ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΣΥΝΔΕΤΟΥ ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟΥ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΣΗΣ/ΥΠΟΒΑΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΣΑΡΡΑΣ ΔΟΝΑΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΠΛΑΤΗ, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οφείλω να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Χριστίνα Πλατή, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την επίβλεψη, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματική εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευρύτερη στήριξη.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Brad Cliatt, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, για την πάντα πρόθυμη βοήθεια που παρείχε όποτε του ζητήθηκε, καθώς και για την επίλυση απορριών που προέκυψαν σχετικά με την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφεραν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού ως υλικό βάσεων/υποβάσεων εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοστρωμάτων. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιήθηκε με κύριο γνώμονα το μέτρο επανάκτησης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού που εκφράζει την ελαστική απόκρισή του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα μέτρησης του μέτρου επανάκτησης από δοκιμή τριαξονικής φόρτισης σε δείγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, αδρανούς υλικού 3Α και μίγματος των δύο αυτών υλικών. Διερευνήθηκε η προσαρμογή τεσσάρων καταστατικών μοντέλων πρόβλεψης στα πειραματικά δεδομένα και πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγησή τους μέσω των αντίστοιχων στατιστικών συντελεστών προσαρμογής, καθώς και των μέσων τετραγωνικών ποσοστιαίων σφαλμάτων πρόβλεψης. Το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε από την διερεύνηση είναι ότι το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό βάσης/υπόβασης στο πλαίσιο της βιωσιμότητας των οδοστρωμάτων. Η δε συμπεριφορά του έναντι των συνθηκών φόρτισης και των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με κατάλληλα καταστατικά μοντέλα κατά τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα και τα σχετικά συμπεράσματα περιλαμβάνονται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the investigation of the behaviour of reclaimed asphalt pavement material when considered as base/subbase material for the design and construction of flexible pavements. Main axis of this investigation is the resilient modulus of reclaimed asphalt pavement material that provides a means of the material's elastic response. For this purpose, experimental data from triaxial stress tests on specimens consisted of reclaimed asphalt pavement material, aggregate material and mix of those two materials were used. The goodness of fit of four constitutive models on the experimental data was investigated by evaluating and comparing the correspondent coefficients of determination and root mean squared percentages of error. The general conclusion is that the reclaimed asphalt pavement material can be used as base/subbase material in the

framework of pavement sustainability. Its behaviour under loading conditions can be simulated by using appropriate constitutive models in pavement design. Detailed results and related conclusions are included in the diploma thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Γενική ανασκόπηση 1
1.2 Στόχος - Μεθοδολογία 2
1.3 Δομή 2

2 ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ 5

2.1 Γενικά 5
2.1.1 Ορισμός 5
2.1.2 Ιστορικά στοιχεία 8
2.1.3 Αφαίρεση και θραύση του ασφαλτικού υλικού 9
2.2 Χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στην οδοποιία 11
2.2.1 Ασφαλτικές στρώσεις 11
2.2.2 Βάσεις-Υποβάσεις 14

3 ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ 15

3.1 Ορισμός 15
3.2 Μέθοδοι υπολογισμού 17
3.3 Διερεύνηση στο εργαστήριο 18
3.4 Καταστατικά μοντέλα έκφρασης του μέτρου επανάκτησης 20
3.5 Παράγοντες επιρροής 36

4 ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 39

4.1 Γενικά 39
4.2 Προετοιμασία δειγμάτων 39
4.3 Πειραματική διαδικασία 43
4.3.1 Περιγραφή συσκευής τριαξονικής φόρτισης 43
4.3.2 Διεξαγωγή πειράματος 46

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 51

5.1 Γενικά 51
5.2 Μίγμα Α 53
5.3 Μίγμα Β 56
5.4 Μίγμα Γ 58

6 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ 61

6.1 Γενικά 61
6.2 Προσδιορισμός μη γραμμικών μοντέλων 62
6.2.1 Μίγμα Α 62
6.2.2 Μίγμα Β 76
6.2.3 Μίγμα Γ 90
6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 105

7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 109

7.1 Μίγμα Α 109
7.2 Μίγμα Β 110
7.3 Μίγμα Γ 111
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 113
9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 121

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Στο πλαίσιο υιοθέτησης τεχνικών φιλικών προς το περιβάλλον, η βιομηχανία κατασκευής οδοστρωμάτων στρέφει την προσοχή της στην ανάκτηση/ανακύκλωση της ασφάλτου. Η τακτική αυτή, εκτός από τα προφανή περιβαλλοντικά οφέλη, συμβάλλει στη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης. Γενικά, η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού είναι ευρέως αποδεκτή στις ασφαλτικές στρώσεις του οδοστρώματος ως συστατικό του νέου ασφαλτομίγματος.

Καθώς όμως, οι ανάγκες και η επιθυμία για εξοικονόμηση πόρων αυξάνονται, εξετάζεται η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στην βάση και την υπόβαση εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Λόγω των ιδιαιτεροτήτων και της ανομοιομορφίας ενός τέτοιου βιώσιμου εναλλακτικού υλικού, εγείρονται ερωτήματα σχετικά με τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του και κατ' επέκταση με την ελαστική συμπεριφορά του.

Βασική παράμετρος περιγραφής και πρόβλεψης της ελαστικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών αποτελεί το μέτρο επανάκτησης (resilient modulus). Παρά το γεγονός ότι για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων λαμβάνεται μια σταθερή αντιπροσωπευτική τιμή για το μέτρο επανάκτησης, στην πραγματικότητα αυτή μεταβάλλεται στα διάφορα στοιχεία του οδοστρώματος ανάλογα με τις επιβαλλόμενες τάσεις και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για την διερεύνηση της τιμής του μέτρου επανάκτησης πραγματοποιούνται τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές με ειδικό εξοπλισμό. Εναλλακτικά, πρόβλεψη της τιμής του μέτρου επανάκτησης για διάφορους συνδυασμούς τάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω κατάλληλου καταστατικού μοντέλου. Από την δεκαετία του 1970 μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί δεκάδες καταστατικά μοντέλα πρόβλεψης του μέτρου επανάκτησης. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η διερεύνηση της προσαρμογής αυτών των μοντέλων στην περίπτωση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει σε σχέση με τα φυσικά ασύνδετα υλικά.

1.2 Στόχος - Μεθοδολογία

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού ως υλικό βάσεων/υποβάσεων εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προκειμένου να χρησιμοποιηθει στον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοστρωμάτων. Για την διερεύνηση αυτή, επιδιώκεται η εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, ως βασική παράμετρος έκφρασης της ελαστικής απόκρισής του.

Η εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης γίνεται με την εργαστηριακή δοκιμή τριαξονικής φόρτισης. Κατά την δοκιμή αυτή μίγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού και αδρανούς υλικού υποβάλλονται σε διάφορους συνδυασμούς τάσεων, καταγράφεται η ελαστική τους παραμόρφωση και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του μέτρου επανάκτησης.

Η στατιστική επεξεργασία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων αποτέλεσε το επόμενο βήμα με την προσαρμογή κατάλληλων καταστατικών μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα. Οι σταθερές των προσαρμοσμένων μοντέλων προσδιορίζονται με μη γραμμική παλινδρόμηση. Οι συντελεστές προσαρμογής των υπό διερεύνηση μοντέλων, καθώς και τα αντίστοιχα μέσα τετραγωνικά ποσοστιαία σφάλματα πρόβλεψης αξιολογούνται συγκριτικά.

1.3 Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος, αποτελείται από εννέα κεφάλαια. Συνοπτικά:

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρονται γενικά στοιχεία για την ανάκτηση ασφαλτικού υλικού. Περιγράφονται τεχνικές ανάκτησης ασφαλτικού υλικού, χρήσεις του στην δομή του οδοστρώματος και ιστορικά στοιχεία.

Στο κεφάλαιο 3 ορίζεται το μέτρο επανάκτησης ασύνδετων υλικών. Παρουσιάζονται μέθοδοι προσδιορισμού του μέσω εργαστηριακών δοκιμών και μέθοδοι εκτίμησης/πρόβλεψής του μέσω καταστατικών μοντέλων.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται λεπτομερώς η εργαστηριακή δοκιμή τριαξονικής φόρτισης: η προετοιμασία των δειγμάτων, ο ειδικός εξοπλισμός και η πειραματική διαδικασία που εφαρμόζεται.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε δείγματα ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού.

Το κεφάλαιο 6 αφορά στη στατιστική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και την προσαρμογή των καταστατικών μοντέλων σε αυτά.

Στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των καταστατικών μοντέλων.

Στο κεφάλαιο 8 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο κεφάλαιο 9 περιλαμβάνεται η διεθνής βιβλιογραφία στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της εργασίας.

Τέλος, στο παράρτημα παρατίθενται πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα.

2 ΑΝΑΚΤΩΜΕΝΟ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

2.1 Γενικά

Κύρια λειτουργία των ασφαλτικών οδοστρωμάτων είναι η αναδιανομή των φορτίων της κυκλοφορίας σε μια μεγάλη επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Σε αυτό το πλαίσιο λειτουργίας τα ασφαλτικά στοιχεία έχουν σημαντικό ρόλο, καθώς πρέπει να εμφανίζουν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που θα τους επιτρέπουν να αναλάβουν και να αφομοιώσουν μεγάλα φορτία σε όλη την διάρκεια ζωής τους. Όπως όμως είναι γνωστό, τα οδοστρώματα φθείρονται από την πάντα αυξανόμενη κυκλοφορία και την έκθεση τους στις καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, βροχόπτωση, παγετός κλπ.) και κατά συνέπεια με την πάροδο του χρόνου εμφανίζουν ιδιότητες κατώτερες από τις επιθυμητές.

Από τα παραπάνω φαίνεται η ανάγκη για υψηλής ποιότητας συντήρηση, ή και ανακατασκευή του οδοστρώματος με υλικά υψηλών προδιαγραφών. Η ανάγκη αυτή, σε συνδυασμό με την στροφή των κατασκευαστών σε φιλικές προς το περιβάλλον τακτικές, έχει δημιουργήσει μια τάση *ανακύκλωσης*[1] των στοιχείων των οδοστρωμάτων, ώστε η προσθήκη «νέων» υλικών να περιοριστεί στο ελάχιστο. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η επαναχρησιμοποίηση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού.

2.1.1 Ορισμός

Ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό (*Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)* είναι το υλικό που έχει αφαιρεθεί από ασφαλτικό οδόστρωμα και περιέχει αδρανή υλικά και άσφαλτο (ασφαλτόμιγμα), με συνήθη αναλογία περίπου 96% αδρανές υλικό και 4% άσφαλτο (Εικόνα 2.1).

Το υλικό λαμβάνεται μετά από εργασίες πλήρους ανακατασκευής του οδοστρώματος, αναδιαμόρφωσης των επιφανειακών του στρώσεων, ή για να αποκτηθεί πρόσβαση στο υπέδαφος. Μετά από κατάλληλη *σύνθλιψη* και *κοσκίνισμα*, παράγεται ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό που αποτελείται από υψηλής ποιότητας και καλής διαβάθμισης κόκκους αδρανών με ασφαλτική επικάλυψη. Η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού αποτελεί μια από τις

[1] Με τον όρο ανακύκλωση στην συγκεκριμένη εργασία αναφερόμαστε στην ανά χρησιμοποίηση του υλικού και όχι στην ευρέως γνωστή φυσική/χημική διεργασία ανακύκλωσης υλικών προϊόντων.

καλύτερες εναλλακτικές, καθώς βρίσκεται ήδη στον χώρο κατασκευής και έχει αποδεδειγμένα καλές ιδιότητες όντας στοιχείο της αρχικής δομής του οδοστρώματος.

Σε γενικές γραμμές, η κατασκευή οδοστρωμάτων από ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό πρέπει να πληρεί τα παρακάτω κριτήρια:

1) Απαιτείται η κατασκευή να είναι οικονομικά συμφέρουσα.

2) Η τελική κατασκευή πρέπει να είναι «φιλική» προς το περιβάλλον

3) Το οδόστρωμα που προκύπτει να έχει καλή δομική συμπεριφορά.

Εικόνα 2.1 Ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό

Τα οικονομικά οφέλη αποτελούν το κύριο λόγο χρήσης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού. Η άσφαλτος συνήθως αποτελεί το πιο ακριβό υλικό των οδοστρωμάτων. Προφανώς με την χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού ένα ποσοστό ασφάλτου ξαναχρησιμοποιείται με αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της κατασκευής. Εδώ όμως πρέπει να αναφερθεί ότι στην κατασκευαστική διαδικασία προστίθενται ενδιάμεσα στάδια για την επεξεργασία του υλικού (σύνθλιψη, κοσκίνισμα). Η επεξεργασία αυτή ενδέχεται να έχει επιπλέον κόστος που

υπερβαίνει τα αρχικά οφέλη. Το κόστος αυτό όμως ισοσκελίζεται με την μείωση του κόστους από την μη μετακίνηση του υλικού (αν επαναχρησιμοποιείται επί τόπου) ή και από bonus που παρέχονται από πολλές χώρες για την χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού.

Τα περιβαλλοντικά οφέλη είναι πολυάριθμα. Είναι γεγονός ότι με χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες «παρθένου» υλικού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιγραφή των πλεονεκτημάτων σε όρους κατανάλωσης ενέργειας. Μετά την ανακύκλωση του ασφαλτικού υλικού ουσιαστικά αυτό παύει να αποτελεί βιομηχανικό απόβλητο και εξοικονομείται η ενέργεια που θα απαιτούνταν για την διαχείρισή του. Επίσης, με την άμεση χρήση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού μειώνεται ο χώρος που χρειάζεται για την απόρριψη του. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η συμβολή της ανακύκλωσης της ασφάλτου στον περιορισμό των εκπομπών αερίων (ανθρακικό αποτύπωμα): άμεσα, με την χρήση τεχνικών χαμηλής θερμοκρασίας είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών καύσεων (σε σχέση με τεχνικές υψηλής θερμοκρασίας) κατά 30-50%. Αλλά και έμμεσα, εξοικονομούνται καύσιμα και αποφεύγονται εκπομπές αερίων, αφού μειώνονται οι εκσκαφές και μεταφορές αδρανών υλικών στην περιοχή κατασκευής.

Αντίθετα, περιβαλλοντικές ανησυχίες προκαλεί το γεγονός ότι το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό σε συνδυασμό με τεχνολογίες θερμής ανάμειξης – που περιγράφονται παρακάτω – παρουσιάζει έκπλυση ουσιών, κυρίως στον τόπο παραγωγής, με κίνδυνο προσβολής του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόλα αυτά πολλές μελέτες έδειξαν ότι τα επίπεδα έκπλυσης βαρέων μετάλλων δεν υπερβαίνουν τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής ένωσης. Έκθεση του πανεπιστημίου του Wisconsin (Shedivy, 2012) έδειξε ότι σε συνθήκες εργαστηρίου η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων ήταν σε ανεκτά επίπεδα. Παρόλα αυτά, επισημαίνεται ότι πρέπει να γίνουν επί τόπου (in situ) δοκιμές, για να αξιολογηθεί η επίδραση του μεγέθους του έργου και των πραγματικών υδρολογικών συνθηκών στα επίπεδα εκπομπών.

Τέλος, η δομική συμπεριφορά και απόδοση του ασφαλτικού υλικού είναι αντικείμενο προσοχής και έρευνας και σε αυτό τον τομέα εστιάζει αυτή η διπλωματική εργασία. Εργαστηριακές δοκιμές, αλλά και έρευνες στον τόπο κατασκευής, συμφωνούν ότι, με κατάλληλο σχεδιασμό, τα μείγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού επιτυγχάνουν παρόμοια διάρκεια ζωής, αλλά και ποιότητα, με οδοστρώματα που χρησιμοποιούν παρθένα υλικά. Παρόλα αυτά, λόγω της ιδιαιτερότητας του υλικού, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί

παράγοντες πριν αποφανθούμε για την δομική του επάρκεια (για παράδειγμα η ποιότητα των ασφαλτικών δεσμών). Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά οδηγούν σε μεγάλο εύρος αποτελεσμάτων και δείχνουν το επίπεδο του ελέγχου που απαιτείται, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα ανακτώμενου υλικού.

2.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η ανακύκλωση οδοστρωμάτων άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως από την δεκαετία του 1970 (West, 2010). Η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού σε θερμά μίγματα έγινε δημοφιλής λόγω του εμπάργκο στο αραβικό πετρέλαιο. Παράλληλα εκείνη την εποχή αναπτύχθηκαν και οι πρώτες τεχνικές και ο εξοπλισμός για την αφαίρεση της ασφάλτου.

Η επί τόπου (in situ) ανακύκλωση των ασφαλτικών οδοστρωμάτων έκανε την εμφάνισή της το 1975. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε πολλά έργα για τα επόμενα 10 χρόνια χωρίς κάποια σημαντική εξέλιξη. Η επιτυχία της μεθόδου δεν συνεχίστηκε γιατί κατά την δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκε μια άλλη μορφή ανακύκλωσης ασφάλτου, η σε εργοστάσιο (διυλιστήριο) ανακύκλωση (in plant recycling), η οποία έχει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Πολλές από τις τεχνικές που αναπτύχθηκαν εκείνη την περίοδο χρησιμοποιούνται έως σήμερα και έχουν γίνει κομμάτι των διαδικασιών κατασκευής και συντήρησης οδοστρωμάτων.

Στοιχεία από τις ΗΠΑ αναφέρουν ότι νέα μείγματα περιέχουν κατά μέσο όρο 12-15% ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό ενώ η αμερικάνικη εθνική υπηρεσία ασφαλτικών οδοστρωμάτων (NAPA) στοχεύει σε άμεση αύξηση του ποσοστού σε 25%. Σε απόλυτους αριθμούς περίπου 90 εκατομμύρια τόνοι ασφαλτικού ανακτώνται ετησίως και το πάνω από 80% χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμών μιγμάτων. (Federal Highways Administration, 2010)

Σε κάποιες ευρωπαϊκές χώρες η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού άρχισε πριν από 30 χρόνια. Κάθε χρόνο περίπου 50 εκατομμύρια τόνοι ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού παράγονται και ξαναχρησιμοποιούνται. Παρόλα αυτά, υπάρχουν χώρες, όπως η Ελλάδα, που η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού δεν είναι κοινή πρακτική. Στόχος του ευρωπαϊκού οργανισμού ασφαλτικών οδοστρωμάτων (European Asphalt Pavement Association, EAPA) είναι η επίτευξη 100% ποσοστού χρήσης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (EAPA, 2008).

Η χρήση των μεθόδων ανακύκλωσης πάντως πρέπει να αυξηθεί, καθώς η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού πραγματοποιείται μόλις στο 7% των εργασιών αποκατάστασης οδοστρωμάτων παγκοσμίως (Jové, 2004).

2.1.3 Αφαίρεση και θραύση του ασφαλτικού υλικού

Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι απαιτείται μεγάλη προσοχή στην επιλογή του ασφαλτικού υλικού προς ανακύκλωση, καθώς το υλικό πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές κατασκευές. Πριν την αφαίρεσή του από το οδόστρωμα συνίσταται η διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών σε δείγματα, ώστε να εκτιμηθούν οι ιδιότητες τους (NCHRP, 2001).

Αφού διερευνηθούν οι ιδιότητές του, το υλικό ανακτάται/αφαιρείται από την δομή του οδοστρώματος με μία διαδικασία που λέγεται milling: το υπάρχον οδόστρωμα θραύεται σε μικρότερα κομμάτια από ειδικό όχημα (Εικόνα 2.2). Με αυτή την διαδικασία μπορούν να αφαιρεθούν μέχρι 50 χιλιοστά πάχους οδοστρώματος ανά διέλευση του οχήματος. Δυνατή είναι και η επέμβαση σε μεγάλο βάθος της δομής του οδοστρώματος (full depth removal), που περιλαμβάνει θραύση του οδοστρώματος με σφύρα ή έμβολο προσαρμοσμένο σε εκσκαφέα.

Η διαδικασία milling είναι η προτιμώμενη μέθοδος, διότι αποτελεί μια πιο επιλεκτική αφαίρεση υλικού από την ανάκτηση πλήρους βάθους, κατά την οποία αφαιρούνται και ποσότητες αδρανών υλικών της βάσης/υπόβασης του οδοστρώματος. Επιπλέον, το όχημα milling δεν εμποδίζει την κυκλοφορία στις υπόλοιπες λωρίδες της οδού.

Εικόνα 2.2 Ειδικό όχημα για milling οδοστρωμάτων

Η επιλογή του βάθους του επιφανειακού στρώματος που θα αφαιρεθεί συχνά βασίζεται στην οπτική εξέταση δειγμάτων. Πυρήνες πρέπει να λαμβάνονται (από κάθε λωρίδα της οδού) από

φθαρμένα και μη σημεία και να διαπιστώνεται το βάθος ρηγματώσεων και η θέση αδύναμων στρωμάτων (Εικόνα 2.3). Η αφαίρεση του αδύναμου υλικού είναι επιθυμητή για την βελτίωση της μακροπρόθεσμης απόδοσης του οδοστρώματος.

Εικόνα 2.3 Πυρήνες ασφαλτικού υλικού

Τα οχήματα milling κομματιάζουν την ασφαλτική στρώση με ειδικά προσαρμοσμένα «δόντια» (Εικόνα 2.4). Τα δόντια περιστρέφονται με ταχύτητα περίπου 200 στροφές ανά λεπτό. Η κοκκομετρική διαβάθμιση που προκύπτει εξαρτάται από την σκληρότητα των αδρανών, την ακαμψία της ασφάλτου (και επομένως την θερμοκρασία την στιγμή της αφαίρεσης), την ταχύτητα του οχήματος milling και το βάθος κοπής.

Εικόνα 2.4 Περιστρεφόμενα «δόντια» milling

Το μέγεθος των πλακών, σβώλων ή κομματιών που προκύπτουν από την αφαίρεση ασφαλτικού υλικού καθορίζει το αν το υλικό είναι κατάλληλο για ανακύκλωση. Για να γίνει επεξεργασία με θραυστήρα οι μέγιστες διαστάσεις σβώλων πρέπει να είναι 1,0×0,7×0,4.

Οι μέθοδοι αφαίρεσης και θραύσης είναι σημαντικοί για την παραγωγή καλά διαβαθμισμένου και καλής ποιότητας ανακτώμενου υλικού από εύθραυστη, «γερασμένη» άσφαλτο. Τροποποίηση της σύστασης του υλικού μπορεί να γίνει με προσθήκη νέου αδρανούς υλικού. Για την κατασκευή επιφανειακών στρώσεων, όμως, το μίγμα απαιτείται να έχει υψηλό βαθμό ομοιογένειας. Η ομοιογένεια και η ποιότητα του ανακτώμενου υλικού, σε συνδυασμό με είδος του εξοπλισμού ανακύκλωσης καθορίζει το ποσοστό του ανακτώμενου υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέα ασφαλτικά μίγματα. Τυπικά ποσοστά είναι 10-30%, αν και χρήση 80-100% είναι δυνατή (EAPA, 2005). Το ευρωπαϊκό πρότυπο, EN 13108: 2005, επιτρέπει χρήση ανακτώμενου υλικού έως και 10% στις επιφανειακές στρώσεις και έως και 50% σε ασφαλτικές βάσεις ή συνδετικές στρώσεις. Αντίστοιχες προδιαγραφές συστήνονται και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ενδεικτικά, το τμήμα μεταφορών της πολιτείας Ουάσιγκτον επιτρέπει ποσοστό ανακτώμενου υλικού ίσο με 20% του συνολικού βάρους αδρανών (WSDOT M 41-10, 2014), αλλά και ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό σε θερμά μίγματα (HMA).

2.2 Χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στην οδοποιία

2.2.1 Ασφαλτικές στρώσεις

Οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούν στρώσεις από ασφαλτόμιγμα κατασκευασμένες πάνω από βάση και υπόβαση από ασύνδετα υλικά. Η πιο διαδεδομένη χρήση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού είναι ως συστατικό σε θερμά ασφαλτικά μίγματα. Μπορεί να αντικαταστήσει ποσότητα αδρανούς υλικού ή με θέρμανση πριν την χρήση να αντικαταστήσει ποσότητα του ασφαλτικού συνδετικού παράγοντα. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά τεχνικές ανακύκλωσης του ασφαλτικού υλικού:

Εν θερμώ ανακύκλωση σε εργοστάσιο (hot-in-plant recycling)

Με την συγκεκριμένη διαδικασία επεξεργάζεται το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό για χρήση του στις ψηλότερες ασφαλτικές στρώσεις του οδοστρώματος. Το εξαγώγιμο ασφαλτόμιγμα (recycled hot mix asphalt, RCA) έχει συγκεκριμένο ποσοστό παλιάς και νέας ασφάλτου. Ξεκινώντας από τις ιδιότητες της παλιάς ασφάλτου (όπως διεισδυτικότητα, ιξώδες)

υπολογίζονται μέσω απλών κανόνων και νομογραφημάτων το είδος και η ποσότητα συνδετικού υλικού που χρειάζεται ώστε το τελικό μείγμα να έχει τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Τρεις τεχνικές είναι διαθέσιμες που διαφέρουν στην προθέρμανση της ανακτώμενης ασφάλτου και καθορίζουν την απόδοση της ανακύκλωσης:

- Χωρίς προθέρμανση της παλιάς ασφάλτου – απόδοση: 10-30% ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού
- Διαρκής προσθήκη ασφάλτου στο δοχείο αναμόχλευσης – απόδοση: 10-50%
- Προθέρμανση του ασφαλτικού υλικού από παράλληλη ροή θερμού αέρα στο δοχείο – απόδοση: 10-70%

Παράγοντες όπως η περιεχόμενη υγρασία, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η πιθανή γήρανση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή της τεχνικής. Η τελευταία τεχνική έχει τα καλύτερα αποτελέσματα και για αυτό προτιμάται για ανακύκλωση ασφάλτου υψηλού επιπέδου.

Εν θερμώ ανακύκλωση επί το έργο (hot-in-situ recycling)

Αυτή η διαδικασία στοχεύει στην βελτίωση των άνω κείμενων 2-4 εκατοστών του ασφαλτικού στρώματος στην περιοχή του έργου. Αρχικά θερμαίνεται το στρώμα ασφάλτου και στην συνέχεια πραγματοποιείται επέμβαση για την διόρθωση των ατελειών. Η θέρμανση γίνεται με υπεριώδη ακτινοβολία ή με ειδικά οχήματα θερμού αέρα που θερμαίνουν την επιφάνεια στους 100-140°C, χωρίς να προκαλούν οξείδωση την άσφαλτο. Αμέσως μετά το μαλακό υλικό «κόβεται» μηχανικά με ατσάλινα εργαλεία. Τα είδη επέμβασης:

- Ανασχηματισμός: το μαλακό υλικό διαμορφώνεται στο επιθυμητό σχήμα και η τελική συμπύκνωση γίνεται με συμβατικούς οδοστρωτήρες. Με την συγκεκριμένη επέμβαση αλλάζει το σχήμα της επιφάνειας της οδού και πιθανώς ο όγκος των πόρων αλλά όχι η χημική σύνθεση του μείγματος.
- Ανά επίστρωση: αφού αφαιρεθεί το μαλακό υλικό, νέο ασφαλτικό υλικό παίρνει την θέση του και συμπυκνώνεται πάνω στα παλαιότερα στρώματα. Η σύνθεση της παλιάς ασφάλτου δεν αλλάζει ούτε σε αυτή την τεχνική, αλλά τώρα επικαλύπτεται από νέο ασφαλτικό υλικό.

- Ανάμειξη: είναι εξέλιξη της παραπάνω μεθόδου κατά την οποία η παλιά άσφαλτος αναμειγνύεται με νέο υλικό (άσφαλτος, συνδετικό υλικό ή κάποιος ανανεωτικός χημικός παράγοντας, ανάλογα με την διόρθωση που χρειάζεται)`. Η επέμβαση αυτή αλλάζει την χημική σύσταση του ασφαλτομίγματος.

Εν ψυχρώ ανακύκλωση σε εργοστάσιο (cold-in-plant recycling)

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει ανάμειξη ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού με ασφαλτικό γαλάκτωμα (asphalt emulsion) ή αφρώδη άσφαλτο (foamed asphalt). Αναζωογονητικοί παράγοντες μπορούν να προστεθούν για να βελτιωθεί το ιξώδες του ασφαλτικού υλικού καθώς και αδρανές υλικό για την βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Το τελικό μείγμα χρησιμοποιείται ως σταθεροποιητικό στρώμα βάσης.

Η διαδικασία αυτή είναι λιγότερο δημοφιλής, με την εν ψυχρώ ανακύκλωση επί το έργο να παίρνει την θέση της.

Εν ψυχρώ ανακύκλωση επί το έργο (cold-in-place recycling)

Η διαδικασία είναι όμοια με την εν ψυχρώ ανακύκλωση σε εργοστάσιο αλλά γίνεται στην υπό κατασκευή οδό μια σειρά ειδικών οχημάτων. Η τυπική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά βήματα:

1. Milling ενός λεπτού ασφαλτικού στρώματος πάχους 50-100mm από κατάλληλο όχημα.
2. Το υλικό συνθλίβεται περεταίρω και διαβαθμίζεται ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κοκκομετρική διαβάθμιση και μέγιστο μέγεθος κόκκων. Σε αυτό το στάδιο προστίθεται παρθένο υλικό αν αυτό απαιτείται.
3. Το διαβαθμισμένο υλικό αναμειγνύεται με πρόσθετο συνδετικό υλικό (γαλάκτωμα ασφάλτου, τσιμέντο, σταχτή κα.)
4. Το υλικό τοποθετείται στην αρχική θέση και διαμορφώνεται στην σχεδιασμένη υψομετρική διαβάθμιση.
5. Ακολουθεί συμπύκνωση με οδοστρωτήρα στην επιθυμητή πυκνότητα.
6. Σε περίπτωση οδού με μεγάλη κυκλοφορία, στην επιφάνεια του νέου μείγματος τοποθετείται μια ειδική στρώση για την καλύτερη πρόσδεση με το υπερκείμενο στρώμα.

2.2.2 Βάσεις-Υποβάσεις

Λιγότερο διαδεδομένη είναι η χρήση ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού σε ασύνδετες, αλλά και στερεοποιημένες βάσεις/υποβάσεις οδοστρωμάτων. Η χρήση αυτή κερδίζει έδαφος λόγω της διαρκώς αυξανόμενης ανάγκης για εξοικονόμηση φυσικών πόρων – αξίζει να αναφερθεί ότι στις ΗΠΑ προάγεται αύτη η πρακτική και λόγω της συσσώρευσης ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού που δεν χρησιμοποιείται στις ασφαλτικές στρώσεις.

Το ασφαλτικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό βάσης ή υπόβασης σε όλα τα είδη οδοστρωμάτων: οδοστρώματα οδών, χώρους στάθμευσης, ποδηλατοδρόμους, σε ανακατασκευή χαλικόδρομων, επαρχιακών οδών κα.

Γενικά, η απόδοση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού σε αυτές τις στρώσεις κρίνεται ικανοποιητική. Στα θετικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνονται η επαρκής φέρουσα ικανότητα, οι αποστραγγιστικές του ιδιότητες και η ανθεκτικότητά του. Παρόλα αυτά, η μη κατάλληλη επεξεργασία του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές) μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη φέρουσα ικανότητα της κοκκώδης βάσης.

Μια χαρακτηριστική περίπτωση χρήσης ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στην βάση ενός οδοστρώματος είναι ανάκτηση πλήρους βάθους (full depth reclamation, FDR). Η διαδικασία αυτή, αποτελεί ουσιαστικά επέκταση των βασικών αρχών της εν ψυχρώ ανακύκλωσης σε όλο το βάθος των ασφαλτικών στρώσεων και σε ένα προκαθορισμένο τμήμα του υλικού της βάσης (τυπικό βάθος 150-225mm). Αρχικά, πραγματοποιείται κονιορτοποίηση του υπάρχοντος οδοστρώματος μέχρι προκαθορισμένο βάθος και προστίθενται υλικά όπως σταθεροποιητικοί παράγοντες. Το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό, στην συνέχεια, ενυδατώνεται ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη υγρασία. Ακολουθεί η συμπύκνωση του υλικού με σκοπό την διαμόρφωση ομοιόμορφης πυκνότητας και την διόρθωση ατελειών. Ενδείκνυται η τοποθέτηση προστατευτικής στρώσης (fog seal). Πάνω από την νέα σταθεροποιημένη βάση, συνήθως τοποθετείται πιο ανθεκτική ασφαλτική στρώση.

3 ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

3.1 Ορισμός

Το μέτρο επανάκτησης (Resilient modulus, M_r) αποτελεί μια παράμετρο «κλειδί» για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Η παράμετρος αυτή είναι μια βασική σχέση τάσης-παραμόρφωσης των ασύνδετων υλικών που χρησιμοποιείται στην δομική ανάλυση οδοστρωμάτων πολλαπλών στρώσεων. Το μέτρο επανάκτησης ορίζεται ως ο λόγος της πρόσθετης αξονικής (κάθετης) τάσης προς την αντίστοιχη αξονική ελαστική παραμόρφωση:

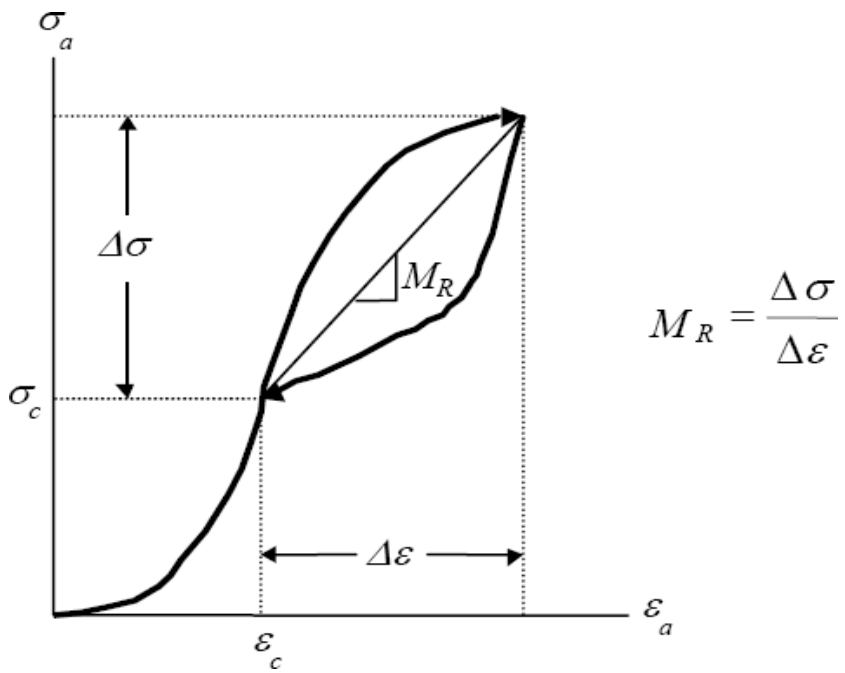
$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \tag{3.1}$$

Όπου:

M_r το μέτρο επανάκτησης,

σ_d η πρόσθετη αξονική τάση,

ε_r η ελαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 3.1 Γραφική παράσταση τάσης-παραμόρφωσης

Για την καλύτερη και πιο πρακτική κατανόηση αυτής της σχέσης πρέπει να γίνουν κατανοητοί οι όροι τάση και παραμόρφωση.

Τάση είναι ο λόγος της δύναμης προς την αντίστοιχη επιφάνεια φόρτισης. Όταν φορτίο τροχού διέρχεται από την επιφάνεια του οδοστρώματος, τα στοιχεία του δέχονται διαφορετικές τάσεις ανάλογα με το βάθος τους από την επιφάνεια και την απόστασή τους από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Η τάση σ_d είναι η αξονική/κάθετη τάση σε ένα σημείο του οδοστρώματος λόγω της επιβολής φορτίου. Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ικανότητα των υλικών να αναλάβουν τα φορτία της κυκλοφορίας είναι και η πλευρική τάση σ_3. Το μέγεθος της πλευρικής τάσης εξαρτάται από τα υλικά του περιβάλλουν το στοιχείο που εξετάζεται, αλλά και η θέση (βάθος) του στοιχείου στην δομή του οδοστρώματος.

Με την επιβολή σταθερής τάσης παρατηρείται παραμόρφωση των υλικών, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τις ιδιότητές τους. Ως παραμόρφωση ορίζεται ο λόγος της μεταβολής του μήκους μιας διάστασης του υλικού προς το αρχικό μήκος της διάστασης αυτής. Ένα τμήμα της παραμόρφωσης μπορεί να είναι αναστρέψιμο (ελαστική παραμόρφωση, ε_r), ενώ ένα άλλο τμήμα της είναι μη αναστρέψιμο (πλαστική παραμόρφωση, ε_p).

Είναι αναγκαίο να τονισθεί ότι το μέτρο επανάκτησης δεν είναι μέτρο αντοχής, αλλά μέτρο δυσκαμψίας του υλικού. Η απόλυτη αντοχή ορίζεται από το σημείο που το υλικό αστοχεί κάτω από την επιβολή συγκεκριμένου οριακού φορτίου. Αντίθετα, το μέτρο επανάκτησης μπορεί να προσδιοριστεί από μεγάλο εύρος συνδυασμών αξονικής και πλευρικής τάσης που δεν έχουν αποτέλεσμα την αστοχία του υλικού. Εδώ έγκειται και η χρησιμότητά του στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων: με το μέτρο επανάκτησης δίνεται η δυνατότητα χαρακτηρισμού των υλικών οδοποιίας υπό ποικίλες συνθήκες φόρτισης (μονοί άξονες, διπλοί άξονες, διπλοί δίδυμοι κλπ.) που δεν θα οδηγήσουν στην αστοχία του οδοστρώματος. Επιλέγοντας τα πάχη για τα διαφορετικά στρώματα και την δυσκαμψία των υλικών, το οδόστρωμα μπορεί να κατασκευασθεί ώστε να αναλάβει τα φορτία σχεδιασμού καθ' όλη την διάρκεια ζωής του.

Το μέτρο επανάκτησης χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Παρέχει μια ένδειξη για την ελαστική απόκριση των εδαφικών υλικών. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι τα κοκκώδη υλικά των βάσεων (όπως και το ανακτώμενο ασφαλτικό

υλικό) επιδεικνύουν μη γραμμική ελαστοπλαστική συμπεριφορά σε εργαστηριακές και πραγματικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση τάσης-παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική και εμφανίζεται ελαστική και παραμένουσα (πλαστική) παραμόρφωση. Παρόλα αυτά, η ελαστική ανάλυση κατά στρώματα και κατ' επέκταση το μέτρο επανάκτησης, χρησιμοποιείται εκτενώς στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι μια σχετικά απλή διαδικασία ανάλυσης και κυρίως γιατί οι φορτίσεις που εξετάζονται είναι γενικά μικρού μεγέθους, με αποτέλεσμα η παραδοχή γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι περισσότεροι οδηγοί σχεδιασμού οδοστρωμάτων θεωρούν την τιμή του μέτρου επανάκτησης σταθερή σε όλο το εύρος ενός στρώματος. Για να χαρακτηρισθούν όμως, με ακρίβεια τα μη συνεκτικά στρώματα βάσης και υπόβασης των οδοστρωμάτων πρέπει να εξετασθούν οι μεταβολές του μέτρου επανάκτησης σε όλο το εύρος τους. Σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές τιμές του μέτρου επανάκτησης για την ανάλυση οδοστρωμάτων σε συνθήκες που προσομοιώνουν τις πραγματικές με μεγαλύτερη ακρίβεια.

3.2 Μέθοδοι υπολογισμού

Το μέτρο επανάκτησης μπορεί να εκτιμηθεί άμεσα με εργαστηριακές δοκιμές επαναλαμβανόμενου φορτίου, έμμεσα μέσω συσχέτισης με άλλες τυποποιημένες δοκιμές ή με αντίστροφο υπολογισμό από τα δεδομένα in-situ δοκιμών. Πιο αναλυτικά, ο αμερικανικός οργανισμός αυτοκινητοδρόμων και μεταφορών (American Association of State Highway and Transportation Officials) στον οδηγό για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων (AASHTO, 1993) αναφέρει τέσσερεις προσεγγίσεις για την καθορισμό μιας τιμής σχεδιασμού για το μέτρο επανάκτησης:

- Εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τυποποιημένες διαδικασίες. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση πραγματοποιείται:

  α) διεξαγωγή δοκιμών σε δείγματα που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες πυκνότητας και υγρασίας του έργου ή σε δείγματα με μέγιστη ξηρή πυκνότητα και βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία, όπως διαπιστώνονται στο εργαστήριο.

β) επιλογή κατάλληλου καταστατικού μοντέλου που προσαρμόζεται στα εργαστηριακά αποτελέσματα, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης για διάφορους συνδυασμούς τάσεων.

- Αντίστροφος υπολογισμός από μη-καταστρεπτικές δοκιμές (non-destructive testing, NDT), όπως η δοκιμή πίπτοντος βάρους (FWD)
- Εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης μέσω συσχέτισης με άλλες φυσικές ιδιότητες των υλικών (όπως ο δείκτης αντίστασης R, το CBR, ο δείκτης PI κλπ.)
- Ορισμός τιμής με βάση προηγούμενη εμπειρία με «παρόμοια» εδάφη ή κοκκώδη υλικά.

3.3 Διερεύνηση στο εργαστήριο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία διερεύνησης του μέτρου επανάκτησης περιλαμβάνει την διενέργεια εργαστηριακών δοκιμών. Οι επικρατέστερες εργαστηριακές δοκιμές δίνουν έμφαση στην αξιολόγηση των υλικών με επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί στις δοκιμές αφού αναπαράγει αποτελεσματικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες φόρτισης: τα υλικά του οδοστρώματος υποβάλλονται σε μια σειρά από διακριτές φορτίσεις, αντίστοιχες με τα φορτία των τροχών. Έτσι, οι δοκιμές επαναλαμβανόμενων φορτίσεων χρησιμοποιούνται πολλά χρόνια για να προσομοιώσουν τα φορτία των οχημάτων.

Σε γενικές γραμμές οι δοκιμές αυτές ακολουθούν παρόμοια διαδικασία. Αρχικά, υπολογίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού από την περιοχή του έργου. Στην συνέχεια, το υλικό διαμορφώνεται σε κυλινδρικά δοκίμια με ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας ανάλογη με αυτή στην περιοχή του έργου ή με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας που υπολογίζεται με διαδικασίες συμπύκνωσης του δείγματος. Η κύρια διαδικασία της δοκιμής είναι η εξής: τα κυλινδρικά δοκίμια του υλικού υποβάλλονται σε σειρά συγκεκριμένων φορτίσεων, με ενδιάμεσα «νεκρά» διαστήματα χωρίς φόρτιση, με τον ίδιο τρόπο που πολλαπλοί τροχοί ασκούν πίεση όταν κινούνται στο οδόστρωμα. Στα δοκίμια ασκούνται συνεχείς πλευρικές τάσεις που προσομοιώνουν τις πλευρικές τάσεις που ασκούνται στα στοιχεία του οδοστρώματος από τις εδαφικές μάζες που τα περικλείουν. Η ολική ελαστική και πλαστική παραμόρφωση του

δείγματος μετράται με ειδικό εξοπλισμό και τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου επανάκτησης του υλικού.

Διαδικασίες για την διεξαγωγή δοκιμών επαναλαμβανόμενων φορτίσεων είχαν προταθεί από αρκετές υπηρεσίες και επιστημονικές ομάδες: (Thompson, 1979), (TRB, 1975), (The Asphalt Institute, 1978). Το 1982, ο AASHTO εισήγαγε την εργαστηριακή δοκιμή T274-82, "Resilient Modulus of Subgrade Soils." Το 1989 η επιτροπή υλικών του AASHTO απέσυρε την δοκιμή T274-82 και το 1991 υιοθετήθηκε η δοκιμή T292-91I, "Resilient Modulus Testing of Subgrade Soils and Untreated Base/Subbase Materials". Η δοκιμή T292 διαφοροποίησε την διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων, το μέγεθος και τον τρόπο εφαρμογής της φόρτισης. Αργότερα, προτάθηκε το πρωτόκολλο TP-46. Σύμφωνα με αυτή την δοκιμή δείγματα με επιθυμητή πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας αντιπροσωπευτικό των συνθηκών του έργου υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες τριαξονικές φορτίσεις. Ο συνδυασμός τριών τιμών πλευρικής και πέντε τιμών αξονικής τάσης δίνει 15 τιμές μέτρου επανάκτησης για κάθε δείγμα. Στην συνέχεια επιλέγεται καταστατικό μαθηματικό μοντέλο, με κατάλληλη προσαρμογή στα δεδομένα της δοκιμής, για την περιγραφή της ελαστικής απόκρισης του υλικού. (Thompson M.R., 1998)

Παρά το γεγονός ότι ο οργανισμός AASHTO είχε εισάγει τρεις διαφορετικές δοκιμές, δεν υπήρχε τυποποιημένη διαδικασία για το μέτρο επανάκτησης. Έρευνα (Chen, 1995) ανέδειξε ότι η αλληλουχία φορτίσεων επηρεάζει το μέτρο επανάκτησης των υλικών. Στην έρευνα αυτή, εξετάστηκαν παράγοντες όπως η διαδικασία δοκιμών που χρησιμοποιείται, η αλληλουχία φορτίσεων, ο αριθμός των επαναλήψεων και η θέση των μετρητών. Παρατηρήθηκε ότι η δοκιμή T292-91I αρχίζει με φόρτιση υψηλών τάσεων και καταλήγει σε χαμηλές, ενώ αντίθετα η δοκιμή TP-46 ξεκινά από χαμηλές τάσεις και καταλήγει σε υψηλότερα επίπεδα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα βρέθηκε ότι με την αύξηση των τάσεων στην δεύτερη δοκιμή τα δείγματα γίνονται πιο δύσκαμπτα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες τιμές μέτρου επανάκτησης. Επίσης, οι ερευνητές κατέληξαν από τα αποτελέσματα ότι η επιλογή δοκιμής προκαλεί μεγαλύτερη μεταβλητότητα στο μέτρο επανάκτησης απ' ότι η προέλευση του υλικού.

