



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ ΕΜΠ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ



Ταταράκη Γ. Καλλιόπη

Επιβλέπων: Λοΐζος Ανδρέας, Καθηγητής ΕΜΠ

Μάρτιος 2013

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας το πόνημα της διπλωματικής μου εργασίας, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, κ. Λοΐζο Ανδρέα, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της εργασίας μου υπό την καθοδήγηση του.

Επίσης, ευχαριστώ όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Οδοποιΐας του ΕΜΠ για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και το φιλικό σπουδαστικό μου περιβάλλον για τη συμπαράσταση του.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένεια μου, για την πολύπλευρη στήριξή της στις σπουδές μου, και στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε η μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών οδοστρώσις που χρησιμοποιούνται σε έργα Οδοποιΐας στην Ελλάδα (ασύνδετα υλικά). Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, επιλέχθηκαν ορισμένα πρότυπα που περιγράφουν τη συμπεριφορά αυτή και έγινε προσπάθεια προσαρμογής τους στο ελληνικό αμμοχάλικο. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε εργαστηριακά με τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, στην οποία υποβλήθηκαν δύο δοκίμια, με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά το καθένα. Πιο συγκεκριμένα, στα δοκίμια ασκήθηκαν κύκλοι φόρτισης μικρής διάρκειας, και έντασης ίσης με αυτή που δέχεται το οδόστρωμα από τη διερχόμενη κυκλοφορία, και μετρήθηκαν οι επανακτήσιμες και μόνιμες παραμορφώσεις. Από τις πρώτες, προέκυψε το αντίστοιχο μέτρο επανάκτησης, το οποίο ονομάζεται Resilient Modulus. Ο έλεγχος προσαρμογής των προτύπων έγινε με στατιστικούς ελέγχους, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SPSS. Γενικά, επιβεβαιώθηκε η μη γραμμική συμπεριφορά του ελληνικού αμμοχάλικου και το πρότυπο το οποίο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα προσαρμογής είναι το Modified Universal, ωστόσο, απαιτείται εκτενέστερη διερεύνηση και πραγματοποίηση περισσότερων δοκιμών για να θεωρηθούν ασφαλή τα συμπεράσματα.

ABSTRACT

Within the context of the present dissertation, the non-linear behavior of materials that are used in Greek roads was investigated (unbound granular materials). Based on the literature review, some models describing the above behavior were selected and an attempt to adjust them to the greek aggregates was performed. The investigation was conducted in the lab applying the triaxial cell test, to which two essay materials were subjected. Specifically, the essay materials were subjected to two low duration and intensity loading cycles equal to the ones the road surface receives by the passing traffic and the resilient and permanent deformations were calculated. From the first, the respective modulus elasticity was derived and was described as Resilient Modulus. The assessment of model adjustment was performed by statistical analysis applying SPSS. In general, the non-linear behavior

of the greek aggregates was confirmed and the model that demonstrated satisfied goodness of fit results was the Modified Universal. However, further investigations are necessary to support the above conclusion with greater confidence.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία	2
1.3 Δομή	3
2. ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	4
2.1 Γενικά	4
2.2 Θεωρία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς	5
2.3 Μη γραμμική συμπεριφορά ασύνδετων υλικών	7
2.3.1 Γενικά στοιχεία	7
2.3.2 Βασικοί παράγοντες	8
2.4 Πρότυπα μη γραμμικής συμπεριφοράς	12
2.5 Συμπεριφορά υλικών στρώσης έδρασης	20
3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Διαδικασία δοκιμής	22
3.2.1 Προετοιμασία δοκιμίου	22
3.2.2 Διάταξη συσκευής τριαξονικής κυψέλης	25
3.2.3 Διαδικασία δοκιμής τριαξονικής κυψέλης	28
4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ	32
4.1 Εισαγωγή	32
4.2 Ορισμοί	32
4.3 Χαρακτηριστικά υλικών	34
4.3.1 Υλικό 1	35
4.3.2 Υλικό 2	36
4.4 Επεξεργασία υλικού και συμπίκνωση	37
4.5 Πραγματοποίηση δοκιμής τριαξονικής κυψέλης	40
5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	42
5.1 Γενικά	42
5.2 Στατιστικοί έλεγχοι	43
5.2.1 Αξιολόγηση προτύπων με R^2 και Se/Sy	43

5.2.2	<i>Έλεγχος καλής προσαρμογής</i>	43
5.2.3	<i>Εφαρμογή</i>	47
5.3	Συσχέτιση αποτελεσμάτων	57
6.	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	65
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ	75

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το φυσικό έδαφος δεν είναι ικανό να φέρει τις προερχόμενες από την κυκλοφορία καταπονήσεις, δεν έχει την απαιτούμενη ποιότητα κύλισης για τα τροχοφόρα οχήματα, και επιπλέον, βάλλεται από τις διάφορες κλιματολογικές διακυμάνσεις, την υγρασία, τη βροχή, κλπ. Για τους λόγους αυτούς, κατασκευάζεται το οδόστρωμα.

Ως οδόστρωμα, ορίζεται το σύνολο των επάλληλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος για τη δημιουργία μίας οδού. Η κατασκευή του έχει ως κύριο λόγο αφενός την κατανομή των τάσεων λόγω των φορτίων κυκλοφορίας, ώστε η καταπόνηση του εδάφους θεμελίωσης να μην υπερβαίνει τα όρια αντοχής του και αφετέρου, την προσφορά προς τους χρήστες της οδού ενός κατ' ελάχιστα ικανοποιητικού επιπέδου ποιότητας κύλισης.

Εν γένει, οι μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων είναι οι εμπειρικές και οι μηχανιστικές. Οι πρώτες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως, βασίζονται κυρίως στην παρατήρηση και εμπειρία όσον αφορά στον τρόπο συμπεριφοράς του οδοστρώματος, χωρίς να χρησιμοποιούν τις σχέσεις Μηχανικής. Κατά συνέπεια, ένα μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, όπως είναι η ακαμψία και η αντίσταση στη μόνιμη παραμόρφωση. Αντίθετα, οι μηχανιστικές μέθοδοι, βασίζονται στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών οδοστρώσεως και κάνουν την ανάλυση πιο ρεαλιστική.

Υπάρχουν τρεις τύποι οδοστρωμάτων: τα εύκαμπτα, τα δύσκαμπτα και τα ημιάκαμπτα. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα οποία αποτελούνται από τη στρώση ασφαλτομίγματος, τις στρώσεις βάσης και υπόβασης που κατασκευάζονται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό) αμμοχάλικο, και τη στρώση έδρασης.

Η στρώση βάσης-υπόβασης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη δομική συμπεριφορά του εύκαμπτου οδοστρώματος, καθώς οι ασφατικές στρώσεις έχουν συνήθως μικρό πάχος. Έτσι, τα ασύνδετα υλικά συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

Συνήθως, οι μέθοδοι σχεδιασμού των οδοστρωμάτων, θεωρούν τη συμπεριφορά των στρώσεων από ασύνδετα υλικά απολύτως ελαστική. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι στις επιβαλλόμενες φορτίσεις, αυτά αναπτύσσουν και μόνιμες παραμορφώσεις. Επίσης, κατά τον σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, θεωρείται ότι κάθε στρώση του οδοστρώματος χαρακτηρίζεται από μία μοναδική, σταθερή και ενιαία τιμή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson. Έχει αποδειχθεί όμως, ότι τα ασύνδετα υλικά δεν μπορούν να χαρακτηριστούν από μία ενιαία τιμή του μέτρου ελαστικότητας, καθώς αυτό μεταβάλλει την τιμή του από σημείο σε σημείο ως αποτέλεσμα των επιβαλλόμενων φορτίσεων και άλλων παραγόντων, κάνοντάς τα να συμπεριφέρονται μη γραμμικά (Osei, 2000). Η έννοια της μη γραμμικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών, ήταν γνωστή σε θεωρητικό επίπεδο τα προηγούμενα χρόνια, αλλά η δυσκολία εφαρμογής της σε πρακτικό επίπεδο δεν τη βοηθούσε να εξελιχθεί. Ωστόσο, 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, κάνοντάς την ξανά ένα επίκαιρο επιστημονικό θέμα.

1.2 Αντικείμενο-Μεθοδολογία

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς υλικών οδοστρώσεως, με έμφαση σε υλικά που χρησιμοποιούνται σε έργα Οδοποιΐας στην Ελλάδα.

Κατά τη διερεύνηση αυτή, πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές σε επιλεγμένα ελληνικά υλικά, προκειμένου να προσομοιωθεί η μηχανική συμπεριφορά τους, λαμβάνοντας υπόψη τη διεθνή εμπειρία και πρακτική σε συναφή θέματα.

Ο έλεγχος της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υπό διερεύνηση υλικών, πραγματοποιήθηκε με πειραματική διαδικασία. Αρχικά, έγινε διεθνής βιβλιογραφική ανασκόπηση για να γίνει συλλογή και αξιολόγηση προτύπων που περιγράφουν τη συμπεριφορά αυτή, και στη συνέχεια επιλέχθηκαν τα συχνότερα εμφανιζόμενα πρότυπα διεθνώς, με σκοπό να διερευνηθεί η εφαρμογή τους στα ελληνικά υλικά. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε εργαστηριακά, με τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, από τα αποτελέσματα της οποίας ελέγχθηκε η προσαρμογή τους. Τέλος, έγινε

συγκριτική ανάλυση των προτύπων που εξετάστηκαν, και εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα.

1.3 Δομή

Πέραν του παρόντος, η συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που ακολουθούν είναι:

Το **κεφάλαιο 2** περιγράφει τη μηχανική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και τη συμβολή τους στην αντοχή του. Αναφέρονται επίσης οι μέθοδοι ανάλυσης των οδοστρωμάτων, και παρουσιάζονται τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών βάσης-υπόβασης.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η συσκευή με την οποία πραγματοποιείται η δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, περιγράφονται αναλυτικά τα μέρη από τα οποία αποτελείται και γίνεται μία σύντομη περιγραφή του πειράματος σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99 (2007).

Το **κεφάλαιο 4** περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή της δοκιμής τριαξονικής κυψέλης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η επεξεργασία των υλικών από τη στιγμή που αποσπάστηκαν, μέχρι και την ολοκλήρωση της δοκιμής, παρουσιάζοντας όλους τους συνδυασμούς φόρτισης, με τη σειρά που ακολουθήθηκαν.

Ακολουθεί το **κεφάλαιο 5**, στο οποίο γίνεται επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής και πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος προσαρμογής των αναπτυχθέντων προτύπων στα ελληνικά ασύνδετα υλικά.

Κλείνοντας, στο **κεφάλαιο 6**, εμπεριέχονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν βάσει της στατιστικής ανάλυσης και της γενικότερης διερεύνησης που παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική.

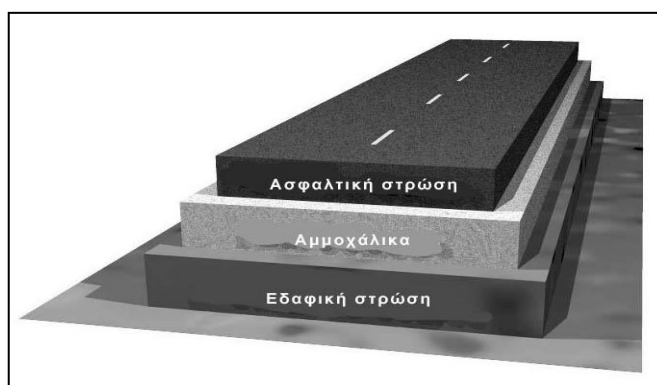
2. ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Γενικά

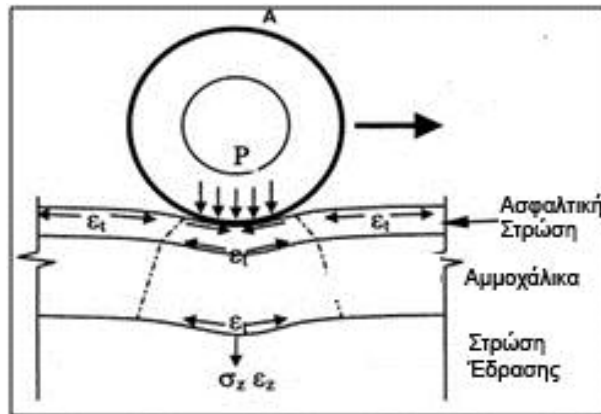
Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών οδοστρώσας αποτελεί αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες, με το επίκεντρο του ενδιαφέροντος να στρέφεται στην ανάλυση της συμπεριφοράς των υλικών των εύκαμπτων οδοστρώματων και πιο συγκεκριμένα, των υλικών βάσης-υπόβασης.

Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (εικόνα 2.1) είναι:

- Η αποφυγή ρηγμάτωσης των ασφαλτικών στρώσεων υπό την επίδραση των φορτίων κυκλοφορίας. Αυτό ελέγχεται βάσει των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων (σ_r) και παραμορφώσεων (ϵ_r), στην κατώτατη επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης (εικόνα 2.2).
- Η παραλαβή των φορτίων κυκλοφορίας από το έδαφος χωρίς να προκαλείται υπερβολική παραμόρφωση. Αυτό ελέγχεται βάσει των κατακόρυφων τάσεων (σ_z) και παραμορφώσεων (ϵ_z) στην ανώτατη επιφάνεια της στρώσης έδρασης.
- Το πάχος της βάσης-υπόβασης να είναι επαρκές, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της κατασκευής να μην υπερφορτίζεται το υπέδαφος από τις διελεύσεις των εργοταξιακών οχημάτων. Επιπλέον, να προσφέρει μία καλή επιφάνεια για τη διάστρωση και τη συμπίκνωση της ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 2.1: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

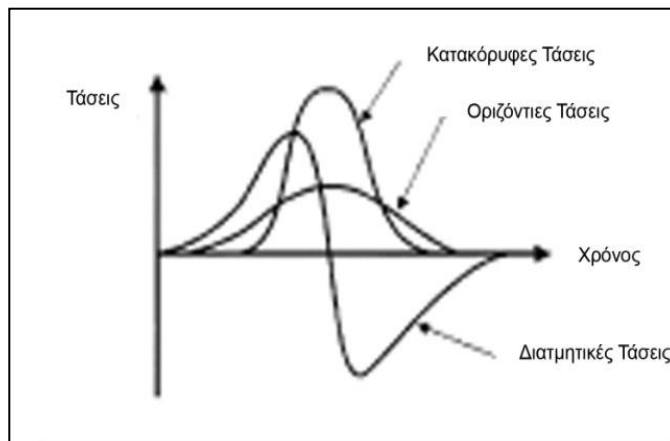


Εικόνα 2.2: Εντατική καταπόνηση οδοστρώματος

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρωτεύων ρόλος που έχει η στρώση βάσης-υπόβασης για την εύρυθμη λειτουργία του εύκαμπτου οδοστρώματος, έχει οδηγήσει στην ενδελεχή διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών που την αποτελούν. Ως εκ τούτου, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ανάλυση της συμπεριφοράς των εύκαμπτων οδοστρωμάτων μέχρι σήμερα, με βάση τη θεωρία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς. Στη συνέχεια γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις διάφορες θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς σχετικά με τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών βάσης-υπόβασης, πάνω στην οποία εστιάζει η παρούσα διπλωματική εργασία για τα ελληνικά αμμοχάλικα, και παρουσιάζονται ορισμένα από τα μη γραμμικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για την περιγραφή της συμπεριφοράς αυτής.

2.2 Θεωρία γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς

Γενικά, ο τρόπος με τον οποίο φορτίζεται το οδόστρωμα, περιγράφεται στο σχήμα της εικόνας 2.3. Σύμφωνα με αυτό, κατά τη διέλευση του τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος, η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται από μία ελάχιστη σε μία μέγιστη τιμή, και στη συνέχεια πάλι σε ελάχιστη, αναπτύσσοντας αντίστοιχα οριζόντιες, κατακόρυφες και διαμητικές τάσεις. Έτσι λοιπόν, η συχνότητα φόρτισης και το μέγεθός της, καθορίζουν την καταπόνηση και διαμορφώνουν τη δομική του κατάσταση.



Εικόνα 2.3: Τάσεις που αναπτύσσονται σε τυχαίο σημείο κατά τη φόρτιση του οδοστρώματος

Στον υπολογισμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, δύο είναι οι θεωρίες που χρησιμοποιούνται: η θεωρία του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημιχώρου, γνωστή ως θεωρία του Boussinesq, και η θεωρία του Burmister, των πολλαπλών επάλληλων ελαστικών στρώσεων, εδραζομένων επί ελαστικού εδαφικού ημιχώρου η οποία βασίζεται στην αρχή των γραμμικώς ελαστικών μέσων (Λοΐζος, 2012).

Οι εξισώσεις που διατυπώθηκαν από τον Boussinesq για τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης σε κάθε σημείο του ημιχώρου, υπό την επίδραση του ομοιόμορφα κατανεμημένου κυκλικού φορτίου απλού τροχού, θεωρούν ενιαία και σταθερή τιμή του λόγου Poisson ν , καθώς και του μέτρου ελαστικότητας E για ολόκληρο τον ημιχώρο.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Burmister, μία διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, προσομοιώνεται με ένα σύστημα τριών επάλληλων ελαστικών στρώσεων, οι οποίες έχουν πεπερασμένο πάχος και εκτείνονται στο άπειρο τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Το πρότυπο αυτό των τεσσάρων στρώσεων, μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα των τριών, εάν τα υλικά της βάσης και της υπόβασης δε διαφέρουν πολύ ποιοτικά, οπότε αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως μία στρώση. Το πρότυπο αυτό των τριών στρώσεων θεωρείται ότι δίνει επαρκώς ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανάλυση και στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Το σύστημα των επάλληλων στρώσεων που περιγράφηκε παραπάνω, βασίζεται στην παραδοχή ότι τα υλικά είναι ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Επομένως, το στατικό πρότυπο που περιγράφηκε ορίζεται πλήρως, αν εκτός από τα πάχη των στρώσεων, οριστούν για τα υλικά αυτών οι σταθερές τιμές του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου Poisson ν , οι οποίες τα χαρακτηρίζουν. Ωστόσο, υπό επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, τα υλικά των εύκαμπτων οδοστρωμάτων δεν είναι απολύτως ελαστικά, και επομένως δεν μπορούν να χαρακτηριστούν από ένα ενιαίο και σταθερό μέτρο ελαστικότητας E . Για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται παρακάτω η μη γραμμική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών, με σκοπό να δοθεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση στην ανάλυση του εύκαμπτου οδοστρώματος.

2.3 Μη γραμμική συμπεριφορά ασύνδετων υλικών

2.3.1 Γενικά στοιχεία

Ο λόγος για τον οποίο άρχισε να απασχολεί τους ερευνητές η μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών οδοστρώσεως, είναι το γεγονός ότι η γραμμική ελαστική θεωρία περιέχει πολλές παραδοχές και υποθέσεις για τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων. Επιπλέον, είχαν γίνει κατά καιρούς αναφορές στη βιβλιογραφία ότι ορισμένα υλικά έχουν την τάση να ‘μαλακώνουν’ (stress softening) ενώ κάποια άλλα να ‘σκληραίνουν’ (stress stiffening) υπό την επίδραση της διερχόμενης κυκλοφορίας (Dehlen και Monismith, 1968).

Μετά από πολυετείς έρευνες και πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών, διαπιστώθηκε ότι τα εν λόγω υλικά, έχουν την τάση να σκληραίνουν με την αύξηση της φόρτισης (stress stiffening) και ως εκ τούτου να αυξάνουν τη δυσκαμψία τους με την αύξηση της ενεργού σφαιρικής τάσης (Boyce, 1980).

Σχετικά με το επανακμήσιμο τμήμα της παραμόρφωσης (resilient deformation), αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με την αύξηση της φόρτισης που επιβάλλεται στα υλικά και με το όριο αντοχής τους. Συγκεκριμένα, όταν τα ασύνδετα υλικά υποβάλλονται σε συνθήκες φόρτισης οι οποίες δεν προσεγγίζουν την αστοχία, η μόνιμη συνιστώσα της παραμόρφωσης μειώνεται έπειτα από κάθε επανάληψη, ώσπου κάτω από συνθήκες στράγγισης η συμπεριφορά τους γίνεται πλήρως ελαστική. Για μικρές αυξήσεις φορτίου, η παραμόρφωση που προκαλείται είναι

σχεδόν πάντα ελαστική, ενώ, για μεγάλες αυξήσεις οι οποίες προσεγγίζουν την αστοχία, η παραμόρφωση δεν είναι απολύτως ελαστική, καθώς ένα ποσοστό ενέργειας απορροφάται από το σύστημα κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου και δεν αποδίδεται κατά την αποφόρτιση.

Η επανακτήσιμη αυτή παραμόρφωση (resilient) είναι αποτέλεσμα τριών μηχανισμών (Masad και Little, 2004):

- Μηχανισμός παραμόρφωσης, κατά τον οποίο οι κόκκοι αλλάζουν σχήμα και συμπιέζονται.
- Μηχανισμός ολίσθησης, κατά τον οποίο οι κόκκοι ολισθαίνουν και κάμπτονται.
- Μηχανισμός κρούσης των κόκκων, ο οποίος συμβαίνει όταν η επιβαλλόμενη φόρτιση υπερβεί την αντοχή του υλικού.

Ο πιο καθοριστικός μηχανισμός για την επανακτήσιμη παραμόρφωση είναι ο πρώτος (μηχανισμός παραμόρφωσης), καθώς η κρούση ενδέχεται να οδηγήσει σε μη αναιρέσιμα αποτελέσματα, ενώ κατά την ολίσθηση υπάρχει απώλεια τριβής.

2.3.2 Βασικοί παράγοντες

Η μη γραμμική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών προέρχεται από το γεγονός ότι δεν μπορούν να χαρακτηριστούν από μία ενιαία και σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας E , καθώς αυτό μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, ως αποτέλεσμα της επίδρασης των επιβαλλόμενων φορτίσεων. Παρακάτω ορίζεται ο τύπος με τον οποίο καταδεικνύεται η συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με τις αναπτυσσόμενες τάσεις:

$$M_R = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{1,r}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.1)$$

όπου:

M_R = Resilient Modulus= Μέτρο Επανάκτησης

σ_d = αποκλίνουσα ή επαναλαμβανόμενη επιβαλλόμενη τάση

σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις

$\varepsilon_{1,r}$ = ελαστική αξονική παραμόρφωση

Το μέτρο ελαστικότητας E , αντικαθίσταται με το μέτρο επανάκτησης M_R . Ο όρος 'resilient' που χαρακτηρίζει το μέτρο επανάκτησης αναφέρεται στο τμήμα εκείνο της ενέργειας που απορροφάται από το υλικό όταν φορτίζεται και αποδίδεται πίσω πλήρως όταν αποφορτίζεται (Osei, 2000).

Τη γενική ιδέα του Resilient Modulus την εισήγαγαν πρώτοι οι Seed et al (1962), κάνοντας έρευνα πάνω στην αστοχία των ασφαλικών οδοστρωμάτων λόγω κόπωσης, και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό της στρώσης έδρασης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το Resilient Modulus είναι μία παράμετρος που εκφράζει την ακαμψία του υλικού και αποτελεί μία εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας, με τη διαφορά ότι το επιβαλλόμενο φορτίο ασκείται με ταχύτητα και επαναλαμβανόμενα. Οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται είναι διάφοροι, όπως η πυκνότητα, το ποσοστό υγρασίας, η διαβάθμιση και ο τύπος του υλικού, το ιστορικό φόρτισης, κ.ά. Ο πιο σημαντικός όμως παράγοντας, πάνω στον οποίο βασίστηκαν πολλοί μελετητές για να αναπτύξουν πρότυπα, είναι η τρέχουσα κατάσταση φόρτισης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο βαθμός επιρροής του κάθε παράγοντα ξεχωριστά, στη συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών.

Επίπεδο φόρτισης

Το επίπεδο φόρτισης είναι ο παράγοντας που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις επανακτήσιμες ιδιότητες των ασύνδετων υλικών. Πολυάριθμες έρευνες (Monismith et al 1967, Hicks 1970, Uzan 1985) έχουν υποδείξει υψηλό βαθμό εξάρτησης της πλευρικής τάσης σ_c και του αθροίσματος των κύριων τάσεων θ από το μέτρο επανάκτησης M_R στα ακατέργαστα ασύνδετα υλικά. Συγκεκριμένα, το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται με την αύξηση της πλευρικής τάσης και του αθροίσματος των κύριων τάσεων. Σε σύγκριση με την πλευρική τάση, η αποκλίνουσα τάση σ_d θεωρείται ότι έχει πολύ μικρή επιρροή στην ακαμψία του υλικού. Επίσης, ο λόγος Poisson επηρεάζεται εξίσου από το επίπεδο φόρτισης του επιβάλλεται. Μάλιστα, οι Hicks (1970), Brown (1975) και Kolisoja (1997) σε αναφορά τους έχουν γράψει ότι ο

λόγος Poisson των ασύνδετων υλικών αυξάνεται με την αύξηση της αποκλίνουσας τάσης και τη μείωση της πλευρικής τάσης.

Πυκνότητα

Η αύξηση της πυκνότητας σε ένα ασύνδετο υλικό επηρεάζει σημαντικά την απόκρισή του στη στατική φόρτιση κάνοντάς το πιο άκαμπτο και πιο δυνατό. Ωστόσο, η επίδρασή της στην ακαμψία του υλικού δεν έχει μελετηθεί εκτεταμένα μέχρι σήμερα. Παρόλα αυτά, μελέτες (Trollope et al 1962, Hicks 1970, Rada και Witczak 1981) αναφέρουν ότι το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας. Το επίπεδο πυκνότητας δείχνει να επηρεάζει και τον λόγο Poisson παρόλο που θεωρείται από κάποιους ερευνητές (Hicks 1970, Allen 1973) ότι είναι μικρός ο βαθμός επιρροής του.

Διαβάθμιση υλικού, ποσοστό κενών, μέγεθος κόκκων

Η ακαμψία των ασύνδετων υλικών επηρεάζεται σε κάποιο βαθμό από το μέγεθος των κόκκων και τη διαβάθμισή τους. Ορισμένοι ερευνητές (Thom και Brown 1987, Kamal et al 1993) έχουν αναφέρει ότι το μέτρο επανάκτησης κατά κύριο λόγο μειώνεται όταν αυξάνεται το ποσοστό των κενών, ενώ η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού επηρεάζει μεν, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό την ακαμψία του. Τέλος, ο Hicks (1970) απέδειξε ότι η αύξηση του ποσοστού των κενών οδηγεί σε μείωση του λόγου Poisson.

Ποσοστό υγρασίας

Αρκετές είναι οι μελέτες που έχουν καταλήξει στο γεγονός ότι η επανακτήσιμη απόκριση ενός ξηρού και ενός μερικώς κορεσμένου αμμοχάλικου είναι παρόμοια, αλλά όσο πλησιάζει ο απόλυτος κορεσμός η επανακτήσιμη συμπεριφορά επηρεάζεται σημαντικά (Smith και Nair, 1973). Ερευνητές όπως οι Hicks και Monismith (1971), Dawson et al (1996) οι οποίοι μελέτησαν τη συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών σε υψηλούς βαθμούς κορεσμού, παρατήρησαν μία αξιοσημείωτη συσχέτιση του μέτρου επανάκτησης με το ποσοστό υγρασίας, με το πρώτο να μειώνεται όσο το δεύτερο αυξάνεται. Ο κορεσμός των ασύνδετων υλικών επηρεάζει και τον λόγο Poisson, ο οποίος μειώνεται όσο ο βαθμός κορεσμού αυξάνεται (Hicks, 1970).

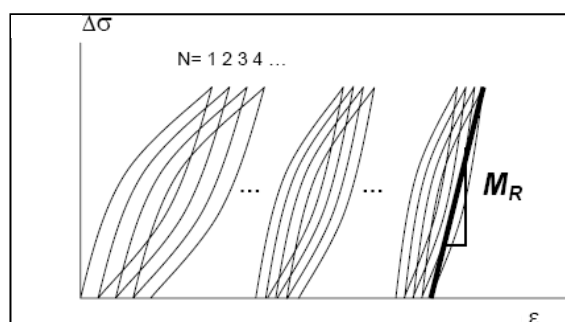
Ιστορικό και αριθμός κύκλων φόρτισης

Σύμφωνα με τον Dehlen (1969), η επίδραση του ιστορικού φόρτισης εμφανίζεται σαν μία συνέπεια διαδοχικών πυκνώσεων και αναδιατάξεων που συμβαίνουν στους κόκκους όταν αυτοί υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Συγκεκριμένα, το αποτέλεσμα των φορτίσεων αυτών έδειξε ότι το υλικό επηρεάζεται μεν από το ιστορικό φόρτισης, αλλά αυτό το γεγονός μπορεί σχεδόν να εξαιρεθεί αποφεύγοντας μερίδα υψηλών φορτίσεων και πραγματοποιώντας προκαταρκτικές φορτίσεις (Boyce, 1976). Ο Hicks (1970) στη συνέχεια ανέφερε ότι μπορεί ότι η επίδραση του ιστορικού φόρτισης να μηδενιστεί και να επιτευχθεί μία σταθερή επανακτήσιμη απόκριση μετά από την εφαρμογή περίπου εκατό κύκλων φόρτισης ίδιου εύρους. Τέλος ο ίδιος πρόσθεσε ότι η επανακτήσιμη απόκριση των ασύνδετων υλικών έπειτα από 50 με 100 φορτίσεις είναι ίδια με αυτήν που παρουσιάζεται έπειτα από 25000 φορτίσεις.

Διάρκεια, συχνότητα και σειρά φόρτισης

Η γενική άποψη που επικρατεί για τη διάρκεια και τη συχνότητα φόρτισης, είναι ότι έχουν ελάχιστη έως μηδενική επιρροή στην επανακτήσιμη συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών (Seed et al, 1965), ενώ οι Hicks (1970) και Allen (1973) μελετώντας τη σειρά φόρτισης η οποία εφαρμόζεται σε ένα δοκίμιο, κατέληξαν ότι δεν έχει καμία επίδραση στις επανακτήσιμες ιδιότητες των αμμοχάλικων.

Για να γίνει κατανοητή η έννοια του Resilient Modulus, πρέπει να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνονται τα υλικά των οδοστρωμάτων και κυρίως τα ασύνδετα υλικά. Η απόκριση λοιπόν, περιλαμβάνει μία πλαστική, μία βισκοελαστική και μία ελαστική φάση, όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 2.4.



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων υπό επαναλαμβανόμενες φορτίσεις

Κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου και υπό αργούς ρυθμούς φόρτισης, κυριαρχούν η βισκοελαστική και η πλαστική φάση. Ωστόσο, για επαναλαμβανόμενες φορτίσεις μικρής διάρκειας και περιορισμένης έντασης, δηλαδή για αντιπροσωπευτικές συνθήκες κυκλοφορίας, οι παραμορφώσεις είναι κατά κύριο λόγο ελαστικές και μικρές κατά τη διέλευση ενός οχήματος. Το αναιρέσιμο τμήμα των παραμορφώσεων συνιστά τη λεγόμενη επανακτήσιμη (resilient) απόκριση κατά την οποία οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων είναι μη γραμμικές.

