



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΦΑΡΑΝΤΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνάται η ελαστική απόκριση του ασύνδετου αμμοχάλικου, ως υλικό βάσεων και υποβάσεων στην κατασκευή εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία. Η διερεύνηση αυτή και ο χαρακτηρισμός της ελαστικής συμπεριφοράς του ασύνδετου κοκκώδους υλικού βασίζεται στο μέτρο επανάκτησης M_r και υλοποιείται σε πρώτη φάση μέσω της ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας και σε δεύτερη και κύρια φάση, μέσω εργαστηριακού πειράματος. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύεται η μη γραμμική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών οδοστρώσεως, ενώ παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού και τα καταστατικά μοντέλα εκτίμησης του μέτρου επανάκτησης. Η πειραματική διαδικασία αφορά αρχικά στον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων διαβαθμισμένου ασύνδετου υλικού, όπως είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση και το βέλτιστο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας. Στη συνέχεια περιλαμβάνει τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε δοκίμια του υπόψη υλικού, συμπυκνωμένα σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, από τις οποίες προκύπτουν δεδομένα για την ελαστική παραμόρφωση και το μέτρο επανάκτησης του υλικού. Πραγματοποιείται δε στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και διερευνάται η προσαρμογή επιλεγμένων καταστατικών μοντέλων πρόβλεψης σε αυτά. Η αξιολόγηση και η συγκριτική ανάλυση των ανωτέρω αποτελεσμάτων οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα, όσον αφορά στην ελαστική απόκριση του υλικού, την επίδραση της φόρτισης και της υγρασίας σε αυτή, αλλά και την καταλληλότητα των καταστατικών μοντέλων εκτίμησης του μέτρου επανάκτησης. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικώς κάποια κύρια σημεία, τα οποία ενδεχομένως να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, the elastic response of unbound aggregate, as base and subbase material for the construction of flexible pavements is investigated, regarding to the moisture content. This investigation and characterization of the elastic behavior of the unbound granular material is based on the resilient modulus M_r and is implemented in the first phase through the review of the international literature and in the second and main phase, through laboratory experiments. Through literature review, the non-linear behavior of unbound paving materials is highlighted, while calculation methods and constitutive models for resilient modulus are presented. The experimental procedure is initially concerned with determining the physical properties of graded unbound material, such as gradation and optimum moisture content. Afterwards, it includes triaxial repeated load tests on specimens of the material in question, which are compacted at various values of moisture content, from which data on the resilient strain and the resilient modulus of the material are obtained. Statistical analysis of the experimental data is carried out and the goodness of fit of selected constitutive models on them is investigated. Evaluation and comparative analysis of the above results lead to useful conclusions, regarding the elastic response of the material, regarding the effect of loading and moisture on the behavior of the material, but also regarding the suitability of the constitutive models for estimating the resilient modulus. Finally, some crucial points are briefly presented, which may be the subject of future research.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Στόχος και μεθοδολογία διπλωματικής εργασίας	3
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας.....	3
2	ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	5
2.1	Ορισμός	5
2.2	Μέθοδοι υπολογισμού.....	7
2.3	Παράγοντες επιρροής	9
2.4	Καταστατικά μοντέλα προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης	13
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	21
3.1	Γενικά.....	21
3.2	Θραυστό υλικό οδοστρώσας 3Α	22
3.3	Προετοιμασία δειγμάτων- Δοκιμή Proctor	22
3.4	Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης	31
3.4.1	Περιγραφή συσκευής.....	31
3.4.2	Περιγραφή πειράματος.....	34
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	39
4.1	Γενικά.....	39
4.2	Κοκκομετρική ανάλυση υλικού	39
4.3	Αποτελέσματα δοκιμής Proctor-Βέλτιστη υγρασία	41
4.4	Αποτελέσματα δοκιμής τριαξονικής φόρτισης	42
5	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	45
5.1	Γενικά.....	45
5.2	Προσαρμογή μη γραμμικών μοντέλων	47
5.2.1	Μίγμα υγρασίας 4%	47
5.2.2	Μίγμα υγρασίας 5%	59

5.2.3	Μίγμα υγρασίας 6%	71
5.2.4	Μίγμα υγρασίας 7%	83
5.2.5	Μίγμα υγρασίας 8%	95
5.3	Συγκριτικά αποτελέσματα.....	107
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	121

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Ορισμός μέτρου επανάκτησης Mr (Araya, 2011).....	6
Εικόνα 2.2 Κατάσταση φόρτισης.....	7
Εικόνα 3.1 Αλληλουχία κοσκίνων και το δονητικό μηχάνημα.	24
Εικόνα 3.2 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης, αριστερά Τύπου Ι και δεξιά Τύπου ΙΙ.....	25
Εικόνα 3.3 Μήτρα δοκιμής Proctor και κόπανος συμπύκνωσης.	27
Εικόνα 3.4 Ανάμιξη υλικού με νερό και τοποθέτηση σε πλαστική σακούλα	29
Εικόνα 3.5 Καλούπι κατασκευής δοκιμίου και τοποθέτηση μεμβράνης	29
Εικόνα 3.6 Συμπύκνωση με δονητική συσκευή και τοποθέτηση δοκιμίου στη βάση του τριαξονικού κελιού.....	30
Εικόνα 3.7 Διάταξη συσκευής τριαξονικής φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).	31
Εικόνα 3.8 Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).....	32
Εικόνα 3.9 Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης και αντίστοιχη παραμόρφωση.....	33
Εικόνα 3.10 Δοκίμιο τοποθετημένο στο θάλαμο φόρτισης.....	35

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού	40
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας του υλικού.....	41
Σχήμα 5.1 Δείγμα 1:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	47
Σχήμα 5.2 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	48
Σχήμα 5.3 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	48
Σχήμα 5.4 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	49
Σχήμα 5.5 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	50
Σχήμα 5.6 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	50
Σχήμα 5.7 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	51
Σχήμα 5.8 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	52
Σχήμα 5.9 Δείγμα1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	52
Σχήμα 5.10 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	53
Σχήμα 5.11 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	54
Σχήμα 5.12 Δείγμα 2:Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	54
Σχήμα 5.13 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	55
Σχήμα 5.14 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	56
Σχήμα 5.15 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	56
Σχήμα 5.16 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	57
Σχήμα 5.17 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	58
Σχήμα 5.18 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	58
Σχήμα 5.19 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	59
Σχήμα 5.20 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	60
Σχήμα 5.21 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	60
Σχήμα 5.22 Δείγμα 2:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	61
Σχήμα 5.23 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	62
Σχήμα 5.24 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	62
Σχήμα 5.25 Δείγμα 1:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan	63
Σχήμα 5.26 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	64
Σχήμα 5.27 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	64
Σχήμα 5.28 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	65
Σχήμα 5.29 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	66
Σχήμα 5.30 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	66

Σχήμα 5.31 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	67
Σχήμα 5.32 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	68
Σχήμα 5.33 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	68
Σχήμα 5.34 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	69
Σχήμα 5.35 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	70
Σχήμα 5.36 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	70
Σχήμα 5.37 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	71
Σχήμα 5.38 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	72
Σχήμα 5.39 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	72
Σχήμα 5.40 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	73
Σχήμα 5.41 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	74
Σχήμα 5.42 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	74
Σχήμα 5.43 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan	75
Σχήμα 5.44 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	76
Σχήμα 5.45 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	76
Σχήμα 5.46 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	77
Σχήμα 5.47 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	78
Σχήμα 5.48 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	78
Σχήμα 5.49 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	79
Σχήμα 5.50 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	80
Σχήμα 5.51 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	80
Σχήμα 5.52 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	81
Σχήμα 5.53 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	82
Σχήμα 5.54 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	82
Σχήμα 5.55 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	83
Σχήμα 5.56 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	84
Σχήμα 5.57 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	84
Σχήμα 5.58 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	85
Σχήμα 5.59 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	86
Σχήμα 5.60 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	86
Σχήμα 5.61 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	87
Σχήμα 5.62 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	88
Σχήμα 5.63 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	88
Σχήμα 5.64 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	89

Σχήμα 5.65 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	90
Σχήμα 5.66 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	90
Σχήμα 5.67 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	91
Σχήμα 5.68 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	92
Σχήμα 5.69 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	92
Σχήμα 5.70 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	93
Σχήμα 5.71 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	94
Σχήμα 5.72 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	94
Σχήμα 5.73 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	95
Σχήμα 5.74 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	96
Σχήμα 5.75 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	96
Σχήμα 5.76 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ	97
Σχήμα 5.77 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ	98
Σχήμα 5.78 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ	98
Σχήμα 5.79 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	99
Σχήμα 5.80 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	100
Σχήμα 5.81 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	100
Σχήμα 5.82 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan.....	101
Σχήμα 5.83 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan	102
Σχήμα 5.84 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan.....	102
Σχήμα 5.85 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	103
Σχήμα 5.86 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	104
Σχήμα 5.87 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	104
Σχήμα 5.88 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG	105
Σχήμα 5.89 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG	106
Σχήμα 5.90 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG	106

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Απαιτούμενη ποσότητα δείγματος	23
Πίνακας 2 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών	25
Πίνακας 3 Ελάχιστο διερχόμενο ποσοστό αδρανών υλικών	25
Πίνακας 4 Απαιτήσεις διερχόμενου ποσοστού αδρανών υλικών από συγκεκριμένα κόσκινα	25
Πίνακας 5 Συνοπτικά στοιχεία της πρότυπης και της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (ΕΛΟΤ EN 13286-2)	28
Πίνακας 6 Ακολουθία φορτίσεων τριαξονικής δοκιμής για υλικά βάσεων/υποβάσεων. (AASHTO T307-99)	36
Πίνακας 7 Κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού	40
Πίνακας 8 Αποτελέσματα τροποποιημένης δοκιμής Proctor	42
Πίνακας 9 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για μίγμα 4%, Δείγμα 1.	42
Πίνακας 10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης	107
Πίνακας Π 1 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 4%.	121
Πίνακας Π 2 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 5%.	129
Πίνακας Π 3 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 6%.	137
Πίνακας Π 4 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 7%.	143
Πίνακας Π 5 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 8%.	150

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα οδοστρώματα κατασκευάζονται με σκοπό οι τάσεις που μεταδίδονται στο έδαφος, λόγω των κυκλοφοριακών φορτίσεων από τα διερχόμενα οχήματα, να είναι μειωμένες σε τέτοιο βαθμό, που να αποτρέπονται ανεπίτρεπτες σε μέγεθος μόνιμες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό είναι πολυστρωματικά, με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων να διαφοροποιούνται με το βάθος, θέτοντας τον κανόνα οι ανώτερες στρώσεις να αναλαμβάνουν τις μεγαλύτερες τάσεις.

Με βάση αυτό τον κανόνα, τα οδοστρώματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: εύκαμπτα, δύσκαμπτα ή άκαμπτα και ημι-άκαμπτα ή ημι-εύκαμπτα. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στα εύκαμπτα οδοστρώματα τα οποία αποτελούνται από τη στρώση ασφαλομίγματος, τις στρώσεις βάσης και υπόβασης, που κατασκευάζονται από συμπακνωμένα ασύνδετα κοκκώδη υλικά (αμμοχάλικο 3Α), και τη στρώση έδρασης.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων είναι κατά βάση εμπειρικές ή στηρίζονται στη μηχανική. Οι εμπειρικές έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα, είτε από παρατηρήσεις που έγιναν σε υφιστάμενες οδούς, είτε από σημαντικά ερευνητικά προγράμματα όπως, το AASHO Road Test που πραγματοποιήθηκε στις Η.Π.Α. στο τέλος της δεκαετίας του 1950. Ένα μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, όπως είναι η αντοχή, η ακαμψία και η αντίσταση στη μόνιμη παραμόρφωση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της εφαρμογής τους μόνο σε περιπτώσεις υλικών και διατομών για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα και εμπειρία κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

Αντίθετα, οι μηχανιστικές ή αναλυτικές μέθοδοι σχεδιασμού στοχεύουν στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων βασιζόμενες στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών οδοστρωσίας. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν τη δυνατότητα εκτίμησης των τάσεων και των παραμορφώσεων, λόγω της πραγματικής κυκλοφοριακής φόρτισης, στα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος. Οι μηχανιστικές μέθοδοι παρουσιάζουν αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας, αλλά οδηγούν σε πιο ρεαλιστική ανάλυση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος και είναι αξιόπιστες για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων με διαφορετικά υλικά και συνθήκες κατασκευής για τις οποίες δεν υπάρχουν εμπειρικά δεδομένα. Τόσο οι

εμπειρικές όσο και οι μηχανιστικές πρέπει να χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, καθώς οι μηχανιστικές μέθοδοι απαιτούν τη χρήση εμπειρικών πληροφοριών για επαλήθευση.

Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη δομική συμπεριφορά του εύκαμπτου οδοστρώματος και συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην φέρουσα ικανότητα του, η οποία αποτελεί τη βασική απαίτηση κατά το σχεδιασμό του. Συνεπώς, η αποσαφήνιση των χαρακτηριστικών αντοχής και δυσκαμψίας των ασύνδετων υλικών, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βάσεων και υποβάσεων, κρίνεται επιτακτική. Επομένως, σιγά-σιγά εγκαταλείπεται ο εμπειρικός χαρακτηρισμός των στρώσεων ασύνδετων κοκκωδών υλικών και η θεώρηση της συμπεριφοράς τους ως απολύτως ελαστική, και υιοθετείται η θεώρηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών και της μεταβλητότητας του μέτρου ελαστικότητας ως αποτέλεσμα της επιβαλλόμενης φόρτισης και άλλων παραγόντων. Τα τελευταία χρόνια η μη γραμμική ανάλυση των ασύνδετων υλικών τέθηκε σε εφαρμογή από τον διεθνή οργανισμό AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ο οποίος την εισήγαγε στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Βασική παράμετρο περιγραφής και πρόβλεψης της ελαστικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών αποτελεί το μέτρο επανάκτησης M_r (resilient modulus), το οποίο κυρίως επηρεάζεται από την κατάσταση της φόρτισης και την περιεχόμενη υγρασία.

Για την διερεύνηση της τιμής του μέτρου επανάκτησης πραγματοποιούνται τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές με ειδικό εξοπλισμό. Η εργαστηριακή δοκιμή επαναλαμβανόμενης τριαξονικής φόρτισης αποδεικνύεται ως η καταλληλότερη για τον χαρακτηρισμό της ελαστικής συμπεριφοράς του ασύνδετου αμμοχάλικου, σε σχέση με το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Πρόκειται για μια πολύπλοκη διαδικασία, για την εκτέλεση της οποίας απαιτείται επίπονη προεργασία και προετοιμασία των δοκιμίων. Παρόλα αυτά, μέσω της δοκιμής αυτής προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην ελαστική απόκριση του υλικού και για αυτό το λόγο η εργαστηριακή αυτή δοκιμή χρησιμοποιείται ευρέως.

Πέραν των εργαστηριακών δοκιμών, διεθνώς, χρησιμοποιούνται κατάλληλα καταστατικά μοντέλα πρόβλεψης, ως εναλλακτικός τρόπος για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης του κοκκώδους υλικού. Τα υπόψη μοντέλα έχουν προκύψει με βάση τον έλεγχο των υλικών στο εργαστήριο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς τους, κατά την επιβολή τυποποιημένης φόρτισης.

1.2 Στόχος και μεθοδολογία διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ελαστικής απόκρισης του ασύνδετου αμμοχάλικου ως υλικό κατασκευής βάσεων και υποβάσεων εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία. Η βασική παράμετρος στην οποία βασίζεται η διερεύνηση και ο χαρακτηρισμός της ελαστικής συμπεριφοράς του ασύνδετου υλικού είναι το μέτρο επανάκτησης M_r .

Για την επίτευξη του υπόψη στόχου, αρχικά διερευνάται η μη γραμμική ελαστο-πλαστική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών οδοστρώσις. Επίσης, διερευνώνται οι τρόποι υπολογισμού του μέτρου επανάκτησης και τα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται πειραματικές δοκιμές σε δείγματα ασύνδετου υλικού, αφενός για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση, το βέλτιστο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και αφετέρου, για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης M_r .

Η εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας, γίνεται με την εργαστηριακή δοκιμή τριαξονικής επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Κατά την δοκιμή αυτή δείγματα ασύνδετου αμμοχάλικου συμπυκνωμένα σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας υποβάλλονται σε διάφορους συνδυασμούς τάσεων, καταγράφεται η ελαστική τους παραμόρφωση και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του μέτρου επανάκτησης.

Ακολουθεί η στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με απώτερο σκοπό την επιλογή του μη γραμμικού καταστατικού μοντέλου που προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα. Έτσι, έπειτα από τη διαδικασία μη γραμμικής παλινδρόμησης και τη σύγκριση των συντελεστών προσαρμογής των εξεταζόμενων μοντέλων προτείνεται το καταλληλότερο μοντέλο για την περιγραφή της ελαστικής απόκρισης του συγκεκριμένου υλικού για ένα εύρος ποσοστών υγρασίας.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η δομή της παρούσας εργασίας, η οποία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Πέραν λοιπόν του παρόντος, η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Το κεφάλαιο 2, όπου ορίζεται το μέτρο επανάκτησης των ασύνδετων υλικών. Παρουσιάζονται οι παράγοντες που το επηρεάζουν (κατάσταση φόρτισης, υγρασία, συμπύκνωση, κοκκομετρική διαβάθμιση κ.λ.π), καθώς και οι μέθοδοι εργαστηριακού προσδιορισμού του. Τέλος αναφέρονται τα κυριότερα καταστατικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης.
- Το κεφάλαιο 3, όπου περιγράφονται οι πρότυπες διαδικασίες που διέπουν τις πειραματικές δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ, για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού (κοκκομετρική διαβάθμιση, δοκιμή Proctor), καθώς και η προετοιμασία των δειγμάτων της τριαξονικής δοκιμής και η πρότυπη διαδικασία σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται.
- Το κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ανωτέρω εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα ασύνδετου αμμοχάλικου για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας.
- Το κεφάλαιο 5, όπου γίνεται η στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από την τριαξονική δοκιμή και εξετάζεται η προσαρμογή των επιλεγμένων καταστατικών μοντέλων σε αυτά.
- Το κεφάλαιο 6, όπου αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Το κεφάλαιο 7, όπου συγκεντρώνεται η διεθνής βιβλιογραφία στην οποία βασίστηκε η εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.
- Τέλος, το παράρτημα περιλαμβάνει τους πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την τριαξονική δοκιμή.

2 ΜΕΤΡΟ ΕΠΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

2.1 Ορισμός

Τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στις βάσεις και στις υποβάσεις εύκαμπτων οδοστρωμάτων για την καλύτερη κατανομή των φορτίων σε βάθος. Καθώς τα φορτία και οι απαιτήσεις απόδοσης των οδοστρωμάτων συνεχώς αυξάνονται, η κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών και της απόκρισης τους στη φόρτιση είναι απαραίτητη.

Τα περισσότερα υλικά οδοστρώσεως, ειδικά τα εδαφικά, δεν είναι αμιγώς ελαστικά, αλλά παρουσιάζουν ελαστο-πλαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι το ασύνδετο υλικό οδοστρώσεως που χρησιμοποιείται στις στρώσεις βάσης και υποβάσης συμπεριφέρεται μερικώς ελαστικά υπό στατικά φορτία, αλλά παρουσιάζει και κάποια μόνιμη παραμόρφωση. Εντούτοις, όταν υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα φορτία εμφανίζει σημαντικά διαφοροποιημένες ιδιότητες. Αρχικά, συμπεριφέρεται σαν να υπόκειται σε στατικό φορτίο, αλλά έπειτα από ορισμένες επαναλήψεις η παραμόρφωση σε κάθε κύκλο φόρτισης είναι σχεδόν αποκλειστικά αναιρέσιμη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η συμπεριφορά του ασύνδετου εδαφικού υλικού οδοστρώσεως να μπορεί να θεωρηθεί ελαστική, εφόσον το επαναλαμβανόμενο φορτίο είναι μικρό σε σύγκριση με την αντοχή του, ώστε να αποφεύγεται η καταστροφή της εδαφικής δομής (Ping, 2007).

Η θεωρία της ελαστικότητας παραδοσιακά καθορίζει τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού από το μέτρο ελαστικότητας, E , και τον λόγο του Poisson, ν . Όσον αφορά στα ασύνδετα κοκκώδη υλικά, το μέτρο ελαστικότητας E αντικαθίσταται από το μέτρο επανάκτησης καθώς περιγράφει καλύτερα την, εξαρτώμενη από την φόρτιση, ελαστική (ανακτήσιμη) συμπεριφορά ενός υλικού που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Η έννοια του μέτρου επανάκτησης M_r διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τους Seed et al (1955) και καθιερώθηκε αργότερα (Seed et al, 1962) για τον χαρακτηρισμό της ελαστικής απόκρισης των υλικών των βάσεων των οδοστρωμάτων και του υπεδάφους. Το μέτρο επανάκτησης M_r ορίζεται ως ο λόγος της αποκλίνουσας ή πρόσθετης αξονικής τάσης (deviator stress) προς την αξονική ελαστική παραμόρφωση (αναιρέσιμη-recoverable strain) (Λοΐζος & Πλατή, 2014). Σχηματικά περιγράφεται από την εικόνα 2.1 και η σχέση προσδιορισμού του είναι η εξής:

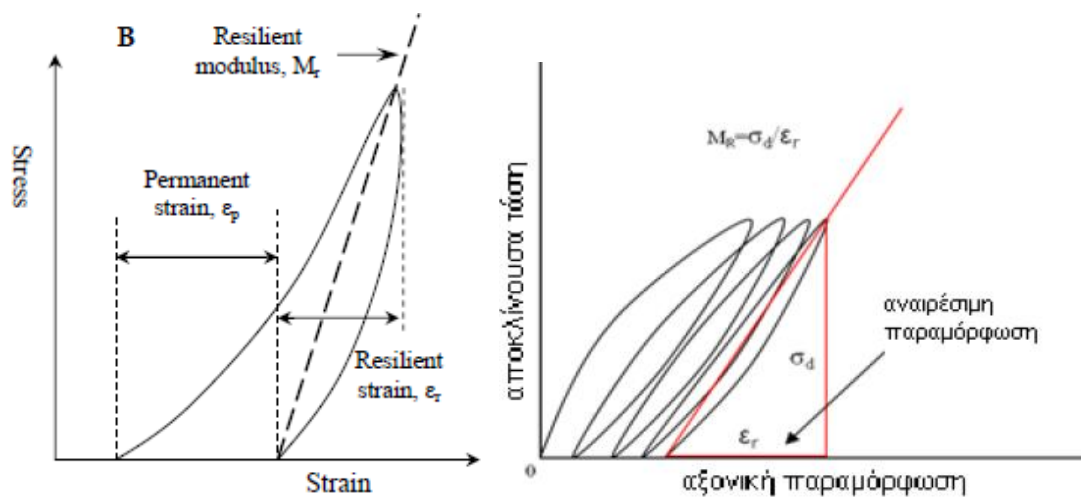
$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (2.1)$$

Όπου:

Mr το μέτρο επανάκτησης,

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

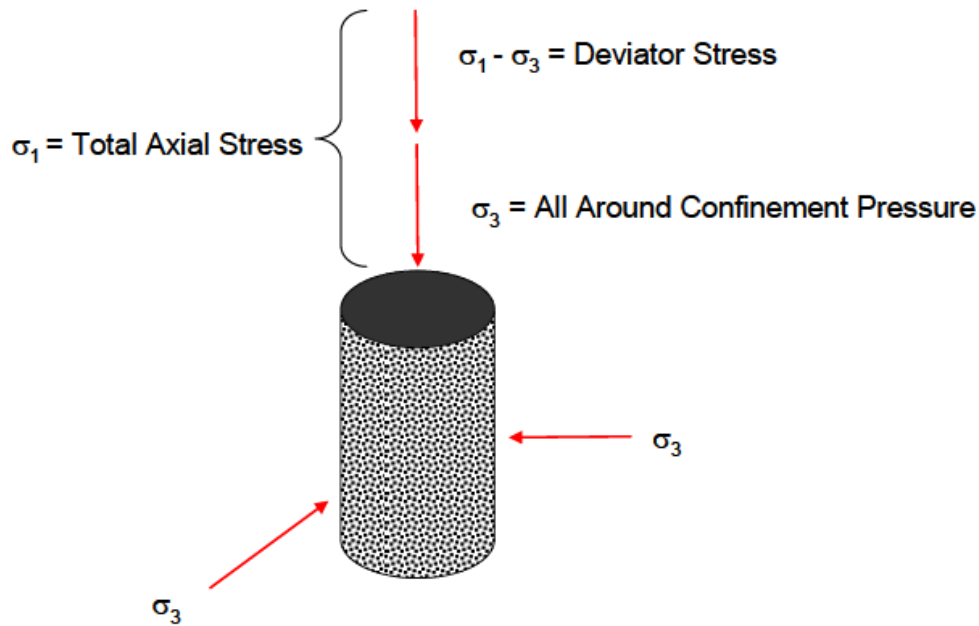
ϵ_r η ελαστική παραμόρφωση.



Εικόνα 2.1 Ορισμός μέτρου επανάκτησης Mr (Araya, 2011)

Το μέτρο επανάκτησης Mr υιοθετήθηκε από πολλούς οδηγούς σχεδιασμού οδοστρωμάτων, όπως AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Officials) και MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) και πλέον αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να προσδιοριστεί απ' ευθείας με τη δοκιμή τριαξονικής επαναλαμβανόμενης τάσης για τους διάφορους συνδυασμούς αποκλίνουσας σ_d και πλευρικής τάσης σ_3 (όπως στην εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 Κατάσταση φόρτισης

Η φόρτιση του υλικού οδοστρωσίας, τόσο η αξονική όσο και η πλευρική τάση, μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος του εκάστοτε σημείου από την επιφάνεια και αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα επιρροής του μέτρου ελαστικότητας.

2.2 Μέθοδοι υπολογισμού

Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης των υλικών οδοστρωσίας. Κάποιες περιλαμβάνουν την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης, συσχετίζοντας το με κάποιες άλλες φυσικές ιδιότητες των υλικών, όπως είναι η φέρουσα ικανότητα εκφρασμένη με το δείκτη CBR. Κάποιες άλλες, περιλαμβάνουν διεξαγωγή εργαστηριακών τριαξονικών δοκιμών επαναλαμβανόμενου φορτίου σε συνθήκες υγρασίας και συμπίκνωσης που προσομοιάζουν τις πραγματικές και στη συνέχεια, προσαρμογή κάποιου καταστατικού μοντέλου στα εργαστηριακά αποτελέσματα, το οποίο θα προβλέπει την τιμή του μέτρου επανάκτησης για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης. Τέλος, ένας τρόπος εκτίμησης του είναι με τη χρήση δεδομένων από επί τόπου δοκιμές.

Στο παρελθόν, η διεξαγωγή επαναλαμβανόμενων τριαξονικών δοκιμών θεωρούνταν χρονοβόρα, δαπανηρή και η διαδικασία της δοκιμής ήταν πολύπλοκη και όχι τυποποιημένη. Τα ζητήματα αυτά οδήγησαν πολλούς ερευνητές στην αναζήτηση λιγότερο περίπλοκων και φθηνών μεθόδων για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης των

ασύνδετων υλικών, όπως τη συσχέτιση του με το δείκτη CBR (California Bearing Ratio). Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές εμπειρικές σχέσεις μεταξύ του M_r και του CBR, οι οποίες φυσικά δεν μπορεί να είναι αξιόπιστες για οποιοδήποτε υλικό σε οποιοδήποτε συνθήκες (Mohajerani et al, 2016).

Δεδομένου ότι τα υλικά του οδοστρώματος υποβάλλονται σε μία σειρά διαφορετικών εναλλασσόμενων φορτίσεων, μία εργαστηριακή δοκιμή που να προσομοιάζει αυτές τις συνθήκες είναι επιθυμητή. Η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης έχει καθιερωθεί εδώ και αρκετά χρόνια γιατί προσομοιώνει αποτελεσματικά τις κυκλοφοριακές συνθήκες φόρτισης. Σε αυτή τη δοκιμή κυλινδρικά δείγματα του υλικού υποβάλλονται σε μια σειρά διαδοχικών φορτίσεων που εφαρμόζονται με μια διακριτή περίοδο παύσης, προσομοιώνοντας έτσι τις καταπονήσεις που προκαλούνται από πολλαπλούς τροχούς που κινούνται στο οδόστρωμα. Η πλευρική τάση που ασκείται στο δοκίμιο προσομοιώνει τις πλευρικές τάσεις που ασκούνται στα στοιχεία των στρώσεων του οδοστρώματος λόγω των υπερκείμενων φορτίων. Η ελαστική (ανακτιήσιμη) αξονική παραμόρφωση του δείγματος που προκύπτει από τη δοκιμή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέτρου επανάκτησης του υλικού.

Για την διεξαγωγή αυτών των τριαξονικών δοκιμών έχουν προταθεί πολλές διαδικασίες και πρότυπα. Κάποιες από τις πρώτες τυποποιημένες διαδικασίες, που προτάθηκαν από τον αμερικανικό οργανισμό αυτοκινητοδρόμων και μεταφορών (American Association of State Highway and Transportation Officials), ήταν η εργαστηριακή δοκιμή AASHTO T274-82 και εν συνεχεία οι δοκιμές T292-91I και T294-92. Αργότερα προτάθηκε το πρωτόκολλο Long Term Pavement Performance (LTPP) P46(1996). Τα πιο σύγχρονα και αποδεκτά πρότυπα είναι τα AASHTO T307-99 (Standard Method of test for Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials) (AASHTO, 2007) και (Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design) (NCHRP1-37A, 2004).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης με βάση τη μέθοδο AASHTO T307. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το δοκίμιο υπόκειται σε μια αλληλουχία φορτίσεων, όπου σε κάθε κύκλο η φόρτιση διαρκεί 0,1 δευτερόλεπτο. Αυτός ο παλμός του φορτίου ακολουθείται από μία περίοδο 0,9 δευτερολέπτων κατά την οποία ασκείται στο δοκίμιο φορτίο ίσο με το 10% της μέγιστης τάσης, προσομοιώνοντας έτσι την αποφόρτιση που επιφέρει το πέρασμα των αξόνων ενός οχήματος από ένα συγκεκριμένο σημείο μιας κοκκώδους στρώσης ενός

πραγματικού οδοστρώματος. Πριν την έναρξη της καταγραφής δεδομένων για το M_r πραγματοποιούνται τουλάχιστον 500 κύκλοι φόρτισης, σε διαφόρους συνδυασμούς πλευρικής και αξονικής τάσης, που αποτελούν την προ-φόρτιση με σκοπό να εξαλείφουν οι όποιες διαταραχές του δείγματος που προκληθήκαν κατά την προετοιμασία του. Στη συνέχεια, ο κάθε ένας από τους 15 συνδυασμούς πλευρικής και πρόσθετης αξονικής τάσης πραγματοποιείται 100 φορές. Για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων, είναι αναμενόμενο το ότι η ελαστική παραμόρφωση αυξάνεται περισσότερο από την μόνιμη, όσο αυξάνονται και οι κύκλοι φόρτισης. Έτσι, έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων η παραμόρφωση είναι για κάθε φόρτιση είναι σχεδόν όλη ανακτήσιμη. Συνεπώς, οι τιμές του μέτρου επανάκτησης M_r υπολογίζονται από τους τελευταίους πέντε κύκλους φόρτισης για κάθε συνδυασμό τάσεων (Li et al, 2010).

Τέλος, ένας άλλος τρόπος εκτίμησης του μέτρου επανάκτησης, εκτός της συσχέτισης με το δείκτη CBR και τις τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης, είναι οι επί τόπου δοκιμές. Αυτές οι δοκιμές περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τις δοκιμές falling weight deflectometer (FWD) και dynamic cone penetrometer (DCP). Τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου πολλές φορές είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα των εργαστηριακών μετρήσεων για το μέτρο επανάκτησης. (Sheng, 2010)

2.3 Παράγοντες επιρροής

Από την εισαγωγή της έννοιας του μέτρου επανάκτησης M_r , έχει διενεργηθεί ένας σημαντικός αριθμός ερευνών, με στόχο την αξιολόγηση των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών οδοστρώσεως και με τη χρήση διαφόρων πειραματικών δεδομένων και πειραματικών διαδικασιών δημιουργήθηκαν πολυάριθμα αριθμητικά μοντέλα. Επίσης μεγάλος όγκος ερευνών όπως οι Hicks and Monismith (1971) και Lekarp et al (2000) έχουν αφιερωθεί στη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν το μέτρο επανάκτησης των εδαφικών υλικών οδοστρώσεως. Οι βασικοί αυτοί παράγοντες επιρροής είναι η συμπύκνωση, η περιεχόμενη υγρασία (βαθμός κορεσμού) και το μέγεθος της φόρτισης. Παράγοντες όπως ο τύπος του εδαφικού υλικού, η κοκκομετρία και η πειραματική διαδικασία επιδρούν επίσης στις ελαστικές ιδιότητες του υλικού οδοστρώσεως.

Συμπύκνωση

Τα δοκίμια κατά την πειραματική διαδικασία πρέπει να προετοιμάζονται στην πυκνότητα που αναμένεται να επιτευχθεί στο έργο ώστε η εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης να είναι πιο ρεαλιστική. Γενικώς, τα δείγματα που συμπυκνώνονται σε μικρότερη πυκνότητα εμφανίζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με αυτά με μεγαλύτερη πυκνότητα. Πιο συγκεκριμένα, οι Trollope et al (1962) πραγματοποίησαν δοκιμές αργά επαναλαμβανόμενου φορτίου σε ομοιόμορφη άμμο και διαπίστωσαν ότι το μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκε έως και 50% μεταξύ χαλαρών και πυκνών δειγμάτων. Ο αριθμός των επαφών μεταξύ των σωματιδίων αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση της πυκνότητας ως αποτέλεσμα της επιπλέον συμπύκνωσης του σωματιδιακού συστήματος. Αυτό, με τη σειρά του, μειώνει τη μέση τάση επαφής που αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο εξωτερικό φορτίο. Ως εκ τούτου, η παραμόρφωση στις επαφές των σωματιδίων μειώνεται και το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται (Kolisoja 1997). Οι Hicks και Monismith (1971) διαπίστωσαν ότι η επίδραση της πυκνότητας είναι μεγαλύτερη για μερικώς θραυστά αδρανή σε σχέση με τα ολικώς θραυστά αδρανή. Επίσης, η επίδραση της πυκνότητας μειώνεται, καθώς το ποσοστό του περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού αυξάνεται. Ακόμη παρατηρείται ότι το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται αξιοσημείωτα με την αύξηση της πυκνότητας μόνο για χαμηλές τιμές ορθής τάσης. Για υψηλά επίπεδα τάσης, η επίδραση της πυκνότητας βρέθηκε λιγότερο έντονη. Τέλος, έρευνες αναφέρουν ότι για τιμές πυκνότητας μεγαλύτερες από τη βέλτιστη συμπύκνωση, το μέτρο επανάκτησης παρουσιάζεται λιγότερο ευαίσθητο στην πυκνότητα.

Περιεχόμενη υγρασία (βαθμός κορεσμού)

Η περιεχόμενη υγρασία θεωρείται ότι είναι ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει το μέτρο επανάκτησης και η επίδραση αυτή έχει γίνει αντιληπτή εδώ και πολύ καιρό. Γενικώς τα δείγματα των δοκιμών πρέπει να προετοιμάζονται σε υγρασία όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες του έργου και να προσεγγίζει τη βέλτιστη. Οι Seed et al (1962) παρατήρησαν για δείγματα συμπυκνωμένα σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης μια γρήγορη αύξηση των ελαστικών παραμορφώσεων. Αντίθετα, για δείγματα που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης οι ελαστικές παραμορφώσεις ήταν χαρακτηριστικά μικρές. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η ελαστική απόκριση των ξηρών και των μερικώς κορεσμένων εδαφικών υλικών είναι παρόμοια, αλλά όσο ο πλήρης κορεσμός προσεγγίζεται η ελαστική συμπεριφορά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά. Η έρευνα των

Hicks & Monismith (1971), που μελέτησαν τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών με υψηλό βαθμό κορεσμού, αναφέρει μια αξιοσημείωτη εξάρτηση του μέτρου επανάκτησης από την περιεχόμενη υγρασία. Πιο συγκεκριμένα έδειξε ότι το μέτρο επανάκτησης μειώνεται σταθερά καθώς η περιεχόμενη υγρασία αυξάνεται πάνω από τη βέλτιστη τιμή της.

Έχει διατυπωθεί από αρκετούς ερευνητές η άποψη ότι η πίεση πόρων είναι αυτή που ελέγχει την παραμορφωσιακή συμπεριφορά και όχι τόσο ο βαθμός κορεσμού. Ωστόσο, οι Thom & Brown (1987) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη υγρασίας σε ένα συγκρότημα κόκκων έχει μια κάποια λιπαντική επίδραση επί των σωματιδίων, και ως εκ τούτου θα αυξήσει την παραμόρφωση αυτού του συγκροτήματος με επακόλουθη μείωση του μέτρου ελαστικότητας ακόμη και χωρίς την ανάπτυξη καθόλου πίεσης πόρων. Τέλος, οι Dawson et al (1996) διαπίστωσαν, μετά από δοκιμές σε διάφορα καλώς διαβαθμισμένα υλικά, ότι για τιμές υγρασίας κάτω από τη βέλτιστη η δυσκαμψία τείνει να αυξηθεί με την αύξηση της υγρασίας, ενώ για μεγαλύτερες της βέλτιστης υγρασίες η δυσκαμψία μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας.

Μέγεθος φόρτισης

Το μέτρο επανάκτησης των εδαφικών υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την φόρτιση στην οποία υποβάλλεται το υλικό εντός του οδοστρώματος. Από τις πρώτες μελέτες σχετικές με την ελαστική απόκριση των υλικών οδοστρώσεως είχε αναφερθεί ότι το μέγεθος της φόρτισης είναι ο παράγοντας με την σημαντικότερη επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας των εδαφικών υλικών. Είναι ευνόητο ότι για δεδομένη φόρτιση η ολική τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Επομένως, η επιλογή της τιμής του μέτρου επανάκτησης πρέπει να γίνει με προσοχή, σε συνάρτηση με την ακριβή τάση που πρόκειται να ασκηθεί στην στρώση (βάσης ή υπόβασης) που μελετάμε ανάλογα με το βάθος που βρίσκεται.

Πολλές έρευνες, όπως αυτές του Hicks (1970) και των Monismith et al. (1967), έδειξαν πολύ υψηλό βαθμό εξάρτησης από την πλευρικά ασκούμενη τάση (σ_3) και από το άθροισμα των κυρίων τάσεων (θ) για το μέτρο επανάκτησης των ακατέργαστων εδαφικών υλικών. Διαπίστωσαν σημαντική αύξηση του μέτρου επανάκτησης με την αύξηση της πλευρικής τάσης και του αθροίσματος των κύριων τάσεων. Πιο συγκεκριμένα οι Monismith et al. (1967) ανέφεραν αύξηση της τάξης του 500% για το μέτρο ελαστικότητας για μεταβολή της πλευρικής τάσης από 20 σε 200 kPa, ενώ αύξηση περίπου κατά 50% παρατηρήθηκε όταν το

άθροισμα των κύριων τάσεων μεταβλήθηκε από 70 σε 140 kPa. Γενικώς, σε σύγκριση με την πλευρική τάση, η διατμητική και η πρόσθετη αξονική τάση (σ_d) έχουν πολύ μικρότερη επίδραση στην δυσκαμψία του εδαφικού υλικού. Ο Hicks (1970) πρότεινε ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι πρακτικά ανεπηρέαστο από το μέγεθος της πρόσθετης αξονικής τάσης (σ_d), δεδομένου ότι δεν παρουσιάζονται εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις. Τέλος όμως, αναγνωρίζει μια ελαφριά μείωση της δυσκαμψίας για χαμηλές τιμές πρόσθετης αξονικής τάσης και μια μικρή αύξηση της σε υψηλά επίπεδα πρόσθετης τάσης (σ_d).

Άλλοι παράγοντες επιρροής

Παλαιότερες έρευνες δείχνουν ότι η δυσκαμψία των κοκκωδών υλικών, που χρησιμοποιούνται ως υλικά οδοστρώσις, εξαρτάται ως ένα βαθμό από το μέγεθος των κόκκων και γενικότερα την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Ένα μέρος των μελετών αφιερώθηκε στην επίδραση που έχει στην δυσκαμψία του υλικού οδοστρώσις, το ποσοστό του περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού (Παιπάλη ή φίλλερ χαρακτηρίζεται το λεπτόκοκκο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής (αμερικάνικο) No 200 (0,074 mm)). Η βιβλιογραφία δεν είναι τόσο σαφής όσον αφορά τον παράγοντα αυτό. Μια γενικότερη θεώρηση θα μπορούσε να είναι ότι όταν η ποσότητα της παιπάλης αυξάνεται το μέτρο επανάκτησης μειώνεται. Μία από τις πολλές μελέτες με τα αντικρουόμενα συμπεράσματα πάνω στο θέμα έδειξε, μια αρχική αύξηση και στη συνέχεια μια σημαντική μείωση της δυσκαμψίας καθώς αυξάνεται το ποσοστό της παιπάλης (Jorenby & Hicks 1986). Η αρχική αυτή βελτίωση οφείλεται στην αύξηση των επαφών των κόκκων καθώς τα κενά μειώνονται. Σταδιακά, η περίσσια παιπάλης εκτοπίζει τα μεγαλύτερα σωματίδια, η μηχανική απόδοση καθορίζεται από τις ιδιότητες του λεπτόκοκκου υλικού και έτσι η δυσκαμψία μειώνεται.

Ένα άλλο κομμάτι της βιβλιογραφίας ασχολήθηκε με την επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης στο μέτρο ελαστικότητας. Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των υλικών φαίνεται να έχει κάποια επιρροή στη δυσκαμψία του, αν και αυτή γενικά θεωρείται ήσσονος σημασίας. Μετά από δοκιμές υλικών για διαφορετικές διαβαθμίσεις διαπιστώθηκε ότι τα ομοιόμορφα διαβαθμισμένα υλικά είναι ελαφρώς πιο δύσκαμπτα από τα καλώς διαβαθμισμένα. Ένα άλλο συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι για υλικά με το ίδιο ποσοστό λεπτόκοκκων και παρόμοια κοκκομετρική διαβάθμιση, το μέτρο επανάκτησης παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση του μέγιστου μεγέθους των κόκκων.

Τέλος, ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας είναι ο τύπος του υλικού και πιο συγκεκριμένα το σχήμα των κόκκων του. Οι περισσότεροι ερευνητές, όπως οι Hicks & Monismith (1971), κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή το θραυστό οδοστρώσας, έχοντας γωνιώδεις κόκκους, παρέχουν καλύτερη διασπορά του φορτίου στους κόκκους και επομένως μεγαλύτερο μέτρο επανάκτησης σε σχέση με το άθραυστο χαλίκι, που αποτελείται από πιο στρογγυλεμένους κόκκους. Αν επίσης η επιφάνεια των κόκκων είναι τραχιά αυτό έχει σαν αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές του μέτρου επανάκτησης. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγήθηκαν οι ερευνητές έπειτα από δοκιμές σε διάφορους τύπους υλικών οδοστρώσας, όπου διαπιστώθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας των τραχιών, γωνιωδών, θραυστών υλικών μπορεί να είναι αυξημένο σε σύγκριση με το χαλίκι έως και 50% για χαμηλές ορθές τάσεις και έως 25% για μεγάλες ορθές τάσεις.

2.4 Καταστατικά μοντέλα προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης

Η ελαστική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος κατέστησε δύσκολο για τους ερευνητές να μοντελοποιήσουν τη σχέση μεταξύ της κατάστασης φόρτισης και της δυσκαμψίας του υλικού. Μετά από αρκετές δεκαετίες προσπάθειας, προκειμένου να περιγραφεί η εξάρτηση του μέτρου επανάκτησης M_r από την εντατική κατάσταση, πολλά καταστατικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση διαφόρων μεταβλητών τάσης. Η μεγάλη πλειονότητα των μοντέλων που συναντώνται στη βιβλιογραφία βασίζονται σε απλές διαδικασίες προσαρμογής χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές. Κάποια από τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Για αρχή, οι Dunlap (1963) και Monismith et al. (1967) κατέληξαν ότι το μέτρο επανάκτησης M_r των κοκκωδών υλικών αυξάνεται με την πλευρική τάση και ότι είναι αισθητά ανεπηρέαστο από το μέγεθος της επαναλαμβανόμενης αποκλίνουσας τάσης, εφόσον αυτή δεν πλησιάζει την τάση αστοχίας. Έτσι πρότειναν την ακόλουθη σχέση (2.2), βασιζόμενη στην πλευρική τάση:

$$M_r = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.2)$$

Όπου:

k_1, k_2 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

σ_3 = η πλευρική τάση

Το κύριο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν συμπεριλαμβάνει την αποκλίνουσα τάση (deviator stress) και λόγω του ότι λαμβάνει υπόψη μόνο την πλευρική τάση είναι περισσότερο εφαρμόσιμο σε γαιώδη υλικά (στρώση έδρασης) και όχι τόσο σε ασύνδετα κοκκώδη υλικά.

Ένα από τα πιο δημοφιλή μοντέλα για την περιγραφή της επίδρασης των τάσεων στην δυσκαμψία του υλικού είναι η έκφραση της τιμής του μέτρου επανάκτησης ως συνάρτηση του αθροίσματος των κυρίων τάσεων (Bulk stress). Οι Seed et al. (1967), Brown και Pell (1967), και Hicks (1970) ανέπτυξαν το ακόλουθο μοντέλο, σχέση (2.3), που είναι γνωστό ως μοντέλο K-θ:

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \quad (2.3)$$

Όπου:

k_1, k_2 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

θ = άθροισμα των κυρίων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (ογκομετρική τάση-bulk stress)

Λόγω της απλότητας του, το μοντέλο K-θ είναι ευρέως αποδεκτό από τους μηχανικούς για την ανάλυση της εξάρτησης του ελαστικού μέτρου των κοκκωδών υλικών από τις τάσεις. Ωστόσο, το μοντέλο παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η διατμητική τάση και παραμόρφωση που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Λαμβάνεται υπόψη αποκλειστικά η επίδραση του αθροίσματος των κυρίων τάσεων που σημαίνει ότι το μοντέλο δυνητικά προβλέπει την ίδια τιμή μέτρου επανάκτησης για παραπλήσιες τιμές ογκομετρικής τάσης. Αυτές όμως οι τιμές ογκομετρικής τάσης μπορούν να προκύψουν είτε από μία υψηλότερη πλευρική τάση και χαμηλότερη αποκλίνουσα, είτε από μία χαμηλότερη πλευρική τάση και υψηλότερη αποκλίνουσα τάση. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται επαρκώς στις ρεαλιστικές

συνθήκες φόρτισης και απαιτούνται επιπλέον τασικές παράμετροι. Επιπλέον, το μοντέλο χρησιμοποιείται συχνά με ένα σταθερό λόγο Poisson για τον υπολογισμό της ακτινικής παραμόρφωσης του δείγματος. Πολλές μελέτες (Hicks 1970, Hicks και Monismith 1971) έχουν δείξει ότι αυτή η αυθαίρετη θεώρηση είναι εσφαλμένη, διότι ο λόγος του Poisson δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με τη μεταβολή των τάσεων.

Παραλλαγή του παραπάνω μοντέλου αποτελεί η σχέση (2.4), στην οποία η ογκομετρική τάση είναι κανονικοποιημένη ως προς την ατμοσφαιρική πίεση ($p_a=100$ kPa).

$$Mr = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \quad (2.4)$$

Περαιτέρω έρευνα (Uzan 1985, Witczak και Uzan 1988) έδειξε ότι το μέτρο επανάκτησης εξαρτάται επίσης από το μέγεθος της διατμητικής τάσης. Έτσι ο Uzan (1985) εισήγαγε έναν επιπλέον όρο στο μοντέλο K-θ, προκειμένου να λάβει υπόψη τη διατμητική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών. Ο όρος αυτός είναι η πρόσθετη αξονική τάση (αποκλίνουσα-deviator stress $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει την μείωση της δυσκαμψίας των ασύνδετων κοκκωδών υλικών σε περιοχές υψηλής διατμητικής τάσης, όπως στην άκρη του φορτίου του τροχού. Το μοντέλο του Uzan εκφράζεται από την παρακάτω σχέση (2.5) καθώς και η κανονικοποιημένη του εκδοχή σχήμα (2.6) :

$$Mr = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (2.5)$$

$$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad (2.6)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

θ = άθροισμα των κυρίων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (ογκομετρική τάση-bulk stress)

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

P_a = ατμοσφαιρική πίεση= 100 kPa

Το μοντέλο Uzan χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων λόγω της απλότητας του, καθώς και λόγω του ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα ασύνδετα

κοκκώδη υλικά, είτε λεπτόκοκκα, είτε χονδρόκοκκα. Τέλος σύμφωνα με αρκετές μελέτες (Witczak και Uzan 1988, Kolisoja 1997) το μοντέλο Uzan στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια από το μοντέλο K-θ.

