληση του οδικού δικτύου από τη μεταφορά των υλικών. Επιπλέον, η υψηλή τεχνολογία έχει οδηγήσει στη μείωση του θορύβου, της εκπεμπόμενης σκόνης και καυσαερίων με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και τη μείωση του χρόνου περάτωσης του έργου.

➤ **Μείωση κόστους**

Το κόστος κατασκευής σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους είναι αισθητά μειωμένο λόγω της σημαντικά ελαττωμένης αγοράς νέων αδρανών και μεταφοράς τους, αλλά και του μηδενισμού του κόστους απόθεσης των φθαρμένων υλικών.

Επίσης, στη μέθοδο αυτή αυξάνεται το πάχος της υπόβασης κατά 50 mm με συνέπεια να παρέχεται το περιθώριο μείωσης της ασφάλτου τουλάχιστον κατά 25 mm, χωρίς να μεταβληθεί ο προβλεπόμενος χρόνος ζωής του οδοστρώματος. Έτσι, η εξοικονόμηση χρημάτων είναι τεράστια δεδομένου του μεγάλου κόστους της ασφάλτου.

Επιπλέον, η χρήση του τυμπάνου άλεσης επιτυγχάνει καλή κοκκομετρική διαβάθμιση με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η προσθήκη επιπλέον αδρανών., ενώ λόγω της αποτελεσματικότητας της ανάμιξης του σταθεροποιητικού μέσου με τα αδρανή, μπορούν να μειωθούν οι ποσότητες του σταθεροποιητικού μέσου με μεγάλα οικονομικά οφέλη. Τέλος, η συστηματοποίηση των εργασιών συγκρινόμενη με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, επιφέρει συνολική μείωση καυσίμων και εργατωρών.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΤΟΠΙΑΣ ΕΝ ΨΥΧΡΩ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Τα μειονεκτήματα της επιτόπιας εν ψυχρώ ανακύκλωσης είναι τα ακόλουθα:

➤ **Έλλειψη εμπειρίας**

Η μέθοδος της εν ψυχρώ ανακύκλωσης εφαρμόζεται τα τελευταία μόνο χρόνια με επακόλουθο να υπάρχει έλλειψη γνώσης και εμπειρίας σε επίπεδο μελέτης των ως προς ανακύκλωση υλικών και των αντίστοιχων χαρακτηριστικών τους. Επιπλέον, η ανυπαρξία τεχνικών προδιαγραφών οδηγεί στη χρήση προδιαγραφών από συμβατικές λύσεις «εν ψυχρώ», με μερικές προσαρμογές. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος που οι κατασκευές αυτές χαρακτηρίζονται γενικά από έλλειψη συστήματος ελέγχου ποιότητας.^[11]

➤ **Κατασκευαστικές ατέλειες**

Η διάστρωση σε λωρίδες μπορεί, ορισμένες φορές, να είναι η αιτία εμφάνισης διαμήκων ρωγμών με συνέπεια την διείσδυση του νερού στις κατώτερες στρώσεις.

➤ **Κόστος αγοράς**

Το κόστος κτήσης και συντήρησης ενός μηχανήματος συρμού είναι τεράστιο.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η μέθοδος της επιτόπιας εν ψυχρώ ανακύκλωσης είναι μια μέθοδος με ελάχιστα αρνητικά σημεία, τα οποία οφείλονται στο γεγονός ότι είναι πολύ πρόσφατη. Με την πάροδο των χρόνων και την απόκτηση περισσότερων εμπειριών, τα μειονεκτήματά της όλο και θα ελαττώνονται, και η μέθοδος της επιτόπιας εν ψυχρώ ανακύκλωσης θα κατακτά έδαφος έναντι των άλλων μεθόδων με σημαντικό περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος.

ΜΕΡΟΣ 2ο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.1: ΕΞΕΤΑΣΘΕΝΤΑ ΜΙΓΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ

Τα πάχη της ασφαλικής στρώσης αλλά και των υποκείμενων στρώσεων από ασύνδετο αμμοχαλίκιο διαφέρουν από οδό σε οδό με συνέπεια κατά την εφαρμογή της μεθόδου της ανακύκλωσης η ανακυκλωμένη στρώση να περιέχει διαφορετικά ποσοστά φρεζαρισμένου υλικού και αμμοχαλίκου. Έτσι λοιπόν κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά πέντε διαφορετικών συνθέσεων θραυστού - φρεζαρισμένου υλικού ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος, δεδομένης της μεταβλητότητας της ασφαλικής στρώσης που συναντάται κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην πράξη. Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν πέντε δοκίμια (εξαιρουμένης της σύνθεσης 100 / 0, όπου η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή και ξεφεύγει από το σκοπό αυτής της διπλωματικής) για κάθε θερμοκρασία που επρόκειτο να εξεταστεί ώστε να έχουμε ένα επαρκές δείγμα για κάθε σύνθεση και να εξαχθούν αντιπροσωπευτικοί μεσοί όροι .

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ανακυκλωμένης στρώσης βάσης οδοστρώματος, όπως αυτή προκύπτει από την ανάμιξη φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ασφάλτου και στρώσης βάσης ή και υπόβασης έως βάθους 300mm από την επιφάνεια) με θραυστά αδρανή σε διάφορες αναλογίες, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.1, υπό την επίδραση της θερμοκρασίας (μέσης 23 °C, υψηλής 40 °C και χαμηλής 5 °C *). Συνολικά λοιπόν παρασκευάστηκαν 70 δοκίμια.

Πίνακας 2.1.1: Σύνθεση και αρίθμηση δοκιμίων

Σύμβολο	Μίγμα	Ποσοστό θραυστού υλικού	Ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού	Αριθμός δοκιμίων	Αρίθμηση δοκιμίων
I	100 / 0	100 %	0 %	10	1-5, 26-30
II	75 / 25	75 %	25 %	15	6-10, 31-35, 51-55*
III	50 / 50	50 %	50 %	15	11-15, 36-40, 56-60*
IV	25 / 75	25 %	25 %	15	16-20, 41-45, 61-65*
V	0 / 100	0 %	100 %	15	21-25, 46-50, 66-70*

* Λόγω προβλήματος της πρέσας MTS στα δοκίμια 51-70 –παρόλο που παρασκευάστηκαν- δεν έγιναν οι σχεδιασμένες μετρήσεις της θερμοκρασίας των 5 °C, μειώνοντας συνεπώς τον αριθμό δοκιμίων υπό εξέταση από 70 σε 50, με αποτέλεσμα η επίδραση της θερμοκρασίας να γίνει μόνο για τις θερμοκρασίες των 23 και 40 °C).

Στα ανωτέρω μίγματα εξετάστηκαν τα ακόλουθα μηχανικά χαρακτηριστικά:

- Αντοχή πρίσματος σε κάμψη
- Αντοχή πρίσματος σε θλίψη (μονοαξονική θλίψη)
- Αντοχή ισοδύναμου κύβου σε θλίψη
- Μέτρο ελαστικότητας πρίσματος σε κάμψη
- Μέτρο ελαστικότητας πρίσματος σε κάμψη με διόρθωση λόγω διάτμησης
- Μέτρο ελαστικότητας πρίσματος σε θλίψη

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μια εβδομάδα μετά την παρασκευή των δοκιμίων, η οποία είναι η «ηλικία αναφοράς» ώστε τα δοκίμια να έχουν αποκτήσει ικανοποιητικό ποσοστό της αντοχής τους. Έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ και στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου. Στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ έγιναν όλες οι μετρήσεις πλην της δοκιμής ισοδύναμου κύβου, η οποία έγινε στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου.

ΥΛΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν υλικά του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ με τα εξής χαρακτηριστικά:

- ❑ Τσιμέντο τύπου ΙΙ 35 σε ποσοστό 5 % κ.β.
- ❑ Νερό σε ποσοστό 5,2 % έως 5,5 % κ.β. (η πλειοψηφία των δοκιμίων είχαν 5,3 % κ.β. νερό)
- ❑ Αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου 19,05 mm

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΙΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση για την κοκκομετρική σύνθεση των υλικών αρχικά πραγματοποιήθηκε σε θραυστό αμμοχάλικο και σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα. Η διάταξη με την οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των μιγμάτων αποτελείται από επάλληλα κόσκινα στα οποία τοποθετείται το υλικό και δονείται. Η διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.1.



Εικόνα 2.1.1: Διάταξη κοσκινίσματος υλικού

Τα θραυστά υλικά δεν είναι καθαρά αδρανή αλλά προέρχονται από υλικά οδοστρωσίας (ΠΤΠ Ο 150,155) ώστε να διαφέρουν όσο το δυνατό λιγότερο από τα υλικά που υπάρχουν στα έργα ανακύκλωσης. Τα φρεζαρισμένα υλικά προέρχονται από τον κατακερματισμό - φρεζάρισμα υπαρχόντων οδοστρωμάτων. Η κοκκομετρική διαβάθμιση και οι καμπύλες των θραυστών και φρεζαρισμένων υλικών παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1.2, 2.1.3 και στα διαγράμματα 2.1.1, 2.1.2 αντίστοιχα:

Πίνακας 2.1.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστών υλικών

Κόσκινο	Άνοιγμα κοσκινού (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)	
		Χονδρόκοκκο	Άμμος
3/4"	19.05	99.5	
5/8"	15.85	87.3	
1/2"	12.7	61.3	
3/8"	9.52	25.7	
1/4"	6.35	2.8	
No 4	4.76	0.3	100.0
No 8	2.38		84.2
No 16	1.19		64.9

No 30	0.59		47.4
No 50	0.297		37.8
No 100	0.149		29.5
No 200	0.074		23.5

Πίνακας 2.1.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση φρεζαρισμένων υλικών

Κόσκινο	Άνοιγμα κοσκινού (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)		
		Χαλίκι	Γαρμπίλι	Άμμος
3/4"	19.05	98.6		
5/8"	15.85	93.4		
1/2"	12.7	44.8	99.1	
3/8"	9.52	2.4	94.5	
1/4"	6.35	0.4	52.0	
No 4	4.76		5.4	97.4
No 8	2.38		1.0	55.7
No 16	1.19			29.8
No 30	0.59			11.5
No 50	0.297			5.2
No 100	0.149			2.1
No 200	0.074			0.6

Από τη μελέτη της κοκκομετρικής καμπύλης του θραυστού αμμοχάλικου (διάγραμμα 2.1.2) διαπιστώθηκε ότι λόγω της ποιότητας των χονδρόκοκκων αδρανών η καμπύλη παρουσιάζει ασυνέχεια και συγκεκριμένα στην περιοχή 4,76 mm και 6,35mm, όπου η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να εμπλουτιστεί το μίγμα με ψηφίδα σε ποσοστό 5% (1/4-No4). Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος I πριν και μετά την προσθήκη της ψηφίδας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 2.1.3.

Οι αναλογίες που επιλέχθηκαν για τα μίγματα II,III,IV προέκυψαν από τα υλικά I,II ανάλογα το ποσοστό σε φρεζαρισμένο υλικό και φαίνονται στον Πίνακα 2.1.4.

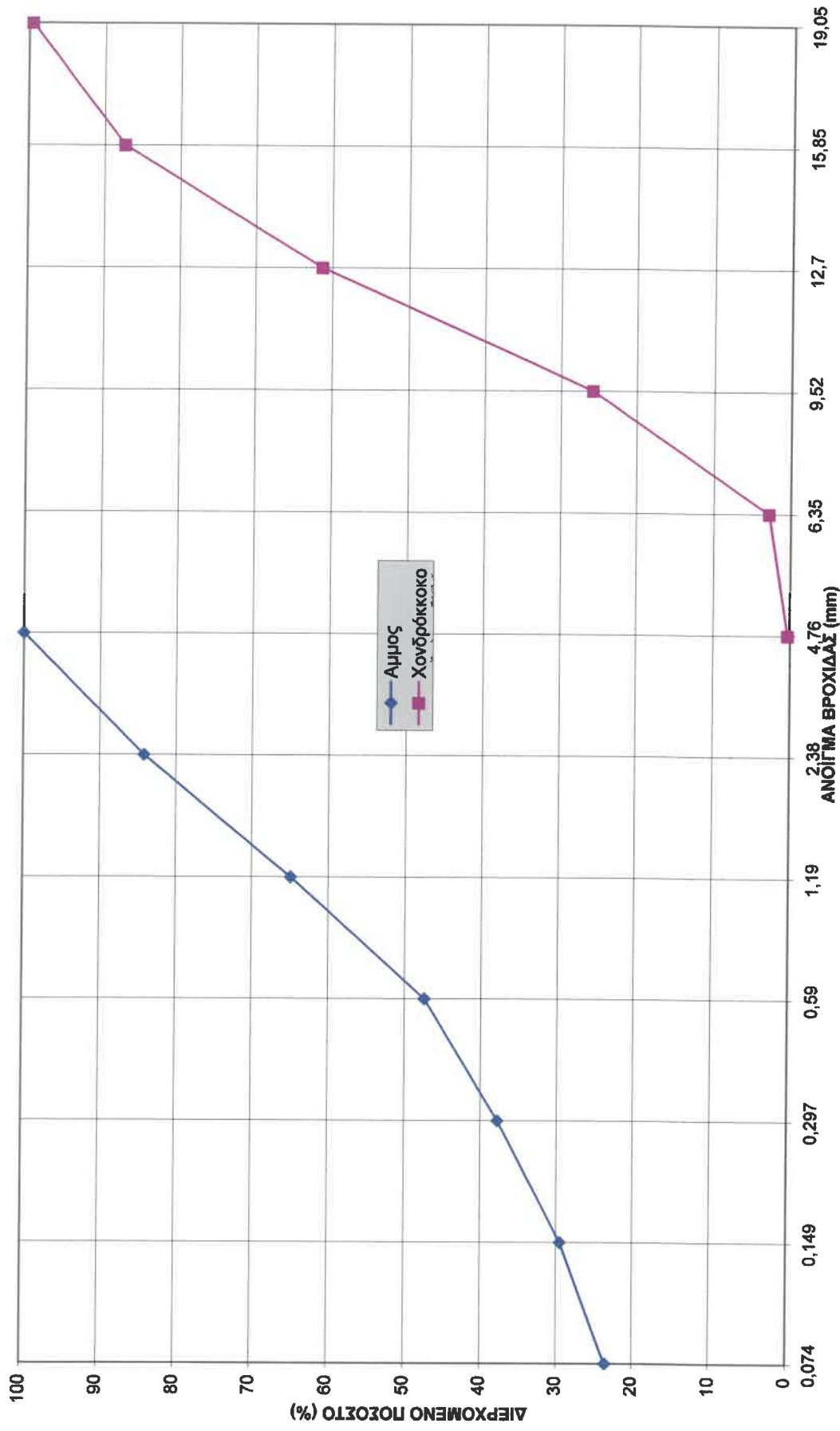
Πίνακας 2.1.4: Αναλογίες αδρανών για τα μίγματα

ΑΔΡΑΝΗ		ΜΙΓΜΑΤΑ				
		100 / 0	75 / 25	50 / 50	25 / 75	0 / 100
ΘΡΑΥΣΤΟ	ΑΜΜΟΣ	55 %	41,25 %	27,5 %	13,75 %	-
	ΨΗΦΙΔΑ	5 %	3,75 %	2,5 %	1,25 %	-
	ΧΟΝΤΡΟ	40 %	30 %	20 %	10 %	-
ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΕΝΟ	ΑΜΜΟΣ	-	13,75 %	27,5 %	41,25 %	55 %
	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	-	3,75 %	7,5 %	11,25 %	15 %
	ΧΑΛΙΚΙ	-	7,5 %	15 %	22,5 %	30 %

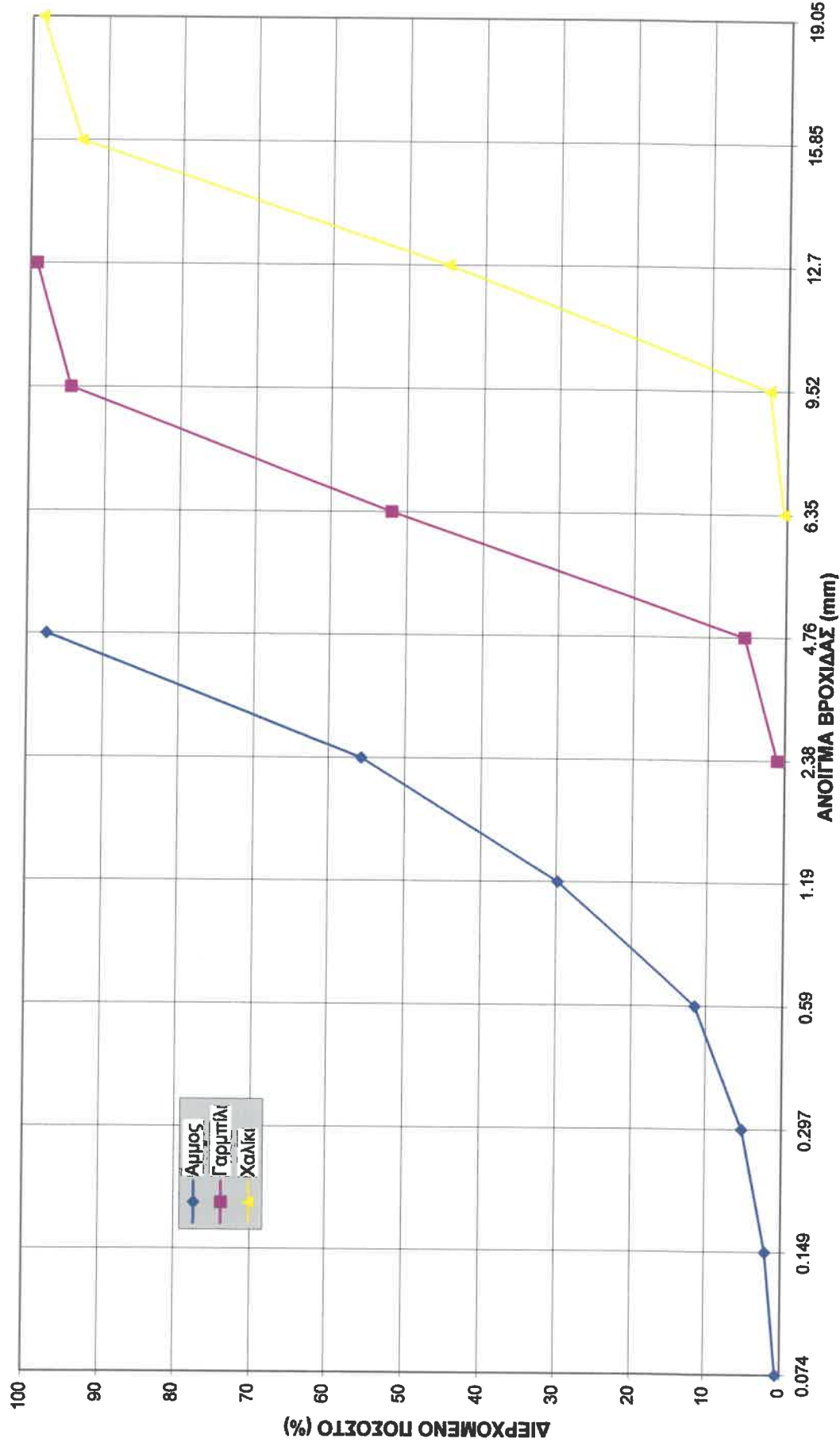
Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω αναλογίες των υλικών οι κοκκομετρικές αναλύσεις των μιγμάτων που θα κατασκευαστούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.5 και οι καμπύλες τους παρουσιάζονται στα σχήματα 2.1.1 – 2.1.4.

Πίνακας 2.1.5 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις μιγμάτων

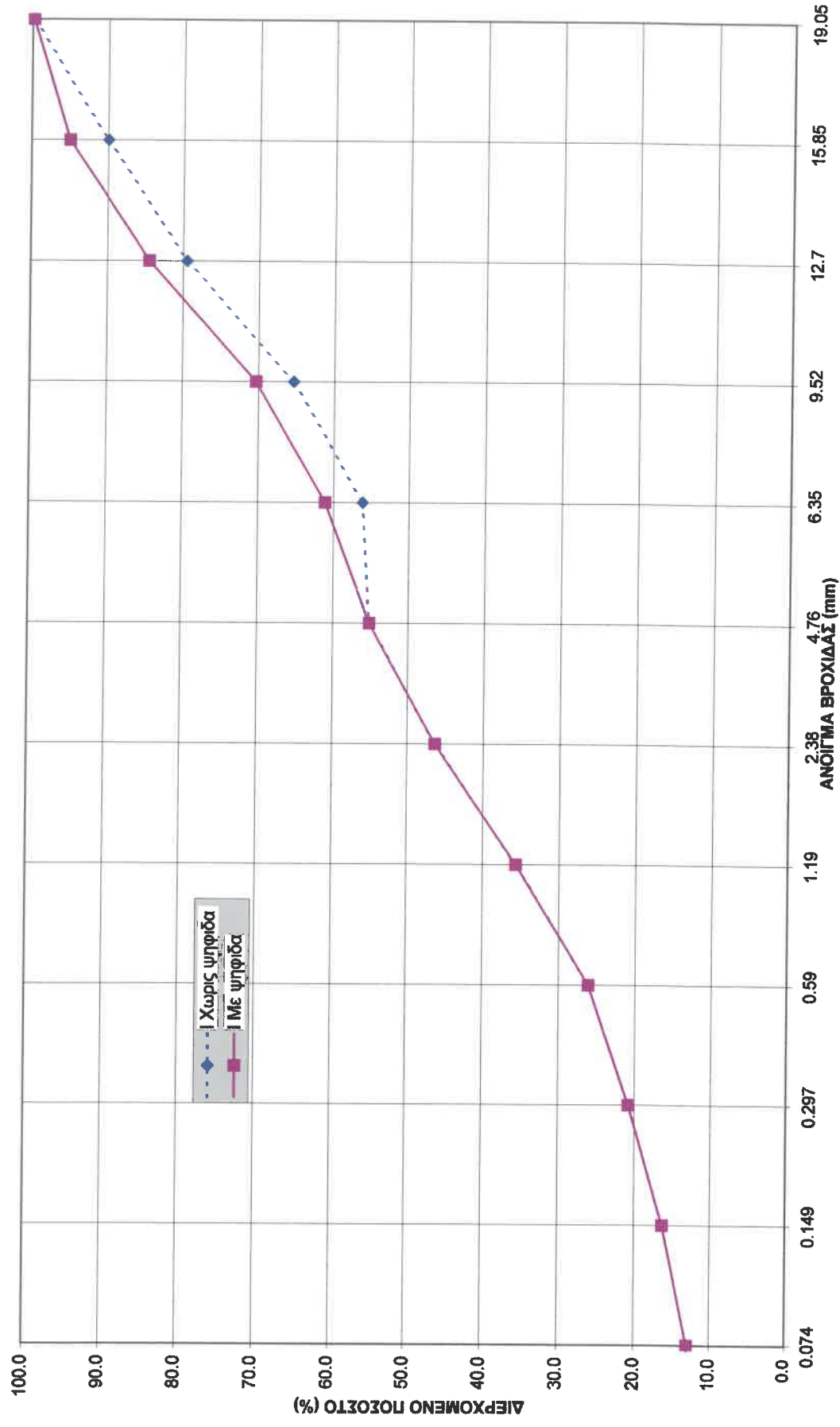
Κόσκινο	Άνοιγμα κοσκινού (mm)	Διερχόμενο ποσοστό (%)				
		I	II	III	IV	V
3/4"	19.05	99.8	99.4	98.9	98.5	98
5/8"	15.85	94.9	95.3	95.7	96.1	96.5
1/2"	12.7	84.5	83.9	83.2	82.6	81.9
3/8"	9.52	70.3	69.9	69.4	69.0	68.5
1/4"	6.35	61.1	61.2	61.3	61.4	61.5
No 4	4.76	55.1	54.9	54.8	54.6	54.4
No 8	2.38	46.3	42.4	38.6	34.7	30.8
No 16	1.19	35.7	30.9	26.1	21.2	16.4
No 30	0.59	26.1	21.2	16.2	11.3	6.3
No 50	0.297	20.8	16.3	11.9	7.4	2.9
No 100	0.149	16.2	12.5	8.7	5.0	1.2
No 200	0.074	12.9	9.8	6.6	3.5	0.3



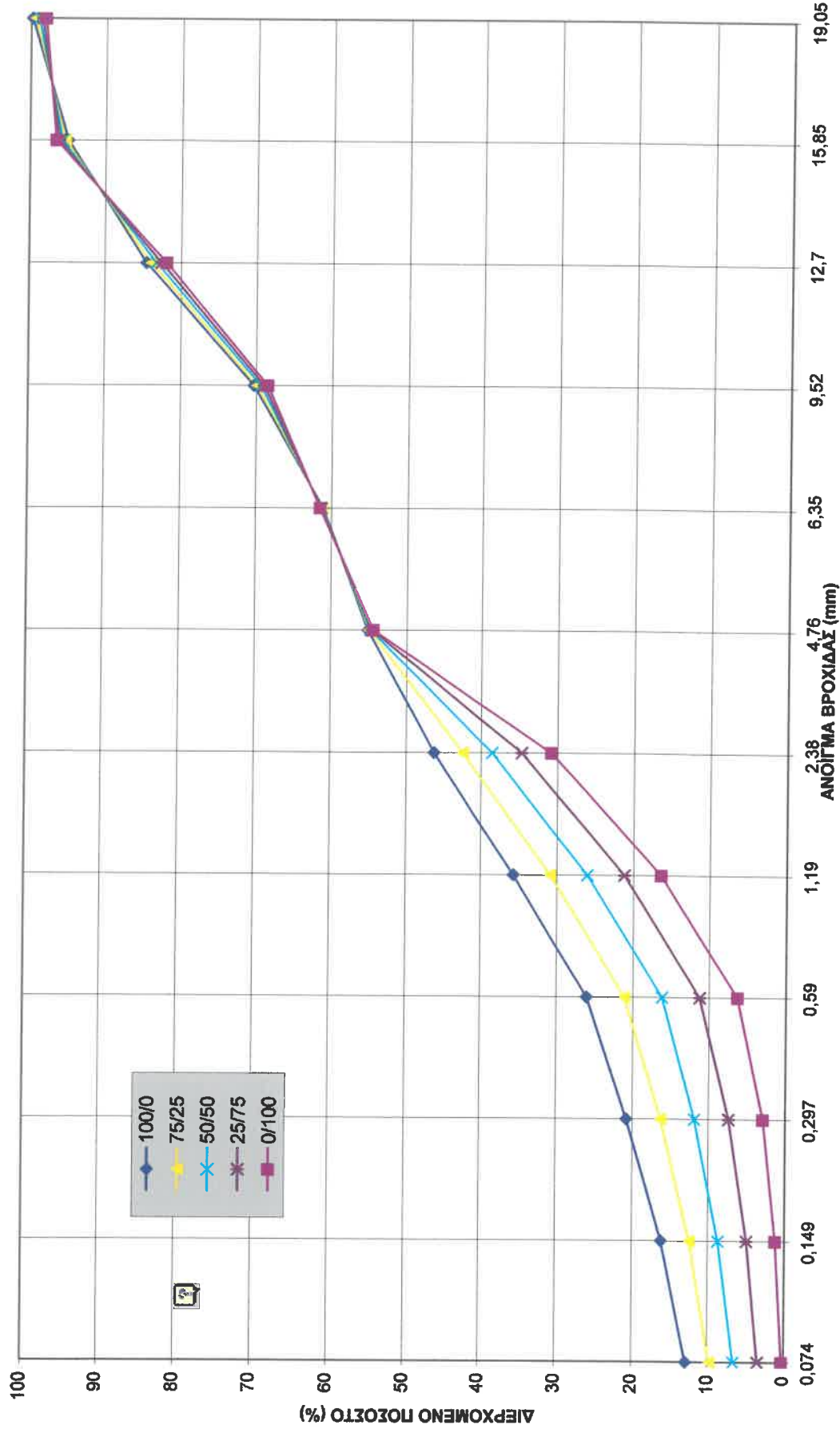
Διάγραμμα 2.1.1:Κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστού αμμοχάλικου



Διάγραμμα 2.1.2:Κοκκομετρική διαβάθμιση φρεζαρισμένου υλικού



Διάγραμμα 2.1.3 :Κοκκομετρική διαβάθμιση θραυστού αμμοχάλικου με προσθήκη ψηφίδας



Διάγραμμα 2.1.4:Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις μιγμάτων

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Δεδομένου ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είχαν 100 % ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο $\frac{3}{4}$ (19,05 mm), χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με ελάχιστη διάσταση 100 mm. Παρασκευάστηκαν, λοιπόν, πρισματικά δοκίμια με διαστάσεις 400mm x 100mm x 100mm.

Συγκεκριμένα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών είναι τα εξής:

- Τα υλικά ζυγίζονται, με το νερό να ζυγίζεται τελευταίο προκειμένου να μη χαθεί βάρος λόγω εξάτμισής του.
- Τα αδρανή τοποθετούνται στον αναμικτήρα, τα τοιχώματα του οποίου έχουν προηγουμένως υγρανθεί (προς αποφυγή απορρόφησης νερού). Ο αναμικτήρας τίθεται σε λειτουργία για 2 min περίπου ενώ ταυτόχρονα προστίθενται τα $\frac{2}{3}$ του βάρους του νερού περίπου (Εικόνα 2.1.2).
- Μετά την πρώτη ανάμιξη σκεπάζεται το μίγμα, ούτως ώστε να γίνει μερική απορρόφηση του νερού από τα αδρανή και ισοκατανομή της υγρασίας στο μίγμα (Εικόνα 2.1.4). Έπειτα από 20 λεπτά συνεχίζεται η ανάμιξη, με την ταυτόχρονη προσθήκη του τσιμέντου και του υπολοίπου νερού (Εικόνα 2.1.3).
- Ελέγχεται μακροσκοπικά η ομοιομορφία του μίγματος και αν χρειαστεί συνεχίζεται η ανάμιξη.



Εικόνες 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4 : Διαδικασία ανάμιξης μίγματος

- Σε λαδωμένες ήδη μήτρες τοποθετείται υλικό, τόσο ώστε τα δοκίμια να συμπυκνωθούν σε δυο στρώσεις ίσου περιόδου πάχους.
- Συμπυκνώνεται το υλικό με δονητική ηλεκτρόσφουρα με εφαρμογή δόνησης και πίεσης. Η δόνηση διαρκεί 2 - 4 sec για κάθε θέση και επαναλαμβάνεται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια 2 φορές (απαιτούνται

περίπου 6 - 8 επαναλήψεις σε κάθε μήτρα), καθώς και μια επιπλέον ταχεία δόνηση σε όλη τη μήτρα (Εικόνα 2.1.5).

- Κατόπιν η επιφάνεια αναμοχλεύεται σε βάθος 2 – 4 mm περίπου έτσι ώστε, με την προσθήκη της δεύτερης στρώσης υλικού, να εξασφαλιστεί η καλή συνάφεια μεταξύ των δυο στρώσεων (Εικόνα 2.1.6).
- Συμπυκνώνεται και η δεύτερη στρώση με τη χρήση επέκτασης της μήτρας καθ' ύψος (χρησιμοποιήθηκε η παράπλευρη επιφάνεια μιας ίδιας μήτρας για αυτό το σκοπό), ώστε να συγκρατείται το υλικό κατά τη συμπύκνωση.
- Όπου το ύψος του υλικού ξεπερνά τα όρια της μήτρας, αφαιρείται το επιπλέον υλικό και με τη χρήση επίπεδης μεταλλικής άκαμπτης πλάκας μεταξύ της ηλεκτρόσφυρας και της μήτρας συμπυκνώνεται ξανά η ελεύθερη επιφάνεια έως ότου αποκτήσει την επιθυμητή επιπεδότητα (Εικόνα 2.1.7).
- Τέλος, η πλάκα απομακρύνεται με οριζόντια περιστροφική κίνηση για να μην απομακρυνθούν μαζί και τυχόν τεμάχια υλικού που έχουν προσκολληθεί.



Εικόνες 2.1.5, 2.1.6, 2.1.7: Στάδια συμπύκνωσης

ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια, αφού καλυφθούν με νάιλον και νωπή λινάτσα, τοποθετούνται στον ειδικό θάλαμο συντήρησης. Σε αυτόν επικρατούν συνθήκες υγρασίας $RH > 95\%$, ενώ η θερμοκρασία κυμαίνεται σε $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Την επομένη μέρα ξεκαλουπώνονται τα δοκίμια και επανατοποθετούνται στο θάλαμο συντήρησης τυλιγμένα αυτή τη φορά με πλαστική μεμβράνη ώστε να αποφευχθεί η εξάτμιση νερού από την επιφάνειά τους που θα αλλοίωνε τις αντοχές τους. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι για την αποφυγή στρέβλωσης τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω σε τεμάχιο από γυαλί λίγο μεγαλύτερων διαστάσεων από τις διαστάσεις των δοκιμών, έτσι ώστε να εδράζονται σε απολύτως επίπεδη επιφάνεια (Εικόνες 2.1.8-2.1.9).



Εικόνες 2.1.8-2.1.9: Ξεκαλούπωμα δοκιμών και τοποθέτηση στο θάλαμο συντήρησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Η θραύση των δοκιμίων στη θερμοκρασία των 40 °C απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα δοκίμια όταν τοποθετούνται στα μηχανήματα να έχουν όντως την παραπάνω θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η διενέργεια κάποιων μετρήσεων ώστε να βεβαιωθούμε ότι :

- Το δοκίμιο εισερχόμενο στο φούρνο θα επιτύχει την επιθυμητή θερμοκρασία μέσα στο διαθέσιμο χρονικό διάστημα, και
- Κατά τη διάρκεια της θραύσης δεν θα μειώνει αισθητά η θερμοκρασία του δοκιμίου.

ΔΟΚΙΜΗ 1

Καταρχήν παρασκευάζεται δοκίμιο το οποίο θα αποτελέσει το προσομοίωμα όλων των δοκιμών ανεξάρτητα αναλογίας φρεζαρισμένου υλικού. Στο δοκίμιο αυτό τοποθετείται θερμόμετρο που μετρά την θερμοκρασία του κέντρου του. Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετείται στο φούρνο (Εικόνα 2.2.1) και ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα σημειώνεται η θερμοκρασία του και η θερμοκρασία που έχει αναπτυχθεί στο περιβάλλον του φούρνου. Επισημαίνεται ότι ο φούρνος λειτουργεί με θερμοστάτη ρυθμισμένο στους 40°C. Στον Πίνακα 2.2.1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν.

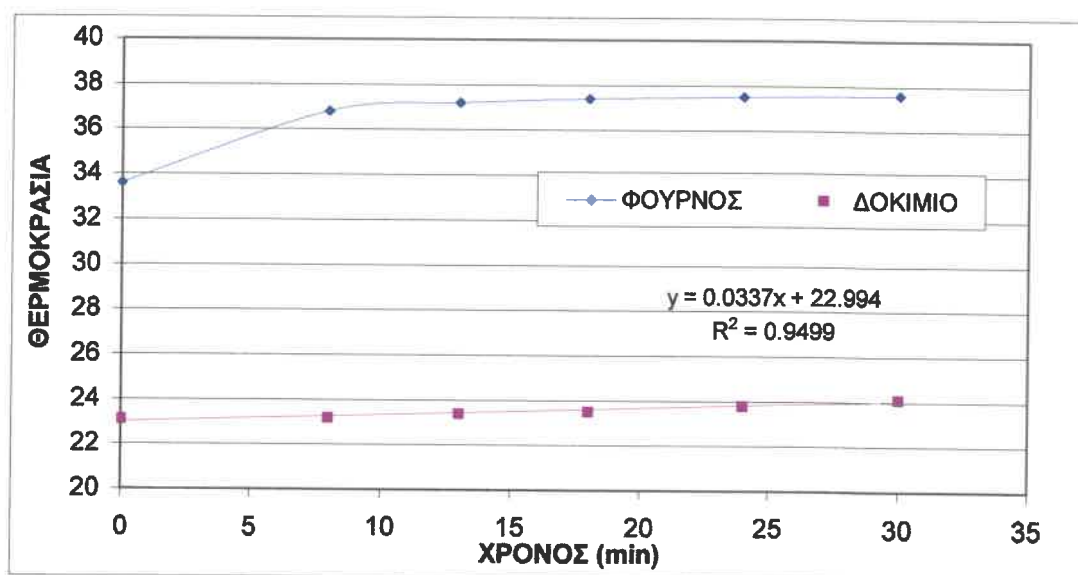


Εικόνα 2.2.1: Τοποθέτηση των δοκιμίων στο φούρνο

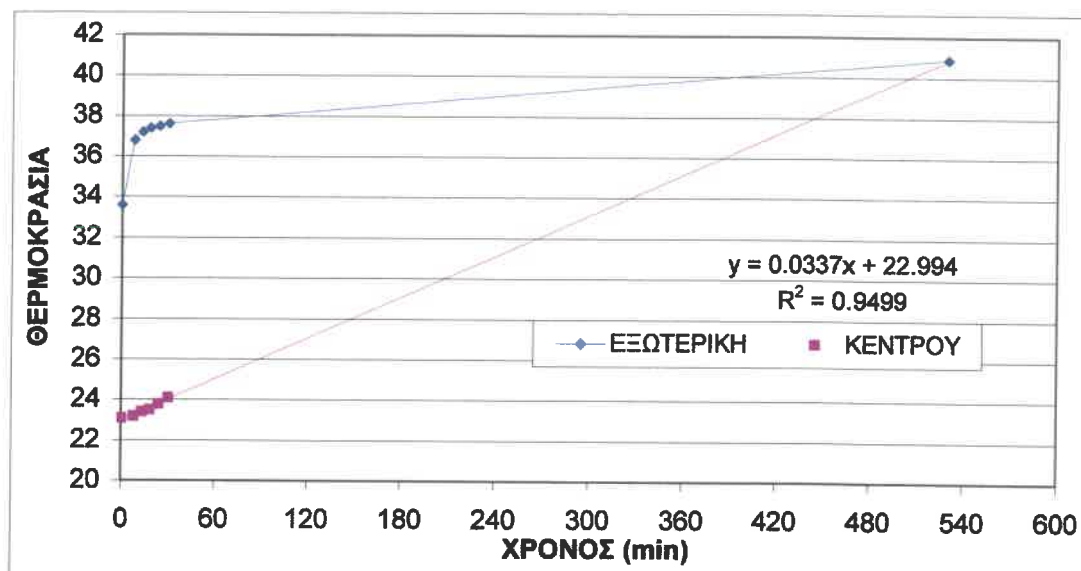
Πίνακας 2.2.1: Παρατηρηθείσες θερμοκρασίες δοκιμών

ΔΙΑΡΚΕΙΑ [min]	ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	
		ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΚΕΝΤΡΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
0	17:26	33.6	23.1
8	17:34	36.8	23.2
13	17:39	37.2	23.4
18	17:44	37.4	23.5
24	17:50	37.5	23.8
30	17:56	37.6	24.1

Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση των παραπάνω μετρήσεων μέσω γραφήματος. Η ανάλυση αυτή παρουσιάζεται στα διαγράμματα 2.2.1-2.2.2. Αποτυπώνεται λοιπόν η θερμοκρασία με το πέρασμα του χρόνου τόσο για το δοκίμιο όσο και για το φούρνο. Τα σημεία αυτά παρουσιάζουν αυξητική τάση η οποία όμως διαφαίνεται ότι τείνει να σταθεροποιηθεί στη θερμοκρασία ρύθμισης του θερμοστάτη. Βάζοντας μάλιστα και τη γραμμή παλινδρόμησης αποτυπώνουμε τη παρατήρηση μας γραφικά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν μας απασχολεί τόσο η μορφή της γραμμής τάσης (εκθετική, πολυωνυμική ...) αλλά αρκούμαστε σε ένα καλό συντελεστή συσχέτισης (R^2) διότι η πρόβλεψη μας δεν είναι ακριβής αλλά της τάξεως της ώρας. Αν προεκτείνουμε τις δυο γραμμές τάσεως το σημείο τομής τους θα μας δώσει τον απαιτούμενο χρόνο για να αποκτήσει το δοκίμιο τη θερμοκρασία των 40 °C. Έτσι βρίσκουμε ότι χρειάζονται περί των 530 min (δηλαδή περίπου 9-10 ώρες). Το διάστημα που τοποθετούνται τα δοκίμια στο φούρνο είναι μεγαλύτερο από τον παραπάνω χρόνο και έτσι δεν έχουμε κανένα πρόβλημα.



Διάγραμμα 2.2.1: Απεικόνιση μεταβολής της θερμοκρασίας συνάρτηση του χρόνου για το δοκίμιο και τον φούρνο



Διάγραμμα 2.2.2: Εύρεση απαιτούμενου χρόνου για να αποκτήσουν τα δοκίμια τη θερμοκρασία του φούρνου

ΔΟΚΙΜΗ 2

Η δοκιμή 2 έχει σκοπό την εύρεση της μείωσης της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά τη διάρκεια των θραύσεων. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας αποφασίστηκε να τοποθετηθεί ένα επιπλέον θερμόμετρο στην επιφάνεια του δοκιμίου ώστε να μπορέσει να απεικονιστεί και ο σχετικός ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό και κοντά στην επιφάνειά του. Έτσι λοιπόν αφήνουμε το σύστημα φούρνος – δοκίμιο να σταθεροποιηθεί στη μέγιστη θερμοκρασία και στη συνέχεια βάζουμε το δοκίμιο στο χώρο της πρέσας δοκίμων ώστε να έχει τις ίδιες θερμοκρασιακές μεταβολές με αυτές των πραγματικών δοκιμών. Για λόγους αξιοπιστίας του αποτελέσματος η δοκιμή επαναλήφθηκε και δεύτερη φορά. Στον πίνακα 2.2.2 παρουσιάζονται οι ενδείξεις των θερμόμετρων.

Πίνακας 2.2.2: Παρατηρηθείσες θερμοκρασίες δοκιμών (1η δοκιμή)

ΔΙΑΡΚΕΙΑ [min]	ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ		
		ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
			ΚΕΝΤΡΟ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
0	14:10	40.9	40.1	41.1
5	14:15	26.0	40.1	40.4
10	14:20	26.0	39.9	39.6
19	14:29	26.0	39.5	39.0
29	14:39	26.0	38.9	38.4
60	15:10	26.0	37.4	37.1
95	15:45	26.0	36.1	35.7

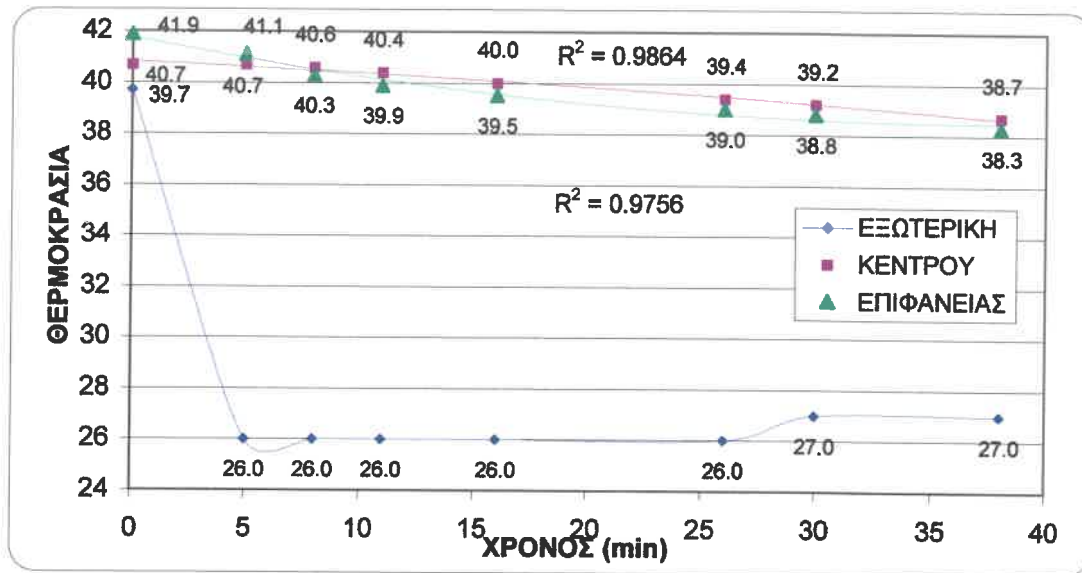
Πίνακας 2.2.3: Παρατηρηθείσες θερμοκρασίες δοκιμών (2η δοκιμή)

ΔΙΑΡΚΕΙΑ [min]	ΩΡΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ		
		ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΙΟΥ	
			ΚΕΝΤΡΟ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
0	12:59	39.7	40.7	41.9
5	13:04	26.0	40.7	41.1
8	13:07	26.0	40.6	40.3
11	13:10	26.0	40.4	39.9
16	13:15	26.0	40.0	39.5
26	13:25	26.0	39.4	39.0
30	13:29	27.0	39.2	38.8
38	13:37	27.0	38.7	38.3

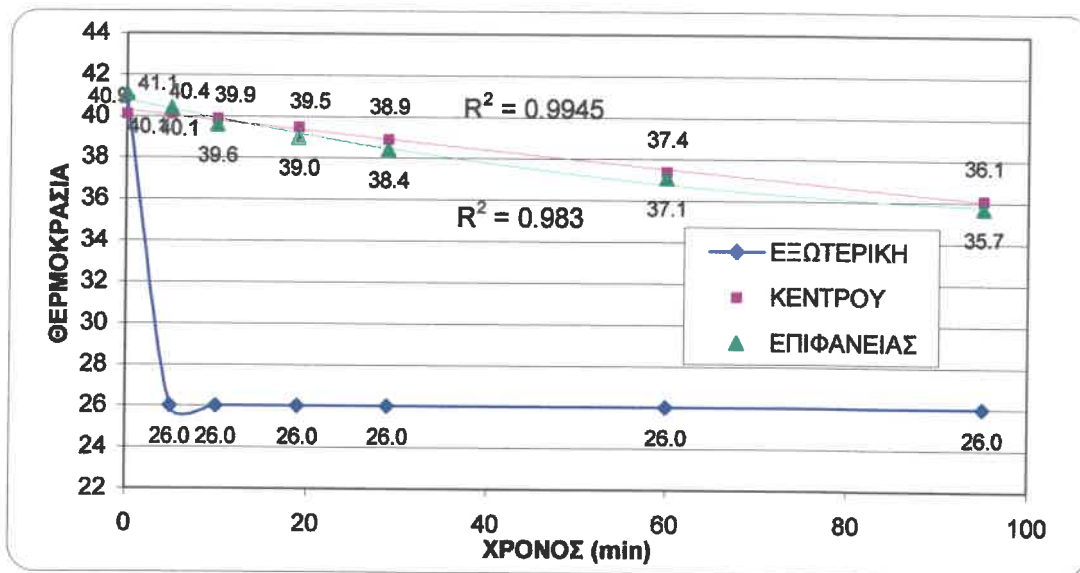
Η απεικόνιση των ενδείξεων των θερμομέτρων που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 2.2.3-2.2.4 μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι και στις δυο δοκιμές ο ρυθμός μείωσης είναι ο ίδιος. Μάλιστα με την προσθήκη γραμμών παλινδρόμησης είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μείωση της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου.

Σύμφωνα με μετρήσεις από την φάση δοκιμών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει διαπιστωθεί ότι απαιτούνται 5 min για την προετοιμασία του δοκιμίου έως την θραύση του. Σε αυτό το διάστημα σύμφωνα με τα διαγράμματα η θερμοκρασία του κέντρου έχει παραμείνει σταθερή και της επιφανείας έχει μειωθεί κατά 0,7 °C, πράγμα που αποδεικνύει ότι οι δοκιμές της κάμψης πραγματοποιούνται στην επιθυμητή θερμοκρασία.

Μετά τη θραύση κάθε δοκίμιο εισέρχεται στο φούρνο έως ότου ολοκληρωθεί η θραύση και των υπολοίπων. Έτσι πρακτικά διατηρείται η θερμοκρασία που είχαν τα δοκίμια κατά τη θραύση τους. Όλα μαζί προετοιμάζονται για τη δοκιμή πρίσματος και εισέρχονται ξανά στο φούρνο. Η διαδικασία αυτή διαρκεί 15 min. Από τα διαγράμματα διαπιστώνεται ότι οι απώλειες είναι της τάξεως μισής μονάδας για το κέντρο και της μιας μονάδας για την επιφάνεια. Δεδομένου ότι οι ακρίβεια των θερμόμετρων είναι 0,5 °C μπορεί κανείς να αντιληφθεί ότι οι απώλειες είναι ελάχιστες εντός των ορίων ακρίβειας του οργάνου μέτρησης της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 2.2.3: Απεικόνιση μείωσης της θερμοκρασίας συνάρτηση του χρόνου για το δοκίμιο (εσωτερική - εξωτερική) και τον φούρνο (1η δοκιμή)



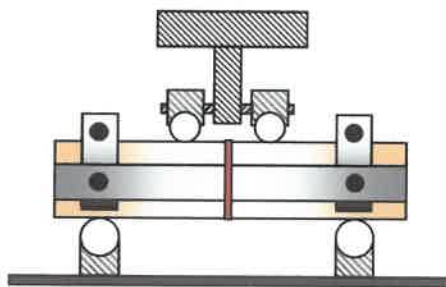
Διάγραμμα 2.2.4: Απεικόνιση μείωσης της θερμοκρασίας συνάρτηση του χρόνου για το δοκίμιο (εσωτερική - εξωτερική) και για τον φούρνο (2η δοκιμή)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δυο εργαστήρια. Στο εργαστήριο Οδοποιίας με τη χρήση μηχανής MTS (Material Test System) μετρήθηκε η παραμόρφωση των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη και μέσω αυτών των μετρήσεων βρέθηκε στη συνέχεια το μέτρο ελαστικότητας. Στο εργαστήριο Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή ισοδύναμου κύβου.

ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Κατά τη δοκιμή σε κάμψη μέσω της μηχανής MTS επιβλήθηκε συγκεντρωμένη φόρτιση στα τρίτα του θεωρητικού μήκους των δοκιμίων. Η μηχανή διαθέτει σερβουδραυλικό σύστημα επιβολής φορτίου που ρυθμίζεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η στήριξη των LVDT έγινε με τη βοήθεια διατάξεων με αρθρωτή στήριξη επιτρέπουσα περιστροφές και οριζόντια μετακίνηση (Εικόνα 2.3.1).



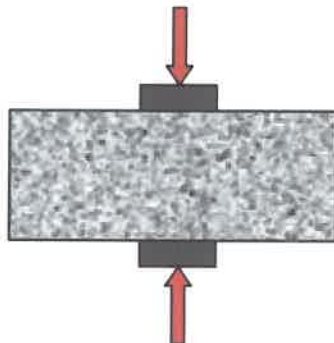
Εικόνα 2.3.1: Διάταξη δοκιμής κάμψης

Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα επαγωγικού τύπου (LVDT) τοποθετήθηκαν στις δυο πλευρές του δοκιμίου κατακόρυφα ώστε να μετρήσουν το βέλος κάμψης και παρουσιάζονται στην παραπάνω εικόνα με κόκκινο χρώμα.

Σκοπός της δοκιμής κάμψης ήταν η εύρεση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας κάμψης των δοκιμίων.

ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Μετά από τη δοκιμή κάμψης κάθε δοκίμιο χωριζόταν σε δυο μικρότερα κομμάτια τα οποία δοκιμάστηκαν σε θλίψη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.2.

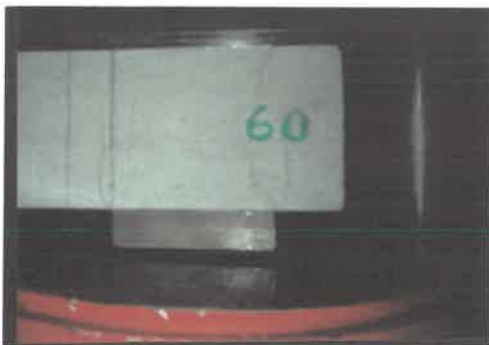


Εικόνα 2.3.2: Διάταξη δοκιμής θλίψης

Το μικρότερο από τα δυο, με ύψος μικρότερο των 200mm, δοκιμάστηκε σε θλίψη με τη μέθοδο του ισοδύναμου κύβου (Εικόνα 2.3.3). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. Χρησιμοποιήθηκε πρέσα μέγιστου φορτίου 60 tn. Η μηχανή δοκιμής σε θλίψη ήταν αυτόματη υδραυλική μηχανή με πλαίσιο στήριξης τεσσάρων κολώνων και σύστημα αυτόματης ρύθμισης της ταχύτητας επιβολής του φορτίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα επιβολής φορτίου 0,58 KN/sec.

Ο λόγος που η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ένωσης τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος ήταν ότι αναμένονταν αντοχές τις οποίες δεν θα μπορούσε να καταγράψει το ηλεκτροδυναμόμετρο αφού θα ξεπερνούσαν τα 25 KN. Η επιφάνεια θραύσης της δοκιμής μπορεί να περιγραφεί ως δυο ανάστροφες πυραμίδες όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.3.4.

Σκοπός της δοκιμής ήταν να βρεθεί η αντοχή του δοκιμίου σε θλίψη κύβου. Ταυτόχρονα το μέγεθος του θλιπτικού φορτίου που βρέθηκε χρησιμοποιήθηκε με κατάλληλη αναγωγή από τύπους για τον υπολογισμό του φορτίου που έπρεπε να επιβληθεί στο δοκίμιο στη δοκιμή θλίψης πρίσματος.



Εικόνα 2.3.3: Δοκιμή ισοδύναμου κύβου.



Εικόνα 2.3.4: Δοκίμιο έπειτα από δοκιμή ισοδύναμου κύβου (φαίνεται η επιφάνεια θραύσης).

Το μεγαλύτερο από τα δυο τμήματα που προέκυψε από τη δοκιμή κάμψης δοκιμάστηκε σε θλίψη πρίσματος. Καταρχήν η επιφάνεια που προέκυψε από τη θραύση ισοπεδώθηκε με κοπή σε ειδικό τροχό νερού. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 100mm x 100mm x 200mm. Κατά την κοπή δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε οι τετραγωνικές επιφάνειες να προκύψουν όσο το δυνατό πιο επίπεδες. Μάλιστα για να είναι παράλληλες οι πλευρές του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες φόρτισης της μηχανής, όπου χρειάστηκε, χρησιμοποιήθηκε σιδηρόστοκος ανάμεσά τους και έπειτα ακούμπησαν οι πλάκες φόρτισης.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν δυο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, ένα σε κάθε πλευρά (Εικόνα 2.3.5). Σκοπός της δοκιμής ήταν να βρεθεί η αντοχή θλίψης πρίσματος αλλά και το μέτρο ελαστικότητας θλίψης. Το μέτρο ελαστικότητας βρέθηκε υπολογιστικά τη χρονική στιγμή που η τάση βρίσκεται στο $\frac{1}{3}$ της αντοχής του υλικού.



Εικόνα 2.3.5: Δοκίμιο κατά την τοποθέτηση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων αντιστάσεως (LVDT) πριν από τη δοκιμή θλίψης πρίσματος.

ΜΕΡΟΣ 3ο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών γίνεται σε τρεις συνοπτικούς πίνακες που παρατίθενται σε αυτό το κεφάλαιο (Πιν. 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3). Η κατάταξη του πίνακα έχει τη σειρά των δοκιμών όπως αυτές πραγματοποιήθηκαν χρονολογικά από την παλαιότερη προς τη νεώτερη. Ενδιάμεσα από τις δοκιμές των δοκιμών σε θερμοκρασία 23 °C (δοκίμια 1 - 25) και 40 °C (δοκίμια 31 - 50), έγιναν οι δοκιμές των στεγνών δοκιμών (δοκίμια 26 - 30) σε θερμοκρασία δοκιμής επίσης 23 °C.

Στους πίνακες παρουσιάζονται οι συνθέσεις των δοκιμών με βάση το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού και με βάση την συνολική σύσταση για να είναι εύκολα διακριτές οι ομάδες δοκιμών (ανά πεντάδα) από τις υπόλοιπες. Στις στήλες παρουσιάζονται:

- $f_{\text{θλίψης κύβου}}$ ή $f_{\text{κύβου}}$: Αντοχή δοκιμίου σε θλίψη ισοδύναμου κύβου σε MPa. Το όνομα του αρχείου Η/Υ ονομάστηκε COMP. Στις περιπτώσεις όπου και στα δυο τμήματα ενός δοκιμίου έγινε δοκιμή αντοχής σε θλίψη ισοδύναμου κύβου, τα δυο μέρη ονομάστηκαν Α και Β και εξήχθη και ο μέσος όρος που φαίνεται ως ΜΟ.
- $f_{\text{πρίσματος}}$: Αντοχή δοκιμίου σε θλίψη πρίσματος σε MPa. Το όνομα του αρχείου Η/Υ ονομάστηκε THRA από το οποίο λαμβάνεται και η αντοχή θλίψης πρίσματος και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη.
- $f_{\text{κάμψης}}$: Αντοχή δοκιμίου σε κάμψη σε MPa. Το όνομα του αρχείου Η/Υ ονομάστηκε FLEXUA από το οποίο λαμβάνεται και η αντοχή κάμψης και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη.
- $E_{\text{θλίψης}}$: Μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου σε θλίψη σε MPa. Τα δυο διαφορετικά αρχεία Η/Υ (COMPA και THRA) αναφέρονται στις δυο φορτίσεις που επιπονήθηκε το δοκίμιο κατά την θλίψη του πρίσματος. Η πρώτη (COMPA) είναι η φόρτιση με φορτίο ίσο με το $\frac{1}{3}$ της αντοχής του, ενώ η δεύτερη είναι η φόρτιση μέχρι την θραύση του. Από αυτές τις τιμές εξήχθη ο μέσος όρος που ονομάστηκε $E_{\text{πρίσματος}}$.
- $E_{\text{κάμψης}}$: Μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου σε κάμψη σε MPa.
- $E_{\text{κάμψης με διάτμηση}}$: Μέτρο ελαστικότητας δοκιμίου σε κάμψη με διόρθωση λόγω διάτμησης σε MPa.