2.4 Πρότυπα μη γραμμικής συμπεριφοράς

Στο πλαίσιο της διεθνούς έρευνας για τη μη γραμμικότητα στην παραμόρφωση των ασύνδετων υλικών, έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο κάτω από αντιπροσωπευτικές συνθήκες, δοκιμές τριαξονικής κυψέλης (κεφάλαιο 3) σε διάφορα υλικά. Κατά τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, επιβάλλονται σε δοκίμια ασύνδετων υλικών κύκλοι φόρτισης μικρής διάρκειας και έντασης αντίστοιχης με αυτήν που επιβάλλεται στο οδόστρωμα από τη διερχόμενη κυκλοφορία. Η εργαστηριακή αυτή δοκιμή, αποτελεί ένα από τα τρία στάδια της λεγόμενης 'μηχανιστικής' μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων, κατά την οποία περιγράφεται η συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών από τη μη γραμμική σχέση που συνδέει τάσεις και παραμορφώσεις. Τα άλλα δύο στάδια της 'μηχανιστικής' μεθόδου είναι η ανάπτυξη σχέσεων Μηχανικής που καταδεικνύουν αυτή τη συμπεριφορά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλα που έχουν προκύψει από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Έπειτα από πολυετείς έρευνες και πολυάριθμες δοκιμές τριαξονικής κυψέλης, αναπτύχθηκαν πρότυπα που συσχετίζουν το μέτρο επανάκτησης των ασύνδετων υλικών με διαφορετικό συνδυασμό τάσεων κάθε φορά. Μέσα από τη συσχέτιση αυτή περιγράφεται η μη γραμμική συμπεριφορά τους υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα από τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί:

Πρώτοι οι Seed et al (1962) και στη συνέχεια οι Brown και Pell (1967) και οι Hicks και Monismith (1971) ανέπτυξαν ένα πρότυπο, το οποίο στη συνέχεια έγινε σημείο αναφοράς για τα υπόλοιπα που ακολούθησαν. Το πρότυπο ονομάζεται 'kθ model' και συνδέει το άθροισμα των κύριων τάσεων με το μέτρο επανάκτησης M_R :

$$M_R = k_1 \theta^{k_2} \quad (2.2)$$

όπου:

k_1, k_2 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

Ο λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι το γεγονός ότι είναι αρκετά απλό στην εφαρμογή του. Παρόλα αυτά, έχει κάποια βασικά μειονεκτήματα. Καταρχάς, θεωρεί τον λόγο Poisson σταθερό, κάτι το οποίο δεν ισχύει, καθώς στην πραγματικότητα μεταβάλλεται ανάλογα με τη φόρτιση. Επίσης, δε λαμβάνει υπόψη τη διατμητική τάση και παραμόρφωση που αναπτύσσεται, ενώ, το μέτρο επανάκτησης είναι ανάλογο του αθροίσματος των κύριων τάσεων, με αποτέλεσμα να μη διευκρινίζεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται από την κάθε τάση ξεχωριστά.

Στη συνέχεια, οι Dunlap και Monismith (1967) υπέδειξαν ότι το M_R αυξάνεται με την πλευρική τάση και δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της αποκλίνουσας τάσης (διαφορά μέγιστης και ελάχιστης), με δεδομένο ότι αυτή δεν προκαλεί εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Έτσι αναπτύχθηκε το παρακάτω πρότυπο:

$$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \quad (2.3)$$

όπου:

k_1, k_2 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

σ_3 = πλευρική τάση (confining stress)

Το μειονέκτημα αυτής της σχέσης είναι ότι δε λαμβάνεται υπόψη η διαφορά τάσεων (deviator stress) και ότι είναι εφαρμόσιμη κυρίως σε υλικά της στρώσης

έδρασης. Πάνω σε αυτό το μειονέκτημα δούλεψαν οι May και Witczak (1981) και αργότερα ο Uzan (1985) οι οποίοι παρατήρησαν ότι πέραν του αθροίσματος των κύριων τάσεων το μέτρο M_R επηρεάζεται τελικά και από την αποκλίνουσα σ_d , και ανέπτυξαν το παρακάτω πρότυπο:

$$M_R = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_0} \right)^{k_3} \quad (2.4)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

p_0 = ατμοσφαιρική πίεση

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = αποκλίνουσα τάση (deviatoric stress)

Το πρώτο σκέλος του προτύπου της σχέσης (2.4) περιγράφει την αύξηση του M_R με την αύξηση της πλευρικής τάσης (confining stress) και της αποκλίνουσας τάσης (deviator stress) και το δεύτερο, δείχνει το πώς επηρεάζεται αποκλειστικά από την σ_d . Ένα πλεονέκτημά του είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου σε χονδρόκοκκα και σε λεπτόκοκκα ασύνδετα υλικά. Για τα χονδρόκοκκα υλικά το k_3 είναι πολύ μικρό και το πρότυπο μετατρέπεται στο $k\theta$ model, ενώ για τα λεπτόκοκκα το k_2 είναι μικρό αλλά σε λογικά πλαίσια, και το μέτρο επανάκτησης εξαρτάται κυρίως από την σ_d .

Την τρισδιάστατη μορφή του προηγούμενου προτύπου περιέγραψε αργότερα ο Uzan (1992), ο οποίος εισήγαγε την οχταεδρική τάση στη θέση της σ_d , με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της κατάστασης φόρτισης ενός υλικού, κατά την οποία η κανονική και διατμητική τάση εναλλάσσονται. Το πρότυπο αυτό το οποίο αναφέρεται ως Universal model περιγράφεται ως:

$$M_R = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} \right)^{k_3} \quad (2.5)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

p_0 = ατμοσφαιρική πίεση

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

Το πρότυπο Universal προτάθηκε ως αντιπροσωπευτικό για όλους τους τύπους των υλικών, από συνεκτικά έως μη συνεκτικά εδάφη. Το k_1 είναι πάντα θετικό, αφού το M_R δεν μπορεί να είναι αρνητικό. Το k_2 πρέπει να είναι θετικό γιατί με την αύξηση της τάσης το υλικό γίνεται πιο άκαμπτο και το M_R μεγαλύτερο και τέλος, το k_3 πρέπει να είναι αρνητικό γιατί η αύξηση της διατμητικής τάσης μειώνει την ακαμψία του υλικού και άρα και το M_R .

Μετά από συστηματικές δοκιμές τριαξονικής κυψέλης σε αργιλικά εδάφη, ο Shackle (1973) ανέπτυξε ένα πρότυπο συναρτήσεως της οχταεδρικής διατμητικής και ορθής τάσης:

$$M_R = k_1 \frac{\tau_{oct}^{k_2}}{\sigma_{oct}^{k_3}} \quad (2.6)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

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

$$\sigma_{oct} = \theta/3$$

Οι Elliot και Lourdesnath (1989) εντόπισαν μία ακόμη αδυναμία του προτύπου $k\theta$ και δούλεψαν πάνω σε αυτό. Παρατήρησαν ότι το πρότυπο $k\theta$ μπορεί να εφαρμοστεί με καλά αποτελέσματα μόνο σε καταστάσεις πριν την αστοχία, ενώ μετά από αυτήν το μέτρο επανάκτησης μειωνόταν με την αύξηση του αθροίσματος των κύριων τάσεων, κάτι το οποίο ερχόταν σε αντιδιαστολή με το αρχικό πρότυπο. Έτσι πρότειναν μία μετατροπή, ενσωματώνοντας σε αυτό έναν όρο, ο οποίος το επηρεάζει ελάχιστα πριν το υλικό βρεθεί σε φάση αστοχίας. Ονομάστηκε 'stress ratio model' και ορίστηκε ως εξής:

$$M_R = \frac{\theta^{k_2}}{10^{A_1}} \quad (2.7)$$

όπου:

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

k_2 = παράμετρος που προκύπτει από γραμμική παρεμβολή

$$A_1 = mR^3$$

Μία βελτιωμένη συσχέτιση μεταξύ του M_R και των διαφόρων τάσεων, όπως η αποκλίνουσα τάση σ_d , η πλευρική σ_3 , και το άθροισμα των κυρίων τάσεων θ , δόθηκε από τον Itani (1990), ο οποίος πρότεινε το παρακάτω πρότυπο.

$$M_R = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \sigma_d^{k_3} \sigma_3^{k_4} \quad (2.8)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3, k_4 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

p_0 = ατμοσφαιρική πίεση

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = αποκλίνουσα τάση (deviatoric stress)

σ_3 = πλευρική τάση (confining stress)

Την ίδια χρονική περίοδο, οι Crockford et al (1990), ανέπτυξαν ένα πρότυπο, το οποίο ήταν συνάρτηση του ογκομετρικού ποσοστού του νερού, της τάσης απορρόφησης, της οχταεδρικής διατμητικής τάσης, της μονάδας βάρους του υλικού, και του αθροίσματος των κυρίων τάσεων. Το πρότυπο ήταν το εξής:

$$M_R = \beta_0 (\theta + 3\psi \frac{V_w}{V_t})^{\beta_1} \tau_{oct}^{\beta_2} (\frac{\gamma}{\gamma_w})^{\beta_3} \quad (2.9)$$

όπου:

$\beta_{0,1,2,3,4}$ = σταθερές του υλικού

ψ = τάση απορρόφησης

V_w/V_t = ογκομετρικό ποσοστό νερού

τ_{oct} = οχταεδρική τάση= $\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$

γ/γ_w = μονάδα βάρους υλικού / μονάδα βάρους νερού

Σε αντίθεση με τους Dunlap και Monismith, άλλοι ερευνητές όπως οι Pezo (1993), Garg και Thompson (1997) θεώρησαν σωστό να εντάξουν στην ανάλυσή τους και την σ_d και πρότειναν την παρακάτω σχέση:

$$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3} \quad (2.10)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = αποκλίνουσα τάση (deviatoric stress)

σ_3 = πλευρική τάση (confining stress)

Οι Tam και Brown (1988) αντίθετα, εισήγαγαν ένα πολύ απλό πρότυπο το οποίο μπορούσε να εκφραστεί με έναν απλό λόγο τάσεων:

$$M_R = \left(k_1 \frac{\theta}{3\sigma_d} \right)^{k_2} \quad (2.11)$$

όπου:

k_1, k_2 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = αποκλίνουσα τάση (deviatoric stress)

Πάνω στο πρότυπο Universal, βασίστηκε στη συνέχεια ο Lytton (1995) και ανέπτυξε ένα νέο πρότυπο, για να συμπεριλάβει τις ιδιότητες των ακόρεστων ασύνδετων υλικών, ισχυριζόμενος ότι έτσι συμπεριφέρονται. Το πρότυπο είναι:

$$M_R = k_1 p_0 \left(\frac{\theta - 3\beta f h_f}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} \right)^{k_3} \quad (2.12)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

p_0 = ατμοσφαιρική πίεση

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

β = ογκομετρικό ποσοστό νερού

f = συνάρτηση του ογκομετρικού ποσοστού νερού

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

Σε συνέχεια του προτύπου Universal, προτάθηκε ένα νέο, ευρύτερης εφαρμογής. Η διαφορά τους εντοπίζεται στις μεταβλητές γραμμικής παρεμβολής, ενώ κατά τα άλλα έδιναν ίδια αποτελέσματα. Ονομάστηκε 'Modified Universal model' ή 'M-E Design (2002)' καθώς ήταν αποτέλεσμα συνδυασμού εμπειρικών και μηχανιστικών μεθόδων:

$$M_R = k_1 p_0 \left(\frac{\theta}{p_0} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_0} + 1 \right)^{k_3} \quad (2.13)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

θ = άθροισμα κύριων τάσεων ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

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

p_0 = ατμοσφαιρική πίεση

Τέλος, έπειτα από εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα στα υλικά υπόβασης, ο Humman πρότεινε ένα πρότυπο που προέρχεται από το πρότυπο $k\theta$, διαχωρίζοντας όμως την πλευρική τάση σ_c από την αποκλίνουσα τάση σ_d , με τον εξής τρόπο:

$$M_R = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_0} \right)^{k_2} \left[1 - k_3 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1,f}} \right) \right]^{k_4} \quad (2.14)$$

όπου:

k_1, k_2, k_3, k_4 = παράμετροι που προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή

σ_3 = μικρότερη κύρια τάση

σ_1 = μέγιστη κύρια τάση

$\sigma_{1,f}$ = μέγιστη κύρια τάση στην αστοχία

σ_0 = τάση αναφοράς ($\sigma_0 = 0$ kPa)

Στο πρότυπο αυτό, το πρώτο τμήμα της σχέσης και συγκεκριμένα ο όρος ' $k_1 \sigma_3^{k_2}$ ', περιγράφει την αύξηση του μέτρου επανάκτησης M_R με την αύξηση της πλευρικής τάσης, ενώ το δεύτερο τμήμα ' $(1 - k_3 (\sigma_1 / \sigma_{1,f})^{k_4})$ ', περιγράφει τη μείωση του μέτρου επανάκτησης όσο η φόρτιση πλησιάζει στην αστοχία ($\sigma_1 / \sigma_{1,f} \rightarrow 1$). Ο μόνος περιορισμός του προτύπου αυτού είναι ότι δεν μπορεί να περιγράψει την αύξηση του μέτρου επανάκτησης με την αύξηση της αποκλίνουσας τάσης, πέραν της αστοχίας.

2.5 Συμπεριφορά υλικών στρώσης έδρασης

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία αναφορά στον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται τα υλικά της στρώσης έδρασης στις επιβαλλόμενες φορτίσεις.

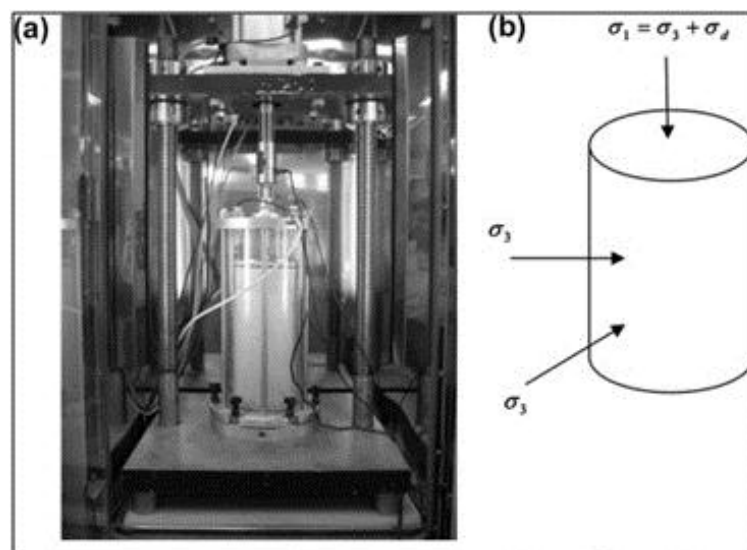
Τα υλικά αυτά, τα οποία είναι ως επί το πλείστον συνεκτικά, εμφανίζουν επίσης μη γραμμική συμπεριφορά όπως και τα ασύνδετα της βάσης-υπόβασης, με τη διαφορά ότι τα πρώτα έχουν την τάση να 'μαλακώνουν' υπό τη δράση του επιβαλλόμενου φορτίου (stress softening). Υιοθετείται, λοιπόν, αντίστοιχη προσέγγιση στον τρόπο ανάλυσης της συμπεριφοράς των υλικών στρώσης έδρασης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τάσεις φτάνουν απομειωμένες από τις υπερκείμενες στρώσεις. Ένα στοιχείο που μπορεί να επισημανθεί, είναι ότι μετά από εργαστηριακές δοκιμές, παρατηρήθηκε το μέτρο επανάκτησης M_R των υλικών στρώσης έδρασης να μειώνεται με την αύξηση της αποκλίνουσας τάσης σ_d και να αυξάνεται με την αύξηση πλευρικής τάσης σ_3 (Sheng, 2010).

Με βάση τα παραπάνω, και στην περίπτωση της στρώσης έδρασης, αναπτύχθηκαν πρότυπα ως αποτέλεσμα των τριαξονικών δοκιμών, χρησιμοποιώντας ποικίλους συνδυασμούς τάσεων. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι υπάρχουν πρότυπα, τα οποία έχει αποδειχθεί κατά το παρελθόν ότι μπορούν να εφαρμοστούν με σχετικά καλά αποτελέσματα τόσο στη βάση-υπόβαση, όσο και στη στρώση έδρασης (George, 2004). Ενδεικτικά ορισμένα από αυτά είναι το πρότυπο kθ (1962), Dunlap and Monismith (1967), και το Modified Universal (2002).

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί, η μηχανική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φόρτιση που τους επιβάλλεται. Μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους προσομοίωσης του οδοστρώματος στις πραγματικές συνθήκες φόρτισης, είναι η δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, κατά την οποία το δοκίμιο υποβάλλεται σε κύκλους φόρτισης μικρής διάρκειας και έντασης ίσης με αυτής που δέχεται το οδόστρωμα από τη διερχόμενη κυκλοφορία (εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Δοκιμή τριαξονικής κυψέλης

Η δοκιμή αυτή, η οποία πραγματοποιείται στο εργαστήριο και περιγράφεται στη συνέχεια, υποβάλλει το δοκίμιο σε μεγάλο αριθμό διαφορετικών κατακόρυφων και πλευρικών τάσεων, κάτω από τις οποίες αναπτύσσονται οι επανακμήσιμες (resilient) παραμορφώσεις και προκύπτουν τα αντίστοιχα μέτρα επανάκτησης M_R .

3.2 Διαδικασία δοκιμής

3.2.1 Προετοιμασία δοκιμίου

Η επιτυχημένη διεξαγωγή της δοκιμής έχει δύο βασικές προϋποθέσεις: την άρτια προετοιμασία του υλικού και τη σωστή σύνδεσή του στη συσκευή τριαξονικής κυψέλης. Τα στάδια επεξεργασίας του υλικού είναι επιγραμματικά:

- Προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας.
- Ανάμειξη υλικού με την ποσότητα νερού που απαιτείται για τη συμπύκνωση.
- Διαδικασία συμπύκνωσης.

Αναλυτικά, ο προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας του δείγματος γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T265-93 (2007). Αρχικά, το ακατέργαστο υλικό ζυγίζεται και τοποθετείται στο φούρνο σε θερμοκρασία 110°C για 15-16 ώρες. Μετά την ξήρανσή του αφήνεται σε θερμοκρασία δωματίου και ξαναζυγίζεται. Η σχέση υπολογισμού του ποσοστού υγρασίας είναι :

$$w = \frac{(W_1 - W_2)}{(W_2 - W_c)} \times 100 \quad (3.1)$$

όπου:

w = ποσοστό υγρασίας (%)

W_1 = μάζα δοχείου + υλικό (g)

W_2 = μάζα δοχείου + υλικό μετά το φούρνο (g)

W_c = μάζα δοχείου (g)

Στη συνέχεια, αφού προσδιοριστεί ο όγκος V και η επιθυμητή πυκνότητα γ_d του δοκιμίου που θα συμπυκνωθεί, υπολογίζεται η ξηρή μάζα W_s του υλικού που έχει προκύψει μετά το φούρνο.

$$W_s = 453.59 \gamma_d V \quad (3.2)$$

όπου:

W_s = ξηρή μάζα υλικού (g)

γ_d = επιθυμητή πυκνότητα (lb/ft³)

V = ολικός όγκος συμπυκνωμένου δοκιμίου (ft³)

Τέλος, προσδιορίζεται η μάζα του νερού W_{aw} που απαιτείται να προστεθεί για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η συμπίκνωση, από τον τύπο:

$$W_{aw} = (W_s + W_{as}) \times \frac{(w - w_1)}{100} \quad (3.3)$$

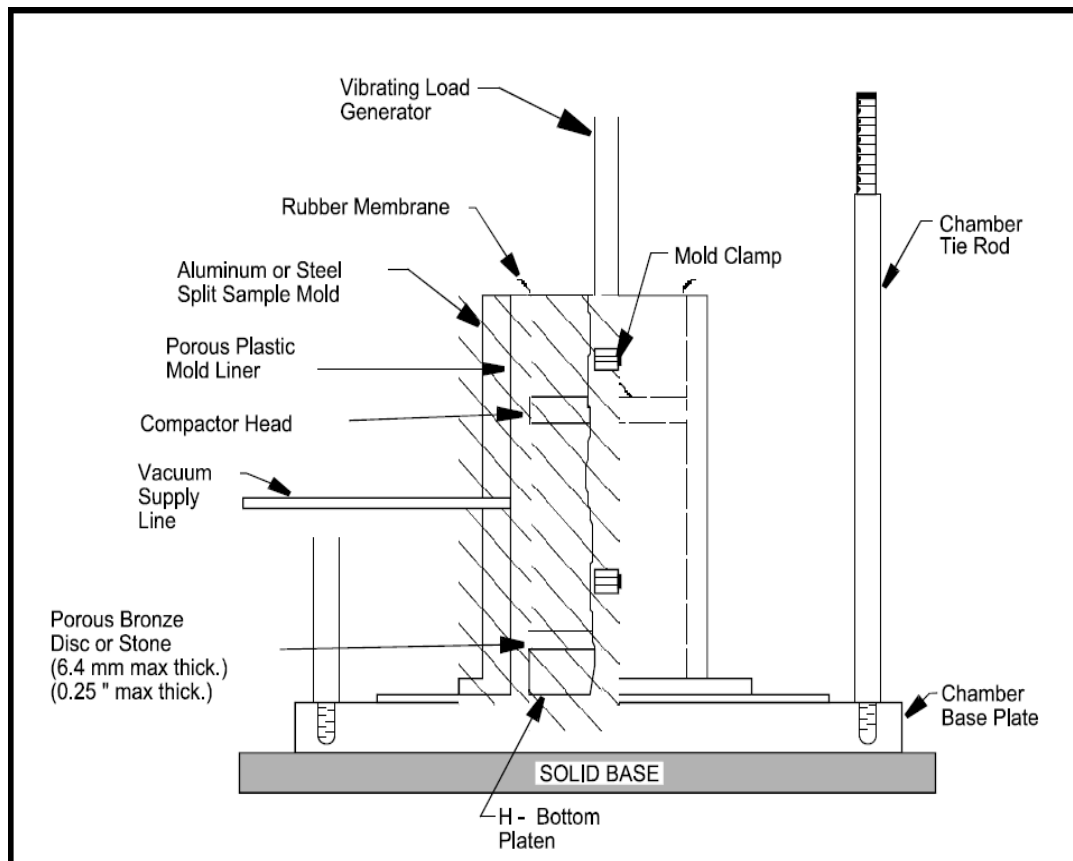
όπου:

W_{aw} =μάζα νερού που απαιτείται για να αποκτηθεί το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας(g)

w = επιθυμητό ποσοστό υγρασίας του συμπυκνωμένου δοκιμίου (%)

Ακολουθεί η ανάμειξη του υλικού με τη μάζα νερού που υπολογίστηκε, με αργό ρυθμό ώστε να προκύψει ένα ομοιόμορφο μίγμα. Με την ολοκλήρωση της ανάμειξης, το μίγμα σφραγίζεται σε πλαστική σακούλα για 48 ώρες μέχρι να ξεκινήσει η διαδικασία της συμπίκνωσης.

Στόχος με την ολοκλήρωση της συμπύκνωσης, είναι να προκύψει το ύψος του δοκιμίου διπλάσιο της διαμέτρου του (AASHTO T307-99, 2007). Η συσκευή με την οποία πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 3.2.

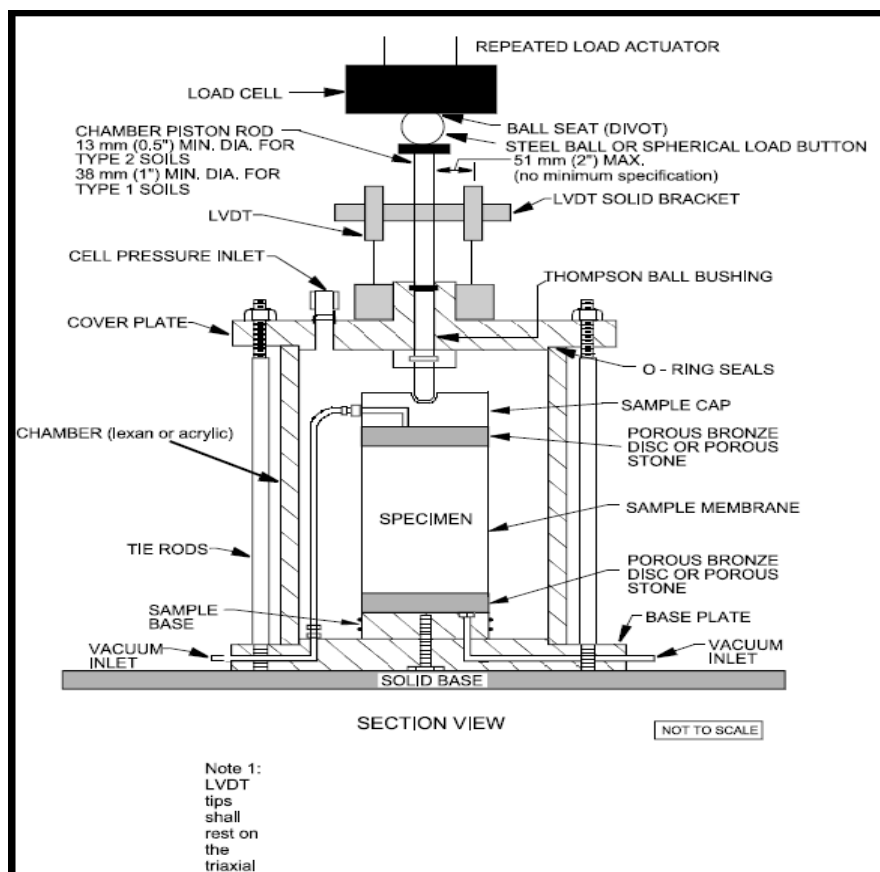


Εικόνα 3.2: Διάταξη συσκευής συμπίκνωσης (AASHTO T265-93, 2007)

Στη βάση της συσκευής τοποθετείται ένα καλούπι, μέσα στο οποίο εισάγεται σε έξι δόσεις το νωπό δείγμα. Η συμπίκνωση πραγματοποιείται με πτώσεις διάρκειας δέκα δευτερολέπτων η κάθε μία. Σε πρώτη φάση, μετράται το ολικό ύψος του καλουπιού. Στη συνέχεια, εισάγεται η πρώτη δόση μάζας, ενεργοποιείται η συσκευή και μετά από 10 δευτερόλεπτα επαναμετράται το νέο ύψος (από τη βάση). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται άλλες πέντε φορές και τελικώς προκύπτει το συμπυκνωμένο δοκίμιο.

3.2.2 Διάταξη συσκευής τριαξονικής κυψέλης

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, οι επανακτήσιμες παραμορφώσεις (resilient deformations), προκύπτουν από τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, μέσω της συσκευής που φαίνεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Διάταξη συσκευής τριαξονικής κυψέλης (AASHTO T307-99, 2007)

Η συσκευή τριαξονικής κυψέλης απαρτίζεται από τρία βασικά μέρη: τον τριαξονικό θάλαμο πίεσης, τη συσκευή φόρτισης και τον εξοπλισμό μέτρησης. Εκτενέστερα για το κάθε κομμάτι:

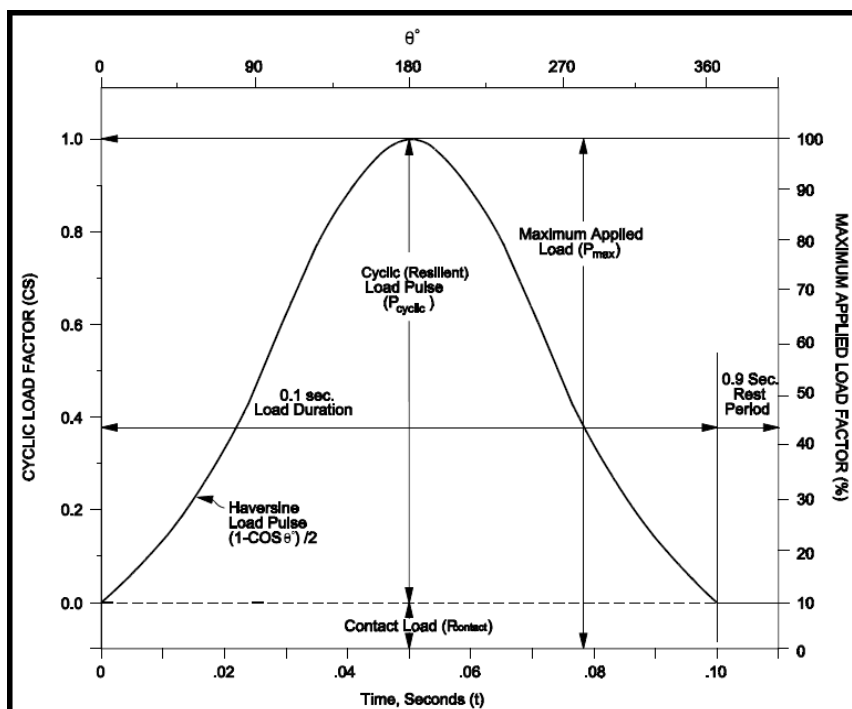
Τριαξονικός θάλαμος πίεσης (Triaxial Pressure Chamber):

Αποτελεί το κυριότερο τμήμα της συσκευής, καθώς στο εσωτερικό του περιλαμβάνει το υπό εξέταση δοκίμιο και το ρευστό που επιλέγεται για να προκαλέσει την πλευρική συμπίεση. Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος από υλικό διαφανές, για να καθιστά εύκολη την παρακολούθηση του πειράματος.

Συσκευή φόρτισης (Loading Device):

Με τη συσκευή αυτή προσομοιώνεται η φόρτιση του οδοστρώματος. Αποτελείται από έναν ενεργοποιητή (actuator), ο οποίος εκτελεί επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης, συνολικής διάρκειας ενός δευτερολέπτου.

Κάθε κύμα φόρτισης έχει διάρκεια 0,1 δευτερόλεπτα και περίοδο ανάπαυσης 0,9 δευτερόλεπτα (βλ. Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα φόρτισης χρόνου (AASHTO T307-99, 2007)

Εξοπλισμός μέτρησης της φόρτισης του δοκιμίου (Load and specimen response measuring equipment):

Περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό κύτταρο (electronic load cell) τοποθετημένο ανάμεσα στον ενεργοποιητή φόρτισης (actuator) και στο έμβολο θαλάμου (chamber piston). Το μέγεθος του φορτίου που μπορεί να αντέξει είναι ανάλογο της διαμέτρου του δοκιμίου. Ένας επιπλέον βασικός εξοπλισμός μέτρησης, είναι οι δύο μετατροπείς μορφής ελατηρίου (LVDTs), οι οποίοι βρίσκονται αντιδιαμετρικά εντός του θαλάμου. Είναι συνδεδεμένοι με τέτοιο τρόπο, ώστε ο καθένας να καταγράφει τις παραμορφώσεις ανεξάρτητα από τον άλλον, και στο τέλος να προκύπτει ο μέσος όρος τους.

Πέραν των βασικών τμημάτων της συσκευής, χρησιμοποιούνται και επιπλέον εξαρτήματα, όπως: διαβήτες, μετρητές, χάρακες βαθμονομημένοι σε 0,5mm, μεμβράνες από καουτσούκ πάχους 0,25-0,79mm, δακτύλιους, πηγές εισροής αέρα, βοηθητικά καλούπια επέκτασης της μεμβράνης, πορώδεις πλάκες, κ.ά.

Κλείνοντας με το κομμάτι της διάταξης, πρέπει να αναφερθεί ότι το σύστημα, λόγω της πολυπλοκότητάς του, επιβάλλεται να ελέγχεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ο κανονισμός προβλέπει έλεγχο κάθε δύο εβδομάδες ή κάθε πενήντα δοκιμές, αλλά προτιμότερο είναι να γίνεται μετά το τέλος κάθε δοκιμής.

3.2.3 Διαδικασία δοκιμής τριαξονικής κυψέλης

Με την προϋπόθεση ότι ολοκληρώθηκε με επιτυχία η προετοιμασία του δοκιμίου, ακολουθεί ένα μεταβατικό στάδιο πριν την έναρξη της δοκιμής. Το στάδιο αυτό είναι σημαντικό καθώς εξασφαλίζει τη σωστή μεταβίβαση φορτίων στο δοκίμιο. Για το λόγο αυτό, η μεμβράνη που είχε χρησιμοποιηθεί κατά τη συμπίκνωση, αντικαθίσταται με μία νέα, και το δοκίμιο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πορώδεις πλάκες (πάνω και κάτω), οι οποίες με τη σειρά τους, μεταφέρουν τις κατακόρυφες και κυκλικές δυνάμεις που προκαλούνται από τον ενεργοποιητή φόρτισης (actuator). Στη συνέχεια σφραγίζεται στα δύο άκρα του με δακτύλιους, εισάγεται στον θάλαμο και συνδέεται με το κεντρικό σύστημα καταγραφής των μετρήσεων.

