



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΚΑΙ ΓΑΛΑΚΤΩΜΑ ΣΕ
ΜΙΚΡΟ ΠΟΣΟΣΤΟ

ΔΥΜΠΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Σ. ΚΟΛΙΑΣ, Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2003

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο Κόλη Στόλιανό, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την καίρια ανάρτηση αυτής της εργασίας καθώς και την πλήρη υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης αυτής. Ευχαριστώ θερμά τον κο Κωνσταντό Αναστάσιο, Πολιτικό Μηχανικό, υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., χωρίς τη βοήθεια του οποίου η ολοκλήρωση της εργασίας δε θα ήταν δυνατή. Ευχαριστώ για την πολύτιμη συμβολή τους την κα Κασσάκου Μάρθα, Πολιτικό Μηχανικό, υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π., και τον κο Ζόρτζια Κωνσταντίνο, τεχνικό υπεύθυνο εργαστηρίου Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδας. Τέλος, ευχαριστώ την Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδας, για την παραχώρηση του εργαστηρίου και όλες τις παρεχόμενες διευκολύνσεις κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

Περίληψη διπλωματικής εργασίας

Στην εργασία αυτή εξετάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά αμμοχαλικών κατεργασμένων με τσιμέντο και γαλάκτωμα σε μικρό ποσοστό, με ιδιαίτερη εμφάνιση στο μέτριο ελαστικότητα και στις αντοχές σε κάμψη και θλίψη.

Στα πρώτα τρία κεφάλαια, γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης. Αναλυτικότερα, στο κεφάλαιο 1, γίνεται αναφορά στα υδροστρώματα. Εξετάζεται η ανάγκη κατασκευής αυτών, τα είδη των υδροστρώματων, ο τρόπος επίδρασης της φόρτισής τους στην ανάπτυξη τάσεων σε αυτά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό τους (οικονομικοί, περιβαλλοντικοί, κλπ), καθώς και η σημαντική επιρροή του λόγου E_s/E_c στον υπολογισμό αυτών.

Στο κεφάλαιο 2, εξηγείται η επίδραση της παρεμποδιζόμενης θερμικής συστολής στη ρηγμάτωση των βάσεων από ισχυρό σκυρόδεμα. Αναφέρονται οι φυσικές ιδιότητες αυτών, ενώ αναλύονται οι αιτίες και τα αποτελέσματα της ρηγμάτωσης. Γίνεται αναφορά στη σημαντική επίδραση των θερμοκρασιακών μειώσεων, εξηγείται ο μηχανισμός θραύσης, ενώ εξάγονται συμπεράσματα και αναφέρονται μέθοδοι που αποφεύκνουν στον έλεγχο της ρηγμάτωσης εξ' αναδύσεως.

Το κεφάλαιο 3 αναφέρεται στα ασφαλικά γαλακτώματα. Παρουσιάζονται αναλυτικά, η κατηγοριοποίησή τους, οι χρήσεις και τα πλεονεκτήματα αυτών, ενώ γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στον τρόπο διασπασης και τις ιδιότητες τους, καθώς και τους γαλακτωματοποιητές.

Στο κεφάλαιο 4, αναφέρεται ο σκοπός της εργασίας αυτής, που είναι η διερεύνηση των μηχανικών χαρακτηριστικών μιγμάτων κατεργασμένων με τσιμέντο και γαλάκτωμα σε μικρό ποσοστό, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση της περιοριστικότητας σε γαλάκτωμα, στην επιρρέπεια σε ρηγμάτωση, των τσιμεντόδετων αμμοχαλικών.