Εξέλιξη του μοντέλου Uzan το μοντέλο που πρότειναν οι Witczak και Uzan (1988), στο οποίο η αποκλίνουσα τάση (σ_d) έχει αντικατασταθεί από την οκτάεδρη διατμητική τάση (τ_{oct}). Το μοντέλο αυτό αποτελεί μία τρισδιάστατη μορφή του μοντέλου Uzan καθώς με την εισαγωγή της οκτάεδρης διατμητικής τάσης προσεγγίζεται καλύτερα η πραγματική κατάσταση φόρτισης του ασύνδετου υλικού του οδοστρώματος, όπου οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις εναλλάσσονται. Είναι γνωστό ως Universal model, λόγω της ικανότητας του να εφαρμόζεται σε όλα τα υλικά ανεξάρτητα από το αν είναι ασύνδετα ή συνεκτικά, και περιγράφεται από την σχέση (2.7), ενώ με τη σχέση (2.8) προσδιορίζεται η οκτάεδρη διατμητική τάση.

$$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad (2.7)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.8)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

θ = άθροισμα των κυρίων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (ογκομετρική τάση-bulk stress)

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

τ_{oct} = οκτάεδρη διατμητική τάση

P_a = ατμοσφαιρική πίεση = 100 kPa

Μία μετατροπή του universal model συνίσταται στο Μηχανιστικό – Εμπειρικό οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide – MEPDG) (NCHRP1-37A, 2004). Το μοντέλο αυτό, γνωστό ως modified universal ή MEPDG model, περιγράφεται από τη σχέση (2.9):

$$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) + 1 \right]^{k_3} \quad (2.9)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

θ = άθροισμα των κυρίων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (ογκομετρική τάση-bulk stress)

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

τ_{oct} = οκτάεδρη διατμητική τάση (σχέση 2.8)

P_a = ατμοσφαιρική πίεση= 100 kPa

Η προσθήκη της μονάδας στον τελευταίο όρο της σχέσης, που αφορά την διατμητική τάση, λύνει το πρόβλημα του μηδενισμού του Mr σε ενδεχόμενη απουσία διατμητικής τάσης. Το μοντέλο MEPDG είναι ευρύτατα αποδεκτό και προτείνεται από πολλούς οδηγούς σχεδιασμού οδοστρωμάτων λόγω των αρκετών πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνει. Ένα από αυτά είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί και για μη συνεκτικά υλικά, όπως τα κοκκώδη υλικά των βάσεων των οδοστρωμάτων, και για συνεκτικά υλικά, όπως τα εδαφικά υλικά. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη του τόσο το φαινόμενο σκλήρυνσης του ασύνδετου υλικού που σχετίζεται με την επίδραση της ογκομετρικής τάσης θ , όσο και το φαινόμενο χαλάρωσης που σχετίζεται με την διατμητική τάση. Η αύξηση αυτή της δυσκαμψίας με την αύξηση της ογκομετρικής τάσης προϋποθέτει σταθερά k_2 θετική, ενώ η αντίστοιχη μείωση της δυσκαμψίας με την αύξηση της διατμητικής τάσης μας οδηγεί σε αρνητική σταθερά k_3 (George, 2004).

Όπως αναφέρθηκε από τους Mazari et al (2014), μία ελαφρώς τροποποιημένη μορφή του μοντέλου MEPDG είναι περισσότερο κατάλληλη για την εκτίμηση της ελαστικής απόκρισης των ασύνδετων υλικών. Πρόκειται για το μοντέλο που πρότειναν οι Ooi et al (2004) και περιγράφεται από τη σχέση (2.10). Ωστόσο, οι περισσότεροι οργανισμοί αυτοκινητοδρόμων εξακολουθούν να χρησιμοποιούν το καταστατικό μοντέλο MEPDG για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης των ασύνδετων στρωμάτων του οδοστρώματος.

$$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} + 1 \right)^{k_2} \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right) + 1 \right]^{k_3} \quad (2.10)$$

Το μοντέλο Ooi με την προσθήκη της μονάδας στον όρο που αφορά την ογκομετρική τάση εξαλείφει το πρόβλημα μηδενισμού του Mr που παρουσιάζει το μοντέλο MEPDG σε

περιπτώσεις που η ογκομετρική τάση θ πλησιάζει στο 0, όπως για παράδειγμα περιοχές μεγάλου βάθους και μακριά από τη φόρτιση.

Στην οκτάεδρη διατμητική και στην οκτάεδρη ορθή τάση βασίστηκε ο Shackel (1973) για την ανάπτυξη ενός καταστατικού μοντέλου για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης. Έπειτα από τη διεξαγωγή τριαξονικών δοκιμών επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε αργιλικά εδάφη κατέληξε στη σχέση 2.11. Ο Shackel υποστήριξε ότι το μοντέλο του είναι εφαρμόσιμο τόσο για κοκκώδη μη συνεκτικά υλικά όσο και για συνεκτικά εδάφη.

$$Mr = k_1 \frac{\tau_{oct}^{k_2}}{\sigma_{oct}^{k_3}} \quad (2.11)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

τ_{oct} = οκτάεδρη διατμητική τάση (σχέση 2.8)

σ_{oct} = οκτάεδρη ορθή τάση= $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = \theta/3$

Ο Itani (1990) έπειτα από πολλαπλή παλινδρομική ανάλυση ανέπτυξε ένα μοντέλο για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης που λαμβάνει υπόψη του αρκετές τασικές μεταβλητές, όπως η αποκλίνουσα τάση, η πλευρική τάση και την ογκομετρική τάση. Στη συγκεκριμένη μελέτη, η οποία είχε σαν στόχο την ανάπτυξη αποδοτικότερων μοντέλων για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών από διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης υλικά. Η σχέση που περιγράφει το μοντέλο Itani είναι η ακόλουθη 2.12 :

$$Mr = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \sigma_d^{k_3} \sigma_3^{k_4} \quad (2.12)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

θ = άθροισμα των κυρίων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ (ογκομετρική τάση-bulk stress)

σ_d = $\sigma_1 - \sigma_3$ = πρόσθετη αξονική- αποκλίνουσα τάση

σ_3 = η πλευρική τάση

P_a = ατμοσφαιρική πίεση= 100 kPa

Ο Pezo (1993), έχοντας παρατηρήσει ότι μοντέλα, όπως το K-θ, που χρησιμοποιούν σαν ανεξάρτητη μεταβλητή το άθροισμα των κυρίων τάσεων δίνουν παρόμοιες τιμές μέτρου επανάκτησης για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης (σε περιπτώσεις όπου έχεις παραπλήσιο άθροισμα αλλά διαφορετικές αξονικές και πλευρικές τάσεις), πρότεινε το μοντέλο UT-Austin. Πρόκειται για ένα μοντέλο αρκετά χρήσιμο για οποιαδήποτε κατάσταση, το οποίο εξαρτάται μόνο από την αποκλίνουσα και την πλευρική τάση και η μαθηματική του έκφραση παρουσιάζεται στη σχέση 2.13.

$$Mr = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (2.13)$$

Όπου:

k_1, k_2, k_3 = σταθερές παλινδρόμησης που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενη τριαξονική δοκιμή

σ_3 = πλευρική τάση

σ_d = $\sigma_1 - \sigma_3$ = πρόσθετη αξονική- αποκλίνουσα τάση

Όλα τα καταστατικά μοντέλα που αναφέρθηκαν είναι απλοποιημένα και εύχρηστα μοντέλα που συσχετίζουν το μέτρο επανάκτησης με διάφορες τασικές παραμέτρους, όπως είναι η ογκομετρική, η αποκλίνουσα, η πλευρική και η οκτάεδρη τάση. Κάποια από αυτά, όπως για παράδειγμα τα μοντέλα K-θ και Dunlap, είναι απλοϊκά βασίζονται σε μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή και αγνοούν σημαντικές παραμέτρους, ενώ κάποια άλλα, όπως για παράδειγμα το MEPDG και το Pezo, είναι πιο εξεζητημένα λαμβάνοντας υπόψη τους την επίδραση τόσο των ορθών όσο και των διατμητικών τάσεων. Οι σταθερές παλινδρόμησης των ανωτέρω μοντέλων μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα μέσω εργαστηριακών δοκιμών καθιστώντας αρκετά πρακτικά για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης των ασύδοτων κοκκωδών υλικών. Για τον προσδιορισμό της ελαστικής απόκρισης των υλικών αυτών με ικανοποιητική ακρίβεια απαιτείται η χρήση τουλάχιστον του μοντέλου Uzan, ενώ μοντέλα, όπως το universal και το MEPDG, αποτελούν πολύ αξιόπιστες λύσεις.

Τέλος, στο πέρασμα του χρόνου έχουν αναπτυχθεί καταστατικά μοντέλα που, εκτός των τάσεων, χρησιμοποιούν και άλλες μεταβλητές και λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση περισσότερων παραμέτρων. Μοντέλα όπως το Anisotropic Boyce model, το μοντέλο Contour και το μοντέλο Thom περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό σταθερών παραμέτρων που πρέπει να υπολογιστούν μέσω εργαστηριακών δοκιμών και παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα. Τα μοντέλα αυτά είναι περισσότερο εξεζητημένα και παρουσιάζουν εξαιρετική προσαρμογή στα εργαστηριακά δεδομένα, όμως η έλλειψη πρακτικότητας είναι ο λόγος που δεν χρησιμοποιούνται ευρέως.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και αφορούν τόσο την προετοιμασία των δοκιμών, όσο και τις πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, περιγράφονται οι τρόποι προσδιορισμού κάποιων βασικών ιδιοτήτων του εξεταζόμενου ασύνδετου αμμοχάλικου, όπως η κοκκομετρική του διαβάθμιση και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το μέτρο επανάκτησης των ασύνδετων υλικών οδοστρώσις εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς σχετίζονται με τις ιδιότητες του υλικού, όπως είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση, το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, ακόμα και η προέλευση του υλικού (αμμοχάλικου). Επιπλέον σημαντικότερη επίδραση στο μέτρο επανάκτησης έχουν οι συνθήκες και ο τρόπος χρήσης του αμμοχάλικου, όπως για παράδειγμα ο βαθμός συμπίκνωσης, το ποσοστό υγρασίας που περιέχει, καθώς και η κατάσταση φόρτισης στην οποία υποβάλλεται. Έτσι λοιπόν κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστούν, μέσω εργαστηριακών δοκιμών, οι παραπάνω ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, συγκεντρώθηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ μεγάλη ποσότητα αμμοχάλικου 3Α το οποίο, έπειτα από μία σειρά πειραματικών διεργασιών για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του, υποβλήθηκε σε τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου για διαφορετικές τιμές υγρασίας και για διάφορους συνδυασμούς τάσεων.

Η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενη φόρτισης αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών φόρτισης του οδοστρώματος και τον προσδιορισμό της ελαστικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο T307-99 (AASHTO 2007) και τα δοκίμια του αμμοχάλικου υποβλήθηκαν σε διαδοχικούς κύκλους φόρτισης μικρής διάρκειας, με ενδιάμεσες παύσεις σε συνδυασμούς τάσεων, όπως ορίζει το ανωτέρω πρότυπο. Τέλος, το πρωτόκολλο αυτό καθορίζει και τις διαδικασίες για την προετοιμασία των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή.

3.2 Θραυστό υλικό οδοστρώσας 3Α

Για την κατασκευή των βάσεων και των υποβάσεων των εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιούνται διάφορα είδη αδρανών υλικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις προέρχονται από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων, από αποθέσεις ποταμών, από απορρίμματα ορυχείων και από υλικά κατεδαφίσεων, εφόσον αυτά πληρούν τις απαιτούμενες προϋποθέσεις, όσον αφορά στη μηχανική τους συμπεριφορά και τις φυσικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, ως αδρανή υλικά για την κατασκευή των βάσεων και των υποβάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τεχνητά αδρανή που προκύπτουν από την κονιορτοποίηση υλικών παλαιών οδοστρωμάτων κατασκευασμένων από ασφαλτόμιγμα ή σκυρόδεμα. Η χρήση αδρανών που προέρχονται από προϊόντα ανακύκλωσης παλαιών οδοστρωμάτων, όπως το ανακτώμενο ασφατικό υλικό RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), είναι αρκετά διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια (Montepara et al, 2012).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε δοκίμια κατασκευασμένα από αμμοχάλικο 3Α. Πρόκειται για ένα θραυστό υλικό οδοστρώσας που παράγεται από μηχανική επεξεργασία και θραύση πετρωμάτων ασβεστόλιθου στο λατομείο και έπειτα από μία διαδικασία κοσκίνισματος προκύπτει το αμμοχάλικο 3Α. Το όνομα 3Α οφείλεται στην κοκκομετρική του διαβάθμιση και το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου, καθώς ο μεγαλύτερος κόκκος πρέπει να διέρχεται από το κόσκινο 3" (76,2 mm) και το υλικό να ακολουθεί διαβάθμιση Α. Η παραπάνω κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται από τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές Οδοστρώσας ΠΤΠ Ο-150 και ΠΤΠ Ο-155 που αφορούν την κατασκευή των υποβάσεων και των βάσεων των οδοστρωμάτων.

3.3 Προετοιμασία δειγμάτων- Δοκιμή Proctor

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μία σημαντική ιδιότητα των κοκκωδών υλικών οδοστρώσας που επηρεάζει την ελαστική τους συμπεριφορά είναι η κοκκομετρική του διαβάθμιση και το μέγιστο μέγεθος των κόκκων του. Έτσι, διαφορές στη διαβάθμιση οδηγούν σε μεταβολές στη δυσκαμψία του υλικού. Η διαβάθμιση του μεγέθους των κόκκων καθορίζει την δομή του υλικού και τις τάσεις επαφής μεταξύ των κόκκων. Για παράδειγμα, η πυκνή δομή των κόκκων αυξάνει τις τριβές και τις τάσεις μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αυξημένη διατμητική αντοχή και μειωμένη παραμορφωσιμότητα του υλικού. Για αυτό το λόγο, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι προτιμότερο τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις βάσεις και τις υποβάσεις των οδοστρωμάτων να είναι καλά

διαβαθμισμένα, ώστε να επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας των στρωμάτων αυτών. Επομένως είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πριν προβούμε σε οποιαδήποτε άλλη εργαστηριακή δοκιμή.

Η κοκκομετρική ανάλυση του ασύνδετου αμμοχάλικου έγινε σύμφωνα με την Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-03-00:2009 με σκοπό να εξεταστεί η προσαρμογή ή μη του υλικού στις απαιτήσεις της ανωτέρω προδιαγραφής. Η ποσότητα του υλικού που απαιτείται εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος κόκκου, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Απαιτούμενη ποσότητα δείγματος.

Ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου σε mm.	Ελάχιστο βάρος δείγματος σε Kgr.
90	80
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

Στην παρούσα εργασία, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είχε μέγιστο μέγεθος κόκκου περίπου 30 mm επομένως η ποσότητα που απαιτήθηκε για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής του διαβάθμισης είναι περίπου 10 Kgr. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία αυτή είχαν ανοίγματα 0.063, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5 και 40 mm, τα οποία, πριν την έναρξη της διαδικασίας, ζυγίστηκαν ξεχωριστά και το βάρος του καθενός καταγράφηκε.

Είναι απαραίτητο πριν την έναρξη του κοσκινίσματος η απαιτούμενη ποσότητα του υλικού να ξηρανθεί στον κλίβανο σε θερμοκρασία $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ για αρκετές ώρες ώστε να απομακρυνθεί η περιεχόμενη στο υλικό υγρασία. Στη συνέχεια το υλικό είναι έτοιμο να τοποθετηθεί στην κορυφή της στήλης των κοσκίνων και να ξεκινήσει η κοσκίνιση, η οποία γίνεται με τη χρήση δονητικού μηχανήματος (εικόνα 3.1) και διαρκεί 10 λεπτά. Αφού ζυγιστεί η καθαρή ποσότητα υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο, υπολογίζονται για κάθε κόσκινο το ποσοστό του υλικού που συγκρατείται σε αυτό και το ποσοστό του

διερχόμενου υλικού. Με βάση το αθροιστικό διερχόμενο ποσοστό και το χαρακτηριστικό άνοιγμα κάθε κόσκινου χαράσσεται η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού.



Εικόνα 3.1 Αλληλουχία κοσκίνων και το δονητικό μηχάνημα.

Η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού καθορίζει αν αυτό είναι κατάλληλο για χρήση ως αδρανές σε βάσεις και υποβάσεις οδοστρωμάτων. Σύμφωνα με τα Ελληνικά πρότυπα η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων που αναγράφονται στον πίνακα 2 και η σχηματική τους απεικόνιση φαίνεται στην εικόνα 3.2. Ο Τύπος Ι χρησιμοποιείται για την κατασκευή της βάσης ή/και της υπόβασης, ενώ ο Τύπος II χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κατασκευή της υπόβασης.

Η διαβάθμιση του υλικού πρέπει να είναι ομαλή, έτσι ώστε το σχετικό διάγραμμα να μην παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις. Επιπροσθέτως, το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο 4 mm (Π_4), από το κόσκινο 2 mm (Π_2) και από το κόσκινο 1 mm (Π_1) θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις του παρακάτω πίνακα 3. Τέλος, τα διερχόμενα ποσοστά των κοσκίνων θα πρέπει να ικανοποιούν και τις απαιτήσεις του πίνακα 4.

Πίνακας 2 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών

Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2	Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος	
	Τύπος I	Τύπος II
63 mm		100
40 mm	100	85-99 ⁽¹⁾
31,5 mm	85-99 ⁽¹⁾	
20 mm		55-85
16 mm	55-85	
10 mm		35-65
8 mm	35-65	
4 mm	25-50	25-50
2 mm	19-40,5	19-44
1 mm	13,5-31	13,5-38
0,5 mm	8,0-24	8,0-32
0,063 mm	0-11	0-12

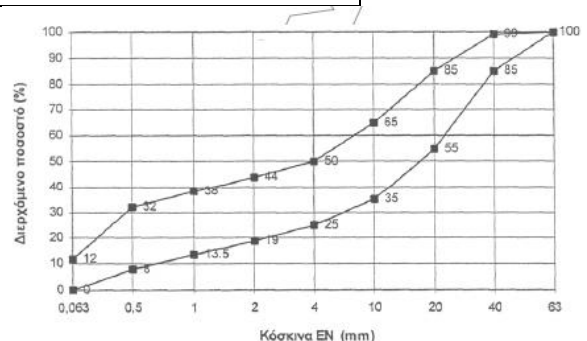
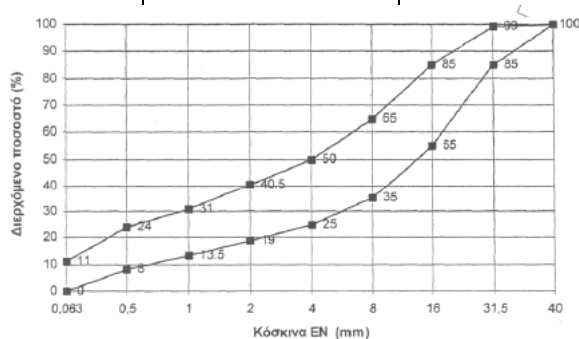
(1) Γίνεται αποδεκτό και το ποσοστό 100%

Πίνακας 3 Ελάχιστο διερχόμενο ποσοστό αδρανών υλικών

Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος		
Κόσκινο 4 mm	Κόσκινο 2 mm	Κόσκινο 1 mm
$\Pi_4 \geq \Pi_2 + 6$	$\Pi_2 \geq \Pi_1 + 6$	$\Pi_1 \geq 1,8 \times \Pi_{0,063}$

Πίνακας 4 Απαιτήσεις διερχόμενου ποσοστού αδρανών υλικών από συγκεκριμένα κόσκινα

Τύπος μίγματος	Διερχόμενο από συγκεκριμένα κόσκινα
I	$10 \leq \Pi_{16} - \Pi_8 \leq 25$ $10 \leq \Pi_8 - \Pi_4 \leq 25$
II	$10 \leq \Pi_{20} - \Pi_{10} \leq 25$ $10 \leq \Pi_{10} - \Pi_4 \leq 25$



Εικόνα 3.2 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης, αριστερά Τύπου I και δεξιά Τύπου II

Ένας άλλος παράγοντας, εκτός από την κοκκομετρική διαβάθμιση, που επηρεάζει την διατμητική αντοχή και την δυσκαμψία των ασύνδετων υλικών που χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα είναι η συμπύκνωση. Με την αύξηση του βαθμού συμπύκνωσης επιτυγχάνεται αύξηση της διατμητικής αντοχής και μείωση της συμπίεστότητας και της διαπερατότητας. Η συμπύκνωση των υλικών αυτών επηρεάζεται έντονα από το ποσοστό υγρασίας που περιέχουν. Η τιμή του ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας για την οποία επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός συμπύκνωσης ονομάζεται βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Επομένως, πριν πραγματοποιηθεί η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας του υλικού μας.

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας και της μέγιστης πυκνότητας γίνεται μέσω της εργαστηριακής δοκιμής Proctor. Υπάρχουν δύο εκδοχές της δοκιμής Proctor η πρότυπη και η τροποποιημένη και αποσκοπούν στην εύρεση της συσχέτισης μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και της πυκνότητας του υλικού. Η μέγιστη πυκνότητα που προκύπτει από τη δοκιμή αποτελεί ένα δείκτη για το επίπεδο συμπύκνωσης που απαιτείται να επιτευχθεί στο πεδίο. Τόσο η πρότυπη όσο και η τροποποιημένη δοκιμή Proctor χρησιμοποιούνται ευρύτατα στο σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων γιατί η σωστή συμπύκνωση των αδρανών υλικών είναι απαραίτητη για την καλή απόδοση των στρώσεων.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, συγκεκριμένη ποσότητα του εξεταζόμενου υλικού, το οποίο έχει προηγουμένως ξηρανθεί για αρκετές ώρες στους 110°C, αναμιγνύεται με καθορισμένη ποσότητα νερού, ώστε να προκύψει ένα δείγμα με συγκεκριμένο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας. Το δείγμα αυτό, εν συνεχεία, συμπυκνώνεται σε στρώσεις σε ένα πρότυπο καλούπι με τη χρήση ενός κόπανου (εικόνα 3.3). Επομένως, διαιρώντας την υγρή μάζα του συμπυκνωμένου δείγματος με τον όγκο του καλουπιού υπολογίζουμε την υγρή πυκνότητα και εφόσον γνωρίζουμε το ποσοστό υγρασίας του συγκεκριμένου δείγματος υπολογίζουμε και την ξηρή πυκνότητα. Επαναλαμβάνουμε αυτή τη διαδικασία αρκετές φορές για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας και από τα ζεύγη υγρασίας- ξηρής πυκνότητας που προκύπτουν σχεδιάζουμε την αντίστοιχη καμπύλη από την οποία προσδιορίζεται το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας στο σημείο όπου μεγιστοποιείται η ξηρή πυκνότητα.



Εικόνα 3.3 Μήτρα δοκιμής Proctor και κόπανος συμπίκνωσης.

Όσον αφορά τις προδιαγραφές του εξοπλισμού και της διαδικασίας που χρησιμοποιούνται στην πρότυπη και την τροποποιημένη δοκιμή Proctor αυτές εναρμονίζονται με το Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 13286-2. Σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο, κατά την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιούνται κυλινδρικές μήτρες διαφορετικών διαμέτρων. Ο τύπος Α έχει διάμετρο 100 ± 1 mm και ύψος 120 ± 1 mm, ο τύπος Β διάμετρο 150 ± 1 mm και ύψος 120 ± 1 mm και ο τύπος C διάμετρο 250 ± 1 mm και ύψος 200 ± 1 mm. Οι πρότυποι κόπανοι που χρησιμοποιούνται διαφέρουν σε βάρος, διάμετρο κεφαλής και ύψος πτώσης ανάλογα και με τον τύπο μήτρας που χρησιμοποιείται. Συνοψίζοντας οι παράμετροι των δύο δοκιμών που προσδιορίζονται από το παραπάνω πρότυπο φαίνονται στον επόμενο πίνακα 5.

Πίνακας 5 Συνοπτικά στοιχεία της πρότυπης και της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (ΕΛΟΤ EN 13286-2)

Τύπος δοκιμής	Χαρακτηριστικά δοκιμής	Μήτρα δοκιμής		
		A	B	C
Πρότυπη Proctor	Βάρος κόπανου (Kgr)	2,5	2,5	15
	Διάμετρος κόπανου (mm)	50	50	125
	Ύψος πτώσης (mm)	305	305	600
	Αριθμός στρώσεων	3	3	3
	Χτυπήματα ανά στρώση	25	56	22
Τροποποιημένη Proctor	Βάρος κόπανου (Kgr)	4,5	4,5	15
	Διάμετρος κόπανου (mm)	50	50	125
	Ύψος πτώσης (mm)	457	457	600
	Αριθμός στρώσεων	5	5	3
	Χτυπήματα ανά στρώση	25	56	98

Εφόσον έχουν γίνει οι προηγούμενοι έλεγχοι και έχουν προσδιοριστεί η κοκκομετρική διαβάθμιση και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του υπό εξέταση αμμοχάλικου ακολουθεί η προετοιμασία των δειγμάτων, ώστε να είναι έτοιμα να υποβληθούν σε τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Η προετοιμασία των δοκιμών έγινε σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99, που ορίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της δοκιμής.

Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι οι διαστάσεις της μήτρας που θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή. Έτσι, για το κάθε δοκίμιο, για να μπορέσει να υποβληθεί σε τριαξονική δοκιμή, σύμφωνα με το ανωτέρω πρότυπο πρέπει ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο να είναι περίπου $h/d=2$. Επομένως στην παρούσα εργασία όλες οι τριαξονικές δοκιμές για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης του ασύνδετου υλικού πραγματοποιήθηκαν σε μήτρες με διάμετρο 150 mm και ύψος 300 mm.

Για την κατασκευή λοιπόν δοκιμών που να έχουν τις παραπάνω διαστάσεις πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία. Πρώτο βήμα ήταν η τοποθέτηση μεγάλης ποσότητας του υλικού στον κλίβανο στους 110°C ώσπου να ξηρανθεί και να αποβάλει εντελώς την περιεχόμενη υγρασία. Έπειτα σε κατάλληλες ποσότητες του ξηρού πλέον υλικού προστέθηκε ακριβής ποσότητα νερού, ώστε να δημιουργηθούν ξεχωριστά μίγματα που να περιέχουν αντίστοιχα 4%, 5%, 6%, 7% και 8% υγρασία. Μετά από καλή ανάμιξη ώστε το κάθε μίγμα να ομογενοποιηθεί, ακολούθησε η τοποθέτηση των μιγμάτων σε πλαστικές σακούλες που σφραγίστηκαν για 48 ώρες προκειμένου η υγρασία να απλωθεί παντού ομοιόμορφα(εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 Ανάμιξη υλικού με νερό και τοποθέτηση σε πλαστική σακούλα

Προκειμένου να γίνει η συμπύκνωση των μίγμάτων και τα δοκίμια να αποκτήσουν το απαιτούμενο σχήμα για την τριαξονική δοκιμή χρησιμοποιήθηκε κατάλληλα διαμορφωμένο καλούπι. Στη βάση του καλουπιού τοποθετήθηκε ένας πορώδης δίσκος και στη συνέχεια τοποθετήθηκε και μία μεμβράνη η οποία εκτείνεται σε όλο το ύψος της μήτρας και μένει κολλημένη στα τοιχώματα λόγω της υποπίεσης που ασκείται αφού ο αέρας αφαιρέθηκε (εικόνα 3.5). Πλέον το καλούπι είναι έτοιμο για να προστεθεί κάποια ποσότητα μίγματος του υλικού και να ξεκινήσει η συμπύκνωση.



Εικόνα 3.5 Καλούπι κατασκευής δοκιμίου και τοποθέτηση μεμβράνης

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές πραγματοποιήθηκε η συμπύκνωση των μιγμάτων του ασύνδετου αμμοχάλικου σε έξι στρώσεις περίπου 5 εκατοστών η κάθε μία. Η συμπύκνωση πραγματοποιήθηκε με μία ηλεκτρική δονητική συσκευή, που φαίνεται στην εικόνα 3.6, με προσοχή να μην δημιουργηθούν κενά και διαταραχτεί το δοκίμιο και να μην σκιστεί η μεμβράνη.



Εικόνα 3.6 Συμπύκνωση με δονητική συσκευή και τοποθέτηση δοκιμίου στη βάση του τριαξονικού κελιού.

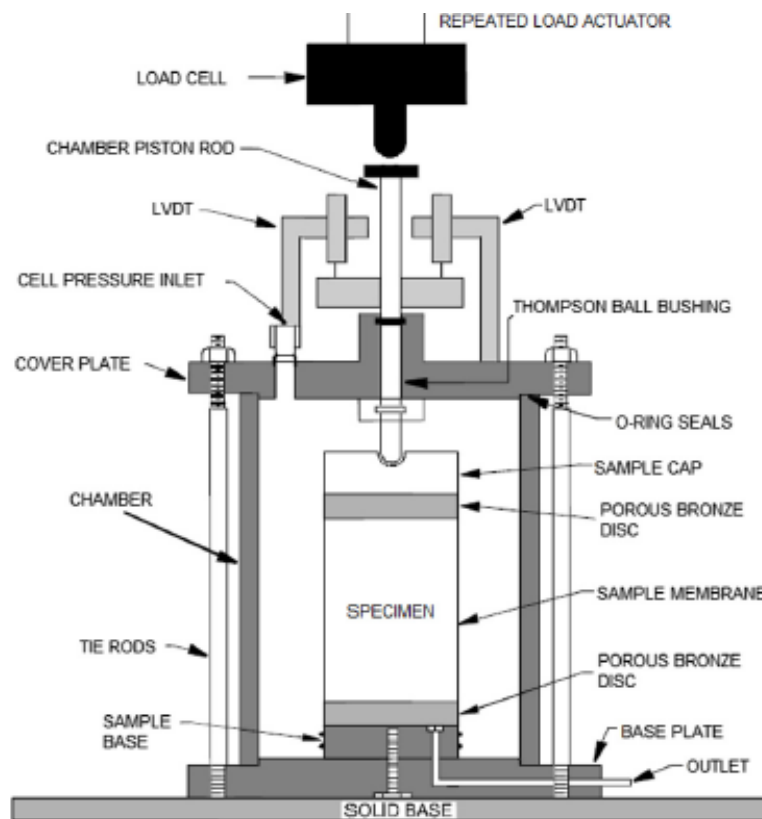
Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε ώστε το άνω άκρο του δοκιμίου να όσο το δυνατόν επίπεδο, ώστε οι τάσεις κατά την τριαξονική δοκιμή να ασκούνται ομοιόμορφα σε αυτό. Τέλος, τοποθετείται πορώδης δίσκος και το ειδικό καπάκι της τριαξονικής συσκευής στο άνω άκρο του δοκιμίου, αφαιρείται το καλούπι και το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στη βάση του τριαξονικού κελιού. Το κελί τριαξονικής πίεσης είναι πλέον έτοιμο να σφραγιστεί για να ξεκινήσει η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου.

3.4 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης

3.4.1 Περιγραφή συσκευής

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η εργαστηριακή δοκιμή που προσομοιάζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος είναι η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενου φορτίου. Για το λόγο αυτό όλα τα υπάρχοντα πρότυπα για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης απαιτούν τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης.

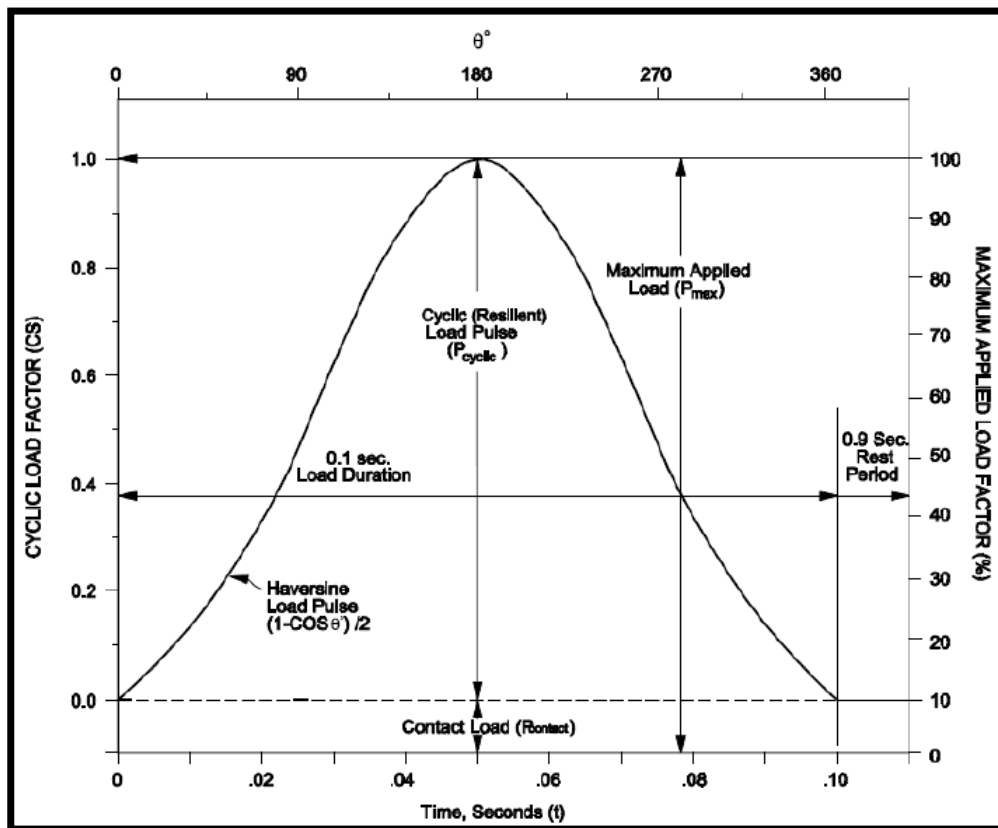
Κατά τη δοκιμή αυτή το προς εξέταση κυλινδρικό δοκίμιο, ανάλογα με το πρότυπο που χρησιμοποιείται, υπόκειται σε μία αλληλουχία επαναλαμβανόμενων φορτίσεων όπου ασκείται στο δοκίμιο συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων ενός εύρους αποκλινουσών και πλευρικών τάσεων. Το ασκούμενο φορτίο ελέγχεται από τον θάλαμο φόρτισης ενώ επίσης μετράται και η ελαστική αξονική παραμόρφωση του δοκίμιου για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Η διάταξη της συσκευής τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99 παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 3.7.



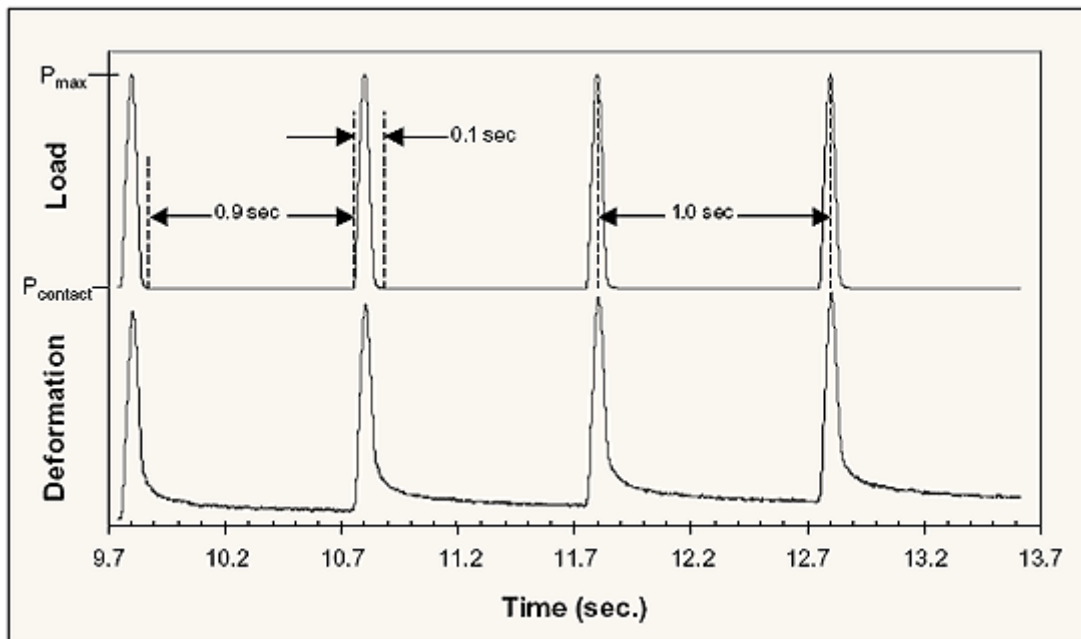
Εικόνα 3.7 Διάταξη συσκευής τριαξονικής φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).

Ένα από τα βασικά μέρη της συσκευής τριαξονικής δοκιμής είναι ο τριαξονικός θάλαμος πίεσης, καθώς περιβάλλει το δοκίμιο και το ρευστό που χρησιμοποιείται για να προκαλέσει την πλευρική συμπίεση. Συνήθως προτιμάται ο αέρας υπό πίεση παρά κάποιο άλλο υγρό και η πίεση του μετριέται με ακρίβεια.

Σημαντικό μέρος της συσκευής τριαξονικής φόρτισης είναι επίσης η συσκευή φόρτισης καθώς με τη βοήθεια της προσομοιώνεται η φόρτιση του οδοστρώματος. Αποτελείται από ένα ενεργοποιητή επαναλαμβανόμενου φορτίου (repeated load actuator), ο οποίος παράγει περιοδικούς παλμούς φόρτισης ημιτονοειδούς μορφής. Η περίοδος των παλμών φόρτισης είναι 1 δευτερόλεπτο, όπου το δοκίμιο φορτίζεται για 0,1 δευτερόλεπτο και η περίοδος παύσης διαρκεί 0,9 του δευτερολέπτου, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.8 και 3.9.



Εικόνα 3.8 Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).



Εικόνα 3.9 Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης και αντίστοιχη παραμόρφωση.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8 το μέγιστο αξονικό φορτίο P_{max} είναι το φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο και αποτελείται από το φορτίο επαφής $P_{contact}$ και το κυκλικό φορτίο P_{cyclic} . Όπου το φορτίο επαφής ασκείται για να διατηρείται σταθερή η επαφή ανάμεσα στο έμβολο και το καπάκι του δείγματος και ισούται με το 10% της μέγιστου αξονικού φορτίου και το κυκλικό αξονικό φορτίο είναι το επαναλαμβανόμενο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο.

$$P_{max} = P_{contact} + P_{cyclic} \quad (3.1)$$

Διαιρώντας τα παραπάνω φορτία P_{max} , P_{cyclic} και $P_{contact}$ με το εμβαδό της διατομής του δοκιμίου προκύπτουν οι αντίστοιχες τάσεις S_{max} , S_{cyclic} και $S_{contact}$ όπου ισχύει:

$$S_{contact} = 10\% S_{max} \quad (3.2)$$

Ένα εξίσου σημαντικό μέρος της συσκευής τριαξονικής φόρτισης αποτελεί ο εξοπλισμός μέτρησης της φόρτισης και των παραμορφώσεων του δοκιμίου. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό κύτταρο (load cell) και από δύο διαφορικούς μετρητές μορφής ελατηρίων (Linear Variable Differential Transducers, LVDT). Το ηλεκτρονικό κύτταρο

βρίσκεται μεταξύ του εμβόλου του θαλάμου (chamber piston rod) και του ενεργοποιητή επαναλαμβανόμενου φορτίου (repeated load actuator) και είναι επιφορτισμένο με τον υπολογισμό των παραπάνω φορτίων. Οι μετατροπείς LVDTs, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά στο εξωτερικό του τριαξονικού θαλάμου, μετρούν την ελαστική παραμόρφωση του δοκιμίου και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρονικό σήμα ώστε να μπορεί να καταγραφεί από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι μετατροπείς αυτοί είναι συνδεδεμένοι έτσι ώστε ο καθένας να καταγράφει ανεξάρτητες μετρήσεις και στο τέλος χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των δύο ξεχωριστών μετρήσεων.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα λόγω της πολυπλοκότητας του πρέπει να ελέγχεται συχνά και πάντα πρέπει να τηρούνται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις ακρίβειας των μηχανισιόμετρων (LVDT). Επομένως, πρέπει να τοποθετούνται με ιδιαίτερη προσοχή και να βαθμονομούνται κάθε 2 εβδομάδες ή κάθε 50 δοκιμές.

3.4.2 Περιγραφή πειράματος

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα δοκίμια των μιγμάτων του ασύνδετου αμμοχάλικου με ποσοστό υγρασίας 4%, 5%, 6%, 7% και 8% ετοιμάστηκαν και συμπυκνώθηκαν ακολουθώντας τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.3. Στη συνέχεια, για κάθε δοκίμιο, σφραγίστηκε το κελί τριαξονικής πίεσης και τοποθετήθηκε στην τριαξονική συσκευή και έρχεται σε επαφή με το έμβολο.

Εδώ πρέπει να τονιστεί η σημασία της σωστής τοποθέτησης του δοκιμίων στη συσκευή ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη ανεπτυγμένων πλευρικών δυνάμεων, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις που το έμβολο δεν είναι κάθετο στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου. Έπειτα, τοποθετούνται και βαθμονομούνται τα μηχανισιόμετρα LVDT για την μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων του δείγματος. Τέλος, αφού τοποθετηθούν και τα σωληνάκια αποστράγγισης της συσκευής και ανοιχτούν οι βαλβίδες, για να έχουμε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, είμαστε έτοιμοι για να ξεκινήσει η δοκιμή επαναλαμβανόμενου τριαξονικού φορτίου (εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 Δοκίμιο τοποθετημένο στο θάλαμο φόρτισης.

Όπως έχουμε αναφέρει, σκοπός της συγκεκριμένης εργαστηριακής δοκιμής είναι ο προσδιορισμός του μέτρου επανάκτησης βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων σε συνθήκες φόρτισης όσο το δυνατό πιο κοντά στις συνθήκες φόρτισης στο πεδίο. Επομένως, ο συνδυασμός και η ακολουθία των τάσεων, πλευρικών και αξονικών, που θα ασκηθούν

στο δοκίμιο πρέπει να καλύπτουν όλο το εύρος των φορτίων που θα δεχθεί ένα οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της ζωής του. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω το πρότυπο AASHTO T307-99 καθορίζει όλους τους συνδυασμούς τάσεων που πρέπει εφαρμοστούν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς και τον αριθμό των επαναλήψεων κάθε συνδυασμού (πίνακας 6).

Πίνακας 6 Ακολουθία φορτίσεων τριαξονικής δοκιμής για υλικά βάσεων/υποβάσεων. (AASHTO T307-99)

Ακολουθία φόρτισης	Πλευρική τάση σ_3	Μέγιστη αξονική τάση σ_{max}	Κυκλική τάση σ_{cyclic}	Τάση επαφής $\sigma_{contact}$	Αριθμός επαναλήψεων
	kPa	kPa	kPa	kPa	
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	31,1	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

Κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής οι τιμές των τάσεων που δίνονται από τον παραπάνω πίνακα παρέχονται αυτόματα στη συσκευή μέσω κατάλληλου λογισμικού, ενώ αυτόματα καταγράφονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι αξονικές παραμορφώσεις που μετρούνται από τα μηχανοσκόπια LVDT, σε κάθε κύκλο φόρτισης.

Η πρώτη σειρά φόρτισης, με το νούμερο 0, που παρατηρείται στον πίνακα 6 αποτελεί τη 'προκαταρκτική' σειρά φόρτισης ή αλλιώς 'conditioning' και κατά τη διάρκεια της η

πλευρική φόρτιση είναι 103,4 kPa και ασκείται αξονική ίση με 103,4 kPa για 500 έως 1000 επαναλήψεις. Η φόρτιση αυτή γίνεται με σκοπό να προσομοιωθεί το ιστορικό τάσεων που υπάρχει σε συνθήκες πεδίου. Επίσης με τη φόρτιση αυτή, εξαλείφουμε τυχόν διαταράξεις που μπορεί να έχει υποστεί το δοκίμιο κατά την προετοιμασία ή την μεταφορά του και κενά ή ασυνέχειες κατά την συμπύκνωση. Έτσι το δοκίμιο παίρνει την τελική του μορφή, σταθεροποιώντας το ύψος του. Αν το ύψος του δείγματος συνεχίσει να μειώνεται μετά το πέρας των 500 επαναλήψεων οι φορτίσεις συνεχίζονται μέχρι τις 1000. Σε περίπτωση που το ύψος του δοκιμίου δεν σταθεροποιηθεί και συνεχίζει να μειώνεται, και πιο συγκεκριμένα η πλαστική αξονική παραμόρφωση ξεπεράσει το 5%, η προφόρτιση πρέπει να σταματήσει, καθώς είναι προφανές ότι κάποιο σφάλμα συνέβη στην προετοιμασία ή τη συμπύκνωση του δείγματος. Οι τιμές της παραμόρφωσης που υπολογίζονται κατά τη φάση της προκαταρκτικής φόρτισης δεν καταγράφονται.

Στη συνέχεια εφαρμόζονται κατά σειρά, όπως ορίζει ο πίνακας 6, οι συνδυασμοί φόρτισης 1 έως 15 που πραγματοποιούνται 100 φορές έκαστος. Από αυτές τις 100 παραμορφώσεις που υπολογίζονται σε κάθε κύκλο φόρτισης καταγράφονται οι τελευταίες 5 τιμές. Επομένως συγκεντρώνονται 75 τιμές ελαστικής παραμόρφωσης και επομένως προκύπτουν και 75 τιμές του μέτρου επανάκτησης. Τέλος, αν η πλαστική αξονική παραμόρφωση, σε οποιαδήποτε φάση της δοκιμής, ξεπεράσει το 5% η δοκιμή σταματάει.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

4.1 Γενικά

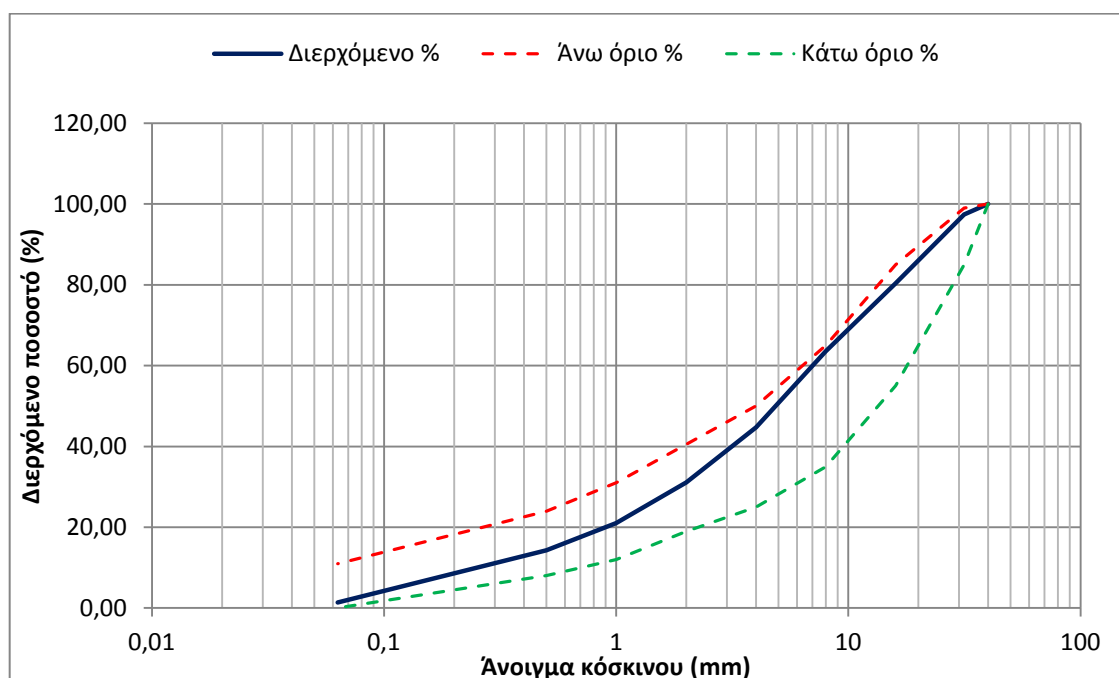
Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκαν ενδελεχώς οι μέθοδοι προσδιορισμού κάποιων βασικών ιδιοτήτων, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση και η σχέση ποσοστού υγρασίας – μέγιστη ξηρή πυκνότητα, των ασύνδετων κοκκωδών υλικών που επηρεάζουν σημαντικά την ελαστική απόκριση των στρωμάτων βάσεων και υποβάσεων των οδοστρωμάτων. Επίσης, παρουσιάστηκε εκτενώς η λειτουργία της συσκευής της τριαξονικής δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης καθώς και των προτύπων διαδικασιών που διέπουν τόσο την εργαστηριακή αυτή δοκιμή όσο και την προετοιμασία των δειγμάτων του εξεταζόμενου υλικού. Τα αποτελέσματα των ανωτέρω εργαστηριακών δοκιμών, που εκτελέστηκαν σύμφωνα με τις πρότυπες διαδικασίες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3, παρατίθενται στη συνέχεια.