Στις σειρές παρουσιάζονται για κάθε ομάδα πέντε δοκιμών:

- Μέσος όρος (ΜΟ) αντοχών, ή μέτρων ελαστικότητας αντίστοιχα, σε MPa.
- Τυπική απόκλιση αντοχών, ή μέτρων ελαστικότητας αντίστοιχα, σε MPa.
- Συντελεστής μεταβλητότητας αντοχών, ή μέτρων ελαστικότητας αντίστοιχα, σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Πίνακας 3.1.1: Αποτελέσματα δοκιμών σε θερμοκρασία 23 °C

% Φρεζαριστού Υλικού	ΔΟΚΙΜΙΟ		ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (MPa)				ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (MPa)					
	Σύνθεση	Δοκίμιο ↓	f _{θλίψης} κύβου		MO	f _{πρίσματος}	f _{κόμης}	E _{θλίψης}			E _{κόμης}	E _{κόμης με διάτμηση}
		Αρχείο →	COMP		THRA	FLEXUA	COMP	THRA	E _{πρίσματος}			
0	100 / 0	1	16.19	16.19 -	7.96	1.64	14700 -	17100	15900 -	33200	41800	
		2	12.91	12.91	8.04	1.6	17400	15200	16300	29600	37300	
		3	15.43	15.43 -	7.87	1.54	13200	12500	12850	26100	32800	
		4	A	13.37	12.855		1.6				25200	31700
			B	12.34								
	5	12.42	12.42	7.17	1.44	16000	12800	14400	24200	30500		
	MO (MPa)		13.78 (12.76)		7.76	1.56	15325 (15533)	14400	14863 (14517)	27660	34820	
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)		1.64 (0.27)		0.40	0.08	1795 (2139)	2168	1571 (1728)	3705	4673	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)		12 (2)		5	5	12 (14)	15	11 (12)	13	13		
25	75 / 25	6	9.35	9.35	5.55		6100 -	10500	8300 -			
		7	10.14	10.14	6.06	1.41	15800 -	11700	13750 -	24200	30500	
		8			5.54	1.61	12200	10200	11200	26900	33800	
		9	9.08	9.08	5.41	1.42	11000	8500	9750	22300	28000	
		10	A	9.18	9.51		1.43				20000	25200
	B		9.84									
	MO (MPa)		9.52		5.64	1.47	11275 (11600)	10225	10750 (10475)	23350	29375	
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)		0.45		0.29	0.10	4008 (849)	1320	2324 (1025)	2924	3659	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)		5		5	6	36 (7)	13	22 (10)	13	12		
50	50 / 50	11	8.76	8.76	5.96	1.53	9400	8300	8850	25000 -	31400 -	
		12	9.1	9.1	5.85	1.55	8400	7200	7800	15000	18800	
		13	A	9.42	9.455		1.6				14600	18400
			B	9.49								
		14	9.42	9.42	5.76	1.54	8300	7500	7900	21500 -	27100 -	
	15	9.82	9.82	5.74	1.75	8800	7300	8050	16200	20400		
	MO (MPa)		9.34		5.83	1.59	8725	7575	8150	18460 (15267)	23220 (19200)	
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)		0.36		0.10	0.09	499	499	478	4582 (833)	5760 (1058)	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)		4		2	6	6	7	6	25 (5)	25 (6)		
75	25 / 75	16	8.09	8.09	5.23	1.77	9500 -	6500	8000 -	12000	15100	
		17	8.09	8.09	5.42	1.74	11500 -	7600	9550 -	11300	14200	
		18	7.9	7.9	5.37	1.49	6400	6200	6300	10900	13700	
		19	8.08	8.08	4.73	1.52	7000	6100	6550	11600	14600	
		20	A	8.18	8.1		1.59				17300 -	21800 -
	B		8.02									
	MO (MPa)		8.06		5.19	1.62	8600 (6700)	6600	7600 (6425)	12620 (11450)	15880 (14400)	
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)		0.09		0.32	0.13	2354 (424)	688	1501 (177)	2647 (465)	3349 (594)	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)		1		6	8	27 (6)	10	20 (3)	21 (4)	21 (4)		
100	0 / 100	21	6.8	6.8	4.92	1.56	4700	4600	4650	12000 -	15100 -	
		22	A	7.09	7.115		1.65				8000	10000
			B	7.14								
		23	6.97	6.97	4.96	1.42	4500	4600	4550	8300	10400	
		24	6.98	6.98	4.88	1.35	5900	5700	5800	8300	10400	
	25	6.9	6.9	4.72	1.49	5000	4900	4950	9500	11900		
	MO (MPa)		6.98		4.87	1.49	5025	4950	4988	9220 (8525)	11560 (10675)	
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)		0.12		0.11	0.12	618	520	568	1657 (665)	2108 (838)	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)		2		2	8	12	10	11	18 (8)	18 (8)		

Πίνακας 3.1.3: Αποτελέσματα δοκιμών σε θερμοκρασία 40 °C

% Φρεζαριστού Υλικού		ΔΟΚΙΜΙΟ		ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (MPa)				ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (MPa)					
		Σύνθεση	Δοκίμιο ↓	f _{θλίψης} κύβου		MO	f _{πρίσματος}	f _{κάμψης}	Ε _{θλίψης}			Ε _{κάμψης}	Ε _{κάμψης με διάτμηση}
			Αρχείο →	COMP		THRA	FLEXUA	COMP	THRA	Ε _{πρίσματος}			
25	75 / 25	31	A	9.9	10.44		1.6				34100 -	43000 -	
		B	10.98										
		32	11.21		11.21		1.58	12500		12500	23400	29500	
		33	A	10.68	11.1		1.67				20900	26300	
			B	11.52									
	34	A	11.02	10.515		1.5				19200	24200		
		B	10.01										
	35	A	10.43	10.22		1.61				21100	26500		
B	10.01												
MO (MPa)			10.64				1.59	12500		12500	23740 (21150)	29900 (26625)	
Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)			0.59				0.06				5981 (1725)	7563 (2181)	
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)			6				4				25 (8)	25 (8)	
50	50 / 50	36	A	8.74	8.675		1.48				17800	22400	
			B	8.61									
		37	A	8.35	8.225		1.6				23400 -	29500 -	
			B	8.1									
		38	A	8.3	7.985		1.41				17100	21500	
			B	7.67									
	39	A	7.87	7.905		1.49				15400	19400		
		B	7.94										
	40	A	8.29	8.1		1.65				15700	19700		
		B	7.91										
	MO (MPa)			8.18				1.53				17880 (16500)	22500 (20750)
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)			0.34				0.10				3240 (1140)	4107 (1439)
Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)			4				6				18 (7)	18 (7)	
75	25 / 75	41	5.74		5.74	4.05	1.45	5500	5300	5400	8400	10500	
		42	A	5.82	5.83		1.29				11600 -	14600 -	
			B	5.84									
		43	A	5.96	5.935		1.27				9600	12100	
			B	5.91									
		44	A	5.65	5.685		1.33				10000	12500	
	B		5.72										
	45	A	6.07	6.02		1.39				8200	10300		
		B	5.97										
	MO (MPa)			5.85			4.05	1.35	5500	5300	5400	9560 (9050)	12000 (11350)
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)			0.14				0.07				1374 (885)	1744 (1112)
	Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)			2				5				14 (10)	15 (10)
100	0 / 100	46	4.37		4.37	3.58	1.25	3500	2200	2850	4500	5600	
		47	A	4.66	4.655		1.21				5900	7400	
			B	4.65									
		48	A	4.66	4.675		1.34				5200	6500	
			B	4.69									
		49	A	4.77	4.74		1.29				5000	6300	
	B		4.71										
	50	A	4.27	4.37		1.17				4300	5400		
		B	4.47										
	MO (MPa)			4.58			3.58	1.25	3500	2200	2850	4980	6240
	Τυπική Απόκλιση σ _{n-1} (MPa)			0.17				0.07				630	796
	Συντελεστής Μεταβλητότητας (%)			4				5				13	13

Με βάση αυτά οι μετρήσεις κρίθηκαν ικανοποιητικές όσον αφορά τις αντοχές αφού το φρεζαρισμένο υλικό δεν έχει την ομοιογένεια του σκυροδέματος και επομένως είναι λογικό να αναμένονται μεγαλύτερες τιμές στους συντελεστές.

Επισημαίνεται μάλιστα ότι ακόμα και πριν τη διόρθωση (με το σύνολο των μετρήσεων) οι συντελεστές μεταβλητότητας αντοχών θλίψης μόνο σε μια περίπτωση ξεπερνούν το 6 % (12 % για τα δοκίμια 1 - 5, σύνθεσης 100 / 0 στους 23 °C), ενώ οι αντίστοιχοι συντελεστές μεταβλητότητας των αντοχών κάμψης επίσης μόνο σε μια περίπτωση ξεπερνούν το 8 % (10% για τα στεγνά δοκίμια 26 - 30, σύνθεσης 100 / 0 με θερμοκρασία δοκιμής τους 23 °C).

Απεναντίας, οι συντελεστές μεταβλητότητας των μέτρων ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα αυξημένοι στην περίπτωση που δεν αφαιρεθούν κάποιες ανακριβείς μετρήσεις και αγγίζουν το 36 και 25 %, αντίστοιχα για την θλίψη και την κάμψη. Για το μέτρο ελαστικότητας δεν υπάρχουν τιμές επαναληψιμότητας από κανονισμούς και δεν μπορεί κριθεί η διακύμανσή τους. Το γεγονός βέβαια ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας των αντοχών ήταν (ακόμα και χωρίς την διόρθωση) αρκετά ικανοποιητικοί, παρόλο που οι απαιτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ισχύουν μόνο για το σκυρόδεμα, υποδεικνύει ότι έγινε σωστή παρασκευή και συντήρηση των δοκιμών.

Για τους ανωτέρω λόγους στο Κεφάλαιο 3.2 «Επεξεργασία Αποτελεσμάτων» κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλες οι μετρήσεις ανεξαιρέτως, με την θεώρηση ότι υπάρχουν και κάποια σφάλματα εργαστηριακών δοκιμών (από μετρήσεις οργάνων και όχι από εργαστηριακή παρασκευή των μιγμάτων), όπως άλλωστε ήταν φυσικό. Σε κάθε επιμέρους εργασία κρίθηκε η αλλοίωση ή μη των αποτελεσμάτων εξαιτίας αυτών των μετρήσεων και όπου κρίθηκε σκόπιμο παρουσιάστηκαν τόσο οι διορθωμένες όσο και οι αρχικές μετρήσεις ώστε να μπορεί να γίνει μια επιμέρους σύγκριση των αναμενόμενων τιμών και των τιμών που βρέθηκαν κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.2: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και τον σχολιασμό που ακολουθεί, έχει χρησιμοποιηθεί προς διευκόλυνση της επεξεργασίας των διαγραμμάτων σε ορισμένες περιπτώσεις ο μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών ανά ομάδα δοκιμών (συνήθως ανά πεντάδες), όπως αυτά παρουσιάστηκαν νωρίτερα στο Κεφ.3.1: «Αποτελέσματα Δοκιμών». Όπου ήταν δυνατό και χρήσιμο για την επεξεργασία βέβαια, αποτυπώθηκε το σύνολο των αποτελεσμάτων για να υπάρξει μια ακριβέστερη εικόνα των μετρήσεων. Η χρήση όλων των τιμών του εργαστηρίου βοηθά στην παρατήρηση λανθασμένων τιμών και την εξάλειψή των για την αποτελεσματικότερη επεξεργασία και σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

Όπου παρατηρήθηκαν τιμές που είχαν μεγάλη απόκλιση από τις αντίστοιχες των δοκιμών όμοιας σύστασης, αυτές τότε ελέχθησαν ως προς την ακρίβειά τους και (όπου έγιναν διορθώσεις) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με και χωρίς την απαλοιφή των λανθασμένων τιμών για μεγαλύτερη εποπτεία της επιρροής αυτής της απαλοιφής στο εργαστηριακό δείγμα.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

Έγινε απλή στατιστική επεξεργασία στα αποτελέσματα των δοκιμών με χρήση του μέσου όρου, της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή μεταβλητότητας κάθε ομάδας δοκιμών. Η χρήση του μέσου όρου είχε ως σκοπό την ευχερέστερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων και την κατάλληλη επεξεργασία τους. Όμως η χρήση των συντελεστών μεταβλητότητας (με τη βοήθεια της τυπικής απόκλισης, αφού ισχύει:

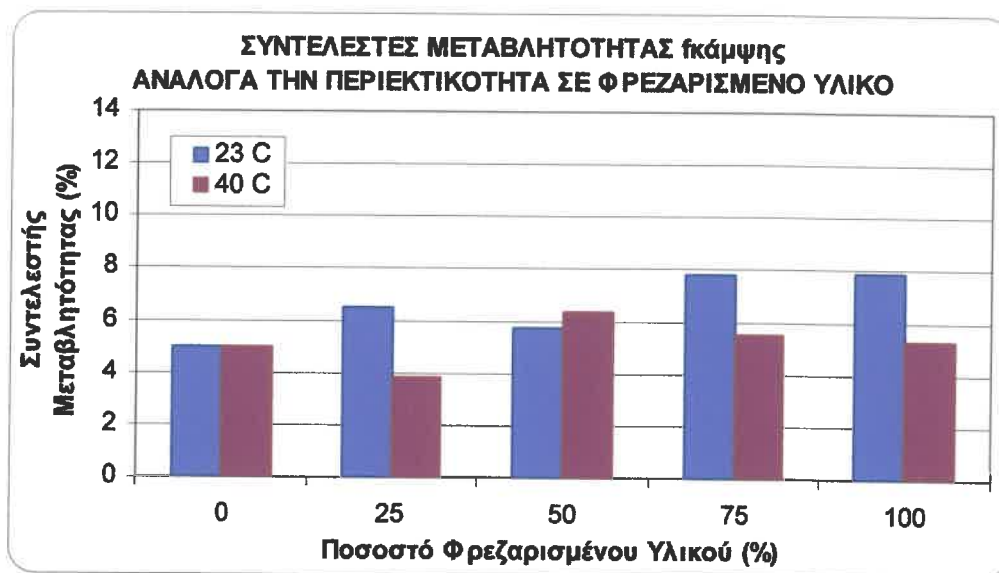
$$\text{συντελεστής μεταβλητότητας \%} = 100 \times \frac{\text{τυπική} \cdot \text{απόκλιση}}{\text{μέσος} \cdot \text{όρος}})$$

έγινε αποκλειστικά για τον έλεγχο της ομοιογένειας των δοκιμών σε κάθε ομάδα.

Με τη χρήση μάλιστα τιμών επαναληψιμότητας για το σκυρόδεμα έγινε ο έλεγχος των τιμών των συντελεστών που βρέθηκαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις με τις μέγιστες αναμενόμενες. Αυτό βέβαια συνέβη μόνο στην περίπτωση των αντοχών

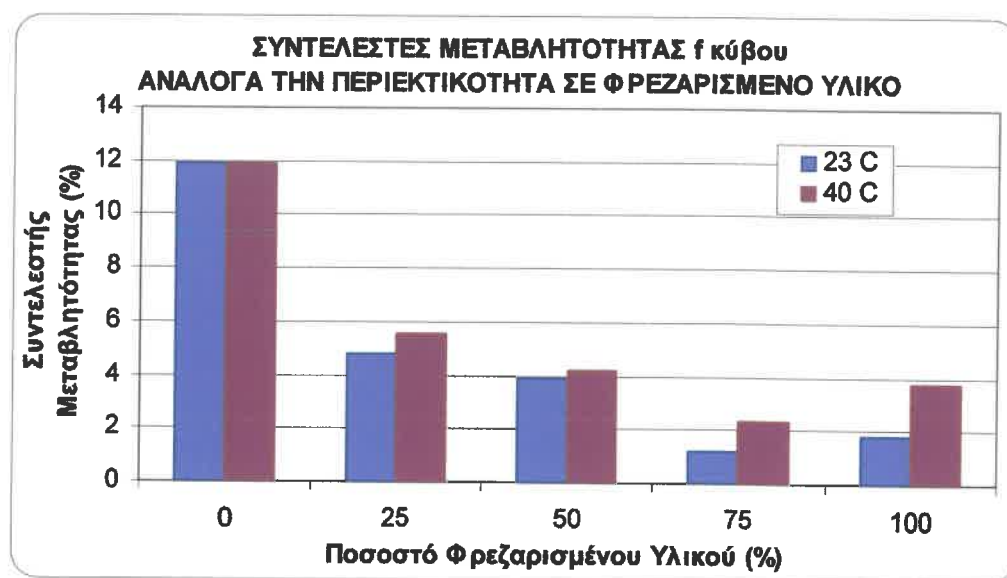
κάμψης και θλίψης αφού δεν υπάρχουν τιμές επαναληψιμότητας για τον μέγιστο συντελεστή μεταβλητότητας των μέτρων ελαστικότητας.

Για το λόγο αυτό οι τελευταίοι παρουσιάζονται μόνο ώστε να ελεχθεί η μεταβολή του συντελεστή με παραμέτρους την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού και την αύξηση της θερμοκρασίας.

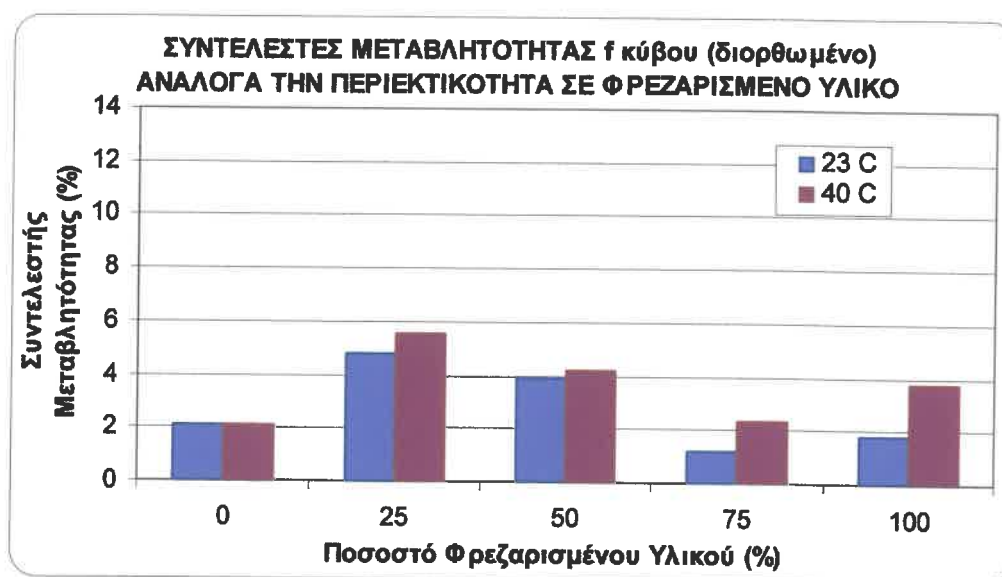


Σχήμα 3.2.1: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό

Οι συντελεστές μεταβλητότητας των αντοχών κάμψης όπως φαίνεται στο σχ.3.2.1 δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού. Παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση του συντελεστή μεταβλητότητας στα δοκίμια που είχαν μεγάλο ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού (άνω του 50 %), κυρίως σε αυτά της θερμοκρασίας των 23 °C. Σε σύγκριση με τον επιτρεπόμενο συντελεστή μεταβλητότητας του σκυροδέματος (επαναληψιμότητα) 5,7%, παρατηρείται ότι οι τιμές δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερες παρόλο που τα μίγματα που εξετάστηκαν είναι φυσικό να μην έχουν την ομοιογένεια του σκυροδέματος.



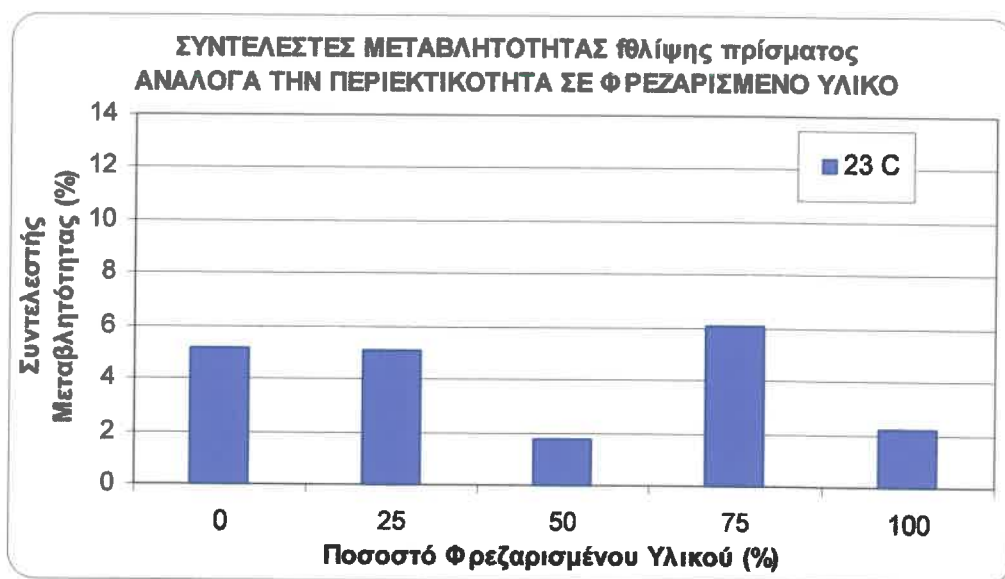
Σχήμα 3.2.2: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας αντοχής θλίψης κύβου σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό



Σχήμα 3.2.3: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας αντοχής θλίψης κύβου σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό (διορθωμένο)

Με την εξαίρεση του συντελεστή μεταβλητότητας για αποκλειστικά θραυστό υλικό, η αντοχή θλίψης κύβου ικανοποιεί την επαναληψιμότητα των προτύπων του σκυροδέματος. Μάλιστα ο μέσος όρος των συντελεστών μεταβλητότητας βρίσκεται στο 3 %, οριακά μικρότερος από τον επιτρεπόμενο (2,37 %), γεγονός που υποδεικνύει ότι η παρασκευή των δοκιμών είχε μεγάλη ομοιογένεια. Αναφορικά με τη μεταβολή του συντελεστή σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού παρατηρείται (σχ.3.2.2

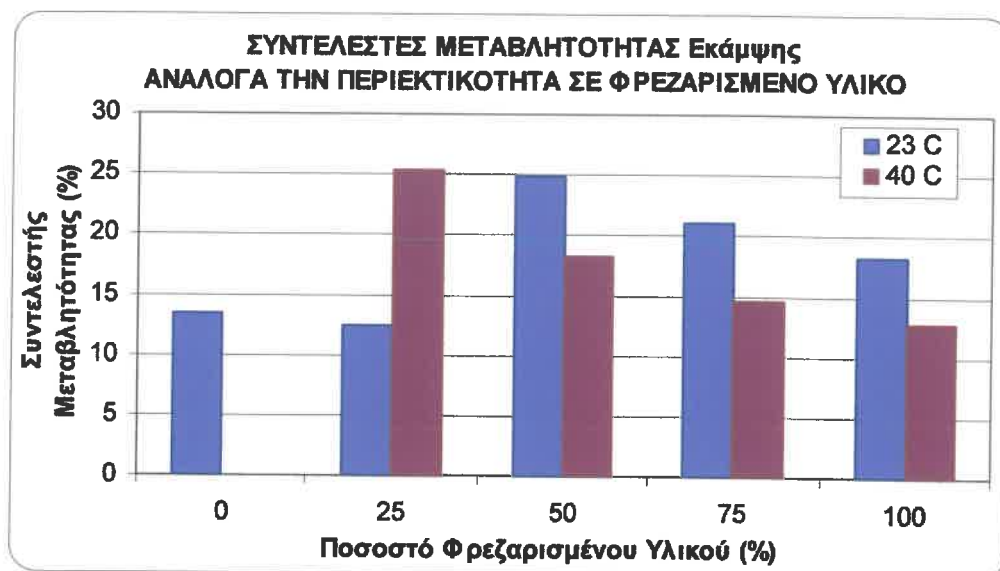
και 3.2.3) μια ακανόνιστη αυξομείωση εντός των επιτρεπόμενων ορίων που δεν μπορεί να οδηγήσει σε βέβαια συμπεράσματα.



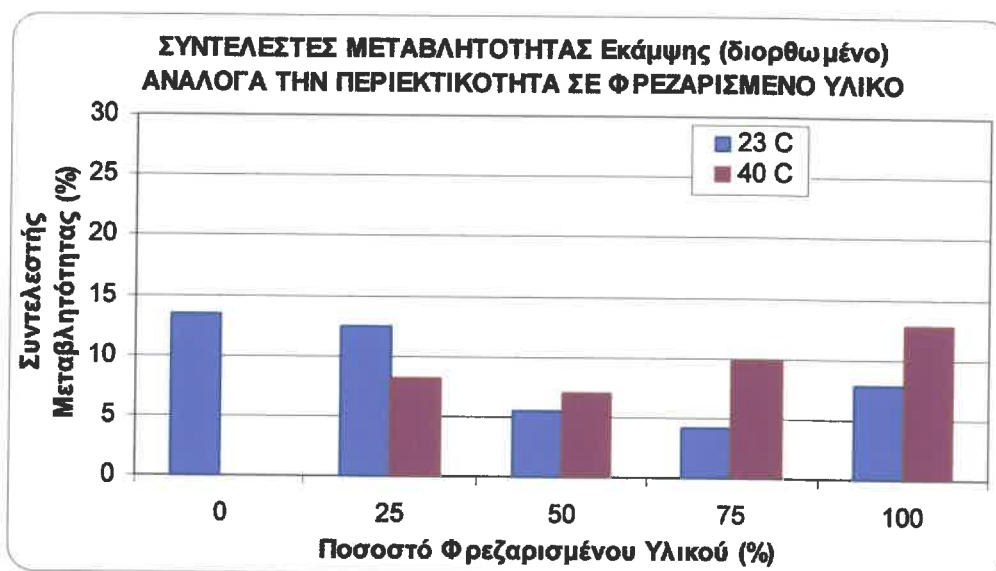
Σχήμα 3.2.4: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας αντοχής θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό

Όμοια με την αντοχή θλίψης κύβου, η αντοχή θλίψης πρίσματος παρουσιάζει (σχ.3.2.4) συντελεστές μεταβλητότητας στα όρια των επιτρεπτών, με ακανόνιστη διακύμανση όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού. Μάλιστα ο μέσος όρος των συντελεστών και εδώ (4 %) είναι ελάχιστα μεγαλύτερος του επιτρεπτού, με τα ίδια συμπεράσματα για την σωστή παρασκευή των δοκιμίων.

Σύγκριση μεταξύ 23 και 40 °C δεν υπάρχει σε αυτή την περίπτωση διότι το δείγμα που εξετάστηκε σε θλίψη πρίσματος στη θερμοκρασία των 40 °C ήταν μικρό. Ο κύριος λόγος που συνέβη αυτό ήταν η δυσκολία στη διατήρηση της θερμοκρασίας στους 40 °C ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του δοκιμίου λόγω των αναγκαίων διαδικασιών για την προετοιμασία του δοκιμίου για δοκιμή (δηλαδή της κοπής του δοκιμίου και εν συνεχεία της συγκόλλησης των ηλεκτρομηκυσιομέτρων - LVDT - στις πλευρές του).



Σχήμα 3.2.5: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας μέτρων ελαστικότητας κάμψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό



Σχήμα 3.2.6: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας μέτρων ελαστικότητας κάμψης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό (διορθωμένο)

Στα συγκριτικά διαγράμματα των συντελεστών μεταβλητότητας των μέτρων ελαστικότητας κάμψης και θλίψης (σχ.3.2.5 και 3.2.7 αντίστοιχα) παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια συστηματική μεταβολή των αποτελεσμάτων με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού. Μάλιστα στους 40 °C παρατηρείται, αντίθετα με το αναμενόμενο, μια μείωση του συντελεστή μεταβλητότητας του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού, γεγονός που

υποδεικνύει ότι δεν φαίνεται να επηρεάζει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ.3.1: Αποτελέσματα Δοκιμών), μπορεί να εξηγηθεί η επιλογή κάποιων μετρήσεων ως λανθασμένες (από λανθασμένες μετρήσεις της πρέσσας λόγω κακής συγκόλλησης των LVDT's, μικρής ρηγμάτωσης στην επιφάνεια των LVDT's που αλλοίωσε τις μετρήσεις των, τυχαίας ύπαρξης πολλών χονδρόκοκκων αδρανών στο σημείο της μέτρησης και άλλους παράγοντες) ώστε οι αυξημένοι συντελεστές των δυο αυτών διαγραμμάτων (σχ.3.2.5 και 3.2.7) να μειωθούν στα επίπεδα των σχ.3.2.6 και 3.2.8 αντίστοιχα. Η μείωση του μέσου όρου των συντελεστών μεταβλητότητας από αυτή τη διόρθωση είναι για την κάμψη από 18 % σε 9 %, ενώ για τη θλίψη από 14 % σε 9 %.

Παρόλα αυτά η ακανόνιστη διακύμανση όλων των διαγραμμάτων (σχ.3.2.5, 3.2.6, 3.2.7 και 3.2.8) σε σχέση με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού δεν μπορεί να βασίσει συμπεράσματα για την επίδραση του φρεζαρισμένου υλικού στο μέτρο ελαστικότητας, πέραν της γενικής παρατήρησης ότι δείχνει να μην επηρεάζεται ουσιαστικά.



Σχήμα 3.2.7: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας μέτρων ελαστικότητας θλίψης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό



Σχήμα 3.2.8: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστών μεταβλητότητας μέτρων ελαστικότητας θλίψης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό (διορθωμένο)

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΘΛΙΨΗΣ

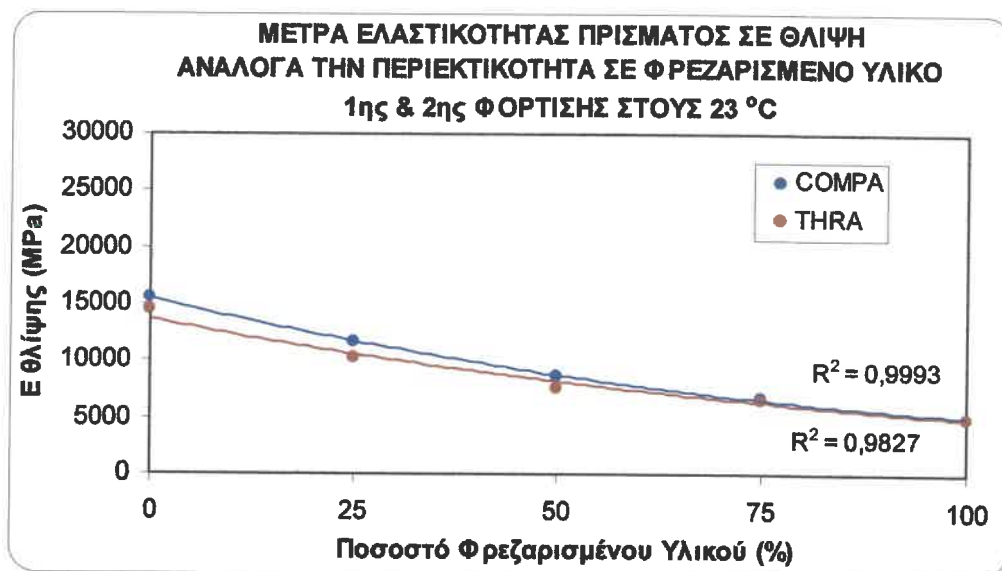
Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας θλίψης έχει υπολογιστεί ως ο μέσος όρος δυο μετρήσεων θλίψης πρίσματος στην πρέσα MTS. Η πρώτη εξ αυτών των μετρήσεων (COMPA) ήταν η αρχική φόρτιση του πρίσματος σε φορτίο ίσο με το 1/3 της αντοχής του (λαμβάνεται συμβατικά για να υπάρχει σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα τάσης-παραμόρφωσης ως εκείνο το σημείο), όπως αυτή υπολογίστηκε από τις μετρήσεις αντοχής κύβου ως εξής:

$$(\text{ΜΟ αντοχής κύβου}) \times 0,8 / 3 ,$$

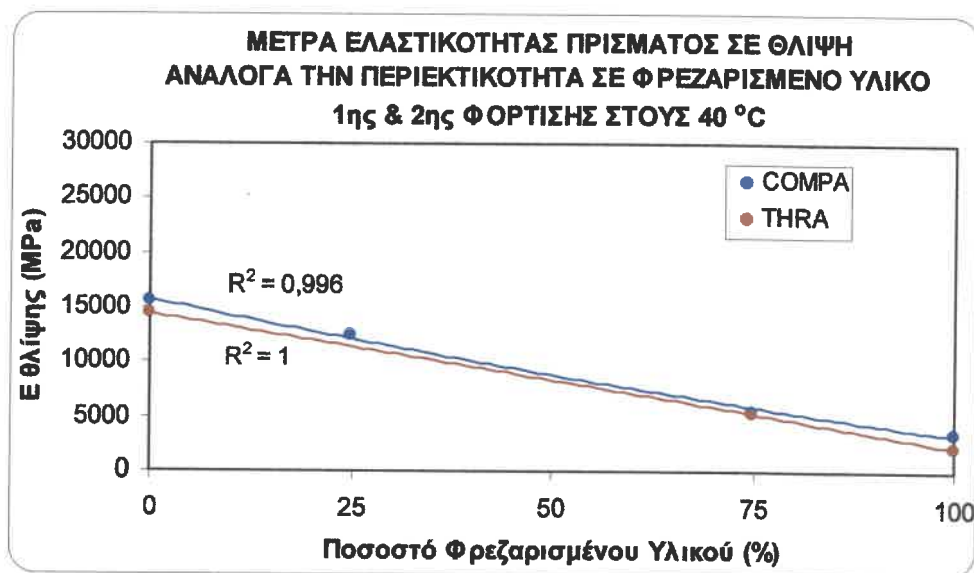
όπου 0,8 εμπειρικός συντελεστής μετατροπής αντοχής κύβου (τριαξονική θλίψη) σε αντοχή θλίψης πρίσματος (μονοαξονική θλίψη).

Η δεύτερη εξ αυτών των μετρήσεων (THRA) ήταν μονοτονική φόρτιση του πρίσματος μέχρι τη θλίψη του.

Στα διαγράμματα 3.2.9 και 3.2.10 συγκρίνεται το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε στις φορτίσεις COMPA και THRA, σε σχέση με το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού σε όλες τις θερμοκρασίες που μετρήθηκαν. Παρατηρείται ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας από την πρώτη και τη δεύτερη φόρτιση έχουν μια μικρή αλλά συστηματική διαφορά.



Σχήμα 3.2.9: Συγκριτικό διάγραμμα μέτρων ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό στους 23 °C



Σχήμα 3.2.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέτρων ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό στους 40 °C

Τόσο στους 23 °C, όσο και στους 40 °C παρατηρείται ότι υπάρχει άμεση συνάρτηση των δυο μέτρων ελαστικότητας, τα οποία κινούνται σε παράλληλες γραμμές, όπως αυτές προσδιορίστηκαν από τις γραμμές παλινδρόμησης με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης.

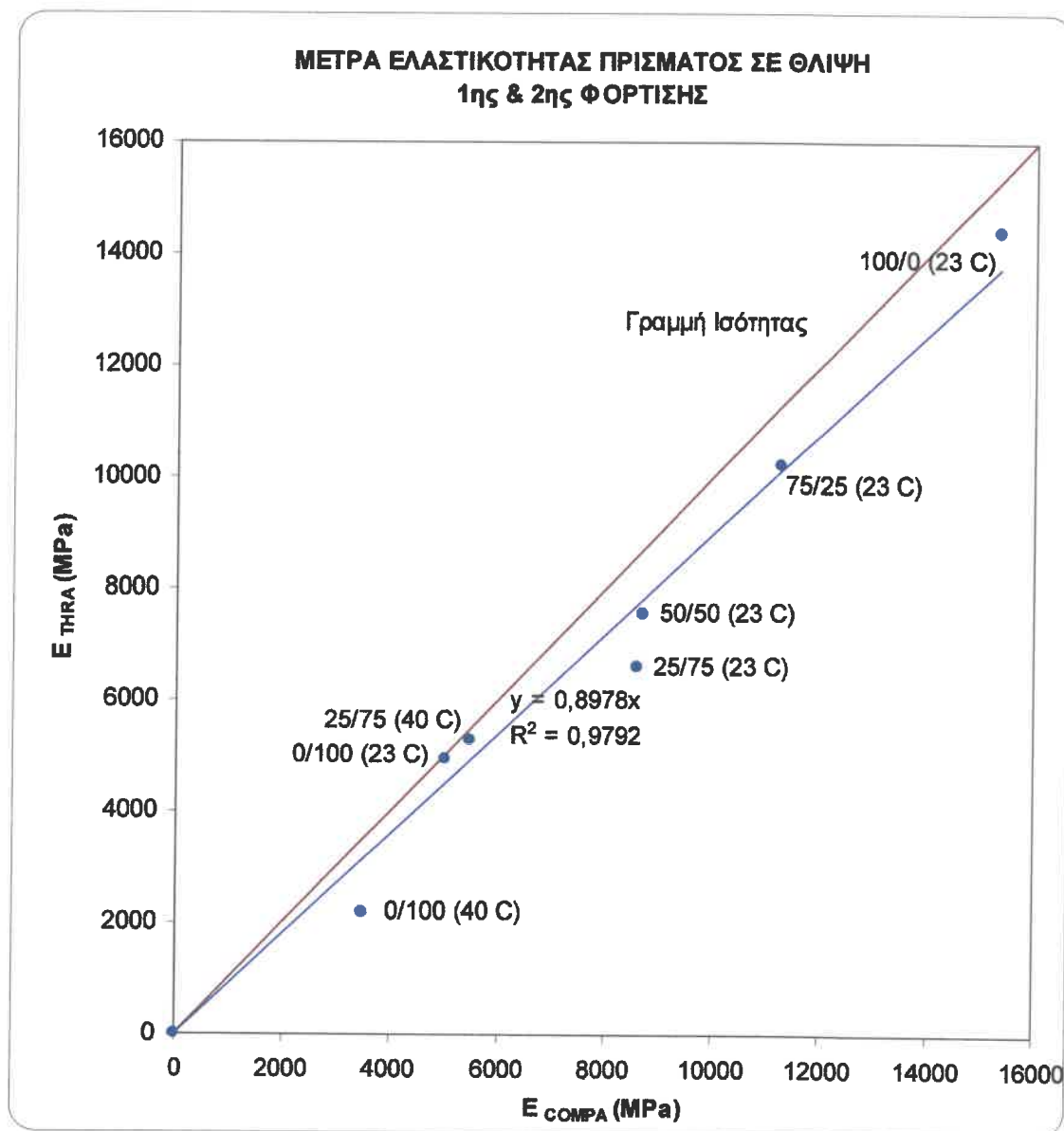
Επίσης, παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας της δεύτερης φόρτισης είναι ελαφρώς μειωμένο από το αντίστοιχο της πρώτης φόρτισης, με τρόπο που να ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την ακόλουθη συνάρτηση:

$$y = 0,864 x$$

όπου y το μέτρο ελαστικότητας της δεύτερης φόρτισης,

x το μέτρο ελαστικότητας της πρώτης φόρτισης.

Η προηγούμενη συνάρτηση για τους 23 °C παραμένει σχεδόν αμετάβλητη ($y = 0,876 x$), ενώ για τους 40 °C παρουσιάζει σημαντική μείωση ($y = 0,761 x$).



Σχήμα 3.2.11: Συγκριτικό διάγραμμα μέτρων ελαστικότητας θλίψης πρίσματος πρώτης και δεύτερης φόρτισης

Στο σχ.3.2.11 συγκρίνονται οι μέσοι όροι ανά 5άδα δοκιμίου κάθε αναμίγματος (για την θερμοκρασία των 40 °C 1 δοκίμιο) για την πρώτη φόρτιση με εκείνους της δεύτερης φόρτισης. Η μικρή διαφορά που παρατηρείται στην συνάρτηση με αυτή που ήδη υπολογίστηκε ($y = 0,898 x$ έναντι $y = 0,864 x$), οφείλεται στον διαφορετικό αριθμό

δεδομένων που λήφθηκαν υπόψη στις δυο αναλύσεις. Η συνάρτηση $y = 0,864 x$ σχηματίστηκε από το σύνολο των αποτελεσμάτων ξεχωριστά.

Σε αυτό το διάγραμμα μάλιστα είναι εμφανής η σχεδόν γραμμική συνάρτηση των δυο μέτρων ελαστικότητας, αφού η γραμμή παλινδρόμησης έχει πολύ μεγάλο συντελεστή συσχέτισης. Για να είναι πιο ευκρινείς μάλιστα η διαφορά των δυο μέτρων ελαστικότητας παρουσιάστηκε και η γραμμή ισότητας των δυο, όπου εύκολα διακρίνεται η ελαφρώς μικρότερη κλίση (συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας του αρχείου THRA υπολείπεται αυτού του COMPA αλλά με σταθερό το λόγο μεταξύ των).

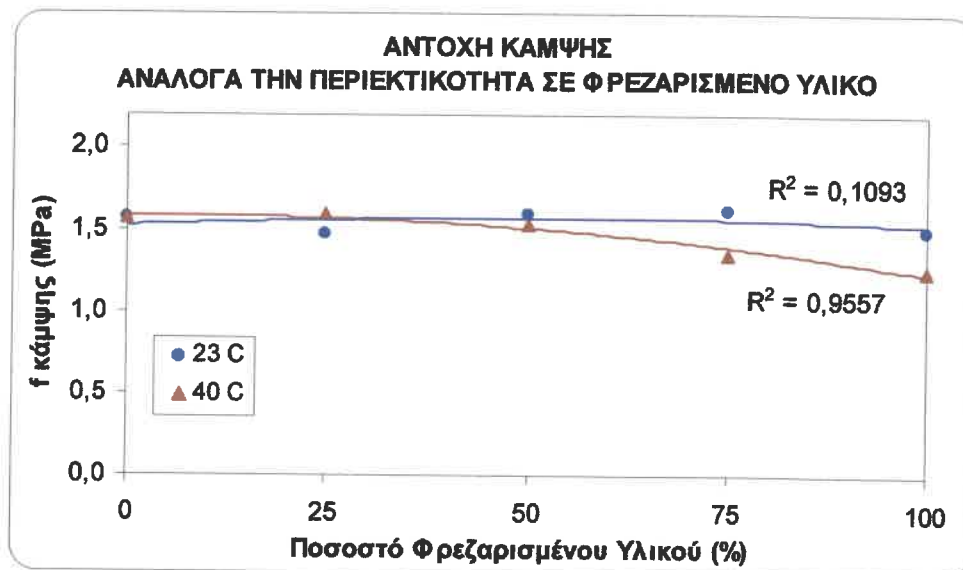
Με βάση αυτά τα στοιχεία θεωρήθηκε σκόπιμο να εξαχθεί ο μέσος όρος των δυο μετρήσεων του μέτρου ελαστικότητας ως τελικό μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, που ακολουθεί, γίνεται με βάση την επίδραση των παραμέτρων της ερευνητικής εργασίας –ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού και θερμοκρασίας- στην αντοχή (θλίψη και κάμψη) και το μέτρο ελαστικότητας (σε θλίψη και κάμψη). Εξετάζεται επίσης και η επιρροή των παραμέτρων αυτών στη συσχέτιση των αντοχών ή μέτρων ελαστικότητας μεταξύ τους.

Ι. Ποσοστό Φρεζαρισμένου Υλικού

Α. Επίδραση στην αντοχή

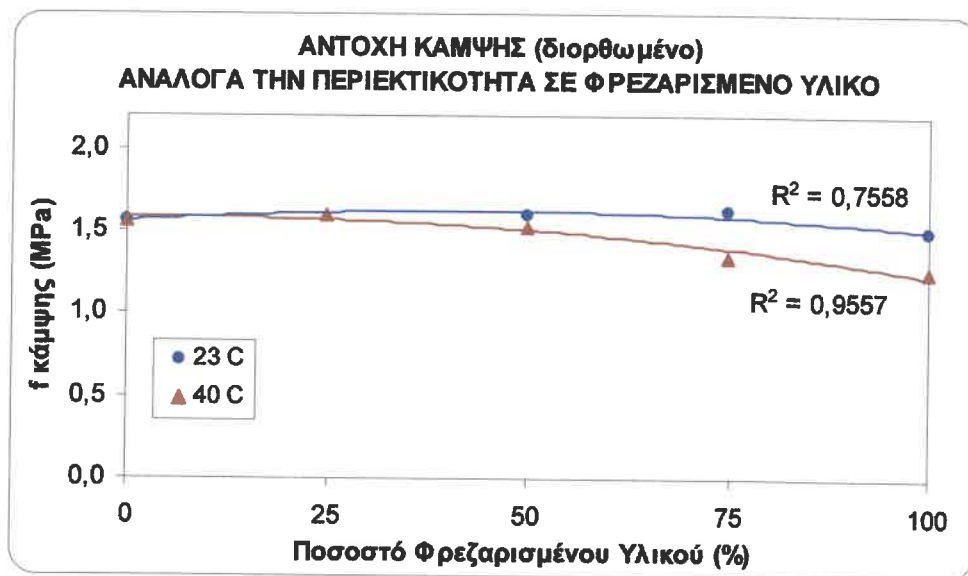


Σχήμα 3.2.12: Μεταβολή αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

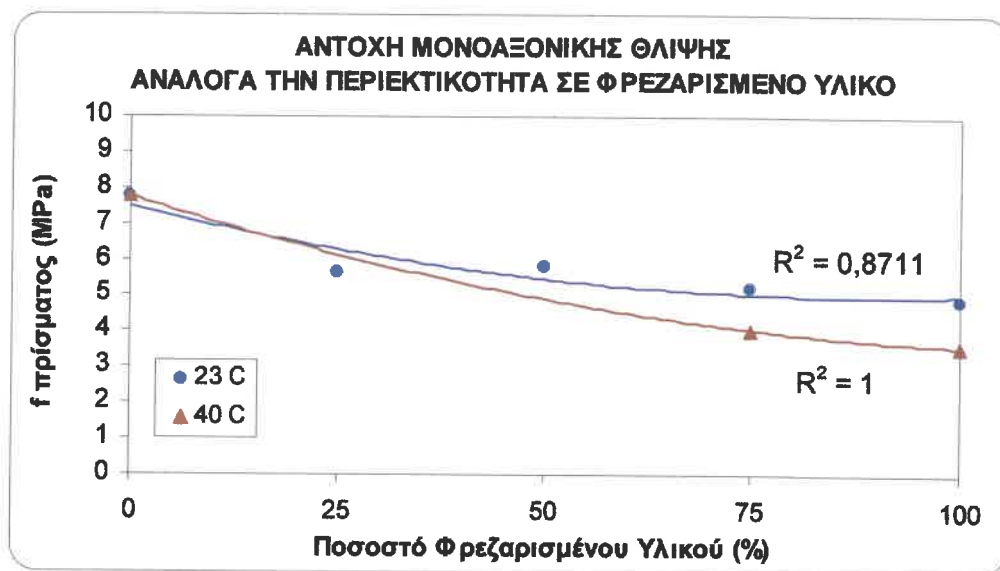
Η αντοχή σε κάμψη στο σύνολο των δοκιμών που εξετάστηκαν παρουσιάζεται στο σχ.3.2.12 περίπου σταθερή και ίση με αυτή των δοκιμών που δεν περιέχουν καθόλου φρεζαρισμένο υλικό, με εξαίρεση τη θερμοκρασία των 40 °C όπου υπάρχει μια μικρή μείωση της αντοχής όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού.

Ταυτόχρονα, η αντοχή κάμψης των δοκιμών με θερμοκρασία 23 °C παρουσιάζεται ελαφρώς αυξημένη αυτής των δοκιμών με θερμοκρασία 40 °C, με μόνη εξαίρεση για ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού 25 %, όπου έχουμε αντιστροφή αυτής της κατάστασης. Το οξύμωρο αυτό γεγονός αποδίδεται σε υποδεέστερη συμπίκνωση των δοκιμών της σειράς 75 / 25 της θερμοκρασίας 23 °C. Τα δοκίμια της εν λόγω σειράς είχαν (στην προσπάθεια εξεύρεσης της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης) μεγαλύτερη υγρασία (5,5 % κβ. νερό ή λόγο νερού προς τσιμέντο $N/T = 1,155$) από την υγρασία των άλλων σειρών, γεγονός που ίσως εξηγεί αυτή τη συμπεριφορά (αντί του λόγου των υπολοίπων δοκιμών που είναι $N/T = 1,113$, δηλαδή 5,3 % κβ. νερό).

Αν μάλιστα απαλειφθεί αυτή η τιμή (όπως φαίνεται στο σχ.3.2.13), τότε ο συντελεστής συσχέτισης της γραμμής παλινδρόμησης των 23 °C γίνεται από 0,1093 → 0,7558, και όλες οι τιμές της αντοχής σε κάμψη των 40 °C βρίσκονται χαμηλότερα της νέας γραμμής παλινδρόμησης, όπως άλλωστε αναμενόταν.

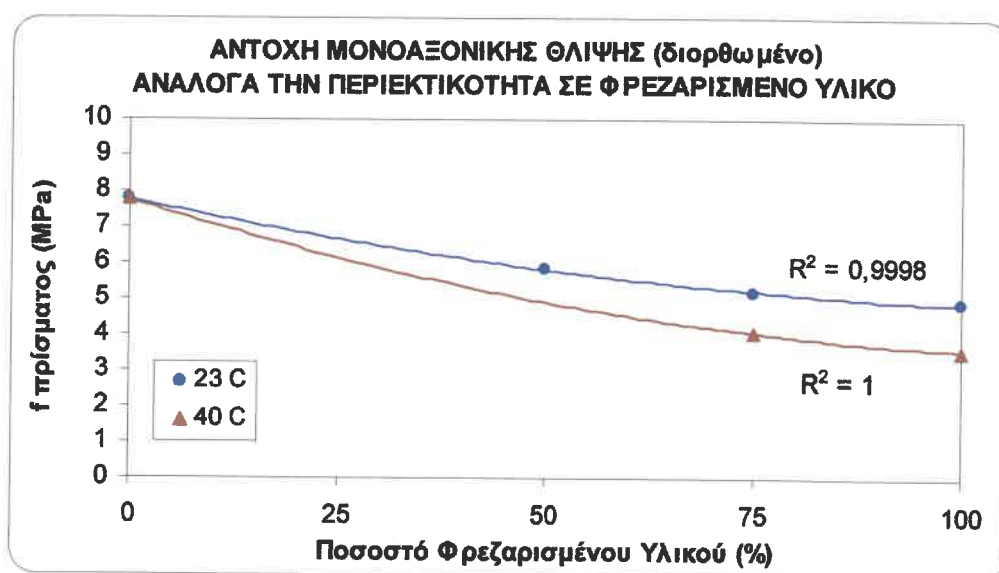


Σχήμα 3.2.13: Μεταβολή αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)



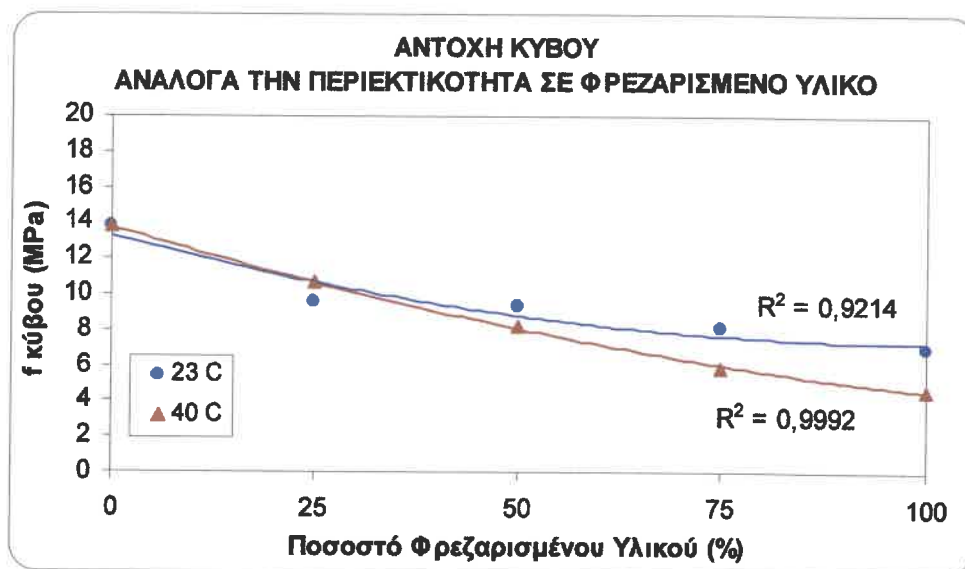
Σχήμα 3.2.14: Μεταβολή αντοχής θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Αντίθετα από την αντοχή κάμψης, η αντοχή θλίψης πρίσματος (σχ.3.2.14) παρουσιάζει πτωτική τάση με την αύξηση του φρεζαρισμένου υλικού στα δοκίμια. Βέβαια και σε αυτή την περίπτωση η αντοχή θλίψης των δοκιμίων της σειράς 75 / 25 (δοκίμια με αναλογία σύνθεσης 75 % θραυστό – 25 % φρεζαρισμένο υλικό) της θερμοκρασίας 23 °C είναι ελαττωμένη σε σύγκριση με την αναμενόμενη και αν απαλειφθεί για τον λόγο που προαναφέρθηκε η νέα βελτιωμένη συσχέτιση παρουσιάζεται στο σχ.3.2.15.



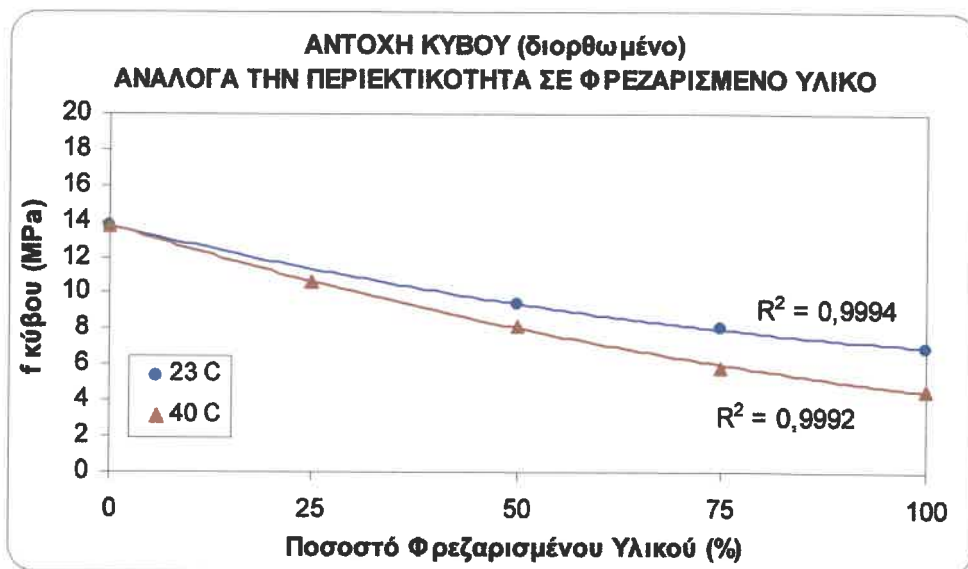
Σχήμα 3.2.15: Μεταβολή αντοχής θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)

Με βάση την αύξηση του συντελεστή συσχέτισης του «διορθωμένου» διαγράμματος, βγαίνει το συμπέρασμα ότι καλώς απαλοίφθηκε η τιμή της σειράς 75/ 25 (23 °C), που παρουσιάζει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν και για την αντοχή κάμψης.



Σχήμα 3.2.16: Μεταβολή αντοχής θλίψης κύβου σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Όμοια με την αντοχή θλίψης πρίσματος, η αντοχή κύβου παρουσιάζει (σχ.3.2.16) πτωτική τάση με την αύξηση του φρεζαρισμένου υλικού στα δοκίμια. Η αντοχή κύβου των δοκιμίων της σειράς 75 / 25 της θερμοκρασίας 23 °C είναι μικρότερη της αντίστοιχης των 40 °C και μπορεί να απαλειφθεί για τον ίδιο λόγο. Έτσι το «διορθωμένο» διάγραμμα της μεταβολής αντοχής θλίψης κύβου παρουσιάζεται στο σχ.3.2.17.

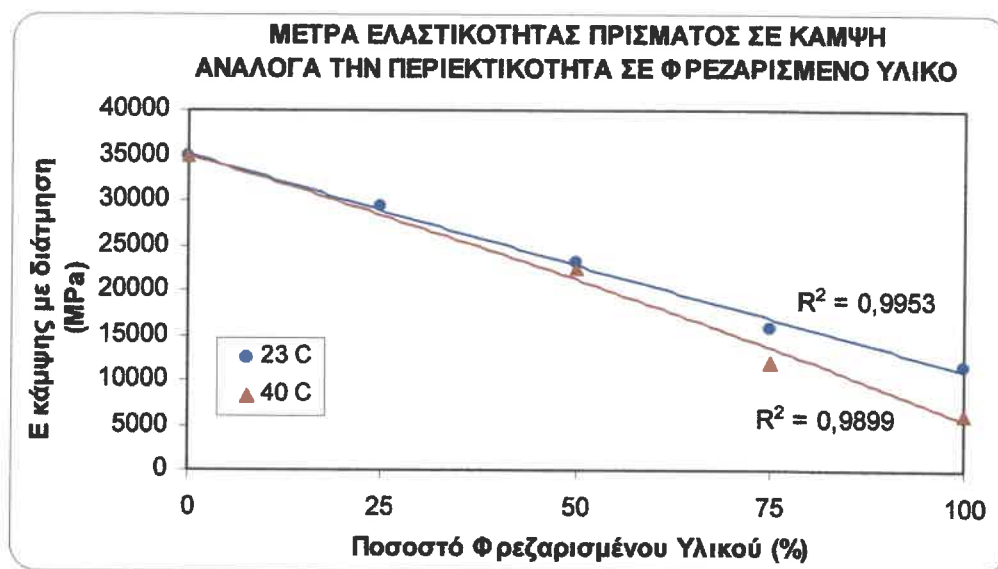


Σχήμα 3.2.17: Μεταβολή αντοχής θλίψης κύβου σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)

Είναι φανερό ότι το διάγραμμα είναι σημαντικά βελτιωμένο. Παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ αντοχής κύβου σε θερμοκρασία 23 °C και εκείνης σε 40 °C αυξάνει όσο το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού αυξάνει (σχ.3.2.17), γεγονός που υποδεικνύει ότι η επίπτωση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη για μίγματα με αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό (0 / 100). Η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 19 %. Αυτό αναμενόταν αφού το συσσωμάτωμα φρεζαρισμένου ασφαλτικού – αδρανούς στους 40°C, λόγω της παρουσίας του ασφαλτικού υλικού που επιδέχεται μεγαλύτερες παραμορφώσεις από την αύξηση της θερμοκρασίας, μειώνει περαιτέρω την αντοχή του.

Το ίδιο φαινόμενο παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της αντοχής κάμψης με το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού, όπου μάλιστα η αντοχή κάμψης στους 23 °C παρουσιάζεται σχεδόν σταθερή ενώ μειώνεται σταθερά η αντοχή κάμψης στους 40 °C, όσο αυξάνει το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού (σχ.3.2.13). Το γεγονός όμως ότι η αντοχή σε κάμψη για τη θερμοκρασία των 23 °C δεν φαίνεται να επηρεάζεται από το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού, ενώ η αντοχή σε θλίψη (μονοαξονική και ισοδύναμου κύβου) επηρεάζεται παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Αυτό θα γίνει σε επόμενες παραγράφους της εργασίας αυτής με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών.

Β. Επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας



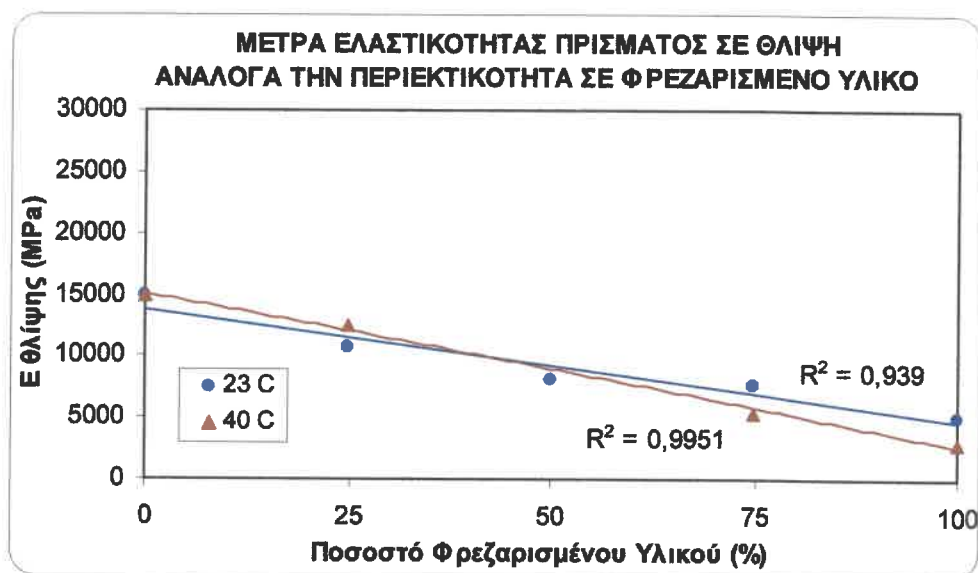
Σχήμα 3.2.18: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας κάμψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Η επίδραση του ποσοστού του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ΦΑ) και της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη φαίνεται στο σχ.3.2.18. κατά την μετάβαση από αποκλειστικά θραυστό σε αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό, το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη ελαττώνεται με γραμμική περίπου μορφή τόσο στη θερμοκρασία των 23 °C όσο και στη θερμοκρασία των 40 °C (σχ.3.2.18). Μια σημαντική διαφορά όμως μεταξύ των δυο θερμοκρασιών είναι ότι στους 40 °C ο ρυθμός μείωσης του μέτρου ελαστικότητας είναι εντονότερος. Μάλιστα αυτή η αύξηση του ρυθμού μείωσης είναι της τάξης του 35 %, όπως φαίνεται αν συγκριθούν οι συναρτήσεις των δυο γραμμικών γραμμών παλινδρόμησης.