Τα κεφάλαια 5, 6, 7 αφορούν στο εργαστηριακό μέρος της εργασίας. Το κεφάλαιο 5 αναφέρεται στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, και παρουσιάζεται η πορεία της εργασίας, από τη δειγματοληψία, την κοκκομετρική διαβάθμιση και την κατασκευή της καμπύλης Proctor, ως την παρασκευή, συμπίκνωση και συντήρηση των δοκιμίων.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, για τη θηράση των δοκιμίων. Κάμψη, με στατική και επαναλαμβανόμενη

φόρτιση, δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, δοκιμή ισοδύναμου κύβου, δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

Στο 7^ο κεφάλαιο, γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης και σχολιασμού των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές. Παρουσιάζονται πίνακες και αναλυτικά διαγράμματα που αφορούν κάθε δοκιμή ξεχωριστά και πραγματοποιούνται συγκρίσεις για τα αποτελέσματα των διαφόρων δοκιμών μεταξύ τους, όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας και τις αντοχές.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξαγονται από τη μελέτη αυτή, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Περιεχόμενα

Ανασκόπηση υπαρχουσας γνώσης

1. Οδοστρώματα.....	1
1.1 Η ανάγκη της κατασκευής των οδοστρώματων	1
1.2 Επιλογή από τις διελεύσεις οχημάτων	3
1.3 Φόρτιση από τους τροχούς.....	4
1.4 Επίδραση του κλίματος στα οδοστρώματα.....	6
1.5 Οικονομικοί παράγοντες	6
1.6 Μέθοδοι υπολογισμού των οδοστρώματων	8
1.7 Λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό	10
1.8 Η επιρροή του λόγου E_1/E_{m1}	12
2. Παραμυδιζόμενη θερμική συστολή βάσεων οδοστρώματων από ισχνό σκυρόδεμα	16
2.1 Κατασκευές από ισχνό σκυρόδεμα	16
2.2 Αποτελέσματα ρηγμάτωσης στη βάση οδοστρώματος.....	17
2.3 Αιτίες ρηγμάτωσης.....	17
2.4 Επίδραση των θερμοκρασιακών μειώσεων	19
2.5 Μηχανισμός θραύσης.....	20
2.6 Φυσικές ιδιότητες	24
2.7 Συμπεράσματα	25
2.8 Έλεγχος της ρηγμάτωσης εξ' αναδύσεως.....	26
2.9 Σχόλια.....	27
3. Ασφαλτικά γαλακτώματα.....	28
3.1 Γενικά.....	28
3.2 Παραγωγή ασφαλτικών γαλακτωμάτων	28
3.3 Ταξινόμηση και τύποι γαλακτωμάτων	28
3.4 Χρήσεις και πλεονεκτήματα γαλακτωμάτων.....	29
3.5 Γαλακτεματοποιητές.....	30
3.6 Αδόσπωση γαλακτώματος	31
3.7 Ιδιότητες ασφαλτικού γαλακτώματος.....	32

Εργαστηριακό μέρος

4. Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	36
5. Υλικά, παρασκευή και ποντίρηση δοκιμών.....	37
5.1 Υλικά.....	37
5.2 Δοχηματολογία.....	37
5.3 Κοκκομετρική ανάλυση	38
5.4 Δοκιμή Proctor	40
5.5 Παρασκευή μεγμάτων.....	41
5.6 Παρασκευή – συμπύκνωση δοκιμών.....	43

5.7	Συντήρηση – ζύγισμα δοκιμίων.....	45
6.	Δοκιμές.....	48
6.1	Δοκιμή κάμψης.....	48
6.1.1	Στατική φόρτιση	48
6.1.2	Δυναμική φόρτιση.....	49
6.2	Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	52
6.3	Δοκιμή ισοδύναμου κύβου.....	53
6.4	Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων.....	54
7.	Παρουσίαση, ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	55
7.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	55
7.2	Κάμψη	60
7.3	Θλίψη.....	70
7.4	Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη.....	80
7.5	Διαγράμματα τάσης- βέλους κάμψης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας	82
7.6	Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συνάρτησε των κύκλων φόρτισης.....	99
7.7	Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανα κύκλο φόρτισης.....	107
7.8	Σύγκριση στατικών και δυναμικών μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη.....	123
7.9	Σχόλια επί των αντοχών	128
7.10	Επιρροεια σε ρηγματώση	134
8.	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	137
	Βιβλιογραφία.....	139