4.2 Κοκκομετρική ανάλυση υλικού

Όπως προαναφέρθηκε, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η προέλευση των ασύνδετων υλικών διαμορφώνει εν πολλοίς την ελαστική του συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό μεγάλη ποσότητα αμμοχάλικου χρησιμοποιήθηκε σε διαδικασία κοσκινίσματος, ώστε να σχηματιστεί ολοκληρωμένη άποψη για την κοκκομετρία και κατά συνέπεια την καταλληλότητα του συγκεκριμένου υλικού ως υλικό οδοστρώσας, και σχηματίστηκε η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού. Τα αποτελέσματα της δοκιμής φαίνονται στον πίνακα 7 και η κοκκομετρική καμπύλη στο σχήμα 4.1 .

Πίνακας 7 Κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού

Άνοιγμα κοσκίνου (mm)	% Διερχόμενο	Τύπος Ι (ΕΛΟΤ EN 933-2)	
		Άνω όριο %	Κάτω όριο %
40	100,00	100	100
31,5	97,43	99	85
16	80,37	85	55
8	63,58	65	35
4	44,70	50	25
2	31,11	40,5	19
1	21,01	31	12
0,5	14,27	24	8
0,063	1,41	11	0

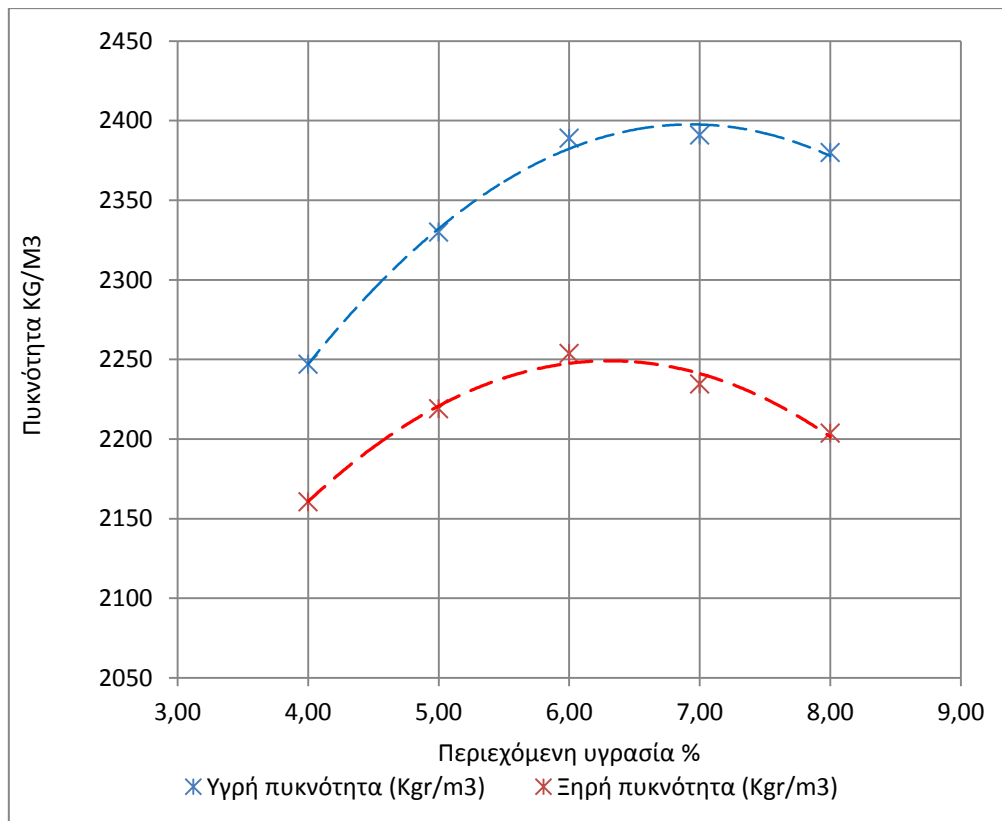


Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού

Παρατηρείται ότι η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού βρίσκεται εντός των τιμών που ορίζει το Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2. Προκύπτει ακόμα από το σχήμα 4.1 ότι το υλικό είναι καλά διαβαθμισμένο. Η καλή διαβάθμιση έχει ως συνέπεια οι λεπτοί κόκκοι να εισχωρούν στα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων γεγονός που προσδίδει στο υλικό αυξημένη δυσκαμψία και αυξημένη αντοχή στη διάβρωση και τη διάτμηση.

4.3 Αποτελέσματα δοκιμής Proctor-Βέλτιστη υγρασία

Ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ του ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας και της ξηρής πυκνότητας είναι αρκετά σημαντικός στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων κι αυτό γιατί η υγρασία που περιέχεται στα ασύνδετα υλικά της βάσης και της υπόβασης επηρεάζει σημαντικά το βαθμό συμπίκνωσης τους και κατ' επέκταση την διατμητική αντοχή και τη συμπίεστικότητα των στρώσεων του οδοστρώματος. Για τον προσδιορισμό λοιπόν του βέλτιστου ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας και της μέγιστης ξηρής πυκνότητας πραγματοποιήθηκε η τροποποιημένη δοκιμή Proctor, με τη χρήση μήτρας τύπου Β, σε αρκετά δείγματα του ασύνδετου αμμοχάλικου. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δείγματα με ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας 4%, 5%, 6%, 7% και 8%. Τα αποτελέσματα της δοκιμής και η καμπύλη ξηρής πυκνότητας – ποσοστού υγρασίας που προέκυψε φαίνονται στον πίνακα 8 και το σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-περιεχόμενης υγρασίας του υλικού

Πίνακας 8 Αποτελέσματα τροποποιημένης δοκιμής Proctor

Ποσοστό υγρασίας (%)	Υγρή πυκνότητα (Kgr/m ³)	Ξηρή πυκνότητα (Kgr/m ³)
4,00	2247	2161
5,00	2330	2219
6,00	2389	2254
7,00	2391	2235
8,00	2380	2204

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 4.2 η μέγιστη ξηρή πυκνότητα προκύπτει για ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας 6%. Επομένως το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας είναι 6% και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα είναι 2254 Kgr/m³.

4.4 Αποτελέσματα δοκιμής τριαξονικής φόρτισης

Από την εκτέλεση της εργαστηριακής τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99 για ασύνδετα υλικά βάσης/υπόβασης, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προέκυψε πληθώρα αποτελεσμάτων. Στον παρακάτω πίνακα 9 παρουσιάζονται μερικά τυπικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την τριαξονική δοκιμή σε δοκίμιο αμμοχάλικου συμπυκνωμένου με περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας 4%.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής για μίγμα 4%, Δείγμα 1.

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	T_{oct} - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,8	25,6	88	12,06784	0,000338	54,945
1	20,5	25,5	87	12,0207	0,000335	55,392
1	20,8	25,6	88	12,06784	0,000332	55,859
1	20,6	25,7	87,5	12,11498	0,000342	54,694
1	20,7	25,5	87,6	12,0207	0,000336	55,106
2	20,5	44,8	106,3	21,11872	0,000521	72,149
2	20,5	44,6	106,1	21,02444	0,000514	72,704
2	21,0	44,7	107,7	21,07158	0,000514	72,784
2	20,6	44,6	106,4	21,02444	0,000516	72,516
2	21,0	44,6	107,6	21,02444	0,000517	72,361

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	T_{oct} - Octahedral Stress $(2^{0.5})/3 * \sigma_d$	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
3	20,7	62,2	124,3	29,32108	0,000705	78,562
3	20,7	61,9	124	29,17966	0,00065	85,909
3	20,8	62,1	124,5	29,27394	0,00061	92,195
3	20,9	62,1	124,8	29,27394	0,000707	78,461
3	20,6	61,9	123,7	29,17966	0,000577	97,055
4	34,5	34,7	138,2	16,35758	0,0005	61,949
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000533	58,666
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000501	61,751
4	34,8	34,5	138,9	16,2633	0,000553	56,295
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000486	63,772
5	34,6	68,9	172,7	32,47946	0,000598	103,849
5	34,5	69,0	172,5	32,5266	0,000596	103,385
5	34,2	68,8	171,4	32,43232	0,000581	106,881
5	34,5	68,8	172,3	32,43232	0,000598	103,862
5	34,6	69,0	172,8	32,5266	0,000589	104,987
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000616	151,128
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000621	149,995
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000635	146,219
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000639	145,321
6	34,6	103,1	206,9	48,60134	0,000635	146,853
7	69,0	69,0	276	32,5266	0,000516	120,915
7	68,8	69,1	275,5	32,57374	0,000536	116,341
7	68,9	69,0	275,7	32,5266	0,000531	115,739
7	68,7	68,8	274,9	32,43232	0,00052	119,298
7	69,0	68,9	275,9	32,47946	0,000534	116,693
8	69,0	138,1	345,1	65,10034	0,000638	194,717
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000638	194,443
8	69,0	137,8	344,8	64,95892	0,000637	194,737
8	68,8	137,8	344,2	64,95892	0,000641	193,51
8	68,8	138,1	344,5	65,10034	0,000638	194,787
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000804	231,367
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000807	230,631
9	69,0	206,9	413,9	97,53266	0,000805	231,329
9	68,7	206,6	412,7	97,39124	0,000805	231,051
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000804	231,357
10	103,5	69,0	379,5	32,5266	0,000529	117,331
10	103,3	68,7	378,6	32,38518	0,000526	117,562

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	T_{oct} - Octahedral Stress $(2^{*}0.5)/3$ $*\sigma_d$	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
10	103,6	69,0	379,8	32,5266	0,000531	116,868
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000527	117,55
10	103,6	69,0	379,8	32,5266	0,00053	117,159
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000589	158,024
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000593	157,21
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,00059	157,984
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,000589	158,069
11	103,5	103,3	413,8	48,69562	0,000589	157,885
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000784	237,359
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000785	237,265
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000787	236,573
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000784	237,487
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000785	237,009
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000583	159,862
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,00058	160,483
13	137,7	103,4	516,5	48,74276	0,000583	159,625
13	138,0	103,5	517,5	48,7899	0,000582	160,155
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000583	159,836
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000643	193,047
14	138,1	137,8	552,1	64,95892	0,000639	194,022
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000642	193,301
14	137,9	138,1	551,8	65,10034	0,000644	192,944
14	138,0	137,9	551,9	65,00606	0,000641	193,539
15	138,1	275,9	690,2	130,0593	0,0009	275,276
15	137,8	275,8	689,2	130,0121	0,000895	277,067
15	138,0	275,6	689,6	129,9178	0,000898	276,49
15	137,8	275,7	689,1	129,965	0,000903	275,347
15	137,9	275,7	689,4	129,965	0,000894	277,161

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την δοκιμή επαναλαμβανόμενης τριαξονικής φόρτισης για όλα τα δείγματα που δοκιμάστηκαν σε ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας 4%, 5%, 6%, 7% και 8% παρουσιάζονται στους πίνακες του παραρτήματος Π1 έως Π5.

5 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά

Στην προσπάθεια συσχέτισης του μέτρου επανάκτησης M_r με τις τιμές των τάσεων, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την δοκιμή τριαξονικής φόρτισης. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκαν ορισμένα από τα καταστατικά μοντέλα που αναφέρθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο προκειμένου να ελεγχθούν η προσαρμογή και η καταλληλότητα τους για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης για διαφορετικούς τιμές τάσεων και υγρασίας.

Το πρώτο μοντέλο που εξετάστηκε είναι το πρότυπο K-θ λόγω του ότι είναι ιδιαίτερος απλό στη χρήση του, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετές περιπτώσεις υλικών και φορτίσεων. Είναι ένα από τα πρώτα μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης το οποίο συνδέει με την ογκομετρική τάση θ (Βλ. σχέση 2.3).

Το μοντέλο Uzan το οποίο εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία εξελιγμένη εκδοχή του μοντέλου K-θ καθώς λαμβάνει υπόψη την επιρροή της διατμητικής έντασης, μέσω της παρεκκλίνουσας τάσης σ_d , την οποία το μοντέλο K-θ αγνοεί (Βλ. σχέση 2.5).

Τέλος, επιλέχθηκε ένα ευρέως διαδεδομένο και ευρύτερης εφαρμογής μοντέλο το MEPDG. Το μοντέλο αυτό είναι αποτέλεσμα συνδυασμού εμπειρικών και μηχανιστικών μεθόδων (Βλ. σχέση 2.9).

Ο έλεγχος των ανωτέρω μοντέλων ως προς την προσαρμογή τους έγινε με τη χρήση του συντελεστή συσχέτισης R^2 . Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή του R^2 τόσο καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται μεταξύ του M_r του μοντέλου με τον αντίστοιχο συνδυασμό τάσεων και τις σταθερές παλινδρόμησης. Επειδή όμως, ο συντελεστής συσχέτισης, παρότι είναι σημαντικός, μπορεί να μην είναι τόσο αξιόπιστος στην περίπτωση μας (είναι καταλληλότερος στην αξιολόγηση γραμμικών μοντέλων) χρησιμοποιήθηκε και ένας άλλος στατιστικός συντελεστής το RMSPE. Το RMSPE (Root Mean Square Percentage of Error) εκφράζει ένα μέσο ποσοστιαίο μέγεθος του σφάλματος πρόβλεψης και όσο μικρότερο είναι

τόσο πιο κατάλληλο είναι το εξεταζόμενο μοντέλο για την εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης.

Τέλος, η εξέταση των σφαλμάτων (residuals-υπόλοιπα) αποτελεί βασικό κομμάτι όλων των στατιστικών μοντέλων, καθώς μπορεί να μας δείξει αν οι υποθέσεις μας είναι εύλογες και η επιλογή του μοντέλου κατάλληλη. Όπως είναι λογικό, ένα μοντέλο παλινδρόμησης, για να είναι κατάλληλο, δεν πρέπει να σφάλλει με τυχαίο τρόπο αλλά θα πρέπει να προβλέπει τιμές υψηλότερες από τις πραγματικές και χαμηλότερες από τις πραγματικές με την ίδια πιθανότητα. Επίσης το μέγεθος του σφάλματος θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο από το μέγεθος της μετρούμενης ποσότητας και από άλλους παράγοντες. Για να επιτυγχάνονται οι ανωτέρω συνθήκες, θα πρέπει το σύνολο των σφαλμάτων να προσεγγίζει την κανονική κατανομή, με μέσο όρο περίπου 0 και κάποια σταθερή διακύμανση, διαφορετικά μεγάλες αποκλίσεις από την κανονική κατανομή υποδεικνύουν ότι κάποιος σημαντικός παράγοντας δεν λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο. Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος κανονικότητας θα γίνει μέσω του ιστογράμματος συχνοτήτων, το οποίο εφόσον έχει σχήμα 'καμπάνας' υποδηλώνει ότι το δείγμα ακολουθεί την κανονική κατανομή, αλλά και μέσω του γραφήματος Normal Probability Plot of Residuals που θα πρέπει να είναι σχεδόν γραμμικό, σημεία δηλαδή του γραφήματος να βρίσκονται κοντά στην διαγώνιο ($x=y$).

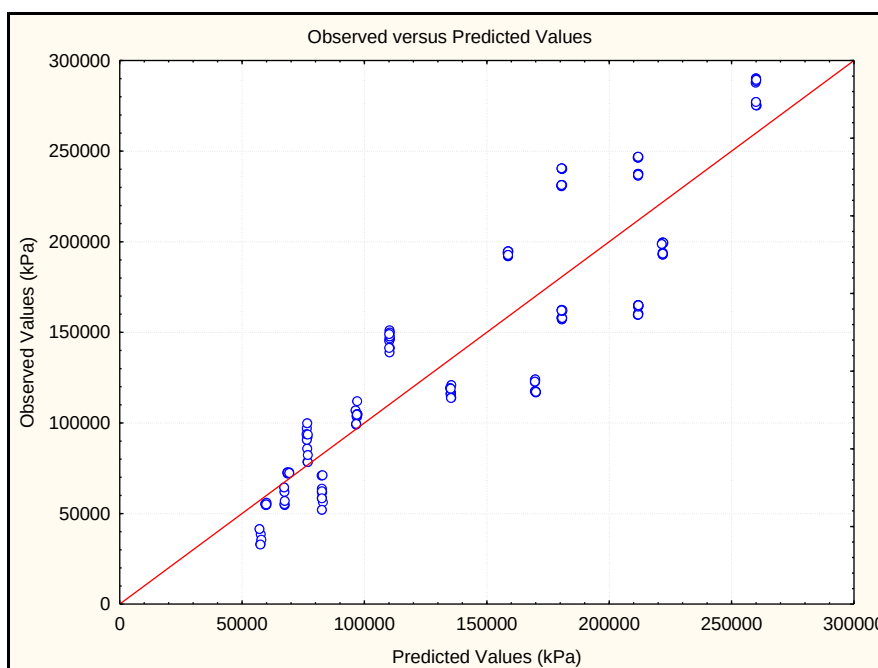
5.2 Προσαρμογή μη γραμμικών μοντέλων

5.2.1 Μίγμα υγρασίας 4%

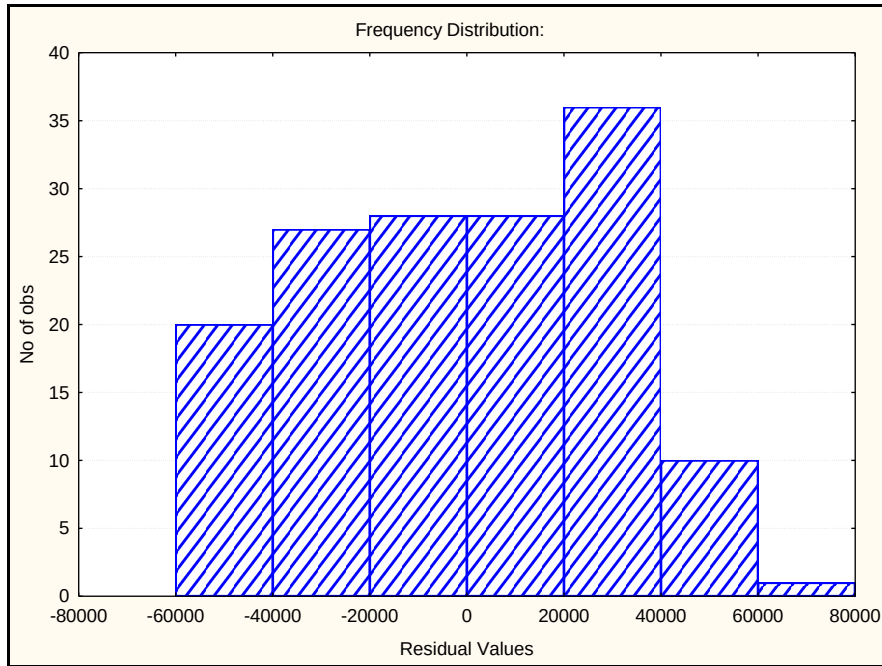
Μοντέλο K-θ

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 2465,095$ και $K_2 = 0,713$

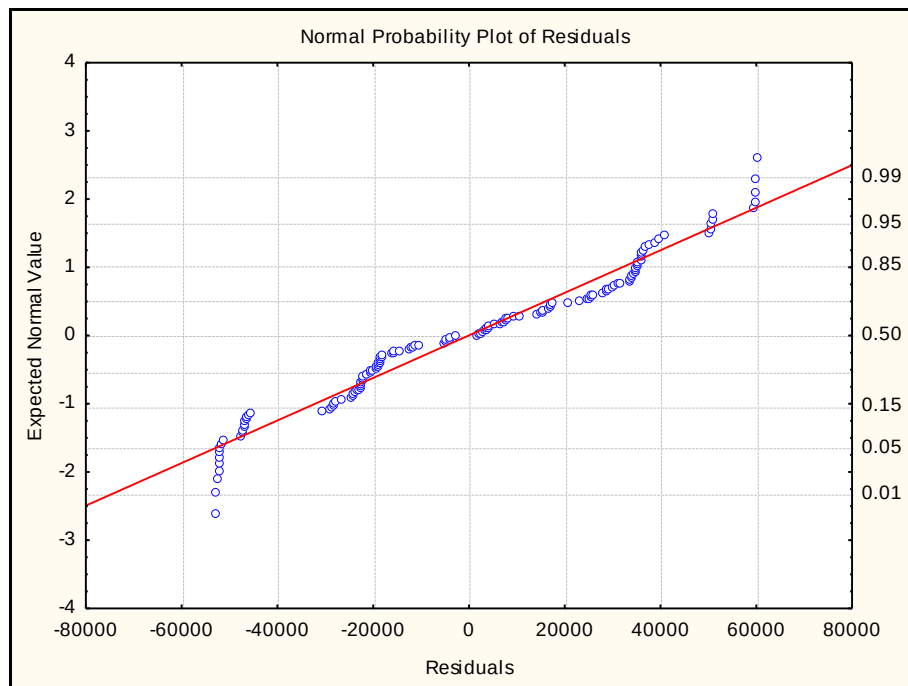
Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.2 και 5.3 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.1 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.2 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ

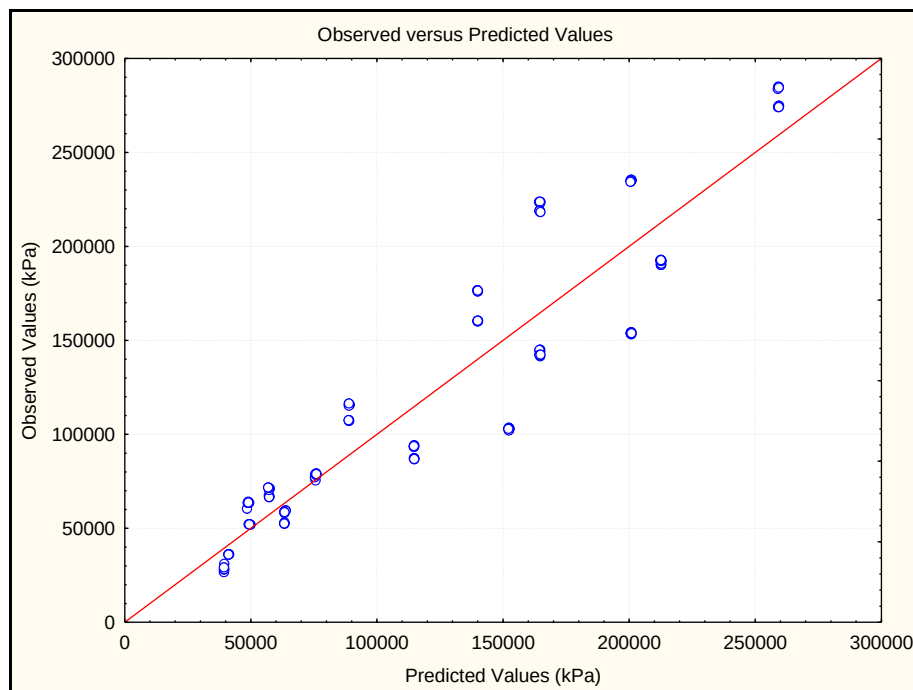


Σχήμα 5.3 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

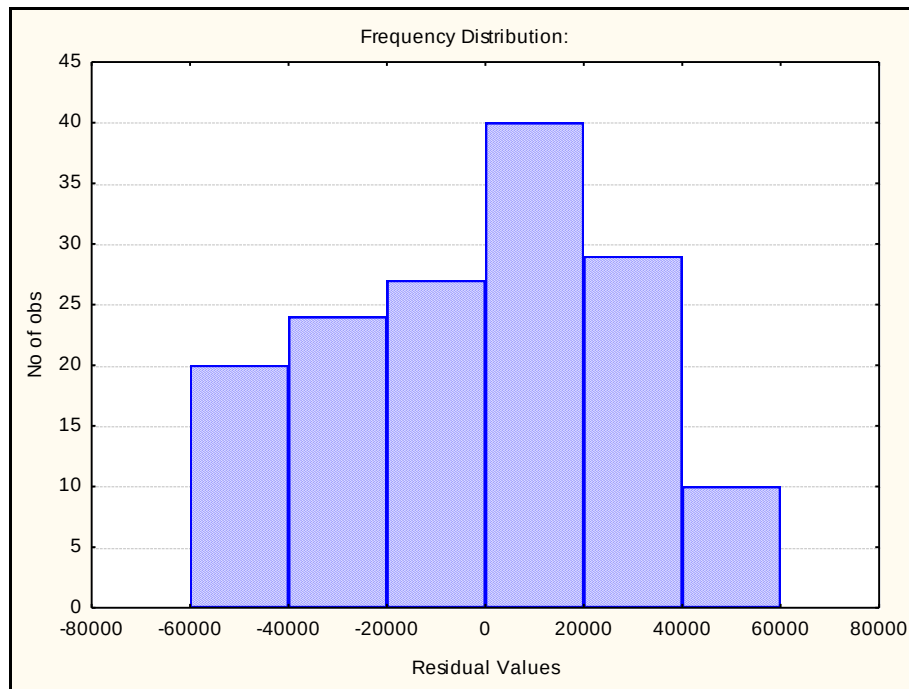
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,80$ και πολύ υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=24,04\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 779,563$ και $K_2 = 0,889$

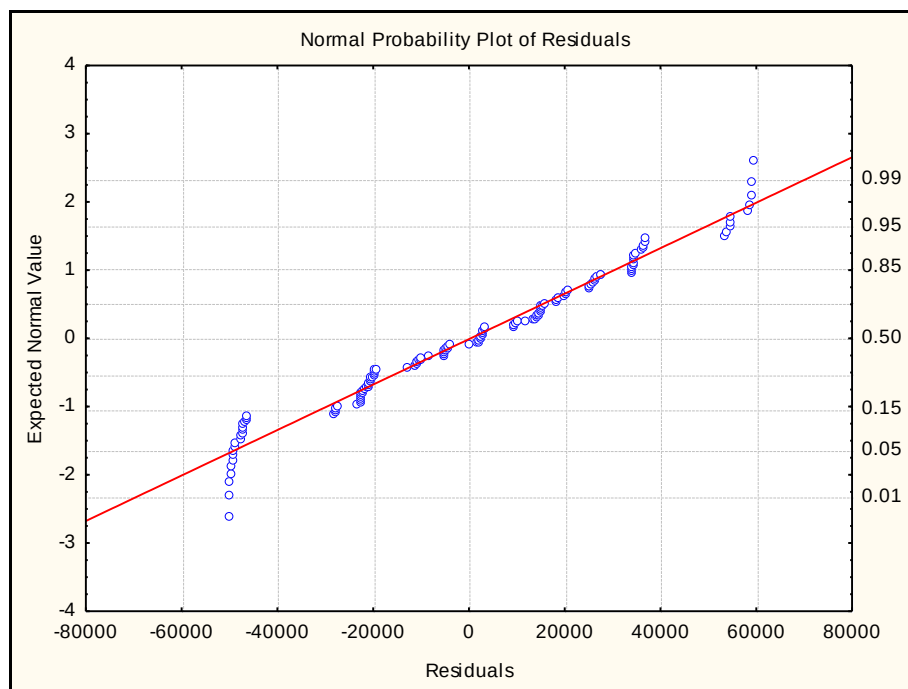
Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.5 και 5.6 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν, όχι σε μεγάλο βαθμό, την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.4 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.5 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ



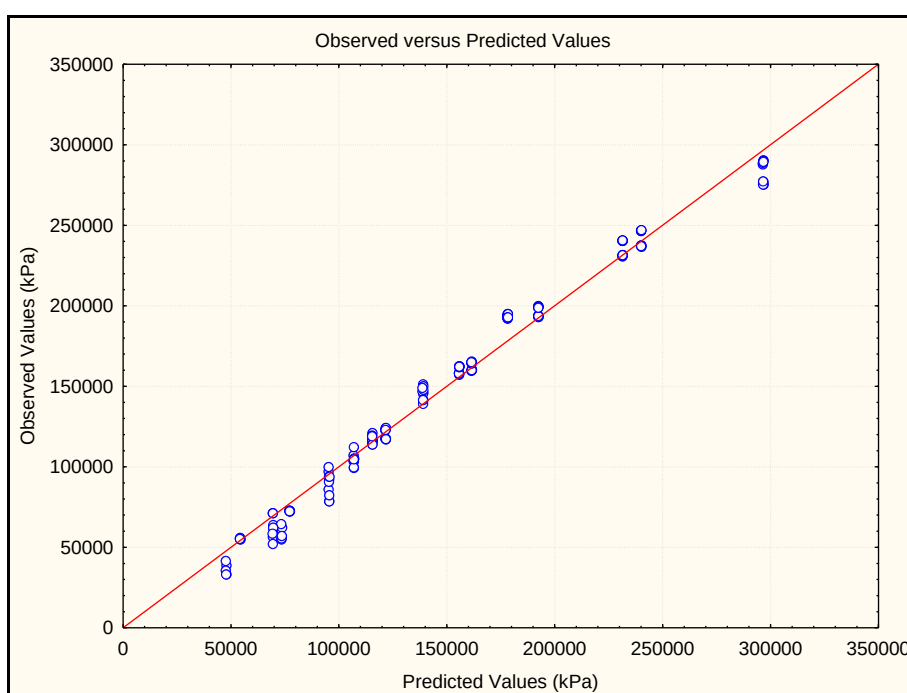
Σχήμα 5.6 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,83$ και πολύ υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=22,59\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

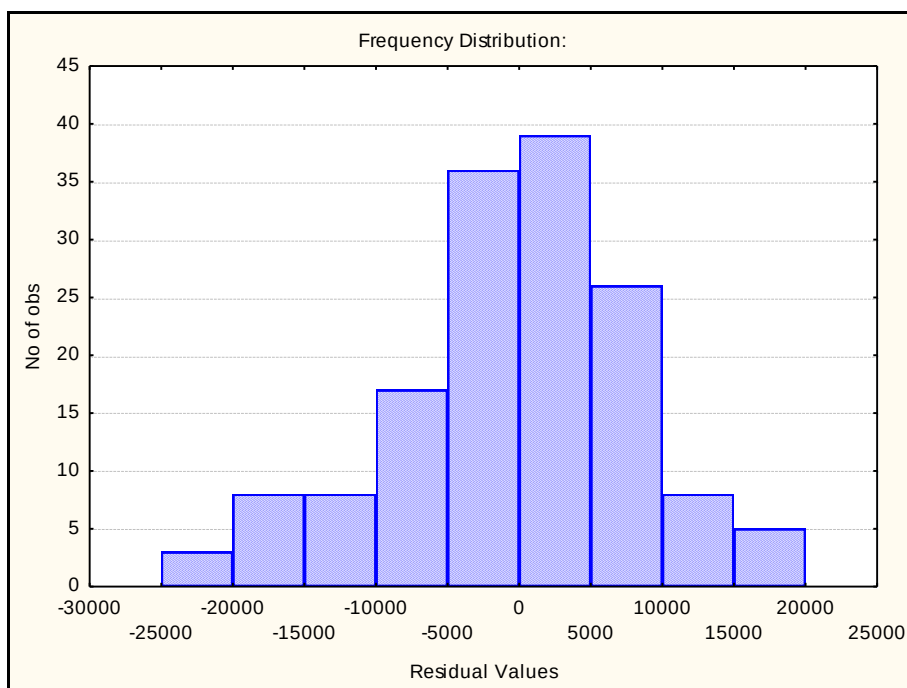
Μοντέλο Uzan

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1 = 4093,559$, $K_2 = 0,164$ και $K_3 = 0,572$

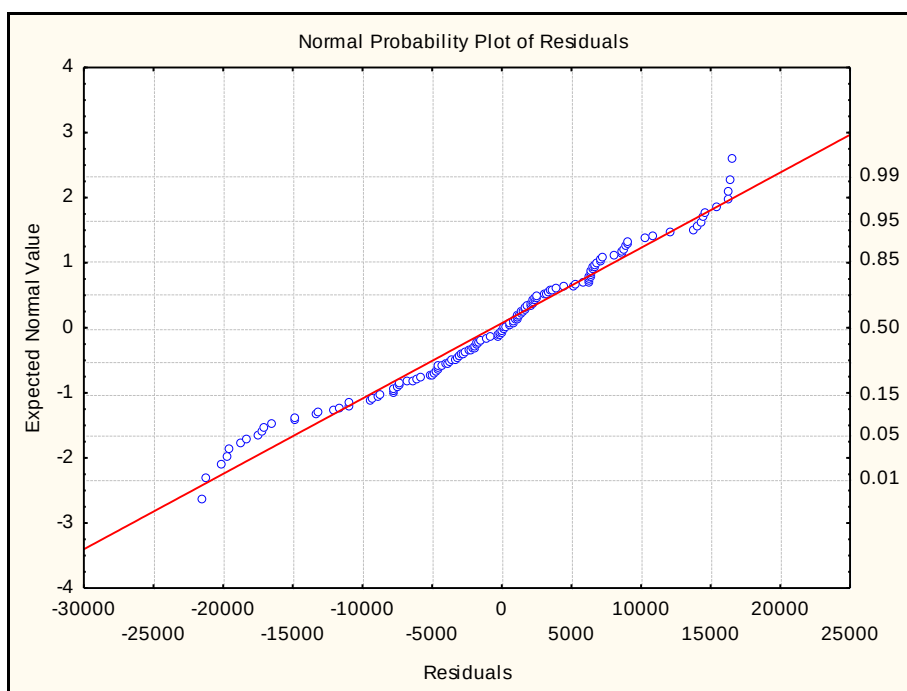
Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.8 και 5.9 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία ακολουθούν την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.7 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.8 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan

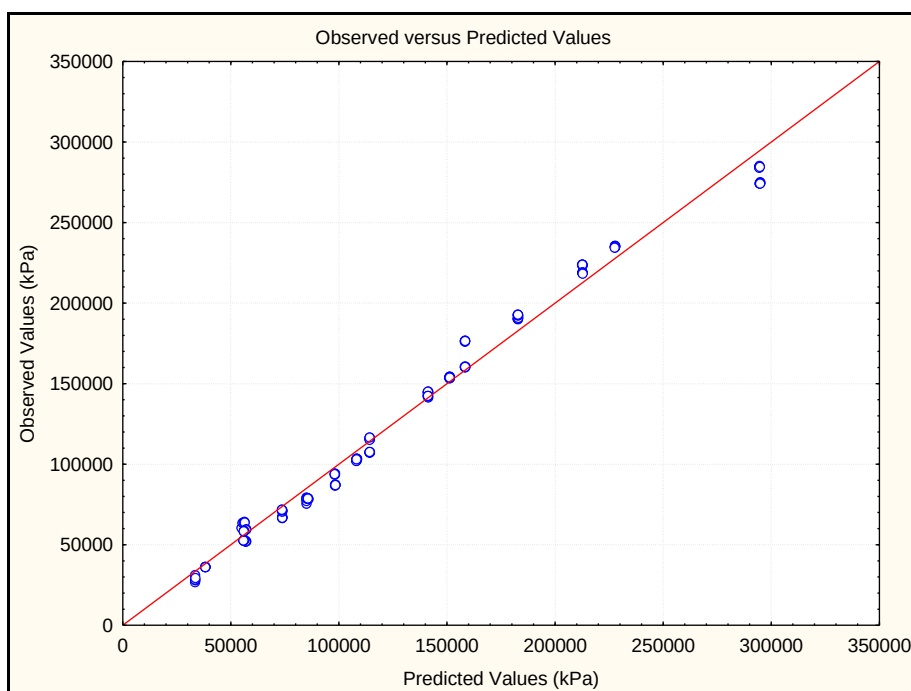


Σχήμα 5.9 Δείγμα1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

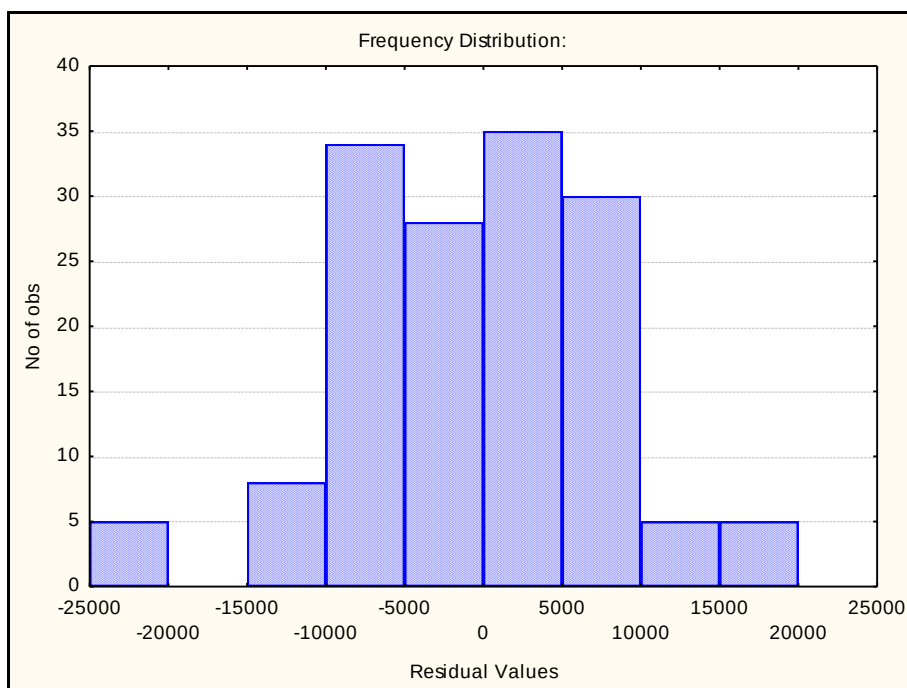
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=10,33\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο U_{zan} είναι: $K_1=1445,478$, $K_2= 0,306$ και $K_3=0,591$

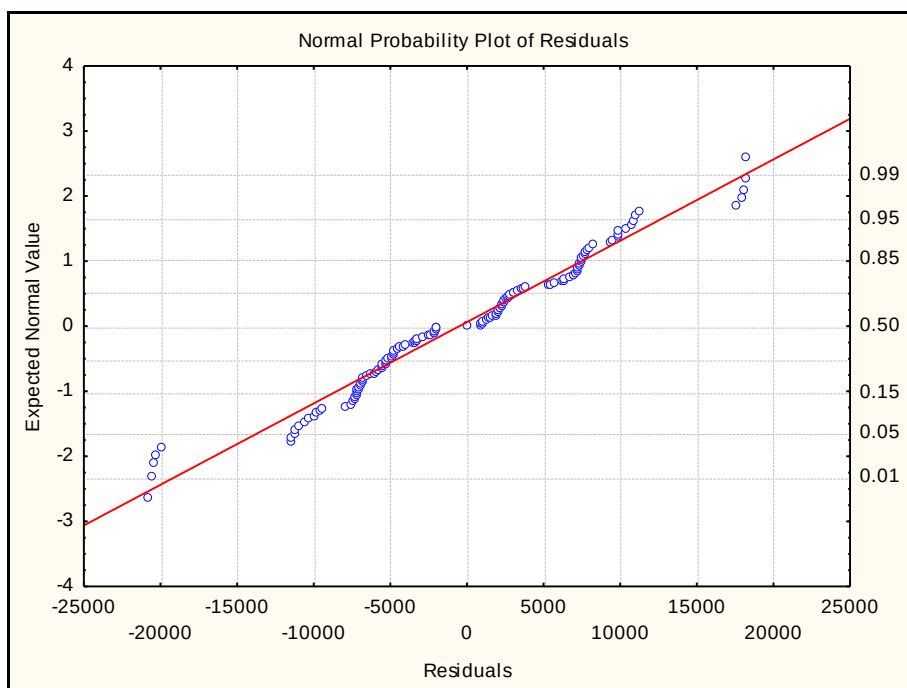
Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.11 και 5.12 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή



Σχήμα 5.10 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου U_{zan}



Σχήμα 5.11 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan



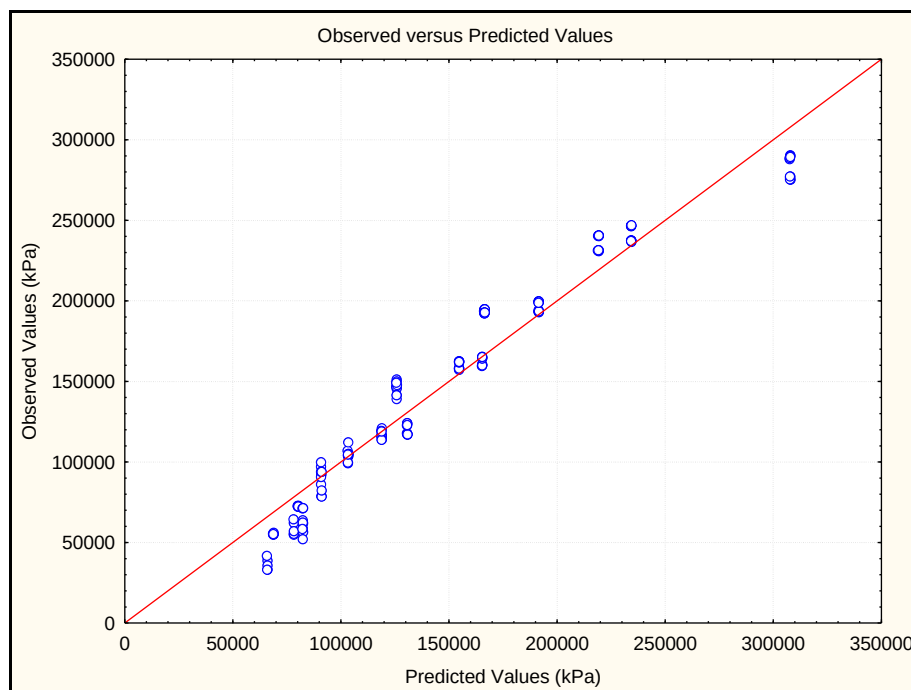
Σχήμα 5.12 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και πολύ χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=7,13\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

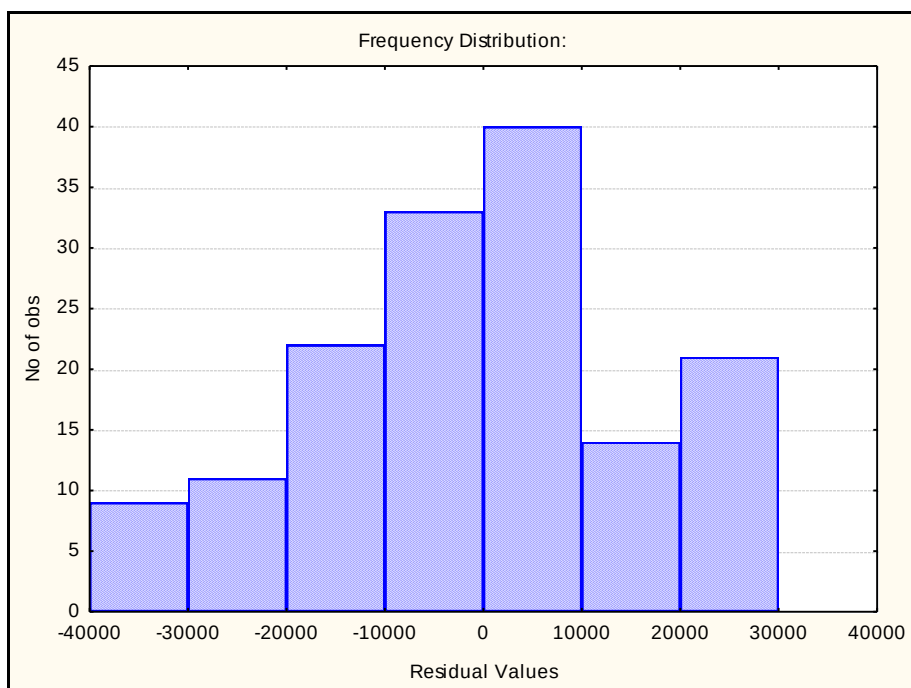
Μοντέλο MEPDG

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1=621,939$, $K_2=0,298$ και $K_3=1,230$

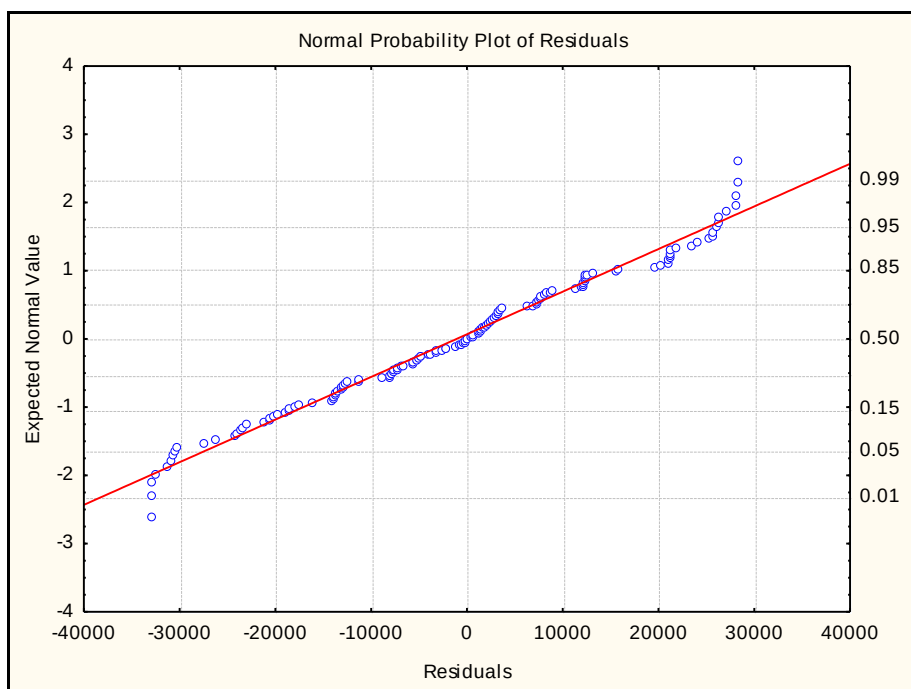
Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.14 και 5.15 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν αρκετά καλά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.13 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.14 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG

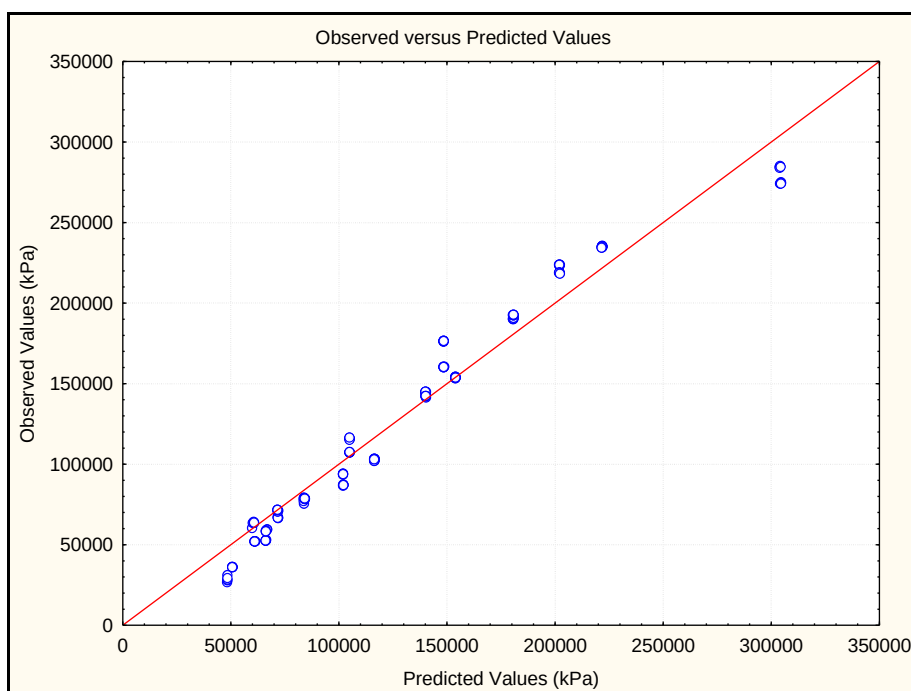


Σχήμα 5.15 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

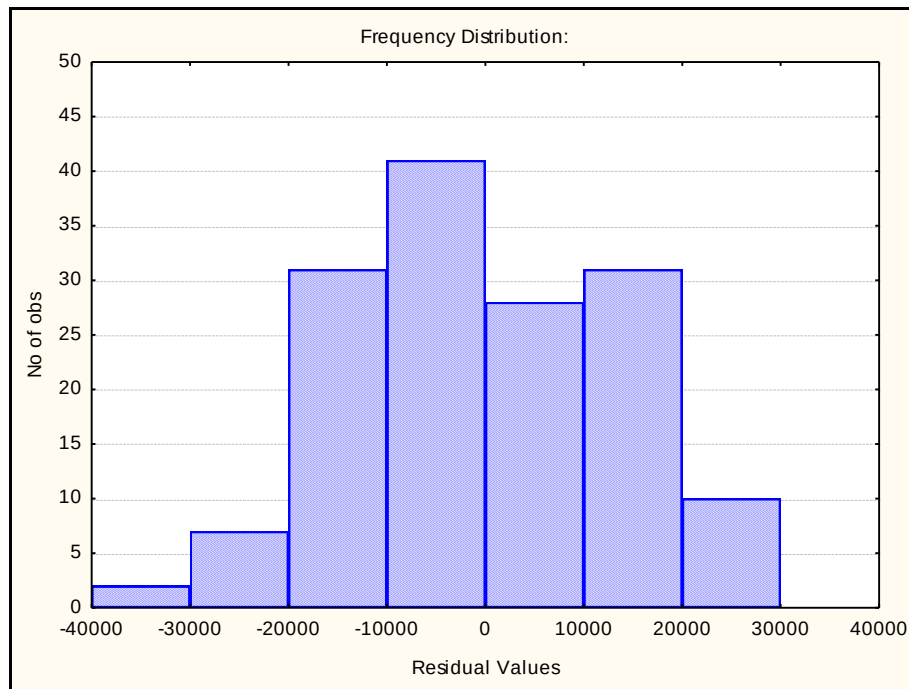
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,95$ και υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=21,04\%$. Επομένως, παρά το μεγάλο σφάλμα πρόβλεψης, το καταστατικό μοντέλο παρουσιάζει υψηλό συντελεστή R^2 και η προσαρμογή του κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο ΜΕΡPDG είναι: $K_1=464,651$, $K_2= 0,417$ και $K_3=1,290$