Ειδικότερα, η μείωση του μέτρου ελαστικότητας από το μίγμα 100 / 0 στο μίγμα 0 / 100 είναι περίπου 200 % για τους 23 °C και 460 % για 40 °C. Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του ΦΑ αποδίδεται στο γεγονός ότι οι κόκκοι του ΦΑ έχουν σημαντικά μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τους κόκκους των καθαρών αδρανών υλικών, καθώς και στο ότι το ΦΑ επηρεάζεται εντονότερα από τη θερμοκρασία σε αντίθεση με τα καθαρά αδρανή που παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστα μεταξύ των θερμοκρασιών 23 και 40 °C.

Μάλιστα αν συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την αντοχή κάμψης, εφόσον οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας είναι ενδεικτικές των τάσεων που αναπτύσσονται στις ανακυκλωμένες στρώσεις του οδοστρώματος, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο ρυθμός μείωσης των αντοχών σε κάμψη όσο αυξάνει το ΦΑ είναι σχεδόν μηδενικός για τους 23 °C (5 %) και μόλις 25 % για τους 40 °C. Άρα η αύξηση του ποσοστού του ΦΑ μειώνει περισσότερο το μέτρο ελαστικότητας από την αντοχή σε κάμψη.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέτρο ελαστικότητας επίσης περισσότερο από την αντοχή σε κάμψη.
- Οι μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας λόγω των δυο παραγόντων (θερμοκρασίας και ποσοστού ΦΑ) δεν επιφέρουν χειρότερη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων στρώσεων αφού η μείωσή του είναι μεγαλύτερη από εκείνη της αντίστοιχης αντοχής σε κάμψη. Επομένως, το περιθώριο αντοχής μεταξύ αναπτυσσόμενης τάσης (που είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας) και αντοχής αυξάνει όσο η θερμοκρασία ή το ποσοστό ΦΑ στο μίγμα αυξάνει. Το συμπέρασμα αυτό θα εξετασθεί λεπτομερέστερα στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφ.3.3: Εντατική και Παραμορφωσιακή Κατάσταση Διατομής Οδοστρώματος με Ανακυκλωμένη Στρώση).



Σχήμα 3.2.19: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη υφίσταται αντίστοιχη μείωση με την αύξηση του φρεζαρισμένου υλικού με ρυθμό πιο ομαλό σε σχέση με αυτόν της κάμψης. Όμοια παρουσιάζεται και η αύξηση του ρυθμού μείωσης της τάξης του 42 % στη θερμοκρασία των 40 °C, ίδιας δηλαδή περίπτωσης μείωσης με αυτή του μέτρου ελαστικότητας κάμψης. Συνεπώς η μείωση αυτή των μέτρων ελαστικότητας είναι ανεξάρτητη της δοκιμής κάμψης – θλίψης και παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση λόγω της έντονης

παραμορφωσιμότητας των συσσωματωμάτων φρεζαρισμένου ασφάλτικού – αδρανούς (ασφάλτικού κονιάματος) σε μεγάλη θερμοκρασία.

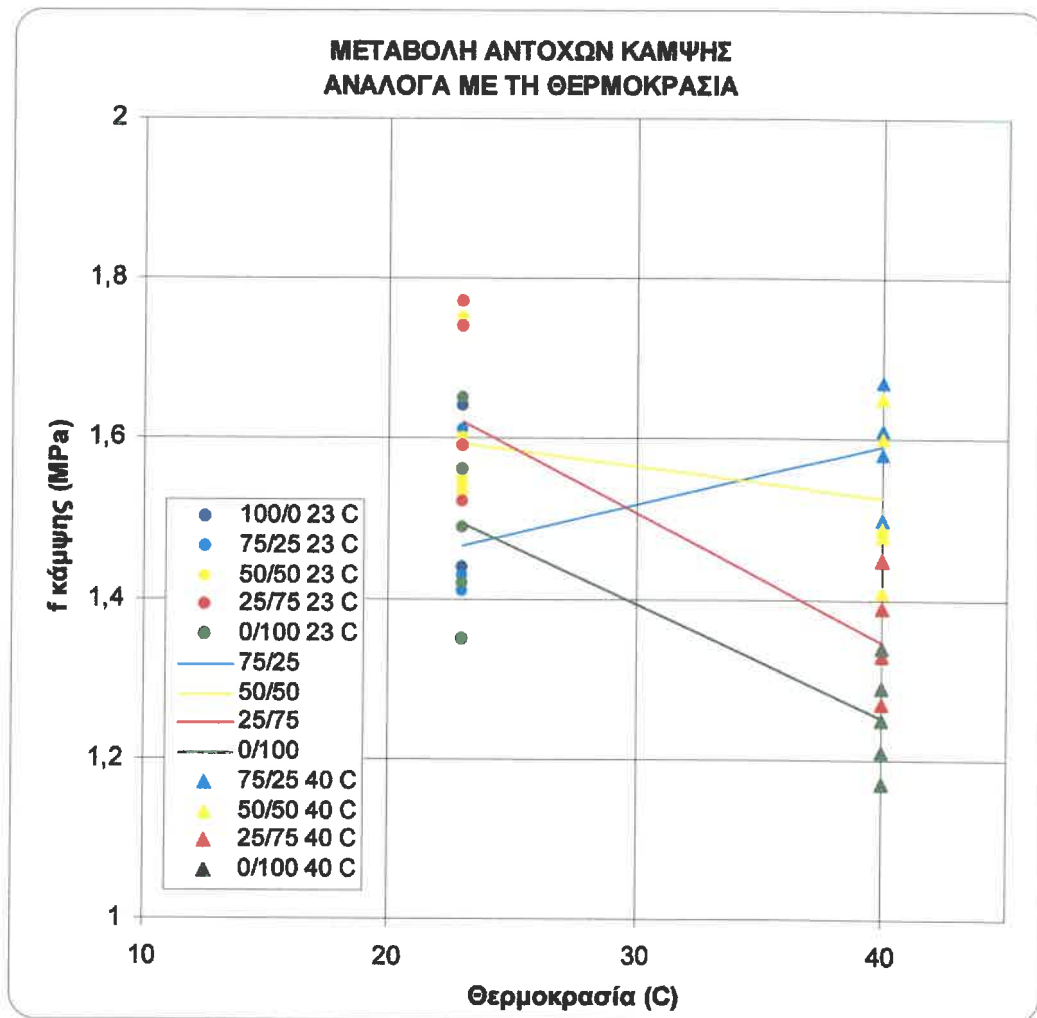
Η περίπτωση του πειραματικού λάθους της σειράς των δοκιμών 75 / 25 (23 °C) εμφανίζεται και σε αυτό το διάγραμμα, όπου το μέτρο ελαστικότητας της θερμοκρασίας των 40 °C για ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού 25 % παρουσιάζεται μεγαλύτερο του αντίστοιχου των 23 °C. Βέβαια, στο συγκεκριμένο διάγραμμα (σχ.3.2.19) λόγω της μικρότερης διαφοράς των μέτρων ελαστικότητας (εν συγκρίσει με της κάμψης), η απαλοιφή αυτής της τιμής δεν έχει εμφανή ευεργετικά αποτελέσματα και για το λόγο αυτό δεν έγινε.

Αν συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις αντοχές θλίψης πρίσματος και κύβου, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο ρυθμός μείωσης των αντοχών σε θλίψη όσο αυξάνει το ΦΑ είναι 37 και 49 % για το πρίσμα και τον κύβο αντίστοιχα και 66 % για το μέτρο ελαστικότητας στους 23 °C. Άρα η αύξηση του ποσοστού του ΦΑ μειώνει περισσότερο το μέτρο ελαστικότητας από τις αντοχές σε θλίψη. Το ίδιο παρατηρείται και για τους 40 °C, όπου οι αντίστοιχοι ρυθμοί μείωσης είναι 54 και 67 % για τις αντοχές και 81 % για το μέτρο ελαστικότητας.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει με μικρότερο ρυθμό το μέτρο ελαστικότητας (αύξηση 19 %) σε σχέση με τις αντοχές σε θλίψη (αύξηση 31 και 27 % αντίστοιχα).
- Αν συγκριθούν οι ρυθμοί μείωσης των επιμέρους μέτρων ελαστικότητας, παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη μείωση της κάμψης από αυτά της θλίψης (τρεις έως πέντε φορές μεγαλύτερη για 23 και 40 °C αντίστοιχα).

II. Θερμοκρασία

A. Επίδραση στην αντοχή

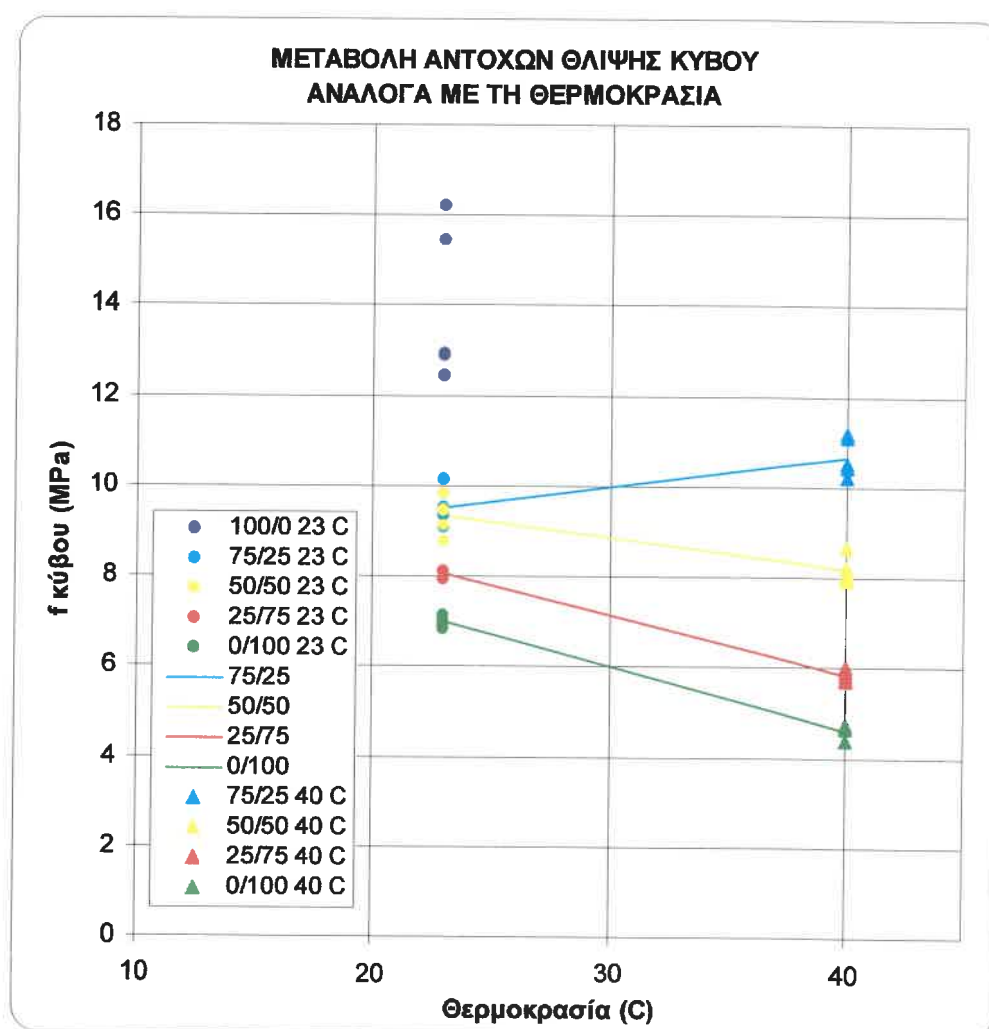


Σχήμα 3.2.20: Μεταβολή αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με τη θερμοκρασία

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή είναι πολύ μεγάλη στην περίπτωση με αυξημένο ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού όπως είναι φανερό από το σχ.3.2.20, που παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή κάμψης.

Τα αποτελέσματα του μίγματος 75 / 25 στους 23 °C πρέπει να εξαιρεθούν γιατί το μίγμα παρασκευάστηκε με ποσοστό νερού 5,5 % κβ. αντί του 5,3 % των άλλων μιγμάτων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την ελαφρώς μειωμένη συμπύκνωση των δοκιμίων, αλλά επίσης τον μεγαλύτερο λόγο Νερό / Τσιμέντο ($N/T = 1,155$, έναντι $N/T = 1,113$ για 5,3 % υγρασία). Είναι επομένως φανερό ότι το μίγμα αυτό δεν είναι ισοδύναμο με το αντίστοιχο στους 40 °C διότι και ελαττωμένη συμπύκνωση έχει αλλά κυρίως η αντοχή του συνδετικού μέσου, που καθορίζεται από τον λόγο N/T , είναι μικρότερη.

Γενικώς παρατηρείται μείωση της αντοχής με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μείωση αυτή στην αντοχή είναι περισσότερο εμφανής όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού για το λόγο ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες φρεζαρισμένου αδρανούς είναι περισσότερο επιρρεπείς στην θερμοκρασιακή μεταβολή (ιδιαίτερα σε τυχόν αύξησή της όπως στην παρούσα περίπτωση). Έτσι, ενώ το μίγμα 50 / 50 παρουσιάζει μείωση της τάξης του 4 %, το μίγμα 0 / 100 παρουσιάζει τετραπλάσια μείωση (16 %).



Σχήμα 3.2.21: Μεταβολή αντοχής θλίψης κύβου σε σχέση με τη θερμοκρασία

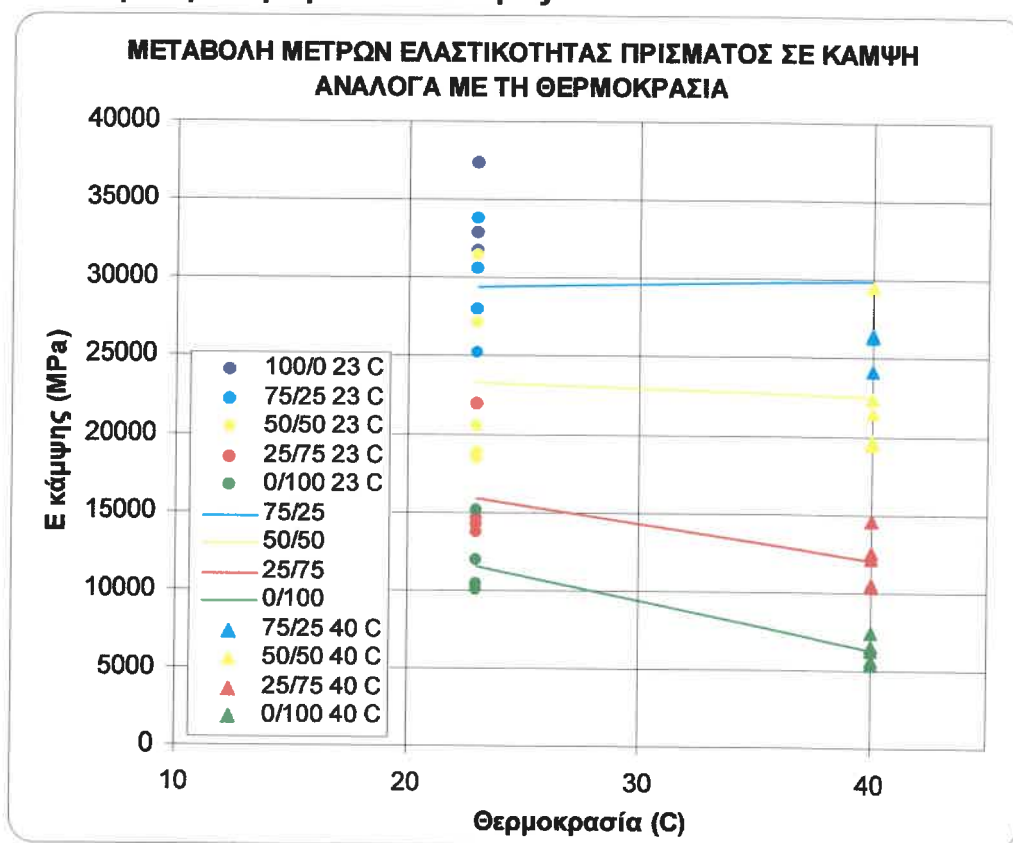
Όμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για την επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή κύβου (σχ.3.2.21). Και εδώ πρέπει να απαλειφθεί η γραμμή που παρουσιάζει τους μέσους όρους αντοχών των μιγμάτων 75 / 25, λόγω του λάθους του μίγματος των 23 °C.

Στην περίπτωση αυτή δε, είναι περισσότερο εμφανής η σταδιακή μεταβολή της κλίσης, της μεγαλύτερης μείωσης δηλαδή των αντοχών κύβου όσο αυξάνει το ποσοστό

του φρεζαρισμένου υλικού. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μείωση της αντοχής κύβου του μίγματος 50 / 50 είναι 12 %, του μίγματος 25 / 75 είναι 27 % και του μίγματος 0 / 100 είναι 34 %.

Επίσης, αν συγκριθεί η μείωση των αντοχών κάμψης (σχ.3.2.20) με τις αντίστοιχες των αντοχών κύβου (σχ.3.2.21) για κάθε μίγμα με την επίδραση της θερμοκρασίας, παρατηρείται ότι η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη στην αντοχή κύβου (διπλάσια έως τριπλάσια) από ότι στην αντοχή σε κάμψη.

Β. Επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας

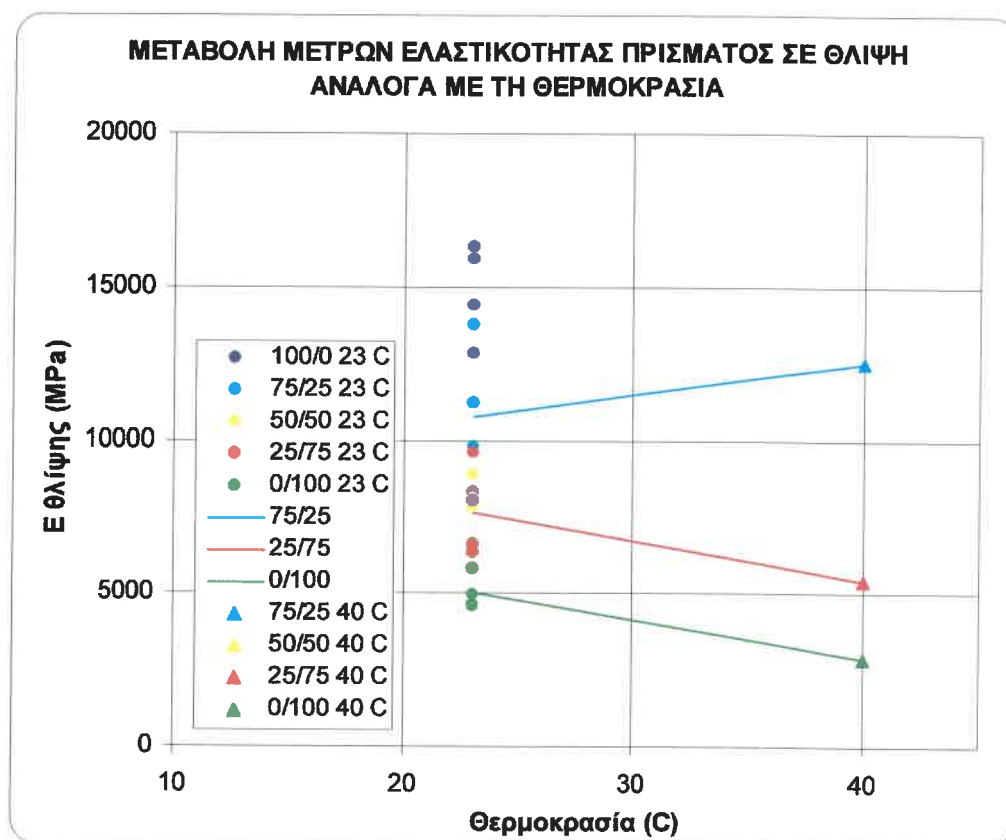


Σχήμα 3.2.22: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας κάμψης πρίσματος με διόρθωση λόγω διάτμησης σε σχέση με τη θερμοκρασία

Όπως φαίνεται στο σχ.3.2.22, η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 23 στους 40°C επιφέρει μείωση του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη με σταδιακή μείωση από 3% για το μίγμα 50 / 50 σε 24 % για το μίγμα 25 / 75 και σε 46 % για το μίγμα 0 / 100. Όσο αυξάνει, δηλαδή, το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού τόσο μειώνεται με ταχύτερο ρυθμό το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας.

Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη μεγάλη παραμορφωσιμότητα των συσσωματωμάτων φρεζαρισμένου ασφαλτικού – αδρανούς σε μεγάλη θερμοκρασία,

που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου $\frac{\sigma}{\varepsilon}$ και κατά συνέπεια του μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 3.2.23: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με τη θερμοκρασία

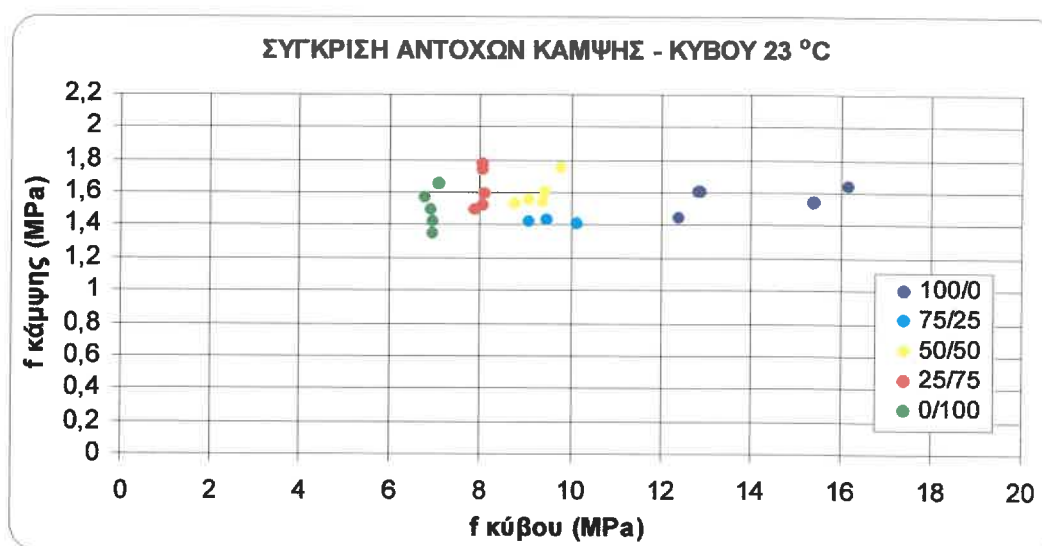
Στο σχ.3.2.23 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη για δύο μόνο μίγματα (25 / 75 και 0 / 100) επειδή δεν υπάρχουν στοιχεία για το μίγμα 50 / 50 και τα στοιχεία του μίγματος 75 / 25 είναι ανακριβή. Όπως και προηγουμένως η γενική παρατήρηση είναι ότι υπάρχει σαφής μείωση του μέτρου ελαστικότητας όσο αυξάνει η θερμοκρασία και ότι η μείωση αυτή είναι της τάξης του 30 έως 40 % (ενώ παρατηρείται και ίδια κλίση μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας των δυο μιγμάτων σε σχέση με τη θερμοκρασία).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αξιοπιστία γενικά των αποτελεσμάτων στη δοκιμή σε κάμψη (αντοχή και μέτρο ελαστικότητας) είναι πολύ μεγαλύτερη εκείνων της θλίψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει μικρό δείγμα αποτελεσμάτων όσον αφορά τη θλίψη πρίσματος στη θερμοκρασία των 40 °C. Έτσι, οι παρατηρήσεις αυτές γίνονται με κάθε επιφύλαξη ενώ προτείνεται να διεξαχθούν περισσότερες μετρήσεις για

μεγαλύτερη ακρίβεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κύριος λόγος που δεν έγιναν περισσότερες μετρήσεις στη θερμοκρασία αυτή είναι ότι η διαδικασία κοπής των θραυσμένων δοκιμίων σε συνδυασμό με τη διαδικασία συγκόλλησης των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (LVDT) είναι χρονοβόρες, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να χάνει την θερμοκρασία των 40 °C και να πρέπει να επανεισαχθεί στο φούρνο ώστε να την επανακτήσει.

III. Συσχέτιση Μεγεθών

A. Αντοχή κάμψης πρίσματος – Αντοχή θλίψης κύβου

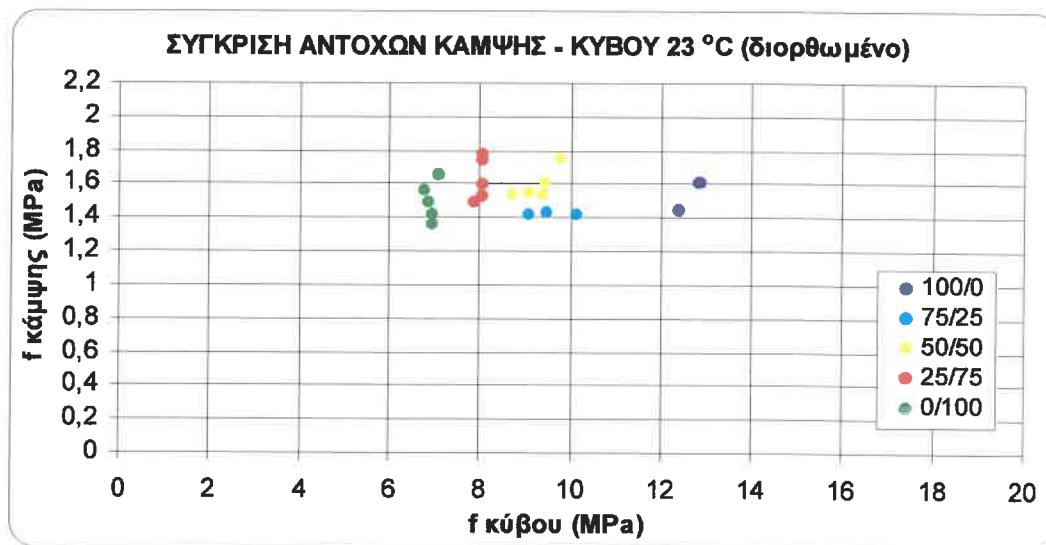


Σχήμα 3.2.24: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου στους 23 °C

Στο διάγραμμα του σχ.3.2.24 γίνεται η συσχέτιση αντοχής σε κάμψη και αντοχής σε θλίψη κύβου για διάφορα μίγματα (100 / 0 έως 0 / 100) στη θερμοκρασία των 23 °C. Παρατηρείται ότι η αντοχή κάμψης διατηρείται εντός των ορίων 1,4 και 1,8 MPa με μέσο όρο τα 1,6 MPa, ενώ η αντοχή κύβου έχει μεγάλη διακύμανση από 7 έως 16 MPa. Συγκεκριμένα με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού υπάρχει μια σημαντική ελάττωση της αντοχής σε θλίψη κύβου (της τάξης του 2 – 31 % όσο αυξάνεται το ποσοστό του ΦΑ).

Πιο λεπτομερής μπορεί να γίνει η εξέταση αν ελεχθεί πρώτα η μεγάλη ανομοιογένεια που παρουσιάζεται στο μίγμα 100 / 0 όπου οι αντοχές κάμψης είναι στο ίδιο επίπεδο (1,4 έως 1,65 MPa), ενώ οι αντοχές κύβου κυμαίνονται από 12 έως 13 MPa για τρία δοκίμια και περί τα 16 MPa για τα υπόλοιπα δυο. Αυτή η ανομοιογένεια στο μίγμα 100 / 0 δεν μπορεί παρά να αποδοθεί σε πειραματικό σφάλμα.

Στο σχ.3.2.25 φαίνεται το διάγραμμα συσχέτισης αντοχής κάμψης – αντοχής κύβου αν θεωρηθούν τα αποτελέσματα των δυο μεγάλων αντοχών σε θλίψη αναξιόπιστα.

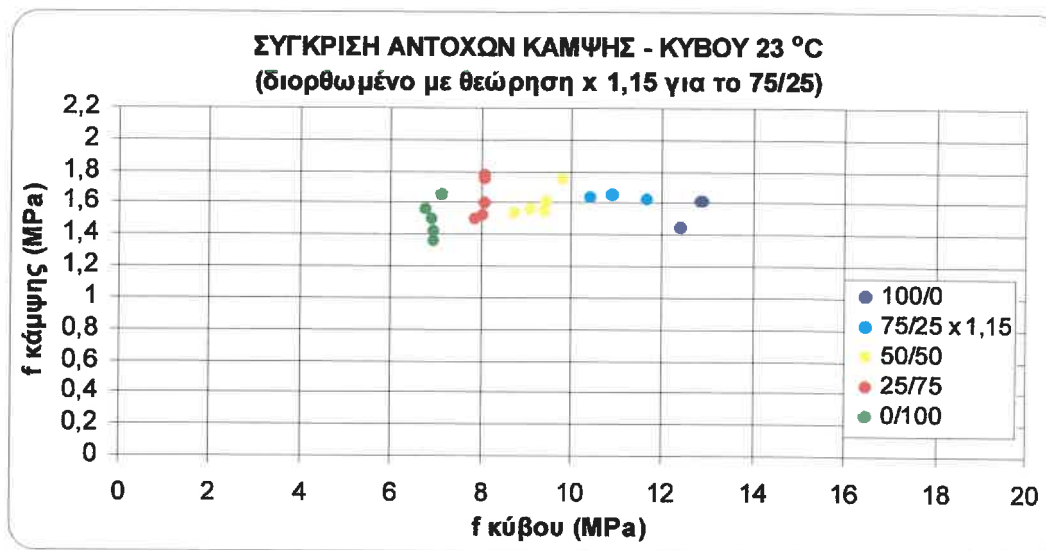


Σχήμα 3.2.25: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου στους 23 °C (διορθωμένο)

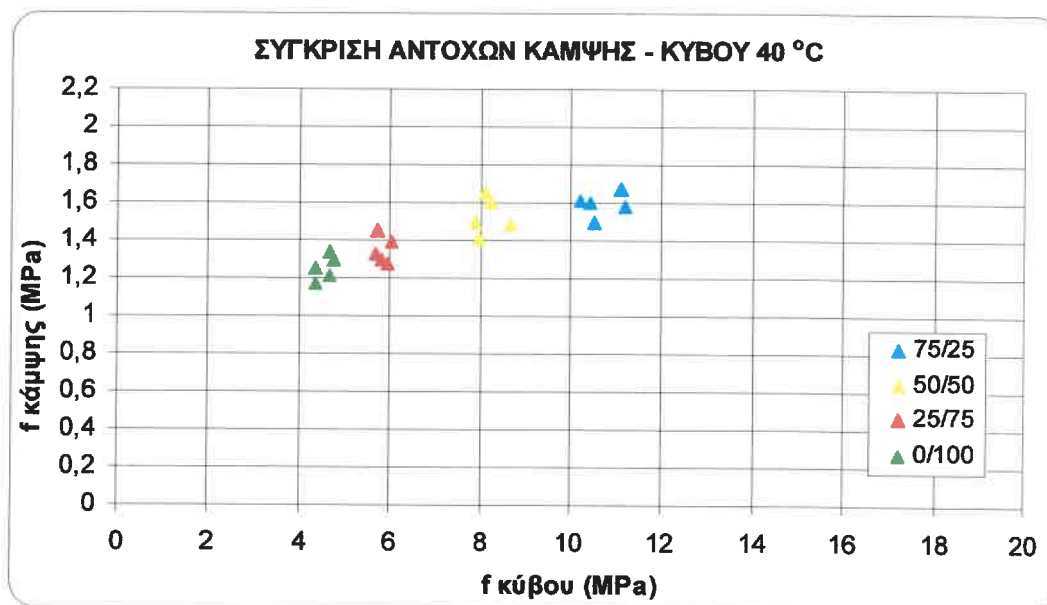
Αν εξαιρεθεί το μίγμα 75 / 25 για τους λόγους που έχουν ήδη αναλυθεί, παρατηρείται μείωση της αντοχής $f_{\text{κύβου}}$ κατά ίσα διαστήματα (μείωση της τάξης του 15% για κάθε αύξηση του ΦΑ κατά 25 %). Εδώ μάλιστα, μπορεί να γίνει και μια υπόθεση όσον αφορά τις αντοχές που αναμενόταν να έχει το μίγμα 75 / 25 εάν είχε το ίδιο ποσοστό υγρασίας με τα υπόλοιπα μίγματα. Σύμφωνα με την παρατήρηση της ισόποσης μείωσης των αντοχών κύβου κατά τη μετάβαση από το πλήρως θραυστό έως το πλήρως φρεζαρισμένο υλικό, η αναμενόμενη αντοχή κύβου θα ήταν περί τα 11 MPa. Με αυτή τη θεώρηση υπάρχει μια μείωση της αντοχής κύβου λόγω της αυξημένης υγρασίας της τάξης του 15 % (από 11 που αναμενόταν σε 9,5 MPa που μετρήθηκε). Αν υποθεθεί ίδια μείωση και της αντοχής σε κάμψη, τότε η αντοχή σε κάμψη θα αναμενόταν στα 1,6 MPa εντός των ορίων της αντοχής κάμψης που παρατηρήθηκε για όλα τα μίγματα. Η υπόθεση αυτή, λοιπόν, εμφανίζεται λογική από πλευράς αντοχών κάμψης και κύβου όσον αφορά τη θερμοκρασία των 23 °C.

Τα διορθωμένα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχ.3.2.26, όπου έχει πολλαπλασιαστεί τόσο η αντοχή κύβου όσο και η αντοχή κάμψης του μίγματος 75 / 25 με τον «διορθωτικό συντελεστή» 1,15 με σκοπό να ληφθεί υπόψη η μείωση των αντοχών της τάξης του 15%. Σημειώνεται ότι αυτό το διάγραμμα σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αποτελέσει αντικατάσταση του προηγούμενου που δημιουργήθηκε από

τις πραγματικές μετρήσεις, παρά απλά αποτελεί μια υπόθεση της κατάστασης που αναμενόταν.



Σχήμα 3.2.26: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου στους 23 °C (διορθωμένο με θεώρηση $\times 1,15$ για το μίγμα 75 / 25)



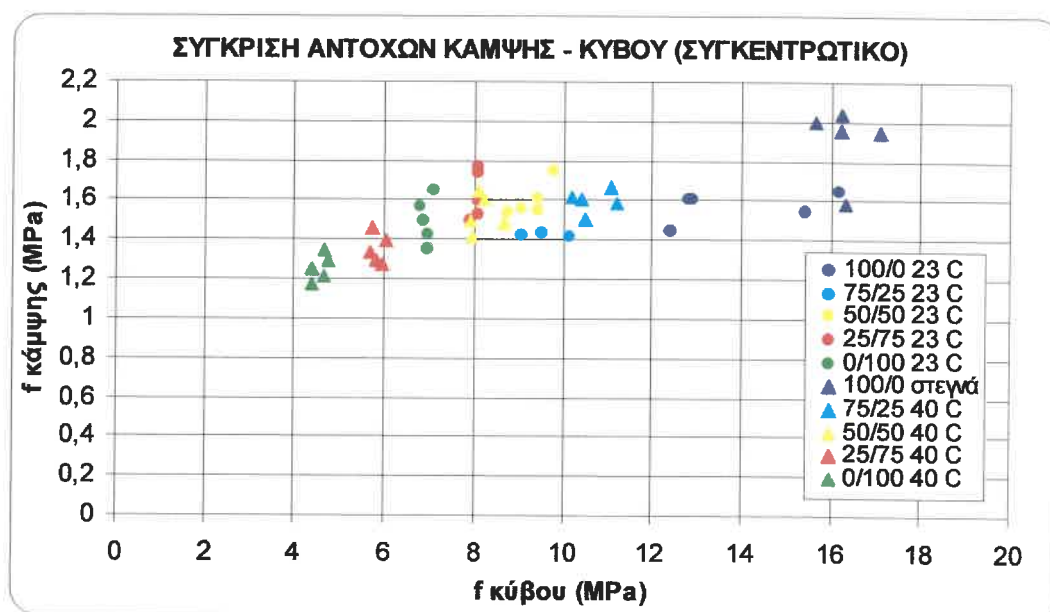
Σχήμα 3.2.27: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου στους 40 °C

Αντίθετα με τη θερμοκρασία των 23 °C, όταν η θερμοκρασία ανέβει στους 40 °C (σχ.3.2.27) παρατηρείται:

- α. Γενικά μικρή αύξηση της αντοχής σε κάμψη (συνολική μείωση από το 75 / 25 στο 0 / 100 27 %) με αντίστοιχη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε θλίψη (συνολική μείωση από το 75 / 25 στο 0 / 100 132 %).
- β. Μια μικρή μείωση στην αντοχή κάμψης όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού (της τάξης του 4 - 13 % όσο αυξάνει το ποσοστό του ΦΑ). Αυτή η μείωση είναι 50 % μεγαλύτερη κατά τη μετάβαση από το μίγμα 50 / 50 στο μίγμα 25 / 75, παρά από το 75 / 25 στο 50 / 50 ή από το 25 / 75 στο 0 / 100.
- γ. Μια σημαντική μείωση στην αντοχή κύβου (της τάξης του 28 – 40 % όσο αυξάνει το ποσοστό του ΦΑ), η οποία είναι 100 % μεγαλύτερη κατά τη μετάβαση από το 50 / 50 στο 25 / 75.

Έτσι φαίνεται ότι η αρνητική επίδραση του ποσοστού της θερμοκρασίας στο φρεζαρισμένο υλικό είναι εντονότερη όταν το ΦΑ ξεπεράσει το 50 %.

Τα προηγούμενα είναι πιο εμφανή στο παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα για όλες τις θερμοκρασίες (σχ.3.2.28). Εδώ εμφανίζεται και η επίδραση της ξήρανσης στα δοκίμια της σειράς 100 / 0 με θραύση στους 23 °C που είχαν αποκλειστικά θραυστό υλικό με 5,3 % υγρασία (ίσο με τα περισσότερα δοκίμια), που όμως αφέθησαν να στεγνώσουν σε κανονική θερμοκρασία (26 °C) χωρίς να διατηρηθούν στον ειδικό θάλαμο συντήρησης.



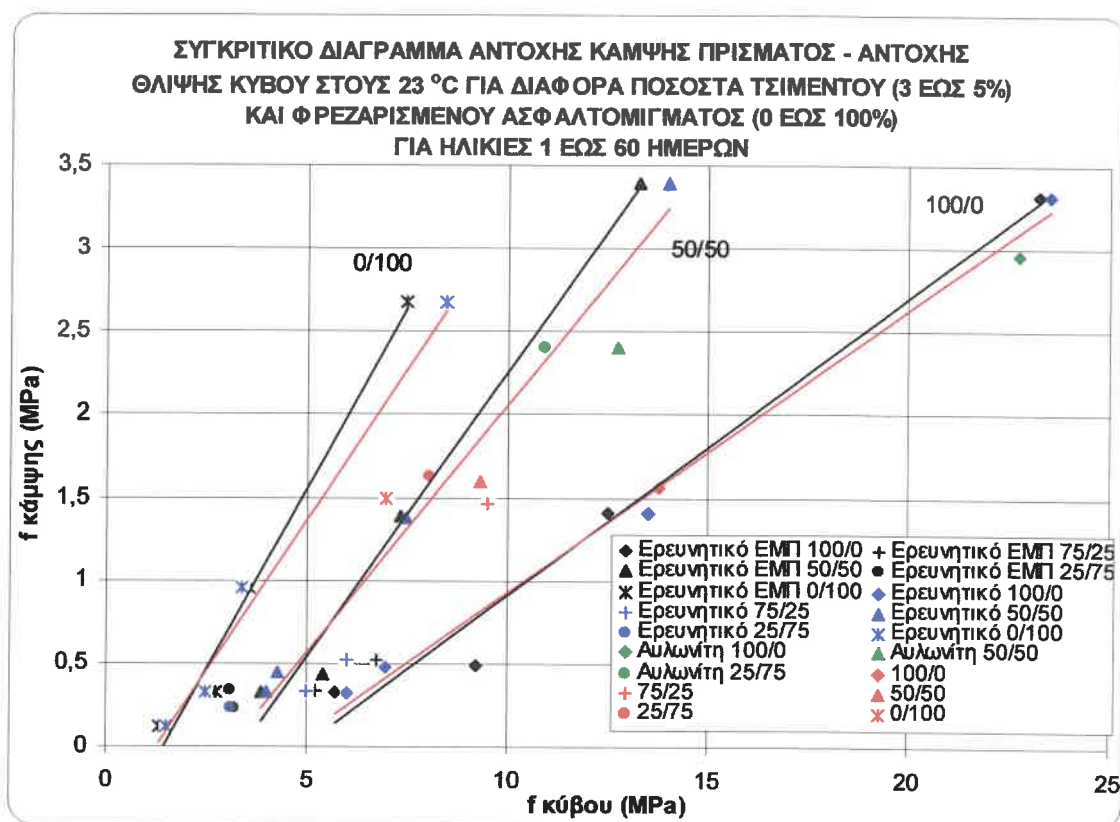
Σχήμα 3.2.28: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

αντοχή σε θλίψη κύβου μπορεί να έχει μεγάλες διακυμάνσεις με το αποτέλεσμα που θα εξεταστεί στη συνέχεια.

Για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη της συσχέτισης των αντοχών κάμψης πρίσματος και θλίψης κύβου λαμβάνοντας υπόψιν και την ηλικία των δοκιμών, συγκρίθηκαν οι μετρήσεις των δοκιμών της θερμοκρασίας 23 °C (δοκίμια σειράς 1 - 25) με άλλες έρευνες που έχουν διεξαχθεί στο ΕΜΠ:

- Έρευνητικό ΕΜΠ για διάφορα ποσοστά τσιμέντου (3 και 5 %) και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (0 έως 100 %) για ηλικίες 1 έως 60 ημερών.^[5]
- Προηγούμενη διπλωματική εργασία για διάφορα ποσοστά ΦΑ (0 έως 75 %) σε διάφορες ηλικίες δοκιμών.^[11]
- Ερευνητική εργασία για διάφορα ποσοστά φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (0 έως 100 %) και ηλικίες 1 έως 60 ημερών.^[9]

Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης φαίνονται στο σχ.3.2.30 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.2.30: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου στους 23 °C για διάφορα ποσοστά τσιμέντου (3 έως 5%) και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (0 έως 100%) για δοκίμια 1 έως 60 ημερών

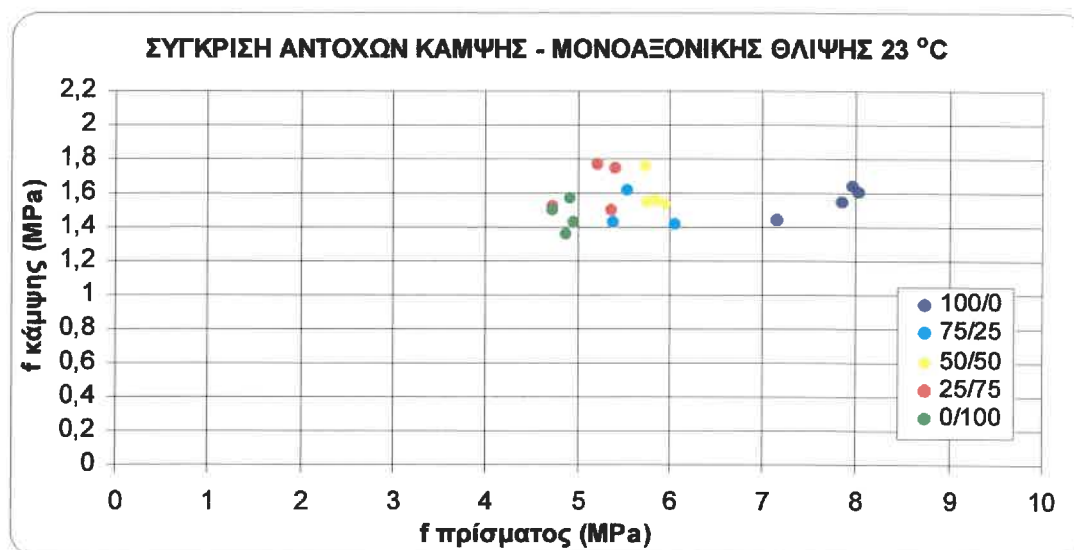
Οι γραμμές που εμφανίζονται στο σχ.3.2.30 υποδηλώνουν την περίπου γραμμική συσχέτιση μεταξύ των αντοχών κάμψης – κύβου, δηλαδή την ομοιόμορφη αύξηση των αντοχών κάμψης και κύβου με την αύξηση της ηλικίας των δοκιμίων. Με κόκκινο αποτυπώνονται τα σημεία της παρούσης διπλωματικής ενώ τα λοιπά σημεία αποτελούν μέρος των ερευνών που ερευνήθηκαν. Οι μαύρες γραμμές αποτελούν τη συσχέτιση αντοχής κάμψης – κύβου όπως βρέθηκε από Ερευνητικό του ΕΜΠ ενώ οι κόκκινες γραμμές αποτελούν την συνολική αποτύπωση όλων των επιμέρους ερευνών για ποσοστά ΦΑ 0, 50 και 100 %.

Με τη βοήθεια αυτών των γραμμών συσχέτισης παρατηρείται:

- Σχεδόν ταύτιση των γραμμών συσχέτισης του Ερευνητικού ΕΜΠ ^[5] με την συνολική αποτύπωση των ερευνών και πολύ καλή συμμετοχή του εργαστηριακού δείγματος της παρούσης διπλωματικής επί του συνόλου.
- Μεταβαλλόμενη κλίση των γραμμών συσχέτισης αντοχής κάμψης – κύβου όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (αύξηση της κλίσης).
- Για την ίδια αντοχή κύβου η αντοχή κάμψης μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό του ΦΑ. Μάλιστα η αντοχή κάμψης (αν διατηρηθεί σταθερή η αντοχή κύβου) αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό ΦΑ όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί αν για ορισμένη αντοχή κύβου βρεθούν βάσει του σχ.3.2.30 οι αντοχές κάμψης. Για παράδειγμα για αντοχή κύβου 7,5 MPa η αντίστοιχη αντοχή κάμψης για ποσοστό ΦΑ 0 % είναι 0,5 MPa, για ΦΑ 50 % είναι 1,3 MPa (υπερδιπλάσια) και για ΦΑ 100 % είναι 2,3 MPa (σχεδόν τετραπλάσια).

Η αντοχή που ενδιαφέρει τον μηχανικό στη διαστασιολόγηση των στρώσεων του οδοστρώματος είναι η αντοχή κάμψης, αφού οι στρώσεις του καταπονούνται σε κάμψη. Το γεγονός αυτό δημιουργεί νέα δεδομένα στη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων με χρήση μόνο της αντοχής σε θλίψη, αφού με βάσει τα δεδομένα του σχ.3.2.30 αυτή μεταβάλλει την αντοχή σε κάμψη ανάλογα με τη σύνθεση των στρώσεων του οδοστρώματος.

Η πρακτική σημασία των προηγούμενων παρατηρήσεων είναι ότι για δεδομένη απαιτούμενη αντοχή κάμψης με βάσει την οποία διαστασιολογείται ένα οδόστρωμα, απαιτείται μικρότερη αντοχή κύβου σε οδοστρώματα με φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα από τα αντίστοιχα με αποκλειστικά θραυστό υλικό για να εξαχθεί η ίδια αντοχή. Τα αποτελέσματα αυτά ελέχθηκαν εκτενέστερα στο Κεφ.3.3 «Εντατική και Παραμορφωσιακή Κατάσταση Διατομής Οδοστρώματος με Ανακυκλωμένη Στρώση».

Β. Αντοχή κάμψης πρίσματος – Αντοχή θλίψης πρίσματος

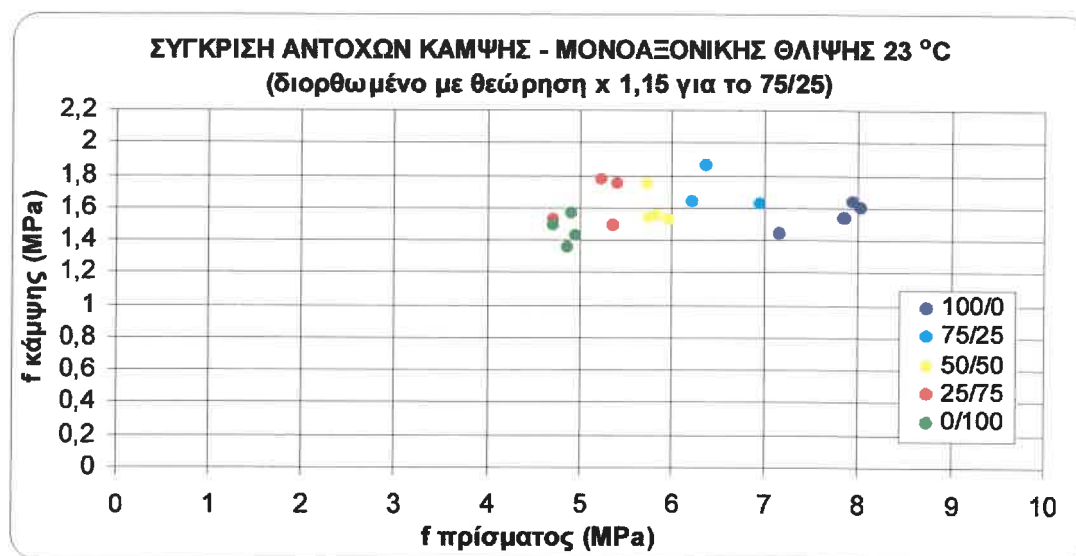
Σχήμα 3.2.31: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος στους 23 °C

Στο διάγραμμα του σχ.3.2.31 έγινε η συσχέτιση της αντοχής κάμψης και της αντοχής θλίψης πρίσματος για διάφορα μίγματα (100 / 0 έως 0 / 100) στη θερμοκρασία των 23 °C. Η αντοχή κάμψης εμφανίζεται εντός ορισμένων ορίων περίπου σταθερή για όλα τα μίγματα, ενώ η αντοχή θλίψης πρίσματος έχει εμφανή πτωτική τάση από το αποκλειστικά θραυστό στο αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό. Μεταξύ του μίγματος 100/0 και των υπολοίπων η διαφορά είναι σαφής, όμως το ίδιο δεν συμβαίνει και για τα υπόλοιπα 4 μίγματα όπου υπάρχει αλληλεπικάλυψη των ορίων τους.

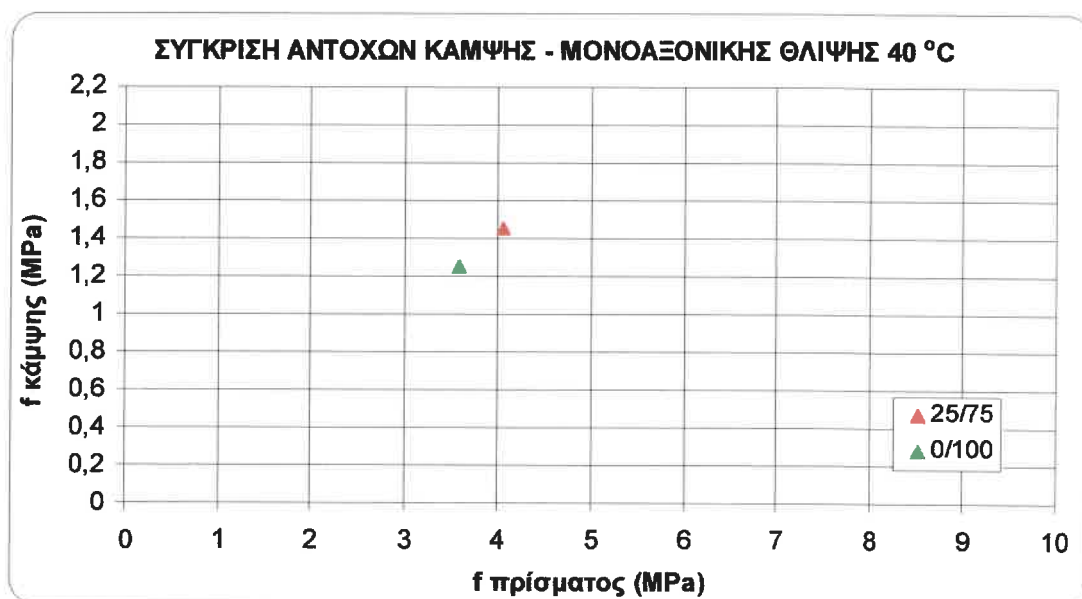
Αν όμως, όπως έγινε και πρωτίτερα στη συσχέτιση αντοχών κάμψης – κύβου, μεταβληθούν οι τιμές του μίγματος 75 / 25 επειδή είχε μεγαλύτερη υγρασία ($N/T = 1,155 > 1,113$) με βάση εμπειρική προσαρμογή, η διαφορά της αντοχής θλίψης πρίσματος γίνεται σαφέστερη (σχ.3.2.32). Βέβαια η προσαρμογή των αντοχών κάμψης και θλίψης πρίσματος του μίγματος 75 / 25 με τον πολλαπλασιασμό τους επί του «διορθωτικού» συντελεστή 1,15, αποτελεί μόνο μια υπόθεση της αναμενόμενης τιμής για υγρασία ίδια με αυτή του υπόλοιπου δείγματος και όχι αντικατάστασή της.

Σε αυτή την περίπτωση (ακόμα και αν απλά αγνοηθεί το μίγμα 75 / 25) η μείωση της αντοχής θλίψης πρίσματος παρουσιάζεται σταδιακή κατά τη μετάβαση από το μίγμα 100 / 0 στο 0 / 100 με τη μεγαλύτερη μείωση να λαμβάνει χώρα μεταξύ 100 / 0 και 50 / 50. Συγκεκριμένα η μείωση της αντοχής θλίψης είναι 25 % από το μίγμα 100 / 0 στο 50 / 50, και 17 % από το μίγμα 50 / 50 στο 0 / 100 (11 % από 50 / 50 στο 25 / 75 και 6 % από 25 / 75 στο 0 / 100). Αν μάλιστα συμπεριληφθεί η αντοχή θλίψης του διορθωμένου 75 / 25 η μείωση είναι σταδιακά 16 %, 10 %, 11 % και 6 % από το μίγμα

100 / 0 στο 0 / 100. Αυτό αποδίδεται στην άμεση επίδραση που έχει οποιαδήποτε αναλογία φρεζαρισμένου υλικού επί της συνολικής αντοχής του δοκιμίου, λόγω των ασθενέστερων συσσωματωμάτων που αποτελούν τα φρεζαρισμένα υλικά. Η επιφάνεια θραύσης μάλιστα των δοκιμίων με κάποια αναλογία ΦΑ συνηθέστερα ακολουθεί τα συσσωματώματα του φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, είτε θραύοντας τα ασθενέστερα αδρανή είτε χρησιμοποιώντας την μειωμένη συνάφεια μεταξύ αδρανούς και ασφαλτικού υλικού.

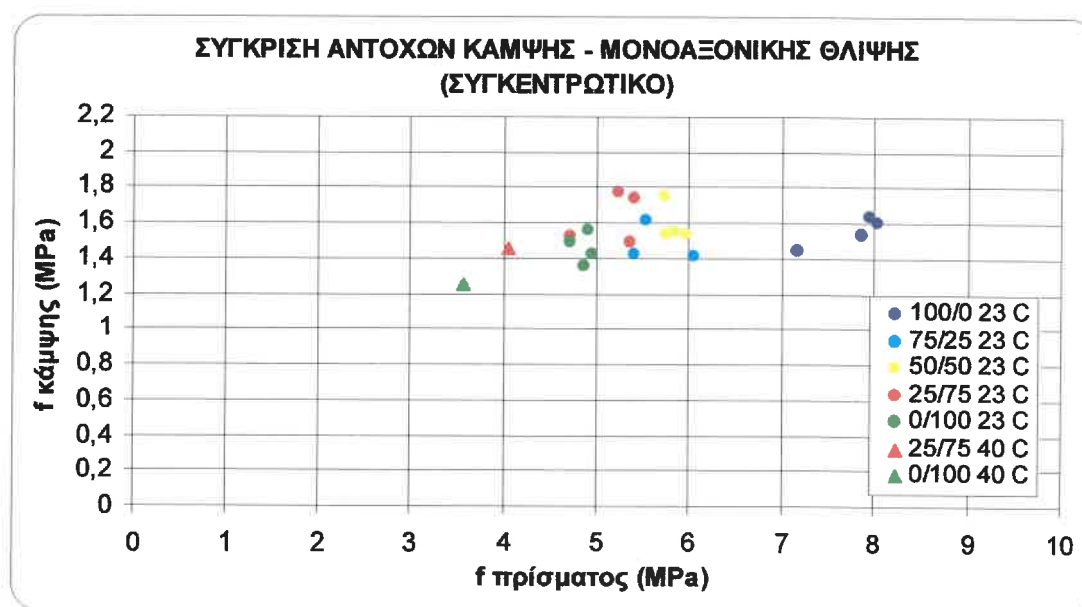


Σχήμα 3.2.32: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος στους 23 °C (διορθωμένο με θεώρηση $\times 1,15$ για το μίγμα 75 / 25)



Σχήμα 3.2.33: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος στους 40 °C

Η αντοχή θλίψης πρίσματος στους 40 °C έχει μόνο δυο αποτελέσματα για τις ομάδες δοκιμών του μίγματος 25 / 75 και 0 / 100 (σχ.3.2.33) λόγω της δυσκολίας διατήρησης της θερμοκρασίας των δοκιμών όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Εξαιτίας αυτού αν και παρατηρείται ελαφρά μείωση της αντοχής θλίψης πρίσματος και της αντοχής κάμψης από το μίγμα 25 / 75 στο 0 / 100 δεν μπορούν να εξαχθούν βέβαια συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στις αντοχές αυτές, παρά μόνο αν εξεταστεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα του σχ.3.2.34.



