



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΪΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΣΗΣ – ΥΠΟΒΑΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΜΟΛΟΓΙΑΝΝΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΠΛΑΤΗ, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την επίβλεψη, την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ταυτόχρονα οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Bradley Watson Cliatt, Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του και για την επίλυση αποριών σχετικά με την πειραματική διαδικασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου. Την αδερφή μου Βασιλική που είναι δίπλα μου σε κάθε προσπάθεια μου και με στηρίζει. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την μητέρα μου Μαρία για τη διαρκή υποστήριξη και την υπομονή της. Κυρίως όμως, έχω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον αείμνηστο πατέρα μου Ιωάννη Μολογιάννη, που συνεχίζει να καθοδηγεί τα βήματα μου και στον οποίο οφείλω ότι έχω πετύχει.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ως ασύνδετο υλικό βάσης-υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Πέραν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η διερεύνηση βασίζεται στη διεξαγωγή μίας πειραματικής διαδικασίας, η οποία περιλαμβάνει διάφορες δοκιμές σε μίγματα παρθένου υλικού αδρανούς (3A) με RAP. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται κοκκομετρικές αναλύσεις για τη διερεύνηση της συμπακνωσιμότητας των υλικών και κατά συνέπεια της φέρουσας ικανότητας του. Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας πραγματοποιείται δοκιμή συμπίκνωσης (Proctor). Εν συνεχεία πραγματοποιούνται δοκιμές καλιφορνιακού δείκτη φέρουσας ικανότητας (California Bearing Ratio: CBR), για την έκφραση της φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον πραγματοποιούνται δοκιμές τριαξονικής φόρτισης των υλικών προκειμένου να προσδιοριστεί το μέτρο επανάκτησης και οι παραμένουσες παραμορφώσεις. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προκύπτει ότι το υλικό RAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό προϋποθέσεις, σε περιεκτικότητα έως 40%, καθώς εμφανίζει ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα και αντοχή, καθώς και μικρή συνολική παραμένουσα παραμόρφωση.

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the investigation of the behavior of Reclaimed Asphalt Pavement material (RAP) to be used as a granular material for the construction of pavement base-subbase. Apart from the literature review, the investigation is based on the prosecution of an experimental procedure, which includes a range of laboratory testing of mixtures containing different proportions of virgin aggregates and RAP material. In particular, sieve analysis is carried out to assess the materials compaction and consequently, their bearing capacity. To determine the optimum moisture, the Proctor test is performed. California Bearing Ratio (CBR) tests are then carried out to assess the materials bearing capacity. In addition, triaxial loading tests are performed on the mixtures under investigation to determine the resilient modulus and the permanent deformation. The results of the experimental procedure show that RAP material can be used conditionally, up to 40%, as it exhibits good bearing capacity and durability, as well as overall small residual deformation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Αντικείμενο	1
1.2	Στόχος-Μεθοδολογία	1
1.3	Δομή εργασίας.....	2
2	ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΒΑΣΕΩΝ-ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	3
2.1	Ιδιότητες ασύνδετων υλικών	3
2.2	Μέτρο επανάκτησης.....	5
2.3	Σχέσεις προσδιορισμού της πλαστικής παραμόρφωσης	6
2.4	Παράγοντες επιρροής του μέτρου επανάκτησης και του λόγου Poisson.....	8
3	ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ.....	16
3.1	Ορισμός.....	16
3.2	Αξιολόγηση ανακτώμενου ασφαλτικού οδοστρώματος	17
3.3	Φρεζάρισμα	18
3.4	Χρήση σε ασφαλτικές στρώσεις	19
4	ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΕΩΝ-ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ.....	22
4.1	Γενικά.....	22
4.2	Ιδιότητες και συμπεριφορά του ανακτώμενου υλικού.....	23
4.2.1	Διαβάθμιση και επιρροή συνδετικού ιστού	23
4.2.2	Αντοχή και δυσκαμψία	23
4.2.3	Επίδραση της συμπύκνωσης.....	26
4.2.4	Απορροή και μεταβολή του όγκου	26
5	ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (CBR).....	28
5.1	Ορισμός.....	28
5.2	Προετοιμασία πρωτογενούς υλικού	28

5.3 Προετοιμασία δειγμάτων	29
5.4 Ωρίμανση.....	31
5.4.1 Προετοιμασία υλικών	31
5.4.2 Χωρίς εξάτμιση.....	32
5.4.3 Πλήρους εμβάπτισης.....	32
5.4.4 Αποφυγή εξάτμισης μέσω εμβάπτισης	33
5.5 Συσκευή CBR.....	33
5.6 Δοκιμή CBR.....	34
5.7 Υπολογισμός και έκφραση αποτελεσμάτων	34
5.8 Σχέσεις προσδιορισμού μέτρου επανάκτησης	36
6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	38
6.1 Περιγραφή υλικών.....	38
6.2 Κοκκομετρική ανάλυση.	39
6.2.1 Προδιαγραφές	39
6.2.2 Κοκκομετρία υλικών.....	42
6.2.3 Υπολογισμός κοκκομετρικών καμπύλων	45
6.3 Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας	50
6.3.1 Περιγραφή δοκιμής.....	50
6.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	52
6.4 Δοκιμή καλιφορνιακού δείκτη CBR	54
6.5 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης.....	55
6.5.1 Προετοιμασία δοκιμών	55
6.5.2 Ανάλυση και αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής	58
7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	60
7.1 Αναλύσεις μετρήσεων CBR.....	60
7.1.2 Σχέση CBR και Ξηρής Πυκνότητας	78
7.1.3 Συγκριτική αξιολόγηση.....	80

7.2 Αναλύσεις μετρήσεων τριαξονικής δοκιμής.....	81
7.2.1 Καμπύλες Mr-Αξονικής Τάσης	81
7.2.2 Προσδιορισμός μόνιμων παραμορφώσεων	84
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	89
9 Βιβλιογραφία	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	104

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο

Υπό το πρίσμα των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών για την εξοικονόμηση φυσικών πόρων, η κατασκευαστική βιομηχανία οδοστρωμάτων έχει στραφεί προς την ανάκτηση-ανακύκλωση ασφαλικών στρώσεων. Η στροφή αυτή, αφενός εντάσσεται στις διαδικασίες της βιώσιμης ανάπτυξης και αφετέρου, στοχεύει στη μείωση του κόστους των έργων οδικής υποδομής.

Το ασφαλικό ανακτώμενο υλικό (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή νέων ασφαλικών στρώσεων. Ωστόσο, έχει εγείρει το ενδιαφέρον για χρήση ως ασύνδετο υλικό για την κατασκευή των στρώσεων βάσης και υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αρκετοί βέβαιοι είναι οι προβληματισμοί, οι οποίοι δημιουργούνται ως προς την καταλληλότητα του υπόψη υλικού. Για το λόγο αυτό, πριν τη χρήση του απαιτείται προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του και κατ' επέκταση, της φέρουσας ικανότητας και ελαστικής-πλαστικής συμπεριφοράς του.

Γενικά, κύρια παράμετρος της έκφρασης της φέρουσας ικανότητας ενός ασύνδετου αδρανούς υλικού αποτελεί ο καλιφορνιακός δείκτης φέρουσας ικανότητας (California Bearing Ratio: CBR) (Yoder & Witczak, 1975), ο προσδιορισμός του οποίου επιτυγχάνεται μέσω της δοκιμής CBR. Επίσης, η ελαστική συμπεριφορά ενός αδρανούς υλικού περιγράφεται από το μέτρο επανάκτησης (M_r) (Seed et al., 1963), η διερεύνηση του οποίου πραγματοποιείται μέσω εργαστηριακών τριαξονικών δοκιμών. Μέσω των τριαξονικών δοκιμών εξάγονται και στοιχεία για τις πλαστικές-παραμένουσες παραμορφώσεις των υλικών, οι οποίες περιγράφουν την πλαστική απόκριση του υλικού. Τα στοιχεία τα οποία εμφανίζονται μέσα από τη διεθνή βιβλιογραφία όσον αφορά σε τιμές CBR και M_r του υλικού RAP είναι περιορισμένα.

1.2 Στόχος-Μεθοδολογία

Δεδομένων των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του ανακτώμενου ασφαλικού υλικού, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως ασύνδετο υλικό για την κατασκευή στρώσεων βάσης-υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Για τη διερεύνηση αρχικά προβλέπεται ο προσδιορισμός του δείκτη CBR. Ο προσδιορισμός του, πρόκειται να πραγματοποιηθεί

μέσω δοκιμών CBR σε δείγματα μιγμάτων διαφορετικών αναλογιών RAP-παρθένου αδρανούς υλικού. Επόμενο βήμα αποτελεί η ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Για μία πιο ολιστική προσέγγιση, σχετικά με τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού RAP, θα προσδιοριστούν επίσης το μέτρο επανάκτησης και οι παραμένουσες παραμορφώσεις των θεωρούμενων δειγμάτων, μέσω της τριαξονικής δοκιμής φόρτισης. Η αξιολόγηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων θα γίνει συγκριτικά στοχεύοντας στη διακριτοποίηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη λήψη αποφάσεων όσον αφορά στη χρήση RAP για την κατασκευή ή και ανακατασκευή των οδοστρωμάτων.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Συγκεκριμένα:

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύονται οι βασικές αρχές που διέπουν τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την φέρουσα ικανότητα των υλικών.

Στο **κεφάλαιο 3** αναφέρονται γενικά στοιχεία για το RAP. Περιγράφονται οι μέθοδοι αξιολόγησης και τεχνικές ανάκτησης RAP, κυρίως για χρήση του σε ασφαλτικές στρώσεις.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται μία ιστορική αναδρομή, όσον αφορά στο RAP και σχολιάζονται οι ιδιότητες του.

Στο **κεφάλαιο 5** ορίζεται ο δείκτης CBR και περιγράφεται λεπτομερώς η σχετική δοκιμή CBR (προετοιμασία δειγμάτων, χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός και διαδικασία).

Στο **κεφάλαιο 6** περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας σε μίγματα RAP-παρθένου αδρανούς.

Στο **κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται επεξεργασία-ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Στο **κεφάλαιο 8** αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 9** περιέχονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές, οι οποίες αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΒΑΣΕΩΝ-ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Ιδιότητες ασύνδετων υλικών

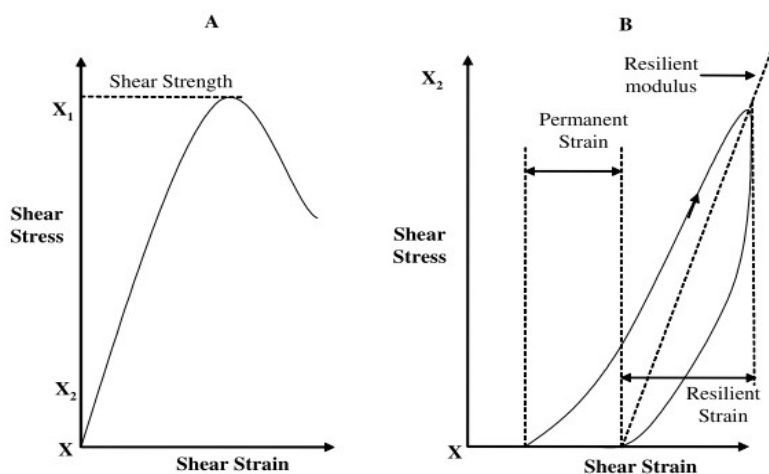
Για τον σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι σημαντική η κατανόηση των ιδιοτήτων των ασύνδετων υλικών των στρώσεων βάσης και υπόβασης. Μέσω αυτών των στρώσεων πραγματοποιείται η κατανομή του φορτίου στις κατώτερες στρώσεις και τελικά στο υπέδαφος. Η φέρουσα ικανότητα των υλικών αυτών οφείλεται στην ανάπτυξη διατμητικών δυνάμεων μέσω της εμπλοκής των σωματιδίων του αδρανούς. Έτσι, είναι προφανές πως οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για καλύτερη συμπεριφορά του οδοστρώματος απαιτούν γνώση των ιδιοτήτων των ασύνδετων υλικών. Η χρήση και η κατανόηση της απόκρισης των ασύνδετων υλικών προϋποθέτει γνώση των ιδιοτήτων τους, οι οποίες προσδιορίζονται είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων, είτε μέσω πρότυπων εργαστηριακών διατάξεων (Thom et al., 2005).

Ο σχεδιασμός του πάχους ενός οδοστρώματος, πριν από τις οδηγίες σχεδιασμού του American Association of State Highway and Transportation-AASHTO (AASHTO Design Guide, 1986) βασιζόταν στην εμπειρία που υπήρχε για την στατική απόκριση του υποστρώματος υπό την επιβολή κατακόρυφων φορτίων. Για το λόγο αυτό, και ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένες οι δοκιμές Marshall και CBR για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων ασύνδετου υλικού. Η πιθανότητα ρωγμών κόπωσης του οδοστρώματος και η συσσώρευση μόνιμων παραμορφώσεων στα ασύνδετα υλικά όμως δεν εξεταζόταν, γεγονός που οδήγησε από πολύ νωρίς αρκετούς να εκφράσουν την ανησυχία τους γι' αυτή την προσέγγιση, συμπεριλαμβανομένου και του Καθηγητή Arthur Casagrande (Burmeister, 1943). Ο τελευταίος εξέφρασε την απορία, για το κατά πόσο οι δοκιμές στατικού φορτίου είναι κατάλληλες για την προσομοίωση χιλιάδων δυναμικών επαναλήψεων στις οποίες υπόκειται το οδόστρωμα κατά την διάρκεια της ζωής του. Η πρόταση του τεκμηριωνόταν από παρατηρήσεις επί των υφιστάμενων οδοστρωμάτων, τα οποία είχαν σχεδιαστεί με στατικές προσεγγίσεις και δεν είχαν την αναμενόμενη απόκριση.

Από το 1950 και μετά, άρχισε να χρησιμοποιείται η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των στρώσεων υπό συνθήκες που προσομοιώνουν καλύτερα τις φορτίσεις κυκλοφορίας στο πεδίο. Σημαντικές

συνεισφορές στον τομέα έγιναν από τους Seed et al. (1955), Seed & McNeill (1956), και τους Seed et al. (1963) στο έργο τους σχετικά με τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης και του προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ του αρχικού μέτρου ελαστικότητας και του μέτρου που προέκυψε από τις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις ήταν σημαντικές. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται από τα δεδομένα πεδίου που ελήφθησαν από το California Department of Highways, τα οποία παρουσιάζουν την έντονη διαφορά μεταξύ δυναμικού και στατικού φορτίου, ενώ τα σχετικά αποτελέσματα υιοθετήθηκαν από το AASHTO του 1986 για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

Στην Εικόνα 2.1 απεικονίζεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης κατά την επιβολή μονοαξονικού φορτίου σε τριαξονική δοκιμή. Το πρώτο τμήμα της μονοαξονικής καμπύλης οφείλεται στο ότι η τάση αυξάνεται συνεχώς μέχρι να λάβει τη μέγιστη τιμή της, μετά την οποία οι παραμορφώσεις συνεχίζονται με ανάπτυξη μικρότερων τιμών τάσεων (Α). Στην περίπτωση που εκτελούνται επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης, αρκετά μακριά από την τιμή της μέγιστης τάσης, τα υλικά υφίστανται ελαστικές και μόνιμες παραμορφώσεις. Στην Εικόνα 2.1B φαίνονται οι μόνιμες και οι ελαστικές παραμορφώσεις για έναν κύκλο φόρτισης αποφόρτισης. Η μόνιμη παραμόρφωση δηλώνει την ευαισθησία του υλικού στις παραμορφώσεις (Brown, 1996).



Εικόνα 2.1 (Α) Μονοαξονική φόρτιση μέχρι την αστοχία (Β) Παραμορφώσεις ασύνδετου υλικού κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης.

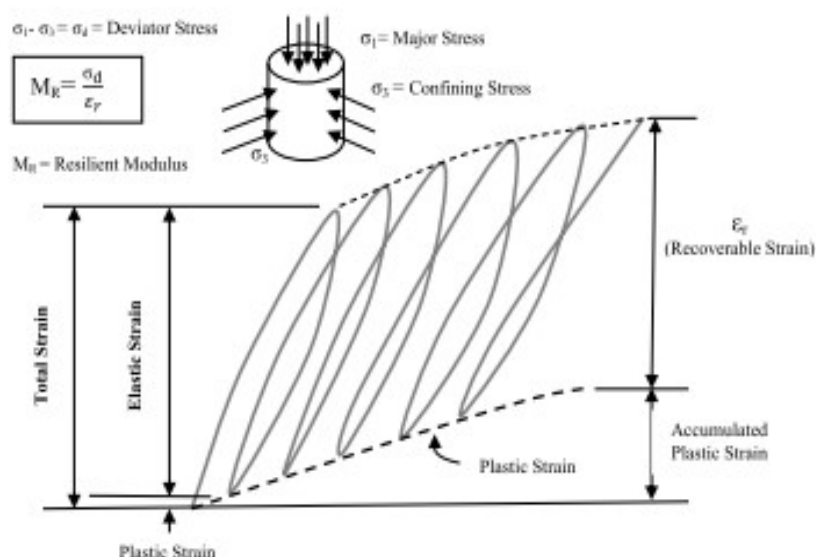
Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, η συμπεριφορά των στρώσεων από ασύνδετα υλικά, υπό τα φορτία κυκλοφορίας, μπορεί συμβατικά να οριστεί ως συνδυασμός μιας ελαστικής και μιας πλαστικής συνιστώσας.

2.2 Μέτρο επανάκτησης

Η ελαστική συμπεριφορά των στρώσεων των ασύνδετων υλικών εκφραζόταν από το μέτρο ελαστικότητας E , και τον λόγο Poisson. Το μέτρο ελαστικότητας E ωστόσο αντικαταστάθηκε από το μέτρο επανάκτησης ή παραμόρφωσης M_r .

Το υλικό βάσης-υπόβασης, όπως αναφέρθηκε από τον Brown (1996) δεν εμφανίζει καθαρά ελαστική συμπεριφορά. Εξάλλου, η σχέση της ελαστικής συμπεριφοράς και των ρωγμών, που προκαλούνται από την κόπωση στις υπερκείμενες ασφαλικές στρώσεις, περιγράφηκε ήδη από τον Hveem κατά την δεκαετία του 1950 (Brown, 1996). Επίσης, η ακριβής έννοια του συντελεστή επανάκτησης ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης τάσης προς την αντίστοιχη παραμόρφωση κάτω από έναν δυναμικό παλμό φορτίου, εισήχθη για τα εδάφη από τον Seed et al (1962).

Ουσιαστικά, σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα η τάση που προκαλείται από το κινούμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερη από την τιμή της αντοχής του οδοστρώματος. Όμως το φορτίο εφαρμόζεται αρκετές φορές. Στο αρχικό στάδιο της εφαρμογής του φορτίου η πλαστική-παραμένουσα παραμόρφωση είναι αξιοσημείωτη, αλλά όσο ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων αυξάνεται, η τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης μειώνεται (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Προσδιορισμός M_r και ελαστικής τάσης

Μετά από επαρκή αριθμό επαναλαμβανόμενων φορτίων υπό σταθερές συνθήκες περιεκτικότητας σε υγρασία, η παραμόρφωση σχεδόν πλήρως ανακάμπτει και η πλαστική

παραμόρφωση δεν αυξάνεται ιδιαίτερα. Έτσι η συμπεριφορά των υλικών μπορεί να θεωρηθεί ελαστική από αυτό το σημείο και έπειτα.

Ως μέτρο επανάκτησης ή παραμόρφωσης ορίζεται ο λόγος επιβαλλόμενης τάσεως προς την αναιρέσιμη παραμόρφωση.

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_a} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_a} \quad (2.1)$$

Όπου M_r το μέτρο επανάκτησης, σ_1 η κύρια αξονική τάση, σ_3 η κύρια πλευρική τάση, σ_d η πρόσθετη αξονική παραμόρφωση και ε_a η ελαστική παραμόρφωση.

2.3 Σχέσεις προσδιορισμού της πλαστικής παραμόρφωσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η επαναλαμβανόμενη φόρτιση του οδοστρώματος αποτελεί συνδυασμό ελαστικής και πλαστικής (παραμένουσας) απόκρισης. Η πρόβλεψη της παραμένουσας παραμόρφωσης αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού, γι' αυτό η δημιουργία μίας καταστατικής σχέσης η οποία θα την υπολογίζει ήταν επιτακτική. Αρκετοί ήταν οι ερευνητές που προσπάθησαν να προβλέψουν την παραμένουσα καταπόνηση σε ασύνδετα υλικά.

Ο Barksdale (1972) πραγματοποίησε μία διεξοδική μελέτη της συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση σε τριαξονική δοκιμή εφαρμόζοντας 105 κύκλους. Απεδείχθη πως για μία δεδομένη φόρτιση η μόνιμη καταπόνηση είναι ανάλογη με τον λογάριθμο του αριθμού των κύκλων φορτίσεων και η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση (log-normal) είναι:

$$\varepsilon_{1,p} = a + b \cdot \log(N) \quad (2.2)$$

Όπου $\varepsilon_{1,p}$ = συνολική παραμένουσα παραμόρφωση, N ο αριθμός των φορτίσεων και a, b σταθερές.

Η μακροχρόνια συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών διερευνήθηκε επίσης από τον Sweere (1990). Εφαρμόζοντας 106 κύκλους επαναλαμβανόμενης φόρτισης ο Sweere παρατήρησε πως τα αποτελέσματα δεν ταυτίζονταν με την log-normal προσέγγιση της σχέσης 2.2. Έτσι πρότεινε για μεγάλο αριθμό φορτίσεων μία log-log προσέγγιση :

$$\varepsilon_{1,p} = a \cdot N^b \quad (2.3)$$

όπου το a και b παράμετροι παλινδρόμησης.

Το μοντέλο log-log εξετάστηκε αργότερα από τους Wolff & Visser (1994), οι οποίοι διεξήγαγαν σε πλήρη κλίμακα τη δοκιμή Heavy Vehicle Simulator (HVS) με πολλές διαφορετικές εφαρμογές φορτίου. Τελικά πρότειναν ένα διαφορετικό μοντέλο:

$$\varepsilon_{1,p} = (c * N + a) * (1 - e^{-bN}) \quad (2.4)$$

όπου a, b και c παράμετροι παλινδρόμησης.

Τα προηγούμενα μοντέλα εξάγουν δεδομένα βάσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Αρκετές ωστόσο είναι και οι έρευνες που έχουν δείξει πως η τιμή της τάσης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η μόνιμη παραμόρφωση του ασύνδετου υλικού.

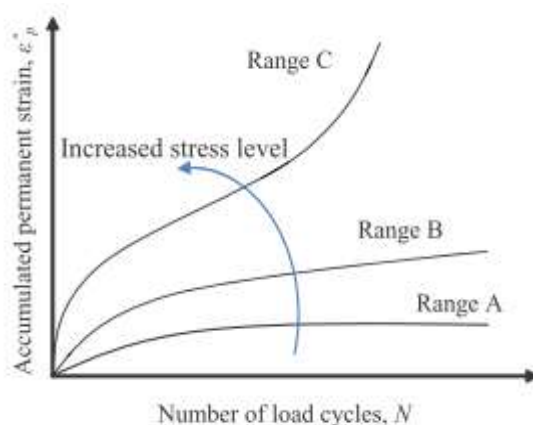
Οι Lashine et al. (1971) διεξήγαγαν δοκιμές επαναλαμβανόμενου τριαξονικού φορτίου σε υλικό από θρυμματισμένη πέτρα και παρατήρησαν πως η μόνιμη σχετική παραμόρφωση σχετίζεται με την σχέση του q-σ₃, όπου q η κατακόρυφη (επιπλέον δύναμη) και σ₃ η πλευρική πίεση. Ο Pappin (1979) περιέγραψε την μόνιμη παραμόρφωση ως μία συνάρτηση της διαδρομής των τάσεων σε ένα διάγραμμα q-p, όπου p η μέση τάση. Άλλοι ερευνητές ανέφεραν πως η σχετική μόνιμη παραμόρφωση σχετίζεται με το πόσο πλησιάζουν οι εφαρμόσιμες τάσεις την τάση αστοχίας. Οι Barret & Smith (1976) πρότειναν να χρησιμοποιηθεί η σχέση q_{max} - q_{failure} για την εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης, όπου (να οριστούν τα q_{max}-q_{failure}). Ο Thom (1988) εξέφρασε τη θέση του υπολογισμού της παραμένουσας παραμόρφωσης με τη σχέση (q_{failure}-q_{max})/q_{max}.

Οι Paute et al. (1993) χρησιμοποίησαν μία νέα προσέγγιση για την επιρροή των κύκλων φόρτισης και του επιπέδου φόρτισης στη σχετική παραμόρφωση. Η προσέγγιση τους βασίζεται στο ότι η μόνιμη καταπόνηση αυξάνεται ασυμπτωτικά προς μία οριακή τιμή η οποία είναι συνάρτηση των τάσεων κατά την αστοχία του υλικού. Έτσι, η παραμόρφωση εκφράζεται ως:

$$\varepsilon_{1,p} = A * (1 - (\frac{N}{100})^{-B}) \quad (2.5)$$

Όπου $\varepsilon_{1,p}$ είναι η συνολική μόνιμη παραμόρφωση μετά τους πρώτους 100 κύκλους φόρτισης και όπου A και B παράμετροι παλινδρόμησης. Βάσει του τύπου, καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται προς το άπειρο η παραμόρφωση προσεγγίζει την τιμή του A. Η παράμετρος, όπως προκύπτει, θεωρείται ως η οριακή τιμή της αξονικής παραμόρφωσης.

Επιπλέον παρατηρήθηκε πως η πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται από τα επίπεδα φόρτισης, το ιστορικό της φόρτισης, τον αριθμό των κυκλικών φορτίσεων, τον βαθμό συμπίκνωσης, την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, την υγρασία και το είδος του αδρανούς (Lekarp, 1999), για τα οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω. Με βάση τη θεωρία shakedown, οι Dawson & Wellner (1999) και οι Werkmeister et al. (2001) εντόπισαν, πως η μόνιμη παραμόρφωση σε ασύνδετα υλικά ανάλογα με τα επίπεδα της φόρτισης εμπίπτει σε τρεις κλίμακες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3 Μόνιμη παραμόρφωση συναρτήσει κύκλων φόρτισης

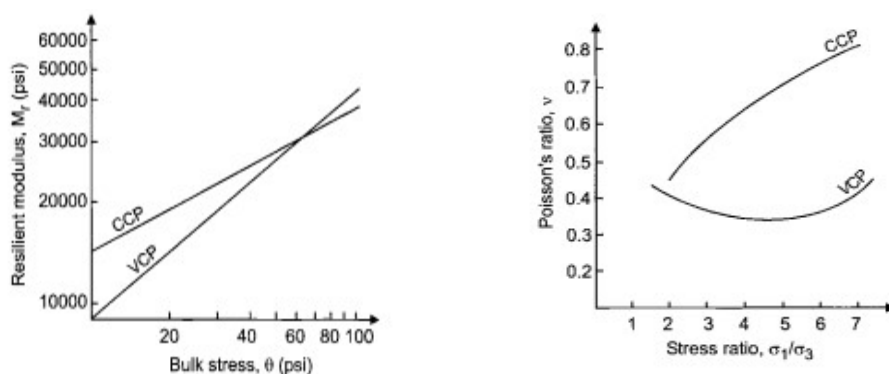
Η μορφή A αντικατοπτρίζει τα χαμηλά επίπεδα τάσης όταν η μόνιμη καταπόνηση αυξάνεται για ένα πεπερασμένο αριθμό φορτίων μετά την εφαρμογή των οποίων η απόκριση γίνεται καθαρά ελαστική χωρίς περαιτέρω πλαστική καταπόνηση. Για υψηλότερα επίπεδα φόρτισης η πλαστική παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνεται με σταθερό ρυθμό ανά κύκλο φόρτισης και παίρνει την μορφή B. Τέλος, όταν τα επίπεδα φόρτισης είναι ακόμα υψηλότερα, η μόνιμη παραμόρφωση αυξάνεται με αυξανόμενο ρυθμό, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία.

2.4 Παράγοντες επιρροής του μέτρου επανάκτησης και του λόγου Poisson

Ένας σημαντικός παράγοντας επιρροής είναι ο ρυθμός επιβολής του φορτίου. Αρκετές είναι οι μελέτες που δείχνουν πως με την αύξηση του ρυθμού της επιβολής του φορτίου επηρεάζεται το μέτρο επανάκτησης. Ο Hicks (1970) υποστήριξε ότι το μέτρο επανάκτησης πρακτικά δεν επηρεάζεται από το ρυθμό επιβολής του φορτίου υπό την προϋπόθεση πως δεν υπάρχει υπερβολική πλαστική παραμόρφωση. Οι Hicks και Monismith (1971)

επισημαναν μία μικρότερη τιμή σε χαμηλή επιβαλλόμενη τάση και μία ελαφριά αύξηση της δυσκαμψίας σε υψηλότερα επίπεδα τάσης.

Ο λόγος Poisson επηρεάζεται επίσης από το επιβαλλόμενο φορτίο. Οι Hicks (1970), Brown και Hyde (1975) και Kolisoja (1997) ανέφεραν ότι ο λόγος Poisson αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαφορά των επιβαλλόμενων τάσεων και μειώνεται σε προστερεοποιημένα υλικά. Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές με σταθερή (Constant Confining Pressure: CCP) και μεταβλητή (Variable Confining Pressure: VPC) διαφορά πίεσης. Οι Allen και Thomson (1974) αξιολόγησαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρατήρησαν πως υπό σταθερή διαφορά πίεσης, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας ήταν υψηλότερες. Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε επίσης πως κατά την διαφορική πίεση παρουσιάζονται μεγαλύτερες πλευρικές παραμορφώσεις και υψηλότερες τιμές του δείκτη Poisson (Εικόνα 2.4). Αργότερα, ο Brown και Hyde (1975) υποστήριξαν ότι οι δοκιμές διαφορικής και σταθερής πίεσης αποφέρουν τις ίδιες τιμές μέτρων ελαστικότητας, υπό την προϋπόθεση ότι η πίεση προφόρτισης στη δοκιμή με τη σταθερή πίεση θα είναι ίση με τη μέση τιμή της πίεσης κατά τη δοκιμή της μεταβλητής διαφοράς πίεσης.



Εικόνα 2.4 Παράδειγμα τριαξονικής δοκιμής υπό μεταβλητή (VCP) και σταθερή (CCP) διαφορά πίεση

Σημαντική είναι και η επιρροή της πυκνότητας. Είναι γνωστό πως όσο αυξάνεται η πυκνότητα ενός ασύνδετου κοκκώδους υλικού μεταβάλλεται σημαντικά και η απόκρισή του στα στατικά φορτία κάνοντάς το πιο δύσκαμπτο. Για την επιρροή της ελαστικής παραμόρφωσης δεν υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία, ωστόσο, αρκετές μελέτες καταλήγουν στο ότι το μέτρο επανάκτησης γενικά αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας. Οι Trollope et al. (1962) εφάρμοσαν μικρότερης συχνότητας επαναλαμβανόμενο φορτίο σε ομοιόμορφη άμμο και παρατήρησαν αύξηση του μέτρου επανάκτησης κατά 50% στα πυκνότερα έναντι των χαλαρότερων δειγμάτων. Παρόμοιες παρατηρήσεις έκανε και ο Robinson (1974), ο οποίος μελέτησε την ομοιόμορφη άμμο. Σύμφωνα με τον Kolisoja

(1997), χάρη στη συμπύκνωση του υλικού τα σωματίδια έρχονται πιο κοντά με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας επαφής μεταξύ τους. Αυτή η αύξηση για δεδομένο εξωτερικό φορτίο μειώνει την τάση στα σωματίδια, έτσι οι παραμορφώσεις μειώνονται και το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται.

Οι Thom και Brown (1988) και οι Brown και Selig (1991) υποστήριξαν πως η επιρροή της πυκνότητας ή η κατάσταση συμπύκνωσης είναι σχετικά ασήμαντη. Οι Hicks και Monismith (1971) παρατήρησαν πως η επιρροή της πυκνότητας ήταν μεγαλύτερη για τα μερικώς θρυμματισμένα από ότι για τα πλήρως θρυμματισμένα αδρανή, καθώς επίσης πως η επιρροή της πυκνότητας μειώθηκε σε αδρανή στα οποία η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αυξήθηκε. Σύμφωνα με τη μελέτη των Barksdale και Itani (1989), το μέτρο επανάκτησης αυξήθηκε με αύξηση της πυκνότητας μόνο για χαμηλές τιμές των τάσεων, ενώ σε υψηλά επίπεδα τάσης η επίδραση της πυκνότητας διαπιστώθηκε πως ήταν λιγότερο έντονη.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, η περιεκτικότητα σε παιπάλη και η μέγιστη διάσταση των κόκκων αποτελούν επίσης βαθμό επιρροής του μέτρου επανάκτησης. Τα αδρανή υλικά αποτελούνται από κόκκους διάφορων μεγεθών, γεγονός που όπως αναφέρεται σε παλαιότερες μελέτες αποτελεί βαθμό επιρροής της δυσκαμψίας του υλικού. Αν και δεν είναι απόλυτα επιβεβαιωμένη η επιρροή της περιεκτικότητας σε παιπάλη, μερικοί ερευνητές (Thom and Brown, 1987, Kamal et al., 1993) ανέφεραν ότι το μέτρο επανάκτησης μειώνεται όταν η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα αυξάνεται. Σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε μία δραματική πτώση κατά 60% (Barksdale και Itani, 1989), όταν το ποσοστό της περιεκτικότητας σε παιπάλη αυξήθηκε από 0% σε 10%. Από εργασία των Jorenby και Hicks (1986) προέκυψε αρχικά μία αύξηση της δυσκαμψίας και στη συνέχεια μία μείωση της κατά την πρόσθεση της παιπάλης. Αυτό οφείλεται στο ότι η αρχική δυσκαμψία αυξάνεται καθώς με την πλήρωση των κενών αυξάνονται οι επαφές μεταξύ των κόκκων, όταν όμως η παιπάλη έχει φτάσει σε σημείο να μετατοπίζει τους κόκκους του υλικού και να αναλαμβάνει τα φορτία η δυσκαμψία αρχίζει να μειώνεται.

Για αδρανή υλικά το οποία παρουσιάζουν ίδια περιεκτικότητα σε παιπάλη και παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση, έχει παρατηρηθεί πως το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγιστο μέγεθος σωματιδίων (Gray, 1962, Thom, 1998, Kolisoja, 1997). Σύμφωνα με τον Kolisoja (1997), αυτό οφείλεται στο ότι το μεγαλύτερο μέρος ενός επιβαλλόμενου φορτίου σε ένα αδρανές συσσωμάτωμα μεταδίδεται από τις διεπιφάνειες των σωματιδίων. Έτσι όταν η μετάδοση του φορτίου γίνεται μέσω χονδρόκοκκων σωματιδίων, μικρότερος αριθμός σωματιδίων χρειάζεται για να μεταφερθεί το φορτίο και

αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη παραμένουσα παραμόρφωση και υψηλότερη δυσκαμψία.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση παρατηρήθηκε πως έχει επίδραση στο μέτρο επανάκτησης του υλικού αλλά είναι μικρής σημασίας. Οι Thom και Brown (1998) μελέτησαν την συμπεριφορά του θρυμματισμένου ασβεστόλιθου σε διαφορετικές διαβαθμίσεις και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα ομοιόμορφα διαβαθμισμένα υλικά ήταν ελάχιστα πιο δύσκαμπτα από τα καλώς διαβαθμισμένα υλικά. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Brown και Selig (1991) και Raad et al. (1992). Ο Plaistow (1994) ισχυρίστηκε ότι όταν αυξάνεται η υγρασία σε καλώς διαβαθμισμένα υλικά, η επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι σημαντική λόγω της συγκράτησης νερού στους πόρους. Επίσης με την αύξηση της υγρασίας σε καλώς διαβαθμισμένα υλικά παρατηρήθηκε καλύτερη αλληλοεμπλοκή των κόκκων (καθώς ακολουθεί πλήρωση των κενών του σκελετού). Οι Heydinger et al. (1996) συνέκριναν την επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης με το μέτρο ελαστικότητας ασβεστόλιθου, χαλικιών και σκωρίας. Σε ασβεστολιθικά υλικά παρατηρήθηκε υψηλότερη τιμή μέτρου επανάκτησης όταν ήταν διαπερατά, ενώ καμία διαφοροποίηση δεν παρατηρήθηκε στα χαλίκια. Στη σκωρία για πυκνότερη διαβάθμιση το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται. Σε μία μεταγενέστερη έρευνα, οι Van Niekerk et al. (1998), μελέτησαν την συμπεριφορά ενός περιορισμένου αριθμού δειγμάτων μίγματος άμμου, θρυμματισμένης τοιχοποιίας και κατεστραμμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλότερη ακαμψία για τα καλώς διαβαθμισμένα μίγματα από ότι για τα ομοιόμορφα. Αυτή η συμπεριφορά έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα των προηγούμενων μελετητών που αναφέρθηκαν και ίσως να μην είχαν αντιδράσεις εάν δεν υπήρχαν τα αυξημένα ποσοστά σε παιπάλη τα οποία θεωρούνται από κάποιους πως κυριάρχησαν. Τέλος οι Niekerk et al. (1998) υποστήριξαν ότι ένας μεγαλύτερος αριθμός διεπιφανειών σε ένα καλώς διαβαθμισμένο υλικό μπορεί να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο για ίση παραμόρφωση σε αντίθεση με ένα ομοιογενές, χαρακτηρίζοντάς το έτσι ως πιο δύσκαμπτο.

Η επιρροή της περιεκτικότητας σε παιπάλη στο λόγο του Poisson διερευνήθηκε από τον Hicks (1970), ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα πως η αύξηση της περιεκτικότητάς της οδηγεί σε μείωση του λόγου Poisson.

Η επίδραση του είδους του υλικού και του σχήματος των σωματιδίων επηρεάζει και αυτή την μηχανική απόκριση του υλικού. Σε μελέτη των Heydinger et al. (1996), το χαλίκι απεδείχθη πως έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τον θρυμματισμένο ασβεστόλιθο.

Ωστόσο αρκετοί ήταν εκείνοι που ανέφεραν ότι το θρυμματισμένο συσσωμάτωμα, το οποίο αποτελείται από κόκκους που φέρουν αιχμές, αναπτύσσει υψηλότερες τιμές μέτρου επανάκτησης από τα μη θρυμματισμένα αδρανή που περιέχουν στρογγυλευμένα σωματίδια (Hicks 1970, Hicks και Monismith, 1971, Allen, 1973, Allen και Thompson, 1974, Thom, 1988, Barksdale και Itani, 1989, Thom και Brown, 1989). Οι Barksdale και Itani (1989) διερεύνησαν διάφορους τύπους αδρανών υλικών και παρατήρησαν πως το μέτρο επανάκτησης ενός ακατέργαστου, γωνιακά θρυμματισμένου υλικού ήταν υψηλότερο από αυτό των στρογγυλευμένων χαλικιών με διαφορά 50% σε χαμηλή, μέση και κανονική καταπόνηση και περίπου 25% σε υψηλή και μέση καταπόνηση. Παρόλο που μπορεί να προκύψει αύξηση του μέτρου επανάκτησης με αύξηση των αιχμών των σωματιδίων και της τραχύτητας των επιφανειών τους, μελέτες δείχνουν πως ο λόγος Poisson μειώνεται για τις ίδιες συνθήκες (Hicks, 1970, Hicks και Monismith, 1971, Allen, 1973). Αυτή η εξήγηση τείνει να ενισχύσει την αμφισβήτηση για την σχέση μεταξύ του λόγου Poisson και της 'λιπαντικής' ικανότητας του νερού, όπως αναφέρεται παρακάτω, καθώς οι πλευρικές κινήσεις αναφέρονται σε αυτή την περίπτωση ως ελεγχόμενες από την κατάσταση των διασωματιδιακών επαφών.