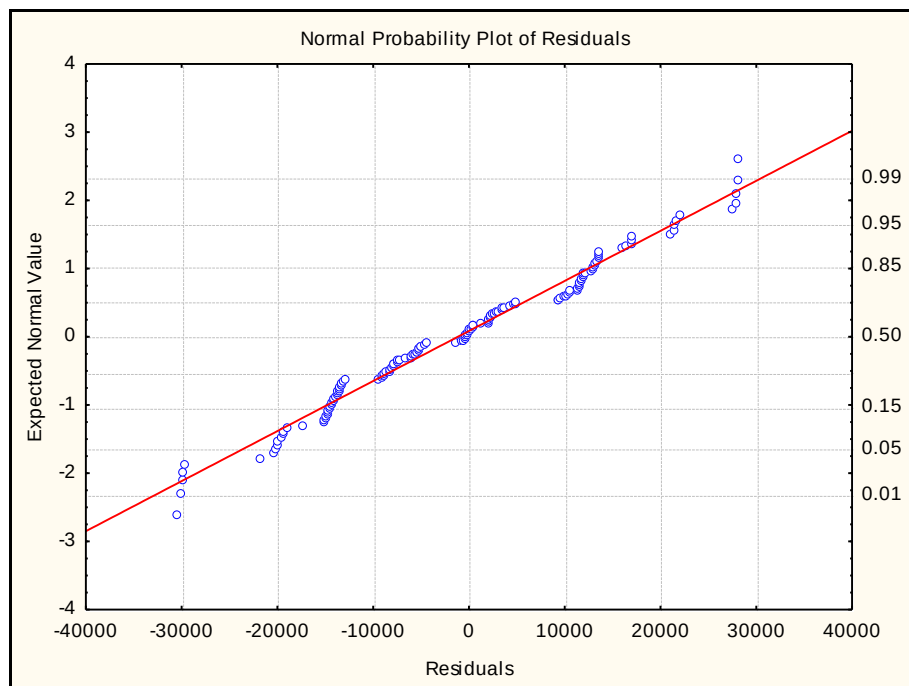
Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.17 και 5.18 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.16 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου ΜΕΡPDG



Σχήμα 5.17 Δείγμα 2: Ιστογράμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.18 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

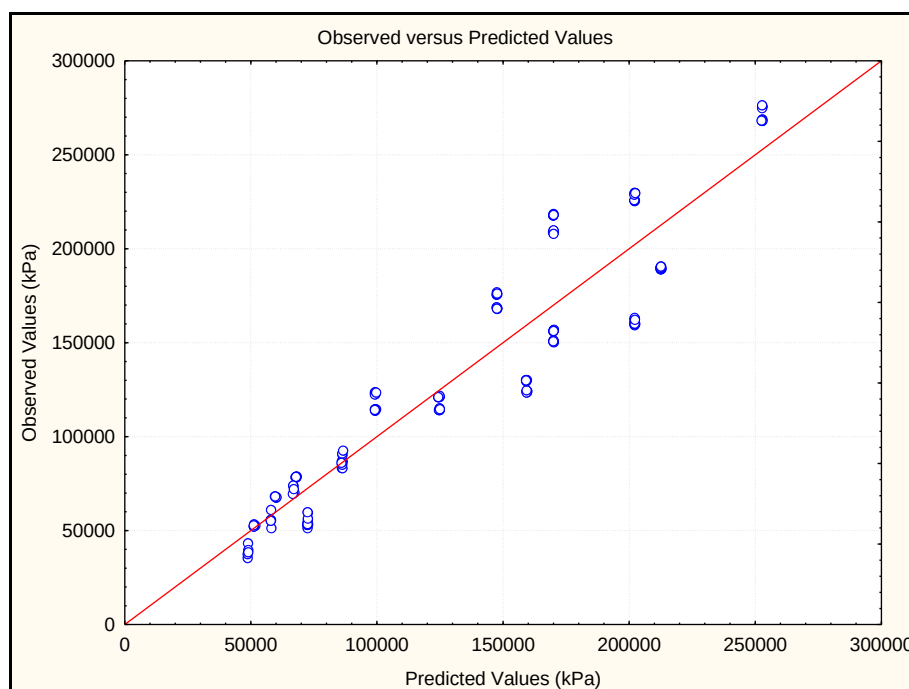
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=96,52$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=17,77\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

5.2.2 Μίγμα υγρασίας 5%

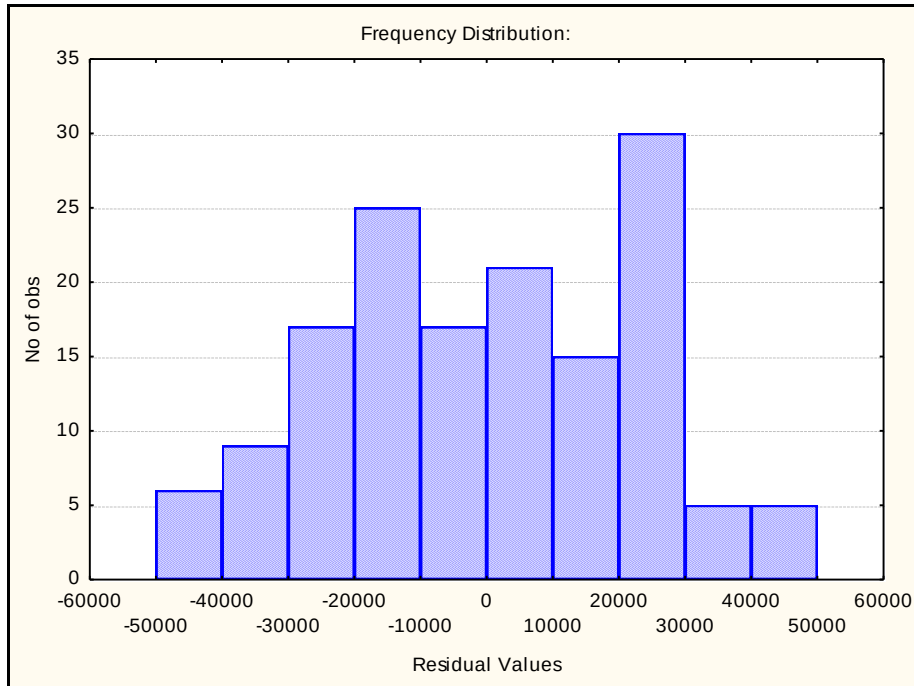
Μοντέλο K-θ

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 1590,805$ και $K_2 = 0,775$

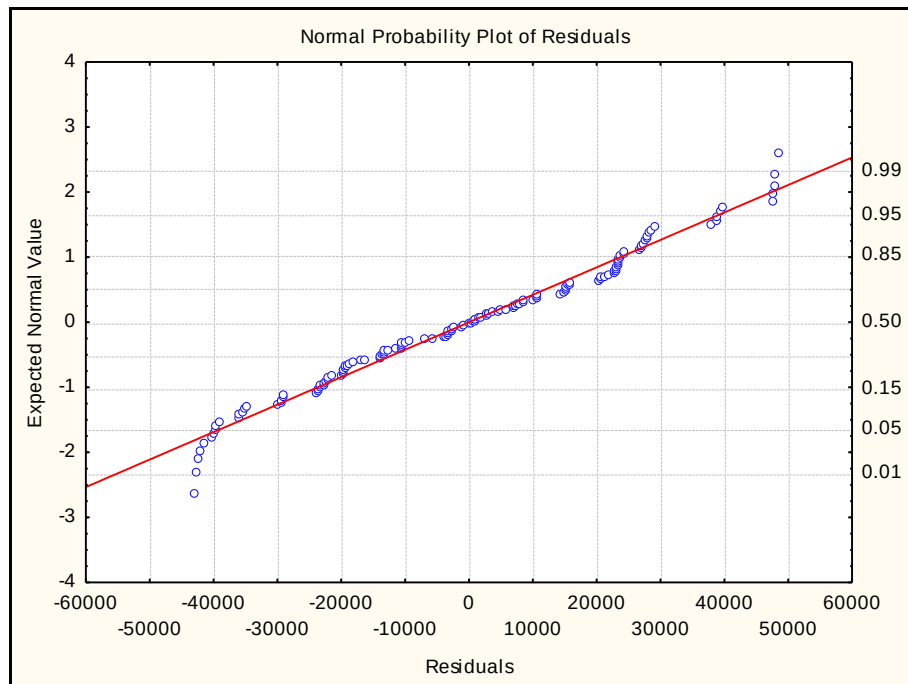
Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.20 και 5.21 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.19 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.20 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ

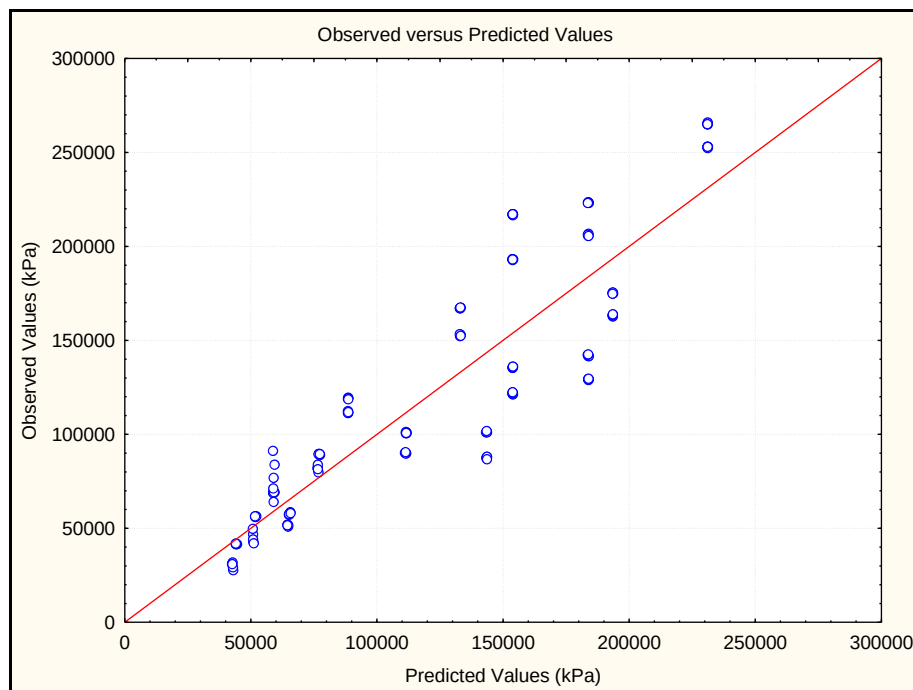


Σχήμα 5.21 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

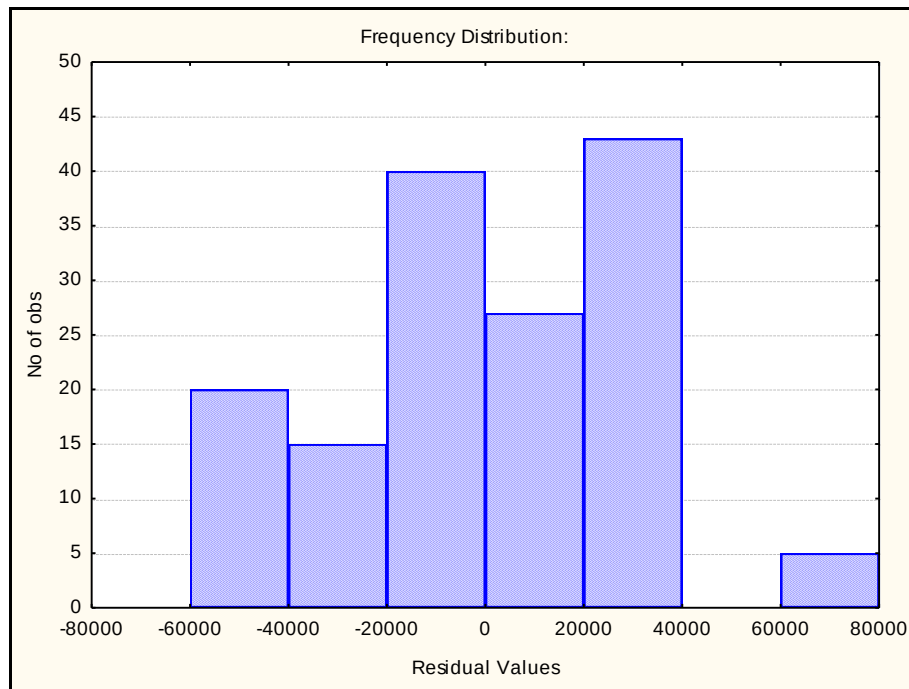
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε αποδεκτός συντελεστής $R^2=0,88$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=17,15\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1=1269,052$ και $K_2= 0,796$

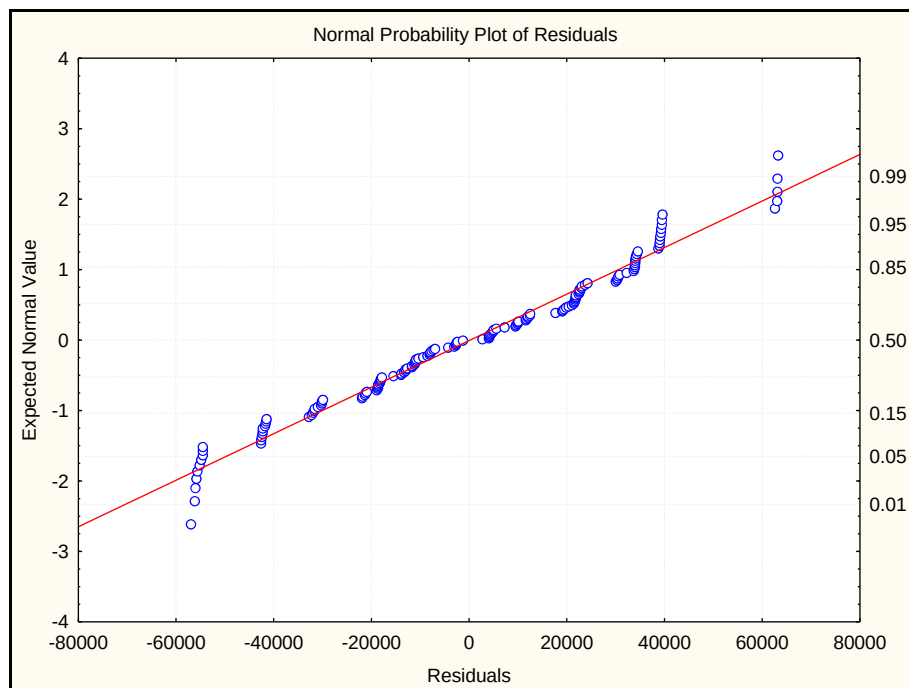
Στο σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.23 και 5.24 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.22 Δείγμα 2:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.23 Δείγμα 2: Ιστογράμμο συχνότητων του μοντέλου K-θ



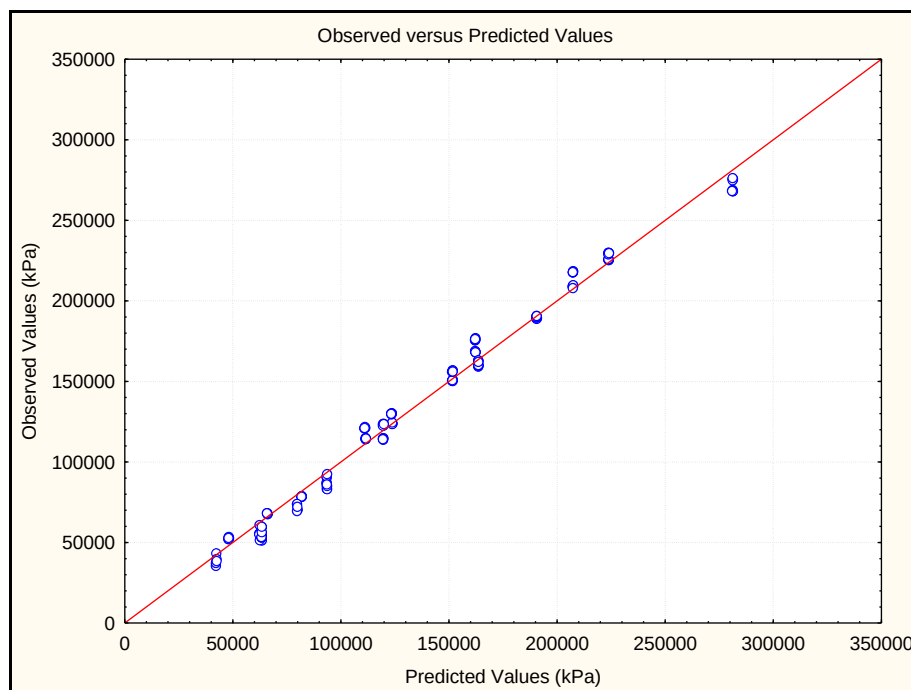
Σχήμα 5.24 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,78$ και πολύ υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=24,62\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

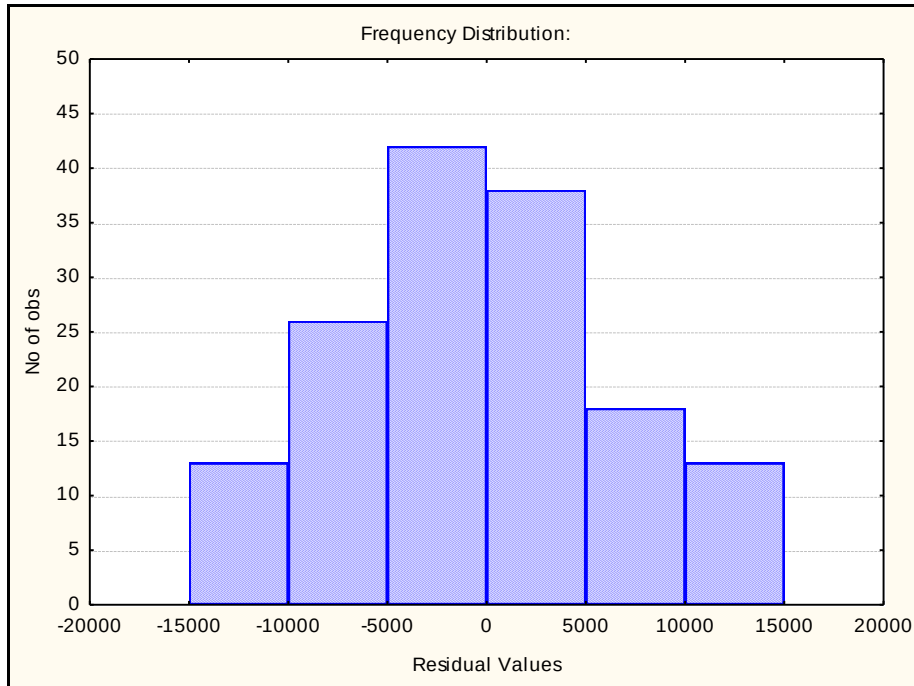
Μοντέλο Uzan

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1 = 2374,334$, $K_2 = 0,342$ και $K_3 = 0,452$

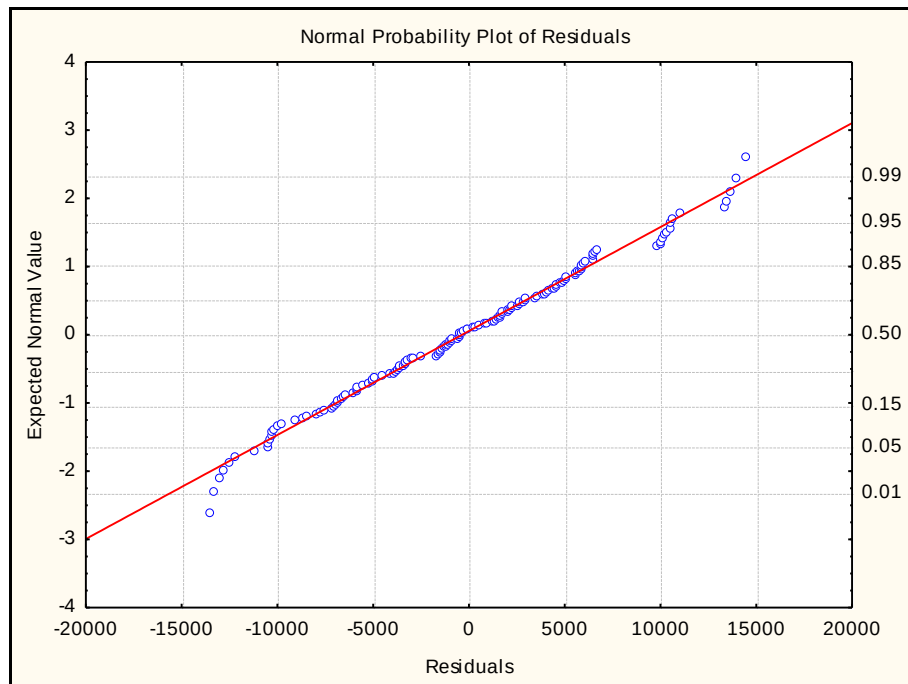
Στο σχήμα 5.25 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.26 και 5.27 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία ακολουθούν την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.25 Δείγμα 1:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.26 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan

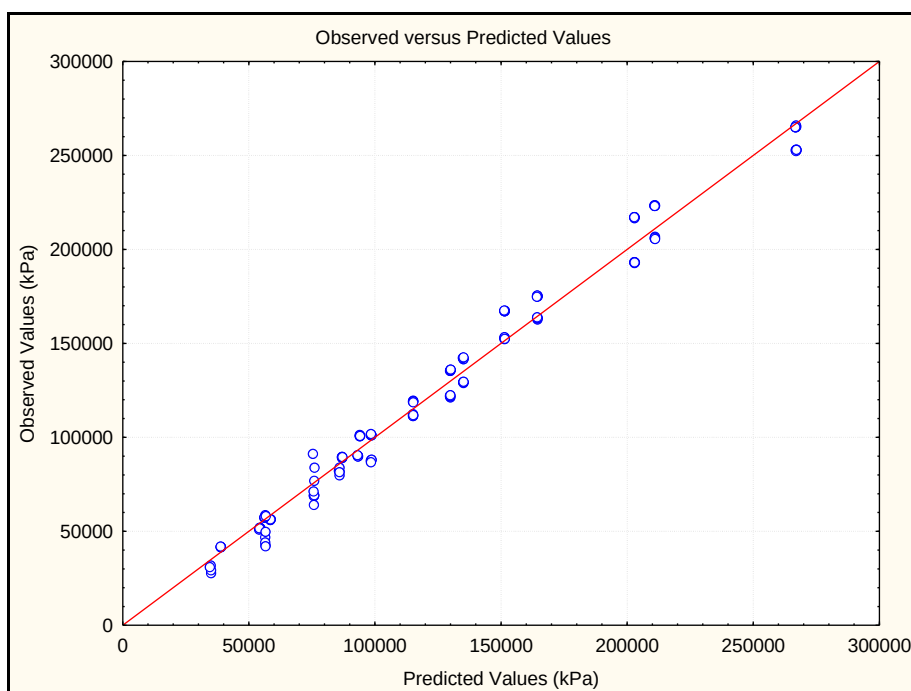


Σχήμα 5.27 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

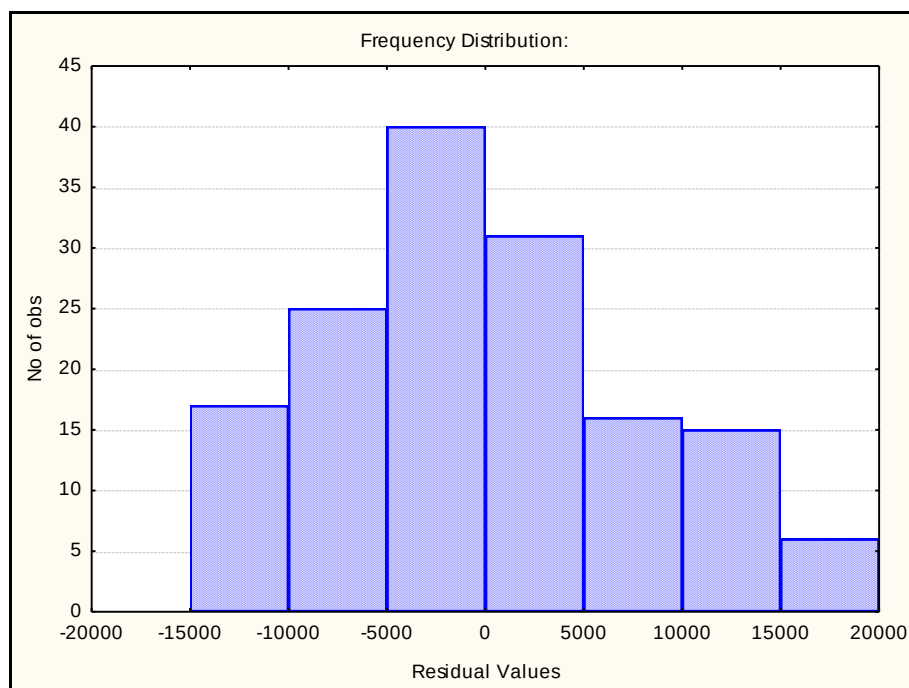
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και πολύ χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=7,19\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1=2296,109$, $K_2=0,175$ και $K_3=0,643$

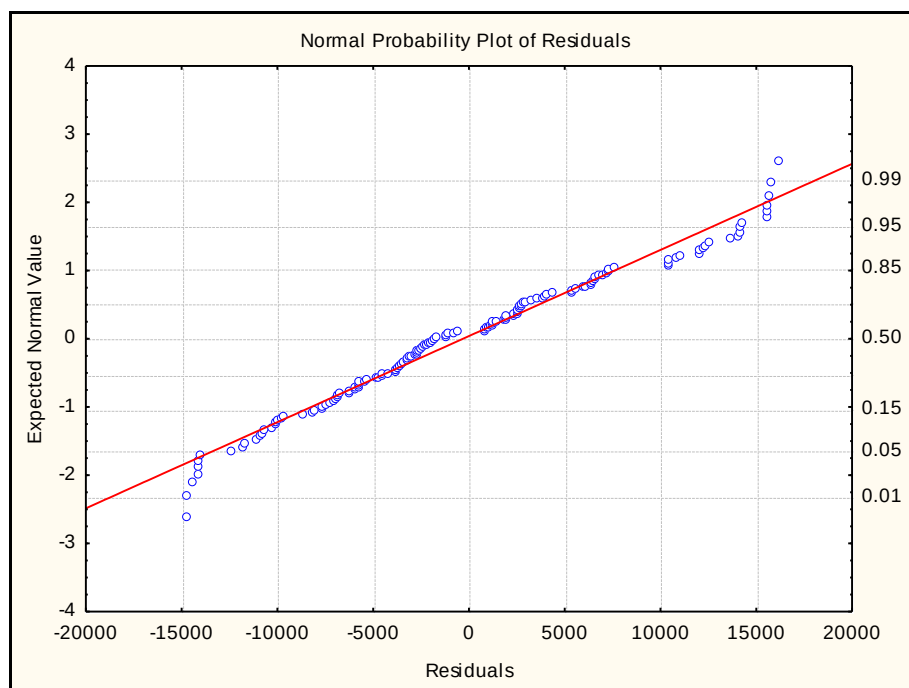
Στο σχήμα 5.28 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.29 και 5.30 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν πολύ καλά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.28 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.29 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan



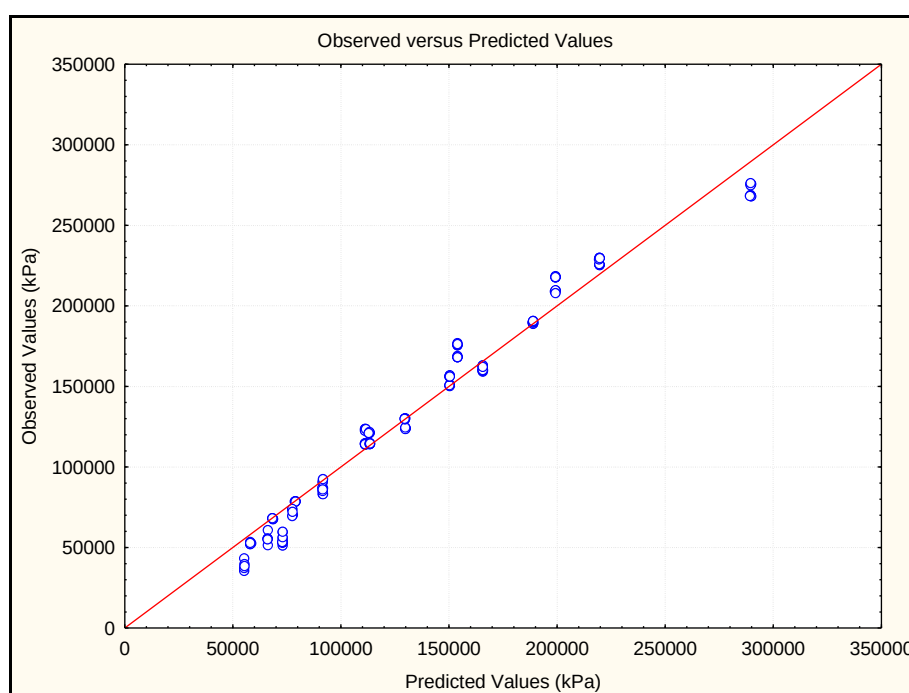
Σχήμα 5.30 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=8,29\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

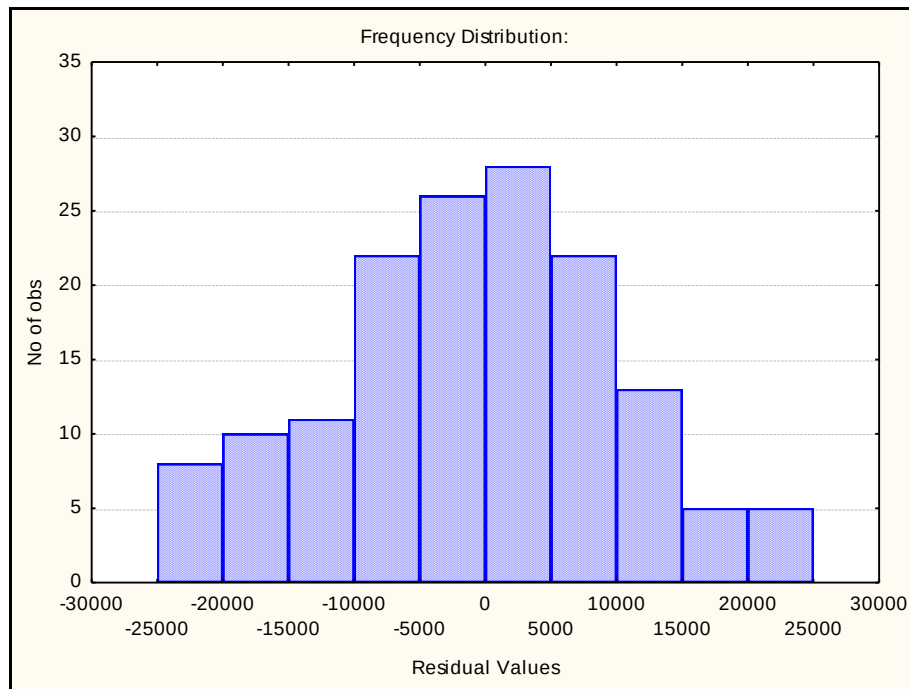
Μοντέλο MEPDG

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1 = 546,667$, $K_2 = 0,434$ και $K_3 = 0,996$

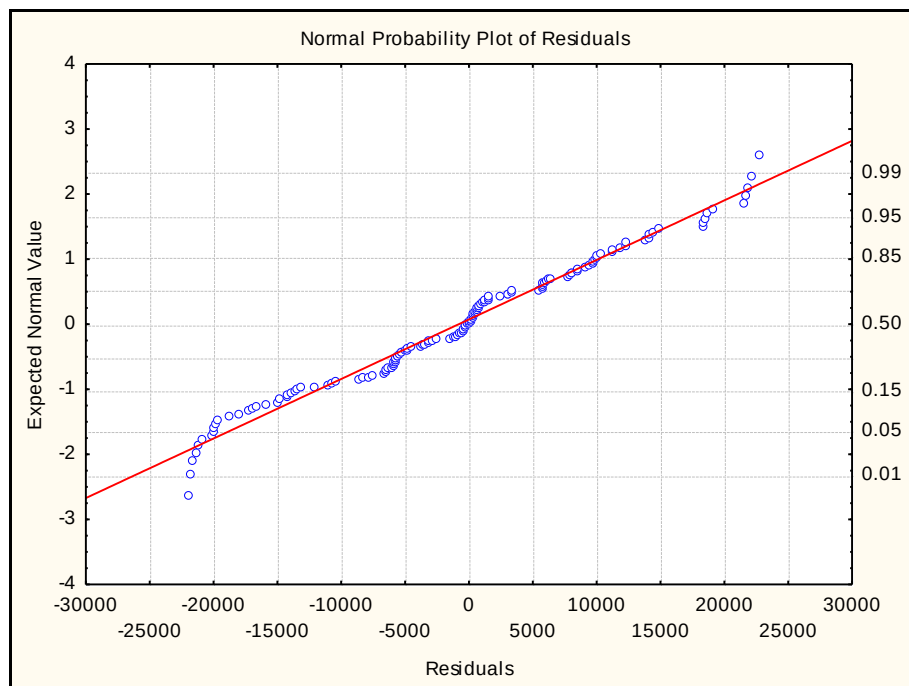
Στο σχήμα 5.31 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.32 και 5.33 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.31 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.32 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG

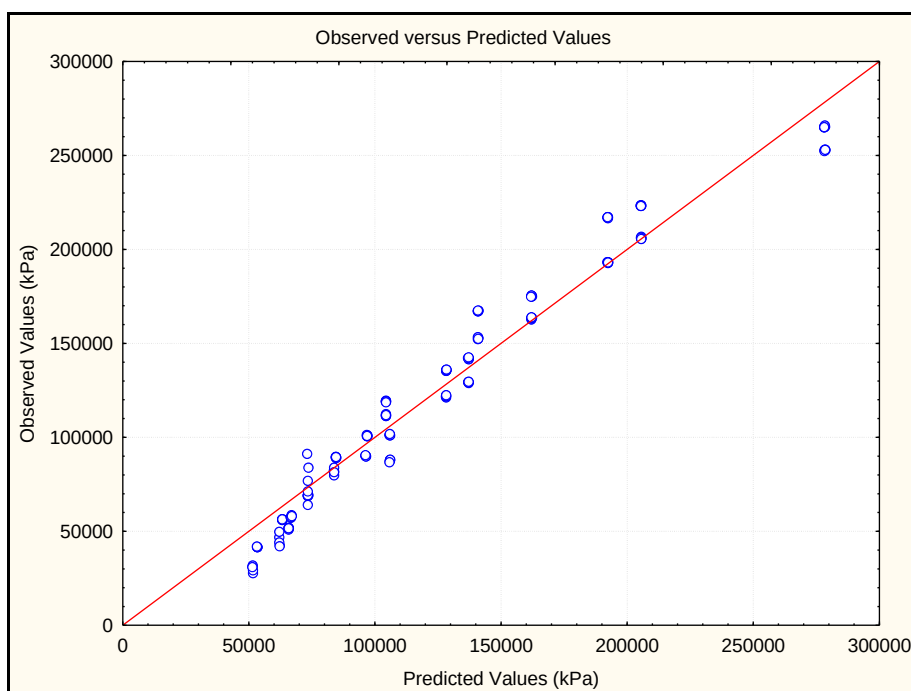


Σχήμα 5.33 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

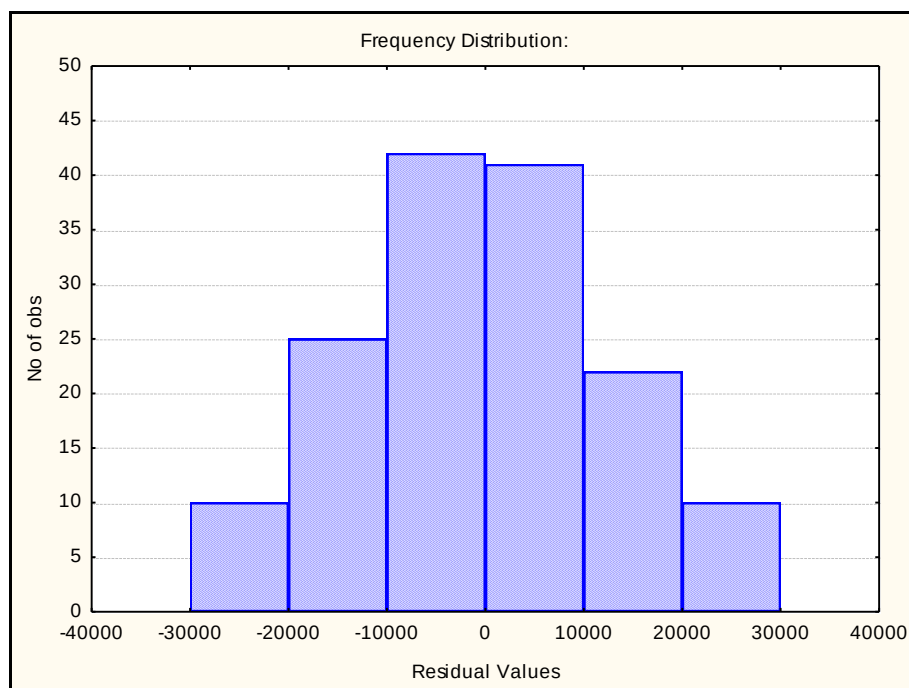
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής $R^2=0,97$ και αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=13,65\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο ΜΕΡPDG είναι: $K_1=477,088$, $K_2= 0.297$ και $K_3=1,429$

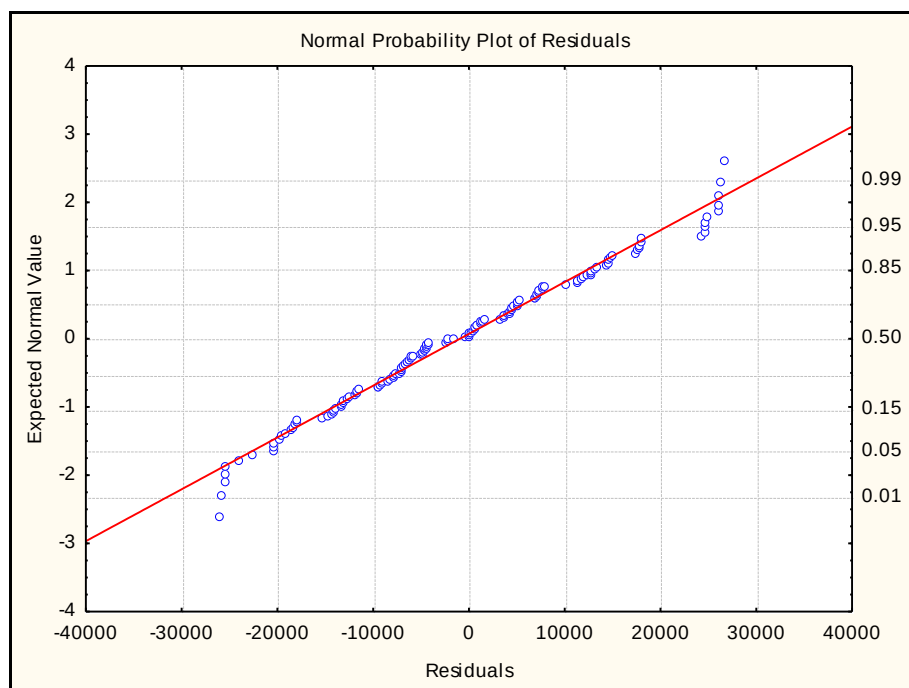
Στο σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.35 και 5.36 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία ακολουθούν την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.34 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου ΜΕΡPDG



Σχήμα 5.35 Δείγμα 2: Ιστογράμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.36 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

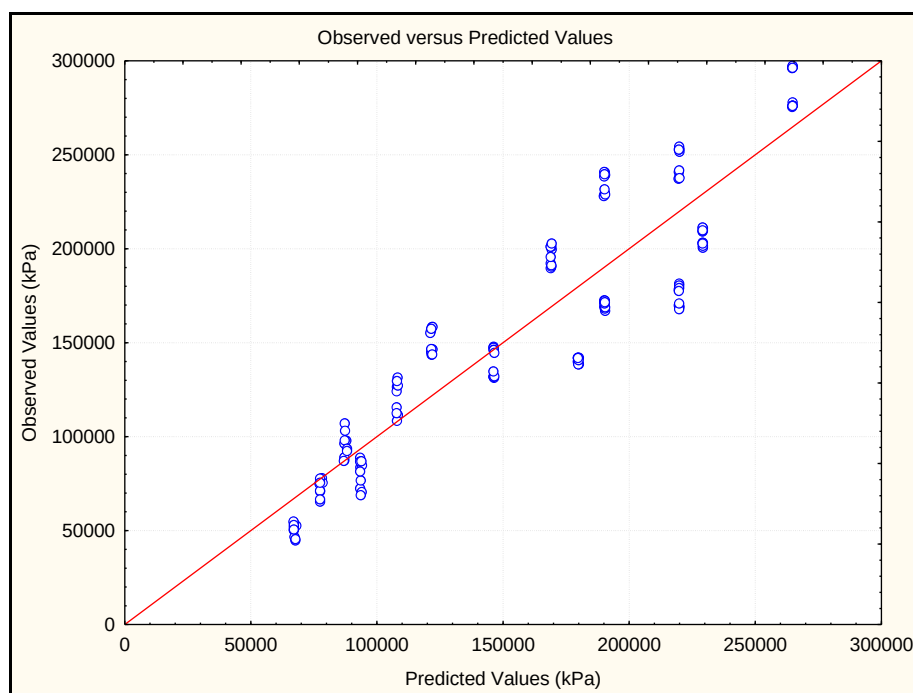
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,96$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=18,75\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική.