Σχήμα 3.2.34: Διάγραμμα αντοχής κάμψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

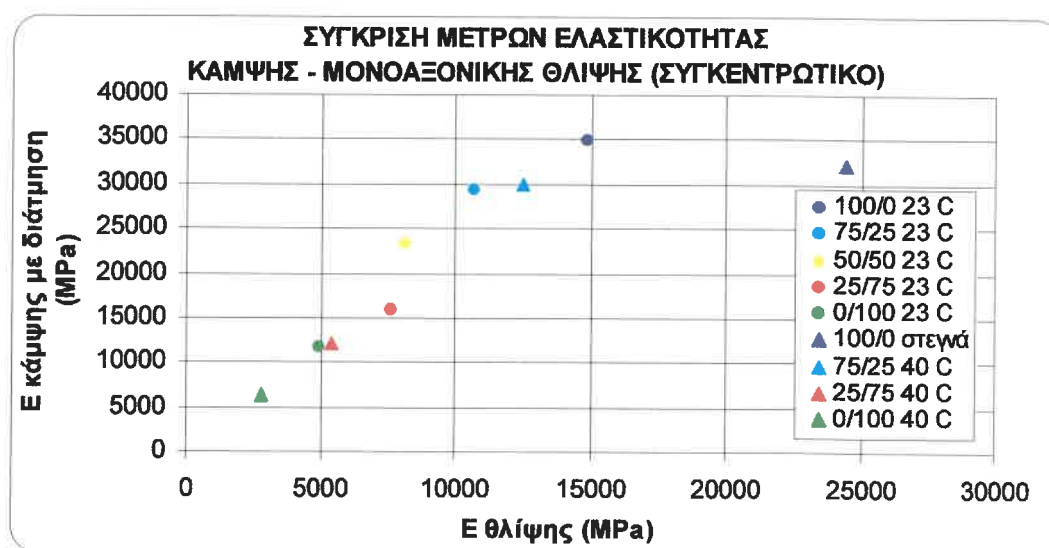
Το ποσοστό της πτώσης των αντοχών κάμψης από τη θερμοκρασία των 23 °C στους 40 °C είναι 17 % για το μίγμα 25 / 75 και 16 % για το μίγμα 0 / 100. Παρατηρείται δηλαδή γενικά μια μείωση των αντοχών κάμψης περίπου σταθερή για τα δυο αυτά μίγματα. Το ποσοστό της πτώσης των αντοχών θλίψης πρίσματος είναι 22 % για το μίγμα 25 / 75 και 26 % για το μίγμα 0 / 100. Παρατηρείται λοιπόν γενικά μείωση και των αντοχών θλίψης η οποία είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για το αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό.

Η αντίστοιχη μείωση των αντοχών κύβου είναι 27 % για το μίγμα 25 / 75 και 34% για το μίγμα 0 / 100, ελαφρώς μεγαλύτερες δηλαδή από αυτές των αντοχών πρίσματος.

Παρατηρείται λοιπόν με την αύξηση της θερμοκρασίας:

- α. Ταχύτερη μείωση της αντοχής κύβου από τη μείωση της αντοχής πρίσματος, και
- β. Ταχύτερη μείωση των αντοχών κύβου και πρίσματος μιγμάτων με αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό από τα αντίστοιχα με μερικώς θραυστό – μερικώς φρεζαρισμένο υλικό.

Γ. Μέτρο ελαστικότητας κάμψης πρίσματος με διόρθωση λόγω διάτμησης – Μέτρο ελαστικότητας θλίψης πρίσματος



Σχήμα 3.2.35: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας κάμψης πρίσματος με διόρθωση λόγω διάτμησης σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας θλίψης πρίσματος για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Στο σχ.3.2.35 γίνεται η σύγκριση του μέτρου ελαστικότητας κάμψης με διόρθωση λόγω διάτμησης με το μέτρο ελαστικότητας θλίψης, όπως αυτό βρέθηκε από τη μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας κάμψης και θλίψης είναι εμφανώς πτωτικά με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού. Αυτό συμβαίνει τόσο για τη θερμοκρασία των 23 όσο και για τη θερμοκρασία των 40 °C. Ωστόσο παρατηρούνται κάποιες διαφορές μεταξύ των δυο μέτρων ελαστικότητας:

- α. Στη θερμοκρασία των 23 °C το μέτρο ελαστικότητας θλίψης παρουσιάζει συνολική μείωση 66 % από το μίγμα 100 / 0 στο 0 / 100, όπως και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (μείωση 67 %), αλλά με μεγαλύτερη διακύμανση από αυτή της κάμψης (διακύμανση 28, 24, 7 και 34 % για τη θλίψη και 16, 21, 32 και

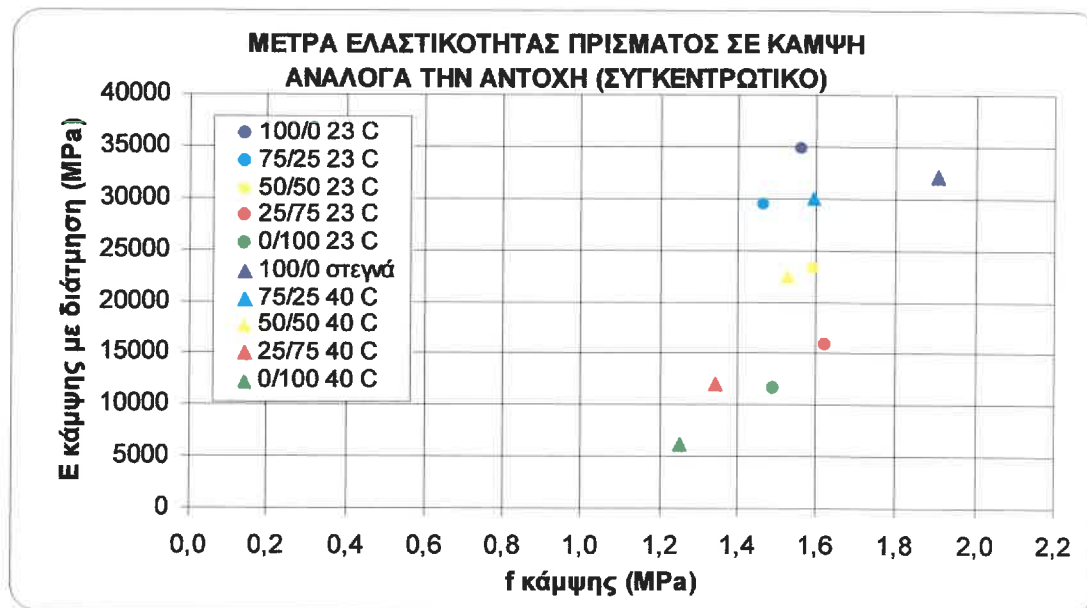
27 % για την κάμψη αντίστοιχα μεταξύ διαδοχικών μιγμάτων από 100 / 0 στο 0 / 100). Η αύξηση του ποσοστού του ΦΑ έχει δηλαδή περίπου την ίδια ποσοστιαία επίδραση στα μέτρα ελαστικότητας θλίψης και κάμψης (ελαφρώς μεγαλύτερη η μείωση της κάμψης) για τα μίγματα με εξαίρεση κατά τη μετάβαση από το 50 / 50 στο 25 / 75 όπου παρουσιάστηκε μεγάλη μείωση του μέτρου ελαστικότητας της κάμψης (32 %) χωρίς αντίστοιχη μείωση του μέτρου ελαστικότητας της θλίψης (7 %). Αυτό αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων των δοκιμίων με ποσοστό ΦΑ μεγαλύτερο του 50% στην κάμψη.

β. Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι για το μίγμα 25 / 75 29 % για τη θλίψη και 24 % για την κάμψη, ενώ του μίγματος 0 / 100 είναι 43 % και 46 % αντίστοιχα. Παρατηρείται δηλαδή μεγαλύτερη μείωση για το μίγμα που έχει αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό τόσο στην κάμψη όσο και στη θλίψη. Ταυτόχρονα παρατηρείται η ομοιόμορφη επίδραση της θερμοκρασίας στα δυο μέτρα ελαστικότητας.

Όσον αφορά τα στεγνά δοκίμια της σειράς 100 / 0 παρατηρείται μικρή πτώση του μέτρου ελαστικότητας κάμψης, καθώς και μια υπερβολική αύξηση (64 %) του μέτρου ελαστικότητας θλίψης. Αν διορθωθεί όμως το μίγμα από τις λανθασμένες τιμές που βρέθηκαν πειραματικά (όπως αυτές παρουσιάζονται στο Κεφ.3.1: Αποτελέσματα Δοκιμών), το μέτρο ελαστικότητας κάμψης διατηρείται περίπου σταθερό, ενώ το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη διατηρεί σημαντική από την πειραματικά εξαγόμενη αύξηση από τα 15000 στα 22500 MPa (53 %).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση των αντοχών κάμψης και θλίψης κύβου για τα στεγνά δοκίμια από το αντίστοιχο μίγμα 100 / 0, που διατηρήθηκε στον ειδικό θάλαμο συντήρησης, είναι 22 και 18 % αντίστοιχα. Συνεπώς, η ξήρανση φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο από τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά το μέτρο ελαστικότητας θλίψης (το μίγμα γίνεται πιο απαραμόρφωτο στη μονοαξονική θλίψη). Βέβαια, απαιτούνται περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα για την επιβεβαίωση των συμπερασμάτων αυτών.

Δ. Μέτρο ελαστικότητας κάμψης πρίσματος με διόρθωση λόγω διάτμησης – Αντοχή κάμψης πρίσματος

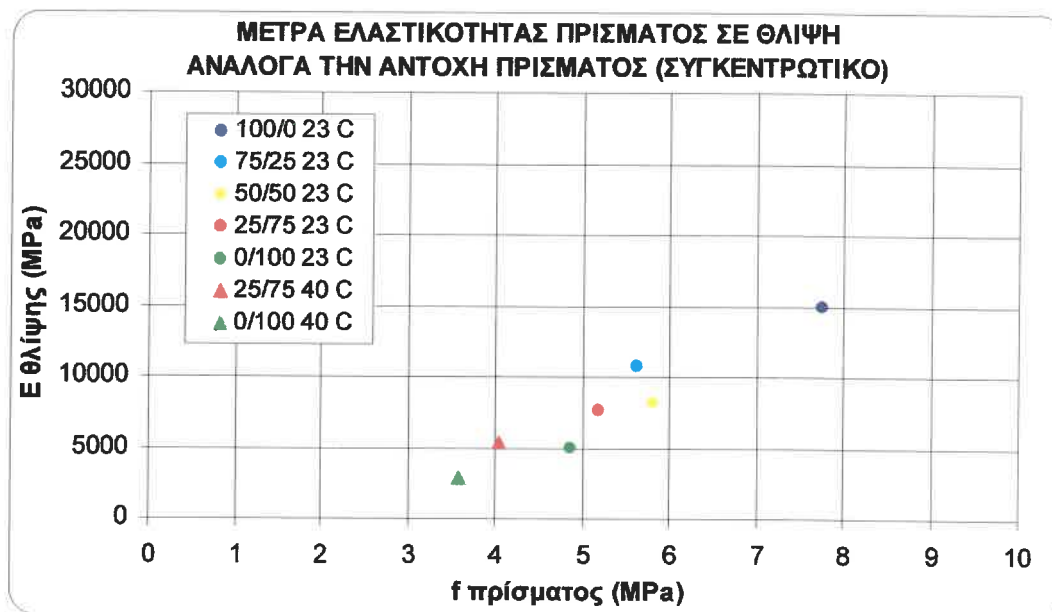


Σχήμα 3.2.36: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας κάμψης πρίσματος με διόρθωση λόγω διάτμησης σε σχέση με την αντοχή κάμψης πρίσματος για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Η αντοχή κάμψης, όπως φαίνεται στο σχ.3.2.36 δεν φαίνεται να επηρεάζεται με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζεται το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη με διάτμηση. Η αντοχή δείχνει να μεταβάλλεται εντός των στενών ορίων 1,47 – 1,62 MPa για την θερμοκρασία των 23 °C και των ορίων 1,25 – 1,59 MPa για τους 40 °C, ενώ το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλεται ιδιαίτερα σημαντικά από 11500 MPa σε 35000 MPa (23°C) και από 6000 MPa σε 30000 MPa (40 °C). Η μείωση δηλαδή της αντοχής φτάνει το 8 % και 11 % για τους 23 και 40 °C αντίστοιχα, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας αγγίζει το 32 % (διακύμανση από 16–32 %) για τους 23 °C και το 48 % (διακύμανση από 25 – 48 %) για τους 40 °C. Μεταβάλλεται, λοιπόν, το μέτρο ελαστικότητας σε μεγάλη κλίμακα χωρίς ανάλογη συμπεριφορά της αντοχής κάμψης.

Η μόνη αναλογία στη συμπεριφορά των δυο αυτών χαρακτηριστικών αφορά τη γενικότερη μείωση και των δυο με την αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε μίγμα (εξαιρείται βέβαια το μίγμα 75 / 25 για τους προαναφερθέντες λόγους). Συγκεκριμένα για την αντοχή κάμψης στα μίγματα 50 / 50, 75 / 25 και 0 / 100 η μείωση είναι 4, 17 και 16 % και του μέτρου ελαστικότητας 3, 24 και 46 % αντίστοιχα.

Ε. Μέτρο ελαστικότητας θλίψης πρίσματος – Αντοχή θλίψης πρίσματος



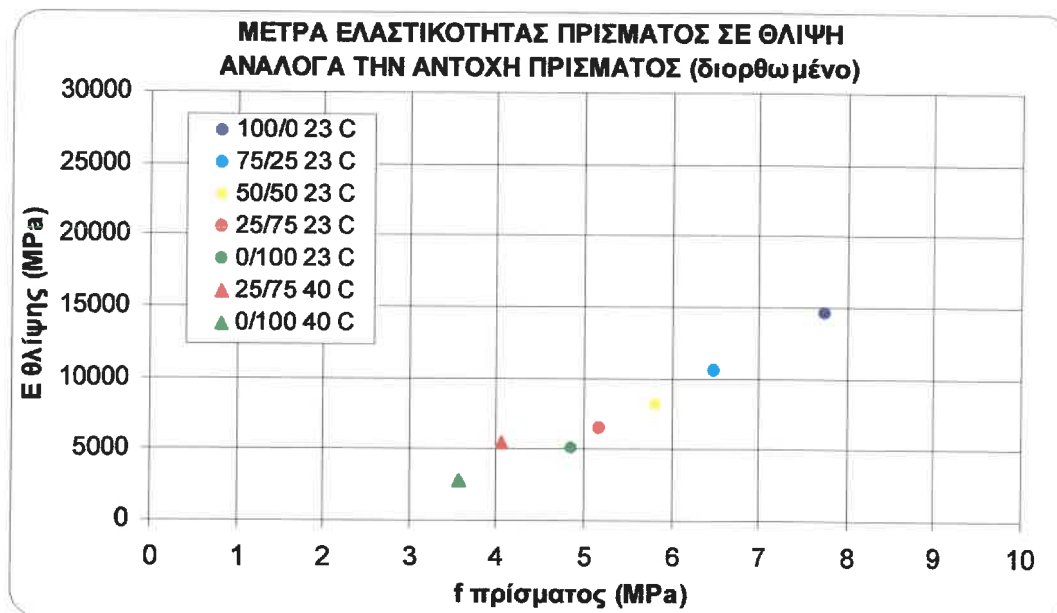
Σχήμα 3.2.37: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Η μεταβολή της αντοχής θλίψης πρίσματος και του μέτρου ελαστικότητας θλίψης ακολουθεί όμοια συμπεριφορά, ιδιαίτερα αν συμπεριληφθούν οι διορθωμένες τιμές για την αντοχή πρίσματος του 75 / 25 (με διόρθωση $\times 1,15$) και για το μέτρο ελαστικότητας του 25/ 75 (εξαιτίας των υπερβολικά υψηλών τιμών των δοκιμών 16,17).

Το αποτέλεσμα αυτής της διόρθωσης φαίνεται στο σχ.3.2.38, όπου το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται κατά σειρά 28, 24, 23 και 21 %, και η αντοχή θλίψης 16, 10, 11 και 6 % στους 23 °C. Υπάρχει δηλαδή μια ομοιομορφία στην μείωση των δυο χαρακτηριστικών περί του 24 % για το μέτρο ελαστικότητας και του 11 % για την αντοχή μεταξύ δυο διαδοχικών μιγμάτων.

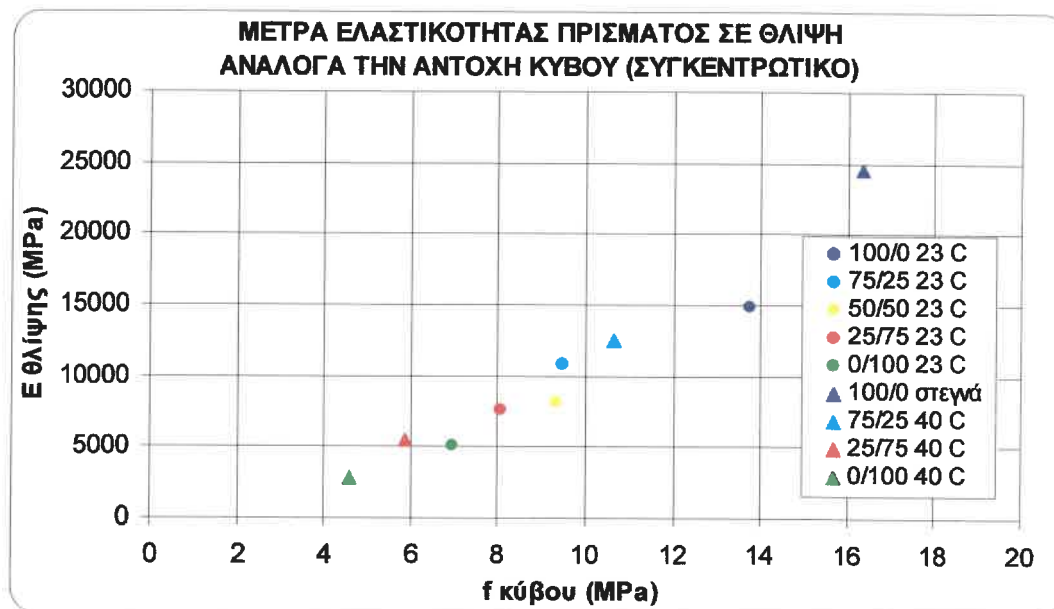
Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας για τα μίγματα 25 / 75 και 0 / 100 λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής είναι 14 και 42 % αντίστοιχα, ενώ της αντοχής πρίσματος 22 και 26 % αντίστοιχα. Παρατηρείται λοιπόν όσον αφορά την αντοχή πρίσματος ταχύτερη μείωση λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας από ότι λόγω της αύξησης του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού, που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά και τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας που κατά κανόνα είναι μεγαλύτερη.

Η μεγάλη διαφορά της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής (δηλ. των 14 και 42 %) αποδίδεται στην αυξημένη μείωση του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ των διαδοχικών μιγμάτων από περίπου 24% σε 47%.



Σχήμα 3.2.38: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης πρίσματος για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)

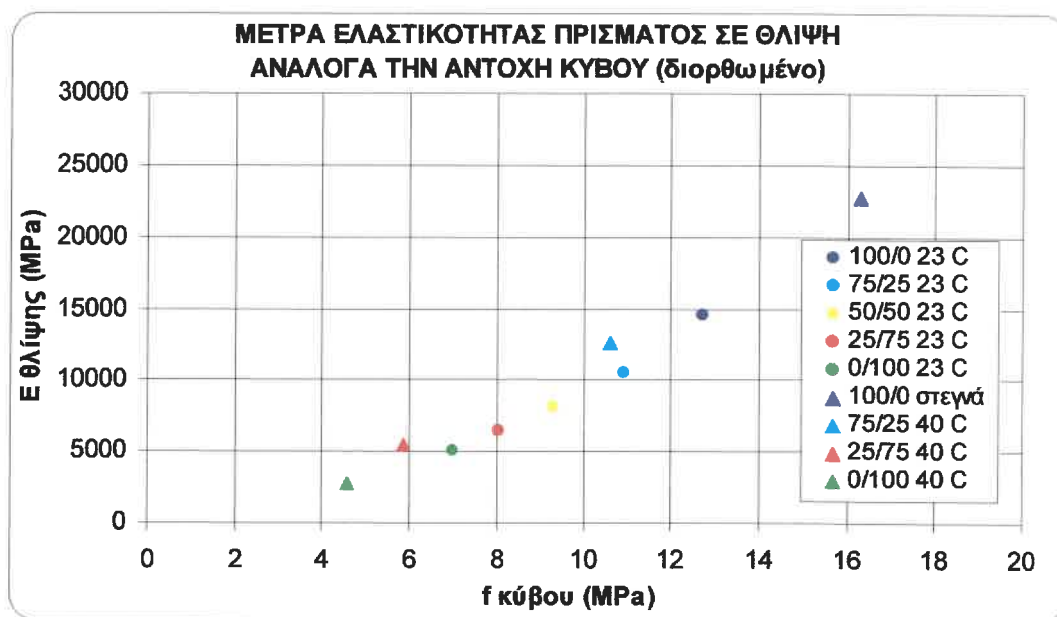
Ζ. Μέτρο ελαστικότητας θλίψης πρίσματος – Αντοχή θλίψης κύβου



Σχήμα 3.2.39: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Η μεταβολή της αντοχής θλίψης κύβου και του μέτρου ελαστικότητας θλίψης ακολουθεί επίσης όμοια συμπεριφορά, ιδιαίτερα αν συμπεριληφθούν οι διορθωμένες

τιμές για την αντοχή κύβου του 75 / 25 (με διόρθωση $\times 1,15$) και για το μέτρο ελαστικότητας του 25/ 75 (εξαιτίας των υπερβολικά υψηλών τιμών των δοκιμών 16,17).



Σχήμα 3.2.40: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης πρίσματος σε σχέση με την αντοχή θλίψης κύβου για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)

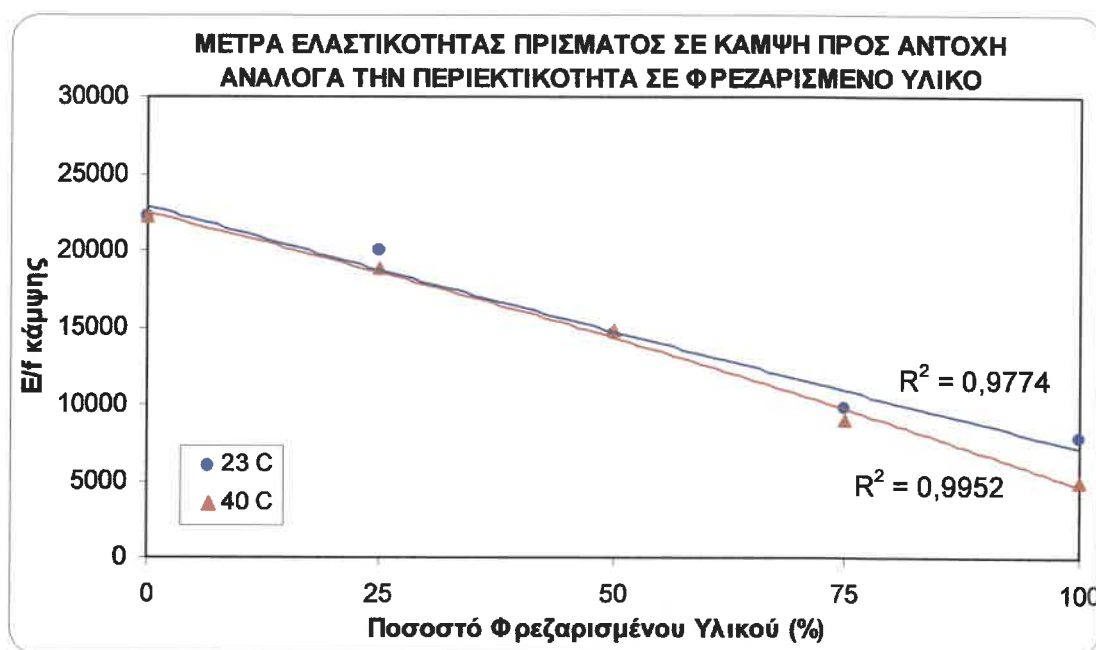
Το αποτέλεσμα αυτής της διόρθωσης φαίνεται στο σχ.3.2.40, όπου η αντοχή κύβου μειώνεται κατά 21, 15, 14 και 13 % στους 23 °C μεταξύ δυο διαδοχικών μιγμάτων κάθε φορά από το μίγμα 100 / 0 στο 0 / 100. Υπάρχει δηλαδή μια σταδιακή ελάττωση της μείωσης της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού. Το ίδιο συμβαίνει και στο μέτρο ελαστικότητας (αντίστοιχη μείωση 28, 24, 23 και 21 %) μόνο που όπως φαίνεται από τις αντίστοιχες τιμές η σταδιακή ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας είναι ελαφρώς μικρότερη της αντοχής.

Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας για τα μίγματα 25 / 75 και 0 / 100 λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής είναι 14 και 42 % αντίστοιχα, ενώ της αντοχής κύβου 27 και 34 % αντίστοιχα. Στο μίγμα 75 / 25 παρατηρείται μια άνοδος του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας που δεν μπορεί παρά να αποδοθεί στο ότι το μίγμα 75 / 25 στους 23 °C είχε αυξημένη υγρασία. Όσον αφορά τα προηγούμενα μίγματα γενικά παρατηρείται μείωση και του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής κύβου λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας.

Αν συγκριθούν τα προηγούμενα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αντοχής πρίσματος παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της αντοχής κύβου τόσο από θερμοκρασιακή μεταβολή όσο και από αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού. Ταυτόχρονα παρατηρείται μεγαλύτερη ομοιομορφία στη μεταβολή μέτρου

ελαστικότητας θλίψης με αντοχή κύβου παρά στη μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης με αντοχή πρίσματος, γεγονός που παρατηρείται και από τη γραμμική μείωση των δυο (μέτρου ελαστικότητας θλίψης – αντοχής κύβου) και στις δυο θερμοκρασίες (σχ.3.2.40). Μάλιστα αν σχεδιαστούν αυτές οι γραμμές που αντιστοιχούν στην ένωση των σημείων του σχ.3.2.40 για κάθε θερμοκρασία χωριστά, αυτές εμφανίζουν παράλληλη πορεία, που υποστηρίζει το φαινόμενο της ομοιόμορφης επίδρασης των δυο παραγόντων που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική (θερμοκρασία και ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού) σε αυτά τα χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας θλίψης και αντοχή κύβου).

Η. Μέτρο ελαστικότητας κάμψης πρίσματος προς αντοχή κάμψης πρίσματος – Ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού

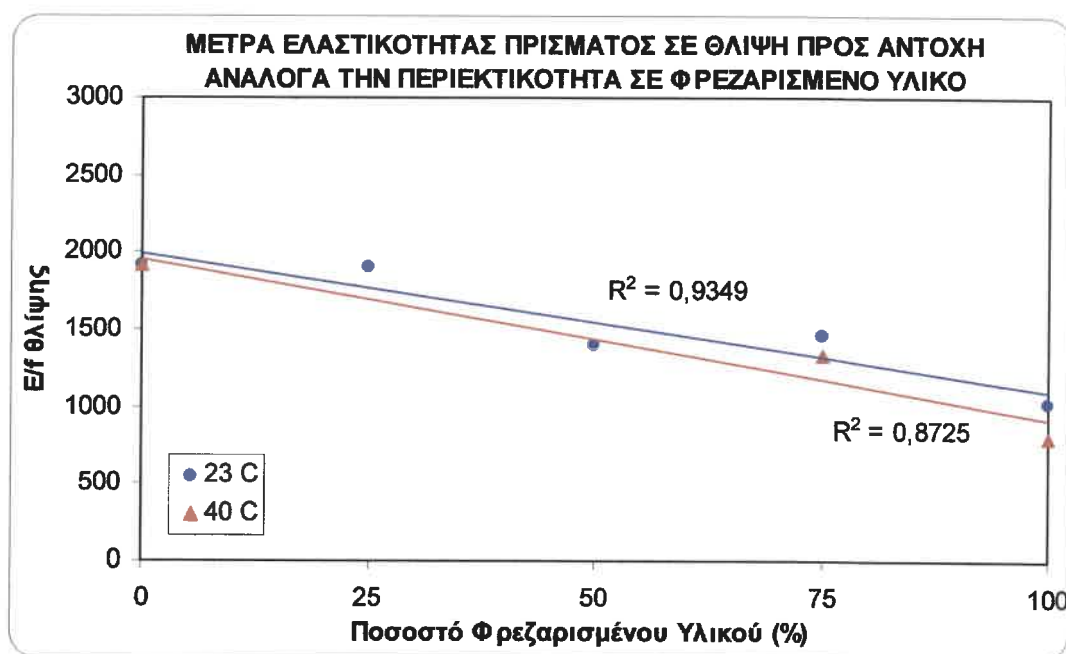


Σχήμα 3.2.41: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας κάμψης πρίσματος προς αντοχή κάμψης σε σχέση με το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

Στο σχ.3.2.41 παρατηρείται ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας κάμψης προς την αντοχή κάμψης και η μεταβολή του ως προς το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού. Και στις δυο θερμοκρασίες η μεταβολή είναι καθαρά πτωτική με μείωση της τάξης του 65 % για τους 23 °C και 78 % για τους 40 °C. Η μείωση είναι, λοιπόν, μεγαλύτερη όσο αυξάνει η θερμοκρασία, γεγονός που παρατηρείται εύκολα αφού και οι δύο θερμοκρασίες έχουν το ίδιο σημείο αρχής του μίγματος 100 / 0 που δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.

Επίσης, αν εξεταστούν τα αποτελέσματα του Κεφ.3.1 παρατηρείται μεταξύ των μιγμάτων 75 / 25 και 25 / 75 η μείωση του λόγου E/f είναι μεγαλύτερη. Αυτό αποδίδεται στην μεγαλύτερη μείωση του μέτρου ελαστικότητας κάμψης εντός αυτής της περιοχής αφού η αντοχή κάμψης παραμένει σχεδόν αμετάβλητη.

Θ. Μέτρο ελαστικότητας θλίψης πρίσματος προς αντοχή θλίψης πρίσματος – Ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού



Σχήμα 3.2.42: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης προς αντοχή πρίσματος σε σχέση με το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού για θερμοκρασίες 23 και 40 °C

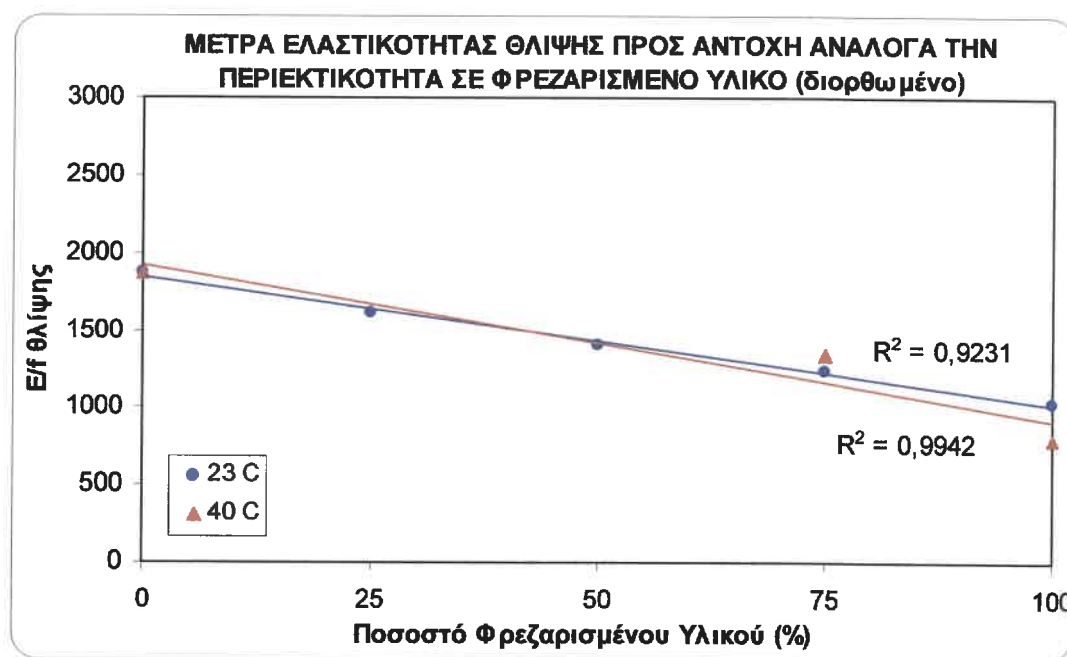
Αντίστοιχα με την κάμψη, ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας θλίψης προς την αντοχή θλίψης πρίσματος μεταβάλλεται πτωτικά όσο αυξάνει το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού (σχ.3.2.42). Μάλιστα η κλίση της πτώσης είναι και πάλι μεγαλύτερη στη θερμοκρασία των 40 °C (μείωση 58 % μεταξύ μίγματος 100 / 0 και 0 / 100) έναντι μείωσης 47 % των 23 °C.

Επίσης παρατηρείται για τους 23 °C ότι η πτώση του λόγου E/f ενώ είναι μεγάλη μεταξύ των μιγμάτων 75 / 25 με 50 / 50 και 25 / 75 με 0 / 100, παραμένει σταθερή μεταξύ των υπολοίπων τμημάτων. Βέβαια αν διορθωθεί το διάγραμμα από την λανθασμένη τιμή της αντοχής του μίγματος 75 / 25 (σχ.3.2.43), παρατηρείται ομοιόμορφη πτώση μεταξύ όλων των τμημάτων πλην του τμήματος 50 / 50 με 25 / 75 όπου και πάλι ο λόγος E/f είναι σταθερός λόγω της ισόποσης (ποσοστιαία) μείωσης του μέτρου ελαστικότητας θλίψης και της αντοχής πρίσματος εντός αυτού του

διαστήματος. Στο υπόλοιπο διάγραμμα η μείωση του μέτρου ελαστικότητας είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της αντοχής, που δικαιολογεί την πτωτική τάση των μεταβολών των λόγων E/f με την αύξηση του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού.

Συγκριτικά με τη μεταβολή του λόγου E/f κάμψης και θλίψης με το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού, παρατηρείται ότι:

- α. Η διαφορά μεταξύ των δυο θερμοκρασιών είναι πιο εμφανής στην κάμψη σε σύγκριση με τη θλίψη.
- β. Ο λόγος E/f είναι επτά με δέκα φορές μεγαλύτερος στην κάμψη από τη θλίψη και είναι μεγαλύτερος στα μίγματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο υλικό.

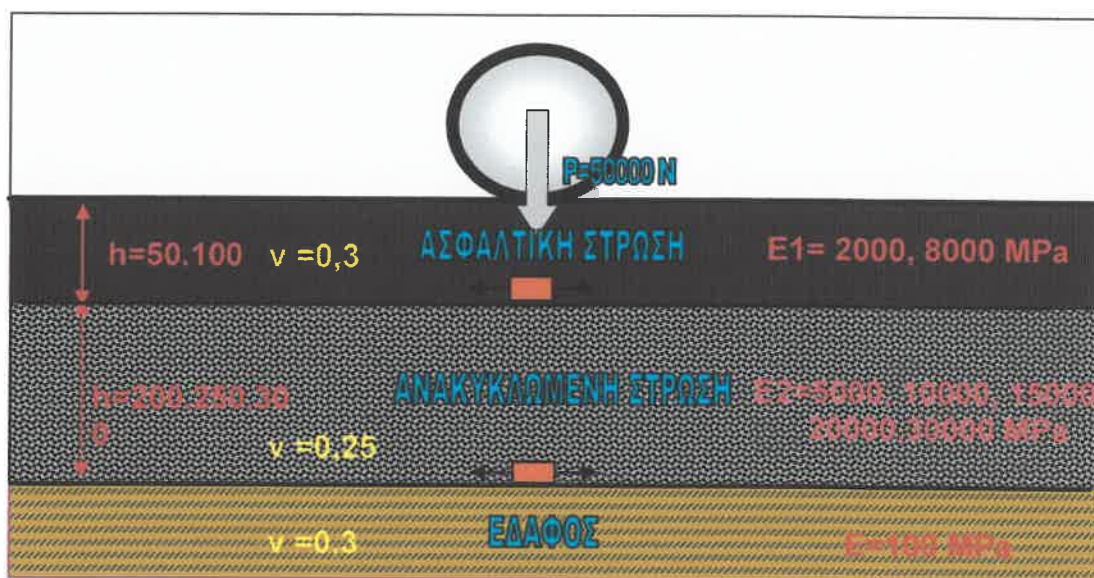


Σχήμα 3.2.43: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας θλίψης προς αντοχή πρίσματος σε σχέση με το ποσοστό φρεζαρισμένου υλικού για θερμοκρασίες 23 και 40 °C (διορθωμένο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.3: ΕΝΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Σε μια προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών μετρήσεων στην εκτιμώμενη συμπεριφορά των ανακυκλωμένων οδοστρώματων, έγινε ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε «τυπικά» - συνήθη ανακυκλωμένα οδοστρώματα. Η ανάλυση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρης αλλά προκαταρκτική αφ'ενός γιατί οι τιμές των ιδιοτήτων του υλικού (E , f) είναι τιμές εργαστηριακές και όχι "επιτόπου", αφ'ετέρου δε διότι δεν λήφθηκαν υπόψη όλοι οι παράγοντες που θα έπρεπε να ληφθούν.

Η εύρεση των τάσεων που αναπτύσσονται στο πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού προγράμματος BISAR. Θεωρούμε μια καταπόνηση που προέρχεται από όχημα με επιφάνεια επαφής (μοναδιαίου) τροχού ακτίνας $r = 150\text{mm}$ και πίεση επαφής $0,7\text{ MPa}$ (Εικόνα 3.3.1). Η καταπόνηση αυτή αντιστοιχεί σε φορτίο $P = 50.000\text{ N}$.



Εικόνα 3.3.1: Διατομή οδοστρώματος

Αναλύθηκαν για τα δεδομένα της εργασίας 60 διαφορετικές διατομές οδοστρωμάτων που προκύπτουν από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των παρακάτω στοιχείων του οδοστρώματος. Τα στοιχεία επιλέγονται κατάλληλα ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για όλες τις δυνατές διατομές που μπορούν να κατασκευαστούν στην πραγματικότητα. Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται η συμπεριφορά της ανακυκλωμένης στρώσης θα ληφθούν υπόψη διάφορες τιμές που θα ανταποκρίνονται σε όλο το φάσμα τιμών που χρησιμοποιούνται, ενώ η ανακυκλωμένη στρώση θα μελετηθεί για τη δυσμενέστερη περίπτωση.

- Οδόστρωμα με ασφαλική στρώση 50 και 100 mm πάχος και μέτρο ελαστικότητας 2000 και 8000 MPa.
- Ανακυκλωμένη στρώση πάχους 200, 250 και 300 mm και μέτρο ελαστικότητας 5000, 10000, 15000, 20000 και 30000 MPa.
- Το έδαφος θεωρήθηκε ότι έχει μέτρο ελαστικότητας 100 MPa ($CBR \approx 10\%$) και άπειρο βάθος.
- Ο λόγος Poisson για την ασφαλική στρώση λήφθηκε $\nu=0,3$ για την ανακυκλωμένη $\nu=0,25$ και για το έδαφος $\nu=0,3$.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.3.1, 3.3.2.

Πίνακας 3.3.1: Τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης σε σχέση
με τα μέτρα ελαστικότητας και τα πάχη των στρώσεων

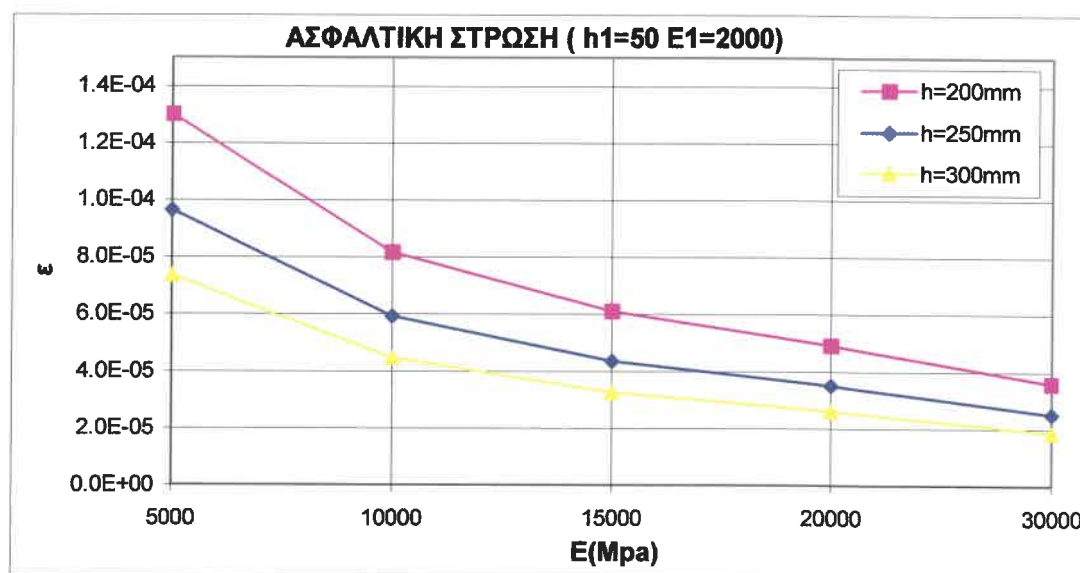
A.A	h ₁	h ₂	E ₁	E ₂	E ₃	STRESS		STRAIN	
	mm	mm	MPa	MPa	MPa	XX	ZZ	XX	ZZ
1	50	200	2000	5000	100	8.53E-01	-4.74E-02	1.30E-04	-9.48E-05
2	50	200	2000	10000	100	1.08	-3.33E-02	8.17E-05	-5.72E-05
3	50	200	2000	15000	100	1.21	-2.66E-02	6.09E-05	-4.21E-05
4	50	200	2000	20000	100	1.3	-2.26E-02	4.90E-05	-3.36E-05
5	50	200	2000	30000	100	1.43E+00	-1.77E-02	3.58E-05	-2.43E-05
6	50	250	2000	5000	100	6.31E-01	-3.37E-02	9.64E-05	-6.99E-05
7	50	250	2000	10000	100	7.81E-01	-2.31E-02	5.92E-05	-4.14E-05
8	50	250	2000	15000	100	8.66E-01	-1.83E-02	4.36E-05	-3.01E-05
9	50	250	2000	20000	100	9.25E-01	-1.54E-02	3.49E-05	-2.39E-05
10	50	250	2000	30000	100	1.00E+00	-1.20E-02	2.52E-05	-1.71E-05
11	50	300	2000	5000	100	4.83E-01	-2.51E-02	7.36E-05	-5.33E-05
12	50	300	2000	10000	100	5.89E-01	-1.69E-02	4.46E-05	-3.11E-05
13	50	300	2000	15000	100	0.648	-1.33E-02	3.26E-05	-2.25E-05
14	50	300	2000	20000	100	0.689	-1.11E-02	2.60E-05	-1.78E-05
15	50	300	2000	30000	100	0.745	-8.60E-03	1.87E-05	-1.27E-05
16	100	200	2000	5000	100	0.671	-3.69E-02	1.03E-04	-7.45E-05
17	100	200	2000	10000	100	0.883	-2.75E-02	6.69E-05	-4.69E-05
18	100	200	2000	15000	100	1.02	-2.27E-02	5.12E-05	-3.54E-05
19	100	200	2000	20000	100	1.11	-1.97E-02	4.19E-05	-2.88E-05
20	100	200	2000	30000	100	1.25	-1.59E-02	3.13E-05	-2.13E-05
21	100	250	2000	5000	100	0.511	-2.73E-02	7.80E-05	-5.66E-05
22	100	250	2000	10000	100	0.658	-1.97E-02	4.98E-05	-3.49E-05
23	100	250	2000	15000	100	0.746	-1.60E-02	3.76E-05	-2.60E-05
24	100	250	2000	20000	100	0.809	-1.37E-02	3.05E-05	-2.09E-05
25	100	250	2000	30000	100	0.895	-1.09E-02	2.25E-05	-1.53E-05
26	100	300	2000	5000	100	0.4	-2.09E-02	6.10E-05	-4.42E-05
27	100	300	2000	10000	100	0.507	-1.48E-02	3.84E-05	-2.68E-05
28	100	300	2000	15000	100	0.569	-1.19E-02	2.87E-05	-1.98E-05
29	100	300	2000	20000	100	0.613	-1.01E-02	2.31E-05	-1.58E-05
30	100	300	2000	30000	100	0.673	-7.98E-03	1.69E-05	-1.15E-05

Πίνακας 3.3.2: Τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας και τα πάχη των στρώσεων

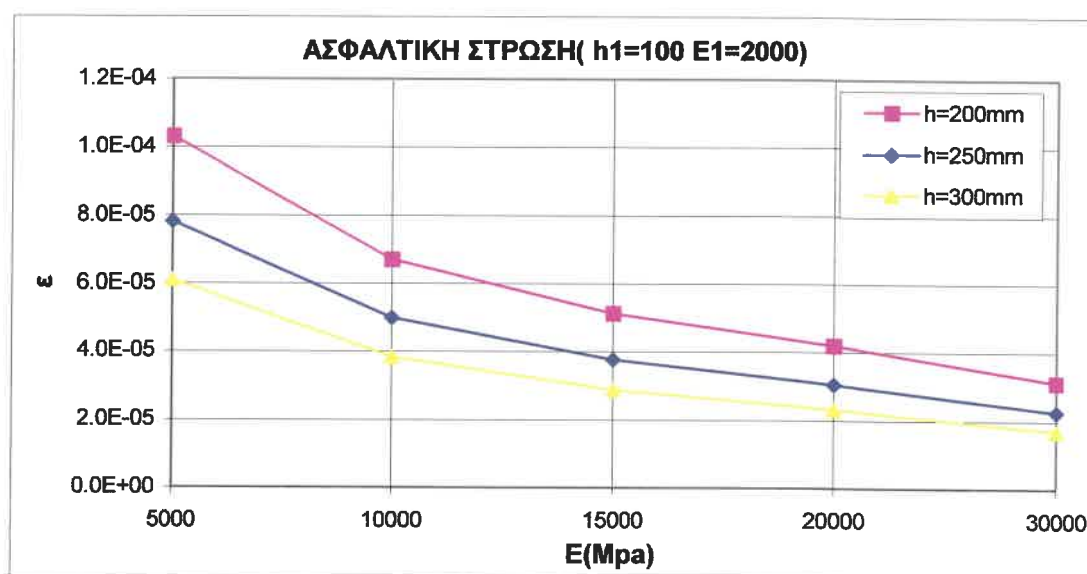
A.A	h ₁	h ₂	E ₁	E ₂	E ₃	STRESS		STRAIN	
	mm	mm	MPa	MPa	MPa	XX	ZZ	XX	ZZ
31	50	200	8000	5000	100	0.724	-3.74E-02	1.10E-04	-7.99E-05
32	50	200	8000	10000	100	0.928	-2.74E-02	7.03E-05	-4.91E-05
33	50	200	8000	15000	100	1.06	-2.26E-02	5.35E-05	-3.69E-05
34	50	200	8000	20000	100	1.16	-1.97E-02	4.38E-05	-3.00E-05
35	50	200	8000	30000	100	1.3	-1.60E-02	3.27E-05	-2.23E-05
36	50	250	8000	5000	100	0.542	-2.73E-02	8.27E-05	-5.97E-05
37	50	250	8000	10000	100	0.686	-1.96E-02	5.19E-05	-3.63E-05
38	50	250	8000	15000	100	0.777	-1.60E-02	3.91E-05	-2.70E-05
39	50	250	8000	20000	100	0.843	-1.37E-02	3.18E-05	-2.18E-05
40	50	250	8000	30000	100	0.936	-1.10E-02	2.35E-05	-1.60E-05
41	50	300	8000	5000	100	0.419	-2.08E-02	6.40E-05	-4.61E-05
42	50	300	8000	10000	100	0.525	-1.47E-02	3.97E-05	-2.77E-05
43	50	300	8000	15000	100	0.591	-1.19E-02	2.97E-05	-2.05E-05
44	50	300	8000	20000	100	0.637	-1.01E-02	2.40E-05	-1.64E-05
45	50	300	8000	30000	100	0.703	-8.03E-03	1.76E-05	-1.20E-05
46	100	200	8000	5000	100	0.53	-2.64E-02	8.09E-05	-5.83E-05
47	100	200	8000	10000	100	0.696	-2.00E-02	5.27E-05	-3.68E-05
48	100	200	8000	15000	100	0.811	-1.70E-02	4.09E-05	-2.82E-05
49	100	200	8000	20000	100	0.902	-1.52E-02	3.40E-05	-2.33E-05
50	100	200	8000	30000	100	1.04	-1.28E-02	2.61E-05	-1.78E-05
51	100	250	8000	5000	100	0.41	-2.01E-02	6.25E-05	-4.50E-05
52	100	250	8000	10000	100	0.532	-1.50E-02	4.03E-05	-2.81E-05
53	100	250	8000	15000	100	0.615	-1.26E-02	3.10E-05	-2.13E-05
54	100	250	8000	20000	100	0.679	-1.11E-02	2.56E-05	-1.75E-05
55	100	250	8000	30000	100	0.775	-9.20E-03	1.94E-05	-1.32E-05
56	100	300	8000	5000	100	0.325	-1.58E-02	4.96E-05	-3.57E-05
57	100	300	8000	10000	100	0.418	-1.16E-02	3.17E-05	-2.21E-05
58	100	300	8000	15000	100	0.481	-9.65E-03	2.42E-05	-1.67E-05
59	100	300	8000	20000	100	0.528	-8.43E-03	1.99E-05	-1.36E-05
60	100	300	8000	30000	100	0.597	-6.91E-03	1.50E-05	-1.02E-05

ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

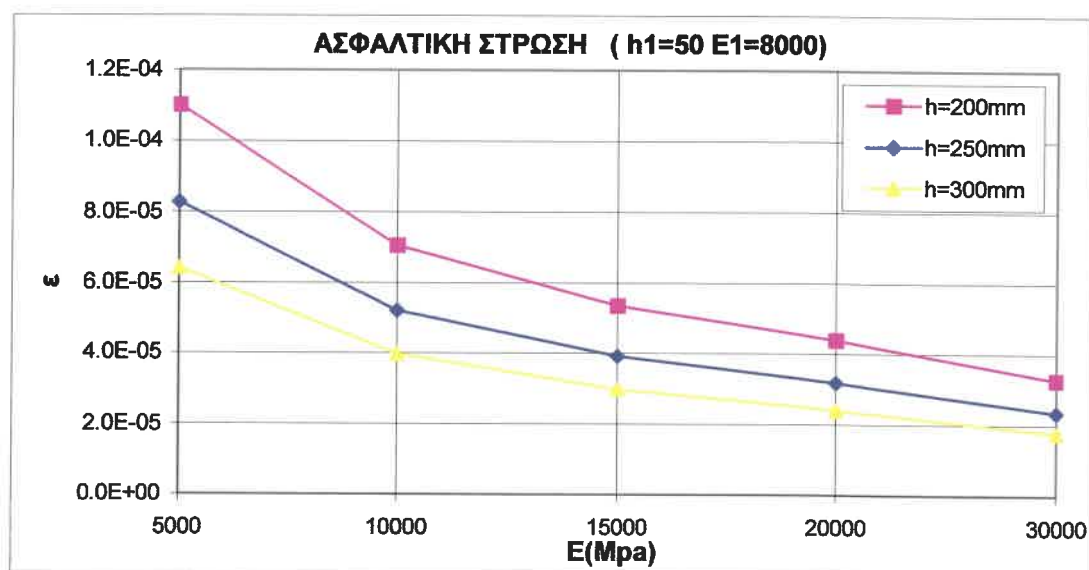
Στα διαγράμματα 3.3.1 - 3.3.4 απεικονίζεται η οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης κάτω από τον άξονα συμμετρίας του φορτίου. Η μελέτη των αναπτυσσομένων παραμορφώσεων στην ασφαλτική στρώση δεν είναι το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αλλά εξετάζεται γιατί επηρεάζει την κόπωση των οδοστρωμάτων. Σε κάθε διάγραμμα επιλέγεται σταθερό πάχος και μέτρο ελαστικότητας στην ασφαλτική στρώση και αποτυπώνεται η ανηγμένη παραμόρφωση ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως για 3 διαφορετικά πάχη.



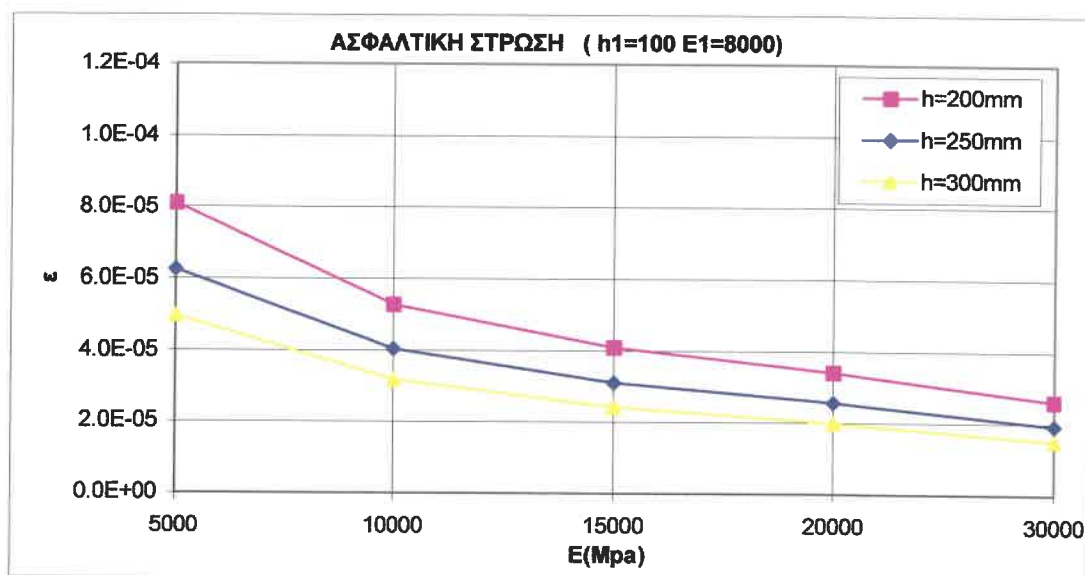
Διάγραμμα 3.3.1: Μεταβολή των ανοιγμένων παραμορφώσεων της ασφαλτικής στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.2: Μεταβολή των ανοιγμένων παραμορφώσεων της ασφαλτικής στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.3: Μεταβολή των ανοιγμένων παραμορφώσεων της ασφαλτικής στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=8000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.4: Μεταβολή των ανοιγμένων παραμορφώσεων της ασφαλτικής στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100\text{ mm}$, $E_1=8000\text{ MPa}$)

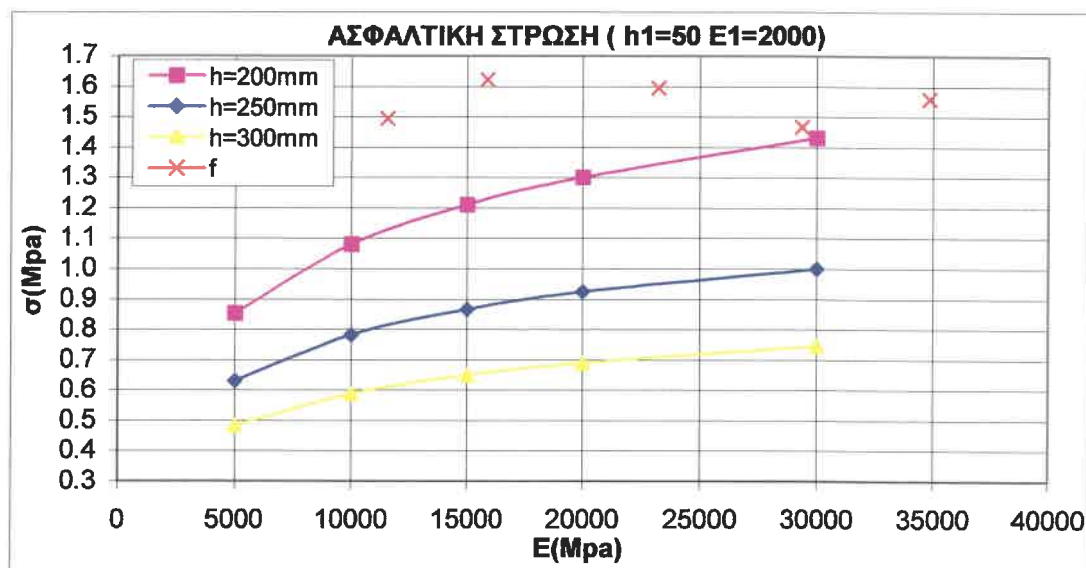
Από την μελέτη των διαγραμμάτων μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης συνεπάγεται την μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης.
- Ο ρυθμός μείωσης της ανηγμένης παραμόρφωσης ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης.
- Η αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης ελαττώνει την ανηγμένη παραμόρφωση.
- Η αύξηση του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης προκαλεί μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων χωρίς όμως να επηρεάζεται ο ρυθμός μείωσης μεταξύ των διαφορετικών παχών αφού παρατηρούμε ότι οι ευθείες είναι μεταξύ τους σχεδόν παράλληλες.

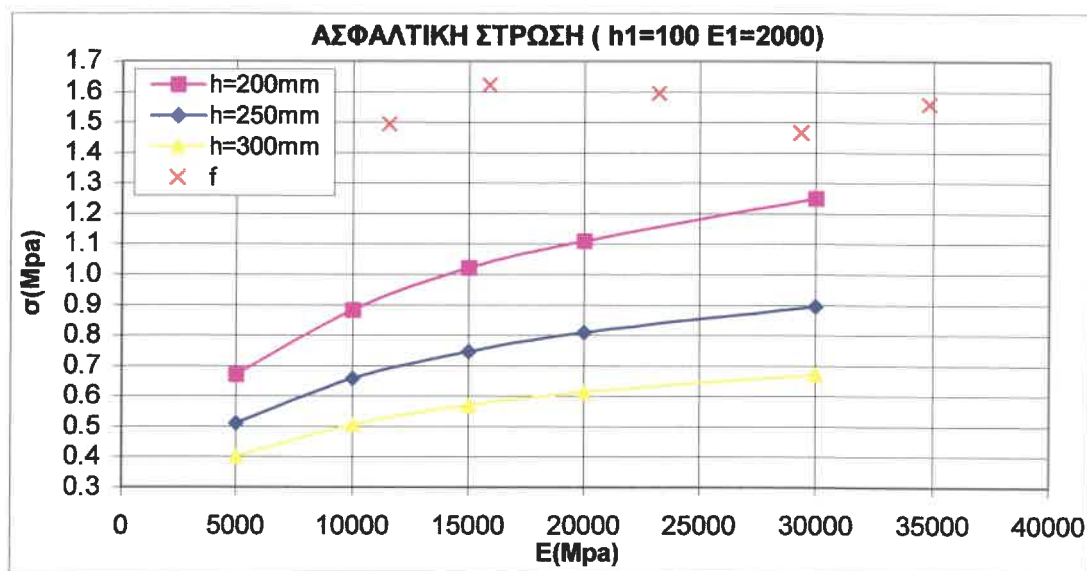
ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΗΣ ΣΤΡΩΣΕΩΣ

Στα διαγράμματα 3.3.5 - 3.3.8 αποτυπώνεται η αναπτυσσόμενη οριζόντια εφελκυστική (από κάμψη) τάση στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας του ανακυκλωμένου υλικού. Σε κάθε διάγραμμα επιλέγεται σταθερό πάχος και μέτρο ελαστικότητας στην ασφατική στρώση και αποτυπώνεται η αναπτυσσόμενη τάση ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως για 3 διαφορετικά πάχη ανακυκλωμένης στρώσεως.