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας που έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι ο βαθμός κορεσμού ή η περιεκτικότητα της υγρασίας τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε επί τόπου δοκιμές. Γενικά είναι αποδεκτή η άποψη πως η ελαστική απόκριση των ξηρών και εν μέρει κορεσμένων κοκκωδών υλικών είναι παρόμοια αλλά καθώς πλησιάζει ο πλήρης κορεσμός η συμπεριφορά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά (Smith και Nair, 1973, Vuong, 1992). Ερευνητές όπως οι Haynes και Yoder (1963), Hicks και Monismith (1971), Barksdale και Itani (1989), Dawson et al. (1996) και Heydinger et al. (1996) οι οποίοι μελέτησαν την συμπεριφορά κοκκωδών υλικών σε υψηλούς βαθμούς κορεσμού, ανέφεραν μία αξιοσημείωτη εξάρτηση του μέτρου επανάκτησης από την περιεκτικότητα σε υγρασία, με το μέτρο επανάκτησης να μειώνεται καθώς ο βαθμός κορεσμού αυξάνεται. Οι Haynes και Yoder (1963) παρατήρησαν μείωση του μέτρου επανάκτησης κατά 50% στο χαλίκι καθώς ο βαθμός κορεσμού αυξήθηκε από 70% σε 97%. Οι Hicks και Monismith (1971) έδειξαν ότι το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης μειώνεται σταθερά καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται προς την βέλτιστη τιμή.

Στα κοκκώδη υλικά υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση αναπτύσσονται υπερπίεσεις πόρων. Καθώς αναπτύσσεται η υπερπίεση πόρων, η ενεργός τάση στο υλικό μειώνεται, οδηγώντας

σε μείωση, τόσο της αντοχής, όσο και της δυσκαμψίας του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υποστηριχτεί πως ο βαθμός κορεσμού δεν είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά των υλικών αλλά η παραμόρφωση ελέγχεται από την πίεση των πόρων. Ο Mirty (1964), οι Seed et al. (1967), και ο Hicks (1970) διατύπωσαν την άποψη πως η μείωση στο μέτρο επανάκτησης επιτυγχάνεται μόνο εάν η ανάλυση βασίζεται σε ολικές τάσεις. Ομοίως, ο Pappin (1979) παρατήρησε πως το ελαστικό μέτρο παραμένει περίπου αμετάβλητο εάν η ανάλυση πραγματοποιηθεί αξιολογώντας τις ενεργές τάσεις.

Οι Thom και Brown (1987), ωστόσο, υποστήριξαν πως η παρουσία νερού σε ένα συσσωμάτωμα αδρανών έχει μία 'λιπαντική' επίδραση στα σωματίδια. Έτσι η παραμόρφωση θα αυξηθεί συνολικά, με επακόλουθη μείωση του μέτρου επανάκτησης ακόμα και χωρίς τη δημιουργία υπερπίεσης πόρων. Η πρότασή τους επιβεβαιώθηκε από μία σειρά επαναλαμβανόμενων τριαξονικών δοκιμών σε θρυμματισμένο βράχο, υπό διαφορετικές τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία. Σε δοκιμές υπό στραγγιζόμενες συνθήκες και σε συχνότητες φόρτισης 0,1-3 Hz δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη ανάπτυξη υπερπίεσεων για βαθμό κορεσμού έως και 85%. Παρά την έλλειψη ανάπτυξης υπερπίεσεων στους πόρους, τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν μία μείωση στο μέτρο επανάκτησης με την αύξηση της περιεκτικότητας της υγρασίας. Για το λόγο αυτό, ως παράγοντας επιρροής θεωρείται η 'λιπαντική' ικανότητα του νερού. Μία ακόμα ερμηνεία αυτών των παρατηρήσεων είναι πως η απορρόφηση των πόρων μειώνεται σε υψηλότερες περιεκτικότητες υγρασίας, οδηγώντας σε χαμηλότερες δυνάμεις επαφής μεταξύ των σωματιδίων.

Οι Raad et al. (1992) σε μελέτη τους έδειξαν πως η επίδραση της υγρασίας στο μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων αδρανών υλικών έχει μεγαλύτερη επίδραση σε καλώς διαβαθμισμένα υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε παιπάλη. Αυτό οφείλεται στο ότι το νερό συγκρατείται ευκολότερα στους πόρους τέτοιων υλικών, σε αντίθεση με τα ομοιογενή διαβαθμισμένα υλικά τα οποία επιτρέπουν ελεύθερη στράγγιση. Οι Dawson et al. (1996) μελέτησαν μια σειρά από καλώς διαβαθμισμένα ασύνδετα υλικά και διαπίστωσαν πως καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται, αυξάνεται και το μέτρο επανάκτησης, μέχρι η τιμή της να φτάσει την μέγιστη. Από εκεί και έπειτα παρατηρείται μείωση του μέτρου επανάκτησης.

Ο κορεσμός των μη συνδεδεμένων κοκκωδών υλικών επηρεάζει επίσης το μέτρο Poisson. Σύμφωνα με τον Hicks (1970) και τους Hicks και Monismith (1971), ο λόγος Poisson μειώνεται ανεξάρτητα με το αν η ανάλυση προκύπτει από ολικές ή ενεργές τάσεις. Αυτό

υποδηλώνει πως η αλλαγή των υπερπιέσεων των πόρων είναι ανεπαρκής. Επίσης η εξήγηση που αφορά την ‘λιπαντική’ επίδραση του νερού πρέπει να εξεταστεί καθώς αναμένεται υψηλότερος λόγος Poisson με την επίδραση της.

Ένας επιπλέον παράγοντας που έχει αποδειχθεί από μελέτες πως επιδρά στο μέτρο επανάκτησης των κοκκωδών υλικών είναι η χρονοϊστορία των φορτίσεων. Σύμφωνα με τον Dehlen (1969), τα αποτελέσματα της προφόρτισης εμφανίζονται ως συνέπεια της προοδευτικής συμπύκνωσης και της αναδιάταξης των σωματιδίων υπό επανειλημμένες εφαρμογές φορτίου. Οι Boyce et al. (1976) διεξήγαγαν δοκιμές επαναλαμβανόμενου φορτίου σε δείγματα καλώς διαβαθμισμένου θρυμματισμένου ασβεστόλιθου, τα οποία είχαν ίδια ξηρή πυκνότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το υλικό που υποβλήθηκε στις ανακυκλικές φορτίσεις επηρεάζεται από αυτές, όμως εάν το υλικό προφορτιστεί αρχικά με κάποιους κύκλους φορτίσεων, τότε αποφεύγονται οι υψηλοί λόγοι απόκρισης. Από την άλλη πλευρά ο Hicks (1970), ανέφερε πως η επίδραση των προηγούμενων κύκλων φόρτισης σχεδόν εξαλείφεται και επιτυγχάνεται μία σταθερή ελαστική απόκριση μετά την εφαρμογή περίπου 100 κύκλων του ίδιου εύρους καταπόνησης. Σε παρόμοιες παρατηρήσεις κατέληξε και ο Allen (1973), ο οποίος πρότεινε πως ένα δείγμα πρέπει να ρυθμιστεί για περίπου 1000 κύκλους φόρτισης πριν την τριαξονική δοκιμή. Οι Brown και Hyde (1975) και ο Mayhew (1983) ανέφεραν πως τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασύνδετων υλικών δεν είναι τόσο ευαίσθητα στην εφαρμογή των κύκλων φόρτισης, με την προϋπόθεση οι εφαρμοζόμενες τάσεις να διατηρούνται αρκετά χαμηλές ώστε να αποφεύγεται η μόνιμη παραμόρφωση στο υλικό. Για το λόγο αυτό ένας μεγάλος αριθμός τριαξονικών δοκιμών πρέπει να διεξαχθεί διαδοχικά στο ίδιο δοκίμιο για τον προσδιορισμό των ελαστικών παραμέτρων του υλικού.

Οι Moore et al. (1970) διερεύνησαν την επίδραση του αριθμού των φορτίσεων στην ελαστική απόκριση των κοκκωδών υλικών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται καθώς ο αριθμός των κύκλων φόρτισης αυξάνεται, λόγω της μείωσης της περιεκτικότητας σε υγρασία από το δείγμα κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ο Hicks (1970) ανέφερε πως οι μηχανικές ιδιότητες ήταν οι ίδιες μετά από 50-100 κύκλους όπως και μετά από 25000.

Σε ότι αφορά στην επίδραση της διάρκειας της φόρτισης, της συχνότητας και της ακολουθίας φόρτισης, γενικά επικρατεί η άποψη πως είναι μικρής σημασίας. Οι Seed et al. (1965) πραγματοποίησαν μελέτη στην οποία το ελαστικό μέτρο της άμμου αυξήθηκε ελαφρά από 160 σε 190 MPa, καθώς η διάρκεια του φορτίου μειώθηκε από 20 λεπτά σε

0,3 δευτερόλεπτα. Ο Hicks (1970) διεξήγαγε δοκιμές σε διάρκεια εφαρμογής της τάσης 0,1, 0,15 και 0,25 δευτερολέπτων και δεν παρατήρησε καμία αλλαγή στο μέτρο επανάκτησης ή τον λόγο Poisson. Είναι πολύ πιθανό το μέτρο επανάκτησης να παρουσιάσει μείωση με την αυξανόμενη συχνότητα φόρτισης, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία προσεγγίζει τον κορεσμό καθώς υπερπιέσεις των πόρων μπορούν να αναπτυχθούν, προκαλώντας μείωση της ενεργής τάσης. Το φαινόμενο αυτό θα είναι ακόμα εντονότερο εάν υπάρχει δυνατότητα αποστράγγισης. Οι Hicks (1970) και Allen (1973) μελέτησαν την αλληλουχία των δοκιμών ή τη σειρά με την οποία εφαρμόστηκαν οι τάσεις σε ένα δείγμα και έδειξαν πως δεν υπάρχει καμία επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των κοκκωδών υλικών.

3 ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ

3.1 Ορισμός

Το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό (Reclaimed Asphalt Pavement, σε συντομία RAP) είναι το υλικό το οποίο έχει αφαιρεθεί από το οδόστρωμα και αποτελείται από αδρανή και άσφαλτο. Παράγεται κατά την πλήρη ανακατασκευή, την αναδιαμόρφωση της επιφάνειας των ασφαλτικών στρώσεων ή σε περιπτώσεις που απαιτείται πρόσβαση σε βαθύτερες στρώσεις. Το υλικό είναι έτοιμο για χρήση, αφού πρώτα επεξεργαστεί κατάλληλα (ενδεδειγμένη σύνθλιψη, κοσκίνισμα).

Οι ασφαλτικές στρώσεις κατασκευάζονται κατά κανόνα με τη χρήση φυσικών πόρων, αδρανών και συνδετικών υλικών. Τα παραπάνω υλικά είναι περιορισμένα, για το λόγο αυτό η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών από παλαιά οδοστρώματα είναι αναγκαία για την βιώσιμη ανάπτυξη. Το RAP χρησιμοποιείται κυρίως ως υλικό για ασφαλτικές στρώσεις, όμως η περίσσεια του δημιουργεί το ενδιαφέρον για χρήση του, σε συνδυασμό με παρθένα αδρανή, σε στρώσεις βάσεις-υπόβασης.

Η χρήση του RAP ως υλικό για την κατασκευή νέων ασφαλτικών στρώσεων υπερισχύει έναντι άλλων ανακυκλώσιμων υλικών, όπως η σκυρία, το γυαλί, ίνες από ανακυκλωμένο χαρτί και πολυμερή, που έχουν μελετηθεί για αντίστοιχη χρήση. Η ανακύκλωση των οδοστρωμάτων χρονολογείται από το 1915 (Kandal & Mallick, 1997), αλλά η χρήση της τεχνικής αυτής δεν ήταν τόσο διαδεδομένη. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, εξαιτίας του εμπάργκο του αραβικού πετρελαίου το 1973, η ασφαλτική βιομηχανία ανέπτυξε τεχνολογίες που συνέβαλαν στη μείωση της ζήτησης της ασφάλτου. Πολλές από τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν εκείνη την περίοδο για την ανακύκλωση του οδοστρώματος, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.

Γενικά επικρατούν δύο βασικές προϋποθέσεις για την χρήση των ανακυκλωμένων ασφαλτικών υλικών. Η πρώτη είναι ότι πρέπει να πληρούν τις ίδιες απαιτήσεις με τα φυσικά επεξεργασμένα υλικά, και η δεύτερη πως τα ασφαλτικά μίγματα που περιέχουν ανακυκλωμένα ασφαλτικά υλικά θα πρέπει να έχουν ίση ή καλύτερη συμπεριφορά από μίγματα με παρθένα υλικά.

Στην Ευρώπη η χρήση του ανακτώμενου οδοστρώματος είναι διαδεδομένη 30 και πλέον χρόνια. Σύμφωνα με τα στοιχεία, περίπου 50 εκατομμύρια τόνοι ασφαλτικού υλικού ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται ετησίως, ενώ έχει τεθεί στόχος του

ευρωπαϊκού οργανισμού ασφαλικών οδοστρωμάτων (European Asphalt Pavement Association, EAPA) να γίνεται ανακύκλωση του 100% των ασφαλικών στρώσεων (European Asphalt Pavement Association, 2008).

3.2 Αξιολόγηση ανακτώμενου ασφαλικού οδοστρώματος

Η γνώση της σύνθεσης ενός υπάρχοντος ασφαλικού υλικού είναι απαραίτητη για την μετέπειτα επαναχρησιμοποίηση του υλικού. Ωστόσο, οδοστρώματα τα οποία χρησιμοποιούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα σπάνια έχουν ομοιόμορφη σύσταση. Σε αυτό συντελούν τυχόν συντηρήσεις, αναβαθμίσεις και μέτρα αποκατάστασης, που έχουν ως αποτέλεσμα την ανομοιομορφία της σύστασης του ασφαλικού υλικού.

Προκειμένου να γίνει έλεγχος της ομοιομορφίας του υπάρχοντος οδοστρώματος και της ικανότητας των υλικών να επαναχρησιμοποιηθούν, πραγματοποιούνται πυρηνοληψίες και διερευνητικές τομές (οι οποίες θα πρέπει να καλύπτουν όλο το βάθος του οδοστρώματος το οποίο πρόκειται να φρεζαριστεί), μετρήσεις φυσικοχημικών ιδιοτήτων ανακτώμενων υλικών καθώς και μετρήσεις φέρουσας ικανότητας του υπάρχοντος οδοστρώματος.

Το δείγμα θα πρέπει ληφθεί υπό συνθήκες παρόμοιες με αυτές της ανάκτησης. Θα πρέπει δηλαδή να γίνει φρεζάρισμα του υπάρχοντος οδοστρώματος, στο πάχος που έχει προσδιοριστεί από την μελέτη, με εξοπλισμό και τρόπο παρόμοιο με αυτόν που θα χρησιμοποιηθεί κατά την ανάκτηση. Επομένως κατά την δειγματοληψία προτείνεται η χρήση μικρής φρέζας, η οποία θα λειτουργήσει με τρόπο και σε βάθος ανάλογο του μηχανολογικού εξοπλισμού, που θα χρησιμοποιηθεί κατά την ανάκτηση. Το δείγμα θα ληφθεί από το φρεζαρισμένο υλικό που προέκυψε.

Σε περίπτωση που η δειγματοληψία με μικρή φρέζα δεν είναι δυνατή, θα πρέπει να ληφθεί δείγμα από κάθε στρώμα ξεχωριστά του παλιού οδοστρώματος, στο πάχος που έχει επιλεγεί για επαναχρησιμοποίηση. Κατόπιν, θα πρέπει κάθε υλικό να θραυστεί με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που θα επικρατεί κατά την κατασκευή, στην συνέχεια να αναμιχθεί με αναλογία αδρανών, η οποία θα καθορίζεται από το πάχος και τη φαινόμενη πυκνότητα κάθε στρώσης.

Στο παρελθόν λαμβάνονταν πυρήνες πριν από την άλεση του οδοστρώματος, τα προς αφαίρεση στρώματα διαχωρίζονταν και δέχονταν περαιτέρω δοκιμές έκχυσης. Η κοκκομετρική διαβάθμιση μετά την άλεση, προσδιοριζόταν με τη χρήση συντελεστών.

Ωστόσο, αυτή η τεχνική δεν ήταν αξιόπιστη δεδομένου ότι δεν λάμβανε υπόψη την συνολική υποβάθμιση της σκληρότητας και της ευθραυστότητας των αδρανών υλικών (αντοχή σε κρούση), της αντοχή της ασφάλτου (η οποία επηρεάζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την άλεση), την ταχύτητα της μηχανής φρεζαρίσματος και το βάθος φρεζαρίσματος.

3.3 Φρεζάρισμα

Το φρεζάρισμα αποτελεί την κύρια τεχνική αφαίρεσης, πλεονεκτώντας έναντι των υπόλοιπων μεθόδων αφαίρεσης, καθώς έχει την δυνατότητα να καθορίσει το βάθος επέμβασης. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία σύντομη παρεμπόδιση της κυκλοφορίας.

Η μηχανή φρεζαρίσματος (Εικόνα 3.1) καταναλώνει αρκετή ενέργεια προκειμένου να αφαιρέσει τις επιφανειακές στρώσεις του οδοστρώματος.



Εικόνα 3.1 Μηχανή φρεζαρίσματος

Η μηχανή αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο τύμπανο με δόντια, το οποίο φέρει 200 στροφές το λεπτό και προσκρούει στο οδόστρωμα. Σε κάθε κρούση καταστρέφεται το οδόστρωμα, επιφέροντας διάσπαση τόσο της σύνθεσης όσο και των αδρανών. Λόγω της σύνθλιψης των συσσωματωμένων σωματιδίων, όπως τονίστηκε και παραπάνω, η κοκκομετρική διαβάθμιση η οποία προκύπτει μετά το φρεζάρισμα, είναι πολύ λεπτότερη από την διαβάθμιση των στρώσεων στις αντίστοιχες θέσεις.

3.4 Χρήση σε ασφαλικές στρώσεις

Διάφορες είναι τεχνικές χρήσης του ανακτώμενου υλικού σε ασφαλικές στρώσεις, οι οποίες επιλέγονται βάσει της κατάστασης του οδοστρώματος, αλλά και των διαρθρωτικών αναγκών του. Οι βασικές τεχνικές είναι η εν θερμώ ανακύκλωση, η επιτόπου εν θερμώ ανακύκλωση, η εν ψυχρώ ανακύκλωση, τόσο η επιτόπου όσο και εν ψυχρώ σε βιομηχανία καθώς και η εις βάθος ανακύκλωση.

Εν θερμώ ανακύκλωση (Hot Mix Asphalt: HMA ή Warm Mix Asphalt: WMA) ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ανακτώμενο οδόστρωμα αναμειγνύεται με νέα υλικά προκειμένου να παραχθούν νέα ασφαλικά μίγματα. Το υλικό παράγεται σε βιομηχανία ασφάλτου. Οι διαδικασίες τοποθέτησης και συμπύκνωσης είναι οι ίδιες όπως και στην περίπτωση κανονικών ασφαλικών στρώσεων από παρθένα υλικά. Τα ποσοστά σε RAP του ασφαλικού μίγματος κυμαίνονται από 10 έως 50 %. Τα πλεονεκτήματα του ασφαλικού μίγματος με RAP έναντι του μίγματος της συμβατικής ασφάλτου είναι οι ίσες ή καλύτερες επιδόσεις σε αντοχή, καθώς και η καλύτερη αντίσταση έναντι παραμορφώσεων και ρωγμών (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

Η εν θερμώ επιτόπια ανακύκλωση (Hot in-place recycling: HIR) είναι η διαδικασία κατά την οποία το υπάρχον οδόστρωμα θερμαίνεται και μαλακώνει προκειμένου να αφαιρεθεί με φρεζάρισμα ή ‘χαράζοντάς’ το μηχανικά (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνικές για την μέθοδο της εν θερμώ επιτόπιας ανακύκλωσης. Κατά την πρώτη το υλικό που προκύπτει μετά το φρεζάρισμα συνδυάζεται με άλλα υλικά και επανασυμπικνώνεται. Η νέα επικάλυψη του ασφαλικού μίγματος εφαρμόζεται, με την ταυτόχρονη τοποθέτηση και συμπύκνωση. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα ανασχηματισμού, καθώς συνδυάζεται το ανακτώμενο υλικό με το υπάρχον ασφαλικό υλικό, ενώ ακολουθεί ταυτόχρονη τοποθέτηση και συμπύκνωση. Η τεχνική εφαρμόζεται σε βάθος 20 έως 50 mm. Τέλος, αναφέρεται η τεχνική της ανάμειξης, κατά την οποία το ανακτώμενο υλικό αναμειγνύεται με ασφαλικό μίγμα από παρθένα αδρανή και η εφαρμογή του γίνεται με τον παραδοσιακό τρόπο οδοστρωσίας (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

Η εν ψυχρώ επί τόπου ανακύκλωση (Cold In-place Recycling: CIR) είναι η διαδικασία κατά την οποία, γίνεται επεξεργασία του υφιστάμενου οδοστρώματος επιτόπου και σχηματίζεται μία νέα στρώση οδοστρώματος. Δεν απαιτείται συνήθως καμία μεταφορά του

ανακτώμενου υλικού. Συνήθως χρησιμοποιούνται κάποια συνδετικά υλικά, όπως η αφρώδης ασφάλτος, τα γαλακτώματα ασφάλτου ή κάποιο συνδετικό υλικό σε αναλογία που εξαρτάται από το βάρος του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

Στην εν ψυχρώ ανακύκλωση σε βιομηχανία (Cold Central Plant Recycling: CCPR) το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό μεταφέρεται σε βιομηχανία ασφάλτου, όπου και επεξεργάζεται με την παραδοσιακή μέθοδο ψυχρής ασφάλτου. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται είτε γαλάκτωμα ασφάλτου, είτε αφρώδης ασφάλτος. Αφού γίνει η ανάμειξη, το υλικό μεταφέρεται και συμπακνώνεται κατάλληλα. Ένα πλεονέκτημα της επεξεργασίας σε βιομηχανία είναι πως οι πλεονάζουσες ποσότητες ανακτώμενου υλικού μπορούν να αποθηκευτούν για χρήση σε άλλες κατασκευές (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

Η ανάκτηση πλήρους βάθους (Full Depth Reclamation: FDR) είναι μέθοδος ανακύκλωσης κατά την οποία όλο το τμήμα της ασφαλτικής στρώσης και μία προκαθορισμένη ποσότητα από τα υλικά της βάσης αναμειγνύονται και υφίσταται μία επεξεργασία προκειμένου τα υλικά έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία να αποτελέσουν μία νέα σταθεροποιημένη βάση (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 Ανάκτηση πλήρους βάθους

Ως προς την επεξεργασία, διάφοροι τύποι πρόσθετων χρησιμοποιούνται, όπως είναι η αφρώδης ασφάλτος, το γαλάκτωμα ασφάλτου και χημικοί παράγοντες όπως το χλωριούχο ασβέστιο, το τσιμέντο Portland, η ιπτάμενη τέφρα και ο ασβέστης, για να παραχθεί μία βελτιωμένη βάση. Η διαδικασία αυτή ξεκινά με την κονιοποίηση, εισάγονται τα πρόσθετα, διαμορφώνεται το μίγμα και ολοκληρώνεται με τη συμπακνωση και την μορφοποίηση της επιφάνειας. Η μορφοποίηση της επιφάνειας εξαρτάται από τη στρώση που καλύπτει τη

βάση ή την χρήση του οδοστρώματος, σε περίπτωση που θα αποτελεί την τελική στρώση. Εάν το ανακτώμενο υλικό δεν επαρκεί για το επιθυμητό πάχος της βάσης, παρθένα αδρανή υλικά μπορούν να προστεθούν. Αυτή η μέθοδος ανακύκλωσης εκτελείται σε βάθος 10 έως 30 εκατοστών (VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION, n.d.).

4 ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΕΩΝ-ΥΠΟΒΑΣΕΩΝ

4.1 Γενικά

Το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό (RAP) χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή νέων ασφαλτικών μιγμάτων. Όμως η αφθονία σε υλικό RAP οδήγησε σε σκέψεις για τη χρήση του ως αδρανές υλικό και σε άλλες στρώσεις του οδοστρώματος. Οι Collins και Ciesielski (1994), έχουν αναφέρει ότι διάφοροι φορείς διαχείρισης αυτοκινητοδρόμων έχουν στραφεί στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών, με το RAP να χρησιμοποιείται πλέον πιο συχνά, ενώ υποστήριξαν ότι ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί και ως υλικό βάσης ή υπόβασης. Σύμφωνα με τους Collins και Ciesielski (1994) η απόδοση των ασύνδετων βάσεων που περιέχουν RAP έχει χαρακτηριστεί ικανοποιητική. Σε μία πιο πρόσφατη μελέτη, ο Saeed (2007) αναφέρει ότι 16 κράτη επέτρεψαν τη χρήση 100% RAP ως αδρανές για στρώσεις από ασύνδετα υλικά, ενώ 5 κράτη περιόρισαν τη χρήση του RAP σε 50% ή μικρότερου ποσοστού κατά βάρος.

Στην Ευρώπη, το ποσοστό του RAP που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με παρθένα υλικά για κατασκευή βάσεων-υποβάσεων διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα: με 10-20% σε Γερμανία, Αυστρία και Ελβετία, 40-60% σε Δανία, Νορβηγία, Ιρλανδία και Σλοβενία (EAPA, 2010). Γενικά επικρατεί η άποψη πως το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό δεν οδηγεί σε περιβαλλοντικά προβλήματα όταν χρησιμοποιείται σε ασύνδετες βάσεις. Μια ειδική περίπτωση, στην οποία χρειάζεται ειδικός χειρισμός είναι αυτή στην οποία περιέχεται πίσσα στο RAP (Finn Thogersen et al., 2012).

Έπειτα από παρατηρήσεις επισημαίνεται πως η φέρουσα ικανότητα του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού σε στρώσεις βάσης-υπόβασης είναι σχεδόν η ίδια, ή μερικές φορές καλύτερη, από αυτή των παρθένων αδρανών υλικών. Ένα παράδειγμα αποτελεί έρευνα στην Ολλανδία, στην οποία το μέτρο επανάκτησης της βάσης είχε τιμή 300 MPa σχεδόν ίση με εκείνη των παρθένων αδρανών (Pihl et al., 2004)

Σχετικά με την σταθερότητα βάσεων-υποβάσεων, ελλείψεις παρατηρούνται όταν η περιεκτικότητα της ασφάλτου είναι υψηλή ή όταν δεν έχει πραγματοποιηθεί σωστή συμπίκνωση. Δεν προτείνεται η χρήση RAP σε περιπτώσεις όπου αναμένεται υψηλό επιβαλλόμενο φορτίο καθώς αυξάνονται αρκετά οι παραμένουσες παραμορφώσεις (Jacobsson, 2002).

Ιδιαίτερα κρίσιμη κρίνεται η συμπύκνωση του RAP, με τα καλύτερα αποτελέσματα να σημειώνονται για συμπύκνωση σε στρώσεις πάχους 8 - 15 cm, στις οποίες η διαβροχή πραγματοποιείται σε ήπιες καιρικές συνθήκες. Η χαμηλή συχνότητα και το μεγάλο πλάτος εφαρμογής είναι σημαντικοί παράγοντες για την καλή συμπύκνωση. Η διέλευση πριν την εφαρμογή ασφαλτικής στρώσης, στα πάχη που προαναφέρθηκαν, προκαλεί περαιτέρω συμπύκνωση, με αποτέλεσμα την δημιουργία μίας συμπαγούς ‘ψευδό ασφαλτόστρωσης’. Αυτό οδηγεί στην μείωση της μελλοντικής τροχαυλάκωσης (Aurstad & Uthus, 2000).

4.2 Ιδιότητες και συμπεριφορά του ανακτώμενου υλικού

4.2.1 Διαβάθμιση και επιρροή συνδετικού ιστού

Το RAP είναι ένα θρυμματισμένο υλικό το οποίο προήλθε από αφαίρεση ασφαλτικής στρώσης, ως εκ τούτου η κοκκομετρική του διαβάθμιση είναι ανάλογη με εκείνη του υλικού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την σύνθεση της ασφαλτικής στρώσης. Όμως, το υλικό για την δημιουργία της ασφαλτικής στρώσης αναμειγνύεται με συνδετικά υλικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσκόλληση συνδετικού υλικού και άλλων λεπτόκοκκων υλικών πάνω στους κόκκους. Οι ιδιότητες του συνδετικού υλικού καθορίζουν το είδος των υλικών τα οποία θα προσκολληθούν πάνω στο σωματίδιο.

Ένας επιπλέον παράγοντας ο οποίος έχει σημασία για την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, είναι οι εργασίες φρεζαρίσματος και αποθήκευσης του, οι οποίες επηρεάζουν την περιεκτικότητα σε παιπάλη (Chesner et al., 2008).

Σε γενικές γραμμές υποστηρίζεται ότι οι φυσικές ιδιότητες του RAP είναι παρόμοιες με εκείνες των θραυστών ασβεστολίθων (Ontario Hot Mix Producers Association, 2010). Όμως σύμφωνα με τους Roberts et al. (1996), με την πάροδο του χρόνου, τα συνδετικά υλικά ενός υλικού RAP υποβάλλονται σε οξείδωση. Αυτή η χημική διεργασία έχει επιρροή στη δυσκαμψία, στην αντοχή σε διάτμηση και ενδεχομένως στην αντοχή σε κόπωση των ασύνδετων υλικών.

4.2.2 Αντοχή και δυσκαμψία

Οι στρώσεις κατασκευασμένες από παρθένα αδρανή υλικά υπερισχύουν σε αντοχή και είναι ανθεκτικότερες σε παραμορφώσεις έναντι των στρώσεων που αποτελούνται από μίγμα παρθένων αδρανών-RAP. Αυτό αποδίδεται στο ότι το υλικό RAP αποτελείται από

αδρανή τα οποία έχουν υποστεί καιρικές μεταβολές, όντας πιο εύθραυστα, καθώς και στην ολκιμότητα της ασφάλτου.

Συγκεκριμένα οι Bennert et al. (2000) ανέφεραν ότι το υλικό RAP εμφανίζει υψηλότερη δυσκαμψία και μέτρο επανάκτησης, αλλά μικρότερη αντοχή σε διάτμηση, σε σύγκριση με παραδοσιακά δείγματα από παρθένα υλικά. Αρκετές είναι οι έρευνες στις οποίες υψηλές τιμές μέτρου επανάκτησης συνδέονται με μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις. Σύμφωνα με τους Bennert et al. (2000) αυτή η απόκριση οφείλεται στην προοδευτική απώλεια της ικανότητας της ασφάλτου στην ανάληψη του φορτίου. Τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης σε RAP έδειξαν πως επικρατούν ιξώδεις ιδιότητες και είναι σημαντική η εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Ο Locander (2009) υποστήριξε πως η δύναμη διάτμησης μειώνεται όσο αυξάνεται η ποσότητα RAP. Οι Taha et al. (1999) υποστήριξαν πως όσο αυξάνεται η ποσότητα του RAP μειώνεται η φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με αυτή των παρθένων υλικών.

Σε έρευνα για την χρήση RAP ως ασύνδετο υλικό σε υπόβαση, ο Ayan (2011) παρατήρησε μείωση των τιμών του δείκτη CBR με αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP. Αυτό το αποτέλεσμα αποδόθηκε στην ολίσθηση μεταξύ των επικαλυμμένων με άσφαλτο σωματιδίων κατά την επιβολή του φορτίου. Η απόκριση ήταν ικανοποιητική για μίγμα 50/50 RAP και ανακυκλωμένου σκυροδέματος (Recycled Concrete Aggregate: RCA).

Μία αξιολόγηση που βασιζόταν σε εργαστηριακές δοκιμές αλλά και δοκιμές πεδίου για μίγματα αδρανών σε υποβάσεις, συμπεριλαμβανομένου του RCA, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μίγμα RAP-RCA με περιεκτικότητα 15% σε RAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπόβαση οδοστρωμάτων (Agulrajah et al., 2014). Τα καλύτερα αποτελέσματα σημειώθηκαν για περιεκτικότητα σε υγρασία 59% έως 78 % της βέλτιστης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του καλιφορνιακού δείκτη για το μίγμα αυτό, ήταν οριακά χαμηλότερα από την απαιτούμενη τιμή σχεδιασμού του.

Έρευνα των Agulrajah et al. (2013) έδειξε πως το καθαρό RAP δεν πληροί τις προδιαγραφές, βάσει αποτελεσμάτων των δοκιμών CBR και της τριαξονικής δοκιμής, για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ως ασύνδετο υλικό υπόβασης. Από τις δοκιμές προκύπτουν τιμές του μέτρου επανάκτησης και της μόνιμης παραμόρφωσης που περιγράφουν την απόκριση του υλικού κατά την κυκλοφοριακή φόρτιση, οι οποίες, χρησιμοποιούνταν ως παράμετροι για τον σχεδιασμό και την ανάλυση των στρώσεων των οδοστρωμάτων (AustRoads, 2004). Προτάθηκε η ανάμιξη RAP μαζί με υψηλής ποιότητας αδρανή για την

επίτευξη των απαιτήσεων σε αντοχή και παραμόρφωση. Ο Mahew (2005) επιβεβαίωσε τη γενική τάση μεγαλύτερων μόνιμων παραμορφώσεων και χαμηλότερων τιμών CBR με την αύξηση της περιεκτικότητας RAP στο μίγμα και σύστησε μέγιστη περιεκτικότητα 50% σε RAP.

Οι Cosentino et al. (2012) ανέφεραν ότι όλα τα κοκκώδη μίγματα τα οποία περιέχουν RAP παρουσιάζουν φαινόμενα ερπυσμού, έτσι πρότειναν το υλικό RAP να αναμιγνύεται με τουλάχιστον 75% ενός εγκεκριμένου αδρανούς, για χρήση σε βάσεις οδοστρωμάτων. Εναλλακτικά τα μίγματα πρέπει να βρίσκονται σε αναλογία, τέτοια ώστε η περιεκτικότητα σε άσφαλτο να μην υπερβαίνει το 1,5% κατά το συνολικό βάρος. Οι Bleakley και Cosentino (2013) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα μίγματα RAP-ασβεστολιθικών αδρανών είναι εφικτό να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις αντοχής και ερπυσμού βάσεων και υποβάσεων, εάν το μίγμα περιέχει το πολύ 25% RAP και 75% ασβεστολιθικό αδρανές. Προτείνεται μέγιστη περιεκτικότητα 50% RAP σε συνδυασμό με χημικό σταθεροποιητικό παράγοντα, όπως το τσιμέντο. Το είδος και η ποσότητα του σταθεροποιητικού παράγοντα προσδιορίζονται με σκοπό να πληρούνται οι εκάστοτε σχεδιαστικές απαιτήσεις.

Ο McGarrah (2007) εξέτασε δημοσιευμένες έρευνες σχετικά με τις ιδιότητες μιγμάτων RAP τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως ασύνδετα υλικά βάσεων και υποβάσεων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το 100% RAP παράγει ένα προϊόν το οποίο είναι μη επαρκούς ποιότητας και το οποίο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP η δύναμη διάτμησης του μίγματος μειώθηκε κάτω από το απαιτούμενο επίπεδο. Ο McGarrah πρότεινε την ανάμειξη παρθένου υλικού-RAP σε μονάδα ανάμειξης, καθώς η επιτόπου ανάμειξη αποδείχθηκε μη ικανοποιητική, και την χρήση το πολύ 25% σε RAP. Οι Dong και Huang (2014) πρότειναν να μην δημιουργείται καμία βάση από 100% RAP κάτω από ασφαλική στρώση. Οι Schaefer et al. (2008) κατέληξαν στη χρήση 20% με 50% RAP σε τυπικές κατασκευές.

Ο Ooi (2010) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο περιορισμός του RAP στο 50% μπορεί να είναι συνετός εφόσον το υλικό πληροί όλες τις προδιαγραφές που ισχύουν και για ένα παρθένο αδρανές υλικό. Επιπλέον, συνέστησε ελάχιστες τιμές CBR 80% για μίγματα βάσης και 60% για μίγματα υπόβασης.

Οι Sayed et al. (2011) ανέφεραν πως δοκιμές πεδίου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στη Φλόριντα, σε βάση προσωρινής οδού από 100% RAP, είχαν θετικά αποτελέσματα. Αν και η έρευνα περιορίστηκε χρονικά, διαπιστώθηκε πως η συμπεριφορά του RAP ήταν

ισοδύναμη με εκείνη του παρθένου υλικού. Παρατηρήθηκε επιπλέον πως η απόδοση των πιο χονδρόκοκκων υλικών ήταν υψηλότερη.

4.2.3 Επίδραση της συμπίκνωσης

Κατά την συμπίκνωση της βάσης ή της υπόβασης, η ύπαρξη μεγάλων συσσωματωμάτων σε υλικά RAP πιθανολογείται να οδηγήσει σε δημιουργία έντονων παραμορφώσεων. Οι μέθοδοι κατασκευής είναι γενικά παρόμοιες με αυτές των συμβατικών αδρανών, όμως εξαιτίας των ιόντων υδρογόνου που βρίσκονται σε υλικά RAP χρειάζεται η χρήση κάποιων διορθωτικών συντελεστών ή κάποιων παραπάνω ελέγχων ποιότητας σχετικά με την υγρασία και την βέλτιστη πυκνότητα.

Σύμφωνα με τους Stroup-Gardiner και Wattenberg-Komas (2013), λόγω της επικάλυψης που δημιουργεί η ασφαλτος στα σωματίδια, η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την συμπίκνωση είναι μικρότερη σε σχέση με τα συνήθη αδρανή που χρησιμοποιούνται σε ασύνδετες βάσεις. Ο Locander (2009) παρατήρησε ότι καθώς το ποσοστό RAP αυξάνεται σε μία βάση το ποσοστό της βέλτιστης υγρασίας μειώνεται. Άποψη που επιβεβαίωσαν στη συνέχεια και οι Guthrie et al. (2007), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι αύξηση σε RAP οδηγεί σε μείωση των τιμών της υψηλότερης πυκνότητας και της βέλτιστης υγρασίας.

Παρατηρήσεις από την Minnesota DOT (Mn/DOT) έδειξαν πως η τυπική δοκιμή Proctor δεν παρείχε επαρκή ενέργεια για να επιτευχθεί επαρκής συμπίκνωση μειγμάτων με RAP (J. Siekmeier, 1999.). Οι Kim et al. (2007) ανέφεραν ότι η δοκιμή γυροσκοπικής συμπίκνωσης είναι πιο κοντά με τις δοκιμές πεδίου σε σύγκριση με την δοκιμή Proctor. Σε σύγκριση με τη δοκιμή Proctor, τα αποτελέσματα της γυροσκοπικής δοκιμής έδειξαν μεγάλη διαφορά για τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα και μία μικρή διαφορά για την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Πάντως και στις δύο δοκιμές παρατηρήθηκε πως καθώς η περιεκτικότητα σε RAP αυξήθηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία μειώθηκε και στις δύο μεθόδους.