Είναι πιθανόν, ειδικά τις πρώτες φορές, να παρουσιαστούν προβλήματα διαρροών κατά την έναρξη της δοκιμής. Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους εμπόδια, πραγματοποιείται ένας επιπλέον έλεγχος: Μετά την είσοδο του δοκιμίου στο θάλαμο, ασκείται πίεση αέρα 7kPa στη βάση του συστήματος. Σε περίπτωση που εμφανιστούν φυσαλίδες, τα ενδεχόμενα είναι δύο, να έχει τραυματιστεί η μεμβράνη, ή να μην έχει σφραγιστεί σωστά ο θάλαμος. Αφού γίνει ο έλεγχος και αποκατασταθούν τα προβλήματα, αποσυνδέεται η παροχή αέρα και ξεκινάει το πείραμα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δοκιμή τριαξονικής κυψέλης είναι η πιο κοινή μέθοδος για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της επανακτήσιμης παραμόρφωσης στα ασύνδετα υλικά, η οποία εκτελείται σε κυλινδρικό δοκίμιο, εφαρμόζοντας ταυτόχρονη κυκλική αξονική και πλευρική πίεση. Οι επανακτήσιμες ιδιότητες του υλικού (M_R , ν) προκύπτουν με βάση την παρακάτω πορεία.

Γενικά, οι σχέσεις που συνδέουν τις ελαστικές παραμορφώσεις του δοκιμίου $\epsilon_{1,r}$ και $\epsilon_{3,r}$ με τις αναπτυσσόμενες τάσεις σ_1 και σ_3 είναι οι εξής:

$$\Delta_{\varepsilon_{1,r}} = \frac{1}{M_R} [\Delta_{\sigma_1} - 2\nu\Delta_{\sigma_3}] \quad (3.4)$$

$$\Delta_{\varepsilon_{3,r}} = \frac{1}{M_R} [\Delta_{\sigma_3} (1 - \nu) - \nu\Delta_{\sigma_1}] \quad (3.5)$$

Για κυλινδρικό συμμετρικό δοκίμιο, η πλευρική τάση (σ_3) και παραμόρφωση (ε_3), αντιστοιχούν στην ελάχιστη κύρια τάση και παραμόρφωση, ενώ η κατακόρυφη αξονική τάση (σ_1) και παραμόρφωση (ε_1) στην μέγιστη κύρια τάση και παραμόρφωση. Κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής, η πλευρική τάση παραμένει σταθερή, επομένως $\Delta\sigma_3=0$ και οι σχέσεις 3.4 και 3.5 απλοποιούνται :

$$\Delta_{\varepsilon_{1,r}} = \frac{\Delta_{\sigma_1}}{M_R} \quad (3.6)$$

$$\Delta_{\varepsilon_{3,r}} = \frac{-\nu\Delta_{\sigma_1}}{M_R} = -\nu\Delta_{\varepsilon_1} \quad (3.7)$$

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η βασική σχέση που συνδέει το M_R με τις αναπτυσσόμενες τάσεις και τις επανακτήσιμες παραμορφώσεις (3.7), την οποία χρησιμοποιεί η δοκιμή τριαξονικής κυψέλης για να εξάγει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

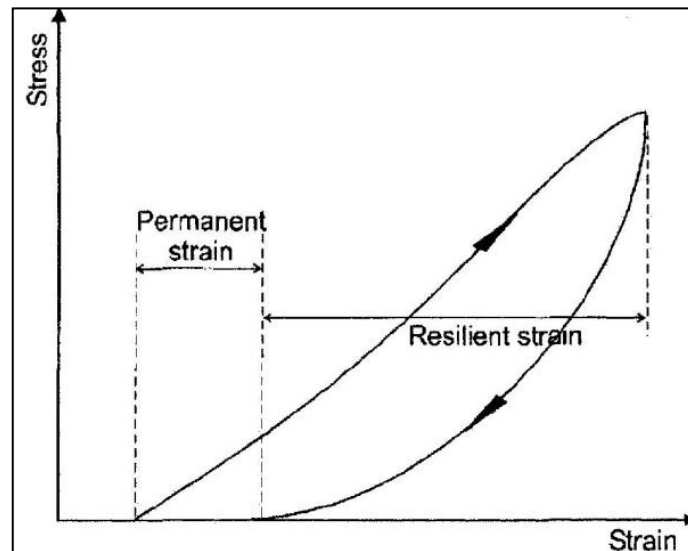
Η κύρια δοκιμή ξεκινάει με την ‘προκαταρκτική’ φόρτιση ή αλλιώς ‘conditioning’ κατά την οποία αναπτύσσεται ο μέγιστος συνδυασμός τάσεων ($\sigma_c=103,4\text{kPa}$, $\sigma_d=93,1\text{kPa}$, $\sigma_{\max}=103,4\text{kPa}$). Με τη φόρτιση αυτή, εξαλείφονται τυχόν προβλήματα που ενδέχεται να παρουσιαστούν στο διάστημα μεταξύ της συμπίκνωσης και της τριαξονικής δοκιμής, και το δοκίμιο παίρνει την τελική του μορφή, σταθεροποιώντας το ύψος του έπειτα από 500-1000 επαναλήψεις. Σε περίπτωση που το δοκίμιο συνεχίζει να μειώνεται σε ύψος, εφαρμόζονται εκ νέου οι επαναλήψεις.

Μετά την ολοκλήρωση της προκαταρκτικής φόρτισης, ασκείται πίεση μικρού μεγέθους και αναπτύσσεται η αντίστοιχη τάση (σ_{contact}), η οποία σταθεροποιεί την επαφή μεταξύ ενεργοποιητή (actuator) και εμβόλου (chamber piston) και εν συνεχεία ακολουθεί ο συνδυασμός φορτίσεων του πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Σειρά φόρτισης για υλικά βάσης-υπόβασης (AASHTO T307-99, 2007)

Sequence No.	Confining Pressure, S_3		Max. Axial Stress S_{max}		Cyclic Stress S_{cyclic}		Contact Stress $0.1S_{\text{max}}$		No. of Load Applications
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	500-1000
1	20.7	3	20.7	3	18.6	2.7	2.1	.3	100
2	20.7	3	41.4	6	37.3	5.4	4.1	.6	100
3	20.7	3	62.1	9	55.9	8.1	6.2	.9	100
4	34.5	5	34.5	5	31.0	4.5	3.5	.5	100
5	34.5	5	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	34.5	5	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
7	68.9	10	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
8	68.9	10	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
9	68.9	10	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
10	103.4	15	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	103.4	15	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
12	103.4	15	206.8	30	186.1	27.0	20.7	3.0	100
13	137.9	20	103.4	15	93.1	13.5	10.3	1.5	100
14	137.9	20	137.9	20	124.1	18.0	13.8	2.0	100
15	137.9	20	275.8	40	248.2	36.0	27.6	4.0	100

Σε κάθε κύκλο φόρτισης, οι μετατροπείς ελατηρίου (LVDTs) μετρούν τις ελαστικές παραμορφώσεις οι οποίες αποστέλλονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κλειστού κυκλώματος. Ταυτόχρονα, υπολογίζονται τα μέτρα επανάκτησης και εξάγονται σαν αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων (εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων (Uzan, 1985)

Οι τιμές των μέτρων επανάκτησης σε κάθε κύκλο, προκύπτουν από τον μέσο όρο των πέντε τελευταίων επαναλήψεων, ενώ η ολοκλήρωση του πειράματος επιτυγχάνεται στο στάδιο εκείνο που παρουσιάζεται παραμόρφωση μεγαλύτερη του 5%.

4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το εργαστηριακό πείραμα που πραγματοποιήθηκε πάνω σε επιλεγμένα ελληνικά υλικά, τα οποία αποσπάστηκαν από δύο διαφορετικά λατομεία και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτοκινητοδρόμων. Το πείραμα υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Οδοποιΐας του ΕΜΠ.

4.2 Ορισμοί

Πριν την αναλυτική περιγραφή του πειράματος, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί η επεξήγηση των συμβολισμών και εξισώσεων που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο καταγραφής μετρήσεων της δοκιμής τριαξονικής κυψέλης, για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και του M_R κατά AASHTO T307-99 (2007).

Τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά της βάσης-υπόβασης, περιέχουν μίγματα από αδρανή και ακατέργαστα υλικά, τα οποία ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα υλικά Τύπου 1, και τα υλικά Τύπου 2. Συγκεκριμένα, τα πρώτα συμπεριλαμβάνουν όλα τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά βάσης-υπόβασης και όλα τα ακατέργαστα υλικά στρώσης έδρασης εκ των οποίων λιγότερο από 70% διέρχονται από το κόσκινο Νο 10, λιγότερο από 20% από το κόσκινο Νο 200 και έχουν δείκτη πλαστιμότητας μικρότερο του 10 ($PI < 10$).

Η διάρκεια φόρτισης στην τριαξονική δοκιμή είναι το χρονικό διάστημα όπου το δοκίμιο υπόκειται στον παλμό της κυκλικής φόρτισης. Η χρονική διάρκεια ενός κύκλου, αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε διαδοχικές εφαρμογές της κυκλικής τάσης.

Το μέγιστο εφαρμοζόμενο αξονικό φορτίο (P_{max}) είναι το φορτίο που εφαρμόζεται στο δείγμα, αποτελούμενο από το φορτίο επαφής και το κυκλικό φορτίο.

$$P_{max} = P_{contact} + P_{cyclic} \quad (4.1)$$

Το φορτίο επαφής ($P_{contact}$), είναι το κάθετο φορτίο που αναπτύσσεται στο δοκίμιο για τη διατήρηση της επαφής ανάμεσα στο έμβολο φόρτισης και στο καπάκι του δοκιμίου. Το φορτίο επαφής περιλαμβάνει το βάρος από το καπάκι και το στατικό φορτίο που εφαρμόζεται στο έμβολο του συστήματος.

Το κυκλικό αξονικό φορτίο (P_{cyclic}), αντιστοιχεί στο επαναλαμβανόμενο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο.

$$P_{cyclic} = P_{max} - P_{contact} \quad (4.2)$$

Η μέγιστη αξονική τάση (S_{max}) που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, αποτελείται από την τάση επαφής και την κυκλική τάση.

$$S_{max} = \frac{P_{max}}{A} \quad (4.3)$$

όπου:

A =εμβαδόν διατομής του δείγματος

Η κυκλική (ελαστική) αξονική τάση S_{cyclic} ισούται με:

$$S_{cyclic} = \frac{P_{cyclic}}{A} \quad (4.4)$$

Η τάση επαφής $S_{contact}$ είναι η αξονική τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο για να διατηρηθεί η επαφή ανάμεσα στο καπάκι του δοκιμίου και το ίδιο το δοκίμιο.

$$S_{contact} = \frac{P_{contact}}{A} \quad (4.5)$$

$$S_{contact} = 0.1S_{max} \quad (4.6)$$

όπου:

S_3 : η πλευρική τάση που αναπτύσσεται μέσα στον τριαξονικό θάλαμο πίεσης και είναι η μικρότερη κύρια τάση

e_r : η επανακτήσιμη αξονική παραμόρφωση λόγω του S_{cyclic}

ε_r : η επανακτήσιμη αξονική οριζόντια παραμόρφωση λόγω του S_{cyclic}

$$\varepsilon_r = \frac{e_r}{L} \quad (4.7)$$

όπου:

L η απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης της ελαστικής αξονικής παραμόρφωσης e_r

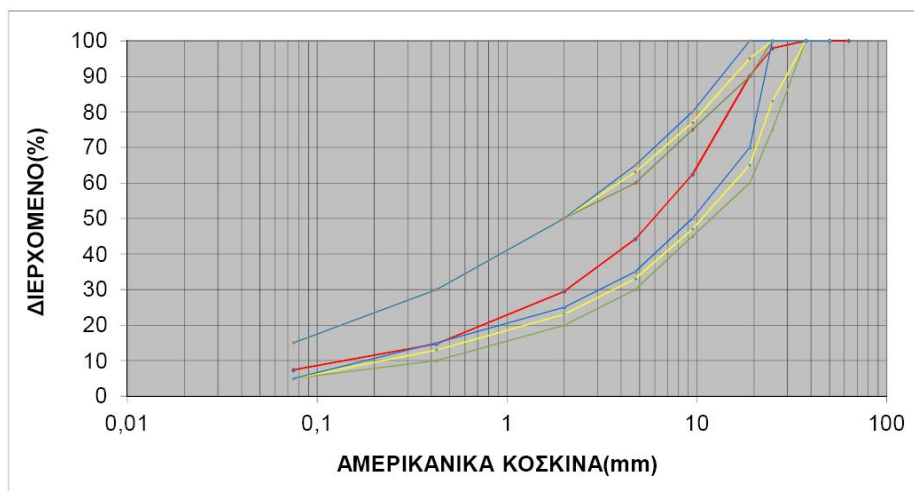
Τέλος, το μέτρο επανάκτησης ορίζεται ως εξής:

$$M_R = \frac{S_{cyclic}}{\varepsilon_r} \quad (4.8)$$

4.3 Χαρακτηριστικά υλικών

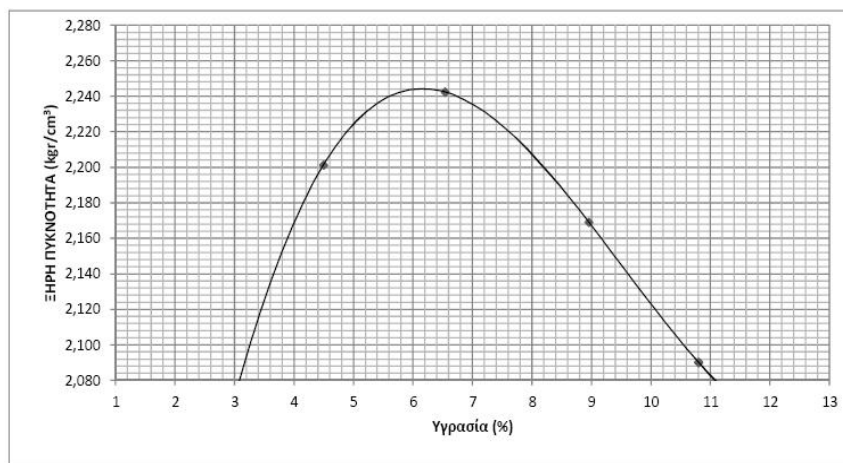
Όπως προαναφέρθηκε, για τη διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς ασύνδετων υλικών (αμμοχαλίκων), χρησιμοποιήθηκαν υλικά από δύο διαφορετικά λατομεία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ξεχωριστά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά για τα δύο υπό διερεύνηση υλικά.

4.3.1 Υλικό 1



Εικόνα 4.1: Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού 1

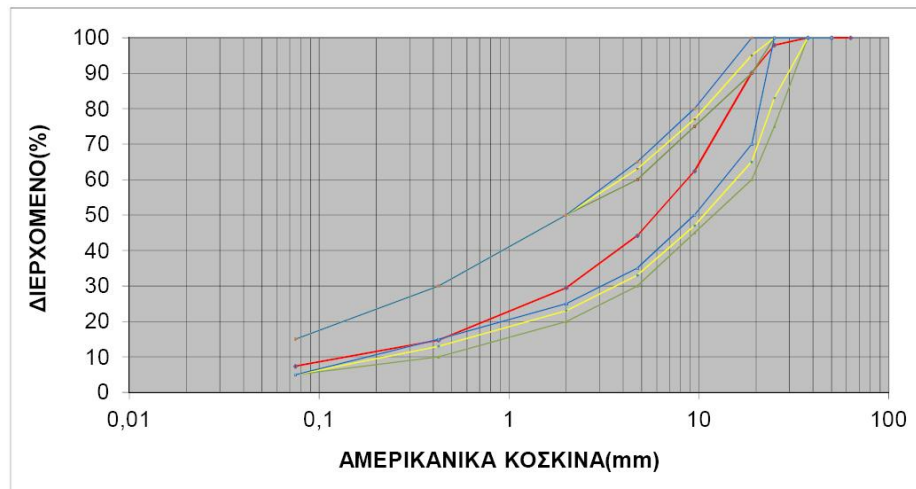
Από την καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης (εικόνα 4.1), προκύπτει ότι το υλικό 1 είναι καλά διαβαθμισμένο. Αυτό σημαίνει ότι οι λεπτοί κόκκοι εισχωρούν στα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων, με αποτέλεσμα το έδαφος να αναπτύσσει αντοχή στη διάβρωση, να μπορεί να συμπυκνώνεται καλά και να παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην παραμόρφωση.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-υγρασίας για το υλικό 1

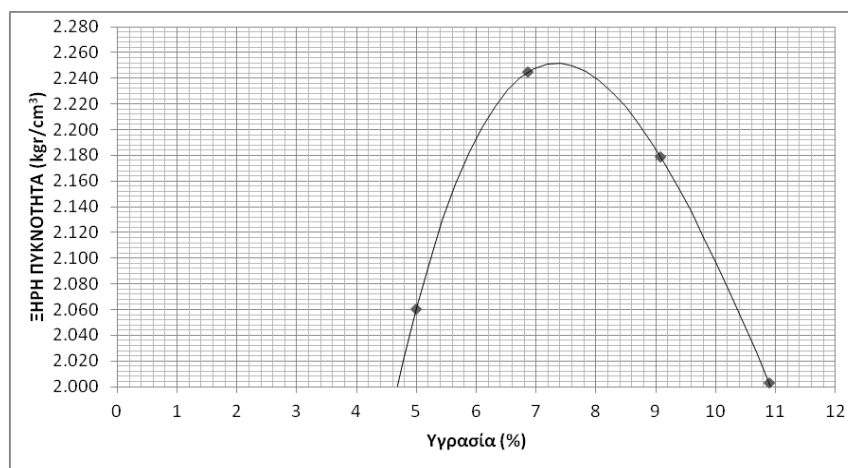
Το υλικό 1 έδωσε μέσο όρο 1.3%, ενώ η δοκιμή Proctor έδωσε βέλτιστη υγρασία 6.2% για μέγιστη ξηρή πυκνότητα 2245kg/m³ (εικόνα 4.2).

4.3.2 Υλικό 2



Εικόνα 4.3: Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικού 2

Ομοίως με το υλικό 1, από την καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης (εικόνα 4.3), προκύπτει ότι το υλικό 2 είναι καλά διαβαθμισμένο και παρουσιάζει αντοχή στην παραμόρφωση.



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα ξηρής πυκνότητας-υγρασίας για το υλικό 2

Για το υλικό 2 προέκυψε φυσική υγρασία 2.1% και η δοκιμή Proctor έδωσε βέλτιστη υγρασία 7.3% για μέγιστη ξηρή πυκνότητα 2252 kg/m^3 (εικόνα 4.4).

4.4 Επεξεργασία υλικού και συμπίκνωση

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, έγινε η παρασκευή των δοκιμών προς συμπίκνωση:

Το **υλικό 1**, είχε ξηρό βάρος $w_s = 13910$ gr και τοποθετήθηκε σε ταψί βάρους $w_t = 2920$ gr. Στη συνέχεια, προστέθηκε το νερό που υπολογίστηκε με βάση τη βέλτιστη υγρασία: $w_{\text{νερού}} = (6,2\%) * 13910 = 862$ gr.

Το **υλικό 2**, είχε ξηρό βάρος $w_s = 13910$ gr και τοποθετήθηκε σε ταψί βάρους $w_t = 2920$ gr. Στη συνέχεια, προστέθηκε το νερό που υπολογίστηκε με βάση τη βέλτιστη υγρασία: $w_{\text{νερού}} = (7,3\%) * 13910 = 1015$ gr.

Ακολούθησε η ανάμειξη του κάθε υλικού με το νερό με αργό ρυθμό, και προέκυψε ένα ομοιόμορφο μίγμα συνολικού βάρους: $w_{\text{ολ}} = w_{\text{νερού}} + w_{\text{υλικού}} = 14772$ gr για το **υλικό 1**, και $w_{\text{ολ}} = 14925$ gr για το **υλικό 2**. Η μάζα αυτή τοποθετήθηκε σε πλαστική σακούλα, όπου και παρέμεινε για 48 ώρες πριν την έναρξη της διαδικασίας της συμπίκνωσης (εικόνα 4.5 α,β).



Εικόνα 4.5(α): Ανάμειξη υλικού με νερό

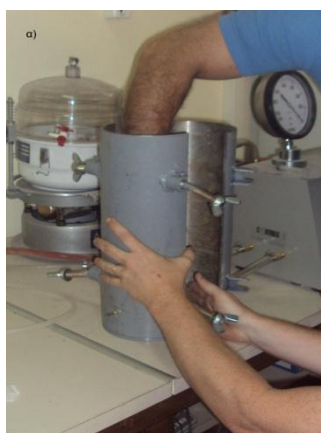


Εικόνα 4.5(β): Τοποθέτηση υλικού σε πλαστική σακούλα

Το κάθε δοκίμιο, για να μπορέσει να υποβληθεί στη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, πρέπει να έχει κάποιες συγκεκριμένες διαστάσεις, τις οποίες ορίζει το πρότυπο AASHTO. Στην περίπτωση των υλικών βάσης-υπόβασης, το πρότυπο προτείνει ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο να είναι περίπου $h/d=2,1$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για τα προς εξέταση υλικά, επιλέχθηκαν οι εξής διαστάσεις: ύψος

$h=30,5\text{cm}$ και διάμετρος $d=15,08\text{cm}$, οι οποίες διασφαλίστηκαν μέσα από τη διαδικασία της συμπίκνωσης.

Το μεταλλικό καλούπι στο οποίο εισάγονται τα υλικά για να συμπτυκνωθούν (εικόνα 4.6α), πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένο, ώστε να μην υπάρξουν φθορές ή απώλειες υγρασίας κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης, και το δοκίμιο να αποκτήσει το σχήμα που επιβάλλεται για την τριαξονική δοκιμή. Αυτό επετεύχθη με μία σειρά ενεργειών, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια και σχηματικά.



Εικόνα 4.6(α): Καλούπι εισαγωγής δοκιμίου



Εικόνα 4.6(β): Μembrάνη προστασίας δοκιμίου

Αρχικά τοποθετήθηκε στη βάση του μία πορώδης πλάκα, πάνω στην οποία προσαρμόστηκε και επεκτάθηκε ως το άλλο άκρο μία μεμβράνη (εικόνα 4.6β). Η μεμβράνη αυτή σφραγίστηκε στο κάτω άκρο με δακτύλιο και κολλήθηκε στο άνω άκρο του καλουπιού με ειδικές ταινίες. Στη συνέχεια, με πλαστικό σωληνάκι αφαιρέθηκε ο αέρας που ενδεχομένως είχε εγκλωβιστεί κατά την εφαρμογή της μεμβράνης στο καλούπι, και με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώθηκαν οι προεργασίες για τη συμπίκνωση, η οποία ακολουθεί παρακάτω.

Με βάση τον κανονισμό, οι προεπιλεγμένες διαστάσεις των δοκιμίων είναι αυτές που καθορίζουν τον αριθμό των στρώσεων που θα γίνει η συμπίκνωση και στην περίπτωση του ελληνικού αμμοχάλικου που εξετάζεται, οι στρώσεις είναι έξι. Έτσι, η κάθε δόση υλικού η οποία υπολογίστηκε να είναι περίπου 2500 gr, ζυγίστηκε σε ένα δοχείο βάρους $w_{\text{δοχείου}}=586\text{ gr}$ και στη συνέχεια εισήχθη στο καλούπι, το οποίο είχε τοποθετηθεί στη συσκευή δόνησης (εικόνα 4.7α,β)



Εικόνα 4.7(α): Εισαγωγή δόσεων υλικού

Εικόνα 4.7(β): Συμπύκνωση υλικού

Μετά την ολοκλήρωση της συμπύκνωσης, ελέγχθηκε εάν το άνω άκρο των δοκιμίων είναι (όσο το δυνατόν) παράλληλο με την πορώδη πλάκα (δηλ. οριζόντιο), καθώς σε αντίθετη περίπτωση, δε θα μπορούσε να ασκηθεί καθαρή κατακόρυφη φόρτιση, με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν διατμητικές τάσεις κατά τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης.

Έτσι, προέκυψε το συμπυκνωμένο δοκίμιο για κάθε υλικό, το οποίο υποβάλλεται στη δοκιμή και έχει τη μορφή της εικόνας 4.8.

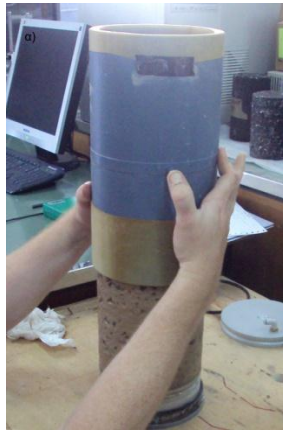


Εικόνα 4.8: Συμπυκνωμένο δοκίμιο

4.5 Πραγματοποίηση δοκιμής τριαξονικής κυψέλης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, μετά τη συμπύκνωση του υλικού, ακολουθεί μία σειρά ενεργειών, που προετοιμάζουν το δοκίμιο για τη δοκιμή.

Προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα που μπορεί να προκάλεσε η τραυματισμένη μεμβράνη από τη συμπύκνωση και στα δύο υλικά, αυτή αντικαταστάθηκε με μία νέα. Η αλλαγή της μεμβράνης, έγινε με τη βοήθεια ενός πλαστικού κυλινδρικού σωλήνα (εικόνα 4.9α), και μετά την άρτια εφαρμογή της στο δοκίμιο, σφραγίστηκε στις δύο πορώδεις πλάκες με δακτύλιους και τοποθετήθηκε στην κυψέλη (εικόνα 4.9β).



Εικόνα 4.9(α): Αλλαγή μεμβράνης



Εικόνα 4.9(β): Τοποθέτηση δοκιμίου στην κυψέλη

Αυτό αποτέλεσε και το τελικό στάδιο επεξεργασίας, καθώς στη συνέχεια, η κυψέλη σφραγίστηκε, και εισήχθη στη συσκευή για την έναρξη της δοκιμής (εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Θάλαμος τριαξονικής συμπίεσης

Ο πίνακας των φορτίσεων που πραγματοποιήθηκαν στη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης και για τα δύο υλικά, καθώς και ο πίνακας επεξήγησης των συμβολισμών, παρατίθενται στους αντίστοιχους πίνακες ΠΙ1, ΠΙ2, ΠΙ3 του Παραρτήματος ΠΙ.

Όπως φαίνεται από τους πίνακες του Παραρτήματος Ι, παρατηρείται η μεταβολή του M_R κατά την επιβολή των διαφόρων συνδυασμών τάσεων, κάτι το οποίο καταδεικνύει τη μη γραμμική συμπεριφορά των υπό εξέταση υλικών. Σκοπός πλέον, είναι να διερευνηθεί εάν η μηχανική συμπεριφορά του ελληνικού αμμοχάλικου είναι ικανή να περιγραφεί από τα μη γραμμικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς. Η διερεύνηση αυτή πραγματοποιείται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Γενικά

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκαν ορισμένα από τα πρότυπα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 (πίνακας 5.1), με σκοπό να ελεγχθεί η προσαρμογή του κάθε προτύπου ξεχωριστά στα υπό διερεύνηση υλικά.

Πίνακας 5.1: Πίνακας προτύπων

Ερευνητές	Πρότυπα
kθ model by Seed et al (1962), Brown and Pell (1967), Hicks and Monismith (1971)	$M_R = k_1 \theta^{k_2}$
Dunlap and Monismith model (1967)	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$
May and Witczak model (1981)	$M_R = k_1 p_0 (\theta / p_0)^{k_2} (\sigma_d / p_0)^{k_3}$
Uzan model (1985)	$M_R = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3}$
Universal model (1992) by Uzan	$M_R = k_1 p_0 (\theta / p_0)^{k_2} (\tau_{oct} / p_0)^{k_3}$
Shackel model (1973)	$M_R = k_1 [\tau_{oct}^{k_2} / \sigma_{oct}^{k_3}]$
Pezo (1993), Garg and Thompson (1997) model	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2} \sigma_3^{k_3}$
Tam and Brown model (1988)	$M_R = [k_1 (\theta/3) / \sigma_d]^{k_2}$
Modified Universal model (2002) by M-E Design Guide	$M_R = k_1 p_0 (\theta / p_0)^{k_2} [(\tau_{oct} / p_0) + 1]^{k_3}$

Τα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης των εργαστηριακών δεδομένων είναι:

- Προσδιορισμός του M_R και των εντατικών μεγεθών από τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης.
- Προσδιορισμός των μη γραμμικών παραμέτρων k_1 , k_2 , k_3 .

- Προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων στα πρότυπα.
- Πραγματοποίηση στατιστικών ελέγχων αξιολόγησης (R^2 , Se/Sy , έλεγχος καλής προσαρμογής).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση των εργαστηριακών δεδομένων και οι σχετικοί στατιστικοί έλεγχοι, πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό SPSS.

5.2 Στατιστικοί έλεγχοι

5.2.1 Αξιολόγηση προτύπων με R^2 και Se/Sy

Μία από τις μεθόδους αξιολόγησης είναι ο συντελεστής συσχέτισης R^2 , ο οποίος προκύπτει από τη σχεδίαση διαγραμμάτων που συσχετίζουν τα M_R των προτύπων με τον αντίστοιχο συνδυασμό τάσεων, και από τον προσδιορισμό των μη γραμμικών παραμέτρων. Όσο πιο κοντά είναι το R^2 στο 1, τόσο καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται. Ωστόσο, ο συντελεστής συσχέτισης είναι κατάλληλος για να αξιολογεί κυρίως γραμμικά πρότυπα και τα αποτελέσματά του μπορεί να μην είναι αξιόπιστα στην περίπτωση μη γραμμικής συμπεριφοράς. Για να γίνει επομένως μία πιο εκτεταμένη έρευνα, πραγματοποιείται ακόμη μία μέθοδος αξιολόγησης των προτύπων με τον όρο Se/Sy . Ο όρος αυτός είναι ο λόγος της τυπικής απόκλισης του σφάλματος εκτιμήσεως Se ανάμεσα στο μέτρο επανάκτησης M_R που προκύπτει από τα πρότυπα, και στο μέτρο επανάκτησης M_R που προκύπτει από τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, και εκφράζει την πιθανότητα σφάλματος στην πρόβλεψή μας, προς την τυπική απόκλιση του δείγματος της δοκιμής Sy . Εν αντιθέσει με τον συντελεστή συσχέτισης R^2 , ο λόγος Se/Sy υποδεικνύει καλή εφαρμογή όταν είναι μικρός και κυρίως όταν είναι κοντά στο μηδέν.

5.2.2 Έλεγχος καλής προσαρμογής

Η αξιολόγηση των προτύπων με τον συντελεστή συσχέτισης R^2 και τον λόγο Se/Sy , μπορεί να είναι σημαντική αλλά δεν είναι πάντα αξιόπιστη. Για να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα των προτύπων, πραγματοποιείται μία ακόμη στατιστική ανάλυση, η οποία μπορεί να καθορίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία τα πρότυπα που μπορούν να εφαρμοστούν. Η ανάλυση αυτή γίνεται με

τον έλεγχο καλής προσαρμογής (Goodness of fit tests), σύμφωνα με τον οποίο ερευνάται αν ένα τυχαίο δείγμα ακολουθεί μία γνωστή κατανομή.