Περίληψη

- A** Διαγράμματα τάσης-βέλους κάμψης (στατική φόρτιση)
- B** Διαγράμματα τάσης -ανηγμένης παραμόρφωσης (δοκιμή θλίψης)
- Γ** Διαγράμματα τάσης-βέλους κάμψης (δυναμική φόρτιση-ειδή της γραμμικής παλινδρόμησης)
- Δ** Διαγράμματα τάσης-βέλους κάμψης (δυναμική φόρτιση-κυμαλές πολυωνυμικής παλινδρόμησης)

ΑΝΑΣΚΟΙΗΣΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΓΝΩΣΗΣ

Κεφάλαιο 1

Οδοστρώματα

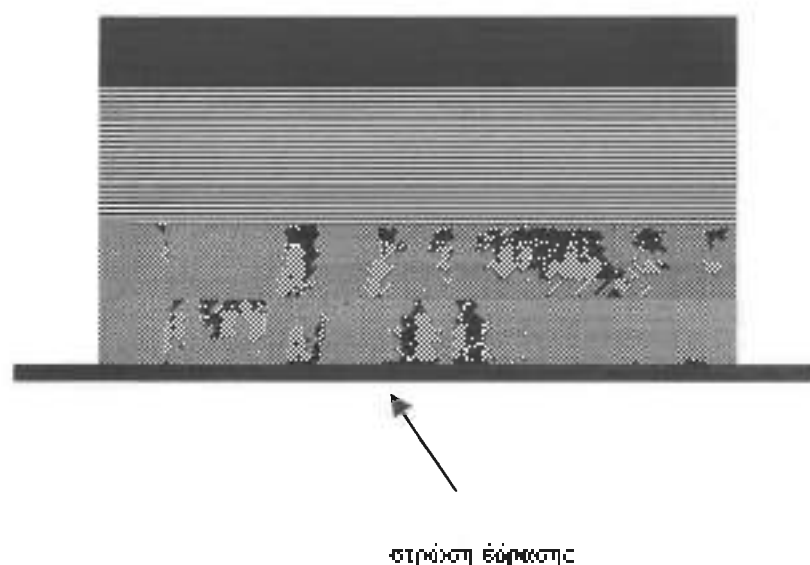
1.1 Η ανάγκη της κατασκευής των οδοστρωμάτων

Η αδυναμία του φυσικού εδάφους να παραλάβει τα φορτία των οχημάτων, χωρίς να υφιστάται σημαντικές παραμορφώσεις που κατά κύριο λόγο θα το καταστήσουν επικίνδυνο και κατά δεύτερο θα μειώσουν την άνεση στην κυκλοφορία των οχημάτων, επιβάλλει την κατασκευή μιας ή περισσότερων διαδοχικών στρώσεων αποτελούμενων από υλικά ανώτερης ποιότητας. Πάντοτε από αυτό, με σκοπό την απομείωση των τάσεων που θα το καταπονούν. Οι στρώσεις αυτές αποτελούν το οδόστρωμα.

Τα οδοστρώματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ασφαλικά, με τα οποία απασχολείται κυρίως η εργασία αυτή, και τα ελκυστήρια υπό σκυρόδεμα. Τα πρώτα χωρίζονται σε εύκαμτα και ημιάκαμτα και τα δεύτερα απαντώνται και δύσκαμτα. Στα επόμενα γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν οι διαφορές μεταξύ των υποκατηγοριών αυτών τονίζοντας τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους.