4.2.4 Απορροή και μεταβολή του όγκου

Το RAP τείνει να συμπεριφέρεται ως έντονα υδροφοβικό υλικό. Σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού, τα μίγματα RAP εμφανίζουν καλύτερη ικανότητα αποστράγγισης σε σύγκριση με άλλα ανακυκλωμένα υλικά (Edil et al., 2012). Επομένως, τα μίγματα RAP αναμένεται να είναι πιο αποτελεσματικά σε αποστράγγιση σε

σύγκριση με άλλα υδρόφιλα υλικά, τα οποία έχουν το ίδιο μέγεθος πόρων. Σε έρευνα για την αξιολόγηση της χρήσης RAP ως πρόσθετη ουσία σε θραυστό αδρανές ή σε επεξεργασμένο έδαφος, οι Mokwa και Peebles (2005), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του RAP σε βάσεις και υποβάσεις είναι βιώσιμη. Αναφέρθηκε επιπλέον πως η διαπερατότητα αυξήθηκε με την αύξηση του ποσοστού σε RAP, επικρατεί θετική επίδραση με βελτιωμένη αποστράγγιση.

Διόγκωση του υλικού RAP παρατηρείται σε περίπτωση που υπάρχουν αδρανή σκωρία. Τα αδρανή σκωρία χρησιμοποιούνται στις ασφαλτικές στρώσεις για την βελτίωση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας (όπως η τριβή). Η αλλαγή όγκου έχει αποδοθεί στην αντίδραση των οξειδίων ασβεστίου και μαγνησίου, τα οποία υπάρχουν στα ανακυκλωμένα υλικά που περιέχουν σκωρία (Collins και Ciesielski, 1994). Η ικανότητα διόγκωσης εξαρτάται από την προέλευση της σκωρίας, την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ηλικία απόθεσης του αποθέματος (Rohde et al., 2003). Τα χαρακτηριστικά διόγκωσης μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση δοκιμών σύμφωνα με το ASTM D4792 (ASTM, 2013) για όλο το μίγμα. Πρόσθετες πετρογραφικές ή χημικές αναλύσεις μπορούν να διεξαχθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του υλικού στο πεδίο (Deniz et al., 2009).

Ανάλογα με την μετέπειτα χρήση του RAP απαιτούνται αντίστοιχες προδιαγραφές και κατ'επέκταση δοκιμές. Ο γενικός κανόνας που υπάρχει στις ΠΕΤΕΠ είναι πως εάν ένα υλικό ικανοποιεί τα Ελληνικά Πρότυπα είναι αποδεκτό. Για τα ανακυκλωμένα ασφαλτικά υλικά τα οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μία σύνθεση, η οποία προϋποθέτει ανάμειξη με τσιμέντο ή κάποιο υλικό, μπορεί να απαιτούνται κάποιες εξειδικευμένες χημικές δοκιμές. Υπάρχει η δυνατότητα εφόσον ένα υλικό δεν πληροί κάποιες από τις απαιτήσεις να γίνει αποδεκτό με την προϋπόθεση πως αναπτύσσει την απαιτούμενη αντοχή.

5 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ (CBR)

5.1 Ορισμός

Η δοκιμή καλιφορνιακού δείκτη φέρουσας ικανότητας (California Bearing Ratio-CBR) είναι μία δοκιμή διείσδυσης κατά την οποία εκφράζεται η φέρουσα ικανότητα εδαφικών και ασύνδετων υλικών όταν συμπυκνωθούν στο εργαστήριο, στη βέλτιστη υγρασία και σε διάφορους βαθμούς πυκνότητας. Ως CBR ορίζεται ο λόγος επί τοις εκατό της δύναμης (ή τάσης), η οποία απαιτείται για να διεισδύσει το έμβολο της συσκευής εντός του υλικού κατά ένα συγκεκριμένο βάθος, προς τη δύναμη (ή τάση) που απαιτείται για την διείσδυση του εμβόλου στο ίδιο βάθος ενός πρότυπου υλικού.

Ο δείκτης CBR υπολογίζεται βάσει της σχέσης 5.1 :

$$CBR = \frac{P}{P_T} \times 100\% \quad (5.1)$$

Όπου P το επιβαλλόμενο φορτίο για να προκληθεί διείσδυση 2,5 mm ή 5,0 mm αντίστοιχα και P_T το επιβαλλόμενο φορτίο που προκαλεί διείσδυση του εμβόλου σε πρότυπο υλικό μεγέθους 2,5 mm ή 5,0 mm.

Η δοκιμή CBR επινοήθηκε από το Τμήμα Οδών της California το 1929 για την αξιολόγηση των υλικών οδοστρωσίας (Yoder et al., 1975).

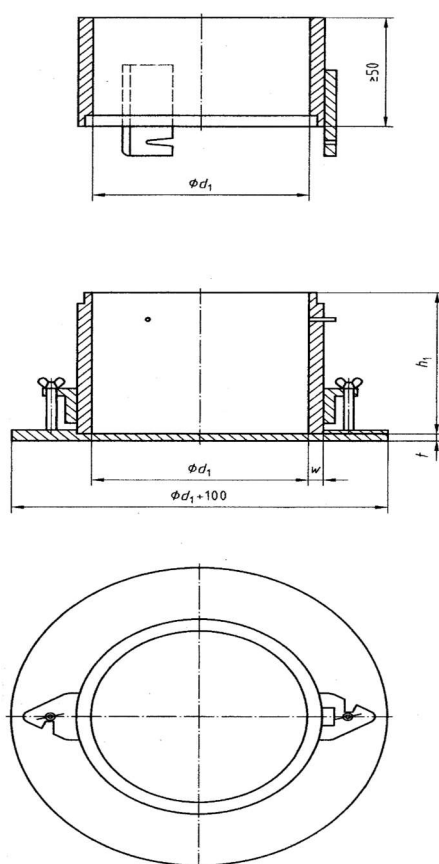
5.2 Προετοιμασία πρωτογενούς υλικού

Για την διεξαγωγή της δοκιμής CBR ακολουθείται τυποποιημένη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά σε σχετικές προδιαγραφές. Στην Ελλάδα ακολουθείται το πρότυπο EN 13286-47 (2012).

Αρχικά το μίγμα ασύνδετου υλικού, το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κοσκινίζεται σε κόσκινο με άνοιγμα διατομής 22,4 mm. Περίπου 7,5 kg δείγματος χρειάζονται για μία δοκιμή CBR και τον προσδιορισμό της υγρασίας του υλικού. Πιθανές είναι κάποιες πρωταρχικές δοκιμές, εφόσον κριθεί απαραίτητο για τον προσδιορισμό του δείγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Ο προσδιορισμός της υγρασίας του υλικού, εάν στο μίγμα περιέχεται ασβέστης, πρέπει να γίνεται 60 έως 90 λεπτά μετά την ανάμειξη.

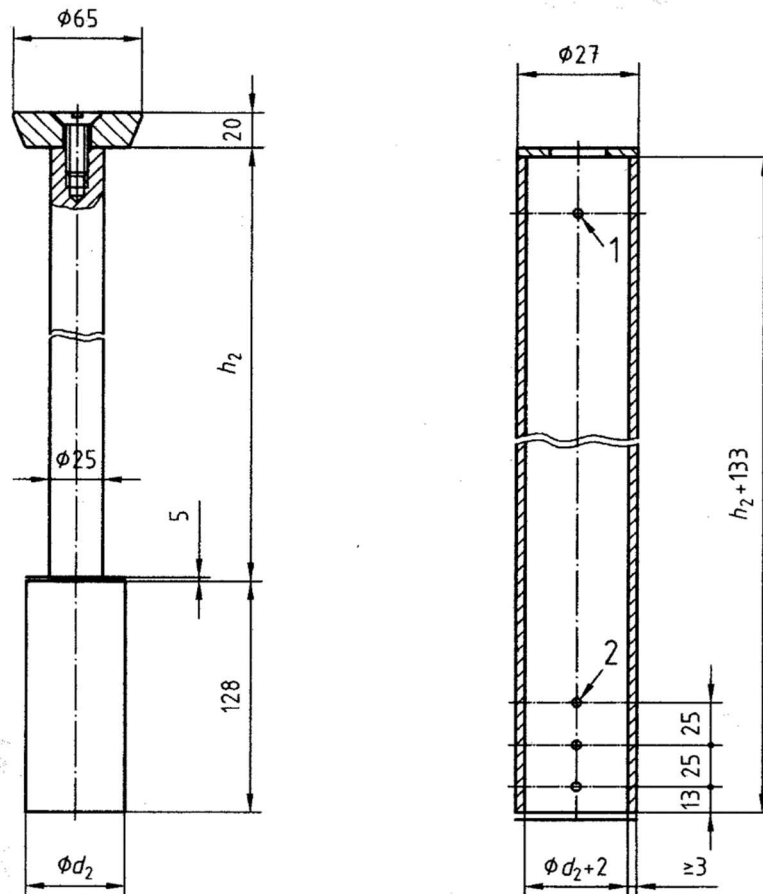
5.3 Προετοιμασία δειγμάτων

Πρώτα απ'όλα, η μήτρα (mould) συνδέεται με το παρέμβλημα (extension collar). Έπειτα τοποθετείται ο κυλινδρικός δίσκος (spacer disc) πάνω στην πλάκα βάση (base plate), και πάνω από τον δίσκο ένα απορροφητικό χαρτί. Τέλος, η μήτρα συνδέεται με την πλάκα βάσης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραπάνω βάσει του EN 13286-47 (2012), προσδιορίζονται βάσει του EN 13286-2 (2010). Οι μήτρες πρέπει να είναι διαμέτρου $d_1 = 100,00 \pm 1,0$ mm, ύψους $h_1 = 120,0 \pm 1,0$ mm, με πάχος τοιχώματος $w = 9,0 \pm 0,5$ και πάχος βάσης $14,0 \pm 0,5$ mm.



Εικόνα 5.1 Σχεδιάγραμμα μήτρας

Για την συμπύκνωση του δείγματος η μήτρα πρέπει να τοποθετηθεί σε στέρεο υπόστρωμα, πλίθινο ή κατασκευασμένο από σκυρόδεμα. Η συμπύκνωση γίνεται βάσει του προτύπου EN 13286-2 (2010) της Πρότυπης δοκιμής Proctor ή της Τροποποιημένης δοκιμής Proctor με τη χρήση σφυριού μάζας $2,50 \pm 0,02$ kg ,διαμέτρου βάσης $d_2=50,0 \pm 0,5$ mm με ύψος πτώσης $h_2= 305\pm 3$ mm, ή σφυριού μάζας $4,50 \pm 0,04$ kg ,διαμέτρου βάσης $d_2=50,0 \pm 0,5$ mm με ύψος πτώσης $h_2= 457\pm 3$ mm.



Εικόνα 5.2 Σχεδιάγραμμα κόπανου δοκιμής Proctor

Πραγματοποιούνται έξι παρόμοιες δοκιμές συμπύκνωσης, η κάθε μία με διαφορετικές διαδικαστικές παραλλαγές, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από την τιμή του μέγιστου σωματιδίου στο υλικό που πρόκειται να εξεταστεί, την απαιτούμενη ποσότητα του υλικού, καθώς και το μέγεθος της μήτρας. Στην δοκιμή Proctor χρησιμοποιείται κόπανος 2,5 kg, ενώ στη τροποποιημένη δοκιμή Proctor επιτυγχάνεται ένας υψηλότερος βαθμός συμπύκνωσης με την χρήση κόπανων βάρους 4,5 ή 15 kg και/ή χρησιμοποιείται πιο μεγάλο ύψος πτώσης του κόπανου σε λεπτότερα στρώματα του δείγματος. Το μέγεθος της μήτρας

επιλέγεται βάσει της τιμής του κοσκινού D (το οποίο μπορεί να έχει μέγιστη διάμετρο 63 mm). Στην περίπτωση που παρουσιάζονται σωματίδια μεγαλύτερης διατομής διεξάγονται ισοδύναμες δοκιμές. Εάν περισσότερο από το 25% του δείγματος συγκρατείται από το κόσκινο των 63 mm η δοκιμή δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Μετά τη συμπύκνωση αφαιρείται το παρέμβλημα, επιπεδώνεται το υλικό στο ύψος των χειλιών της μήτρας. Όπου έχουν δημιουργηθεί κενά, προστίθεται λεπτόκοκκο υλικό. Αφού αφαιρεθεί η πλάκα βάσης και ο κυλινδρικός δίσκος, ζυγίζονται η μήτρα με το δοκίμιο με προσέγγιση 5 g. Στην περίπτωση έλλειψης συνοχής του δοκιμίου, είναι προτιμότερο να ζυγιστεί η μήτρα με το δοκίμιο, το κυλινδρικό δίσκο και τη πλάκα βάσης για να αποφευχθεί η απώλεια υλικού. Μέρος του υλικού το οποίο δεν χρειάστηκε για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υγρασίας του υλικού.

5.4 Ωρίμανση

5.4.1 Προετοιμασία υλικών

Στην περίπτωση που απαιτείται ωρίμανση (curing) του δοκιμίου ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα, διαφορετικά πραγματοποιείται κατευθείαν η διαδικασία για τον προσδιορισμό του δείκτη CBR.

Η διαδικασία της αποθήκευσης, η οποία αφορά στο χρόνο μετά την προετοιμασία του δείγματος και πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής, πραγματοποιείται σε μία από τις ακόλουθες συνθήκες:

- α) σε μία κατάσταση στην οποία εμποδίζεται το φαινόμενο της εξάτμισης και η απώλεια υγρασίας είναι ανεκτή μέχρι 2 %,
- β) σε μία κατάσταση πλήρους εμβάπτισης (βύθισης) και
- γ) σε μία κατάσταση στην οποία εμποδίζεται η εξάτμιση μέσω της εμβάπτισης.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει η θερμοκρασία και η προαναφερόμενη χρονική διάρκεια να καταγράφονται και να είναι ορισμένες.

5.4.2 Χωρίς εξάτμιση

Η ωρίμανση για την αποφυγή της εξάτμισης πρέπει να διεξάγεται σε θάλαμο ή δωμάτιο με σχετική υγρασία το λιγότερο 98%, διαφορετικά πρέπει το δοκίμιο να κερώνεται ή να χρησιμοποιείται κάποιο κάλυμμα για την μήτρα, το οποίο θα σφραγίζεται με σιλικόνη ή ταινία. Βάσει του προτύπου οποιαδήποτε άλλη εγκεκριμένη μέθοδος είναι αποδεκτή. Τα δοκίμια πρέπει να βρίσκονται σε θερμοκρασία (20 ± 2) °C ή σε κάποια άλλη προσδιορισμένη.

5.4.3 Πλήρους εμβάπτισης

Σε αυτή την περίπτωση ένα τραχύ διηθητικό χαρτί τοποθετείται πάνω στη διάτρητη πλάκα βάσης. Η μήτρα η οποία περιέχει το συμπυκνωμένο δοκίμιο περιστρέφεται και στη συνέχεια συνδέεται με την πλάκα βάσης, έτσι ώστε το δοκίμιο να είναι σε επαφή με το διηθητικό χαρτί. Επίσης όταν δεν χρησιμοποιείται ο κυλινδρικός δίσκος, το παρέμβλημα συνδέεται με το μέρος το οποίο αποτελεί το πάνω μέρος της μήτρας. Κατόπιν, ένα διηθητικό χαρτί τοποθετείται στο πάνω μέρος της μήτρας και έπειτα τοποθετούνται δακτυλιοειδή βάρη, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από την περίπτωση και υπολογίζεται αναλόγως. Ένας δακτυλιοειδής δίσκος μάζας 2 kg προσομοιώνει την επίδραση 700 mm της υπερκείμενης κατασκευής.

Ύστερα το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε δεξαμενή γεμάτη από νερό, σε θερμοκρασία 20 ± 2 °C, σε ένα επίπεδο το οποίο να επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του νερού από το πάνω και κάτω μέρος του δοκιμίου.

Τοποθετείται και ασφαρίζεται η μηχανή μέτρησης της κάθετης διαστολής του δοκιμίου στη μήτρα. Πραγματοποιούνται οι αρχικές μετρήσεις κάθετης διαστολής και το δοκίμιο παραμένει στη δεξαμενή τουλάχιστον για 96 ώρες. Η στάθμη του νερού σε όλη τη διάρκεια πρέπει να παραμένει σταθερή. Εάν απαιτείται, μετριέται η διαστολή με ακρίβεια 0,05 mm, σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα τα οποία εξαρτώνται από τον ρυθμό διόγκωσης. Με τη χρήση αυτών των δεδομένων μπορεί να σχεδιαστεί το γράφημα της διαστολής με τον χρόνο ή το τετράγωνο του χρόνου. Από το γράφημα γίνεται αντιληπτή η ολοκλήρωση της διόγκωσης όταν η καμπύλη γίνεται παράλληλη στον άξονα του χρόνου.

Μετά την ολοκλήρωση της εμβάπτισης λαμβάνονται οι τελικές τιμές κατακόρυφης διαστολής και υπολογίζεται το ποσοστό της διόγκωσης ως προς το αρχικό ύψος του δείγματος. Αφαιρείται η μηχανή υπολογισμού της διαστολής του δοκιμίου και το δοκίμιο

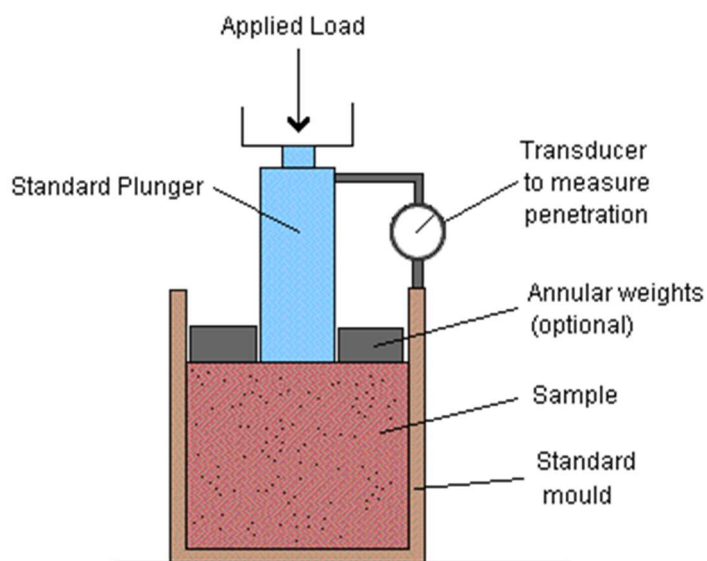
βγαίνει από την δεξαμενή. Το δοκίμιο αφήνεται να στραγγίσει για 15 ± 1 min. Εφόσον έχουν χρησιμοποιηθεί, αφαιρούνται τα δακτυλιοειδή βάρη, η διάτρητη πλάκα και η πλάκα βάσης, ζυγίζονται, και καταγράφεται η μάζα του δοκιμίου με τη μήτρα.

5.4.4 Αποφυγή εξάτμισης μέσω εμβάπτισης

Η ωρίμανση με αποφυγή εξάτμισης μέσω της εμβάπτισης διεξάγεται όπως περιγράφεται στις παραγράφους 5.4.3 και 5.4.4, με τη μόνη διαφορά ότι τα δοκίμια δεν κερώνονται και δεν χρησιμοποιούνται καλύμματα πριν την εμβάπτιση τους.

5.5 Συσσκευή CBR

Βάσει του προτύπου EN 13286-47 (2012) απαιτείται μία μηχανή φόρτισης με ικανότητα φόρτισης τουλάχιστον 50 kN και με τη δυνατότητα εφαρμογής της δύναμης του φορτίου μέσω του εμβόλου, με ρυθμό διείσδυσης $1,27 \pm 0,5$ mm/min (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3 Σχεδιάγραμμα μηχανής CBR

Το κυλινδρικό έμβολο διείσδυσης πρέπει να έχει διάμετρο 50 ± 5 mm, και το κατώτερο άκρο του να είναι από χάλυβα.

5.6 Δοκιμή CBR

Κατά τη δοκιμή CBR η πλάκα βάσης συνδέεται με τη μήτρα, έτσι ώστε το αρχικό πάνω μέρος του δοκιμίου να είναι σε επαφή με την πλάκα βάσης και το αρχικό κάτω μέρος να είναι ελεύθερο προκειμένου να εξεταστεί. Μετά, η μήτρα τοποθετείται πάνω στη πλάκα της μηχανής.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη CBR, σε δοκίμιο στο οποίο είχαν προστεθεί δακτυλιοειδή βάρη, προστίθενται τα απαιτούμενα βάρη ξανά πάνω στο δοκίμιο, προκειμένου να αποφευχθεί αναμόχλευση του μίγματος στην περιοχή της οπής των δακτυλιοειδών βαρών. Επιπλέον τοποθετείται ένα δακτυλιοειδές βάρος πριν τοποθετηθεί το έμβολο διείσδυσης, μετά το οποίο τοποθετούνται και τα υπόλοιπα βάρη. Εάν δεν είχαν τοποθετηθεί βάρη προσαύξησης τότε τοποθετείται κατευθείαν το έμβολο.

Βάσει της αναμενόμενης τιμής του δείκτη CBR μία αρχική δύναμη επιβάλλεται στο δοκίμιο. Εάν αναμένεται ένας λόγος φέρουσας ικανότητας μέχρι 5% επιβάλλεται μία αρχική δύναμη 10 N, εάν αναμένεται ένας λόγος πάνω από 5% τότε επιβάλλεται μία αρχική δύναμη 40 N. Η τιμή της διείσδυσης η οποία καταγράφεται αρχικά, ορίζεται ως μηδενική.

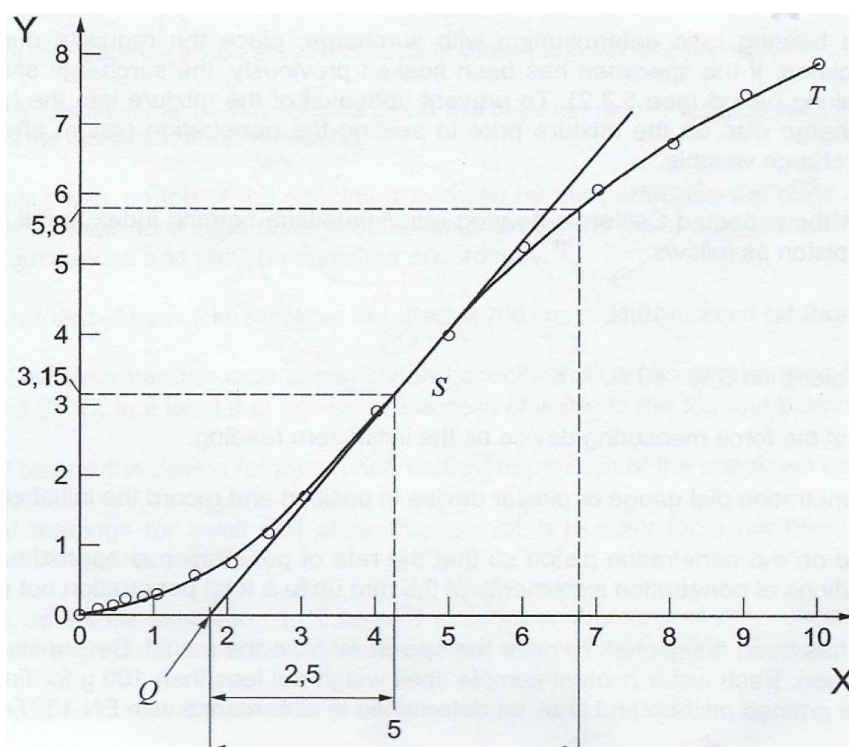
Εφαρμόζεται τέτοια δύναμη στη μηχανή, ώστε η διείσδυση του εμβόλου να προχωρά με σταθερό ρυθμό 1,27 mm/min. Από την έναρξη της διείσδυσης και μετά καταγράφονται οι τιμές του φορτίου για διείσδυση ανά 0,5 mm. Η μέγιστη διείσδυση δεν μπορεί να ξεπερνά τα 10 mm.

Αφού ολοκληρωθεί η δοκιμή προσδιορίζεται η υγρασία του δοκιμίου. Τα δείγματα που θα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της υγρασίας δεν πρέπει να ζυγίζονται λιγότερο από 100 g για λεπτόκοκκα δείγματα και όχι περισσότερο από 500 g για χονδρόκοκκα δείγματα (EN 1097-5, 2008). Εφόσον το δείγμα έχει εμβαπτιστεί, η αρχική τιμή της υγρασίας του θα έχει αλλάξει. Επιπλέον, διαφοροποιείται και η τιμή καθ' ύψος του δοκιμίου.

5.7 Υπολογισμός και έκφραση αποτελεσμάτων

Οι τιμές επιβαλλόμενου φορτίου-διείσδυσης που έχουν καταγραφεί τοποθετούνται σε σύστημα αξόνων με τις τιμές των φορτίων στις θέσεις των τεταγμένων και τις αντίστοιχες τιμές των διεισδύσεων στις θέσεις των τετμημένων. Με την ένωση των σημείων προκύπτει η καμπύλη φορτίου-διείσδυσης.

Η φυσιολογική μορφή της καμπύλης είναι να είναι κοίλη (Εικόνα 5.4). Σε περίπτωση που το αρχικό μέρος της καμπύλης στέφει τα κοίλα μέλη προς τα άνω, γεγονός που οφείλεται στις τοπικές ανωμαλίες της επιφάνειας του δοκιμίου, πρέπει να γίνει μία διόρθωση. Έτσι από το σημείο της καμπύλης με την μέγιστη κλίση (S), σχεδιάζεται εφαπτομένη. Το σημείο τομής της εφαπτομένης με τον άξονα της διείδυσης (Q) αποτελεί το νέο αρχικό σημείο της καμπύλης. Η μορφή της καμπύλης τροποποιείται και η νέα καμπύλη που προκύπτει αποτελείται από την εφαπτομένη από το σημείο (Q) έως το σημείο (S) και το υπόλοιπο μέρος της καμπύλης μέχρι το σημείο (T).



Εικόνα 5.4 Διάγραμμα Δύναμης-Διείδυσης

Η δοκιμή CBR πρέπει να εκτελείται με διείδυση έως 7,5 mm. Σε περίπτωση που η διείδυση είναι μεγαλύτερες από 7,5 mm απαιτείται μία διορθωμένη τιμή εάν η διορθωμένη διείδυση για 5 mm βρίσκεται πέρα των 7,5 mm. Σε περίπτωση που ο χειριστής κατά τη διάρκεια του πειράματος σχεδιάζει την καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, η δοκιμή μπορεί να τερματιστεί όταν ο δείκτης CBR πέσει κάτω από τη μέγιστη τιμή του. Εάν ο δείκτης CBR για διείδυση 2,5 mm έχει τιμή 6 %, αλλά για διείδυση 3,5 mm έχει χαμηλότερη τιμή, τότε η δοκιμή πρέπει να ολοκληρωθεί και τα αποτελέσματα καταγράφονται ως εξής : -2,5 mm διείδυση 6 %, -5,0 mm διείδυση < 6 %.

Από την καμπύλη εξάγονται οι τιμές δύναμης (σε kN) για αντίστοιχες τιμές παραμορφώσεων στις τιμές των 2,5 mm και 5 mm. Εκφράζοντας αυτές τις διεισδύσεις ως ποσοστό της διαφοράς των αντίστοιχων τιμών δυνάμεων επί τοις εκατό, ο δείκτης CBR λαμβάνεται ως η υψηλότερη τιμή που προκύπτει.

Προκειμένου να υπάρχει μηχανιστική αντίληψη ως προς τη συμπεριφορά των υλικών, χρειάζεται γνώση ως προς το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης. Ωστόσο, ο προσδιορισμός του μέτρου αυτού γίνεται στο εργαστήριο, είναι χρονοβόρος και υπάρχει συχνά σχετική δυσκολία στην προετοιμασία των μιγμάτων που δυσχεραίνουν την πραγματοποίηση της τριαξονικής δοκιμής. Αντίθετα, επειδή η δοκιμή προσδιορισμού του δείκτη CBR είναι συνηθέστερη και απλούστερη, έχουν αναπτυχθεί από σχετικές έρευνες διάφορες σχέσεις συσχέτισης του δείκτη CBR και του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης με στόχο την γρηγορότερη εκτίμηση του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης.

5.8 Σχέσεις προσδιορισμού μέτρου επανάκτησης

Η πρώτη έκφραση του μέτρου επανάκτησης (M_r) ως συνάρτηση του CBR αναπτύχθηκε από τους Heukelom και Foster και περιγράφεται από τη σχέση:

$$M_r(\text{psi}) = 1565 * CBR \quad (5.2)$$

Αργότερα, το 1962 ο Heukelom συνεργαζόμενος με τον Klomp κατέληξαν στην σχέση :

$$M_r(\text{psi}) = 1500 * CBR \quad \text{ή} \quad (5.3)$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 10 * CBR \quad (5.4)$$

Εν συνεχεία ο Green και Hall (Σώμα των Μηχανικών του Στρατού των Η.Π.Α., 1975) πρότειναν τις παρακάτω σχέσεις, οι οποίες απορρέουν από την σύγκριση των μετρήσεων από τον παλμό διάδοσης κυμάτων με την εφαρμογή επιτόπου δοκιμής CBR (in-situ CBR):

$$M_r(\text{psi}) = 5409 * CBR^{0,71} \quad (5.5)$$

$$M_r(\text{Mpa}) = 37.3 * CBR^{0,71} \quad (5.6)$$

Το Συμβούλιο της Νότιας Αφρικής πάνω στην επιστημονική και βιομηχανική έρευνα (South African Council on Scientific and Industrial Research, CSIR) (Paterson et al., 1978) υιοθέτησε εξισώσεις της μορφής $M_r = k * CBR$, τροποποιώντας τον συντελεστή k ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τον εργαστηριακό προσδιορισμό του :

$$M_r(\text{psi}) = 30000 * CBR^{0,65} \quad (5.7)$$

Οι Powell et al. (1984) κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση, η οποία βασίζεται σε επιτόπου δοκιμές CBR οι οποίες περιλαμβάνουν τιμές από τιμές μεταξύ 1 και 12.

$$Mr(ksi) = 2554 * CBR^{0,64} \quad (5.8)$$

Το Εργαστήριο Μεταφορών και Οδικής Έρευνας (Transportation and Road Research Laboratory) δημοσίευσε τις σχέσεις:

$$Mr(psi) = 2555 * CBR^{0,64} \quad (5.9)$$

$$Mr(Mpa) = 17.6 * CBR^{0,64} \quad (5.10)$$

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι από τις παραπάνω σχέσεις, αυτή η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο είναι η (5.4), ενώ η χρήση των σχέσεων είναι περιορισμένη καθώς εφαρμόζονται κυρίως σε λεπτά εδάφη με πολύ χαμηλές τιμές CBR. Πολλοί ήταν οι ερευνητές οι οποίοι μελέτησαν αυτή τη σχέση Mr-CBR. Ο Angell (1988) σημείωσε πως η σχέση Heukelom και Klomp (1962) δεν είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης, καθώς το υποεκτιμά για τιμές CBR μικρότερες του 5% και το υπερεκτιμά για τιμές μεγαλύτερες του 5%.

Ο Fall (1993) υποστήριξε ότι η δοκιμή CBR είναι αυθαίρετη και τα αποτελέσματά της είναι δύσκολο να συσχετιστούν με την δυσκαμψία του υλικού. Επιπλέον, σε έρευνα των Sukumaran et al. (2002) με πεπερασμένα στοιχεία, υποστηρίχτηκε ότι ο δείκτης CBR δεν είναι κατάλληλος για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης, καθώς το CBR αποτελεί μέτρο δυσκαμψίας και επομένως δεν συσχετίζεται με το μέτρο επανάκτησης.

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1 Περιγραφή υλικών

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου πραγματοποιήθηκε πειραματική διαδικασία με σκοπό την περιγραφή και κατανόηση της συμπεριφοράς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού-RAP, για χρήση ως υλικό βάσης-υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σε συνδυασμό με θραυστό παρθένο υλικό. Το πείραμα εστίασε στον προσδιορισμό του δείκτη CBR.

Οι δοκιμές έγιναν σε τέσσερα διαφορετικά μίγματα, με διαφορετικές αναλογίες RAP και θραυστού υλικού (3A) (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1 Σύσταση μιγμάτων

	RAP (%)	3A (%)
ΜΙΓΜΑ Α	0	100
ΜΙΓΜΑ Β	10	90
ΜΙΓΜΑ Γ	20	80
ΜΙΓΜΑ Δ	30	70
ΜΙΓΜΑ Ε	40	60

Προκειμένου να προσδιοριστεί ο δείκτης CBR πραγματοποιήθηκαν οι κοκκομετρικές αναλύσεις των μιγμάτων, ο προσδιορισμός της βέλτιστης υγρασίας και τέλος η δοκιμή CBR.

6.2 Κοκκομετρική ανάλυση.

6.2.1 Προδιαγραφές

Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των υλικών πραγματοποιήθηκαν για να διαπιστωθεί εάν τα μίγματα είναι κατάλληλα για χρήση σύμφωνα με το ΣΧΕΔΙΟ ΕΛΟΤ ΤΟ 1501-05-03-01-00:2017. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών.

Πίνακας 6.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών

Άνοιγμα κόσκινου ΕΛΟΤ EN 933-2* (mm)	Ποσοστό διερχόμενο από κόσκινα κατά βάρος (%)	
	0/40 G _A 75	
	Μέγιστο όριο	Ελάχιστο όριο
125	-	-
80	100	100
63	-	-
40	99	75
31.5	-	-
20	99	54
14	99	48
10	99	40
4	70	22
1	45	9
0.063	15	3

**Κόσκινα σύμφωνα με το ISO 3310-1&3310-2 και ISO 565*

Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν τα κόσκινα με άνοιγμα κόσκινου (mm) 40, 20, 16, 10, 4, 1, 0.063. Το κόσκινο με άνοιγμα κοσκίνου 14 mm δεν υπήρχε στο εργαστήριο για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το κόσκινο με άνοιγμα 16 mm, καθώς ήταν το πλησιέστερο. Επίσης δεν τοποθετήθηκε το κόσκινο με άνοιγμα 80 mm καθώς το υλικό, όπως φαίνεται

και παρακάτω, δεν περιείχε κλάσμα, το οποίο να συγκρατείται από το κόσκινο με άνοιγμα 40 mm.

Πραγματοποιήθηκαν οι κοκκομετρικές αναλύσεις για υλικό 3A και RAP. Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των υπόλοιπων μιγμάτων προέκυψαν υπολογιστικά ως σύνθεση των δύο πρώτων υλικών σε διάφορες αναλογίες.

Τα κόσκινα τοποθετήθηκαν από πάνω προς τα κάτω με φθίνουσα σειρά ανοίγματος. (Εικόνα 6.1)



Εικόνα 6.1 Κόσκινα

Στο ανώτερο κόσκινο το δείγμα, στη συνέχεια ένα καπάκι και κατόπιν τα κόσκινα τοποθετήθηκαν σε μηχανή δόνησης για 10 λεπτά (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2 Συσκευή δόνησης

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία στη συσκευή δόνησης, αφαιρέθηκε το καπάκι και κάθε κόσκινο ζυγίστηκε με και χωρίς υλικό (Εικόνα 6.3). Βάσει αυτών των μετρήσεων προέκυψε η κοκκομετρική καμπύλη.



Εικόνα 6.3 Ζύγιση

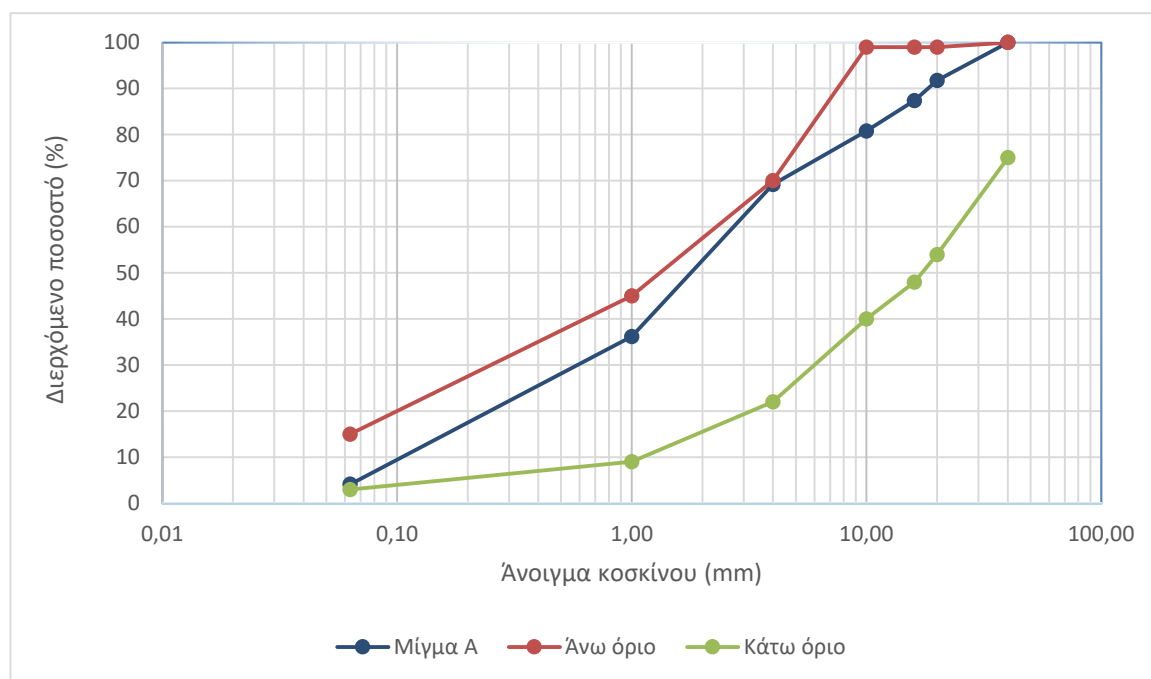
6.2.2 Κοκκομετρία υλικών

Μίγμα Α

Η κοκκομετρική ανάλυση του μίγματος Α έδωσε τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3, με τα οποία κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη (Εικόνα 6.4).

Πίνακας 6.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α

Μέγεθος κόσκινου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100,00	100-75
20,00	91,73	99-54
16,00	87,42	99-48
10,00	80,78	99-40
4,00	69,19	70-22
1,00	36,19	45-19
0,063	4,15	15-3



Εικόνα 6.4 Κοκκομετρική καμπύλη υλικού 3Α

Η μορφή και η κλίση χαρακτηρίζει την ομοιομορφία ή μη της κατανομής των κόκκων και την έλλειψη ή μη των κόκκων κάποιας διάστασης (Α. Λοΐζος, Χ. Πλατή, 2017). Η

ομοιομορφία του υλικού εκφράζεται ποσοτικά συναρτήσει του συντελεστή ομοιομορφίας C_u . Όταν $C_u > 5$ τότε το υλικό είναι καλώς διαβαθμισμένο. Η καμπυλότητα εκφράζεται με τον συντελεστή C_c , όταν $1 \leq C_c \leq 3$ το υλικό είναι καλώς διαβαθμισμένο.