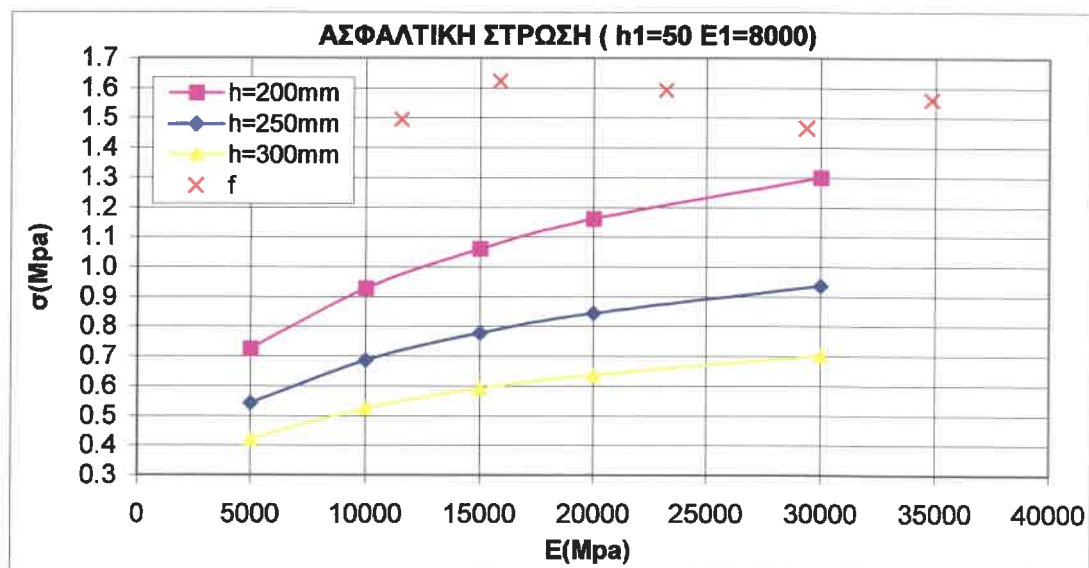
Στα διαγράμματα 3.3.5 - 3.3.8 παρουσιάζονται και οι αντοχές των μιγμάτων (I,II,III,IV,V) ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας όπως προέκυψαν από την δόκιμη κάμψης για την θερμοκρασία των 23 °C.



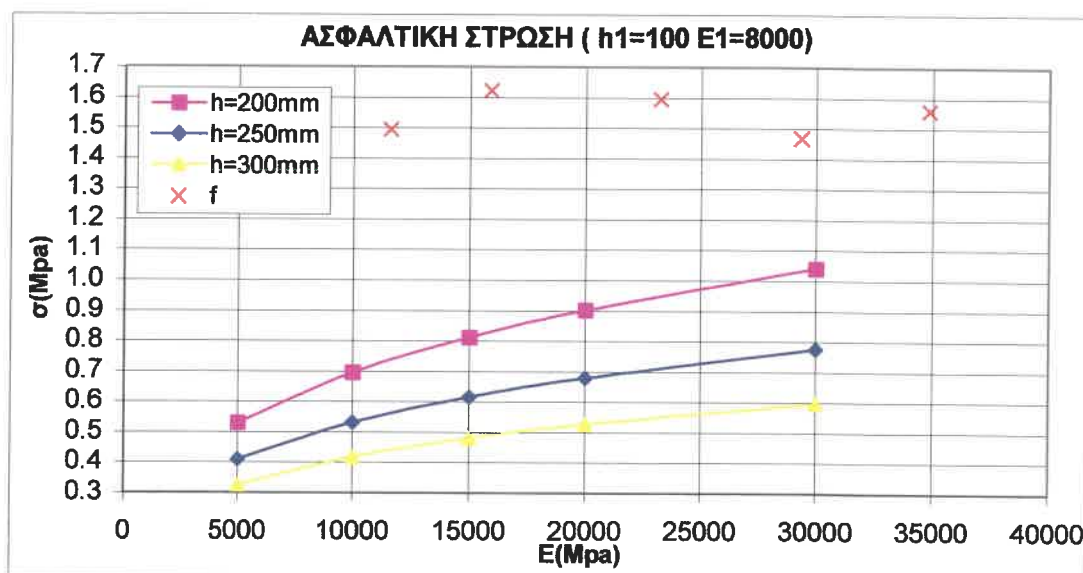
Διάγραμμα 3.3.5: Μεταβολή των τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.6: Μεταβολή των τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.7: Μεταβολή των τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=8000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.8: Μεταβολή των τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσεως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100$ mm, $E_1=8000$ MPa)

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων σ - E μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως συνεπάγεται αύξηση των επιβαλλόμενων τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης. Έτσι αν από ένα καθαρό μίγμα 100/0 που έχει μέτρο ελαστικότητας 34820 MPa περάσουμε σε ένα μίγμα 0/100 το οποίο έχει μέτρο ελαστικότητας 11560 MPa έχουμε ελάττωση των τάσεων στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης.
- Από την παρατήρηση της κλίσης των ευθειών συμπεραίνεται ότι ο ρυθμός αύξησης των τάσεων μειώνεται με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ενώ ο ρυθμός μείωσης των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι περίπου ίδιος και δεν εξαρτάται από το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης. Η παρατήρηση αυτή αποτυπώνεται και από το γεγονός ότι σε κάθε διάγραμμα οι τάσεις ανάλογα το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσεως κινούνται παράλληλα περίπου.
- Η αύξηση τόσο του μέτρου ελαστικότητας όσο και του πάχους της ασφαλτικής στρώσης ελαττώνει τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Αυτό προκύπτει από σύγκριση τιμών μεταξύ των διαγραμμάτων.

Σύμφωνα λοιπόν με όσα έχουν παρουσιαστεί προηγουμένως, στο Κεφάλαιο 3.2 «Επεξεργασία και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων», προκύπτει ότι τα μέτρα ελαστικότητας και οι αντοχές των μιγμάτων έχουν τις τιμές που αποτυπώνονται στον Πίνακα 3.3.3.

Πίνακας 3.3.3: Τιμές μέτρου ελαστικότητας και αντοχής σε κάμψη που προσδιορίστηκαν πειραματικά

ΜΙΓΜΑ (Θραυστό / Φρεζαρισμένο)	Ε κάμψης με διόρθωση λόγω διάτμησης	$f_{\text{κάμψης}}$
I (100 / 0)	34820	1,56
II (75 / 25)	29375	1,47
III (50 / 50)	23220	1,59
IV (25 / 75)	15880	1,62
V (0 / 100)	11560	1,49

Ο λόγος που επιλέχθηκε να παρουσιαστούν στο ίδιο διάγραμμα οι αναπτυσσόμενες τάσεις με τις αντοχές είναι για να φανεί πόσο μεγαλύτερες είναι οι αντοχές από τις αναπτυσσόμενες τάσεις όσο μεταβάλλεται η περιεκτικότητα σε φρεζαρισμένο ασφαλτόμιγμα.

Έτσι λοιπόν παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η διαφορά $\{ f - \sigma \}$ ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσης. Εξαίρεση στο παραπάνω συμπέρασμα αποτελεί το μίγμα II για το οποίο η αντοχή σε κάμψη προέκυψε σχετικώς χαμηλή (1,47).

Στον Πίνακα 3.3.4 παρουσιάζονται οι τιμές των τάσεων της ανακυκλωμένης στρώσεως που αντιστοιχούν στα μίγματα I, II, III, IV και V ανάλογα το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσεως. Στον Πίνακα 3.3.5 φαίνεται ο λόγος σ / f και στα διαγράμματα αποτυπώνονται τα δεδομένα του πίνακα συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως για 3 διαφορετικά πάχη ανακυκλωμένης στρώσεως επιλέγοντας κάθε φορά σταθερό πάχος και μέτρο ελαστικότητας στην ασφατική στρώση.

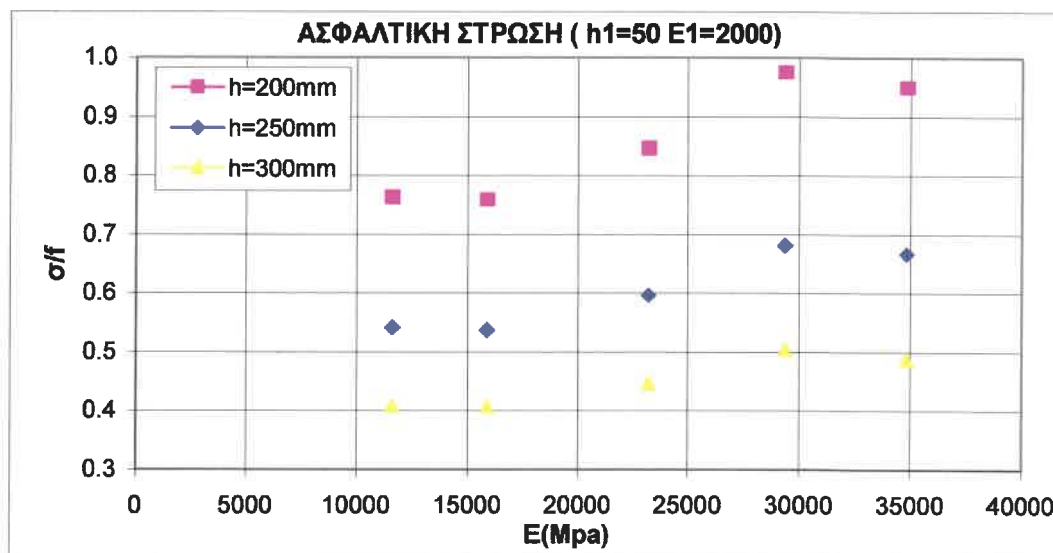
Πίνακας 3.3.4: Αναπτυσσόμενες τάσεις στον πυθμένα της ανακυκλωμένης στρώσης ανάλογα το μέτρο ελαστικότητας των μινμάτων

Ε _{κάρμης}	f _{κάρμης}	h ₁ =50 mm - E ₁ =2000 MPa			h ₁ =100 mm - E ₁ =2000 MPa			h ₁ =50 mm - E ₁ =8000 MPa			h ₁ =100 mm - E ₁ =8000 MPa		
		σ			σ			σ			σ		
		h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300
11560	1.49	1.14	0.81	0.61	0.93	0.69	0.53	0.93	0.73	0.55	0.74	0.54	0.45
15880	1.62	1.23	0.87	0.66	1.04	0.75	0.57	1.08	0.79	0.60	0.83	0.63	0.48
23220	1.59	1.35	0.95	0.71	1.16	0.85	0.64	1.21	0.87	0.67	0.95	0.71	0.55
29375	1.47	1.43	1.00	0.74	1.25	0.89	0.67	1.29	0.95	0.70	1.04	0.76	0.59
34820	1.56	1.48	1.04	0.76	1.30	0.93	0.69	1.36	0.97	0.72	1.10	0.80	0.60

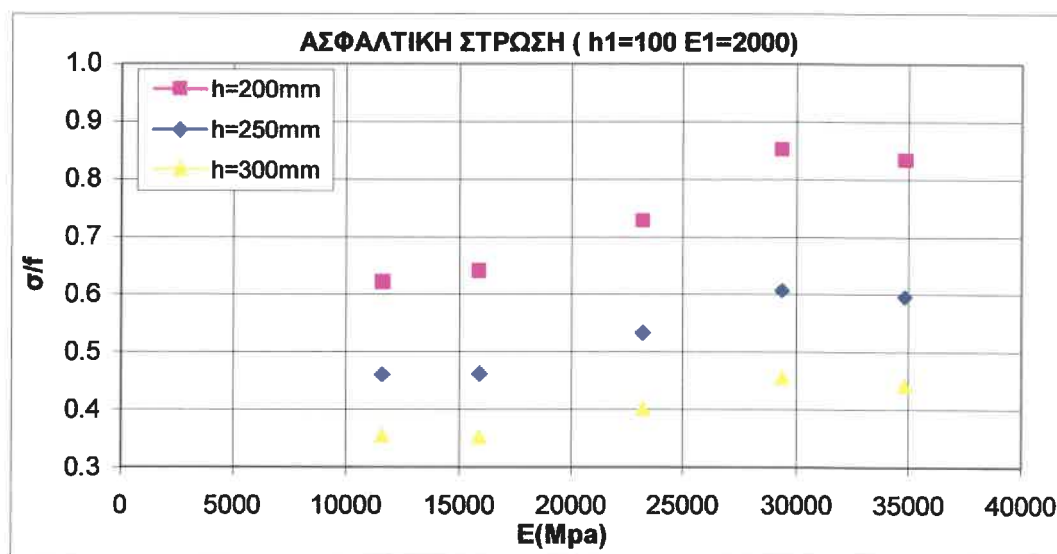
Πίνακας 3.3.5: Λόγος σ / f ανάλογα το μέτρο ελαστικότητας των μινμάτων

Ε _{κάρμης}	h ₁ =50 mm - E ₁ =2000 MPa			h ₁ =100 mm - E ₁ =2000 MPa			h ₁ =50 mm - E ₁ =8000 MPa			h ₁ =100 mm - E ₁ =8000 MPa		
	σ / f			σ / f			σ / f			σ / f		
	h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300	h=200	h=250	h=300
11560	0.76	0.54	0.41	0.62	0.46	0.35	0.62	0.49	0.37	0.50	0.36	0.30
15880	0.76	0.54	0.41	0.64	0.46	0.35	0.67	0.49	0.37	0.51	0.39	0.30
23220	0.85	0.60	0.45	0.73	0.53	0.40	0.76	0.55	0.42	0.60	0.45	0.35
29375	0.97	0.68	0.50	0.85	0.61	0.46	0.88	0.65	0.48	0.71	0.52	0.40
34820	0.95	0.67	0.49	0.83	0.60	0.44	0.87	0.62	0.46	0.71	0.51	0.38

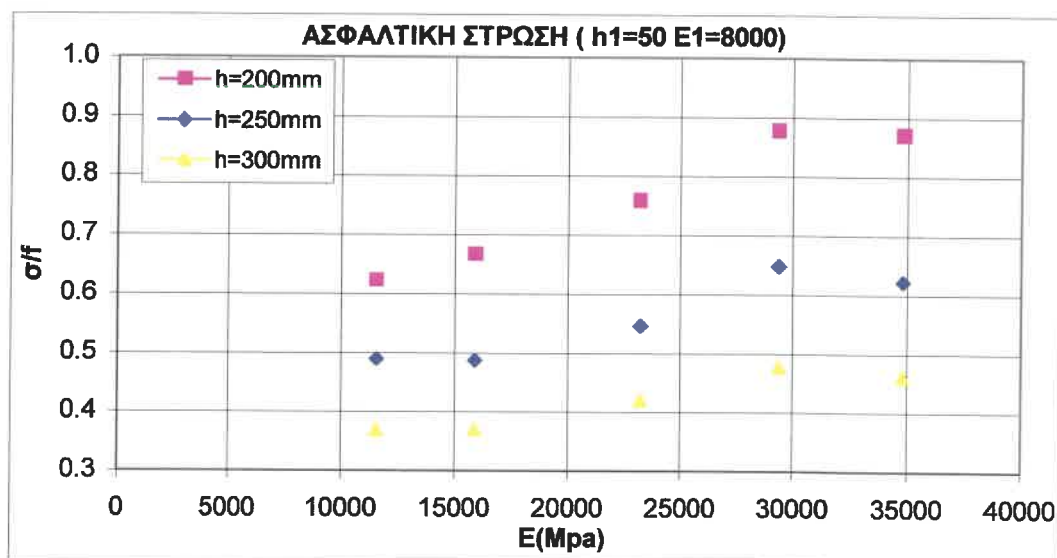
Στα διαγράμματα 3.3.9 - 3.3.12 απεικονίζεται ο λόγος σ / f ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας. Σε κάθε διάγραμμα επιλέγεται σταθερό πάχος και μέτρο ελαστικότητας στην ασφαλτική στρώση και παρουσιάζεται ο λόγος σ / f ως συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως για 3 διαφορετικά πάχη ανακυκλωμένης στρώσεως.



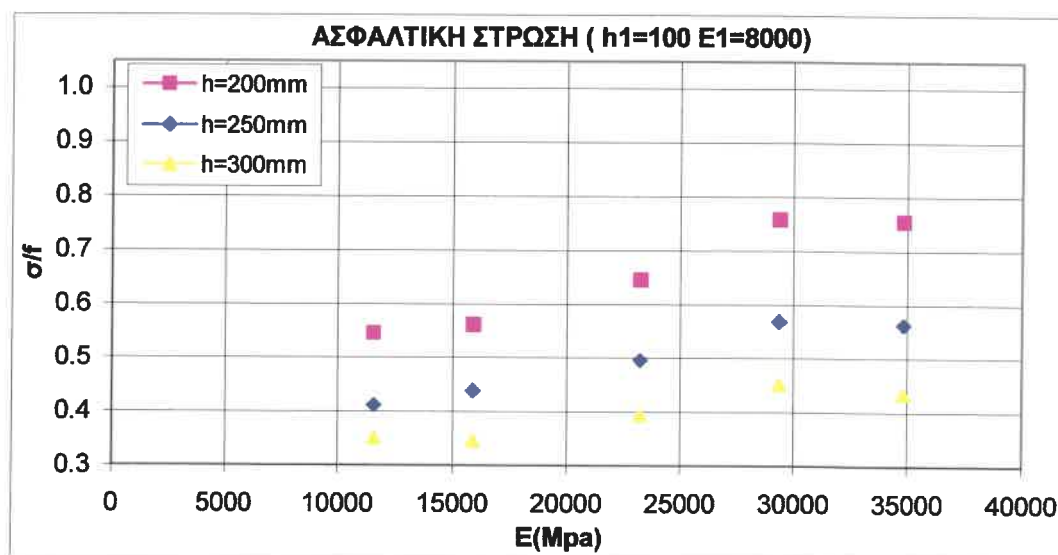
Διάγραμμα 3.3.9: Μεταβολή του λόγου σ / f συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.10: Μεταβολή του λόγου σ / f συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100$ mm, $E_1=2000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.11: Μεταβολή του λόγου σ / f συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=50$ mm, $E_1=8000$ MPa)



Διάγραμμα 3.3.12: Μεταβολή του λόγου σ / f συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας και του πάχους της ανακυκλωμένης στρώσεως ($h_1=100$ mm, $E_1=8000$ MPa)

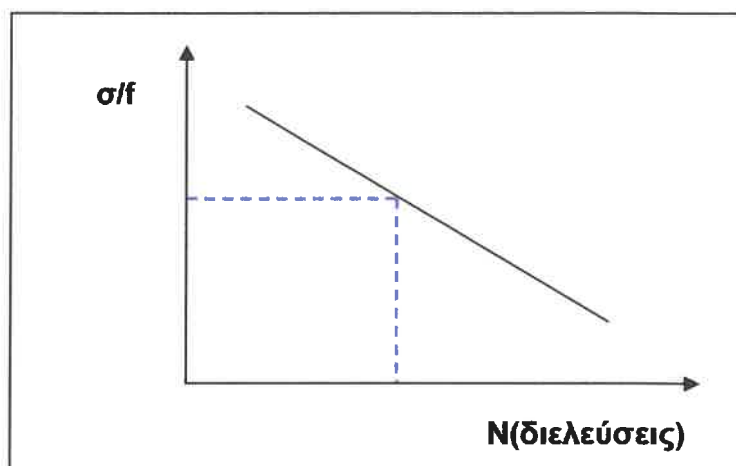
Από την παρατήρηση των παρακάτω διαγραμμάτων μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως έχει ως συνέπεια την αύξηση του λόγου σ / f .
- Η αύξηση τόσο του μέτρου ελαστικότητας όσο και του πάχους της ασφαλικής στρώσης ελαττώνει τον λόγο σ / f . Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από σύγκριση των τιμών ανάμεσα στα διαγράμματα 3.3.9 - 3.3.12.
- Ο ρυθμός μείωσης του λόγου σ / f είναι περίπου ίδιος περίπου ανεξαρτήτως πάχους της ανακυκλωμένης στρώσης. Η παρατήρηση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι οι τάσεις ανάλογα το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσεως κινούνται σχεδόν παράλληλα.

Η μόνη παραφωνία στα παραπάνω συμπεράσματα παρουσιάζεται στο μίγμα I με μέτρο ελαστικότητας 34820 MPa στο οποίο αναμενόταν ανοδική τάση ενώ αντίθετα παρατηρούμε ότι σταθεροποιείται στην τιμή του μίγματος II. Αυτό προφανώς οφείλεται όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στο γεγονός ότι οι τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων δεν προέκυψαν από το πρόγραμμα BISAR, αλλά πάρθηκαν γραφικά σύμφωνα με την γραμμή τάσης των προηγούμενων τιμών. Έτσι ο λόγος σ / f δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη τιμή αφού τόσο η εύρεση της γραμμής τάσης που ακολουθεί ο λόγος σ / f όσο και η γραμμική παρεμβολή για την εύρεση της τιμής που αντιστοιχεί στο μίγμα I είναι μικρής ακρίβειας άρα πιθανό να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Ο λόγος της αναπτυσσόμενης τάσης προς την αντοχή (σ / f) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού οδοστρωμάτων αφού εκφράζει την αντοχή του οδοστρώματος σε κόπωση. Ανάλογα λοιπόν τις επιθυμητές επιτρεπόμενες διελεύσεις που επιθυμούμε να έχει το οδόστρωμα που θα κατασκευαστεί βρίσκουμε το λόγο σ / f συμβουλευόμενοι κάποιο διάγραμμα της μορφής του σχήματος 3.3.13. Πρέπει να σημειωθεί ότι το παρακάτω διάγραμμα είναι ενδεικτικό και δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα διότι αλλάζει η κλίση της ευθείας ανάλογα τις αναλογίες του μίγματος σε φρεζαριστό υλικό.

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων $\sigma / f - E$ βρίσκουμε τα αποδεκτά μέτρα ελαστικότητας και πάχη των στρώσεων και επιλέγουμε το καταλληλότερο.



Σχήμα 3.3.13: Διάγραμμα αντιστοιχίας λόγου σ / f με ισοδύναμες διελεύσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

1. Αύξηση του ποσοστού του **φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος (ΦΑ)** (από το μίγμα 100 / 0 στο 0 / 100) στους 23 °C έχει ως συνέπεια τη μείωση των αντοχών θλίψης πρίσματος και κύβου, ενώ η αντοχή κάμψης διατηρείται περίπου σταθερή. Τα μέτρα ελαστικότητας θλίψης και κάμψης έχουν επίσης πτωτική τάση, με μεγαλύτερη μάλιστα μείωση από τις αντίστοιχες των αντοχών. Ο ρυθμός μείωσης των αντοχών θλίψης είναι περίπου ίδιος, ενώ ο ρυθμός μείωσης του μέτρου ελαστικότητας κάμψης είναι σημαντικά μεγαλύτερος της θλίψης.
2. Αύξηση της **θερμοκρασίας** των μιγμάτων έχει ως συνέπεια την περαιτέρω μείωση όλων των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχών και μέτρου ελαστικότητας). Μάλιστα η μείωσή των είναι μεγαλύτερη για μίγματα με μεγάλο ποσοστό ΦΑ (> 50 %), γεγονός που αποδίδεται στο ότι τα φρεζαρισμένα υλικά είναι πιο επιρρεπή στη θερμοκρασία.
3. Αύξηση της θερμοκρασίας ή του ποσοστού του φρεζαρισμένου υλικού μειώνει το **μέτρο ελαστικότητας** αναλογικά περισσότερο από ότι μειώνει την αντοχή σε κάμψη. Επομένως, το περιθώριο αντοχής μεταξύ αναπτυσσόμενης τάσης (που είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας) και αντοχής αυξάνει όσο η θερμοκρασία ή το ποσοστό ΦΑ στο μίγμα αυξάνει. Άρα η συμπεριφορά θα είναι βελτιωμένη. Πειράματα σε κόπωση που να περιλαμβάνουν την επίδραση της θερμοκρασίας και του ποσοστού ΦΑ είναι απαραίτητα προκειμένου να οριστικοποιηθούν τα συμπεράσματα αυτά.
4. Η **ξήρανση** του μίγματος 100 / 0 αυξάνει όλα τα μηχανικά χαρακτηριστικά περισσότερο όμως το μέτρο ελαστικότητας θλίψης.
5. Για την ίδια **αντοχή κύβου** η **αντοχή κάμψης** αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του ΦΑ. Η πρακτική σημασία αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι για δεδομένη απαιτούμενη αντοχή κάμψης με βάση την οποία διαστασιολογείται ένα οδόστρωμα, απαιτείται μικρότερη αντοχή κύβου σε οδοστρώματα με ΦΑ από τα αντίστοιχα με αποκλειστικά θραυστό υλικό για να εξαχθεί η ίδια αντοχή. Η συνηθισμένη πρακτική των Προδιαγραφών να απαιτούν ένα επίπεδο αντοχής σε θλίψη θα πρέπει στις περιπτώσεις ανακυκλώσεων να λάβει υπόψη ότι όταν επιτυγχάνεται μία ορισμένη αντοχή σε θλίψη η αντίστοιχη αντοχή σε κάμψη (κύριος παράγοντας διαστασιολόγησης) είναι μεγαλύτερη όσο το ποσοστό του φρεζαρισμένου υλικού ή η θερμοκρασία αυξάνει.

6. Μείωση του μέτρου ελαστικότητας της ανακυκλωμένης στρώσεως συνεπάγεται μείωση των *επιβαλλόμενων τάσεων* στον πυθμένα της στρώσεως και μείωση του *λόγου επιβαλλόμενης τάσης προς την αντοχή σ / f* . Αύξηση του πάχους ή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης, επίσης ελαττώνει τον λόγο σ / f . Υπενθυμίζεται ότι ο λόγος σ / f εκφράζει την αντοχή του οδοστρώματος σε κόπωση και όσο αυτός μειώνεται, τόσο αυξάνονται οι επιτρεπόμενες διελεύσεις που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.5: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι κάποια σημεία της παρούσας διπλωματικής χρειάζονται περαιτέρω έρευνα και για αυτό προτείνεται να μελετηθούν τα παρακάτω:

- Ίδιο ποσοστό νερού στα μίγματα ώστε να εξαλειφθεί η επίδραση διαφορετικής αναλογίας νερού προς τσιμέντου (N / T) στις αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας, αναφορικά με τα μίγματα 100 / 0 και 75 / 25 στους 23 °C.
- Διεξαγωγή δοκιμών σε θερμοκρασία 5 °C για να βρεθεί η επίδρασή της στις αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας (αυτό αποτελούσε στόχο της παρούσης εργασίας, αλλά λόγω βλάβης της πρέσας M.T.S. δεν έγινε).
- Εξέταση περισσότερων δοκιμών στη δοκιμή σε κάμψη όπου παρατηρήθηκε διαφοροποίηση από αποτελέσματα άλλων ερευνών.
- Εκτέλεση δοκιμών σε θλίψη πρίσματος στους 40 °C με κατάλληλες συνθήκες διατήρησης της θερμοκρασίας των δοκιμών, όπου λόγω αυτής της δυσκολίας δεν έγινε μεγάλο πλήθος δοκιμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ. Κόλιας – Α. Λοίζος “Σημειώσεις Οδοστρωμάτων”, Ε.Μ.Π Αθήνα 1999.
2. ASTM C-39 “Standard Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, 1999.
3. ASTM C-78 “Standard Method for Flexural Strength of Cylindrical Concrete Specimens (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”, 1999.
4. Wirtgen GMBH, Wirtgen Cold Recycling Manual
5. Σ. Κόλιας - Μ. Κατσάκου, Ερευνητικό πρόγραμμα Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου “Κατεργασία θραυστού αμμοχάλικου με τσιμέντο”, Αθήνα 2001.
6. Σ. Δέδες “Επίδραση προέλευσης αδρανούς και ποσοστού τσιμέντου στα μηχανικά χαρακτηριστικά κατεργασμένων θραυστών αμμοχάλικων”, 1997.
7. G. Engbers – J.P.Smallegange “The development of Emulscement: a base material with a future”, Reflecting cracking in pavements, 1996.
8. Gembloux – Faculte Universitaire des sciences agronomiques “Le recyclage en voiries Communales et provinciales”, 1998.
9. Kolias S., “Materials and Structures Vol.29 – Mechanical properties of cement-treated mixtures of milled bituminous concrete and crushed aggregates”, 1996.
10. Διπλωματική εργασία Μ. Λουβέρδη “Μελέτη ενυδάτωσης μιγμάτων τσιμέντου και ασφαλικού γαλακτώματος προς χρήσιν τους σε επί τόπου ανακύκλωση ασφαλικών οδοστρωμάτων”, Αθήνα 2002.
11. Διπλωματική εργασία Α. Αυλωνίτη “Επιτόπου εν ψυχρώ ανακύκλωση οδοστρωμάτων με τσιμέντο”, Αθήνα 2002.
12. Αναστάσιος Κ.Μουρατίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ., “Διαχείριση Οδών και Οδικών Έργων”, Θεσσαλονίκη 1994.
13. Διπλωματική εργασία Κυριαζής Ζ. - Γιαννακίδης Α., “Μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένου ασφαλομίγματος με γαλάκτωμα και τσιμέντο”, Αθήνα 2000.
14. Σ. Κόλιας – Α. Λοίζος, “Σημειώσεις στα ειδικά θέματα Οδοστρωμάτων”, Ε.Μ.Π Αθήνα 1997.
15. Διπλωματική εργασία Λ. Παπανικολάου “Προκαταρκτική αξιολόγηση και συγκριτική ανάλυση συστημάτων διαχείρισης οδοστρωμάτων”, Αθήνα 2003.
16. Νικολαΐδης Φ., “Οδοποιία, Οδοστρώματα – Υλικά έλεγχος ποιότητας”, 1996.
17. Διπλωματική εργασία Σεγρεδάκης Λ., “Μηχανικά χαρακτηριστικά ανακυκλωμένου ασφαλομίγματος με γαλάκτωμα και τσιμέντο”, Αθήνα 2001.
18. CEN prEN 12359,12394, “Testing Concrete – Determination of flexural and compressive strength of test specimens”, 1997.

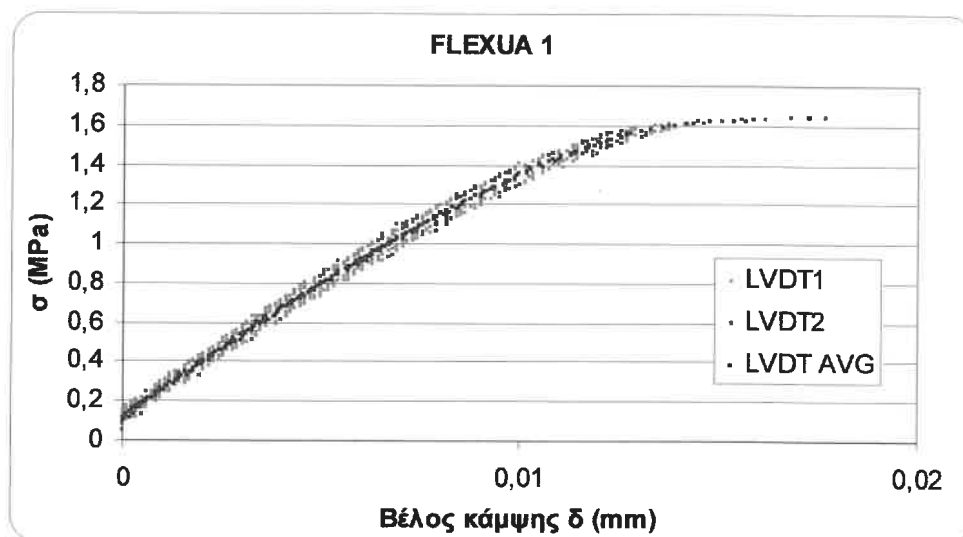
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

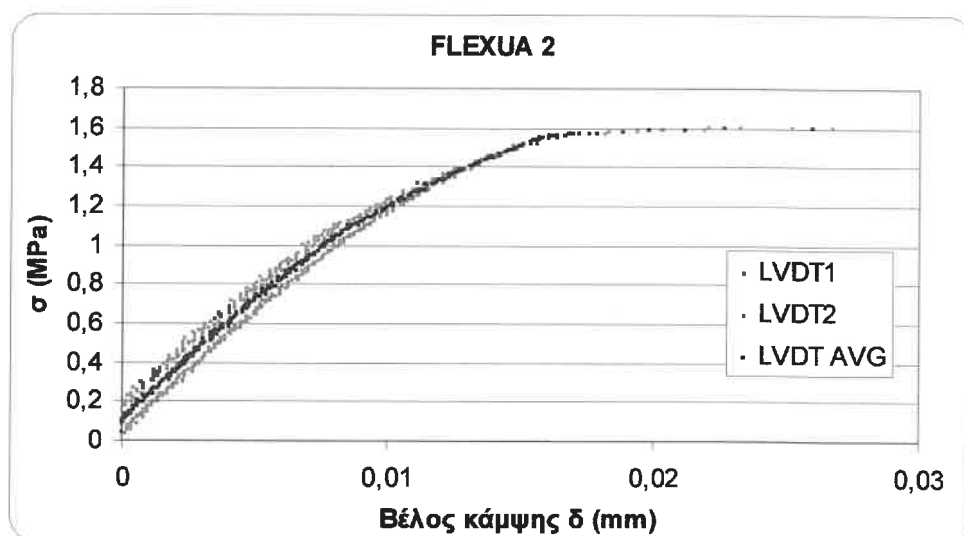
Στο Παράρτημα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα των δοκιμών κάμψης και θλίψης πρίσματος (1^{ης} και 2^{ης} φόρτισης) των δοκιμών της εργαστηριακής έρευνας. Αυτά δημιουργήθηκαν έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων της πρέσας MTS με την αποτύπωση ενός σημείου (δεδομένου) κάθε 0,1 sec. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στα διαγράμματα παρακάτω με τρία διαφορετικά χρώματα που υποδεικνύουν τα δυο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (LVDT1 και LVDT2) και το μέσο όρο των (LVDT AVG). Η παρουσίαση των διαγραμμάτων έχει ως σκοπό την εποπτική παρακολούθηση των εργαστηριακών μετρήσεων, ώστε να εντοπιστούν τυχόν ανωμαλίες στις μετρήσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΜΨΗΣ (FLEXUA)

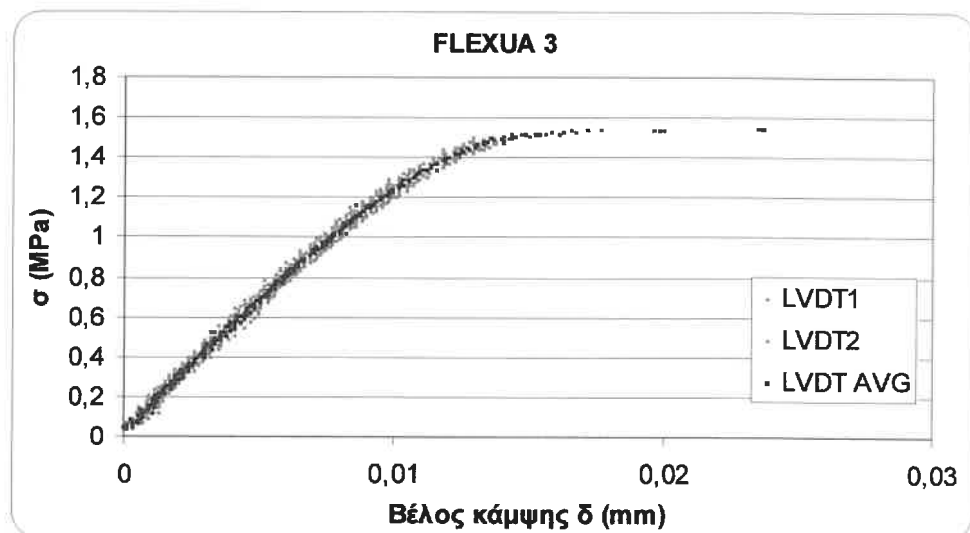
Στα διαγράμματα κάμψης παρουσιάζεται η τάση που αναπτύσσεται στα δοκίμια από την πρέσα MTS σε σύγκριση με το βέλος κάμψης που μετρούν τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα LVDT. τελευταία αποτυπωμένο σημείο (πάνω δεξιά στα διαγράμματα) υποδεικνύει την τάση και το βέλος κάμψης στη θραύση του εκάστοτε δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε στο $\frac{1}{3}$ της αντοχής των δοκιμών (και αντίστοιχα της επιβαλλόμενης τάσης) θεωρούμενο χάριν ευκολίας ότι έως εκείνο το σημείο ακολουθεί σχεδόν γραμμική πορεία η συσχέτιση τάσης – βέλους κάμψης.



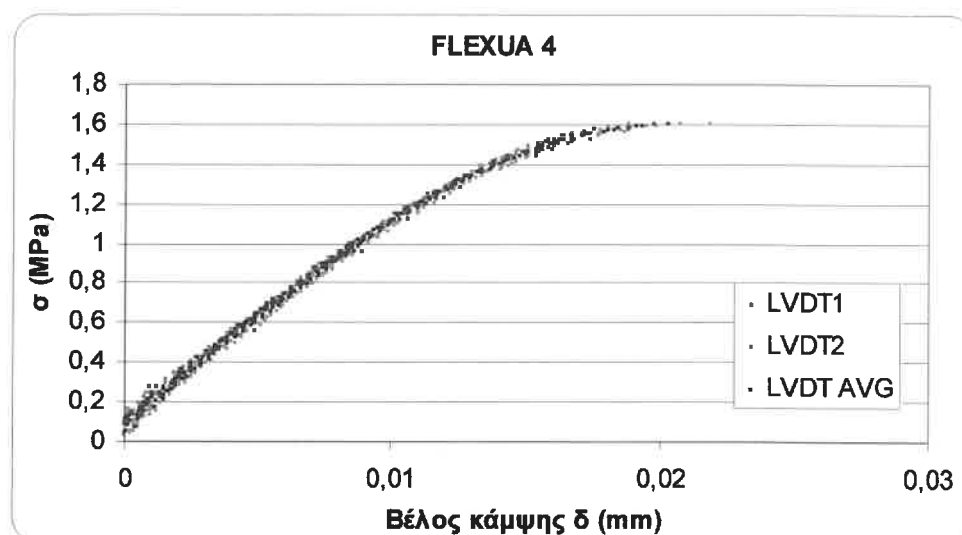
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 1, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



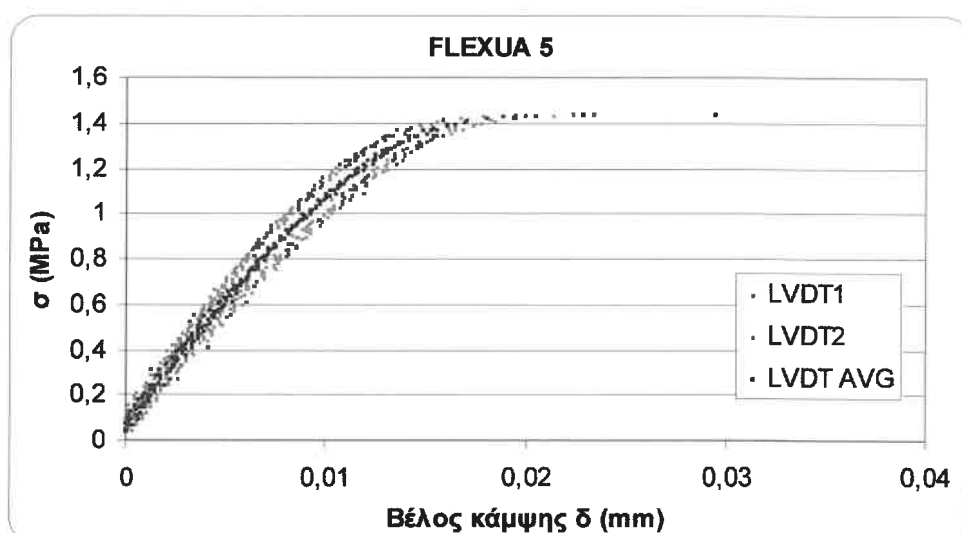
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 2, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



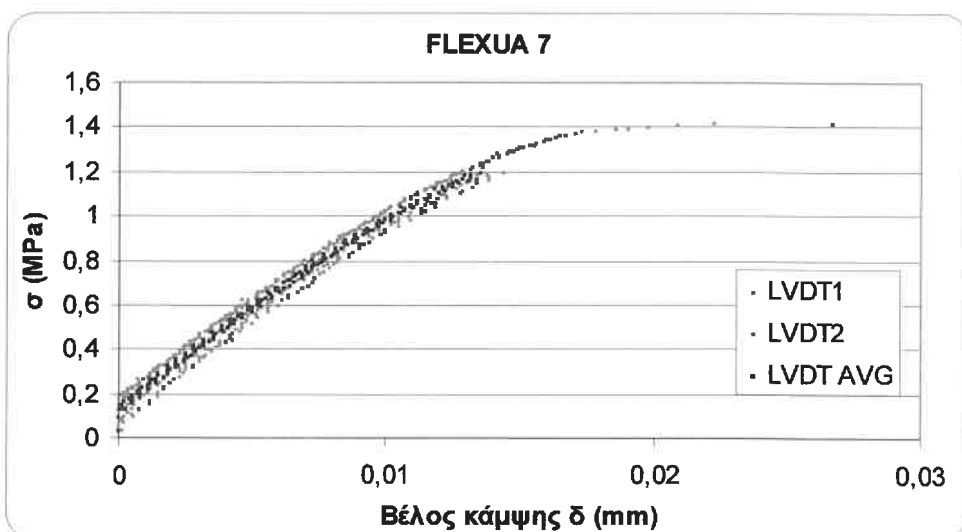
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 3, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



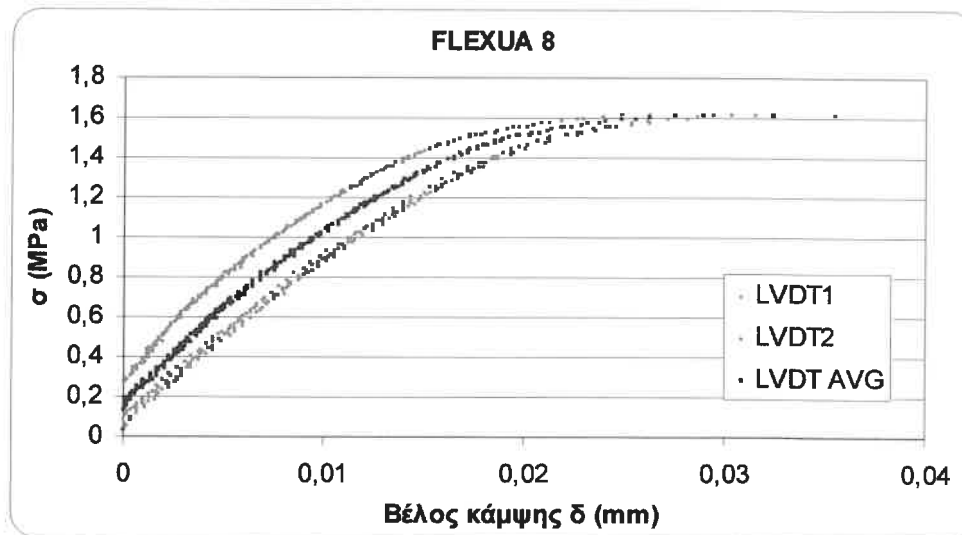
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 4, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



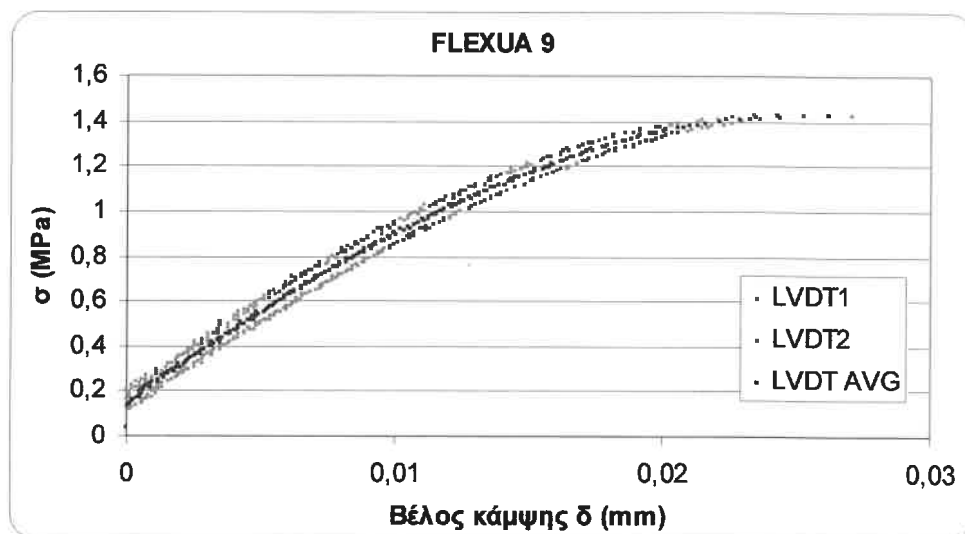
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



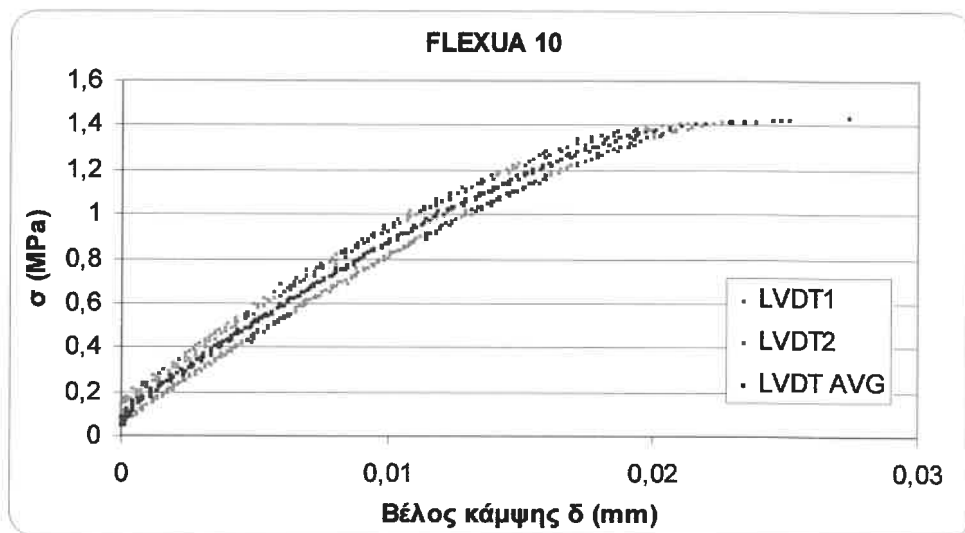
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 7, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



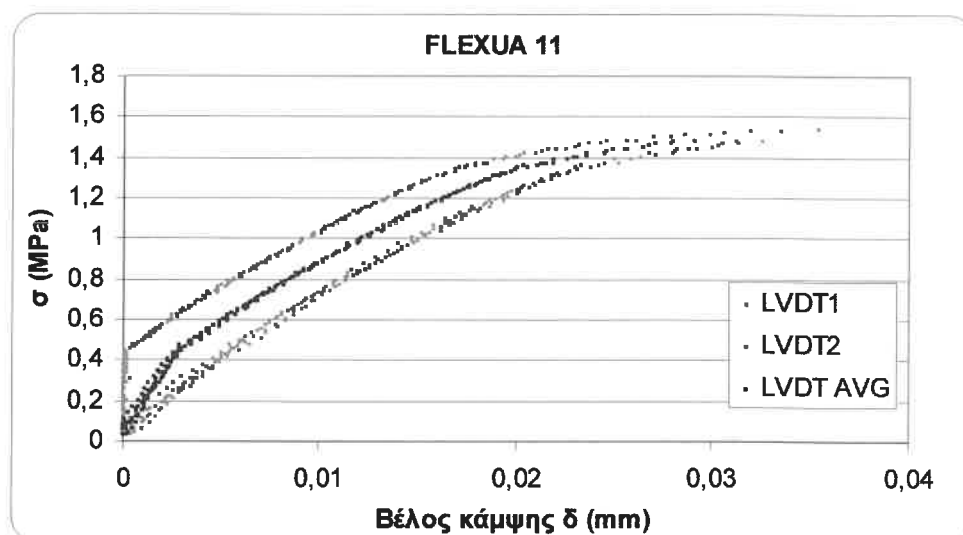
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 8, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



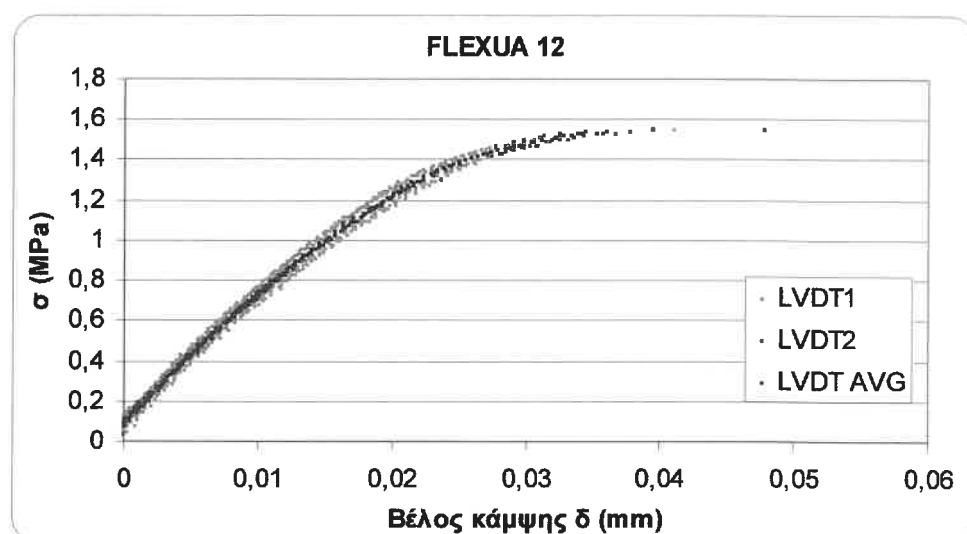
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 9, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



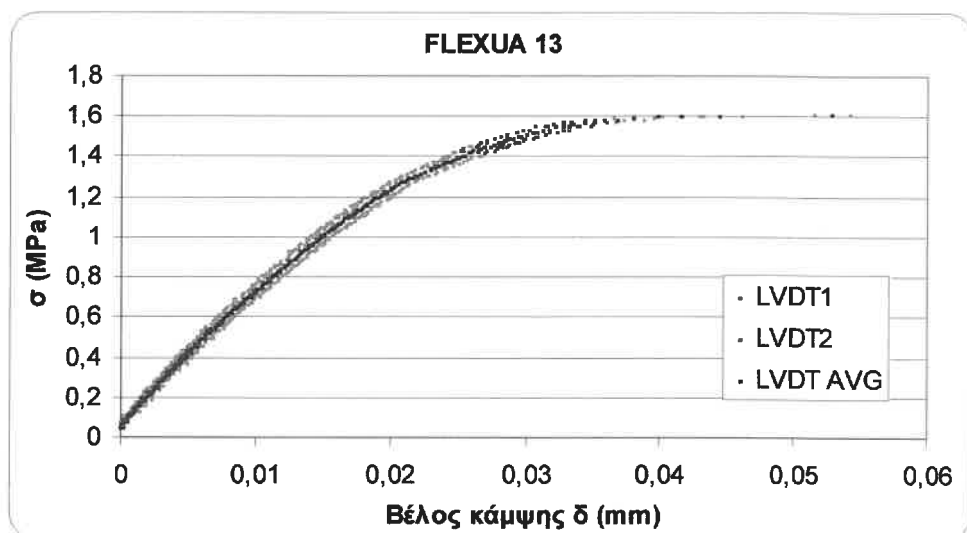
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 10, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



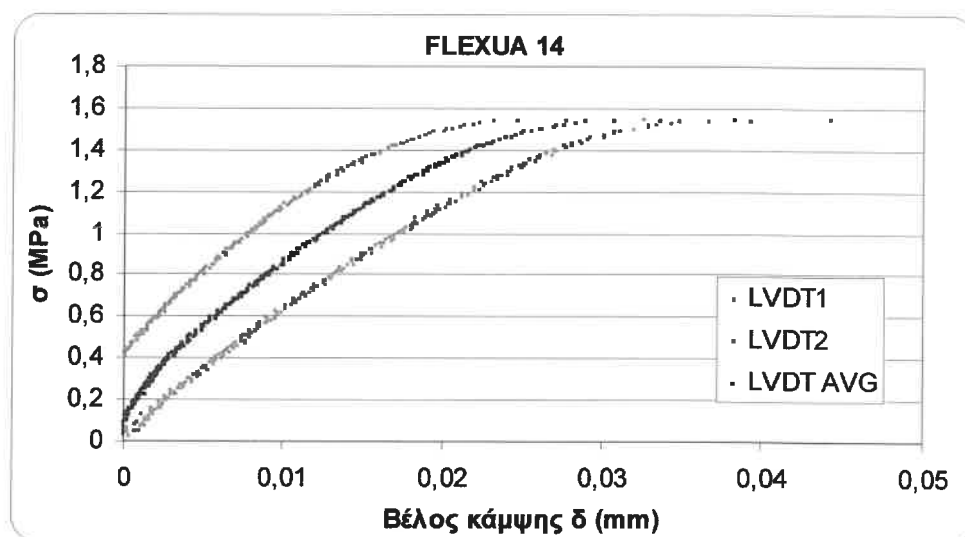
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 11, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



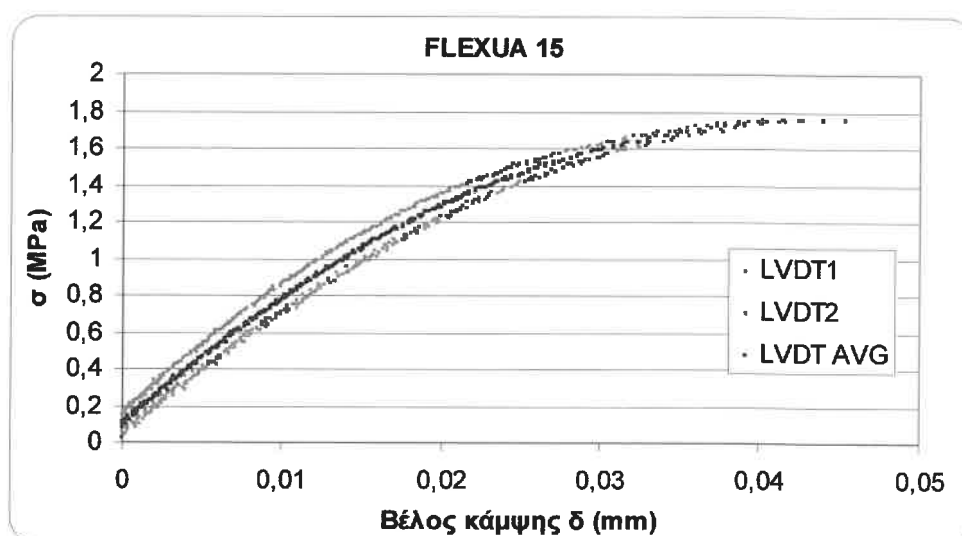
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 12, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



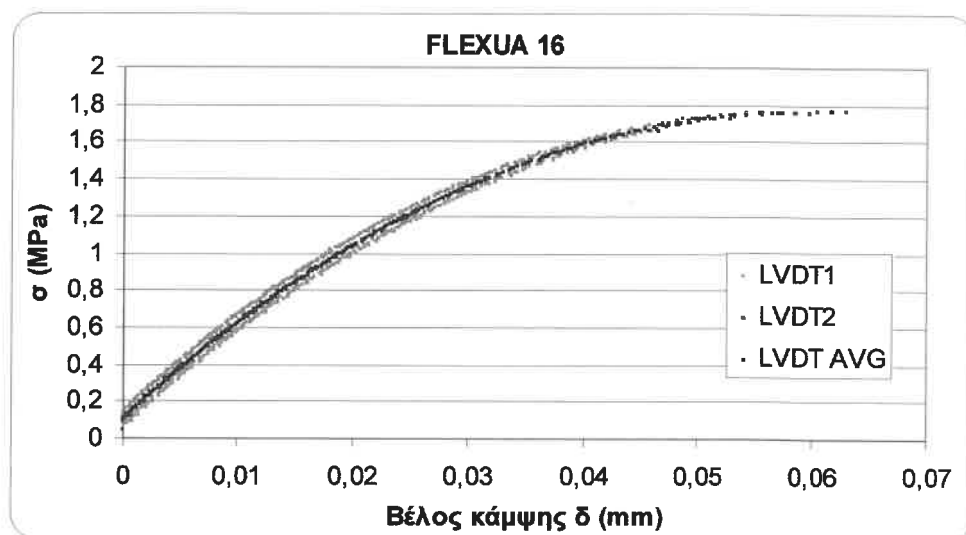
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 13, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



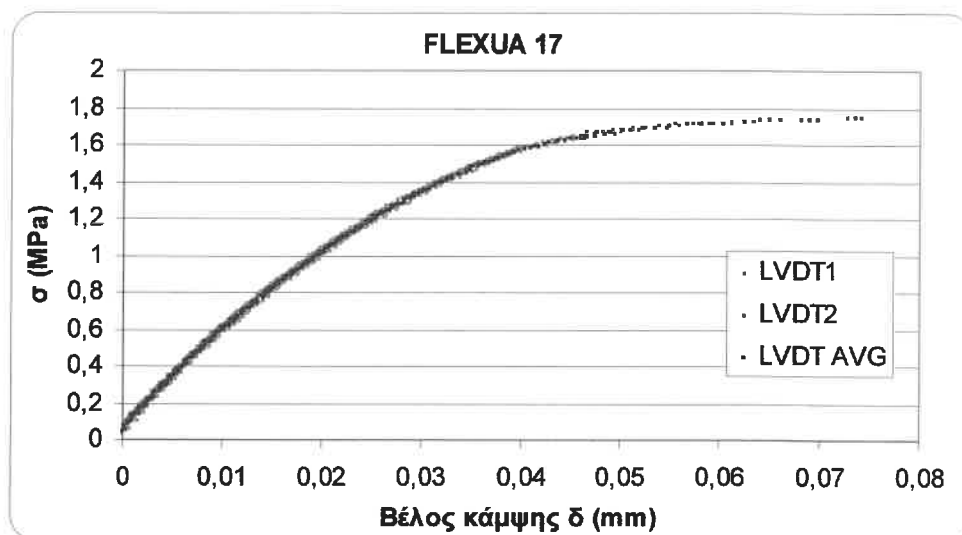
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 14, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