Οι σύγχρονες μέθοδοι για εργαστηριακές δοκιμές είναι (NCHRP1-37A, 2004):

- NCHRP 1-28A, "Harmonized Test methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design."

- AASHTO T307, "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials"

Σε αυτά τα πρωτόκολλα περιγράφονται λεπτομερώς οι διαδικασίες προετοιμασίας των δειγμάτων και ο εξοπλισμός που απαιτείται. Μάλιστα, για να περιοριστεί το φαινόμενο αύξησης της δυσκαμψίας των δειγμάτων κατά την διάρκεια της δοκιμής (λόγω της σταδιακής αύξησης των τάσεων), προτείνεται η αυξομείωση των ασκούμενων πιέσεων στις σειρές φόρτισης.

Παρά τις αρκετές βελτιώσεις η διαδικασία δοκιμών παρουσιάζει αρκετές αβεβαιότητες αλλά και περιορισμούς (Seed, 2000):

- Τα εργαστηριακά δείγματα δεν προσομοιώνουν απόλυτα τις πραγματικές συνθήκες λόγω ανομοιομορφίας των δειγμάτων, διαφορές στον προσανατολισμό των αδρανών, περιεχόμενης υγρασίας και επίπεδου συμπύκνωσης.
- Αναπόφευκτα ελαττωματικός εξοπλισμός δυσκολεύει την επίτευξη επιθυμητών φορτίσεων.
- Ελαττώματα στα όργανα μέτρησης προκαλούν αβεβαιότητα στην μέτρηση των παραμορφώσεων στα δείγματα
- Μη καθολική αποδοχή του απαιτούμενου εξοπλισμοί, της βαθμονόμησης και της διαδικασίας επαλήθευσης των αποτελεσμάτων οδηγεί σε διαφορές και ασυμφωνίες μεταξύ των εργαστηρίων.

Όλα αυτά τα ζητήματα εμποδίζουν την καθολική αποδοχή μιας δοκιμαστικής διαδικασίας από μελετητές και υπηρεσίες. Είναι φανερό ότι οι εργαστηριακές δοκιμές για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης είναι υπό συνεχή ανάπτυξη και βελτίωση και χρειάζεται χρόνος μέχρι να γίνουν δοκιμές «ρουτίνας», που θα πραγματοποιούνται με ακρίβεια από όλα τα εργαστήρια υλικών.

3.4 Καταστατικά μοντέλα έκφρασης του μέτρου επανάκτησης

Πολυάριθμα καταστατικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί που συνδυάζουν τις τάσεις και τις τιμές του μέτρου επανάκτησης για να περιγράψουν την μη γραμμική συμπεριφορά φόρτισης-παραμόρφωσης των υλικών. Χαρακτηριστικά, αναφέρονται τα ακόλουθα:

K-θ μοντέλο (Hicks & Monismith, 1971)

Το καταστατικό μοντέλο αυτό –συνήθως αποδίδεται στους Hicks και Monismith (1971)– εξαιτίας της απλότητάς του είναι το πιο ευρέως γνωστό μοντέλο για τη εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης ασύνδετων αδρανών σε βάσεις/υποβάσεις. Είχε καθολική αποδοχή την δεκαετία του 60 στις εργαστηριακές δοκιμές και μάλιστα ο οδηγός AASHTO του 1986 συνιστούσε την χρήση του στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

$$M_r = K_1\ \theta^{K_2} \tag{3.1}$$

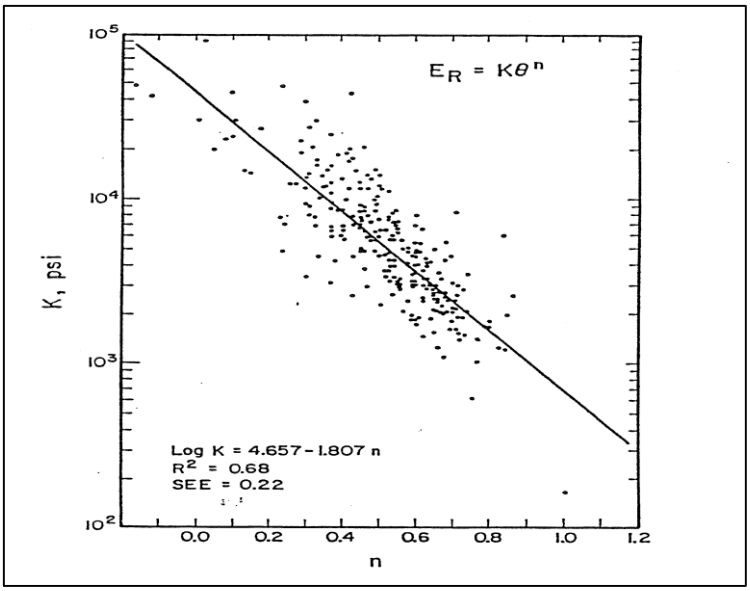
Όπου:

M_r το μέτρο επανάκτησης,

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ η ολική τάση (ή τάση διόγκωσης),

K_1 και K_2 σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη δοκιμή τριαξονικής φόρτισης.

Οι Rada και Witczak (1981) συγκέντρωσαν στοιχεία ελαστικής παραμόρφωσης και διαπίστωσαν τάση μείωσης της σταθεράς K_2, όταν η K_1 αυξάνεται. Μάλιστα, πρότειναν την σχέση μεταξύ των K_1 (K) και K_2 (n) του σχήματος 3.2 (Rada & Witczak, 1981).



Σχήμα 3.2 Σχέση K_1-K_2 από τους Rada και Witczak (1981)

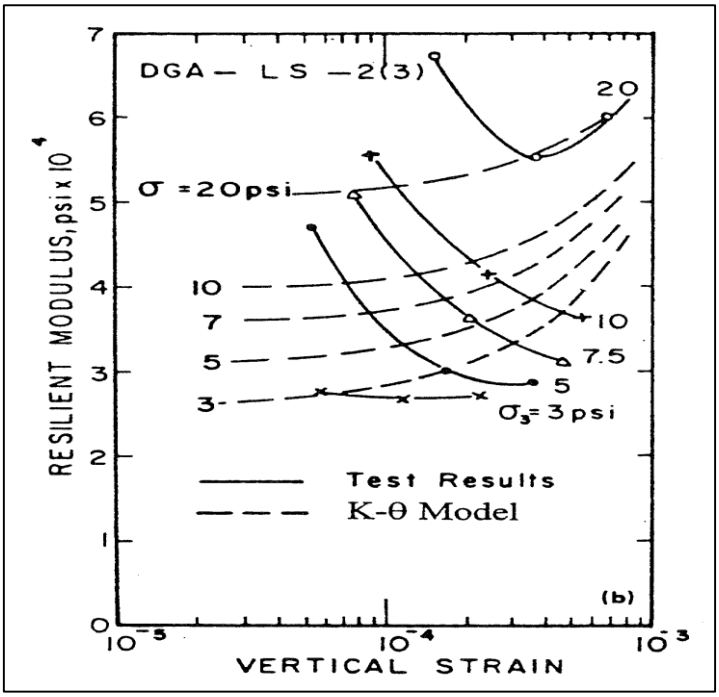
(a) Base		
Moisture Condition	k_1*	k_2*
Dry	6,000 - 10,000	0.5 - 0.7
Damp	4,000 - 6,000	0.5 - 0.7
Wet	2,000 - 4,000	0.5 - 0.7
(b) Subbase		
Dry	6,000 - 8,000	0.4 - 0.6
Damp	4,000 - 6,000	0.4 - 0.6
Wet	1,500 - 4,000	0.4 - 0.6

* Range in k_1 and k_2 is a function of the material quality.

Σχήμα 3.3 Τυπικές τιμές K_1 και K_2 ασύνδετων υλικών, οδηγός AASHTO (1986)

Οι Elliott και Thompson (1985) χρησιμοποιώντας το μοντέλο με τιμές σταθερών $K_1 = 9000$, $K_2 = 0,33$ και $K_1 = 4000$, $K_2 = 0,5$ συνέκριναν την συμπεριφορά διάφορων υλικών και κατέληξαν ότι οι φυσικές τους ιδιότητες δεν οδηγούσαν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις. Αντίθετα, η συνδυασμένη δυσκαμψία /σκληρότητα των στρωμάτων βάσης και υπόβασης ήταν καθοριστικός παράγοντας (Elliott & Thompson, 1985).

Το καταστατικό μοντέλο K-θ είναι απλό, αλλά αγνοεί σημαντικούς παράγοντες επιρροής του μέτρου επανάκτησης. Σε έρευνα (Uzan, 1985) διαπιστώθηκε ασυμφωνία μεταξύ μετρήσεων και προβλεπόμενων τιμών, λόγω του ότι το μοντέλο K-θ αγνοούσε την επίδραση της διατμητικής τάσης και παραμόρφωσης (σχήμα 3.4). Ο Hicks έδειξε ότι το καταστατικό μοντέλο δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά την φθίνουσα συμπεριφορά του μέτρου επανάκτησης όταν για τις κύριες τάσεις ισχύει $(\sigma 1/\sigma 3)<2$ (Hicks, 1970). Τέτοιες συνθήκες φόρτισης, όμως, είναι απίθανο να πραγματοποιούνται στα οδοστρώματα. Σαν συμπέρασμα φαίνεται ότι το καταστατικό μοντέλο K-θ δεν προσαρμόζεται απόλυτα στην συμπεριφορά των υλικών, αλλά περιγράφει ρεαλιστικά την αύξηση του μέτρου επανάκτησης όταν η πρόσθετη αξονική τάση (κατακόρυφο φορτίο) είναι μεγαλύτερη από τις πλευρικές πιέσεις.



Σχήμα 3.4 Μετρήσεις-τιμές K-θ, Uzan (1985)

K-G μοντέλο (Boyce, 1980)

Ο Boyce (1980) πραγματοποίησε μια σειρά από τριαξονικές δοκιμές φόρτισης σε δείγματα καλά διαβαθμισμένου θραυστού ασβεστόλιθου. Βρέθηκε ότι η ελαστική παραμόρφωση, επηρεάζεται από την μέση τάση p και την αναλογία της πρόσθετης αξονικής τάσης q ως προς την μέση τάση. Έτσι, ο Boyce ανέπτυξε τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K = \frac{K_i\, p^{(1-\mu)}}{1-\beta\left(\frac{q}{p}\right)^2} \tag{3.2}$$

$$G = G_i\, p^{(1-\mu)} \tag{3.3}$$

$$\varepsilon_v = \left(\frac{1}{K_\iota}\right) p^{\mu}\left[1-\beta\left(\frac{q}{p}\right)^2\right] \tag{3.4}$$

$$\varepsilon_q = \left(\frac{1}{3G_i}\right) p^{\mu}\left(\frac{q}{p}\right) \tag{3.5}$$

Όπου:

K_i η αρχική τιμή του μέτρου αντίστασης σε ομοιόμορφη συμπίεση (bulk modulus),

G_i το μέτρο διάτμησης,

μ σταθερά με μ<1,

$\beta = (1-\mu)\, K_i / (6\, G_i)$ και

q το πρόσθετο αξονικό φορτίο.

Αν και χρησιμοποιεί μόνο τρεις παραμέτρους (μ, K_i, και G_i) το συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο δίνει ικανοποιητικές προβλέψεις για το μέτρο επανάκτησης συγκρινόμενες με τιμές που προκύπτουν από πραγματικές μετρήσεις.

Μοντέλο Contour (Brown & Pappin, 1981)

Οι Brown και Pappin (1981) εξέλιξαν το καταστατικό μοντέλο του Boyce σε ένα μοντέλο 5 παραμέτρων. Με ειδική τριαξονική συσκευή δοκιμάσθηκαν υλικά σε διάφορους ρεαλιστικούς συνδυασμούς τάσεων. Το συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο προβλέπει τις ογκομετρικές και διατμητικές παραμορφώσεις με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\varepsilon_v = \frac{1}{K_i}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\mu-1}\left[1-\beta\left(\frac{q}{p_0}\right)^2\right]p \qquad (3.6)$$

$$\varepsilon_q = \frac{1}{3G_i}\left(\frac{p}{p_0}\right)^{k-1} q \qquad (3.7)$$

$$\Delta\varepsilon_q = \frac{1}{3G_i}\left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\kappa}\frac{q_2}{p_2} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\kappa}\frac{q_1}{p_1}\right] l^r \qquad (3.8)$$

Όπου:

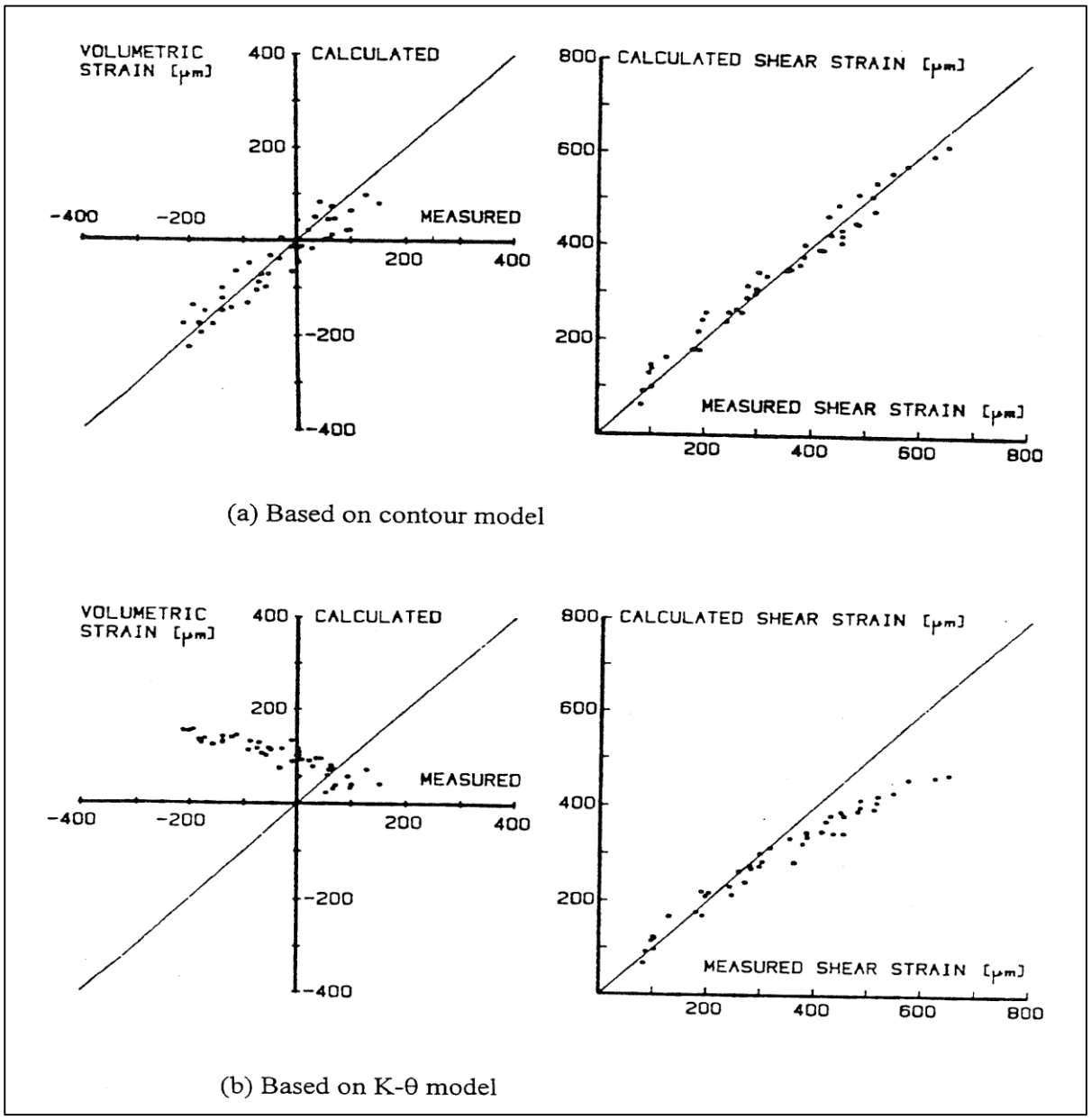
$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ και $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$,

κ, r είναι σταθερές των υλικών,

p_0 η πίεση αναφοράς,

$l = (\Delta p^2 + \Delta q^2)^{1/2}$ το μήκος μεταξύ δύο καταστάσεων φόρτισης (συνδυασμοί φόρτισης).

Το καταστατικό μοντέλο αυτό προβλέπει το μέτρο επανάκτησης με μεγαλύτερη ακρίβεια από τα προηγούμενα. Παρόλα αυτά, οι απαιτούμενες δοκιμές και η εκτίμηση των σταθερών των υλικών είναι πιο πολύπλοκες διαδικασίες από άλλες πιο απλές προσεγγίσεις. Το σχήμα 3.5 παρουσιάζει μία σύγκριση των προβλέψεων της ογκομετρικής και διατμητικής παραμόρφωσης, όπως προκύπτουν από τα μοντέλα K-θ και Contour (Sweere, Penning, & Vos, 1987).



Σχήμα 3.5 Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων K-θ, Contour (Sweere et al., 1987)

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του καταστατικού μοντέλου Contour συμφωνούν με τις μετρήσεις, ενώ οι τιμές του μοντέλου K-θ αποκλίνουν αισθητά. Από την άλλη πλευρά όμως, το καταστατικό μοντέλο Contour, με την προσθήκη δύο μεταβλητών, δεν ικανοποιεί πλέον το θεώρημα αμοιβαιότητας των μετακινήσεων (θεώρημα Betti-Maxwell) και επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί ελαστικό.

Μοντέλο Uzan (Uzan, 1985)

Ο καθηγητής Uzan (1985) βελτίωσε το καταστατικό μοντέλο K-θ εντάσσοντας σε αυτό την επιρροή της διατμητικής τάσης. Το νέο καταστατικό μοντέλο εισήγαγε ως παράμετρο την πρόσθετη αξονική τάση που έπρεπε να εκτιμηθεί μέσα από εργαστηριακές δοκιμές. Η εξίσωση του μοντέλου είναι η παρακάτω:

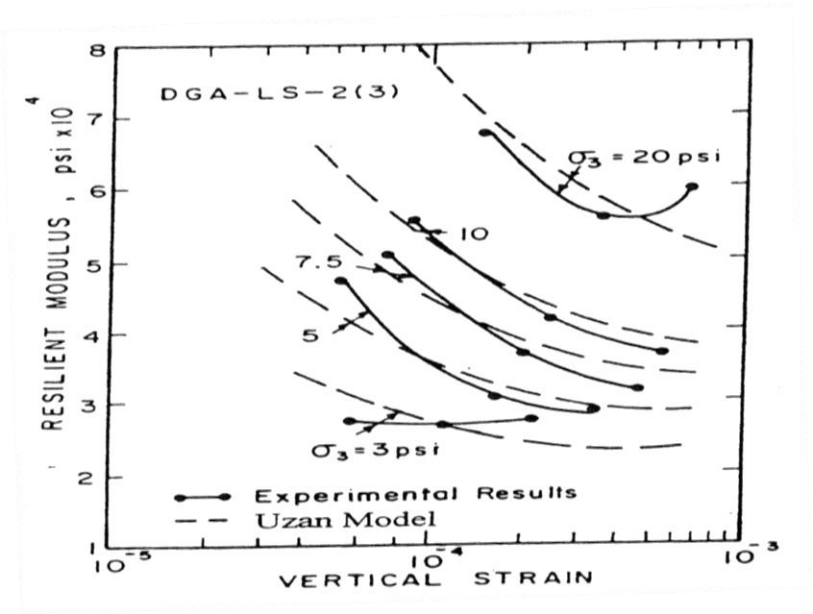
$$M_r = K_3 \theta^{K_4} \sigma_d^{K_5} \qquad (3.9)$$

Όπου:

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 =$ ολική τάση,

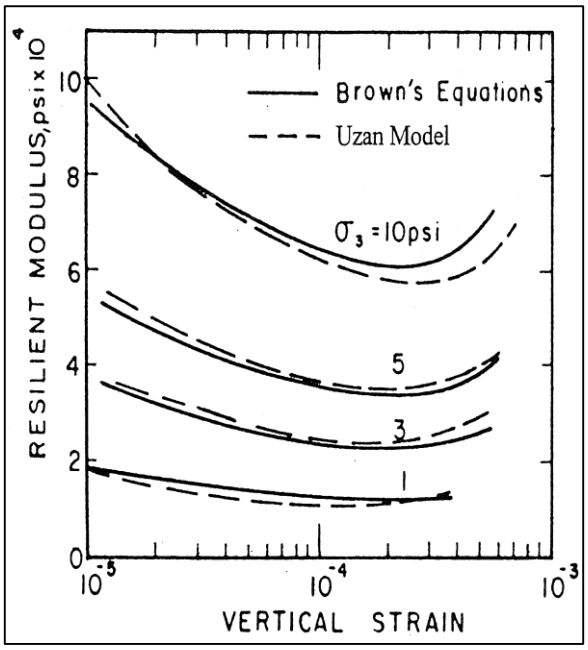
$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 =$ πρόσθετη αξονική/παρεκκλίνουσα τάση (deviator stress) και

K_3, K_4, K_5 σταθερές παλινδρόμησης που υπολογίζονται από επαναλαμβανόμενες δοκιμές τριαξονικής φόρτισης.



Σχήμα 3.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών και προβλέψεων μοντέλου Uzan (1985)

Το μοντέλο Uzan, συγκρινόμενο με το πιο πολύπλοκο μοντέλο Contour, δίνει επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα (Σχήμα 3.7). Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του μοντέλου ενσωματώνει την διατμητική τάση και παραμόρφωση απεικονίζοντας ρεαλιστικά την συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών.



Σχήμα 3.7 Σύγκριση μοντέλου Uzan και Contour

Λόγω της απλότητας αλλά και της ευκολίας στον υπολογισμό των σταθερών, το καταστατικό μοντέλο Uzan χρησιμοποιείται εκτενώς στον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Τροποποιημένο μοντέλο K-G μοντέλο (Jouve, Martinez, Paute, & Ragneau, 1987)

Αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή των εξισώσεων του Boyce. Το τροποποιημένο καταστατικό μοντέλο K-G αγνοεί το φαινόμενο διόγκωσης (K ≤ 0) που είναι ασύμβατο με το ελαστικό μοντέλο (θεώρημα Betti). Οι νέες εξισώσεις:

$$K = K_i p^{(1-\mu)} \left\{ 1 + \gamma \left(\frac{q}{p} \right)^2 \right\} \tag{3.10}$$

$$G = G_i p^{(1-\kappa)} \tag{3.11}$$

$$\varepsilon_q = \frac{1}{3G_i} \left(\frac{q}{p} - c \right) p^{\kappa} \tag{3.12}$$

Όπου:

P = μέση τάση,

q = πρόσθετο αξονικό φορτίο

K_i, G_i, γ, κ, μ σταθερές προς εκτίμηση από πειραματικά δεδομένα,

$C = p_1^{(\kappa-1)} q_1 / p_2^{\kappa} \leq 1$,

P_1, q_1 οι τάσεις στην κατάσταση 1 και

P_2, q_2 οι τάσεις στην κατάσταση 2.

Με το συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο βρέθηκε ότι το σχήμα των σωματιδίων των αδρανών επηρεάζει την ελαστική συμπεριφορά των θραυστών ασύνδετων υλικών. Μεγαλύτερες τιμές του μέτρου επανάκτησης παρατηρήθηκαν σε αδρανή με μέσο ποσοστό ομαλότητας και σφαιρικότητας.

Καταστατικό Μοντέλο Thom (Thom, 1988)

Ο Thom (1988), με την διεξαγωγή δοκιμών με κυλινδρικό μηχανισμό, πρότεινε ένα νέο καταστατικό μοντέλο ελαστικής παραμόρφωσης. Βασιζόμενος και στα ευρήματα των Brown and Pappin, θεώρησε ξεχωριστές σχέσεις για την ογκομετρική και διατμητική παραμόρφωση. Το προτεινόμενο καταστατικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη επίσης την μικρουφή, το σχήμα των σωματιδίων και το μέγεθος των ασύνδετων αδρανών. Κατά συνέπεια απαιτούνται περισσότερες σταθερές για να συσχετιστούν οι ογκομετρικές και διατμητικές παραμορφώσεις με τις κύριες και διατμητικές τάσεις:

$$\varepsilon_v = A\Delta(lnp)^B(\Delta p)^C - D\left[\Delta\left(ln\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)^2\right]^E \tag{3.13}$$

$$\varepsilon_q = F\Delta\left(ln\frac{\sigma_1}{\sigma_3}\right)^G\left[\Delta\tau + \frac{1}{3}\Delta S\right]^H \tag{3.14}$$

Όπου:

σ_1, σ_3 οι κύριες τάσεις,

p μέση τάση,

S η μέση τάση στο επίπεδο,

τ η διατμητική τάση και

A, B, C, D, E, F, G, H οι σταθερές του υλικού που πρέπει να εκτιμηθούν πειραματικά.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσίαζαν πολύ καλή προσαρμογή στα εργαστηριακά δεδομένα. Ο Thom κατέληξε ότι δείγματα αδρανών αποτελούμενα από μεγάλα σωματίδια παρουσίαζαν μεγαλύτερη ελαστική δυσκαμψία και διατμητική αντοχή. Η ακαμψία των ξηρών υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μικρουφή στις επιφάνειες επαφής των σωματιδίων, η οποία καθορίζει την μεταξύ τους τριβή.

Καταστατικό Μοντέλο οκτάεδρης διατμητικής τάσης (Witczak & Uzan, 1988)

Οι Witczak και Uzan (1988) πρότειναν μια τροποποίηση στο καταστατικό μοντέλο Uzan αντικαθιστώντας τον όρο για το πρόσθετο αξονικό φορτίο με έναν όρο οκτάεδρης διατμητικής τάσης. Το καταστατικό μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη του την επιρροή της διόγκωσης που συμβαίνει σε στοιχείο οδοστρώματος όταν υποβάλλεται σε φόρτιση με μεγάλη αναλογία κύριων τάσεων σ_1/σ_3. Είναι καθολικά αποδεκτό εξαιτίας της δυνατότητας του να εφαρμόζεται σε όλα τα είδη των εδαφών από τα πιο συνεκτικά μέχρι τα μη συνεκτικά (universal model).

$$M_r = K_6 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_7} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{K_8} \tag{3.15}$$

Όπου:

$\Theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 =$ ολική τάση,

$T_{oct} =$ οκτάεδρη διατμητική τάση ($\sigma_d \sqrt{2}/3$),

$P_a =$ ατμοσφαιρική πίεση και

K_6, K_7, K_8 σταθερές παλινδρόμησης.

Αφού η σταθερά K_6 είναι ανάλογη του μέτρου ελαστικότητας του Young πρέπει να είναι πάντα θετική (το μέτρο επανάκτησης είναι πάντα θετικό). Η σταθερά K_7 θα πρέπει να είναι θετική γιατί αυξάνοντας την πλευρική τάση προκαλείται δυσκαμψία/σκλήρυνση του υλικού. Αρνητική θα είναι η σταθερά K_8 γιατί η αύξηση της διατμητικής τάσης «μαλακώνει» το υλικό (μικρότερες τιμές του μέτρου επανάκτησης). (George, 2004)

Διάφορες τροποποιημένες εκδοχές του καθολικού καταστατικού μοντέλου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης. Σε μελέτη του μακροπρόθεσμου προγράμματος απόδοσης οδοστρωμάτων LTTP (Yau & Von Quintus, 2002), αναπτύχθηκε το εξής μοντέλο:

$$M_r = K_6 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_7} \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right) + 1\right]^{K_8} \tag{3.16}$$

Αυτό είναι το γενικευμένο (universal) καταστατικό μοντέλο που συνίσταται από τον εμπειρικό οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (MEPDG). Αύτη η εκδοχή του μοντέλου, εφαρμόζεται με ικανοποιητική προσαρμογή σε συνεκτικά αλλά και ασύνδετα εδαφικά υλικά.

Καταστατικό Μοντέλο Itani (Itani, 1990)

Ο Itani (1990) εκτέλεσε εκτενή παλινδρομική ανάλυση χρησιμοποιώντας πολλά μοντέλα για να συσχετίσει το μέτρο επανάκτησης με διαφορετικούς συνδυασμούς πρόσθετου φορτίου, μέσης τάσης, πλευρικής τάσης και αξονικής παραμόρφωσης. Αποτέλεσμα της ανάλυσης ήταν ένα καταστατικό μοντέλο με πολύ καλή προσαρμογή στα εργαστηριακά δεδομένα εμφανίζοντας υψηλό συντελεστή R^2 =0,96.

$$M_r = K_9 \left(\frac{\theta}{3}\right)^{K_{10}} \sigma_d^{K_{11}} \sigma_3^{K_{12}} \qquad (3.17)$$

Όπου:

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 =$ ολική τάση,

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 =$ πρόσθετη αξονική τάση,

$\sigma_3 =$ πλευρική τάση και

K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12} σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενες τριαξονικές δοκιμές σε κοκκώδη υλικά.

Πρόκειται για ένα τροποποιημένο μοντέλο Uzan με την εισαγωγή του όρου για την πλευρική τάση. Ο Itani κατέληξε ότι παρά το ότι υπήρχε ένα πρόβλημα πολλαπλής συγγραμμικότητας (οι σ_3, θ, σ_d συσχετίζονται γραμμικά) το συγκεκριμένο μοντέλο ήταν χρήσιμο για την πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης.

Καταστατικό Μοντέλο UTEP (Feliberti, 1991)

Το πανεπιστήμιο του Texas (1991) πρότεινε ένα καταστατικό μοντέλο ελαστικής απόκρισης για να περιγράψει την συμπεριφορά ασύνδετων αδρανών υλικών. Το μοντέλο αυτό προβλέπει το μέτρο επανάκτησης χρησιμοποιώντας την ολική τάση και την ελαστική αξονική παραμόρφωση που προκύπτει από επαναλαμβανόμενες τριαξονικές δοκιμές:

$$M_r = K_{13}\theta^{K_{14}}(\varepsilon_a)^{K_{15}} \tag{3.18}$$

Όπου:

$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 =$ ολική τάση,

$\varepsilon_a =$ η ελαστική παραμόρφωση και

K_{13}, K_{14}, K_{15} σταθερές παλινδρόμησης.

Το συγκεκριμένο καταστατικό μοντέλο είναι υπερορισμένο, αφού εξ ορισμού το μέτρο επανάκτησης προκύπτει διαιρώντας το πρόσθετο αξονικό φορτίο με την αξονική παραμόρφωση που προκύπτει. Συγκρινόμενο με άλλα καταστατικά μοντέλα, τα αποτελέσματά του προσαρμόζονταν καλύτερα σε μεγάλο εύρος πειραματικών δεδομένων (Alba, 1993).

Καταστατικό Μοντέλο UT-Austin (Pezo, 1993)

Ο Pezo (1993) εισήγαγε μια νέα γενική μέθοδο για το μέτρο επανάκτησης στα υλικά οδοστρωμάτων. Πραγματοποιήθηκε πολλαπλή παλινδρομική ανάλυση για να εκφραστεί η αξονική παραμόρφωση με όρους πλευρικής τάσης και αξονικού φορτίου:

$$M_r = K_{16}\sigma_d^{K_{17}}\sigma_3^{K_{18}} \tag{3.19}$$

Όπου:

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 =$ πρόσθετη αξονική τάση,

$\sigma_3 =$ πλευρική τάση και

K_{16}, K_{17}, K_{18} σταθερές παλινδρόμησης.

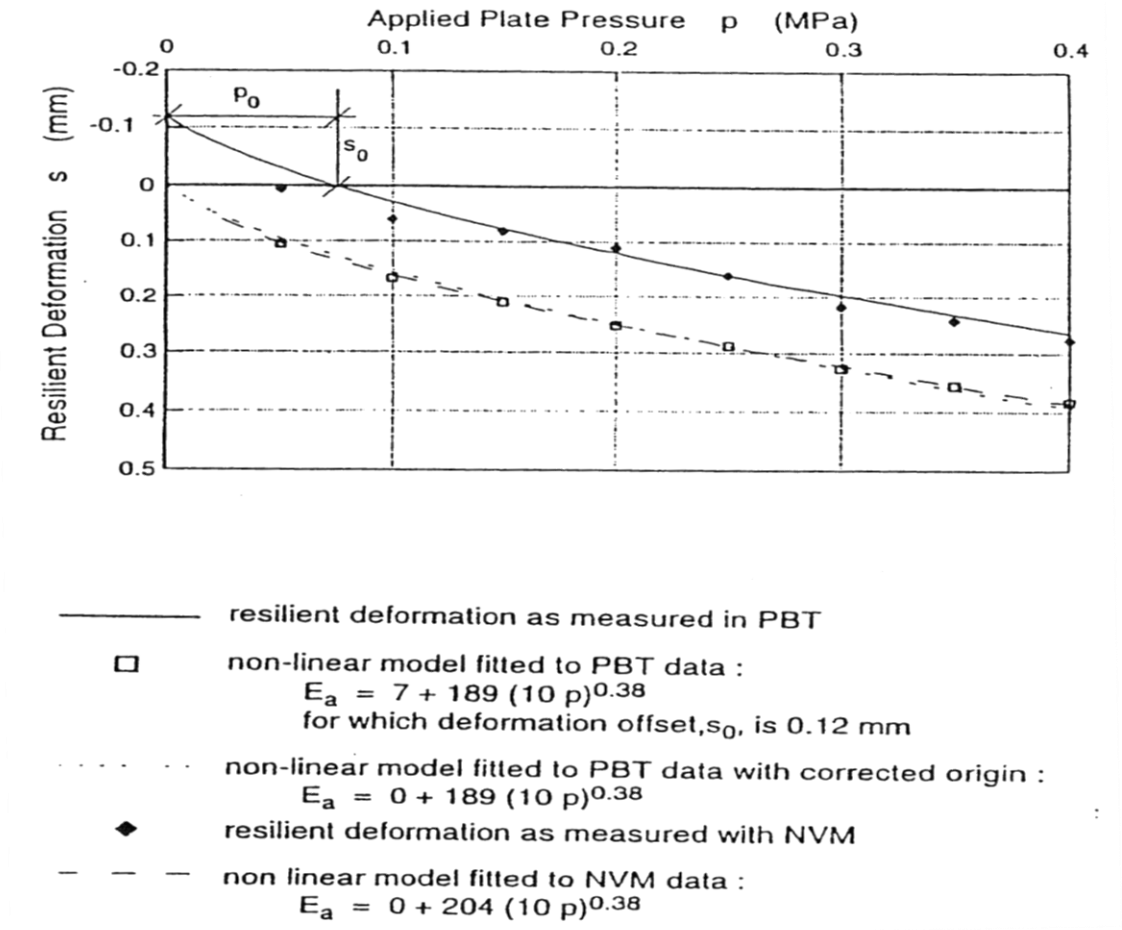
Χρησιμοποιώντας το καταστατικό μοντέλο Pezo προέκυψε πολύ καλή στατιστική προσαρμογή, συντελεστής R^2=0,96, σε τιμές μέτρου επανάκτησης από δοκιμές σε κοκκώδη υλικά (Alba, 1993). Ο Pezo παρατήρησε ότι τα καταστατικά μοντέλα όπως το K-θ δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης (πχ μικρή σ_d, μεγάλη σ_3 και μεγάλη σ_d, μικρή σ_3) εάν η ολική τάση $\theta=\sigma_d+3\sigma_3$ είναι ίδια. Σε αυτές τις περιπτώσεις το μέτρο επανάκτησης αναμένεται να μην είναι το ίδιο (παρόλο που η ολική τάση θ δεν αλλάζει), αφού τα μη συνεκτικά υλικά που υποβάλλονται σε υψηλότερη πλευρική τάση παρουσιάζουν και υψηλότερο μέτρο επανάκτησης. Για να αντιμετωπίσει αυτό το φαινόμενο εισήγαγε ξεχωριστές μεταβλητές για τις κύριες τάσεις (σ_d και σ_3) στην σχέση που πρότεινε.

Εναλλακτικές Τεχνικές

Στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων η μόνιμη πλαστική παραμόρφωση θεωρείται μηδενική για έναν ανεξάρτητο κύκλο φόρτισης. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερες πιέσεις ασκούνται στο οδόστρωμα κατά την φάση κατασκευής και όχι κατά την φάση λειτουργίας του και έτσι, τα φορτία κυκλοφορίας προκαλούν μόνο ελαστική (μη μόνιμη) παραμόρφωση. Σύμφωνα με τους Dastich και Dawson (1995) αυτή η ελαστική παραμόρφωση μπορεί να αξιολογηθεί στην εκάστοτε οδό με μια τροποποιημένη διαδικασία φόρτισης πλάκας (PBT) (Dastich & Dawson, 1995). Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει περιγράφεται λύνοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$s(p_x) = \int_0^{p_x} \frac{dp}{E_k + E_0(10p)^{0.38}} \tag{3.20}$$

Η εξίσωση αποτελείται από τρεις σημαντικές παραμέτρους: E_κ το ανεξάρτητο από την τάση τμήμα του μέτρου επανάκτησης, E_0 το εξαρτημένο από την τάση τμήμα του μέτρου επανάκτησης και S_0 η παραμόρφωση αντιστάθμισμα.



Σχήμα 3.8 Καμπύλη πίεσης-ελαστικής παραμόρφωσης από την εξίσωση Dustin-Dawson (1995)

Από την εξίσωση προκύπτει η καμπύλη του σχήματος 3.8 . Αποδείχτηκε ότι μια αρχική συνεχής τάση p_0 είναι απαραίτητη για να δημιουργηθούν μετρήσιμες παραμορφώσεις. Αυτή η αντίσταση σε παραμόρφωση μπορεί να οριστεί ως παραμόρφωση αντιστάθμισμα ή αρνητική παραμόρφωση και αντιστοιχεί στο σημείο επαφής της καμπύλης με τον άξονα των παραμορφώσεων.

Μια άλλη εναλλακτική τεχνική υπολογισμού του μέτρου επανάκτησης περιλαμβάνει φυσική δόνηση του συστήματος. Η διαδικασία ονομάζεται φυσική δονητική μέθοδος (Natural Nibration Method, NVM). Σε αυτή την μέθοδο το έδαφος αναπαρίσταται με ελατήριο και το φορτίο του οδοστρώματος με μάζα πάνω στο ελατήριο. Η φυσική συχνότητα του συστήματος εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού:

$$M_r = 2\pi^2(1-\nu^2)\frac{m}{r}f^2 \qquad (3.21)$$

Όπου:

m μάζα (kg),

r η ακτίνα κυκλικής πλάκας φόρτισης (mm),

v ο αριθμός Poisson (0.35 για κοκκώδη υλικά) και

F η συχνότητα ταλάντωσης.

Η δοκιμή NVM μπορεί υπό συνθήκες να αποδώσει συγκρίσιμα αποτελέσματα με την τροποποιημένη δοκιμή φόρτισης πλάκας: πρέπει η πίεση των πόρων να μην έχει σημαντική επίδραση στην παραμόρφωση των υλικών και σε περίπτωση ασύνδετων υλικών, η σκληρότητα θα πρέπει να είναι 400mm μεγαλύτερη από αυτή των συνεκτικών. Η δοκιμή NVM θεωρείται πρακτικότερη από την χρονοβόρα PBT.

Συνοπτικά, θα μπορούσαμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες για όλα τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν (εκτός από το K-θ καταστατικό μοντέλο και την εναλλακτική μέθοδο των Dastich και Dawson): τα απλοποιημένα καταστατικά μοντέλα που βασίζονται στην διατμητική τάση και τα πιο εξεζητημένα καταστατικά μοντέλα που βασίζονται στην ογκομετρική και διατμητική παραμόρφωση. Το K-θ μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως απλό καταστατικό μοντέλο, όμως αμελεί την επίδραση της διατμητικής τάσης.

Το καταστατικό μοντέλο του Uzan και οι τροποποιημένες εκδοχές του (Witczak-Uzan και Itani) και το μοντέλο Pezo εξετάζουν την επιρροή της πλευρικής και αξονικής τάσης και συνυπολογίζουν επαρκώς την μείωση της ακαμψίας που επέρχεται από την αύξηση της έντασης.

Τα καταστατικά μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας K-G, contour, τροποποιημένο K-G και Thom ορίζουν το μέτρο επανάκτησης βασιζόμενα στην ογκομετρική και διατμητική εντατική συμπεριφορά. Αυτά τα καταστατικά μοντέλα, αν και πολύπλοκα με μικρή πρακτική αξία, είναι πιο εξεζητημένα και πολλά υποσχόμενα για μελλοντική θεωρητική έρευνα.

Οι σταθερές παλινδρόμησης των μοντέλων της πρώτης κατηγορίας μπορούν να υπολογιστούν με εργαστηριακές δοκιμές ρουτίνας. Έτσι, για μια πρακτική και με ακρίβεια προσέγγιση της ελαστικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών συνίσταται να χρησιμοποιείται κατ' ελάχιστο το καταστατικό μοντέλο Uzan και το καταστατικό μοντέλο Pezo. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, αλλά και να υιοθετηθούν από κρατικές υπηρεσίες μεταφορών σε οδηγούς για σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

3.5 Παράγοντες επιρροής

Μέγεθος φόρτισης

Το μέγεθος της φόρτισης στοιχείου της βάσης του οδοστρώματος επηρεάζει σημαντικά την τιμή του μέτρου επανάκτησης. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, η συνολική τάση είναι συνάρτηση της πλευρικά ασκούμενης τάσης σ_3 και του κάθετου επιπρόσθετου αξονικού φορτίου σ_d: $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$. Σε πραγματικές συνθήκες, μέσα στην δομή του οδοστρώματος, η ολική τάση διαφοροποιείται σαν συνάρτηση των φορτίων κυκλοφορίας, του είδους του υλικού και της πυκνότητας των υπερκείμενων στρωμάτων. Για δεδομένη φόρτιση, η ολική τάση μειώνεται όσο η απόσταση από την επιφάνεια του οδοστρώματος αυξάνεται. Αν μια βάση από ασύνδετο υλικό τοποθετείται κάτω από ασφαλτική στρώση μικρού πάχους, η ολική τάση που ασκείται σε τυχαίο στοιχείο της θα είναι μεγαλύτερη από ότι αν η υπερκείμενη στρώση είναι μεγάλου πάχους. Κατά συνέπεια και το μέτρο επανάκτησης θα διαφέρει σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις. Έτσι, όταν επιλέγεται τιμή του μέτρου επανάκτησης πρέπει να υπολογιστεί με ακρίβεια το μέγεθος της ολικής τάσης.

Συμπύκνωση

Κατά την εργαστηριακή δοκιμή τα δείγματα πρέπει να προετοιμάζονται στην πυκνότητα που επιδιώκεται να επιτευχθεί στο έργο ώστε να γίνει μια ρεαλιστική εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης. Τα δείγματα με μικρότερη πυκνότητα παρουσιάζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με αυτά με μεγαλύτερη πυκνότητα. Το μέγεθος της διαφοροποίησης είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, όπως το μέγιστο μέγεθος κόκκων, το σχήμα των κόκκων, η κοκκομετρική διαβάθμιση (ιδίως το περιεχόμενο ποσοστό μικρών κόκκων).

Επίσης, η αρχική πυκνότητα μπορεί να επηρεάσει την συμπεριφορά του υλικού κατά την φόρτισή του. Για παράδειγμα ένα δείγμα με χαμηλής αρχικής πυκνότητας συμπυκνώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με δείγματα υψηλής πυκνότητας. Αυτά η συμπύκνωση οδηγεί σε λανθασμένα εργαστηριακά αποτελέσματα.

Περιεχόμενη υγρασία (βαθμός κορεσμού)

Η περιεχόμενη υγρασία έχει σημαντικό ρόλο στην απόδοση των υλικών. Κατά την εργαστηριακή δοκιμή υπολογισμού του μέτρου επανάκτησης τα δείγμα ετοιμάζονται στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, δηλαδή το ποσοστό υγρασίας με την μέγιστη πυκνότητα. Συνήθως το ποσοστό αυτό εξακριβώνεται με την δοκιμή Proctor ή άλλες παρόμοιες διαδικασίες. Όπως και με την συμπύκνωση, τα δοκίμια πρέπει να περιέχουν ποσοστά υγρασίας που πλησιάζουν τις πραγματικές συνθήκες στο έργο (βέλτιστο ποσοστό υγρασίας). Η τάση που καταγράφεται είναι, όσο το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας αυξάνεται και ο βαθμός κορεσμού πλησιάζει το 100%, η τιμή του μέτρου επανάκτησης μειώνεται.