Για το υλικό 3A ο συντελεστής C_u είναι ίσος με:

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 2,9/0,1 = 29$$

και ο συντελεστής C_c είναι ίσος με:

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60}) = 0,6^2/(2,9 \cdot 0,1) = 1.24$$

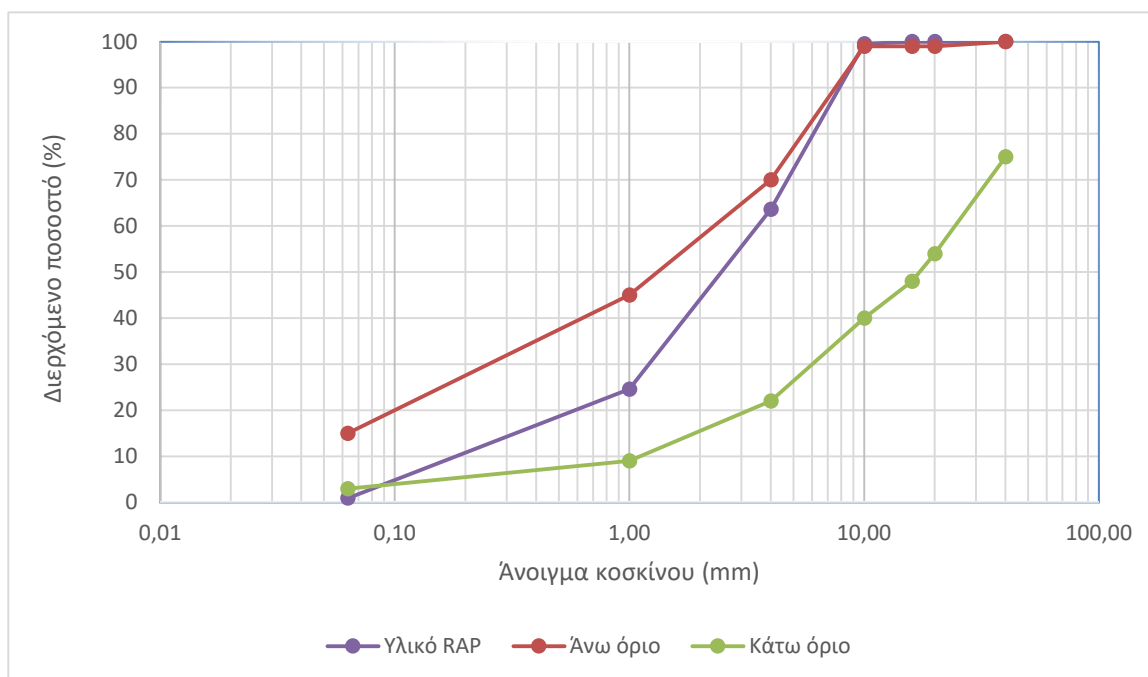
Από την κοκκομετρική καμπύλη φαίνεται πως το υλικό 3A βρίσκεται εντός των ορίων της καμπύλης, εμφανίζοντας μία οριακά αποδεκτή τιμή στο κόσκιο με άνοιγμα 4,00 mm. Ουσιαστικά απουσιάζει η παρουσία λεπτόκοκκου υλικού από 1,00 mm έως 10,00 mm, αν δεν βρισκόταν εντός ορίων η διαβάθμιση θα χαρακτηριζόταν ως ασυνεχής και θα υπήρχε κίνδυνος διαχωρισμού. Επίσης, ισχύει πως $C_u > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, έτσι το μίγμα A χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

Υλικό RAP

Η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού RAP έδωσε τα αποτελέσματα του πίνακα 6.4, με τα οποία κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη (Εικόνα 6.5).

Πίνακας 6.4 Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού RAP.

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100,00	100-75
20,00	100,00	99-54
16,00	100,00	99-48
10,00	99,57	99-40
4,00	63,59	70-22
1,00	24,55	45-19
0,063	0,93	15-3



Εικόνα 6.5 Κοκκομετρική καμπύλη RAP

Η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού RAP πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα της, για την εξαγωγή των κοκκομετρικών αναλύσεων των υπόλοιπων μιγμάτων.

Για το υλικό RAP υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u :

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 3,5/0,2 = 17,5$$

και ο συντελεστής καμπυλότητας C_c :

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60}) = 1,2^2/(3,5 \cdot 0,2) = 2,05$$

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.5 η κοκκομετρική καμπύλη απουσιάζει χονδρόκοκο υλικό, και επιπλέον η κοκκομετρική καμπύλη βρίσκεται κάτω από το κατώτερο όριο για τα λεπτόκοκκα. Επομένως το υλικό RAP παρουσιάζει έλλειψη σε χονδρόκοκο υλικό και περίσσεια σε λεπτόκοκκο. Η έντονη παρουσία λεπτόκοκκου μπορεί να οδηγήσει στην μετάπτωση των κόκκων κατά την συμπύκνωση ή την επιβολή φορτίου με αποτέλεσμα το διαχωρισμό του υλικού. Επιπλέον, ισχύει πως $C_u > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, άρα το μίγμα Α χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

6.2.3 Υπολογισμός κοκκομετρικών καμπύλων

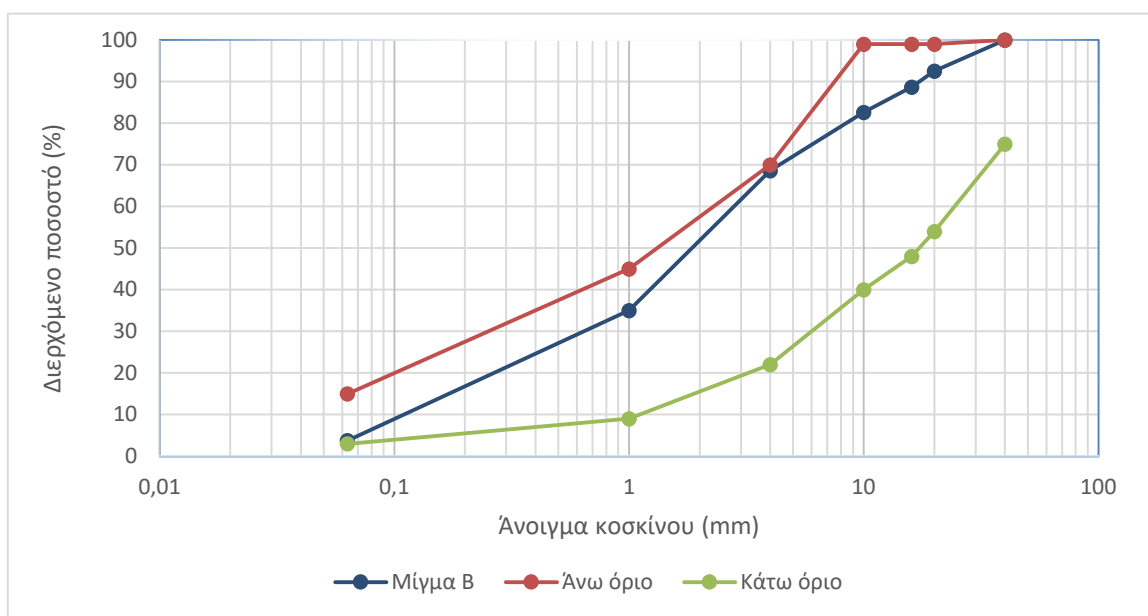
Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των μιγμάτων Β, Γ, Δ και Ε, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προέκυψαν ως συνθέσεις των υλικών 3Α και RAP (Πίνακας 6.1).

Μίγμα Β

Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος Β παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.6 και τα στοιχεία της περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5 Κοκκομετρική διαβάθμιση Μίγματος Β

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100	100-75
20,00	92,55	99-54
16,00	88,66	99-48
10,00	82,64	99-40
4,00	68,61	70-22
1,00	34,98	45-19
0,063	3,75	15-3



Εικόνα 6.6 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Β

Για το μίγμα Β υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u :

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 4/0,1 = 40$$

και ο συντελεστής καμπυλότητας C_c :

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10} * d_{60}) = 0,7^2 / (4 * 0,1) = 1,225$$

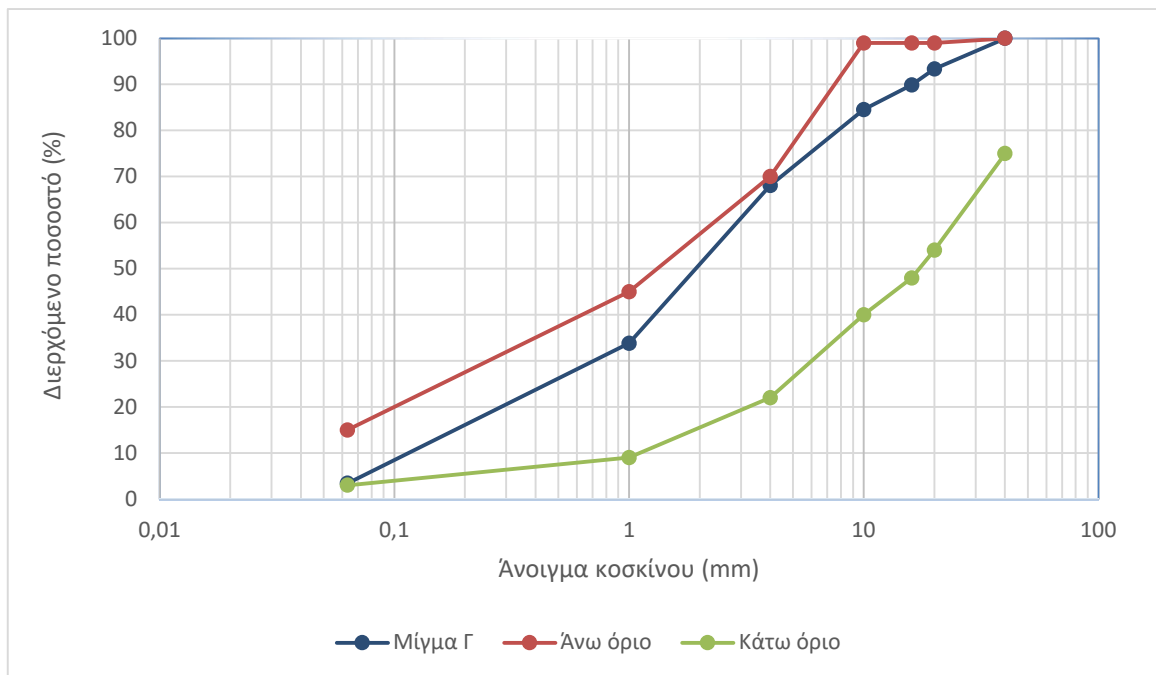
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.6 η κοκκομετρική καμπύλη είναι εντός ορίων. Όπως ήταν αναμενόμενο, το ποσοστό του διερχόμενου στο κόσκινο με άνοιγμα 4,00 mm μειώθηκε σε σύγκριση με το υλικό Α, καθώς προστέθηκε σε αυτό υλικό RAP το οποίο διαθέτει μεγαλύτερο ποσοστό υλικού ανάμεσα στα κόσκινα 1,00 mm έως 10,00 mm. Επιπλέον, ισχύει πως $C_u > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, άρα το μίγμα Α χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

Μίγμα Γ

Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος Γ παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.7 και τα στοιχεία της περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6 Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος Γ

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100,00	100-75
20,00	93,38	99-54
16,00	89,92	99-48
10,00	84,51	99-40
4,00	68,05	70-22
1,00	33,81	45-19
0,063	3,43	15-3



Εικόνα 6.7 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Γ

Για το μίγμα Γ υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u :

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 3/0,1 = 30$$

και ο συντελεστής καμπυλότητας C_c :

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} * d_{60}) = 0,75^2/(3 * 0,1) = 1,87$$

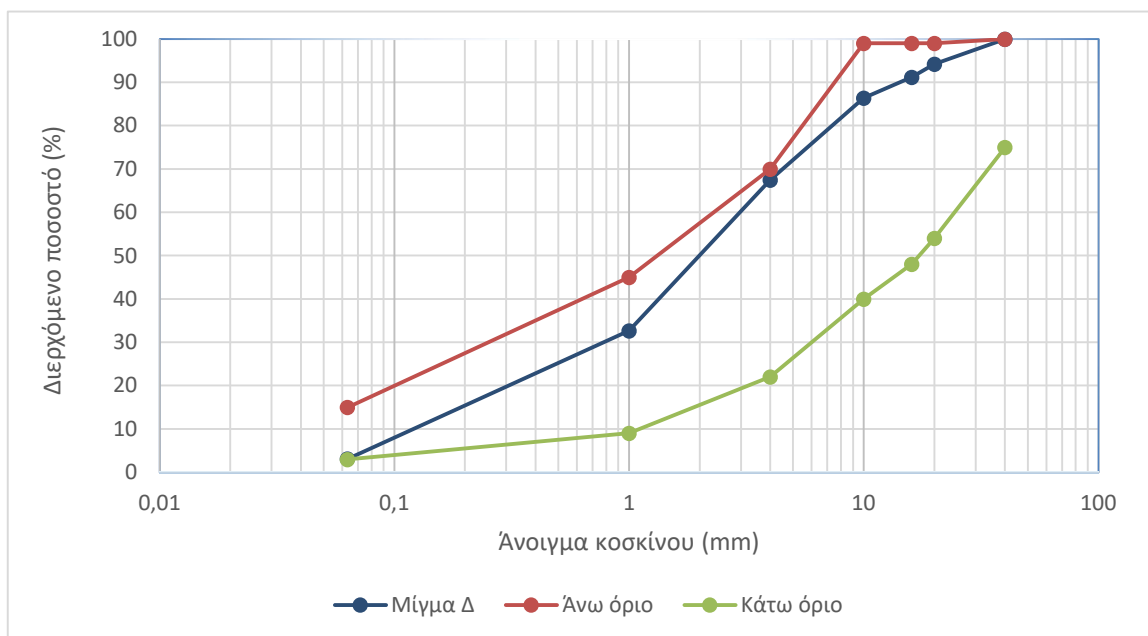
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.7 η κοκκομετρική καμπύλη είναι εντός ορίων. Το ποσοστό του διερχόμενου στο κόσκινο με άνοιγμα 4,00 mm συνεχίζει να μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υλικό RAP. Επιπλέον, ισχύει πως $C_u > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, άρα το μίγμα Α χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

Μίγμα Δ

Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος Δ παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8 και τα στοιχεία της περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7 Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος Δ

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100	100-75
20,00	94,20	99-54
16,00	91,18	99-48
10,00	86,39	99-40
4,00	67,49	70-22
1,00	32,65	45-19
0,063	3,10	15-3



Εικόνα 6.8 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Δ

Για το μίγμα Δ υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u :

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 3/0,13 = 23,07$$

και ο συντελεστής καμπυλότητας C_c :

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10} * d_{60}) = 0,8^2 / (3 * 0,13) = 1,64$$

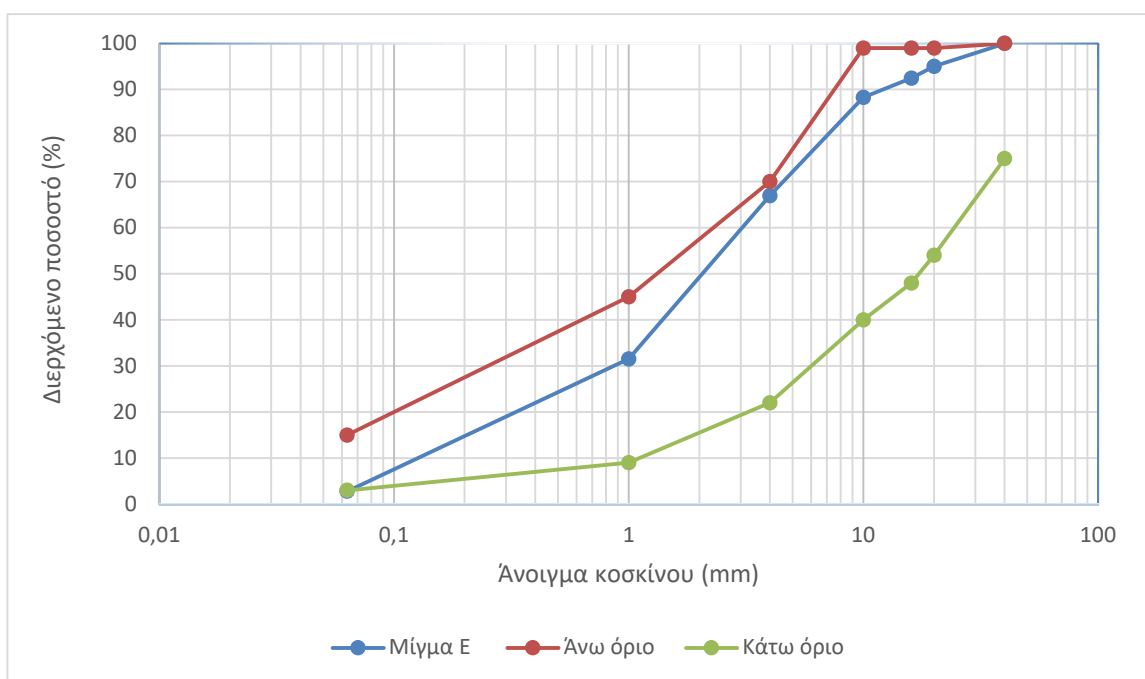
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.8 η κοκκομετρική καμπύλη βρίσκεται εντός ορίων. Επιπλέον, ισχύει πως $C_u > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, άρα το μίγμα Δ χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

Μίγμα E

Η κοκκομετρική καμπύλη του μίγματος E παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.9 και τα στοιχεία της περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8 Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος E

Μέγεθος κοσκίνου (mm)	Συνολικό διερχόμενο υλικό (%)	Όρια
40,00	100,00	100-75
20,00	95,03	99-54
16,00	92,43	99-48
10,00	88,27	99-40
4,00	66,93	70-22
1,00	31,48	45-19
0,063	2,78	15-3



Εικόνα 6.9 Κοκκομετρική καμπύλη Μίγματος E

Για το μίγμα E υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u :

$$C_U = d_{60}/d_{10} = 3/0,13 = 23,07$$

και ο συντελεστής καμπυλότητας C_c :

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10} * d_{60}) = 0,9^2 / (3 * 0,13) = 2,07$$

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.9 η κοκκομετρική καμπύλη βρίσκεται εντός ορίων. Επιπλέον, ισχύει πως $C_U > 5$ και $1 \leq C_c \leq 3$, άρα το μίγμα Δ χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο.

6.3 Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας

6.3.1 Περιγραφή δοκιμής

Ο προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας και της μέγιστης ξηρής πυκνότητας πραγματοποιήθηκε με συμπίκνωση σύμφωνα με το πρότυπο EN 13286.02 (2010).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η δοκιμή δεν εκτελέστηκε με ακρίβεια, προσαρμόστηκε σε υλικούς και χρονικούς περιορισμούς. Βάσει του προτύπου η διάμετρος της μήτρας πρέπει να είναι τουλάχιστον τετραπλάσια της μέγιστης διαμέτρου του κλάσματος. Έτσι για $D=23$ mm επιλέχθηκε η μήτρα Β διαμέτρου $d_1=150,0 \pm 1,0$ mm και ύψους $h_1 = 120,0 \pm 1,0$ mm, στο εργαστήριο δεν υπήρχε μήτρα αυτών των διαστάσεων, έτσι τελικά χρησιμοποιήθηκε μήτρα διαμέτρου $d=152,0$ mm και ύψους $h=117,0$ mm με συνολικό εσωτερικό όγκο $V=0,00212$ m³. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ο κόπανος Β μάζας 4,5 kg (όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 5.4).

Αρχικά εξήχθη δείγμα 6,00 kg από το εκάστοτε υλικό (Εικόνα 6.10), το οποίο στην συνέχεια αναμειγνυόταν με νερό σε επιθυμητή ποσότητα, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία των δοκιμών.



Εικόνα 6.10 Ζύγιση μίγματος

Αφού λαμβανόταν το καθαρό βάρος της μήτρας τοποθετούταν σε αυτή το παρέμβλημα. Η συμπύκνωση του υλικού στη μήτρα έγινε σε τρεις στρώσεις. Για κάθε στρώση χρησιμοποιήθηκε υλικό βάρους από 1,6 έως 1,8 kg, και πραγματοποιήθηκαν 28 χτύποι ανά στρώση (Εικόνα 6.11).



Εικόνα 6.11 Α. Ζύγιση υλικού Β. Τοποθέτηση στη μήτρα

Μετά την συμπύκνωση αφαιρέθηκε το παρέμβλημα. Στη συνέχεια το υλικό το οποίο εξείχε από το χείλος της μήτρας αφαιρέθηκε με την βοήθεια σπάτουλας. Σε περιπτώσεις όπου στην τελική επιφάνεια του υλικού υπήρχαν χονδρόκοκκα κλάσματα, αφαιρέθηκαν, και τα

κενά που δημιουργήθηκαν, πληρώθηκαν με λεπτόκοκκο υλικό. Τέλος, η μήτρα με το υλικό ζυγίστηκαν και υπολογίστηκε η ξηρή πυκνότητα του δείγματος.

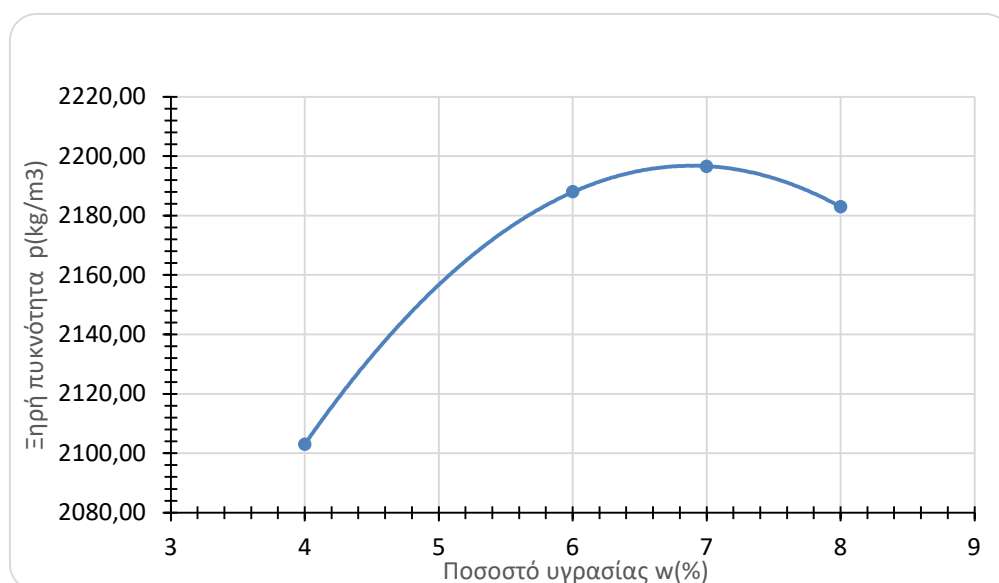
6.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μίγμα Α

Για το μίγμα Α παρασκευάστηκαν 4 δοκίμια προς συμπίκνωση κατά Proctor. Τα ζεύγη τιμών ποσοστού υγρασίας – φαινομένου ξηρού βάρους περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.9 και παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.12.

Πίνακας 6.9 Ποσοστό υγρασίας- Ξηρή πυκνότητα

Ποσοστό Υγρασίας w (%)	Ξηρή πυκνότητα ρ (kg/m ³)
4	2103,00
6	2188,00
7	2196,50
8	2183,00



Εικόνα 6.12 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας μίγματος Α.

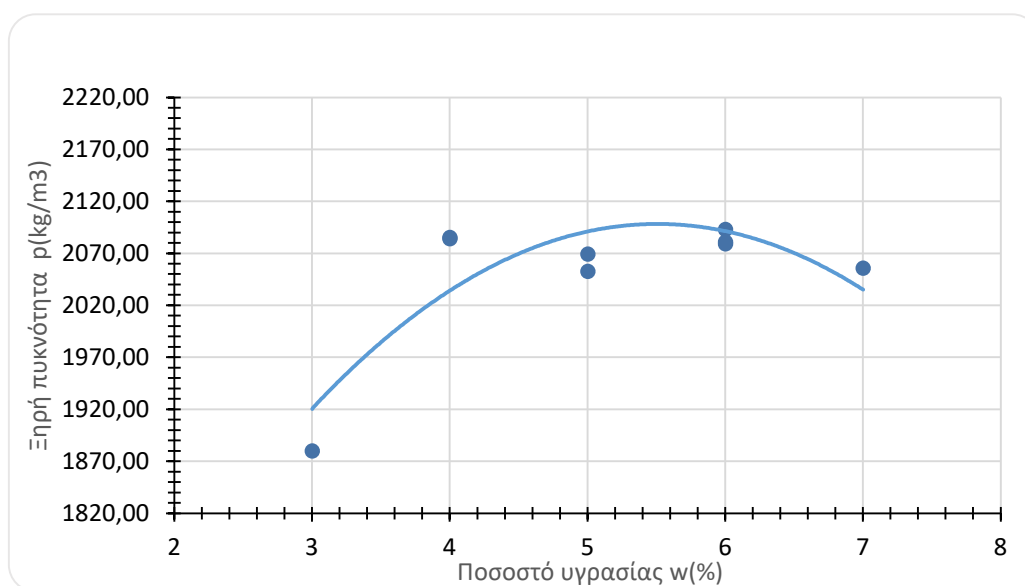
Η βέλτιστη υγρασία όπως προκύπτει από το διάγραμμα πυκνότητας υγρασίας είναι 7%.

Μίγμα Γ

Για το μίγμα Γ παρασκευάστηκαν 9 δοκίμια προς συμπίκνωση κατά Proctor. Τα ζεύγη τιμών ποσοστού υγρασίας – φαινόμενου ξηρού βάρους περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.10 και παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.13.

Πίνακας 6.10 Ποσοστό υγρασίας- Ξηρή πυκνότητα

Ποσοστό Υγρασίας w (%)	Ξηρή πυκνότητα $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$
3	1879,92
4	2084,00
5	2052,56
6	2092,83
5	2069,27
7	2088,87
6	2079,12
6	2080,99
4	2085,26



Εικόνα 6.13 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας μίγματος Γ.

Η βέλτιστη υγρασία όπως προκύπτει από το διάγραμμα πυκνότητας-υγρασίας είναι 6%.

Για τα υπόλοιπα μίγματα RAP-3A το ποσοστό της βέλτιστης υγρασίας θεωρήθηκε πως δεν θα παρουσιάζει διαφορά μεγάλης τάξης. Έτσι για τη δοκιμή CBR τα μίγματα

συμπυκνώθηκαν με υγρασία 6% και σε κάποιες περιπτώσεις όσο αυξανόταν η ποσότητα του υλικού RAP, μειωνόταν ελαφρώς το ποσοστό της υγρασίας. Για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω δοκιμές προσδιορισμού της βέλτιστης υγρασίας.

6.4 Δοκιμή καλιφορνιακού δείκτη CBR

Η προετοιμασία των δειγμάτων για την δοκιμή φέρουσας ικανότητας έγινε βάσει του ΕΛΟΤ EN 13286-47 (2012), όπως αναφέρεται στην παράγραφο 5.4. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας η δοκιμή προσαρμόστηκε για λόγους εξοικονόμησης χρόνου από την προβλεπόμενη. Έτσι το υλικό τοποθετήθηκε σε τρεις στρώσεις μέσα στην μήτρα, με την κάθε στρώση να αποτελείται από υλικό βάρους 1,6 έως 1,8 kg, και η συμπύκνωση πραγματοποιήθηκε με την επιβολή 28 χτύπων ανά στρώση.

Μετά την συμπύκνωση, ομαλοποιούταν η επιφάνεια, με την αφαίρεση του υλικού, το οποίο εξείχε από το χείλος με την χρήση σπάτουλας. Επίσης αφαιρούνταν και τα χονδρόκοκα μέρη τα οποία βρισκότουσαν στην επιφάνεια, τα κενά των οποίων σχηματίζονταν πληρούνταν με λεπτόκοκκο υλικό.

Ύστερα τοποθετούταν πάνω στο υλικό διηθητικό χαρτί, το παρέμβλημα και ο κυλινδρικός δίσκος (Εικόνα 6.14).



Εικόνα 6.14 Α. Τοποθέτηση διηθητικού χαρτιού πάνω στο υλικό. Β. Τοποθέτηση κυλινδρικού δίσκου.

Τέλος το δοκίμιο τοποθετούταν στην μηχανή όπου και πραγματοποιούταν η δοκιμή CBR (Εικόνα 6.15).



Εικόνα 6.15 Συσκευή δοκιμής CBR

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 17 δοκιμές CBR. Για το μίγμα Α και Β πραγματοποιήθηκαν από 4 δοκιμές, και για τα μίγματα Γ, Δ και Ε από τρεις δοκιμές. Ενδεικτικά δεδομένα της δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα Π1 των παραρτημάτων.

6.5 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης

6.5.1 Προετοιμασία δοκιμίων

Η προετοιμασία των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε βάσει του AASHTO T307-99. Για την τριαξονική δοκιμή το πρότυπο προτείνει για όλα τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται σε βάσεις και υποβάσεις την κατάταξη τους ως υλικά τύπου 1 ή 2. Στην προκειμένη περίπτωση τα υλικά πληρούν τις προδιαγραφές του τύπου 1, καθώς το ποσοστό του διερχόμενου από κόσκινο ανοίγματος 2.00 mm είναι μικρότερο του 70% και επιπλέον το διερχόμενο ποσοστό από άνοιγμα 0.075 είναι μικρότερο του 20%.

Για τον τύπο 1 ένα καθορίζεται μήτρα διαμέτρου 152 mm, με ελάχιστο ύψος 381 mm (ή ύψος μεγαλύτερο από το ύψος της τελικής στρώσης). Αρχικά τοποθετήθηκε η μεμβράνη από καουτσούκ, στο τέλος της μεταλλική πλάκα, πάνω από την πλάκα πορώδης δίσκος και

εξωτερικά από την μεμβράνη ένα δαχτυλίδι από καουτσούκ, για την συγκράτηση της μεμβράνης πάνω στη βάση (Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.16

Στη συνέχεια το υλικό, το οποίο βρισκόταν στην βέλτιστη υγρασία του, τοποθετήθηκε και συμπυκνώθηκε σε 5 ισοπαχείς στρώσεις των 6 cm (των 2,360-2,380 kg ανά στρώση) με δονητική συσκευή συμπίεσης. Ύστερα αφού αφαιρέθηκε η μήτρα τοποθετήθηκε και άνω πορώδης δίσκος, το ειδικό μεταλλικό καπάκι και ένα δαχτυλίδι για την συγκράτηση της μεμβράνης (Εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.17 Α. Δοκίμιο πριν την τοποθέτηση πορώδη δίσκου. Β. Δοκίμιο με τοποθέτηση ειδικού μεταλλικού καπακιού.

Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε στην βάση της συσκευής της τριαξονικής δοκιμής, έπειτα στον κλίβανο, και συνδέθηκαν με αυτή οι σωλήνες για την εξασφάλιση των

πλευρικών πιέσεων (σ_2 - σ_3) και της υγρασίας (Εικόνα 6.18). Αφού ολοκληρώθηκαν οι έλεγχοι των συνδέσεων και της εφαρμογής των μηχανομετρών, ξεκίνησε η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης.



Εικόνα 6.18 Συσκευή τριαξονικής φόρτισης.

Αρχικά έγινε μία προφόρτιση του δοκιμίου προκειμένου να μειωθούν οι επιδράσεις των αρχικών ατελειών επαφής. Επιβλήθηκε πλευρική τάση 103,4 kPa και εφαρμόστηκαν τουλάχιστον 500 επαναλήψεις ενός επαναλαμβανόμενου ισοδύναμου φορτίου, με μέγιστη αξονική τάση 103,4 kPa (η οποία αντιστοιχεί σε τιμή κυκλικής τάσης 93,1 kPa). Να σημειωθεί πως σε συσκευές στις οποίες η πλευρική πίεση επιβάλλεται με πεπιεσμένο αέρα, η αξονική τάση εφαρμόζεται με παλμό 0.1 sec και με περίοδο ξεκούρασης 0.9 έως 3.0 sec.

Η εφαρμογή των τάσεων και ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων κατά το πρότυπο AASHTO T307-99 παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.28.

Πίνακας 6.11 Ακολουθία φορτίσεων βάσεων-υποβάσεων κατά το πρότυπο AASHTO T307-99.

ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ kPa	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ kPa	ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ kPa	ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ kPa	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝ. ΦΟΡΤΙΣΗΣ
0	103.4	103.4	93.1	10.3	500-1000
1	20.7	20.7	18.6	2.1	100
2	20.7	41.4	37.7	4.1	100
3	20.7	62.1	55.9	6.2	100
4	34.5	34.5	31,0	3.5	100
5	34.5	68.9	62,0	6.9	100

6	34.5	103.4	93.1	10.3	100
7	68.9	68.9	62,0	6.9	100
8	68.9	137.9	124.1	13.8	100
9	68.9	206.8	186.1	20.7	100
10	103.4	68.9	62,0	6.9	100
11	103.4	103.4	93.1	10.3	100
12	103.4	206.8	186.1	20.7	100
13	137.9	103.4	93,0	10.3	100
14	137.9	137.9	124.1	13.8	100
15	137.9	275.8	248.2	27.6	100

6.5.2 Ανάλυση και αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής

Η εξαγωγή του μέτρου επανάκτησης γίνεται βάσει των τελευταίων 5 κύκλων φόρτισης. Το μέτρο επανάκτησης ισούται με την πραγματική κυκλική τάση (S_{cyclic}) προς την ανακτήσιμη παραμόρφωση ($\epsilon_r = \epsilon_r / L$):

$$Mr = S_{cyclic} / \epsilon_r \quad (6.1)$$

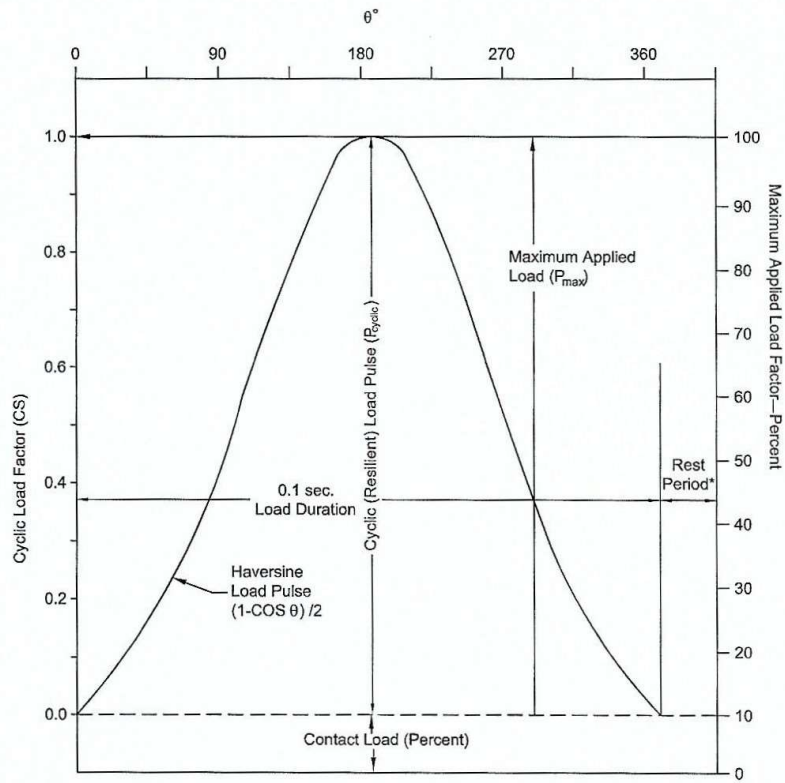
Η πραγματική κυκλική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$S_{cyclic} = P_{cyclic} / A \quad (6.2)$$

Όπου A = εμβαδόν διατομής κάθετα στην φόρτιση και

$$P_{cyclic} = P_{max} - P_{contact} \quad (6.3)$$

Όπου P_{max} η μέγιστη δύναμη εφαρμογής και $P_{contact}$ η δύναμη επαφής, η οποία είναι απαραίτητη για την διατήρηση θετικής επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της οροφής του (Εικόνα 6.19).



Εικόνα 6.19 Παλμός φόρτισης τριγωνικής δοκιμής

Σύμφωνα με το AASHTO T307-99 πρέπει να ισχύει $P_{contact} = 0.1P_{max}$.

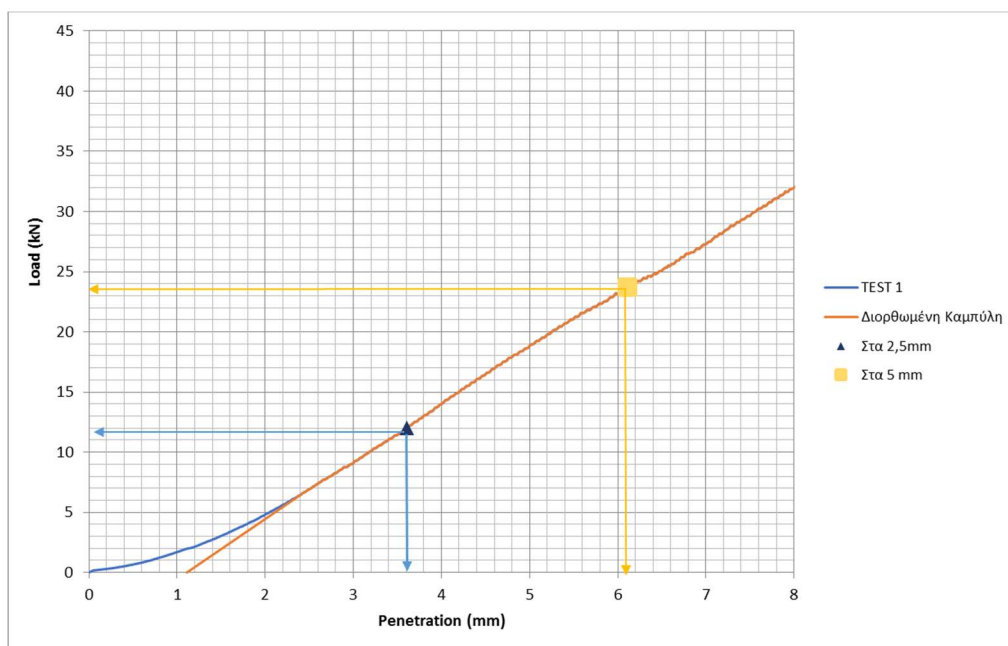
7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

7.1 Αναλύσεις μετρήσεων CBR

Όπως αναφέρεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.7, σε περίπτωση που η καμπύλη επιβαλλόμενου φορτίου - διείσδυσης στρέφει τα κοίλα προς τα άνω πρέπει να γίνει διόρθωση των τιμών. Η τιμή CBR προκύπτει ως η μέγιστη τιμή του λόγου της διορθωμένης τιμής φορτίου προς την πρότυπη επί τοις εκατό για διείσδυση 2,5 mm ή 5 mm, με πρότυπες τιμές φορτίου 13,7 και 20,55 kN αντίστοιχα. Η τιμή στρογγυλοποιείται στον πλησιέστερο ακέραιο.

Καμπύλες CBR μίγματος Α

Για το μίγμα Α πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές CBR. Τα αποτελέσματα για την 1η δοκιμή παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.1 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.1.