5.2.3 Μίγμα υγρασίας 6%

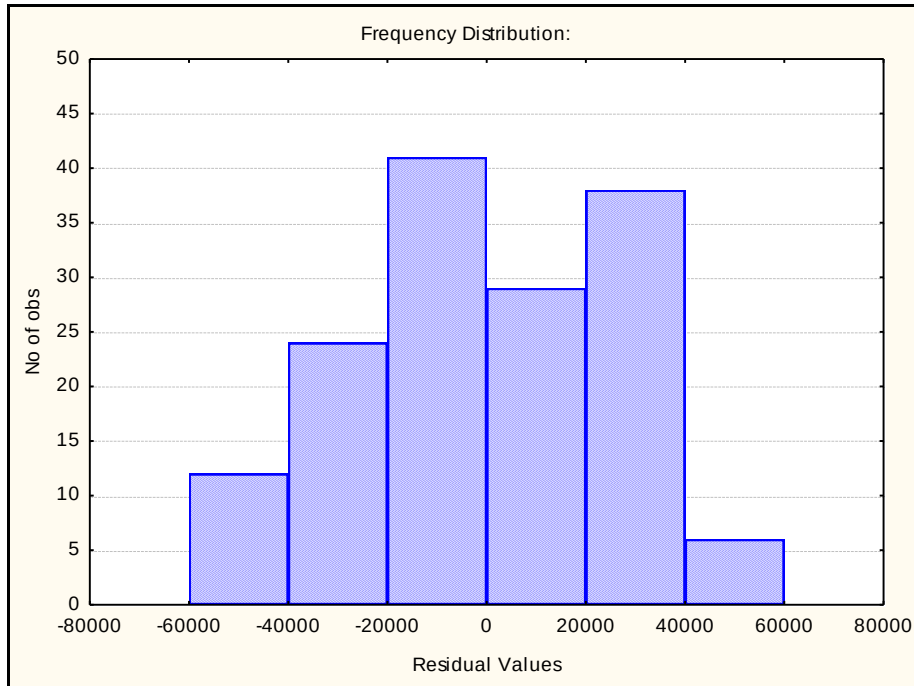
Μοντέλο K-θ

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 3873,428$, και $K_2 = 0,646$

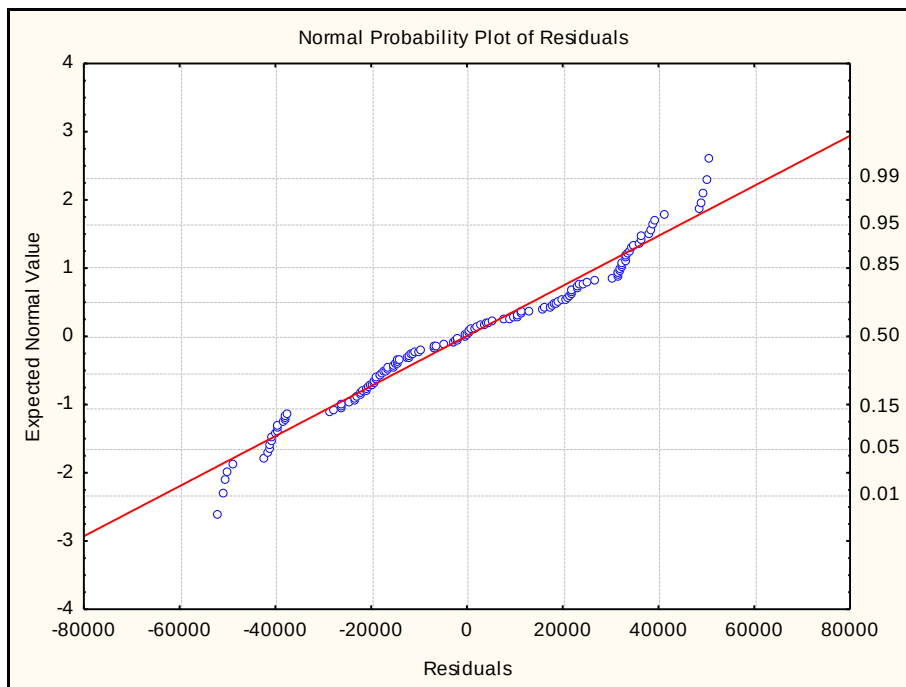
Στο σχήμα 5.37 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.38 και 5.39 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.37 Δείγμα 1:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.38 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου K-θ

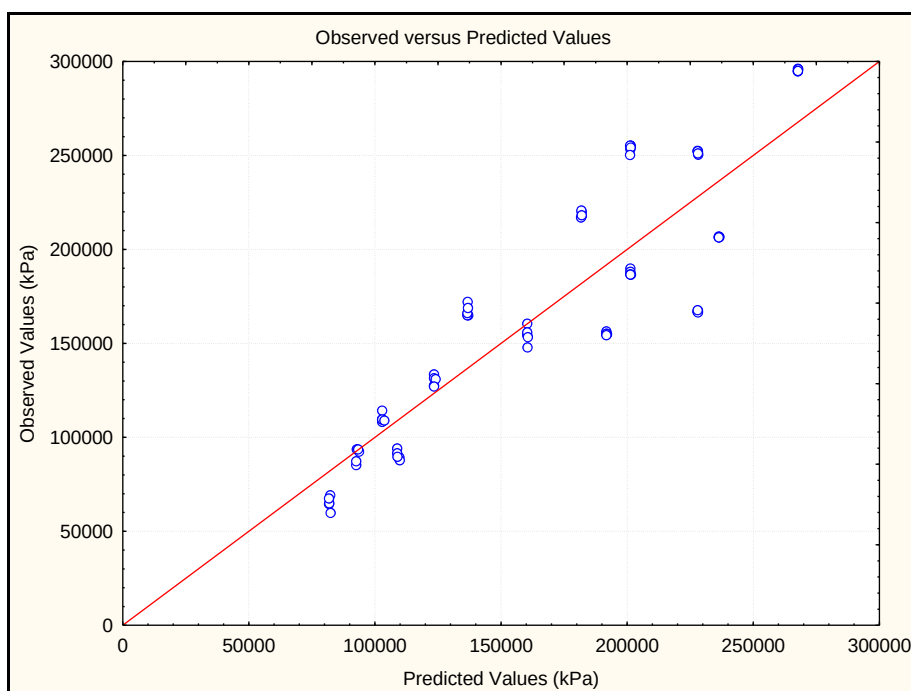


Σχήμα 5.39 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

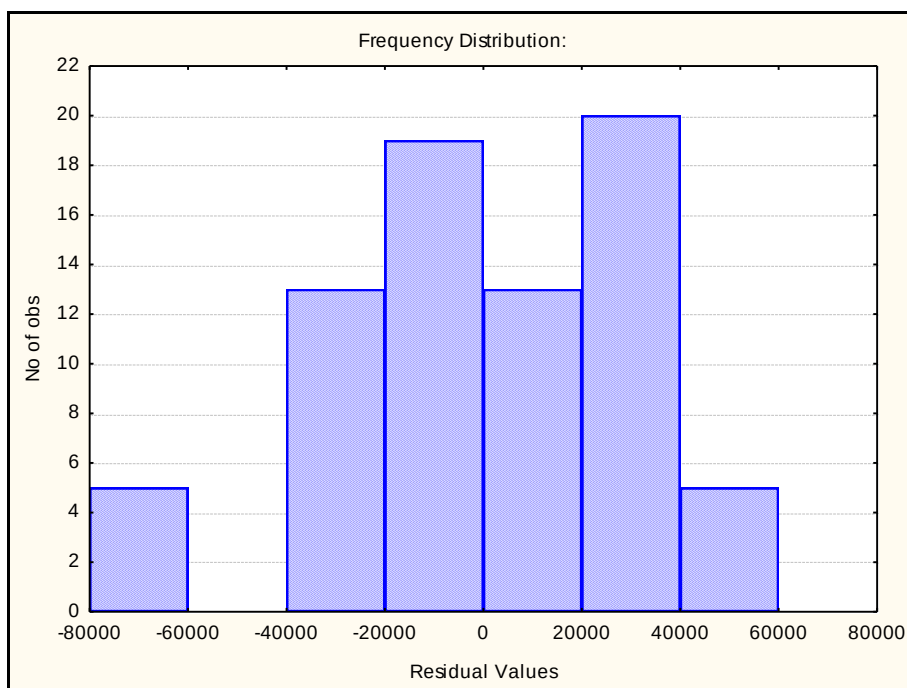
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,84$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=18,19\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1=6996,152$ και $K_2= 0.558$

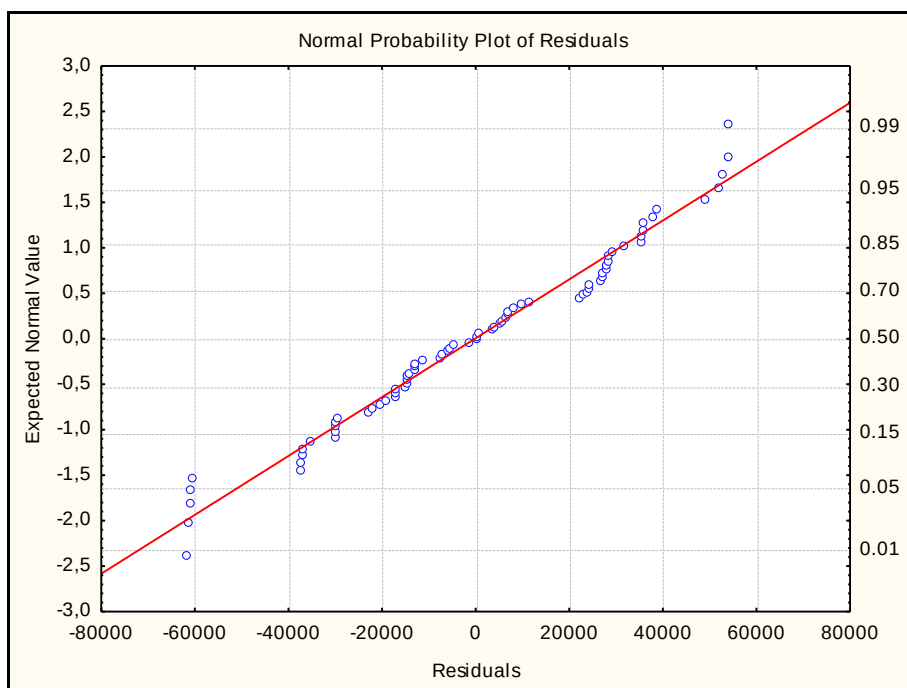
Στο σχήμα 5.40 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.41 και 5.42 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν, όχι σε μεγάλο βαθμό, την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.40 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.41 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Κ-θ



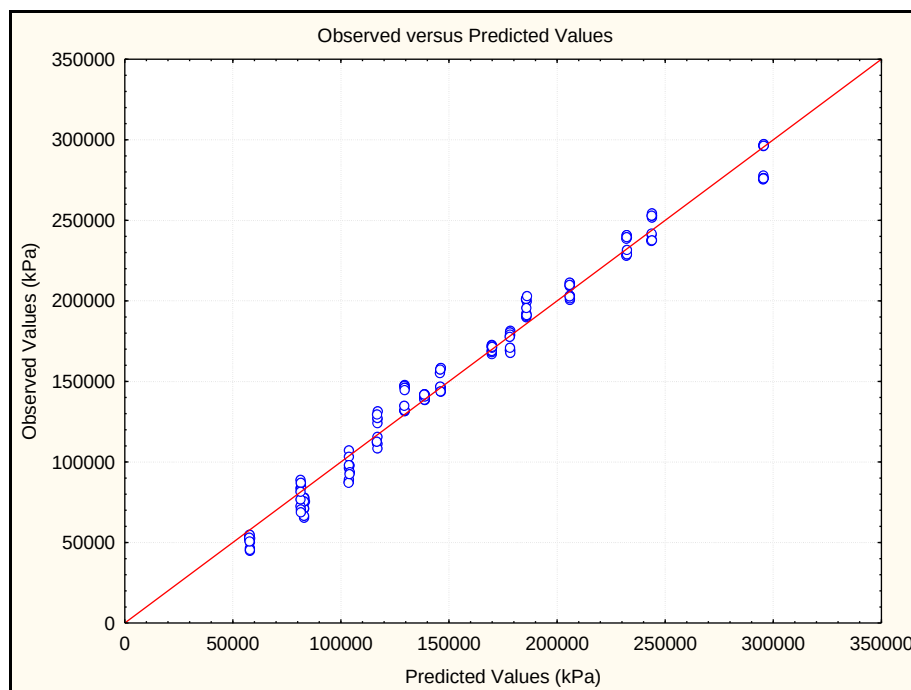
Σχήμα 5.42 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Κ-θ

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,79$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=17,68\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

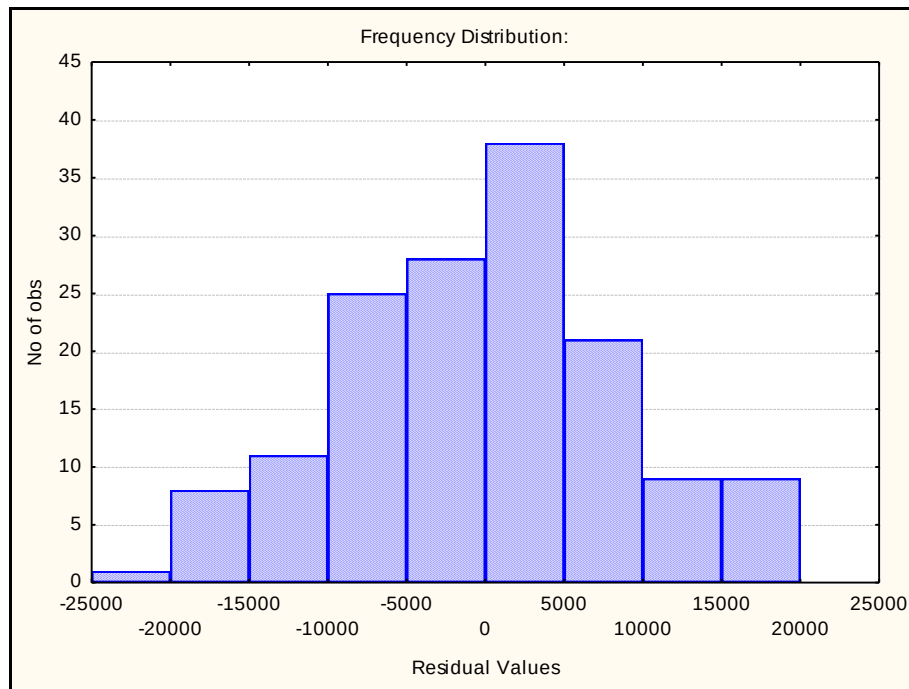
Μοντέλο Uzan

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1 = 5644,153$, $K_2 = 0,218$ και $K_3 = 0,451$

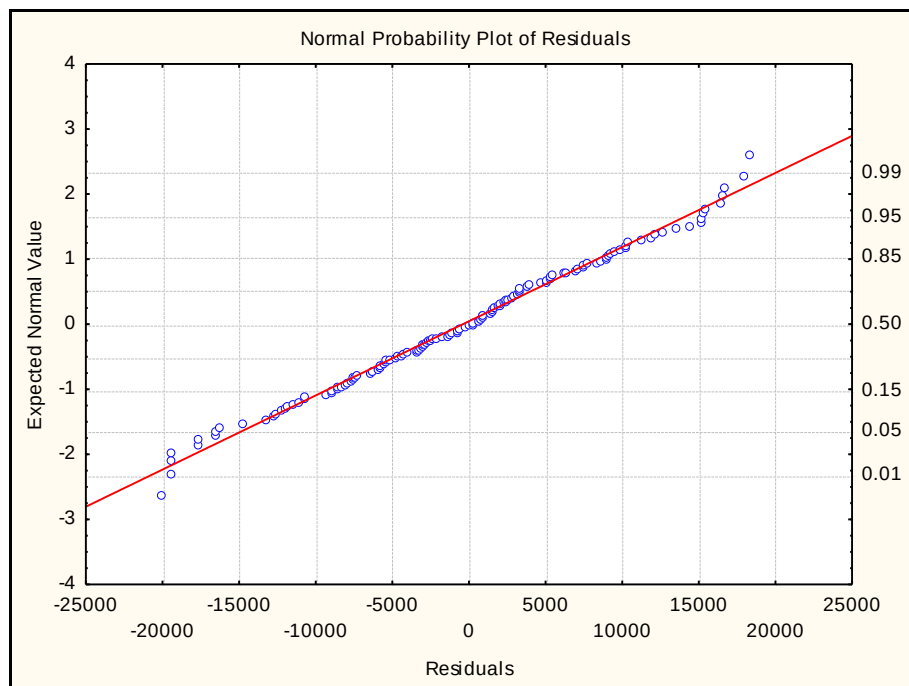
Στο σχήμα 5.43 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.44 και 5.45 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν πολύ καλά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.43 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.44 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan

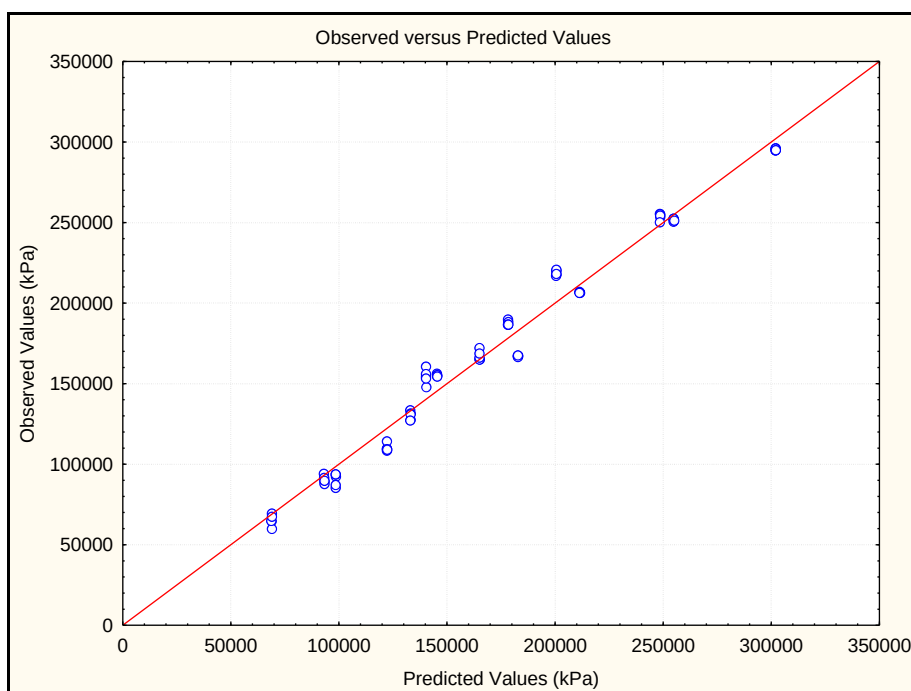


Σχήμα 5.45 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

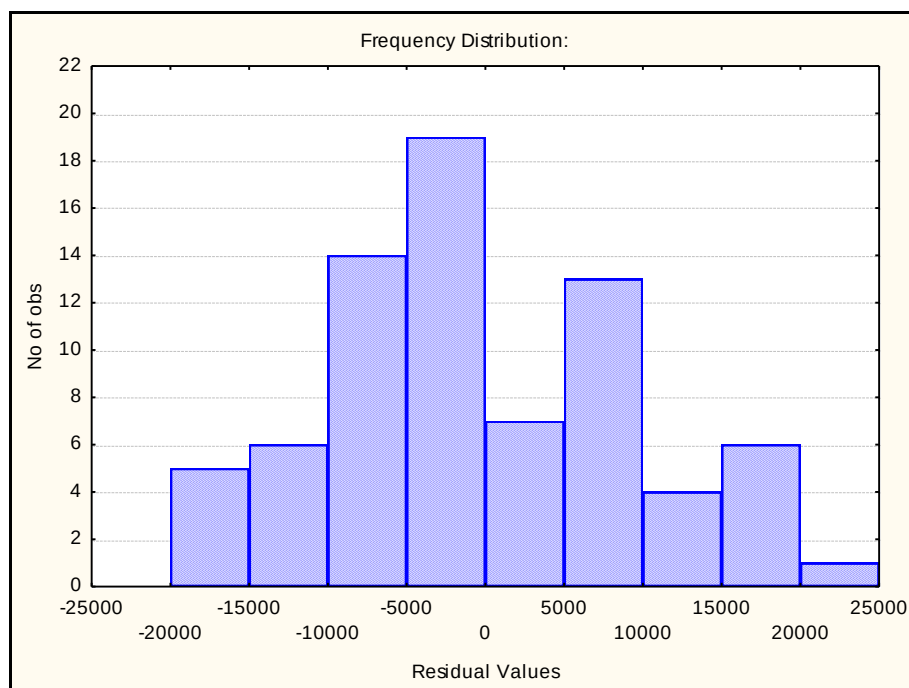
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0.98$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=8,31\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1=9885,934$, $K_2= 0,112$ και $K_3=0,479$

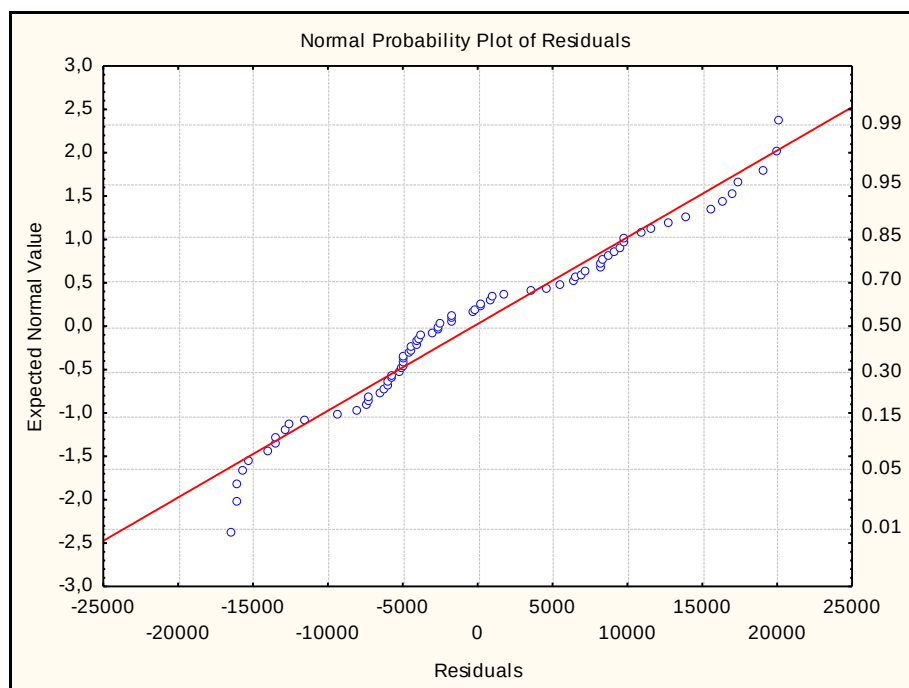
Στο σχήμα 5.46 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.47 και 5.48 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.46 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.47 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan



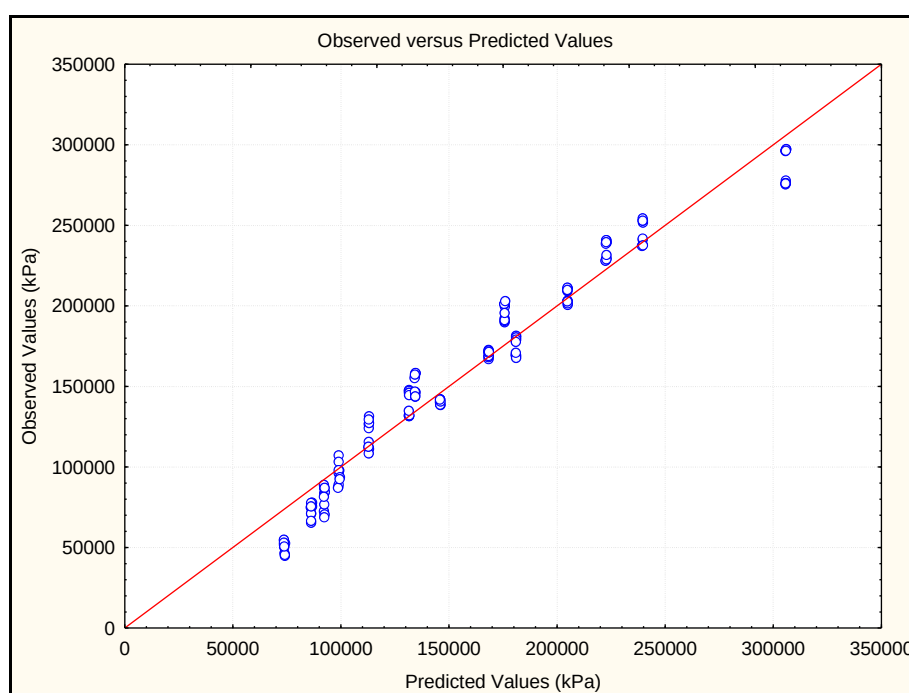
Σχήμα 5.48 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,98$ και πολύ χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=6,63\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

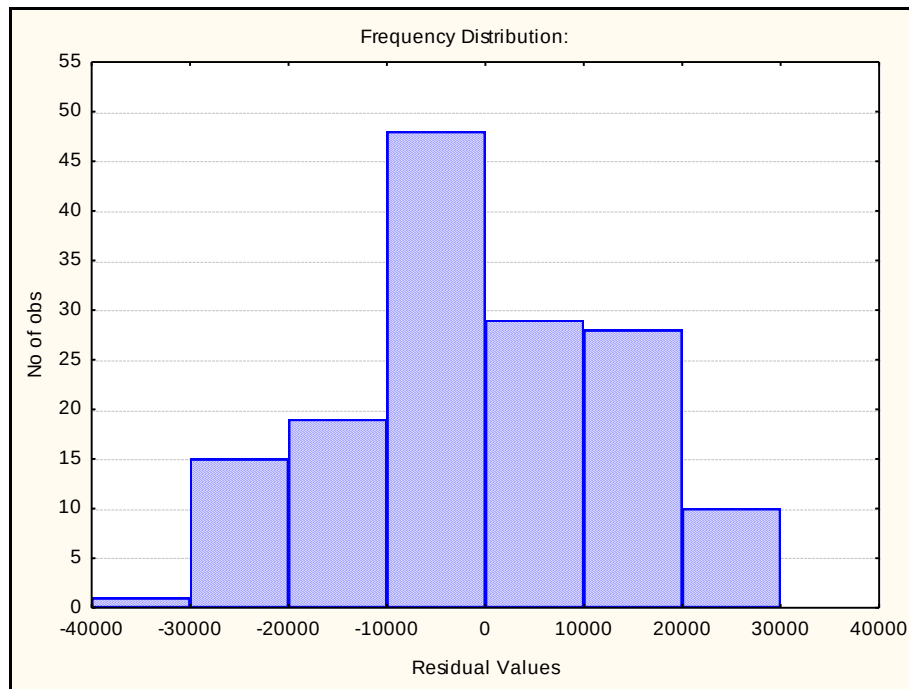
Μοντέλο MEPDG

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1 = 716,509$, $K_2 = 0,326$ και $K_3 = 0,988$

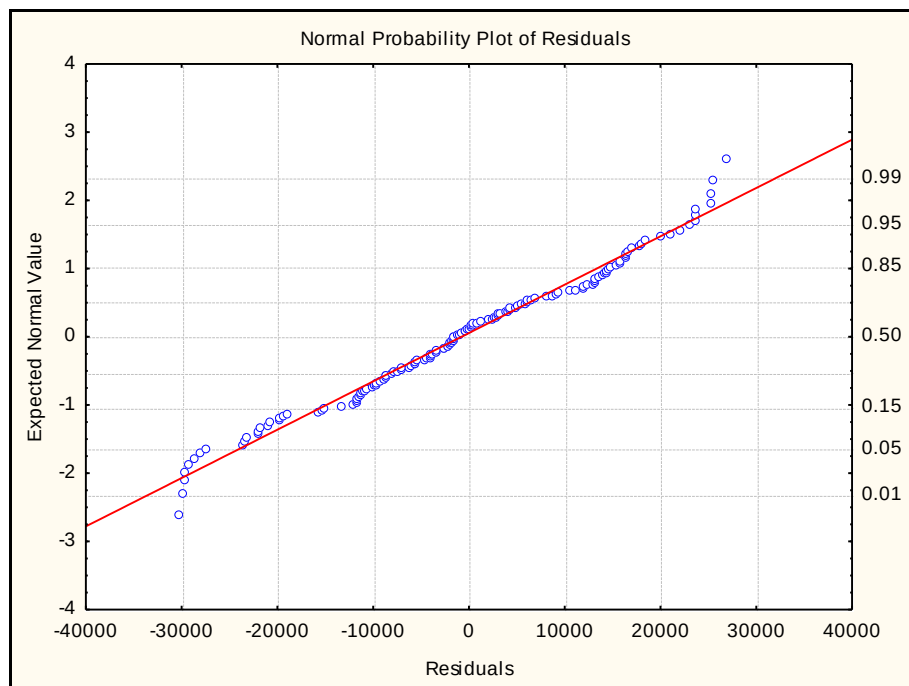
Στο σχήμα 5.49 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.50 και 5.51 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.49 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.50 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG

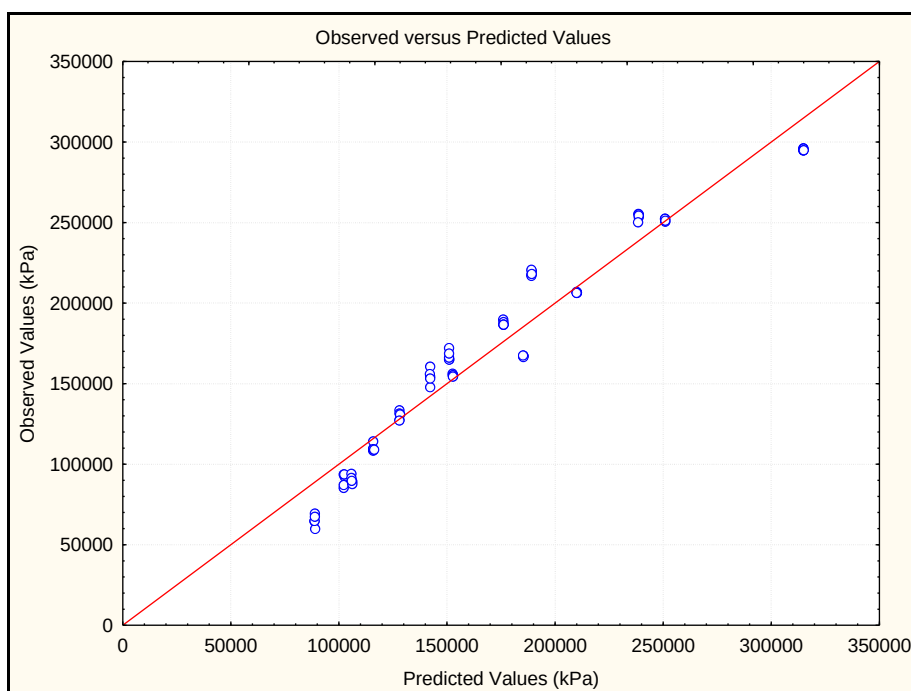


Σχήμα 5.51 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

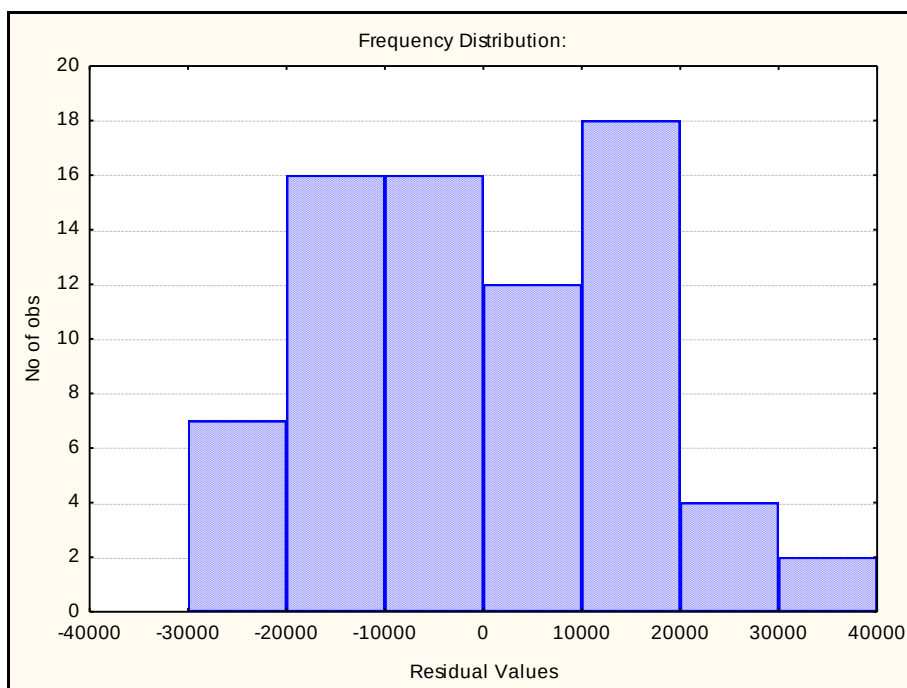
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,96$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=15,75\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1=839,837$, $K_2= 0,223$ και $K_3=1,069$

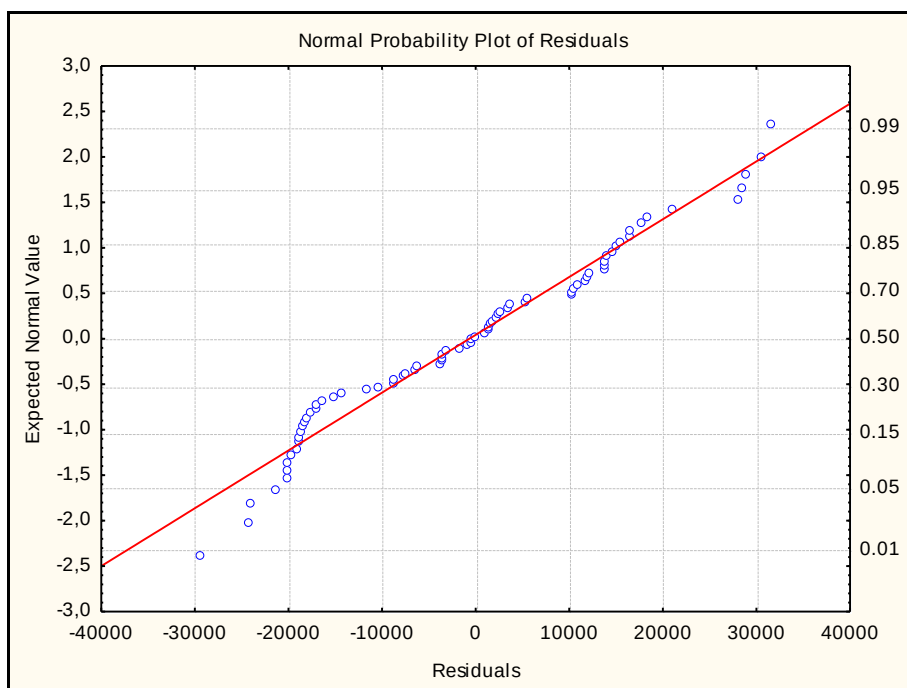
Στο σχήμα 5.52 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.53 και 5.54 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.52 Δείγμα 2:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.53 Δείγμα 2: Ιστογράμμα συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.54 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

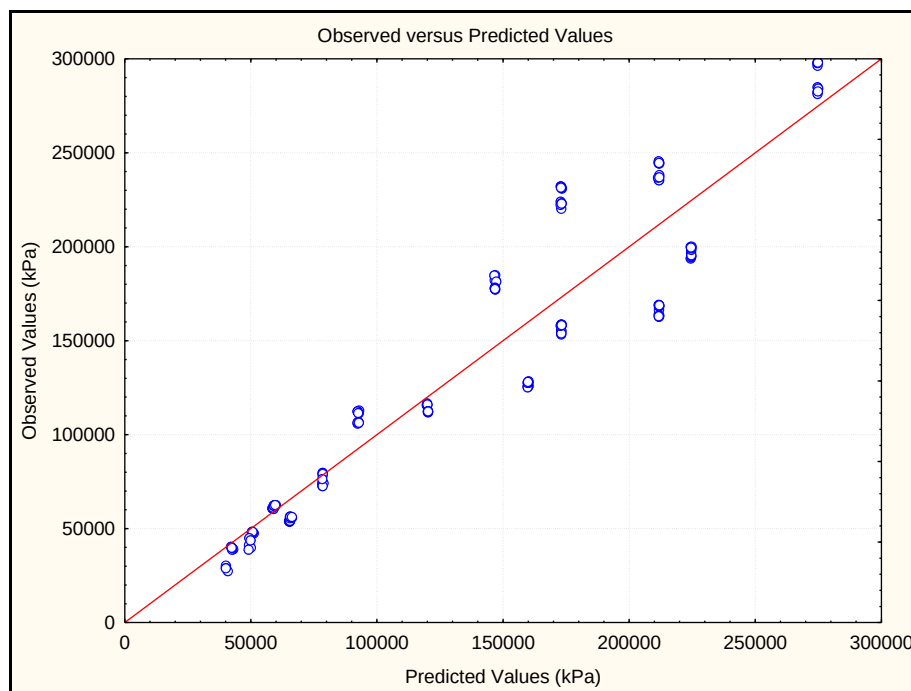
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,95$ και αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=13,04\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

5.2.4 Μίγμα υγρασίας 7%

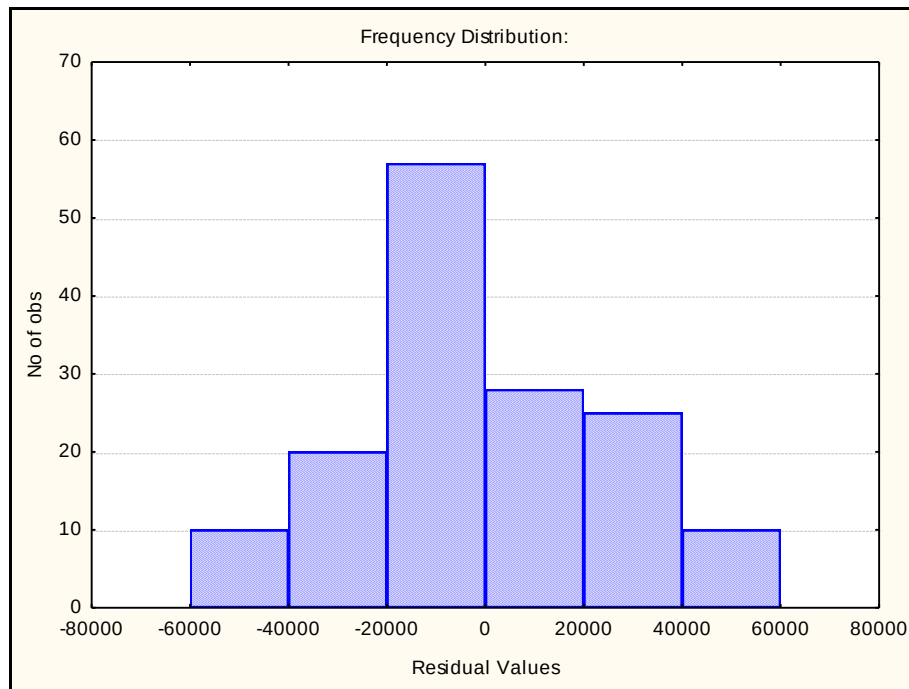
Μοντέλο K-θ

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 746,309$, και $K_2 = 0,904$

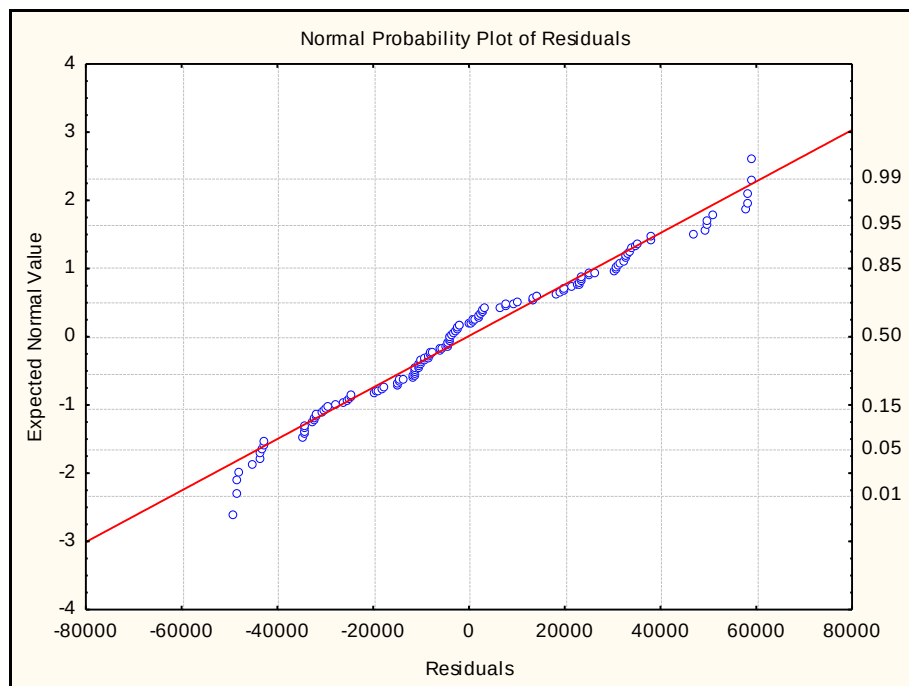
Στο σχήμα 5.55 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.56 και 5.57 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.55 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.56 Δείγμα 1: Ιστογράμμα συχνοτήτων του μοντέλου Κ-θ

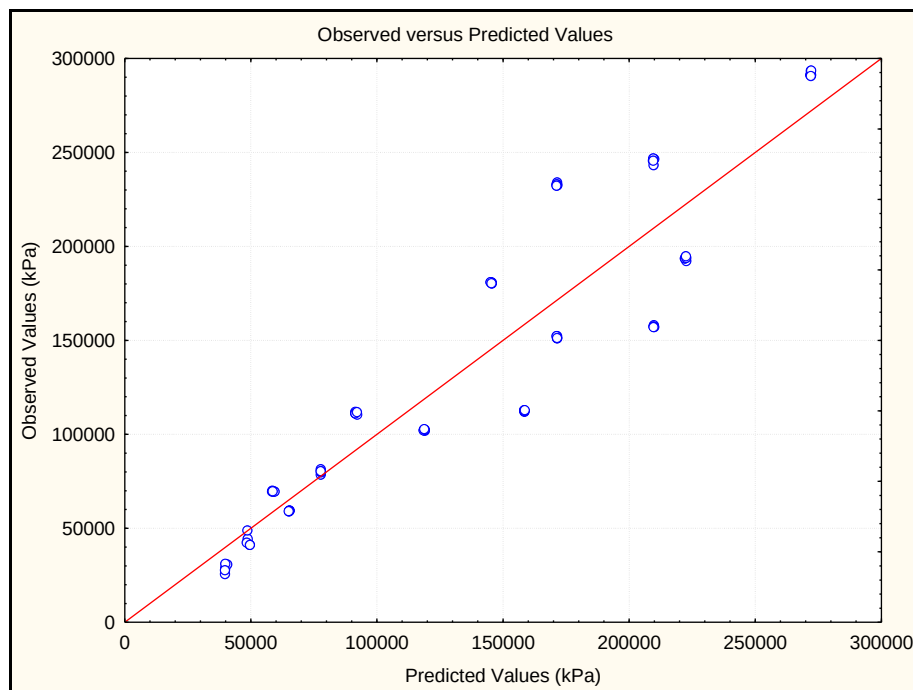


Σχήμα 5.57 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Κ-θ

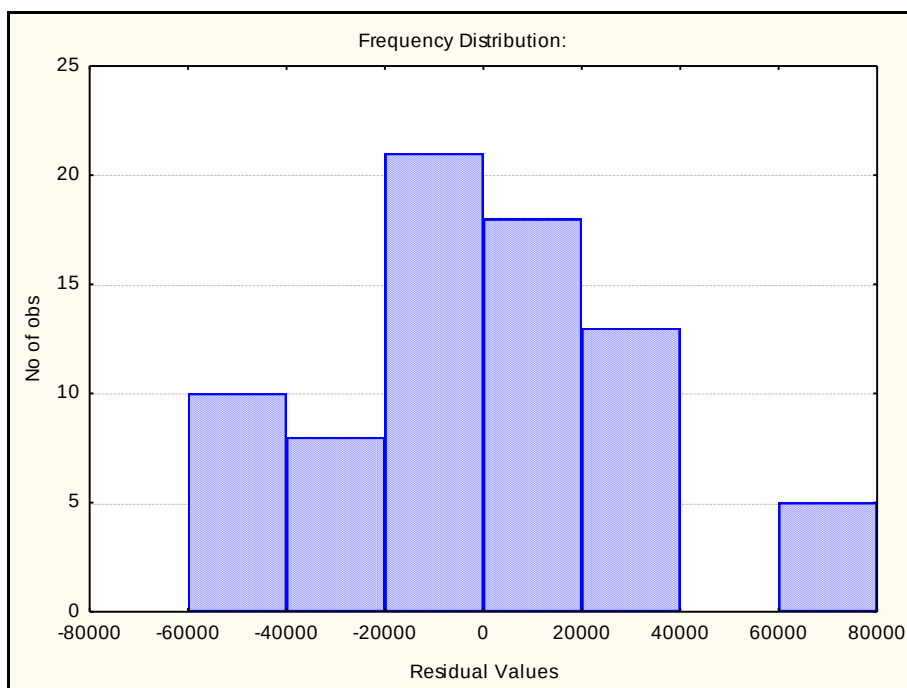
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,88$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=17,55\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1=741,200$ και $K_2= 0,904$

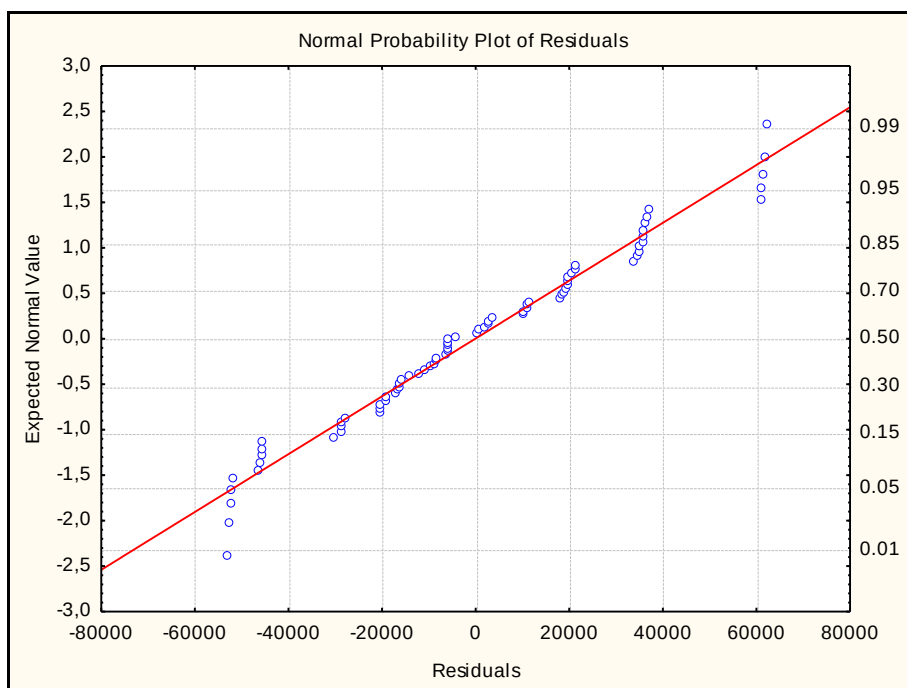
Στο σχήμα 5.58 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.59 και 5.60 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.58 Δείγμα 2:Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.59 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Κ-θ



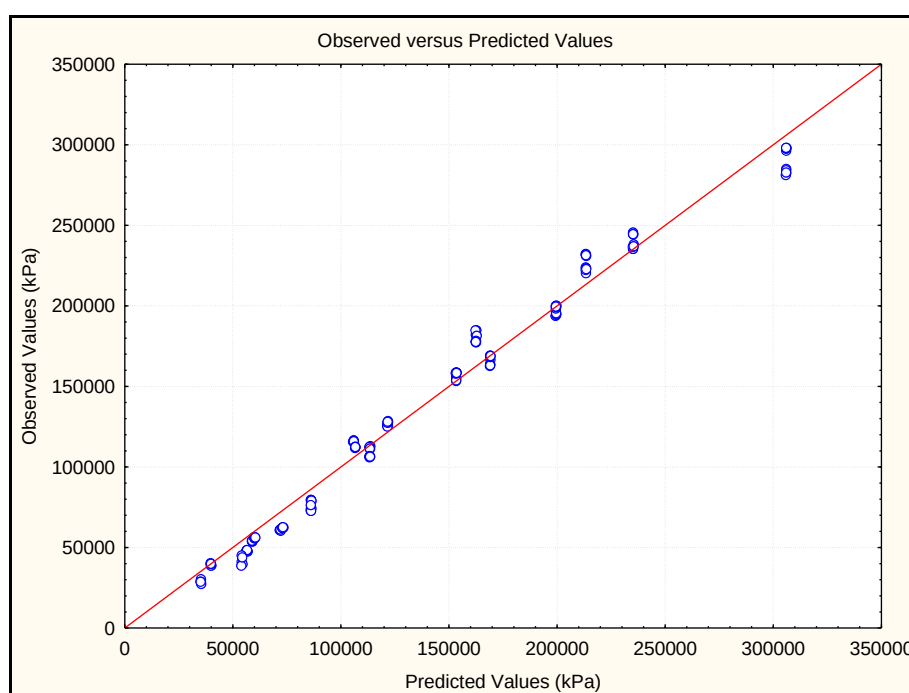
Σχήμα 5.60 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Κ-θ

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,84$ και αρκετά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=22,09\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

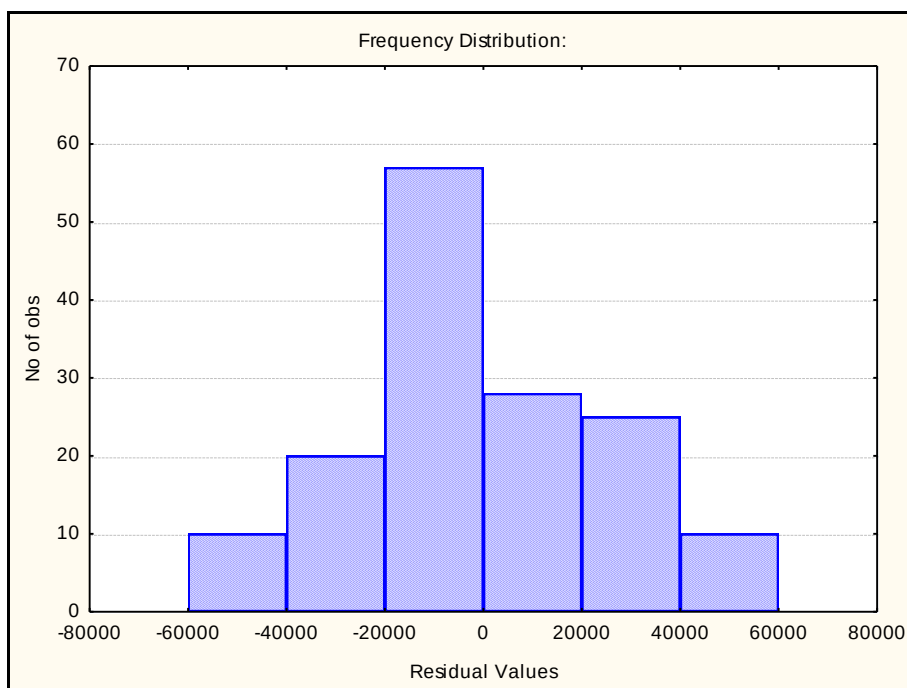
Μοντέλο Uzan

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1 = 1210,609$, $K_2 = 0,437$ και $K_3 = 0,476$

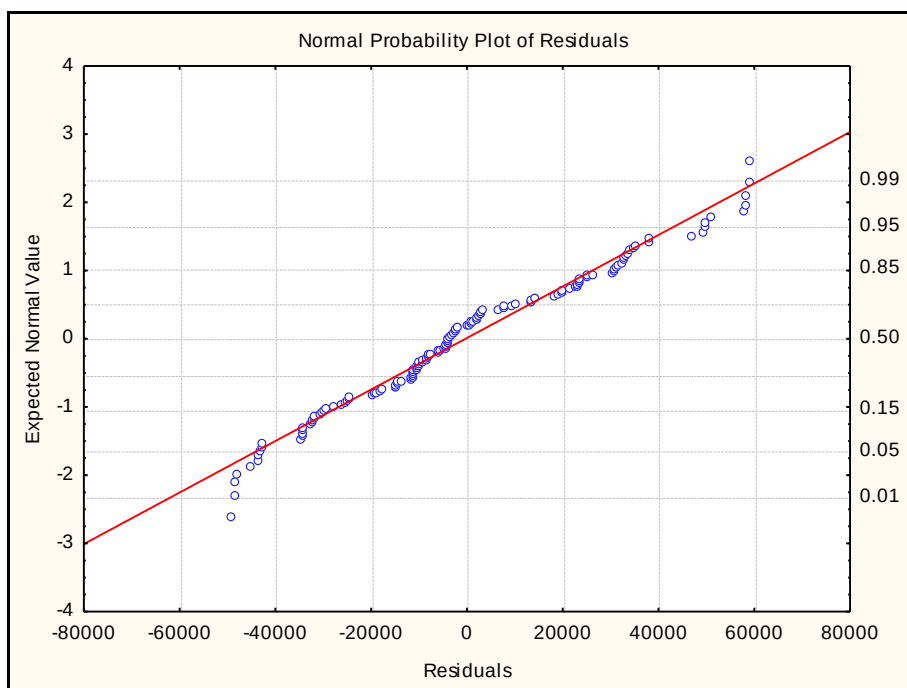
Στο σχήμα 5.61 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.62 και 5.63 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.61 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.62 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan

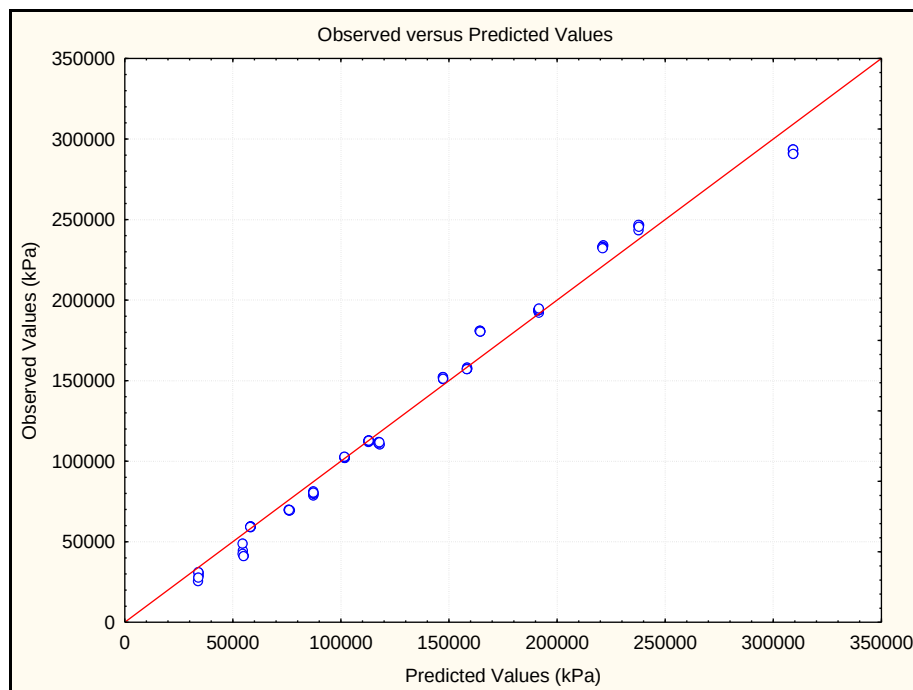


Σχήμα 5.63 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

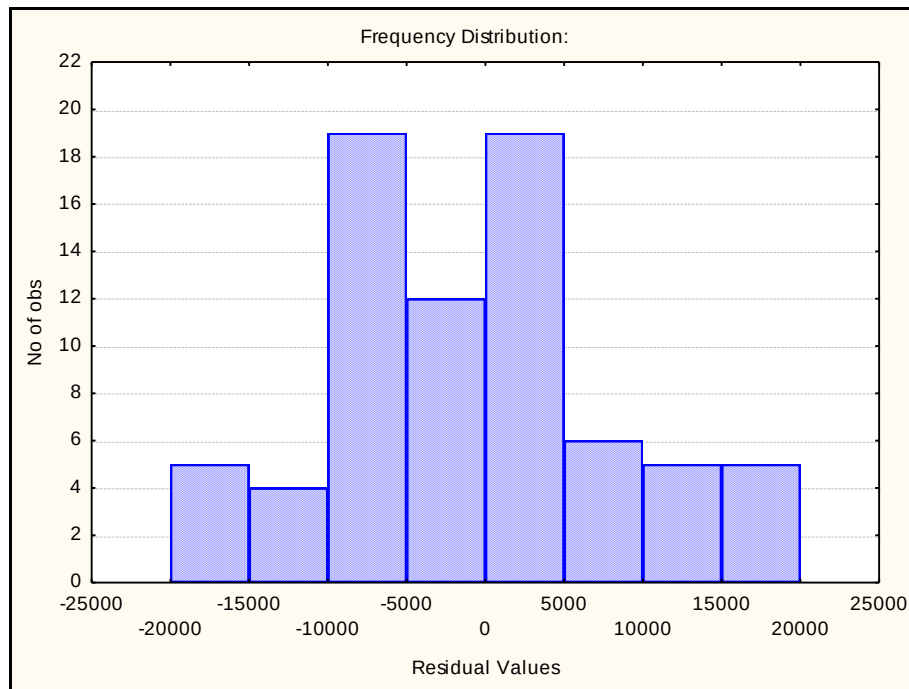
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,98$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=10,94\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1=1368,627$, $K_2=0,325$ και $K_3=0,587$

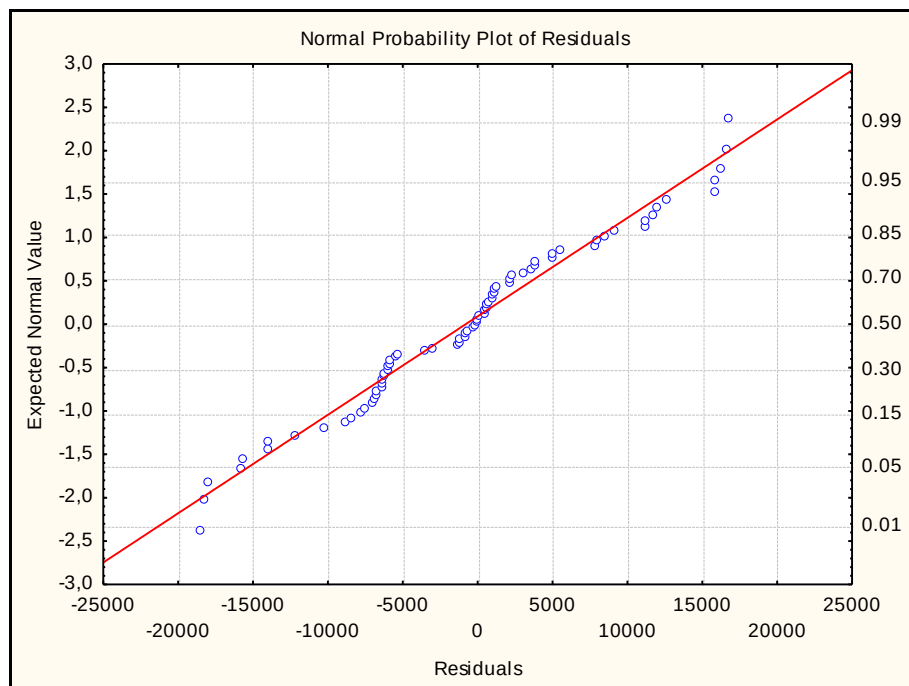
Στο σχήμα 5.64 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.65 και 5.66 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν, όχι σε μεγάλο βαθμό, την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.64 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.65 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan



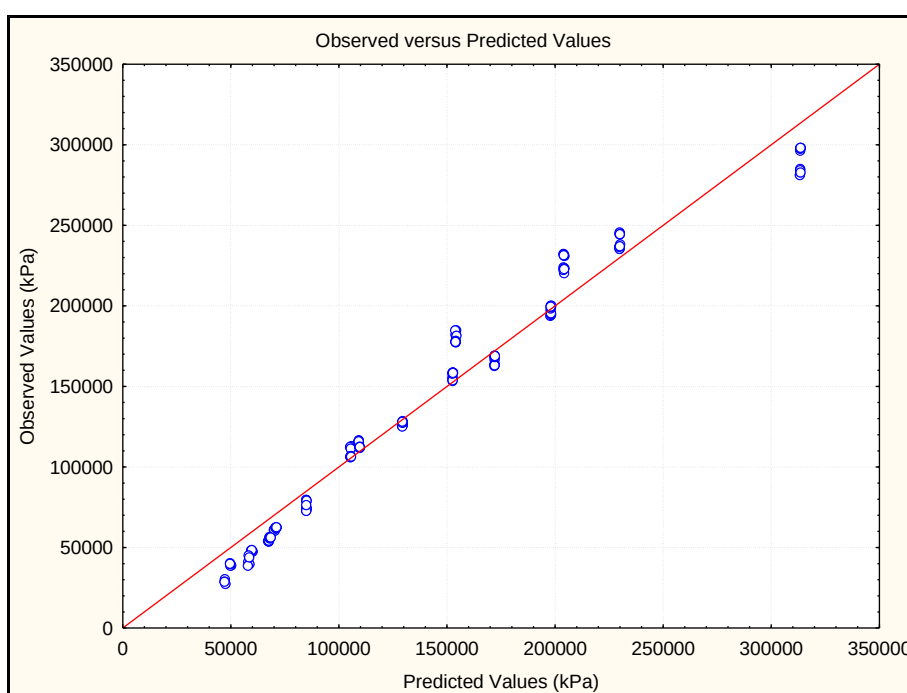
Σχήμα 5.66 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $\text{RMSPE}=10,24\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

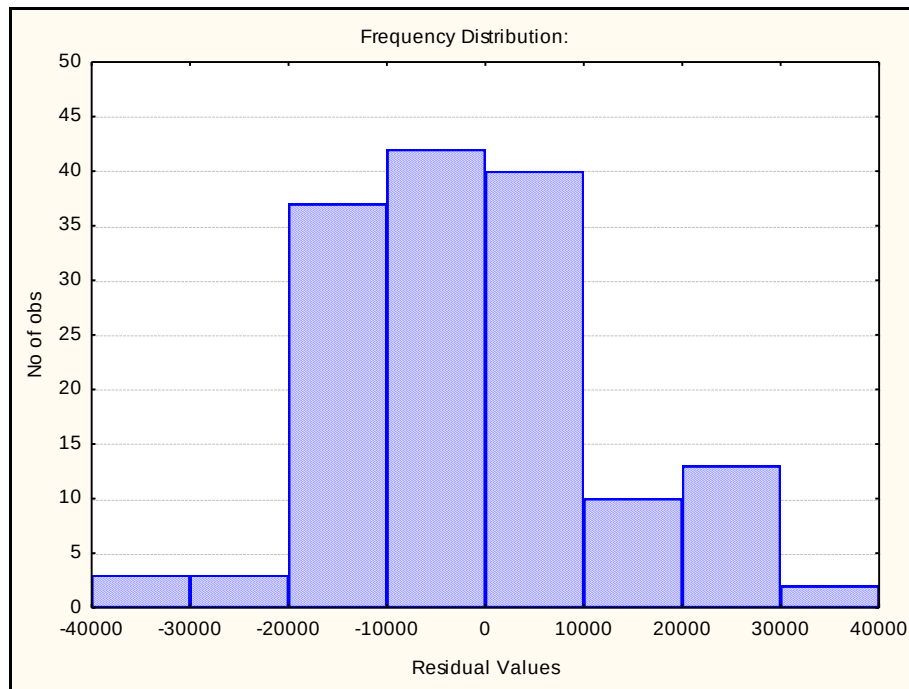
Μοντέλο MEPDG

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1 = 476,346$, $K_2 = 0,534$ και $K_3 = 1,024$

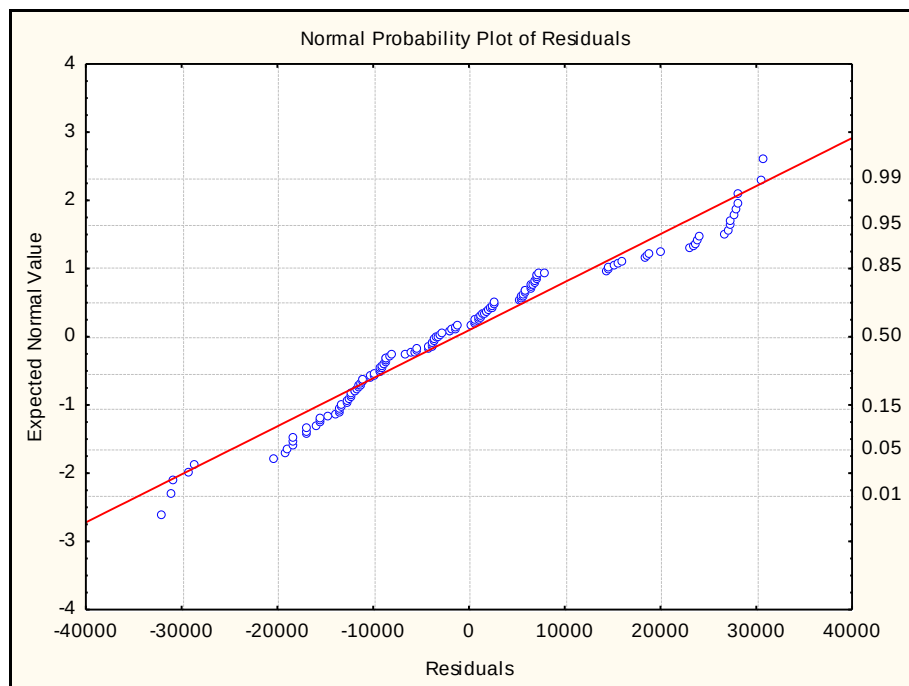
Στο σχήμα 5.67 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.68 και 5.69 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.67 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.68 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG

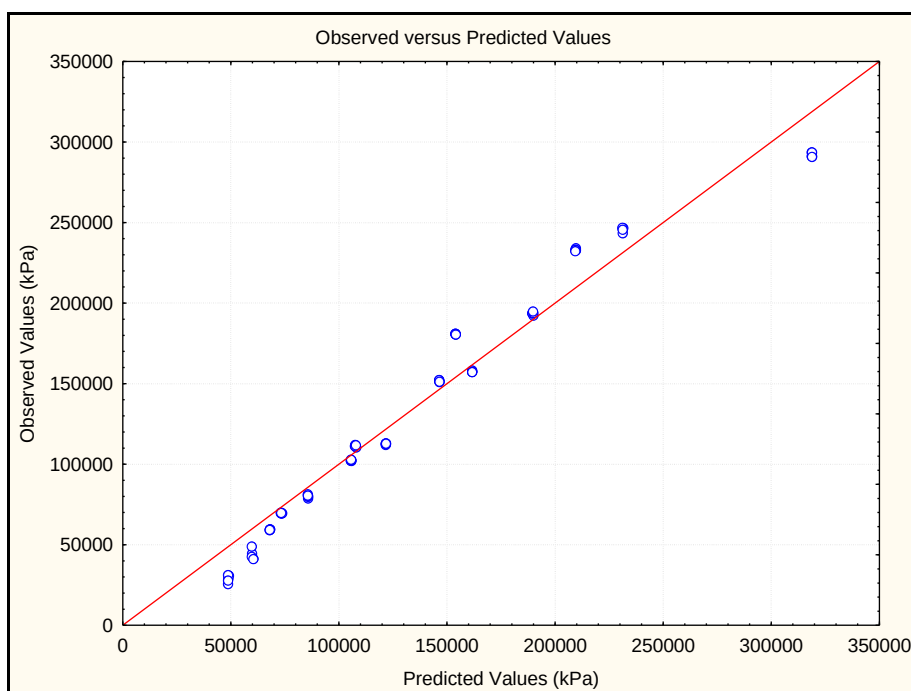


Σχήμα 5.69 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

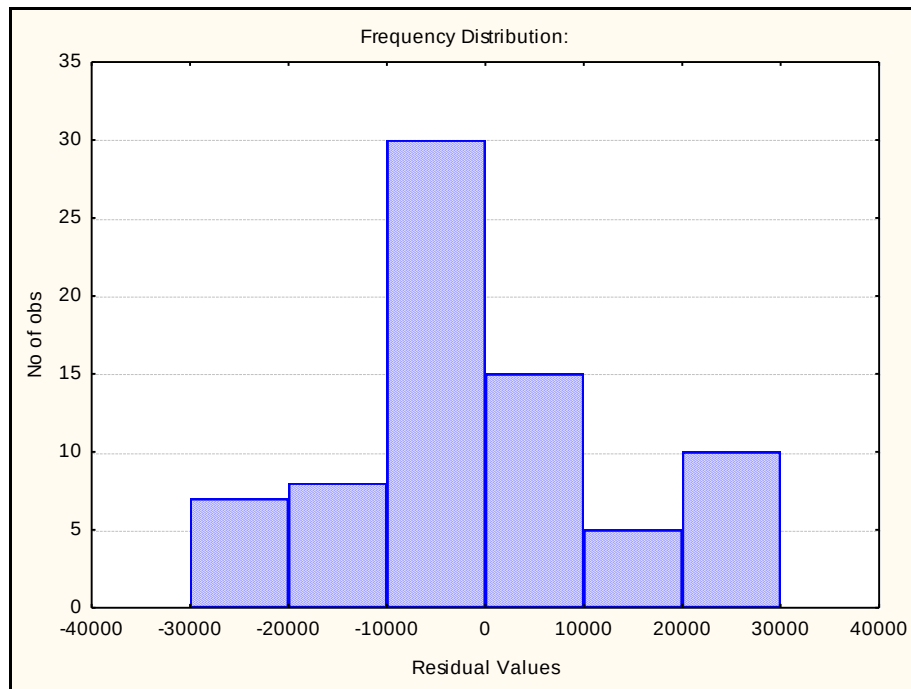
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε πολύ υψηλός συντελεστής $R^2=0.97$ και σχετικά υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=18,23\%$, επομένως, λόγω υψηλού R^2 , η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1=472,363$, $K_2= 0,444$ και $K_3=1,265$

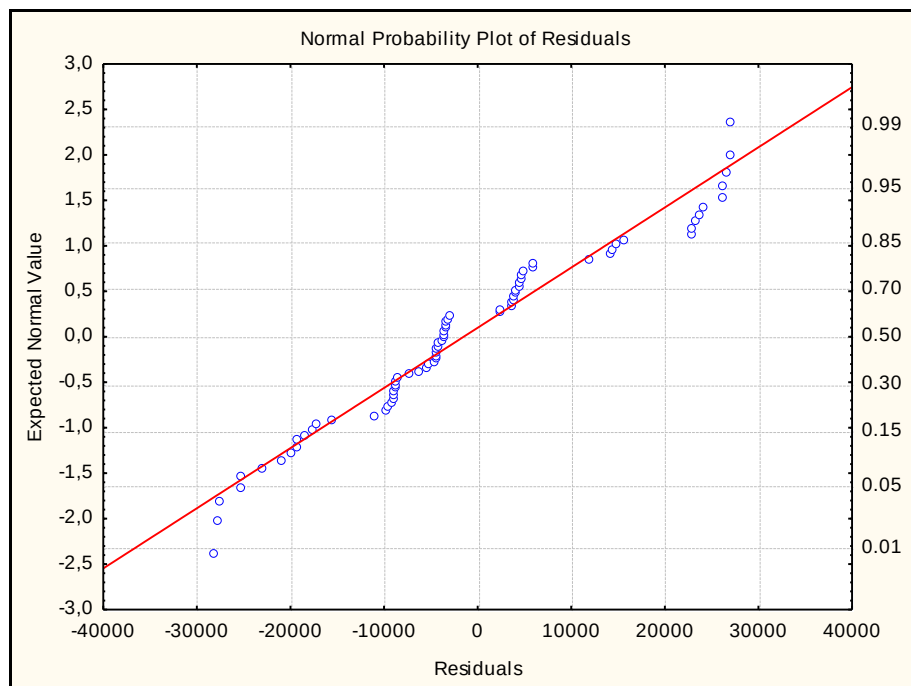
Στο σχήμα 5.70 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.71 και 5.72 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.70 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.71 Δείγμα 2: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG



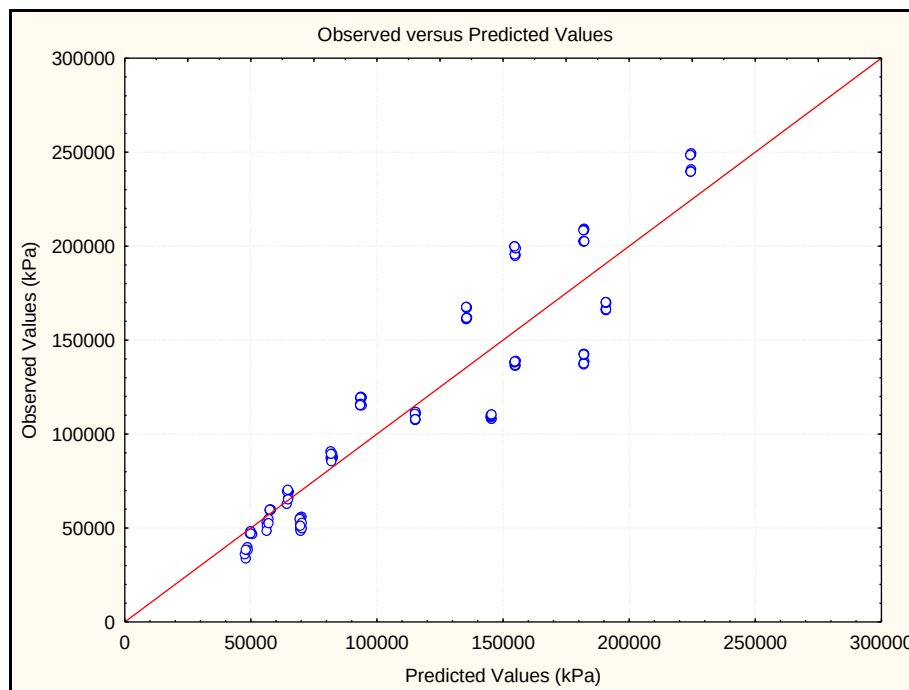
Σχήμα 5.72 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,96$ και υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=22,41\%$, επομένως, λόγω υψηλού R^2 , η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

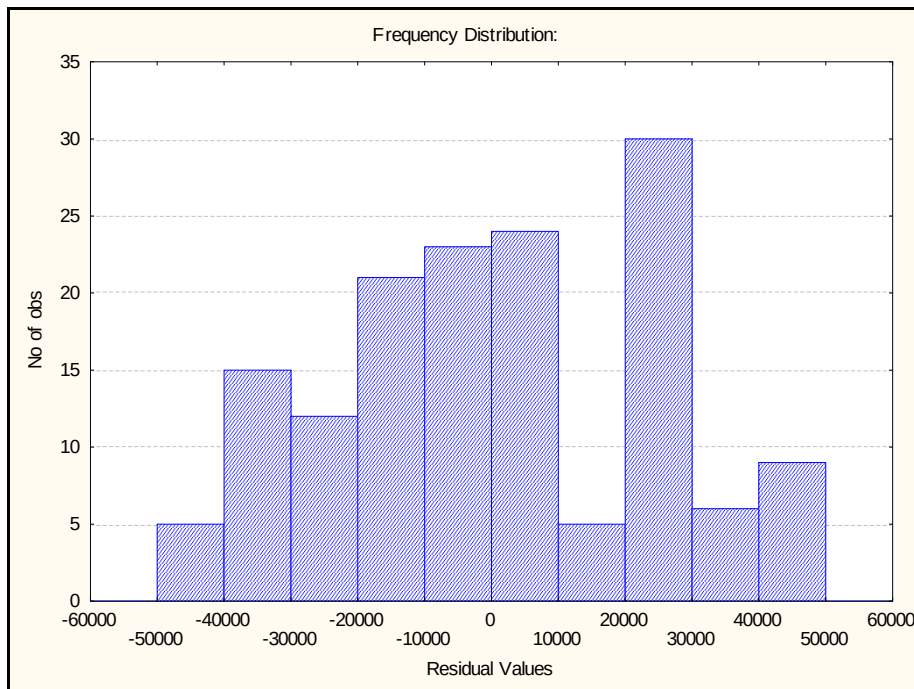
5.2.5 Μίγμα υγρασίας 8%

Μοντέλο K-θ Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1 = 1941,760$, και $K_2 = 0,727$

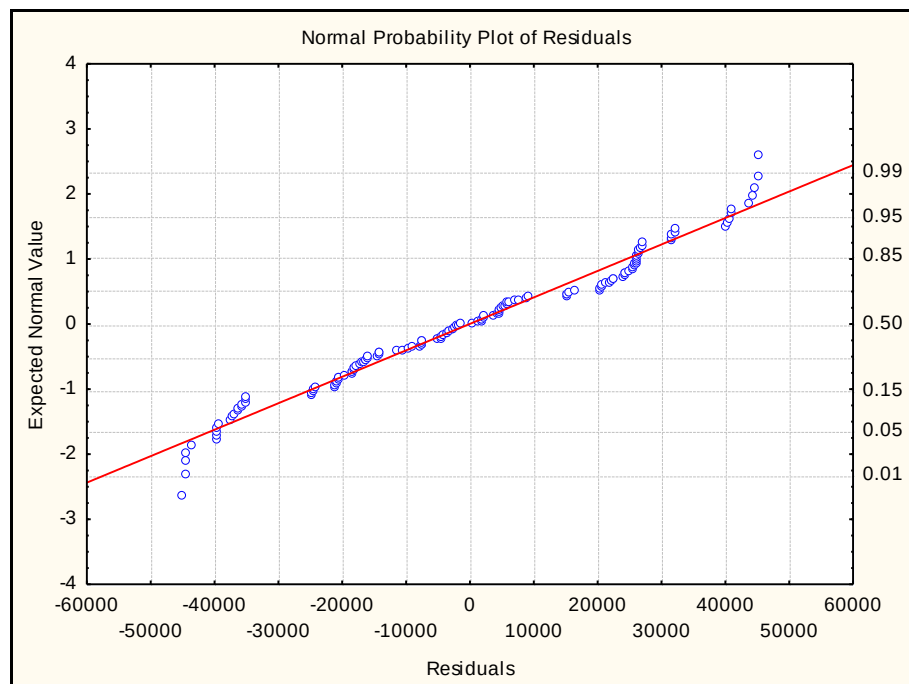
Στο σχήμα 5.73 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.74 και 5.75 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.73 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.74 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνότητων του μοντέλου K-θ

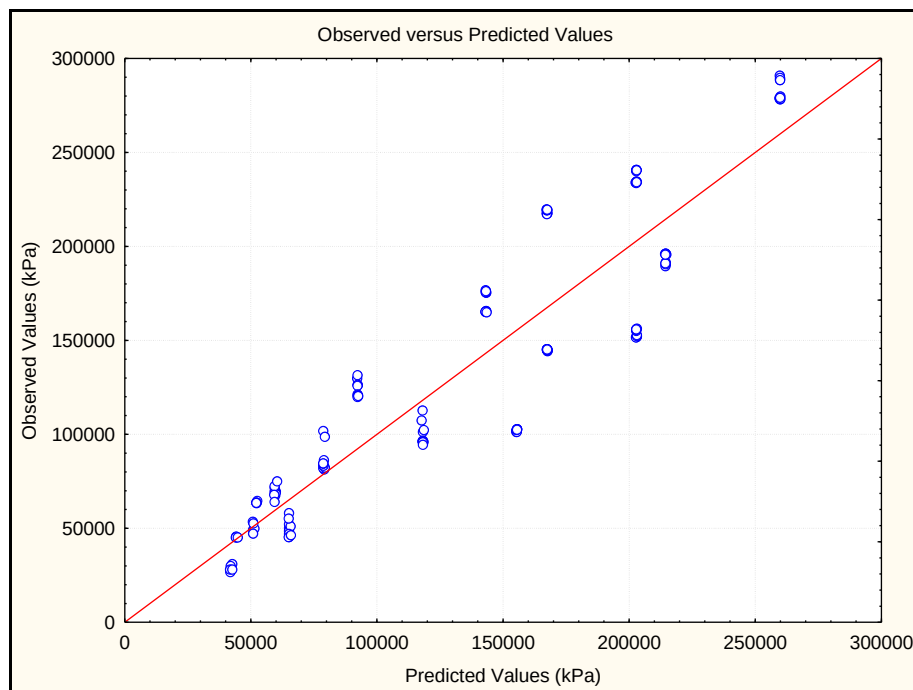


Σχήμα 5.75 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

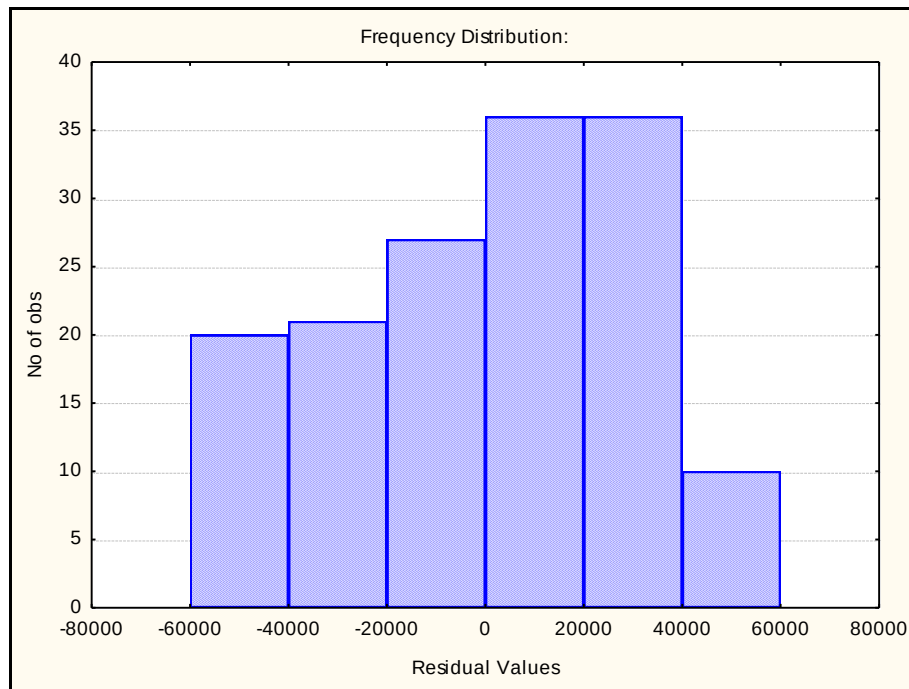
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,83$ και υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=19,29\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο K-θ είναι: $K_1=950,685$, και $K_2= 0,858$

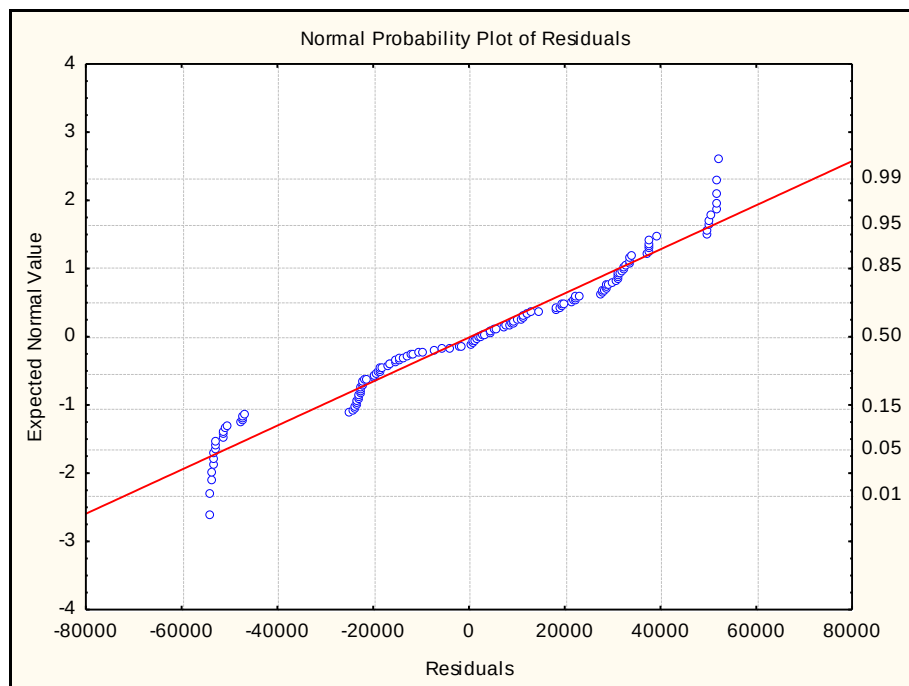
Στο σχήμα 5.76 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.77 και 5.78 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.76 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου K-θ



Σχήμα 5.77 Δείγμα 2: Ιστογράμμα συχνοτήτων του μοντέλου K-θ



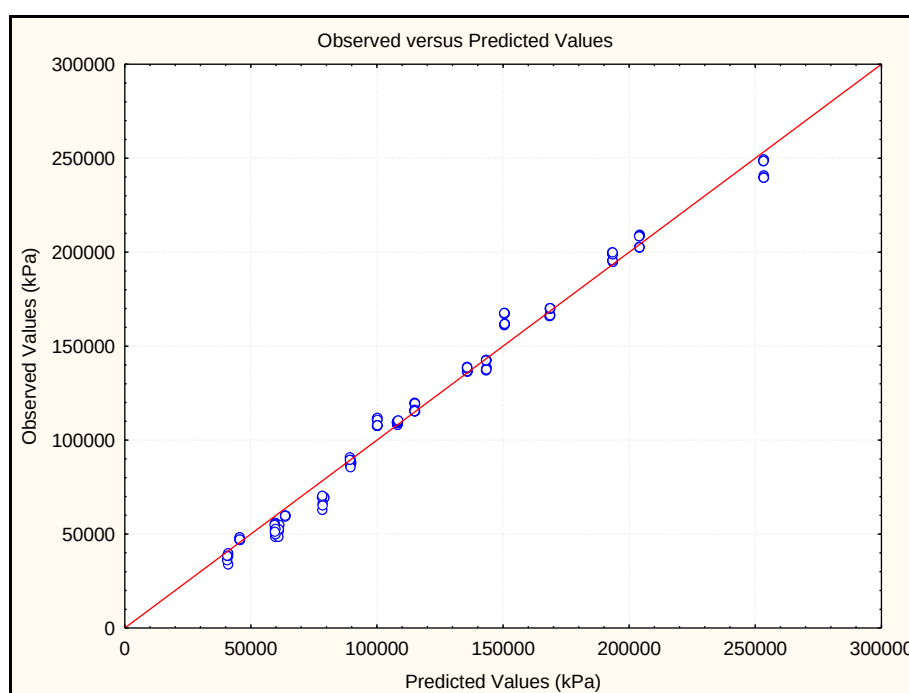
Σχήμα 5.78 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου K-θ

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε ικανοποιητικός συντελεστής $R^2=0,83$ και πολύ υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=24,56\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

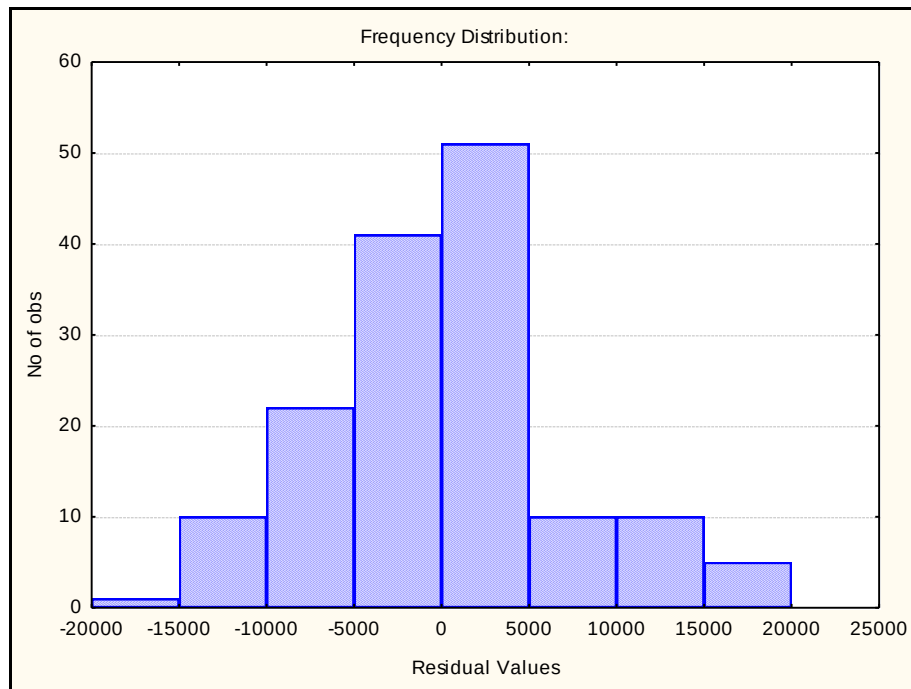
Μοντέλο Uzan

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1 = 2996,089$, $K_2 = 0,240$ και $K_3 = 0,510$

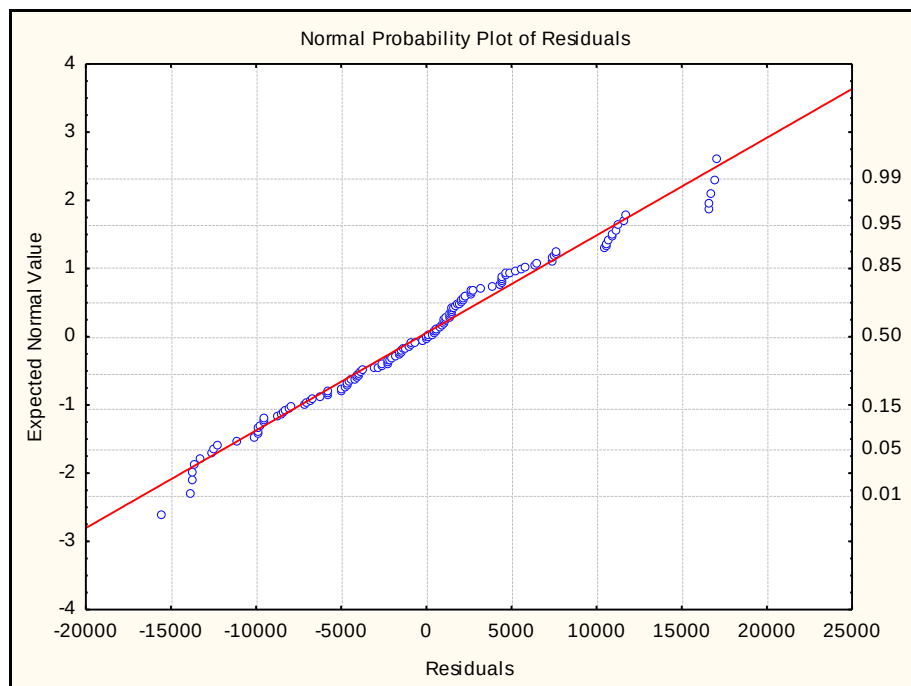
Στο σχήμα 5.79 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.80 και 5.81 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.79 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.80 Δείγμα 1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan

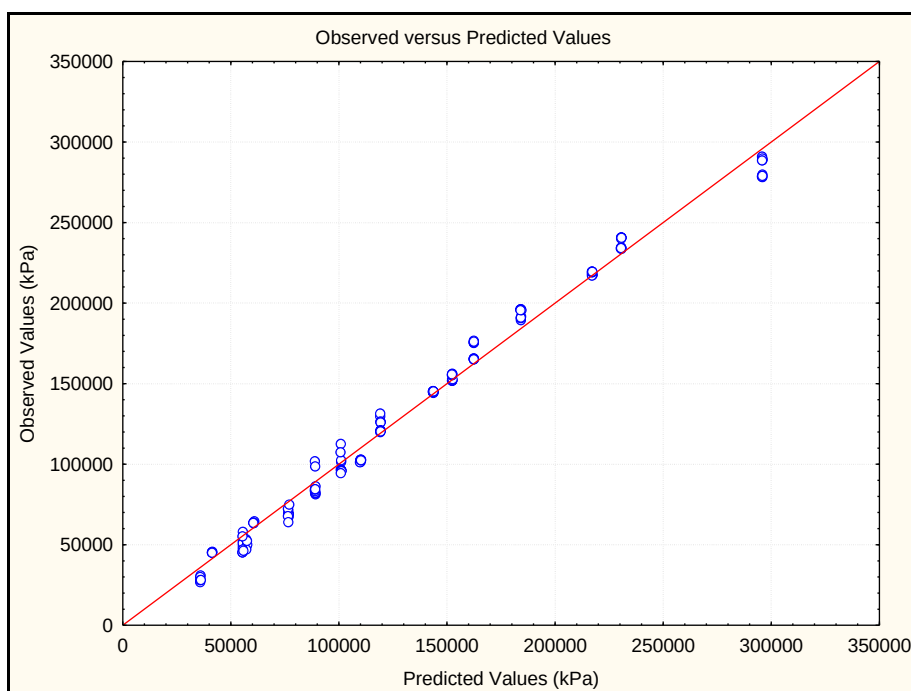


Σχήμα 5.81 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

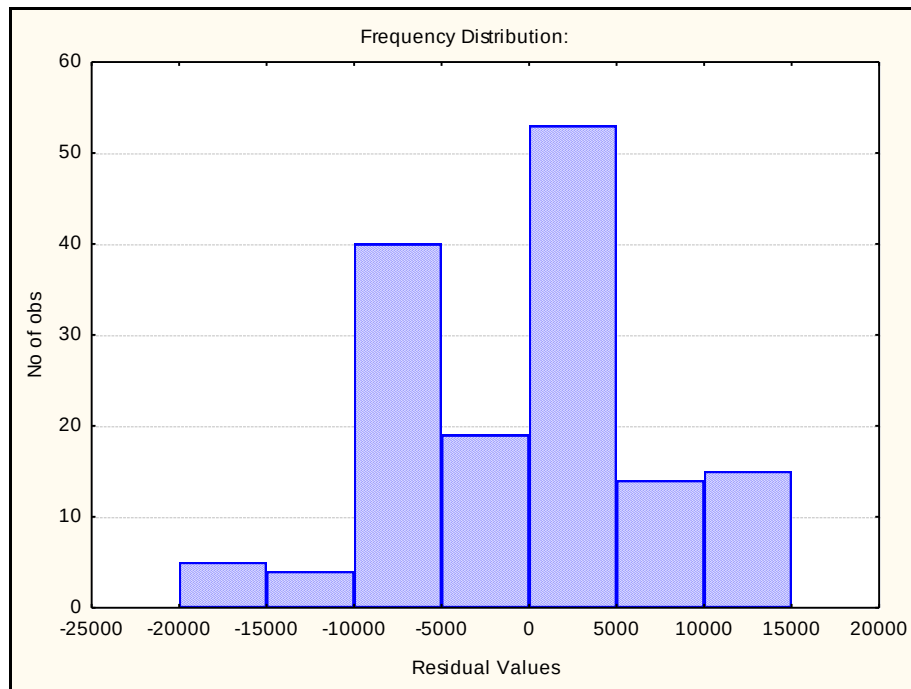
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=8,03\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο Uzan είναι: $K_1=1792,440$, $K_2= 0,268$ και $K_3=0,597$

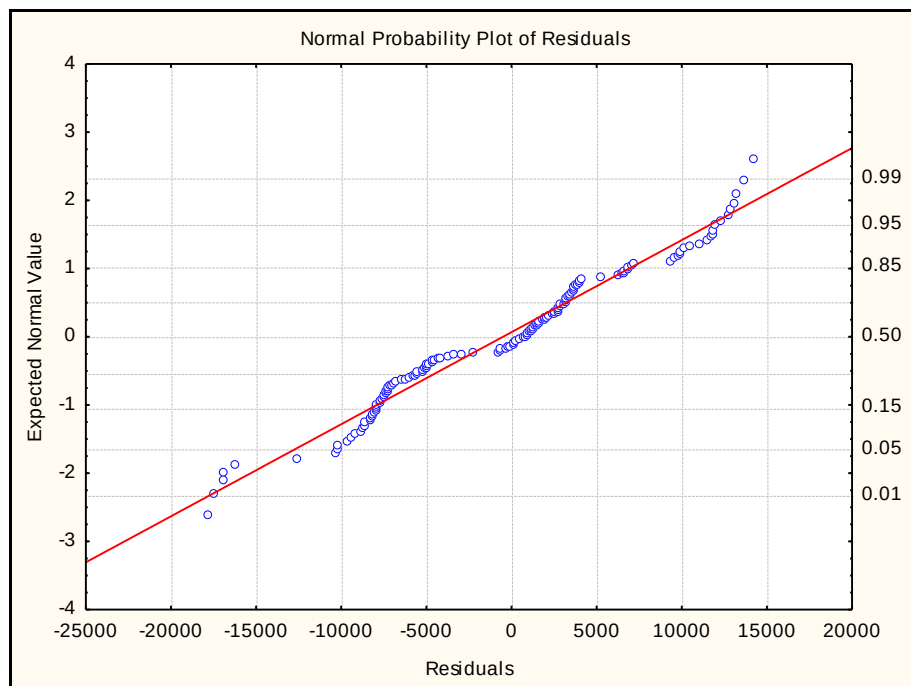
Στο σχήμα 5.82 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.83 και 5.84 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.82 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου Uzan



Σχήμα 5.83 Δείγμα 2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοντέλου Uzan



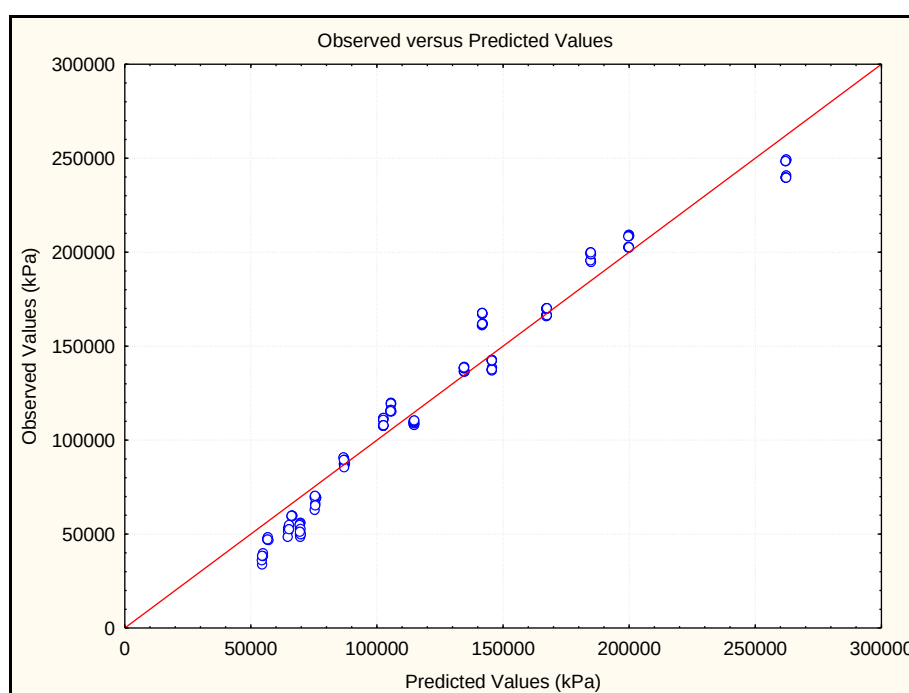
Σχήμα 5.84 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου Uzan

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε εξαιρετικά υψηλός συντελεστής $R^2=0,99$ και χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=8,75\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική.