4 ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

4.1 Γενικά

Η πιο διαδεδομένη δοκιμή επαναλαμβανόμενων φορτίσεων είναι η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης και οι τροποποιήσεις της. Η δοκιμή θεωρείται ότι προσομοιώνει ικανοποιητικά τις πραγματικές φυσικές συνθήκες (υγρασία, πυκνότητα κλπ.) και συνδυασμούς φόρτισης που υποβάλλονται σε στοιχείο εύκαμπτου οδοστρώματος από φορτία κινούμενων τροχών.

Δύο είναι οι λόγοι που η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου προτιμάται για τον καθορισμό του μέτρου επανάκτησης:

- Στην τριαξονική δοκιμή προκαθορισμένες κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 ασκούνται στο δείγμα. Έτσι, οι τάσεις σε κάθε επίπεδο φόρτισης είναι γνωστές καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής. Αυτές οι τάσεις προσομοιώνουν τις συνθήκες φόρτισης που συμβαίνουν στην πραγματικότητα όταν ένα απομονωμένο φορτίο τροχού διέρχεται πάνω από το στοιχείο του υλικού.

- Με την τριαξονική δοκιμή μπορούν να μετρηθούν η αξονική, η ακτινική και η ογκομετρική παραμόρφωση.

Όπως θα δούμε παρακάτω, η τροποποιημένη δοκιμή αξονικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκε από το εργαστήριο οδοποιίας για τη διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού από ελληνικό υφιστάμενο αυτοκινητόδρομο. Το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε είναι το T307-99 του αμερικανικού οργανισμού AASHTO (AASHTO, 2007). Το πρωτόκολλο αυτό αναλύει τις διαδικασίες που αφορούν την προετοιμασία, αλλά και την δοκιμή δειγμάτων ακατέργαστων υλικών βάσεων/υποβάσεων για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης.

4.2 Προετοιμασία δειγμάτων

Πριν την διεξαγωγή της δοκιμής απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία του υλικού προς εξέταση. Το υλικό συμπυκνώνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες για να επιτευχθεί μικρότερος όγκος κενών μέσω ανακατανομής των στερεών κόκκων του. Η διαδικασία συμπύκνωσης που χρησιμοποιείται συχνότερα στα εργαστήρια είναι η τροποποιημένη δοκιμή Proctor (ASTM D1557).

Εικόνα 4.1 Μήτρα και κόπανο τροποποιημένης δοκιμής Proctor

Σύμφωνα με την δοκιμή αυτή, ποσότητα υλικού αναμιγνύεται με νερό και τοποθετείται σε μεταλλική μήτρα διαμέτρου 30cm. Αυτή η πρώτη στρώση του υλικού συμπυκνώνεται με ειδικό κόπανο βάρους 4,54kg που πέφτει από ύψος 45,72cm (Εικόνα 4.1).

Εικόνα 4.2 Στρώση αδρανούς υλικού σε μήτρα συμπύκνωσης

Πραγματοποιούνται 25 κτύποι ανά στρώση του υλικού, ομοιόμορφα κατανεμημένοι στην επιφάνεια της μήτρας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την τοποθέτηση νέας στρώσης πάνω από την προηγούμενη, για συνολικά 5 στρώσεις του υλικού (Εικόνα 4.2).

Η δοκιμή πραγματοποιείται για διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας ώστε να διαπιστωθεί το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στο μέγιστο ξηρό φαινόμενο ειδικό βάρος, που θα πρέπει να επιδιώκεται να επιτευχθεί επιτόπου στο έργο.

4.3 Πειραματική διαδικασία

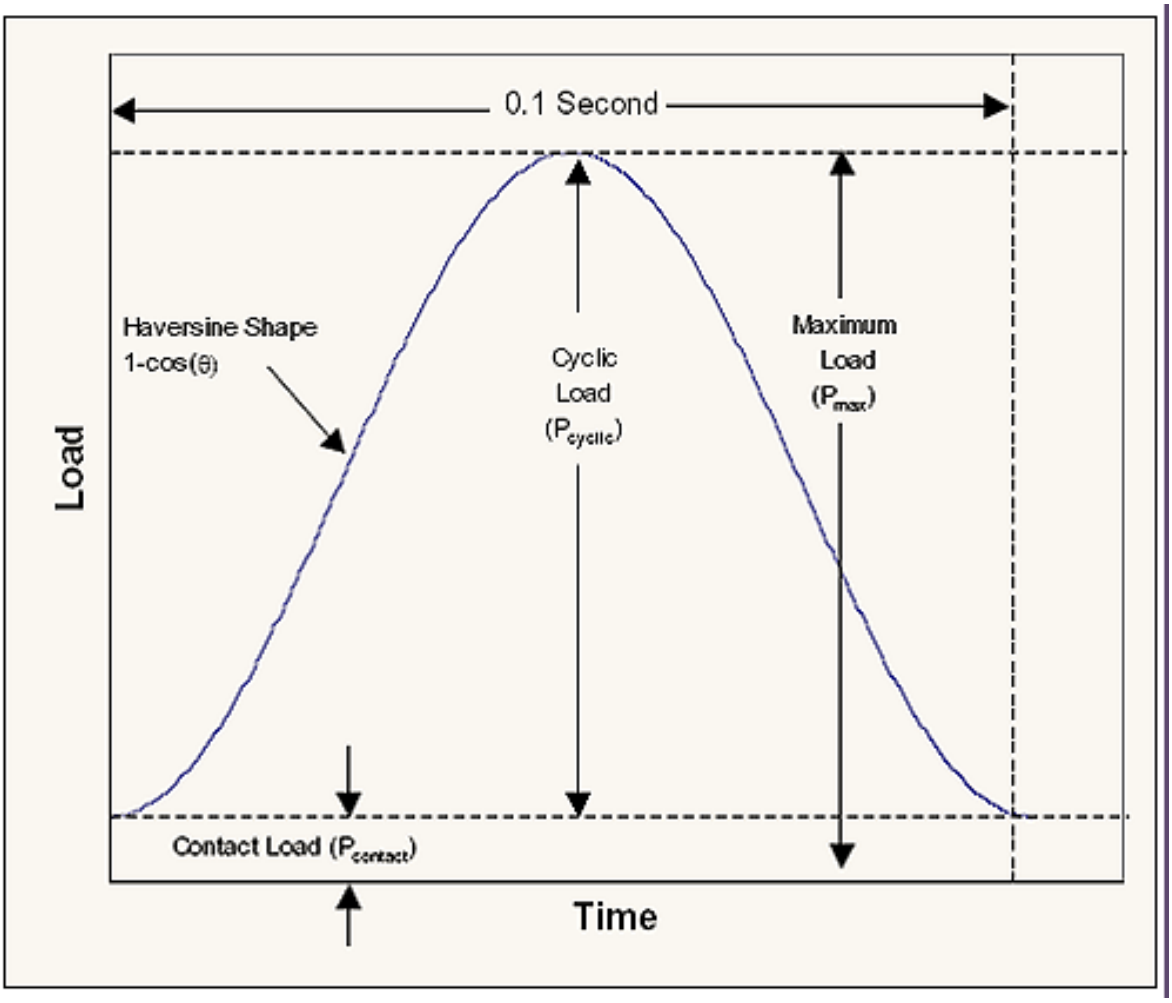
4.3.1 Περιγραφή συσκευής τριαξονικής φόρτισης

Πυρήνας της συσκευής είναι ο θάλαμος τριαξονικής φόρτισης στον οποίο τοποθετείται το δείγμα για την διεξαγωγή της δοκιμής (Εικόνα 4.3). Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από κατάλληλο διαφανές υλικό (συνήθως πλαστικό) για να διευκολύνεται η παρακολούθηση του δείγματος κατά την διάρκεια της δοκιμής.

Εικόνα 4.3 Θάλαμος τριαξονικής δοκιμής φόρτισης

Για την προσομοίωση της φόρτισης από κινούμενους τροχούς που δέχεται ένα στοιχείο του οδοστρώματος, ασκείται στο δείγμα αξονικό κάθετο φορτίο. Για την φόρτιση χρησιμοποιείται υδραυλική συσκευή (ειδική αντλία) τοποθετημένη εξωτερικά, πάνω από τον θάλαμο τριαξονικής πίεσης. Η φόρτιση μεταφέρεται στο εσωτερικό του θαλάμου, στην κεφαλή του δείγματος με ειδική ράβδο-έμβολο. Η συσκευή είναι ικανή να παράγει περιοδικούς «παλμούς» φόρτισης ημιτονοειδούς μορφή (συνάρτηση haversine(θ)=(1-cosθ)/2 (Εικόνα 4.4). Η

περίοδος φόρτισης, δηλαδή το διάστημα μεταξύ δύο συνεχών εφαρμογών πίεσης, είναι 1 δευτερόλεπτο: η πραγματική φόρτιση διαρκεί 0,1 δευτερόλεπτο και ακολουθεί περίοδος ανάπαυσης 0,9 δευτερολέπτων.



Εικόνα 4.4 Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης μορφής Haversine

Το μέγιστο αξονικό φορτίο P_{max} περιλαμβάνει το φορτίο επαφής $P_{contact}$ και το επαναλαμβανόμενο φορτίο P_{cyclic}. Το φορτίο επαφής είναι φορτίο που ασκείται για να διατηρείται σταθερή η επαφή του δείγματος με το ειδικό καπάκι του, ενώ το P_{cyclic} είναι το πραγματικό φορτίο που ασκείται από την συσκευή μέσω του εμβόλου.

$P_{max} = P_{contact} + P_{cyclic}$

$P_{cyclic} = P_{max} - P_{contact}$

$P_{contact} = 0.1\ P_{max}$

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις με την επιφάνεια A του δείγματος, παίρνουμε:

$S_{max} = P_{max}/A$

$S_{cyclic} = P_{cyclic}/A$

$S_{contact} = P_{contact}/A$ και

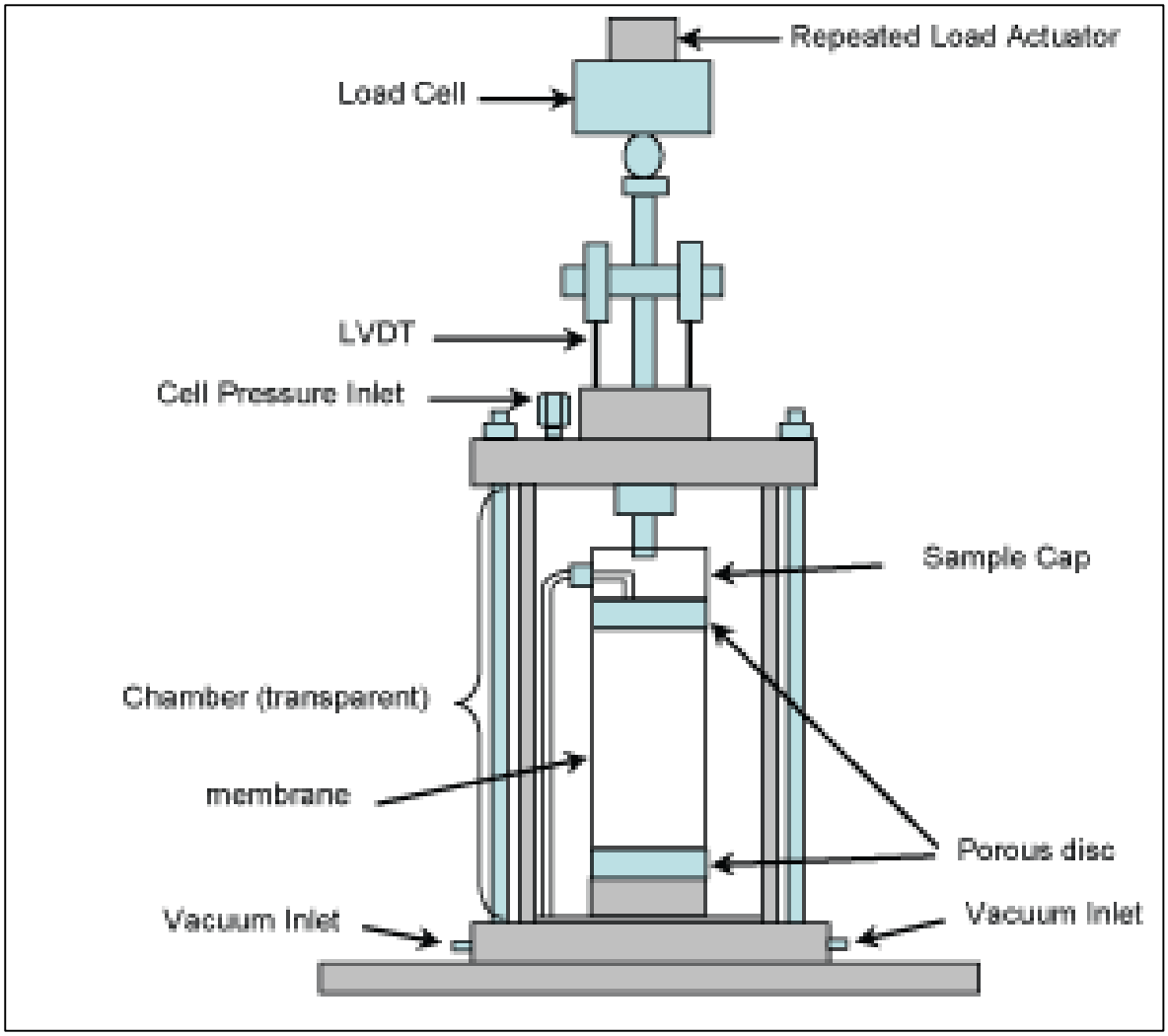
$S_{contact} = 0.1\ S_{max}$

Οι παραπάνω τιμές αξονικού φορτίου υπολογίζονται από ηλεκτρονικό κύτταρο-μετρητή τοποθετημένο μεταξύ της συσκευής φόρτισης και του εμβόλου. Η απαιτούμενη φορτική ικανότητα του κυττάρου είναι γραμμική σχέση του μεγέθους (διαμέτρου) του δείγματος. Για δείγμα μεγέθους 15mm απαιτείται ικανότητα 22,24kN.

Το δείγμα στον θάλαμο τριαξονικής πίεσης κατά την διάρκεια της δοκιμής περιβάλλεται από υγρό. Οι υδραυλικές πιέσεις αναπαράγουν τις πλευρικές πιέσεις που δέχονται τα στοιχεία του οδοστρώματος από τις περιβάλλον έδαφος. Συνήθως αέρας υπό πίεση προτιμάται αντί για υγρό. Η πίεση του αέρα παρακολουθείται από συμβατικούς μετρητές πίεσης, μανόμετρα ή μετατροπείς πίεσης με ακρίβεια 0,7 kPa.

Η αξονική παραμόρφωση μετράται από δυο διαφορικούς μετρητές μέσω ελατηρίων (spring loaded Linear Variable Differential Transducers, LVDT). Οι μετατροπείς μετρούν την γραμμική παραμόρφωση του δείγματος από την αρχική κατάσταση και την μετατρέπουν σε ηλεκτρονικό σήμα ανάλογου μεγέθους για να καταγραφεί και επεξεργασθεί από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι μετατροπείς βρίσκονται εξωτερικά του θαλάμου τριαξονικής πίεσης, αντιδιαμετρικά του εμβόλου, προσαρμοσμένοι σε σταθερές επιφάνειες που ισαπέχουν από αυτό. Επιπλέον, οι μετατροπείς πρέπει να συνδεθούν έτσι ώστε να λειτουργούν και ανεξάρτητα. Για τις υπολογιστικές διαδικασίες λαμβάνεται ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων τους.

Σχηματικά παρουσιάζονται τα μέλη της συσκευής τριαξονικής φόρτισης στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 Σχεδιάγραμμα συσκευής τριαξονικής φόρτισης

Οι δοκιμές για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης πρέπει να σταματούν όταν δεν τηρούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις ακριβείας των μετατροπέων. Για αυτό το λόγο η απόκριση τους πρέπει να ελέγχεται καθημερινά από το πρόγραμμα διασφάλισης ποιότητας του εργαστηρίου. Επιπλέον πρέπει να βαθμονομούνται κάθε δύο βδομάδες ή κάθε 50 δοκιμές, με μικρόμετρο ανάλογης ανάλυσης.

4.3.2 Διεξαγωγή πειράματος

Το δείγμα τοποθετείται στην βάση του θαλάμου κάτω από την συσκευή τριαξονικής φόρτισης (Σχήμα 4.6). Στην συνέχεια τοποθετείται το έμβολο και συνδέεται σφιχτά με το κύτταρο μετρητή.

Η σωστή τοποθέτηση του δείγματος είναι σημαντική για τον περιορισμό των πλευρικών δυνάμεων που εμφανίζονται σε περίπτωση που το έμβολο δεν είναι κάθετο στην επιφάνεια επαφής με το δείγμα.

Εικόνα 4.6 Δοκίμιο πριν και αφού τοποθετηθεί στον θάλαμο φόρτισης

Η επαφή του εμβόλου πρέπει να είναι συνεχής ίση με 10%±0,7 kPa του αντίστοιχου αξονικού φορτίου που επιβάλλεται. Στην συνέχεια συνδέουμε την ειδική αντλία και εφαρμόζουμε πίεση 103,4 kPA (πλευρική πίεση). Ανοίγουμε τις βαλβίδες στην κορυφή και την βάση του δείγματος επιτρέποντας την διαφυγή νερού.

Τα φορτία του πίνακα 4.1 πρέπει να εφαρμόζονται στην κορυφή του δείγματος συνυπολογίζοντας τις επιπλέον πιέσεις σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$F = (A * P) - W$

Όπου:

F η πραγματική δύναμη που επιβάλλεται από την συσκευή φόρτισης

A η επιφάνεια του εμβόλου με το δείγμα

P η κάθετη πίεση

W το βάρος του εμβόλου και του εξωτερικού συστήματος μετρητών παραμόρφωσης που βρίσκεται πάνω από το δείγμα.

Πίνακας 4.1 Σειρές φορτίσεων τριαξονικής δοκιμής για υλικά βάσεων/υποβάσεων

Αριθμός σειράς	Τάση, S_3 (kPa)	Μέγιστη αξονική τάση, S_{max} (kPa)	S_{cyclic} (kPa)	Τάση επαφής, $S_{contact}$ (kPa)	Αριθμός επαναλήψεων
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	37,3	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	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

Αρχικά εφαρμόζεται η σειρά φορτίσεων 0 (σειρά προετοιμασίας, conditioning): η πλευρική πίεση τίθεται στα 103,4 kPa και το δείγμα υποβάλλεται σε αξονική φόρτιση 103,4 kPa για τουλάχιστον 500 φορές. Ο παλμός της φόρτισης έχει την ημιτονοειδή μορφή (haversine) και την περιοδικότητα που εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 5.3.1. Αν το ύψος του δείγματος συνεχίζει να μειώνεται στο τέλος αυτής της σειράς, οι φορτίσεις συνεχίζονται μέχρι τις 1000 επαναλήψεις.

Η παραπάνω σειρά φόρτισης (σειρά 0) έχει τρεις στόχους. Πρώτον, στοχεύει να επαναφέρει το δείγμα στα επιθυμητά επίπεδα συμπίεσης. Ο βαθμός συμπίεσης πιθανώς έχει μεταβληθεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ της πραγματοποίησης της συμπύκνωσης του δείγματος και της έναρξης της δοκιμής. Δεύτερον, περιορίζει φαινόμενα απότομης παραμόρφωσης του δείγματος (λόγω αρχικής φόρτισης). Αποτελεί δηλαδή ένα είδος προφόρτισης για το υλικό, απαραίτητης για την κανονικότητα των αποτελεσμάτων. Τέλος, βοηθά στην ελαχιστοποίηση φαινομένων ελαττωματικής επαφής μεταξύ του δείγματος με το πλαστικό καπάκι και την πλάκα στην βάση του θαλάμου.

Αν η ολική κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση ξεπεράσει το 5% κατά την διάρκεια της προετοιμασίας, η σειρά 0 πρέπει να σταματήσει. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να επανεξετασθεί η διαδικασία συμπύκνωσης για να αναγνωριστούν οι λόγοι για τους οποίους η συμπύκνωση δεν έφτασε σε επαρκή επίπεδα. Αν δεν υπάρχει ικανοποιητική εξήγηση, το δείγμα δοκιμάζεται για δεύτερη φορά. Αν η κατακόρυφη πλαστική παραμόρφωση ξεπεράσει και πάλι το 5% η δοκιμή τερματίζεται και συντάσσεται ανάλογη αναφορά.

Η δοκιμή συνεχίζεται πραγματοποιώντας την σειρά φόρτισης 1. Θέτουμε μέγιστη αξονική τάση και πλευρική πίεση ίση με 21kPa, όπως αναγράφονται στον πίνακα. Εφαρμόζονται 100 επαναλήψεις της αντίστοιχης τάσης S_{cyclic}. Για τις τελευταίες 5 επαναλήψεις καταγράφεται χωριστά η ελαστική παραμόρφωση που ανιχνεύουν οι μετρητές.

Συνεχίζουμε την δοκιμή για τις υπόλοιπες σειρές 2-15 πραγματοποιώντας 100 επαναλήψεις για κάθε συνδυασμό φόρτισης και καταγράφοντας την παραμόρφωση για τις 5 τελευταίες. Αν σε κάποιο σημείο της δοκιμής η συνολική κάθετη πλαστική παραμόρφωση ξεπεράσει το 5% η διαδικασία διακόπτεται.

Στο τέλος της δοκιμής κάθε μετρητής έχει καταγράψει 5 τιμές παραμόρφωσης ε_r για κάθε σειρά φόρτισης. Λαμβάνεται ο μέσος όρος τους και υπολογίζεται το μέτρο επανάκτησης για κάθε συνδυασμό φόρτισης από τον τύπο:

$$M_r = S_{cyclic} / \varepsilon_r$$

Με τις 75 τιμές παραμόρφωσης και μέτρου επανάκτησης που προκύπτουν συμπληρώνεται ειδικός πίνακας αναφοράς.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

5.1 Γενικά

Στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου πραγματοποιήθηκε πειραματική διαδικασία με σκοπό την κατανόηση και περιγραφή της συμπεριφοράς του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως υλικό βάσης/υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό με το οποίο έγινε το πείραμα, προήλθε από εργασίες οδοποιίας (αλλαγή της υπάρχουσας χάραξης) σε ελληνική οδό. Το πείραμα εστίασε στην εκτίμηση και πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης M_r του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού.

Οι δοκιμές έγιναν σε τρία διαφορετικά μίγματα (Εικόνα 5.1) με διαφορετικές αναλογίες ανακτώμενου ασφαλτομίγματος (RAP) και αδρανούς υλικού (3A):

Πίνακας 5.1 Σύσταση μιγμάτων

	RAP (%)	3A (%)
Μίγμα Α	100	0
Μίγμα Β	0	100
Μίγμα Γ	50	50

Εικόνα 5.1 Από αριστερά προς δεξιά: αδρανές υλικό 3A, ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό και μίγμα των δύο υλικών

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης είναι η εξής:

Αρχικά έγινε κοκκομετρική ανάλυση του εκάστοτε μίγματος για να διαπιστωθεί αν είναι κατάλληλο για υλικό βάσης ή υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών υλικών για κατασκευή βάσης και υπόβασης, για διάφορες διαβαθμίσεις, σύμφωνα με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΤΠ) Ο-155 και Ο-150 (egnatia.eu, 2015). Είναι επιθυμητό η κοκκομετρική διαβάθμιση να ακολουθεί τις προδιαγραφές αυτές ώστε, μετά την συμπύκνωση, να επιτυγχάνεται το ελάχιστο ποσοστό κενών.

Πίνακας 5.2 Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων αδρανών υλικών κατά ΠΤΠ Ο-155/Ο-150

Αριθμός κοσκίνου mm (in)	Διερχόμενο ποσοστό (%) κατά βάρος				
	Διαβαθμίσεις				
	Α	Β	Γ	Δ	Ε
76,2 (3”)	100	-	-	-	-
50,8 (2”)	65-100	100	-	-	-
38,1 ($1^{1/2}$”)	-	70-100	100	-	-
31,7 ($1^{1/4}$”)	-	-	-	100	-
25,4 (1”)	45-75	55-85	70-100	83-100	100
19,1 (3/4”)	-	50-80	60-90	65-95	70-100
9,52 (3/8”)	30-60	40-70	45-75	47-77	50-80
4,76 (No. 4)	25-50	30-60	30-60	33-63	35-65
2,00 (No. 10)	20-40	20-50	20-50	23-50	25-50
0,42 (No. 40)	10-25	10-30	10-30	13-30	15-30
0,074 (No. 200)	3-10	5-15	5-15	5-15	5-15

Στην συνέχεια, για κάθε μίγμα παρασκευάστηκαν δείγματα με διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας ώστε να συμπυκνωθούν κατά Proctor. Από τα ζεύγη τιμών ποσοστό υγρασίας-φαινόμενο ξηρό βάρος των δειγμάτων προέκυψε η βέλτιστη υγρασία (Optimum Moisture

Content, OMC). Η βέλτιστη υγρασία ορίζεται ως το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας για το οποίο μετρήθηκε το μέγιστο φαινόμενο ξηρό βάρος.

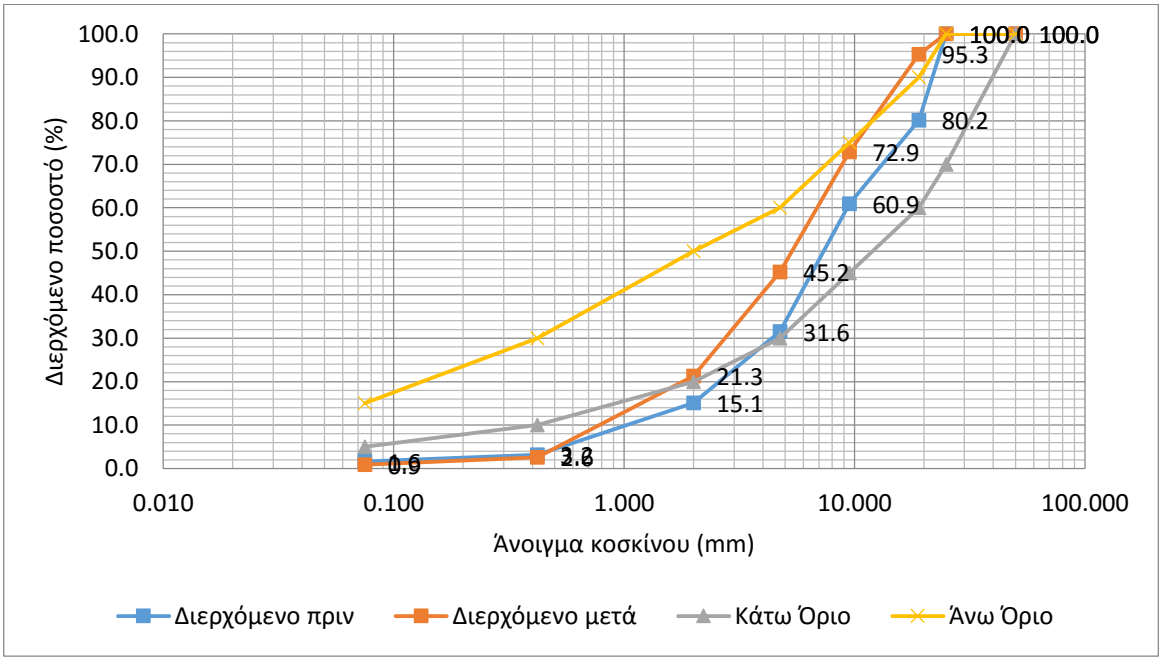
Τέλος, διενεργήθηκε η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης σύμφωνα με το πρωτόκολλο T307-99, όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 5.3.2., σε δείγματα με διαφορετικό περιεχόμενο υγρασίας ανάλογα με τα αποτελέσματα της συμπύκνωσης.

5.2 Μίγμα Α

Η κοκκομετρική ανάλυση του μίγματος Α έδωσε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.3, με τα οποία κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη του Σχήματος 5.1.

Πίνακας 5.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος Α

Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο πριν (%)	Διερχόμενο Μετά (%)	Όρια O-150/O-155
0,075	1,6	0,9	5-15
0,42	3,2	2,6	10-30
2,00	15,1	21,3	20-50
4,75	31,6	45,2	30-60
9,50	60,9	72,9	45-75
19,0	80,2	95,3	60-90
25,0	100,0	100,0	70-100
50,0	100,0	100,0	100



Σχήμα 5.1 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Α

Η μορφή και η κλίση της καμπύλης χαρακτηρίζει την ομοιομορφία ή μη της κατανομής των κόκκων και την έλλειψη ή μη των κόκκων κάποιας διάστασης (Λοΐζος & Πλατή, 2014). Για να εκφραστεί ποσοτικά η ομοιομορφία του εδαφικού υλικού υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_U:

Πριν $C_U = d_{60}/d_{10} = 9,5/1 = 9,5$

Μετά $C_U = d_{60}/d_{10} = 7,0/0,8 = 8,75$

Η καμπυλότητα εκφράζεται με τον συντελεστή C_C:

Πριν $C_C = d_{30}^2/(d_{10} * d_{60}) = 4,5^2/(1 * 9,5) = 2,1316$

Μετά $C_C = d_{30}^2/(d_{10} * d_{60}) = 2,75^2/(0,8 * 7) = 1,3504$

Όπου d_{10}, d_{30} και d_{60} η διάμετρος του κόκκου για την οποία το διερχόμενο ποσοστό είναι 10%, 30% και 60% αντίστοιχα.

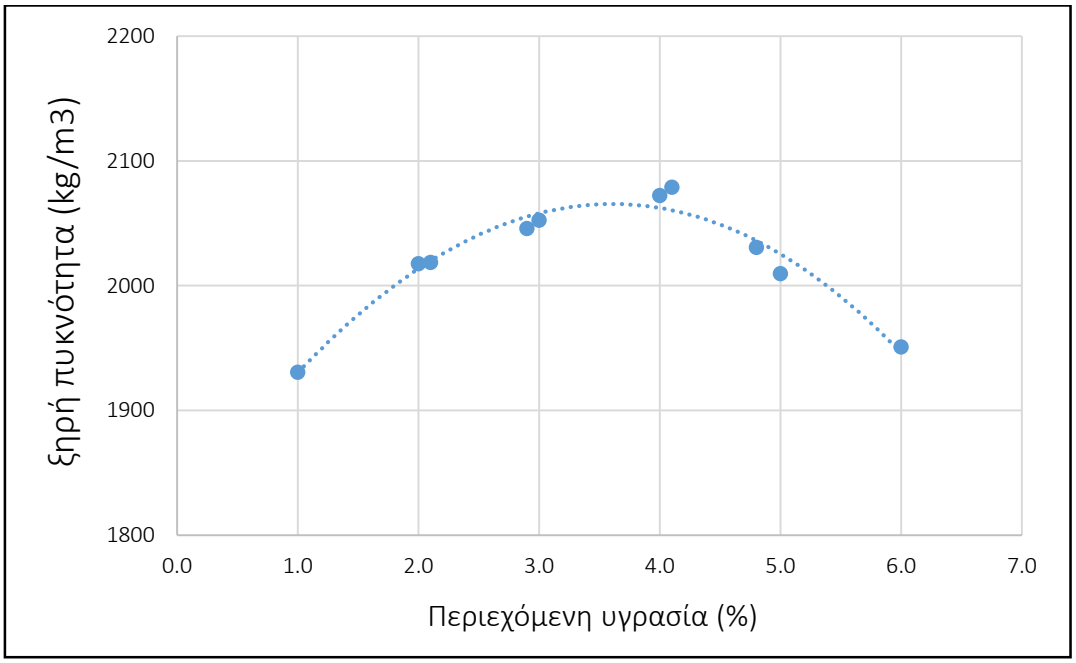
Από τον πίνακα φαίνεται ότι το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό ακολουθεί σε γενικές γραμμές την διαβάθμιση Γ των πρότυπων τεχνικών προδιαγραφών Ο-150 και Ο-155. Τα ποσοστά μικρών κόκκων όμως είναι μικρότερα από το όριο, γεγονός που καθιστά το υλικό δύσκολα συμπυκνώσιμο. Παρόλα αυτά, ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι $C_U>5$ και για τον συντελεστή καμπυλότητας ισχύει $1 < C_C < 3$. Έτσι, το Μίγμα Α χαρακτηρίζεται *καλώς διαβαθμισμένο.*

Στην συνέχεια για το μίγμα Α παρασκευάσθηκαν δέκα δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, συμπυκνώθηκαν κατά Proctor και υπολογίστηκε η πυκνότητα τους. Προέκυψαν τα ζεύγη τιμών ποσοστό υγρασίας-φαινόμενο ξηρό βάρος του Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Ποσοστό υγρασίας-Ξηρή πυκνότητα

Ποσοστό υγρασίας (%)	Ξηρή πυκνότητα (kg/m^3)
1.0	1930
2.0	2017
2.1	2018
2.9	2045
3.0	2052
4.0	2072
4.1	**2078**
4.8	2030
5.0	2009
6.0	1950

Η *βέλτιστη υγρασία* είναι 4,1~4,0% (κορυφή του διαγράμματος ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας) (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας μίγματος Α

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης εξετάσθηκαν τα αποτελέσματα της εργαστηριακής δοκιμής στα δοκίμια με βέλτιστη υγρασία

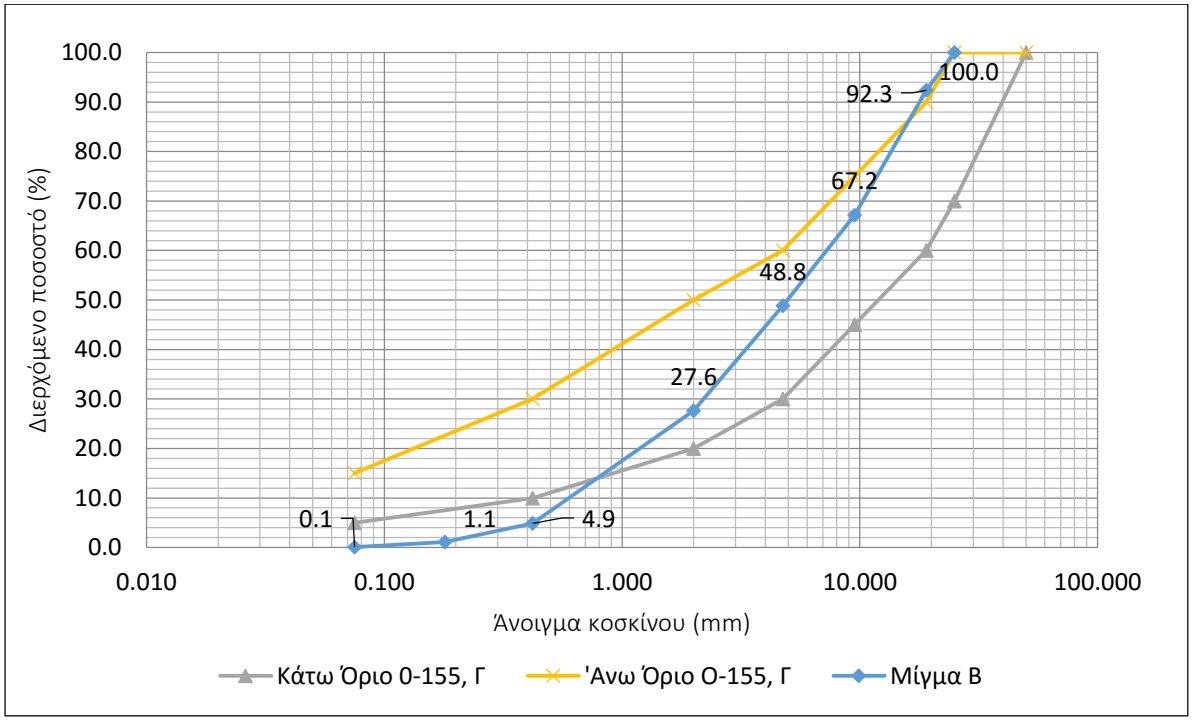
(4%). Τα αποτελέσματα της δοκιμής για το Μίγμα Α παρουσιάζονται στους πίνακες παραρτήματος Π1, Π2.

5.3 Μίγμα Β

Η κοκκομετρική ανάλυση του μίγματος Β έδωσε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.5, με τα οποία κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη του Σχήματος 5.3.

Πίνακας 5.5 Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος Β

Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο (%)	Όρια Ο-150/Ο-155
0,075	0,1	5-15
0,42	1,1	10-30
2,00	4,9	20-50
4,75	27,6	30-60
9,50	48,8	45-75
19,0	67,2	60-90
25,0	92,3	70-100
50,0	100,0	100



Σχήμα 5.3 Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος Β

Το αδρανές υλικό ακολουθεί, όπως και το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό, σε γενικές γραμμές την διαβάθμιση Γ των πρότυπων τεχνικών προδιαγραφών Ο-150/Ο-155. Τα ποσοστά μικρών κόκκων όμως, όπως και στην περίπτωση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, είναι μικρότερα από το όριο, γεγονός που καθιστά το υλικό δύσκολα συμπυκνώσιμο.

Για να εκφραστεί ποσοτικά η ομοιομορφία και του εδαφικού υλικού υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας C_U η κλίση της καμπύλης C_C:

$C_U = d_{60}/d_{10} = 7, 2/0, 6 = 12$

Η καμπυλότητα εκφράζεται με τον συντελεστή C_C:

$C_C = d_{30}^2/ (d_{10} * d_{60}) = 2, 32/ (0, 6 * 7, 2) = 1, 2245$

Όπου d_{10}, d_{30} και d_{60} η διάμετρος του κόκκου για την οποία το διερχόμενο ποσοστό είναι 10%, 30% και 60% αντίστοιχα.

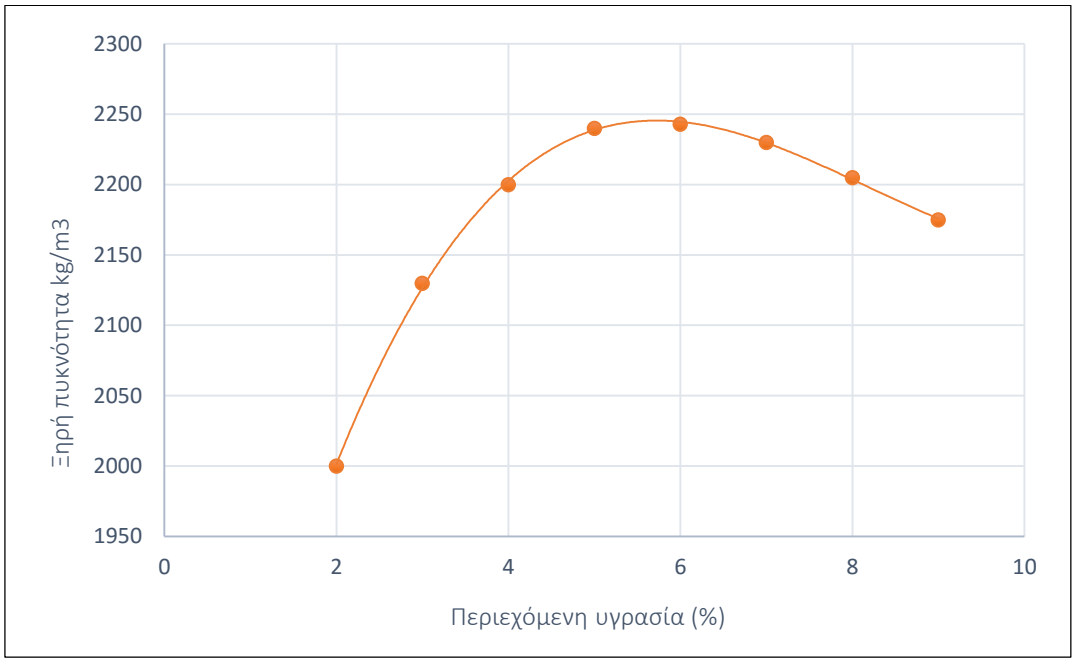
Παρόλα αυτά, ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι $C_U>5$ και για τον συντελεστή καμπυλότητας ισχύει $1 < C_C < 3$. Έτσι, το Μίγμα Β χαρακτηρίζεται *καλώς διαβαθμισμένο.*

Για το μίγμα Β παρασκευάσθηκαν 8 δοκίμια προς συμπύκνωση κατά Proctor. Προέκυψαν τα ζεύγη τιμών ποσοστό υγρασίας-φαινόμενο ξηρό βάρος του Πίνακα 5.6. Η βέλτιστη υγρασία όπως προκύπτει από το διάγραμμα πυκνότητας-υγρασίας (Σχήμα 5.4) είναι 6,0%.

Πίνακας 5.6 Ποσοστό υγρασίας-Ξηρή πυκνότητα

Ποσοστό υγρασίας (%)	Ξηρή πυκνότητα (kg/m^3)
2,0	2000
3,0	2130
4,0	2200
5,0	2240
6,0	**2243**
7,0	2230
8,0	2205
9,0	2175

Η βέλτιστη υγρασία όπως προκύπτει από το διάγραμμα πυκνότητας-υγρασίας (Σχήμα 5.4) είναι 6,0%.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας μίγματος Β

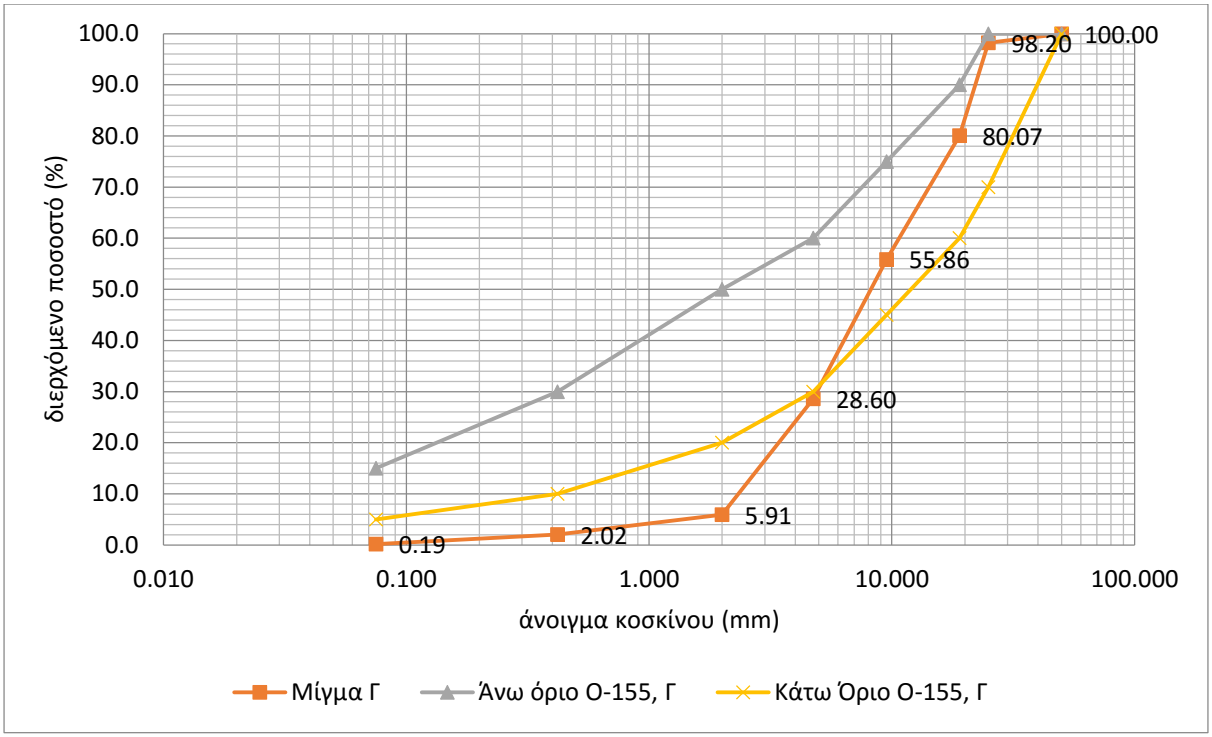
Για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης εξετάσθηκαν τα αποτελέσματα από δύο δείγματα με βέλτιστη υγρασία. Τα αποτελέσματα για το Μίγμα Β βρίσκονται στους πίνακες παραστήματος Π3, Π4.

5.4 Μίγμα Γ

Η κοκκομετρική ανάλυση του μίγματος Γ έδωσε τα αποτελέσματα του πίνακα 5.7:

Πίνακας 5.7 Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος Γ

Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	Διερχόμενο (%)	Όρια Ο150/Ο155
0,075	0,19	5-15
0,42	2,02	10-30
2,00	5,91	20-50
4,75	28,60	30-60
9,50	55,86	45-75
19,0	80,07	60-90
25,0	98,20	70-100



Σχήμα 5.5: Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος

Παρατηρείται ότι η κοκκομετρική καμπύλη βρίσκεται εκτός των ορίων των πρότυπων τεχνικών προδιαγραφών Ο-150/Ο-155. Η έλλειψη κόκκων μικρής διαμέτρου, που είχε διαπιστωθεί στα επιμέρους υλικά (ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό και αδρανές υλικό 3Α), εμφανίζεται και στο μίγμα Γ και καθιστά το μίγμα Γ δύσκολα συμπυκνώσιμο.