Στην τρέχουσα διπλωματική, θα ελεγχθεί εάν τα αναπτυχθέντα πρότυπα, όπως προέκυψαν από τη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης και από τη διαδικασία παλινδρόμησης, ακολουθούν την κανονική κατανομή (έλεγχος κανονικότητας). Ο έλεγχος κανονικότητας γίνεται σε τρία στάδια:

- Αρχικά, κατασκευάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων. Από το διάγραμμα αυτό μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή αν έχει σχήμα 'καμπάνας'. Ωστόσο, το ιστόγραμμα δεν είναι ικανό από μόνο του να απαντήσει στην ερώτηση αν τα δεδομένα κατανέμονται κανονικά. Για το λόγο αυτό ακολουθεί το επόμενο βήμα.
- Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα γραφήματα P-P (Probability-Probability) και Q-Q (Quantile-Quantile), τα οποία βοηθούν να ελεγχθεί αν τα δεδομένα προέρχονται από την κανονική κατανομή. Τα γραφήματα αυτά βασίζονται στην ακόλουθη παρατήρηση:

Αν $X_1, X_2, \dots, X_n$ είναι ένα τυχαίο δείγμα (ανεξ. τ.μ.) από μία (συνεχή) κατανομή με σ.κ. F τότε οι νέες τ.μ. $Y_1=F(X_1), Y_2=F(X_2), \dots, Y_n=F(X_n)$ είναι και αυτές ανεξάρτητες και ακολουθούν την ομοιόμορφη $U(0,1)$ κατανομή διότι

$$(F(x) \leq X) = P(X \leq F^{-1}(x)) = F(F^{-1}(x)) = x, \forall x \in [0,1] \quad (5.1)$$

Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι αν $Y_1, Y_2, \dots, Y_n \sim U(0,1)$ τότε κάθε μία από τις διατεταγμένες τ.μ. $Y_{(1)}, Y_{(2)}, \dots, Y_{(n)}$ ακολουθεί την κατανομή βήτα και συγκεκριμένα $Y_{(i)} \sim \text{Beta}(i, n-1+1)$ με $E(Y_{(i)})=i/(n+1)$. Επομένως για μεγάλο n θα ισχύει προσεγγιστικά ότι για $i=1,2,\dots,n$

$$Y_{(i)} = F(X_{(i)}) \approx \frac{i}{n+1} \quad ; \text{ή ισοδύναμα} \quad X_{(i)} = F^{-1}\left(\frac{i}{n+1}\right) \quad (5.2)$$

Με άλλα λόγια, αν $X_i \sim F_0$ περιμένουμε ότι τα n σημεία του επιπέδου

$$\left(F_0(X_{(i)}), \frac{i}{n+1}\right), i = 1, 2, \dots, n \quad (5.3)$$

ή ισοδύναμα τα n σημεία του επιπέδου

$$(X_{(i)}, F_0^{-1}(\frac{i}{n+1})), i = 1, 2, \dots, n \quad (5.4)$$

θα βρίσκονται 'κοντά' στη διαγώνιο ($x=y$) που περνά από την αρχή των αξόνων. Το P-P plot ακριβώς είναι το γράφημα των πρώτων σημείων (μαζί με τη διαγώνιο), ενώ το Q-Q plot είναι το γράφημα των δεύτερων n σημείων (μαζί με τη διαγώνιο). Και στα δύο γραφήματα, αν τα σημεία βρίσκονται 'κοντά' στη διαγώνιο, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι τα δεδομένα προέρχονται από την F_0 , και ακολουθούν κανονική κατανομή.

- Το τελευταίο βήμα και πιο καθοριστικό, είναι ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov (K-S), ο οποίος ενδείκνυται σε πληθυσμούς μεγαλύτερους των 50, κάτι το οποίο ταιριάζει στην ανάλυση της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη δοκιμή για το πρώτο υλικό είναι 75, και για το δεύτερο 70. Ο έλεγχος αυτός, ο οποίος υπάγεται σε μία ευρύτερη οικογένεια ελέγχων, βασίζεται σε δύο υποθέσεις: τη μηδενική υπόθεση (H_0) που λέει ότι η κατανομή δε διαφέρει από την κανονική, και την εναλλακτική (H_1) που λέει ότι η κατανομή διαφέρει από την κανονική. Για τη διεξαγωγή των ελέγχων υποθέσεων, χρησιμοποιούνται κάποιοι μαθηματικοί τύποι, που καλούνται ελεγχουσυναρτήσεις. Με βάση το αποτέλεσμα τους, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται ή όχι. Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίζεται ίσο με 5%. Το παρατηρηθέν επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίζεται ως η πιθανότητα η τιμή του ελέγχου (ελεγχουσυνάρτησης) να πάρει μια τιμή τόσο ακραία ή περισσότερο ακραία από αυτή που πήρε στο συγκεκριμένο δείγμα κάτω από τη μηδενική υπόθεση. Αν η p-value είναι μικρότερη του 0.05, τότε λέμε ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται, διαφορετικά γίνεται δεκτή.

Πιο συγκεκριμένα: το κριτήριο K-S χρησιμοποιείται για έλεγχο καλής προσαρμογής ενός τυχαίου δείγματος σε μία δεδομένη συνεχή κατανομή ($H_0: X_i \sim F_0$). Βασίζεται στη διαφορά της εμπειρικής συνάρτησης κατανομής (που προέρχεται από το δείγμα) και της αναμενόμενης F_0 (υπό την H_0). Πιο

συγκεκριμένα, αν $X_1, X_2, \dots, X_n$ είναι ένα τ.δ., η εμπειρική συνάρτηση κατανομής (Ε.Σ.Κ.) του δείγματος αυτού είναι:

$$\hat{F}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x) = \frac{\#(X_i \leq x)}{n}, \quad (5.5)$$

η οποία αποτελεί εκτίμηση της συνάρτησης κατανομής των X_i διότι:

$$\begin{aligned} \hat{F}_n(x) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(X_i \leq x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \rightarrow E(Y_1) = 0 P(Y_1 = 0) + 1 P(Y_1 = 1) = \\ P(Y_1 = 1) &= P(X_1 \leq x) = F(x), \forall x \in R \end{aligned} \quad (5.6)$$

Επομένως, υπό την H_0 η Ε.Σ.Κ. θα πρέπει να είναι 'κοντά' στην F_0 . Αντίθετα, αν δεν ισχύει η H_0 , αναμένουμε σημαντική απόκλιση της Ε.Κ.Σ. υπό την F_0 . Για να κατασκευάσουμε έναν έλεγχο με βάση αυτόν τον συλλογισμό, θα πρέπει να ορίσουμε μία 'απόσταση' μεταξύ των δύο κατανομών και να απορρίπτουμε την H_0 όταν αυτή η απόσταση γίνεται 'μεγάλη'. Πάνω σε αυτό ορίζεται:

Αν F, G είναι δύο συναρτήσεις κατανομής στον R , τότε η ποσότητα

$$d_K(F, G) = \sup \{|F(x) - G(x)|\} \quad (5.7)$$

καλείται απόσταση Kolmogorov-Smirnov μεταξύ της F και της G . Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα απορρίπτεται η $H_0: X_i \sim F$, όταν η στατιστική συνάρτηση:

$$D_n = d_K(\hat{F}_n, F_0) = \sup \{|\hat{F}_n(x) - F_0(x)|\}, \quad (5.8)$$

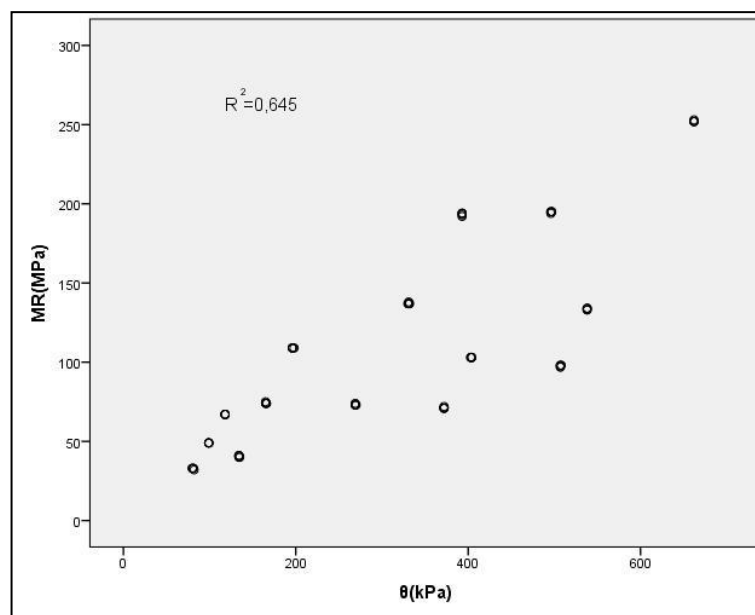
λαμβάνει 'ασυνήθιστα' μεγάλες τιμές, δηλαδή όταν $D_n > c$. Το κριτήριο αυτό είναι γνωστό ως κριτήριο Kolmogorov-Smirnov.

Το πρόγραμμα, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν όλοι οι παραπάνω έλεγχοι, εμφανίζει τις τιμές των παρατηρηθέντων επιπέδων στατιστικής σημαντικότητας και τις ονομάζει Asymptotic Significances (Asymp Sig). Σε περίπτωση που η τιμή των Asym. Sig. είναι μεγαλύτερη από 0,05, το πρότυπο υποδηλώνει καλή προσαρμογή, διαφορετικά κρίνεται ακατάλληλο.

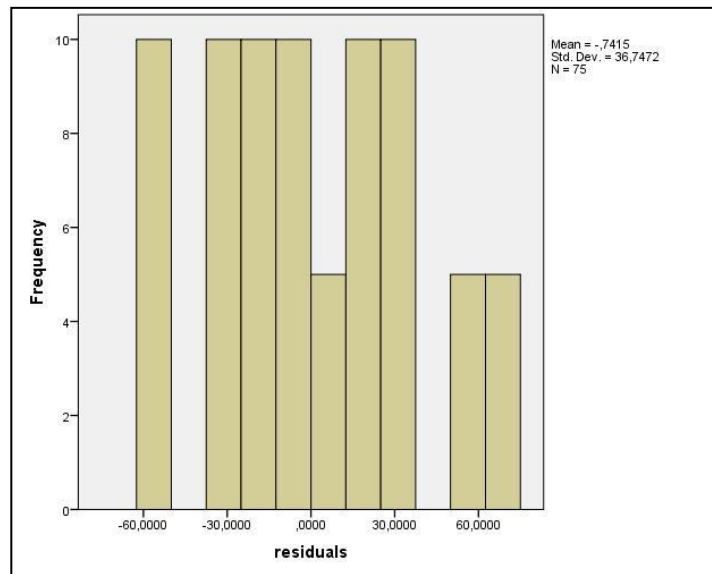
5.2.3 Εφαρμογή

Δεδομένου ότι το πρότυπο $k\theta$ είναι ευρέως γνωστό και θεωρείται 'πρότυπο αναφορά' για τα υπόλοιπα, δίνεται ως χαρακτηριστικό παράδειγμα για την προσαρμογή του στα υπό εξέταση υλικά. Έτσι, αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης του M_R με την ογκομετρική τάση θ για το υλικό 1, καθώς και ο συντελεστής συσχέτισης R^2 που προκύπτει (εικόνα 5.1). Στη συνέχεια παρατίθενται το ιστόγραμμα συχνοτήτων (εικόνα 5.2) και τα γραφήματα P-P και Q-Q (εικόνα 5.3, 5.4), και τέλος δίνεται ο πίνακας αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης Kolmogorov-Smirnov (πίνακας 5.2). Η ίδια διαδικασία ακολουθείται στη συνέχεια και για το υλικό 2.

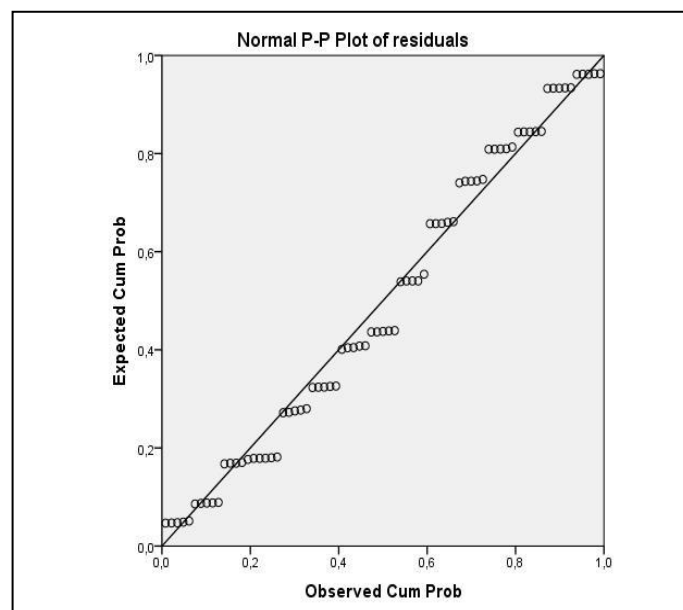
Υλικό 1



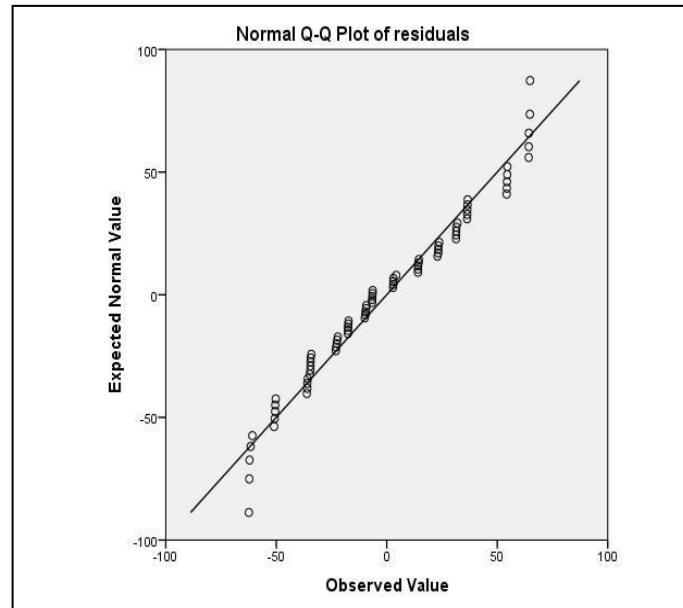
Εικόνα 5.1: Ανάπτυξη προτύπου $k\theta$



Εικόνα 5.2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου $k\theta$



Εικόνα 5.3: Γράφημα P-P για το πρότυπο $k\theta$



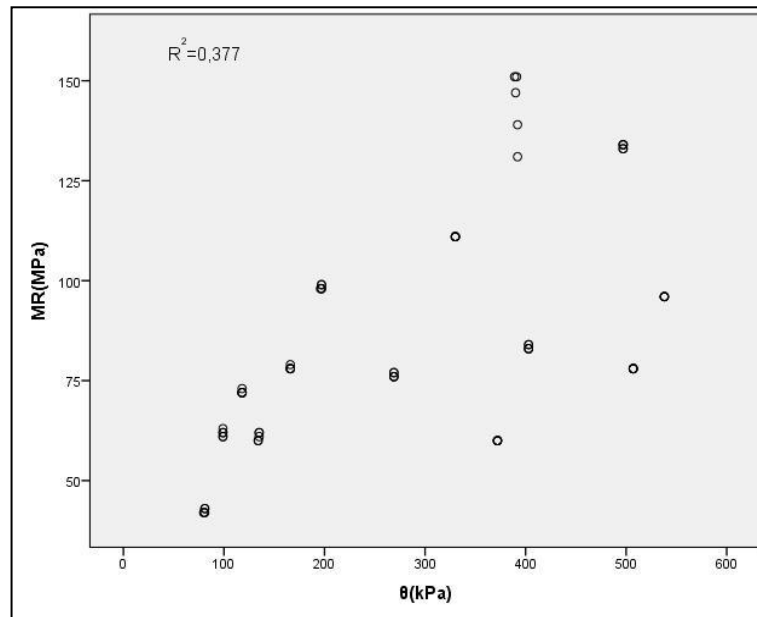
Εικόνα 5.4: Γράφημα Q-Q για το πρότυπο $k\theta$

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για το πρότυπο $k\theta$

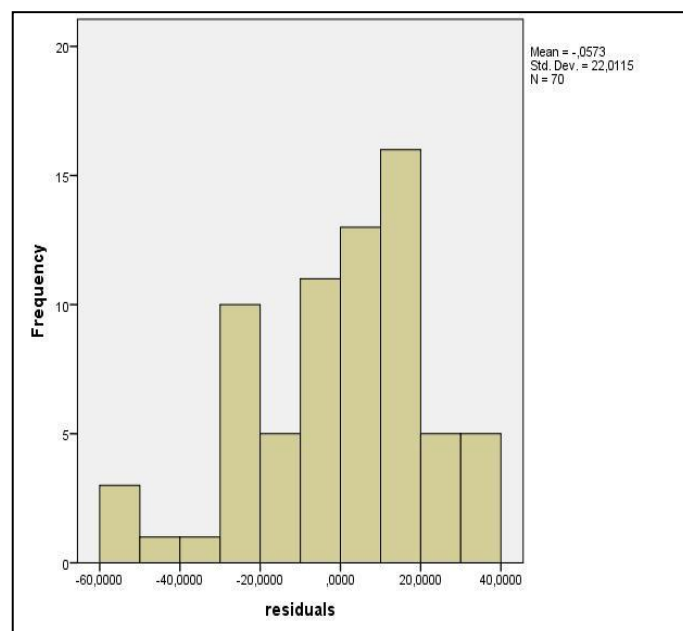
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,741501
	Τυπική Απόκλιση		36,7471960
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,094
	Αρνητικές		-,075
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας (Asymp.Sig)			,519
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,479
	95%	Άνω	,498

Ο συντελεστής συσχέτισης όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1 ($R^2=0,645$) δεν είναι πολύ ικανοποιητικός. Επίσης, από το ιστόγραμμα δεν προκύπτει κανονική κατανομή, ωστόσο από τα διαγράμματα P-P, Q-Q και από τη στατιστική ανάλυση που δίνει Asymp. Sig=0,519 ($>0,05$) φαίνεται να υπάρχει καλή προσαρμογή.

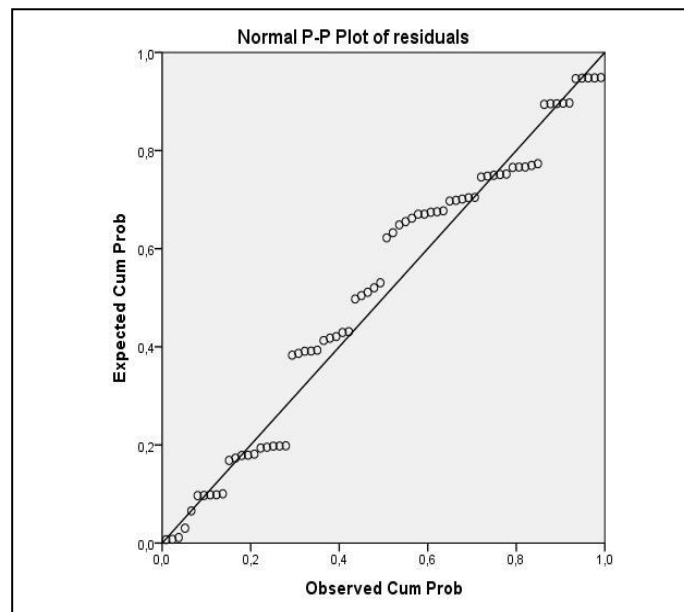
Υλικό 2



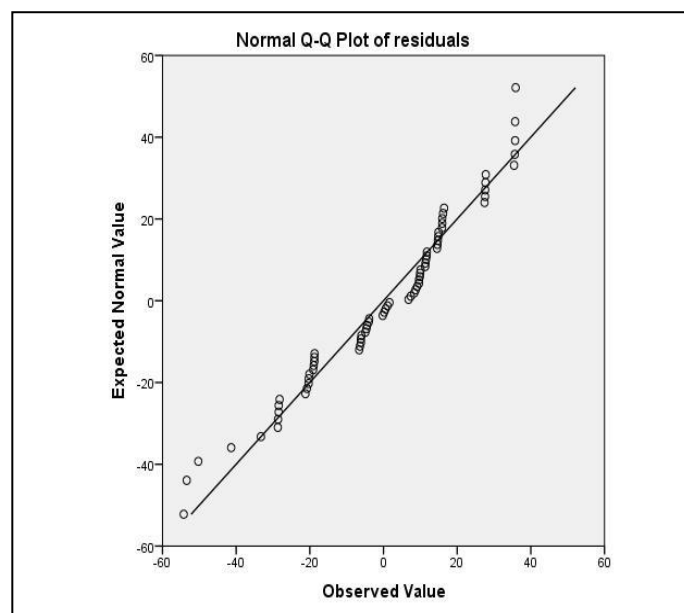
Εικόνα 5.5: Ανάπτυξη προτύπου $k\theta$



Εικόνα 5.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου $k\theta$



Εικόνα 5.7: Γράφημα P-P για το πρότυπο $k\theta$



Εικόνα 5.8: Γράφημα Q-Q για το πρότυπο $k\theta$

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης για το πρότυπο kθ

Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,057348
	Τυπική Απόκλιση		22,0115022
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,087
	Αρνητικές		-,122
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας (Asymp. Sig)			,247
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,217
	95%	Άνω Όριο	,233

Ο συντελεστής συσχέτισης όπως προκύπτει από την εικόνα 5.5 ($R^2=0,377$) είναι αρκετά χαμηλός. Παρόλα αυτά, τόσο το ιστόγραμμα, όσο και η στατιστική ανάλυση υποδεικνύουν πολύ καλή προσαρμογή, καθώς το πρώτο προσεγγίζει γραφικά την κανονική κατανομή, και οι τιμές στατιστικής σημαντικότητας (Asymp. Sig.) είναι $0,247 > 0,05$.

Τα αποτελέσματα των στατιστικών αναλύσεων για όλα τα πρότυπα περιλαμβάνονται στο παράρτημα II, το οποίο στις εικόνες ΠII.1-ΠII.64 συμπεριλαμβάνει τα διαγράμματα συσχέτισης, τα ιστογράμματα συχνοτήτων, και τα γραφήματα P-P και Q-Q, ενώ στους πίνακες ΠII.1-ΠII.16 τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Kolmogorov-Smirnov.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλα τα πρότυπα τα αποτελέσματα των στατιστικών αναλύσεων. Συγκεκριμένα, στους πίνακες 5.4 και 5.5 παρατίθενται οι τιμές των μη γραμμικών παραμέτρων k_1 , k_2 , k_3 , και τα αποτελέσματα της στατιστικής αξιολόγησης (R^2 , Se/Sy , Asymp.Sig) για το δοκίμιο 1, και στους πίνακες 5.6 και 5.7 για το δοκίμιο 2.

Πίνακας 5.4: Τιμές μη γραμμικών παραμέτρων για το υλικό 1

Πρότυπα		Μη γραμμικές παράμετροι	
	k_1	k_2	k_3
May and Witzak (1981)	1.199	-0.058	0.928
Uzan	2.186	-0.058	0.928
Pezo(1993), Garg and Thompson (1997)	1.999	0.908	-0.037
Shackel (1973)	4.129	0.928	0.058
Universal (1992)	2.417	-0.058	0.928
Modified Universal (2002)	0.395	0.07	2.303
$k\theta$ (1962)	0.999	0.817	-
Dunlap and Monismith (1967)	11.598	0.533	-
Tam and Brown (1988)	111.98	-0.63	-

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης για το υλικό 1

Πρότυπα	R²	Se/Sy	Asymp. Sig.
May and Witczak (1981)	0.998	0.04	0.020
Uzan (1985)	0.998	0.04	0.014
Pezo(1993), Garg and Thompson (1997)	0.998	0.04	0.026
Shackel (1973)	0.998	0.04	0.014
Universal (1992)	0.998	0.04	0.023
Modified Universal (2002)	0.976	0.15	0.292
kθ (1962)	0.645	0.6	0.519
Dunlap and Monismith (1967)	0.396	0.78	0.034
Tam and Brown (1988)	0.148	0.93	0.166

Πίνακας 5.6: Τιμές μη γραμμικών παραμέτρων για το υλικό 2

Πρότυπα		Μη γραμμικές παράμετροι	
	k_1	k_2	k_3
May and Witzak (1981)	1.252	-0.238	0.712
Uzan	14.118	-0.238	0.712
Pezo(1993), Garg and Thompson (1997)	10.081	0.635	-0.160
Shackel (1973)	18.558	0.712	0.238
Universal (1992)	2.144	-0.238	0.712
Modified Universal (2002)	0.457	-0.129	2.115
$k\theta$ (1962)	14.23	0.322	-
Dunlap and Monismith (1967)	89.018	-0.488	-
Tam and Brown (1988)	38.346	0.197	-

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης για το υλικό 2

Πρότυπα	R²	Se/Sy	Asymp. Sig.
May and Witczak (1981)	0.968	0.18	0.109
Uzan (1985)	0.968	0.18	0.106
Pezo(1993), Garg and Thompson (1997)	0.968	0.18	0.415
Shackel (1973)	0.968	0.18	0.108
Universal (1992)	0.968	0.18	0.106
Modified Universal (2002)	0.947	0.24	0.171
kθ (1962)	0.377	0.8	0.247
Dunlap and Monismith (1967)	0.275	0.86	0.038
Tam and Brown (1988)	0.184	0.91	0.240

Όπως είναι φανερό, τα πρότυπα που δείχνουν να έχουν σχεδόν άριστη εφαρμογή με βάση τον συντελεστή συσχέτισης R^2 και τον λόγο Se/Sy και για τα δύο υλικά, είναι των May και Witczak, Uzan, Pezo, Garg και Thompson, Shackel και το πρότυπο Universal, καθώς ο πρώτος είναι κοντά στη μονάδα και ο δεύτερος κοντά στο μηδέν. Αντιθέτως, τα πρότυπα που έχουν τα χειρότερα αποτελέσματα είναι τα Tam και Brown και Dunlap και Monismith.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά στον έλεγχο καλής προσαρμογής, στο υλικό 1, τα πρότυπα που δείχνουν να προσαρμόζονται καλά είναι το Modified Universal, το $k\theta$, και το Tam και Brown τα οποία έχουν $Asymp.Sig>0.05$. Ωστόσο, στο υλικό 2, όλα τα πρότυπα πλην του Dunlap και Monismith, εξάγουν εξίσου καλά αποτελέσματα.

5.3 Συσχέτιση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση που έχουν τα πρότυπα μεταξύ τους και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζονται από τις τάσεις που εμπεριέχουν, πραγματοποιήθηκε συσχέτιση των M_R τους. Έτσι, στον πίνακα 5.8 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης R^2 για όλους τους συνδυασμούς προτύπων. Επειδή τα αποτελέσματα προέκυψαν πανομοιότυπα και για τα δύο υλικά, παρουσιάζονται μόνο μία φορά στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.8: Συσχέτιση αποτελεσμάτων M_R

Πρότυπα	Uzan	Modified Universal	Universal	Shackel	Tam and Brown	Pezo,Garg and Thompson	May and Witczak	Dunlap and Monismith	$k\theta$
Uzan	—	0.97	1	1	0.15	1	1	0.4	0.66
Modified Universal	0.97	—	0.97	0.97	0.11	0.97	0.97	0.4	0.65
Universal	1	0.97	—	1	0.15	1	1	1	0.66
Shackel	1	0.97	1	—	0.15	1	1	0.4	0.66

Πίνακας 5.8 (συνέχεια)

<i>Πρότυπα</i>	Uzan	Modified Universal	Universal	Shackel	Tam and Brown	Pezo,Garg and Thompson	May and Witczak	Dunlap and Monismith	kθ
Tam and Brown	0.16	0.11	0.15	0.15	—	0.15	0.15	0.16	0.03
Pezo,Garg and Thompson	1	0.97	1	1	0.15	—	1	0.4	0.66
May and Witczak	1	0.97	1	1	0.15	1	—	0.4	0.66
Dunlap and Monismith	0.4	0.4	1	0.4	0.16	0.4	0.4	—	0.93
kθ	0.66	0.65	0.66	0.66	0.03	0.66	0.66	0.93	—

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει, είναι ότι τα περισσότερα πρότυπα που παρουσίασαν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ τους, όπως πχ το Modified Universal με το Uzan ($R^2=0,97$), περιέχουν τον συνδυασμό της ογκομετρικής τάσης θ , και της αποκλίνουσας τάσης σ_d . Αντιθέτως, όσα αποτελούνται από την πλευρική τάση σ_3 , και συσχετίστηκαν με τα υπόλοιπα, δεν έδωσαν καλά αποτελέσματα, όπως το Dunlap and Monismith με Uzan ($R^2=0,4$). Ωστόσο, πιο αναλυτικά συμπεράσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

6. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών οδοστρώσας που χρησιμοποιούνται σε έργα Οδοποιίας στην Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα των ασύνδετων υλικών βάσης-υπόβασης.

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τη μη γραμμική ανάλυση των υλικών, ήταν κατά βάση πειραματική. Αρχικά, αξιολογήθηκαν και επιλέγησαν πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών. Εν συνεχεία, δύο δείγματα υλικού, με παρεμφερή τεχνικά χαρακτηριστικά (κοκκομετρική διαβάθμιση, βέλτιστη υγρασία), υποβλήθηκαν στη δοκιμή τριαξονικής κυψέλης, με σκοπό να διερευνηθεί πάνω σε αυτά η προσαρμογή των επιλεχθέντων προτύπων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, και εξήχθησαν τα αποτελέσματα προσαρμογής για το κάθε πρότυπο ξεχωριστά. Έτσι, τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Από την ανάλυση παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε, τα πρότυπα που παρουσίασαν το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης R^2 είναι τα εξής: May and Witczak, Uzan, Pezo, Garg και Thompson, Shackel, Universal και Modified Universal. Στο πρώτο υλικό ο συντελεστής συσχέτισης για όλα τα παραπάνω πρότυπα κυμαίνεται στο 0,99, ενώ στο δεύτερο υλικό κυμαίνεται στο 0,95. Αντίστοιχα ήταν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την άλλη μέθοδο αξιολόγησης, με βάση τον λόγο Se/Sy , ο οποίος προέκυψε περίπου 0,04 για το πρώτο υλικό και 0,18 για το δεύτερο. Αντιθέτως, ακατάλληλο κρίθηκε και για τα δύο υλικά το πρότυπο Tam και Brown, καθώς στην πρώτη δοκιμή ο συντελεστής συσχέτισης και ο λόγος Se/Sy ήταν 0,148 και 0,93 αντίστοιχα, ενώ στη δεύτερη 0,184 και 0,91.
- Συγκρίνοντας τις μη γραμμικές παραμέτρους των προτύπων (k_1 , k_2 , k_3) που προέκυψαν στα δύο υλικά, παρατηρείται ότι μόνο το υλικό 2 προσεγγίζει το εύρος τιμών των μη γραμμικών παραμέτρων που δίνουν τα αντίστοιχα διεθνή πρότυπα. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό 2 είχε μεγαλύτερη ξηρή πυκνότητα από το υλικό 1, και πραγματοποιήθηκε καλύτερη

συμπύκνωση, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για να εξακριβωθεί αυτό το συμπέρασμα.

- Ο έλεγχος καλής προσαρμογής για το πρώτο υλικό έδωσε καλά αποτελέσματα στα πρότυπα: kθ, Tam και Brown, και Modified Universal. Στο δεύτερο υλικό, όλα τα πρότυπα δείχνουν να προσαρμόζονται ικανοποιητικά, εκτός από το Dunlap και Monismith. Συγκεντρωτικά, και στις δύο περιπτώσεις, το καταλληλότερο πρότυπο δείχνει να είναι το kθ, ενώ το Dunlap και Monismith δίνει τα χειρότερα αποτελέσματα.
- Συνολικά, το πρότυπο που εμφανίζει εξίσου καλά αποτελέσματα και στα δύο υλικά, με βάση όλους τους τρόπους αξιολόγησης και στατιστικής ανάλυσης, είναι το Modified Universal. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, ότι το πρότυπο kθ, το οποίο είναι πρότυπο 'αναφορά', στο πρώτο κομμάτι της στατιστικής ανάλυσης (R^2 , Se/Sy) δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ στον έλεγχο καλής προσαρμογής δείχνει να είναι από τα καταλληλότερα πρότυπα.
- Μία επιπλέον παρατήρηση που μπορεί να γίνει, και προκύπτει τόσο από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, όσο και από τη συσχέτιση των προτύπων που πραγματοποιήθηκε, είναι ότι τα πρότυπα που μπορούν να περιγράψουν τη μη γραμμική συμπεριφορά των υπό εξέταση υλικών, είναι αυτά που συμπεριλαμβάνουν τον συνδυασμό της ογκομετρικής (θ), της αποκλίνουσας (σ_d), και κάποιες φορές, της πλευρικής τάσης (σ_3), ενώ παρατηρείται ότι η πλευρική τάση σ_3 από μόνη της, κάνει τα πρότυπα που την περιέχουν ακατάλληλα για προσαρμογή.