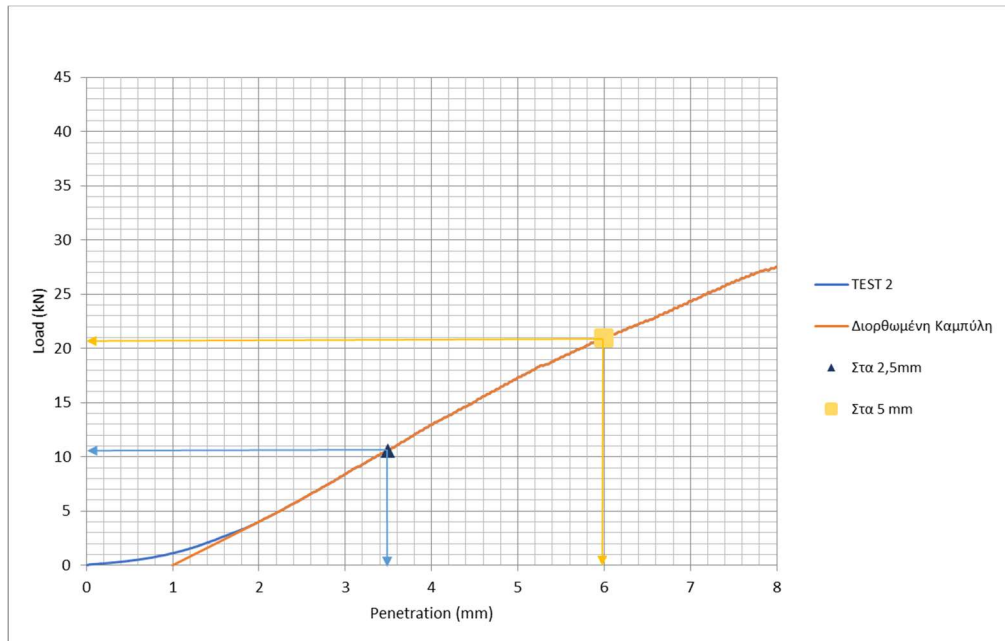
Εικόνα 7.1 Διάγραμμα διείσδυσης –φορτίου μίγματος Α, 1^η δοκιμή

Πίνακας 7.1 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Α, 1^η δοκιμή

Test 1	
CBR(kN) - 2.5mm	12,03
CBR(kN) - 5.0mm	23,72
CBR(%) - 2.5mm	87,85
CBR(%) - 5.0 mm	115,44

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.1 προκύπτει τιμή CBR = 115%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2183 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 2^η δοκιμή του μίγματος Α παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.2 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.2.



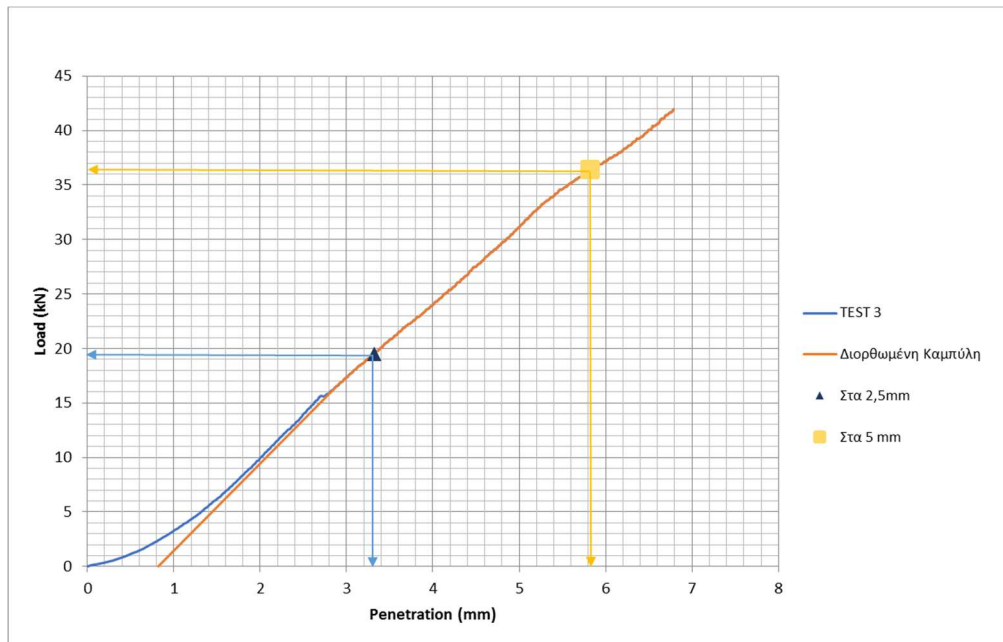
Σχήμα 7.2 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Α, 2^η δοκιμή

Πίνακας 7.2 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Α, 2^η δοκιμή

Test 2	
CBR(KN) - 2.5mm	10,59
CBR(KN) - 5.0mm	20,94
CBR(%) - 2.5mm	77,35
CBR(%) - 5.0 mm	101,90

Για την 2^η δοκιμή προέκυψε CBR = 102%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2193 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 3^η δοκιμή του μίγματος Α παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.3 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.3.



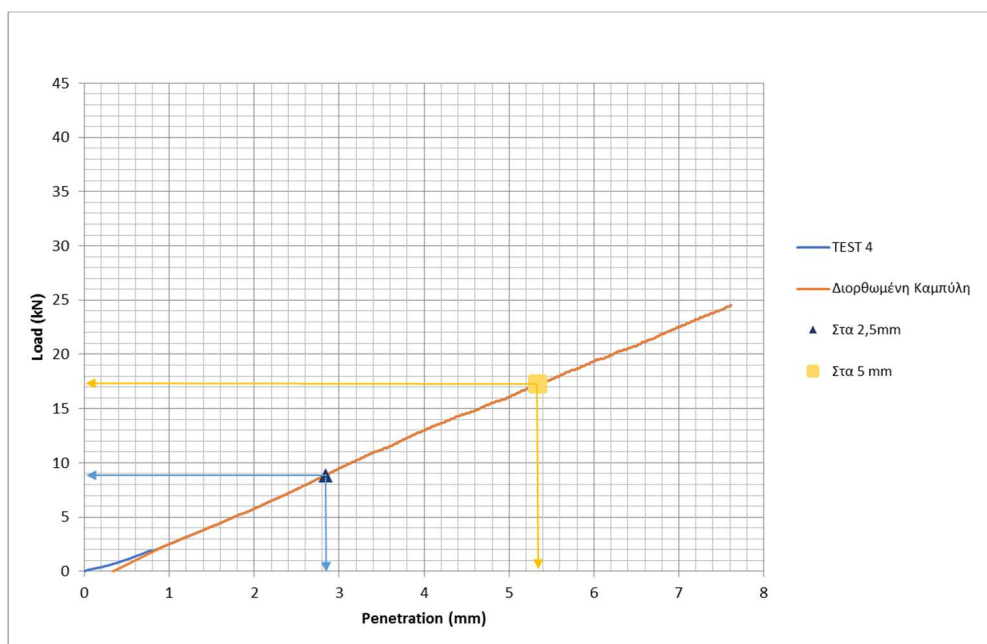
Σχήμα 7.3 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Α, 3^η δοκιμή

Πίνακας 7.3 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Α, 3^η δοκιμή

Test 3	
CBR(kN) - 2.5mm	19,48
CBR(kN) - 5.0mm	36,39
CBR(%) - 2.5mm	142,19
CBR(%) - 5.0 mm	177,09

Στην 3^η δοκιμή προκύπτει CBR = 177%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2135 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 4^η δοκιμή του μίγματος Α παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.4 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.4.



Σχήμα 7.4 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Α, 4^η δοκιμή

Πίνακας 7.4 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Α, 4^η δοκιμή

Test 4	
CBR(kN) - 2.5mm	8,86
CBR(kN) - 5.0mm	17,25
CBR(%) - 2.5mm	64,72
CBR(%) - 5.0 mm	83,96

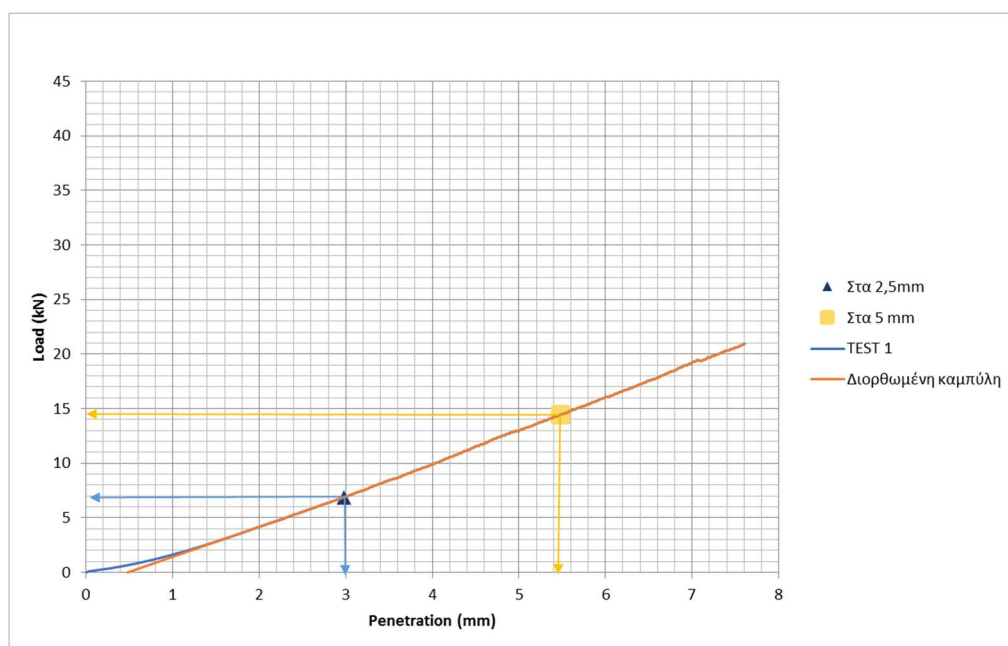
Στην 4^η δοκιμή προκύπτει CBR = 83%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2135 \text{ kg/m}^3$.

Για το μίγμα Α ο μέσος όρος των τιμών του CBR ισούται με CBR = 120% και η τυπική απόκλιση με $s = 40$. Η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι σχετικά υψηλή. Αυτή η απόκλιση μπορεί να οφείλεται σε κακή δειγματοληψία του υλικού. Δεδομένου επίσης πως με την αύξηση της ξηρής πυκνότητας ο δείκτης CBR μειώνεται, ενδεχομένως να υπάρχουν

περισσότερα χονδρόκοκα κλάσματα, τα οποία εμποδίζουν την διείσδυση και μειώνουν την ξηρή πυκνότητα. Επίσης, επειδή οι συγκεκριμένες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν πρώτες είναι πιθανόν οι έντονες διακυμάνσεις να οφείλονται σε απειρία.

Καμπύλες CBR μίγματος Β

Για το μίγμα Β πραγματοποιήθηκαν επίσης τέσσερις δοκιμές. Τα αποτελέσματα για την 1^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.5 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.5.



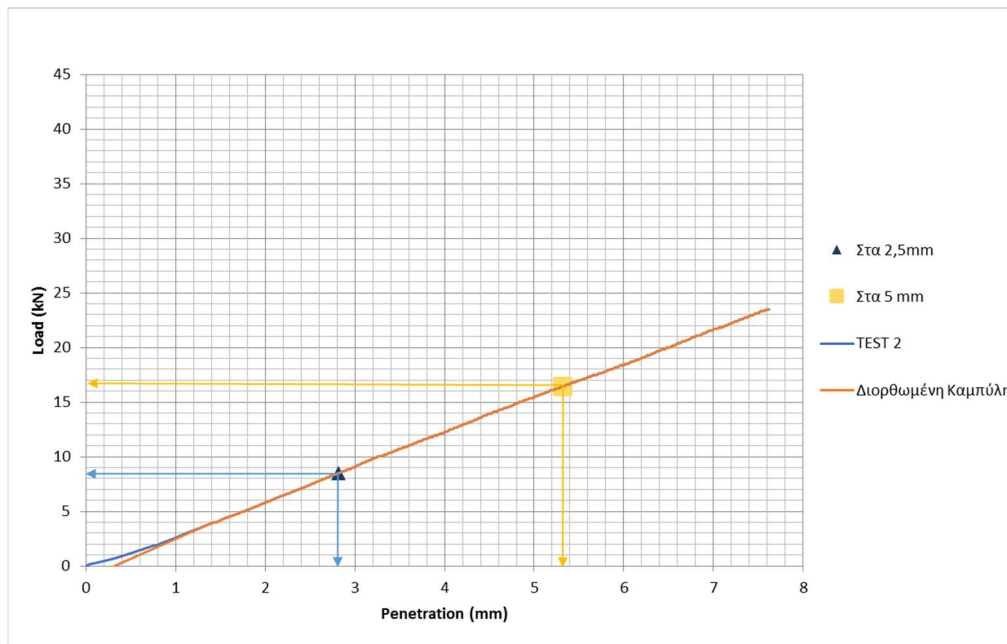
Εικόνα 7.5 Διάγραμμα διείσδυσης-φορτίου μίγματος Β, 1^η δοκιμή

Πίνακας 7.5 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Β, 1^η δοκιμή

Test 1	
CBR(kN) - 2.5mm	6,87
CBR(kN) - 5.0mm	14,45
CBR(%) - 2.5mm	50,17
CBR(%) - 5.0 mm	70,32

Για την 1^η δοκιμή προέκυψε CBR = 70%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2134 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 2^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.6 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.6.



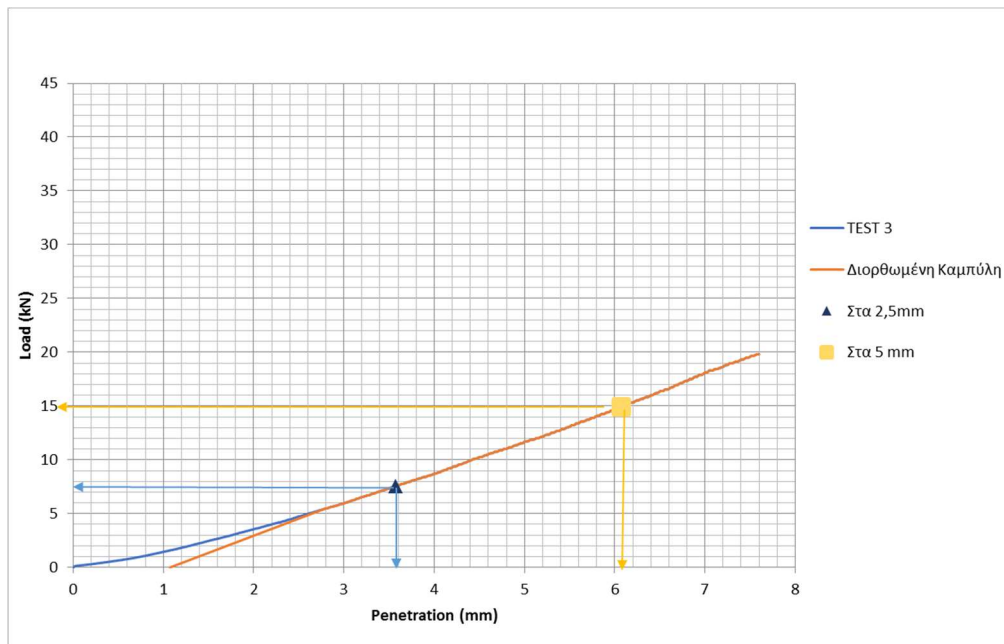
Εικόνα 7.6 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Β, 2^η δοκιμή

Πίνακας 7.6 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Β, 2^η δοκιμή

Test 2	
CBR(kN) - 2.5mm	8,497
CBR(kN) - 5.0mm	16,447
CBR(%) - 2.5mm	62,02
CBR(%) - 5.0 mm	80,03

Για την 2^η δοκιμή του μίγματος Β προέκυψε CBR = 80%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2127 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 3^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.7 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.7.



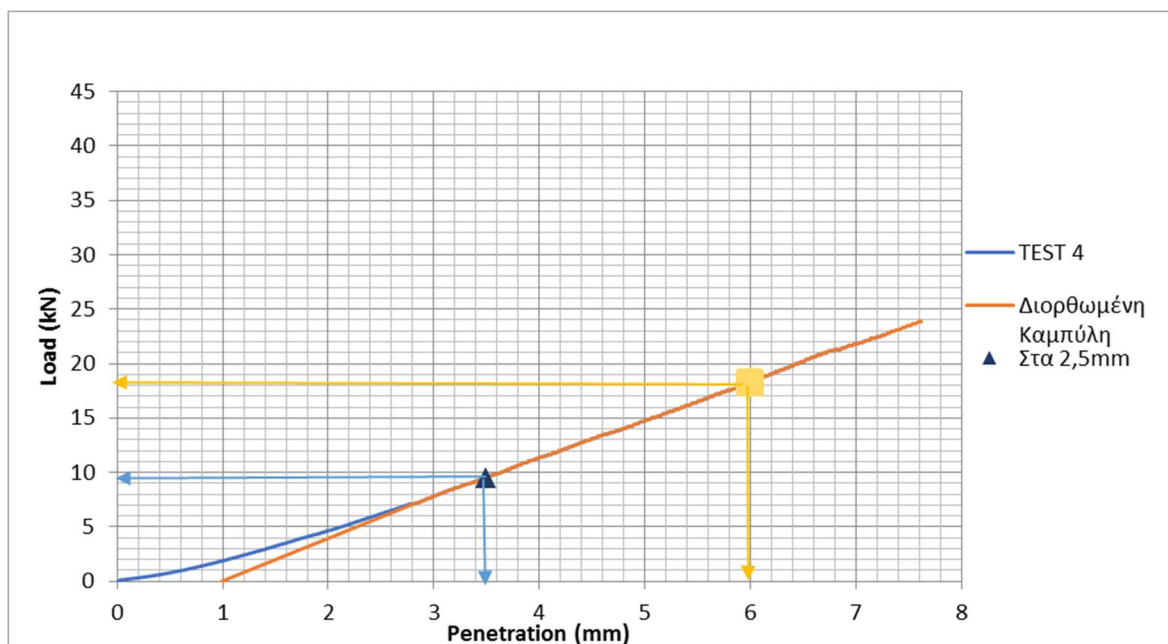
Εικόνα 7.7 Διάγραμμα διείσδυσης-φορτίου μίγματος Β, 3^η δοκιμή

Πίνακας 7.7 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Β, 3^η δοκιμή

Test 3	
CBR(kN) - 2.5mm	7,53
CBR(kN) - 5.0mm	14,94
CBR(%) - 2.5mm	54,98
CBR(%) - 5.0 mm	72,71

Για την 3^η δοκιμή προέκυψε CBR = 73%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2133 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 4^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.8 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.8.



Σχήμα 7.8 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Β, 4^η δοκιμή

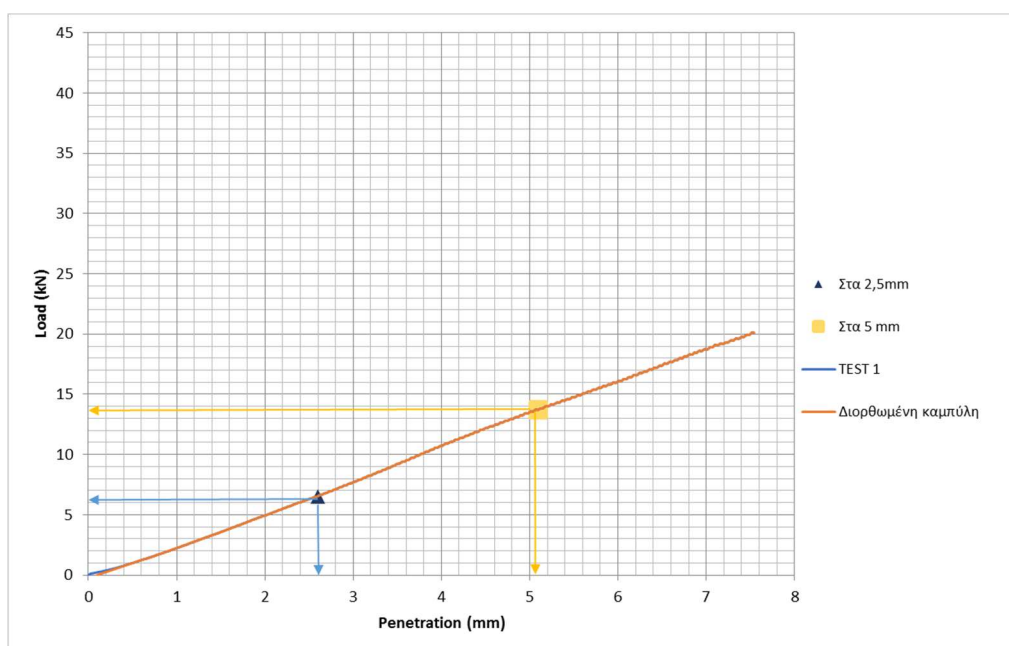
Πίνακας 7.8 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Β, 4^η δοκιμή

Test 4	
CBR(kN) - 2.5mm	9,517
CBR(kN) - 5.0mm	18,302
CBR(%) - 2.5mm	69,47
CBR(%) - 5.0 mm	89,06

Για την 4η δοκιμή προέκυψε CBR = 89%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2128 \text{ kg/m}^3$. Για το μίγμα Β ο μέσος όρος των τιμών του CBR ισούται με CBR = 78% και η τυπική απόκλιση με $s = 8,4$. Η μικρή τυπική απόκλιση υποδηλώνει πως το δείγμα ήταν ομογενές και η δειγματοληψία καλή.

Καμπύλες CBR μίγματος Γ

Για τον προσδιορισμό του δείκτη CBR του μίγματος Γ πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές. Τα αποτελέσματα για την 1^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.9 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.9.



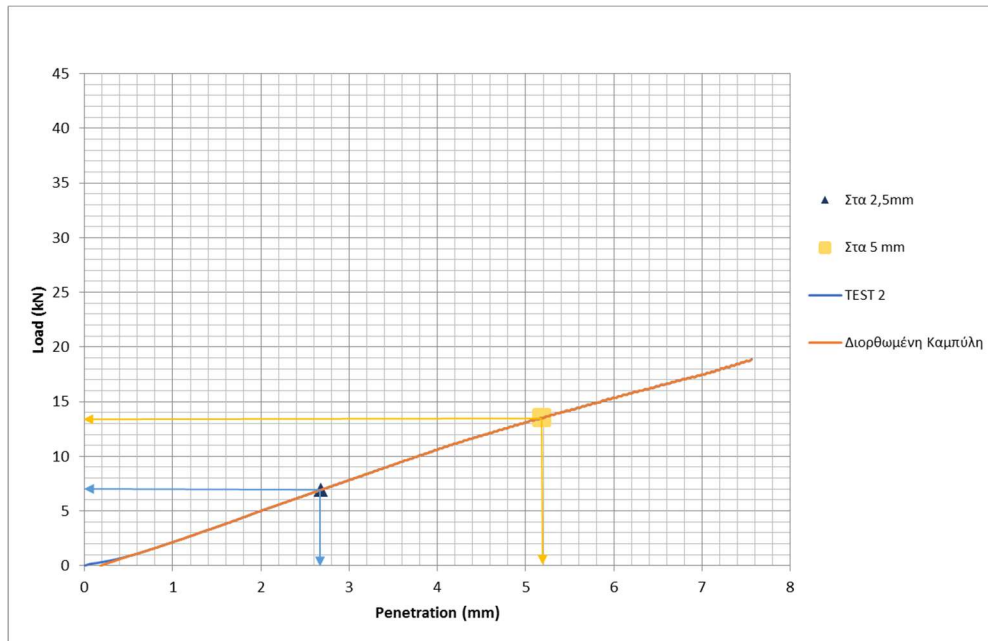
Σχήμα 7.9 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Γ, 1^η δοκιμή

Πίνακας 7.9 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Γ, 1^η δοκιμή

Test 1	
CBR(kN) - 2.5mm	6,55
CBR(kN) - 5.0mm	13,72
CBR(%) - 2.5mm	47,83
CBR(%) - 5.0 mm	66,77

Για την 1^η δοκιμή προέκυψε CBR = 67%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2041 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 2^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.10 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.10.



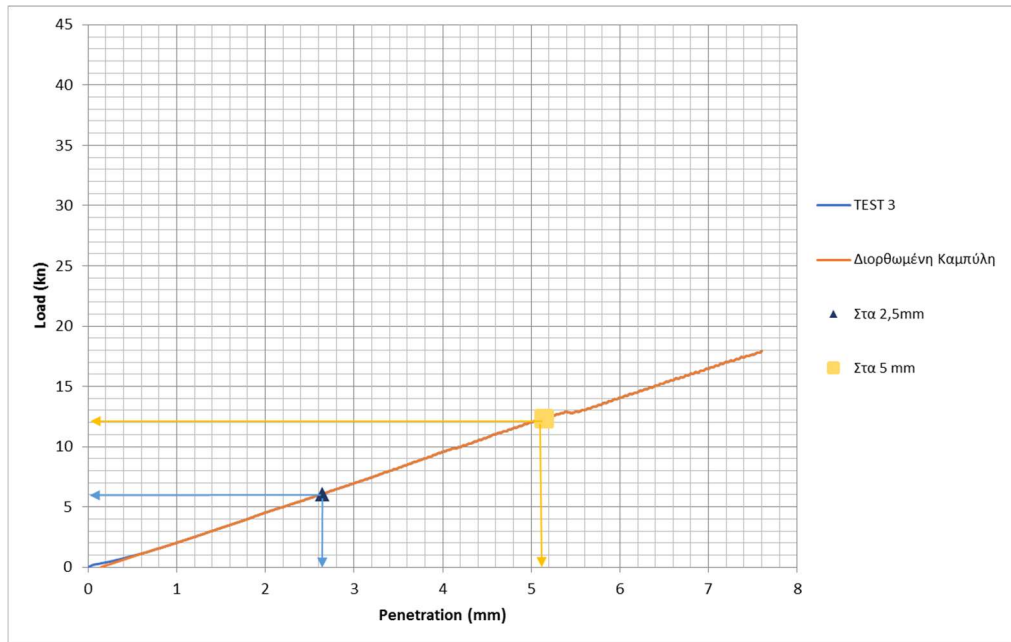
Σχήμα 7.10 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Γ, 2^η δοκιμή

Πίνακας 7.10 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Γ, 2^η δοκιμή

Test 2	
CBR(kN) - 2.5mm	6,94
CBR(kN) - 5.0mm	13,51
CBR(%) - 2.5mm	50,67
CBR(%) - 5.0 mm	65,74

Για την 2^η δοκιμή προέκυψε CBR = 66%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2064 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 3^η δοκιμή του περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.11 και παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.11.



Σχήμα 7.11 Διάγραμμα διεξόδου-φορτίου μίγματος Γ, 3^η δοκιμή

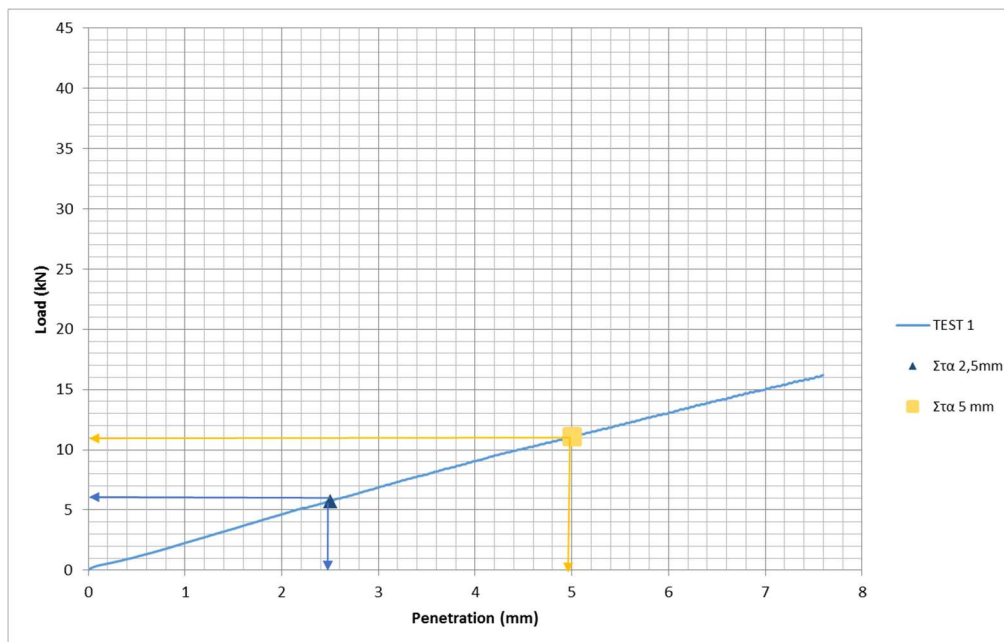
Πίνακας 7.11 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Γ, 3^η δοκιμή

Test 3	
CBR(kN) - 2.5mm	6,064
CBR(kN) - 5.0mm	12,315
CBR(%) - 2.5mm	44,26
CBR(%) - 5.0 mm	59,93

Για την 3^η δοκιμή προέκυψε CBR = 60%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2057 \text{ kg/m}^3$. Για το μίγμα Γ ο μέσος όρος του CBR ισούται με CBR = 64% και η τυπική απόκλιση $s = 3.6$. Η μικρή τυπική απόκλιση υποδηλώνει πως το μίγμα ήταν αντιπροσωπευτικό.

Καμπύλες CBR μίγματος Δ

Για τον προσδιορισμό του δείκτη φέρουσας ικανότητας του μίγματος Δ πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές. Τα αποτελέσματα για την 1^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.12 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.12.



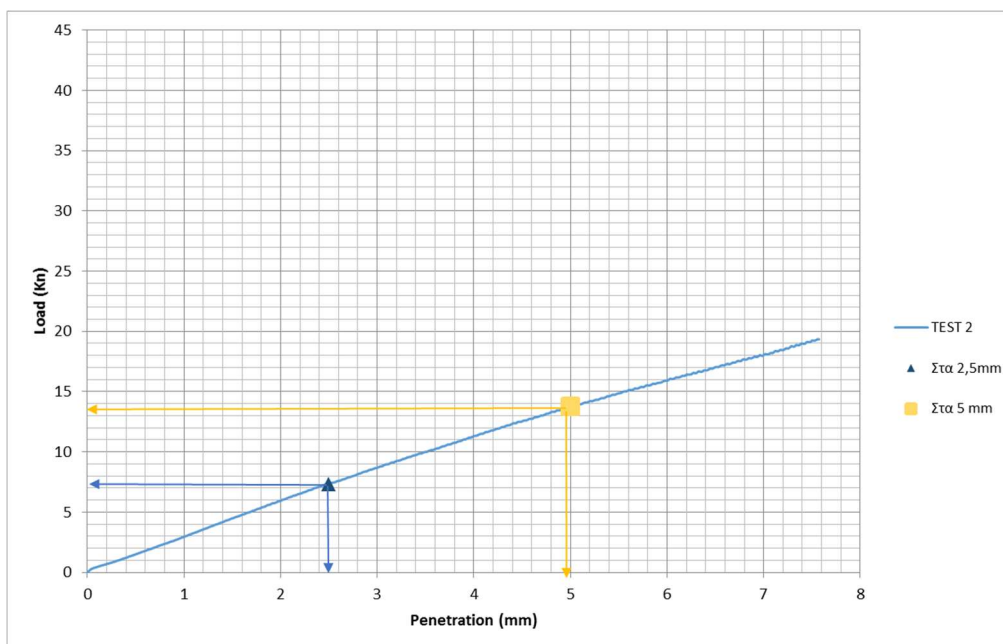
Σχήμα 7.12 Διάγραμμα διεξόδου-φορτίου μίγματος Δ, 1^η δοκιμή

Πίνακας 7.12 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Δ, 1^η δοκιμή

Test 1	
CBR(kN) - 2.5mm	5,76
CBR(kN) - 5.0mm	11,07
CBR(%) - 2.5mm	42,04
CBR(%) - 5.0 mm	53,89

Η 1^η δοκιμή δεν χρειάστηκε να διόρθωση της καμπύλης καθώς δεν στρέφει τα κοίλα προς τα άνω στην αρχή της. Για την 1^η δοκιμή προέκυψε CBR = 54%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2041 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 2^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.13 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.13.



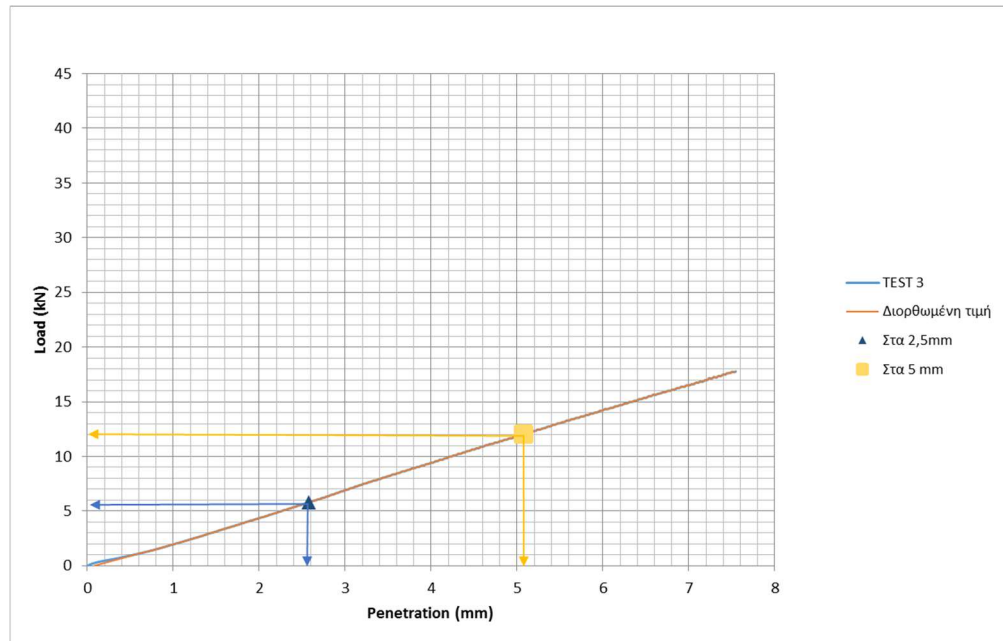
Σχήμα 7.13 Διάγραμμα διείδυσης- μίγματος Δ, 2^η δοκιμή

Πίνακας 7.13 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Δ, 2^η δοκιμή

Test 2	
CBR(kN) - 2.5mm	7,356
CBR(kN) - 5.0mm	13,756
CBR(%) - 2.5mm	53,69
CBR(%) - 5.0 mm	66,94

Στην συγκεκριμένη δοκιμή επίσης δεν χρειάστηκε διόρθωση. Για την 2^η δοκιμή προέκυψε CBR = 67%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2064 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 3^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.14 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.14.



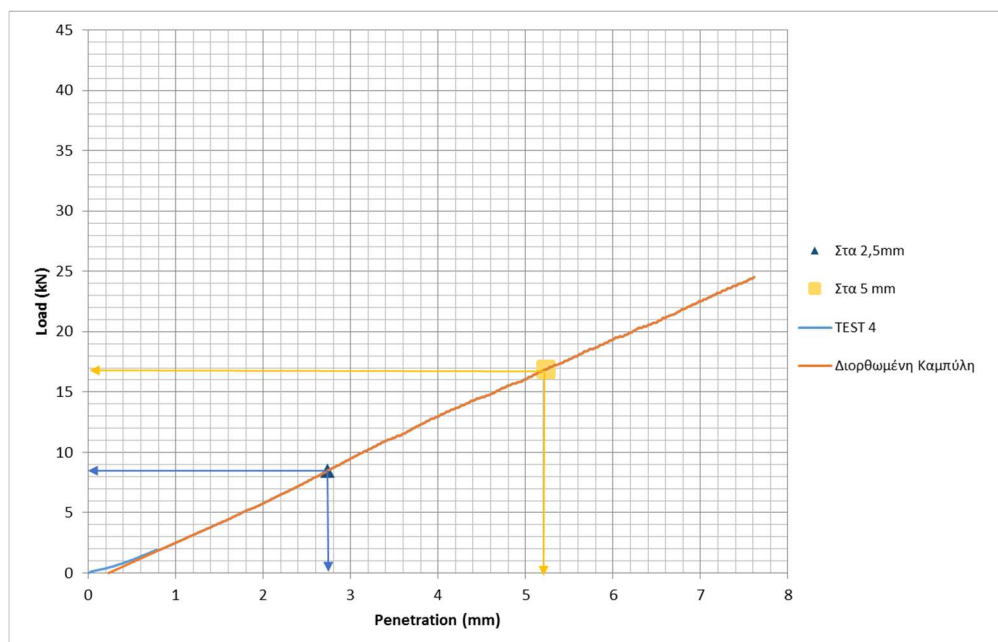
Σχήμα 7.14 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Δ, 3^η δοκιμή

Πίνακας 7.14 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Δ, 3^η δοκιμή

Test 3	
CBR(kN) - 2.5mm	5,816
CBR(kN) - 5.0mm	12,01
CBR(%) - 2.5mm	42,45
CBR(%) - 5.0 mm	58,44

Για την 3^η δοκιμή προέκυψε CBR = 58%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2057 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 4^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.15 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.15.



Σχήμα 7.15 Διάγραμμα διείσδυσης-φορτίου μίγματος Δ, 4^η δοκιμή

Πίνακας 7.15 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Δ, 4^η δοκιμή

Test 4	
CBR(kN) - 2.5mm	8,49
CBR(kN) - 5.0mm	16,87
CBR(%) - 2.5mm	61,99
CBR(%) - 5.0 mm	82,11

Για την 4^η δοκιμή προέκυψε CBR = 82%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2096 \text{ kg/m}^3$.

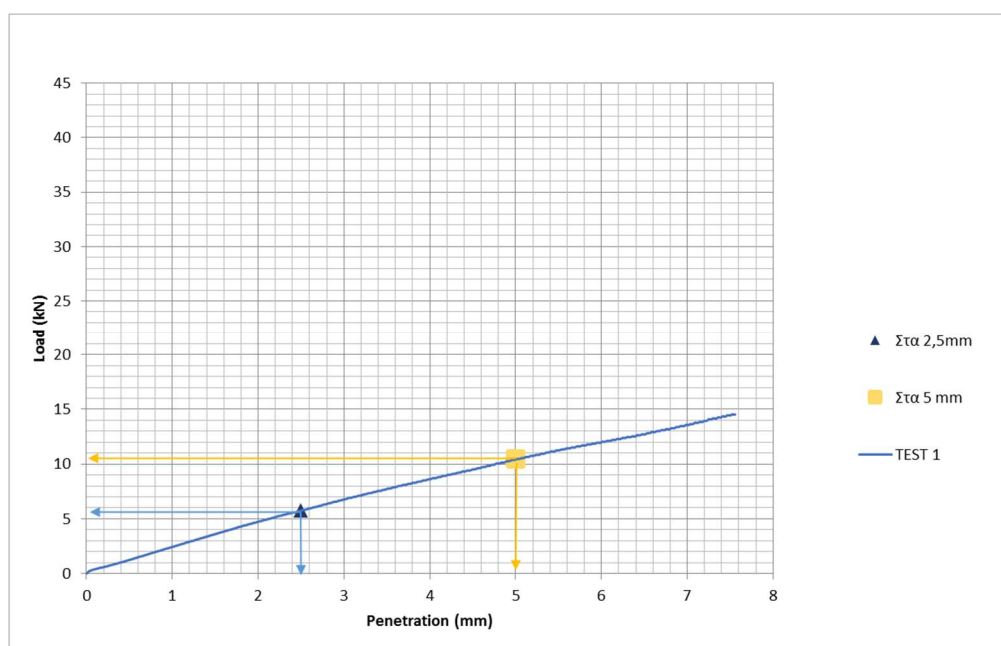
Η τιμή CBR είναι σχετικά μεγάλη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, για το λόγο αυτό δεν θεωρείται ρεαλιστική. Η υψηλότερη τιμή πιθανότατα οφείλεται στην παρουσία μεγάλου τέμαχους εντός της περιμέτρου της βελόνας διείσδυσης.

Ο μέσος όρος του CBR και η τυπική του απόκλιση υπολογίστηκε βάσει των τριών άλλων τιμών. Για το μίγμα Δ ο μέσος όρος του CBR ισούται με CBR = 60% και η τυπική απόκλιση

s = 6.6. Η μικρή τυπική απόκλιση υποδηλώνει πως το μίγμα το δείγμα ήταν ομογενές και η δειγματοληψία καλή.

Καμπύλες CBR μίγματος Ε

Για το μίγμα Ε πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές CBR. Τα αποτελέσματα για την 1^η δοκιμή παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.16 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.16.