Ο συντελεστής C_U, που εκφράζει την κλίση, είναι οριακά αποδεκτός:

$C_U = d_{60}/d_{10} = 12,0/2,4 = 5$

Αντίθετα, ο συντελεστής C_C, που εκφράζει την καμπυλότητα, είναι εκτός ορίων:

$C_C = d_{30}^2/(d_{10} * d_{60}) = 5,02 / (2,4 * 12,0) = 0,87<1$

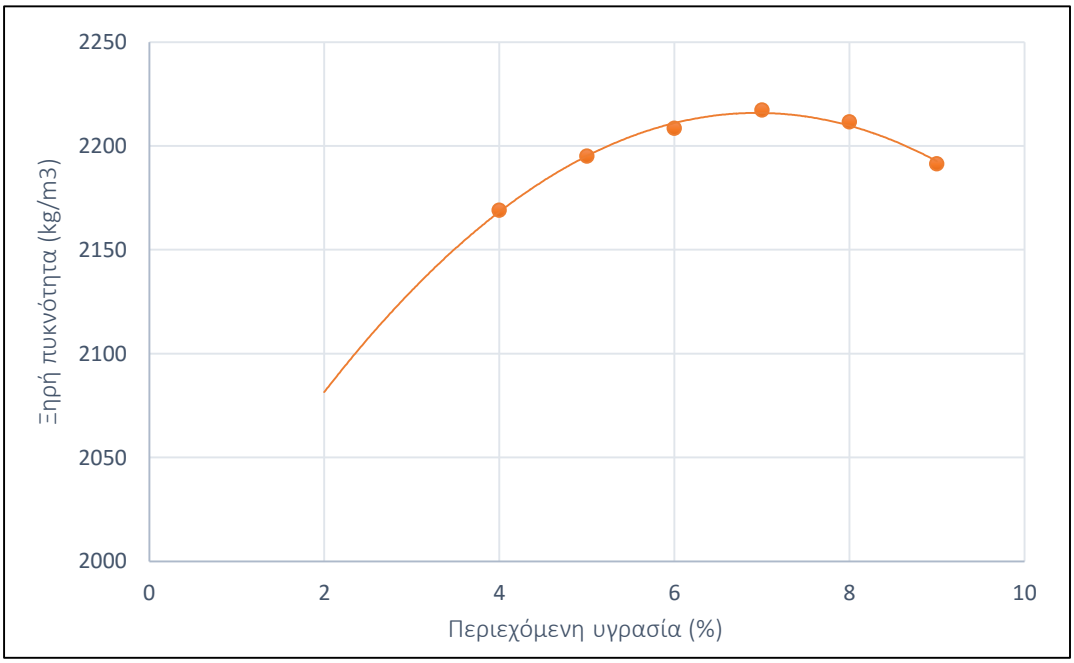
Όπου d_{10}, d_{30} και d_{60} η διάμετρος του κόκκου για την οποία το διερχόμενο ποσοστό είναι 10%, 30% και 60% αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα παραπάνω το Μίγμα Γ δεν κρίνεται ικανοποιητικά διαβαθμισμένο.

Για το δείγμα Γ η συμπύκνωση Proctor έγινε σε 6 δείγματα με υγρασία 5, 6, 7, 8 και 9% και προέκυψαν τα ζεύγη τιμών ποσοστό υγρασίας-φαινόμενο ξηρό βάρος του πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8 Ποσοστό υγρασίας-Ξηρή πυκνότητα

Ποσοστό Υγρασίας (%)	Ξηρή πυκνότητα (kg/m^3)
4,0	2169
5,0	2195
6,0	2208
7,0	**2217**
8,0	2212
9,0	2191

Η βέλτιστη υγρασία (από το διάγραμμα πυκνότητας-υγρασίας, σχήμα 5.6) είναι 7,0%. Αν και παρατηρείται ότι η πυκνότητα δεν διαφέρει ουσιαστικά για κανένα ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας μίγματος Γ

Η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης εφαρμόστηκε σε δύο δείγματα με βέλτιστη υγρασία. Τα αποτελέσματά της για το Μίγμα Γ παρουσιάζονται στους πίνακες του παραρτήματος Π5, Π6.

6 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

6.1 Γενικά

Μετά την πραγματοποίηση της δοκιμής τριαξονικής φόρτισης ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με σκοπό την συσχέτιση των τάσεων με τις τιμές του μέτρου επανάκτησης. Εξετάστηκε η προσαρμογή κατάλληλων καταστατικών μοντέλων για την περιγραφή και πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης σε διαφορετικούς συνδυασμούς τάσεων.

Λόγω της απλότητάς του, αλλά και της ρεαλιστικής περιγραφής της συμπεριφοράς του μέτρου επανάκτησης σε συνθήκες φόρτισης παρόμοιες με τις κυκλοφοριακές, εξετάστηκε πρώτα το ευρέως διαδεδομένο καταστατικό μοντέλο K-θ.

Στην συνέχεια, για να ληφθεί υπόψη η σημαντική διατμητική ένταση κατά την φόρτιση, που αγνοείται από το μοντέλο K-θ, εξετάστηκε το μοντέλο Uzan.

Ακολούθησε το ευρέως διαδεδομένο μοντέλο που προτείνεται από τον εμπειρικό οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (MEPDG) και αποτελεί τροποποίηση του μοντέλου Uzan. Το μοντέλο αυτό προσαρμόζεται ικανοποιητικά σε όλους τους τύπους υλικών, συνεκτικά και ασύνδετα (universal model).

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Pezo. Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε γιατί, σε αντίθεση με τα προηγούμενα περιλαμβάνει διαφορετικές μεταβλητές για την οριζόντια και την πρόσθετη αξονική τάση. Σε πολλές δημοσιευμένες μελέτες συμπεριφοράς ασύνδετων υλικών επιτυγχάνει υψηλό συντελεστή προσαρμογής R^2.

Για την αξιολόγηση της προσαρμογής των στατιστικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικοί συντελεστές R^2 και RMSPE (Root Mean Square Percentage of Error). Στόχος είναι υψηλός συντελεστής προσαρμογής R^2, με τιμές $R^2>0,90$ να θεωρούνται ικανοποιητικές. Παράλληλα επιχειρείται κατάταξη των μοντέλων με βάση τον συντελεστή RMSPE που εκφράζει το ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης. Επιδιώκεται το κατά το δυνατόν μικρότερο ποσοστό RMSPE(%), δηλαδή μικρότερη απόκλιση των τιμών του μοντέλου από τις αντίστοιχες εργαστηριακές μετρήσεις.

6.2 Προσδιορισμός μη γραμμικών μοντέλων

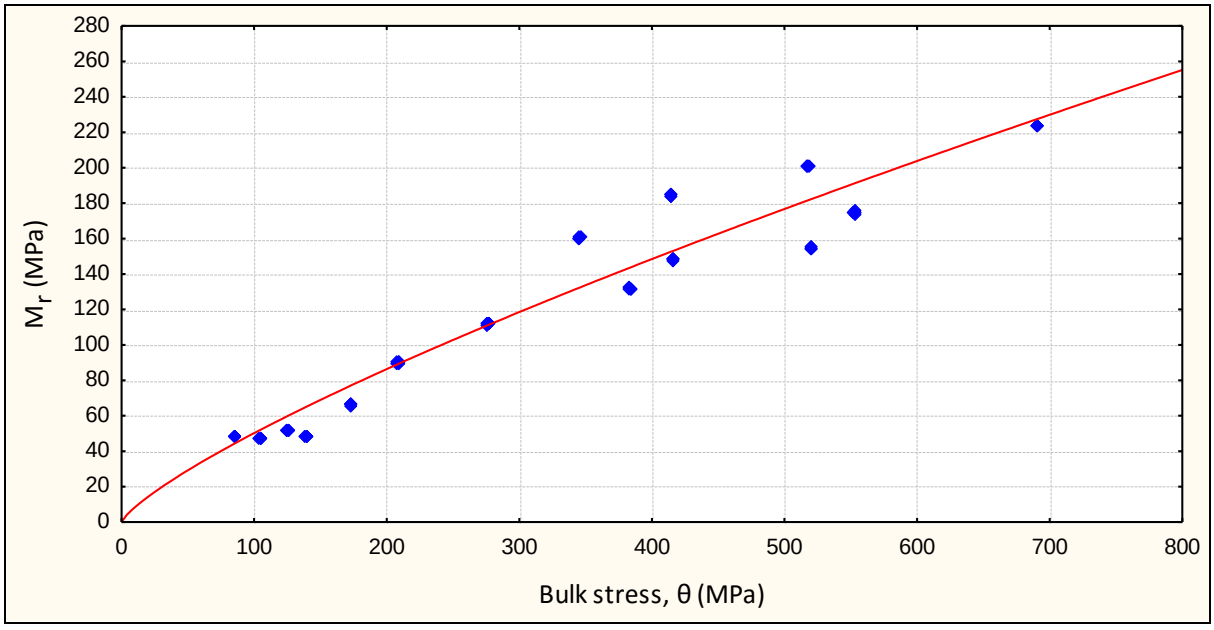
6.2.1 Μίγμα Α

Μοντέλο Κ-θ (σχέση 3.1)

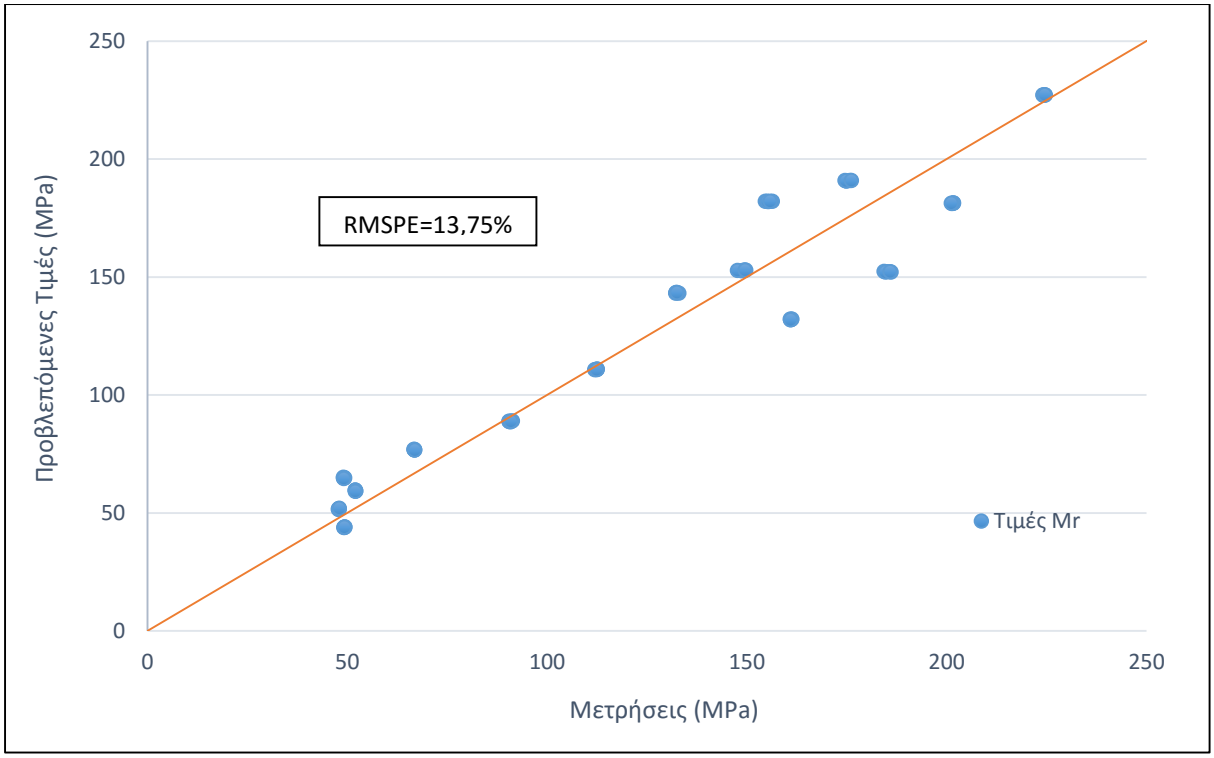
Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο Κ-θ υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.1):

$$M_r = 1371{,}090 \times \theta^{0{,}781} \qquad (6.1)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,92 >0,90. Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η καμπύλη του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ για το πρώτο δείγμα. Στο σχήμα 6.2 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο με τις τιμές που προκύπτουν από την σχέση (6.1) . Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RMSPE=13,75%.



Σχήμα 6.1 Δείγμα 1: Γραφική απεικόνιση του M_r με την ολική τάση θ



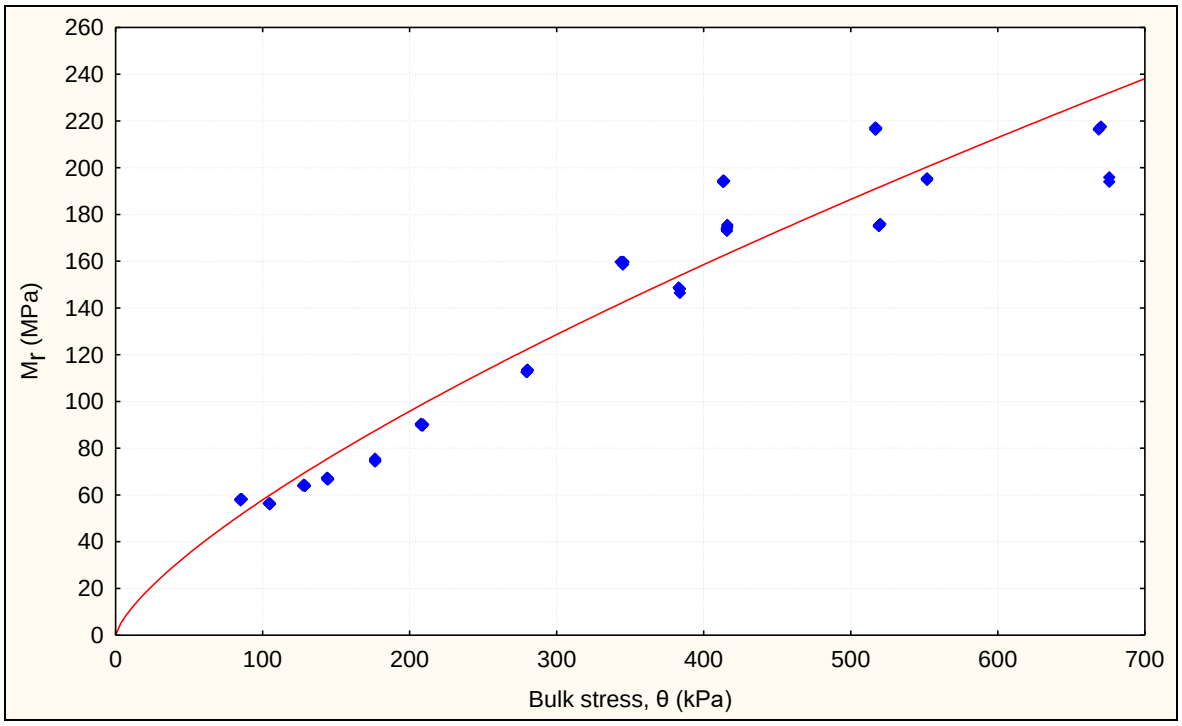
Σχήμα 6.2 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο K-θ υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.2):

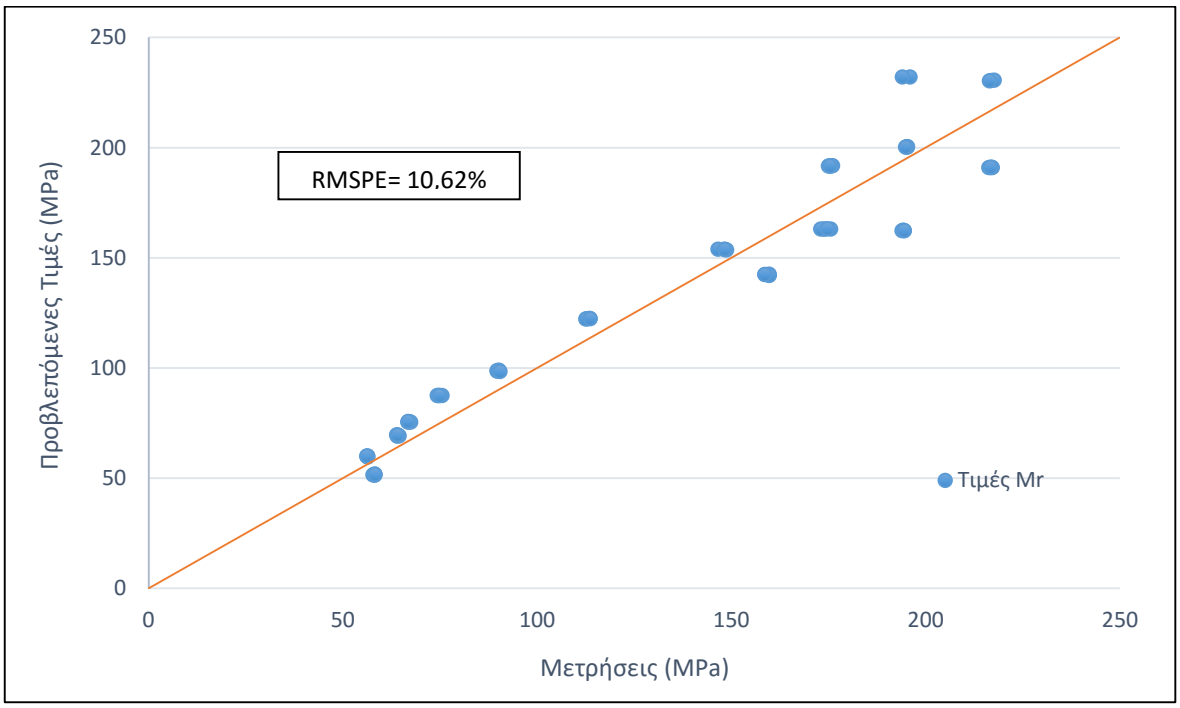
$$M_r = 2039{,}010 \times \theta^{0{,}727} \qquad (6.2)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,93 >0,90. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η καμπύλη του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.4 συγκρίνονται οι εργαστηριακές τιμές του μέτρου επανάκτησης με τις αντίστοιχες τιμές της σχέσης 6.2. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης από τις τιμές εργαστηρίου με συντελεστή RMSPE(%)= 10,62%.



Σχήμα 6.3 Δείγμα 2: Γραφική απεικόνιση του M_r με την ολική τάση θ



Σχήμα 6.4 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης με το μοντέλο K-θ για το μίγμα Α. Παρατηρείται ικανοποιητικός συντελεστής προσαρμογής R^2 και για τα δύο δείγματα που δείχνει ότι η ολική τάση θ είναι σημαντική παράμετρος για την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού. Στο δεύτερο δείγμα η προσαρμογή ήταν καλύτερη με σαφώς μικρότερο συντελεστή RMSPE.

Πίνακας 6.1 Μοντέλο K-θ, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	1371,090	2039,010
K_2	0,782	0,727
R^2	0,93	0,93
RMSPE (%)	13,75	10,62

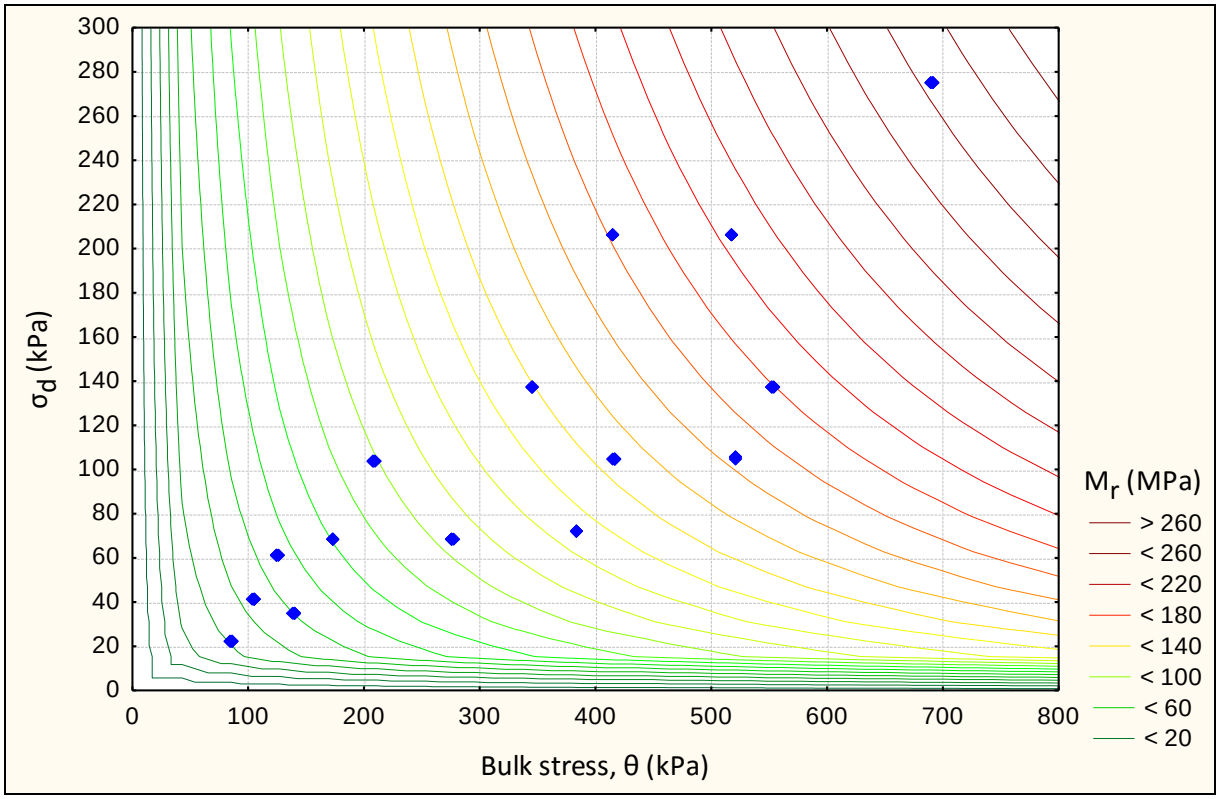
Μοντέλο Uzan (σχέση 3.9)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.3):

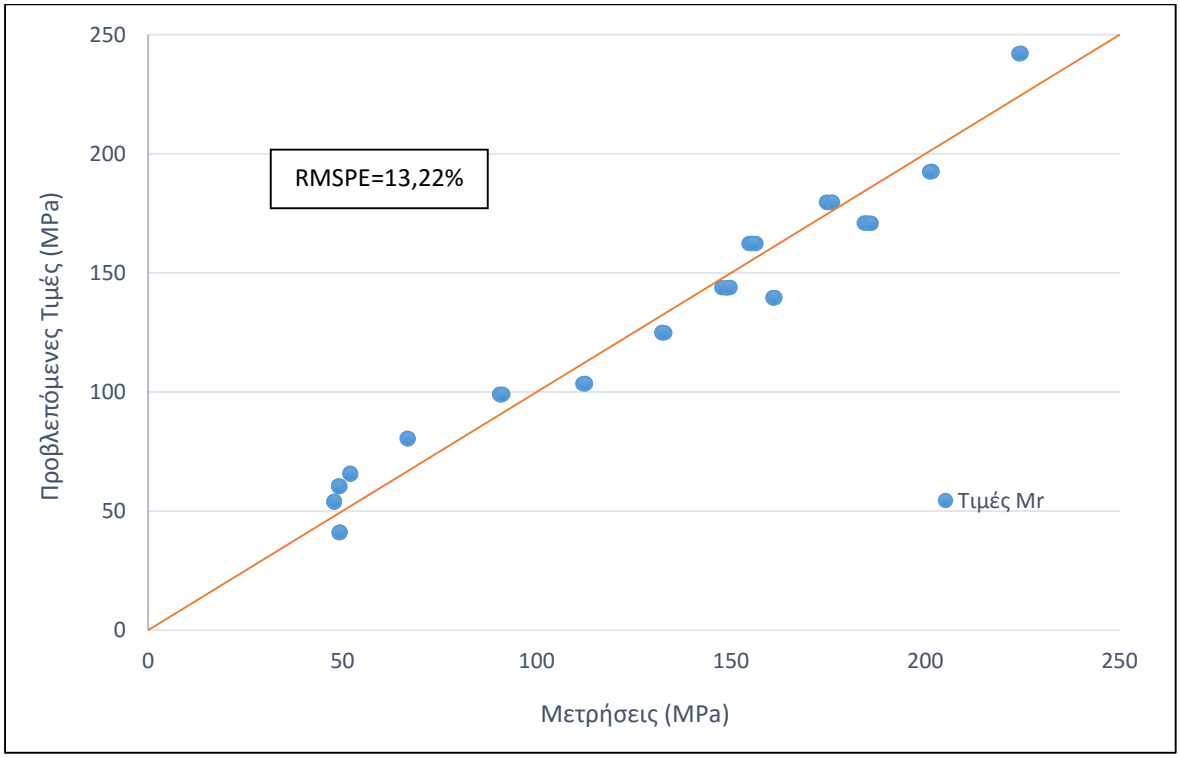
$$M_r = 1710{,}958 \times \theta^{0{,}535} \times \sigma_d^{0{,}259} \qquad (6.3)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,96. Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.6 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την τριαξονική δοκιμή με τις αντίστοιχες τιμές, όπως προκύπτουν από το μοντέλο Uzan. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RMSPE=13,22%.



Σχήμα 6.5 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση του M_r με την ολική τάση θ και την αξονική τάση σ_d



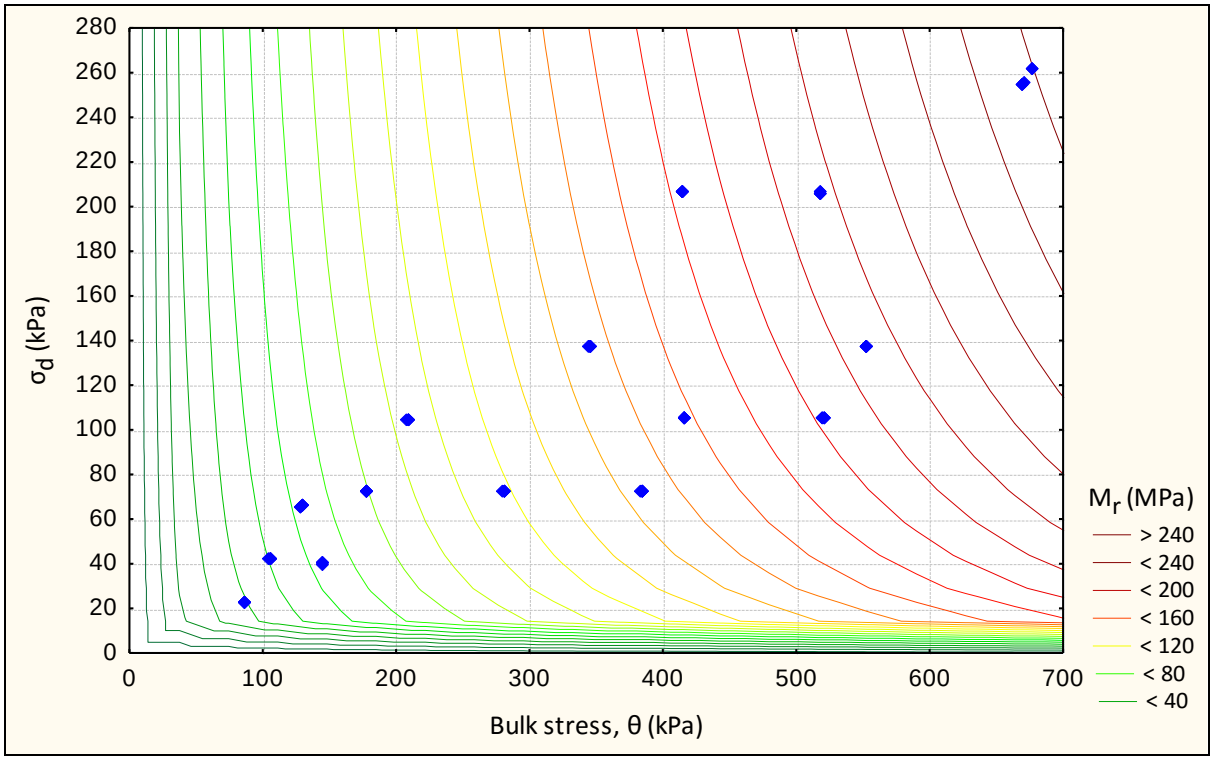
Σχήμα 6.6 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Uzan

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.4):

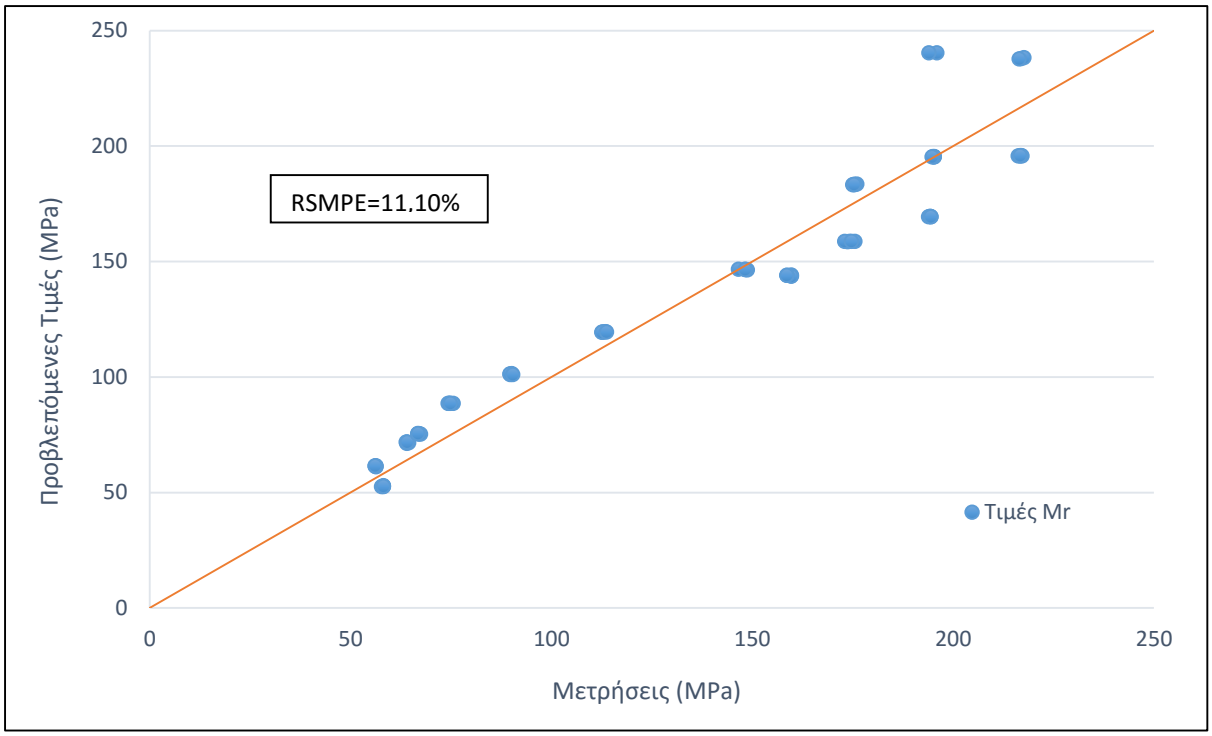
$$M_r = 2180{,}352 \times \theta^{0{,}610} \times \sigma_d^{0{,}130} \qquad (6.4)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,94. Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ και την αξονική τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.8 γίνεται σύγκριση των τιμών εργαστηρίου και των αντίστοιχων προβλέψεων της σχέσης 6.4 για το δείγμα 2. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=11,10%.



Σχήμα 6.7 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση του M_r με την ολική τάση θ και την αξονική τάση σ_d



Σχήμα 6.8 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Uzan

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι του μοντέλου Uzan για τα δύο δείγματα του μίγματος Α. Παρά την απλότητά του, το μοντέλο Uzan κρίνεται αποτελεσματικό, καθώς παρουσιάζει την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα και των δύο δειγμάτων αποτελούμενα από αμιγώς ασφαλτικό υλικό (χαμηλοί συντελεστές RSMPE).

Πίνακας 6.2 Μοντέλο Uzan, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	1710,958	2180,352
K_2	0,535	0,610
K_3	0,259	0,130
R^2	0,96	0,94
RMSPE (%)	13,22	11,10

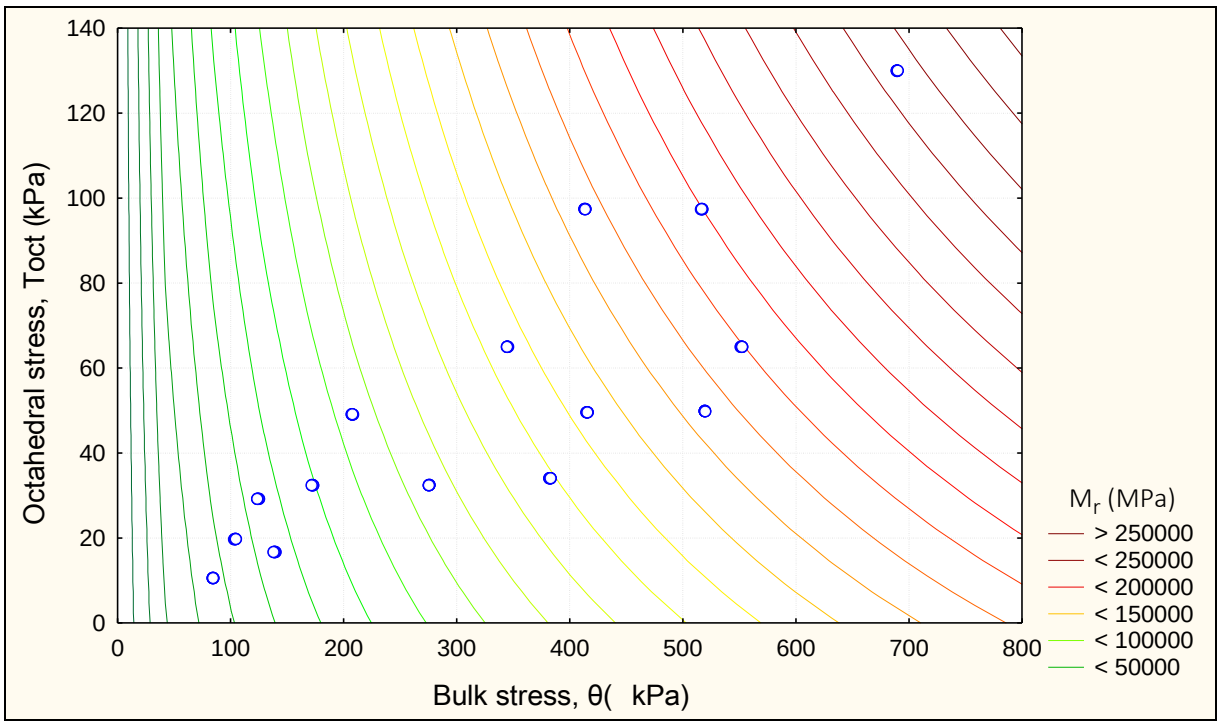
Μοντέλο MEPDG (σχέση 3.16)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.5):

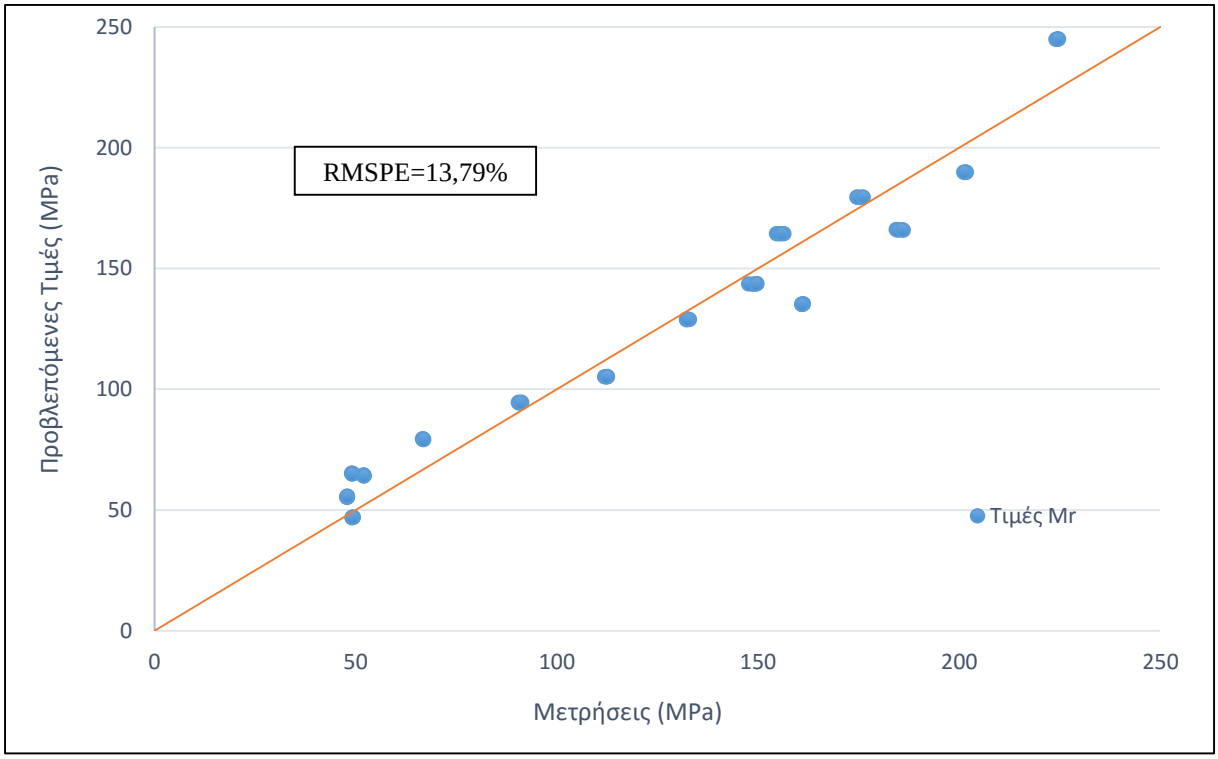
$$M_r = 492{,}580 \ P_a \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0{,}601} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0{,}533} \qquad (6.5)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2= 0,95. Στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ σε δυσδιάστατη προβολή.

Στο σχήμα 6.10 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την τριαξονική δοκιμή με τις αντίστοιχες τιμές, όπως προκύπτουν από το μοντέλο MEPDG. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RMSPE=13,79%.



Σχήμα 6.9 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση του M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



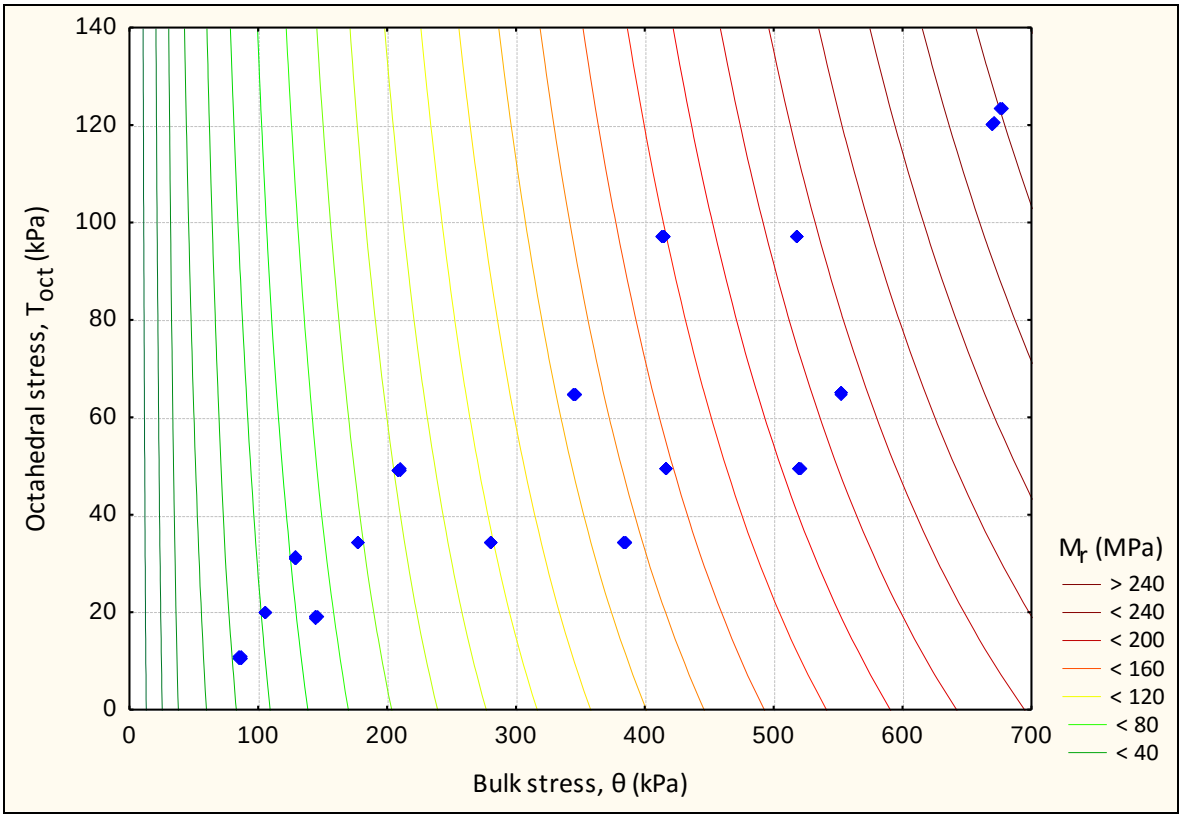
Σχήμα 6.10 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.6):

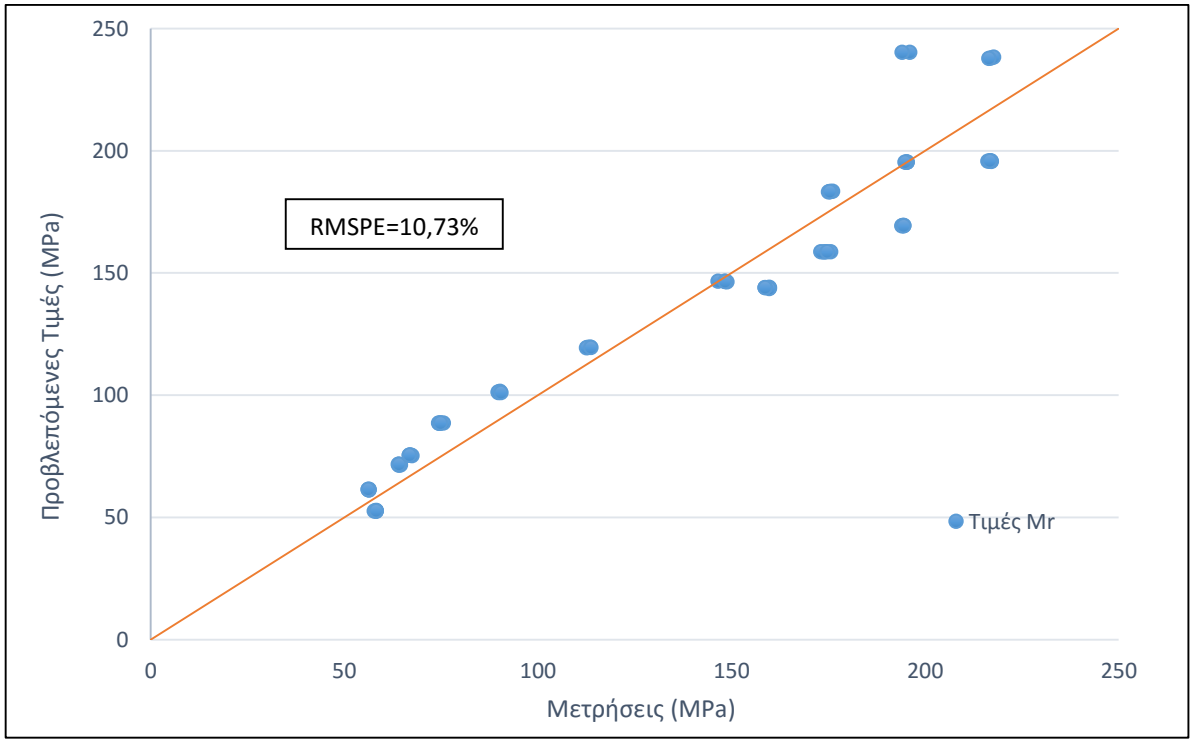
$$M_r=569{,}265\ P_a \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0{,}649} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}+1\right)^{0{,}250} \qquad (6.6)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2 = 0{,}94$. Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.12 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την τριαξονική δοκιμή με τις αντίστοιχες τιμές, όπως προκύπτουν από το μοντέλο MEPDG. Το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RMSPE=10,73%.



Σχήμα 6.11 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση του M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



Σχήμα 6.12 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι του μοντέλου MEPDG για τα δύο δείγματα του μίγματος Α. Παρατηρείται υψηλός συντελεστής προσαρμογής R^2 και για τα δύο δείγματα. Στο δεύτερο δείγμα η προσαρμογή ήταν καλύτερη με σαφώς μικρότερο συντελεστή RMSPE.