Συνοψίζοντας, στα πλαίσια της εργασίας αυτής, κατά τη διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών οδοστρωσίας που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, μπορούμε να πούμε ότι βρέθηκαν ορισμένα πρότυπα τα οποία ενδεχομένως μπορούν να την περιγράψουν. Ωστόσο, λόγω του μικρού δείγματος, δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως ασφαλή τα συμπεράσματα αυτά. Παρόλα αυτά, σε εκτενέστερη διερεύνηση μέσω της πραγματοποίησης περισσότερων δοκιμών, εάν προκύψουν τα ίδια αποτελέσματα, θα μπορούσε να αξιολογηθεί η πρακτική αξία των προτύπων που έδωσαν ικανοποιητική προσαρμογή. Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που έδωσε η μη γραμμική ανάλυση στη συγκεκριμένη εργασία, αφορούν σε ασύνδετα υλικά εύκαμπτων οδοστρωμάτων, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι

η μη γραμμική συμπεριφορά που παρουσιάζουν εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO T307-99, 2007. *Laboratory Determination of Moisture of Soils*. American Association of the State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T307-99, 2007. *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of the State Highway and Transportation Officials.

Al-Suhaibani A.S. and Al-Refeai T.O., 2003. *Characteristics of Subgrade Soils*. Emirates Journal for Engineering Research, 8(1), 41-44.

Araya A.A., 2011. *Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements*. Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geoscience, Delft University of Technology.

Araya A.A., Huurman M., Houben L.G.M. and Molenaar A.A., 2011. *Characterizing Mechanical Behavior of Unbound Granular Material for Pavements*. In Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington.

Araya A.A., Molenaar A. and Houben L., 2009. *Characterization of Unbound Granular Materials Using Repeated Load CBR and Triaxial Testing*. Geotechnical International Conference 2010, Shanghai, China.

Boyce H.R., 1980. *A non-linear model for the elastic behavior of granular materials under repeated loading*. In proceedings of International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, 285-294.

Brown S.F., 1974. *Repeated Load Testing of a Granular Material*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 100(7), 825-841.

Duncan J. M. and Chang J.C., 1970. *Nonlinear analysis of stress-strain in soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96(5), 1629-1653.

Flintsch W.G., Al-Qadi I.L., Park Y., Brandon T.L. and Appea A., 2003. *Relationship Between Backcalculated and Laboratory-Measured Resilient Moduli of Unbound*

Materials. In proceedings of the Transportation Research Board 82th Annual Meeting, Washington D.C.

Frost M. W., Fleming P.R. and Rogers C.D.F., 2004. *Cyclic triaxial tests on clay subgrades for analytical pavement design*. Journal of Transportation Engineering, 130(3), 378-386.

Garg N. and Thompson M.R., 1997. *Triaxial Characterization of Minnesota Road Research Project Granular Materials*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1577, 27-36.

Gonzalez A., Saleh M. and Ali A., 2007. *Evaluating Nonlinear Elastic Models for Unbound Granular Materials in Accelerated Testing Facility*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1990, 141-149.

Hicks R.G. and Monismith C.L., 1971. *Factors influencing the resilient properties of granular material*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 345, 15-31.

K.P. George, 2004. *Prediction of Resilient Modulus from soil index properties*. Report, Department of Civil Engineering, The University of Mississippi.

Kumar P., Chandra S. and Vishal R., 2006. *Comparative study of different subbase materials*. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(4), 576-580.

Li T. and Baus R.L., 2005. *Nonlinear parameters for granular base materials from plate tests*. Journal of Transportation Engineering, 131(7), 907-913.

Nazarian S., Rojas J., Pezo R., Yuan D., Abdallah I. and Scullion T., 1998. *Relating Laboratory and Field Moduli of Texas Base Materials*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1639, 1-11.

Osei A.A., 2000. *Characterization of Unbound Granular Layer in Flexible Pavements*. Report, Texas A&M University.

Ping W.V. and Ling G., 1997. *Field Verification of Laboratory Resilient Modulus Measurements on Subgrade Soils*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1577, 53-61.

Ping W.V., Yang Z., Liu C. and Dietrich B., 2001. *Measuring Resilient Modulus of Granular Materials in Flexible Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1778, 81-90.

Rada G. and Witczak M.W., 1981. *Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Material*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 810, 23-33.

Schwartz C.W., 2002. *Effect of stress-dependent base layer on the superposition of flexible pavement solutions*. International Journal of Geomechanics, 2(3), 331-352.

Sheng B., 2010. *Evaluation of Granular Subgrade Modulus From Field and Laboratory Tests*. Thesis, Florida State University.

Sung-Hee K., 2004. *Determination of Aggregate Physical Properties and its effect of cross-anisotropic behavior of unbound aggregate materials*. Dissertation, Texas, A&M University.

Tong L. and Baus R.L., 2005. *Nonlinear Parameters for Granular Base Materials from Plate Tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(7), 907-913.

Uzan J., 1985. *Characterization of Granular Material*. Transportation Research Record 1022, 52-59.

Witczak M.W., Qi X., and Mirza M.W., 1995. *Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure*. Journal of Transportation Engineering, 121(3), 273-282.

Λοΐζος Α. *Σημειώσεις Οδοστρωμάτων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Αθήνα, 2012.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Εργαστηριακά αποτελέσματα

Εργαστηριακά αποτελέσματα

Πίνακας ΠΙ1: Πίνακας φορτίσεων ασύνδετου υλικού 1

Confining Stress (σc)	Target max ax.Stress	Cycle No	Actual max load	Actual cyclic load	Actual contact load	Actual max ax. Stress	Actual cyclic Stress (σs)	Actual contact Stress	Recov. Def LVDT1	Recov. Def LVDT2	Average Recov. Deform.	Resilient Strain	Resilient Modulus
kPa	kPa		kN	kN	kN	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	MPa
Sequence No. = 1 Last 5 pulses of 100													
21	20.7	1	0.372	0.332	0.04	20.8	18.6	2.3	0.179742	0.172692	0.176217	0.000578	32.163
20.9	20.7	2	0.373	0.332	0.04	20.9	18.6	2.3	0.174896	0.165784	0.17034	0.000558	33.351
20.8	20.7	3	0.374	0.333	0.04	20.9	18.7	2.3	0.174204	0.167856	0.17103	0.000561	33.256
20.6	20.7	4	0.373	0.333	0.04	20.9	18.7	2.2	0.175358	0.167396	0.171377	0.000562	33.197
20.6	20.7	5	0.373	0.333	0.04	20.9	18.6	2.3	0.175819	0.169008	0.172413	0.000565	33.007
Permanent strain (%) =0.0													
Sequence No. = 2 Last 5 pulses of 100													
20.7	41.4	1	0.74	0.667	0.073	41.4	37.3	4.1	0.24227	0.220585	0.231428	0.000759	49.166
20.7	41.4	2	0.739	0.666	0.073	41.4	37.3	4.1	0.239963	0.220585	0.230274	0.000755	49.411
20.7	41.4	3	0.739	0.666	0.073	41.4	37.3	4.1	0.240425	0.220815	0.23062	0.000756	49.315
20.7	41.4	4	0.74	0.667	0.073	41.4	37.3	4.1	0.240655	0.219664	0.23016	0.000755	49.427
20.7	41.4	5	0.74	0.667	0.074	41.5	37.3	4.1	0.241809	0.220815	0.231312	0.000758	49.236
Permanent strain (%) =0.0													
Sequence No. = 3 Last 5 pulses of 100													
20.7	62.1	1	1.11	0.999	0.11	62.1	56	6.2	0.273419	0.237854	0.255637	0.000838	66.776
20.7	62.1	2	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.273419	0.238545	0.255982	0.000839	66.617
20.7	62.1	3	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272266	0.239926	0.256096	0.00084	66.533
20.7	62.1	4	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272266	0.238545	0.255405	0.000837	66.772
20.7	62.1	5	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272497	0.237394	0.254945	0.000836	66.842
Permanent strain (%) =0.1													

Πίνακας Π11 (συνέχεια)

Sequence No. = 4 Last 5 pulses of 100													
34.6	34.5	1	0.616	0.554	0.063	34.5	31	3.5	0.240194	0.228414	0.234304	0.000768	40.364
34.5	34.5	2	0.616	0.554	0.063	34.5	31	3.5	0.238348	0.226341	0.232345	0.000762	40.676
34.5	34.5	3	0.615	0.553	0.063	34.5	30.9	3.5	0.239732	0.227953	0.233843	0.000767	40.345
34.5	34.5	4	0.615	0.553	0.062	34.5	31	3.5	0.238579	0.226111	0.232345	0.000762	40.64
34.4	34.5	5	0.616	0.553	0.063	34.5	31	3.5	0.239271	0.227032	0.233151	0.000764	40.56
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 5 Last 5 pulses of 100													
34.4	68.9	1	1.232	1.109	0.123	69	62.1	6.9	0.271343	0.235091	0.253217	0.00083	74.815
34.4	68.9	2	1.231	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.271574	0.236472	0.254023	0.000833	74.428
34.4	68.9	3	1.23	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.272266	0.235091	0.253678	0.000832	74.47
34.7	68.9	4	1.232	1.108	0.123	69	62.1	6.9	0.272266	0.236242	0.254254	0.000834	74.409
34.7	68.9	5	1.231	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.271804	0.236242	0.254023	0.000833	74.433
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 6 Last 5 pulses of 100													
34.4	103.4	1	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.295108	0.227262	0.261185	0.000856	108.793
34.4	103.4	2	1.845	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.293493	0.22496	0.259227	0.00085	109.455
34.4	103.4	3	1.847	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.294647	0.22565	0.260149	0.000853	109.185
34.4	103.4	4	1.846	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.294416	0.22565	0.260033	0.000853	109.125
34.8	103.4	5	1.846	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.293263	0.22565	0.259457	0.000851	109.382
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 7 Last 5 pulses of 100													
69.2	68.9	1	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.278034	0.240617	0.259326	0.00085	72.985
69.1	68.9	2	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.277111	0.239236	0.258173	0.000846	73.303
68.9	68.9	3	1.231	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.278034	0.239005	0.25852	0.000848	73.065
68.9	68.9	4	1.23	1.106	0.124	68.9	61.9	6.9	0.276419	0.240157	0.258288	0.000847	73.129
68.9	68.9	5	1.23	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.27665	0.237624	0.257137	0.000843	73.513
Permanent strain (%) =0.1													

Πίνακας ΠΙ1 (συνέχεια)

Sequence No. = 8 Last 5 pulses of 100													
69.2	137.9	1	2.462	2.215	0.247	137.8	124	13.8	0.323027	0.227493	0.27526	0.000902	137.491
69.1	137.9	2	2.463	2.216	0.247	137.9	124.1	13.8	0.323027	0.227032	0.27503	0.000902	137.53
69	137.9	3	2.46	2.214	0.246	137.8	124	13.8	0.32395	0.230025	0.276988	0.000908	136.513
68.9	137.9	4	2.461	2.215	0.246	137.8	124	13.8	0.322796	0.230256	0.276526	0.000907	136.741
68.8	137.9	5	2.463	2.217	0.246	137.9	124.1	13.8	0.324642	0.228414	0.276528	0.000907	136.867
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 9 Last 5 pulses of 100													
69	206.8	1	3.697	3.328	0.37	207	186.3	20.7	0.353946	0.23417	0.294058	0.000964	193.274
69	206.8	2	3.698	3.328	0.37	207	186.3	20.7	0.352792	0.233479	0.293136	0.000961	193.886
69	206.8	3	3.698	3.327	0.37	207	186.3	20.7	0.3521	0.233249	0.292674	0.00096	194.055
68.9	206.8	4	3.695	3.326	0.369	206.9	186.2	20.6	0.354176	0.236012	0.295094	0.000968	192.379
68.8	206.8	5	3.695	3.326	0.37	206.9	186.2	20.7	0.353253	0.233709	0.293481	0.000962	193.55
Permanent strain (%) =0.2													
Sequence No. = 10 Last 5 pulses of 100													
103.3	68.9	1	1.23	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.281957	0.247525	0.264741	0.000868	71.409
103.3	68.9	2	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.282649	0.248446	0.265547	0.000871	71.194
103.3	68.9	3	1.231	1.108	0.123	68.9	62.1	6.9	0.280803	0.247985	0.264394	0.000867	71.572
103.3	68.9	4	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.281726	0.247985	0.264856	0.000868	71.454
103.3	68.9	5	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.28288	0.247755	0.265317	0.00087	71.276
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 11 Last 5 pulses of 100													
103.3	103.4	1	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.306876	0.245452	0.276164	0.000905	102.885
103.3	103.4	2	1.846	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.305491	0.245683	0.275587	0.000904	102.926
103.6	103.4	3	1.846	1.662	0.184	103.4	93.1	10.3	0.304799	0.245222	0.275011	0.000902	103.184
103.6	103.4	4	1.847	1.662	0.184	103.4	93.1	10.3	0.305261	0.245452	0.275357	0.000903	103.074
103.6	103.4	5	1.845	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.306645	0.246373	0.276509	0.000907	102.568
Permanent strain (%) =0.1													

Πίνακας ΠΙ1 (συνέχεια)

Sequence No. = 12 Last 5 pulses of 100													
103.5	206.8	1	3.693	3.324	0.369	206.8	186.1	20.7	0.347024	0.2344	0.290712	0.000953	195.267
103.5	206.8	2	3.693	3.323	0.37	206.7	186	20.7	0.3491	0.236472	0.292786	0.00096	193.798
103.5	206.8	3	3.692	3.323	0.369	206.7	186	20.7	0.348408	0.233249	0.290828	0.000954	195.005
103.5	206.8	4	3.694	3.324	0.37	206.8	186.1	20.7	0.346331	0.23417	0.290251	0.000952	195.468
103.4	206.8	5	3.691	3.322	0.37	206.7	186	20.7	0.348408	0.233019	0.290713	0.000953	195.144
Permanent strain (%) =0.2													
Sequence No. = 13 Last 5 pulses of 100													
137.8	103.4	1	1.848	1.664	0.184	103.5	93.2	10.3	0.322796	0.262261	0.292529	0.000959	97.157
138	103.4	2	1.847	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.322104	0.262261	0.292183	0.000958	97.222
138.2	103.4	3	1.849	1.665	0.184	103.5	93.2	10.3	0.32072	0.260189	0.290454	0.000952	97.942
138	103.4	4	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.32072	0.259959	0.290339	0.000952	97.81
138	103.4	5	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.320258	0.260649	0.290454	0.000952	97.802
Permanent strain (%) =0.2													
Sequence No. = 14 Last 5 pulses of 100													
138	137.9	1	2.464	2.218	0.246	138	124.2	13.8	0.326488	0.239926	0.283207	0.000929	133.684
137.8	137.9	2	2.463	2.216	0.247	137.9	124.1	13.8	0.327411	0.239926	0.283669	0.00093	133.423
137.8	137.9	3	2.464	2.218	0.246	138	124.2	13.8	0.326257	0.241078	0.283668	0.00093	133.511
137.8	137.9	4	2.463	2.217	0.247	137.9	124.1	13.8	0.326257	0.240617	0.283437	0.000929	133.587
137.8	137.9	5	2.463	2.217	0.246	137.9	124.1	13.8	0.327642	0.240387	0.284014	0.000931	133.351
Permanent strain (%) =0.2													
Sequence No. = 15 Last 5 pulses of 100													
137.9	275.8	1	4.924	4.431	0.494	275.7	248.1	27.6	0.362021	0.238084	0.300053	0.000984	252.106
137.9	275.8	2	4.926	4.432	0.493	275.8	248.2	27.6	0.363175	0.237624	0.300399	0.000985	251.942
137.9	275.8	3	4.924	4.431	0.492	275.7	248.1	27.6	0.362944	0.237854	0.300399	0.000985	251.882
138.1	275.8	4	4.922	4.429	0.493	275.6	248	27.6	0.361329	0.237854	0.299592	0.000982	252.52
137.8	275.8	5	4.924	4.431	0.494	275.7	248.1	27.6	0.363406	0.238315	0.30086	0.000986	251.595

Πίνακας ΠΙ2: Πίνακας φορτίσεων ασύνδετου υλικού 2

Confining Stress (σc)	Target max ax.Stress	Cycle No	Actual max load	Actual cyclic load	Actual contact load	Actual max ax. Stress	Actual cyclic Stress (σs)	Actual contact Stress	Recov. Def LVDT1	Recov. Def LVDT2	Average Recov. Deform.	Resilient Strain	Resilient Modulus
kPa	kPa		kN	kN	kN	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm	mm/mm	MPa
Sequence No. = 1 Last 5 pulses of 100													
20.9	20.7	1	0.372	0.332	0.04	20.8	18.6	2.3	0.179742	0.172692	0.176217	0.000578	32.163
20.9	20.7	2	0.373	0.332	0.04	20.9	18.6	2.3	0.174896	0.165784	0.17034	0.000558	33.351
20.7	20.7	3	0.374	0.333	0.04	20.9	18.7	2.3	0.174204	0.167856	0.17103	0.000561	33.256
20.6	20.7	4	0.373	0.333	0.04	20.9	18.7	2.2	0.175358	0.167396	0.171377	0.000562	33.197
20.6	20.7	5	0.373	0.333	0.04	20.9	18.6	2.3	0.175819	0.169008	0.172413	0.000565	33.007
Permanent strain (%) =0.0													
Sequence No. = 2 Last 5 pulses of 100													
20.6	41.4	1	0.74	0.667	0.073	41.4	37.3	4.1	0.24227	0.220585	0.231428	0.000759	49.166
20.6	41.4	2	0.739	0.666	0.073	41.4	37.3	4.1	0.239963	0.220585	0.230274	0.000755	49.411
20.6	41.4	3	0.739	0.666	0.073	41.4	37.3	4.1	0.240425	0.220815	0.23062	0.000756	49.315
20.9	41.4	4	0.74	0.667	0.073	41.4	37.3	4.1	0.240655	0.219664	0.23016	0.000755	49.427
20.9	41.4	5	0.74	0.667	0.074	41.5	37.3	4.1	0.241809	0.220815	0.231312	0.000758	49.236
Permanent strain (%) =0.0													
Sequence No. = 3 Last 5 pulses of 100													
20.6	62.1	1	1.11	0.999	0.11	62.1	56	6.2	0.273419	0.237854	0.255637	0.000838	66.776
20.7	62.1	2	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.273419	0.238545	0.255982	0.000839	66.617
20.7	62.1	3	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272266	0.239926	0.256096	0.00084	66.533
20.7	62.1	4	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272266	0.238545	0.255405	0.000837	66.772
20.7	62.1	5	1.109	0.998	0.111	62.1	55.9	6.2	0.272497	0.237394	0.254945	0.000836	66.842
Permanent strain (%) =0.1													

Πίνακας ΠΙ2 (συνέχεια)

Sequence No. = 4 Last 5 pulses of 100													
34.5	34.5	1	0.616	0.554	0.063	34.5	31	3.5	0.240194	0.228414	0.234304	0.000768	40.364
34.5	34.5	2	0.616	0.554	0.063	34.5	31	3.5	0.238348	0.226341	0.232345	0.000762	40.676
34.5	34.5	3	0.615	0.553	0.063	34.5	30.9	3.5	0.239732	0.227953	0.233843	0.000767	40.345
34.5	34.5	4	0.615	0.553	0.062	34.5	31	3.5	0.238579	0.226111	0.232345	0.000762	40.64
34.5	34.5	5	0.616	0.553	0.063	34.5	31	3.5	0.239271	0.227032	0.233151	0.000764	40.56
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 5 Last 5 pulses of 100													
34.6	68.9	1	1.232	1.109	0.123	69	62.1	6.9	0.271343	0.235091	0.253217	0.00083	74.815
34.4	68.9	2	1.231	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.271574	0.236472	0.254023	0.000833	74.428
34.4	68.9	3	1.23	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.272266	0.235091	0.253678	0.000832	74.47
34.4	68.9	4	1.232	1.108	0.123	69	62.1	6.9	0.272266	0.236242	0.254254	0.000834	74.409
34.4	68.9	5	1.231	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.271804	0.236242	0.254023	0.000833	74.433
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 6 Last 5 pulses of 100													
34.5	103.4	1	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.295108	0.227262	0.261185	0.000856	108.793
34.5	103.4	2	1.845	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.293493	0.22496	0.259227	0.00085	109.455
34.4	103.4	3	1.847	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.294647	0.22565	0.260149	0.000853	109.185
34.4	103.4	4	1.846	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.294416	0.22565	0.260033	0.000853	109.125
34.4	103.4	5	1.846	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.293263	0.22565	0.259457	0.000851	109.382
Permanent strain (%) =0.1													
Sequence No. = 7 Last 5 pulses of 100													
69.1	68.9	1	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.278034	0.240617	0.259326	0.00085	72.985
69.1	68.9	2	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.277111	0.239236	0.258173	0.000846	73.303
69	68.9	3	1.231	1.107	0.124	68.9	62	6.9	0.278034	0.239005	0.25852	0.000848	73.065
69	68.9	4	1.23	1.106	0.124	68.9	61.9	6.9	0.276419	0.240157	0.258288	0.000847	73.129
68.9	68.9	5	1.23	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.27665	0.237624	0.257137	0.000843	73.513
Permanent strain (%) =0.1													

Πίνακας Π12 (συνέχεια)

Sequence No. = 8 Last 5 pulses of 100													
68.8	137.9	1	2.462	2.215	0.247	137.8	124	13.8	0.323027	0.227493	0.27526	0.000902	137.491
69.1	137.9	2	2.463	2.216	0.247	137.9	124.1	13.8	0.323027	0.227032	0.27503	0.000902	137.53
69.1	137.9	3	2.46	2.214	0.246	137.8	124	13.8	0.32395	0.230025	0.276988	0.000908	136.513
69	137.9	4	2.461	2.215	0.246	137.8	124	13.8	0.322796	0.230256	0.276526	0.000907	136.741
68.8	137.9	5	2.463	2.217	0.246	137.9	124.1	13.8	0.324642	0.228414	0.276528	0.000907	136.867
Permanent strain (%) =0.2													
Sequence No. = 9 Last 5 pulses of 100													
68.8	206.8	1	3.697	3.328	0.37	207	186.3	20.7	0.353946	0.23417	0.294058	0.000964	193.274
68.8	206.8	2	3.698	3.328	0.37	207	186.3	20.7	0.352792	0.233479	0.293136	0.000961	193.886
68.8	206.8	3	3.698	3.327	0.37	207	186.3	20.7	0.3521	0.233249	0.292674	0.00096	194.055
69.1	206.8	4	3.695	3.326	0.369	206.9	186.2	20.6	0.354176	0.236012	0.295094	0.000968	192.379
69.1	206.8	5	3.695	3.326	0.37	206.9	186.2	20.7	0.353253	0.233709	0.293481	0.000962	193.55
Permanent strain (%) =0.5													
Sequence No. = 10 Last 5 pulses of 100													
103.5	68.9	1	1.23	1.107	0.123	68.9	62	6.9	0.281957	0.247525	0.264741	0.000868	71.409
103.5	68.9	2	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.282649	0.248446	0.265547	0.000871	71.194
103.4	68.9	3	1.231	1.108	0.123	68.9	62.1	6.9	0.280803	0.247985	0.264394	0.000867	71.572
103.3	68.9	4	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.281726	0.247985	0.264856	0.000868	71.454
103.2	68.9	5	1.231	1.108	0.123	68.9	62	6.9	0.28288	0.247755	0.265317	0.00087	71.276
Permanent strain (%) =0.5													
Sequence No. = 11 Last 5 pulses of 100													
103.4	103.4	1	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.306876	0.245452	0.276164	0.000905	102.885
103.4	103.4	2	1.846	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.305491	0.245683	0.275587	0.000904	102.926
103.4	103.4	3	1.846	1.662	0.184	103.4	93.1	10.3	0.304799	0.245222	0.275011	0.000902	103.184
103.4	103.4	4	1.847	1.662	0.184	103.4	93.1	10.3	0.305261	0.245452	0.275357	0.000903	103.074
103.4	103.4	5	1.845	1.662	0.184	103.3	93	10.3	0.306645	0.246373	0.276509	0.000907	102.568
Permanent strain (%) =0.5													

Πίνακας Π12 (συνέχεια)

Sequence No. = 12 Last 5 pulses of 100													
103.6	206.8	1	3.693	3.324	0.369	206.8	186.1	20.7	0.347024	0.2344	0.290712	0.000953	195.267
103.5	206.8	2	3.693	3.323	0.37	206.7	186	20.7	0.3491	0.236472	0.292786	0.00096	193.798
103.4	206.8	3	3.692	3.323	0.369	206.7	186	20.7	0.348408	0.233249	0.290828	0.000954	195.005
103.3	206.8	4	3.694	3.324	0.37	206.8	186.1	20.7	0.346331	0.23417	0.290251	0.000952	195.468
103.3	206.8	5	3.691	3.322	0.37	206.7	186	20.7	0.348408	0.233019	0.290713	0.000953	195.144
Permanent strain (%) =0.9													
Sequence No. = 13 Last 5 pulses of 100													
138	103.4	1	1.848	1.664	0.184	103.5	93.2	10.3	0.322796	0.262261	0.292529	0.000959	97.157
138	103.4	2	1.847	1.663	0.183	103.4	93.1	10.3	0.322104	0.262261	0.292183	0.000958	97.222
138	103.4	3	1.849	1.665	0.184	103.5	93.2	10.3	0.32072	0.260189	0.290454	0.000952	97.942
137.9	103.4	4	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.32072	0.259959	0.290339	0.000952	97.81
137.8	103.4	5	1.847	1.663	0.184	103.4	93.1	10.3	0.320258	0.260649	0.290454	0.000952	97.802
Permanent strain (%) =1													
Sequence No. = 14 Last 5 pulses of 100													
137.8	137.9	1	2.464	2.218	0.246	138	124.2	13.8	0.326488	0.239926	0.283207	0.000929	133.684
138.1	137.9	2	2.463	2.216	0.247	137.9	124.1	13.8	0.327411	0.239926	0.283669	0.00093	133.423
138	137.9	3	2.464	2.218	0.246	138	124.2	13.8	0.326257	0.241078	0.283668	0.00093	133.511
137.9	137.9	4	2.463	2.217	0.247	137.9	124.1	13.8	0.326257	0.240617	0.283437	0.000929	133.587
137.8	137.9	5	2.463	2.217	0.246	137.9	124.1	13.8	0.327642	0.240387	0.284014	0.000931	133.351
Permanent strain (%) =1.1													

Πίνακας ΠΙ3: Πίνακας επεξήγησης συμβολισμών δοκιμής τριαξονικής κυψέλης

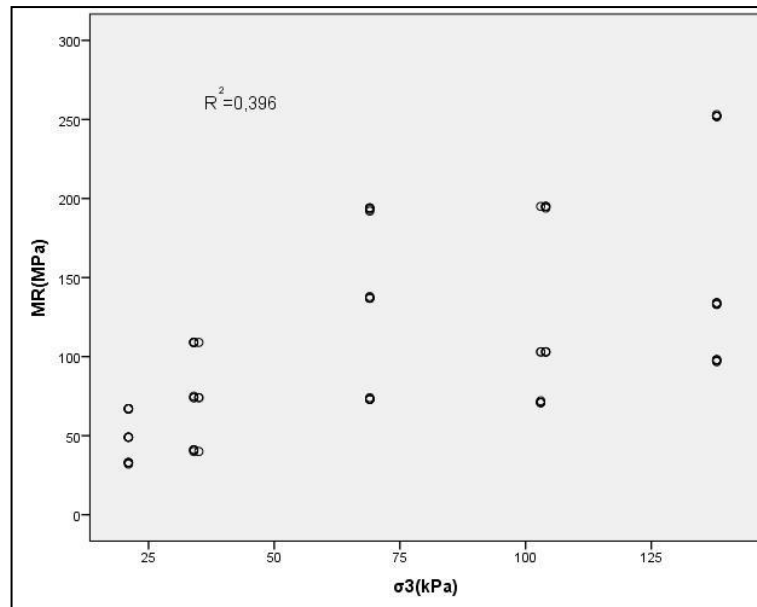
Συμβολισμός	Επεξήγηση
Confining stress σ_c (kPa)	Πλευρική τάση (kPa)
Target max ax. stress (kPa)	Μέγιστη αξονική τάση (kPa)
Cycle No	Κύκλος φόρτισης
Actual max load (kN)	Πραγματικό μέγιστο κατακόρυφο φορτίο (kN)
Actual cyclic load (kN)	Πραγματικό κυκλικό κατακόρυφο φορτίο (kN)
Actual contact load (kN)	Πραγματικό κατακόρυφο φορτίο επαφής (kN)
Actual max ax. stress (kPa)	Πραγματική μέγιστη αξονική τάση (kPa)
Actual cyclic stress (σ_s) (kPa)	Πραγματική κυκλική τάση (kPa)
Actual contact stress (kPa)	Πραγματική τάση επαφής (kPa)
Recovered Def. LVDT1 (mm)	Ελαστική παραμόρφωση από αισθητήρα 1 (mm)
Recovered Def. LVDT2 (mm)	Ελαστική παραμόρφωση από αισθητήρα 2 (mm)
Average Recovered Deformation (mm)	Μέσος όρος παραμορφώσεων (mm)
Resilient strain (mm/mm)	Ελαστική ανηγμένη παραμόρφωση (mm/mm)
Resilient modulus (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
Permanent deformation (%)	Μόνιμες παραμορφώσεις (%)
Sequence No	Σειρά φόρτισης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

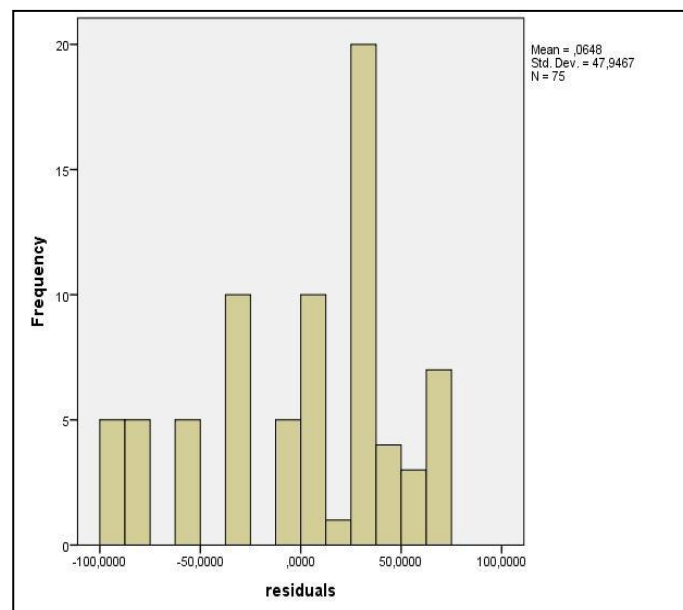
Προσαρμογή προτύπων και στατιστικοί έλεγχοι

Προσαρμογή προτύπων και στατιστικοί έλεγχοι

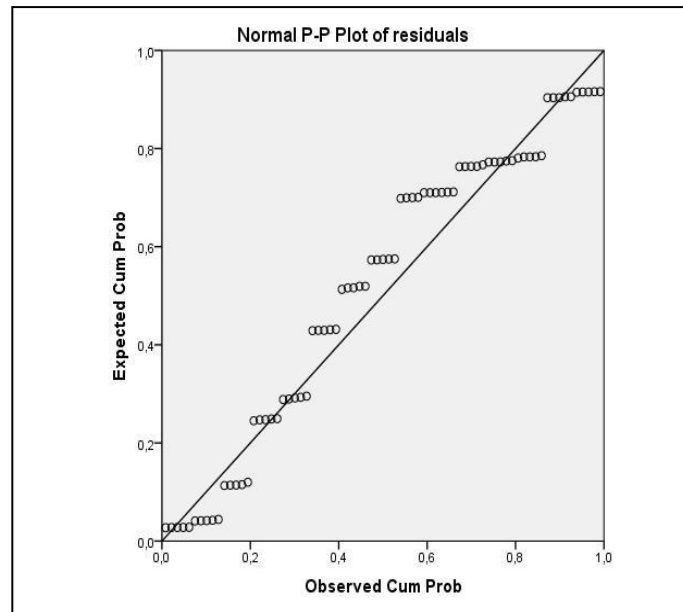
Υλικό (1)