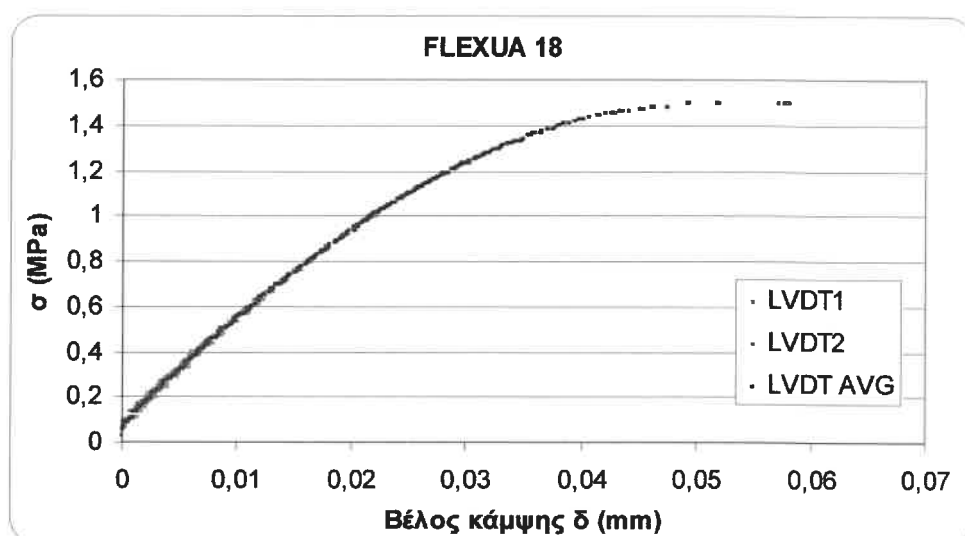
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



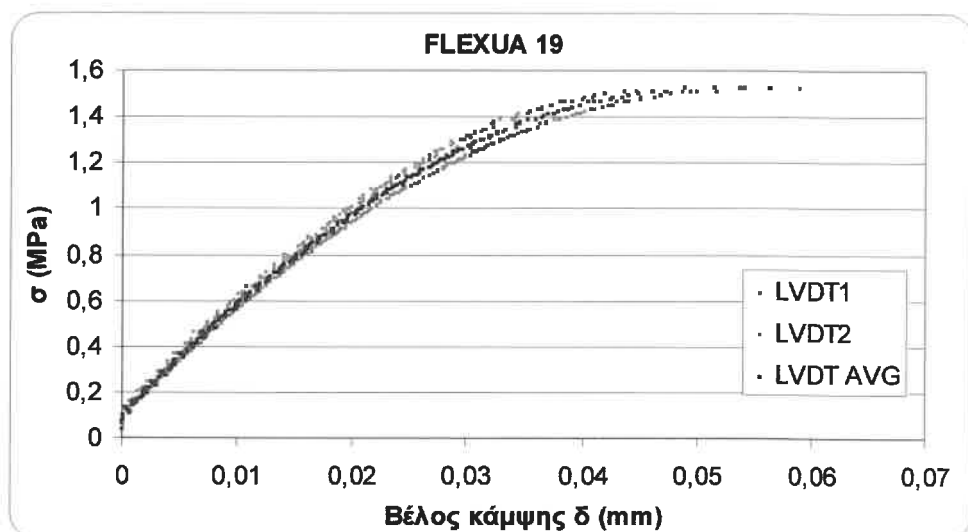
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 16, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



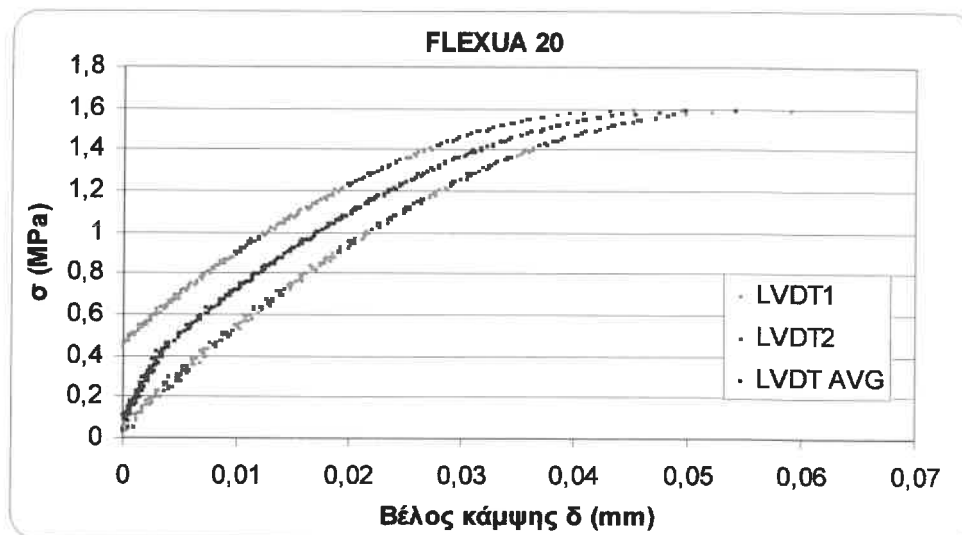
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 17, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



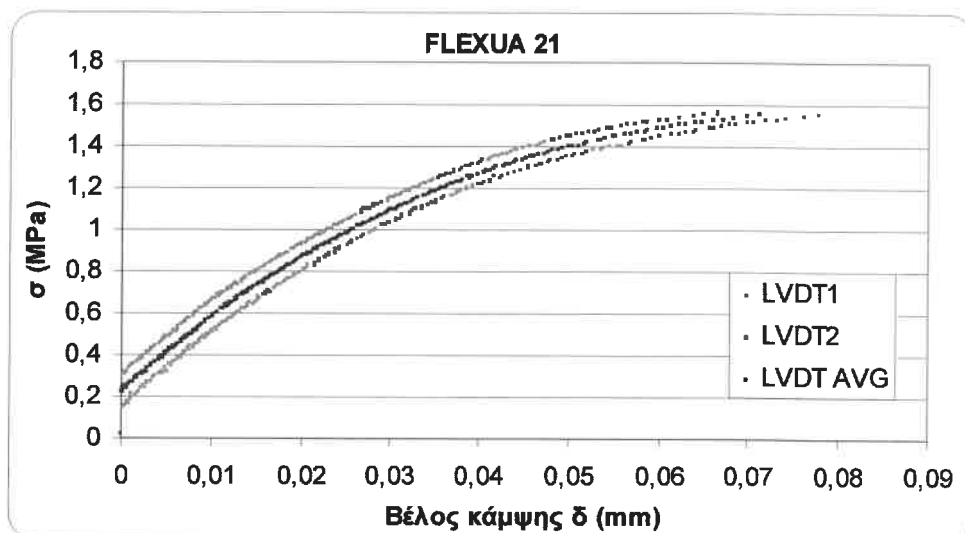
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 18, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



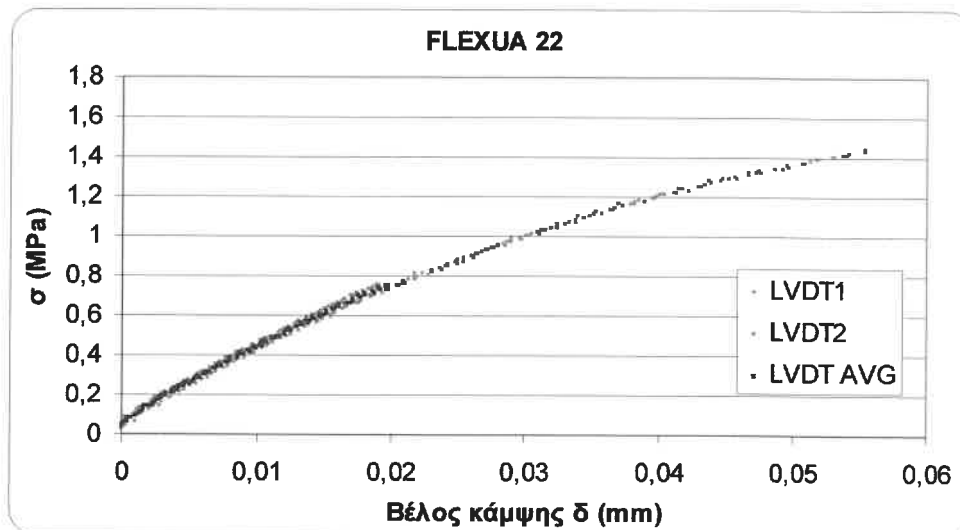
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 19, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



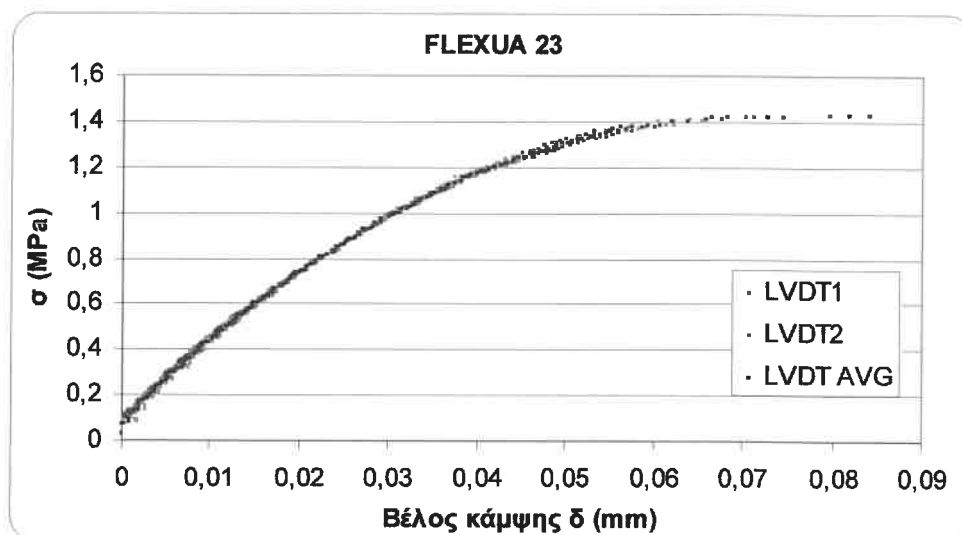
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 20, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



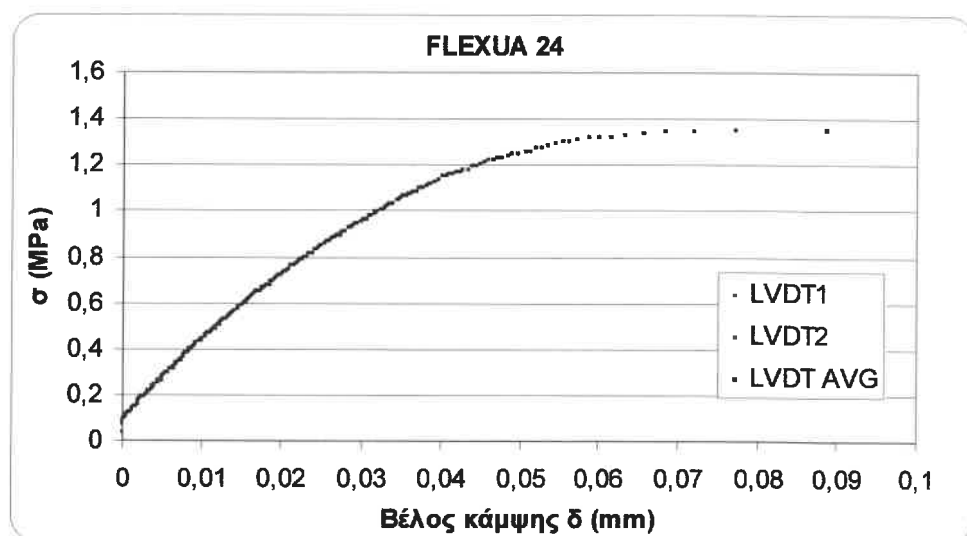
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 21, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



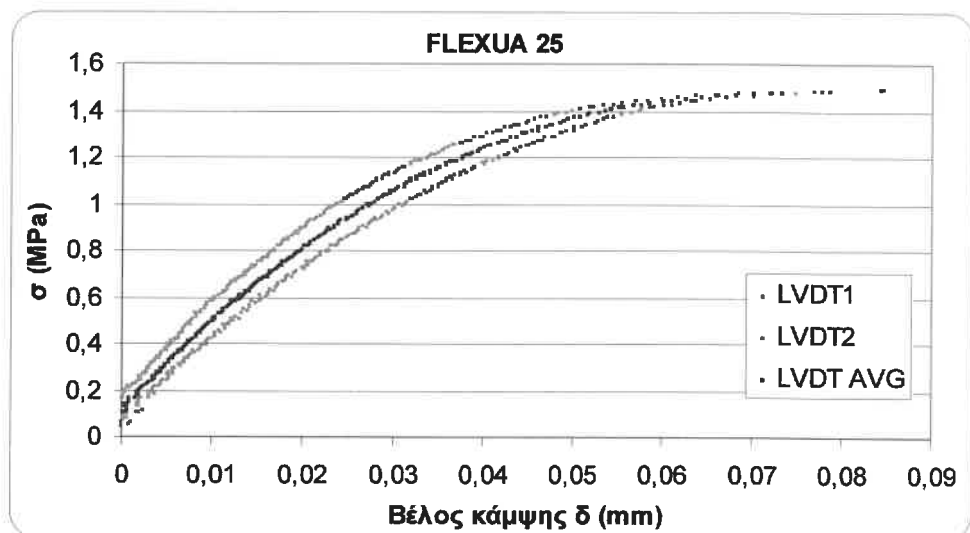
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 22, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



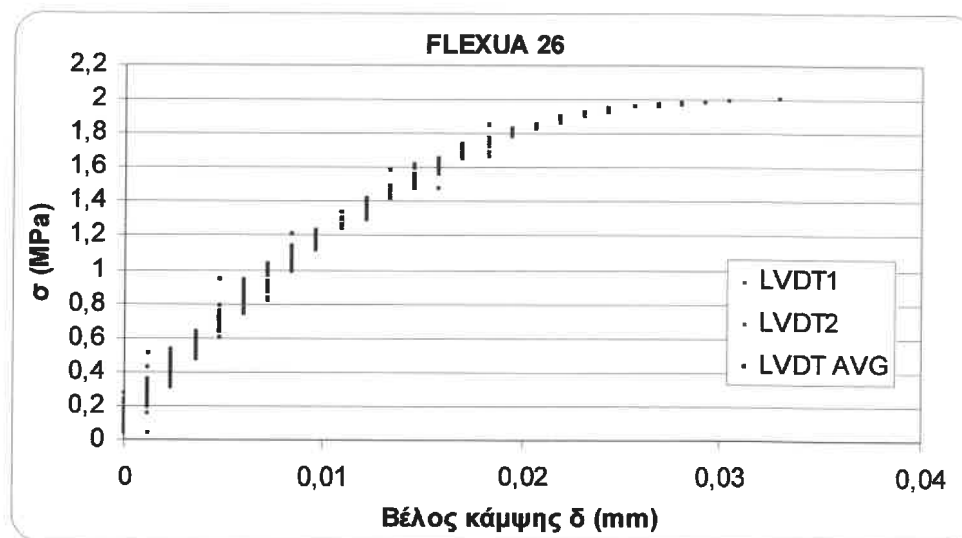
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 23, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



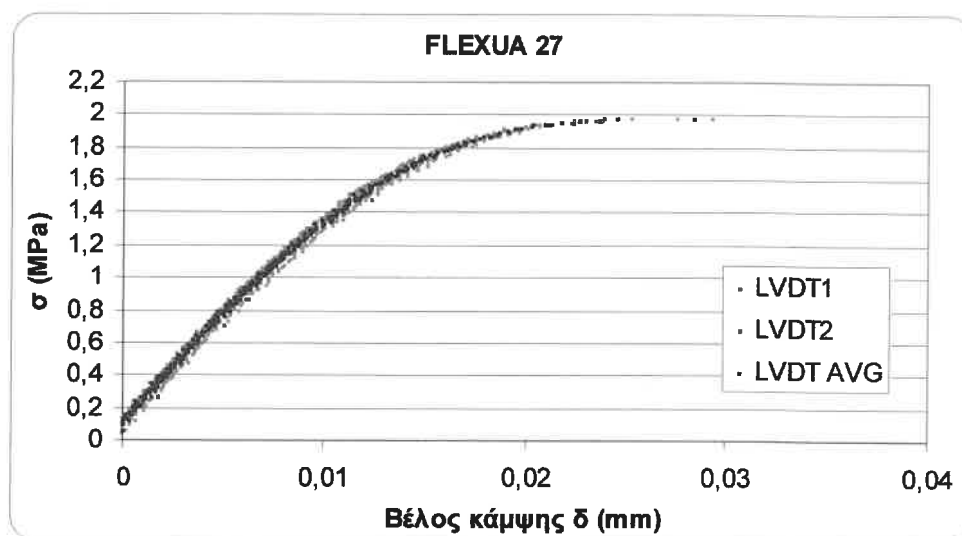
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 24, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



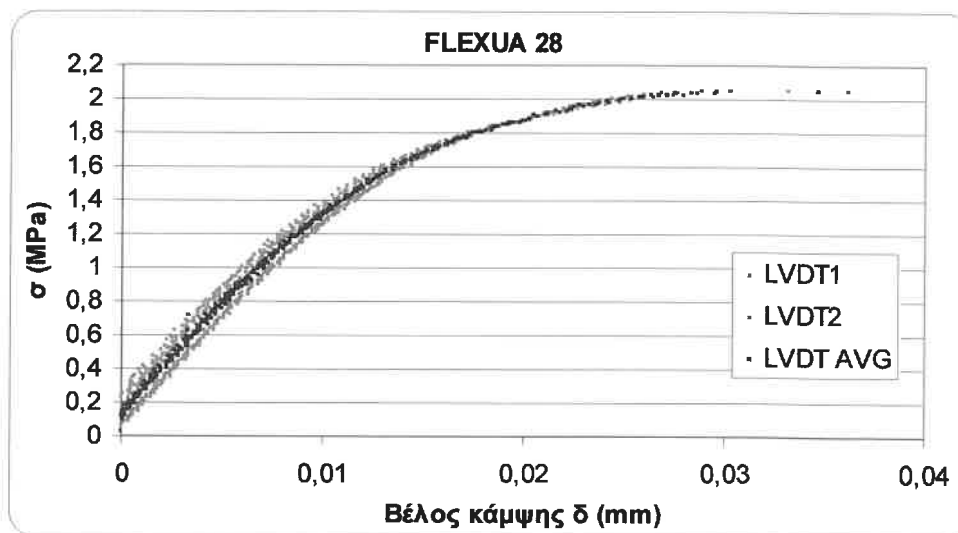
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



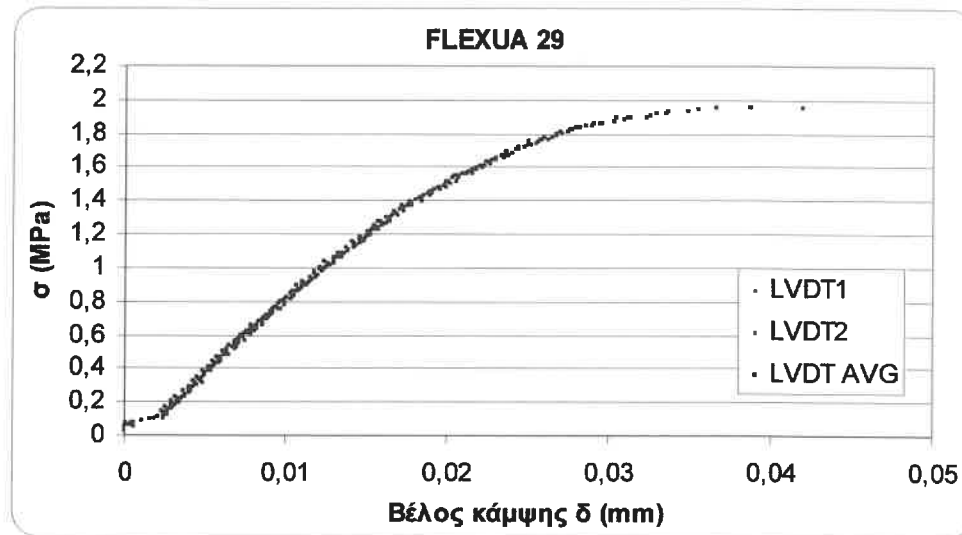
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 26, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



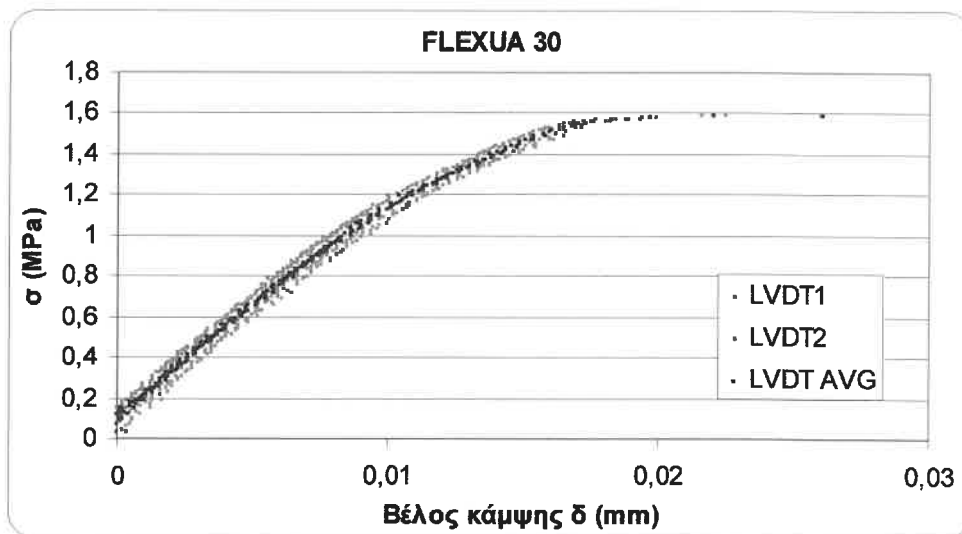
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 27, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



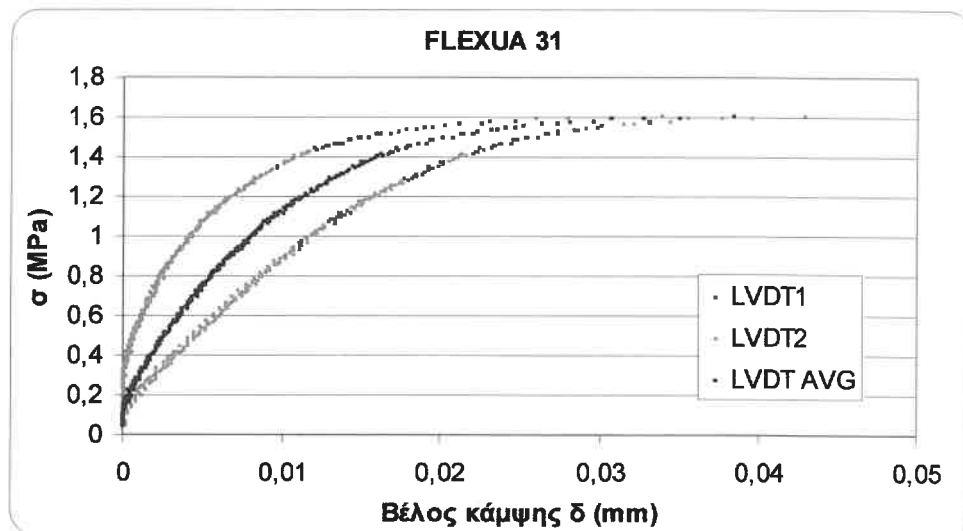
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 28, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



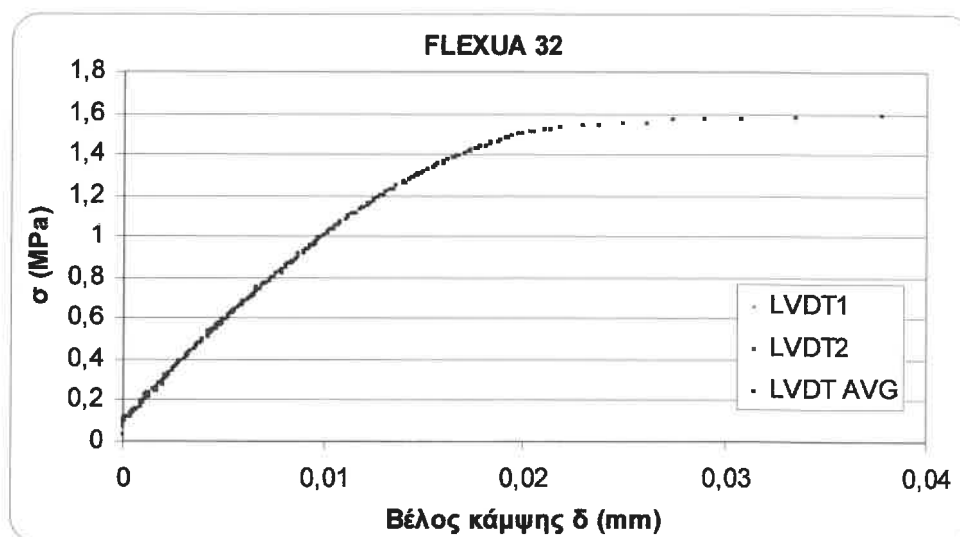
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 29, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



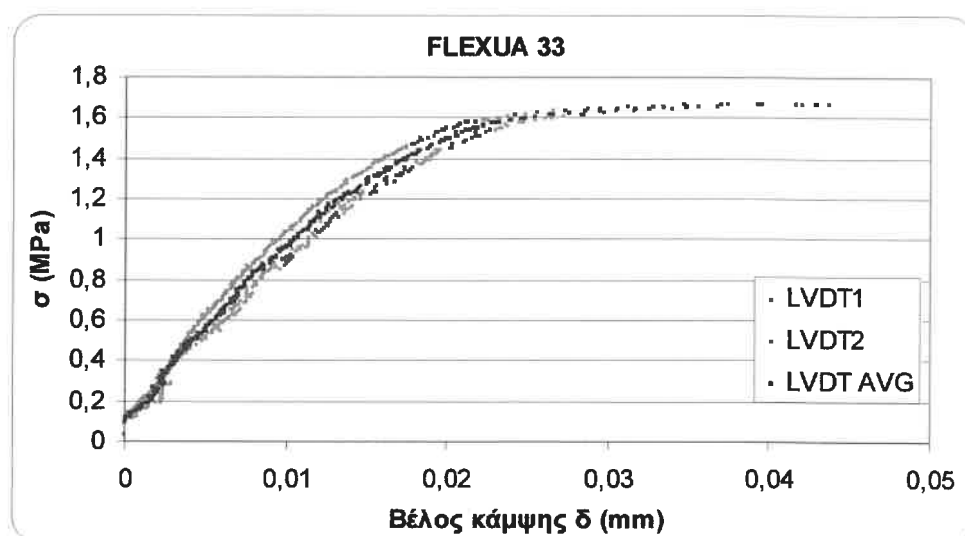
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 30, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



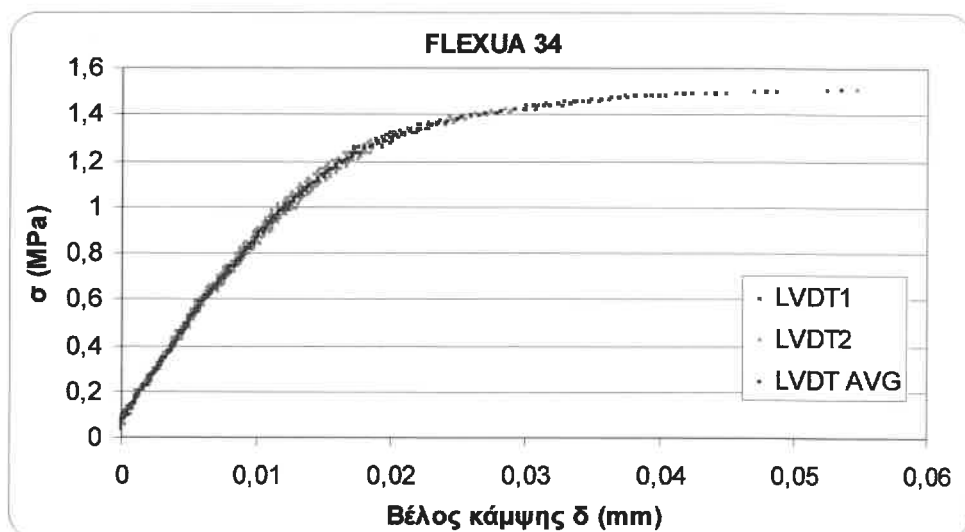
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 31, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



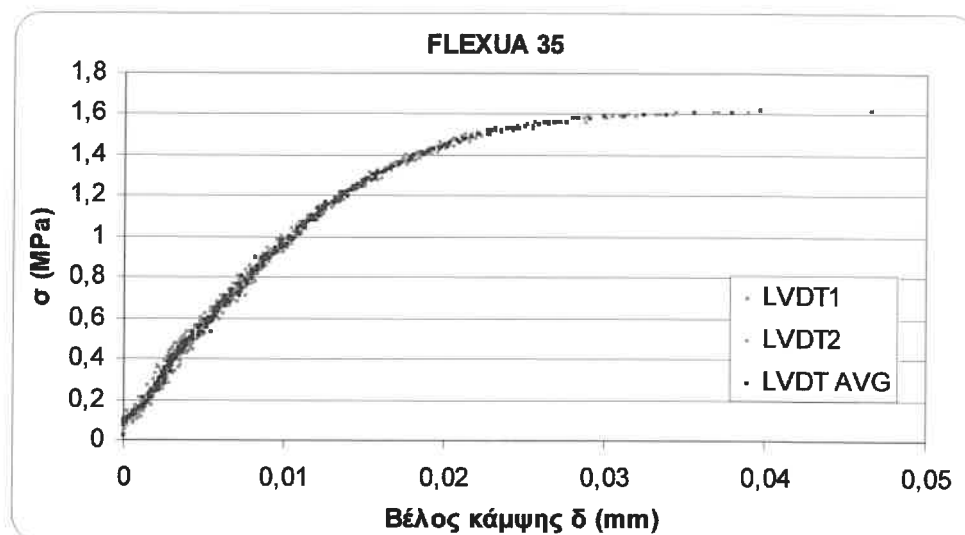
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 32, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



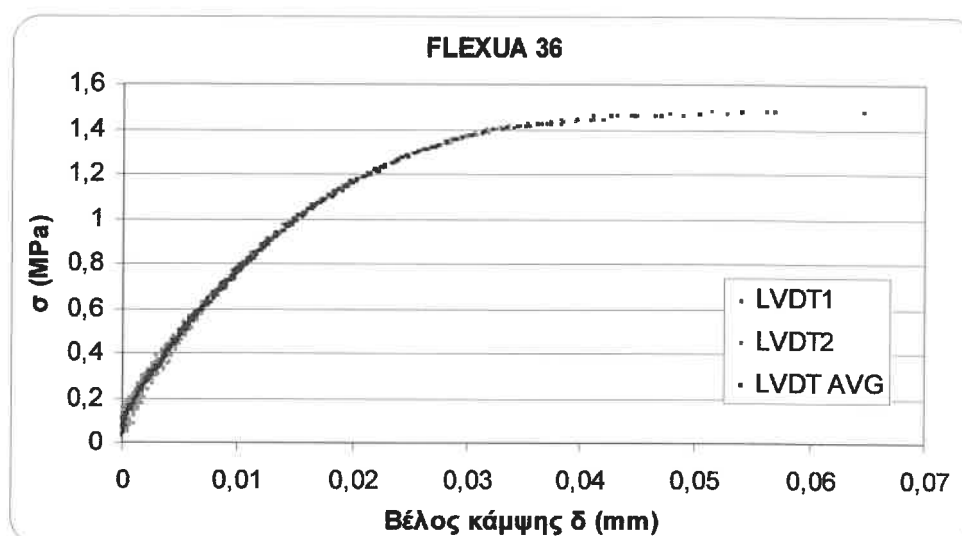
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 33, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



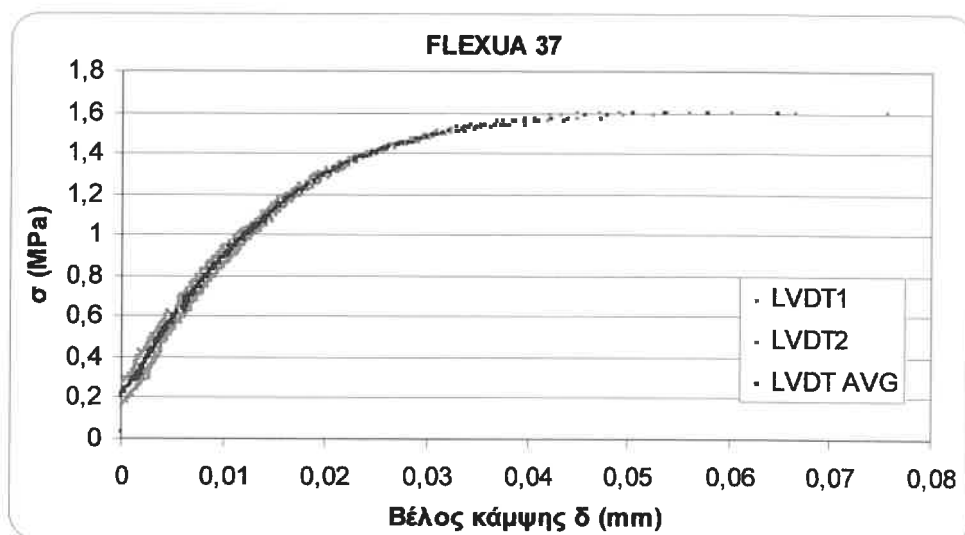
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 34, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



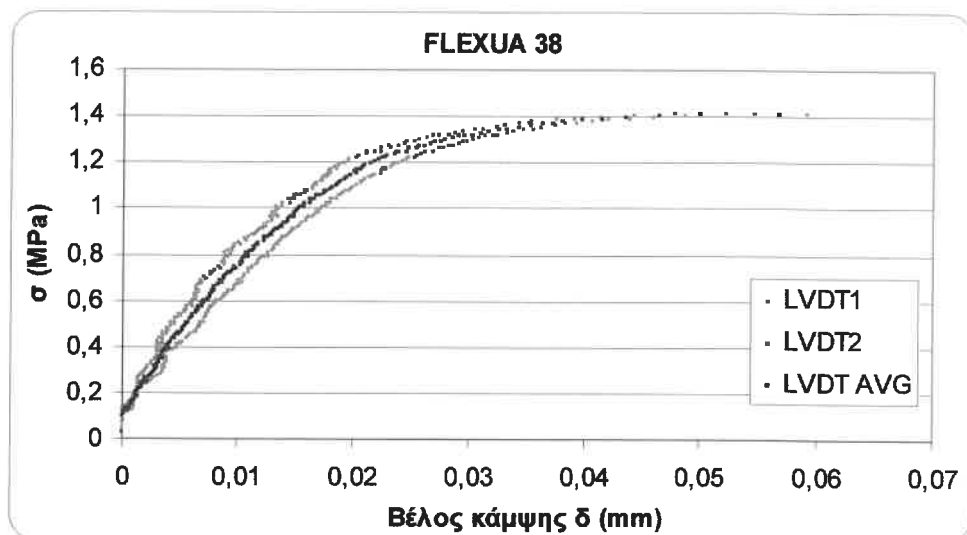
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 35, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



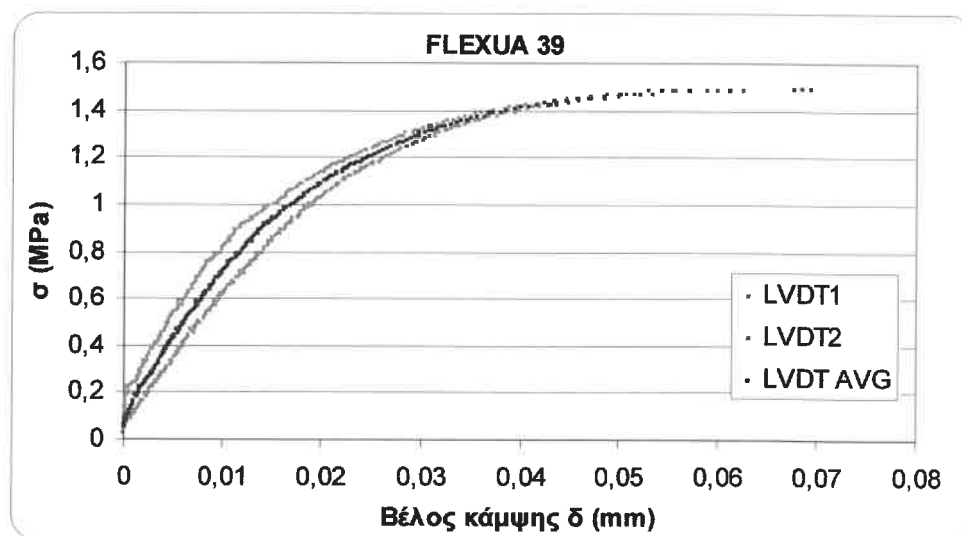
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 36, μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



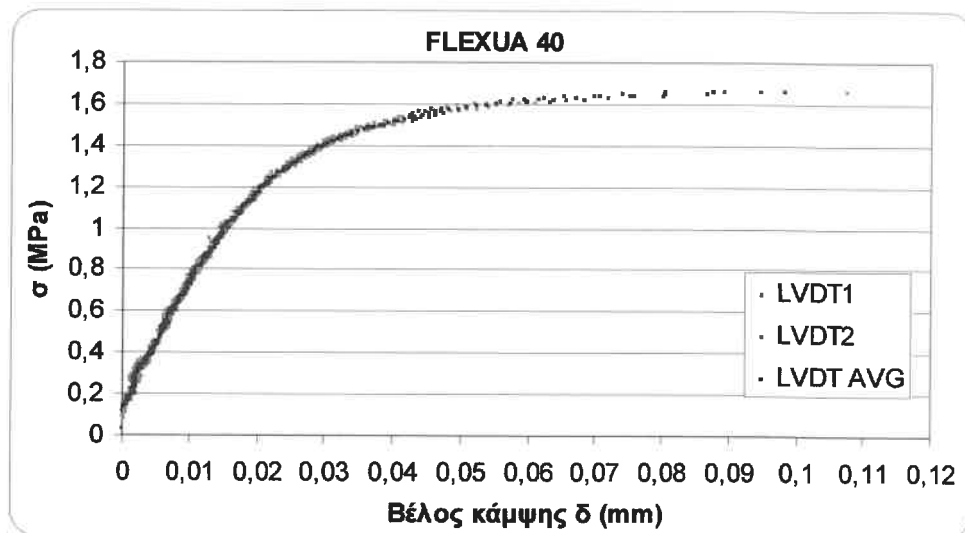
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 37, μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



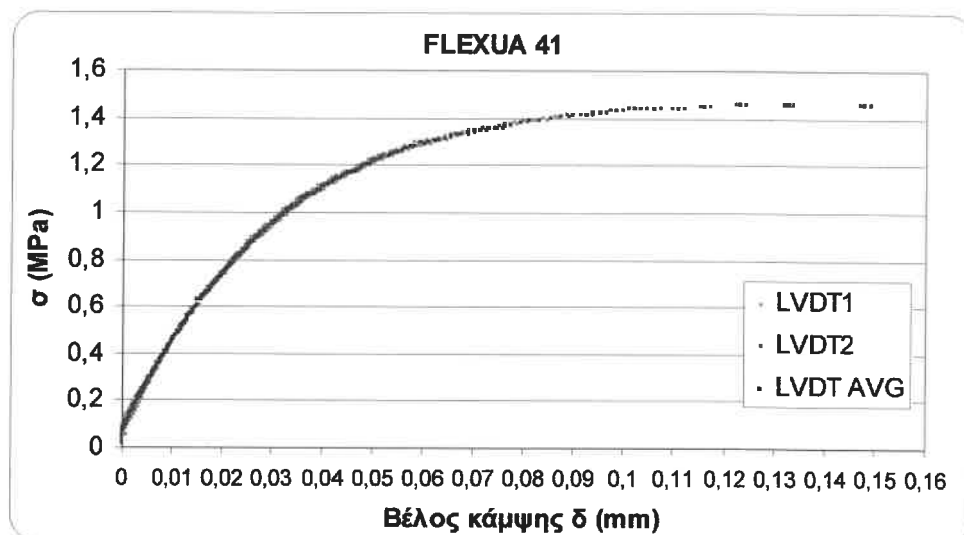
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 38 μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



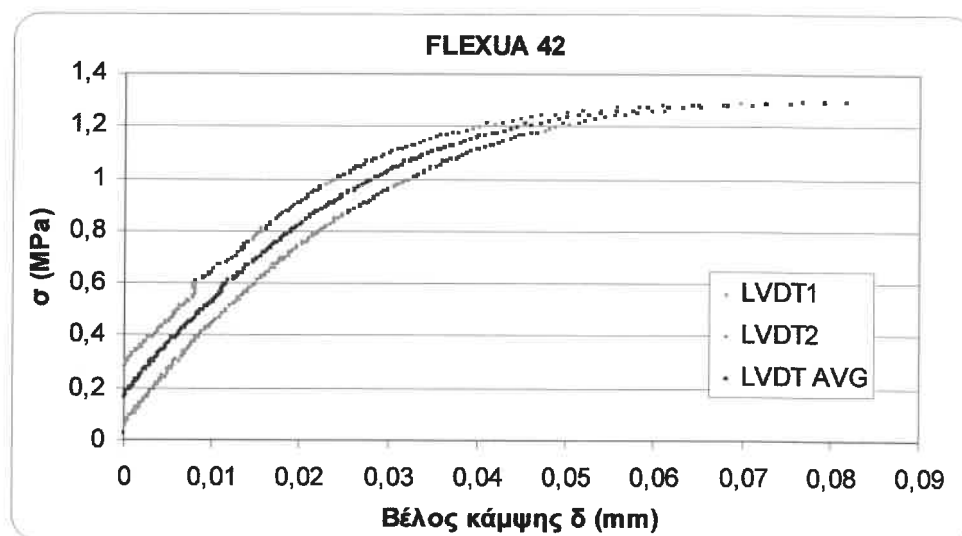
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 39, μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



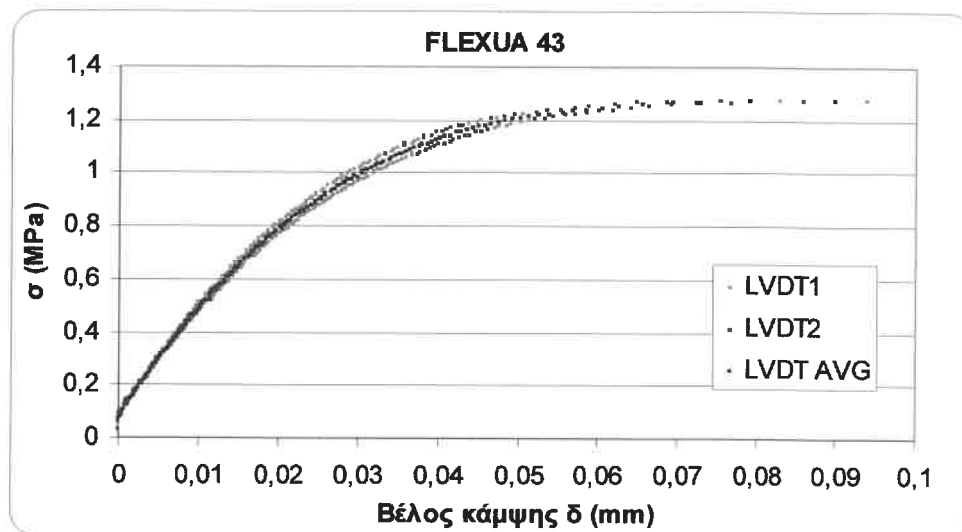
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 40, μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



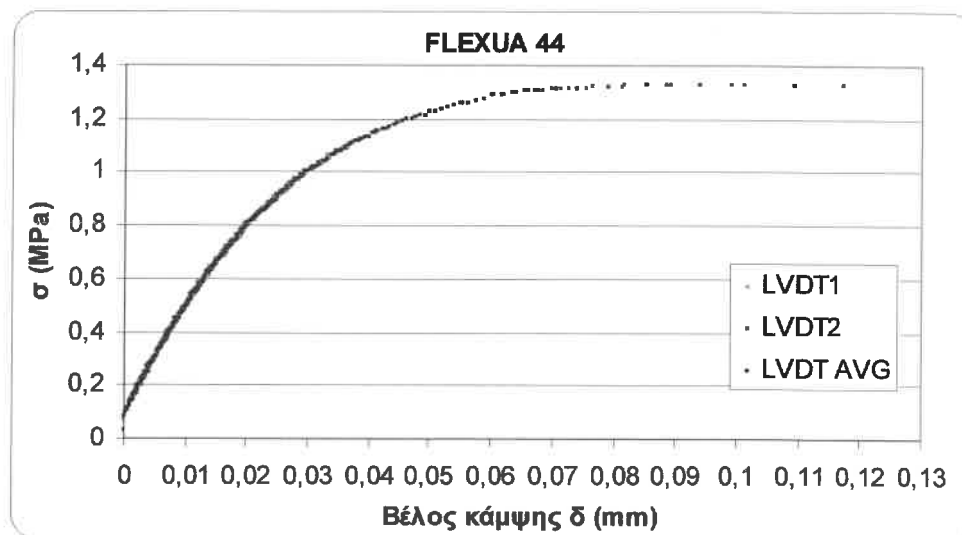
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 41, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



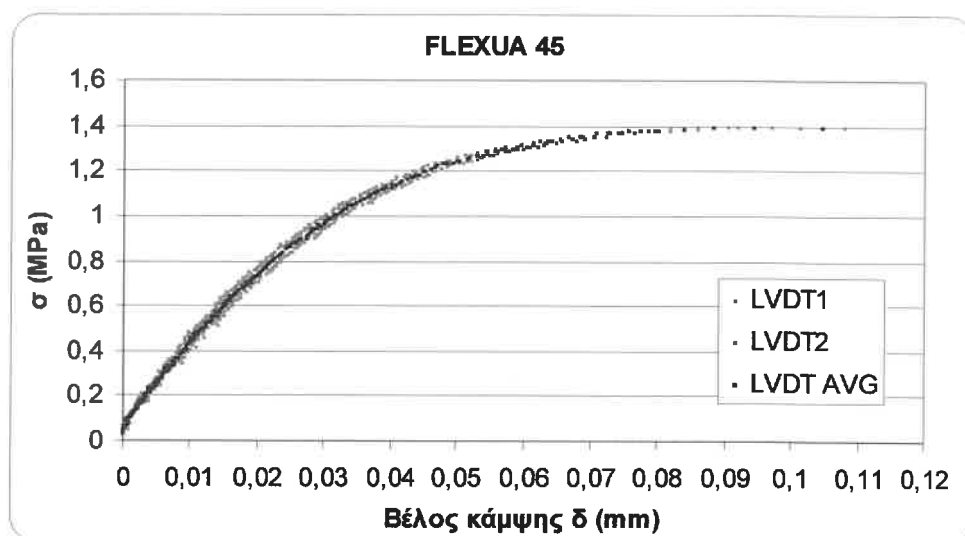
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 42, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



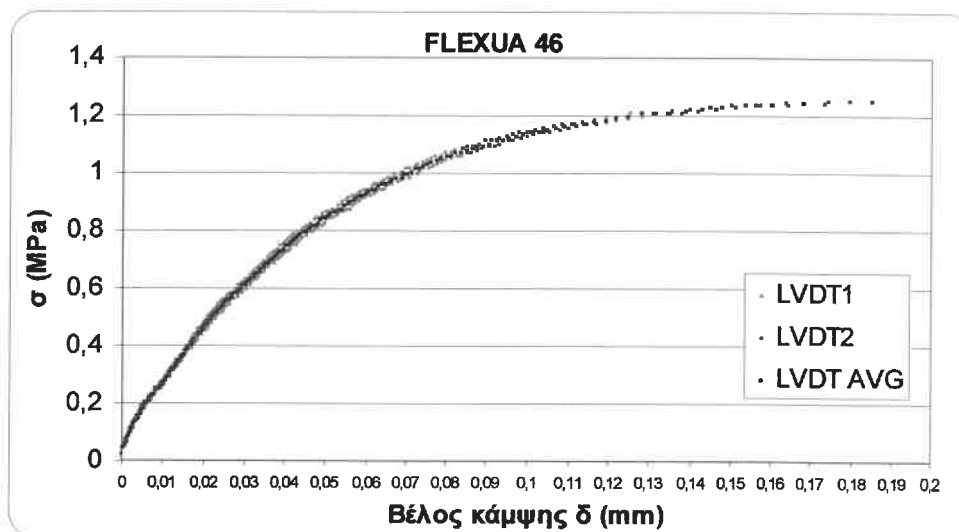
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 43, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



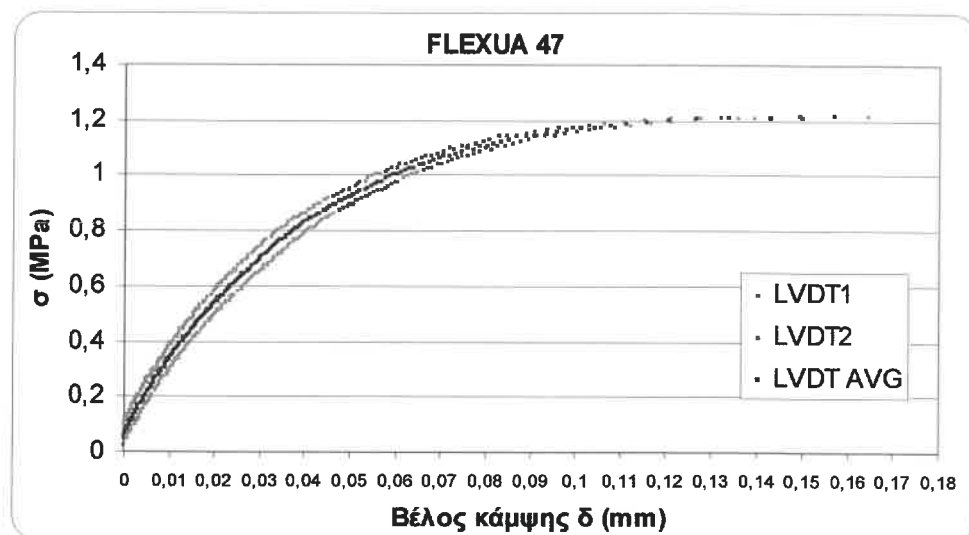
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 44, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



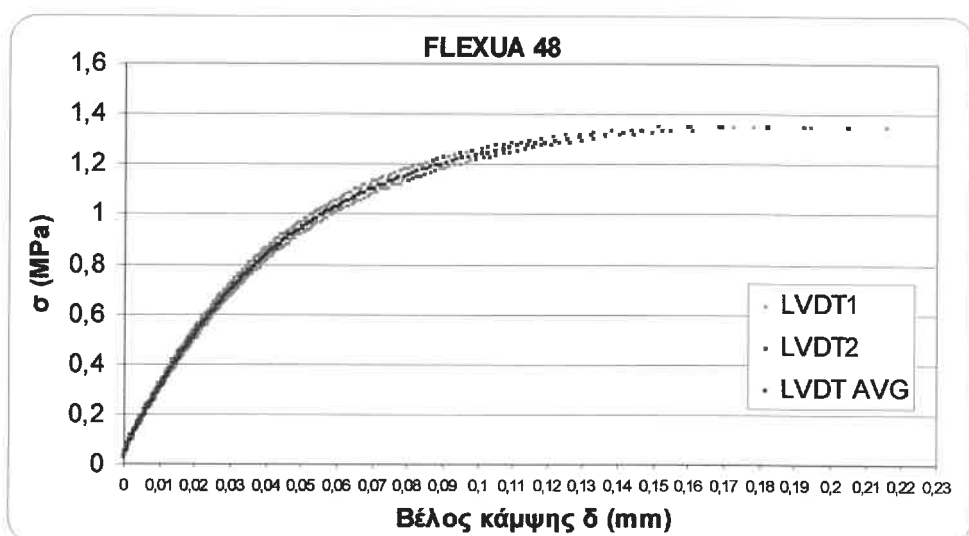
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 45, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



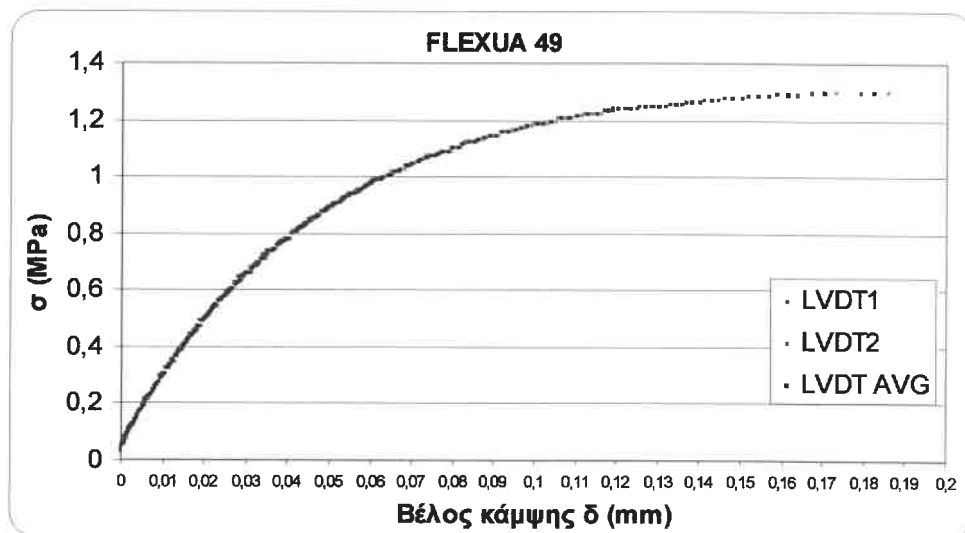
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 46, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C



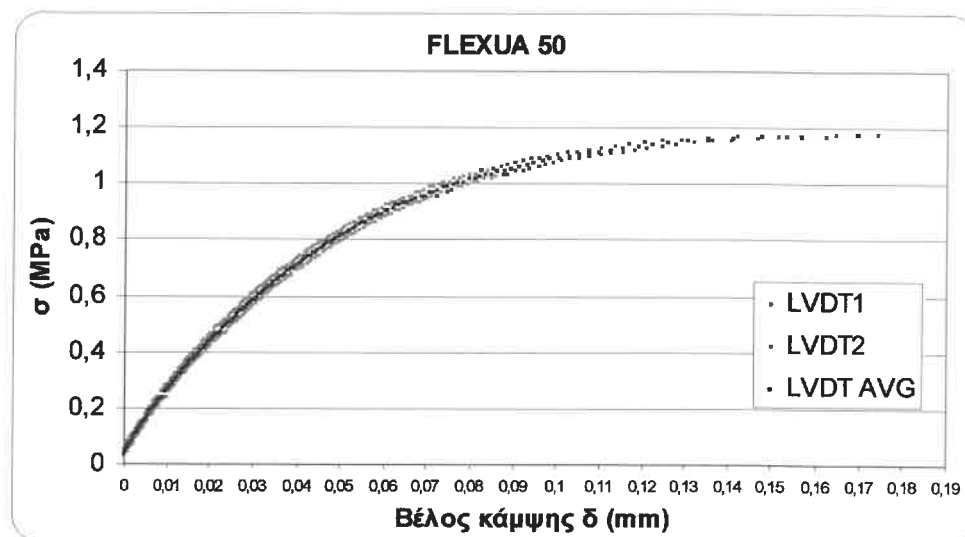
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 47, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C



Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 48, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C



Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 49, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C

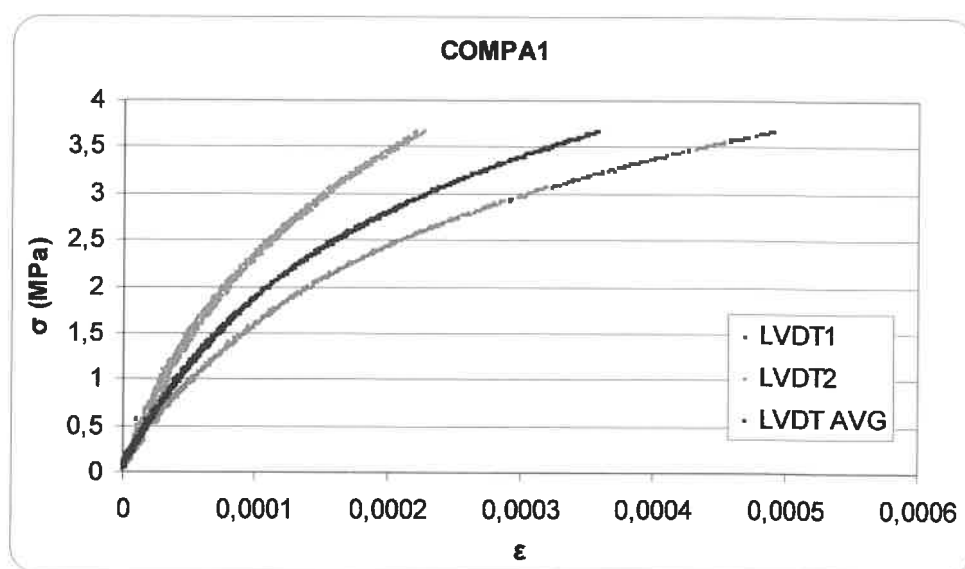


Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίου 50, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C

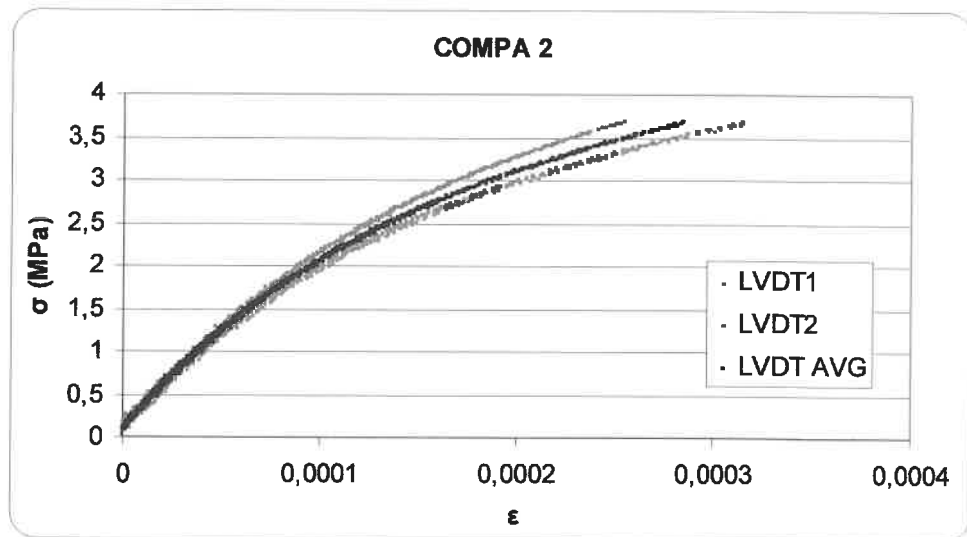
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΠΡΙΣΜΑΤΟΣ 1^{ΗΣ} ΦΟΡΤΙΣΗΣ (COMPA)

Στα διαγράμματα θλίψης παρουσιάζεται η τάση που αναπτύσσεται στα δοκίμια από την πρέσα MTS σε σύγκριση με την ανηγμένη παραμόρφωση. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε στο $\frac{1}{3}$ της αντοχής θλίψης των δοκιμίων (όπως λήφθηκε από τη 2^η φόρτιση) ή στο τελευταίο σημείο της 1^{ης} φόρτισης στις περιπτώσεις όπου η 1^η φόρτιση δεν έφτανε σε αυτή την αντοχή.