Πίνακας 6.3 Μοντέλο MEPDG, αποτελέσματα παλινδρόμησης

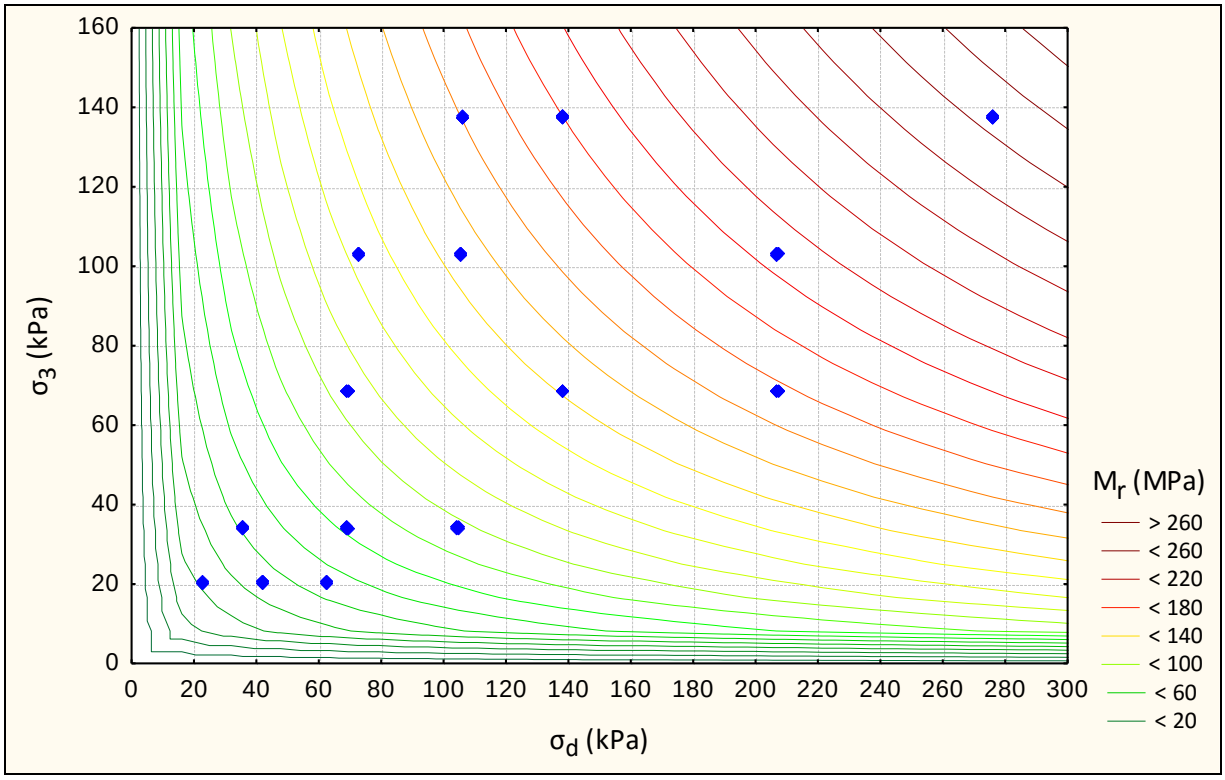
	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	492,580	569,266
K_2	0,601	0,649
K_3	0,533	0,250
R^2	0,95	0,94
RMSPE (%)	13,79	10,73

Μοντέλο Pezo (σχέση 3.19)

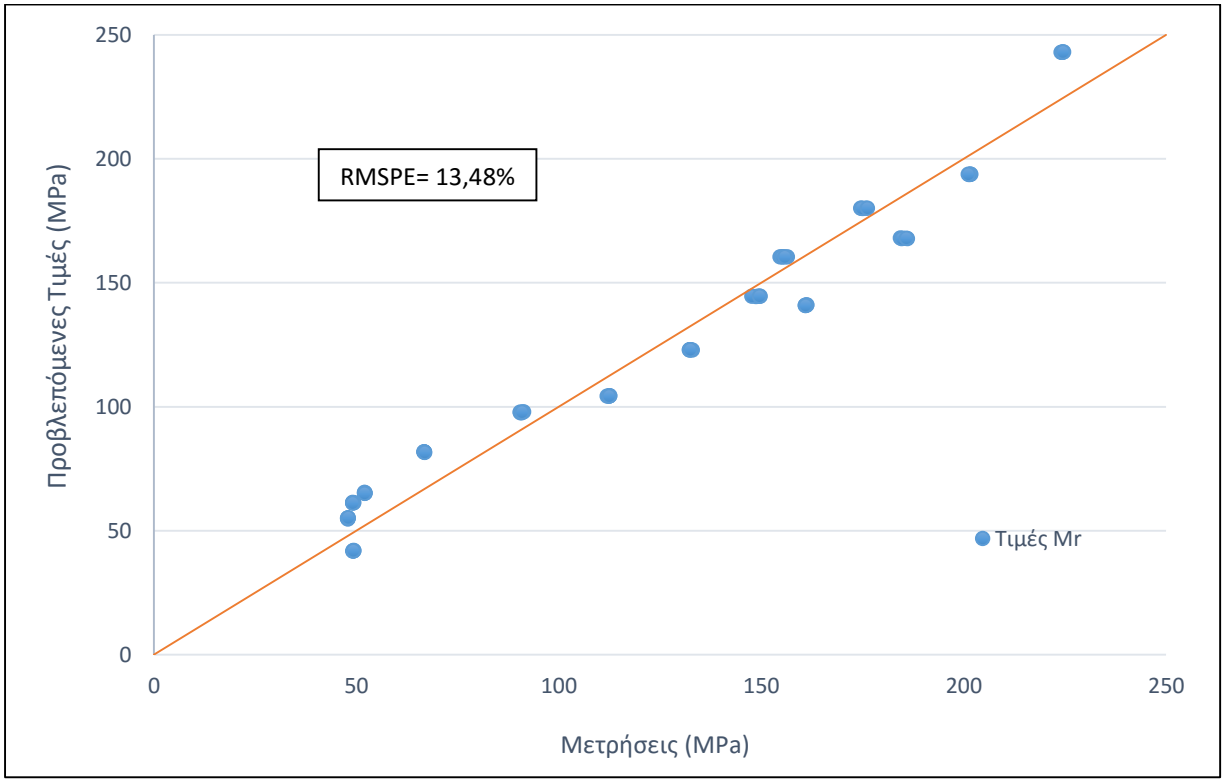
Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Pezo υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.7):

$$M_r = 3749{,}177 \times \sigma_d^{0{,}453} \times \sigma_3^{0{,}353} \qquad (6.7)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,96. Μάλιστα, το μοντέλο Pezo εφαρμόζεται εξαιρετικά και στα άλλα μίγματα, με υψηλό R^2, όπως θα δούμε παρακάτω. Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την κύρια οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική σ_d για το πρώτο δείγμα. Στο σχήμα 6.14 γίνεται σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης της σχέσης (6.7) με τις τιμές εργαστηρίου. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=13,48%.



Σχήμα 6.13 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση του M_r με την κύρια οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική σ_d



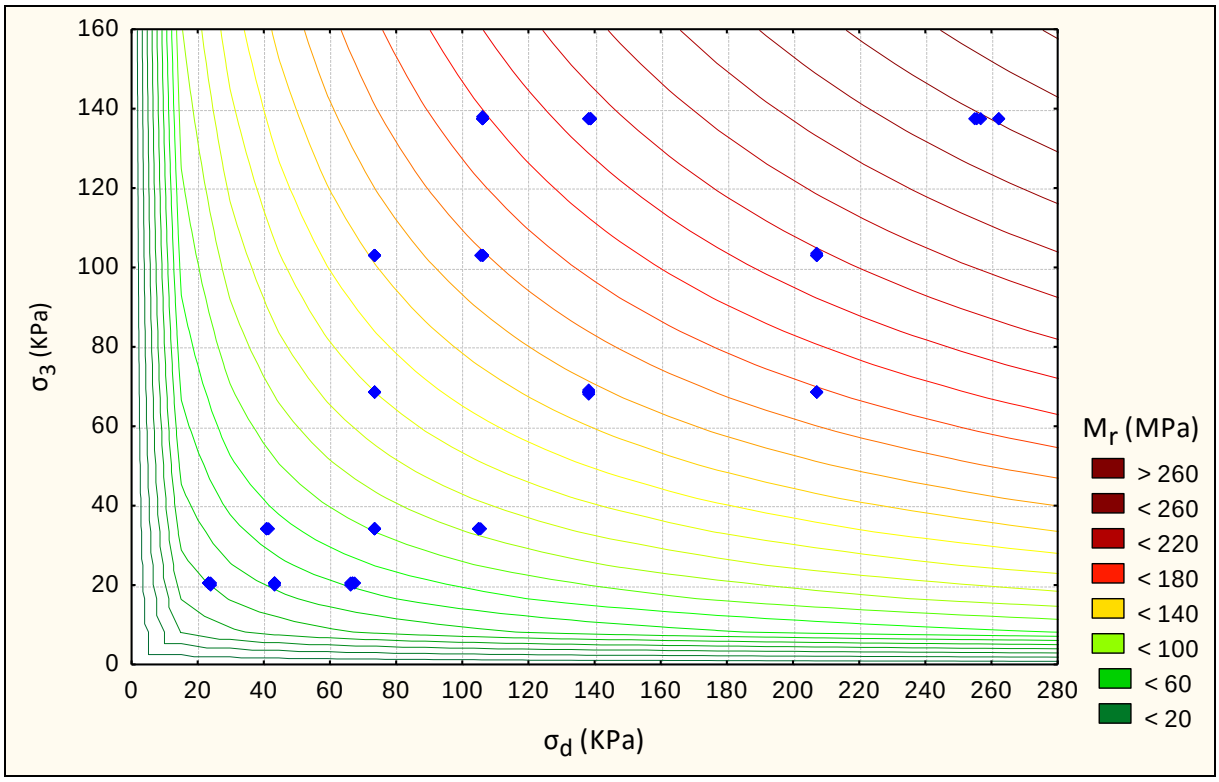
Σχήμα 6.14 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.8).

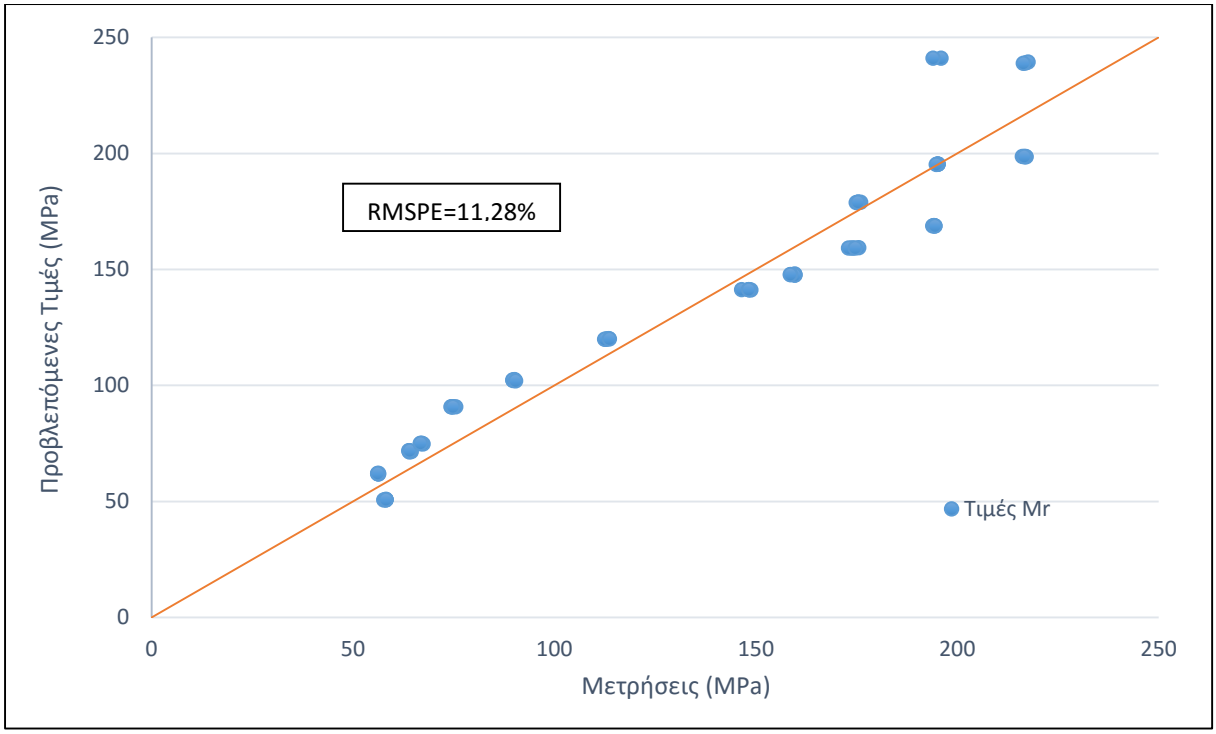
$$M_r = 5353{,}027 \times \sigma_d^{0{,}329} \times \sigma_3^{0{,}401} \qquad (6.8)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,94. Στο σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την κύρια οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική σ_d για το δείγμα 2.

Στο σχήμα 6.16, συγκρίνονται με το διάγραμμα οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την σχέση (6.8) με τις αντίστοιχες τιμές εργαστηρίου. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=11,28%.



Σχήμα 6.15 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση του M_r με την κύρια οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική σ_d



Σχήμα 6.16 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι του μοντέλου Pezo για τα δύο δείγματα του μίγματος Α. Το μοντέλο Pezo έχει εξαιρετική προσαρμογή στα δεδομένα και των δύο δειγμάτων με υψηλούς συντελεστές R^2 και σχετικά χαμηλά ποσοστά RMSPE(%).

Πίνακας 6.4 Μοντέλο Pezo, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	3749,177	5353,027
K_2	0,453	0,329
K_3	0,353	0,401
R^2	0,96	0,94
RMSPE (%)	13,48	11,28

6.2.2 Μίγμα Β

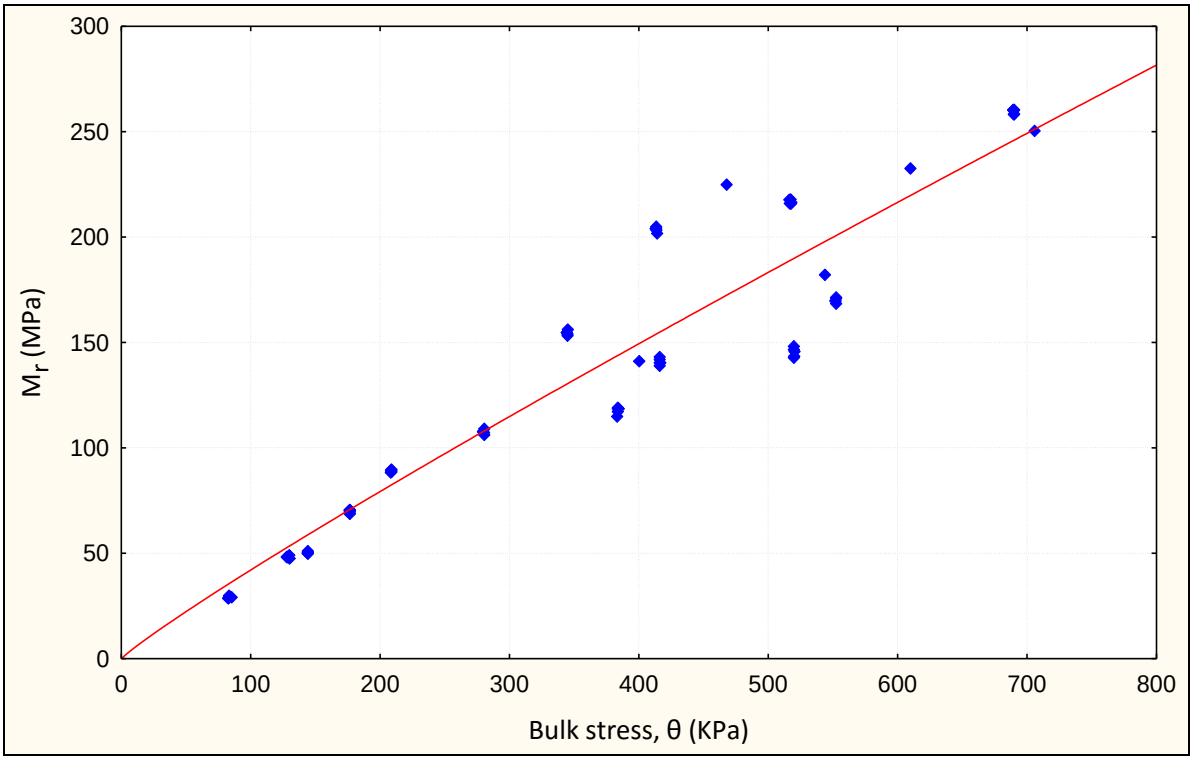
Μοντέλο Κ-θ (σχέση 3.1)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο Κ-θ υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.9):

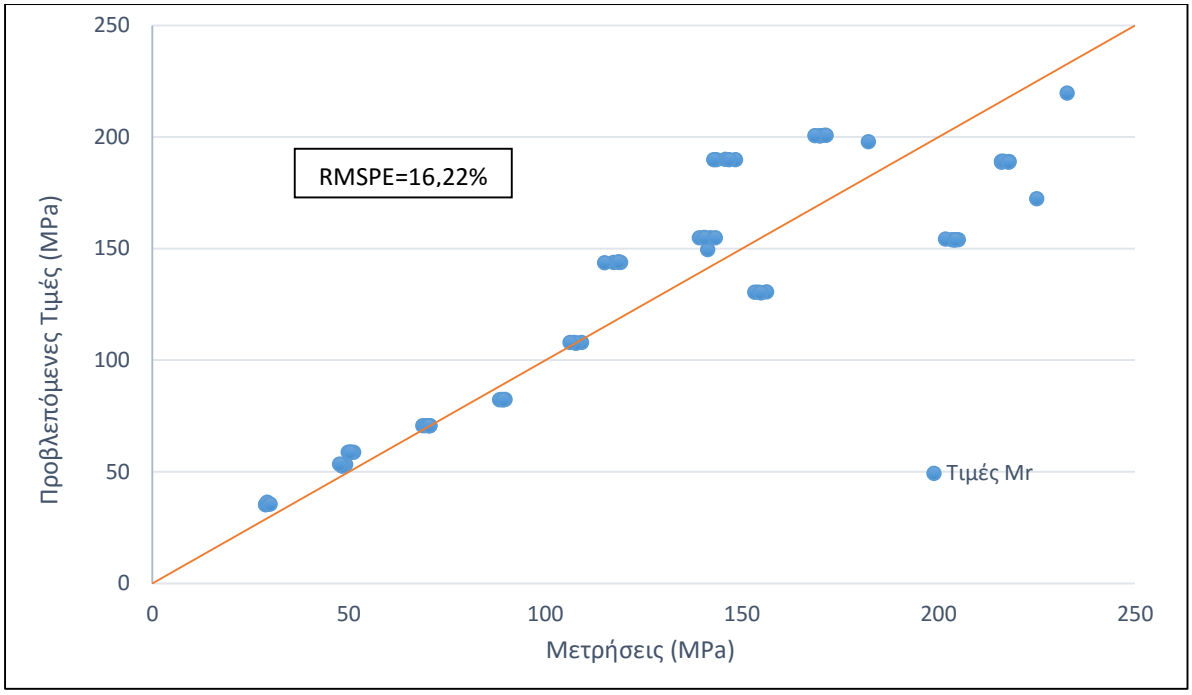
$$M_r = 624{,}017 \times \theta^{0{,}914} \qquad (6.9)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται μη αποδεκτή, καθώς προέκυψε μη ικανοποιητικός συντελεστής R^2=0,87. Στο σχήμα 6.17 παρουσιάζεται η καμπύλη του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ για το δείγμα 1.

Στο σχήμα 6.18, συγκρίνονται με το διάγραμμα οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την σχέση (6.9) με τις αντίστοιχες τιμές εργαστηρίου. Το μοντέλο παρουσιάζει μη αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=16,22%>15%.



Σχήμα 6.17 Δείγμα 1: Γραφική απεικόνιση του M_r με την ολική τάση θ



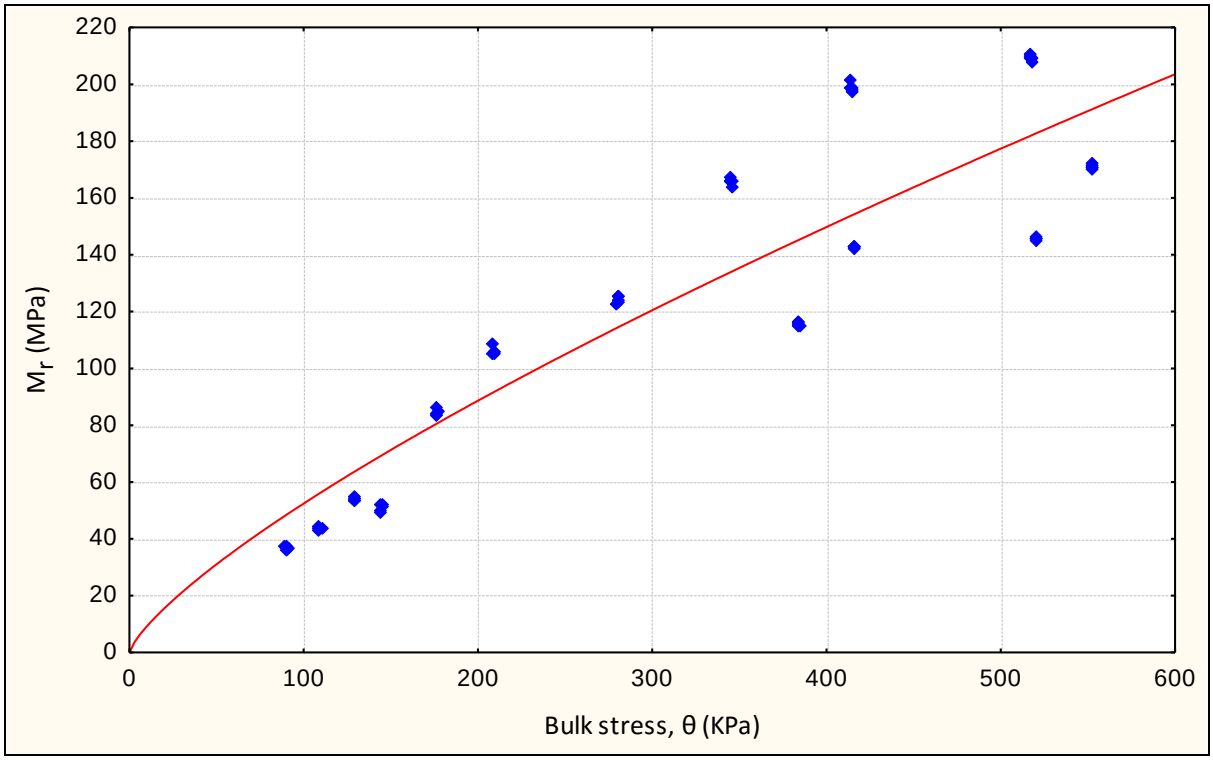
Σχήμα 6.18 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο K-θ υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.10):

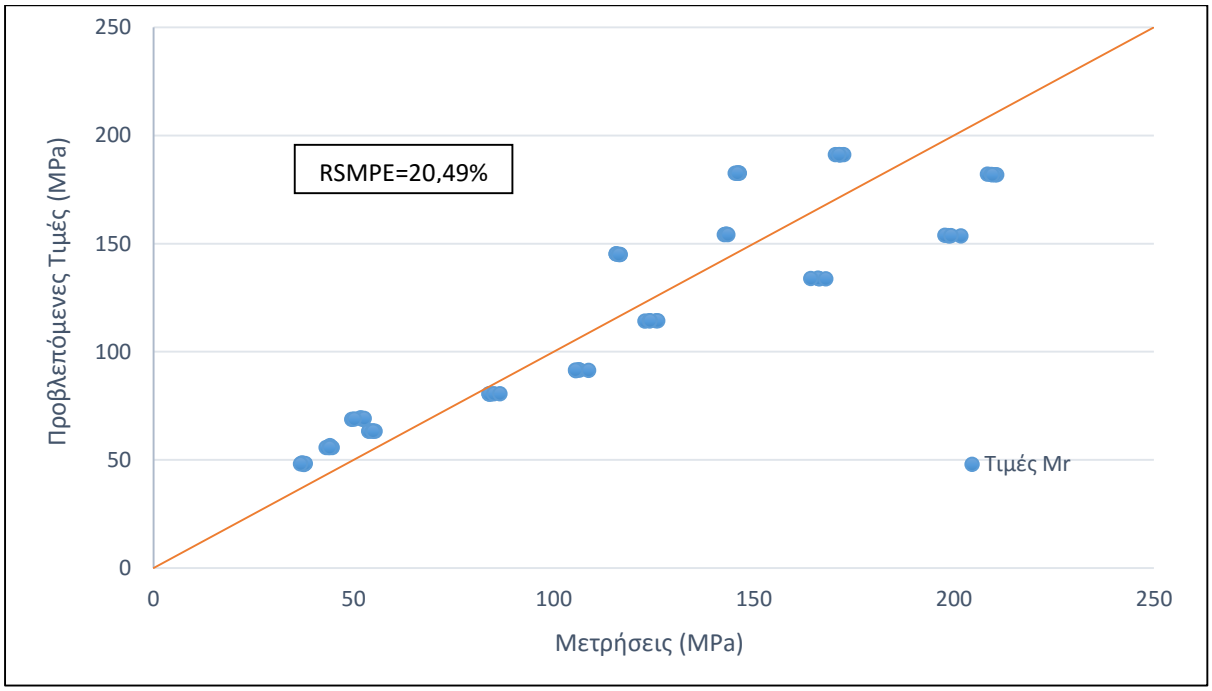
$$M_r = 1606{,}220 \times \theta^{\,0{,}757} \qquad (6.10)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,96. Στο Σχήμα 6.19 παριστάνεται γραφικά η σχέση του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ για το δείγμα 2.

Στο σχήμα 6.20 γίνεται σύγκριση των τιμών εργαστηρίου και των αντίστοιχων προβλέψεων της σχέσης 6.10 για το δείγμα 2. Παρά τον υψηλό συντελεστή R^2, το μοντέλο παρουσιάζει μη αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=20,49%.



Σχήμα 6.19 Δείγμα 2: Γραφική απεικόνιση του M_r με την ολική τάση θ



Σχήμα 6.20 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι του μοντέλου K-θ για τα δύο δείγματα του μίγματος B. Από τα υψηλά ποσοστά RMSPE(%) συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο K-θ δεν περιγράφει ικανοποιητικά την ελαστική συμπεριφορά του μίγματος B (αμιγώς αδρανές υλικό 3A).

Πίνακας 6.5 Μοντέλο K-θ, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	624,017	1606,220
K_2	0,914	0,757
R^2	0,87	0,96
RMSPE (%)	16,22	20,49

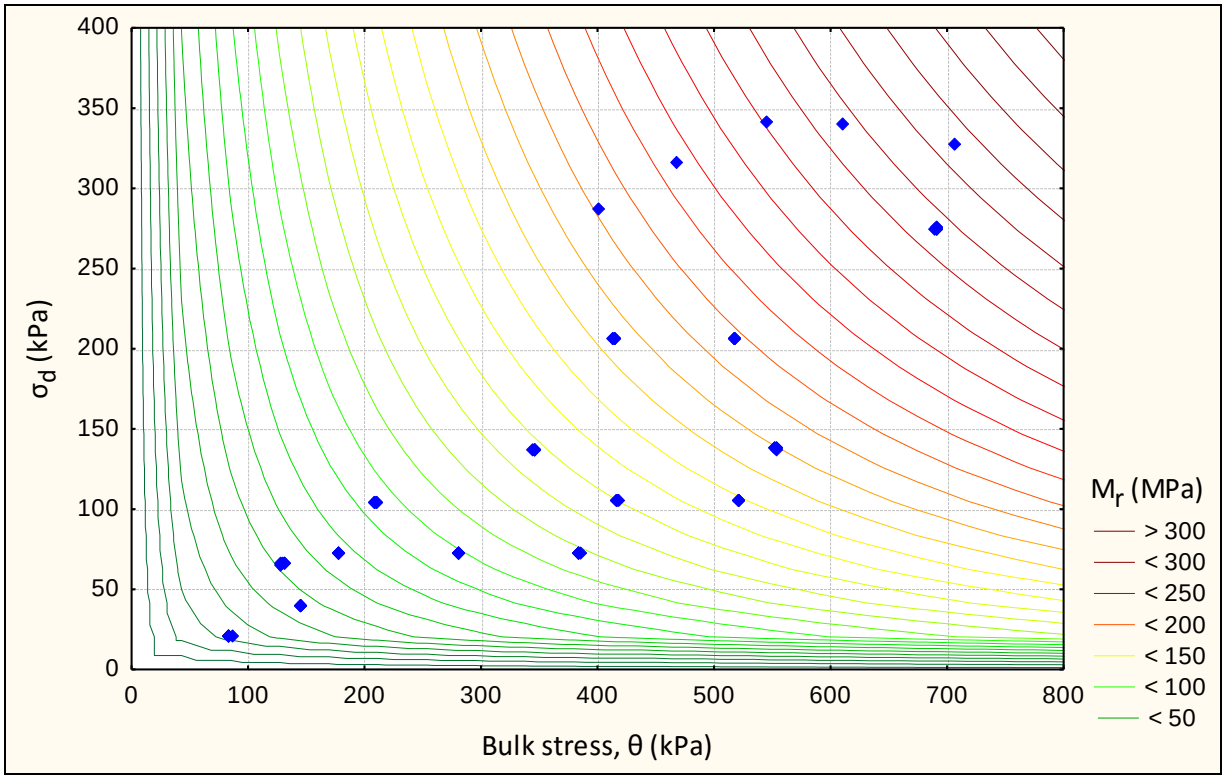
Μοντέλο Uzan (σχέση 3.9)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.11):

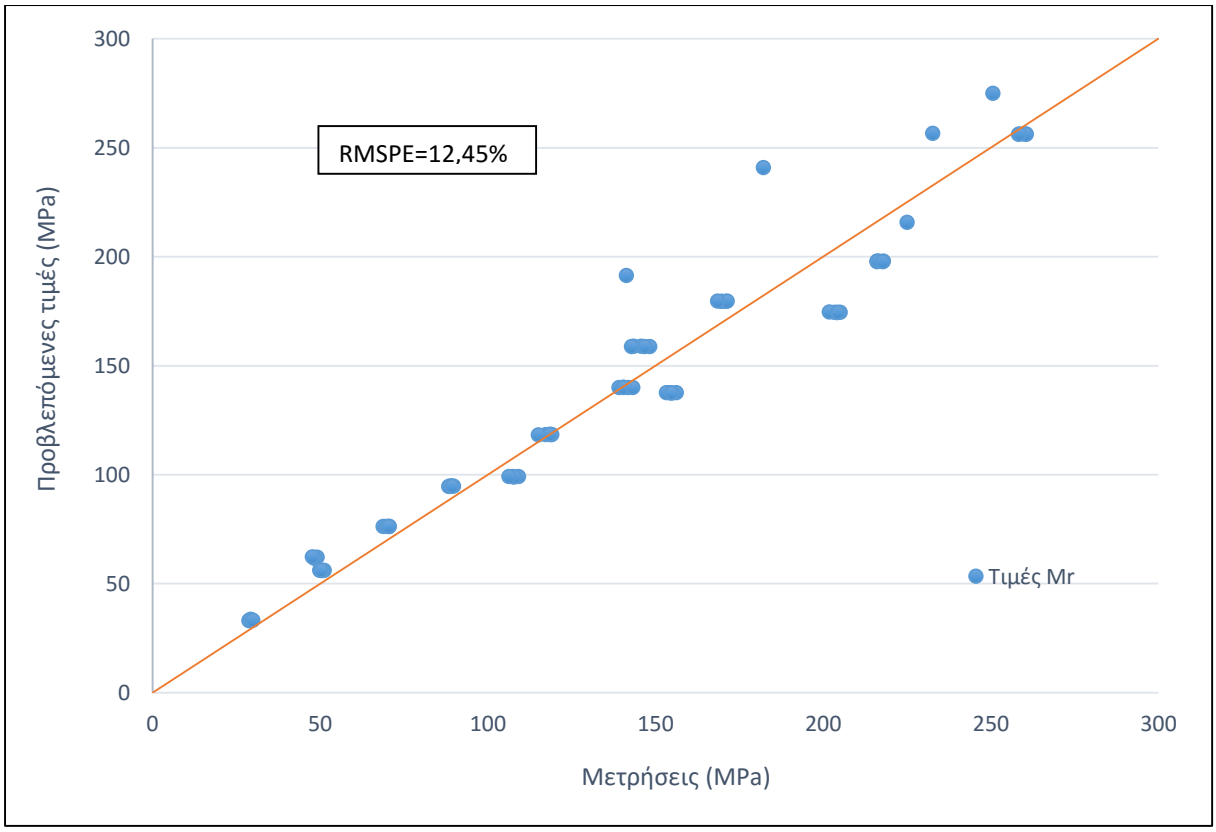
$$M_r = 990{,}895 \times \theta^{0{,}563} \times \sigma_d^{0{,}334} \qquad (6.11)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,95. Στο σχήμα 6.21 παρουσιάζεται το διάγραμμα του μέτρου επανάκτησης με το ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d.

Στο επόμενο σχήμα 6.22 συγκρίνονται οι προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan με τις τιμές εργαστηρίου για το πρώτο δείγμα. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=12,45%.



Σχήμα 6.21 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



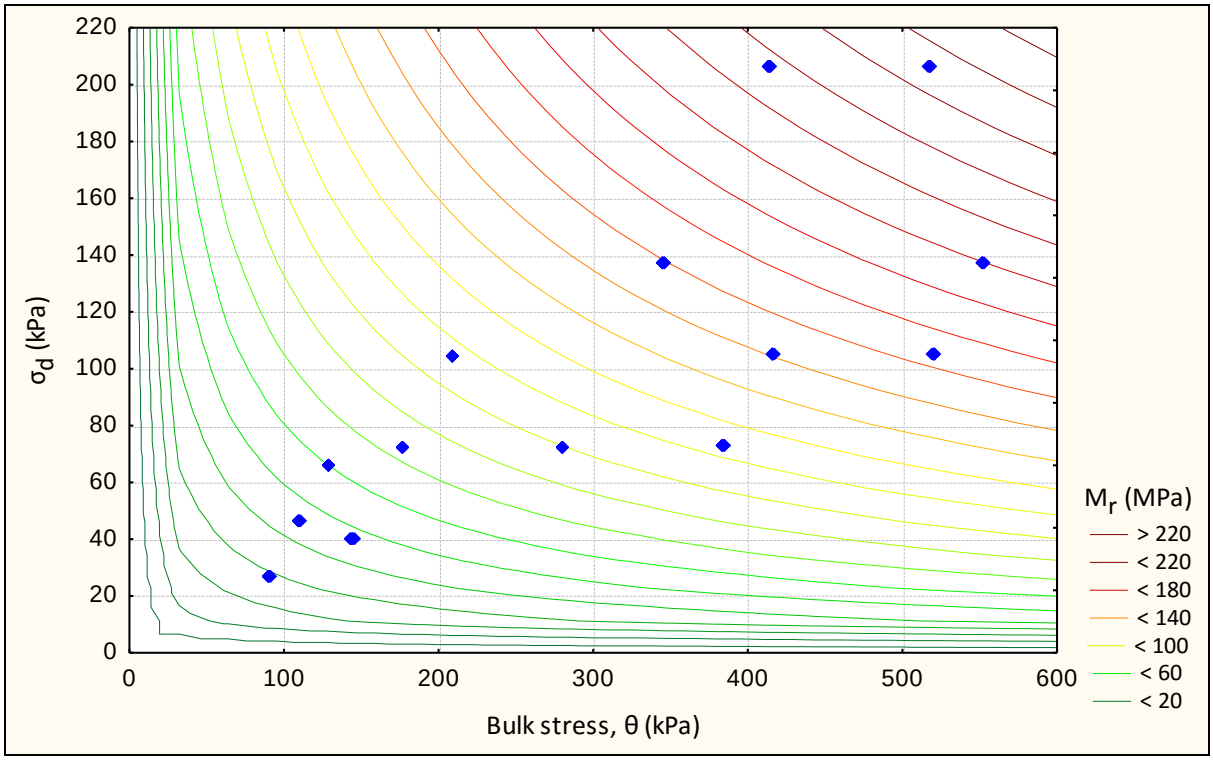
Σχήμα 6.22 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου M-EPDG

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.12):

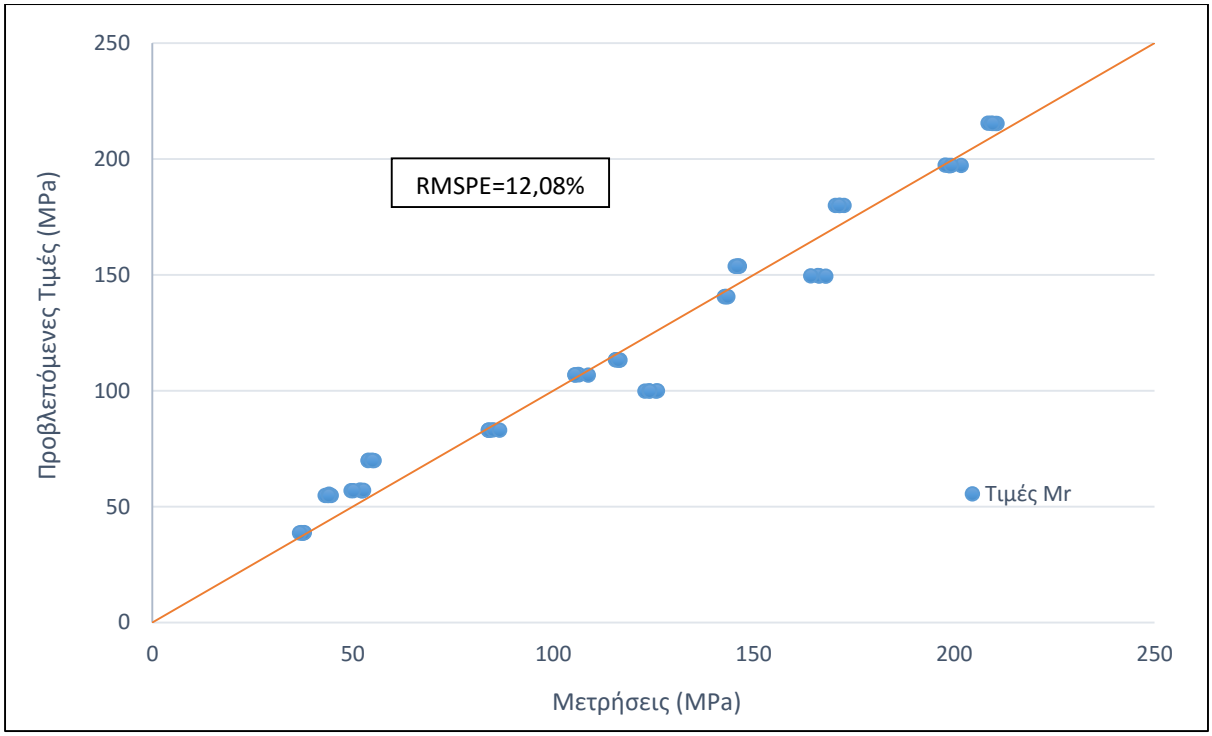
$$M_r = 1246{,}609 \times \theta^{0{,}394} \times \sigma_d^{0{,}505} \qquad (6.12)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.23 βρίσκεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.24 συγκρίνονται γραφικά οι προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan του μέτρου επανάκτησης του δεύτερου δείγματος με τις εργαστηριακές μετρήσεις. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=12,08%.



Σχήμα 6.23 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



Σχήμα 6.24 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Uzan

Στον πίνακα 6.6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης, με βάση το μοντέλο Uzan, για τα δύο δείγματα του μίγματος B. Παρατηρείται ότι το μοντέλο Uzan προσαρμόζεται πολύ καλύτερα στα εργαστηριακά αποτελέσματα (υψηλός συντελεστής R^2 και χαμηλός συντελεστής RMSPE(%)) σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα.

Πίνακας 6.6 Μοντέλο Uzan, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	990,895	1246,609
K_2	0,563	0,394
K_3	0,334	0,505
R^2	0,95	0,97
RMSPE (%)	12,45	12,08

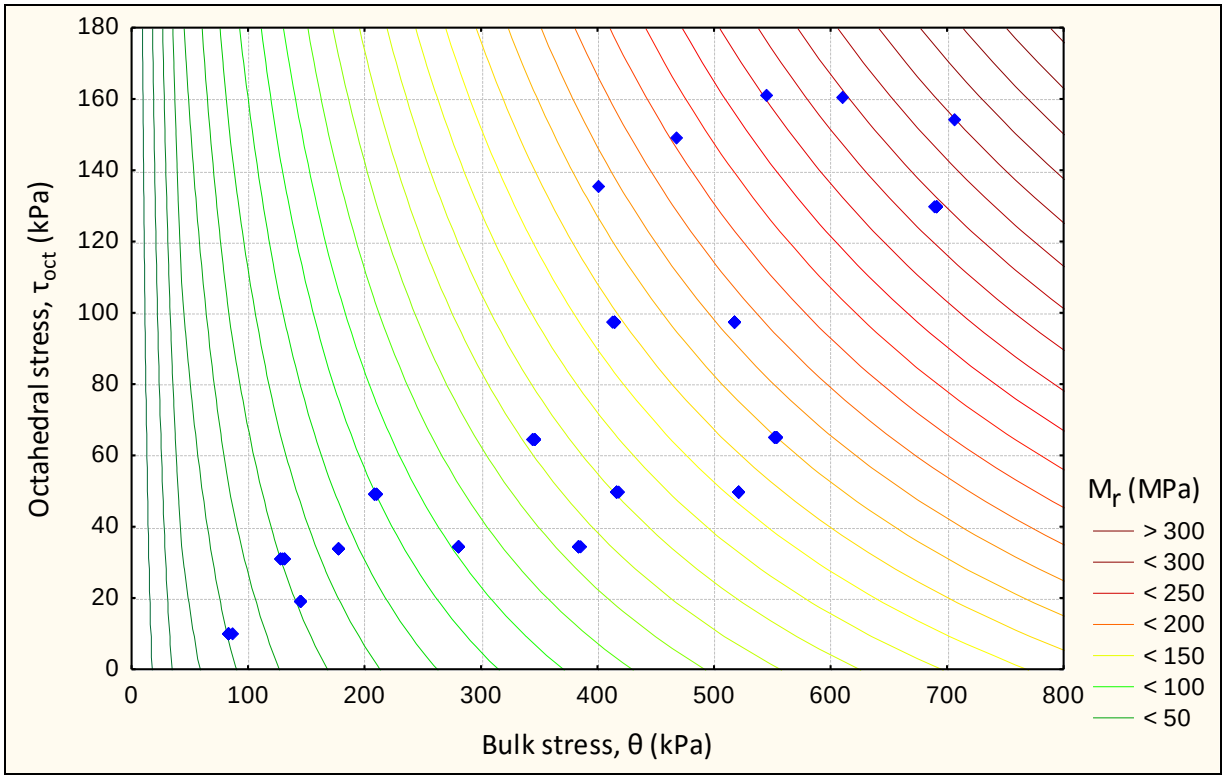
Μοντέλο MEPDG (σχέση 3.16)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.13):

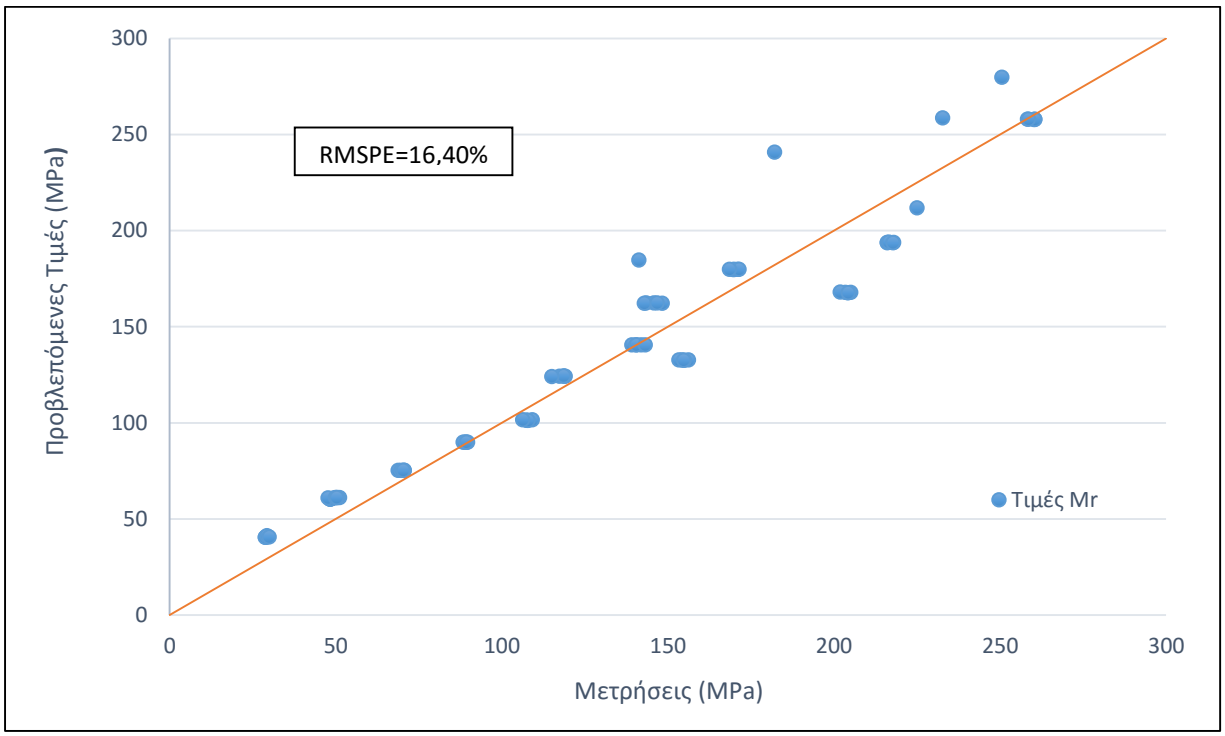
$$M_r = 430{,}080\, P_a \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0{,}644} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0{,}658} \qquad (6.13)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε αποδεκτός συντελεστής R^2=0,93. Στο σχήμα 6.25 παριστάνεται γραφικά η σχέση του μέτρου επανάκτησης με την οκτάεδρη τάση και την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.26 συγκρίνονται, για το πρώτο δείγμα, οι τιμές που προβλέπονται από την σχέση 6.13 με τις τιμές του μέτρου επανάκτησης από την εργαστηριακή δοκιμή. Παρά τον υψηλό συντελεστή R^2, το μοντέλο παρουσιάζει μη αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=16,40%.