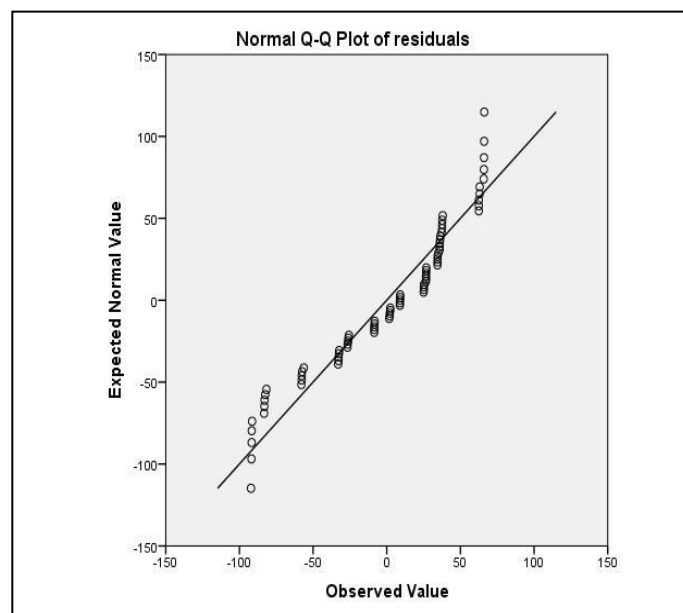
Εικόνα ΠΙΙ.1: Ανάπτυξη προτύπου κατά Dunlap και Monismith για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.2: Ιστογράμμα συχνοτήτων προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 1



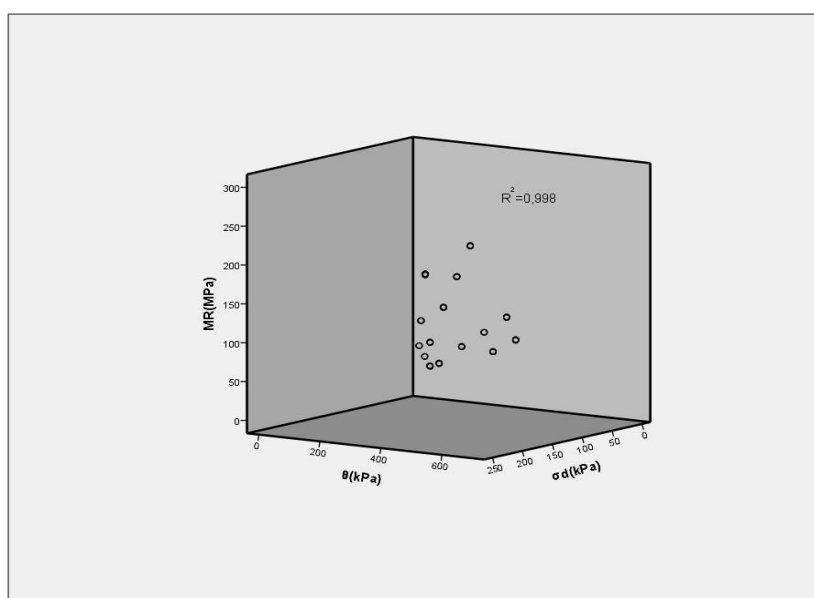
Εικόνα ΠΙΙ.3: Γράφημα P-P προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 1



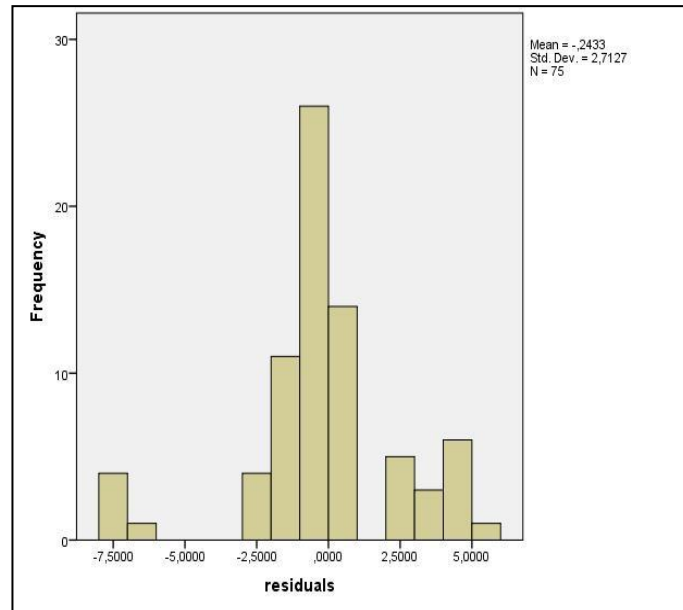
Εικόνα ΠΙΙ.4: Γράφημα Q-Q προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.1: Στατιστική ανάλυση προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 1

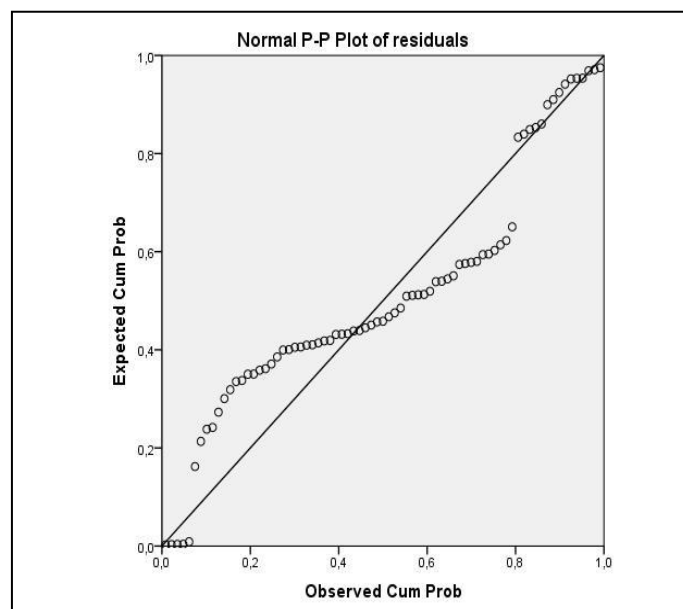
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος Τυπική Απόκλιση		,064780 47,9467094
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές Αρνητικές		,089 -,165
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,034
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης 95%	Κάτω Όριο Άνω Όριο	,024 ,031



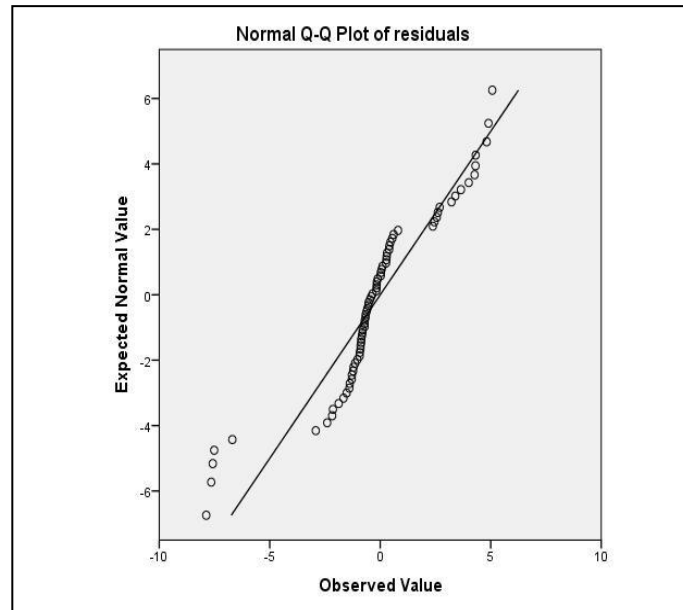
Εικόνα ΠΙΙ.5: Ανάπτυξη προτύπου κατά May και Witczak για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου May and Witczak για το υλικό 1



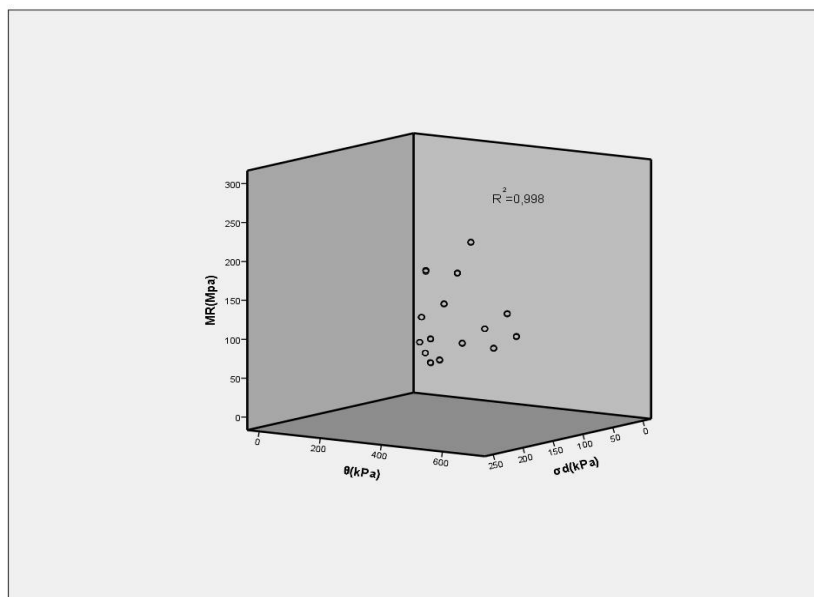
Εικόνα ΠΙΙ.7: Γράφημα P-P προτύπου May και Witczak για το υλικό 1



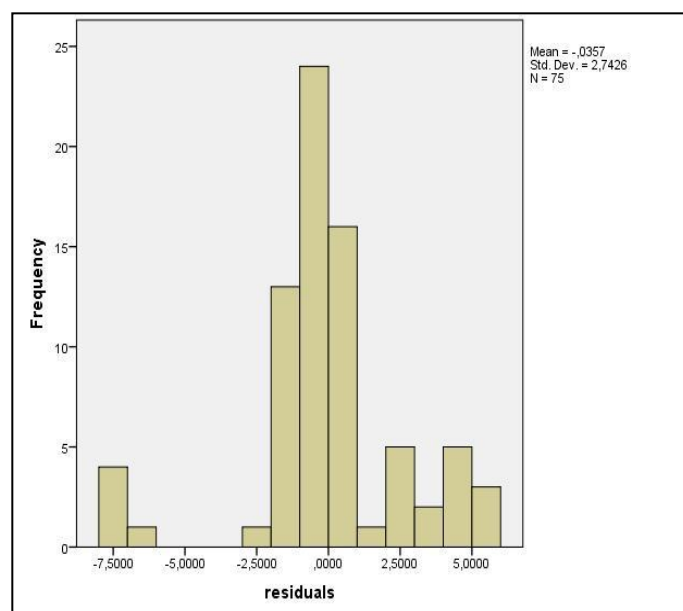
Εικόνα ΠΙΙ.8: Γράφημα Q-Q προτύπου May και Witczak για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.2: Στατιστική ανάλυση προτύπου May και Witczak για το υλικό 1

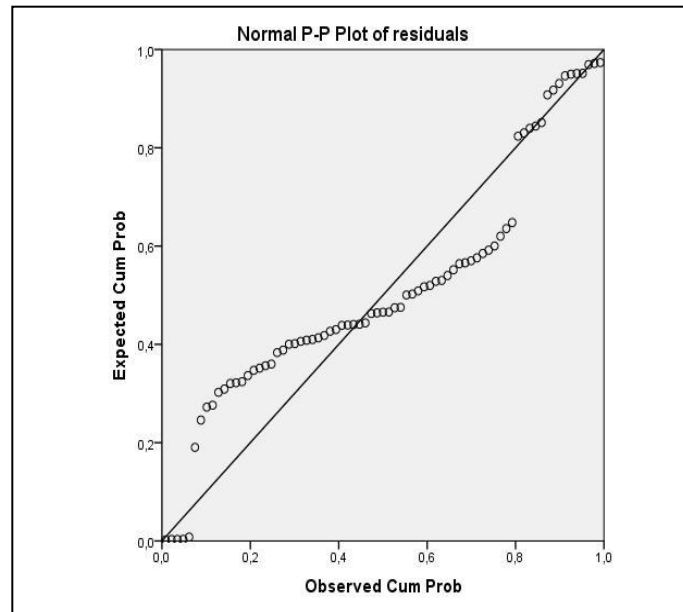
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,243274
	Τυπική Απόκλιση		2,7127359
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,164
	Αρνητικές		-,175
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,020
Τιμές Monte Carlo Sig.	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,014
	95%	Άνω Όριο	,019



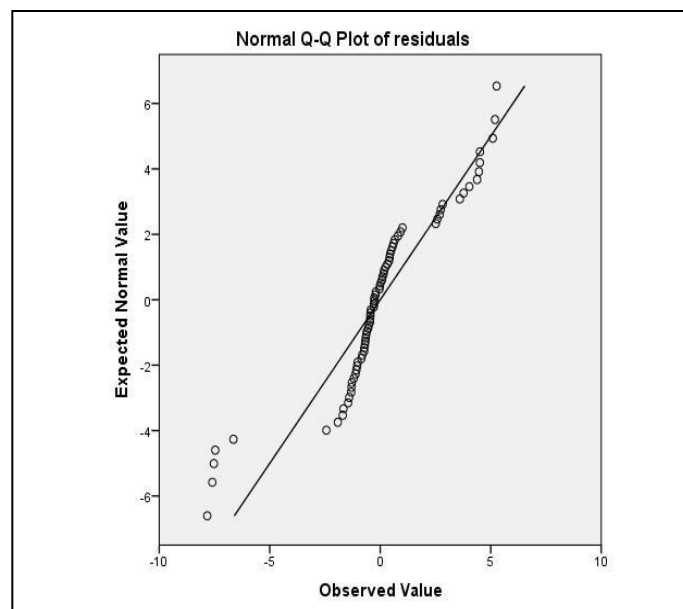
Εικόνα ΠΙΙ.9: Ανάπτυξη προτύπου Uzan για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.10: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Uzan για το υλικό 1



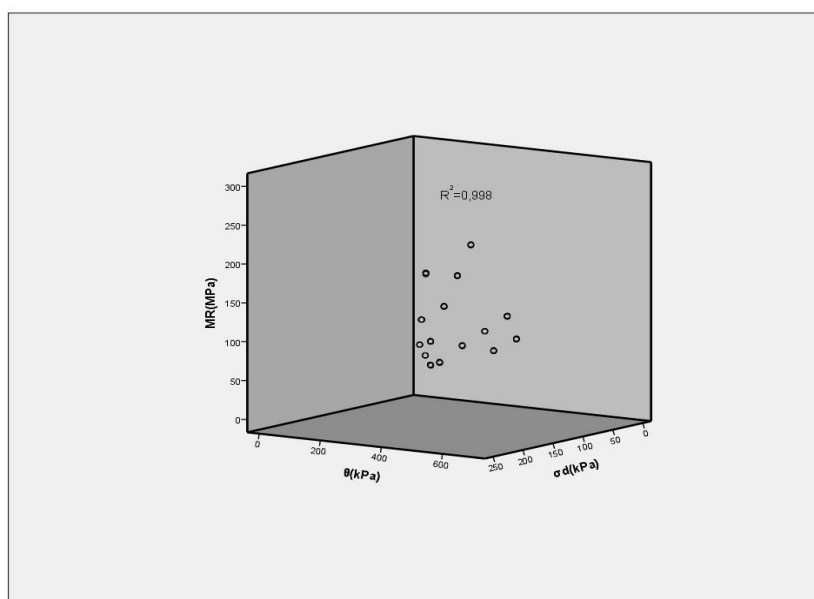
Εικόνα ΠΙΙ.11: Γράφημα P-P προτύπου Uzan για το υλικό 1



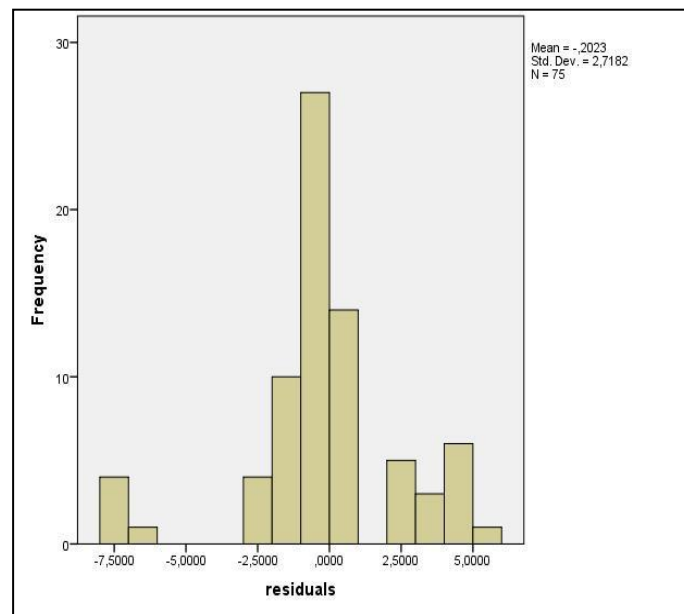
Εικόνα ΠΙΙ.12: Γράφημα Q-Q προτύπου Uzan για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.3: Στατιστική ανάλυση προτύπου Uzan για το υλικό 1

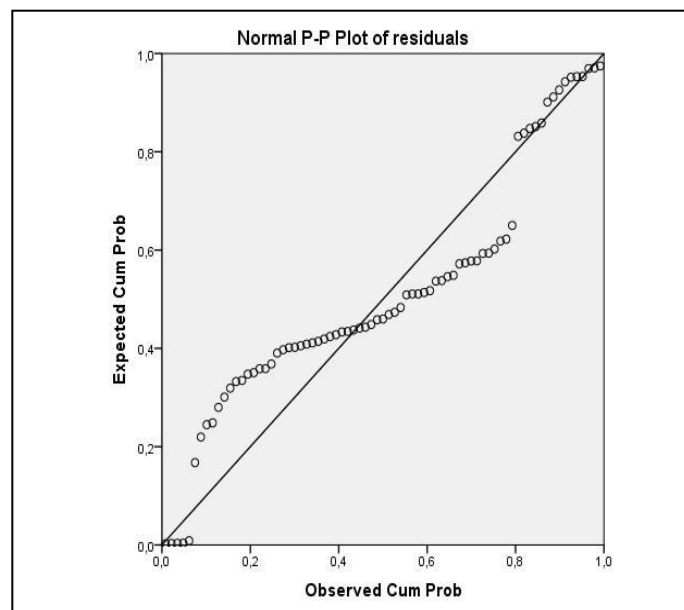
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,035716
	Τυπική Απόκλιση		2,7425660
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,160
	Αρνητικές		-,182
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,014
Τιμές Monte Carlo Sig.	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,007
	95%	Άνω Όριο	,011



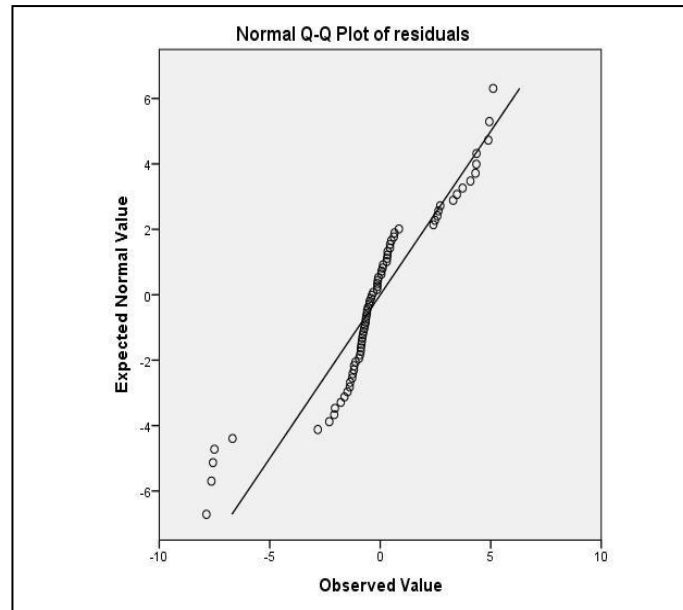
Εικόνα ΠΙΙ.13: Ανάπτυξη προτύπου Universal για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.14: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Universal για το υλικό 1



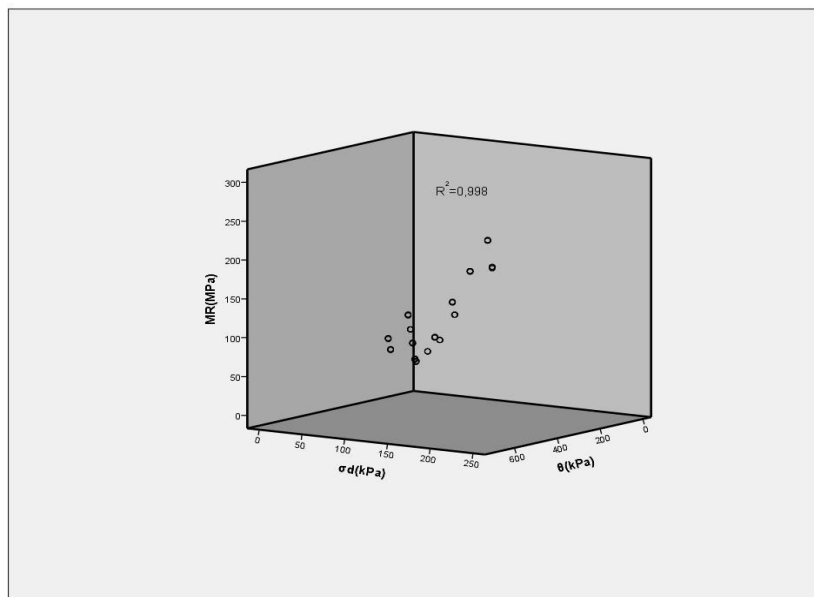
Εικόνα ΠΙΙ.15: Γράφημα P-P προτύπου Universal για το υλικό 1



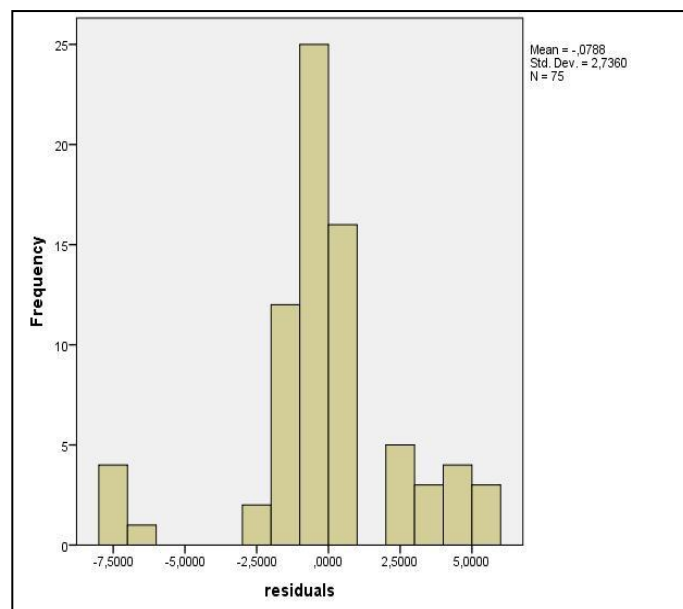
Εικόνα ΠΙΙ.16: Γράφημα Q-Q προτύπου Universal για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.4: Στατιστική ανάλυση προτύπου Universal για το υλικό 1

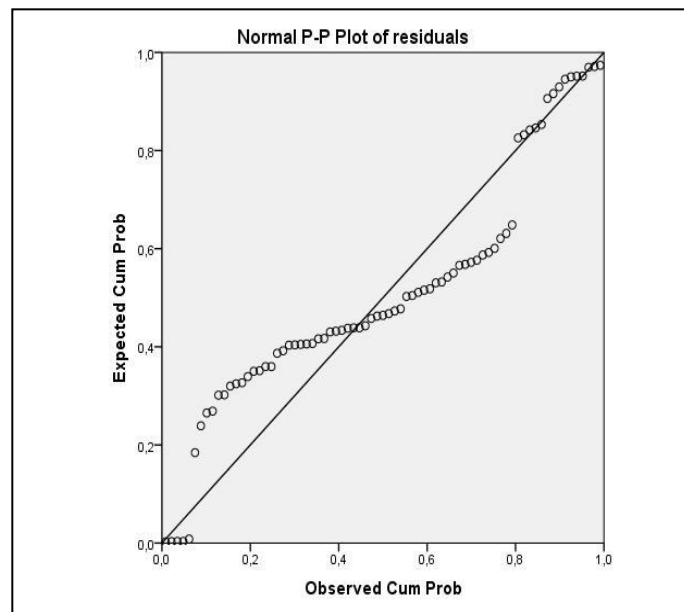
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,202272
	Τυπική Απόκλιση		2,7182408
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,164
	Αρνητικές		-,173
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,023
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,015
	95%	Άνω Όριο	,020



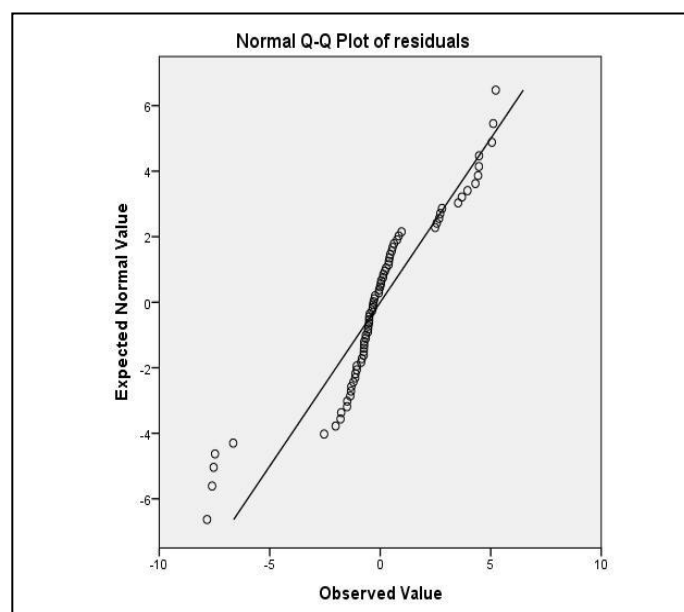
Εικόνα ΠΙΙ.17: Ανάπτυξη προτύπου Shackel για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.18: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Shackel για το υλικό 1



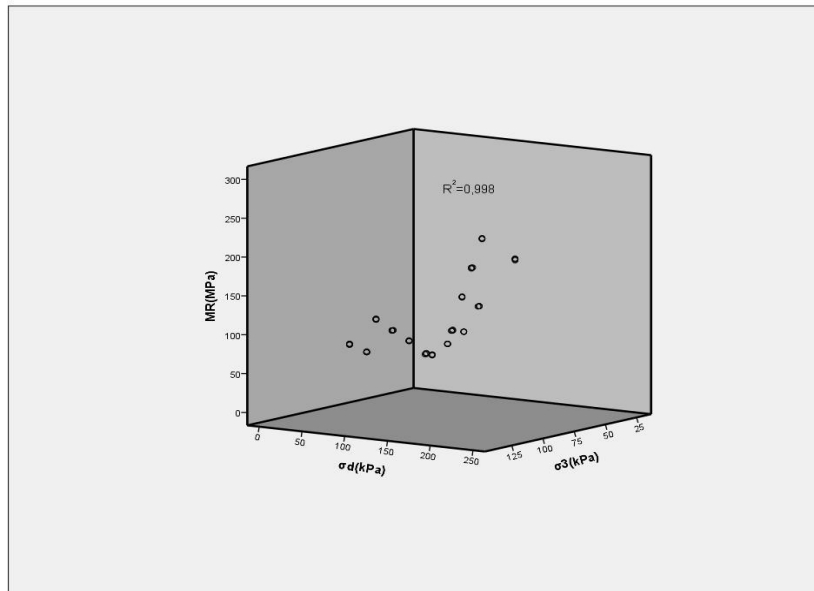
Εικόνα ΠΙΙ.19: Γράφημα P-P προτύπου Shackle για το υλικό 1



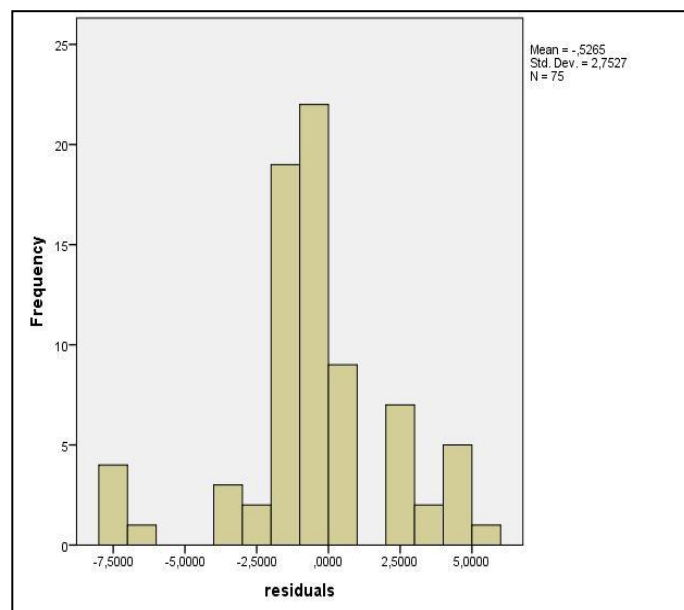
Εικόνα ΠΙΙ.20: Γράφημα Q-Q προτύπου Shackle για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.5: Στατιστική ανάλυση προτύπου Shackle για το υλικό 1

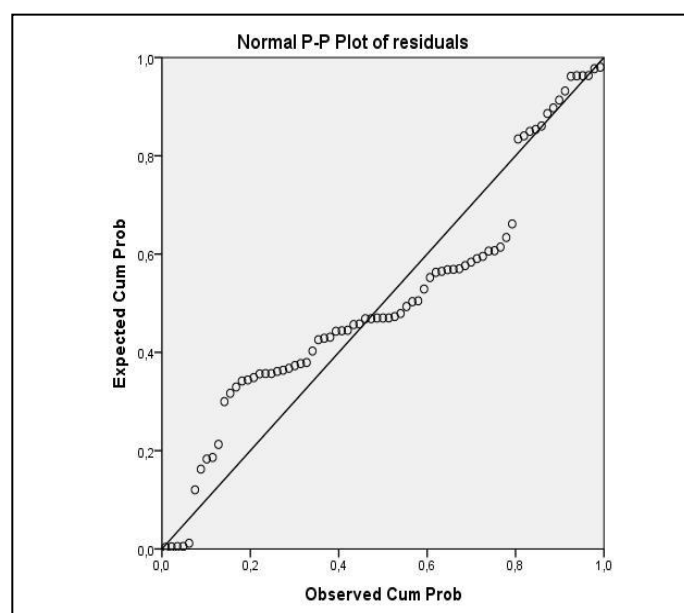
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,078778
	Τυπική Απόκλιση		2,7359775
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,159
	Αρνητικές		-,181
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,014
Τιμές Monte Carlo Sig	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,009
	95%	Άνω Όριο	,013