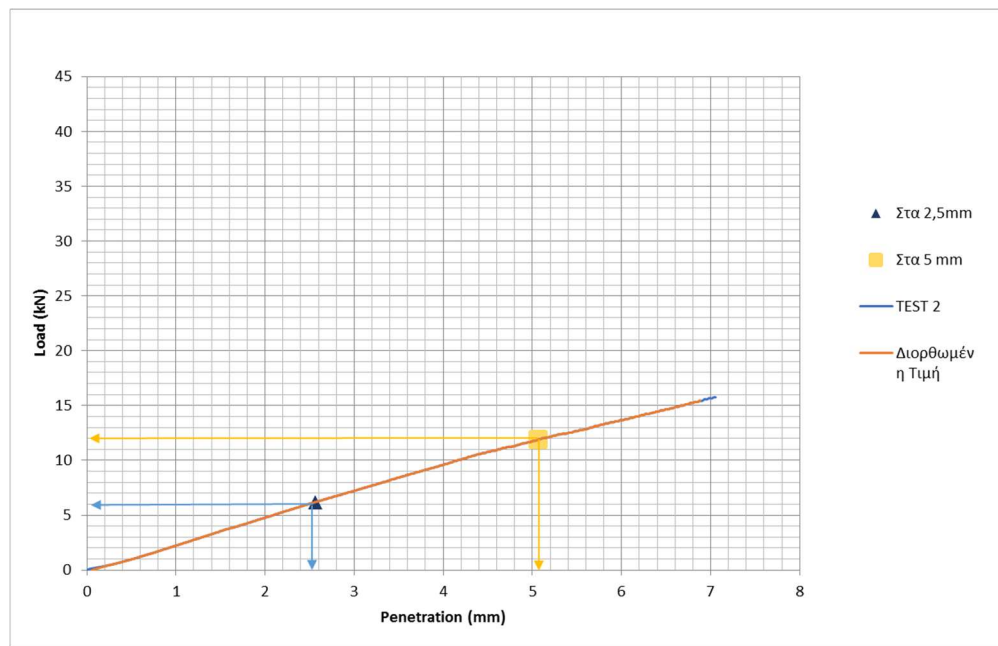
Εικόνα 7.16 Διάγραμμα διεύθυνσης-φορτίου μίγματος Ε, 1^η δοκιμή

Πίνακας 7.16 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Ε, 1^η δοκιμή

Test 1	
CBR(kN) - 2.5mm	5,74
CBR(kN) - 5.0mm	10,43
CBR(%) - 2.5mm	41,95
CBR(%) - 5.0 mm	50,78

Στην συγκεκριμένη δοκιμή δεν χρειάστηκε διόρθωση. Για την 1^η δοκιμή προέκυψε CBR = 51%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2029 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 2^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.17 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.17.



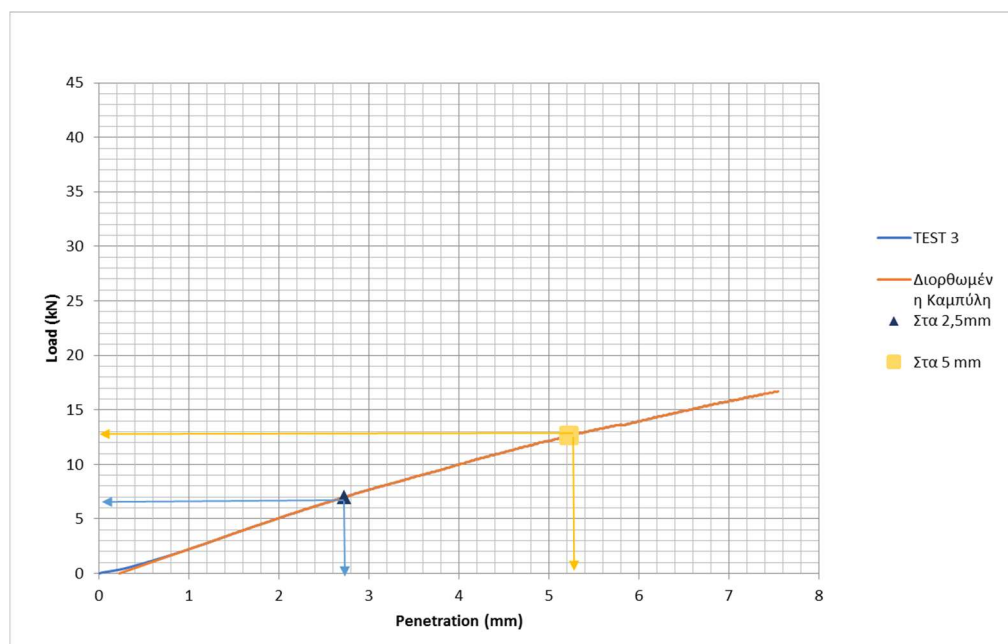
Σχήμα 7.17 Διάγραμμα διείσδυσης-φορτίου μίγματος Ε, 2^η δοκιμή

Πίνακας 7.17 Τιμή δείκτη CBR μίγματος Ε, 2^η δοκιμή

Test 2	
CBR(KN) - 2.5mm	6,20
CBR(KN) - 5.0mm	11,88
CBR(%) - 2.5mm	45,28
CBR(%) - 5.0 mm	57,83

Για την 2^η δοκιμή προέκυψε CBR = 58%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2056 \text{ kg/m}^3$.

Τα αποτελέσματα για την 3^η δοκιμή του παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.18 και περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.18.



Σχήμα 7.18 Διάγραμμα διείδυσης-φορτίου μίγματος E, 3^η δοκιμή

Πίνακας 7.18 Τιμή δείκτη CBR μίγματος E, 3^η δοκιμή

Test 3	
CBR(KN) - 2.5mm	6,99
CBR(KN) - 5.0mm	12,63
CBR(%) - 2.5mm	51,05
CBR(%) - 5.0 mm	61,50

Για την 3^η δοκιμή προέκυψε CBR = 61%, ενώ η ξηρή πυκνότητα του μίγματος είχε μετρηθεί $\rho_d = 2038 \text{ kg/m}^3$. Για το μίγμα E ο μέσος όρος του CBR ισούται με CBR = 57% και η τυπική απόκλιση $s = 5.4$. Η μικρή τυπική απόκλιση υποδηλώνει πως το μίγμα ήταν το δείγμα ήταν ομογενές και η δειγματοληψία καλή.

7.1.2 Σχέση CBR και Ξηρής Πυκνότητας

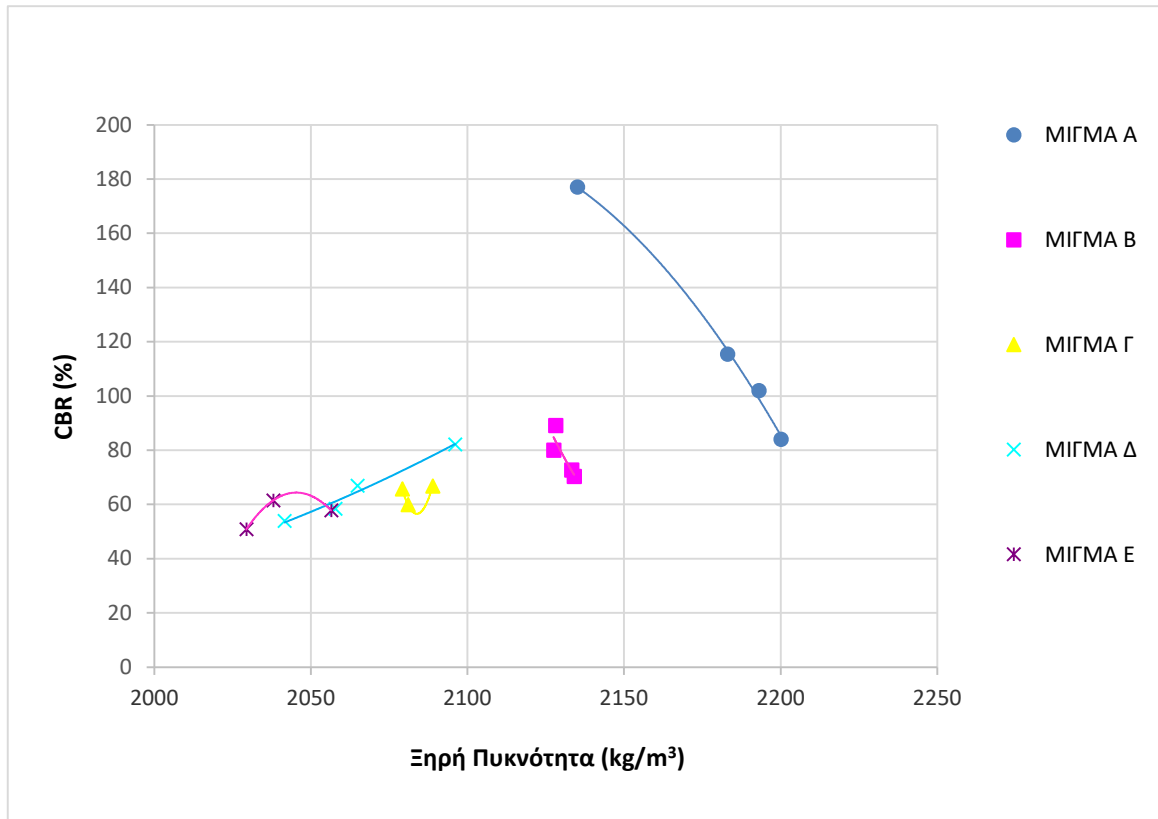
Οι τιμές του δείκτη CBR και οι αντίστοιχες τιμές της ξηρής πυκνότητας περιλαμβάνονται στον πίνακα 7.19.

Πίνακας 7.19 Τιμές CBR και αντίστοιχων τιμών Ξηρής Πυκνότητας

ΜΙΓΜΑ Α	ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m³	2183	2193	2135	2200
	CBR(%)	115	102	177	84
ΜΙΓΜΑ Β	ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m³	2134	2127	2133	2128
	CBR(%)	70	80	73	89
ΜΙΓΜΑ Γ	ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m³	2088	2079	2080	-
	CBR(%)	67	66	60	-
ΜΙΓΜΑ Δ	ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m³	2041	2064	2057	-
	CBR(%)	54	67	58	-
ΜΙΓΜΑ Ε	ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ kg/m³	2029	2056	2038	-
	CBR(%)	51	58	61	-

Γενικά είναι γνωστό ότι όσο αυξάνεται η ξηρή πυκνότητα ενός ασύνδετου κοκκώδους υλικού, αυξάνεται και η αντοχή του. (Fredrick Lekarp, Ulf Isacsson & Andrew Dawson, 2000). Επομένως ο δείκτης CBR, ως παράμετρος έκφρασης της φέρουσας ικανότητας, θα αυξάνεται. Στα αποτελέσματα του πίνακα 7.19 φαίνεται ότι η αύξηση της ξηρής πυκνότητας, οδηγεί σε αύξηση του CBR μόνο για το μίγμα Δ. Αντίθετα για τα μίγματα Α και Β παρατηρείται μείωση του δείκτη CBR με την αύξηση της πυκνότητας, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στην παρουσία χονδρόκοκκου υλικού εντός της περιμέτρου της

βελόνας. Επισημαίνεται πως για τα μίγματα Γ και Ε δεν παρατηρείται σαφή σχέση μεταξύ ξηρής πυκνότητας-CBR. Οι παρατηρήσεις αυτές αναπαρίστανται επίσης στην Εικόνα 7.19.



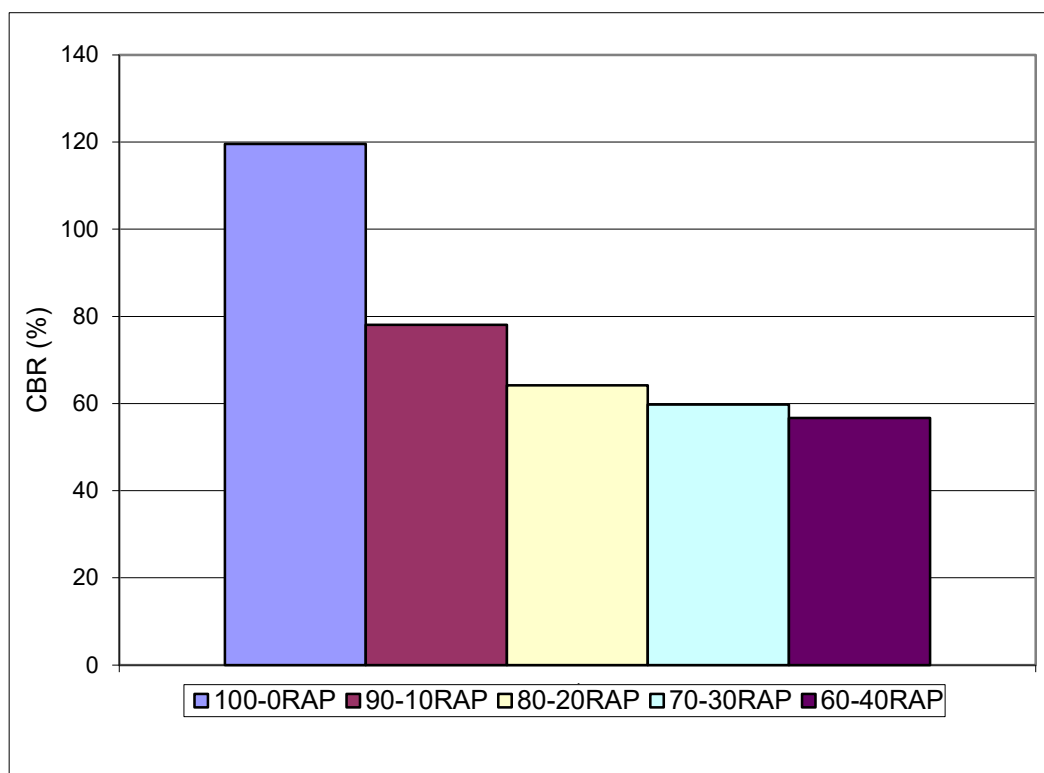
Εικόνα 7.19 Τιμές CBR- Ξηρής πυκνότητας

Βάσει των παραπάνω δεν προκύπτει κάποια αναλογική σχέση που να καθορίζει τη μεταβολή του ενός μεγέθους σε σχέση με τη μεταβολή του άλλου.

7.1.3 Συγκριτική αξιολόγηση

Γενικά παρατηρείται μια μείωση του CBR όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε RAP όπως είχε παρατηρήσει και ο Ayan (2011). Συγκεκριμένα με χρήση 10% RAP σε υλικό 3A παρατηρείται μείωση της τιμής του CBR κατά 35% της τιμής για 3A. Η μείωση αυτή αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP, έτσι για περιεκτικότητα 40% σε RAP παρατηρείται μείωση κατά 50% της τιμής του CBR σε σύγκριση με το μίγμα 3A (Εικόνα 7.20).

Όμως παρατηρείται ότι οι μεταβολές του δείκτη CBR δεν είναι σημαντικές μεταβαίνοντας από το μίγμα των 80-20 RAP, στο 70-30 RAP και μετά στο 60-40 RAP. Κατά μέσο όρο η μέση μεταβολή είναι της τάξης του 10%.



Εικόνα 7.20 Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων μιγμάτων-τιμών δείκτη CBR

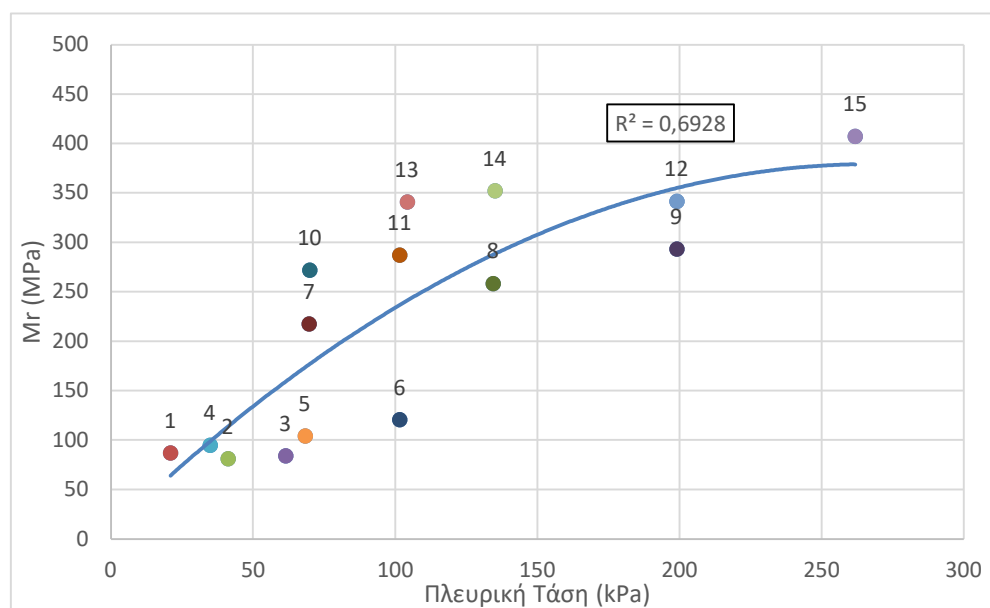
Σύμφωνα με τον Οίο (2010) πρέπει να χρησιμοποιείται RAP έως 50% σε συνδυασμό με παρθένο υλικό (αμμοχάλικο) με τιμές CBR > 80% για βάσεις και > 60 για υποβάσεις. Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας τα δείγματα Β, Γ και οριακά το Δ είναι αποδεκτά για χρήση σε στρώση υπόβασης. Επειδή, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, η συμπύκνωση δεν πραγματοποιήθηκε πρότυπα, αλλά έγινε με λιγότερους χτύπους, πιθανώς και το υλικό Ε να είναι κατάλληλο για χρήση ως υλικό υπόβασης. Ομοίως και το μίγμα Β θα μπορούσε να είναι κατάλληλο για χρήση σε βάσεις.

7.2 Αναλύσεις μετρήσεων τριαξονικής δοκιμής

7.2.1 Καμπύλες Mr-Αξονικής Τάσης

Ο προσδιορισμός του μέτρου επανάκτησης πραγματοποιήθηκε βάσει του AASHTO T 307-99, σύμφωνα με την διαδικασία, η οποία αναφέρεται στην παράγραφο 6.5.2. Τα σχετικά στοιχεία περιλαμβάνονται στους πίνακες Π2, Π3, Π4, Π5, Π6 του παραρτήματος, ενώ στις εικόνες 7.21 – 7.25 παρουσιάζονται οι καμπύλες Mr - αξονικής τάσης που αναπτύχθηκαν. Σε κάθε μίγμα η καμπύλη τάσης επιλέχθηκε βάσει του υψηλότερου συντελεστή προσαρμογής R^2 , ενώ οι εμφανιζόμενες τιμές (1 - 15) αναφέρονται στα στάδια φόρτισης.

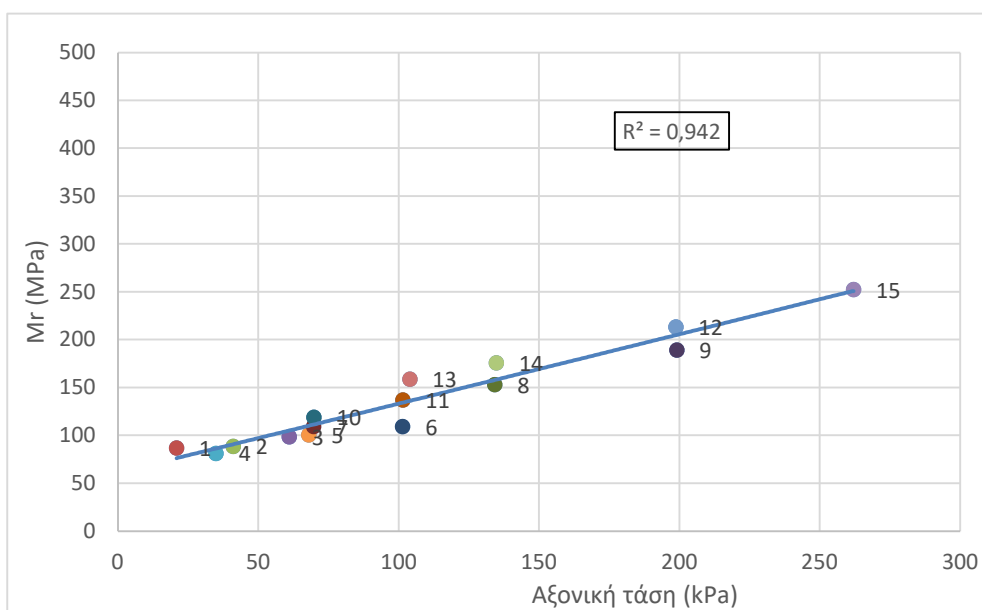
Για το μίγμα Α η καμπύλη Mr – αξονικής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.21. Ύστερα από διερεύνηση προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής του ίσος με $R^2=0,6928$ και η καμπύλη τάσης, για τις τιμές Mr – αξονικής τάσης, πολυωνυμικής μορφής. Η μορφή της καμπύλης αυτής αποδεικνύει τη μη γραμμικότητα των τιμών.



Εικόνα 7.21 Τιμές Mr- αξονικής τάσης μίγματος Α

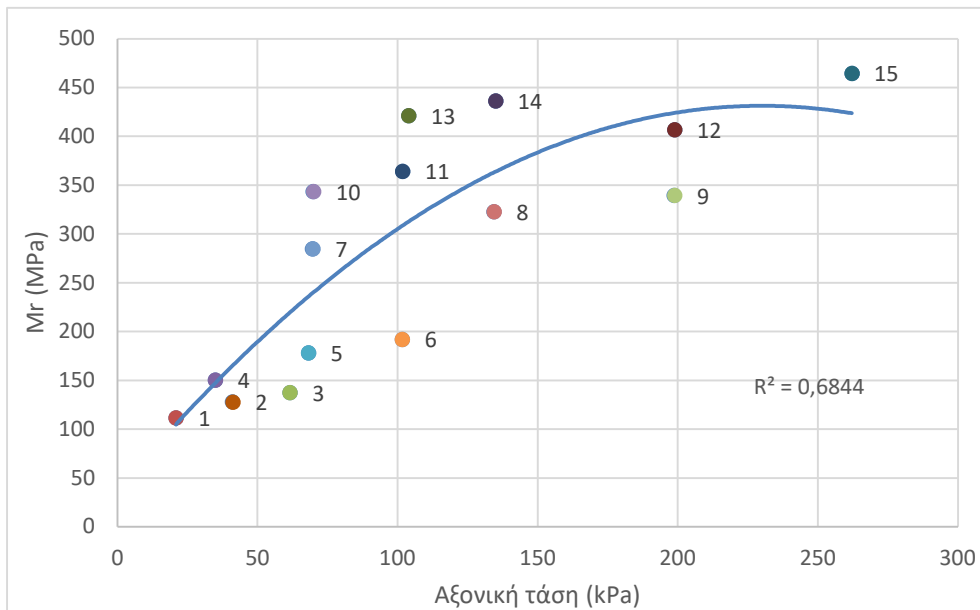
Για το μίγμα Β η καμπύλη Mr - αξονικής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.22. Ύστερα από διερεύνηση προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής του ίσος με $R^2=0,942$ και η καμπύλη τάσης, για τις τιμές Mr – αξονικής τάσης, γραμμικής μορφής. Συσχέτιση η οποία δεν είναι ρεαλιστική για ασύνδετα υλικά. Επιπλέον η μέγιστη τιμή του Mr είναι 252 MPa σε αντίθεση με των μιγμάτων Α, Γ, Δ και Ε τα οποία εμφανίζουν μέγιστη τιμή 406, 464, 454 και 458 MPa αντίστοιχα. Βάσει του δείκτη CBR, ο οποίος για το μίγμα Β είναι

υψηλότερος από τα μίγματα Γ, Δ και Ε αναμέναμε υψηλότερη τιμές M_r . Ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στο συμπέρασμα πως ενδεχομένως υπήρξε πειραματική αστοχία.



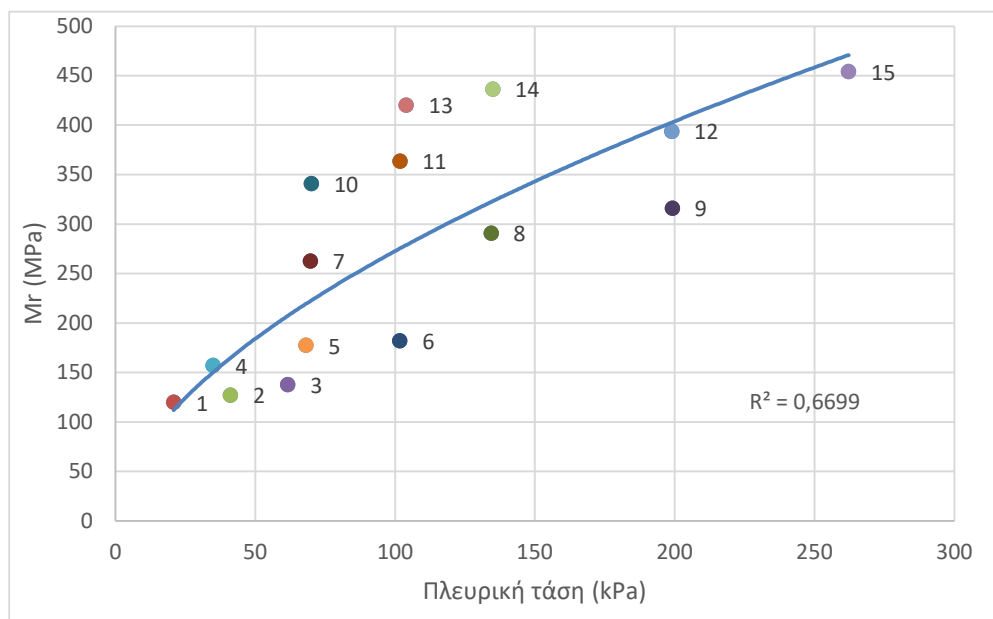
Εικόνα 7.22 Τιμές M_r - αξονικής τάσης μίγματος Β

Για το μίγμα Γ η καμπύλη M_r - αξονικής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.23. Ύστερα από διερεύνηση προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής του ίσος με $R^2=0,6864$ και η καμπύλη τάσης, για τις τιμές M_r - αξονικής τάσης, λογαριθμικής μορφής. Η μορφή της καμπύλης αυτής αποδεικνύει τη μη γραμμικότητα των τιμών. Στο μίγμα Γ παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το μίγμα Α.



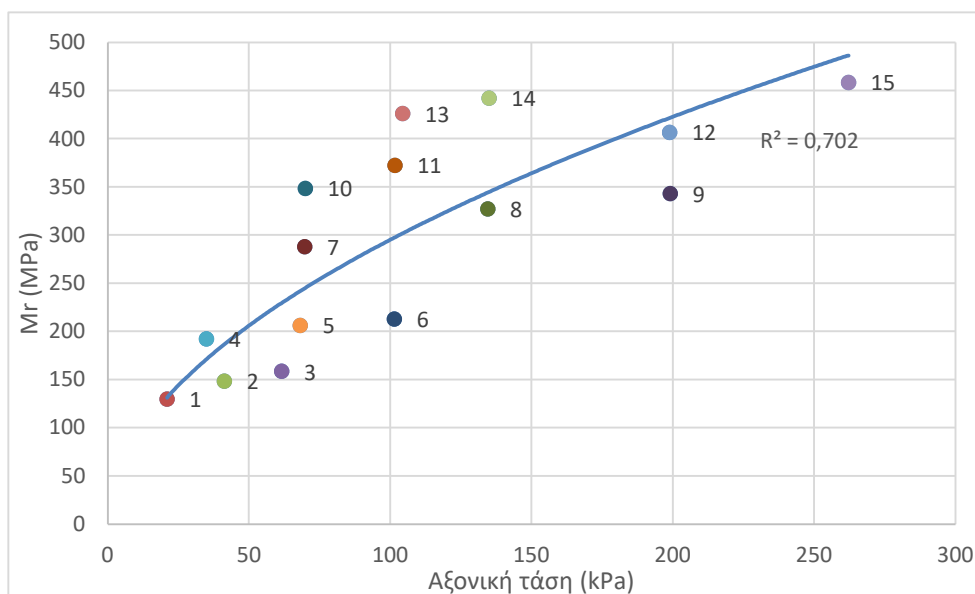
Εικόνα 7.23 Τιμές M_r - αξονικής τάσης μίγματος Γ

Για το μίγμα Δ η καμπύλη M_r - αξονικής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.24. Ύστερα από διερεύνηση προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής για το μίγμα Δ ίσος με $R^2=0,6699$ και η καμπύλη τάσης, για τις τιμές M_r – αξονικής τάσης, πολυωνυμικής μορφής. Η μορφή της καμπύλης αυτής αποδεικνύει τη μη γραμμικότητα των τιμών. Το μίγμα Δ εμφανίζει λίγο μικρότερο μέτρο επανάκτησης σε σύγκριση με το μίγμα Γ.



Εικόνα 7.24 Τιμές M_r - αξονικής τάσης μίγματος Δ

Για το μίγμα Ε η καμπύλη M_r - αξονικής τάσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.25. Ύστερα από διερεύνηση προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής ίσος με $R^2=0,702$ και η καμπύλη τάσης, για τις τιμές M_r – αξονικής τάσης, πολυωνμικής μορφής. Η μορφή της καμπύλης αυτής αποδεικνύει τη μη γραμμικότητα των τιμών. Τέλος, το μίγμα Ε εμφανίζει μέτρο επανάκτησης ανάμεσα στα μίγματα Γ και Δ.



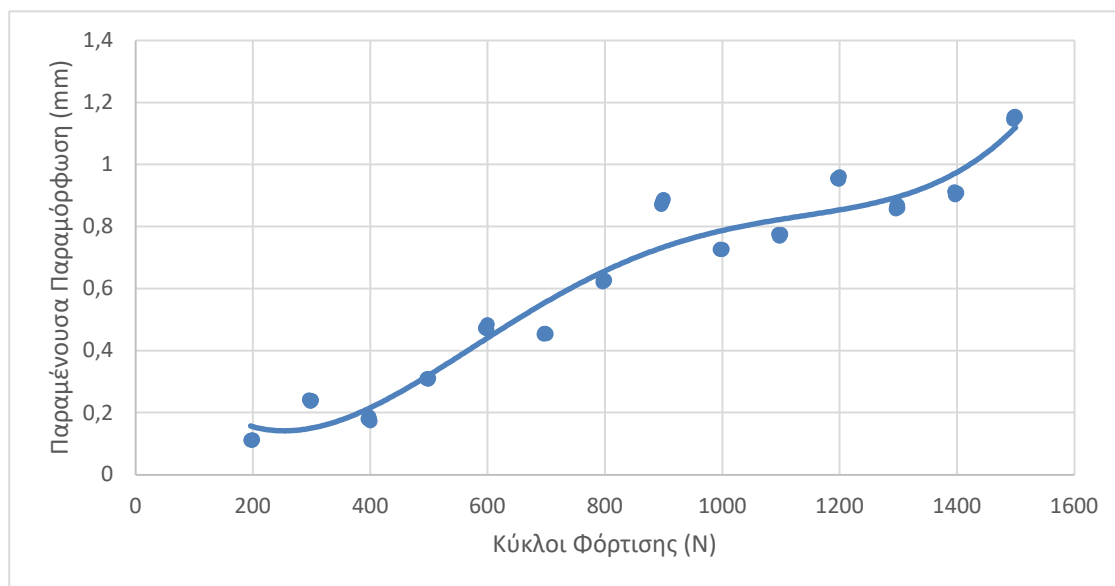
Εικόνα 7.25 Τιμές M_r - αξονικής τάσης μίγματος Ε

Σε όλα τα μίγματα παρατηρείται αύξηση του μέτρου επανάκτησης με την πάροδο των κύκλων φόρτισης. Όπως αναφέρει και ο Dehlevn (1969), οι αρχικοί κύκλοι φόρτισης συμπυκνώνουν το υλικό και προκαλούν αναδιάταξη των σωματιδίων στον ιστό, για επαναλαμβανόμενες εφαρμογές φορτίου.

7.2.2 Προσδιορισμός μόνιμων παραμορφώσεων

Από τις δοκιμές τριαξονικής δοκιμής προσδιορίστηκε η παραμένουσα παραμόρφωση για κάθε μίγμα. Το μίγμα Β λόγω των αβεβαιοτήτων που προέκυψαν δεν εξετάστηκε ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση.

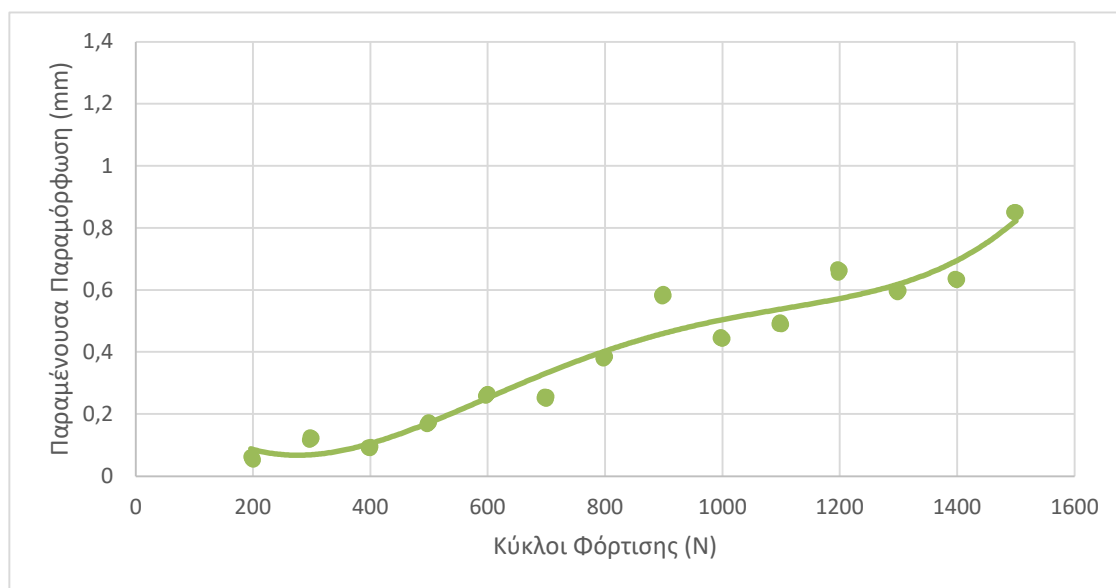
Για το μίγμα Α η παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.26.



Εικόνα 7.26 Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-κύκλοι φόρτισης μίγματος Α

Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για το μίγμα Α ισούται με $\epsilon_p=1,15$ mm.

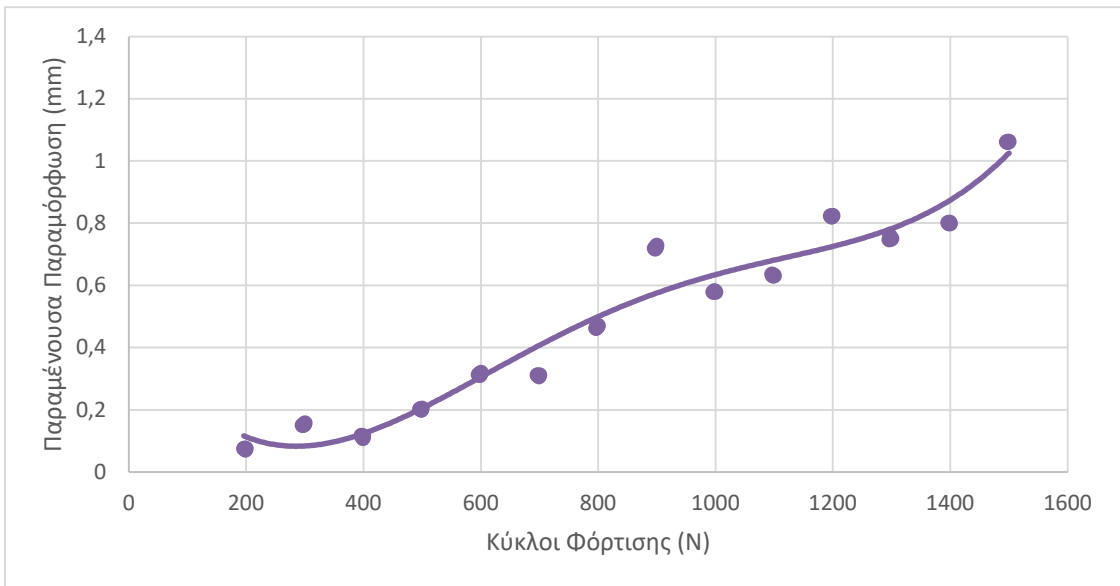
Για το μίγμα Γ η παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.27.



Εικόνα 7.27 Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-κύκλοι φόρτισης μίγματος Γ

Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για το μίγμα Γ ισούται με $\epsilon_p=0,85$ mm.

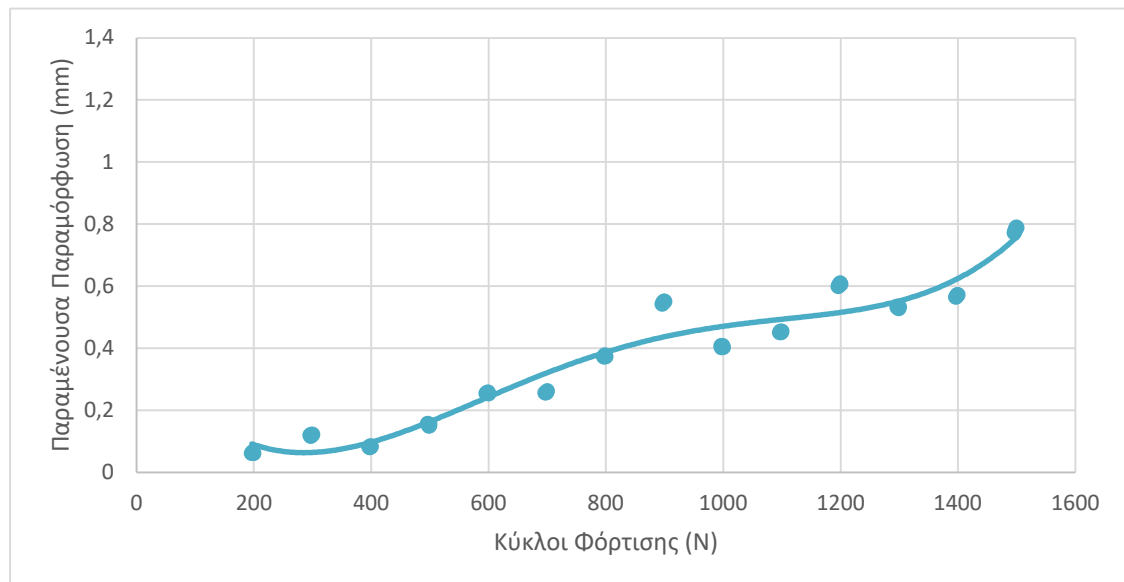
Για το μίγμα Δ η παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.28.