Σχήμα 6.25 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



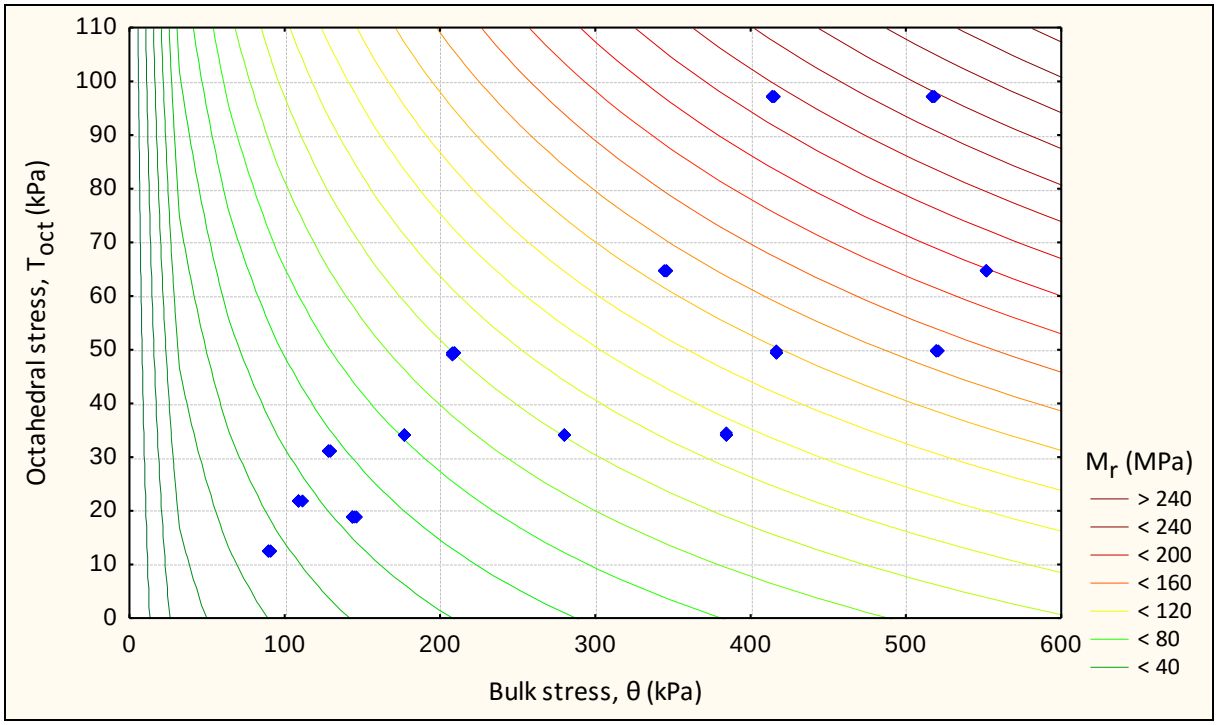
Σχήμα 6.26 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.14):

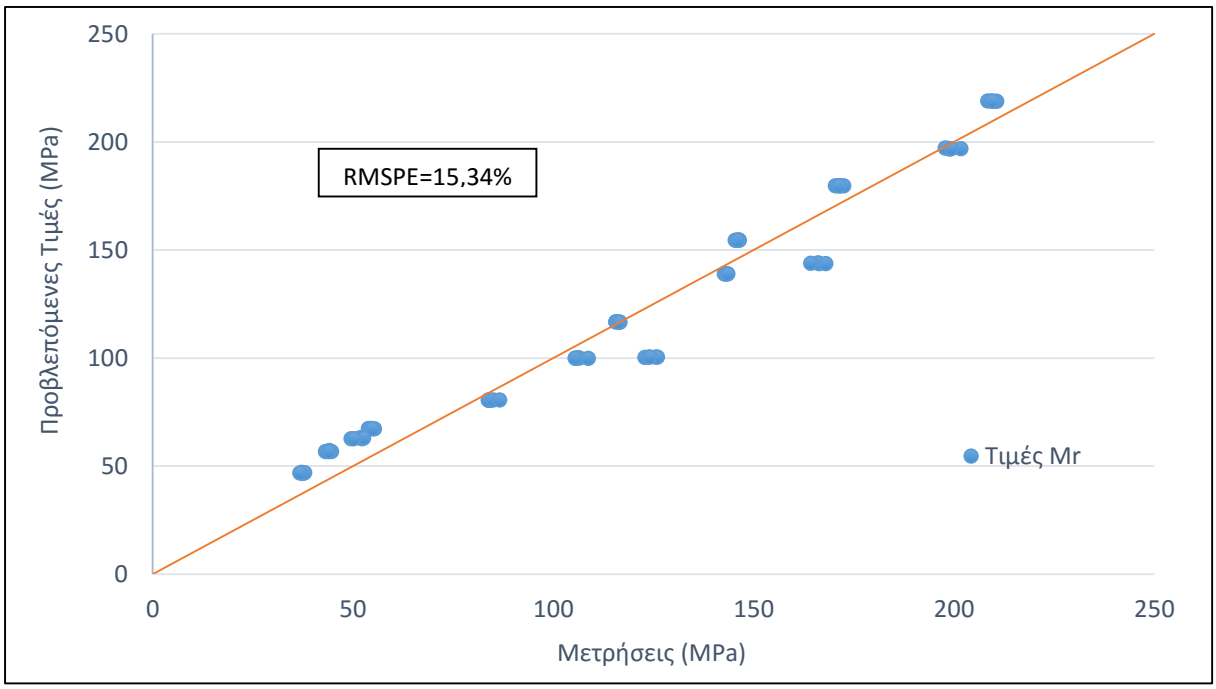
$$M_r = 423{,}991 \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0{,}473} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{1{,}269} \qquad (6.14)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,95. Στο σχήμα 6.27 παριστάνεται γραφικά η σχέση του μέτρου επανάκτησης με την οκτάεδρη τάση και την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.28 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την σχέση 6.14 με τις τιμές εργαστηρίου. Παρά τον υψηλό συντελεστή R^2, το μοντέλο παρουσιάζει μη αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=15,34%.



Σχήμα 6.27 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



Σχήμα 6.28 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Στον πίνακα 6.7 παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι του μοντέλου MEPDG για τα δύο δείγματα του μίγματος B. Ενώ οι συντελεστές R^2 είναι ικανοποιητικοί, τα ποσοστά RMSPE(%) είναι υψηλά: το μοντέλο MEPDG δεν ενδείκνυται για την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς του μίγματος B (αμιγώς αδρανές υλικό 3A).

Πίνακας 6.7 Μοντέλο MEPDG, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	430,080	423,991
K_2	0,644	0,473
K_3	0,658	1,269
R^2	0,93	0,95
RMSPE (%)	16,40	15,34

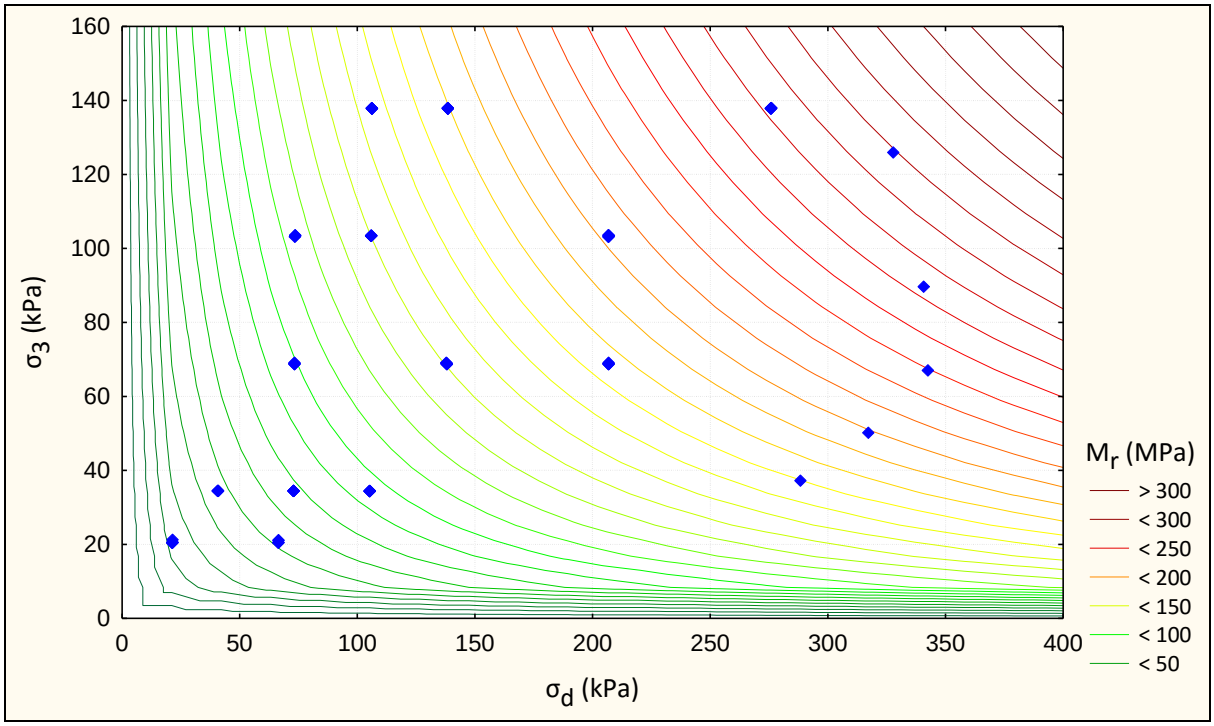
Μοντέλο Pezo (σχέση 3.19)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Pezo υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.15):

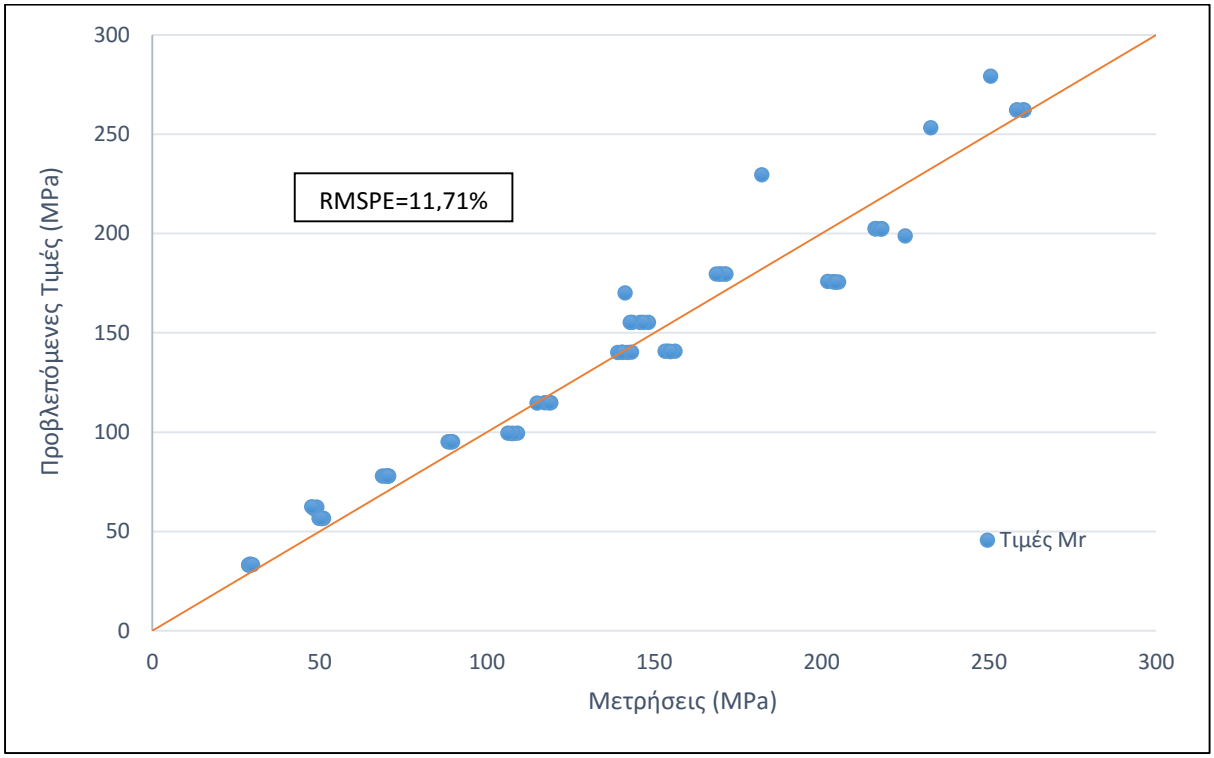
$$M_r = 2145{,}828 \times \sigma_d^{0{,}549} \times \sigma_3^{0{,}349} \qquad (6.15)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,96. Στο σχήμα 6.29 βρίσκεται το διάγραμμα του μέτρου επανάκτησης με την οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.30 γίνεται σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης από το μοντέλο Pezo με τις εργαστηριακές μετρήσεις. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=11,71%.



Σχήμα 6.29 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση του M_r με την οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



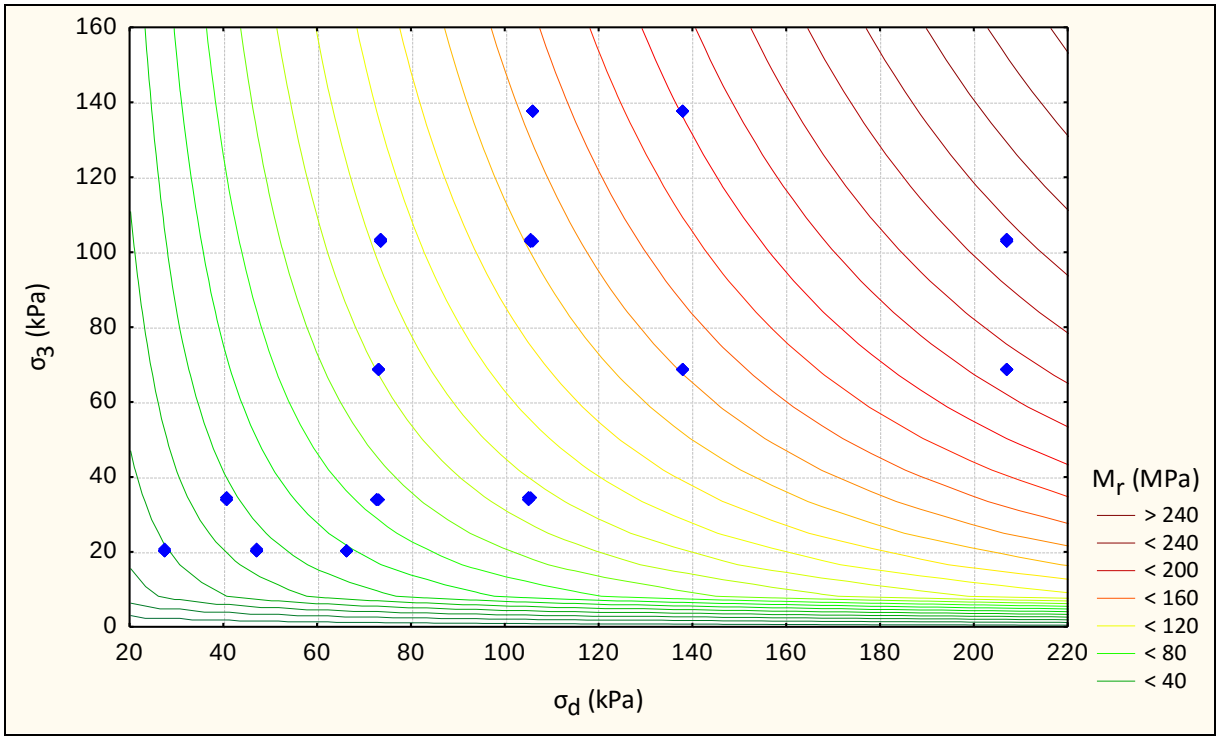
Σχήμα 6.30 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Pezo υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.16):

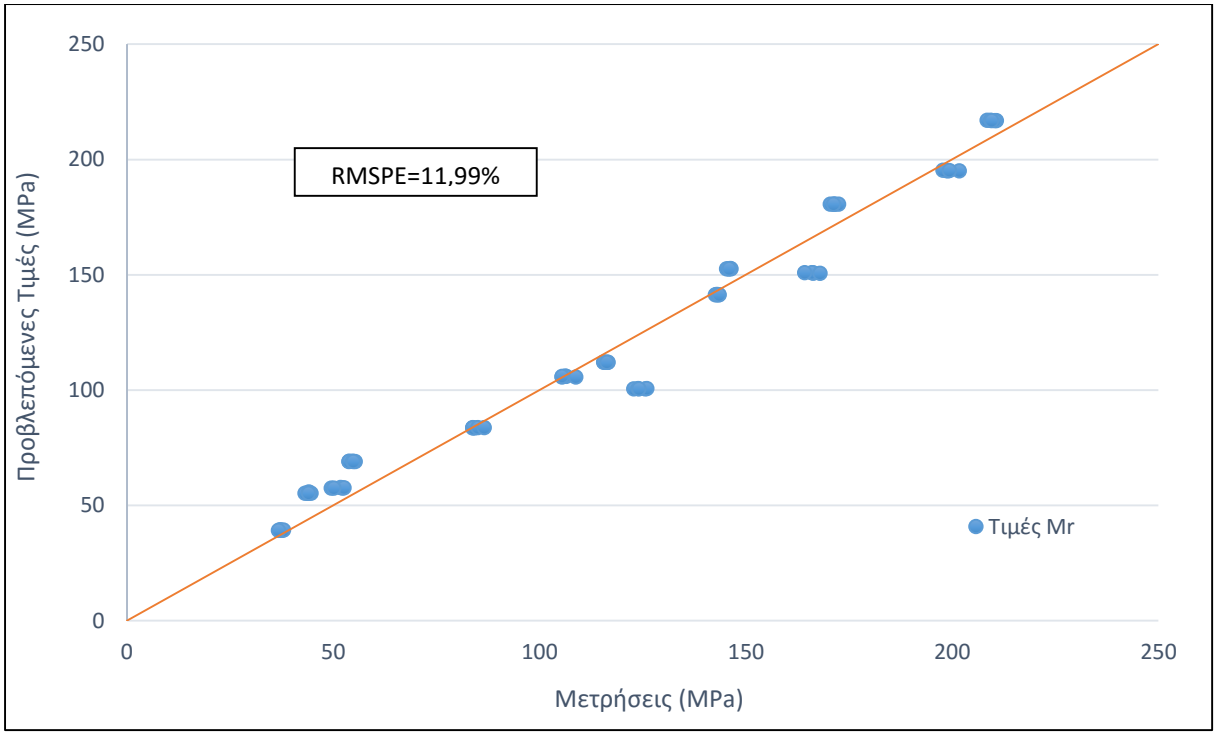
$$M_r = 2180{,}757 \times \sigma_d^{0{,}636} \times \sigma_3^{0{,}260} \qquad (6.16)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.31 παρουσιάζεται το διάγραμμα του μέτρου επανάκτησης Mr με την οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.32 συγκρίνονται γραφικά οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από το μοντέλο Pezo με τα αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=11,99%.



Σχήμα 6.31 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση του M_r με την οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



Σχήμα 6.32 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Στον πίνακα 6.8 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης με βάση το μοντέλο Pezo για τα δύο δείγματα του μίγματος B. Συγκρινόμενο με τα άλλα μοντέλα που εξετάσθηκαν, το μοντέλο αυτό παρουσίασε τους υψηλότερους συντελεστές R^2 και τους χαμηλότερους συντελεστές RMSPE(%) και για τα δύο δείγματα. Έτσι συμπεραίνουμε ότι αποτελεί το καλύτερο μοντέλο για την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς του μίγματος B.

Πίνακας 6.8 Μοντέλο Pezo, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	2145,828	2180,757
K_2	0,549	0,636
K_3	0,349	0,260
R^2	0,96	0,97
RMSPE (%)	11,71	11,99

6.2.3 Μίγμα Γ

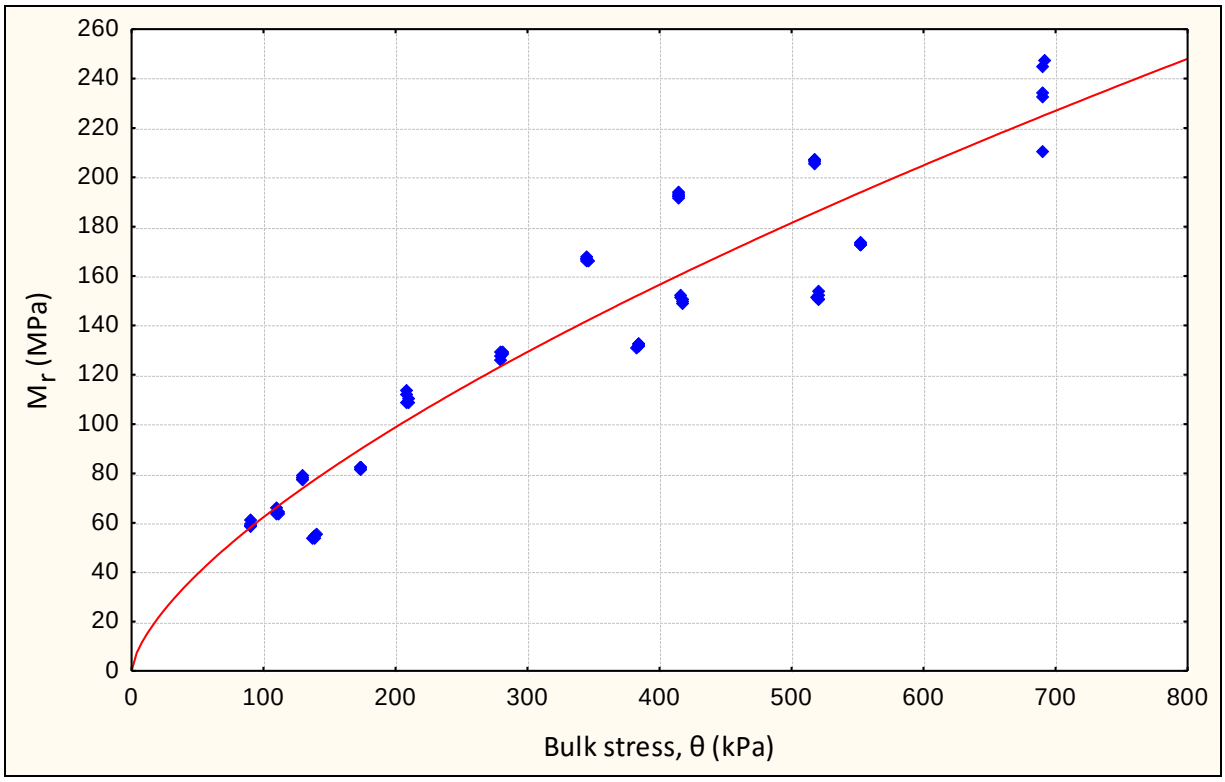
Μοντέλο Κ-θ (σχέση 3.1)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο Κ-θ υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.17):

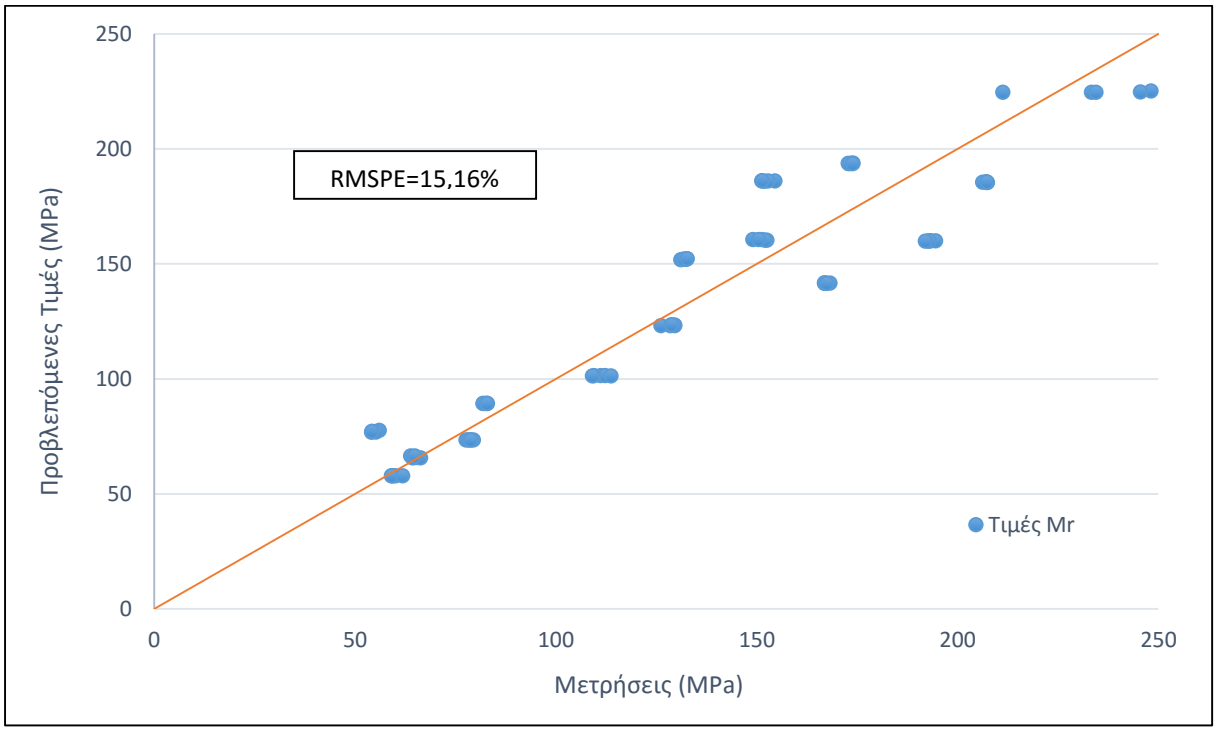
$$M_r = 2921{,}220 \times \theta^{0{,}664} \qquad (6.17)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται μη αποδεκτή, καθώς προέκυψε μη ικανοποιητικός συντελεστής R^2=0,88. Στο σχήμα 6.33 παρουσιάζεται η καμπύλη του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.34 συγκρίνονται οι εργαστηριακές μετρήσεις του μέτρου επανάκτησης με τις αντίστοιχες τιμές της σχέσης (6.17). Το μοντέλο παρουσιάζει επίσης υψηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=15,16%.



Σχήμα 6.33 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ



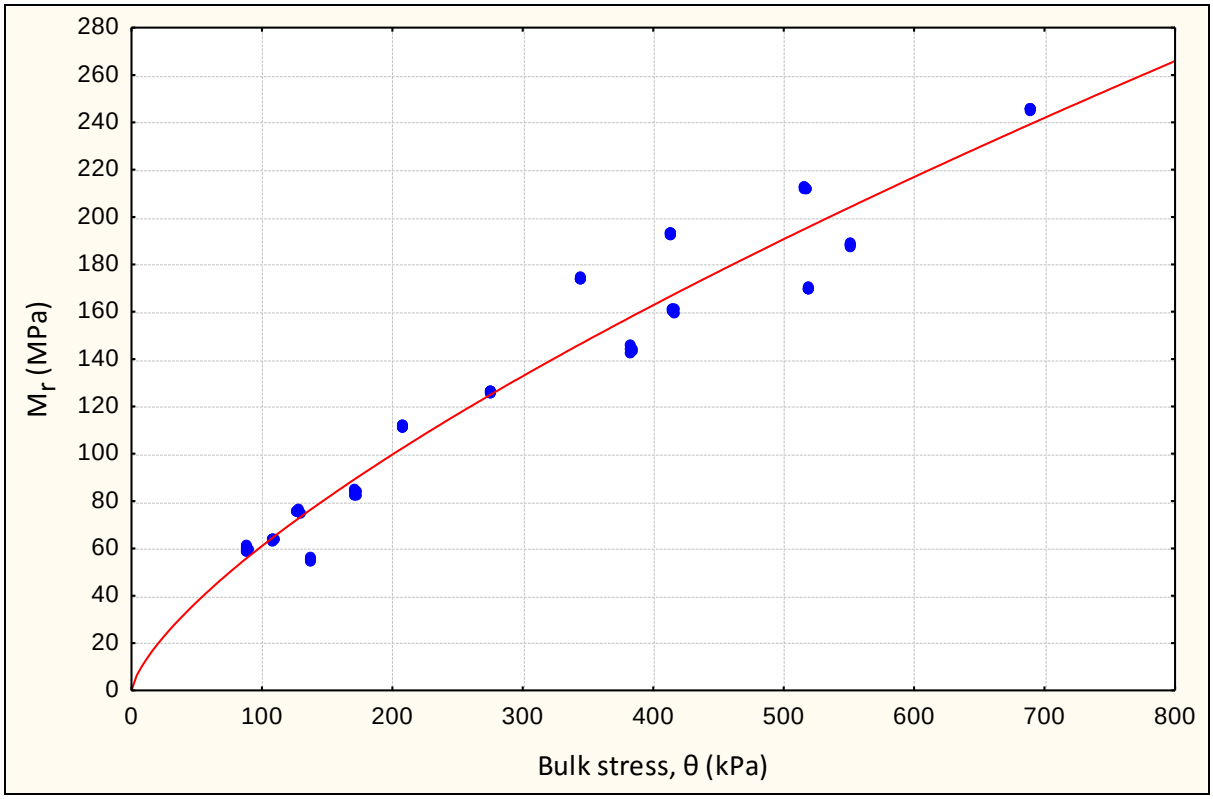
Σχήμα 6.34 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2 για το μοντέλο K-θ υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.18):

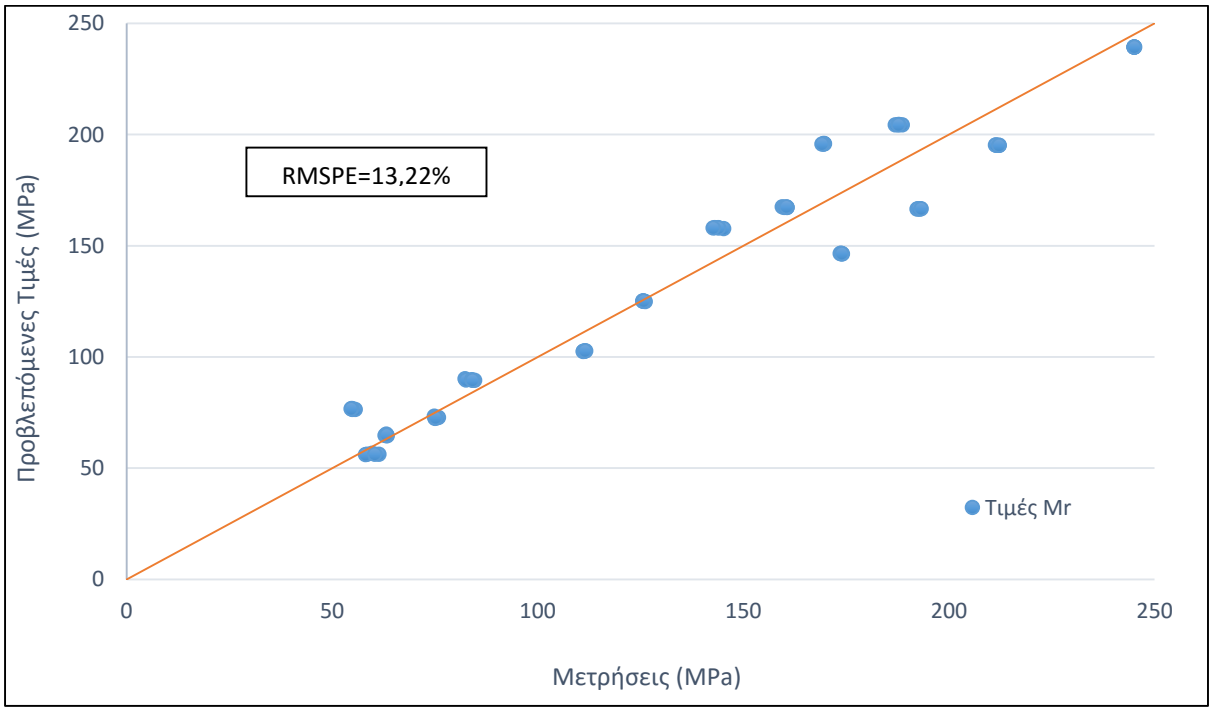
$$M_r = 2340{,}160 \times \theta^{0{,}708} \qquad (6.18)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή, καθώς προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής R^2=0,93. Στο σχήμα 6.35 παρουσιάζεται η καμπύλη του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ.

Στο σχήμα 6.36 γίνεται σύγκριση των εργαστηριακών τιμών του μέτρου επανάκτησης με τις αντίστοιχες τιμές της σχέσης (6.18). Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=13,22%.



Σχήμα 6.35 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ



Σχήμα 6.36 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου K-θ

Στον πίνακα 6.9 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας με βάση το μοντέλο K-θ για το μίγμα Γ. Το μοντέλο K-θ δεν έχει ικανοποιητική εφαρμογή στα πειραματικά αποτελέσματα και επομένως δεν ενδείκνυται για την περιγραφή της συμπεριφοράς μίγματος ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού.

Πίνακας 6.9 Μοντέλο K-θ, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	2921,220	2340,160
K_2	0,664	0,708
R^2	0,88	0,93
RMSPE (%)	15,16	13,32

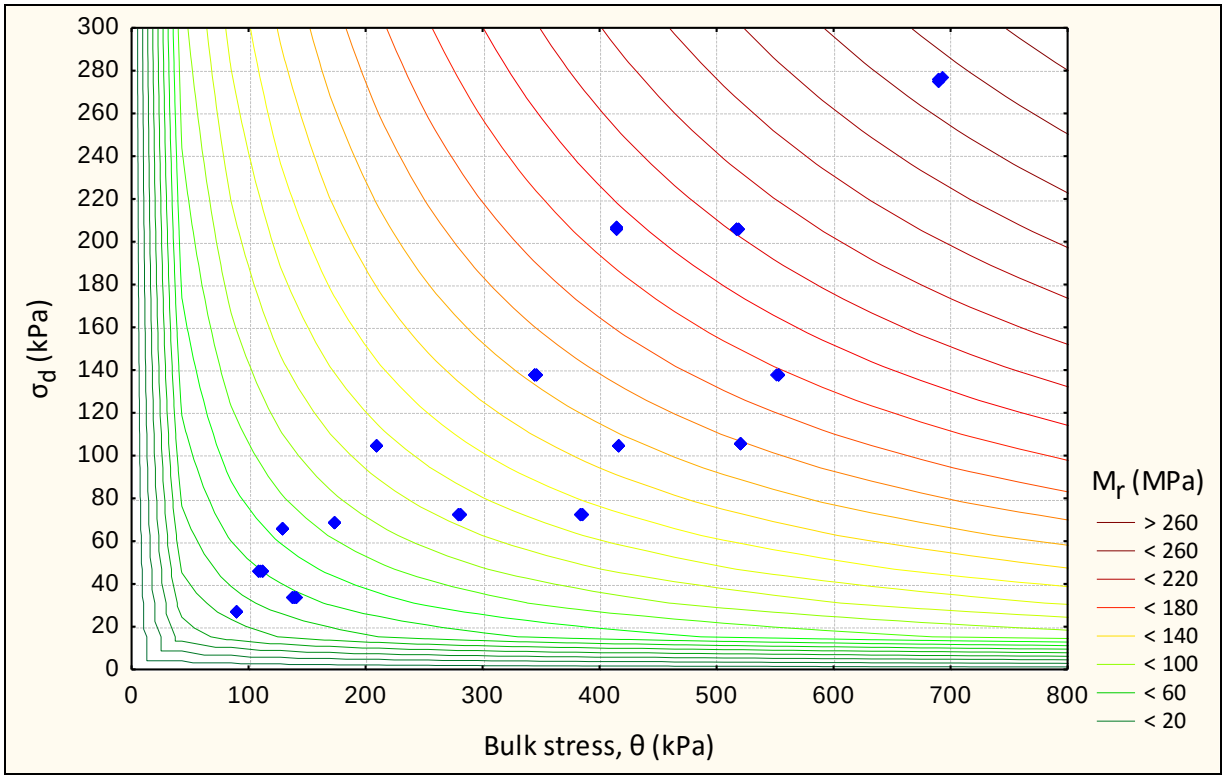
Μοντέλο Uzan (σχέση 3.9)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.19):

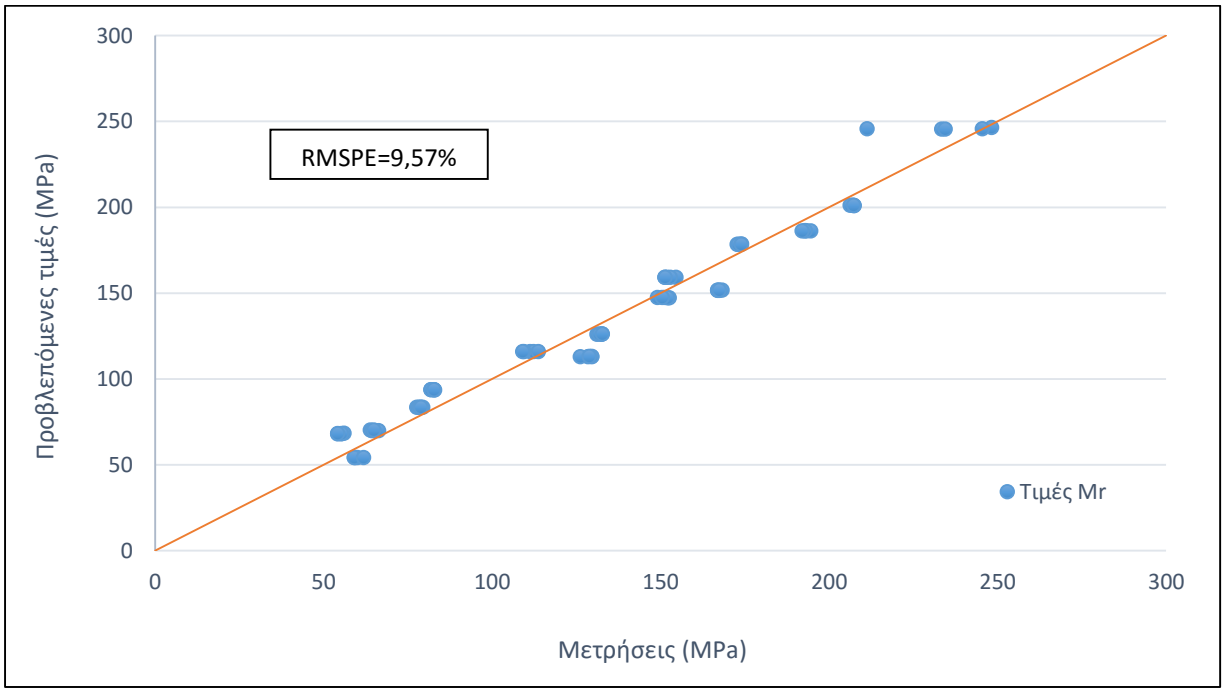
$$M_r = 3630,472 \times \theta^{0,344} \times \sigma_d^{0,350} \qquad (6.19)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.37 φαίνεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ και την πρόσθετη τάση σ_d.

Στο σχήμα 6.38 συγκρίνονται οι τιμές του μέτρου επανάκτησης από την σχέση (6.19) με τις αντίστοιχες εργαστηριακές μετρήσεις του πρώτου δείγματος. Το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=9,57%.



Σχήμα 6.37 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



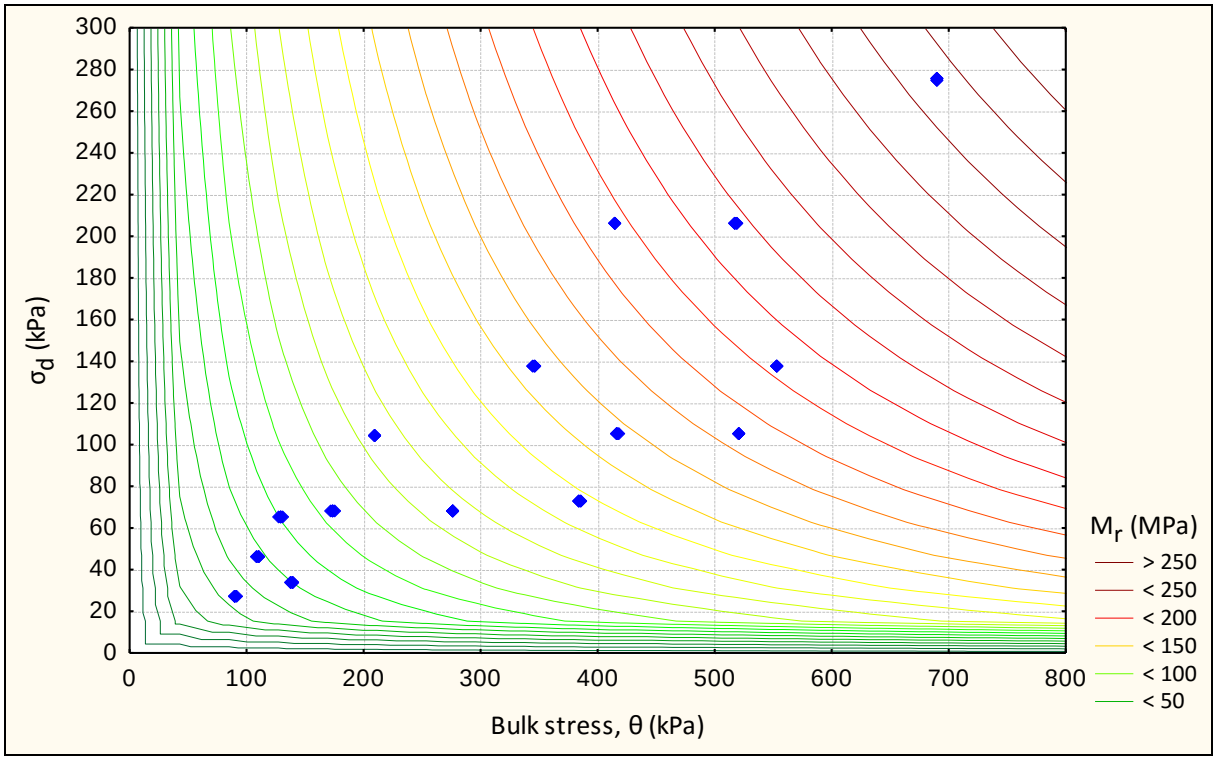
Σχήμα 6.38 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Uzan

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Uzan υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.20):

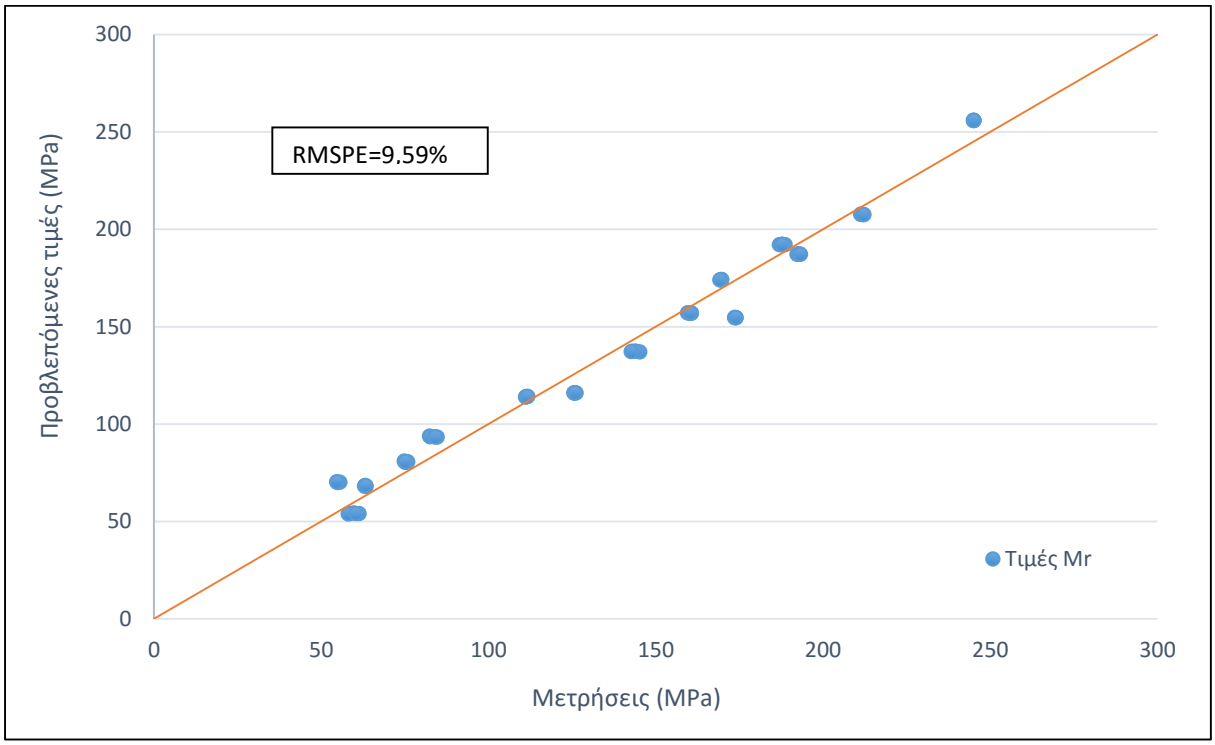
$$M_r = 2830{,}140 \times \theta^{0{,}461} \times \sigma_d^{0{,}266} \qquad (6.20)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,98, ο μεγαλύτερος που καταγράφηκε κατά την στατιστική επεξεργασία. Στο σχήμα 6.39 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την ολική και την πρόσθετη αξονική τάση.