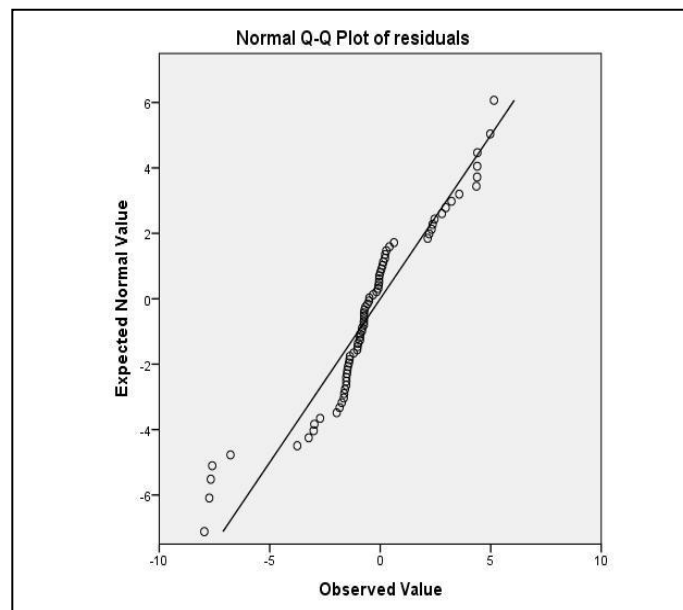
Εικόνα ΠΙΙ.21: Ανάπτυξη προτύπου Pezo, Garg and Thompson για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.22: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Pezo, Garg and Thompson για το υλικό 1



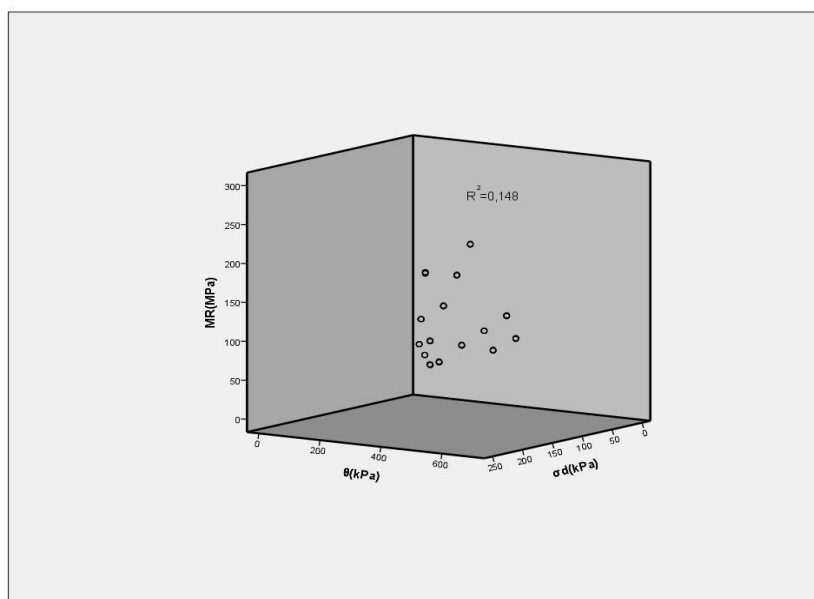
Εικόνα ΠΙΙ.23: Γράφημα P-P προτύπου Pezo, Garg and Thompson για το υλικό 1



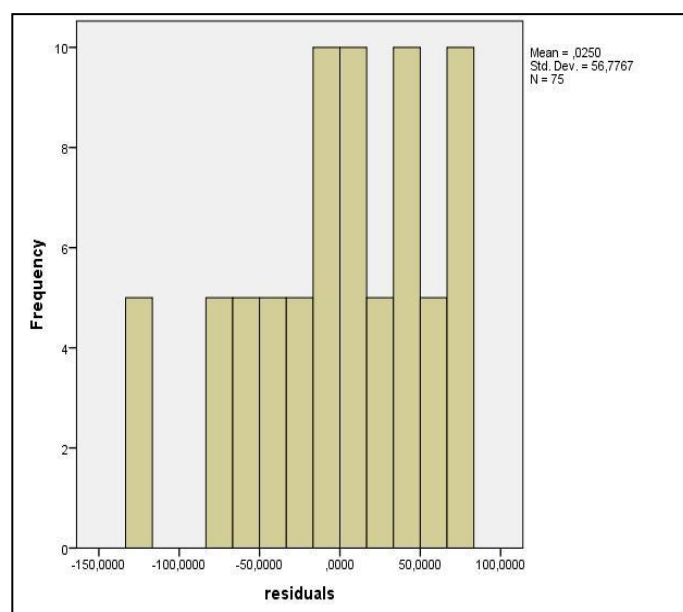
Εικόνα ΠΙΙ.24: Γράφημα Q-Q προτύπου Pezo, Garg and Thompson για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.6: Στατιστική ανάλυση προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 1

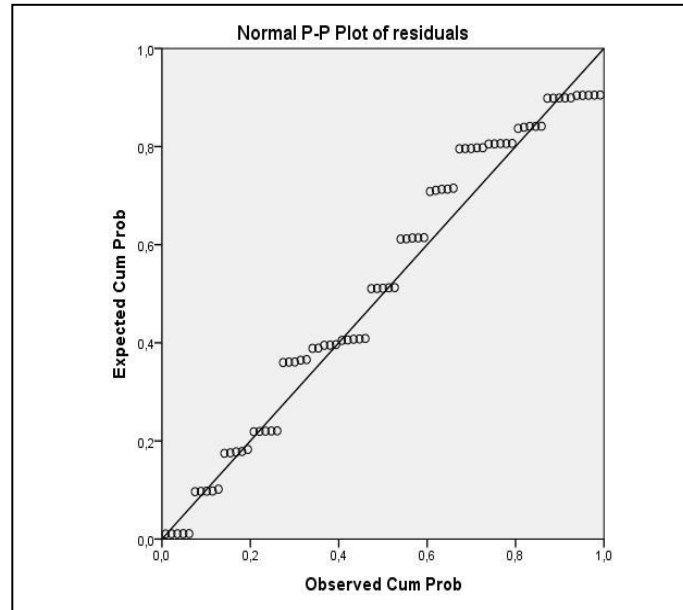
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,526464
	Τυπική Απόκλιση		2,7527183
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,159
	Αρνητικές		-,170
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,026
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης 95%	Κάτω Όριο	,018
		Άνω Όριο	,023



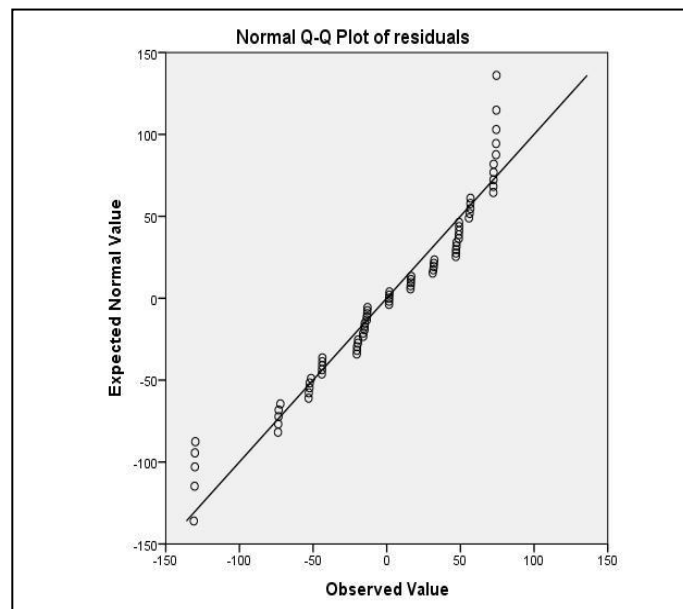
Εικόνα ΠΙΙ.25: Ανάλυση προτύπου Tam και Brown για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.26: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Tam και Brown για το υλικό 1



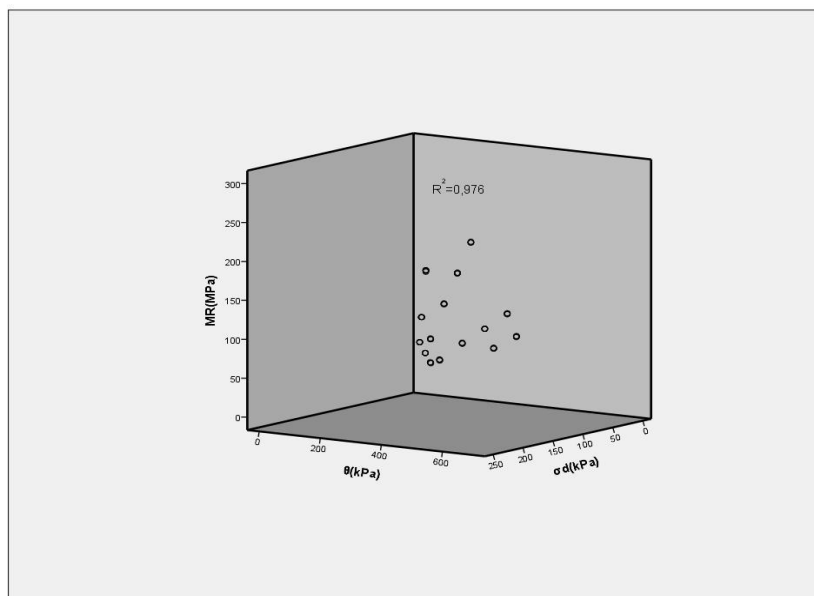
Εικόνα ΠΙΙ.27: Γράφημα P-P προτύπου Tam και Brown για το υλικό 1



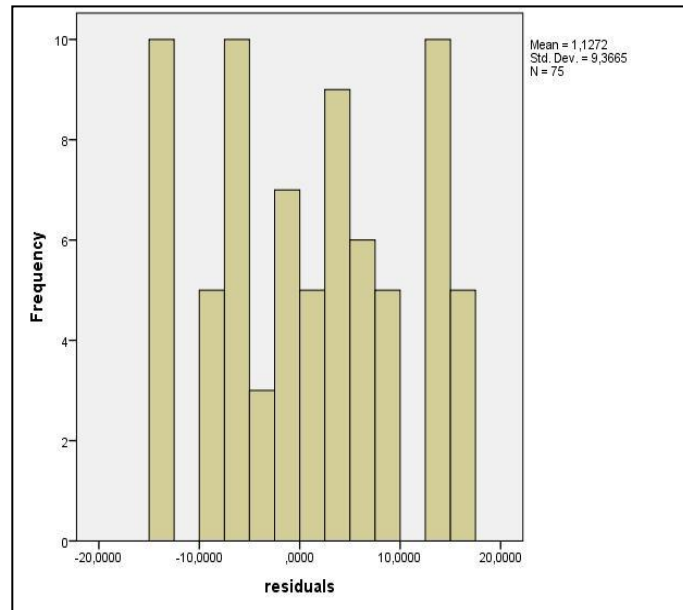
Εικόνα ΠΙΙ.28: Γράφημα Q-Q προτύπου Tam και Brown για το υλικό 1

Πίνακας ΠΙΙ.7: Στατιστική ανάλυση προτύπου Tam και Brown για το υλικό 1

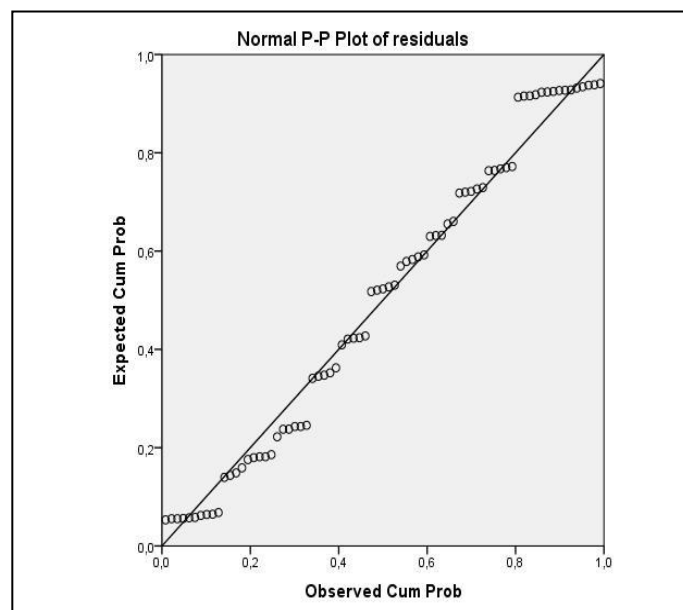
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος Τυπική Απόκλιση		,024969 56,7767446
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές Αρνητικές		-,129
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,166
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης 95%	Κάτω Όριο Άνω Όριο	,143 ,157



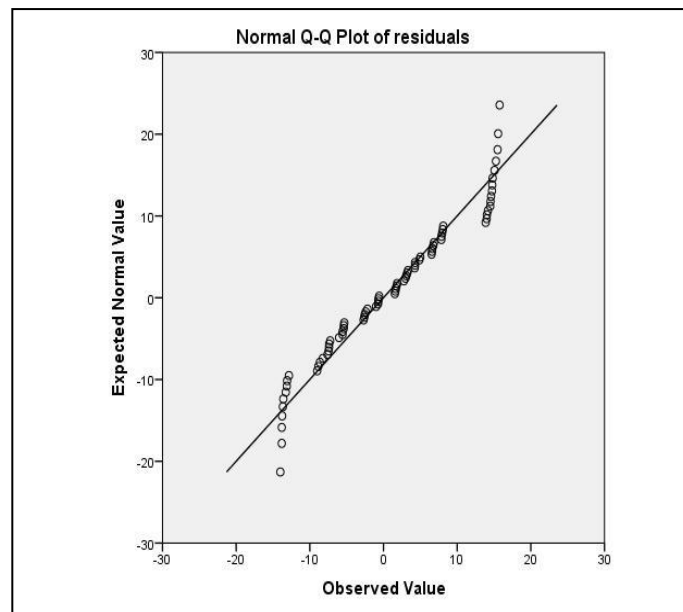
Εικόνα ΠΙΙ.29: Ανάπτυξη προτύπου Modified Universal για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.30: Ιστογράμμο συχνοτήτων προτύπου Modified Universal για το υλικό 1



Εικόνα ΠΙΙ.31: Γράφημα P-P προτύπου Modified Universal για το υλικό 1

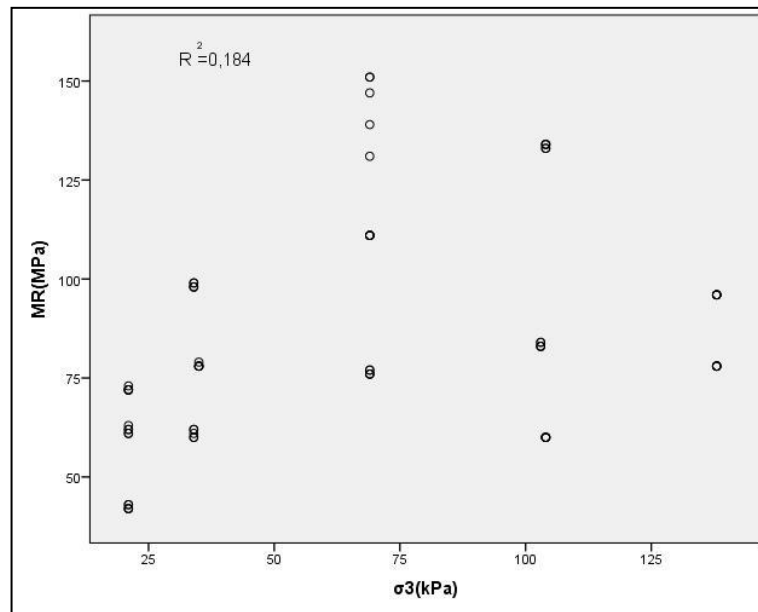


Εικόνα ΠΙΙ.32: Γράφημα Q-Q προτύπου Modified Universal για το υλικό 1

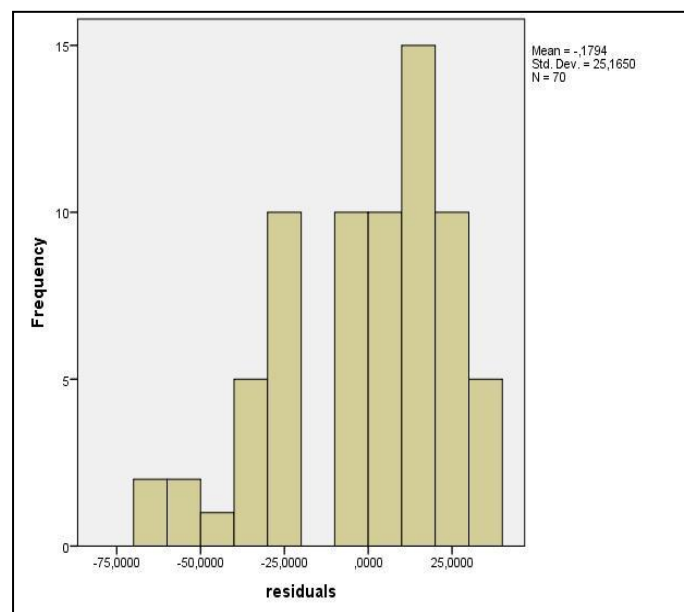
Πίνακας ΠΙΙ.8: Στατιστική ανάλυση προτύπου Modified Universal για το υλικό 1

Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			75
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		1,127214
	Τυπική Απόκλιση		9,3665424
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,088
	Αρνητικές		
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,292
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,257
	95%	Άνω Όριο	,275

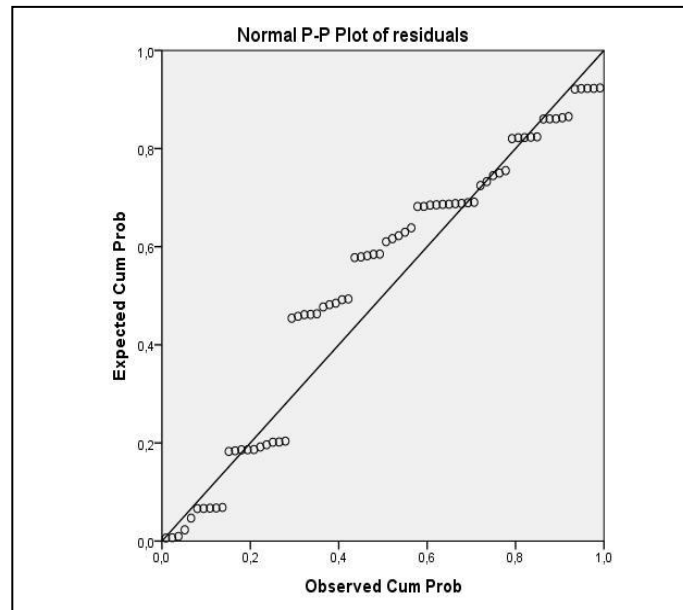
Υλικό (2)



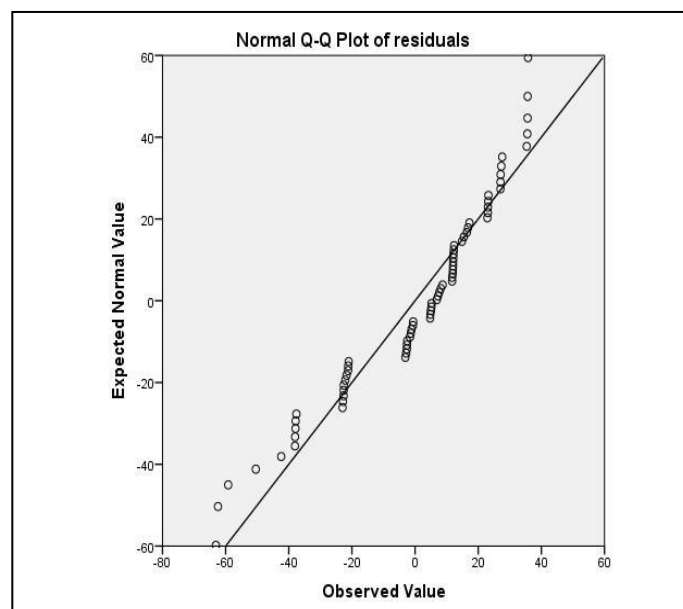
Εικόνα ΠΙΙ.33: Ανάπτυξη προτύπου κατά Dunlap και Monismith για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.34: Ιστόγραμμα συχνοτήτων κατά Dunlap και Monismith για το υλικό 2



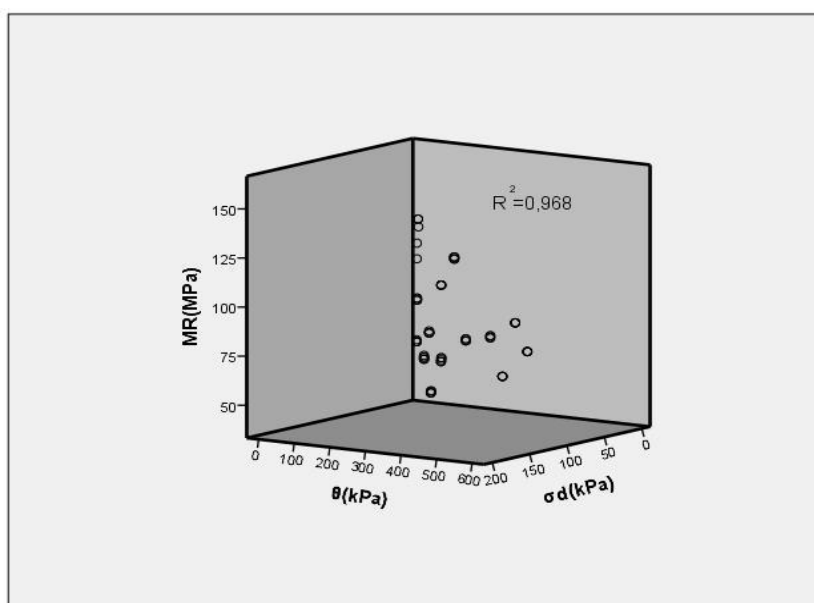
Εικόνα ΠΙΙ.35: Γράφημα P-P προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 2



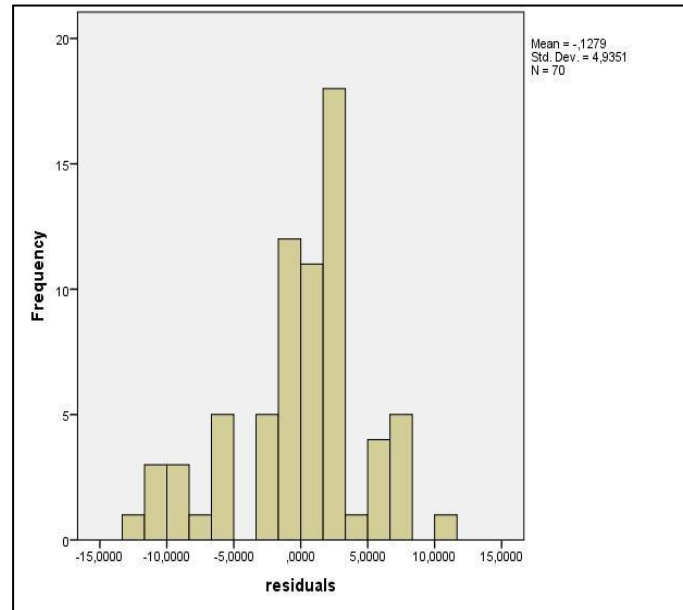
Εικόνα ΠΙΙ.36: Γράφημα Q-Q προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.9: Στατιστική ανάλυση προτύπου Dunlap και Monismith για το υλικό 2

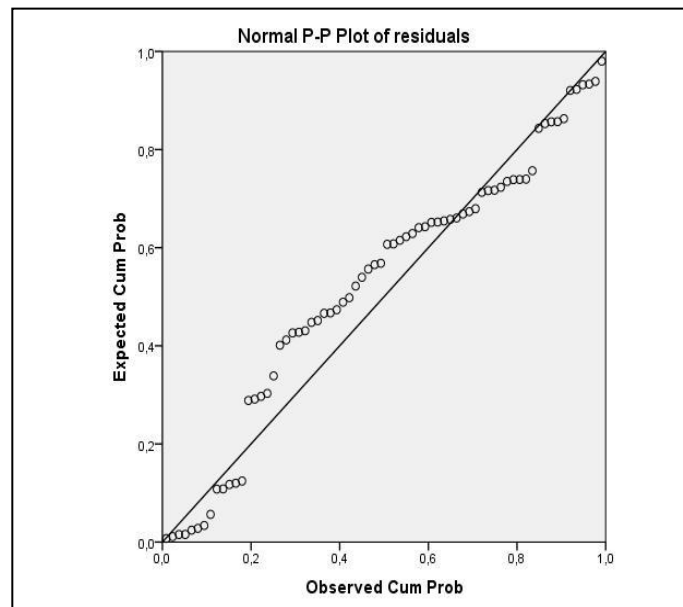
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,179449
	Τυπική Απόκλιση		25,1650399
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,082
	Αρνητικές		-,168
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,038
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,029
	95%	Άνω Όριο	,036



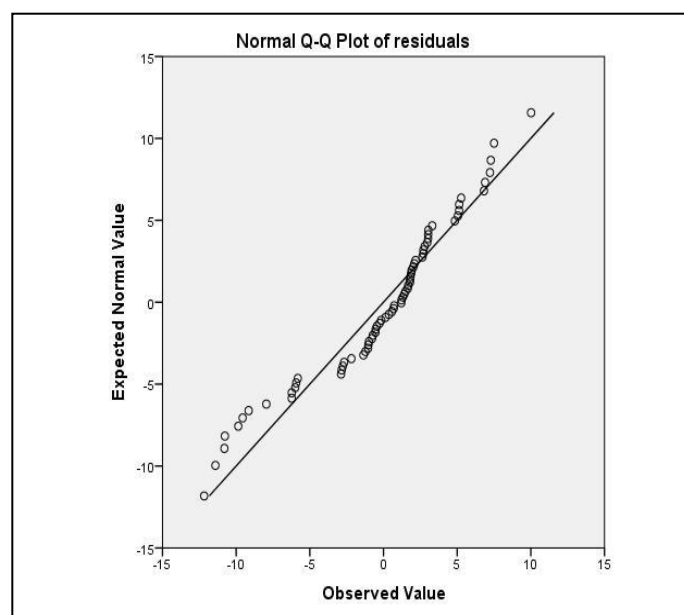
Εικόνα ΠΙΙ.37: Ανάπτυξη προτύπου May και Witczak για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.38: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου May και Witczak για το υλικό 2



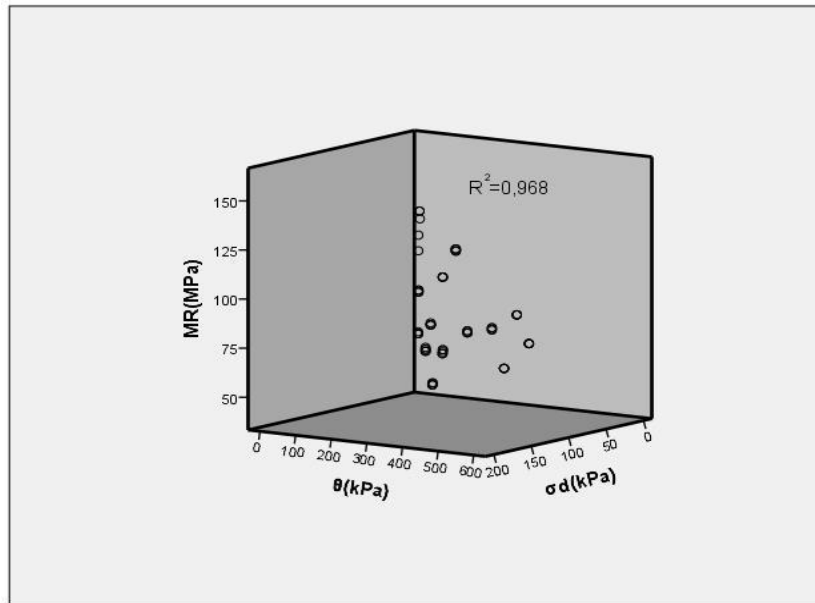
Εικόνα ΠΙΙ.39: Γράφημα P-P προτύπου May και Witczak για το υλικό 2



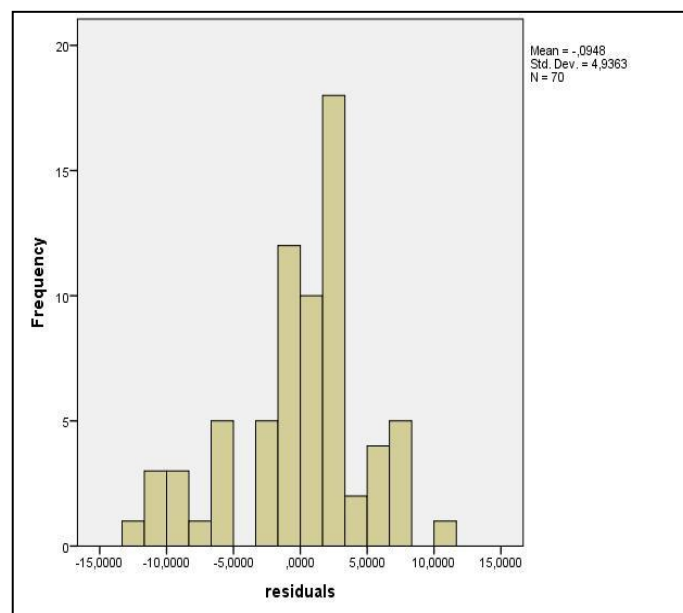
Εικόνα ΠΙΙ.40: Γράφημα Q-Q προτύπου May και Witczak για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.10: Στατιστική ανάλυση προτύπου May και Witczak για το υλικό 2

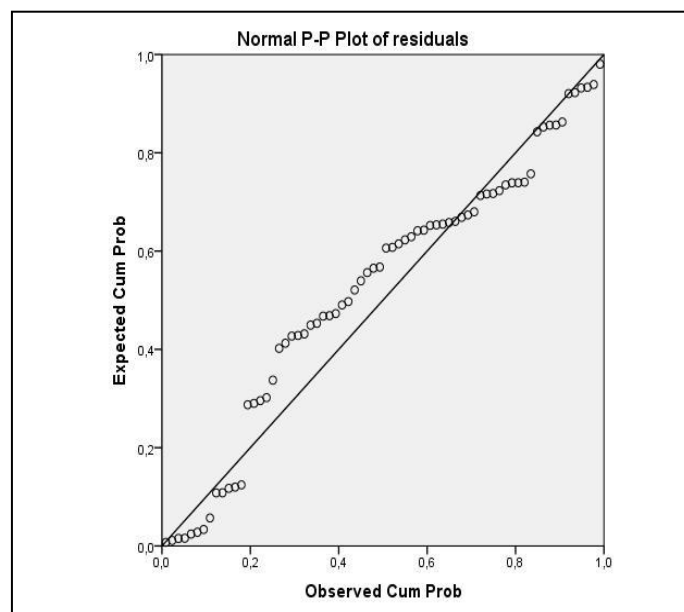
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,127944
	Τυπική Απόκλιση		4,9351079
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,089
	Αρνητικές		-,144
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,109
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,095
	95%	Άνω Όριο	,107



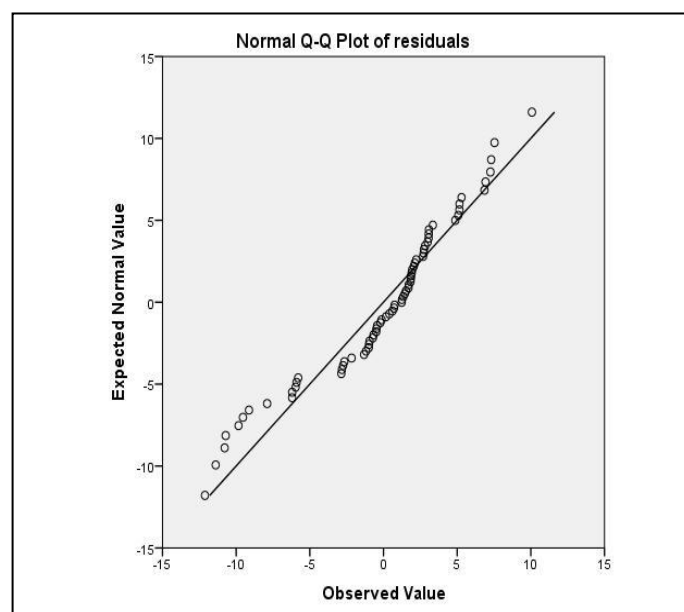
Εικόνα ΠΙΙ.41: Ανάπτυξη προτύπου Uzan για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.42: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Uzan για το υλικό 2