Εικόνα 7.28 Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-κύκλων φόρτισης μίγματος Δ

Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για το μίγμα Δ ισούται με $\epsilon_p=1,06$ mm

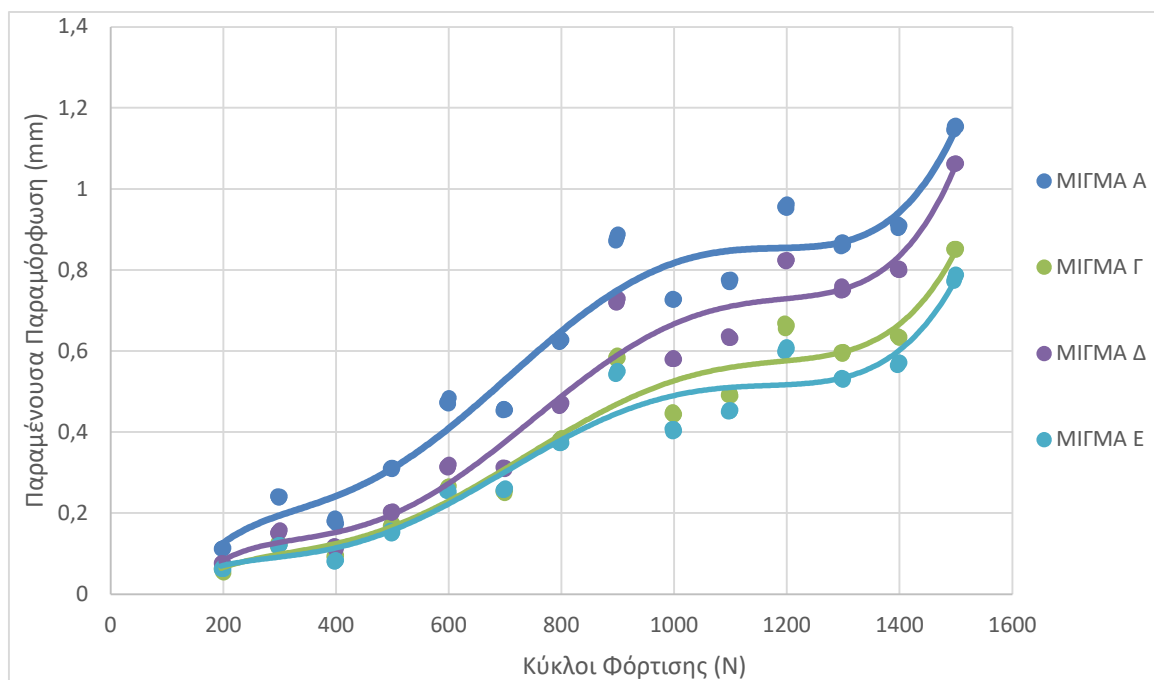
Για το μίγμα Ε η παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.29.



Εικόνα 7.29 Διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης-κύκλων φόρτισης μίγματος Ε

Η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση για το μίγμα Ε ισούται με $\epsilon_p=0,78$ mm.

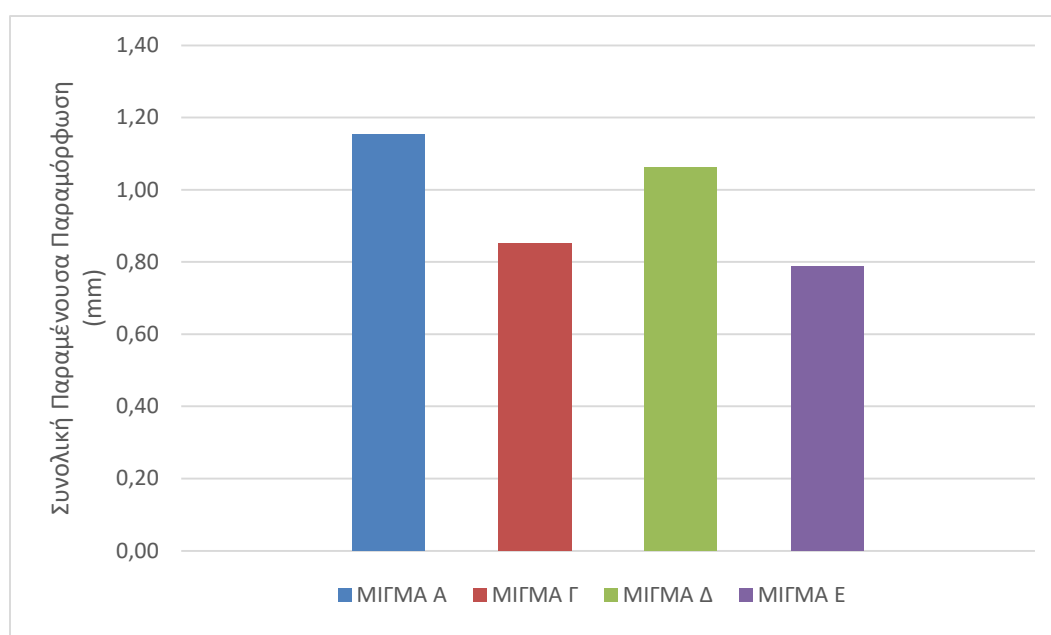
Συγκεντρωτικό διάγραμμα όλων των μιγμάτων παραμένουσα παραμόρφωση συναρτήσει του αριθμού των κύκλων φόρτισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.29



Εικόνα 7.30 Συγκεντρωτικό διάγραμμα παραμένουσας παραμόρφωσης- κύκλων φόρτισης μιγμάτων

Σε όλα τα μίγματα παρατηρείται αύξηση της συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης με την αύξηση των επιβαλλόμενων κύκλων. Επιπλέον όλα τα μίγματα εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Στην Εικόνα 7.31 παρουσιάζονται οι συνολικές παραμένουσες παραμορφώσεις ανά μίγμα.



Εικόνα 7.31 Συγκεντρωτική παρουσίαση μιγμάτων –τιμών συνολικής παραμένουσας παραμόρφωσης

Παρατηρείται ότι, οι τιμές των παραμενουσών παραμορφώσεων είναι πολύ μικρές ($\leq 1,15$ mm). Επίσης, οι υπόψη τιμές μίγματα με RAP είναι μικρότερες από αυτή του παρθένου αδρανούς υλικού (3A). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα ερευνητών όπως ο Maher (2005), ο οποίος έχει δείξει ότι αύξηση του RAP, οδηγεί σε αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της φέρουσας ικανότητας και κατ' επέκταση της συμπεριφοράς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (RAP) για χρήση σε στρώσεις βάσεις-υπόβασης εύκαμπτου οδοστρώματος. Πραγματοποιήθηκε σειρά εργαστηριακών δοκιμών σε μίγματα διαφορετικής περιεκτικότητας αδρανούς υλικού 3A - RAP στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι δοκιμές εφαρμόστηκαν στα εξής μίγματα: μίγμα Α (100% υλικό 3A), μίγμα Β (90% υλικό 3A - 10% RAP), μίγμα Γ (80% υλικό 3A - 20% RAP), μίγμα Δ (70% υλικό 3A - 30% RAP) και μίγμα Ε (60% υλικό 3A - 40% RAP).

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν οι κοκκομετρικές αναλύσεις για την διερεύνηση της συμπεκνωσιμότητας των υλικών και κατά συνέπεια της φέρουσα ικανότητα τους. Ακολούθησε δοκιμή συμπίκνωσης (Proctor) για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πυκνότητας. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές CBR, για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των επιμέρους υλικών (δειγμάτων) μέσω του δείκτη CBR. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τριαξονικής φόρτισης των υλικών για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης και της παραμένουσας παραμόρφωσης τους.

Από την επεξεργασία των εργαστηριακών στοιχείων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξάγονται τα ακόλουθα **συμπεράσματα**:

Το υλικό RAP παρουσιάζει μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο, εξαιτίας της κατεργασίας την οποία έχει υποστεί κατά το φρεζάρισμα. Επιπλέον, βάσει της κοκκομετρικής του καμπύλης φαίνεται ότι δεν καθίσταται ικανό να χρησιμοποιηθεί αυτοτελώς ως υλικό βάσης-υπόβασης. Επίσης, παρατηρείται μείωση της βέλτιστης υγρασίας με την αύξηση της περιεκτικότητας RAP. Η ασφαλτος περιβάλλει τους κόκκους των αδρανών και συμπεριφέρεται υδροφοβικά, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις σε νερό για τη βέλτιστη συμπίκνωση να μειώνονται.

Με την αύξηση του RAP παρατηρείται μείωση του CBR, όπως είχε παρατηρήσει και ο Ayan (2011). Συγκεκριμένα με χρήση 10% RAP σε υλικό 3A παρατηρείται μείωση της τιμής του CBR κατά 35% της τιμής για 3A. Η μείωση αυτή αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP, έτσι για περιεκτικότητα 40% σε RAP παρατηρείται μείωση κατά 50% της τιμής του CBR σε σύγκριση με το μίγμα 3A. Τα μίγματα Γ, Δ, και Ε εμφανίζουν κοντινές τιμές CBR. Θα ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθούν αντί του μίγματος Β σε στρώσεις μεγαλύτερου πάχους.

Επίσης, ενώ ισχύει σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ότι αύξηση της ξηρής πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση του CBR, αυτό φαίνεται να συμβαίνει μόνο για το μίγμα Δ. Αντίθετα, για τα μίγματα Α και Β παρατηρείται μείωση του δείκτη CBR με την αύξηση της πυκνότητας, γεγονός το οποίο ενδεχομένως να οφείλεται στην παρουσία χονδρόκοκκου υλικού εντός της περιμέτρου της βελόνας διείδυσης. Για τα μίγματα Γ και Ε δεν παρατηρείται σαφής σχέση μεταξύ της ξηρής πυκνότητας και του δείκτη CBR.

Από τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής παρατηρείται αύξηση του μέτρου επανάκτησης με την αύξηση των κύκλων φόρτισης για όλα τα θεωρούμενα μίγματα. Όπως αναφέρει και ο Dehlevn (1969), οι αρχικοί κύκλοι φόρτισης συμπυκνώνουν το υλικό και προκαλούν αναδιάταξη των σωματιδίων στον ιστό, για επαναλαμβανόμενες εφαρμογές φορτίου. Έτσι όσο οι κύκλοι φόρτισης αυξάνονται, το Mr αυξάνεται. Από την ανάλυση αποδεικνύεται η μη γραμμικότητα της σχέσης Mr – αξονικής τάσης, η οποία είναι αναμενόμενη για ασύνδετα υλικά. Για το μίγμα Β, παρότι ισχύει πως το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται με την αύξηση των κύκλων φόρτισης παρατηρείται γραμμική σχέση των παραμέτρων Mr – αξονικής τάσης. Η συμπεριφορά αυτή δεν είναι ενδεδειγμένη και για το λόγο αυτό θεωρούμε πως υπήρξε πειραματική αστοχία.

Ειδικότερα, το μέτρο επανάκτησης των μιγμάτων που περιέχουν RAP είναι υψηλότερο από αυτό του 3Α. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην καλύτερη αλληλοεμπλοκή των κόκκων, η οποία επιτυγχάνεται με την πλήρωση του σκελετού του εκάστοτε μίγματος, λόγω της χρήσης του RAP που είναι πιο λεπτόκοκκο. Επιπλέον, η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στις ελαστικές ιδιότητες της ασφάλτου.

Οι τιμές των παραμενουσών παραμορφώσεων προκύπτουν γενικά ότι είναι πολύ μικρές ($\leq 1,15$ mm) για όλα τα μίγματα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι συνολικές παραμένουσες παραμορφώσεις για μίγματα με RAP (μίγματα Γ, Δ και Ε) είναι μικρότερες από αυτή του παρθένου αδρανούς υλικού. Ειδικότερα, το μίγμα Ε, με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε RAP, παρουσιάζει τη μικρότερη παραμένουσα παραμόρφωση. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα ερευνητών, όπως του Maher (2005) ο οποίος επιβεβαίωσε, ότι για αύξηση του RAP υπάρχει αύξηση των παραμενουσών παραμορφώσεων, στοιχείο το οποίο δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση.

Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι το υλικό RAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μίγματα 3Α – RAP υπό προϋποθέσεις, σε περιεκτικότητα έως 40%, καθώς εμφανίζει ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα και αντοχή και μικρή συνολική παραμένουσα παραμόρφωση.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα διαμορφώνονται οι εξής **προτάσεις** για περαιτέρω έρευνα:

- Διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού μίγματος 3A – RAP, για χρήση ως ασύνδετο υλικό στρώσης βάσης-υπόβασης οδοστρώματος, στο οποίο το υλικό 3A να είναι πιο χονδρόκοκκο.
- Αύξηση των δειγμάτων για την αύξηση της ακρίβειας, των αποτελεσμάτων αξιολόγησης.
- Θεώρηση της θερμοκρασίας ως παραμέτρου επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών μιγμάτων 3A – RAP , έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων που προσδίδει η άσφαλτος στο υλικό RAP.
- Προσδιορισμός της αντοχής σε θρυμματισμό κατά Los Angeles και της αντοχής σε κρούση κατά Micro Deval. Επιπλέον δοκιμές για τον χαρακτηρισμό της ικανότητας των αδρανών σε αντίσταση κατά των θρυμματισμό από την επιβολή φορτίων, όπως η αντίσταση σε θλιψη (ACV – Aggregate Compression Value), προσδιορισμός δύναμης για 10% λεπτόκοκκα (TFV – Ten percent Fines Value) και αντίσταση σε κρούση (AIV – Aggregate Impact Value)
- Δοκιμές προσδιορισμού ιδιοτήτων σε θερμικές και καιρικές μεταβολές, όπως η ανθεκτικότητα σε ψύξη απόψυξη.
- Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών μιγμάτων 3A - RAP, όπως το ποσοστό θραυσμένων επιφανειών.
- Υπολογισμός παραμενουσών παραμορφώσεων με την επιβολή περισσότερων κύκλων φόρτισης κατά την τριαξονική δοκιμή φόρτισης.

9 Βιβλιογραφία

- Cosentino P. J., Kalajian E. H., Bleakley A. M., Diouf B. S., Misilo T. J., Petersen A. J., Krajcik R. E., Sajjadi A.M. . (2012). *Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications*. Florida Institute of Technology, Melbourne.
- Gray J.E. (1962). *Characteristics of graded base course aggregates*. Engrg. Res. Bull, National Crushed Stone Association.
- AASHTO. (1986). *Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.
- Adama Dione, Meissa Fall, Yves, Berthaud, Farid Benboudjema, Alexandre Michou. (2014). *Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in*. Université de Thiès, Laboratoire de Mechanique et Modelisation,UFR Sciences de l'Ingénieur, Thiès.
- Allen J. & Thompson M. R. (1974). Resilient response of granular materials subjected to time dependent lateral stresses. *Highway Research Record*, σσ. 1-13.
- Allen J. (1973). *The effect of non-constant lateral pressures of the resilient response of granular materials*. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). *T 307-99(2012) Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. Washington.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. 444 North Capitol Street N.W., Suite 249 Washington, D.C. 20001: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Standard Method of the Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. 444 North Capitol Street N.W., Suite 249 Washington, D.C 20001: AASHTO.
- Angell D.J. (1988). *Technical basis for Pavement Design Manual*. Main Roads Department, Brisbane, Queensland.

- Arulrajah A., Piratheepan J. & Disfani M.M. (2014). Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Concrete Aggregate Blends in Pavement Subbases: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), σσ. 349-357.
- Arulrajah A., Piratheepan J., Disfani M.M. & Bo MW. (2013). Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), σσ. 1077-1088.
- Aurstad J. & Uthus N.S. (2000). Use of stockpiled asphalt and demolition debris in road construction in Norway. *5th International symposium, Unbound aggregates in roads* (σσ. 87-92). Nottingham: Balkema.
- AustRoads. (2004). *Guide to the Structural Design of Road Pavements*. Sydney, NSW, Australia.
- Ayan. (2011). *V. Assessment of Recycled Aggregates for Use in Unbound Subbase of Highway Pavement*. Kingston University, London, UK.
- Barksdale R. D. & Itani S. Y. (1989). Influence of aggregate shape on base behaviour. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1227, σσ. 173-182.
- Barksdale R.D. (1972). Laboratory evaluation of rutting in basecourse materials. *3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1*, σσ. 161-174. London.
- Barret J.R. & Smith D.M. (1976). Stress history effects in base course materials. *8th Australian Road Research Board Conference*, (σσ. 30-39). Perth.
- Bennert T. & Maher A. (2005). *The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material*. Rutgers University, Piscataway.
- Bennert T., Papp W.J., Maher A. & Gucunski N. (2000). Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1714(1), σσ. 33-39.
- Bleakley A.M. & Cosentino P.J. (2013). Improving the Properties of Reclaimed Asphalt Pavement for Roadway Base Applications Through Blending and Chemical

- Stabilization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2335(1), σ. 20.
- Boyce J. R., Brown S. F. & Pell P. S. (1976). The resilient behaviour of a granular material under repeated loading. *8th ARRB Conf.Mat. Constr. and Maintenance*, 8, σσ. 1-12.
- Brown S. F. & Hyde A. F. L. (1975). Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(537), σσ. 49-58.
- Brown S. F. & Pell P. S. (1967). An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads. *2nd International Conference on Concrete Pavement Design*, PP 384-403, σσ. 487–504.
- Brown S. F. & Selig E. T. (1991). *The design of pavement and rail track foundations Cyclic loading of soils: From theory to design*. New York.
- Brown S.F. (1996). 36th Rankine Lecture: Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, 46, σσ. 338-426.
- Brown S.F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *36th Rankin Lecture*, 46, σσ. 383-426.
- Burmister D.M. (1943). The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. *Annual Meeting of the Highway Research Board*, 23, σσ. 126-144.
- Chesner W.H., Collins R.J. & MacKay M.H. (1998). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Ανάκτηση από <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/index.cfm>
- Christopher B. R., Charles S. & R. Boudreau. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavements*. National Highway Institute, Department of Transportation.
- Collins R.J. & Ciesielski S.K. (1994). *Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington.

- Dawson A. R., Correia A. G., Jaure P., Paute J. & Galjaard P. J. (1994). Modelling resilient and permanent deflections in granular and soil pavement layers. *4th Int. Conf. Bearing Capacity of Roads and Airfields*, 2, σσ. 847-861. Minneapolis.
- Dawson A. R., Thom N. H. & Paute J. L. (1996). Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition. *Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp. Euroflex 1993*. The Netherlands.
- Dawson A.R. & Wellner F. (1999). *Plastic behaviour of granular materials*. The University of Nottingham.
- Dehlen G. L. (1969). *The effect of non-linear material response on the behaviour of pavements subjected to traffic loads*. University of California, Berkeley, Calif.
- Deniz D., Tutumler E. & Popovics J. S. (2009). *Expansive Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Used as Base Materials*. Illinois Center for Transportation, Urbana – Champaign.
- Dong Q. & Huang B. (2014). Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), σσ. 379-383.
- E. J. Yoder & M. W. Witzak. (1975). *Αρχες Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων* (2η εκδ.). (X. Καργόπουλος, Μεταφρ.) Μ.Γκιούρδας.
- EAPA. (2010). *Asphalt in Figures 2010*. Ανάκτηση από European Asphalt Pavement Association:
http://www.eapa.org/usr_img/Asphalt%20in%20figures%20Version%202022-12-2011.pdf
- Edil C.H., T.B., Tinjum, J.M. & Benson. (2012). *Recycled Unbound Materials*. University of Wisconsin-Madison, Minnesota Department of Transportation Research Services, Office of Policy Analysis, Research & Innovation, Minnesota.
- Edward J. Hoppe, Ph.D., P.E., D. Stephen Lane, G. Michael Fitch, Ph.D. & Sameer. (2014). *Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase*. Ανάκτηση από http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/15-r6.pdf
- Edwards J. P. (2007). *Laboratory Charavterisation of Pavement Foundation Materials*. Loughborough University, Nottingham.

- engineersdaily*. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://www.engineersdaily.com/2014/04/what-is-california-bearing-ratiocbr-test.html>
- European Asphalt Pavement Association. (2008, Μάιος 21). *Arguments to stimulate the government*. Belgium. Ανάκτηση Μάρτιος 27, 2019, από https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/arguments_stimulate_asphalt_May2008.pdf
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2010). *ΕΛΟΤ EN 13286.02 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference* (2η Έκδοση εκδ.). ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ Α.Ε.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2007). *ΕΛΟΤ EN 13242+A1 Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*. ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ Α.Ε.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2012). *ΕΛΟΤ EN 13286-47 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling* (2η Έκδοση εκδ.). ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ Α.Ε.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (χ.χ.). *EN 1097-5 2008 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates Determination of the Water Content by Drying in a Well Ventilated Oven*.
- Fall M. (1993). *Identification et Caractérisation Mécanique de Graveleux Latéritiques du Sénégal: Application au Domaine Graveleux Latéritiques du Sénégal: Application au Domaine*. Thèse de Doctorat INPL.
- Federal Highway Administration Research and Technology. (2016). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. Federal Highway Administration Research and Technology. Ανάκτηση Οκτώβριος 2019, από <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rarp131.cfm>
- Finn Thogersen, Colette Gregoire, Josef Stryk, Pierre Horny, Yannick Descantes, Cyrille Chazallon, Anita Blasl, Peter Broere, Karmen Fifer Bizjak, Fredrik Hellman, Maria Arm. (2013). *Recycling of road materials into new unbound rad layers - Main*

- practice in selected European countries. *Journal Road Materials and Pavement Design*, 14(2).
- Fredrick Lekarp & Andrew Dawson. (1997). Analysis of Permanent Deformation Behaviour Of Unbound Granular Materials. *International Symposium on Thin Pavements, Surface Treatments, Unbound Roads*. Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Fredrick Lekarp, Ulf Isacsson & Andrew Dawson. (2000, Ιανουάριος). STATE OF THE ART. I: RESILIENT RESPONSE OF UNBOUND AGGREGATES. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1), σσ. 67-69.
- Green J.W., J.L. & Hall . (1975). *Non- destructive vibratory testing of airport pavement : Experimental tests results and development of evaluation methodology and procedure*. Federal Aviation Administration, Washington.
- Guthrie S.W., Cooley D. & Eggett D.L. (2007). Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005(1), σσ. 44-52.
- Hansen K.R. & A. Copeland. (2015). *5th Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014*. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland.
- Haynes J. G. & Yoder E. J. (1963). Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO Road Test.
- Heukelom W. & Klomp A.J.G. (1962). Dynamamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. *First International Conference on Structural Desing of Asphalt Pavement*. University of Michigan.
- Heukelomand W. & Foster C.R. (1960). Dynamic Testing of Pavement. *Journal of the Structural Division*, 41(4), σσ. 473-492.
- Heydinger A. G., Xie Q. L., Randolph B. W. & Gupta J. D. (1996). Analysis of resilient modulus of dense and open-graded aggregates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1547(1), σσ. 1-6.
- Hicks R. G. & Monismith C.L. (1971). Factors influencing the resilient properties of granular materials. *Highway Research Record*, 345, σσ. 15-31.

- Hicks R. G. (1970). *Factors influencing the resilient properties of granular materials*. University of California, Berkeley, Institute of Transportation and Traffic Engineering: Dissertation series, Berkeley.
- Jorenby B. N. & Hicks R. G. (1986). Base course contamination limits. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1095, σσ. 86-101.
- Kamal M. A., Dawson A. R., Farouki O. T., Hughes D. A. B. & Shaat A. A. (1993). Field and laboratory evaluation of the mechan. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1406, σσ. 88-97.
- Kandhal P.S. & R.B. Mallick. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant's Reference Book*. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama.
- Kim W., Labuz J. F. & Dai S. (2007). Resilient Modulus of Base Course Containing Recycled Asphalt Pavement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, σσ. 27-35.
- Kolisoja P. (1997). *Resilient deformation characteristics of granular materials*. Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Lashine A.K., Brown S.F. & Pell P.S. (1971). *Dynamic properties of soils*. Department of University of Nottingham, Nottingham.
- Lekarp F. (1999). *Resilient and Permanent Deformation Behavior of Unbound Aggregates under Repeated Loading*. Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Locander R. (2009). *Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) As a Base Course Material*. Colorado Department of Transportation, Denver.
- Mayhew H. C. (1983). Resilient properties of unbound road base under repeated triaxial loading. *Lab. Rep. 1088*.
- McGarrah E.J. (2007). *Evaluation of Current Practices of Reclaimed Asphalt Pavement/Virgin Aggregate as Base Course Material*. University of Washington, Seattle.
- Mitry F. G. (1964). *Determination of the modulus of resilient deformation of untreated base course materials*. University of California, Berkeley, Calif.

- Mohammad Shafiqur Rahman & Sigurdur Erlingsson. (2016). Modelling the Moisture Dependent Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials. *Procedia Engineering*, 143, σσ. 921–928.
- Mokwa R.L. & Peebles C.S. (2005). *Evaluation of the Engineering Characteristics of RAP/Aggregate Blends*. Montana State University, Bozeman.
- Moore W. M., Britton S. C. & Schrivner F. H. (1970). *A laboratory study of the relation of stress to strain for a crushed limestone base material*. Res. Rep. 99-5F, Study 2-8-65-99, Texas A&M University, Texas Transp. Inst, College Station, Tex.
- Ontario Hot Mix Producers Association. (2003). *The ABCs of Recycled Aggregate*. Mississauga, Canada.
- Ooi P.S.K. (2010). *Application of Recycled Materials in Highway Projects*. University of Hawaii at Manoa. Honolulu.
- Pappin J.W. (1979). *Characteristics of a granular material for pavement analysis*. University of Nottingham, Nottingham.
- Paterson W.D.L. & Maree J.H. (1978). *An iterim mechanistic procedure for the structural desing pavements*. National Institute for Transport and Road Research, Pretoria, South Africa.
- Paute J.L., Hornych P. & Benaben J.P. (1996). Repeated load triaxial testing of granular. *In Flexible pavements*.
- Phil K.A. , Berg F & Milvang-Jensen O. (2004). *Ubundne baeger af knust asfalt-efter europaeiske standerder*. Vejiteknisk Institut Rappoer .
- Plaistow L. C. (1994). *Non-linear behaviour of some pavement unbound aggregates*. University of Nottingham, Civ. Engrg., Nottingham.
- Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C. & Nunn M.E. (1984). *The structural design of bituminous roads*. TRRL .
- Raad L., Minassian G. & Gartin S. (1992). ‘Characterization of saturated granular bases under repeated loads. *Transp. Res. Rec. 1369*.
- Randy C. West, Ph. D., P.E. (2015). *Best Practices for RAP and RAS Management*. New Jersey: National Asphalt Pavement Association.

- Randy C. West, Ph.D., P.E.-National Asphalt Pavement Association. (2015). *Best Practices for RAP and RAS Management*. Ανάκτηση Μάρτιος 27, 2019, από http://www.asphalt pavement.org/PDFs/EngineeringPubs/QIP129_RAP_-_RAS_Best_Practices_lr.pdf
- Roberts F.L., Kandhal P.S., Brown E.R., Lee D.Y. & Kennedy T.W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Lanham.
- Robinson R. G. (1974). Measurement of the elastic properties of granular materials using a resonance method. *TRRL Supplementary Rep. No. 111UC*.
- Rohde J.A.P., L. Nunez, W.P.& Ceratti. (2003). Electric Arc Furnace Steel Slag Base Material for Low-Volume Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, σσ. 201-207.
- Saeed A. (2007). *Transportation Research Board of the National Academies*. Ανάκτηση από http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w119.pdf
- Sayed S.M., Pulsifer J.M. & Jackson N.M. (2011). UNRAP: Are We Ready for It? *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, σσ. 188-196.
- Schaefer V., Stevens L., White D. & Ceylan H. (2008). *Design Guide for Improved Quality of Roadway Subgrades and Subbases*. Iowa State University, Ames.
- Seed H., Chan C. & Lee. (1962). Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. *1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, Michigan.
- Seed H. B., Mitry F. G., Monismith C. L. & Chan C. K. (1965). *Predictions of pavement deflection from laboratory repeated load tests*. University of California, Berkeley, Calif.
- Seed H.B. & McNeill R.L. (1956). *Soils Deformation in Normal Compression and Repeated Loading Tests*. HRB Bulletin 141.
- Seed H.B., Chan C.K. & Lee C.E. (1963). Resilience Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements. *1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI*.

- Seed H.B., Chan C.K. & Monismith C.L. (1955). Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay. *HRB*, (σσ. 541-558).
- Seed H.B., Chan C.K. & Monismith C.L. (1995). *Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay*. HRB Proceedings.
- Siekmeier J.A., Young D. & Beberg D. (1999). *Comparison of the Dynamic Cone Penetrometer With Other Tests During Subgrade and Granular Base Characterization in Minnesota In Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume*. American Society of Civil Engineers, Reston.
- Smith W. S. & Nair K. . (1973). *Development of procedures for characterization of untreated granular base coarse and asphalt-treated base course materials*. Federal Highway Administration, Washington.
- Stroup-Gardiner T., M. & Wattenberg-Komas. (2013). *Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington.
- Sukumaran B., Kyatham V., Shah A. & Sheth D. (2002). Suitability of using California Bearing Ratio to predict resilient modulus. *FAA Airport Technology Transfer Conference*.
- Sweere G.T.H. (1990). *Unbound granular bases for roads. Ph.D. Thesis*. University of Delft, Delft.
- T. Jacobsson. (2002). *Återvinning av krossad asfalt som bär och förstärkningslager Del 2 – Erfarenheter genom fältstudier*. Swedish Road and Transport Research Institute.
- Taha R., Ali G., Basma A. & Al-Turk O. (1999). Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases. (T. R. Academies, Επιμ.) *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, σσ. 264-269.
- Thom N. H. & Brown S. F. (1988). The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone. *Proc., 14th ARRB*, 14, σσ. 94-100.
- Thom N. H. & Brown S. F. (1987). Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base. *Transp. Res. Rec. 1121*.

- Thom N., Edwards J.P. & Dawson A. (2005). *A Practical Test for Laboratory Characterization of Pavement Foundation Materials*. International Centre for Aggregate Research Conference (ICAR), Texas.
- Thom N.H. (1988). *Design of road foundations*. University of Nottingham, Nottingham.
- Trollope E. H., Lee I. K. & Morris J. (1962). *Stresses and deformation in two-layer pavement structures under slow repeated loading*. ARRB.
- Van Niekerk A. A., Houben L. J. M. & Molenaar A. A. A. (1998). Estimation of mechanical behaviour of unbound road building materials from physical material properties. *5th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads and Airfields*.
- VIRGINIA ASPHALT ASSOCIATION. (χ.χ.). *Vaasphalt*. Ανάκτηση Μάρτιος 27, 2019, από <https://www.vaasphalt.org/pavement-recycling/>
- Vuong B. (1992). Influence of density and moisture content on dynamic stress-strain behaviour of a low plasticity crushed rock. σσ. 88–100.
- Werkmeister S., Dawson A.R. & Wellner F. (2001). Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. *Transport Research Record 1757*.
- WIRTGEN GROUP Applications. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://www.wirtgen-group.com/en-sg/applications/>
- Wolff H. & Visser A.T. (1994). Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement. *Institution of Civil Engineers, Transport*, (σσ. 259-272).
- Α.Λοΐζος & Χ.Πλατή. (2017). *Σημειώσεις για το μάθημα οδοστρώματα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.
- Δοκιμές αδρανών υλικών/ελεγχόμενη ιδιότητα*. (χ.χ.). Ανάκτηση από http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_AGGREGATES/ad1_5.htm
- Πλατή, Α. Λοΐζος & Χ. (2017). *Σημειώσεις για το Μάθημα των Οδοστρωμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.
- ΣΧΕΔΙΟ ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-01-00 Στρώση έδρασης οδοστρώματος από ασύνδετα εδαφικά υλικά. (2017). ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας III Στοιχεία μηχανής CBR

Test 1	
Φορτίο (kN)	Διείσδυση (mm)
CBR - 2.5mm	47,88
CBR - 5.0 mm	67,64
CBR (kN) - 5mm	6,32
CBR (kN) - 5mm	13,53
0	0
0,119	0,025
0,134	0,037
0,15	0,049
0,163	0,059
0,177	0,066
0,19	0,075
0,204	0,086
0,215	0,094
0,229	0,102
0,242	0,108
0,253	0,114
0,264	0,12
0,275	0,129
0,285	0,138
0,296	0,147
0,306	0,155
0,313	0,16
0,323	0,165
0,332	0,171
0,343	0,177
0,351	0,182
0,361	0,187
0,369	0,192
0,377	0,197
0,385	0,201
0,393	0,206
0,402	0,211
0,41	0,217
0,417	0,221
0,426	0,226
0,436	0,231
0,443	0,235
0,452	0,238
0,458	0,244
0,467	0,25
0,476	0,254
0,483	0,259
0,491	0,263
0,5	0,267
0,509	0,272

Πίνακας Π2 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Α

Μίγμα Α					
ΣΤΑΔΙΟ 1					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	20,91660182	18,68464736	2,231954463	0,000214219	87,22235239
97	20,91660182	18,70590407	2,210697754	0,000215371	86,85451996
98	20,93785853	18,70590407	2,231954463	0,000216143	86,54393973
99	20,8528317	18,64213394	2,210697754	0,00021422	87,02314406
100	20,93785853	18,70590407	2,231954463	0,000215567	86,77517935
Μ. Ο.	20,91235048	18,6888987	2,223451779	0,000215104	86,8838271
ΑΠΟΚΛ	0,034928337	0,027715358	0,011642779	8,56002E-07	0,256025025
ΣΤΑΔΙΟ 2					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	41,15298895	37,13547092	4,017518033	0,000458826	80,9357861
97	41,11047553	37,0929575	4,017518033	0,000458256	80,9437636
98	41,17424566	37,17798434	3,996261324	0,000459408	80,92587659
99	41,13173224	37,11421421	4,017518033	0,000459791	80,71981529
100	41,13173224	37,0929575	4,038774742	0,000459601	80,70685243
Μ. Ο.	41,14023493	37,12271689	4,017518033	0,000459176	80,8464188
ΑΠΟΚΛ	0,024236377	0,035569278	0,015030763	6,28702E-07	0,121740795
ΣΤΑΔΙΟ 3					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	61,36811937	55,54378106	5,824338312	0,000660202	84,13146312
97	61,4318895	55,60755119	5,824338312	0,000659814	84,27762266
98	61,45314621	55,58629448	5,866851731	0,000659816	84,24517066
99	61,38937608	55,50126764	5,88810844	0,000663272	83,67802909
100	61,38937608	55,52252435	5,866851731	0,00066366	83,66109994

Μ. Ο.	61,40638145	55,55228374	5,854097705	0,000661353	83,99867709
ΑΠΟΚΛ	0,034928337	0,04407885	0,028518868	1,94032E-06	0,305358524
ΣΤΑΔΙΟ 4					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S_{max}	S_{cyclic}	S_{contact}	ε_r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	34,86100304	31,11982222	3,741180814	0,000328667	94,68504515
97	34,92477317	31,18359235	3,741180814	0,000329631	94,60151953
98	34,81848962	31,11982222	3,698667396	0,000329434	94,46449258
99	34,83974633	31,14107893	3,698667396	0,000328667	94,74972073
100	34,86100304	31,09856552	3,762437523	0,0003304	94,12393212
Μ. Ο.	34,86100304	31,13257625	3,728426788	0,00032936	94,52494202
ΑΠΟΚΛ	0,039767661	0,032237396	0,028518868	7,28394E-07	0,248236616
ΣΤΑΔΙΟ 5					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S_{max}	S_{cyclic}	S_{contact}	ε_r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	68,17026631	61,68697001	6,483296297	0,000597144	103,3033568
97	68,19152302	61,77199685	6,419526169	0,000597915	103,3123454
98	68,42534682	61,98456394	6,440782878	0,000597339	103,7678206
99	68,36157669	61,87828039	6,483296297	0,000593491	104,2615141
100	68,29780656	61,85702368	6,440782878	0,000591955	104,4962417
Μ. Ο.	68,28930388	61,83576697	6,453536904	0,000595569	103,8282557
ΑΠΟΚΛ	0,109011899	0,112479932	0,028518868	2,66921E-06	0,54296706
ΣΤΑΔΙΟ 6					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S_{max}	S_{cyclic}	S_{contact}	ε_r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,5432997	92,19034767	9,352952035	0,000768536	119,9558717
97	101,6070698	92,23286109	9,374208744	0,000767384	120,1913448
98	101,4582729	92,06280741	9,395465453	0,00076623	120,1503967
99	101,4795296	92,08406412	9,395465453	0,000763151	120,6629566
100	101,5858131	92,21160438	9,374208744	0,000762192	120,9820683
Μ. Ο.	101,534797	92,15633693	9,378460086	0,000765498	120,3885276
ΑΠΟΚΛ	0,064824251	0,077521444	0,017784639	2,72731E-06	0,421420312

ΣΤΑΔΙΟ 7					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,72200608	62,11210419	7,609901883	0,000286258	216,9797598
97	69,67949266	62,06959078	7,609901883	0,000286258	216,8312452
98	69,70074937	62,09084748	7,609901883	0,000286064	217,0520135
99	69,70074937	62,11210419	7,588645174	0,000286064	217,126321
100	69,70074937	62,15461761	7,546131755	0,000285102	218,0084009
Μ. Ο.	69,70074937	62,10785285	7,592896515	0,000285949	217,1995481
ΑΠΟΚΛ	0,015030763	0,031528795	0,027715358	4,83373E-07	0,465114365
ΣΤΑΔΙΟ 8					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,3636587	122,3323613	12,03129739	0,000474776	257,6632893
97	134,2573751	122,1835643	12,07381081	0,000471889	258,9245042
98	134,3849154	122,2898479	12,09506752	0,00047439	257,7835714
99	134,4699422	122,353618	12,11632423	0,000474009	258,1252582
100	134,5762258	122,4811582	12,09506752	0,000474577	258,0847411
Μ. Ο.	134,4104234	122,3281099	12,08231349	0,000473928	258,1162728
ΑΠΟΚΛ	0,119681125	0,107761243	0,032237396	1,17461E-06	0,492492958
ΣΤΑΔΙΟ 9					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,6652039	181,3409859	17,32421797	0,000618807	293,0492159
97	198,9202844	181,553553	17,36673139	0,000619957	292,848438
98	199,1966216	181,8298902	17,36673139	0,000620344	293,1114629
99	199,1541082	181,7236067	17,43050152	0,000620539	292,8480446
100	199,0903381	181,6810933	17,40924481	0,000618034	293,9660017
Μ. Ο.	199,0053112	181,6258258	17,37948542	0,000619536	293,1646326
ΑΠΟΚΛ	0,217297223	0,187493333	0,041436955	1,07493E-06	0,46328919
ΣΤΑΔΙΟ 10					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,93457317	62,11210419	7,822468974	0,000228896	271,3547944
97	69,95582988	62,11210419	7,843725684	0,000227936	272,4983599
98	69,89205975	62,09084748	7,801212265	0,00022909	271,033133
99	69,87080304	62,02707736	7,843725684	0,000227938	272,1231253
100	69,89205975	62,06959078	7,822468974	0,000228127	272,0833995
Μ. Ο.	69,90906512	62,0823448	7,826720316	0,000228397	271,8185624
ΑΠΟΚΛ	0,034928337	0,035569278	0,017784639	5,53536E-07	0,603531693
ΣΤΑΔΙΟ 11					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,4157594	91,91401045	9,501748999	0,000320276	286,9841105
97	101,522043	91,95652387	9,565519126	0,000321234	286,2599373
98	101,67084	92,14783425	9,523005708	0,00032085	287,1993394
99	101,6495832	92,19034767	9,45923558	0,000320274	287,8485809
100	101,522043	92,0415507	9,48049229	0,00032066	287,0376413
Μ. Ο.	101,5560537	92,05005339	9,506000341	0,000320659	287,0659219
ΑΠΟΚΛ	0,104785012	0,118923642	0,040888096	4,07064E-07	0,567331351
ΣΤΑΔΙΟ 12					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,6226905	181,5960664	17,02662404	0,000531664	341,5616315
97	198,7502307	181,6810933	17,06913746	0,000531857	341,5974091
98	199,1328515	182,1274842	17,00536734	0,000532428	342,0698289
99	199,4304454	182,4038214	17,02662404	0,00053493	340,9860278
100	199,1753649	182,1274842	17,04788075	0,000535505	340,1044121
Μ. Ο.	199,0223166	181,9871899	17,03512673	0,000533277	341,2638619
ΑΠΟΚΛ	0,330129765	0,338976203	0,024236377	1,80515E-06	0,753495034
ΣΤΑΔΙΟ 13					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	104,1153615	92,12657754	11,98878397	0,000269501	341,8418663
97	104,1791316	92,19034767	11,98878397	0,000269696	341,8310632
98	104,2854152	92,33914463	11,94627055	0,000271037	340,6881652
99	104,2641585	92,27537451	11,98878397	0,000271617	339,7263006
100	104,2429018	92,31788792	11,92501384	0,000271422	340,1270954
Μ. Ο.	104,2173937	92,24986645	11,96752726	0,000270654	340,8428981
ΑΠΟΚΛ	0,069532512	0,089429883	0,030061526	9,88949E-07	0,969215335
ΣΤΑΔΙΟ 14					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,9588465	122,2685911	12,69025537	0,000347792	351,5563527
97	134,9588465	122,1835643	12,77528221	0,000346642	352,4774872
98	135,0013599	122,2473344	12,7540255	0,000347601	351,6887562
99	134,9801032	122,2260777	12,7540255	0,00034722	352,0133489
100	135,1501569	122,4173881	12,73276879	0,000347984	351,7906071
Μ. Ο.	135,0098626	122,2685911	12,74127148	0,000347448	351,9053104
ΑΠΟΚΛ	0,08038297	0,088923194	0,032237396	5,31554E-07	0,360861011
ΣΤΑΔΙΟ 15					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	261,2662124	239,223005	22,04320741	0,000589014	406,1412123
97	261,585063	239,6056258	21,97943728	0,000589198	406,6637769
98	261,8401436	239,6056258	22,23451779	0,000589778	406,2640792
99	261,9251704	239,5418556	22,38331476	0,000586709	408,2808102
100	262,1377375	239,9244764	22,21326108	0,000588624	407,6021185
Μ. Ο.	261,7508654	239,5801177	22,17074766	0,000588665	406,9903994
ΑΠΟΚΛ	0,335559895	0,249438221	0,161186978	1,16989E-06	0,921235882