- Τα εύκαμτα οδοστρώματα αποτελούνται από α) τις στρώσεις ασφαλτομίγματος, β) τη βάση, η οποία κατασκευάζεται από αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης που μπορεί να είναι θραυστό λατομείου ή θραυστό σιλλεκτό, και γ) την υπόβαση, που επίσης κατασκευάζεται από συμποκνευμένο θραυστό ή σιλλεκτό αμμοχάλικο (σχήμα 1.1.1α).
- Τα ημιάκαμτα οδοστρώματα διαφέρουν ως προς τα μηχανοφρεθέντα λόγω της καταργασίας που υποβάλλεται το αμμοχάλικο της βάσης, της υπόβασης, ή και των δυο, με τσιμέντο ή άλλες υδραυλικές κονίες. Αυτό τα κάνει ικανά να ανταπεξέρχονται σε συνθήκες βαριάς κυκλοφορίας και αυτός είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη χώρα μας, στην κατασκευή των εθνικών οδών. Μειονέκτημα των οδοστρωμάτων αυτών είναι η ρηγμάτωση από ανάσωση, όπως εκτενέστερα θα αναφερθεί σε επόμενες παραγράφους (σχήμα 1.1.1β).
- Τα δύσκαμτα οδοστρώματα αποτελούνται από μια πλάκα σκυροδέματος που για κατασκευαστικούς λόγους (ομοιόμορφη έδραση της πλάκας),

1.1.1α) Εύκαμπτα οδοστρώματα

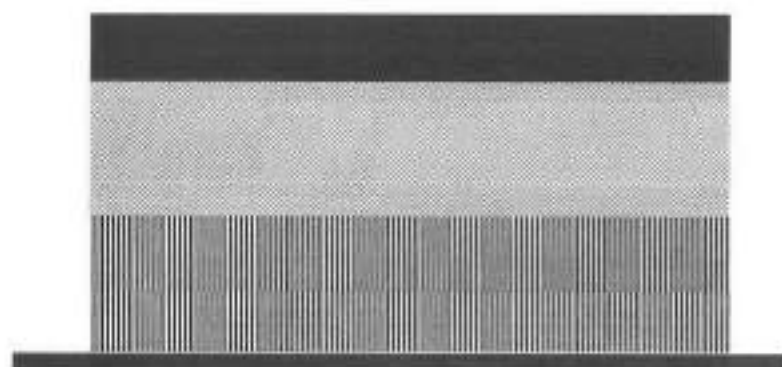


ασφαλτικές στρώσεις

βάση
Π.Τ.Π. Ο 155 Αιμοχάλικο

υπόβαση
Π.Τ.Π. Ο 150 Αιμοχάλικο

1.1.1β) Ημιάκαμπτα οδοστρώματα

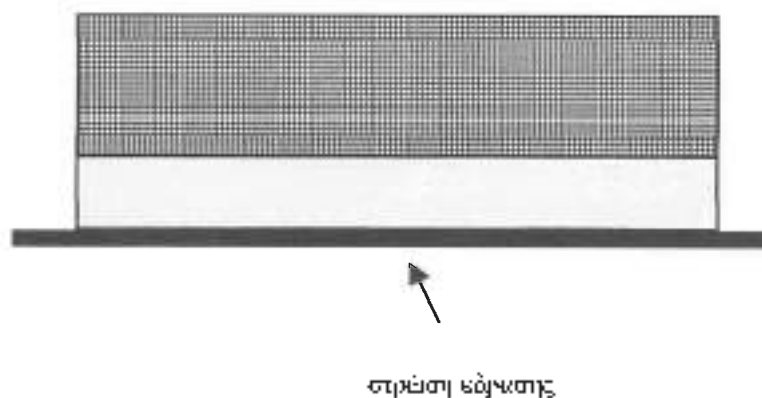


ασφαλτικές στρώσεις

βάση
Αιμοχάλικο κατεργασμένη
με πύραυλικές κονίες

υπόβαση
Π.Τ.Π. Ο 150 ή αιμοχάλικο
κατεργασμένο με πύραυλικές κονίες

1.1.1γ) Δύσκαμπτα οδοστρώματα



πκυκνώμα

Αιμοχάλικο κατεργασμένο
με πύραυλικές κονίες

Σχήμα 1.1.1: Διάφοροι τύποι οδοστρώματων

τοποθετείται πάνω σε μια στρώση έδρασης, η οποία σε αντιστοιχία με τα ασφαλτικά οδοστρώματα αποκαλείται υπόβαση (σχήμα 1.1.17).