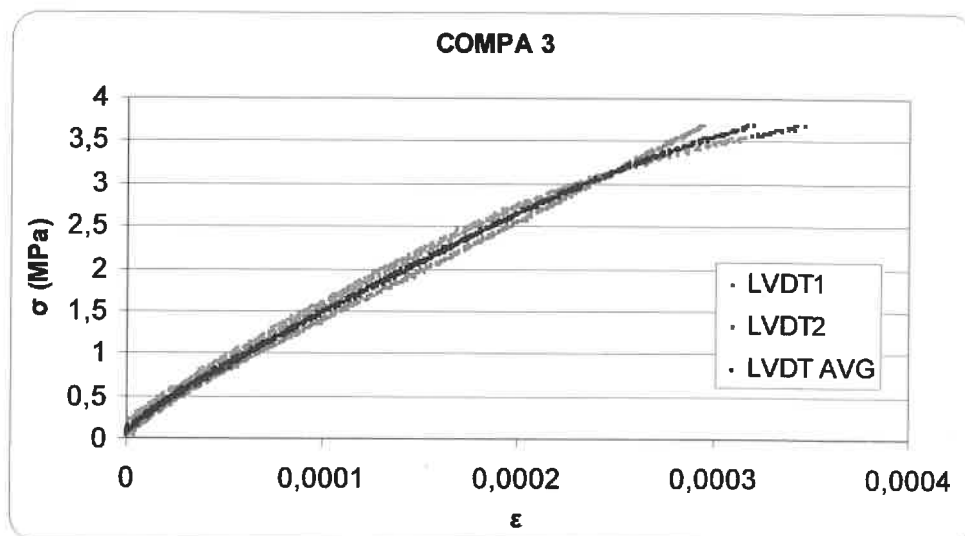
Σε ορισμένα διαγράμματα παρουσιάζεται έντονη ανομοιομορφία και η γραμμική συσχέτιση τάσης – παραμόρφωσης δεν είναι τόσο εμφανής. Αυτό οφείλεται στο μικρό πλήθος δεδομένων της πρέσας MTS και παρουσιάζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου η θραύση ήταν γρήγορη, δηλαδή στα δοκίμια χαμηλής αντοχής των μίγμάτων με αποκλειστικά φρεζαρισμένο υλικό.



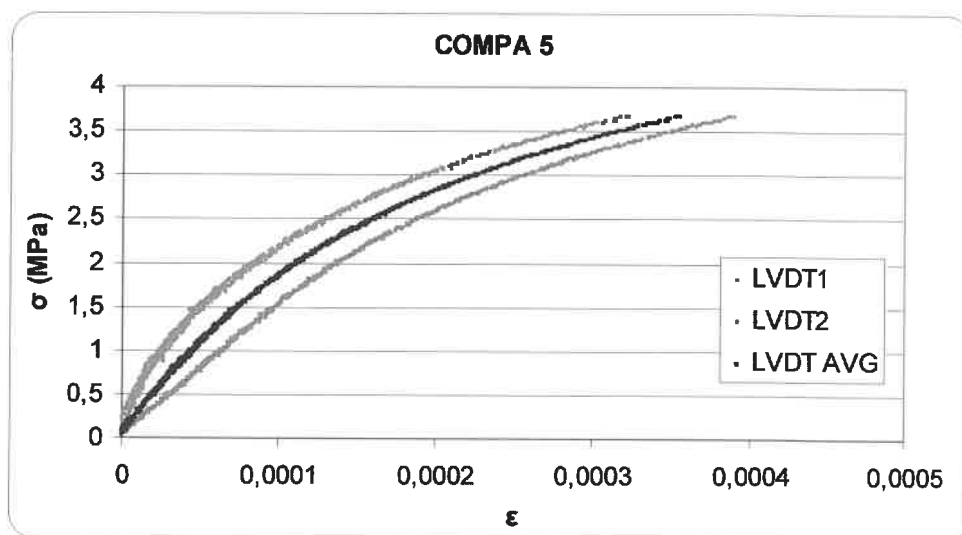
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



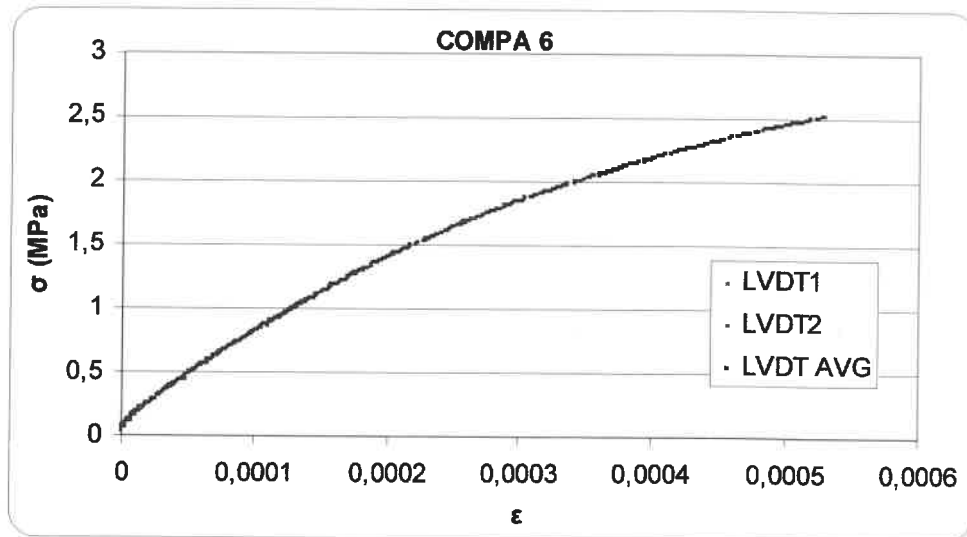
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 2, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



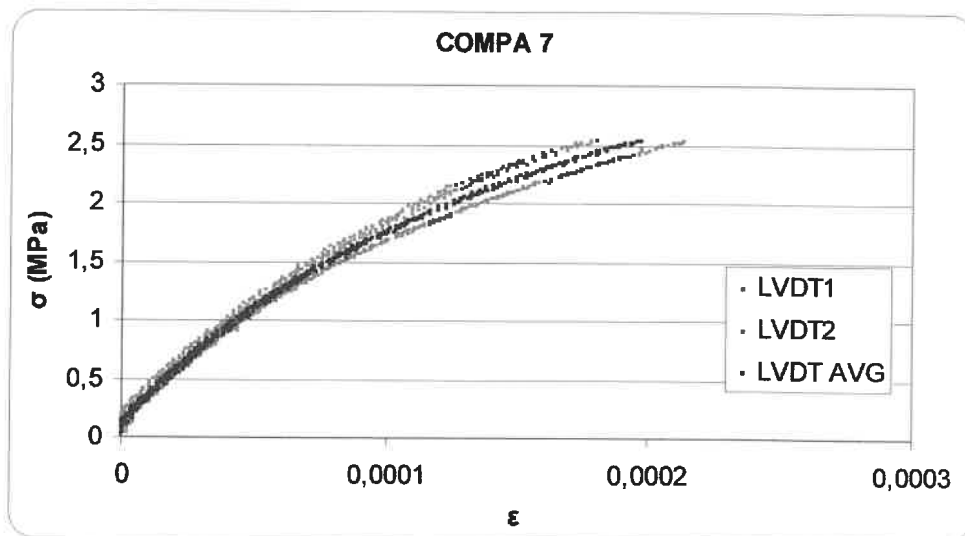
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 3, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



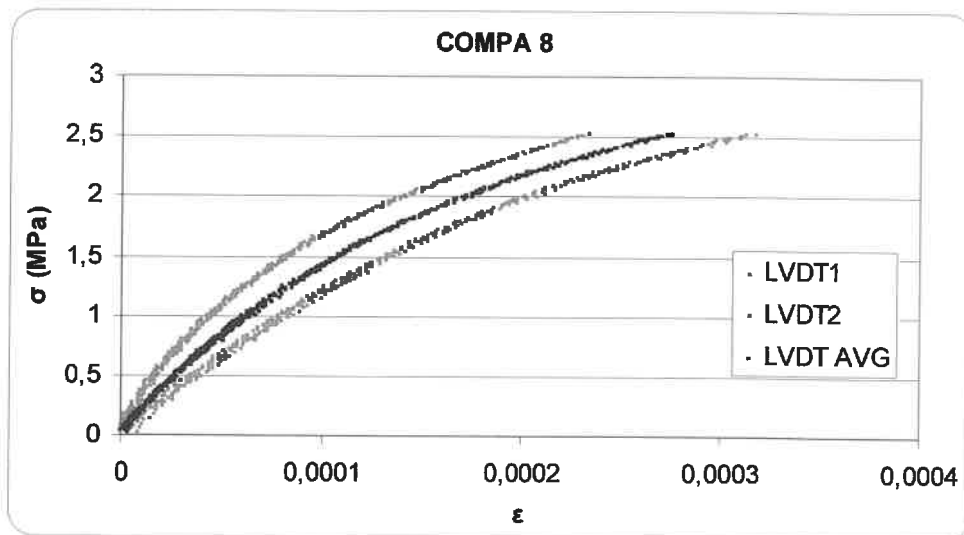
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



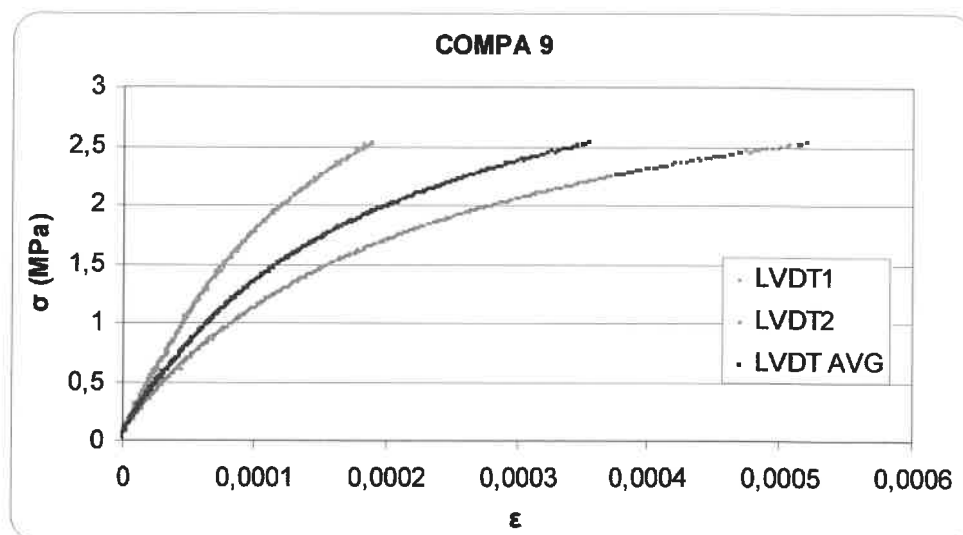
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 6, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



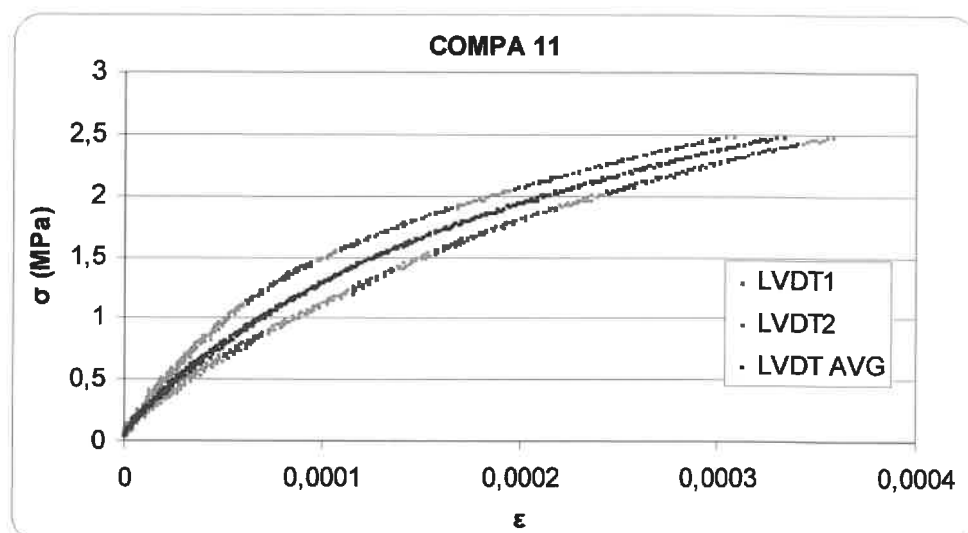
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 7, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



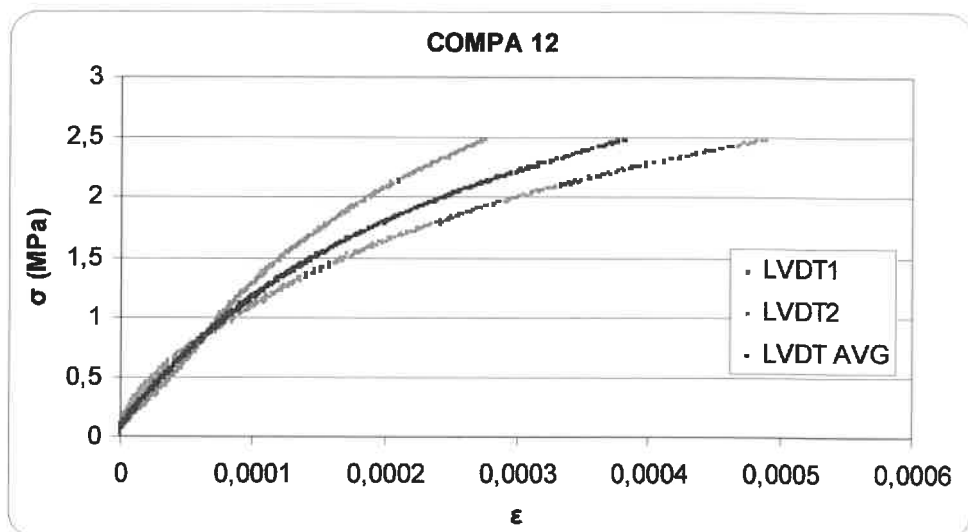
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 8, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



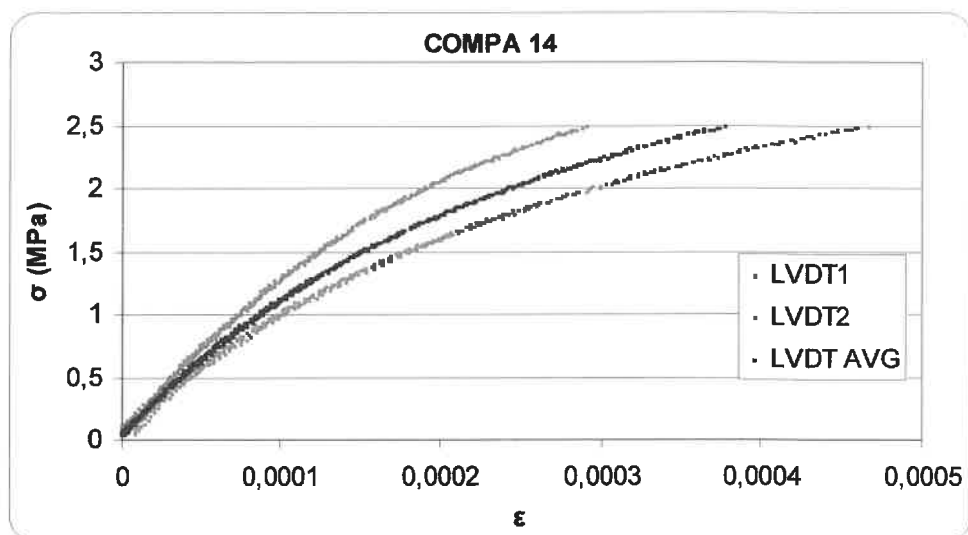
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 9, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



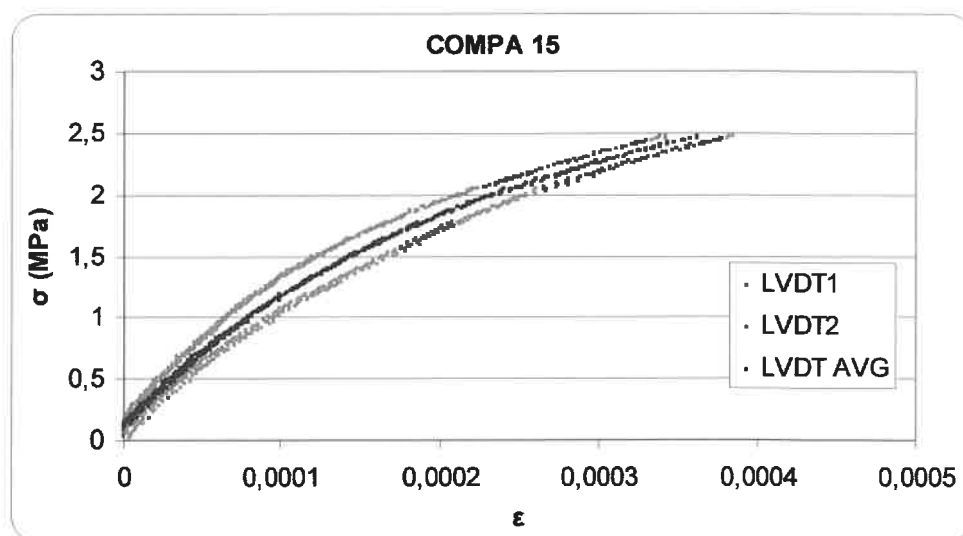
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 11, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



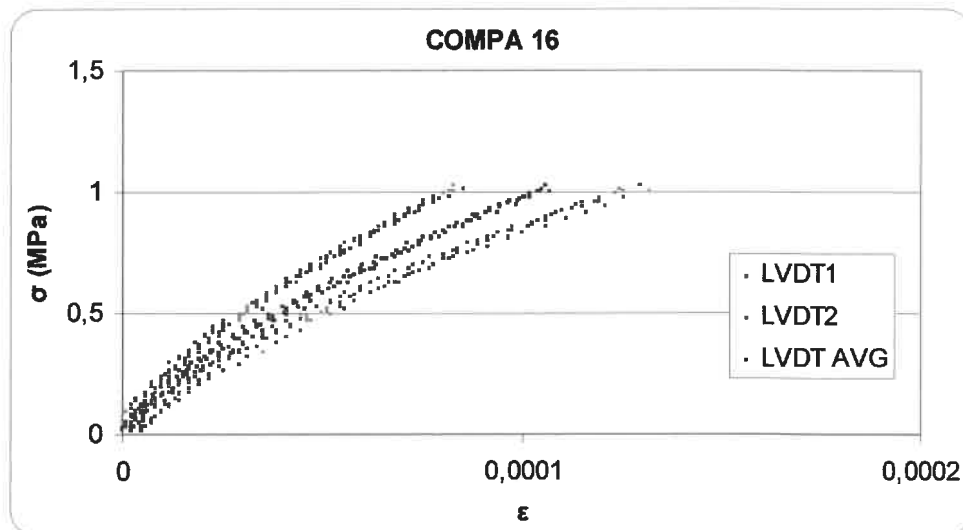
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 12, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



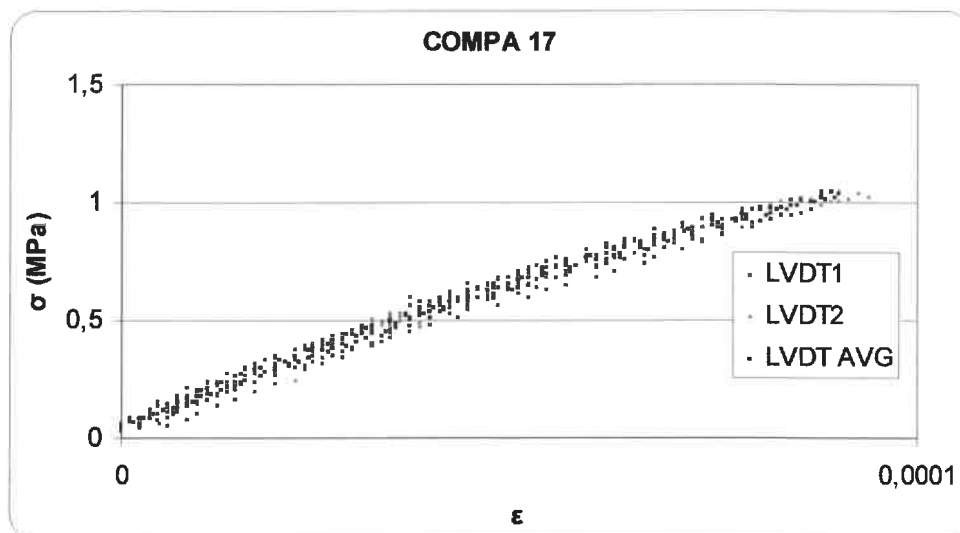
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 14, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



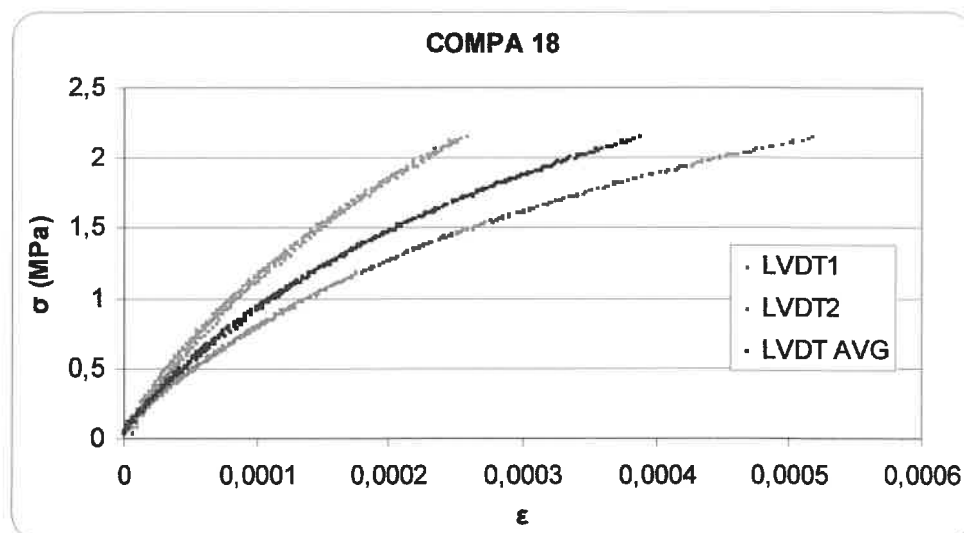
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



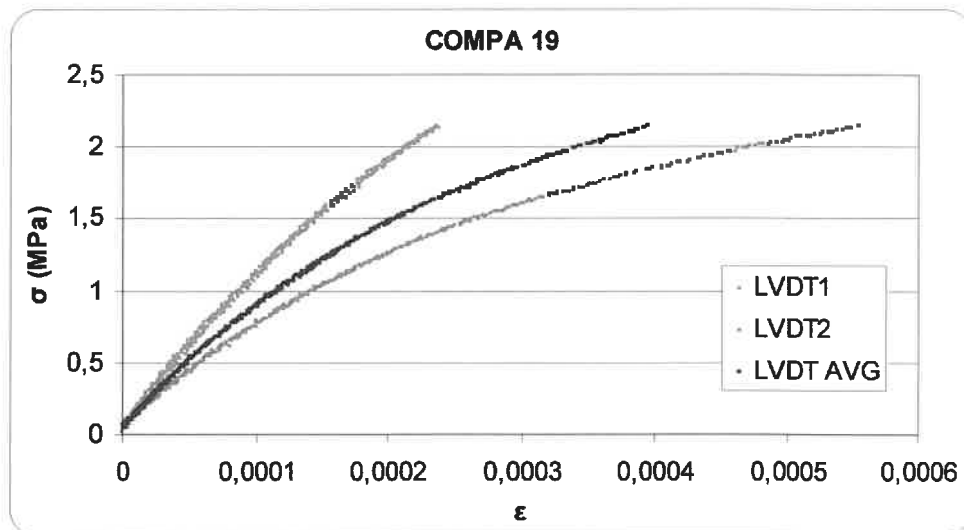
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 16, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



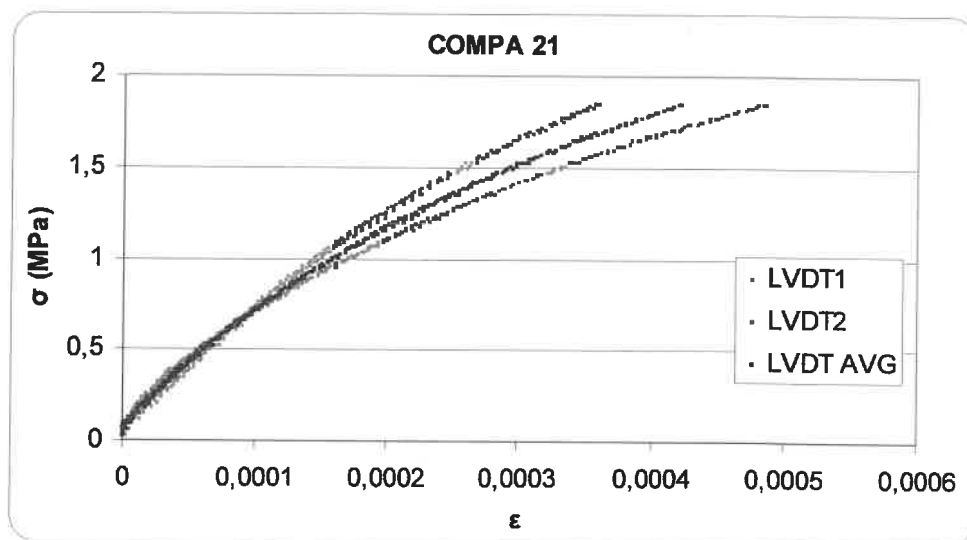
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 17, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



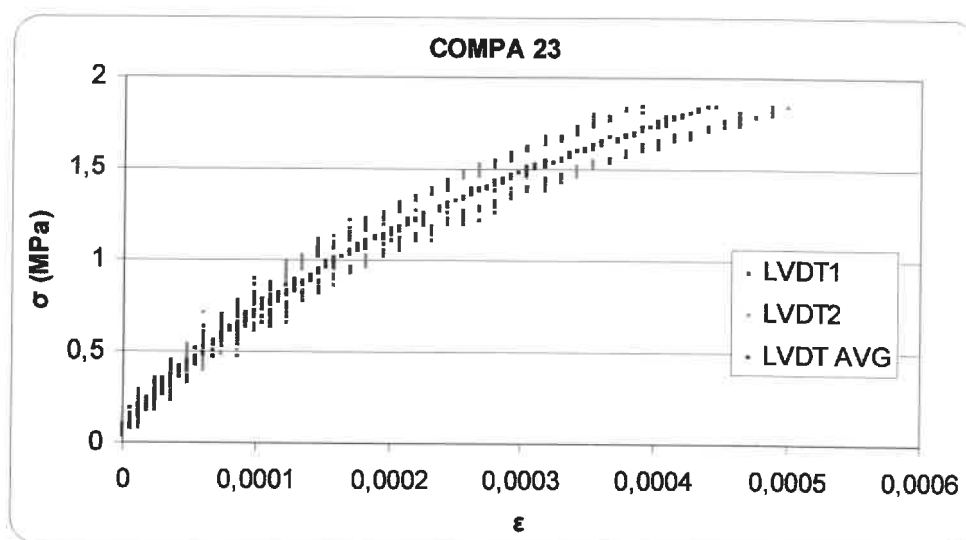
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 18, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



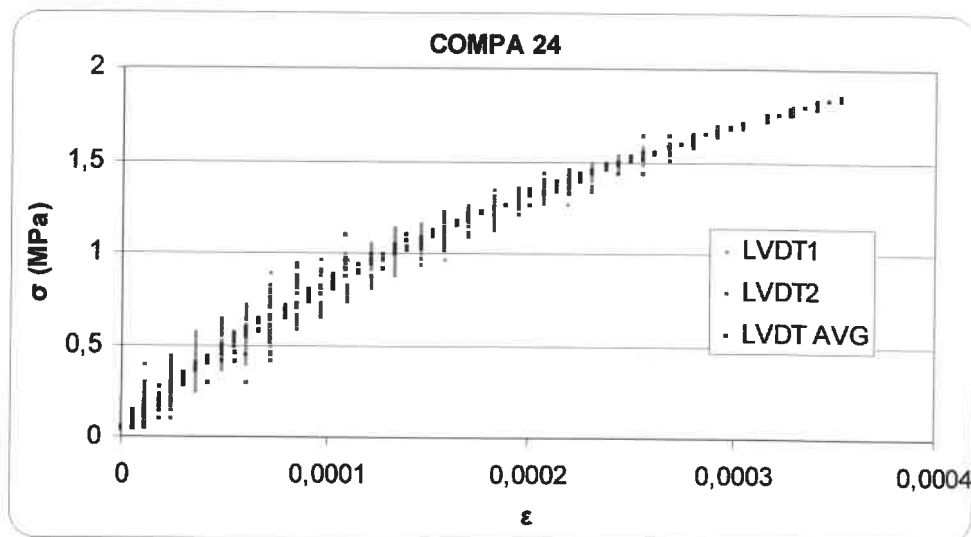
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 19, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



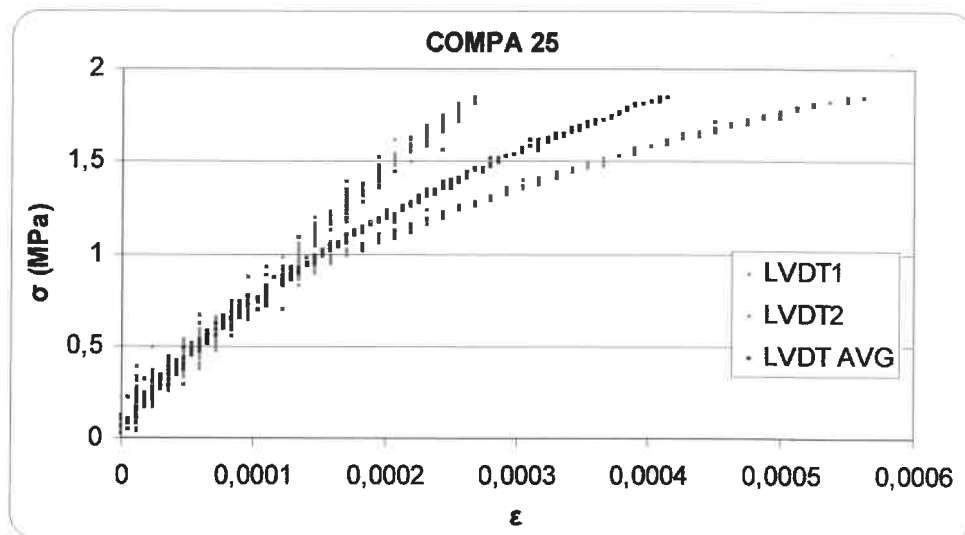
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 21, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



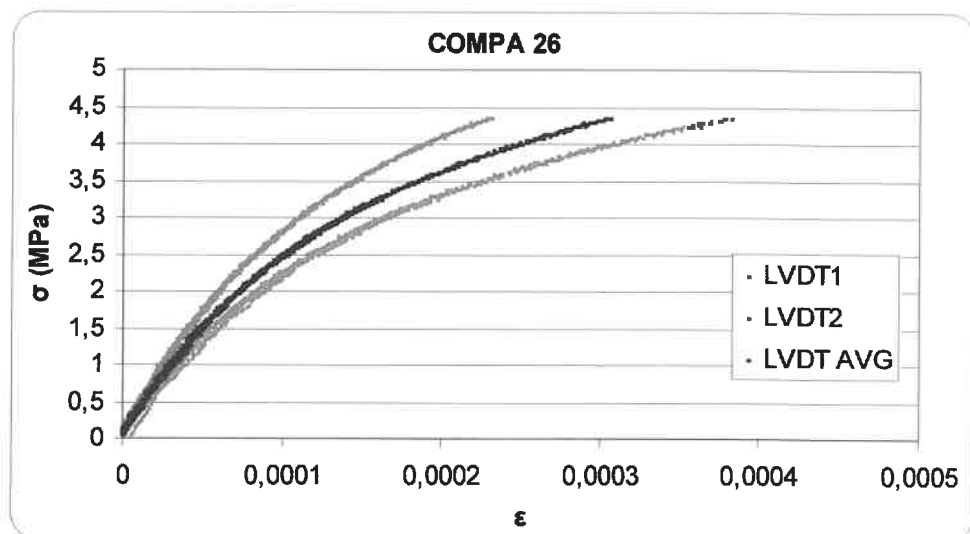
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 23, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



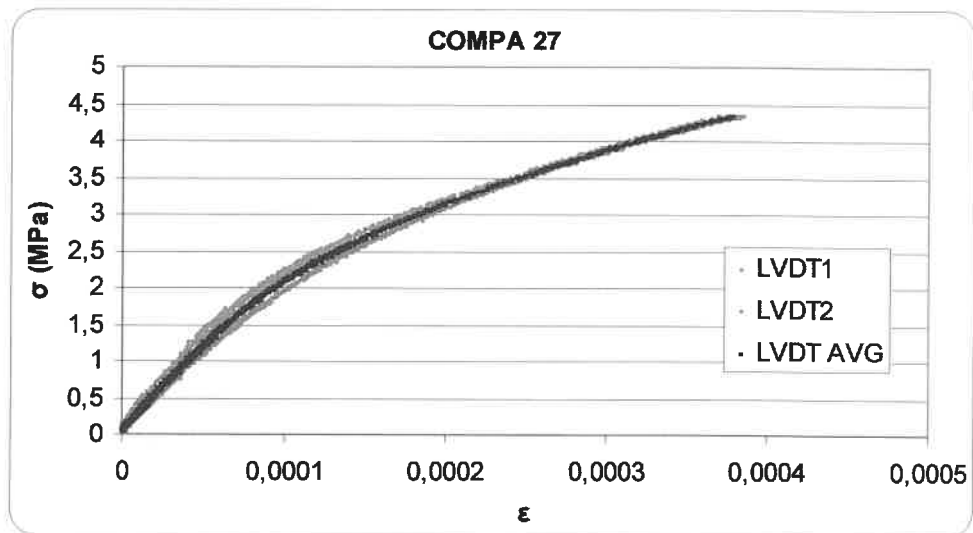
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 24, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



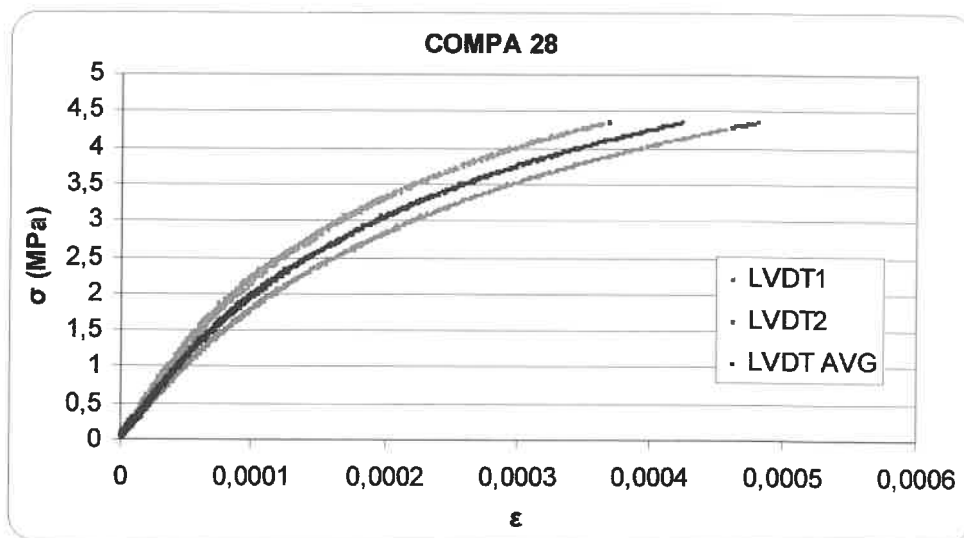
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



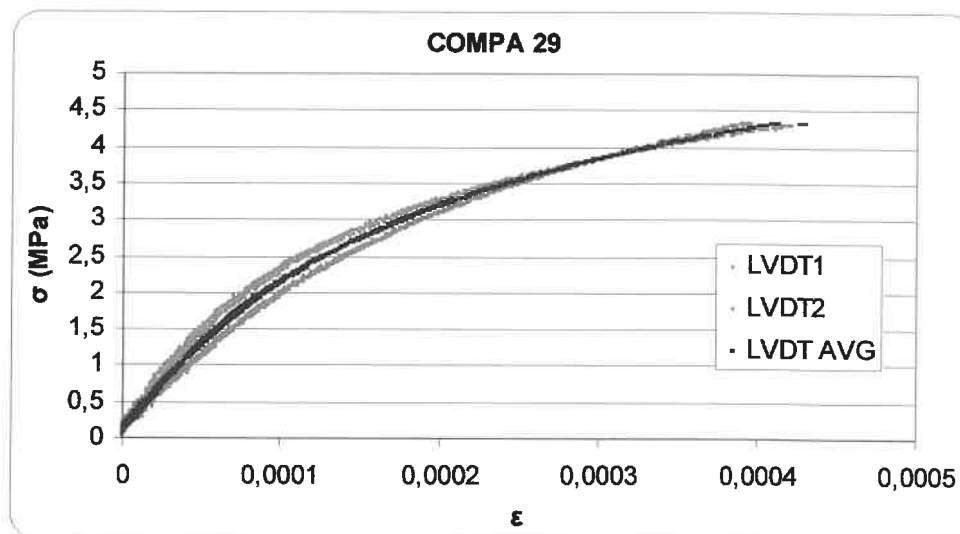
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 26, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



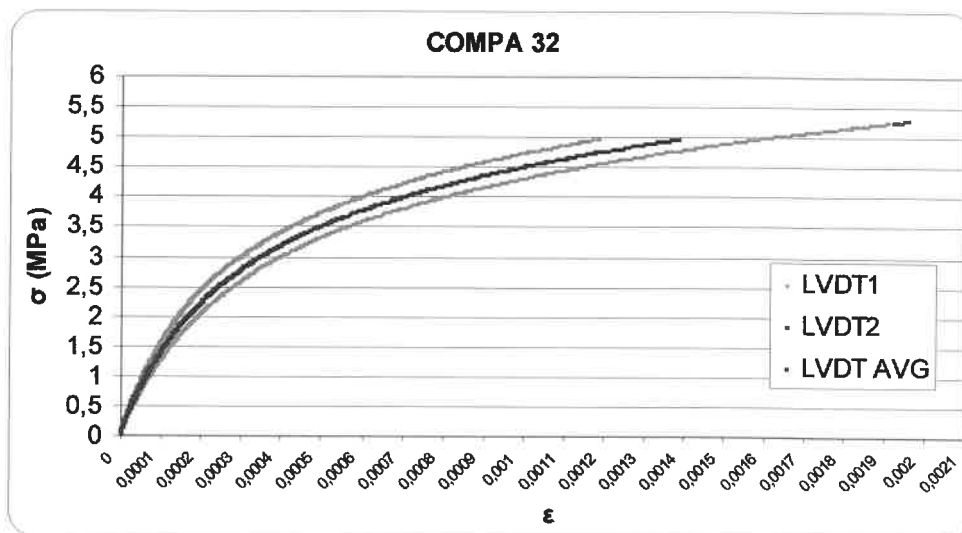
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 27, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



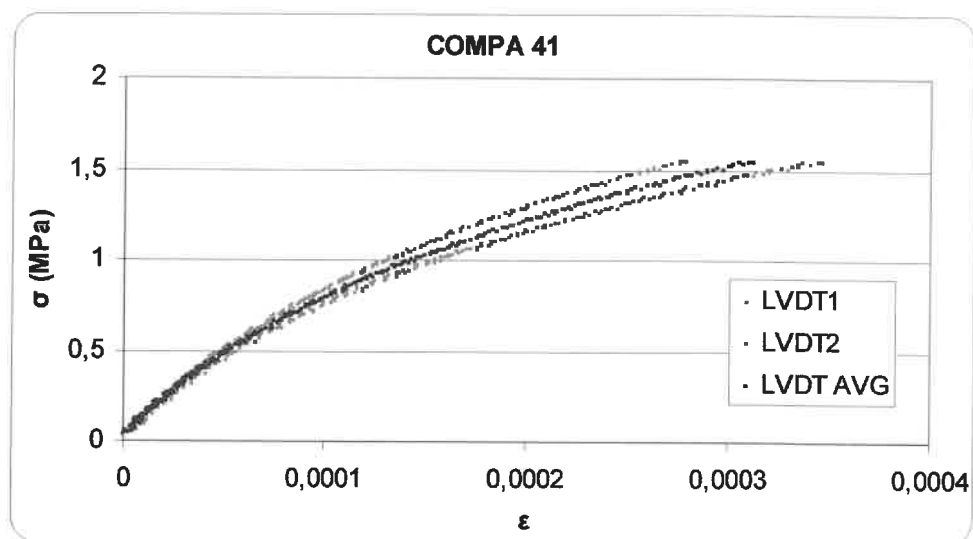
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 28, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



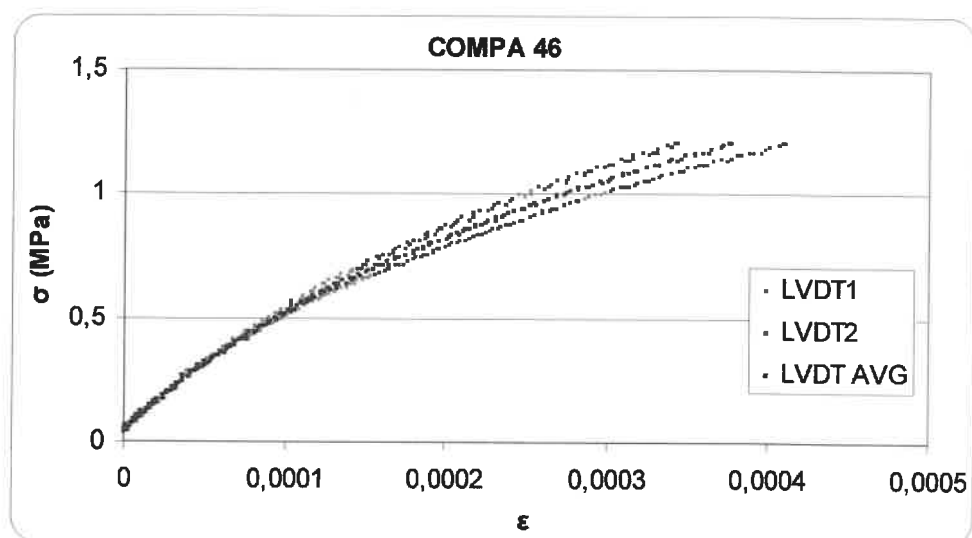
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 29, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C (στεγνά)



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 32, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 41, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C

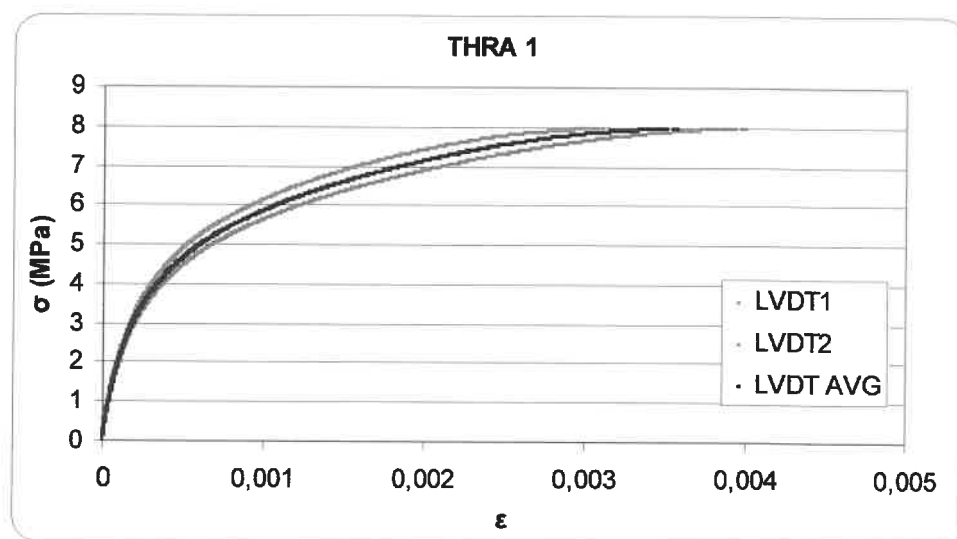


Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 46, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C

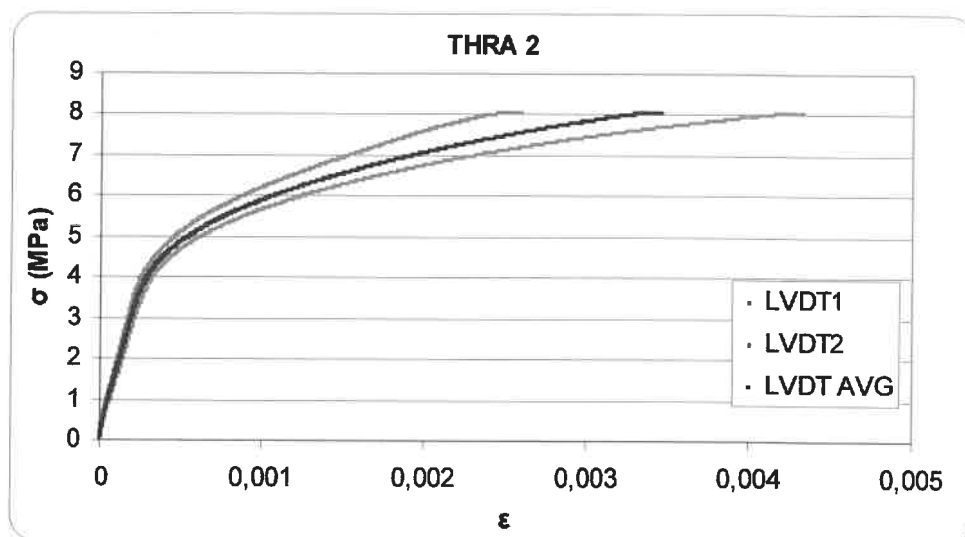
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ ΠΡΙΣΜΑΤΟΣ 2^{ΗΣ} ΦΟΡΤΙΣΗΣ (THRA)

Στα διαγράμματα θλίψης παρουσιάζεται η τάση που αναπτύσσεται στα δοκίμια από την πρέσα MTS σε σύγκριση με την ανηγμένη παραμόρφωση. Το τελευταίο αποτυπωμένο σημείο (πάνω δεξιά στα διαγράμματα) υποδεικνύει την τάση και την παραμόρφωση στη θραύση του εκάστοτε δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε στο $\frac{1}{3}$ της αντοχής των δοκιμίων (και αντίστοιχα της επιβαλλόμενης τάσης) θεωρούμενο χάριν ευκολίας ότι έως εκείνο το σημείο ακολουθεί σχεδόν γραμμική πορεία η συσχέτιση τάσης – παραμόρφωσης.

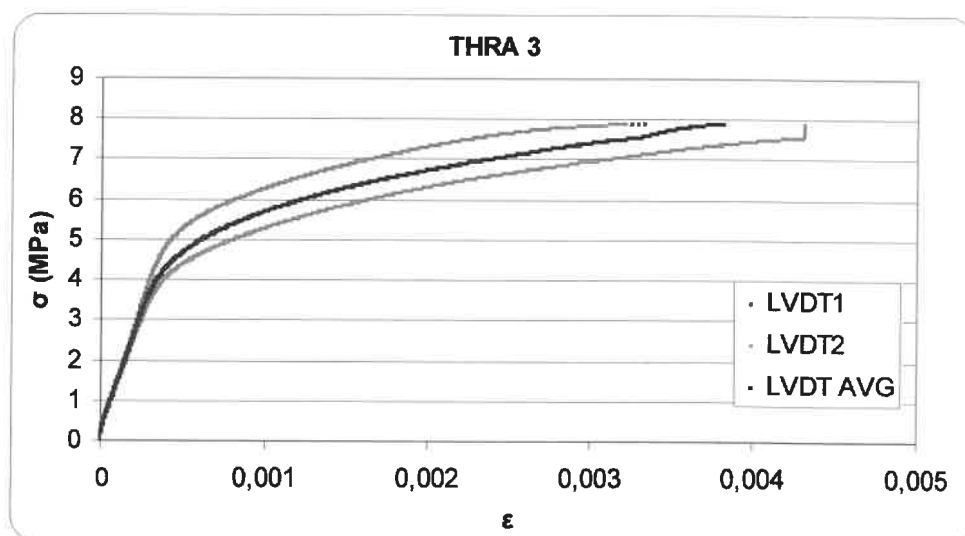
Σε ορισμένα διαγράμματα το ένα εκ των δυο LVDT φαίνεται να “σταματάει” αρκετά νωρίτερα από το άλλο όσον αφορά την παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στην αποκόλληση του LVDT από το πλευρό του δοκιμίου λόγω εμφάνισης ρωγμής πριν από τη θραύση του.



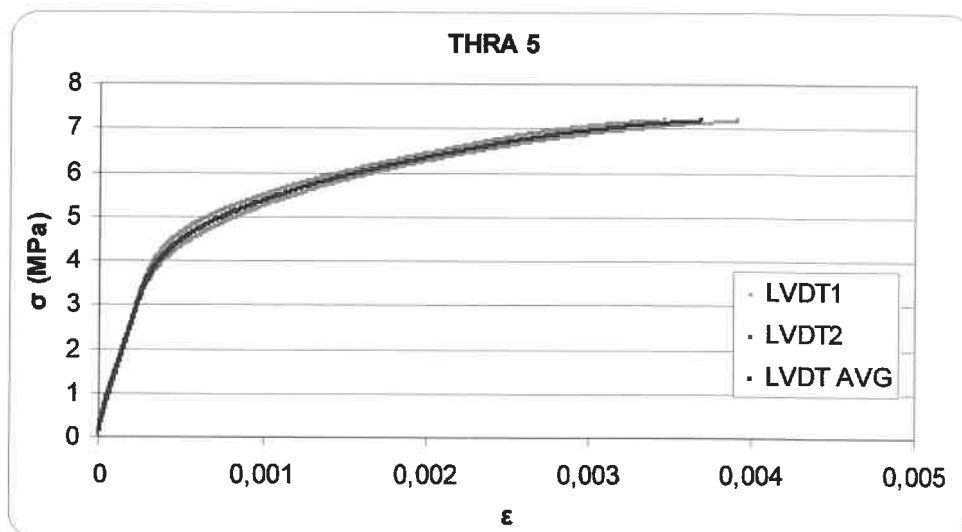
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 1, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



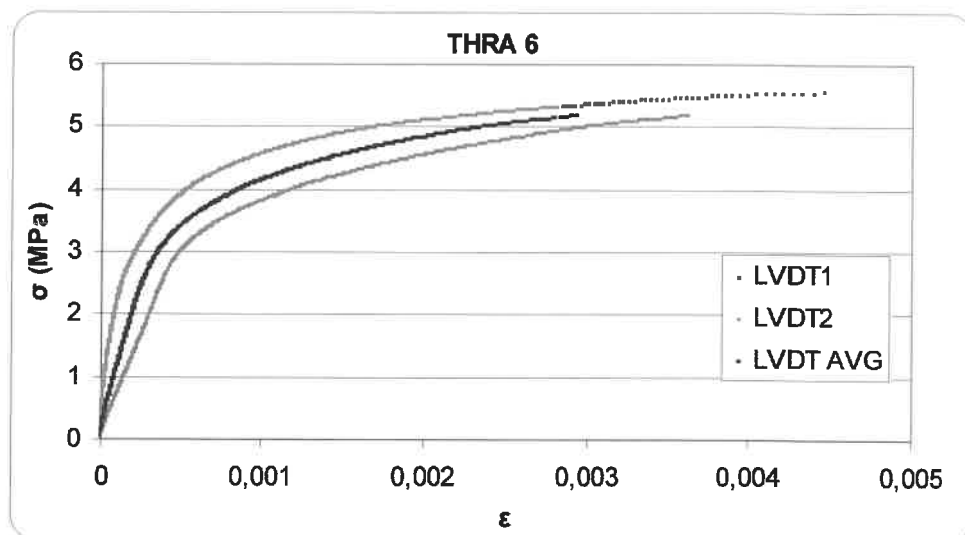
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 2, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



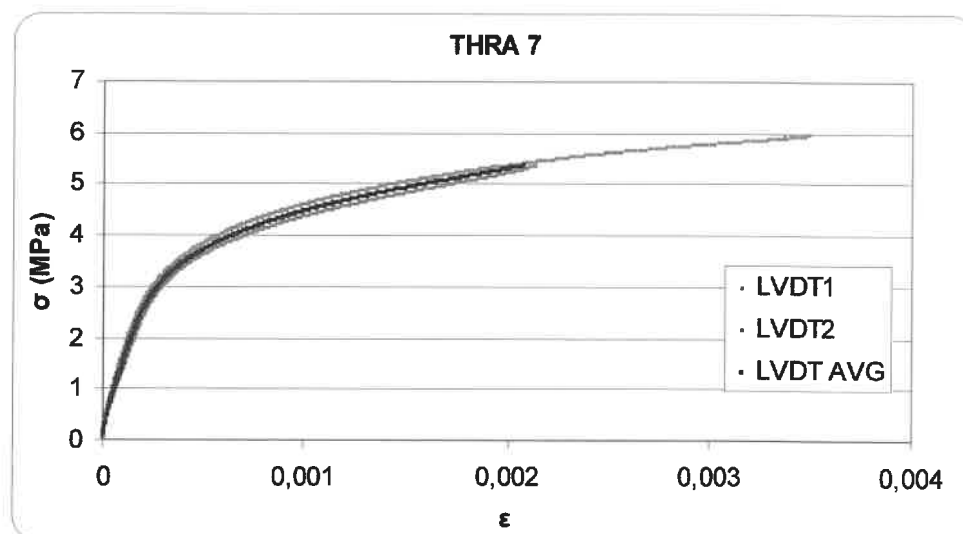
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 3, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



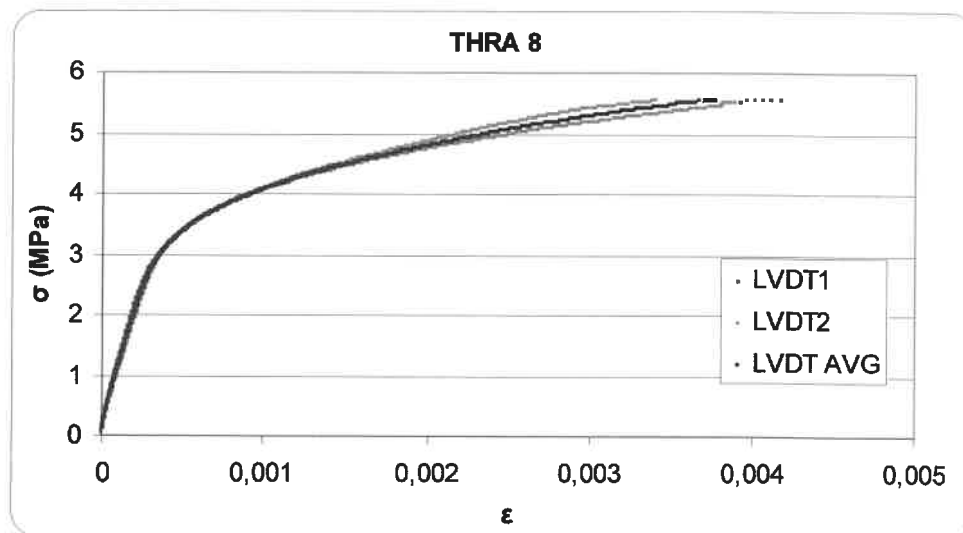
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



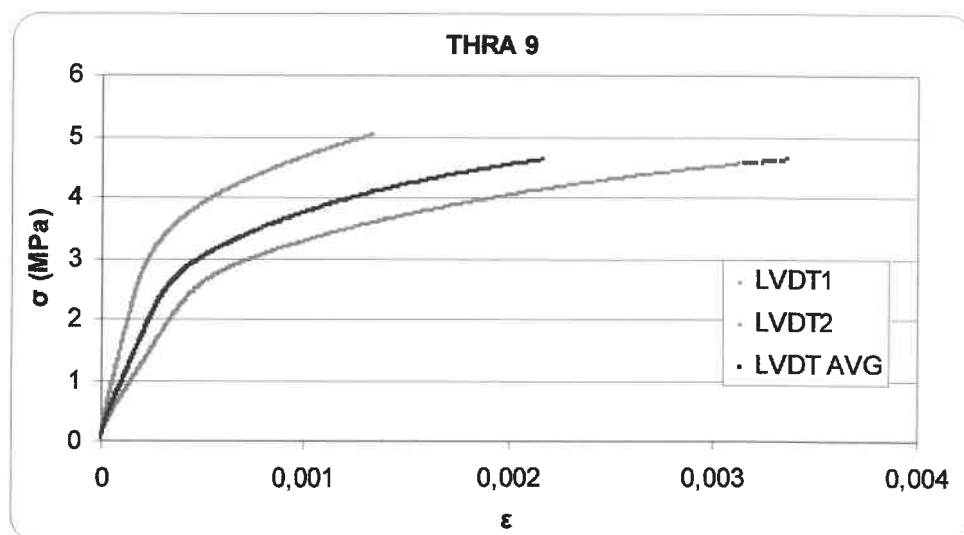
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 6, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



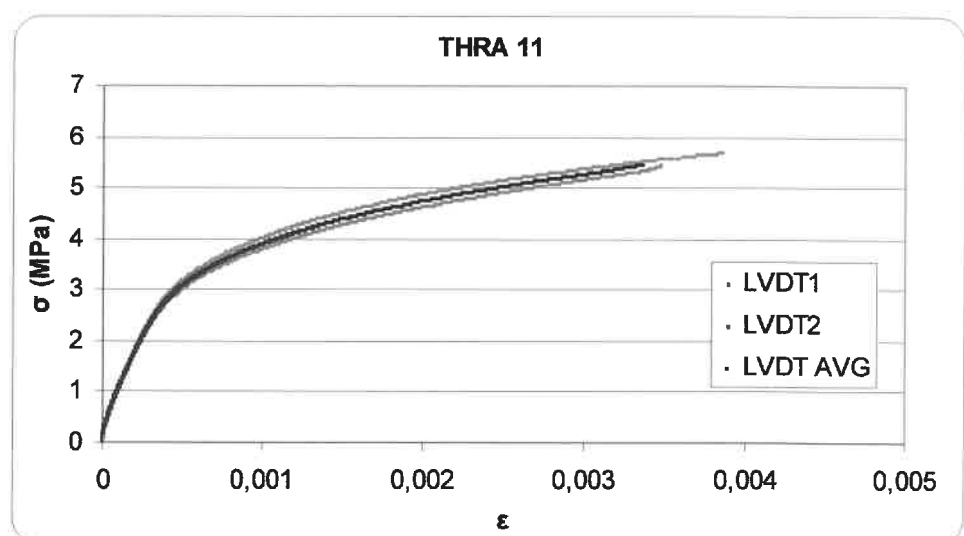
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 7, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