Πίνακας Π3 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Β

ΜΙΓΜΑ Β					
ΣΤΑΔΙΟ 1					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	20,91660182	18,68464736	2,231954463	0,000282466	66,14823913
97	20,93785853	18,68464736	2,253211172	0,000281312	66,41954781
98	20,93785853	18,68464736	2,253211172	0,0002815	66,37526381
99	20,93785853	18,68464736	2,253211172	0,000280731	66,55713299
100	20,93785853	18,72716078	2,210697754	0,00028035	66,79920786
Μ. Ο.	20,93360719	18,69315004	2,240457146	0,000281272	66,45987832
ΑΠΟΚΛ	0,009506289	0,019012579	0,019012579	8,09745E-07	0,240056325
ΣΤΑΔΙΟ 2					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	41,06796212	37,07170079	3,996261324	0,000419172	88,44039971
97	41,13173224	37,11421421	4,017518033	0,000419748	88,42032421
98	41,15298895	37,17798434	3,975004615	0,000420325	88,45048738
99	41,15298895	37,15672763	3,996261324	0,000420898	88,27971927
100	41,17424566	37,19924105	3,975004615	0,000421669	88,21911489
Μ. Ο.	41,13598359	37,1439736	3,992009982	0,000420362	88,36200909
ΑΠΟΚΛ	0,040888096	0,051192935	0,017784639	9,73457E-07	0,10555155
ΣΤΑΔΙΟ 3					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	60,9642419	55,09739017	5,866851731	0,000560691	98,26696826
97	60,9642419	55,11864688	5,845595022	0,000560689	98,30520368
98	61,11303886	55,28870055	5,824338312	0,00056031	98,67520885
99	61,13429557	55,26744384	5,866851731	0,00056031	98,63727144
100	61,07052544	55,20367371	5,866851731	0,000560499	98,49014371
Μ. Ο.	61,04926874	55,19517103	5,854097705	0,0005605	98,47495919
ΑΠΟΚΛ	0,080943137	0,085820261	0,019012579	1,89995E-07	0,186247766

ΣΤΑΔΙΟ 4					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	34,96728658	31,14107893	3,826207651	0,000383987	81,09934424
97	34,92477317	31,16233564	3,762437523	0,000383028	81,35783646
98	34,90351646	31,09856552	3,804950941	0,0003836	81,0702187
99	34,92477317	31,11982222	3,804950941	0,000383794	81,08478881
100	34,94602987	31,14107893	3,804950941	0,00038418	81,05855497
Μ. Ο.	34,93327585	31,13257625	3,8006996	0,000383718	81,13414864
ΑΠΟΚΛ	0,024236377	0,024236377	0,023285558	4,41953E-07	0,125981566
ΣΤΑΔΙΟ 5					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	67,95769922	61,51691634	6,440782878	0,000612984	100,3564811
97	67,97895592	61,53817305	6,440782878	0,000612599	100,4541864
98	68,00021263	61,53817305	6,462039588	0,000612022	100,5490283
99	68,04272605	61,62319988	6,419526169	0,000612794	100,5609613
100	68,1490096	61,6657133	6,483296297	0,000613179	100,5672193
Μ. Ο.	68,02572068	61,57643512	6,449285562	0,000612716	100,4975753
ΑΠΟΚΛ	0,075752661	0,064474791	0,024236377	4,43917E-07	0,091249165
ΣΤΑΔΙΟ 6					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,373246	92,06280741	9,310438616	0,000841628	109,3865843
97	101,4157594	92,06280741	9,352952035	0,000842971	109,212268
98	101,5858131	92,21160438	9,374208744	0,000843352	109,3393762
99	101,5432997	92,14783425	9,395465453	0,000843741	109,2134769
100	101,4370162	92,08406412	9,352952035	0,000843932	109,1131475
Μ. Ο.	101,4710269	92,11382352	9,357203376	0,000843125	109,2529706
ΑΠΟΚΛ	0,089682154	0,064824251	0,031528795	9,14644E-07	0,10964201
ΣΤΑΔΙΟ 7					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,74326279	62,06959078	7,67367201	0,000568598	109,1624617
97	69,74326279	62,06959078	7,67367201	0,000567636	109,3475477
98	69,76451949	62,11210419	7,652415301	0,000568405	109,2743649
99	69,72200608	62,06959078	7,652415301	0,000568212	109,2367049
100	69,65823595	62,06959078	7,588645174	0,00056802	109,2735091
Μ. Ο.	69,72625742	62,07809346	7,648163959	0,000568174	109,2589176
ΑΠΟΚΛ	0,040888096	0,019012579	0,034928337	3,7014E-07	0,067275488
ΣΤΑΔΙΟ 8					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,1085782	122,3111046	11,79747359	0,000811373	150,7458629
97	134,1085782	122,2473344	11,86124372	0,000805576	151,7514366
98	134,2786318	122,4811582	11,79747359	0,0007992	153,2547602
99	134,342402	122,4386448	11,90375714	0,000793602	154,2822336
100	134,2361184	122,353618	11,88250043	0,00078742	155,3853882
Μ. Ο.	134,2148617	122,366372	11,84848969	0,000799434	153,0839363
ΑΠΟΚΛ	0,104136182	0,094586385	0,04893662	9,46917E-06	1,871090623
ΣΤΑΔΙΟ 9					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,7502307	181,2134457	17,53678506	0,000960417	188,6820744
97	198,8565143	181,2984725	17,55804177	0,000959454	188,959962
98	199,3241619	181,8298902	17,49427165	0,000960224	189,362023
99	199,4091887	181,8298902	17,57929848	0,00096176	189,0594866
100	199,2603918	181,6810933	17,57929848	0,000959456	189,3583875
Μ. Ο.	199,1200975	181,5705584	17,54953909	0,000960262	189,0843867
ΑΠΟΚΛ	0,296300532	0,295078039	0,035569278	9,44911E-07	0,287278182
ΣΤΑΔΙΟ 10					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,89205975	62,02707736	7,864982393	0,000522067	118,8106074
97	69,89205975	62,06959078	7,822468974	0,00052245	118,8049377
98	69,93457317	62,09084748	7,843725684	0,000522641	118,8021059
99	69,87080304	62,06959078	7,801212265	0,000522639	118,7618539
100	69,87080304	62,04833407	7,822468974	0,000522836	118,6764674
Μ. Ο.	69,89205975	62,06108809	7,830971658	0,000522527	118,7711945
ΑΠΟΚΛ	0,026034046	0,024236377	0,024236377	2,91037E-07	0,056364808
ΣΤΑΔΙΟ 11					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,4157594	91,99903729	9,416722162	0,000671845	136,9349272
97	101,5432997	92,10532083	9,437978871	0,000672616	136,935967
98	101,6070698	92,14783425	9,45923558	0,000673196	136,8812059
99	101,4795296	92,06280741	9,416722162	0,000672428	136,9109642
100	101,4795296	92,020294	9,45923558	0,00067416	136,4962351
Μ. Ο.	101,5050376	92,06705876	9,437978871	0,000672849	136,8318599
ΑΠΟΚΛ	0,072709132	0,060869952	0,021256709	8,77236E-07	0,188942901
ΣΤΑΔΙΟ 12					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,4951502	181,4897829	17,00536734	0,000851362	213,1757085
97	198,6014338	181,4897829	17,11165088	0,000852323	212,9354552
98	198,877771	181,7448634	17,13290759	0,000852133	213,2821597
99	198,9202844	181,9149171	17,00536734	0,000853096	213,2408796
100	198,7714874	181,7236067	17,04788075	0,000853098	213,0161643
Μ. Ο.	198,7332254	181,6725906	17,06063478	0,000852402	213,1300735
ΑΠΟΚΛ	0,181243832	0,182609855	0,059366758	7,28809E-07	0,148612224
ΣΤΑΔΙΟ 13					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	103,9878213	91,99903729	11,98878397	0,000579893	158,6482093
97	104,009078	92,0415507	11,96752726	0,000580088	158,668147
98	104,1578749	92,21160438	11,94627055	0,000580666	158,8031139
99	104,1578749	92,21160438	11,94627055	0,000581627	158,5408427
100	104,0303347	92,06280741	11,96752726	0,000579899	158,7566613
Μ. Ο.	104,0685968	92,10532083	11,96327592	0,000580435	158,6833948
ΑΠΟΚΛ	0,082873909	0,099702804	0,017784639	7,37371E-07	0,101848228
ΣΤΑΔΙΟ 14					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,8950764	122,2898479	12,60522854	0,000695845	175,742995
97	134,7462794	122,1197942	12,62648525	0,000695841	175,4995421
98	134,7887928	122,1835643	12,60522854	0,000696036	175,5419754
99	134,8100496	122,1835643	12,62648525	0,000696038	175,5415096
100	134,9801032	122,3323613	12,64774196	0,000695077	175,9981775
Μ. Ο.	134,8440603	122,2218264	12,6222339	0,000695768	175,6648399
ΑΠΟΚΛ	0,093384476	0,086866889	0,017784639	3,9779E-07	0,209076316
ΣΤΑΔΙΟ 15					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	261,7551167	239,8394496	21,91566715	0,000952136	251,8962404
97	261,6063198	239,6481392	21,95818057	0,000951177	251,949009
98	261,9464271	240,0095032	21,93692386	0,000950408	252,5331423
99	262,2652777	240,1795569	22,08572083	0,000951376	252,4549489
100	262,5203582	240,4346374	22,08572083	0,000952329	252,4701126
Μ. Ο.	262,0186999	240,0222573	21,99644265	0,000951485	252,2606906
ΑΠΟΚΛ	0,37323537	0,303457671	0,082873909	7,75065E-07	0,310561256

Πίνακας Π4 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Γ

ΜΙΓΜΑ Γ					
ΣΤΑΔΙΟ 1					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	20,76780486	18,55710711	2,210697754	0,000166314	111,5786063
97	20,83157499	18,64213394	2,189441044	0,000167277	111,4449357
98	20,8740884	18,66339065	2,210697754	0,000168042	111,0637462
99	20,78906157	18,59962052	2,189441044	0,000166127	111,9605745
100	20,83157499	18,64213394	2,189441044	0,000166125	112,2177318
Μ. Ο.	20,81882096	18,62087723	2,197943728	0,000166777	111,6531189
ΑΠΟΚΛ	0,041436955	0,042513418	0,011642779	8,53387E-07	0,44988033
ΣΤΑΔΙΟ 2					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	41,15298895	37,15672763	3,996261324	0,000291318	127,5470977
97	41,13173224	37,15672763	3,975004615	0,000290548	127,8847698
98	41,13173224	37,13547092	3,996261324	0,000290357	127,8958515
99	41,17424566	37,17798434	3,996261324	0,000292087	127,2839795
100	41,13173224	37,11421421	4,017518033	0,000291316	127,4019705
Μ. Ο.	41,14448627	37,14822494	3,996261324	0,000291125	127,6027338
ΑΠΟΚΛ	0,019012579	0,024236377	0,015030763	6,9297E-07	0,278598228
ΣΤΑΔΙΟ 3					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	61,49565963	55,60755119	5,88810844	0,000404426	137,4974014
97	61,51691634	55,6288079	5,88810844	0,000403659	137,8114457
98	61,49565963	55,6288079	5,866851731	0,000404811	137,4192778
99	61,55942976	55,79886157	5,760568185	0,000405771	137,5130517
100	61,51691634	55,82011828	5,696798057	0,000405963	137,5005867
Μ. Ο.	61,51691634	55,69682937	5,820086971	0,000404926	137,5483527
ΑΠΟΚΛ	0,026034046	0,103483284	0,086866889	9,56338E-07	0,151659164

ΣΤΑΔΙΟ 4					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	34,92477317	31,18359235	3,741180814	0,000207888	150,0016654
97	34,92477317	31,18359235	3,741180814	0,000207506	150,2783527
98	34,90351646	31,16233564	3,741180814	0,000206928	150,5952673
99	34,79723291	31,07730881	3,719924105	0,000207312	149,9057458
100	34,88225975	31,14107893	3,741180814	0,000208082	149,6580622
Μ. Ο.	34,88651109	31,14958162	3,736929472	0,000207543	150,0878187
ΑΠΟΚΛ	0,052928779	0,04407885	0,009506289	4,58921E-07	0,360232864
ΣΤΑΔΙΟ 5					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	68,06398276	61,60194317	6,462039588	0,000346964	177,5456357
97	68,1490096	61,6657133	6,483296297	0,00034696	177,7313223
98	68,1490096	61,6657133	6,483296297	0,000347345	177,5345263
99	68,10649618	61,62319988	6,483296297	0,000345424	178,398858
100	68,12775289	61,64445659	6,483296297	0,000343116	179,6606279
Μ. Ο.	68,11925021	61,64020525	6,479044955	0,000345962	178,174194
ΑΠΟΚΛ	0,035569278	0,027715358	0,009506289	1,7537E-06	0,90282267
ΣΤΑΔΙΟ 6					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,5432997	91,89275374	9,650545963	0,000478145	192,1858926
97	101,5858131	91,95652387	9,629289254	0,000480261	191,4718194
98	101,6283265	91,95652387	9,671802672	0,000480453	191,3955506
99	101,7558668	92,06280741	9,693059381	0,000479104	192,156249
100	101,7346101	92,06280741	9,671802672	0,000478145	192,5415454
Μ. Ο.	101,6495832	91,98628326	9,663299989	0,000479222	191,9502114
ΑΠΟΚΛ	0,092655847	0,074550161	0,024236377	1,10999E-06	0,496029347
ΣΤΑΔΙΟ 7					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,76451949	62,17587432	7,588645174	0,000218113	285,0631739
97	69,74326279	62,09084748	7,652415301	0,000218692	283,9187765
98	69,65823595	62,06959078	7,588645174	0,000218111	284,5782958
99	69,70074937	62,11210419	7,588645174	0,000217923	285,0184717
100	69,65823595	62,02707736	7,631158592	0,000218114	284,3785637
Μ. Ο.	69,70500071	62,09509883	7,609901883	0,000218191	284,5914563
ΑΠΟΚΛ	0,048472755	0,055021627	0,030061526	2,92194E-07	0,475093205
ΣΤΑΔΙΟ 8					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,2361184	122,1410509	12,09506752	0,000378023	323,1050764
97	134,3849154	122,2260777	12,15883765	0,000380137	321,531578
98	134,3636587	122,1623076	12,20135106	0,000378214	322,9977863
99	134,5124556	122,3748747	12,13758094	0,000378794	323,0646652
100	134,4911989	122,2898479	12,20135106	0,000378981	322,6803159
Μ. Ο.	134,3976694	122,2388318	12,15883765	0,00037883	322,6758843
ΑΠΟΚΛ	0,111065034	0,095773211	0,04509229	8,3124E-07	0,661141778
ΣΤΑΔΙΟ 9					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,5589204	181,3834993	17,17542101	0,000534284	339,4891422
97	198,728974	181,5322963	17,19667772	0,000535055	339,2780099
98	199,026568	181,7448634	17,28170455	0,000536394	338,8269496
99	198,9627978	181,7661201	17,19667772	0,00053582	339,2296764
100	198,9202844	181,70235	17,21793443	0,000535242	339,476754
Μ. Ο.	198,8395089	181,6258258	17,21368309	0,000535359	339,2601064
ΑΠΟΚΛ	0,192135254	0,163690463	0,040888096	7,98005E-07	0,268451563
ΣΤΑΔΙΟ 10					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,95582988	62,1333609	7,822468974	0,000181349	342,6179412
97	69,84954633	62,02707736	7,822468974	0,000180773	343,121657
98	69,84954633	62,02707736	7,822468974	0,000180773	343,121657
99	69,95582988	62,15461761	7,801212265	0,000180777	343,8201602
100	69,97708659	62,17587432	7,801212265	0,000180968	343,5740225
Μ. Ο.	69,9175678	62,10360151	7,813966291	0,000180928	343,2510876
ΑΠΟΚΛ	0,062698284	0,071455433	0,011642779	2,49888E-07	0,464356956
ΣΤΑΔΙΟ 11					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,6920967	92,27537451	9,416722162	0,000253807	363,5653196
97	101,7346101	92,27537451	9,45923558	0,000253038	364,6705184
98	101,7558668	92,23286109	9,523005708	0,000252841	364,7863895
99	101,8621503	92,38165805	9,48049229	0,000253993	363,7177616
100	101,7771235	92,29663121	9,48049229	0,000253801	363,6570089
Μ. Ο.	101,7643695	92,29237987	9,471989606	0,000253496	364,0793996
ΑΠΟΚΛ	0,06305759	0,055021627	0,03861473	5,18656E-07	0,596391305
ΣΤΑΔΙΟ 12					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,6014338	181,6385799	16,96285392	0,000446585	406,7280474
97	198,7927442	181,6598366	17,13290759	0,000448313	405,2077982
98	198,7927442	181,7236067	17,06913746	0,000446005	407,4473148
99	198,8565143	181,70235	17,1541643	0,000446585	406,8708425
100	199,0690814	181,9361738	17,13290759	0,000447545	406,5200171
Μ. Ο.	198,8225035	181,7321094	17,09039417	0,000447007	406,554804
ΑΠΟΚΛ	0,167779947	0,118923642	0,078102137	9,15845E-07	0,827964956
ΣΤΑΔΙΟ 13					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	103,8815377	92,21160438	11,66993333	0,000218962	421,1298585
97	103,9665645	92,27537451	11,69119004	0,000219351	420,6750925
98	103,8815377	92,16909096	11,71244675	0,000219542	419,8242685
99	103,9240511	92,27537451	11,64867662	0,000218964	421,4175422
100	104,0303347	92,38165805	11,64867662	0,000219154	421,5380583
Μ. Ο.	103,9368052	92,26262048	11,67418468	0,000219195	420,916964
ΑΠΟΚΛ	0,06305759	0,08038297	0,027715358	2,51869E-07	0,695367875
ΣΤΑΔΙΟ 14					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,7887928	122,1835643	12,60522854	0,000280081	436,2435117
97	134,8313063	122,1835643	12,64774196	0,000280464	435,6481581
98	134,8950764	122,2260777	12,66899867	0,000280271	436,1001911
99	134,9375898	122,2685911	12,66899867	0,000280079	436,5499693
100	135,1289002	122,4599015	12,66899867	0,000280466	436,6305696
Μ. Ο.	134,9163331	122,2643398	12,6519933	0,000280272	436,2344799
ΑΠΟΚΛ	0,131894412	0,114864931	0,027715358	1,92306E-07	0,393163097
ΣΤΑΔΙΟ 15					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	261,7763734	239,9457331	21,83064032	0,00051673	464,3544262
97	261,9251704	239,9669898	21,95818057	0,000516527	464,5775881
98	262,1802509	240,0945301	22,08572083	0,000516154	465,1608849
99	262,2015076	239,9244764	22,27703121	0,000516732	464,3116299
100	262,4140747	240,3070972	22,10697754	0,00051788	464,0209554
Μ. Ο.	262,0994754	240,0477653	22,05171009	0,000516804	464,4850969
ΑΠΟΚΛ	0,250342313	0,159354447	0,167779947	6,4568E-07	0,426566824

Πίνακας Π5 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Δ

ΜΙΓΜΑ Δ					
ΣΤΑΔΙΟ 1					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	20,78906157	18,57836381	2,210697754	0,000154748	120,0552876
97	20,74654815	18,55710711	2,189441044	0,000154938	119,771232
98	20,83157499	18,66339065	2,168184335	0,000155324	120,1575071
99	20,8740884	18,64213394	2,231954463	0,000156863	118,8435648
100	20,8740884	18,72716078	2,146927626	0,000155514	120,4211264
Μ. Ο.	20,8230723	18,63363126	2,189441044	0,000155477	119,8497436
ΑΠΟΚΛ	0,055430716	0,06822046	0,033609808	8,31645E-07	0,608688115
ΣΤΑΔΙΟ 2					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	41,11047553	37,11421421	3,996261324	0,000292228	127,0041193
97	41,15298895	37,15672763	3,996261324	0,00029242	127,0663845
98	41,19550237	37,19924105	3,996261324	0,000292416	127,2133761
99	41,13173224	37,13547092	3,996261324	0,00029242	126,9936921
100	41,17424566	37,19924105	3,975004615	0,000291649	127,5480886
Μ. Ο.	41,15298895	37,16097897	3,992009982	0,000292227	127,1651321
ΑΠΟΚΛ	0,033609808	0,038025157	0,009506289	3,33348E-07	0,231328267
ΣΤΑΔΙΟ 3					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	61,53817305	56,18148234	5,356690711	0,000407817	137,7613482
97	61,60194317	56,13896892	5,462974257	0,000408011	137,5919106
98	61,64445659	55,77760486	5,866851731	0,000407241	136,9644514
99	61,51691634	55,82011828	5,696798057	0,000404356	138,0469562
100	61,58068646	55,94765853	5,63302793	0,000404166	138,4272563
Μ. Ο.	61,57643512	55,97316659	5,603268537	0,000406318	137,7583845
ΑΠΟΚΛ	0,050749698	0,182486094	0,199745214	1,90031E-06	0,54514109

ΣΤΑΔΙΟ 4					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	34,90351646	31,16233564	3,741180814	0,000198612	156,900838
97	34,88225975	31,14107893	3,741180814	0,000198227	157,0980255
98	34,88225975	31,11982222	3,762437523	0,000197841	157,2974479
99	34,92477317	31,16233564	3,762437523	0,000198225	157,2067242
100	34,90351646	31,18359235	3,719924105	0,000198801	156,8581775
Μ. Ο.	34,89926511	31,15383296	3,745432156	0,000198341	157,0722426
ΑΠΟΚΛ	0,017784639	0,024236377	0,017784639	3,74772E-07	0,190178119
ΣΤΑΔΙΟ 5					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	68,10649618	61,64445659	6,462039588	0,000347284	177,5044711
97	68,04272605	61,60194317	6,440782878	0,000347284	177,3820543
98	68,08523947	61,64445659	6,440782878	0,000348053	177,1121815
99	68,17026631	61,72948343	6,440782878	0,000347862	177,4540479
100	68,12775289	61,6657133	6,462039588	0,000347094	177,6626397
Μ. Ο.	68,10649618	61,65721062	6,449285562	0,000347515	177,4230789
ΑΠΟΚΛ	0,047531447	0,046571116	0,011642779	4,16391E-07	0,202060251
ΣΤΑΔΙΟ 6					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,6070698	92,020294	9,586775836	0,000506337	181,7372963
97	101,6283265	91,97778058	9,650545963	0,000505568	181,9297139
98	101,6070698	91,97778058	9,629289254	0,000503652	182,62168
99	101,7133534	92,06280741	9,650545963	0,000504802	182,3740395
100	101,7771235	92,14783425	9,629289254	0,00050538	182,3337647
Μ. Ο.	101,6665886	92,03729936	9,629289254	0,000505148	182,1992989
ΑΠΟΚΛ	0,075752661	0,071138555	0,026034046	1,00011E-06	0,358170197
ΣΤΑΔΙΟ 7					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,72200608	62,09084748	7,631158592	0,000236395	262,6570524
97	69,65823595	62,06959078	7,588645174	0,000235819	263,2084452
98	69,65823595	62,06959078	7,588645174	0,000236782	262,1385976
99	69,63697924	62,04833407	7,588645174	0,000236204	262,6898777
100	69,63697924	62,06959078	7,567388464	0,000236971	261,9289367
Μ. Ο.	69,66248729	62,06959078	7,592896515	0,000236434	262,5245819
ΑΠΟΚΛ	0,034928337	0,015030763	0,023285558	4,58767E-07	0,504062805
ΣΤΑΔΙΟ 8					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,3211452	122,204821	12,11632423	0,000420563	290,5744061
97	134,2573751	122,1197942	12,13758094	0,000420756	290,2388838
98	134,2573751	122,0985375	12,15883765	0,0004196	290,9875957
99	134,4486855	122,2898479	12,15883765	0,000420175	291,0452959
100	134,3849154	122,204821	12,18009435	0,000420176	290,841657
Μ. Ο.	134,3338993	122,1835643	12,15033496	0,000420254	290,7375677
ΑΠΟΚΛ	0,083146074	0,076642155	0,024236377	4,43557E-07	0,332923628
ΣΤΑΔΙΟ 9					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,9627978	181,8086335	17,1541643	0,000575837	315,7290925
97	198,9840545	181,7873768	17,19667772	0,000575261	316,0082655
98	199,0903381	182,0424573	17,04788075	0,000576607	315,7134194
99	199,3241619	182,0849707	17,23919114	0,000576605	315,7881612
100	199,387932	182,212511	17,17542101	0,000574685	317,0647551
Μ. Ο.	199,1498569	181,9871899	17,16266698	0,000575799	316,0607387
ΑΠΟΚΛ	0,195631027	0,183842886	0,071455433	8,41423E-07	0,573524344
ΣΤΑΔΙΟ 10					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	70,10462684	62,26090116	7,843725684	0,000183082	340,0705462
97	70,04085671	62,19713103	7,843725684	0,000181739	342,2333235
98	70,08337013	62,21838774	7,864982393	0,00018366	338,7691432
99	70,0196	62,11210419	7,907495811	0,000182319	340,6788418
100	70,06211342	62,19713103	7,864982393	0,000181739	342,2333235
Μ. Ο.	70,06211342	62,19713103	7,864982393	0,000182508	340,7970356
ΑΠΟΚΛ	0,033609808	0,054194187	0,026034046	8,47929E-07	1,481549028
ΣΤΑΔΙΟ 11					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,7133534	92,2541178	9,45923558	0,000253805	363,4842127
97	101,6920967	92,21160438	9,48049229	0,000253998	363,0403212
98	101,6495832	92,16909096	9,48049229	0,000253614	363,4232388
99	101,9259205	92,46668489	9,45923558	0,000253803	364,3243848
100	101,7558668	92,33914463	9,416722162	0,000254385	362,9901739
Μ. Ο.	101,7473641	92,28812853	9,45923558	0,000253921	363,4524663
ΑΠΟΚΛ	0,106919345	0,117969948	0,026034046	2,92739E-07	0,535182635
ΣΤΑΔΙΟ 12					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,7077173	181,6598366	17,04788075	0,00046101	394,0472934
97	198,7077173	181,6173231	17,09039417	0,000461778	393,3004195
98	198,8990277	181,8086335	17,09039417	0,000461588	393,8763731
99	199,1328515	181,9999439	17,13290759	0,000462359	393,633295
100	199,1328515	181,9574305	17,17542101	0,000461969	393,8737008
Μ. Ο.	198,9160331	181,8086335	17,10739954	0,000461741	393,7462163
ΑΠΟΚΛ	0,212779553	0,171377068	0,048472755	4,98193E-07	0,289536906
ΣΤΑΔΙΟ 13					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	103,9240511	92,08406412	11,83998701	0,000218981	420,5119179
97	104,0515914	92,23286109	11,8187303	0,000219362	420,4600389
98	103,9027944	92,12657754	11,77621688	0,000218784	421,0847202
99	103,9453078	92,12657754	11,8187303	0,000219743	419,2475253
100	104,0303347	92,2541178	11,77621688	0,000219549	420,1974223
Μ. Ο.	103,9708159	92,16483962	11,80597627	0,000219284	420,3003249
ΑΠΟΚΛ	0,066203644	0,074246493	0,028518868	3,96502E-07	0,671664381
ΣΤΑΔΙΟ 14					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,8738197	122,1197942	12,7540255	0,000279897	436,3024442
97	134,852563	122,1197942	12,73276879	0,000279514	436,8999008
98	135,0013599	122,2473344	12,7540255	0,00028009	436,4568076
99	135,0013599	122,2473344	12,7540255	0,000279903	436,7494679
100	134,9801032	122,2260777	12,7540255	0,000280285	436,0772049
Μ. Ο.	134,9418412	122,192067	12,74977416	0,000279938	436,4971651
ΑΠΟΚΛ	0,072709132	0,066544025	0,009506289	2,85611E-07	0,33232676
ΣΤΑΔΙΟ 15					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	261,6913466	239,7756794	21,91566715	0,000526924	455,0475215
97	261,9889405	239,881963	22,10697754	0,000528844	453,5969987
98	262,4353314	240,2008136	22,23451779	0,000528844	454,199919
99	262,2652777	239,9669898	22,29828792	0,000529416	453,2672742
100	262,4778448	240,6046911	21,87315374	0,000528075	455,6263295
Μ. Ο.	262,1717482	240,0860274	22,08572083	0,000528421	454,3476086
ΑΠΟΚΛ	0,330198192	0,329513275	0,188334923	9,62718E-07	0,984550029

Πίνακας Π6 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Ε

ΜΙΓΜΑ Ε					
ΣΤΑΔΙΟ 1					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	20,91660182	18,68464736	2,231954463	0,000144215	129,5608704
97	20,95911524	18,68464736	2,274467881	0,000144403	129,3924761
98	20,93785853	18,72716078	2,210697754	0,000144018	130,0332156
99	21,02288537	18,79093091	2,231954463	0,000144787	129,7828327
100	20,98037195	18,79093091	2,189441044	0,000144407	130,1251688
Μ. Ο.	20,96336658	18,73566346	2,227703121	0,000144366	129,7789127
ΑΠΟΚΛ	0,040888096	0,053353917	0,031528795	2,8474E-07	0,308809938
ΣΤΑΔΙΟ 2					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	41,23801579	37,19924105	4,038774742	0,000251713	147,7844724
97	41,19550237	37,15672763	4,038774742	0,000251137	147,9541319
98	41,21675908	37,17798434	4,038774742	0,000251135	148,0398625
99	41,34429933	37,30552459	4,038774742	0,000251904	148,0941172
100	41,28052921	37,24175447	4,038774742	0,000249793	149,0901898
Μ. Ο.	41,25502116	37,21624641	4,038774742	0,000251136	148,1925548
ΑΠΟΚΛ	0,058984974	0,058984974	0	8,25404E-07	0,515298517
ΣΤΑΔΙΟ 3					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	61,41063279	55,54378106	5,866851731	0,000349019	159,1424356
97	61,51691634	55,6288079	5,88810844	0,000351327	158,3391567
98	61,41063279	55,52252435	5,88810844	0,000350558	158,3834062
99	61,4318895	55,50126764	5,930621858	0,000351325	157,9769626
100	61,55942976	55,67132132	5,88810844	0,000351329	158,4593319
Μ. Ο.	61,46590023	55,57354045	5,892359782	0,000350712	158,4602586
ΑΠΟΚΛ	0,06822046	0,073019194	0,023285558	1,00292E-06	0,424120656

ΣΤΑΔΙΟ 4					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	34,98854329	31,20484906	3,783694232	0,00016229	192,2786569
97	34,86100304	31,09856552	3,762437523	0,000161905	192,0789565
98	34,90351646	31,11982222	3,783694232	0,000162674	191,30138
99	34,86100304	31,09856552	3,762437523	0,000161712	192,3084663
100	34,83974633	31,07730881	3,762437523	0,000161712	192,1770183
Μ. Ο.	34,89076243	31,11982222	3,770940207	0,000162059	192,0288956
ΑΠΟΚΛ	0,059366758	0,049851402	0,011642779	4,17284E-07	0,416613116
ΣΤΑΔΙΟ 5					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	67,95769922	61,47440292	6,483296297	0,000297116	206,9035005
97	67,97895592	61,49565963	6,483296297	0,000298081	206,305488
98	68,12775289	61,64445659	6,483296297	0,000298461	206,5407382
99	68,02146934	61,53817305	6,483296297	0,000299231	205,6546122
100	67,97895592	61,51691634	6,462039588	0,00029942	205,4534409
Μ. Ο.	68,01296666	61,5339217	6,479044955	0,000298462	206,171556
ΑΠΟΚΛ	0,06822046	0,066203644	0,009506289	9,3079E-07	0,606814679
ΣΤΑΔΙΟ 6					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c ₁	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,3519893	91,99903729	9,352952035	0,00043174	213,0887716
97	101,3519893	91,97778058	9,374208744	0,000431932	212,9451441
98	101,4370162	92,0415507	9,395465453	0,000432316	212,9032089
99	101,3519893	91,99903729	9,352952035	0,000432511	212,7088907
100	101,3519893	91,93526716	9,416722162	0,00043251	212,5623569
Μ. Ο.	101,3689947	91,9905346	9,378460086	0,000432202	212,8416744
ΑΠΟΚΛ	0,038025157	0,03861473	0,027715358	3,49843E-07	0,206881195
ΣΤΑΔΙΟ 7					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,72200608	62,11210419	7,609901883	0,000216955	286,2901167
97	69,72200608	62,15461761	7,567388464	0,000215995	287,7601516
98	69,70074937	62,09084748	7,609901883	0,00021503	288,7540156
99	69,67949266	62,04833407	7,631158592	0,000215223	288,2972442
100	69,70074937	62,15461761	7,546131755	0,000215608	288,2759251
Μ. Ο.	69,70500071	62,11210419	7,592896515	0,000215762	287,8754906
ΑΠΟΚΛ	0,017784639	0,04509229	0,034928337	7,62684E-07	0,953512364
ΣΤΑΔΙΟ 8					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,2573751	122,1197942	12,13758094	0,000373775	326,7196901
97	134,2361184	122,0560241	12,18009435	0,000373586	326,7147478
98	134,3849154	122,1410509	12,24386448	0,000372807	327,6250159
99	134,6187392	122,4599015	12,15883765	0,000374156	327,2960709
100	134,5974825	122,3961314	12,20135106	0,000373774	327,4606215
Μ. Ο.	134,4189261	122,2345804	12,1843457	0,00037362	327,1632293
ΑΠΟΚΛ	0,181990207	0,180744537	0,040888096	4,99198E-07	0,423437869
ΣΤΑΔΙΟ 9					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,9202844	181,3409859	17,57929848	0,000528305	343,2507155
97	198,7714874	181,1071621	17,66432532	0,00052926	342,1895282
98	198,9202844	181,4472695	17,47301494	0,000529267	342,8273529
99	199,1966216	181,5748097	17,6218119	0,000529646	342,822797
100	199,3454186	181,7236067	17,6218119	0,000529457	343,2265557
Μ. Ο.	199,0308193	181,4387668	17,59205251	0,000529187	342,8633899
ΑΠΟΚΛ	0,233533757	0,234113486	0,073019194	5,18108E-07	0,429809977
ΣΤΑΔΙΟ 10					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	69,87080304	61,96330723	7,907495811	0,000178073	347,965309
97	69,84954633	62,00582065	7,843725684	0,000178071	348,2076613
98	69,84954633	62,02707736	7,822468974	0,000178073	348,3234208
99	69,82828962	62,00582065	7,822468974	0,000177687	348,9613575
100	69,84954633	62,11210419	7,737442138	0,000178651	347,6727426
Μ. Ο.	69,84954633	62,02282602	7,826720316	0,000178111	348,2260982
ΑΠΟΚΛ	0,015030763	0,055021627	0,060869952	3,44981E-07	0,48078874
ΣΤΑΔΙΟ 11					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	101,5645564	92,12657754	9,437978871	0,000247627	372,0371538
97	101,5858131	92,12657754	9,45923558	0,000247243	372,6158837
98	101,4370162	91,97778058	9,45923558	0,000247051	372,302239
99	101,5432997	92,0415507	9,501748999	0,000247626	371,6965597
100	101,7346101	92,29663121	9,437978871	0,000248014	372,1431152
Μ. Ο.	101,5730591	92,11382352	9,45923558	0,000247512	372,1589903
ΑΠΟΚΛ	0,106919345	0,119869748	0,026034046	3,75057E-07	0,338456053
ΣΤΑΔΙΟ 12					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	198,3250966	180,9583652	17,36673139	0,000445994	405,7416263
97	198,8352576	181,5110396	17,32421797	0,000446182	406,8096278
98	198,8140009	181,553553	17,26044785	0,00044599	407,079517
99	198,6439472	181,192189	17,45175823	0,000446566	405,7452597
100	199,0903381	181,6173231	17,47301494	0,000445608	407,5722881
Μ. Ο.	198,7417281	181,366494	17,37523408	0,000446068	406,5896638
ΑΠΟΚΛ	0,282242355	0,280958699	0,088413602	3,48117E-07	0,819462744
ΣΤΑΔΙΟ 13					

A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	104,2854152	92,29663121	11,98878397	0,000217234	424,8710525
97	104,2429018	92,29663121	11,94627055	0,00021685	425,6246009
98	104,3491853	92,4879416	11,86124372	0,000216276	427,63905
99	104,2641585	92,29663121	11,96752726	0,000216655	426,007825
100	104,1791316	92,2541178	11,92501384	0,000216852	425,424928
Μ. Ο.	104,2641585	92,32639061	11,93776787	0,000216773	425,9134913
ΑΠΟΚΛ	0,061973424	0,092166895	0,04893662	3,48678E-07	1,048246394
ΣΤΑΔΙΟ 14					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	134,7250227	122,0347673	12,69025537	0,000276439	441,4521898
97	134,8738197	122,1197942	12,7540255	0,000276631	441,4541507
98	135,0013599	122,2473344	12,7540255	0,000276053	442,8402075
99	135,0651301	122,3323613	12,73276879	0,000277017	441,605647
100	134,9375898	122,2260777	12,71151208	0,000276053	442,7632052
Μ. Ο.	134,9205844	122,192067	12,72851745	0,000276439	442,02308
ΑΠΟΚΛ	0,130516887	0,116039049	0,027715358	4,09022E-07	0,714025399
ΣΤΑΔΙΟ 15					
A/A	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ	ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ
c1	S _{max}	S _{cyclic}	S _{contact}	ε _r	Mr
-	kN	kPa	kPa	mm/mm	Mpa
96	-	-	-	-	-
97	261,9039137	238,3514799	23,55243376	0,000525483	453,5852907
98	262,4140747	238,6065604	23,80751427	0,000519545	459,2606264
99	262,6691552	238,9891812	23,67997401	0,000519543	459,998715
100	262,6478985	238,8616409	23,78625756	0,000518386	460,7798129
Μ. Ο.	262,1462402	243,6401492	18,506091	0,000633533	415,2893878
ΑΠΟΚΛ	0,662991273	11,04427096	11,6290092	0,000252231	96,45358754