Μια ακόμα σημαντική διαφορά μεταξύ των τύπων αυτών των οδοστρώματων έγκειται στον τρόπο που μεταβιβάζουν τα φορτία που δέχονται από τα οχήματα στο φυσικό έδαφος, σίγουρα όμως οι τάσεις απ'αυτά είναι πλέον αρκετά μειωμένες, έτσι ώστε νη μπορεί να τις αντελάξει χωρίς πρόβλημα. Το έδαφος επίσης προστατεύεται λόγω του οδοστρώματος και από τα κλιματολογικά φαινόμενα όπως τον παγετό και την εισροή νερού.

1.2 Επιπόνηση από τις διελεύσεις οχημάτων

Σε αντίθεση με τις περισσότερες κατασκευές του πολιτικού μηχανικού που δέχονται ως επί το πλείστον στατικά φορτία, τα οδοστρώματα καταπονούνται κυρίως από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Οι κυριότεροι παράγοντες που μας απασχολούν στον υπολογισμό του οδοστρώματος είναι τα φορτία των τροχών των οχημάτων που το χρησιμοποιούν, καθώς και η συχνότητα που το εκάστοτε φορτίο περνάει από την τυχαία διατομή που εξετάζεται. Ιδιαίτερη σημασία έχουν το μέγεθος του φορτίου, η απόσταση των τροχών και αξόνων των οχημάτων (πιθανή αλληλεπίδραση φορτίων, άρα μεγαλύτερη καταπόνηση) .Οι δίδυμοι τροχοί που συναντώνται στα μερίλα φορτηγά, η πίεση των ελαστικών. Ακόμα, επειδή η κυκλοφορία συντίθεται από πολλούς διαφορετικούς τύπους οχημάτων (ΙΧ, φορτηγά ελαφρά ή βαριά που μπορούν να είναι διαξονικά ή πολυαξονικά, αγρατικά μηχανήματα κ.ά.), χρησιμοποιούνται κάποιοι συντελεστές για να αναχθούν τα φορτία από κάθε όχημα σε ένα τυχαίο τυπικό φορτίο π.χ. 8 τόνοι ή 13 τόνοι. Οι συντελεστές αυτοί ονομάζονται συντελεστές ισοδυναμίας και δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$W=(P/P_1)^a$$

Όπου :

P, τυχαίο φορτίο

P₁, τυπικό φορτίο

και α εκθέτης που για τα εύκαμπτα οδοστρώματα λαμβάνει την τιμή 4 και για τα ημιάκαμπτα και τα δύσκαμπτα τιμές από 8-12.

W, ο συντελεστής ισοδυναμίας για το φορτίο P.

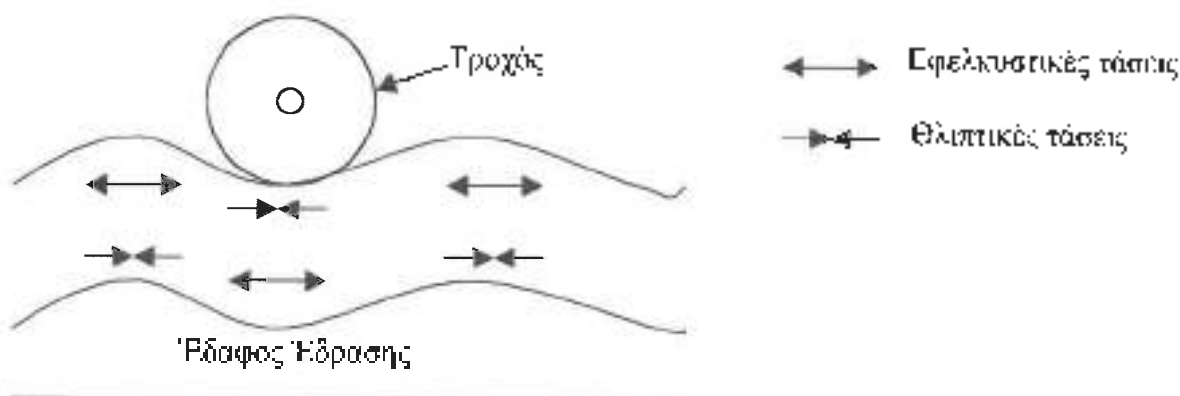
Από τον τύπο αυτόν φαίνεται πως τα μικρά οχήματα επηρεάζουν ελάχιστα την κατάσταση του οδοστρώματος, ενώ τα μεγάλα φορτηγά επιφέρουν μεγάλες φθορές.