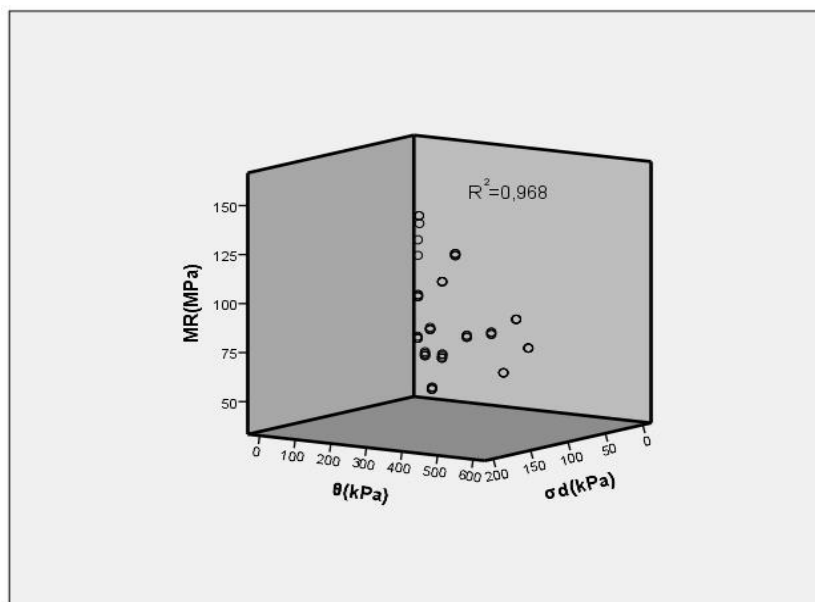
Εικόνα ΠΙΙ.43: Γράφημα P-P προτύπου Uzan για το υλικό 2



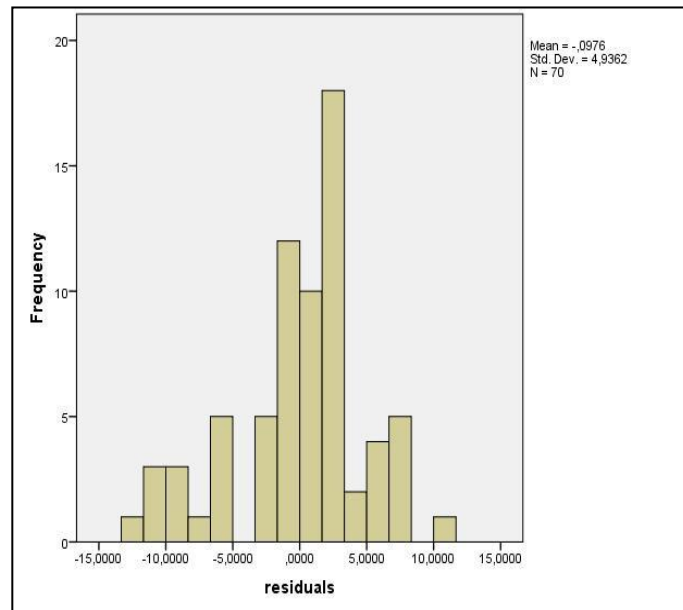
Εικόνα ΠΙΙ.44: Γράφημα Q-Q προτύπου Uzan για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.11: Στατιστική ανάλυση προτύπου Uzan για το υλικό 2

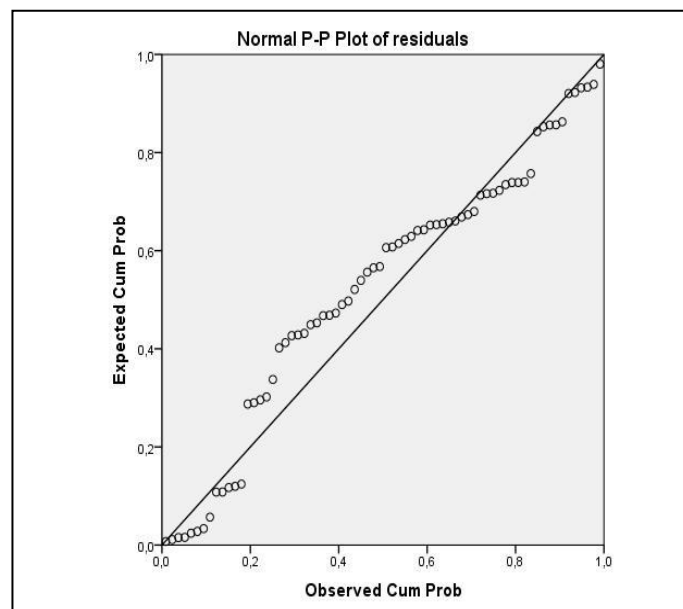
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,094752
	Τυπική Απόκλιση		4,9362713
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,088
	Αρνητικές		-,145
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,106
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,089
	95%	Άνω Όριο	,100



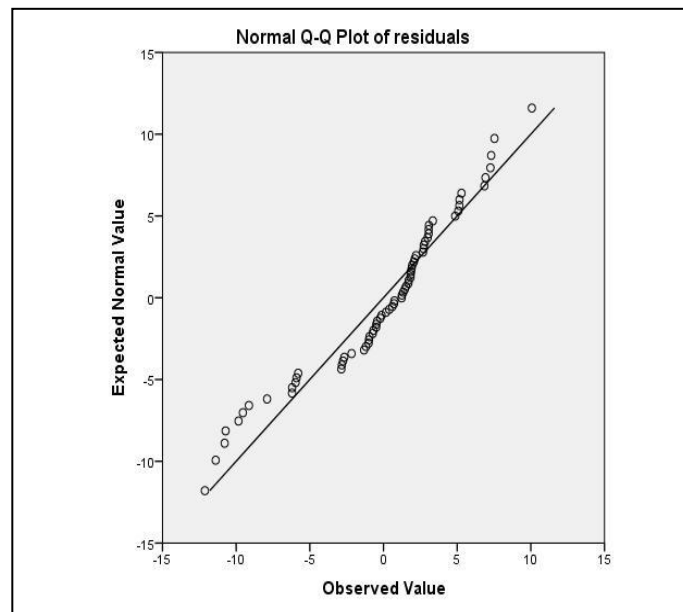
Εικόνα ΠΙΙ.45: Ανάπτυξη προτύπου Universal για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.46: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Universal για το υλικό 2



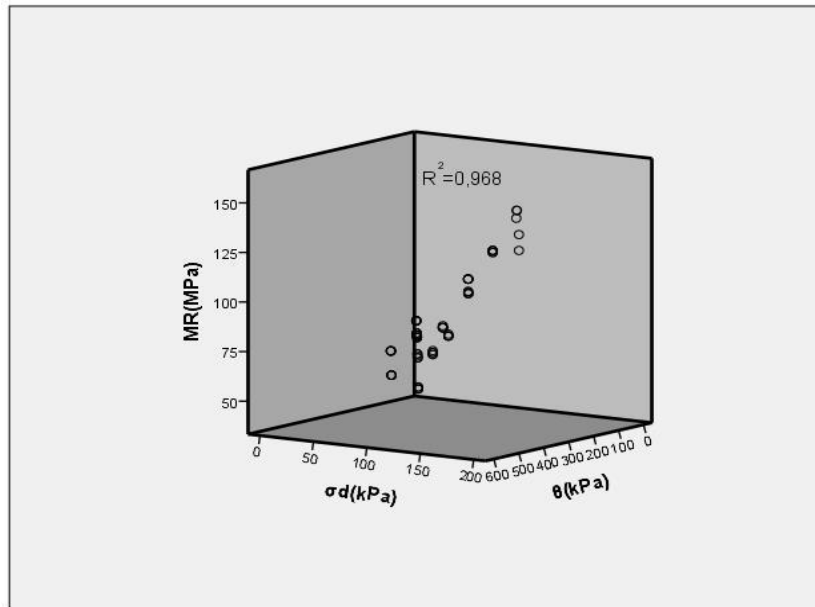
Εικόνα ΠΙΙ.47: Γράφημα P-P προτύπου Universal για το υλικό 2



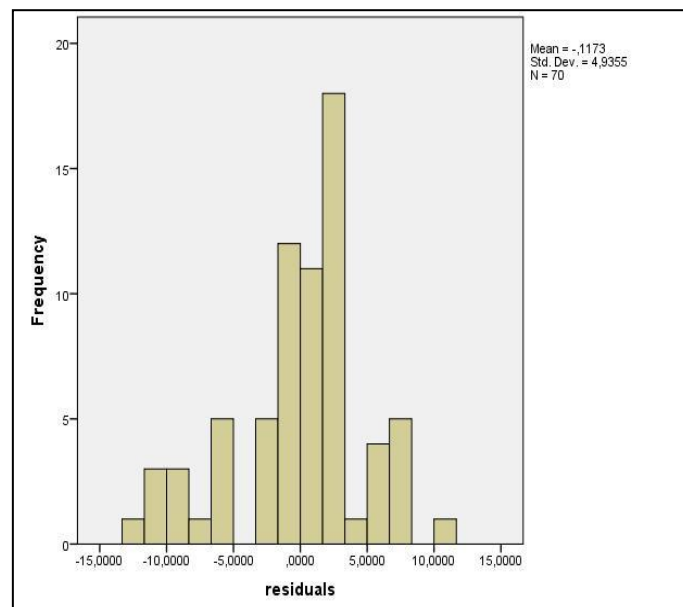
Εικόνα ΠΙΙ.48: Γράφημα Q-Q προτύπου Universal για το υλικό 2

Εικόνα ΠΙΙ.12: Στατιστική ανάλυση προτύπου Universal για το υλικό 2

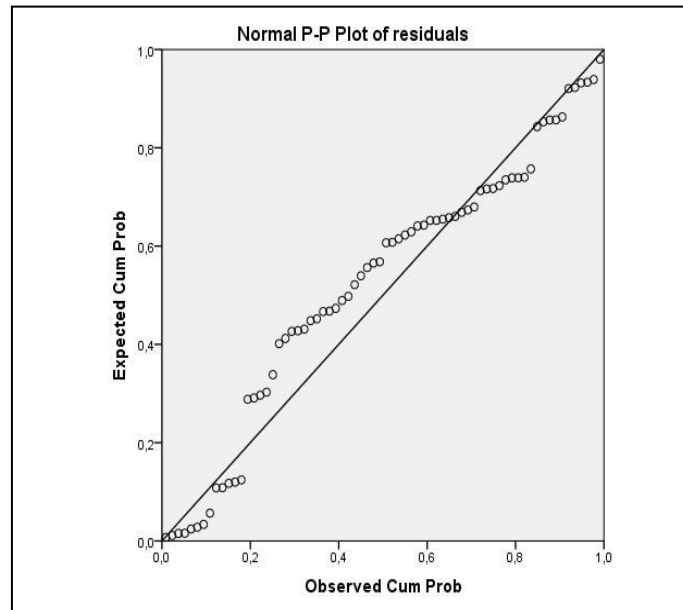
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			residuals
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,097647
	Τυπική Απόκλιση		4,9361689
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,088
	Αρνητικές		-,145
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,106
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,091
	95%	Άνω Όριο	,103



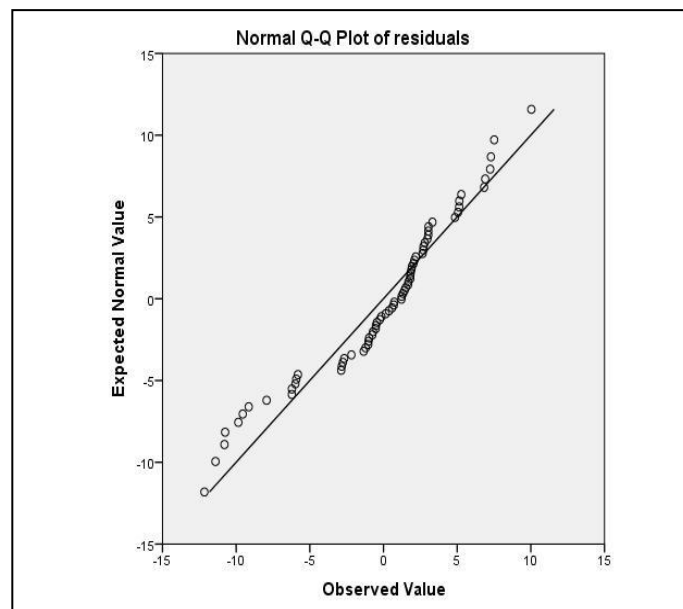
Εικόνα ΠΙΙ.49: Ανάπτυξη προτύπου Shackel για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.50: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Shackel για το υλικό 2



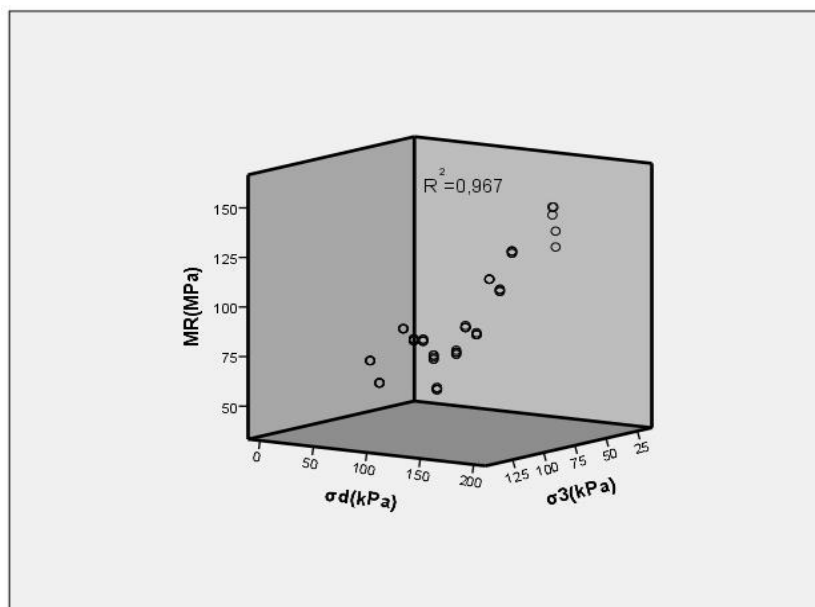
Εικόνα ΠΙΙ.51: Γράφημα P-P προτύπου Shackle για το υλικό 2



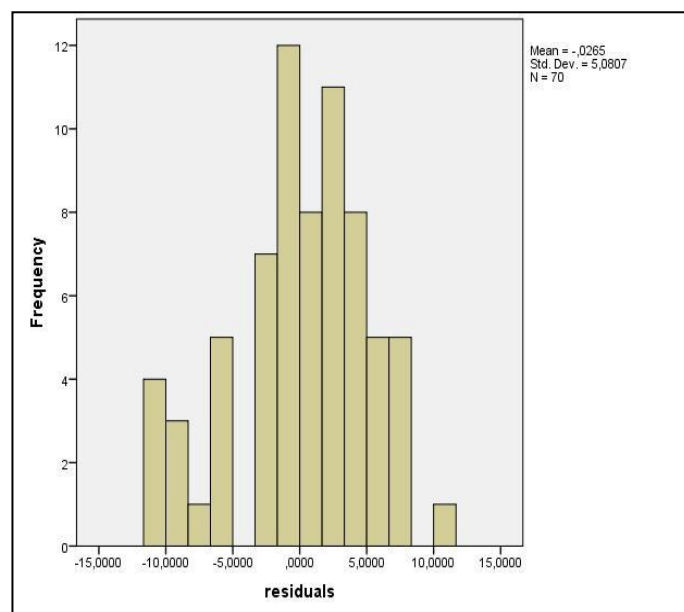
Εικόνα ΠΙΙ.52: Γράφημα Q-Q προτύπου Shackle για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.13: Στατιστική ανάλυση προτύπου Shackel για το υλικό 2

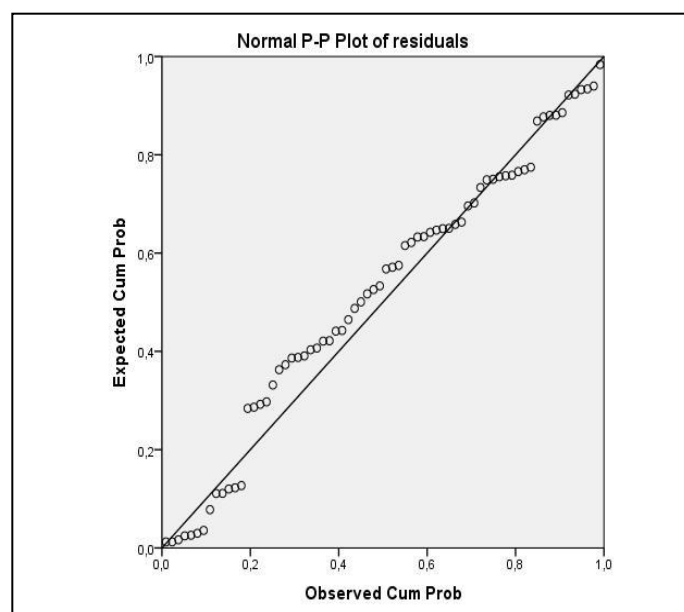
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,117291
	Τυπική Απόκλιση		4,9354787
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,089
	Αρνητικές		-,144
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,108
Τιμές Monte Carlo Sig.	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,090
	95%	Άνω Όριο	,101



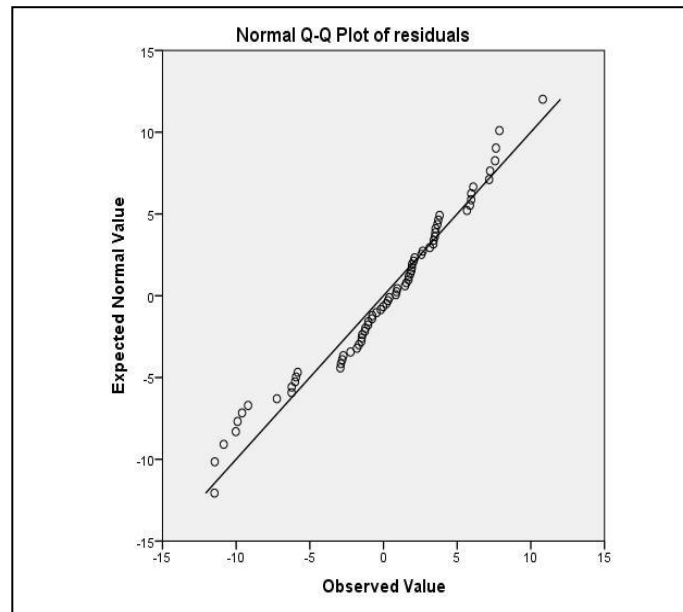
Εικόνα ΠΙΙ.53: Ανάπτυξη προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.54: Ιστόγραμμα συχνοτήτων προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 2



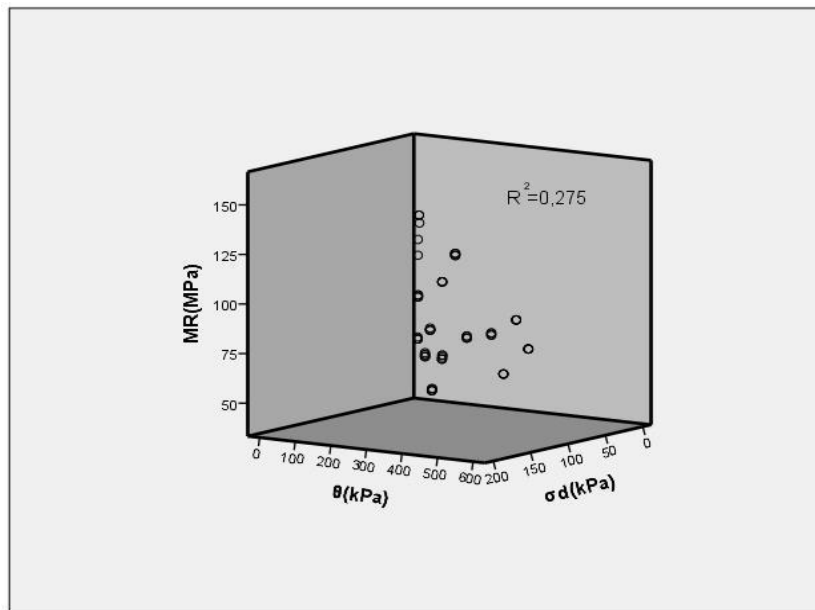
Εικόνα ΠΙΙ.55: Γράφημα P-P προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 2



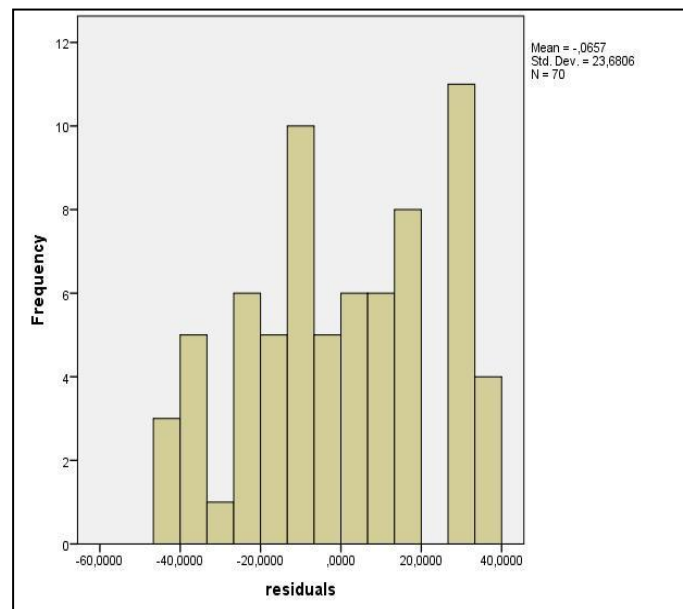
Εικόνα ΠΙΙ.56: Γράφημα Q-Q προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.14: Στατιστική ανάλυση προτύπου Pezo, Garg και Thompson για το υλικό 2

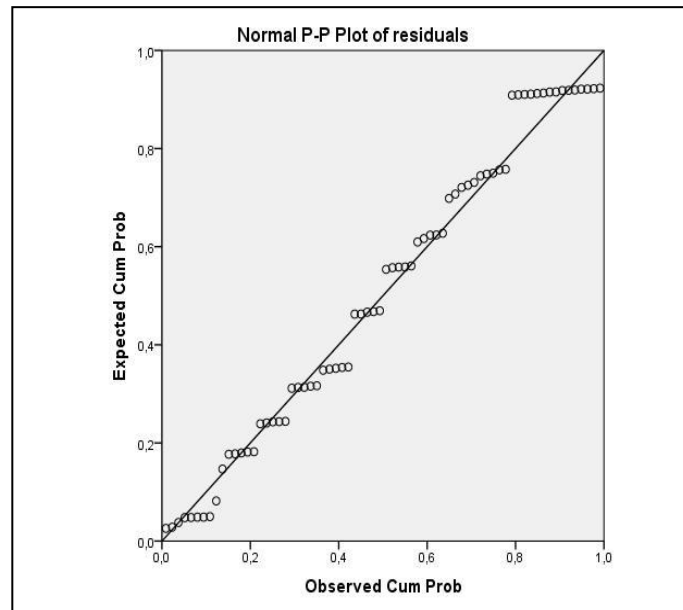
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			residuals
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		-,026538
	Τυπική Απόκλιση		5,0807384
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,068
	Αρνητικές		-,106
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,415
Τιμές Monte Carlo	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,378
	95%	Άνω Όριο	,397



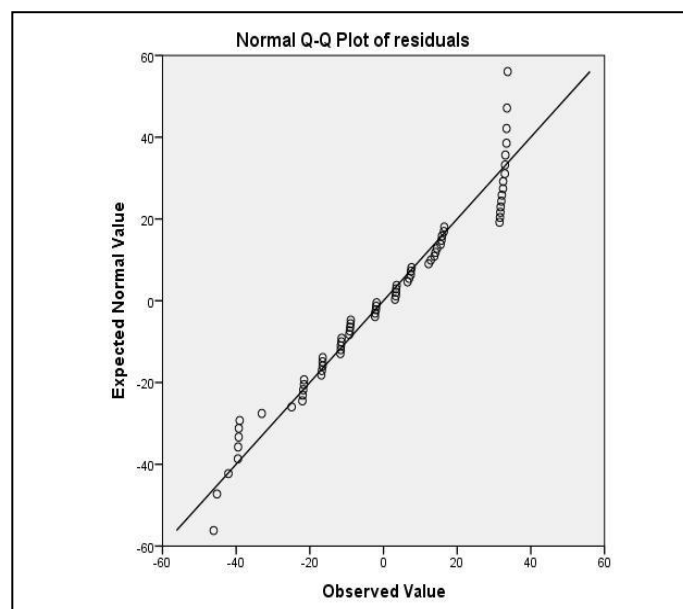
Εικόνα ΠΙΙ.57: Ανάπτυξη προτύπου Tam και Brown για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.58: Ιστόγραμμα συχνοτήτων Tam και Brown για το υλικό 2



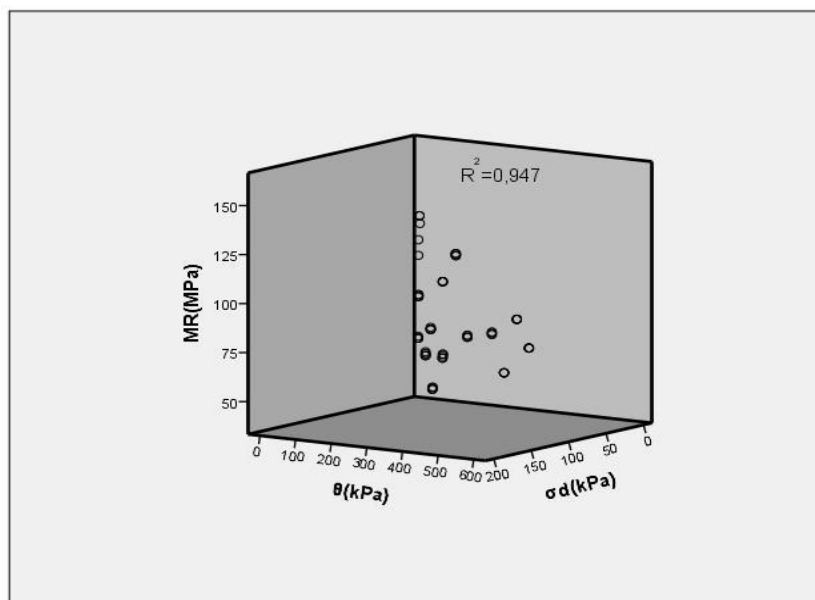
Εικόνα ΠΙΙ.59: Γράφημα P-P προτύπου Tam και Brown για το υλικό 2



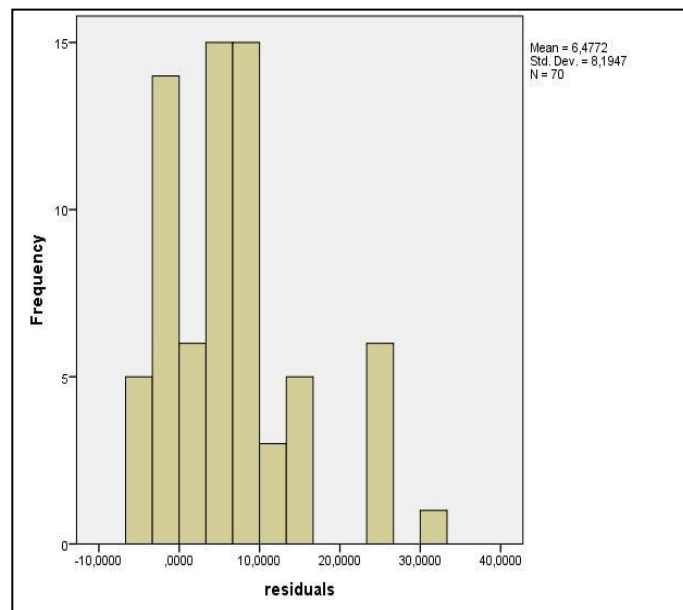
Εικόνα ΠΙΙ.60: Γράφημα Q-Q προτύπου Tam και Brown για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.15: Στατιστική ανάλυση προτύπου Tam και Brown για το υλικό 2

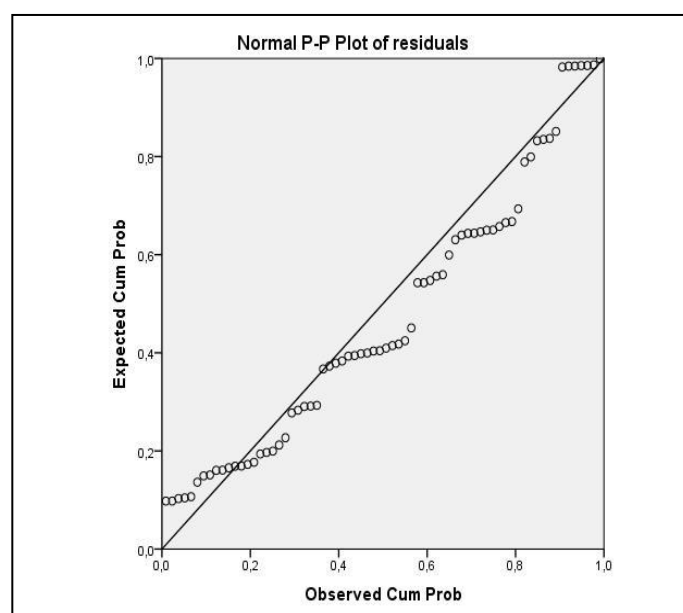
Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος Τυπική Απόκλιση		-,065697 23,6806206
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές Αρνητικές		,077 -,123
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,240
Τιμές Monte Carlo Sig.	Επίπεδο Εμπιστοσύνης 95%	Κάτω Όριο Άνω Όριο	,213 ,229



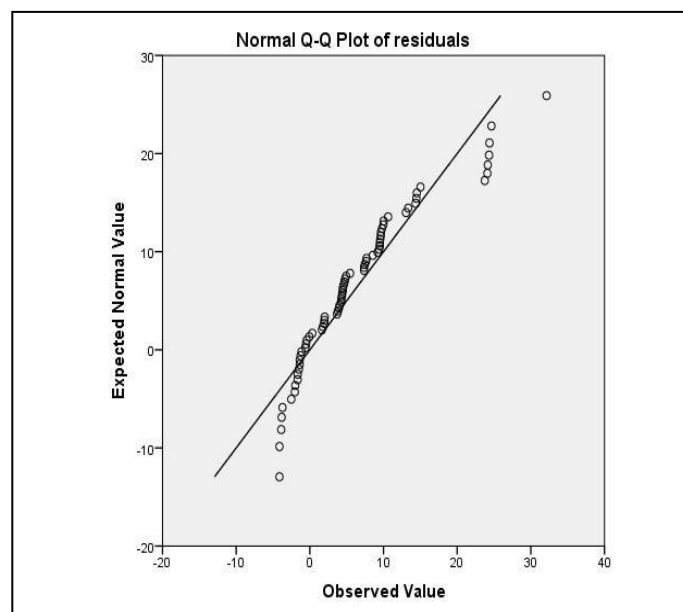
Εικόνα ΠΙΙ.61: Ανάπτυξη προτύπου Modified Universal για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.62: Ιστογράμμα συχνοτήτων προτύπου Modified Universal για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.63: Γράφημα P-P προτύπου Modified Universal για το υλικό 2



Εικόνα ΠΙΙ.64: Γράφημα Q-Q προτύπου Modified Universal για το υλικό 2

Πίνακας ΠΙΙ.16: Στατιστική ανάλυση προτύπου Modified Universal για το υλικό 2

Έλεγχος Καλής Προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov			υπόλοιπα
Μέγεθος Δείγματος			70
Μη Γραμμικές Παράμετροι	Μέσος Όρος		6,477166
	Τυπική Απόκλιση		8,1946571
Μέγιστες Αποκλίσεις	Θετικές		,133
	Αρνητικές		-,098
Τιμές Παρατηρηθέντων Επιπέδων Στατιστικής Σημαντικότητας			,171
Τιμές Monte Carlo Sig.	Επίπεδο Εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	,151
	95%	Άνω Όριο	,165