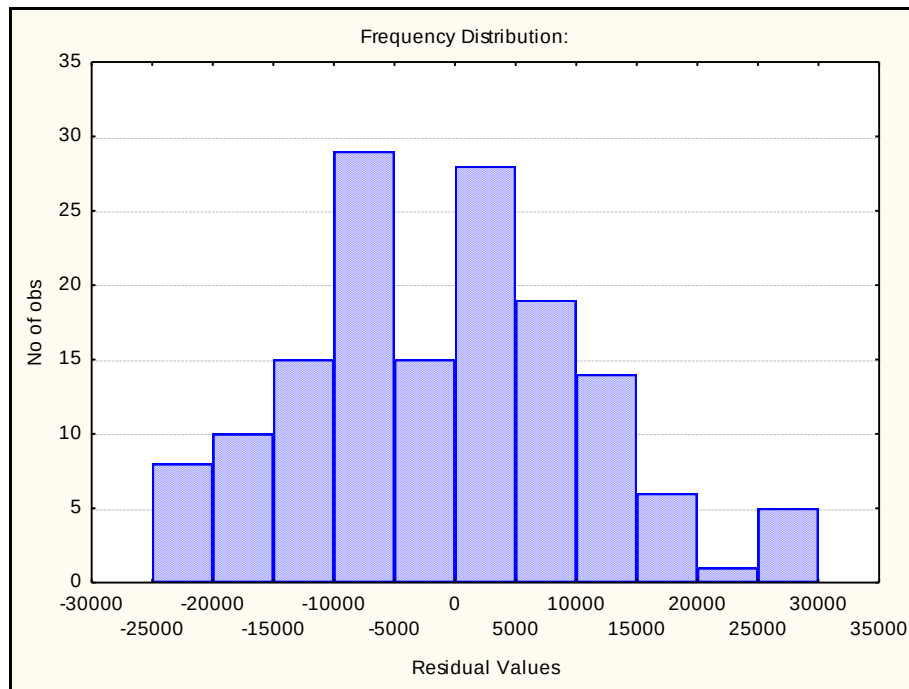
Μοντέλο MEPDG

Για το πρώτο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο MEPDG είναι: $K_1=524,850$, $K_2= 0,351$ και $K_3=1,118$

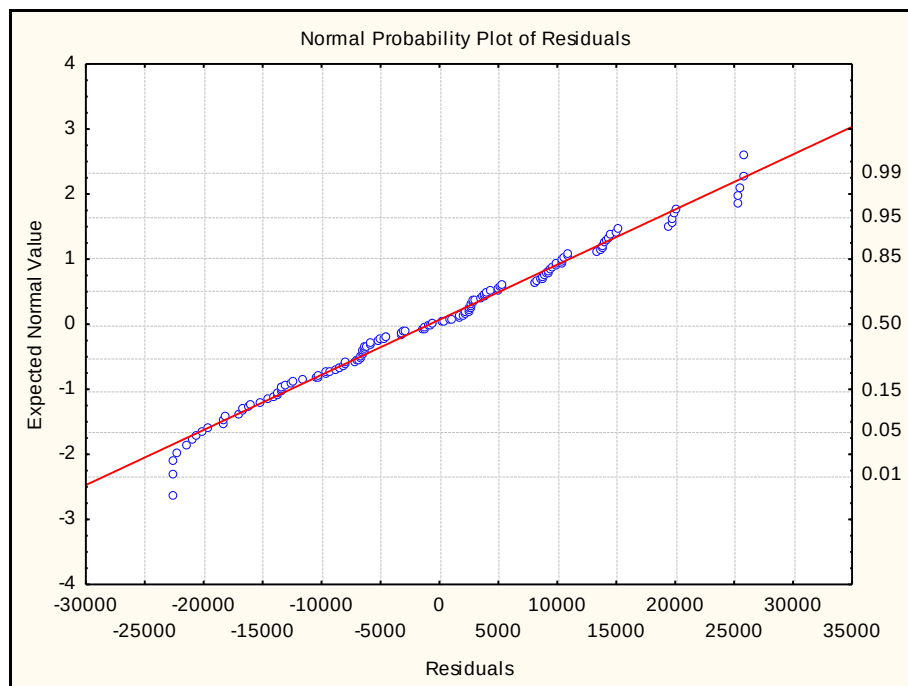
Στο σχήμα 5.85 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.86 και 5.87 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.85 Δείγμα 1: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.86 Δείγμα 1: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG

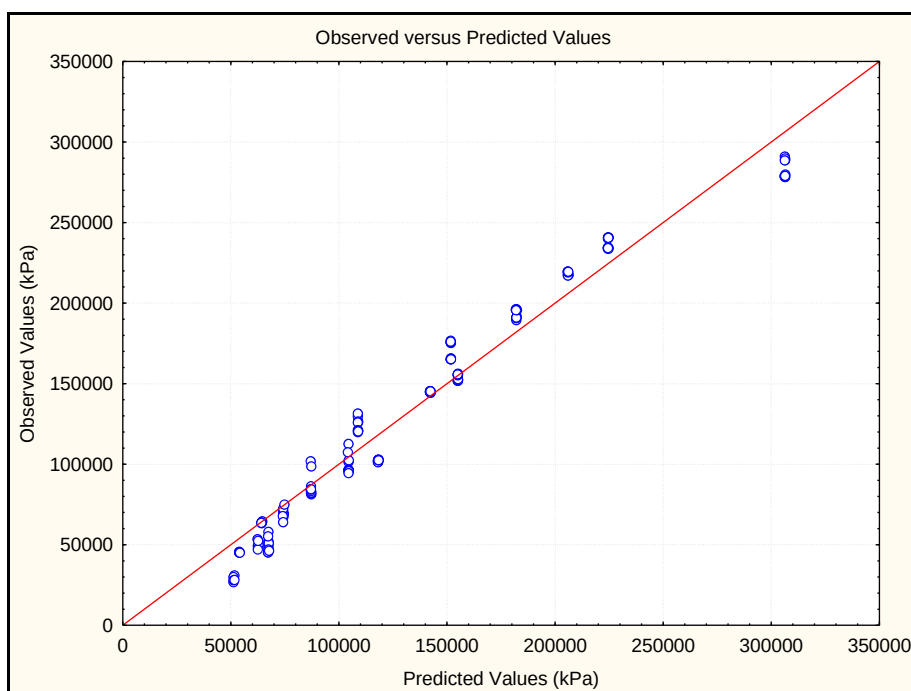


Σχήμα 5.87 Δείγμα 1: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

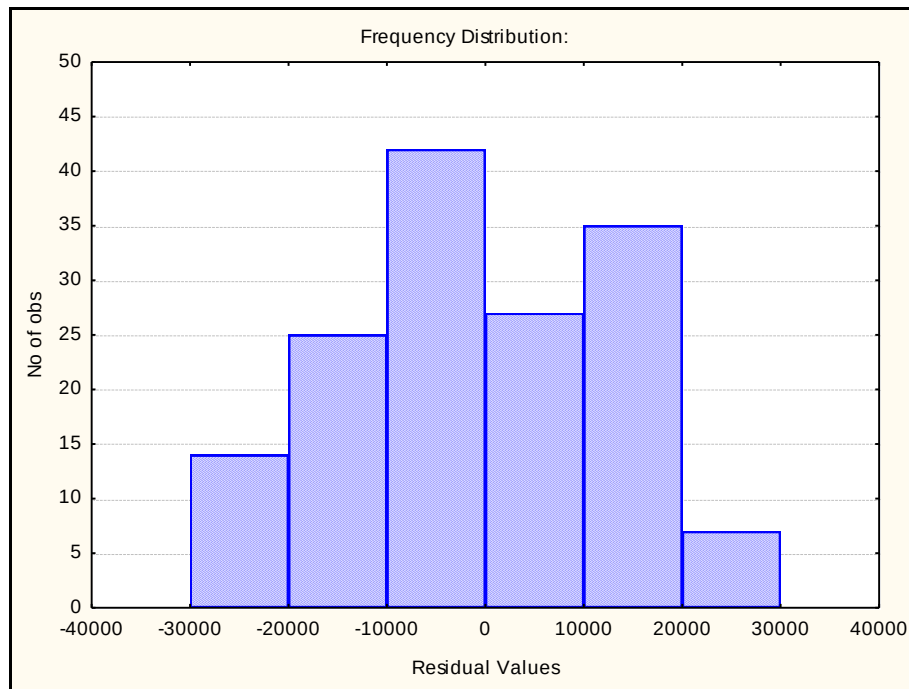
Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,96$ και αποδεκτό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=15,33\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται αποδεκτή.

Για το δεύτερο δείγμα οι συντελεστές παλινδρόμησης που προέκυψαν για το μοντέλο ΜΕΡPDG είναι: $K_1=489,209$, $K_2= 0,387$ και $K_3=1,306$

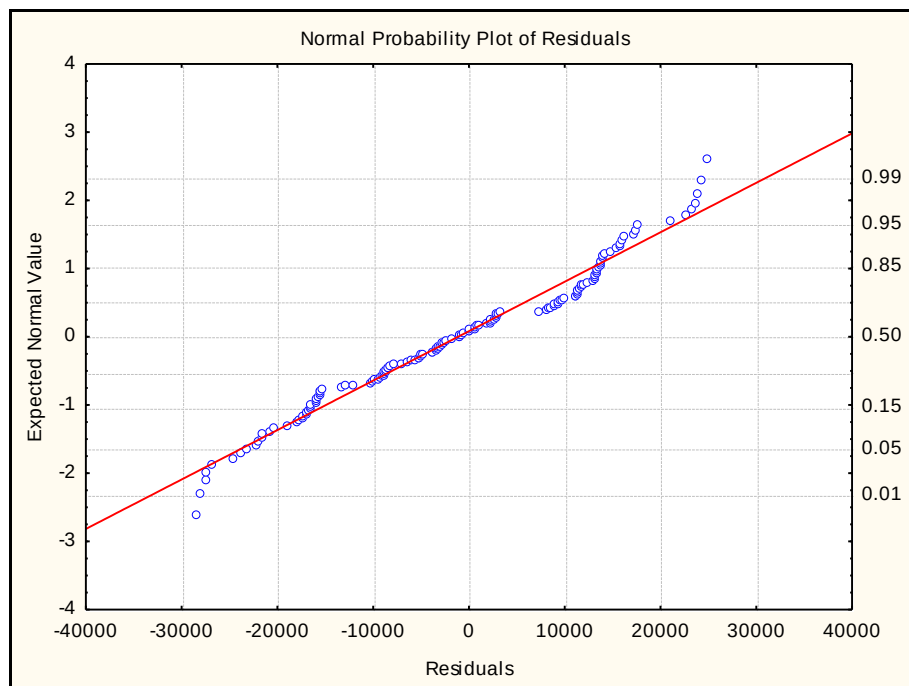
Στο σχήμα 5.88 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών του μέτρου επανάκτησης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο και των τιμών που υπολογίζονται από το μοντέλο. Στα σχήματα 5.89 και 5.90 ελέγχεται η κανονικότητα των σφαλμάτων, τα οποία προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.



Σχήμα 5.88 Δείγμα 2: Μετρήσεις-Προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου ΜΕΡPDG



Σχήμα 5.89 Δείγμα 2: Ιστογράμμο συχνοτήτων του μοντέλου MEPDG



Σχήμα 5.90 Δείγμα 2: Normal probability plot του μοντέλου MEPDG

Από την στατιστική ανάλυση προέκυψε υψηλός συντελεστής $R^2=0,96$ και υψηλό σφάλμα πρόβλεψης $RMSPE=20,11\%$, επομένως η προσαρμογή του καταστατικού μοντέλου κρίνεται οριακά αποδεκτή.

5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα

Στην προηγούμενη παράγραφο 5.2 πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές επαναλαμβανόμενης τριαξονικής φόρτισης και εξετάστηκε η προσαρμογή των καταστατικών μοντέλων σε αυτά.

Πίνακας 10 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης

Περιεχόμενη Υγρασία μίγματος %	Αριθμός δείγματος	Καταστατικό μοντέλο	K_1	K_2	K_3	R^2	RMSPE (%)
<u>Μίγμα 4%</u>	1	K-θ	2465,095	0,713	-	0,80	24,04
		Uzan	4039,559	0,164	0,572	0,99	10,33
		MEPDG	621,939	0,298	1,230	0,95	21,04
	2	K-θ	779,563	0,889	-	0,83	22,59
		Uzan	1445,478	0,306	0,591	0,99	7,13
		MEPDG	464,651	0,417	1,290	0,97	17,77
<u>Μίγμα 5%</u>	1	K-θ	1590,805	0,775	-	0,88	17,15
		Uzan	2374,334	0,342	0,452	0,99	7,19
		MEPDG	546,667	0,434	0,996	0,97	13,65
	2	K-θ	1269,052	0,796	-	0,78	24,62
		Uzan	2296,109	0,175	0,643	0,99	8,29
		MEPDG	477,088	0,297	1,429	0,96	18,75
<u>Μίγμα 6%</u>	1	K-θ	3873,428	0,646	-	0,84	18,19
		Uzan	5644,153	0,218	0,451	0,98	8,31
		MEPDG	716,509	0,326	0,988	0,96	15,75
	2	K-θ	6996,152	0,558	-	0,79	17,68
		Uzan	9885,934	0,112	0,479	0,98	6,63
		MEPDG	839,837	0,223	1,069	0,95	13,04
<u>Μίγμα 7%</u>	1	K-θ	746,309	0,904	-	0,88	17,55
		Uzan	1210,000	0,437	0,476	0,98	10,94
		MEPDG	476,346	0,534	1,024	0,97	18,23
	2	K-θ	741,200	0,904	-	0,84	22,09
		Uzan	1368,627	0,325	0,587	0,99	10,24
		MEPDG	472,363	0,444	1,265	0,96	22,41
<u>Μίγμα 8%</u>	1	K-θ	1941,760	0,727	-	0,83	19,29
		Uzan	2996,089	0,240	0,510	0,99	8,03
		MEPDG	524,850	0,351	1,118	0,96	15,33
	2	K-θ	950,685	0,858	-	0,83	24,56
		Uzan	1792,440	0,268	0,597	0,99	8,75
		MEPDG	489,209	0,387	1,306	0,96	20,11

Στον παραπάνω πίνακα 10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης που προέκυψαν για όλα τα δείγματα του ασύνδετου υλικού που συμπυκνώθηκαν σε ποσοστά υγρασίας 4%, 5%, 6%, 7% και 8%, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσαρμογής R^2 και οι τιμές του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος RMSPE.

Όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν γενικά αποδεκτούς συντελεστές προσαρμογής R^2 , που κυμαίνονται για το μοντέλο K-θ από 0,78 έως 0,88, για το Uzan από 0,98 έως 0,99 και για το MEPDG από 0,95 έως 0,97, ανεξάρτητα από το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας του δείγματος. Το μοντέλο K-θ, συγκριτικά με τα υπόλοιπα μοντέλα, εμφανίζει σε όλες τις περιπτώσεις χαμηλότερο συντελεστή R^2 , ενώ τα μοντέλα Uzan και MEPDG εμφανίζουν πολύ υψηλό R^2 .

Οι τιμές του συντελεστή RMSPE, που εκφράζει το ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης, κυμαίνονται για το μοντέλο K-θ από 17,15% έως 24,62%, για το Uzan από 6,63% έως 10,94% και για το MEPDG από 13,04% έως 22,41%. Τα μοντέλα K-θ και MEPDG παρουσιάζουν αρκετά υψηλά σφάλματα RMSPE που μειώνονται ελαφρώς για τα δείγματα με το βέλτιστο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας 6%, ενώ το μοντέλο Uzan εμφανίζει σταθερά χαμηλές τιμές RMSPE, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, ανεξαρτήτως ποσοστού υγρασίας.

Τέλος, σημαντικές αποκλίσεις παρατηρούνται στις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης, κυρίως του K_1 , για τα μοντέλα K-θ και Uzan, ενώ για το μοντέλο MEPDG οι συντελεστές παλινδρόμησης κυμαίνονται σε μικρότερο εύρος.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της μη γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του ασύνδετου αμμοχάλικου ως υλικό κατασκευής των βάσεων και των υποβάσεων των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία. Για τον χαρακτηρισμό της ελαστικής απόκρισης του υλικού υπό τις κυκλοφοριακές συνθήκες φόρτισης χρησιμοποιήθηκε το μέτρο επανάκτησης M_r , που αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Έπειτα από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη μη γραμμική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών, και την αναζήτηση των μεθόδων υπολογισμού του μέτρου επανάκτησης, αλλά και των καταστατικών μοντέλων πρόβλεψης του, ακολούθησε η πειραματική διαδικασία για τη διερεύνηση της ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Συγκεκριμένα, στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων ασύνδετου αμμοχάλικου και στη συνέχεια, δείγματα του υλικού, συμπυκνωμένα σε διαφορετικά ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας, υποβλήθηκαν σε τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν και η διαδικασία προσαρμογής των καταστατικών μοντέλων K-θ, Uzan και MEPDG σε αυτά, πραγματοποιήθηκαν για ένα εύρος ποσοστών υγρασίας (4%, 5%, 6%, 7%, 8%).

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, τις εργαστηριακές δοκιμές, αλλά και τις στατιστικές αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδείχθηκε η μεγάλη εξάρτηση του μέτρου επανάκτησης M_r από την κατάσταση φόρτισης, καθώς αυτό αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση των επιβαλλόμενων τάσεων (πλευρική και αξονική τάση, ογκομετρική τάση), συμπέρασμα που συμφωνεί πλήρως με την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία (stress-hardening materials). Επομένως, δεν μπορεί να θεωρηθεί μία σταθερή τιμή για το ελαστικό μέτρο ενός κοκκώδους υλικού, καθώς αυτό αποτελεί συνάρτηση της επιβαλλόμενης φόρτισης από την κυκλοφορία και της θέσης του υλικού στη δομή του οδοστρώματος.
- Μεταξύ των πολλών παραγόντων που επιδρούν στο μέτρο επανάκτησης των ασύνδετων υλικών, όπως είναι η συμπύκνωση, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η

προέλευση του υλικού, αποδεικνύεται ότι το ποσοστό υγρασίας που περιέχουν και η κατάσταση φόρτισης είναι οι σημαντικότεροι.

- Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι η τριαξονική δοκιμή φόρτισης στην οποία υποβλήθηκαν δοκίμια που έχουν συμπτυκνωθεί υπό βέλτιστο ποσοστό υγρασίας έγινε υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Έτσι συμπεραίνουμε ότι οι τιμές του μέτρου επανάκτησης που προέκυψαν στο εργαστήριο αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές τιμές στο οδόστρωμα, μόνο όταν εξασφαλίζεται επαρκής στράγγιση. Σε περιπτώσεις που το νερό παγιδεύεται στις κοκκώδεις στρώσεις του οδοστρώματος, λόγω του ότι μπορεί να υπάρχει κάποιο αδιαπέρατο ή αργλικό στρώμα κάτω από την υπόβαση, τότε μπορεί η εργαστηριακή δοκιμή να υπερεκτιμά το μέτρο επανάκτησης σε σχέση με την πραγματικότητα.
- Από τα αποτελέσματα της δοκιμής Proctor σχηματίστηκε η καμπύλη ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας – ξηρής πυκνότητας από την οποία προσδιορίστηκε το βέλτιστο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας 6% και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα 2254 Kgr/m³. Από τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής επιβεβαιώνεται ότι τα δοκίμια που είναι συμπτυκνωμένα με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 6% πράγματι παρουσιάζουν υψηλότερη τιμή μέτρου επανάκτησης από τα δοκίμια που έχουν διαφορετική περιεχόμενη υγρασία.
- Η πρότυπη διαδικασία εκτέλεσης της τριαξονικής δοκιμής AASHTO T307-99 καθορίζει μία ακολουθία ζευγών τιμών αποκλίνουσας και πλευρικής τάσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δοκιμής κατά την εφαρμογή αυτών των συνδυασμών τάσεων, γενικά παρατηρείται αύξηση του μέτρου επανάκτησης όταν αυξάνεται η ογκομετρική τάση (το άθροισμα των κυρίων τάσεων). Όμως, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της τριαξονικής δοκιμής, το μέτρο επανάκτησης δεν φαίνεται να επηρεάζεται στον ίδιο βαθμό, καθώς αυξάνεται η πλευρική τάση όσο όταν αυξάνεται η αποκλίνουσα, αξονική τάση. Το γεγονός αυτό δε συμφωνεί με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, καθώς πολλές έρευνες υποστηρίζουν ότι η υπάρχει πολύ μεγάλη εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από την πλευρική τάση, ενώ η αποκλίνουσα τάση έχει μικρότερη επιρροή στη δυσκαμψία του υλικού.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης για τα δεδομένα που προέκυψαν από την τριαξονική δοκιμή, παρατηρείται αρκετά μεγάλη απόκλιση στις τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης (κυρίως στις τιμές K_1) τόσο για το μοντέλο K-θ όσο και για το Uzan, ενώ για το μοντέλο MEPDG κινούνται σε πιο μικρό εύρος. Μάλιστα υπάρχουν περιπτώσεις που οι συντελεστές παλινδρόμησης, που

προκύπτουν για τα μοντέλα K-θ και Uzan, παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση ακόμα και για δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί στο ίδιο ποσοστό υγρασίας. Οι μεγάλες αποκλίσεις στους συντελεστές παλινδρόμησης μπορεί να μας δυσκολέψει στην παραμετροποίηση του μοντέλου μας και να μας δώσει επισφαλή αποτελέσματα στην εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης.

- Αξιολογώντας τις τιμές του συντελεστή προσαρμογής R^2 που προέκυψαν παρατηρούμε ότι οι αυτές κυμαίνονται σε αποδεκτά πλαίσια και για τα τρία εξεταζόμενα μοντέλα. Είναι φανερό ότι τα μοντέλα Uzan και MEPDG προσαρμόζονται πολύ καλά στις μετρούμενες τιμές του μέτρου επανάκτησης του ασύνδετου αμμοχάλικου που εξετάστηκε σε όλα τα δείγματα ανεξαρτήτου ποσοστού περιεχόμενης υγρασίας, ενώ το μοντέλο K-θ παρουσιάζει πιο μικρή προσαρμογή. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής R^2 για το μοντέλο Uzan κυμαίνεται από 0,98 έως 0,99 και κρίνεται εξαιρετικός, για το μοντέλο MEPDG από 0,95 έως 0,97 και κρίνεται πολύ υψηλός, ενώ για το μοντέλο K-θ από 0,78 έως 0,88, που αν και γενικά θεωρείται ικανοποιητικός, στην παρούσα περίπτωση η προσαρμογή του μοντέλου K-θ κρίνεται ανεπαρκής συγκριτικά με τα άλλα δύο μοντέλα.
- Αντίστοιχα είναι και τα συμπεράσματα όσον αφορά στον συντελεστή RMSPE που εκφράζει το σφάλμα πρόβλεψης. Το μέσο τετραγωνικό ποσοστιαίο σφάλμα RMSPE κυμαίνεται για το μοντέλο Uzan από 6,63% έως 10,94% και κρίνεται χαμηλό, για το μοντέλο MEPDG από 13,04% έως 22,41 % και κρίνεται μέτριο ως υψηλό ενώ για το μοντέλο K-θ από 17,15% έως 24,62% και κρίνεται υψηλό. Επομένως το μοντέλο Uzan παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες τιμές σφάλματος από το λιγότερο αξιόπιστο μοντέλο K-θ, Το δε μοντέλο MEPDG σε κάποια δείγματα παρουσιάζει αποδεκτά σφάλματα ενώ σε κάποια άλλα οι τιμές του σφάλματος πρόβλεψης είναι ιδιαίτερα υψηλές.
- Παρατηρείται ακόμα ότι οι τιμές του RMSPE για τα δείγματα που έχουν συμπυκνωθεί στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 6% είναι σχετικά χαμηλότερες από τις τιμές που προέκυψαν για τα δείγματα διαφορετικής υγρασίας, και για τα τρία μοντέλα. Παρόλα αυτά, η τιμές του RMSPE για τα μοντέλα K-θ και MEPDG παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ δειγμάτων διαφορετικής υγρασίας, ενώ για το μοντέλο Uzan οι τιμές RMSPE είναι σταθερά χαμηλές για όλα τα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας. Γεγονός που σημαίνει ότι, η προσαρμογή του μοντέλου Uzan δεν επηρεάζεται από την περιεχόμενη υγρασία, στο βαθμό που επηρεάζονται τα άλλα μοντέλα.

- Παρόμοια εικόνα για την προσαρμογή των μοντέλων προκύπτει και από τον έλεγχο της κανονικότητας των σφαλμάτων, καθώς από τα ιστογράμματα των σφαλμάτων και τα διαγράμματα normal probability plot διαπιστώνεται ότι τα μοντέλα Uzan και MEPDG προσαρμόζονται πιο ικανοποιητικά στην κανονική κατανομή από το μοντέλο K-θ, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπήρχαν κάποιες περιπτώσεις που το μοντέλο K-θ πλησιάζει αρκετά την κανονική κατανομή.
- Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο K-θ, αν και παρουσιάζει αποδεκτό συντελεστή προσαρμογής R^2 , αυτός είναι αρκετά χαμηλότερος τις τιμές που προκύπτουν για τα μοντέλα MEPDG και Uzan, τα οποία παρουσιάζουν καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, καθώς και λόγω του αρκετά υψηλού σφάλματος πρόβλεψης που παρουσιάζει, το μοντέλο K-θ δεν συστήνεται για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης των ασύνδετων υλικών με βάση τα ευρήματα της παρούσας εργασίας. Αντίθετα, λαμβάνοντας υπόψη τον εξαιρετικό συντελεστή συσχέτισης R^2 και το πολύ χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης που παρουσιάζει, για όλα τα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας, συστήνεται για την διερεύνηση της ελαστικής συμπεριφοράς του ασύνδετου αμμοχάλικου το καταστατικό μοντέλο Uzan.

Πέραν των ανωτέρω συμπερασμάτων, διαπιστώθηκαν και ορισμένα στοιχεία και παράμετροι που πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω σε μελλοντικές έρευνες, ώστε ο χαρακτηρισμός των ασύνδετων υλικών των βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων να γίνεται με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Επομένως προτείνονται για μελλοντική έρευνα τα εξής:

- Αξιολόγηση ασύνδετων υλικών διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ονομαστικού μεγέθους κόκκου από το αμμοχάλικο που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία. Για παράδειγμα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της ελαστικής συμπεριφοράς ασύνδετου υλικού με μεγάλο ποσοστό περιεχόμενου λεπτόκοκκου υλικού (παιπάλης) και πώς αυτή επηρεάζεται από την περιεχόμενη υγρασία. Επομένως, απαιτείται έλεγχος περισσότερων υλικών, από διαφορετικές πηγές λήψης και σε περισσότερες τιμές ποσοστού υγρασίας, ώστε να σχηματιστεί μία πλήρης εικόνα της συμπεριφοράς των υλικών βάσης υπόβασης των οδοστρωμάτων.

- Για τον ακριβή προσδιορισμό της παραμορφωτικής συμπεριφοράς των ασύνδετων κοκκωδών υλικών σε διάφορες συνθήκες φόρτισης και υγρασίας θα πρέπει οι οδηγοί σχεδιασμού οδοστρωμάτων, εκτός της δυσκαμψίας, να ενσωματώσουν παραμέτρους αντοχής και κόπωσης για τον χαρακτηρισμό των ασύνδετων υλικών. Επιπλέον, σε μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να διερευνηθεί η αποδοτικότητα περισσότερο πολύπλοκων καταστατικών μοντέλων, όπως το μοντέλο του Boyce, το μοντέλο Contour και το μοντέλο Thom, που εκτός των τάσεων, χρησιμοποιούν και άλλες μεταβλητές και λαμβάνουν υπόψη τους την επίδραση περισσότερων παραμέτρων για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης των υλικών.
- Τέλος, τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά είναι πιθανό να μοντελοποιούνται καλύτερα με μεθόδους διακριτών στοιχείων. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων για τον χαρακτηρισμό των υλικών αυτών, καθώς έτσι μπορεί να προσδιοριστεί η πραγματική μη γραμμική συμπεριφορά τους, αντί της χρήσης γραμμικών ελαστικών θεωριών.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO (1993). *"Guide for Design of Pavement Structures"*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO (2013). *"Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing"*, American Association of the State Highway and Transportation Officials, 33rd edition.
- AASHTO T307-99 (2007). *"Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials"*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Araya, A. (2011). *"Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements"*, Road and Railway Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.
- Behiry, A. (2014). *"Characterization of the Layered Pavement by Modelling and Calibration of Resilient Modulus"*, American Journal of Civil Engineering, 2(3), p. 74-86.
- Brown, S. F. and Pappin, J. W. (1981). *"Analysis of Pavements with Granular Bases"*, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 810, p.17-23.
- Brown, S. F., and Pell, P. S. (1967). *"An experimental investigation of the stresses, strains and deflections in a layered pavement structure subjected to dynamic loads."*, International Conference Structure Design of Asphalt Pavements, p. 384-403.
- Dawson, A. R., Thom, N. H., and Paute, J. L. (1996). *"Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition."* Flexible Pavements, Eur. Symp. Euroflex 1993, A. G. Correia, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 35–44.
- Dunlap, W. A. (1963), *"A Report on a Mathematical Model Describing the Deformation Characteristics of Granular Materials"*, Technical Report 1, Project 2-8-62-27, Texas A&M University, College Station, TX.
- George, K. (2004). *"Prediction of Resilient Modulus from Soil Index Properties"*, University of Mississippi, Department of Civil Engineering.

- Hicks, R. G. (1970). *"Factors influencing the resilient properties of granular materials"*, Ph.D thesis, University of California, Berkeley.
- Hicks, R. G. and Monismith, C. L. (1971). *"Factors influencing the resilient properties of granular materials"*, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 345, p. 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.
- Jorenby, B. N., and Hicks, R. G. (1986). *"Base course contamination limits"*, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 1095, p. 86–101.
- Karasahin, M. (1993). *"Resilient Behaviour of Granular Materials for Analysis of Highway Pavements"*, University of Nottingham, Department of Civil Engineering.
- Kolisoja, P., (1997). *"Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials"*, Ph.D thesis, Tampere University of Technology, Tampere.
- Lekarp, F., Isacsson, U., Dawson, A., (2000). *"State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates"*, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 126(1), p. 66-75.
- Li, L., Liu, J., Zhang, X. (2010). *"Resilient modulus characterization of Alaskan granular base materials"*, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks.
- Mazari, M., Abdallah, I., Garibay, J., Nazarian, S. (2016). *"Correlating Nonlinear Parameters of Resilient Modulus Models for Unbound Geomaterials"*, 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, 143, p. 862-869.
- Mazari, M., Navarro, E., Abdallah, I., and Nazarian, S. (2014). *"Comparison of numerical and experimental responses of pavement systems using various resilient modulus models"*, Center for Transportation Infrastructure Systems, The University of Texas at El Paso, El Paso, TX, USA, p. 36-44.
- Mohajerani, A., Nguyen, B., T., Glavacevic, L. (2016). *"Estimation of resilient modulus of unbound granular materials using Clegg impact value and field stress levels"*, School of Engineering, Civil Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia.

- Monismith, C. L., Seed, H. B., Mitry, F. G., and Chan, C. K. (1967). "Prediction of pavement deflections from laboratory tests.", 2nd International Conference Structure Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, p. 53-88.
- Montepara, A. , Tebaldi, G., Marradi, A., Betti, G. (2012). *"Effect on Pavement Performance of a Subbase Layer Composed by Natural Aggregate and RAP"*, SIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, Rome, Italy, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 53, p. 981 – 990.
- Mousa, R., El-Badawy, S., Azam, A., Gabr, A., Arab, M. (2015). *"Resilient Modulus characterization for Granular Base Material in Egypt"*, 8th International Engineering Conference, Sharm Al-Shiekh, Egypt.
- NCHRP (2013). *"Practices for Unbound Aggregate Pavement Layers"*, NCHRP Synthesis 445, National Cooperative Highway Research Program, Transport Research Board, National Research Council.
- 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.
- Ooi, P. S. K., Archilla, A. R., and Sandefur, K. G. (2004). *"Resilient Modulus Models for Compactive Cohesive Soils"*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1874, p. 115-124.
- Pezo, R.F. (1993). *"A General Method of Reporting Resilient Modulus Tests of Soils: A Pavement Engineer's Point of View"*, 72nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Ping, W., V. (2007). *"Final report: Enhancement of Resilient Modulus Data for the Design of Pavement Structures in Florida"*, Department of Civil & Environmental Engineering, FAMU-FSU College of Engineering, Florida State University.
- Seed, H. B., Chan, C. K., Lee, C. E. (1962). *"Resilient Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements"*, International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, p. 77-113.

- Seed, H. B., Chan, C. K., Monosmith, C. L. (1955). *"Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay"*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 34, p. 541-558.
- Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., and Chan, C. K. (1967). *"Prediction of flexible pavement deflections from laboratory repeated load tests."* NCHRP Report, 35, National Cooperative Highway Research Program.
- Shackel, B. (1973). *"Repeated Loading of Soils: A Review"* Australian Road Research, 5(3), p. 22-49.
- Sheng, B. (2010). *"Evaluation of Granular Subgrade Modulus from Field and Laboratory Tests"*, Florida State University, Department of Civil & Environmental Engineering.
- Thom, N. H., and Brown, S. F. (1987). *"Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base"*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1121, p. 50–56.
- Trollope, E. H., Lee, I. K., and Morris, J. (1962). *"Stresses and deformation in two-layer pavement structures under slow repeated loading"*, Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 1(2), p. 693–718.
- Uzan, J. (1985). *"Characterization of Granular Materials"*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1022, p. 52-59.
- 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.
- ΕΛΟΤ EN 13286.02. *"Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content – Proctor compaction – Μίγματα μη σταθεροποιημένα και σταθεροποιημένα με υδραυλικές κονίες – Μέρος 2: Μέθοδοι δοκιμής για τον προσδιορισμό της εργαστηριακής πυκνότητας αναφοράς και της περιεκτικότητας σε νερό – Συμπύκνωση Proctor"*.
- ΕΛΟΤ EN 933-1. *"Test for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method – Δοκιμές γεωμετρικών ιδιοτήτων των"*

αδρανών – Μέρος 1: Προσδιορισμός διαγράμματος κοκκομετρίας – Μέθοδος με κόσκινα”.

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-03-00:2009. “*Road pavement layers with unbound aggregates - Στρώσεις οδοστρώματος από ασύνδετα αδρανή υλικά*”.

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας Π 1 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 4%

Cycle No	Confining Stress (σc)	σd - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,8	25,6	88	12,06784	0,000338	54,945
1	20,5	25,5	87	12,0207	0,000335	55,392
1	20,8	25,6	88	12,06784	0,000332	55,859
1	20,6	25,7	87,5	12,11498	0,000342	54,694
1	20,7	25,5	87,6	12,0207	0,000336	55,106
2	20,5	44,8	106,3	21,11872	0,000521	72,149
2	20,5	44,6	106,1	21,02444	0,000514	72,704
2	21	44,7	107,7	21,07158	0,000514	72,784
2	20,6	44,6	106,4	21,02444	0,000516	72,516
2	21	44,6	107,6	21,02444	0,000517	72,361
3	20,7	62,2	124,3	29,32108	0,000705	78,562
3	20,7	61,9	124	29,17966	0,00065	85,909
3	20,8	62,1	124,5	29,27394	0,00061	92,195
3	20,9	62,1	124,8	29,27394	0,000707	78,461
3	20,6	61,9	123,7	29,17966	0,000577	97,055
4	34,5	34,7	138,2	16,35758	0,0005	61,949
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000533	58,666
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000501	61,751
4	34,8	34,5	138,9	16,2633	0,000553	56,295
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000486	63,772
5	34,6	68,9	172,7	32,47946	0,000598	103,849
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000596	103,385
5	34,2	68,8	171,4	32,43232	0,000581	106,881
5	34,5	68,8	172,3	32,43232	0,000598	103,862
5	34,6	69	172,8	32,5266	0,000589	104,987
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000616	151,128
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000621	149,995
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000635	146,219
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000639	145,321
6	34,6	103,1	206,9	48,60134	0,000635	146,853
7	69	69	276	32,5266	0,000516	120,915
7	68,8	69,1	275,5	32,57374	0,000536	116,341

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000531	115,739
7	68,7	68,8	274,9	32,43232	0,00052	119,298
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000534	116,693
8	69	138,1	345,1	65,10034	0,000638	194,717
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000638	194,443
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000637	194,737
8	68,8	137,8	344,2	64,95892	0,000641	193,51
8	68,8	138,1	344,5	65,10034	0,000638	194,787
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000804	231,367
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000807	230,631
9	69	206,9	413,9	97,53266	0,000805	231,329
9	68,7	206,6	412,7	97,39124	0,000805	231,051
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000804	231,357
10	103,5	69	379,5	32,5266	0,000529	117,331
10	103,3	68,7	378,6	32,38518	0,000526	117,562
10	103,6	69	379,8	32,5266	0,000531	116,868
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000527	117,55
10	103,6	69	379,8	32,5266	0,00053	117,159
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000589	158,024
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000593	157,21
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,00059	157,984
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,000589	158,069
11	103,5	103,3	413,8	48,69562	0,000589	157,885
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000784	237,359
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000785	237,265
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000787	236,573
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000784	237,487
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000785	237,009
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000583	159,862
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,00058	160,483
13	137,7	103,4	516,5	48,74276	0,000583	159,625
13	138	103,5	517,5	48,7899	0,000582	160,155
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000583	159,836
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000643	193,047
14	138,1	137,8	552,1	64,95892	0,000639	194,022
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000642	193,301
14	137,9	138,1	551,8	65,10034	0,000644	192,944
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000641	193,539

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	138,1	275,9	690,2	130,05926	0,0009	275,276
15	137,8	275,8	689,2	130,01212	0,000895	277,067
15	138	275,6	689,6	129,91784	0,000898	276,49
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000903	275,347
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000894	277,161
1	20,8	20,8	83,2	9,80512	0,000484	38,624
1	20,7	20,9	83	9,85226	0,000563	33,112
1	20,5	20,7	82,2	9,75798	0,000439	41,515
1	21	20,6	83,6	9,71084	0,000534	35,58
1	20,7	20,8	82,9	9,80512	0,000565	32,988
2	20,6	41,6	103,4	19,61024	0,000593	62,057
2	20,8	41,3	103,7	19,46882	0,000674	54,743
2	20,7	41,2	103,3	19,42168	0,000583	64,419
2	20,7	41,4	103,5	19,51596	0,000665	55,265
2	20,8	41,4	103,8	19,51596	0,000651	57,06
3	20,7	61,9	124	29,17966	0,000564	99,735
3	20,6	62	123,8	29,2268	0,000616	90,693
3	20,9	62,1	124,8	29,27394	0,000672	82,287
3	20,5	62	123,5	29,2268	0,0006	93,788
3	20,8	62,2	124,6	29,32108	0,000596	93,705
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000435	71,06
4	34,5	34,6	138,1	16,31044	0,000504	62,27
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,00059	52,032
4	34,7	34,5	138,6	16,2633	0,000434	71,198
4	34,5	34,4	137,9	16,21616	0,000537	58,347
5	34,7	69	173,1	32,5266	0,000594	104,881
5	34,3	68,9	171,8	32,47946	0,000623	99,138
5	34,6	68,9	172,7	32,47946	0,000556	112,143
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000619	99,55
5	34,6	68,8	172,6	32,43232	0,00059	104,538
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,00066	141,482
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,000671	138,957
6	34,5	103,6	207,1	48,83704	0,000629	147,803
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000656	141,465
6	34,5	103,1	206,6	48,60134	0,000624	149,053
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,00053	116,548
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,00054	115,631

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
7	69	69	276	32,5266	0,000547	113,967
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000543	113,778
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,00052	118,918
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000646	192,024
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000645	192,483
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000645	192,142
8	68,9	137,8	344,5	64,95892	0,000644	192,614
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,000644	192,822
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000774	240,44
9	68,9	207	413,7	97,5798	0,000775	240,452
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000775	240,183
9	68,8	206,6	413	97,39124	0,000774	240,301
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000774	240,551
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000502	123,36
10	103,4	68,7	378,9	32,38518	0,000504	122,656
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000501	123,792
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,0005	124,07
10	103,2	68,9	378,5	32,47946	0,000505	122,885
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000576	161,707
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000573	162,417
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000574	162,277
11	103,6	103,6	414,4	48,83704	0,000575	162,228
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000574	162,147
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000755	246,53
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000755	246,358
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000755	246,678
12	103,2	206,9	516,5	97,53266	0,000755	246,57
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000754	246,922
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000565	164,533
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000566	164,729
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000568	164,188
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000563	165,263
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000564	164,996
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000621	199,676
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000622	199,565
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000624	198,877
14	138,2	138	552,6	65,0532	0,000623	199,418
14	137,6	138	550,8	65,0532	0,000625	198,744

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	137,8	275,8	689,2	130,01212	0,000855	290,3
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000855	289,903
15	137,8	275,5	688,9	129,8707	0,000861	287,809
15	138	275,4	689,4	129,82356	0,000859	288,709
15	138	275,7	689,7	129,96498	0,000858	289,345
1	20,5	25,4	86,9	11,97356	0,000513	36,274
1	20,8	25,3	87,7	11,92642	0,000512	36,127
1	20,8	25,3	87,7	11,92642	0,000513	36,201
1	20,5	25,4	86,9	11,97356	0,000516	36,114
1	20,5	25,4	86,9	11,97356	0,000515	36,097
2	21,1	44,8	108,1	21,11872	0,000719	51,928
2	20,6	44,8	106,6	21,11872	0,000715	52,146
2	20,5	44,7	106,2	21,07158	0,000717	52,057
2	20,9	44,7	107,4	21,07158	0,000714	52,172
2	20,6	44,8	106,6	21,11872	0,000717	52,078
3	20,6	63,9	125,7	30,12246	0,000832	67,353
3	20,8	63,8	126,2	30,07532	0,000837	66,697
3	20,8	63,9	126,3	30,12246	0,000837	66,902
3	20,8	63,8	126,2	30,07532	0,00084	66,535
3	20,8	63,7	126,1	30,02818	0,000837	66,626
4	34,6	37,6	141,4	17,72464	0,000591	52,417
4	34,4	37,6	140,8	17,72464	0,000588	52,671
4	34,4	38	141,2	17,9132	0,00059	53,086
4	34,6	37,6	141,4	17,72464	0,000587	52,666
4	34,5	37,6	141,1	17,72464	0,000588	52,564
5	34,6	68,9	172,7	32,47946	0,000793	78,27
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000823	75,517
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000806	77,077
5	34,7	68,9	173	32,47946	0,000782	79,285
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000788	78,748
6	34,9	103,2	207,9	48,64848	0,000803	115,702
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000801	116,256
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000806	115,567
6	34,5	103,3	206,8	48,69562	0,000808	115,217
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,0008	116,401
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,000662	93,697
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,00066	93,936

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000658	94,204
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,000665	93,297
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000661	93,726
8	69	137,7	344,7	64,91178	0,000703	176,226
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000703	176,602
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000705	175,98
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000703	176,661
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000703	176,475
9	69,2	206,8	414,4	97,48552	0,000832	223,674
9	68,7	206,7	412,8	97,43838	0,000831	223,786
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000833	223,392
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000834	223,102
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000832	223,701
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000605	102,617
10	103,5	69,1	379,6	32,57374	0,000604	103,163
10	103,2	69	378,6	32,5266	0,000603	103,118
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,000599	103,44
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000599	103,402
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000642	144,915
11	103,4	103,6	413,8	48,83704	0,000643	145,014
11	103,3	103,3	413,2	48,69562	0,000644	144,39
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000647	143,962
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,000642	144,967
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000792	235,093
12	103,6	206,7	517,5	97,43838	0,00079	235,438
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000791	235,258
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000793	234,675
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000791	235,24
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000608	153,27
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000605	153,771
13	137,7	103,5	516,6	48,7899	0,000605	154,048
13	138,1	103,2	517,5	48,64848	0,000606	153,364
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000604	154,34
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000653	190,028
14	137,9	137,7	551,4	64,91178	0,000652	190,068
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,00065	190,848
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000653	190,108
14	138	138	552	65,0532	0,000651	190,76

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000903	274,922
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000905	274,15
15	137,9	275,5	689,2	129,8707	0,000904	274,194
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000904	274,647
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000906	274,131
1	20,6	20,8	82,6	9,80512	0,000696	26,624
1	20,8	20,7	83,1	9,75798	0,000593	31,054
1	20,6	20,9	82,7	9,85226	0,000655	27,995
1	20,7	20,8	82,9	9,80512	0,000651	28,258
1	20,6	21	82,8	9,8994	0,00064	29,192
2	20,7	42,6	104,7	20,08164	0,000588	60,406
2	20,7	43,1	105,2	20,31734	0,000548	63,605
2	21	43,6	106,6	20,55304	0,000553	63,522
2	20,6	44,1	105,9	20,78874	0,000555	64,165
2	20,5	44,3	105,8	20,88302	0,000562	63,737
3	20,9	63,9	126,6	30,12246	0,000789	71,1
3	20,5	63,8	125,3	30,07532	0,000779	71,682
3	20,7	63,8	125,9	30,07532	0,000794	70,417
3	20,8	63,7	126,1	30,02818	0,000783	71,335
3	20,5	63,8	125,3	30,07532	0,000781	71,58
4	34,5	38,8	142,3	18,29032	0,000531	59,602
4	34,5	37,7	141,2	17,77178	0,000526	58,101
4	34,6	38,7	142,5	18,24318	0,000532	59,336
4	34,4	37,8	141	17,81892	0,00052	58,872
4	34,5	37,7	141,2	17,77178	0,000522	58,468
5	34,5	69,8	173,3	32,90372	0,000792	78,388
5	34,5	69,7	173,2	32,85658	0,000787	78,801
5	34,5	69,8	173,3	32,90372	0,00079	78,586
5	34,6	69,8	173,6	32,90372	0,000793	78,308
5	34,5	69,6	173,1	32,80944	0,000786	78,749
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000868	107,179
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000866	107,487
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000869	107,155
6	34,6	103,4	207,2	48,74276	0,000868	107,209
6	34,3	103,5	206,4	48,7899	0,000867	107,501
7	68,9	69,1	275,8	32,57374	0,000712	87,143
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,00071	87,273

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
7	68,9	69,2	275,9	32,62088	0,000713	87,183
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,000713	86,723
7	68,9	69,1	275,8	32,57374	0,000714	86,915
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000775	160,095
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000776	159,994
8	68,9	138,2	344,9	65,14748	0,000775	160,522
8	68,9	137,8	344,5	64,95892	0,000773	160,446
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000774	160,335
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,00085	219,06
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000852	218,542
9	68,8	206,7	413,1	97,43838	0,00085	218,872
9	68,9	206,6	413,3	97,39124	0,000849	218,937
9	69,2	206,8	414,4	97,48552	0,000853	218,211
10	103,5	69	379,5	32,5266	0,000604	102,855
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000607	102,211
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000605	102,401
10	103,4	68,7	378,9	32,38518	0,000606	102,048
10	103,2	68,9	378,5	32,47946	0,000602	102,943
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000659	141,403
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000655	142,147
11	103,3	103,3	413,2	48,69562	0,000654	142,199
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000655	142,13
11	103,6	103,3	414,1	48,69562	0,000654	142,245
12	103,2	206,7	516,3	97,43838	0,000792	234,802
12	103,6	206,7	517,5	97,43838	0,000792	234,905
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,000791	235,4
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000793	234,811
12	103,2	206,7	516,3	97,43838	0,000794	234,28
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,000606	153,634
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000607	153,553
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000603	154,226
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000607	153,627
13	138,1	103,4	517,7	48,74276	0,000605	153,821
14	138,1	137,8	552,1	64,95892	0,000645	192,287
14	137,6	137,8	550,6	64,95892	0,000644	192,516
14	138	138	552	65,0532	0,000646	192,295
14	137,8	138	551,4	65,0532	0,000644	192,828
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000644	192,695

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	138,1	275,4	689,7	129,82356	0,000871	284,608
15	137,8	275,4	688,8	129,82356	0,000871	284,608
15	138	275,4	689,4	129,82356	0,000869	285,078
15	137,7	275,4	688,5	129,82356	0,000873	283,858
15	138	275,7	689,7	129,96498	0,000872	284,444

Πίνακας Π 2 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 5%

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,6	26,2	88	12,35068	0,000357	52,187
1	21,1	26,2	89,5	12,35068	0,000353	52,621
1	20,6	26,4	88,2	12,44496	0,000352	53,267
1	20,6	26,2	88	12,35068	0,000357	52,052
1	20,6	26,2	88	12,35068	0,000352	52,77
2	20,9	45,5	108,2	21,4487	0,000551	67,457
2	20,6	45,6	107,4	21,49584	0,000551	67,734
2	20,5	45,6	107,1	21,49584	0,000549	68,069
2	21	45,5	108,5	21,4487	0,00055	67,749
2	20,6	45,4	107,2	21,40156	0,000546	68,04
3	20,9	64,7	127,4	30,49958	0,00071	78,706
3	20,5	64,6	126,1	30,45244	0,000712	78,391
3	20,8	64,7	127,1	30,49958	0,000715	78,229
3	20,7	64,8	126,9	30,54672	0,000712	78,637
3	20,7	64,6	126,7	30,45244	0,000711	78,496
4	34,6	34,4	138,2	16,21616	0,000527	59,404
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000569	54,319
4	34,5	34,6	138,1	16,31044	0,000558	55,777
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000602	51,156
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000581	52,915
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000731	85,057
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000739	83,244

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
5	34,7	68,8	172,9	32,43232	0,000717	86,769
5	34,6	68,9	172,7	32,47946	0,000749	83,132
5	34,4	69,1	172,3	32,57374	0,000733	85,007
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000818	113,744
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000813	114,545
6	34,8	103,4	207,8	48,74276	0,000813	114,572
6	34,4	103,3	206,5	48,69562	0,000812	114,53
6	34,4	103,2	206,4	48,64848	0,000814	114,157
7	68,9	70,9	277,6	33,42226	0,000539	114,975
7	69	70,9	277,9	33,42226	0,000542	114,242
7	68,8	70,9	277,3	33,42226	0,000543	114,052
7	68,7	70,9	277	33,42226	0,000543	114,121
7	69,1	70,9	278,2	33,42226	0,000542	114,552
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000738	168,136
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000737	168,395
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000735	168,802
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000739	167,934
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000738	168,156
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000891	208,809
9	68,8	206,5	412,9	97,3441	0,00089	208,78
9	68,9	207	413,7	97,5798	0,000889	209,555
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000888	209,69
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000895	207,859
10	103,5	70,4	380,9	33,18656	0,000502	123,612
10	103,2	70,4	380	33,18656	0,0005	124,01
10	103,6	70,3	381,1	33,13942	0,000499	124,117
10	103,4	70,3	380,5	33,13942	0,000502	123,36
10	103,3	70,4	380,3	33,18656	0,000498	124,583
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000618	150,748
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000619	150,402
11	103,6	103,4	414,2	48,74276	0,00062	150,207
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000616	151,213
11	103,3	103,5	413,4	48,7899	0,000619	150,606
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000826	225,475
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000825	225,54
12	103,4	207	517,2	97,5798	0,000827	225,198
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000825	225,554
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000824	225,841