1.3 Φόρτιση από τους τροχούς

Η φόρτιση που μεταφέρεται από το ελαστικό στο οδοστρώμα θεωρείται φορτίο ομοιόμορφα κατανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια και σε μέγεθος ίσο με την εσωτερική πίεση του αεροθαλάμου του ελαστικού.

Έτσι αν R η ακτίνα του κύκλου, P το φορτίο του τροχού και p η εσωτερική πίεση του ελαστικού (πίεση που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 0,8 MPa για συνήθη οχήματα) τότε ισχύει :

$$p = P/(\pi R^2) \Rightarrow R = (P/\pi p)^{1/2}$$

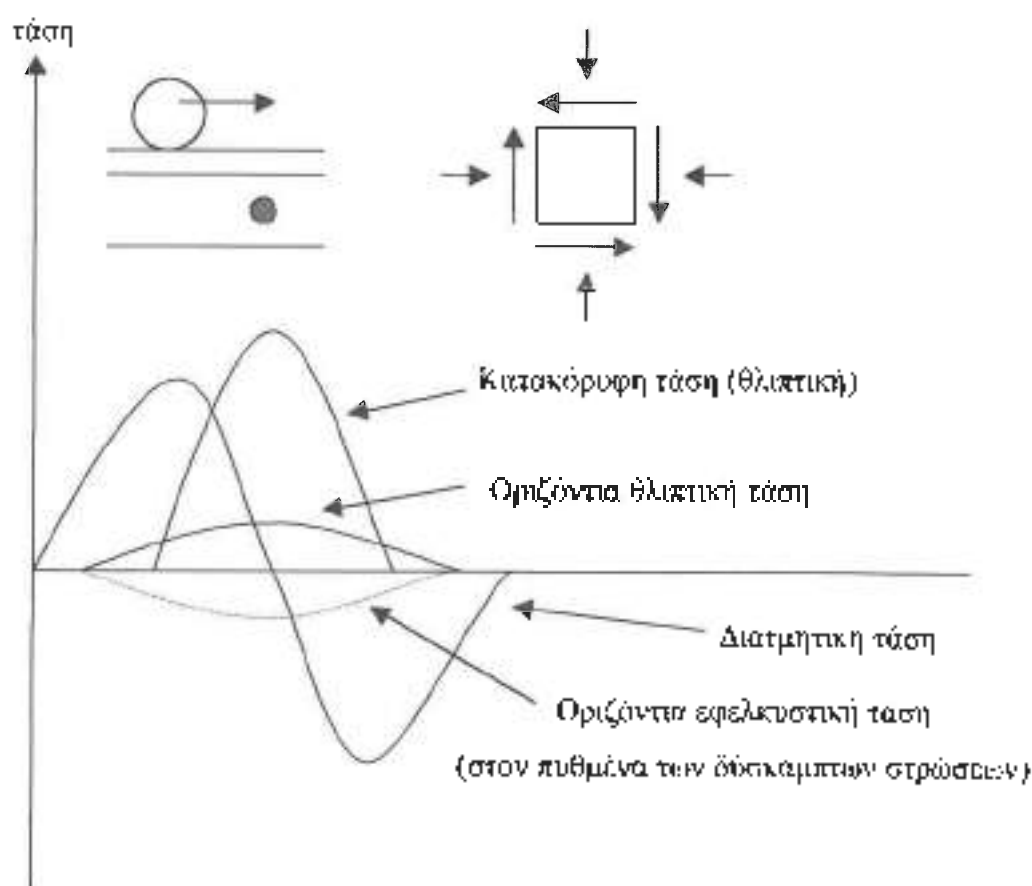


Σχήμα 1.3.1: Αναπτυσσόμενες οριζόντιες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις στο οδοστρώμα λόγω υπαχορήγησης του υπό το βάρος του τροχού οχήματος