Στο σχήμα 6.40 συγκρίνονται οι τιμές της σχέσης 6.20 με τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές για το δεύτερο δείγμα. Το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=9,59%.



Σχήμα 6.39 Δείγμα 2 Γραφική παράσταση M_r με την ολική τάση θ και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



Σχήμα 6.40 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Uzan

Στον πίνακα 6.10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου Uzan για το μίγμα Γ. Η πολύ καλή προσαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα δείχνει ότι αποτελεί εξαιρετική εναλλακτική για την περιγραφή της ελαστικής απόκρισης μίγματος ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού.

Πίνακας 6.10 Μοντέλο Uzan, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	3630,472	2830,140
K_2	0,344	0,461
K_3	0,350	0,266
R^2	0,97	0,98
RMSPE (%)	9,57	9,59

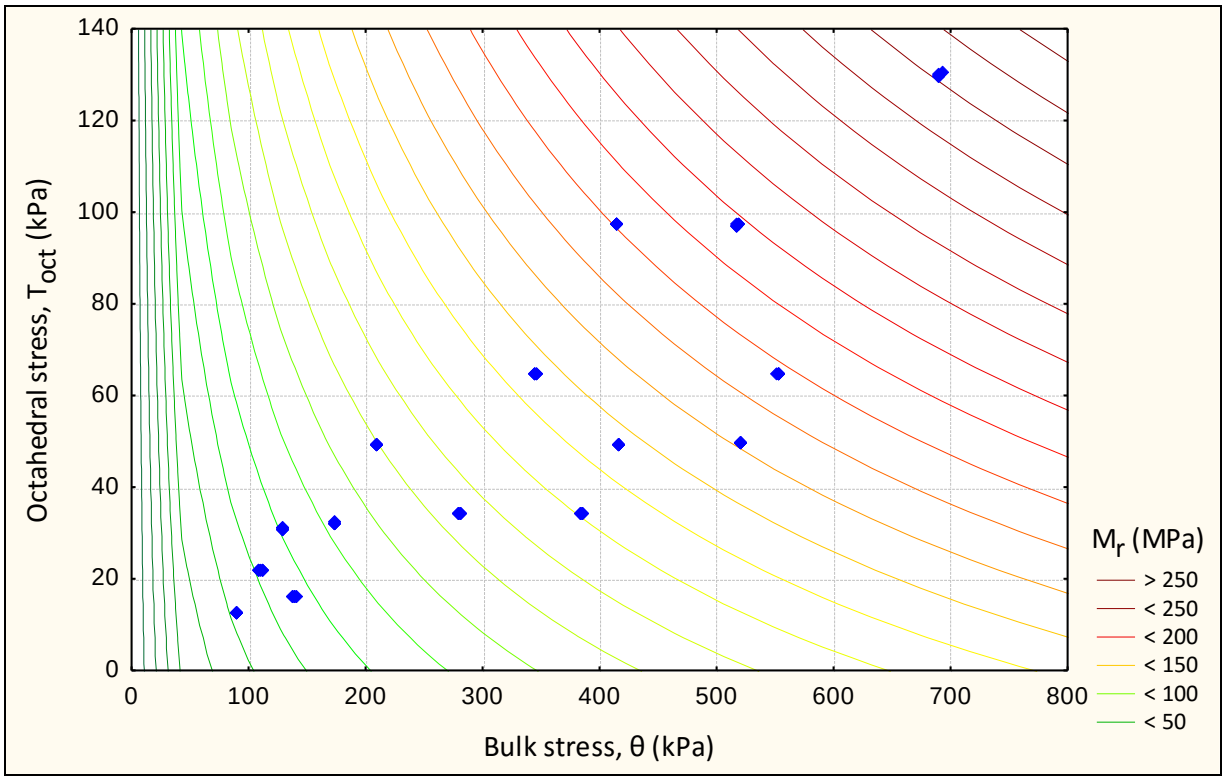
Μοντέλο MEPDG (σχέση 3.16)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.21):

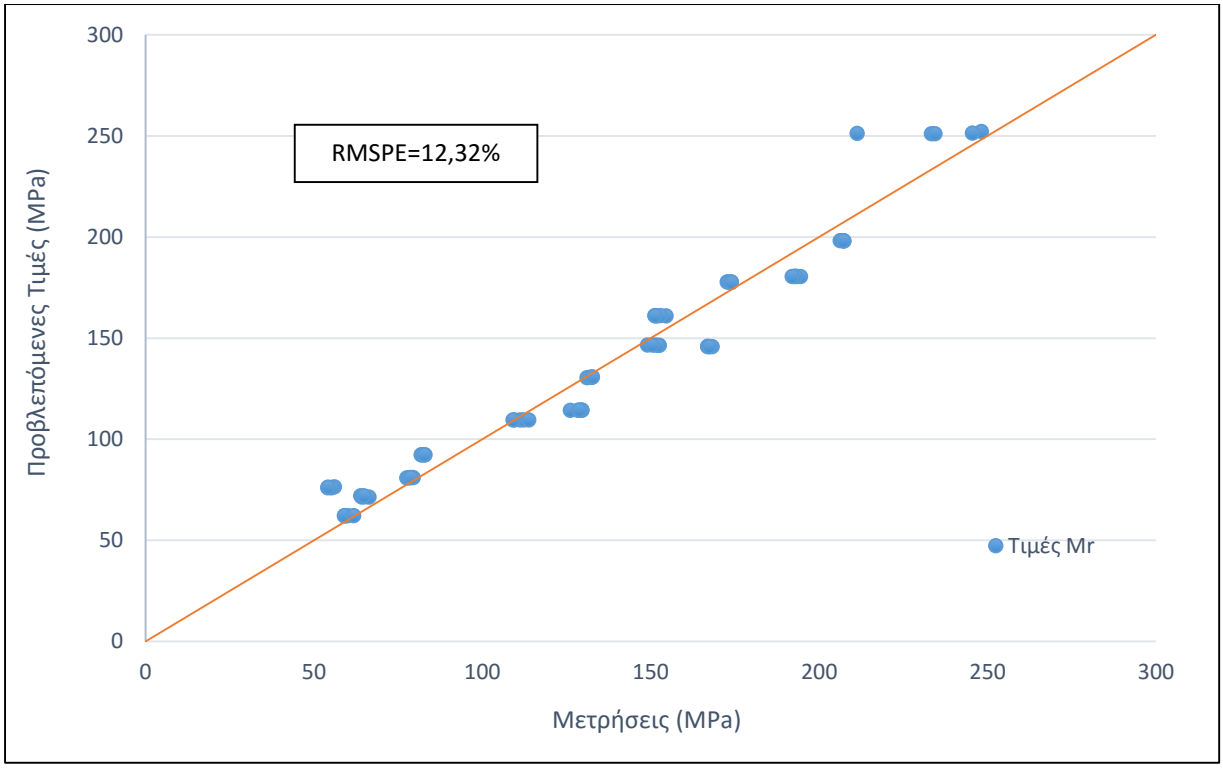
$$M_r = 593{,}424\, P_a \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{0{,}420} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0{,}759} \qquad (6.21)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή, καθώς προέκυψε υψηλός συντελεστής R^2=0,95. Στο σχήμα 6.41 βρίσκεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την ολική τάση θ και την οκτάεδρη τάση τ_{oct}.

Στο σχήμα 6.42 γίνεται σύγκριση των εργαστηριακών τιμών για το πρώτο δείγμα με τις αντίστοιχες τιμές της σχέσης (6.21). Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=12,32%.



Σχήμα 6.41 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



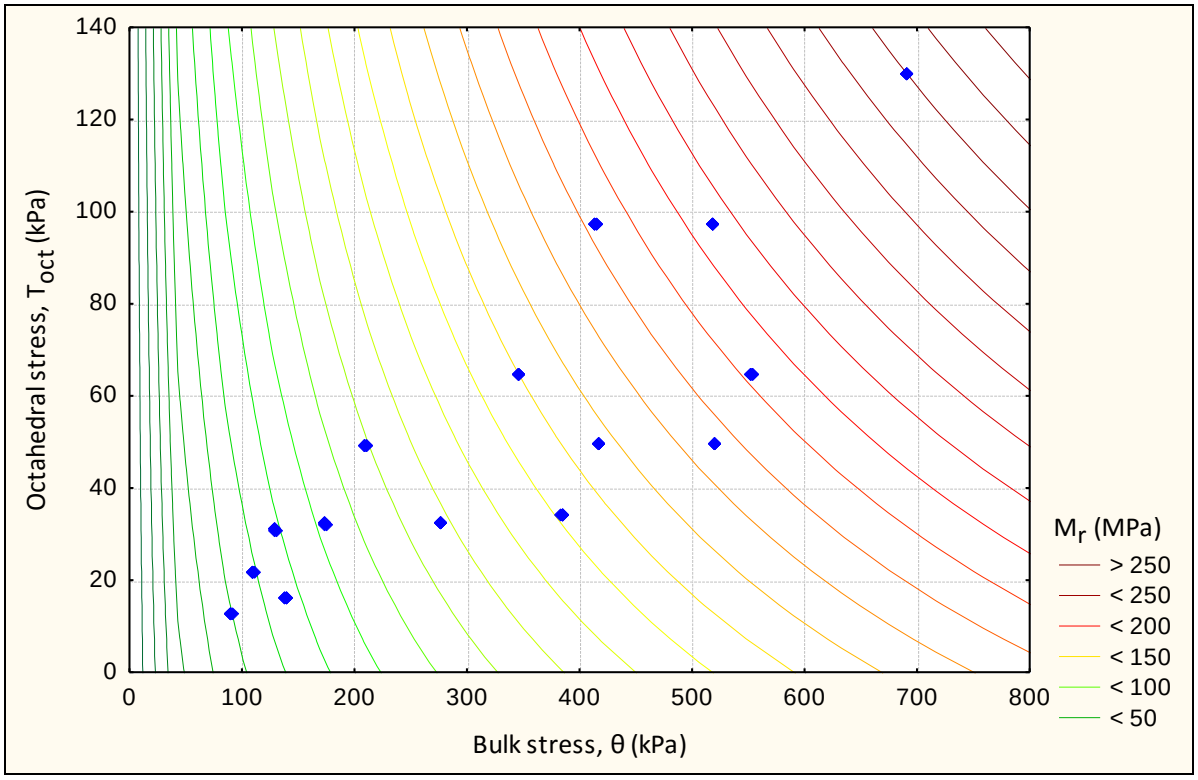
Σχήμα 6.42 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο MEPDG υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.22):

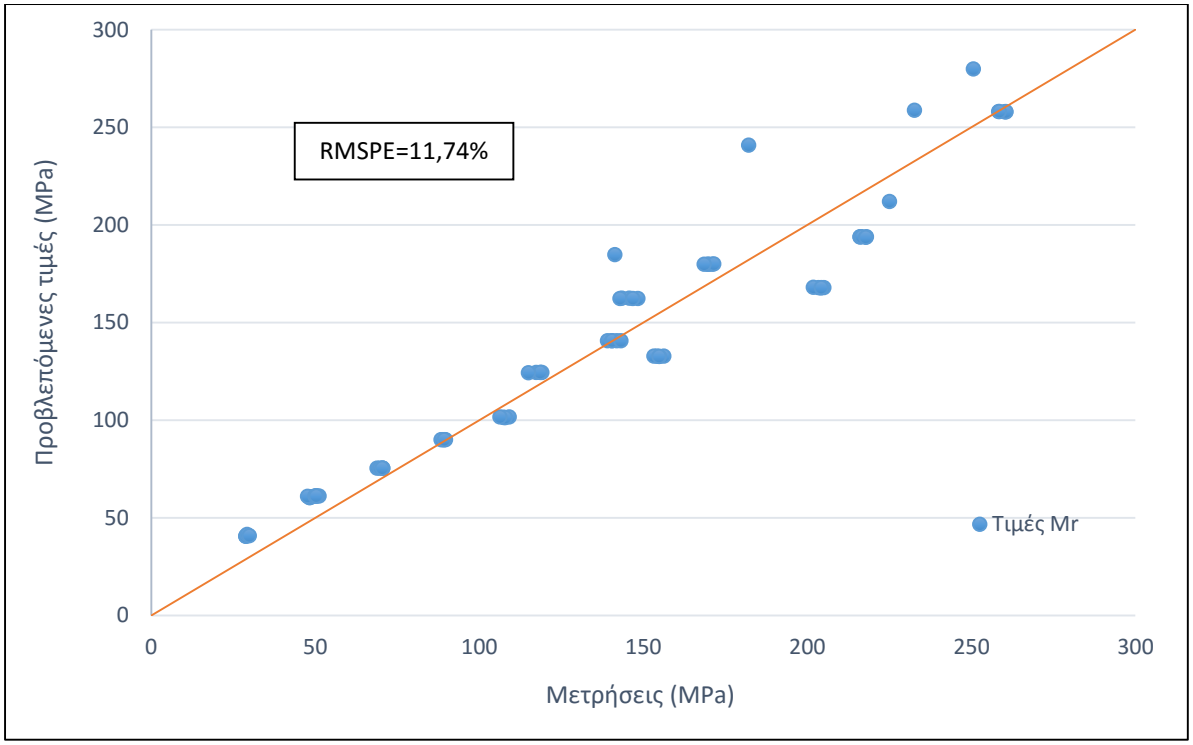
$$M_r = 592{,}041\ P_a \left(\frac{\Theta}{P_a}\right)^{0{,}531} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{0{,}536} \qquad (6.22)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.43 απεικονίζεται γραφικά η σχέση του μέτρου επανάκτησης με την ολική και την οκτάεδρη τάση.

Στο σχήμα 6.44 γίνεται σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών της σχέσης (6.22) με τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές του δεύτερου δείγματος. Το μοντέλο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=11,74%.



Σχήμα 6.43 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση M_r με την οκτάεδρη τάση τ_{oct} και την ολική τάση θ



Σχήμα 6.44 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου MEPDG

Στον πίνακα 6.11 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης με βάση το μοντέλο MEPDG για το μίγμα Γ. Οι ικανοποιητικοί δείκτες R^2 και RMSPE(%) δείχνουν ότι το μοντέλο M-EPDG μπορεί να περιγράψει επαρκώς την συμπεριφορά του μίγματος Γ.

Πίνακας 6.11 Μοντέλο MEPDG, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	593,424	592,041
K_2	0,419	0,523
K_3	0,759	0,563
R^2	0,95	0,97
RMSPE (%)	12,32	11,74

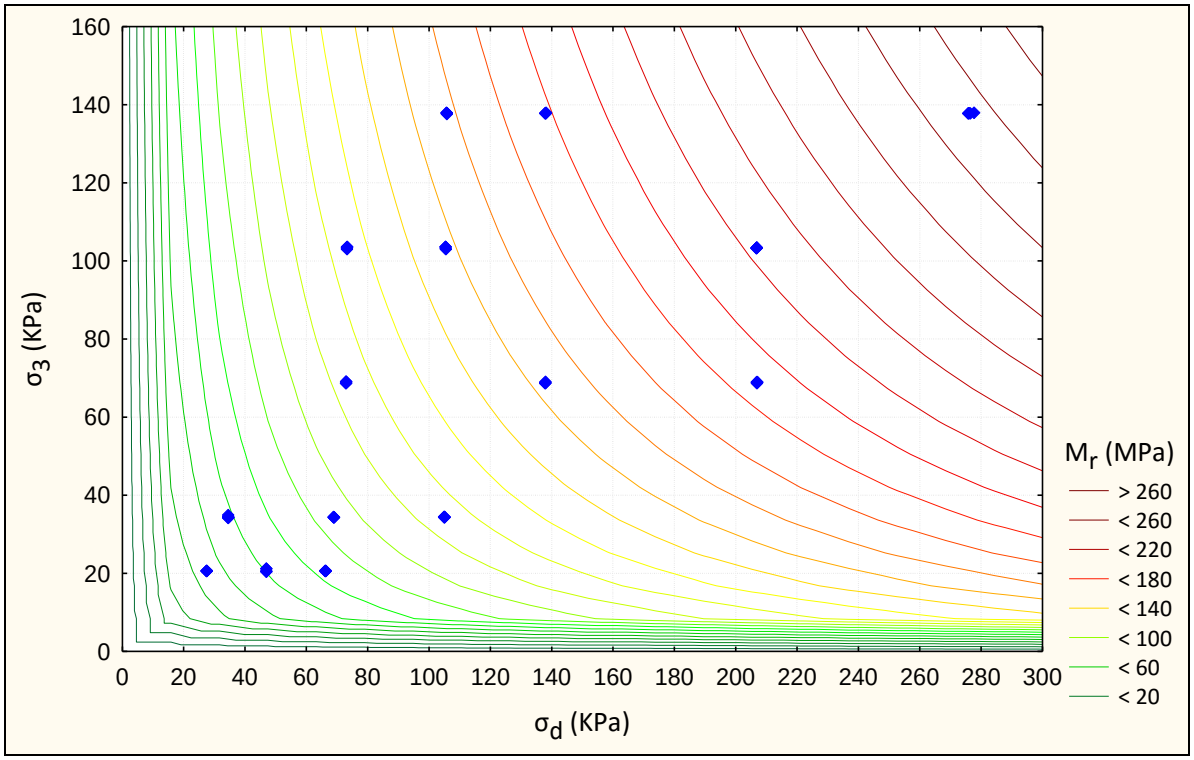
Μοντέλο Pezo (σχέση 3.19)

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Pezo υπολογίσθηκαν για το πρώτο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.23):

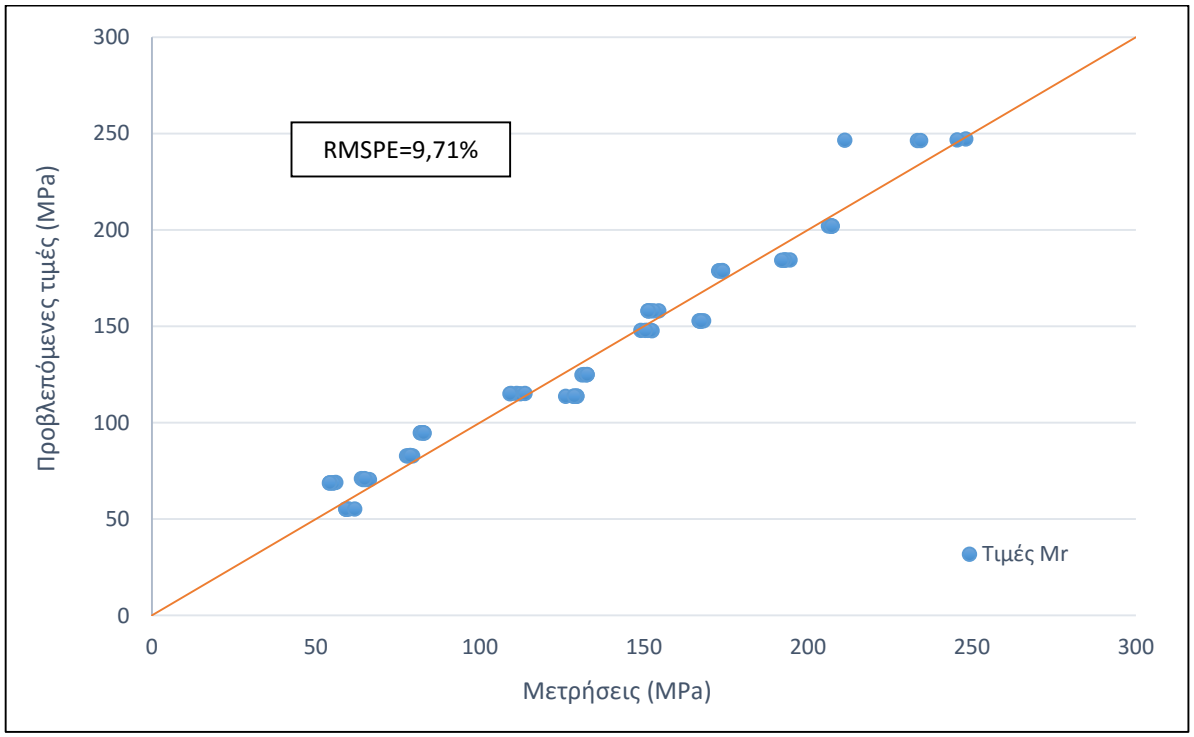
$$M_r = 5988,697 \times \sigma_d^{0,463} \times \sigma_3^{0,226} \qquad (6.23)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.45 βρίσκεται η γραφική παράσταση του μέτρου επανάκτησης με την οριζόντια και την πρόσθετη αξονική τάση.

Στο σχήμα 6.46 γίνεται η σύγκριση των τιμών της σχέσης 6.23 με τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές για το πρώτο δείγμα Το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=9,71%.



Σχήμα 6.45 Δείγμα 1: Γραφική παράσταση του M_r με την οριζόντια σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



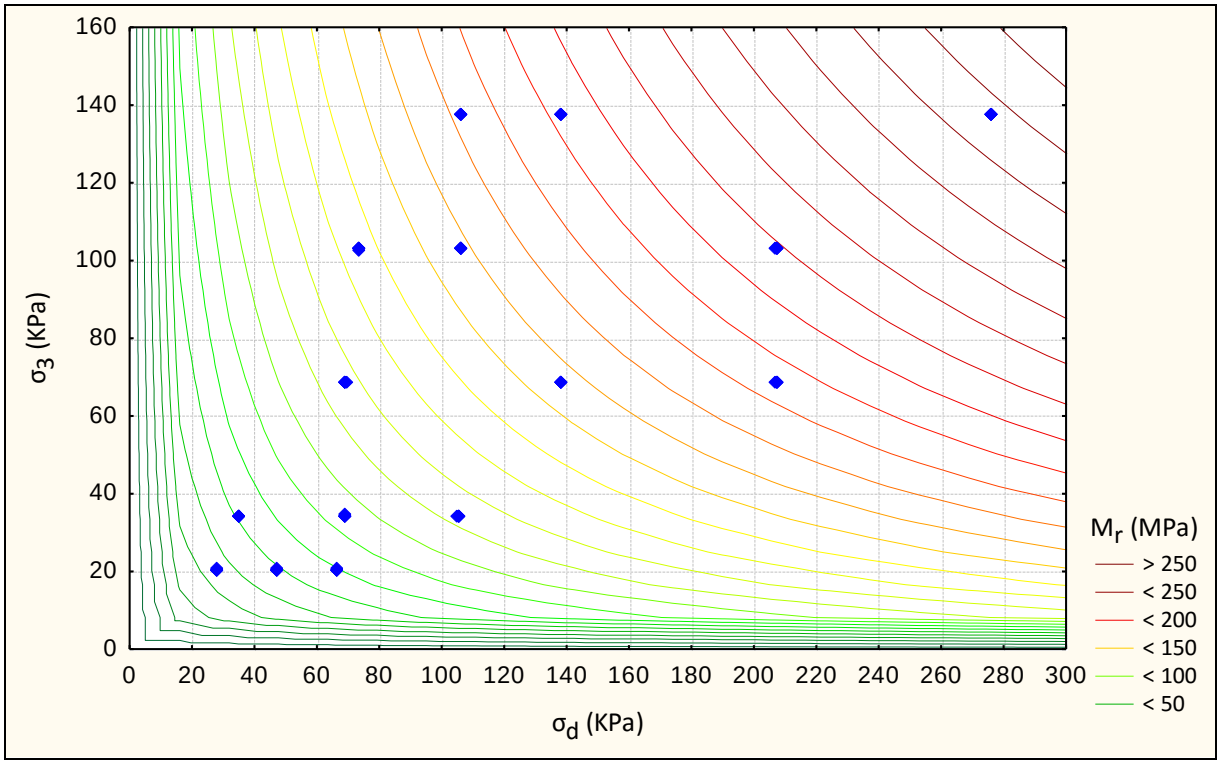
Σχήμα 6.46 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Οι σταθερές παλινδρόμησης K_1, K_2, K_3 για το μοντέλο Pezo υπολογίσθηκαν για το δεύτερο δείγμα και προέκυψε η σχέση (6.24):

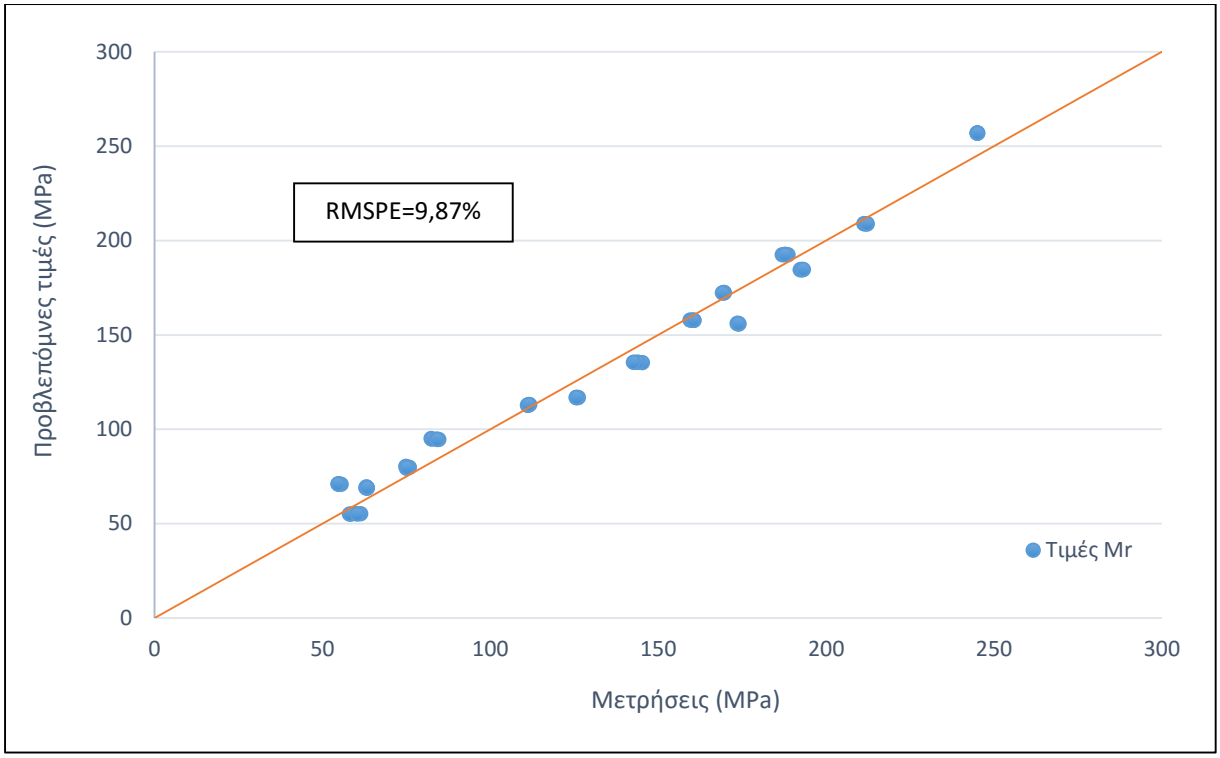
$$M_r = 5548{,}337 \times \sigma_d^{0{,}417} \times \sigma_3^{0{,}303} \qquad (6.24)$$

Η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής R^2=0,97. Στο σχήμα 6.47 παριστάνεται γραφικά το μέτρο επανάκτησης με την οριζόντια και την πρόσθετη αξονική τάση.

Στο σχήμα 6.48 συγκρίνονται οι τιμές της σχέσης 6.24 με τις αντίστοιχες εργαστηριακές μετρήσεις του δεύτερου δείγματος. Το μοντέλο παρουσιάζει χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης με συντελεστή RSMPE=9,87%.



Σχήμα 6.47 Δείγμα 2: Γραφική παράσταση του M_r με την οριζόντια σ_3 και την πρόσθετη αξονική τάση σ_d



Σχήμα 6.48 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές μοντέλου Pezo

Στον πίνακα 6.12 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης με βάση το μοντέλο Pezo για το μίγμα Γ. Οι πολύ καλές τιμές των συντελεστών προσαρμογής δείχνουν ότι και το μοντέλο Pezo περιγράφει εξαιρετικά το μίγμα ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού.

Πίνακας 6.12 Μοντέλο Pezo, αποτελέσματα παλινδρόμησης

	Δείγμα 1	Δείγμα 2
K_1	5988,697	5548,337
K_2	0,463	0,417
K_3	0,226	0,303
R^2	0,97	0,98
RMSPE (%)	9,71	9,87

6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για την περαιτέρω αξιολόγηση των σχέσεων που προέκυψαν διεξήχθη σύντομη βιβλιογραφική έρευνα. Αναζητήθηκαν παρόμοιες μελέτες για το μέτρο επανάκτησης που χρησιμοποιούν τα παραπάνω καταστατικά μοντέλα. Στους πίνακες 6.13, 6.14, 6.15 και 6.16 παρουσιάζονται τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν, σε παρόμοιες έρευνες, για τα μοντέλα K-θ, MEPDG, Uzan και Pezo αντίστοιχα:

Πίνακας 6.13 Τιμές σταθερών παλινδρόμησης μοντέλου K-θ

K-θ			
Πηγή	Μίγμα	K1	K2
(University of Hawai, 2010)	RAP (OMC 5, 8%)	8574	0,62
	RAP/VA	4422	0,78
(Politecnico di Torino, 2010)	RAP sample 1 (20°C)	717	0,47
	RAP sample 2 (20°C)	664	0,48
	RAP sample 3 (20°C)	766	0,5
(Minnesota DOT, 2012)	RAP MN	23000	0,39
	RAP CO	25600	0,37
	RAP CA	12300	0,49
	RAP TX	21600	0,42
	RAP OH	15600	0,48
	RAP NJ	23500	0,41
	RAP WI	29500	0,41
(University of Wisconsin, 2013)	RAP CO	17138	0,42
	RAP NJ	14475	0,47
	RAP TX	17138	0,47
(Alaska DOT, 2010)	RAP/VA 50/50	4272	0,701
	RAP/VA 50/50	7010	0,619
	RAP/VA 50/50	7723	0,614

Πίνακας 6.14 Τιμές σταθερών παλινδρόμησης μοντέλου MEPDG

M-EPDG				
Πηγή	Μίγμα	K1	K2	K3
(University of Hawai, 2010)	RAP (OMC 5, 8%)	1410	0,53	0,99
	RAP/VA	1200	0,81	-0,11
(Alaska DOT, 2010)	RAP/VA 50/50 sample 1	1240	0,688	-0,227
	RAP/VA 50/50 sample 2	1241	0,712	-0,316
	RAP/VA 50/50 sample 3	1322	0,687	-0,251
(Qiai Dong, 2014)	RAP (25°C)	1450	0,980	-0,093

Πίνακας 6.15 Τιμές σταθερών παλινδρόμησης μοντέλου Uzan

Uzan				
Πηγή	Μίγμα	K1	K2	K3
(Politecnico di Torino, 2010)	RAP sample 1 (20°C)	649	0,5	-0,06
	RAP sample 2 (20°C)	620	0,57	-0,08
	RAP sample 3 (20°C)	728	0,54	-0,04
(Alaska DOT, 2010)	RAP/VA 50/50 sample 1	6424	0,706	-0,089
	RAP/VA 50/50 sample 2	6271,923	0,733	-0,119
	RAP/VA 50/50 sample 3	7014,632	0,711	-0,103
(University of Tennessee, 2006)	RAP	4379	0,945	0.055

Πίνακας 6.16 Τιμές σταθερών παλινδρόμησης μοντέλου Pezo

Pezo				
Πηγή	Μίγμα	K1	K2	K3
(Alaska DOT, 2010)	RAP-D1 50/50 sample 1	18137	0,14	0,48
	RAP-D1 50/50 sample 2	18405	0,11	0,49
	RAP-D1 50/50 sample 3	19938	0,12	0,48

Συγκρίνοντας τις τιμές των σταθερών που υπολογίστηκαν στο παρών κεφάλαιο με αντίστοιχες τιμές από την διεθνή βιβλιογραφία, παρατηρούμε τα παρακάτω:

- Από έρευνες σε μίγματα RAP με το μοντέλο K-θ προκύπτει μεγάλο εύρος τιμών της σταθεράς K_1 664-29500, με την σταθερά K_2 να κυμαίνεται από 0, 40 έως 0, 80. Οι τιμές που προέκυψαν στην παρούσα εργασία για την σταθερά K_1 (1710, 958 και 3749, 177) βρίσκονται μέσα σε αυτά τα όρια, όπως και οι τιμές για την σταθερά K_2 (0,782 και 0,727). Οι αντίστοιχες τιμές για μίγματα RAP-αδρανών υλικών είναι K_1 4000-7700 και K_2 0, 6-0, 8. Οι τιμές που προέκυψαν σε αυτή την εργασία δεν συμφωνούν απόλυτα (K_1: 2921,220 και 2340,160 / K_2: 0,664 και 0,708).
- Για το μοντέλο MEPDG, για τα μίγματα RAP, από την διεθνή βιβλιογραφία, προκύπτουν τιμές K_1 1410-1450 / K_2 0, 50-1, 0 / K_3 -0,310-0, 99. Στην παρούσα εργασία προέκυψαν χαμηλότερες τιμές για το K_1 (~430). Οι τιμές για τις σταθερές K_2 και K_3 βρίσκονται μέσα στα όρια που παρατηρούνται διεθνώς. 'Οσον αφορά τα μίγματα RAP/αδρανές υλικό παρατηρούνται τιμές K_1 1200-1300 / K_2 0,680-0,810 / K_3 -0,11- -0,31. Οι αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται στην παρούσα εργασία δεν συμπίπτουν με αυτές της διεθνής βιβλιογραφίας (μικρότερες σταθερές K_1 και K_2, μεγαλύτερες K_3)
- Για το μοντέλο Uzan, για τα μίγματα RAP, από την διεθνή βιβλιογραφία, προκύπτουν τιμές K_1 620-720 / K_2 0, 0-0,60 / K_3 -0,04 - -0,08. Οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν στην παρούσα εργασία δεν διαφέρουν σημαντικά με αυτές της διεθνής βιβλιογραφίας.

Για μίγματα RAP/αδρανές υλικό, στην διεθνή βιβλιογραφία, παρατηρούνται τιμές K_1 6270-7000 / K_2 ~0,7 / K_3 ~-0,10. Παρά την πολύ καλή προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου, οι αντίστοιχες τιμές των σταθερών δεν είναι παρόμοιες (μικρότερες K_1, K_2, θετικές K_3)

- Οι τιμές των σταθερών παλινδρόμησης για το μοντέλο Pezo που προέκυψαν δεν συμφωνούν με τις τιμές από την διεθνή βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά ο αριθμός των ερευνών βασιζόμενων σε αυτό το μοντέλο είναι περιορισμένος.

7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

7.1 Μίγμα Α

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σχέσεις που προέκυψαν για τα δύο δείγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (RAP) και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσαρμογής. Τα καταστατικά μοντέλα είναι ταξινομημένα σε αύξουσα σειρά του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος πρόβλεψης RMSPE (%).

Πίνακας 7.1 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Α, δείγμα 1

Δείγμα 1 – 100% RAP			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
Uzan	$M_r = 1710{,}958 \times \theta^{0{,}535} \times \sigma_d^{0{,}259}$	0,96	13,22
Pezo	$M_r = 3749{,}177 \times \sigma_d^{0{,}453} \times \sigma_3^{0{,}353}$	0,96	13,48
K-θ	$M_r = 1371{,}090 \times \theta^{0{,}782}$	0,92	13,75
MEPDG	$M_r = 492{,}580 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0{,}601} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{0{,}533}$	0,95	13,79

Πίνακας 7.2 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Α, δείγμα 2

Δείγμα 2 – 100% RAP			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
K-θ	$M_r = 2039{,}01 \times \theta^{0{,}727}$	0,93	10,62
MEPDG	$M_r = 569{,}265 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0{,}649} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{0{,}250}$	0,93	10,73
Uzan	$M_r = 2180{,}352 \times \theta^{0{,}610} \times \sigma_d^{0{,}130}$	0,94	11,10
Pezo	$M_r = 5353{,}027 \times \sigma_d^{0{,}329} \times \sigma_3^{0{,}401}$	0,93	11,28

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα τέσσερα μοντέλα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα εργαστηριακά δεδομένα στην περίπτωση μίγματος από αμιγές ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό. Παρατηρείται για όλα τα μοντέλα ικανοποιητικός συντελεστής R^2 (>0,90) και σχετικά χαμηλός συντελεστής RMSPE(%). Για το πρώτο δείγμα η μέση τιμή του συντελεστή RMSPE(%) είναι 13,56% με μικρή τυπική απόκλιση 0,22% και για το δεύτερο η μέση τιμή είναι 10,93% με τυπική απόκλιση 0,24%. Οι μικρές αποκλίσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μέτρο επανάκτησης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού μπορεί να περιγραφεί από

οποιοδήποτε από τα τέσσερα μοντέλα, τα οποία αποδίδουν αξιόπιστα αποτελέσματα πρόβλεψης.

7.2 Μίγμα Β

Στους πίνακες 7.3 και 7.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σχέσεις που προέκυψαν για τα δύο δείγματα αδρανούς υλικού 3Α και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσαρμογής. Τα καταστατικά μοντέλα είναι ταξινομημένα σε αύξουσα σειρά του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος πρόβλεψης RMSPE(%).

Πίνακας 7.3 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Β, δείγμα 1

Δείγμα 1– 100% 3Α			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
Pezo	$M_r = 2145{,}828 \times \sigma_d^{\,0{,}549} \times \sigma_3^{\,0{,}349}$	0,95	11,71
Uzan	$M_r = 990{,}895 \times \theta^{\,0{,}563} \times \sigma_d^{\,0{,}334}$	0,94	12,45
K-θ	$M_r = 624{,}017 \times \theta^{\,0{,}914}$	0,87	16,22
MEPDG	$M_r = 430{,}080 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0{,}644} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{0{,}658}$	0,93	16,40

Πίνακας 7.4 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Β, δείγμα 2

Δείγμα 2– 100% 3Α			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
Pezo	$M_r = 2180{,}757 \times \sigma_d^{\,0{,}636} \times \sigma_3^{\,0{,}260}$	0,96	11,99
Uzan	$M_r = 1246{,}609 \times \theta^{\,0{,}394} \times \sigma_d^{\,0{,}505}$	0,96	12,08
MEPDG	$M_r = 423{,}991 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0{,}473} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{1{,}269}$	0,95	15,34
K-θ	$M_r = 1606{,}220 \times \theta^{\,0{,}757}$	0,96	20,49

Στην περίπτωση του αδρανούς υλικού τα τέσσερα μοντέλα προσαρμόζονται σε διαφορετικό βαθμό στα εργαστηριακά δεδομένα. Ο συντελεστής R^2 κυμαίνεται σε αποδεκτά και υψηλά επίπεδα άνω του 0,95 σχεδόν για όλα τα μοντέλα, εκτός από την περίπτωση του μοντέλου K-θ στο δείγμα 1, όπου ο συντελεστής R^2 είναι σημαντικά χαμηλότερος (<0,90). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον σχετικά αυξημένο συντελεστή RMSPE (>15%) που εμφανίζεται και στα δύο δείγματα, οδηγεί στην απόρριψη του μοντέλου K-θ για την πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης. Αντίθετα, τα μοντέλα Pezo και Uzan παρουσιάζουν χαμηλότερα σφάλματα

πρόβλεψης (~12%) και κρίνονται καταλληλότερα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μέτρου επανάκτησης στην περίπτωση αμιγώς αδρανούς υλικού.

7.3 Μίγμα Γ

Στους πίνακες 7.5 και 7.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι σχέσεις που προέκυψαν για δύο δείγματα μίγματος ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού. Τα καταστατικά μοντέλα είναι ταξινομημένα σε αύξουσα σειρά του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος πρόβλεψης RMSPE(%).

Πίνακας 7.5 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Γ, δείγμα 1

Δείγμα 1 – 50% RAP/50% 3A			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
Uzan	$M_r = 3630,472 \times \theta^{0,344} \times \sigma_d^{0,350}$	0,96	9,57
Pezo	$M_r = 5988,697 \times \sigma_d^{0,463} \times \sigma_3^{0,226}$	0,96	9,71
MEPDG	$M_r = 593,424 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0,420} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{0,759}$	0,95	12,32
K-θ	$M_r = 2921,220 \times \theta^{0,664}$	0,88	15,16

Πίνακας 7.6 Καταστατικά μοντέλα Μίγμα Γ, δείγμα 2

Δείγμα 2 – 50% RAP/50% 3A			
Μοντέλο		R^2	RMSPE (%)
Uzan	$M_r = 2830,140 \times \theta^{0,461} \times \sigma_d^{0,266}$	0,97	9,59
Pezo	$M_r = 5548,337 \times \sigma_d^{0,417} \times \sigma_3^{0,303}$	0,97	9,87
MEPDG	$M_r = 592,041 \times P_a \times (\theta / P_a)^{0,523} \times (T_{oct} / P_a + 1)^{0,563}$	0,96	11,74
K-θ	$M_r = 2340,160 \times \theta^{0,708}$	0,93	13,32

Παρατηρείται ότι οι τάσεις που καταγράφονται για τα επιμέρους υλικά μεταφέρονται σε ένα βαθμό και στα μίγματά τους:

- Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν ικανοποιητική προσαρμογή με υψηλούς συντελεστές R^2 και χαμηλά ποσοστά RMSPE(%), όπως διαπιστώσαμε και για το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό παραπάνω. Εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο K-θ που συγκριτικά με τα

υπόλοιπα μοντέλα εμφανίζει χαμηλότερο συντελεστή R^2 και για τα δύο δείγματα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον υψηλότερο συντελεστή RMSPE που παρουσιάζεται στην περίπτωση αυτή, μας οδηγεί να το απορρίψουμε για την περιγραφή της συμπεριφοράς ενός μίγματος ανακτώμενου ασφαλτικού και αδρανούς υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό βάσης/υπόβασης οδοστρωμάτων.

- Τα επιθυμητά επίπεδα προσαρμογής των μοντέλων Uzan και Pezo που προέκυψαν για τα δείγματα αδρανούς υλικού εμφανίζονται και στην περίπτωση του μίγματος των δύο υλικών. Τα δύο μοντέλα εμφανίζουν τους υψηλότερους συντελεστές R^2 (>0,97) που προέκυψαν από όλες τις παλινδρομήσεις, καθώς επίσης και τους χαμηλότερους συντελεστές RMSPE (<10%), με το μοντέλο Uzan να υπερτερεί ελάχιστα. Τα δύο μοντέλα συσχετίζουν το μέτρο επανάκτησης με την οριζόντια τάση σ_3 και την πρόσθετη κάθετη τάση σ_d με μεγάλη επιτυχία (άλλωστε $\theta=3\sigma_3+\sigma_d$). Οι δύο αυτές τάσεις είναι καθοριστικοί παράγοντες επιρροής του μέτρου επανάκτησης.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η συμπεριφορά του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού ως βιώσιμο υλικό ασύνδετων βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με κύριο γνώμονα το μέτρο επανάκτησης του ασύνδετου πλέον ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού ως μέσο έκφρασης της ελαστικής απόκρισής του. Το μέτρο επανάκτησης αποτελεί μια παράμετρο κλειδί στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων, αφού γνωρίζοντας την τιμή του γίνεται αντιληπτή η συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών υπό τις κυκλοφοριακές συνθήκες φόρτισης.

Για τη διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα από δοκιμή τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η δοκιμή εφαρμόστηκε σε δείγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, που προέρχεται από υφιστάμενο ελληνικό αυτοκινητόδρομο, με τις εξής αναλογίες: 100% ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό (μίγμα Α), 100% αδρανές υλικό 3Α (μίγμα Β) και 50% ανακτώμενο ασφαλτικό υλικο/50% αδρανές υλικό 3Α (μίγμα Γ).