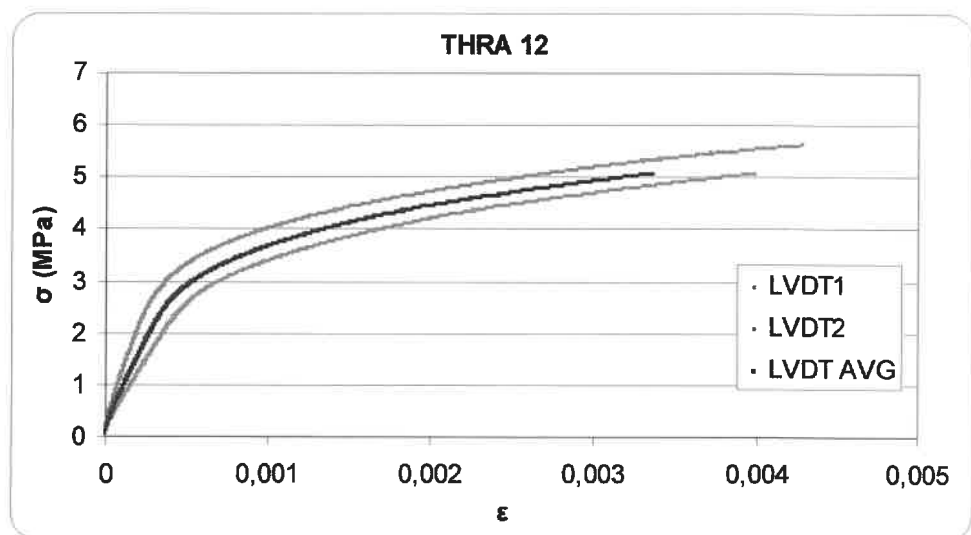
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 8, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



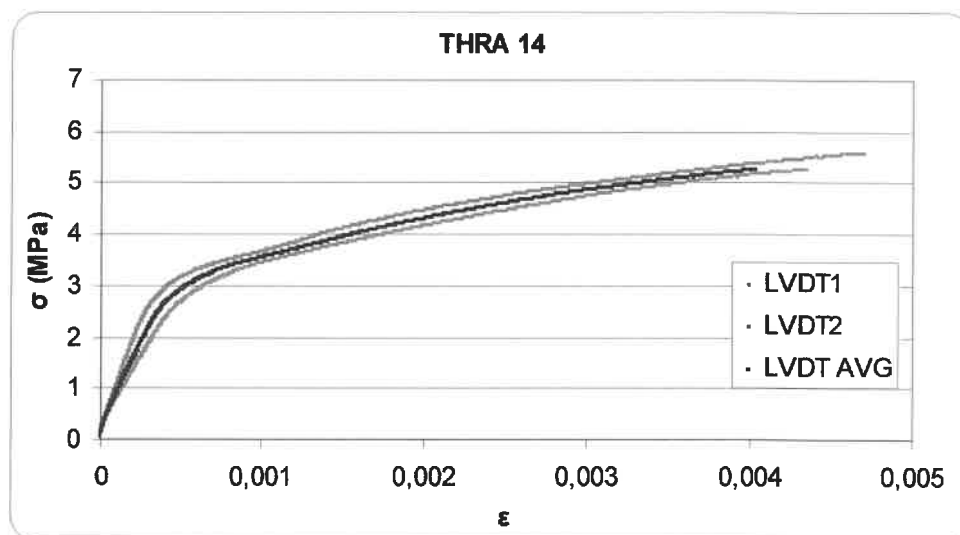
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 9, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



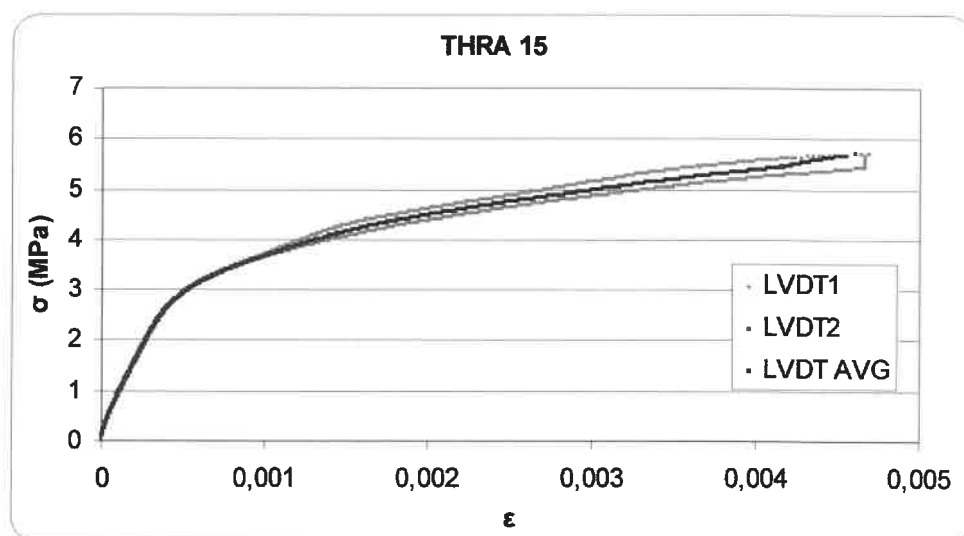
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 11, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



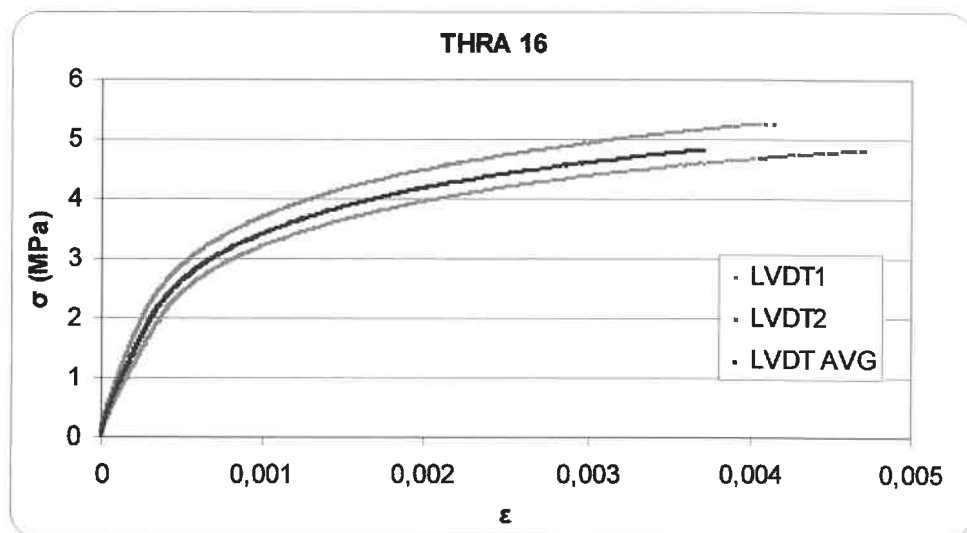
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 12, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



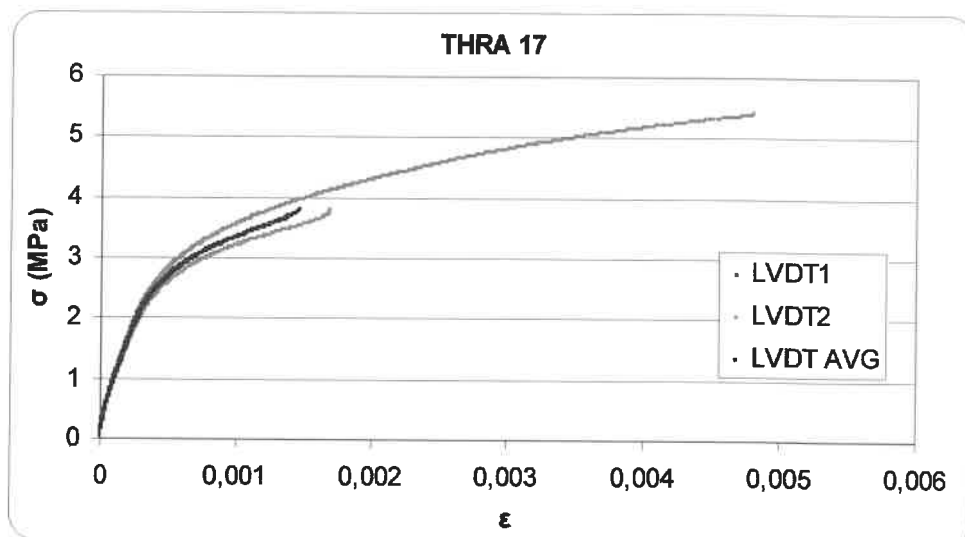
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 14, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



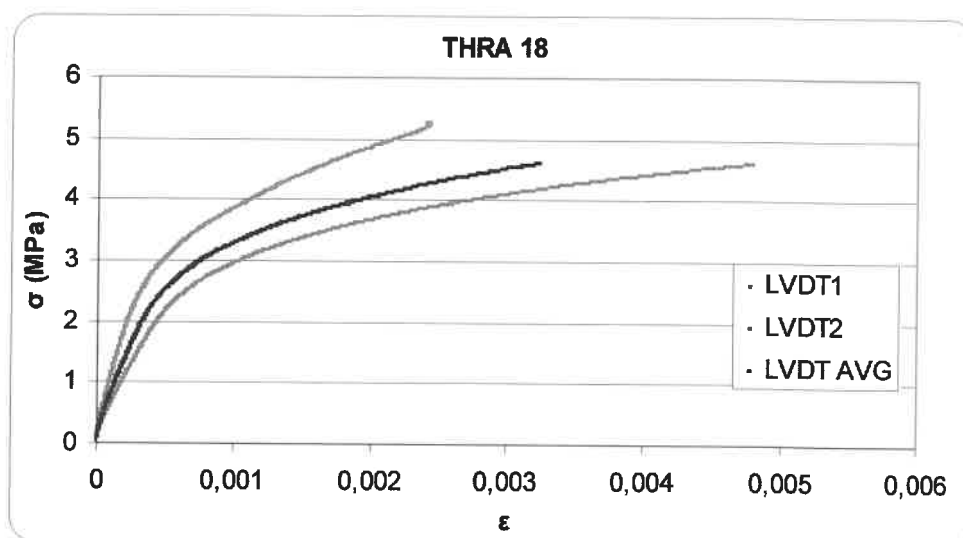
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



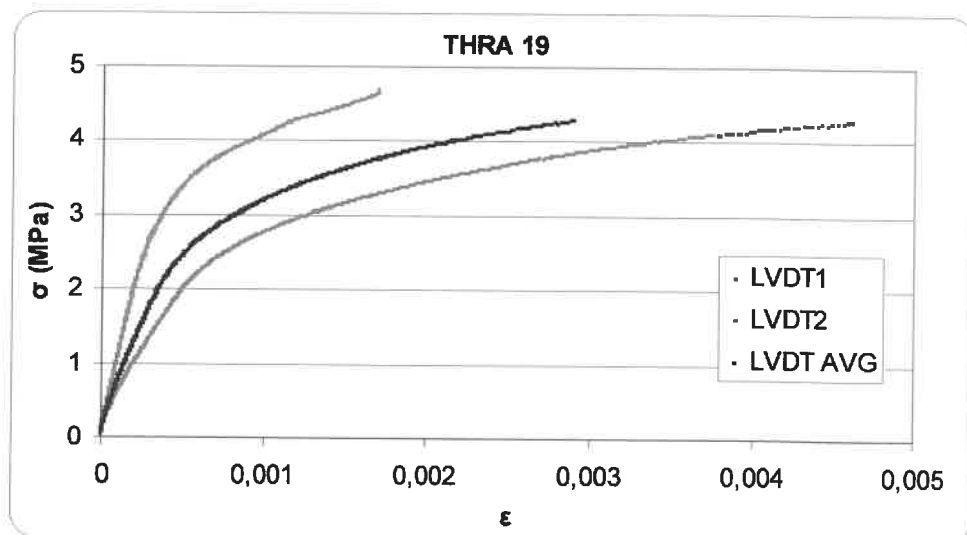
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 16, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



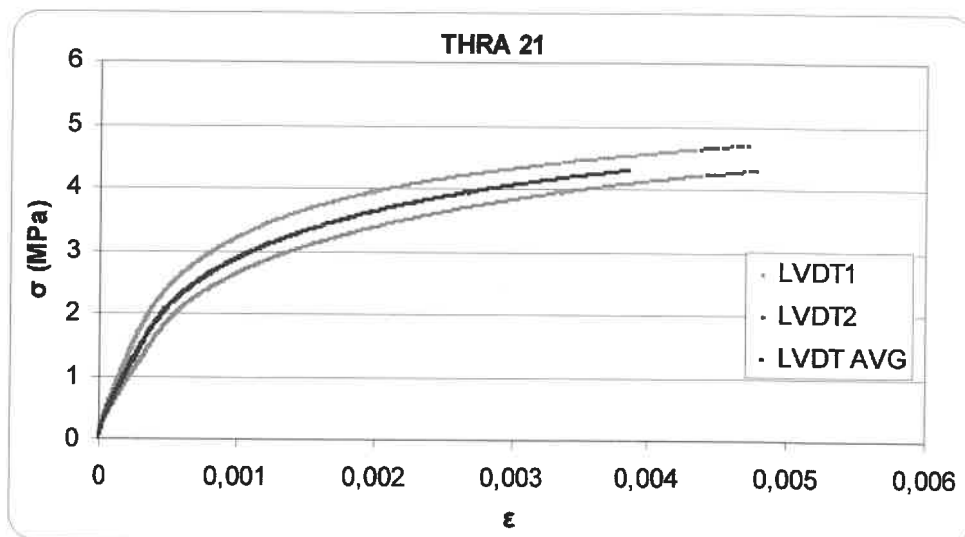
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 17, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



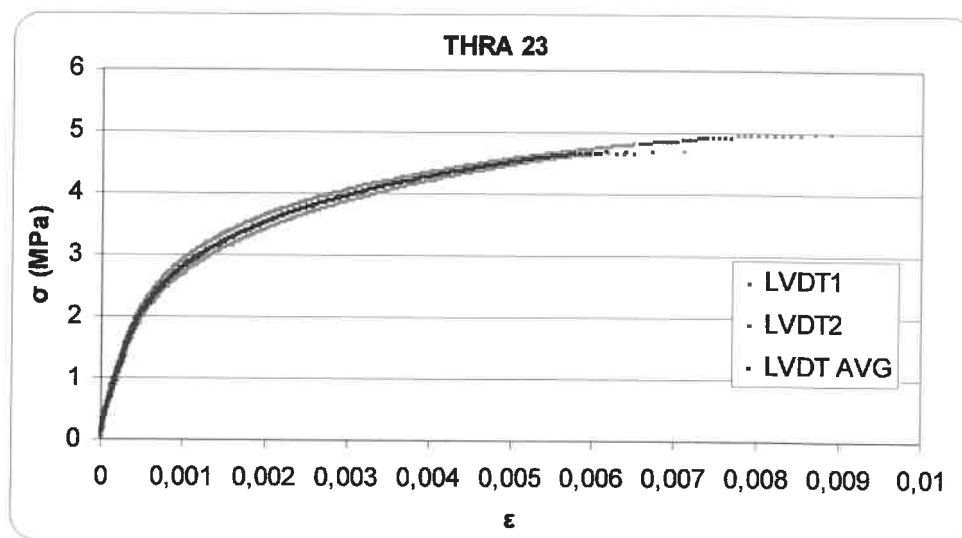
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 18, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



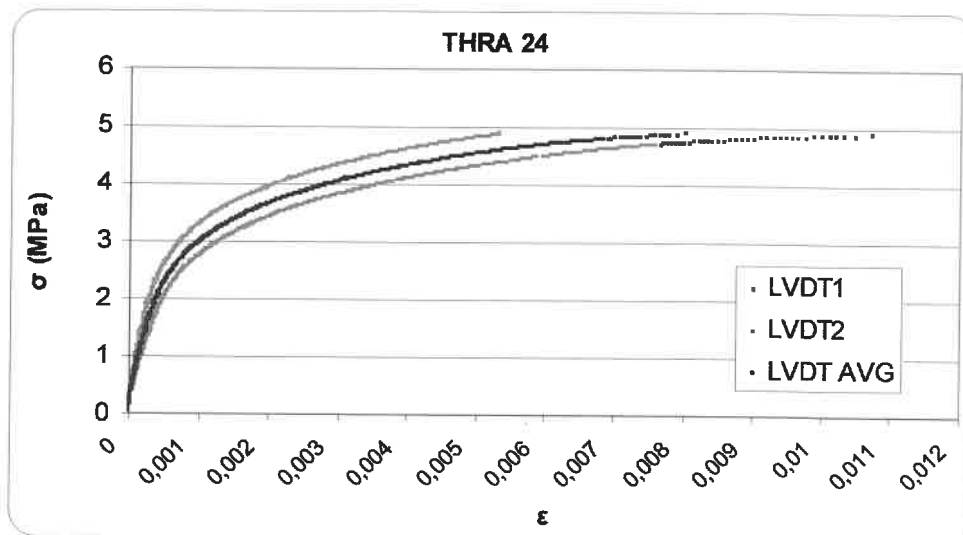
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 19, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



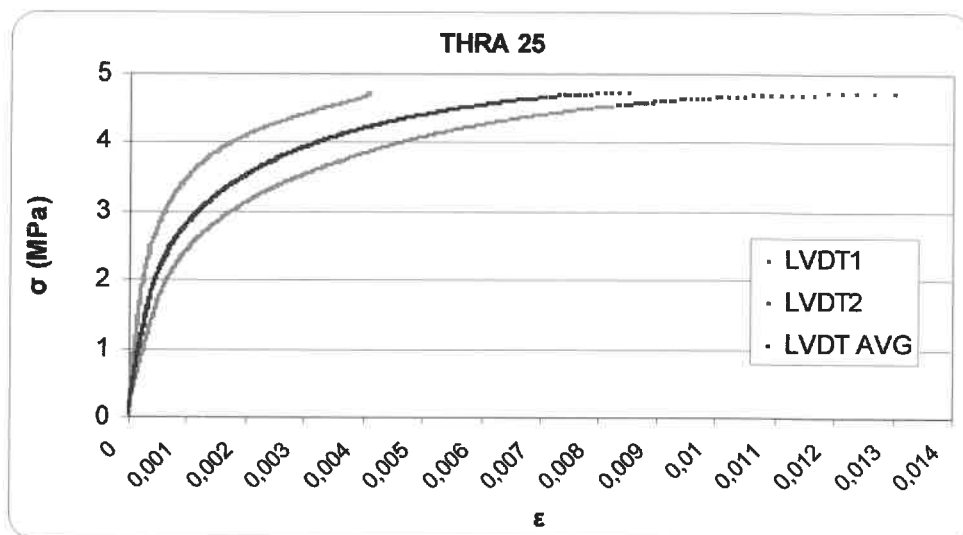
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 21, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



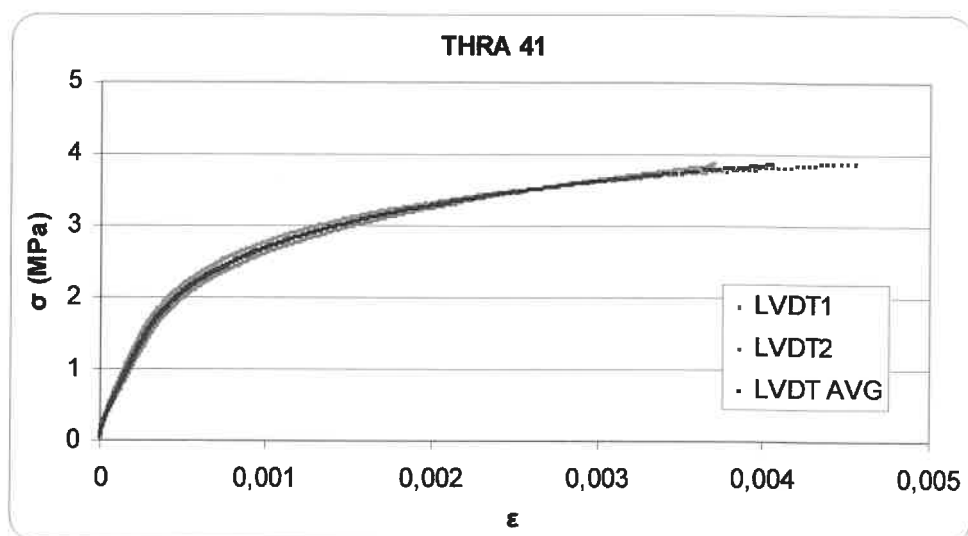
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 23, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



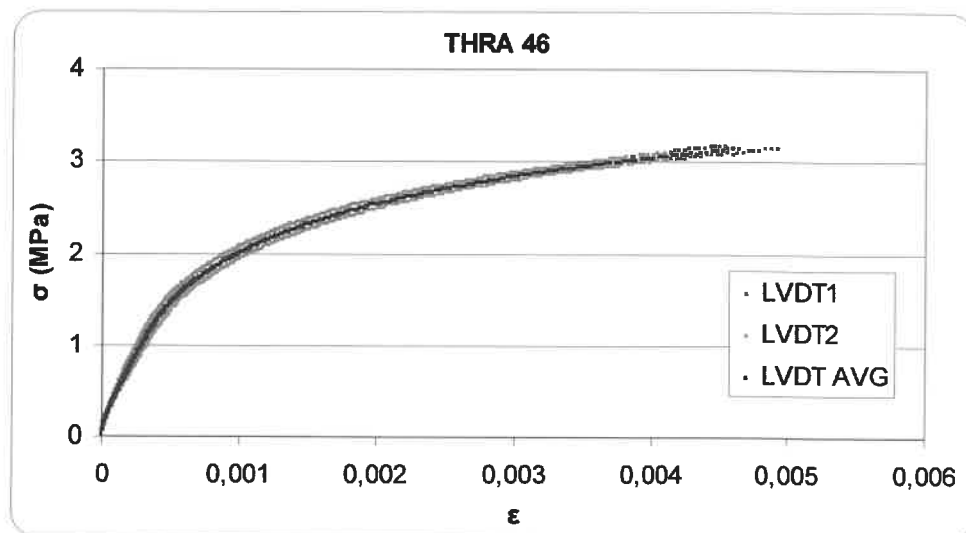
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 24, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 41, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C

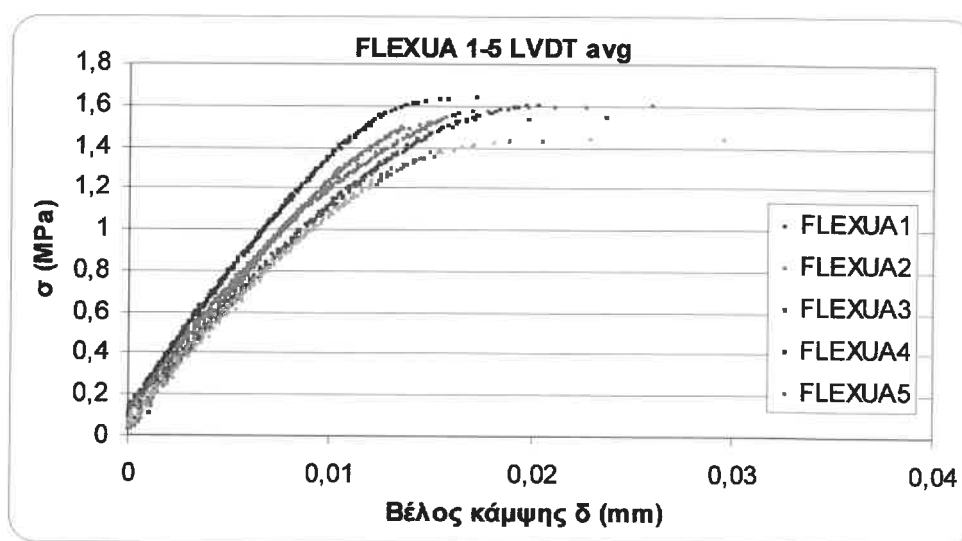


Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίου 46, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C

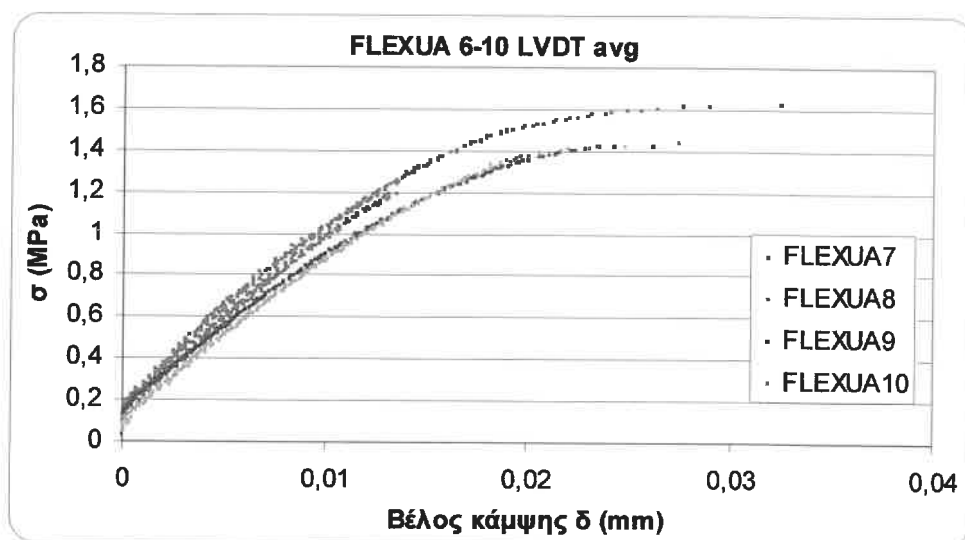
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗΣ

Στα συγκριτικά διαγράμματα παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων ανά ομάδα δοκιμίων (συνήθως ανά πεντάδες) στο ίδιο διάγραμμα ώστε να είναι φανερή η διαφορά μεταξύ δυο δοκιμίων ίδιας σύνθεσης και θερμοκρασίας. Με τη βοήθεια των συγκριτικών αυτών διαγραμμάτων εντοπίστηκαν μη αναμενόμενες τιμές στα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων και έγινε η κατάλληλη απαλοιφή των λανθασμένων τιμών στο Κεφάλαιο 3.1 «Αποτελέσματα Δοκιμών» ώστε αυτά να μην επηρεάσουν την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

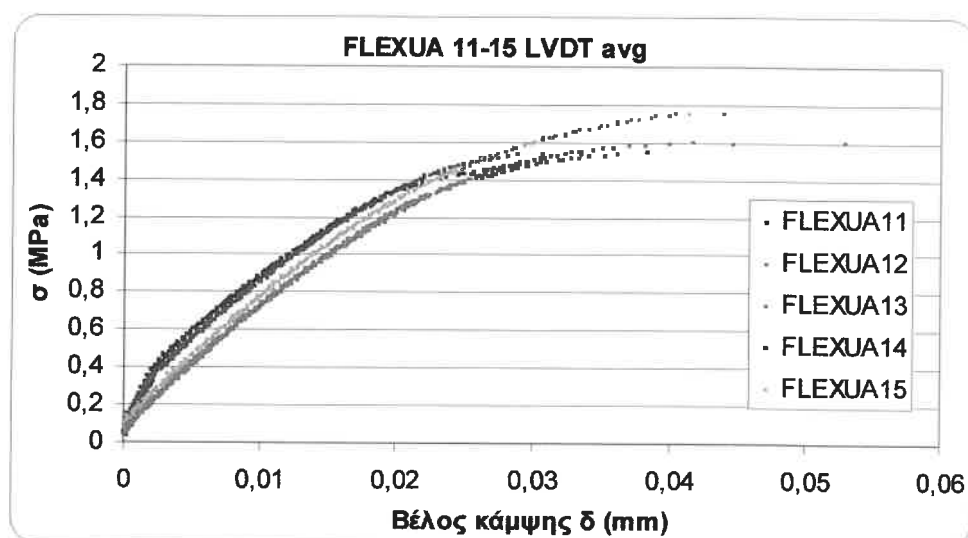
Χαρακτηριστικά παραδείγματα μη αναμενόμενων τιμών είναι τα FLEXUA 29 και COMPA 6. Στη δοκιμή κάμψης του δοκιμίου 29 παρατηρείται ένα άλμα του βέλους κάμψης χωρίς αντίστοιχη μεταβολή της επιβαλλόμενης τάσης, που οφείλεται σε κακή συγκόλληση των LVDT που μάλλον ολίσθησαν και έδωσαν αυτό το μη αναμενόμενο "άλμα" που επηρέασε το μέτρο ελαστικότητας κάμψης (έδωσε το μισό μέτρο ελαστικότητας από το αντίστοιχο των δοκιμίων της ίδιας ομάδας). Το ίδιο συνέβει και με το μέτρο ελαστικότητας θλίψης του δοκιμίου 6, όπου το ένα εκ των δυο LVDT δεν μέτρησε καθόλου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητάς του να είναι υποδιπλάσιο των αντίστοιχων της ομάδας του.



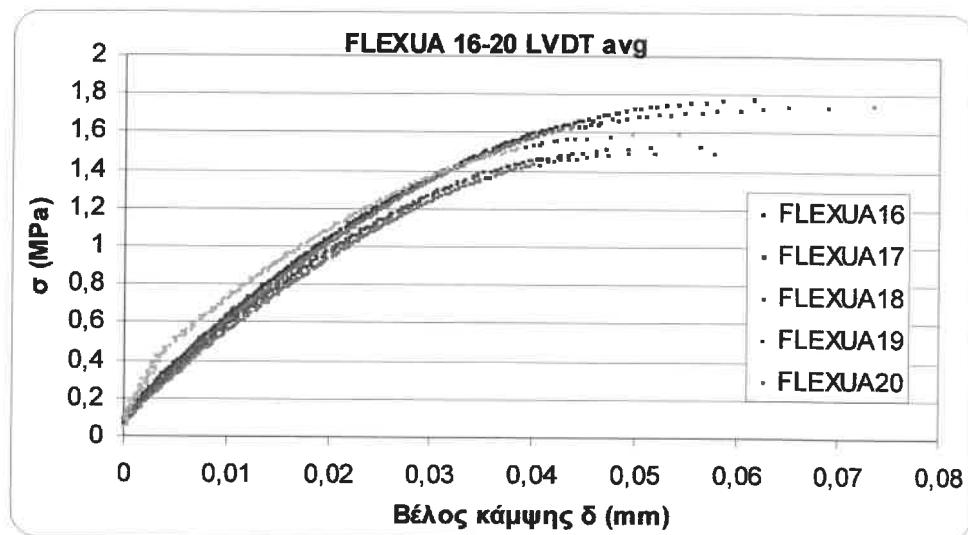
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 1-5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



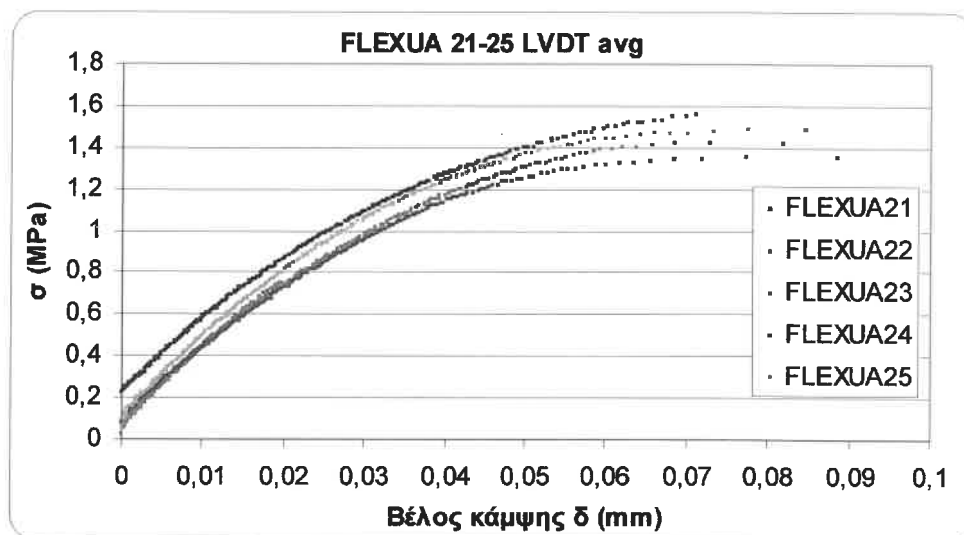
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 6-10, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



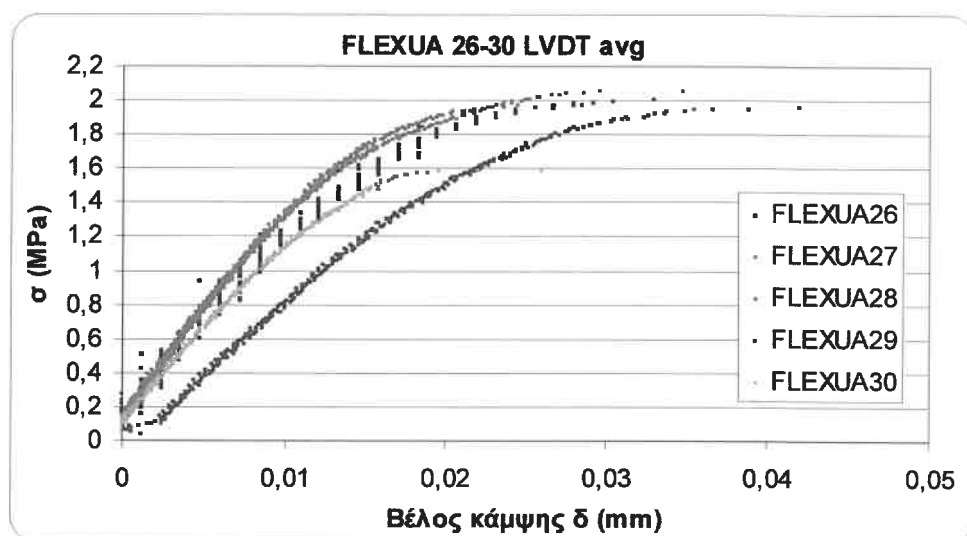
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 11-15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



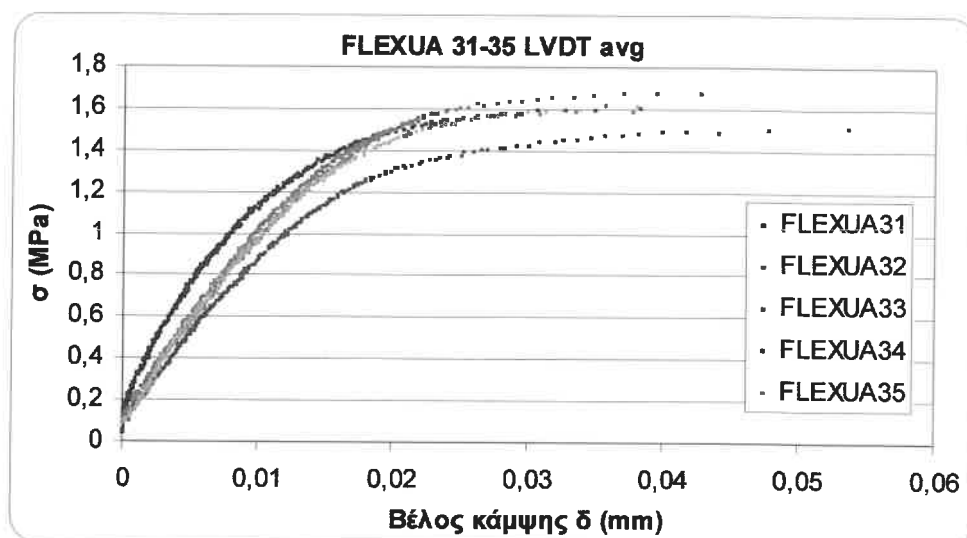
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 16-20, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



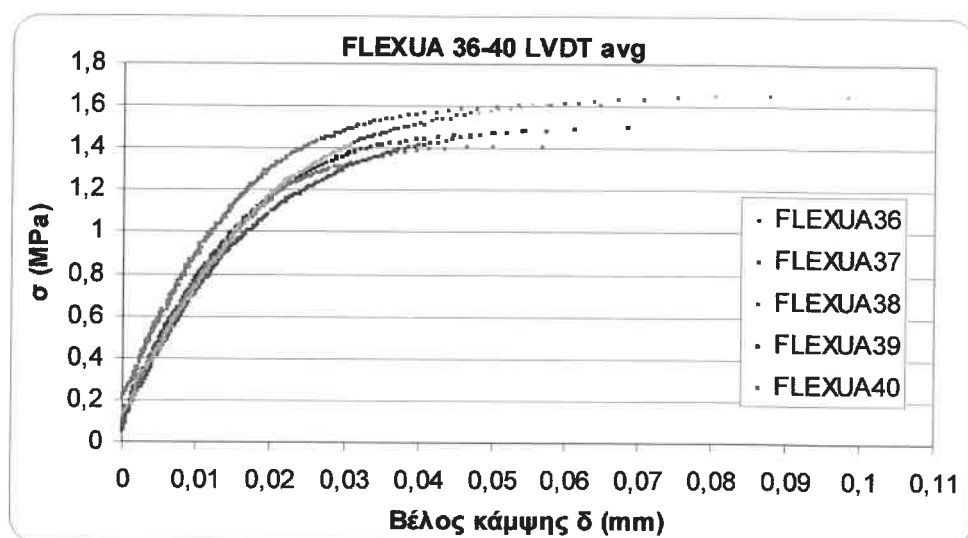
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 21-25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



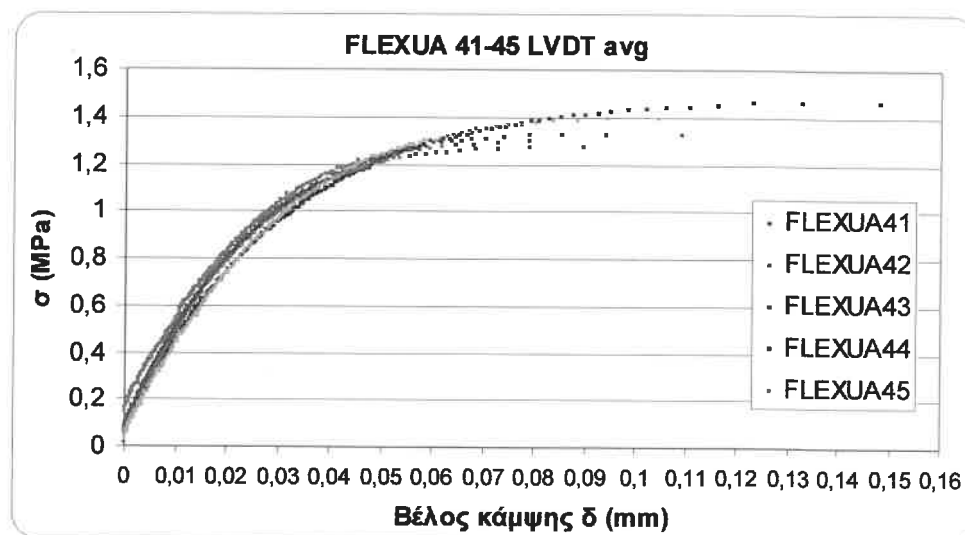
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 26-30, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C
(στεγνά)



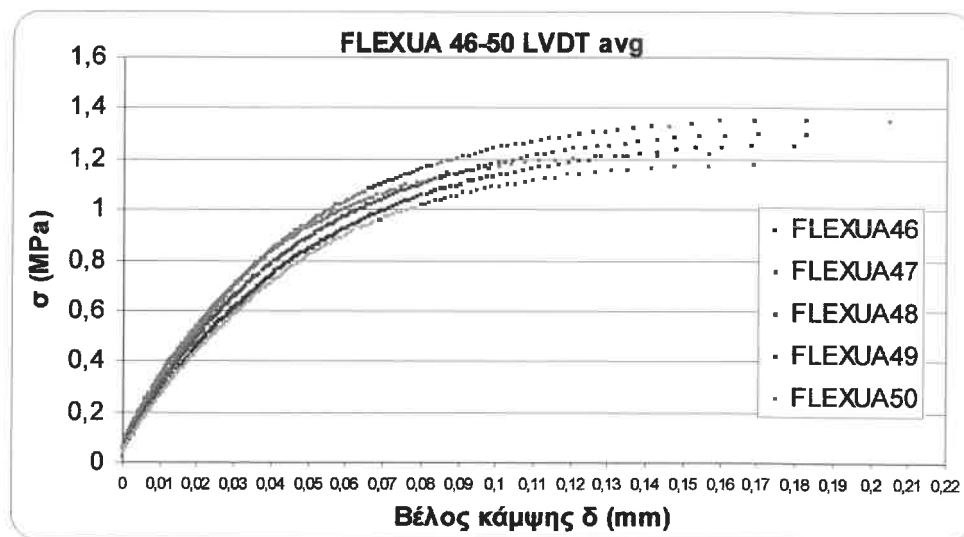
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 31-35, μίγματος 75 / 25 στους 40 °C



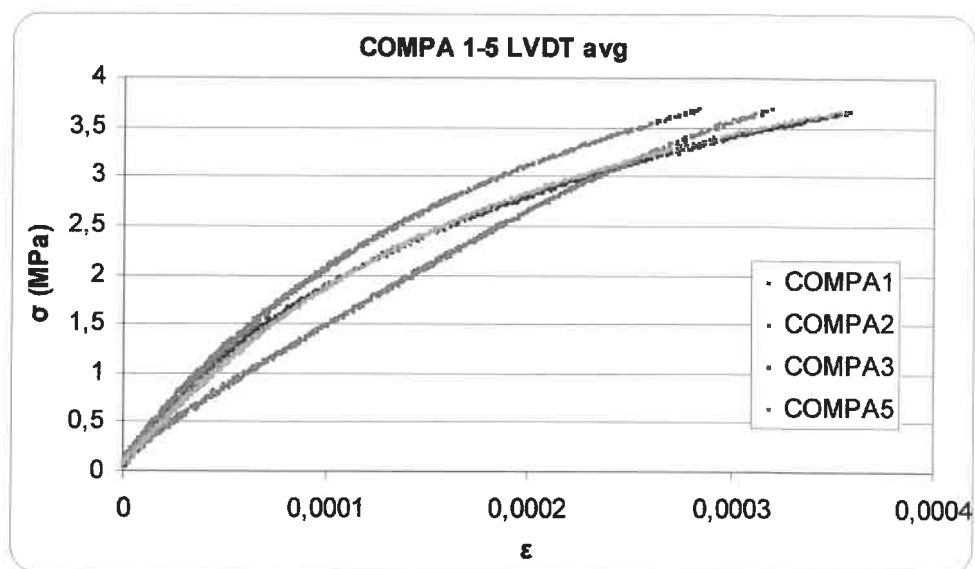
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 36-40, μίγματος 50 / 50 στους 40 °C



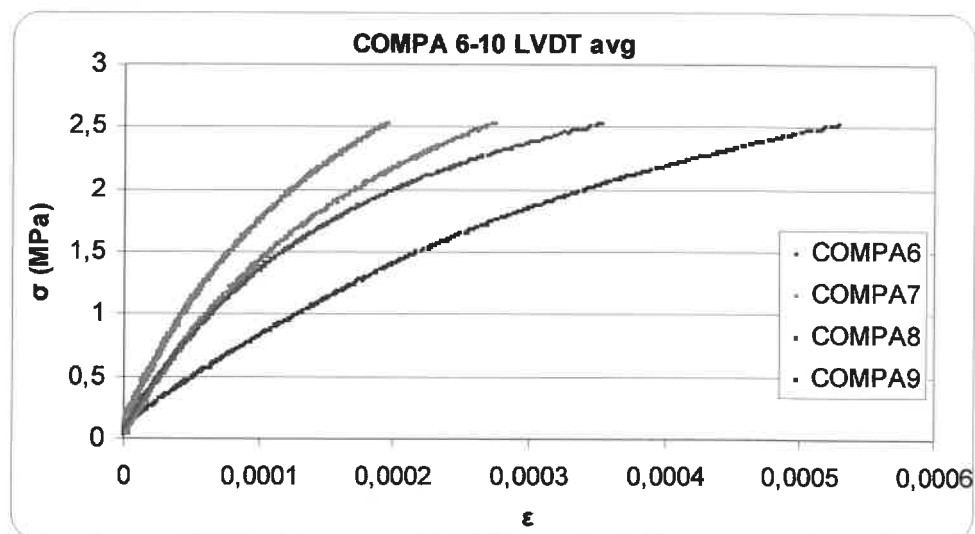
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 41-45, μίγματος 25 / 75 στους 40 °C



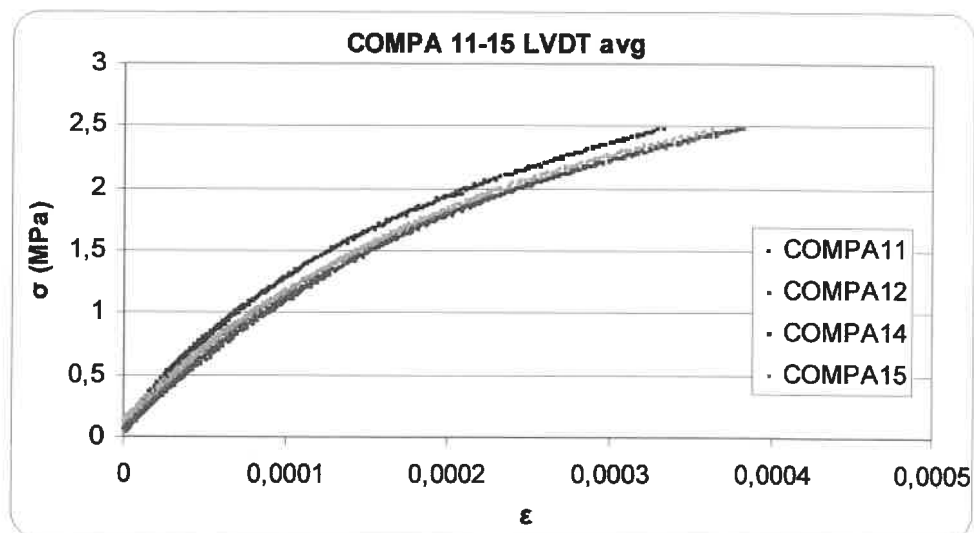
Διάγραμμα τάσης – βέλους κάμψης δοκιμίων 46-50, μίγματος 0 / 100 στους 40 °C



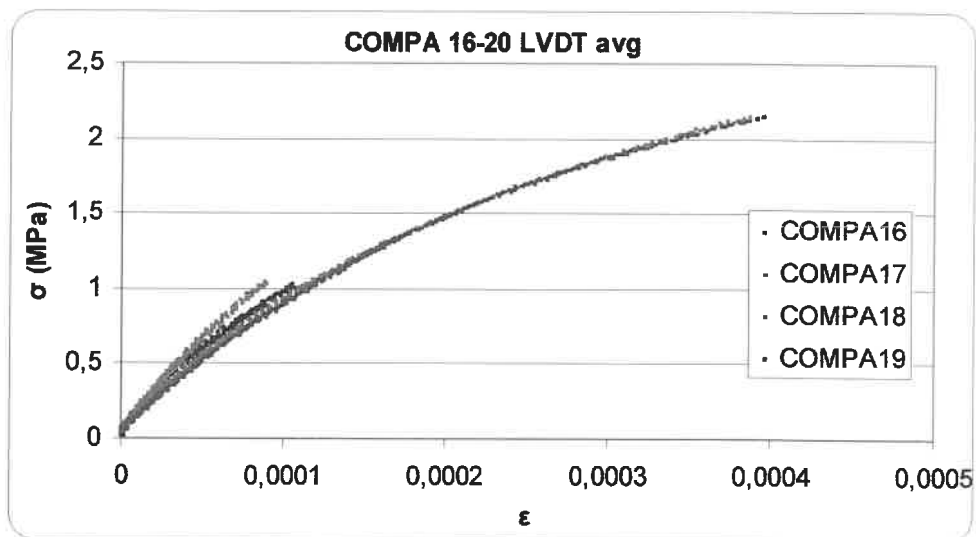
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 1-5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



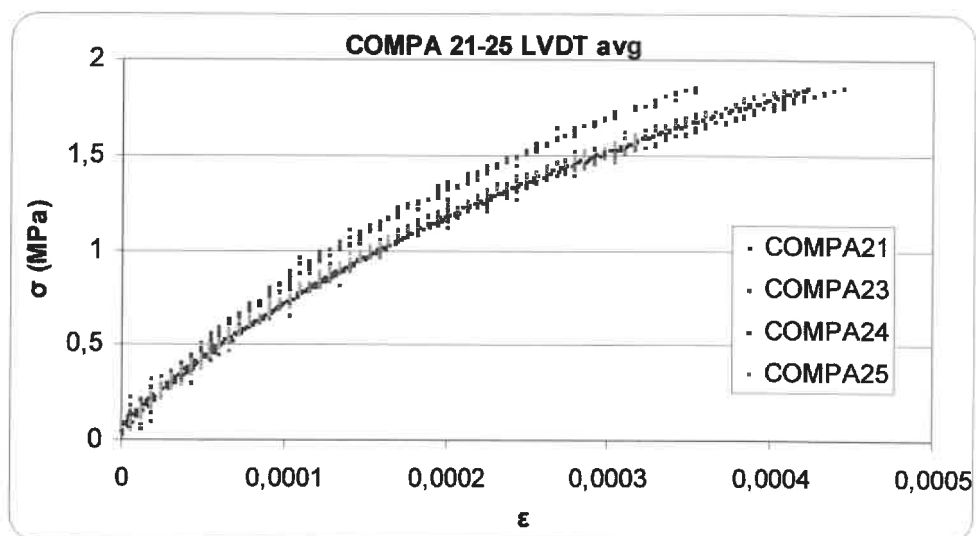
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 6-10, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



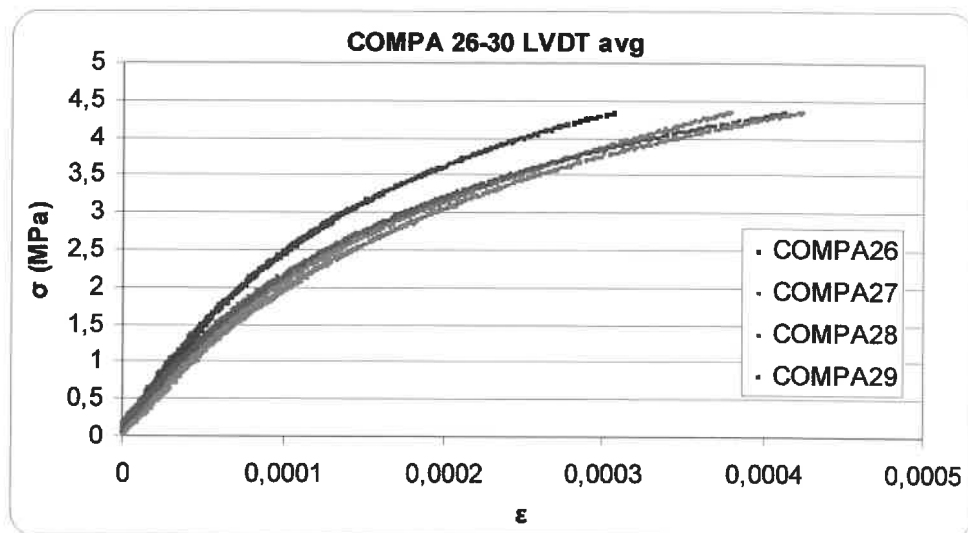
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 11-15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



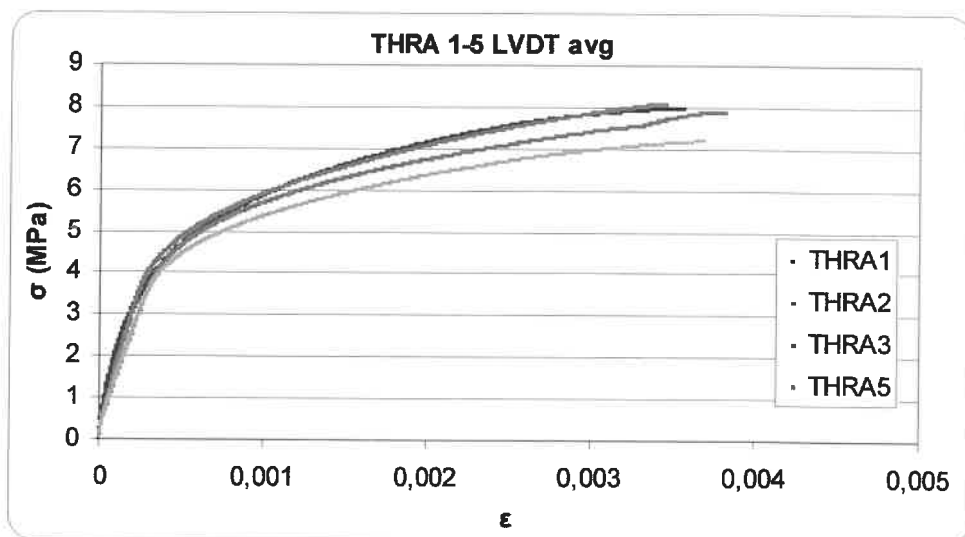
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών 16-20, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



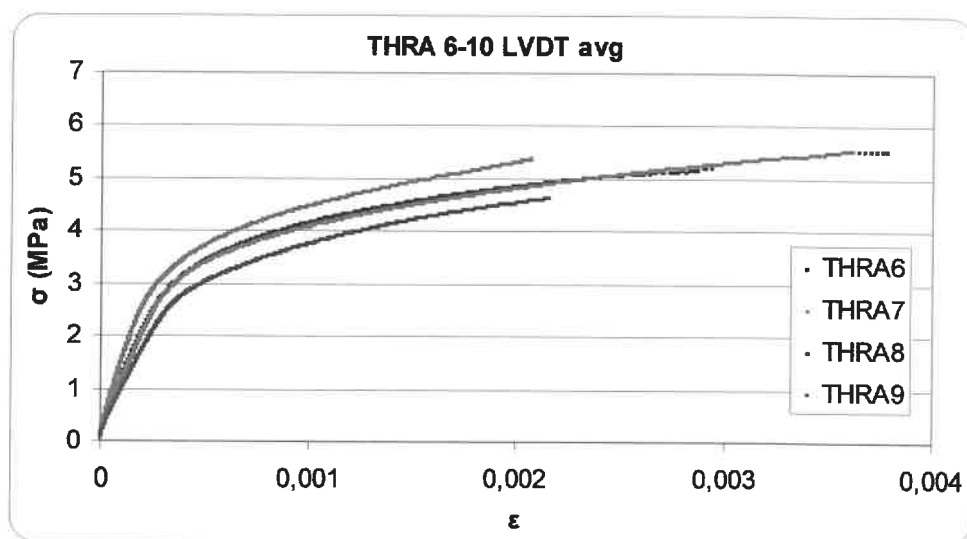
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών 21-25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C



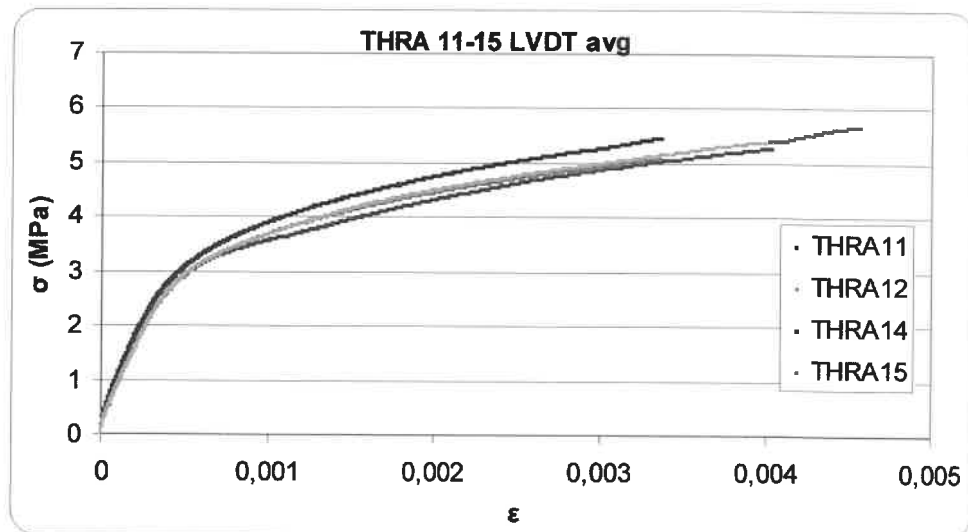
Διάγραμμα τάσης–παραμόρφωσης δοκιμών 26-30, μίγματος 100/0 στους 23 °C (στεγνά)



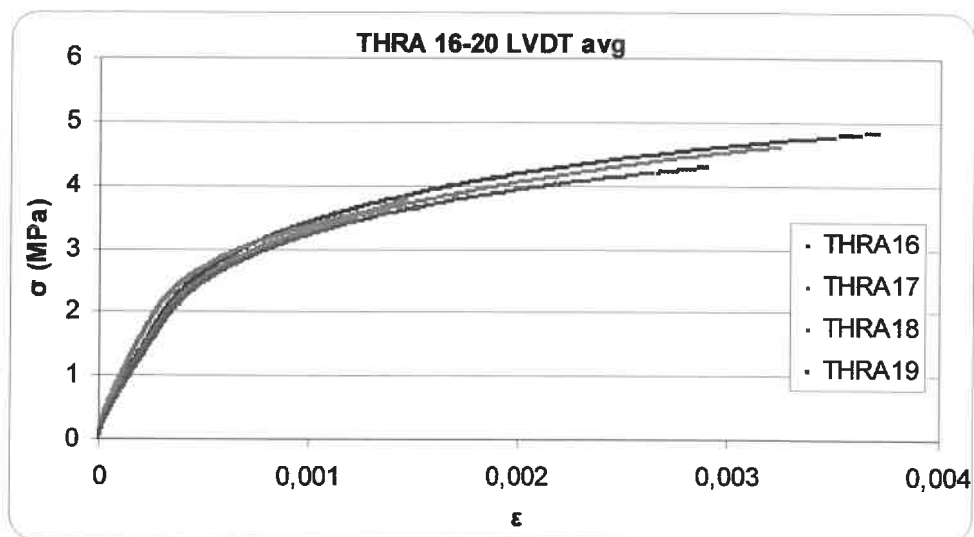
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 1-5, μίγματος 100 / 0 στους 23 °C



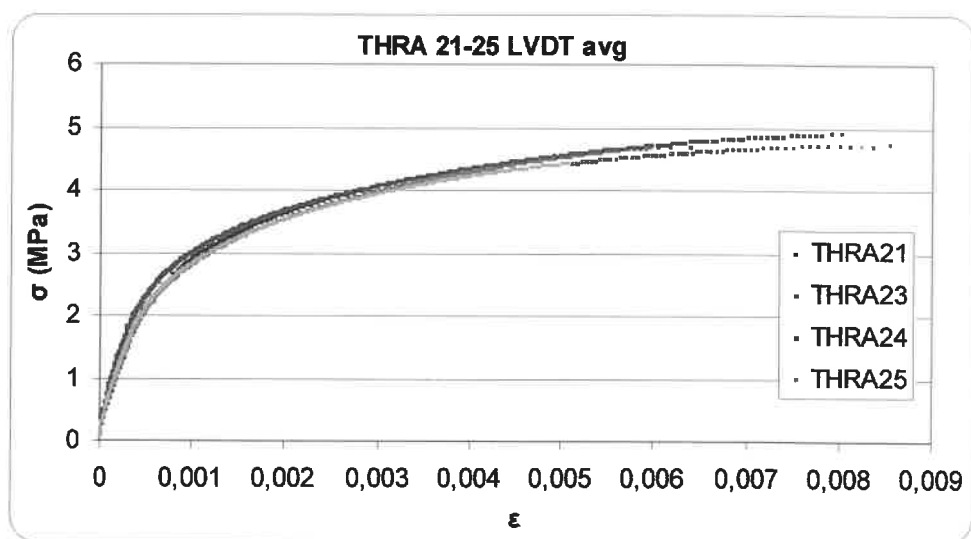
Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 6-10, μίγματος 75 / 25 στους 23 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 11-15, μίγματος 50 / 50 στους 23 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 16-20, μίγματος 25 / 75 στους 23 °C



Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμίων 21-25, μίγματος 0 / 100 στους 23 °C