Η καταπόνηση αυτή από τους τροχούς είναι καμπτικής φύσεως και προκαλεί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3.1, εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις εντός της στρώσης. Οι τιμές των τάσεων αυτών εξαρτώνται από το πάχος και την ακαμψία κάθε στρώσης και υπάρχουν για κάθε υλικό συγκεκριμένες ανώτατες τιμές τάσεων οι οποίες είναι επικίνδυνο να ξεπεραστούν καθώς θα προκαλέσουν μερική ή και ολική αστοχία. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η συμπεριφορά των υλικών που θα

χρησιμοποιηθούν, σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση μικρότερου μεγέθους από αυτό το οποίο θα τους προκαλούσε αστοχία σε συνθήκες στατικής φόρτισης. Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή ως συμπεριφορά σε κόπωση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή των τάσεων, οριζόντιων και κατακόρυφων που αναπτύσσονται σε τυχαίο σημείο του οδοστρώματος, κατά τη διάρκεια διέλευσης φορτίου από την περιοχή του σημείου αυτού [10].



Σχήμα 1.3.2: Μεταβολή των αναπτυσσόμενων σε τυχαίο σημείο τάσεων κατά τη διάρκεια διέλευσης φορτίου

Παρατηρείται ότι οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις μεταβάλλονται με παρόμοιο τρόπο, αν και διαφέρουν ως προς το μέγεθος και ως προς το ότι στις οριζόντιες τάσεις το κύμα φόρτισης είναι μεγαλύτερο. Οι δύοκαμπτες στρώσεις δέχονται εφελκυστικές τάσεις στο κατώτερο τμήμα τους. Επίσης παρατηρείται, ότι η διατμητική τάση αλλάζει πρόσημο εκατέρωθεν του σημείου αναφοράς (βλ. σχήμα 1.3.2).

1.4 Επίδραση του κλίματος στα οδοστρώματα

Μεγάλη σημασία στον υπολογισμό ενός οδοστρώματος παίζουν τα κλιματολογικά φαινόμενα της περιοχής στην οποία αυτό θα κατασκευαστεί. Ακολουθούν παραδείγματα για το πώς επηρεάζουν αυτά σ' ένα οδόστρωμα .

- Οι θερμοκρασιακές μεταβολές προκαλούν ρωγμές λόγω των διαμήκων συστολολογισμών
- Οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφάλτου, που σε συνδυασμό με την κυκλοφορία των οχημάτων στο οδόστρωμα, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες βλάβες, υποχωρήσεις στην επιφάνειά του και τελικά αστοχία της στρώσης έδρασης.
- Η ύπαρξη παγετού δημιουργεί ρωγμές και προκαλεί θραύση στο οδόστρωμα. Ακόμα, πιθανή είναι και η ανύψωση και αύξηση του όγκου του οδοστρώματος λόγω σχηματισμού πάγου
- Οι βροχοπτώσεις επηρεάζουν το ποσοστό υγρασίας του φυσικού εδάφους, το οποίο ασκεί μεγάλη επίδραση στην αντοχή και στη φέρουσα ικανότητά του