Στην συνέχεια αναζητήθηκαν καταστατικά μοντέλα από την διεθνή βιβλιογραφία και επιλέχθηκαν τέσσερα εξ αυτών: τα K-θ, Uzan, MEPDG και Pezo. Το μοντέλο K-θ επιλέχθηκε γιατί, παρά την απλότητά του, προσαρμόζεται ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο Uzan και η τροποποιημένη εκδοχή του, το μοντέλο του αμερικανικού οδηγού σχεδιασμού οδοστρωμάτων MEPDG, επιλέχθηκαν γιατί λαμβάνουν υπόψη την διατμητική παραμόρφωση των υλικών. Μάλιστα, το μοντελο MEPDG – γνωστο και ως universal model – ενδείκνυται για μοντελοποιήση τόσο συνεκτικών όσο και ασύνδετων υλικών. Το μοντέλο Pezo επιλέχθηκε, γιατί με τις διακριτές μεταβλητές που χρησιμοποιεί για την πλευρική και την κατακόρυφη τάση, σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία επιτυγχάνει εξαιρετική προσαρμογή.

Η προσαρμογή των μοντέλων στα πειραματικά δεδομένα ελέγθηκε μέσω των στατιστικών συντελεστών R^2 και RMSPE(%). Ακολούθησε συγκριτική αξιολόγηση μέσω των υπόψη συντελεστών για να διαπιστωθεί το καταλληλότερο μοντέλο για την πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, του αδρανούς υλικού 3Α και του υλικού που προκύπτει από την πρόσμιξη αυτών των δύο.

Αξιολογώντας τις τιμές του συντελεστή προσαρμογής R^2 (>0,90) είναι φανερό ότι και τα τέσσερα καταστατικά μοντέλα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στις εργαστηριακές μετρήσεις από τα δύο δείγματα 100% ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού (Μίγμα Α). Ενώ κάθε καταστατικό μοντέλο χρησιμοποιεί διαφορετικές μεταβλητές για να εκφράσει το μέτρο επανάκτησης, οι προβλεπόμενες τιμές παρουσιάζουν παρόμοιες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες εργαστηριακές μετρήσεις. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο συντελεστής RMSPE(%) λαμβάνει σχετικά χαμηλές τιμές και στις τέσσερεις περιπτώσεις και μάλιστα με μικρή διαφοροποίηση: προέκυψε για το πρώτο δείγμα RMSPE~13,5% και το για δεύτερο RMSPE~11%.

Για τα δείγματα αδρανούς υλικού 3Α (Μίγμα Β), τα τέσσερα καταστατικά μοντέλα προσαρμόζονται ικανοποιητικά στα εργαστηριακά δεδομένα, αλλά σε αυτή την περίπτωση δύο από αυτά εμφανίζουν σαφώς μικρότερες αποκλίσεις. Τα καταστατικά μοντέλα Uzan και Pezo προσαρμόζονται εξαιρετικά στα εργαστηριακά δεδομένα με πολύ υψηλό συντελεστή προσαρμογής R^2>0,95, ενώ και ο συντελεστής RMSPE είναι σε χαμηλά επίπεδα περίπου 12%. Αντίθετα, τα μοντέλα K-θ και MEPDG δείχνουν λιγότερο κατάλληλα, αφού προκύπτουν υψηλότερα σφάλματα πρόβλεψης 16-20%. Η καλή προσαρμογή των καταστατικών μοντέλων Uzan και Pezo αποδίδεται στο γεγονός ότι λαμβάνουν υπόψη τους τη διατμητική αντοχή, μέσω των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούν για την πλευρική και την πρόσθετη αξονική τάση.

Στην περίπτωση του μίγματος Γ, όπου έχει αναμιχθεί ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό και αδρανές υλικό 3Α, μεταφέρονται τα χαρακτηριστικά που διαπιστώθηκαν και στα δύο επιμέρους υλικά. Όπως στην περίπτωση αμιγώς ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού, τα τέσσερα μοντέλα παρουσιάζουν καλή προσαρμογή με υψηλούς συντελεστές R^2 (>0,90), αλλά και μικρή μέση απόκλιση από τις εργαστηριακές τιμές, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του συντελεστή RMSPE(%). Επίσης, εμφανίζεται και η τάση που διαπιστώθηκε στα δείγματα του αμιγώς αδρανούς υλικού 3Α: τα μοντέλα Uzan και Pezo κρίνονται ως καταλληλότερα για την περιγραφή και πρόβλεψη του μέτρου επανάκτησης με γενικά υψηλότερους δείκτες προσαρμογής R^2 (>0,96) και χαρακτηριστικά μικρότερα μέσα ποσοστιαία σφάλματα πρόβλεψης RMSPE (<10%).

Εκτός από την περίπτωση του μοντέλου K-θ, παρατηρείται ασυμφωνία στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας σε σχέση με την διεθνή βιβλιογραφία. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην

ανομοιομορφία που εμφανίζει το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό ανάλογα με την προέλευσή του, αφού οι ιδιότητές του επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τρόπος εξαγωγής/αποθήκευσης του, η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, ο βαθμός συμπύκνωσης κα. Επιπλέον, στα μίγματα ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού με αδρανή υλικά, η ποιότητα του αδρανούς υλικού προφανώς επηρεάζει το συνολικό μίγμα. Η ποικιλία αδρανών υλικών με διαφορετικές ιδιότητες που διαπιστώνεται στην διεθνή βιβλιογραφία οδηγεί σε μεγάλο εύρος αποτελεσμάτων με χαρακτηριστικές ασυμφωνίες ανάμεσα στις διάφορες έρευνες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστίασε στη διερεύνηση της ελαστικής συμπεριφοράς του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού. Αξίζει όμως να σημειωθεί, ότι τα ασύνδετα υλικά συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά όταν υποβάλλονται σε φόρτιση. Το μέτρο επανάκτησης εξ ορισμού υπολογίζεται με βάση την αναστρέψιμη (ελαστική) παραμόρφωση που παρουσιάζουν τα υλικά και αγνοεί την παραμένουσα παραμόρφωση που πραγματοποιείται. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη υπερκείμενων στρώσεων «ανακουφίζει» τη βάση: λόγω της μεγαλύτερης ακαμψίας των ανώτερων ασφαλτικών στρώσεων οι κατακόρυφες τάσεις από τα φορτία της κυκλοφορίας μεταφέρονται μειωμένες στη βάση και την υπόβαση του οδοστρώματος και κατά συνέπεια, η παραμένουσα παραμόρφωση είναι σημαντικά μειωμένη. Έτσι, η θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συνολικά, η περιγραφή της συμπεριφοράς του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού με τα παραπάνω καταστατικά μοντέλα κρίνεται επιτυχής. Τα μοντέλα K-θ, Uzan, MEPDG και Pezo, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διεθνείς έρευνες, προσαρμόζονται με υψηλούς συντελεστές R^2 και χαμηλά σφάλματα πρόβλεψης στα εργαστηριακά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, το ανακτώμενο ασφαλτικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, καθώς τα καταστατικά μοντέλα που περιγράφουν την συμπεριφορά του μπορούν να εισαχθούν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε αναλυτικές μεθόδους σχεδιασμού του οδοστρώματος.

Είναι εμφανές ότι για την αποτελεσματικότερη χρήση του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στα στρώματα βάσης χρειάζονται περισσότερες εργαστηριακές μελέτες με στόχο την διερεύνηση του μέτρου επανάκτησης. Είναι αναγκαία η διεύρυνση του στατιστικού δείγματος μέσω διαφοροποίησης χαρακτηριστικών, όπως η ποιότητα του αδρανούς υλικού του δείγματος, το ποσοστό ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού στο μίγμα, καθώς και το ποσοστό

περιεχόμενης υγρασίας. Τέλος, για τον περιορισμό των αποκλίσεων από τα εργαστηριακά δεδομένα, ώστε να περιγραφεί και να προβλεφθεί με ακρίβεια η τιμή του μέτρου επανάκτησης, έχει μεγάλη πρακτική σημασία η ανάπτυξη καταστατικών μοντέλων προσαρμοσμένα στις ιδιαιτερότητες του ανακτώμενου ασφαλτικού υλικού. Τα σύγχρονα καταστατικά μοντέλα, ενώ επιτυγχάνουν συχνά εξαιρετική προσαρμογή, έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση φυσικών ασύνδετων υλικών και δεν λαμβάνουν υπόψη χαρακτηριστικά, όπως η γήρανση του ασφαλτικού συνδετικού παράγοντα.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO (1993). *"Guide for Design of Pavement Structures"*, American Association of State Highway and Trasportation Officials.

AASHTO (2007). "*Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*", T 307-99, American Association of State Highway and Trasportation Officials.

Alaska DOT (2010). *"Characterization of Asphalt Treated Base Course Material", Final Report,* Alaska University, Transportation Center, Fairbanks

Alba, J. (1993). "*Laboratory Determination of Resilient Modulus of Granular Materials for Flexible Pavement Design"*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Techbnology, School of Civil and Environmental Engineering.

Boyce, J. (1980). *"A Nonlinear Model for the Elastic Behavior of Granular Materials Under Repeated Loading*", *International Symposium of Soils Under Cyclic and Transient Loading,* Swansea.

Brown, S. & Pappin, J. (1981). "*Analysis of Pavements with Granular Bases*", Trasportation Research Record 810, National Research Council, pp. 17-23.

Chen, D. (1995). "*Characterization of Base/Subbase Materials under Repetitive Loading*". Journal of Testing and Evaluation, *23*, pp. 180-188.

Dastich, I. & Dawson, A. (1995). "*Techniques for Assessing the Nonlinear Resilient Response of Unbound Granular-Layered Structures"*, ASTM, Geotechnical Testing Journal, Volume 18, Issue 1, pp. 50-77.

EAPA (2005). *"Industry statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements",* European Asphalt Pavement Association, Brussels, Committee on Health, Safety and Environment.

EAPA (2008). "*Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling",* Position Paper, European Asphalt Pavement Association.

Egnatia.eu (2015). Ανάκτηση από http://www.egnatia.eu/page/default.asp?la=1&Id=695.

Elliott, R., & Thompson, M. (1985). "*Mechanistic Design Concepts for Conventional Flexible Pavements*", University of Illinois, Civil Engineering Studies, Transportation Engineering Series *No. 42*.

Federal Highways Administration (2010). "*Recycled Materials in Roadway Construction: The Many Ways of Going Green"*. Ανάκτηση από http://www.fhwa.dot.gov/publications/focus/10apr/01.cfm

Feliberti, M. (1991). "*Critical Evaluation of Parameters Affecting Resilient Modulus Tests on Subgrades*", M.S. Thesis, University of Texas, Department of Civil Engineering.

George, K. (2004). *"Prediction of Resilient Modulus from Soil Index Properties",* University of Mississippi, Department of Civil Engineering.

Hicks, R. (1970). "*Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials*", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

Hicks, R., & Monismith, C. (1971). "*Factors Influencing the Resilient Properties of Granualr Materials*", Nation Research Counsil, Washington D.C., pp. 15-31.

Itani, S. (1990). "*Behavior of Base Materials Containing Large Sized Particles"*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering.

Jouve, P., Martinez, J., Paute, J., & Ragneau, E. (1987). "*Rational model for Flexible Pavement Deformations*", Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*,* Ann Arbor, MI.

Jové, M. J. (2004). "*Enhanced Recycling Techniques for Asphalt Pavements, as Studied in the Paramix Project*", International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona.

Minnesota DOT (2012). *"Recycled Unbound Materials",* University of Wisconsin, Madison, Department of Civil and Environmental Engineering,Geological Engineering Program.

NCHRP (2001). "*Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method: Guidelines",* National Research Counsil, Transport Research Board, Washington, DC.

NCHRP1-37A (2004). "*Guide for Mechanical-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*", National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council.

Pezo, R. (1993). "*A General Method of Reporting Resilient Modulus Tests of Soils - A Pavement Engineer's Point of View*", *Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting.*

Politecnico di Torino (2010). "*Triaxial Testin for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixture*", *Road Materials and Pavement Design*, pp 123-147. doi:10.3166/RMPD.11.123-147

Qiai Dong, B. H. (2014, February). "*Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material*", Journal of Materials in Civil Engineering, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000820

Rada, G., & Witczak, M. (1981). "*Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material",* Transportation Research Record No. 810.

Seed (2000). "*Evaluation of Laboratory Determind and Nondestructive Test Based Resilient Modulus Values from WesTrack Experiment",* Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, 3rd edition.

Shedivy, R. F. (2012). "*Leaching Characteristics of Recycled Asphalt Pavemrnt Used as Unbound Road Base*", University of Wisconsin, Madison.

Sweere, G., Penning, A., & Vos, E. (1987). "*Development of A Structural Design Procedure for Asphalt Pavements with Crushed Rubble Base Courses*", Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, MI.

The Asphalt Institute (1978). *"Soils Manual for the Design of the Asphalt Pavements Structures"*, 2nd edition.

Thom, N. (1988, May). "*Design of Road Foundations*", Ph.D. Thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering.

Thompson M.R., (1998). *"Granular Material and Soil Moduli, Review of Literature",* University of Illinois.

Thompson, M. R. (1979). "Resilient properties of Subgrade Soils", Transportation Engineering Journal, No 105.

TRB (1975). *"Test Procedures for Characterizing Dymanic Stress-Strain Properties of Pavement Materials",* Transportation Research Board.

University of Hawai (2010). *"Application of Recycled Materials in Highway Projects",* Honolulu.

University of Tennessee (2006). *"Laboratory Evaluation of Unbound RAP as a Pavement Base Material",* Wenbin He, University of Tennessee - Knoxville.

University of Wisconsin (2013). *"The Effects of Temperature on Resilient Modulus of Recycled Concrete Aggregate and Recycled Asphalt Pavement Used as Road Base",* Solid Waste Research Program, University of Wisconsin, Madison.

Uzan, J. (1985). "*Characterization of Granular Materials",* National Research Council, Transportation Research Record 1022, TRB, pp. 52-59.

West, R. (2010). *"Reclaimed Asphalt Pavement Management: Best Practices",* National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama.

Witczak, M., & Uzan, J. (1988). "*The Universal Airport Pavement Design System*", Report I of V: *"Granular Material Characterization"*, University of Maryland, Department of Civil Engineering, MD.

WSDOT M 41-10 (2014). *"Standard Specifications for Road, Bridge and Municipal Construction, M 41-10",* Washington State Department of Transport.

Yau, A. & Von Quintus, H. (2002). "*Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics*", Final Report, USDOT, FHWA.

Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ. (2014). *"Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα",* Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π1 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Α, Δείγμα 1

Μίγμα Α, Δείγμα 1, 4.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	22.40	20.60	84.20	10.56	0.000379	49.227
1	2	22.40	20.60	84.20	10.56	0.000378	49.091
1	3	22.40	20.80	84.80	10.56	0.000377	49.330
1	4	22.40	20.70	84.50	10.56	0.000377	49.399
1	5	22.40	20.70	84.50	10.56	0.000378	49.219
2	1	41.80	20.50	103.30	19.70	0.000778	47.909
2	2	41.90	20.80	104.30	19.75	0.000778	47.966
2	3	41.90	20.80	104.30	19.75	0.000779	47.838
2	4	41.90	20.60	103.70	19.75	0.000781	47.763
2	5	41.90	20.90	104.60	19.75	0.000779	47.948
3	1	62.10	20.90	124.80	29.27	0.001076	51.969
3	2	62.10	20.60	123.90	29.27	0.001072	52.132
3	3	62.10	20.90	124.80	29.27	0.001076	51.969
3	4	62.10	20.60	123.90	29.27	0.001074	52.059
3	5	62.10	20.50	123.60	29.27	0.001076	51.976
4	1	35.50	34.70	139.60	16.73	0.000632	49.028
4	2	35.50	34.40	138.70	16.73	0.000629	49.286
4	3	35.50	34.50	139.00	16.73	0.000629	49.303
4	4	35.50	34.50	139.00	16.73	0.000632	49.028
4	5	35.50	34.20	138.10	16.73	0.000632	49.069
5	1	68.90	34.40	172.10	32.48	0.000928	66.796
5	2	68.90	34.60	172.70	32.48	0.000931	66.636
5	3	69.00	34.40	172.20	32.53	0.000929	66.788
5	4	68.90	34.60	172.70	32.48	0.000930	66.800
5	5	68.90	34.30	171.80	32.48	0.000927	66.888
6	1	104.10	34.40	207.30	49.07	0.001027	90.502
6	2	104.10	34.70	208.20	49.07	0.001019	91.293
6	3	104.20	34.30	207.10	49.12	0.001024	90.811
6	4	104.10	34.60	207.90	49.07	0.001027	90.434
6	5	104.20	34.50	207.70	49.12	0.001021	90.925
7	1	68.90	68.80	275.30	32.48	0.000554	111.909
7	2	68.90	68.90	275.60	32.48	0.000553	112.300
7	3	69.00	68.90	275.70	32.53	0.000552	112.557
7	4	69.00	69.00	276.00	32.53	0.000551	112.525
7	5	68.90	68.80	275.30	32.48	0.000551	112.376
8	1	137.90	69.10	345.20	65.01	0.000770	161.294
8	2	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000771	160.901
8	3	138.00	68.90	344.70	65.05	0.000770	161.187
8	4	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000771	160.848
8	5	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000771	160.925
9	1	206.80	68.90	413.50	97.49	0.001006	185.068
9	2	206.80	69.00	413.80	97.49	0.001009	184.334

Μίγμα Α, Δείγμα 1, 4.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.70	68.80	413.10	97.44	0.000999	186.100
9	4	206.70	68.80	413.10	97.44	0.001007	184.674
9	5	206.60	69.00	413.60	97.39	0.001001	185.837
10	1	72.40	103.50	382.90	34.13	0.000469	132.239
10	2	72.40	103.20	382.00	34.13	0.000469	132.215
10	3	72.40	103.50	382.90	34.13	0.000468	132.449
10	4	72.30	103.30	382.20	34.08	0.000466	132.954
10	5	72.40	103.50	382.90	34.13	0.000468	132.457
11	1	105.10	103.50	415.60	49.54	0.000624	149.227
11	2	105.10	103.20	414.70	49.54	0.000627	148.679
11	3	105.10	103.60	415.90	49.54	0.000624	149.740
11	4	105.10	103.40	415.30	49.54	0.000631	147.666
11	5	105.10	103.50	415.60	49.54	0.000624	149.591
12	1	206.60	103.20	516.20	97.39	0.000923	201.339
12	2	206.70	103.40	516.90	97.44	0.000923	201.521
12	3	206.60	103.50	517.10	97.39	0.000922	201.695
12	4	206.80	103.40	517.00	97.49	0.000922	201.748
12	5	206.70	103.30	516.60	97.44	0.000925	201.138
13	1	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000602	154.618
13	2	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000596	156.406
13	3	105.90	137.80	519.30	49.92	0.000600	155.351
13	4	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000601	155.098
13	5	105.70	138.00	519.70	49.83	0.000596	155.843
14	1	138.00	138.10	552.30	65.05	0.000711	174.537
14	2	138.00	138.10	552.30	65.05	0.000707	175.809
14	3	138.00	137.70	551.10	65.05	0.000710	174.998
14	4	138.00	137.90	551.70	65.05	0.000710	174.777
14	5	137.90	138.10	552.20	65.01	0.000705	176.170
15	1	275.60	137.90	689.30	129.92	0.001106	224.249
15	2	275.90	137.90	689.60	130.06	0.001105	224.678
15	3	275.80	137.80	689.20	130.01	0.001106	224.364
15	4	275.60	138.00	689.60	129.92	0.001107	224.054
15	5	275.90	138.00	689.90	130.06	0.001106	224.549

Πίνακας Π2 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Α, Δείγμα 2

Μίγμα Α, Δείγμα 2, 4.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	23.30	20.50	84.80	10.98	0.000320	58.210
1	2	23.20	20.90	85.90	10.94	0.000319	58.171
1	3	23.20	20.60	85.00	10.94	0.000321	57.681
1	4	23.30	20.70	85.40	10.98	0.000320	58.187
1	5	23.20	20.70	85.30	10.94	0.000319	58.182
2	1	42.70	20.50	104.20	20.13	0.000661	56.378
2	2	42.70	20.70	104.80	20.13	0.000666	56.111
2	3	42.70	20.80	105.10	20.13	0.000662	56.377
2	4	42.70	20.60	104.50	20.13	0.000662	56.287
2	5	42.70	20.80	105.10	20.13	0.000664	56.128
3	1	66.90	20.60	128.70	31.54	0.000878	64.083
3	2	66.00	20.50	127.50	31.11	0.000866	64.004
3	3	66.40	20.80	128.80	31.30	0.000873	63.853
3	4	66.20	20.60	128.00	31.21	0.000863	64.446
3	5	66.40	20.80	128.80	31.30	0.000870	64.069
4	1	40.50	34.60	144.30	19.09	0.000460	66.972
4	2	40.90	34.50	144.40	19.28	0.000466	67.132
4	3	40.60	34.50	144.10	19.14	0.000464	66.691
4	4	40.60	34.40	143.80	19.14	0.000460	67.401
4	5	40.80	34.60	144.60	19.23	0.000466	66.773
5	1	73.00	34.50	176.50	34.41	0.000834	74.297
5	2	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000831	74.480
5	3	73.00	34.50	176.50	34.41	0.000829	74.768
5	4	73.00	34.50	176.50	34.41	0.000824	75.524
5	5	73.10	34.50	176.60	34.46	0.000832	74.816
6	1	104.80	34.60	208.60	49.40	0.001034	90.005
6	2	104.60	34.40	207.80	49.31	0.001035	89.724
6	3	105.20	34.60	209.00	49.59	0.001037	90.154
6	4	104.60	34.70	208.70	49.31	0.001035	89.677
6	5	104.70	34.30	207.60	49.36	0.001029	90.406
7	1	73.40	68.90	280.10	34.60	0.000550	113.021
7	2	73.20	68.90	279.90	34.51	0.000549	112.718
7	3	73.40	69.00	280.40	34.60	0.000547	113.504
7	4	73.10	68.80	279.50	34.46	0.000550	112.499
7	5	73.30	68.90	280.00	34.55	0.000547	113.681
8	1	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000777	159.750
8	2	137.90	69.20	345.50	65.01	0.000777	159.706
8	3	138.00	68.50	343.50	65.05	0.000778	159.693
8	4	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000782	158.661
8	5	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000783	158.606
9	1	206.80	69.00	413.80	97.49	0.000958	194.275
9	2	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000959	193.925

Μίγμα Α, Δείγμα 2, 4.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.90	68.80	413.30	97.53	0.000957	194.498
9	4	206.80	69.00	413.80	97.49	0.000958	194.256
9	5	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000957	194.466
10	1	73.30	103.50	383.80	34.55	0.000418	148.213
10	2	73.20	103.20	382.80	34.51	0.000416	148.755
10	3	73.30	103.50	383.80	34.55	0.000422	146.516
10	4	73.30	103.40	383.50	34.55	0.000418	148.355
10	5	73.30	103.40	383.50	34.55	0.000419	148.259
11	1	105.60	103.30	415.50	49.78	0.000536	173.761
11	2	105.60	103.40	415.80	49.78	0.000535	174.176
11	3	105.70	103.40	415.90	49.83	0.000532	175.544
11	4	105.60	103.40	415.80	49.78	0.000539	173.001
11	5	105.50	103.50	416.00	49.73	0.000533	174.697
12	1	206.80	103.50	517.30	97.49	0.000858	217.009
12	2	206.80	103.30	516.70	97.49	0.000858	216.709
12	3	206.60	103.30	516.50	97.39	0.000856	217.124
12	4	206.70	103.40	516.90	97.44	0.000860	216.205
12	5	206.60	103.60	517.40	97.39	0.000859	216.678
13	1	105.70	137.80	519.10	49.83	0.000531	174.976
13	2	105.80	138.10	520.10	49.87	0.000529	176.046
13	3	105.90	137.80	519.30	49.92	0.000531	175.432
13	4	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000529	175.518
13	5	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000530	175.342
14	1	138.30	137.90	552.00	65.19	0.000636	195.037
14	2	138.30	137.80	551.70	65.19	0.000636	195.177
14	3	138.20	137.90	551.90	65.15	0.000635	195.297
14	4	138.30	137.90	552.00	65.19	0.000636	195.318
14	5	138.10	137.90	551.80	65.10	0.000636	194.791
15	1	255.40	137.90	669.10	120.40	0.001044	216.938
15	2	261.90	138.00	675.90	123.46	0.001213	195.959
15	3	256.40	137.90	670.10	120.87	0.001042	217.634
15	4	254.90	137.90	668.60	120.16	0.001044	216.439
15	5	262.10	137.90	675.80	123.55	0.001226	194.003

Πίνακας Π3 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Β, Δείγμα 1

Μίγμα Β, Δείγμα 1, 6.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	21.40	20.60	83.20	10.09	0.000638	29.389
1	2	21.30	20.50	82.80	10.04	0.000644	28.791
1	3	21.30	20.40	82.50	10.04	0.000647	28.819
1	4	21.40	21.30	85.30	10.09	0.000640	29.250
1	5	21.40	20.60	83.20	10.09	0.000625	29.935
2	1	327.80	126.00	705.80	154.52	0.001271	250.568
2	2	340.70	89.70	609.80	160.61	0.001423	232.687
2	3	342.50	67.10	543.80	161.45	0.001861	182.138
2	4	317.10	50.20	467.70	149.48	0.001364	225.027
2	5	288.30	37.30	400.20	135.90	0.002016	141.291
3	1	66.40	21.10	129.70	31.30	0.001138	49.141
3	2	66.40	20.60	128.20	31.30	0.001157	48.302
3	3	66.40	20.50	127.90	31.30	0.001162	48.203
3	4	66.30	20.50	127.80	31.25	0.001157	48.341
3	5	66.40	21.20	130.00	31.30	0.001171	47.635
4	1	40.70	34.50	144.20	19.19	0.000619	50.046
4	2	40.70	34.50	144.20	19.19	0.000607	51.176
4	3	40.70	34.50	144.20	19.19	0.000621	49.867
4	4	40.60	34.50	144.10	19.14	0.000613	50.560
4	5	40.70	34.50	144.20	19.19	0.000617	50.298
5	1	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000879	70.612
5	2	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000902	68.795
5	3	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000890	69.631
5	4	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000878	70.621
5	5	72.90	34.50	176.40	34.37	0.000881	70.342
6	1	105.20	34.50	208.70	49.59	0.001048	88.724
6	2	105.20	34.50	208.70	49.59	0.001038	89.723
6	3	105.20	34.40	208.40	49.59	0.001044	89.275
6	4	105.10	34.40	208.30	49.54	0.001053	88.374
6	5	105.20	34.40	208.40	49.59	0.001044	89.336
7	1	73.20	68.80	279.60	34.51	0.000576	107.609
7	2	73.20	69.00	280.20	34.51	0.000577	107.325
7	3	73.30	69.00	280.30	34.55	0.000568	109.151
7	4	73.30	68.70	279.40	34.55	0.000575	107.919
7	5	73.20	69.10	280.50	34.51	0.000583	106.298
8	1	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000805	154.142
8	2	137.80	69.10	345.10	64.96	0.000794	156.226
8	3	138.00	68.70	344.10	65.05	0.000802	154.895
8	4	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000810	153.269
8	5	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000802	154.751
9	1	206.70	68.90	413.40	97.44	0.000907	205.072
9	2	206.80	68.70	412.90	97.49	0.000912	204.082

Μίγμα Β, Δείγμα 1, 6.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.80	68.90	413.50	97.49	0.000915	203.385
9	4	206.80	69.10	414.10	97.49	0.000922	201.816
9	5	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000911	204.282
10	1	73.50	103.40	383.70	34.65	0.000521	119.090
10	2	73.50	103.40	383.70	34.65	0.000529	117.303
10	3	73.50	103.40	383.70	34.65	0.000523	118.670
10	4	73.50	103.60	384.30	34.65	0.000523	118.620
10	5	73.40	103.20	383.00	34.60	0.000538	115.022
11	1	105.80	103.40	416.00	49.87	0.000656	141.924
11	2	105.80	103.40	416.00	49.87	0.000668	139.124
11	3	105.90	103.50	416.40	49.92	0.000663	140.426
11	4	105.80	103.40	416.00	49.87	0.000663	140.432
11	5	105.90	103.40	416.10	49.92	0.000651	143.192
12	1	206.70	103.60	517.50	97.44	0.000861	216.041
12	2	206.80	103.20	516.40	97.49	0.000861	216.067
12	3	206.80	103.60	517.60	97.49	0.000859	216.531
12	4	206.90	103.40	517.10	97.53	0.000854	218.004
12	5	206.70	103.20	516.30	97.44	0.000854	217.803
13	1	106.20	137.90	519.90	50.06	0.000649	143.484
13	2	106.20	137.80	519.60	50.06	0.000628	148.323
13	3	106.10	138.00	520.10	50.02	0.000639	145.741
13	4	106.20	137.80	519.60	50.06	0.000652	142.841
13	5	106.10	137.90	519.80	50.02	0.000634	146.744
14	1	138.40	137.80	551.80	65.24	0.000731	169.746
14	2	138.30	138.00	552.30	65.19	0.000725	171.017
14	3	138.50	137.80	551.90	65.29	0.000731	169.838
14	4	138.40	138.00	552.40	65.24	0.000724	171.423
14	5	138.50	137.90	552.20	65.29	0.000737	168.521
15	1	275.90	138.00	689.90	130.06	0.000953	260.490
15	2	275.80	137.90	689.50	130.01	0.000961	258.267
15	3	275.70	137.90	689.40	129.96	0.000954	260.120
15	4	275.80	137.80	689.20	130.01	0.000953	260.502
15	5	275.90	138.00	689.90	130.06	0.000960	258.502

Πίνακας Π4 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Β, Δείγμα 2

Μίγμα Β, Δείγμα 2, 6.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	27.20	20.70	89.30	12.82	0.000500	37.239
1	2	27.20	21.00	90.20	12.82	0.000500	37.083
1	3	27.20	20.50	88.70	12.82	0.000492	37.595
1	4	27.20	20.80	89.60	12.82	0.000492	37.921
1	5	27.20	20.70	89.30	12.82	0.000506	36.702
2	1	46.70	20.50	108.20	22.01	0.000854	43.772
2	2	46.70	20.50	108.20	22.01	0.000863	43.112
2	3	46.80	21.20	110.40	22.06	0.000849	44.078
2	4	46.70	20.50	108.20	22.01	0.000837	44.647
2	5	46.70	20.50	108.20	22.01	0.000849	44.012
3	1	66.20	20.70	128.30	31.21	0.001038	53.882
3	2	66.10	20.70	128.20	31.16	0.001013	55.323
3	3	66.10	20.70	128.20	31.16	0.001038	53.782
3	4	66.20	20.80	128.60	31.21	0.001023	54.731
3	5	66.10	20.70	128.20	31.16	0.001016	54.899
4	1	40.30	34.20	142.90	19.00	0.000595	52.246
4	2	40.40	34.20	143.00	19.04	0.000627	49.538
4	3	40.30	34.90	145.00	19.00	0.000598	51.760
4	4	40.40	34.60	144.20	19.04	0.000591	52.644
4	5	40.30	34.30	143.20	19.00	0.000617	50.129
5	1	72.60	34.50	176.10	34.22	0.000740	83.821
5	2	72.50	34.50	176.00	34.18	0.000734	84.267
5	3	72.50	34.50	176.00	34.18	0.000738	83.796
5	4	72.70	34.50	176.20	34.27	0.000730	85.005
5	5	72.60	34.50	176.10	34.22	0.000717	86.582
6	1	104.90	34.30	207.80	49.45	0.000882	105.478
6	2	104.90	34.60	208.70	49.45	0.000874	106.448
6	3	105.10	34.60	208.90	49.54	0.000877	106.232
6	4	104.80	34.40	208.00	49.40	0.000855	108.744
6	5	104.90	34.60	208.70	49.45	0.000883	105.418
7	1	72.90	69.00	279.90	34.37	0.000494	125.599
7	2	72.90	68.80	279.30	34.37	0.000504	122.834
7	3	73.00	69.00	280.00	34.41	0.000493	126.005
7	4	73.00	69.00	280.00	34.41	0.000501	123.881
7	5	72.90	69.00	279.90	34.37	0.000499	124.057
8	1	137.90	68.90	344.60	65.01	0.000746	166.238
8	2	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000746	166.428
8	3	137.90	69.10	345.20	65.01	0.000747	165.971
8	4	137.80	68.80	344.20	64.96	0.000740	167.959
8	5	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000755	164.232
9	1	206.80	69.00	413.80	97.49	0.000937	198.546
9	2	206.70	68.80	413.10	97.44	0.000935	198.883

Μίγμα Β, Δείγμα 2, 6.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000924	201.726
9	4	206.90	69.10	414.20	97.53	0.000941	197.761
9	5	206.70	69.00	413.70	97.44	0.000933	199.273
10	1	73.30	103.50	383.80	34.55	0.000537	115.570
10	2	73.20	103.30	383.10	34.51	0.000531	116.623
10	3	73.20	103.30	383.10	34.51	0.000534	116.442
10	4	73.20	103.60	384.00	34.51	0.000537	115.556
10	5	73.20	103.30	383.10	34.51	0.000533	116.269
11	1	105.50	103.30	415.40	49.73	0.000652	142.635
11	2	105.70	103.30	415.60	49.83	0.000652	143.001
11	3	105.40	103.50	415.90	49.69	0.000651	142.934
11	4	105.50	103.40	415.70	49.73	0.000649	143.386
11	5	105.50	103.30	415.40	49.73	0.000650	143.550
12	1	206.70	103.70	517.80	97.44	0.000892	208.433
12	2	206.80	103.30	516.70	97.49	0.000883	210.692
12	3	206.80	103.50	517.30	97.49	0.000889	209.341
12	4	206.90	103.20	516.50	97.53	0.000886	210.319
12	5	206.80	103.30	516.70	97.49	0.000888	209.556
13	1	105.80	137.80	519.20	49.87	0.000639	145.811
13	2	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000640	145.350
13	3	105.80	138.00	519.80	49.87	0.000637	146.228
13	4	105.70	137.90	519.40	49.83	0.000635	146.413
13	5	105.70	137.90	519.40	49.83	0.000639	145.904
14	1	137.90	137.90	551.60	65.01	0.000724	171.408
14	2	137.80	138.00	551.80	64.96	0.000727	170.414
14	3	137.90	137.80	551.30	65.01	0.000723	171.583
14	4	137.90	137.90	551.60	65.01	0.000720	172.505
14	5	137.90	137.90	551.60	65.01	0.000725	171.249

Πίνακας Π5 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Γ, Δείγμα 1

Μίγμα Γ, Δείγμα 1, 7.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	27.50	20.70	89.60	12.96	0.000313	59.464
1	2	27.50	20.70	89.60	12.96	0.000311	60.062
1	3	27.40	20.70	89.50	12.92	0.000313	59.131
1	4	27.50	20.70	89.60	12.96	0.000313	59.048
1	5	27.50	20.70	89.60	12.96	0.000302	61.815
2	1	46.90	21.20	110.50	22.11	0.000584	63.843
2	2	46.90	20.60	108.70	22.11	0.000571	65.192
2	3	46.90	20.50	108.40	22.11	0.000565	66.300
2	4	46.90	20.50	108.40	22.11	0.000579	64.291
2	5	46.90	21.20	110.50	22.11	0.000574	64.858
3	1	66.20	20.70	128.30	31.21	0.000705	79.455
3	2	66.10	20.70	128.20	31.16	0.000718	77.601
3	3	66.10	20.70	128.20	31.16	0.000713	78.172
3	4	66.30	20.70	128.40	31.25	0.000710	78.706
3	5	66.30	20.70	128.40	31.25	0.000709	78.828
4	1	34.50	34.30	137.40	16.26	0.000565	55.191
4	2	34.50	34.20	137.10	16.26	0.000570	54.126
4	3	34.50	35.00	139.50	16.26	0.000556	56.045
4	4	34.60	34.40	137.80	16.31	0.000563	55.249
4	5	34.50	34.60	138.30	16.26	0.000569	54.182
5	1	68.80	34.50	172.30	32.43	0.000757	81.904
5	2	68.90	34.40	172.10	32.48	0.000757	81.820
5	3	68.80	34.40	172.00	32.43	0.000748	82.939
5	4	68.90	34.40	172.10	32.48	0.000750	82.698
5	5	69.00	34.40	172.20	32.53	0.000750	82.773
6	1	105.00	34.50	208.50	49.50	0.000838	111.199
6	2	104.80	34.50	208.30	49.40	0.000829	112.293
6	3	104.90	34.50	208.40	49.45	0.000849	109.455
6	4	105.00	34.40	208.20	49.50	0.000820	113.744
6	5	104.90	34.40	208.10	49.45	0.000851	109.093
7	1	72.90	68.80	279.30	34.37	0.000482	128.440
7	2	73.00	69.10	280.30	34.41	0.000479	129.532
7	3	72.90	68.80	279.30	34.37	0.000479	129.579
7	4	72.90	68.80	279.30	34.37	0.000492	126.155
7	5	72.90	69.20	280.50	34.37	0.000482	128.765
8	1	137.80	68.80	344.20	64.96	0.000741	167.375
8	2	137.90	69.10	345.20	65.01	0.000744	166.860
8	3	137.80	68.80	344.20	64.96	0.000742	166.868
8	4	137.90	68.90	344.60	65.01	0.000738	168.212
8	5	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000742	167.395
9	1	206.90	68.80	413.30	97.53	0.000966	192.747
9	2	206.80	69.00	413.80	97.49	0.000962	193.297

Μίγμα Γ, Δείγμα 1, 7.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.80	69.00	413.80	97.49	0.000957	194.513
9	4	207.00	69.00	414.00	97.58	0.000966	192.905
9	5	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000969	191.954
10	1	73.20	103.30	383.10	34.51	0.000468	132.386
10	2	73.20	103.60	384.00	34.51	0.000468	132.609
10	3	73.20	103.10	382.50	34.51	0.000473	131.073
10	4	73.20	103.50	383.70	34.51	0.000470	131.727
10	5	73.30	103.60	384.10	34.55	0.000468	132.672
11	1	105.40	103.60	416.20	49.69	0.000624	149.041
11	2	105.40	103.20	415.00	49.69	0.000610	152.517
11	3	105.40	103.60	416.20	49.69	0.000615	151.247
11	4	105.50	103.10	414.80	49.73	0.000613	152.062
11	5	105.40	103.60	416.20	49.69	0.000619	150.432
12	1	206.70	103.40	516.90	97.44	0.000898	207.239
12	2	206.80	103.50	517.30	97.49	0.000899	206.988
12	3	206.70	103.30	516.60	97.44	0.000897	207.428
12	4	206.80	103.40	517.00	97.49	0.000902	206.258
12	5	206.80	103.50	517.30	97.49	0.000898	207.243
13	1	105.70	137.90	519.40	49.83	0.000603	154.516
13	2	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000615	151.204
13	3	105.80	137.70	518.90	49.87	0.000613	151.892
13	4	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000610	152.841
13	5	105.70	138.00	519.70	49.83	0.000614	151.311
14	1	137.90	137.90	551.60	65.01	0.000718	172.721
14	2	138.00	137.90	551.70	65.05	0.000716	173.510
14	3	138.00	137.80	551.40	65.05	0.000718	172.949
14	4	138.10	138.00	552.10	65.10	0.000714	173.986
14	5	137.80	137.80	551.20	64.96	0.000713	173.911
15	1	275.90	137.80	689.30	130.06	0.001064	233.339
15	2	275.70	137.80	689.10	129.96	0.001059	234.402
15	3	276.00	137.90	689.70	130.11	0.001203	211.255
15	4	277.70	138.00	691.70	130.91	0.000997	248.161
15	5	276.40	137.80	689.80	130.29	0.001007	245.490

Πίνακας Π6 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για το Μίγμα Γ, Δείγμα 2

Μίγμα Γ, Δείγμα 2, 7.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
1	1	27.50	20.90	90.20	12.96	0.000311	59.655
1	2	27.40	20.60	89.20	12.92	0.000317	58.479
1	3	27.50	20.60	89.30	12.96	0.000305	61.341
1	4	27.40	20.50	88.90	12.92	0.000319	58.077
1	5	27.50	20.50	89.00	12.96	0.000309	60.342
2	1	46.90	20.60	108.70	22.11	0.000593	62.893
2	2	46.80	20.50	108.30	22.06	0.000590	63.187
2	3	46.80	20.50	108.30	22.06	0.000590	63.414
2	4	46.80	21.10	110.10	22.06	0.000590	63.137
2	5	46.80	20.80	109.20	22.06	0.000589	63.282
3	1	66.10	20.60	127.90	31.16	0.000739	75.492
3	2	66.20	20.40	127.40	31.21	0.000745	75.034
3	3	66.10	21.20	129.70	31.16	0.000746	74.838
3	4	66.20	20.70	128.30	31.21	0.000739	75.860
3	5	66.20	20.60	128.00	31.21	0.000744	75.120
4	1	34.50	34.50	138.00	16.26	0.000563	54.911
4	2	34.50	34.30	137.40	16.26	0.000565	54.915
4	3	34.60	34.30	137.50	16.31	0.000559	55.597
4	4	34.50	34.70	138.60	16.26	0.000564	54.741
4	5	34.50	34.60	138.30	16.26	0.000565	54.624
5	1	68.80	35.00	173.80	32.43	0.000752	82.320
5	2	68.90	34.30	171.80	32.48	0.000734	84.658
5	3	68.90	34.50	172.40	32.48	0.000749	82.555
5	4	68.90	34.60	172.70	32.48	0.000738	83.932
5	5	68.80	34.40	172.00	32.43	0.000738	84.134
6	1	104.80	34.40	208.00	49.40	0.000837	111.078
6	2	104.90	34.70	209.00	49.45	0.000833	111.687
6	3	104.90	34.50	208.40	49.45	0.000836	111.318
6	4	105.00	34.40	208.20	49.50	0.000838	111.132
6	5	104.90	34.70	209.00	49.45	0.000835	111.473
7	1	68.90	69.00	275.90	32.48	0.000495	125.526
7	2	69.00	68.80	275.40	32.53	0.000491	126.169
7	3	68.90	68.90	275.60	32.48	0.000493	125.756
7	4	68.90	68.90	275.60	32.48	0.000494	125.629
7	5	68.90	69.00	275.90	32.48	0.000492	125.769
8	1	137.90	69.10	345.20	65.01	0.000715	173.675
8	2	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000716	173.526
8	3	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000713	173.843
8	4	137.90	68.80	344.30	65.01	0.000713	174.073
8	5	137.90	69.00	344.90	65.01	0.000713	173.911
9	1	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000964	192.946
9	2	206.80	68.90	413.50	97.49	0.000965	192.874

Μίγμα Γ, Δείγμα 2, 7.0% περιεχόμενη υγρασία							
Σειρά φόρτισης	Αριθμός Φόρτισης	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)	θ (kPa)	T_{oct} (kPa)	Resilient strain (mm)	M_r (MPa)
9	3	206.80	68.80	413.20	97.49	0.000968	192.253
9	4	206.90	68.80	413.30	97.53	0.000967	192.471
9	5	206.70	68.90	413.40	97.44	0.000963	193.259
10	1	73.20	103.60	384.00	34.51	0.000433	143.009
10	2	73.10	103.20	382.70	34.46	0.000427	145.237
10	3	73.20	103.60	384.00	34.51	0.000431	143.889
10	4	73.20	103.50	383.70	34.51	0.000431	143.984
10	5	73.20	103.40	383.40	34.51	0.000434	142.611
11	1	105.50	103.30	415.40	49.73	0.000580	160.611
11	2	105.60	103.60	416.40	49.78	0.000584	159.454
11	3	105.50	103.30	415.40	49.73	0.000579	160.651
11	4	105.50	103.30	415.40	49.73	0.000582	159.938
11	5	105.50	103.60	416.30	49.73	0.000580	160.464
12	1	206.90	103.50	517.40	97.53	0.000880	211.444
12	2	206.80	103.40	517.00	97.49	0.000879	211.625
12	3	206.70	103.40	516.90	97.44	0.000877	212.235
12	4	206.80	103.50	517.30	97.49	0.000881	211.280
12	5	206.80	103.40	517.00	97.49	0.000877	212.167
13	1	105.80	137.90	519.50	49.87	0.000548	169.718
13	2	105.90	137.70	519.00	49.92	0.000549	169.538
13	3	105.90	138.00	519.90	49.92	0.000549	169.599
13	4	105.90	137.80	519.30	49.92	0.000549	169.565
13	5	105.80	137.80	519.20	49.87	0.000550	169.135
14	1	138.00	137.90	551.70	65.05	0.000663	186.954
14	2	138.10	138.00	552.10	65.10	0.000661	187.852
14	3	138.00	137.90	551.70	65.05	0.000658	188.646
14	4	138.10	138.00	552.10	65.10	0.000662	187.686
14	5	137.90	137.90	551.60	65.01	0.000660	187.696
15	1	275.90	137.80	689.30	130.06	0.001013	244.980
15	2	275.80	137.90	689.50	130.01	0.001013	245.006
15	3	275.70	137.90	689.40	129.96	0.001013	244.999
15	4	275.90	137.90	689.60	130.06	0.001013	245.161
15	5	275.70	138.00	689.70	129.96	0.001012	245.086