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000585	159,137
13	137,7	103,5	516,6	48,7899	0,00058	160,733
13	138,2	103,4	518	48,74276	0,000582	159,899
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,000582	159,784
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000582	160,034
14	138,1	138,1	552,4	65,10034	0,000657	189,171
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000656	189,108
14	137,7	138	551,1	65,0532	0,000657	189,058
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000657	188,826
14	138,1	137,8	552,1	64,95892	0,000654	189,509
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000926	268,045
15	138	275,6	689,6	129,91784	0,000923	268,699
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000925	268,259
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000927	267,933
15	137,7	275,4	688,5	129,82356	0,000924	268,15
1	20,7	20,7	82,8	9,75798	0,000527	35,388
1	20,7	20,7	82,8	9,75798	0,000491	37,3
1	20,7	20,8	82,9	9,80512	0,000439	43,271
1	20,7	21	83,1	9,8994	0,000485	39,551
1	20,7	21	83,1	9,8994	0,000494	38,446
2	20,7	41,4	103,5	19,51596	0,000618	60,873
2	20,7	41,5	103,6	19,5631	0,00072	51,302
2	20,6	41,3	103,1	19,46882	0,000665	55,624
2	20,7	41,3	103,4	19,46882	0,000673	55,406
2	20,6	41,3	103,1	19,46882	0,000681	55,061
3	21	62,1	125,1	29,27394	0,000794	70,187
3	20,7	62,1	124,2	29,27394	0,00076	73,744
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000763	73,879
3	20,5	62,2	123,7	29,32108	0,000799	69,534
3	20,9	62,1	124,8	29,27394	0,000773	71,993
4	34,4	34,4	137,6	16,21616	0,000581	52,87
4	34,7	34,5	138,6	16,2633	0,00058	53,25
4	34,5	34,4	137,9	16,21616	0,000579	53,368
4	34,6	34,4	138,2	16,21616	0,000554	56,334
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000527	59,807
5	34,3	68,9	171,8	32,47946	0,00071	86,974
5	34,6	68,8	172,6	32,43232	0,000683	90,134

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
5	34,5	68,7	172,2	32,38518	0,000686	90,908
5	34,2	69,1	171,7	32,57374	0,000722	85,977
5	34,8	68,8	173,2	32,43232	0,000672	92,458
6	34,4	103,6	206,8	48,83704	0,000755	123,601
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,00076	122,538
6	34,4	103,3	206,5	48,69562	0,000753	123,424
6	34,4	103,3	206,5	48,69562	0,000759	122,444
6	34,8	103,5	207,9	48,7899	0,000755	123,438
7	69,1	70,4	277,7	33,18656	0,000511	121,195
7	68,6	70,3	276,1	33,13942	0,000512	120,922
7	69,1	70,5	277,8	33,2337	0,000513	121,049
7	69,1	70,4	277,7	33,18656	0,000509	121,707
7	68,7	70,3	276,4	33,13942	0,000511	121,02
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000707	175,493
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000706	175,652
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000703	176,74
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000706	175,863
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000704	176,188
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000855	217,566
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000855	217,653
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000854	218,095
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000852	218,502
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000854	217,851
10	103,3	70,1	380	33,04514	0,000477	130,06
10	103,4	70	380,2	32,998	0,000479	129,361
10	103,6	70,1	380,9	33,04514	0,000477	130,153
10	103,3	69,9	379,8	32,95086	0,000476	130,012
10	103,3	69,9	379,8	32,95086	0,000477	129,841
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000595	156,569
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000594	156,82
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000596	156,125
11	103,4	103,2	413,4	48,64848	0,000596	155,968
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000597	156,113
12	103,6	206,8	517,6	97,48552	0,000811	229,516
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,00081	229,708
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000811	229,636
12	103,2	206,8	516,4	97,48552	0,000814	228,671
12	103,6	206,9	517,7	97,53266	0,000811	229,539

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000573	162,424
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000572	162,649
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000574	162,407
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000571	163,13
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000574	162,173
14	137,9	138	551,7	65,0532	0,000653	190,148
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,000653	189,942
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,000653	189,828
14	138	138	552	65,0532	0,000652	190,519
14	137,8	138	551,4	65,0532	0,000652	190,468
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,0009	275,71
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000901	275,4
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000901	275,541
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000903	274,72
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000898	276,229
1	21	24,3	87,3	11,45502	0,000447	41,597
1	20,7	24,3	86,4	11,45502	0,000446	41,681
1	20,7	24,3	86,4	11,45502	0,000446	41,565
1	20,6	24,4	86,2	11,50216	0,000449	41,561
1	20,6	24,3	86,1	11,45502	0,000444	41,785
2	20,7	43,4	105,5	20,45876	0,000664	56,084
2	20,7	43,4	105,5	20,45876	0,000667	55,937
2	20,7	43,5	105,6	20,5059	0,000664	56,241
2	21	43,4	106,4	20,45876	0,00066	56,423
2	20,6	43,5	105,3	20,5059	0,000662	56,36
3	21,1	62,1	125,4	29,27394	0,00081	69,036
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,00081	69,04
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000811	68,987
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000814	68,591
3	20,8	62,1	124,5	29,27394	0,00081	69,045
4	34,4	36	139,2	16,9704	0,000601	51,7
4	34,7	35,6	139,7	16,78184	0,000603	50,954
4	34,3	35,9	138,8	16,92326	0,000597	51,846
4	34,6	36,1	139,9	17,01754	0,000604	51,609
4	34,4	35,8	139	16,87612	0,000599	51,592
5	34,4	68,8	172	32,43232	0,000759	82,1
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000761	81,689

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
5	34,7	68,9	173	32,47946	0,000774	79,667
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000743	83,893
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000765	81,437
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000833	111,71
6	34,5	103,3	206,8	48,69562	0,000828	112,348
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000836	111,291
6	34,5	103,3	206,8	48,69562	0,000835	111,286
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000834	111,754
7	69,1	69	276,3	32,5266	0,000692	89,732
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,000689	90,058
7	68,7	68,9	275	32,47946	0,000689	90,036
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000691	89,727
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000684	90,465
8	68,9	137,8	344,5	64,95892	0,000815	152,182
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,000812	152,969
8	69,1	137,8	345,1	64,95892	0,000812	152,717
8	68,6	137,9	343,7	65,00606	0,00081	153,223
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000814	152,465
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000966	192,655
9	69	207	414	97,5798	0,000965	193,055
9	68,7	206,7	412,8	97,43838	0,000963	193,139
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000964	192,981
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000965	192,951
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,000707	87,87
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000709	87,37
10	103,5	68,8	379,3	32,43232	0,000706	87,646
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,000706	88,01
10	103,5	68,7	379,2	32,38518	0,000713	86,692
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000761	122,215
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000768	121,266
11	103,2	103,3	412,9	48,69562	0,000764	121,774
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000764	121,813
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000762	122,314
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000906	205,594
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,000904	205,769
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000901	206,557
12	103,2	206,8	516,4	97,48552	0,000903	206,129
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,000907	205,425

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000722	128,853
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,00072	129,33
13	138,1	103,4	517,7	48,74276	0,000721	129,238
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,00072	129,268
13	138	103,5	517,5	48,7899	0,00072	129,49
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000758	163,557
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000763	162,676
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,00076	163,171
14	137,9	138,1	551,8	65,10034	0,00076	163,553
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000757	163,754
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000981	253,029
15	137,8	275,6	689	129,91784	0,000981	252,816
15	137,9	276	689,7	130,1064	0,000982	252,779
15	137,9	275,6	689,3	129,91784	0,000983	252,256
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000981	252,987
1	20,6	20,6	82,4	9,71084	0,000614	30,914
1	20,9	20,8	83,5	9,80512	0,000684	27,598
1	20,8	20,9	83,3	9,85226	0,000646	29,146
1	20,7	20,8	82,9	9,80512	0,000574	31,783
1	20,7	20,5	82,6	9,6637	0,000607	30,97
2	20,7	41,5	103,6	19,5631	0,000867	42,574
2	20,7	41,3	103,4	19,46882	0,000791	46,773
2	20,7	41,3	103,4	19,46882	0,000855	44,082
2	20,9	41,4	104,1	19,51596	0,000889	41,902
2	20,5	41,5	103	19,5631	0,000755	49,64
3	20,7	62	124,1	29,2268	0,000789	71,085
3	20,7	62,1	124,2	29,27394	0,000872	64,059
3	20,7	62,2	124,3	29,32108	0,000723	76,812
3	21	62,3	125,3	29,36822	0,000643	83,768
3	20,7	61,6	123,7	29,03824	0,000571	91,115
4	34,4	37,6	140,8	17,72464	0,000538	57,234
4	34,7	37,9	142	17,86606	0,000532	58,447
4	34,3	37,7	140,6	17,77178	0,000539	57,287
4	34,3	37,8	140,7	17,81892	0,000537	57,577
4	34,8	38,1	142,5	17,96034	0,000538	57,996
5	34,8	70,2	174,6	33,09228	0,000696	89,061
5	34,5	70,2	173,7	33,09228	0,000692	89,576

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
5	34,6	70,2	174	33,09228	0,000697	88,992
5	34,3	70,1	173	33,04514	0,000693	89,42
5	34,7	70,2	174,3	33,09228	0,000693	89,409
6	34,5	103,3	206,8	48,69562	0,000782	118,957
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000782	119,143
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000779	119,558
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,00078	119,209
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000785	118,692
7	68,8	69,8	276,2	32,90372	0,000616	100,609
7	69	69,9	276,9	32,95086	0,000614	100,997
7	68,8	69,7	276,1	32,85658	0,00061	101,238
7	69	69,9	276,9	32,95086	0,000616	100,591
7	68,8	69,9	276,3	32,95086	0,000616	100,688
8	68,7	137,9	344	65,00606	0,000743	167,05
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,000743	167,145
8	69	138	345	65,0532	0,000742	167,375
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000743	167,015
8	69	137,7	344,7	64,91178	0,00074	167,5
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000857	217,084
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000857	217,114
9	68,8	206,6	413	97,39124	0,000857	216,902
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000859	216,613
9	68,8	206,7	413,1	97,43838	0,000857	217,075
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000612	101,364
10	103,6	68,6	379,4	32,33804	0,000609	101,252
10	103,1	68,9	378,2	32,47946	0,000614	101,052
10	103,4	69,1	379,3	32,57374	0,000615	101,088
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000608	101,774
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000685	135,959
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000688	135,313
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000688	135,28
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000687	135,645
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000684	136,109
12	103,4	206,6	516,8	97,39124	0,000833	223,142
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000833	223,33
12	103,6	206,8	517,6	97,48552	0,000834	223,156
12	103,4	206,6	516,8	97,39124	0,000832	223,397
12	103,3	206,7	516,6	97,43838	0,000834	223,004

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000657	141,629
13	137,6	103,5	516,3	48,7899	0,000656	142,152
13	138,1	103,4	517,7	48,74276	0,000658	141,516
13	137,8	103,2	516,6	48,64848	0,000654	142,097
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000654	142,484
14	138,1	137,8	552,1	64,95892	0,000709	174,845
14	137,7	138	551,1	65,0532	0,000708	175,36
14	137,9	138,1	551,8	65,10034	0,00071	175,024
14	137,9	137,8	551,5	64,95892	0,000707	175,414
14	137,8	137,7	551,1	64,91178	0,000709	174,735
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000936	265,185
15	137,9	275,4	689,1	129,82356	0,000935	265,107
15	137,9	275,5	689,2	129,8707	0,000936	264,851
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000933	265,803
15	137,9	275,4	689,1	129,82356	0,000935	264,963

Πίνακας Π 3 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 6%

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,5	20,8	82,3	9,80512	0,000371	50,268
1	21,2	20,7	84,3	9,75798	0,00035	52,561
1	20,6	20,6	82,4	9,71084	0,000337	54,367
1	20,5	20,7	82,2	9,75798	0,000345	54,769
1	21	20,7	83,7	9,75798	0,000411	44,769
2	21,1	41,3	104,6	19,46882	0,00048	77,815
2	20,6	41,3	103,1	19,46882	0,000503	74,598
2	20,3	41,5	102,4	19,5631	0,000502	74,954
2	21,2	41,4	105	19,51596	0,000491	75,435
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,000481	77,707
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000523	107,04
3	20,5	62,1	123,6	29,27394	0,000579	96,218

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
3	21	62,1	125,1	29,27394	0,000571	97,749
3	20,7	62	124,1	29,2268	0,000543	103,07
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000571	97,958
4	34,5	34,4	137,9	16,21616	0,000368	83,654
4	34,4	34,4	137,6	16,21616	0,000349	88,752
4	34,9	34,5	139,2	16,2633	0,000367	84,572
4	34,3	34,6	137,5	16,31044	0,000359	86,654
4	34,7	34,5	138,6	16,2633	0,000357	86,92
5	34,6	69	172,8	32,5266	0,000474	131,425
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000491	126,42
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000499	123,99
5	34,8	68,8	173,2	32,43232	0,000486	127,222
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000481	129,458
6	34,6	103,6	207,4	48,83704	0,000589	158,132
6	34,4	103,3	206,5	48,69562	0,000595	156,231
6	34,2	103,3	205,9	48,69562	0,000598	155,129
6	34,9	103,3	208	48,69562	0,000588	158,274
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000593	157,304
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000419	147,868
7	68,8	68,8	275,2	32,43232	0,000422	147,249
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000425	146,008
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000426	146,024
7	69,1	68,9	276,2	32,47946	0,000429	144,621
8	69	138	345	65,0532	0,00062	199,469
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000616	201,055
8	68,8	137,7	344,1	64,91178	0,000618	201,097
8	68,8	137,8	344,2	64,95892	0,000617	201,019
8	69,1	138,1	345,4	65,10034	0,000614	202,814
9	69,1	206,8	414,1	97,48552	0,000809	229,72
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000812	228,89
9	68,7	206,6	412,7	97,39124	0,000817	228,018
9	69,2	206,8	414,4	97,48552	0,000812	228,862
9	68,9	207	413,7	97,5798	0,000804	231,584
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000443	139,655
10	103,6	69	379,8	32,5266	0,00045	138,327
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000442	140,165
10	103,5	68,9	379,4	32,47946	0,000445	139,002
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000448	138,512

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
11	103,3	103,5	413,4	48,7899	0,000545	171,302
11	103,6	103,4	414,2	48,74276	0,000558	166,87
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000554	168,095
11	103,2	103,5	413,1	48,7899	0,000551	169,119
11	103,6	103,4	414,2	48,74276	0,000552	168,772
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000773	240,838
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000784	237,953
12	103,2	206,7	516,3	97,43838	0,000783	237,191
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000771	241,651
12	103,5	207	517,5	97,5798	0,000783	237,576
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000551	168,943
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000549	169,294
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,000549	169,714
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000555	167,719
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000545	170,817
14	137,9	137,8	551,5	64,95892	0,000611	203,103
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000619	200,52
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000611	203,103
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000616	201,478
14	137,7	137,9	551	65,00606	0,000612	202,722
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000893	277,846
15	137,9	275,6	689,3	129,91784	0,000901	275,404
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000899	276,137
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000899	276,149
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000899	276,009
1	20,7	20,8	82,9	9,80512	0,000391	46,535
1	20,6	20,6	82,4	9,71084	0,000352	51,765
1	20,6	20,5	82,3	9,6637	0,000357	52,897
1	21	20,7	83,7	9,75798	0,000405	45,404
1	20,6	20,7	82,5	9,75798	0,000365	50,615
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,00053	70,889
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,000566	65,353
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,000528	71,08
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,000556	66,535
2	20,6	41,3	103,1	19,46882	0,000499	75,442
3	20,5	62	123,5	29,2268	0,000639	87,382
3	21,2	62,2	125,8	29,32108	0,0006	93,539

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
3	20,5	62,1	123,6	29,27394	0,000628	89,031
3	20,3	62,1	123	29,27394	0,000639	87,108
3	21,2	62,1	125,7	29,27394	0,000606	92,306
4	34,3	34,5	137,4	16,2633	0,000428	72,457
4	34,8	34,5	138,9	16,2633	0,000437	70,522
4	34,6	34,4	138,2	16,21616	0,000406	76,613
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000448	68,79
4	34,3	34,5	137,4	16,2633	0,000386	81,499
5	34,3	69	171,9	32,5266	0,000537	115,486
5	34,6	68,8	172,6	32,43232	0,000556	111,647
5	34,7	68,9	173	32,47946	0,000559	111,234
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000571	108,336
5	34,3	68,8	171,7	32,43232	0,000552	112,443
6	34,9	103,3	208	48,69562	0,000637	146,403
6	34,5	103,6	207,1	48,83704	0,00065	143,573
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,000642	144,851
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000635	146,659
6	34,8	103,3	207,7	48,69562	0,000646	143,706
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,000471	131,906
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000473	131,349
7	68,8	69,1	275,5	32,57374	0,000472	131,658
7	69,1	69	276,3	32,5266	0,000469	132,016
7	68,8	68,8	275,2	32,43232	0,000459	134,738
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000647	192,101
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000653	189,651
8	69	137,8	344,8	64,95892	0,000652	190,542
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000647	191,174
8	68,7	137,9	344	65,00606	0,000636	195,658
9	69	206,9	413,9	97,53266	0,000775	240,673
9	69,1	207	414,3	97,5798	0,000778	239,309
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000774	240,796
9	68,8	206,7	413,1	97,43838	0,000778	238,462
9	69	206,7	413,7	97,43838	0,000778	239,625
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000437	142,041
10	103,6	68,8	379,6	32,43232	0,000436	142,025
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000437	141,905
10	103,5	69	379,5	32,5266	0,00044	140,523
10	103,3	68,7	378,6	32,38518	0,000435	141,855

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000544	171,445
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000545	170,782
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,00054	172,584
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000541	172,3
11	103,5	103,6	414,1	48,83704	0,000543	171,535
12	103,5	207	517,5	97,5798	0,000742	251,618
12	103,5	207	517,5	97,5798	0,000737	252,981
12	103,4	207	517,2	97,5798	0,000737	252,85
12	103,4	207	517,2	97,5798	0,000732	254,246
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000737	252,754
13	137,9	103,5	517,2	48,7899	0,000514	181,358
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,00052	178,413
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000516	180,337
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,00052	179,036
13	137,9	103,2	516,9	48,64848	0,000523	177,553
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000589	210,961
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000592	209,111
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000592	209,671
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000588	211,25
14	137,9	137,8	551,5	64,95892	0,00059	209,789
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000837	296,431
15	137,9	276	689,7	130,1064	0,000836	297,08
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000838	296,091
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000835	297,333
15	138	275,8	689,8	130,01212	0,000838	296,309
1	20,5	20,7	82,2	9,75798	0,000289	64,493
1	20,8	20,7	83,1	9,75798	0,000269	69,191
1	20,9	20,7	83,4	9,75798	0,000309	59,679
1	20,6	20,6	82,4	9,71084	0,000285	64,77
1	20,5	20,8	82,3	9,80512	0,000279	67,405
2	20,4	41,5	102,7	19,5631	0,000436	85,172
2	21,2	41,4	105	19,51596	0,000404	92,26
2	20,6	41,4	103,2	19,51596	0,0004	93,63
2	20,4	41,5	102,7	19,5631	0,000427	87,133
2	21	41,3	104,3	19,46882	0,000399	93,649
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000517	108,218
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000507	109,588

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,00049	114,135
3	20,6	62,1	123,9	29,27394	0,000511	109,394
3	21,3	62,1	126	29,27394	0,000512	108,867
4	35	34,4	139,4	16,21616	0,000346	89,199
4	34,3	34,4	137,3	16,21616	0,000328	94,094
4	34,2	34,5	137,1	16,2633	0,000342	91,462
4	35	34,5	139,5	16,2633	0,000355	87,63
4	34,3	34,6	137,5	16,31044	0,000348	89,617
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000485	127,507
5	34,4	68,8	172	32,43232	0,000465	133,352
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000472	131,493
5	34,9	68,9	173,6	32,47946	0,000473	130,829
5	34,4	68,8	172	32,43232	0,000486	127,046
6	34,7	103,4	207,5	48,74276	0,000564	164,877
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000541	172,086
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000564	164,904
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000561	165,971
6	34,6	103,4	207,2	48,74276	0,000552	168,711
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,000387	160,528
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,00042	147,711
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,000401	154,319
7	68,8	68,8	275,2	32,43232	0,000398	155,876
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000404	153,201
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,00057	217,633
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000565	219,777
8	68,8	137,8	344,2	64,95892	0,000572	216,937
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000563	220,663
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000569	218,029
9	69	206,7	413,7	97,43838	0,00073	255,182
9	68,7	206,9	413	97,53266	0,00073	255,096
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000732	253,233
9	69	206,8	413,8	97,48552	0,000731	254,161
9	68,8	206,5	412,9	97,3441	0,000742	250,142
10	103,6	69	379,8	32,5266	0,0004	154,742
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000396	156,221
10	103,5	68,8	379,3	32,43232	0,000399	155,084
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,0004	155,022
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,000402	154,315

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
11	103,6	103,3	414,1	48,69562	0,000498	186,564
11	103,3	103,2	413,1	48,64848	0,00049	189,83
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000496	188,097
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000498	186,639
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000498	186,564
12	103,5	206,7	517,2	97,43838	0,00074	251,83
12	103,2	206,9	516,5	97,53266	0,000739	252,322
12	103,6	206,8	517,6	97,48552	0,000743	250,377
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000738	252,27
12	103,4	207,1	517,3	97,62694	0,000742	251,106
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,000558	166,77
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000557	167,25
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000558	166,97
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000559	166,492
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,000556	167,544
14	138,1	137,9	552,2	65,00606	0,000601	206,476
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,000599	206,873
14	137,8	138	551,4	65,0532	0,000602	206,325
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000601	206,525
14	137,9	137,8	551,5	64,95892	0,000601	206,302
15	137,8	275,9	689,3	130,05926	0,000839	296,138
15	137,8	275,8	689,2	130,01212	0,000842	294,782
15	138	275,7	689,7	129,96498	0,000839	295,787
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000842	294,645
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000842	294,941

Πίνακας Π 4 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 7%

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	21,1	25,5	88,8	12,0207	0,00048	38,845
1	20,5	25,4	86,9	11,97356	0,000462	40,27

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,8	25,3	87,7	11,92642	0,000477	38,762
1	20,8	25,4	87,8	11,97356	0,00047	39,64
1	20,6	25,4	87,2	11,97356	0,000468	39,873
2	21,1	44,3	107,6	20,88302	0,000784	47,518
2	20,6	44	105,8	20,7416	0,000767	48,169
2	20,5	44,6	106,1	21,02444	0,000785	47,852
2	20,9	43,9	106,6	20,69446	0,000771	47,783
2	20,7	44,3	106,4	20,88302	0,00077	48,3
3	20,8	63,2	125,6	29,79248	0,000915	61,118
3	20,6	63,2	125	29,79248	0,000919	60,864
3	20,5	63,1	124,6	29,74534	0,000921	60,667
3	20,9	63,2	125,9	29,79248	0,000925	60,425
3	20,8	63,1	125,5	29,74534	0,000913	61,19
4	34,5	37,3	140,8	17,58322	0,000571	54,168
4	34,3	37,3	140,2	17,58322	0,000575	53,875
4	34,5	37,5	141	17,6775	0,000582	53,643
4	34,7	37,2	141,3	17,53608	0,000573	54,005
4	34,6	37,3	141,1	17,58322	0,000571	54,096
5	34,5	68,9	172,4	32,47946	0,000829	74,588
5	34,5	68,9	172,4	32,47946	0,000781	79,492
5	34,5	68,8	172,3	32,43232	0,000783	79,46
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000791	78,459
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000787	79,042
6	34,9	103,4	208,1	48,74276	0,000825	112,851
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000828	112,344
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000829	112,289
6	34,8	103,4	207,8	48,74276	0,000836	111,269
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000836	111,402
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000533	116,528
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000536	115,702
7	68,8	68,8	275,2	32,43232	0,000536	115,459
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000536	115,688
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000535	115,967
8	69,1	138	345,3	65,0532	0,000683	181,905
8	69	138,1	345,1	65,10034	0,000673	184,779
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000681	181,99
8	68,7	137,9	344	65,00606	0,000672	184,699
8	69,3	138	345,9	65,0532	0,000683	181,441

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000844	220,136
9	68,8	206,7	413,1	97,43838	0,000833	223,893
9	69	207	414	97,5798	0,000836	223,125
9	68,7	206,8	412,9	97,48552	0,000836	222,292
9	69	206,9	413,9	97,53266	0,000834	222,861
10	103,4	68,7	378,9	32,38518	0,000494	125,418
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000493	125,657
10	103,5	69	379,5	32,5266	0,000493	125,869
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000492	125,875
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000495	125,097
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,0006	155,158
11	103,3	103,5	413,4	48,7899	0,000604	154,236
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000599	155,411
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000607	153,326
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000606	153,677
12	103,4	207,1	517,3	97,62694	0,000782	238,033
12	103,5	206,6	517,1	97,39124	0,000791	235,381
12	103,5	206,6	517,1	97,39124	0,000791	235,419
12	103,1	206,7	516	97,43838	0,000785	236,63
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,000785	236,919
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000568	163,906
13	137,8	103,6	517	48,83704	0,000559	166,465
13	138	103,2	517,2	48,64848	0,000571	162,738
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000568	163,264
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,00057	163,096
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,00064	193,661
14	137,8	138,1	551,5	65,10034	0,000641	194,283
14	138	138	552	65,0532	0,000638	194,881
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000631	196,73
14	138	138	552	65,0532	0,000636	195,377
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000871	284,873
15	137,8	275,8	689,2	130,01212	0,000879	282,233
15	138,1	275,6	689,9	129,91784	0,000873	284,062
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000883	281,2
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000878	282,661
1	20,6	20,7	82,5	9,75798	0,000647	28,963
1	20,5	20,8	82,3	9,80512	0,000625	30,256

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,5	20,7	82,2	9,75798	0,000645	28,81
1	21,1	20,6	83,9	9,71084	0,000657	27,382
1	20,5	20,6	82,1	9,71084	0,000634	28,805
2	20,5	41,5	103	19,5631	0,000916	41,061
2	21,1	41,5	104,8	19,5631	0,000932	39,725
2	20,6	41,5	103,3	19,5631	0,00084	44,9
2	20,5	41,4	102,9	19,51596	0,000954	38,762
2	21	41,5	104,5	19,5631	0,000861	43,801
3	20,5	64,6	126,1	30,45244	0,0009	62,14
3	21,1	64,7	128	30,49958	0,000897	62,427
3	20,6	64,4	126,2	30,35816	0,000892	62,393
3	20,5	64,6	126,1	30,45244	0,000901	62,154
3	21	64,5	127,5	30,4053	0,000893	62,527
4	34,2	38,7	141,3	18,24318	0,000558	55,537
4	34,9	38,4	143,1	18,10176	0,000554	55,702
4	34,3	38,4	141,3	18,10176	0,000547	56,429
4	34,3	38,7	141,6	18,24318	0,000553	56,281
4	34,8	38,8	143,2	18,29032	0,000556	56,179
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000841	73,772
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000854	72,645
5	34,8	68,9	173,3	32,47946	0,000842	74,038
5	34,6	68,8	172,6	32,43232	0,00085	72,636
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000819	76,245
6	34,6	103,4	207,2	48,74276	0,000872	106,786
6	34,6	103,5	207,3	48,7899	0,000877	106,224
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000879	105,927
6	34,3	103,5	206,4	48,7899	0,000875	106,526
6	34,8	103,4	207,8	48,74276	0,000876	106,354
7	68,9	69,7	276,4	32,85658	0,000554	111,734
7	68,9	69,8	276,5	32,90372	0,000551	112,43
7	68,9	69,8	276,5	32,90372	0,000554	112,003
7	68,9	69,8	276,5	32,90372	0,000552	112,24
7	68,9	69,8	276,5	32,90372	0,000552	112,301
8	69	138	345	65,0532	0,000701	177,138
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000699	177,592
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,000697	178,187
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000698	177,771
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000699	177,544

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
9	68,7	206,8	412,9	97,48552	0,000802	232,055
9	69,1	206,9	414,2	97,53266	0,000806	230,959
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000802	231,995
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000804	231,302
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000805	231,338
10	103,5	68,9	379,4	32,47946	0,000486	127,552
10	103,5	68,9	379,4	32,47946	0,000483	128,328
10	103,3	69	378,9	32,5266	0,000487	127,611
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000486	127,421
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000485	127,968
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000588	158,528
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,000589	157,904
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000587	158,493
11	103,6	103,5	414,3	48,7899	0,000588	158,471
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000589	158,246
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000759	245,133
12	103,4	206,7	516,9	97,43838	0,000761	244,44
12	103,4	206,7	516,9	97,43838	0,000758	245,383
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000762	244,305
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000761	244,533
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000553	168,292
13	138	103,3	517,3	48,69562	0,000553	168,244
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000551	169,051
13	137,8	103,4	516,8	48,74276	0,000551	168,95
13	138	103,5	517,5	48,7899	0,000552	168,806
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000625	198,303
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000621	199,874
14	137,9	138	551,7	65,0532	0,000624	199,11
14	138	138,1	552,1	65,10034	0,000621	200,012
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000622	199,451
15	137,9	276	689,7	130,1064	0,000833	298,141
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000837	296,342
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000835	297,521
15	137,8	275,9	689,3	130,05926	0,000833	297,873
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000833	297,984
1	20,5	21	82,5	9,8994	0,000645	28,874
1	20,4	20,8	82	9,80512	0,000718	25,58

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	21,1	20,8	84,1	9,80512	0,000601	30,74
1	20,5	20,9	82,4	9,85226	0,000606	31,076
1	20,4	20,9	82,1	9,85226	0,000663	27,725
2	21,1	41,5	104,8	19,5631	0,000895	41,221
2	20,5	41,3	102,8	19,46882	0,000834	44,375
2	20,3	41,3	102,2	19,46882	0,000877	42,365
2	21,2	41,3	104,9	19,46882	0,000901	41,05
2	20,5	41,2	102,7	19,42168	0,000768	48,731
3	20,9	64,6	127,3	30,45244	0,000806	69,401
3	20,5	64,5	126	30,4053	0,000798	69,924
3	20,4	64,6	125,8	30,45244	0,000805	69,525
3	21,2	64,6	128,2	30,45244	0,000805	69,446
3	20,6	64,6	126,4	30,45244	0,000802	69,724
4	34,6	38,4	142,2	18,10176	0,000522	59,502
4	34,5	38,4	141,9	18,10176	0,000526	58,958
4	34,6	38,5	142,3	18,1489	0,000523	59,417
4	34,6	38,4	142,2	18,10176	0,000523	59,289
4	34,4	38,4	141,6	18,10176	0,000525	59,084
5	34,5	68,8	172,3	32,43232	0,000767	81,341
5	34,5	68,9	172,4	32,47946	0,000788	78,568
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000775	79,598
5	34,5	68,9	172,4	32,47946	0,00077	80,289
5	34,5	68,8	172,3	32,43232	0,000771	80,436
6	34,3	103,3	206,2	48,69562	0,000837	111,136
6	34,9	103,5	208,2	48,7899	0,000844	110,377
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000831	111,974
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000837	111,158
6	34,8	103,4	207,8	48,74276	0,000833	111,826
7	69,1	68,9	276,2	32,47946	0,000609	101,918
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000608	102,215
7	68,7	68,9	275	32,47946	0,000607	102,174
7	69,1	68,9	276,2	32,47946	0,000605	102,42
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,000603	102,778
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000687	180,705
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000686	180,973
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000688	180,28
8	68,7	137,8	343,9	64,95892	0,000686	180,876
8	68,9	138,1	344,8	65,10034	0,000689	180,326

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
9	69,1	206,8	414,1	97,48552	0,0008	232,537
9	68,9	207	413,7	97,5798	0,000796	233,921
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000799	232,973
9	68,8	206,6	413	97,39124	0,000798	232,975
9	68,8	206,7	413,1	97,43838	0,000801	232,201
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000549	112,697
10	103,4	68,9	379,1	32,47946	0,000554	111,99
10	103,3	69	378,9	32,5266	0,00055	112,885
10	103,4	69,1	379,3	32,57374	0,000554	112,319
10	103,5	69	379,5	32,5266	0,00055	112,77
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000617	150,98
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000611	152,225
11	103,5	103,4	413,9	48,74276	0,000616	151,122
11	103,2	103,4	413	48,74276	0,000612	152,207
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000616	151,225
12	103,2	206,8	516,4	97,48552	0,000758	245,663
12	103,6	206,9	517,7	97,53266	0,000754	246,512
12	103,3	206,6	516,5	97,39124	0,000754	246,724
12	103,4	206,7	516,9	97,43838	0,000764	243,241
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000758	245,604
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000591	157,496
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000589	158,037
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000592	157,293
13	138,1	103,3	517,6	48,69562	0,000593	157,002
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000592	157,123
14	138,1	138	552,3	65,0532	0,000646	192,243
14	137,7	137,8	550,9	64,95892	0,000641	193,58
14	137,7	137,8	550,9	64,95892	0,000641	193,539
14	138,1	138	552,3	65,0532	0,000641	193,812
14	138	138	552	65,0532	0,000638	194,653
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000846	293,361
15	137,7	275,8	688,9	130,01212	0,000853	291,168
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000853	291,103
15	138	275,8	689,8	130,01212	0,000845	293,576
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,000854	290,661

Πίνακας Π 5 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής: δείγματα με περιεχόμενη υγρασία 8%

Cycle No	Confining Stress (σ _c)	σ _d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress (2 ^{0.5})/3 *σ _d	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
1	20,6	25,2	87	11,87928	0,000388	47,768
1	20,4	25,3	86,5	11,92642	0,000396	46,935
1	21,1	25,3	88,6	11,92642	0,000398	46,821
1	20,7	25,3	87,4	11,92642	0,000386	48,257
1	20,6	25,3	87,1	11,92642	0,000395	47,054
2	20,9	44,4	107,1	20,93016	0,000624	59,75
2	20,8	44,4	106,8	20,93016	0,000624	59,732
2	20,6	44,4	106,2	20,93016	0,000624	59,798
2	20,5	44,4	105,9	20,93016	0,00063	59,24
2	20,5	44,4	105,9	20,93016	0,000625	59,726
3	20,9	62,8	125,5	29,60392	0,000807	69,251
3	20,7	62,8	124,9	29,60392	0,000803	69,494
3	20,6	62,7	124,5	29,55678	0,000804	69,356
3	20,6	63	124,8	29,6982	0,000806	69,545
3	20,6	63	124,8	29,6982	0,000809	69,277
4	34,4	34,7	137,9	16,35758	0,000608	51,472
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,00062	49,833
4	34,5	34,5	138	16,2633	0,000587	52,85
4	34,9	34,5	139,2	16,2633	0,000559	56,03
4	34,5	34,6	138,1	16,31044	0,00063	48,557
5	34,3	68,9	171,8	32,47946	0,00069	90,488
5	35,1	69	174,3	32,5266	0,000711	87,517
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000702	87,87
5	34,2	68,9	171,5	32,47946	0,000686	90,864
5	34,8	69,1	173,5	32,57374	0,000705	88,241
6	34,9	103,3	208	48,69562	0,000779	119,386
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000777	119,732
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,000785	118,906
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,00078	119,448
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,000779	119,477
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000555	111,64
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,00056	110,843
7	69	68,8	275,8	32,43232	0,000559	110,688
7	69	68,9	275,9	32,47946	0,000554	111,902
7	68,7	69	275,1	32,5266	0,000561	110,705
8	69	137,9	344,9	65,00606	0,000742	167,28

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000741	167,586
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,000743	167,205
8	69	137,7	344,7	64,91178	0,000742	167,059
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,00074	167,611
9	69	206,7	413,7	97,43838	0,000953	195,099
9	69,1	206,7	414	97,43838	0,000951	195,392
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000952	195,695
9	68,9	207	413,7	97,5798	0,000957	194,739
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000951	195,615
10	103,6	68,8	379,6	32,43232	0,000572	108,231
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000571	108,421
10	103,2	69,2	378,8	32,62088	0,000571	109,001
10	103,6	68,9	379,7	32,47946	0,000574	108,003
10	103,3	69,1	379	32,57374	0,000571	108,923
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000682	136,328
11	103,3	103,5	413,4	48,7899	0,000682	136,683
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000683	136,418
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,00068	136,822
11	103,5	103,3	413,8	48,69562	0,00068	136,724
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,00092	202,36
12	103,4	206,8	517	97,48552	0,000918	202,655
12	103,4	206,6	516,8	97,39124	0,000918	202,623
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000919	202,572
12	103,6	206,8	517,6	97,48552	0,000918	202,627
13	138	103,6	517,6	48,83704	0,000673	138,561
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000677	137,572
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,000677	137,423
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000678	137,067
13	137,9	103,4	517,1	48,74276	0,000677	137,577
14	137,9	138	551,7	65,0532	0,000748	166,043
14	137,9	137,8	551,5	64,95892	0,000745	166,346
14	138	137,7	551,7	64,91178	0,000747	165,911
14	137,8	138	551,4	65,0532	0,000745	166,671
14	138	138	552	65,0532	0,000746	166,438
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,001036	239,578
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,00103	240,807
15	137,9	275,8	689,5	130,01212	0,001036	239,56
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,001035	239,737

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,001036	239,653
1	21,1	20,9	84,2	9,85226	0,000481	39,694
1	20,5	21,1	82,6	9,94654	0,000556	33,864
1	20,3	20,9	81,8	9,85226	0,000522	36,013
1	21,2	20,9	84,5	9,85226	0,000497	38,229
1	20,6	20,8	82,6	9,80512	0,000472	38,399
2	20,5	41,5	103	19,5631	0,000706	53,153
2	21	41,7	104,7	19,65738	0,000688	54,766
2	20,5	41,6	103,1	19,61024	0,00072	51,406
2	20,4	41,5	102,7	19,5631	0,000761	48,485
2	21,2	41,3	104,9	19,46882	0,000715	52,62
3	21	62,1	125,1	29,27394	0,000837	66,275
3	20,6	62	123,8	29,2268	0,000807	69,528
3	20,5	62,1	123,6	29,27394	0,000884	62,785
3	20,8	62	124,4	29,2268	0,000801	70,337
3	20,9	62,1	124,8	29,27394	0,000854	65,239
4	35	34,6	139,6	16,31044	0,000622	49,786
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000559	55,484
4	34,2	34,5	137,1	16,2633	0,000569	54,777
4	34,9	34,6	139,3	16,31044	0,000582	52,811
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000598	51,224
5	34,9	68,8	173,5	32,43232	0,000693	89,339
5	34,3	68,8	171,7	32,43232	0,000711	87,281
5	34,6	68,8	172,6	32,43232	0,000719	86,429
5	34,5	68,9	172,4	32,47946	0,000722	85,539
5	34,4	68,8	172	32,43232	0,000696	89,334
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000803	115,915
6	34,2	103,5	206,1	48,7899	0,000809	115,106
6	35	103,3	208,3	48,69562	0,000808	115,194
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000803	115,976
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000806	115,41
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000576	107,635
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000575	107,608
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000575	107,861
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000576	107,531
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000576	107,854
8	68,8	137,8	344,2	64,95892	0,00077	161,12

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
8	68,7	137,9	344	65,00606	0,000769	161,46
8	69	138	345	65,0532	0,000769	161,557
8	69	138,1	345,1	65,10034	0,000767	161,983
8	68,8	138	344,4	65,0532	0,000768	161,728
9	69	206,6	413,6	97,39124	0,000935	198,946
9	68,9	206,8	413,5	97,48552	0,000934	199,219
9	68,6	206,9	412,7	97,53266	0,000932	199,751
9	69,2	206,9	414,5	97,53266	0,000937	198,844
9	68,7	206,9	413	97,53266	0,000931	199,905
10	103,3	68,7	378,6	32,38518	0,000566	109,352
10	103,5	68,7	379,2	32,38518	0,000565	109,48
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000563	110,093
10	103,4	69	379,2	32,5266	0,000564	110,05
10	103,5	69,2	379,7	32,62088	0,000564	110,427
11	103,1	103,4	412,7	48,74276	0,000675	138,04
11	103,7	103,3	414,4	48,69562	0,000669	139,027
11	103,3	103,3	413,2	48,69562	0,000672	138,346
11	103,3	103,3	413,2	48,69562	0,000672	138,423
11	103,3	103,4	413,3	48,74276	0,000672	138,584
12	103,4	207	517,2	97,5798	0,000893	208,666
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,00089	209,135
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000891	208,85
12	103,5	206,8	517,3	97,48552	0,000892	208,566
12	103,3	206,6	516,5	97,39124	0,000893	208,299
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000653	142,508
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000655	142,363
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000653	142,679
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000653	142,457
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,000654	142,233
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,000731	169,807
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000729	170,176
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,00073	169,887
14	138	137,9	551,9	65,00606	0,00073	170,009
14	137,8	138,1	551,5	65,10034	0,00073	170,229
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000997	248,916
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000999	248,253
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000998	248,774
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000996	249,248

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	137,8	275,7	689,1	129,96498	0,000998	248,588
1	20,7	25,7	87,8	12,11498	0,00041	45,205
1	20,7	25,7	87,8	12,11498	0,000409	45,234
1	20,6	25,9	87,7	12,20926	0,00041	45,568
1	20,5	25,9	87,4	12,20926	0,000415	45,064
1	21,1	25,7	89	12,11498	0,000412	45,049
2	20,7	45,1	107,2	21,26014	0,000581	64,615
2	20,6	44,6	106,4	21,02444	0,00058	63,718
2	20,6	44,8	106,6	21,11872	0,000588	63,358
2	20,6	44,8	106,6	21,11872	0,000586	63,479
2	20,5	44,7	106,2	21,07158	0,000584	63,537
3	21	61,9	124,9	29,17966	0,000806	69,406
3	20,7	62,2	124,3	29,32108	0,000831	67,376
3	20,5	62,1	123,6	29,27394	0,000806	69,508
3	20,9	62	124,7	29,2268	0,000811	69,166
3	20,8	62,1	124,5	29,27394	0,000807	68,72
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000614	49,98
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000593	52,095
4	34,4	34,4	137,6	16,21616	0,000691	45,241
4	34,4	34,5	137,7	16,2633	0,000633	48,503
4	34,9	34,4	139,1	16,21616	0,000617	51,083
5	34,5	69	172,5	32,5266	0,000759	81,271
5	34,3	68,7	171,6	32,38518	0,000613	101,685
5	34,2	69	171,6	32,5266	0,000752	81,884
5	34,9	68,7	173,4	32,38518	0,000632	98,651
5	34,4	69	172,2	32,5266	0,000718	86,207
6	34,3	103,4	206,3	48,74276	0,000719	129,691
6	34,5	103,4	206,9	48,74276	0,000735	126,133
6	34,5	103,3	206,8	48,69562	0,00071	131,455
6	34,4	103,5	206,7	48,7899	0,000737	126,372
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000741	125,876
7	68,9	68,9	275,6	32,47946	0,000607	101,236
7	68,9	68,7	275,4	32,38518	0,000552	112,564
7	68,9	68,8	275,5	32,43232	0,000636	96,666
7	69,3	68,8	276,7	32,43232	0,000603	102,247
7	68,5	68,7	274,2	32,38518	0,00058	107,425
8	69,1	137,9	345,2	65,00606	0,000708	175,245

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000703	176,581
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000707	175,482
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000707	175,577
8	68,9	137,9	344,6	65,00606	0,000705	176,08
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000856	217,573
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000856	217,446
9	69,1	206,9	414,2	97,53266	0,000856	217,512
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000853	217,967
9	68,9	206,7	413,4	97,43838	0,000857	217,049
10	103,3	68,8	378,7	32,43232	0,000608	101,657
10	103,5	68,8	379,3	32,43232	0,000604	102,515
10	103,3	68,9	378,8	32,47946	0,000613	101,278
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,00061	101,727
10	103,5	68,9	379,4	32,47946	0,000602	102,807
11	103,6	103,3	414,1	48,69562	0,000644	144,494
11	103,3	103,5	413,4	48,7899	0,000642	145,17
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000644	144,65
11	103,5	103,5	414	48,7899	0,000646	144,208
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000641	145,205
12	103,2	206,6	516,2	97,39124	0,000795	233,901
12	103,5	206,9	517,4	97,53266	0,000795	234,168
12	103,5	206,7	517,2	97,43838	0,000793	234,581
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000797	233,553
12	103,5	206,7	517,2	97,43838	0,000794	234,205
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000613	151,874
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000613	151,667
13	137,7	103,4	516,5	48,74276	0,000614	151,621
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000612	152,171
13	138	103,5	517,5	48,7899	0,00061	152,743
14	137,9	138	551,7	65,0532	0,000648	191,506
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000651	190,703
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,000655	189,448
14	138	137,8	551,8	64,95892	0,000651	190,48
14	137,8	137,9	551,3	65,00606	0,00065	190,979
15	138	275,9	689,9	130,05926	0,000888	279,679
15	138	275,8	689,8	130,01212	0,000893	278,088
15	137,7	275,7	688,8	129,96498	0,00089	278,816
15	138,1	275,7	690	129,96498	0,000891	278,382

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,00089	278,996
1	20,5	20,9	82,4	9,85226	0,000685	26,66
1	21,1	20,9	84,2	9,85226	0,000596	30,891
1	20,6	20,9	82,7	9,85226	0,000618	29,87
1	20,4	20,9	82,1	9,85226	0,000682	27,946
1	21,1	21	84,3	9,8994	0,000678	28,067
2	20,7	41,4	103,5	19,51596	0,000762	49,174
2	21	41,5	104,5	19,5631	0,000736	49,914
2	20,6	41,2	103	19,42168	0,000703	53,343
2	20,7	41,3	103,4	19,46882	0,0008	47,006
2	20,7	41,5	103,6	19,5631	0,000715	52,479
3	20,6	62	123,8	29,2268	0,000775	71,48
3	20,6	61,9	123,7	29,17966	0,000768	72,345
3	20,5	61,9	123,4	29,17966	0,000833	67,72
3	21,3	62,2	126,1	29,32108	0,000751	74,841
3	20,5	62,1	123,6	29,27394	0,000867	64,011
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000539	58,047
4	34,4	34,6	137,8	16,31044	0,000651	46,996
4	34,3	34,5	137,4	16,2633	0,000684	45,17
4	35	34,6	139,6	16,31044	0,000669	46,222
4	34,3	34,4	137,3	16,21616	0,000559	55,217
5	34,4	68,8	172	32,43232	0,000742	83,294
5	34,8	68,8	173,2	32,43232	0,000753	82,255
5	34,4	68,9	172,1	32,47946	0,000741	83,265
5	34,4	68,7	171,9	32,38518	0,000734	84,252
5	34,3	68,9	171,8	32,47946	0,000736	84,438
6	34,4	103,4	206,6	48,74276	0,000769	121,103
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000772	120,681
6	34,5	103,5	207	48,7899	0,000772	120,556
6	34,5	103,2	206,7	48,64848	0,000776	119,819
6	34,6	103,4	207,2	48,74276	0,000774	120,283
7	68,8	69	275,4	32,5266	0,000645	96,236
7	68,8	68,9	275,3	32,47946	0,000645	96,114
7	69,1	68,9	276,2	32,47946	0,000646	95,983
7	68,9	69	275,7	32,5266	0,000648	95,669
7	69	68,7	275,7	32,38518	0,000654	94,507
8	69,1	137,8	345,1	64,95892	0,000749	165,567

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress ($2^{0.5}/3 * \sigma_d$)	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
8	68,9	138	344,7	65,0532	0,00075	165,65
8	68,8	137,9	344,3	65,00606	0,000752	165,07
8	68,6	138	343,8	65,0532	0,000752	165,15
8	69,2	137,8	345,4	64,95892	0,000752	164,937
9	68,7	206,7	412,8	97,43838	0,000847	219,599
9	68,8	206,8	413,2	97,48552	0,000849	219,112
9	69,1	206,8	414,1	97,48552	0,000849	219,274
9	68,8	206,9	413,3	97,53266	0,000848	219,335
9	68,9	206,9	413,6	97,53266	0,000848	219,441
10	103,4	69,1	379,3	32,57374	0,000605	102,765
10	103,4	68,8	379	32,43232	0,000606	102,239
10	103,5	68,6	379,1	32,33804	0,00061	101,177
10	103,3	69	378,9	32,5266	0,000607	102,248
10	103,4	69,1	379,3	32,57374	0,000607	102,414
11	103,4	103,3	413,5	48,69562	0,000642	144,77
11	103,6	103,6	414,4	48,83704	0,000644	144,835
11	103,4	103,4	413,6	48,74276	0,000641	145,257
11	103,3	103,3	413,2	48,69562	0,000642	144,95
11	103,4	103,5	413,7	48,7899	0,000642	145,135
12	103,3	206,9	516,8	97,53266	0,000774	240,57
12	103,4	207	517,2	97,5798	0,000774	240,657
12	103,5	206,7	517,2	97,43838	0,000773	240,693
12	103,3	206,8	516,7	97,48552	0,000775	239,957
12	103,4	206,9	517,1	97,53266	0,000775	240,447
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,0006	155,071
13	137,8	103,3	516,7	48,69562	0,000598	155,553
13	137,8	103,5	516,9	48,7899	0,000598	155,777
13	138	103,4	517,4	48,74276	0,000596	156,212
13	137,9	103,3	517	48,69562	0,000597	155,819
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000633	196,103
14	137,8	137,6	551	64,86464	0,000632	195,918
14	137,9	137,9	551,6	65,00606	0,000633	196,108
14	138,1	138,1	552,4	65,10034	0,000636	195,517
14	137,8	137,8	551,2	64,95892	0,000634	195,558
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000859	289,095
15	137,9	275,7	689,4	129,96498	0,000853	290,779
15	138	275,8	689,8	130,01212	0,00086	288,633
15	137,9	275,9	689,6	130,05926	0,000857	289,696

Cycle No	Confining Stress (σ_c)	σ_d - Deviator Stress - Act Axial stress	(θ) bulk stress	Toct - Octahedral Stress $(2^{0.5})/3 * \sigma_d$	Resilient Strain	Resilient Modulus
	kPa	kPa	kPa	kPa	mm/mm	MPa
15	138	275,6	689,6	129,91784	0,00086	288,369