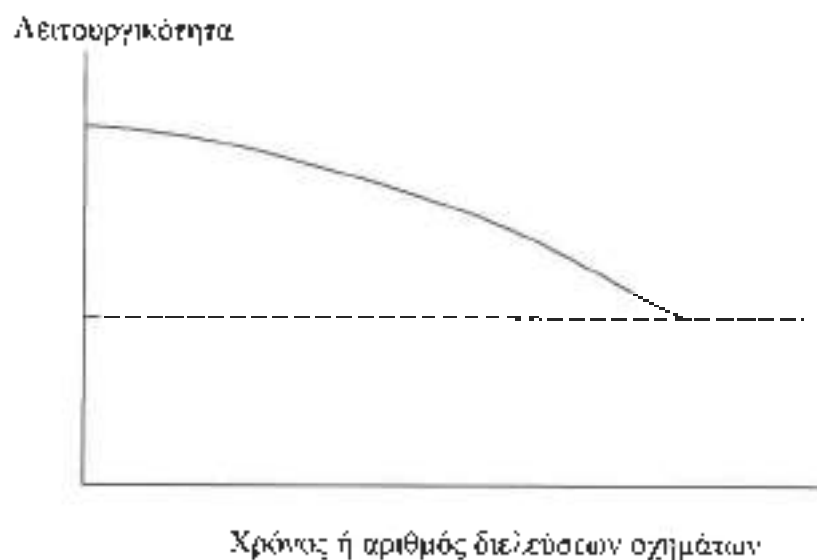
1.5 Οικονομικοί παράγοντες

Η επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του οδοστρώματος γίνεται με βάση το κόστος κατασκευής της, αλλά και την υπαίτηση η κατασκευή να μπορεί να συντηρείται με το μικρότερο δυνατό κόστος και όσο το δυνατόν αραιότερα χρονικά. Όπως είναι λογικό, η λειτουργικότητα του οδοστρώματος, δηλαδή η ικανότητά του να εξυπηρετεί την κυκλοφορία των οχημάτων με άνεση και ασφάλεια, μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω της συνεχούς διεύθυνσης οχημάτων (βλ. σχήμα 1.5.1). Σε περιπτώσεις αυτοχρηματοδότησης του έργου, όπου η ανάδοχος εταιρία έχει ως υποχρέωση να παραδώσει το έργο σε μία προσυμφωνημένη, ως προς τη λειτουργικότητα του, κατάσταση, η όλη διαδικασία κατασκευής και συντήρησης μπορεί να έχει ως εξής [10]:

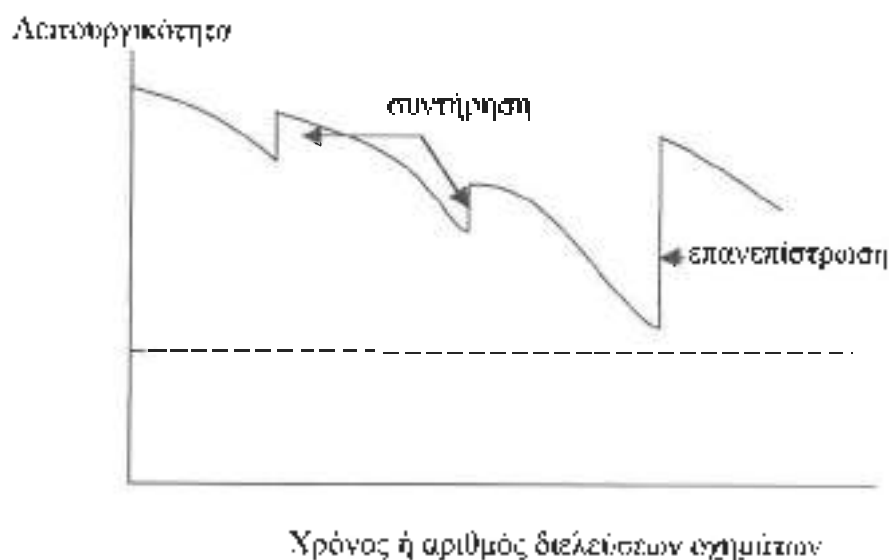
- Η κατασκευάστρια εταιρία μπορεί να κατασκευάσει το οδόστρωμα με μέτριας ποιότητας υλικά ή με μικρά σχετικά πάχη οπότε θα έχει έτσι μικρό κόστος κατασκευής. Στη συνέχεια όμως, θα χρειάζεται να γίνεται αρκετά τακτικά η

συντήρηση του οδοστρώματος, πράγμα που θα αυξήσει αρκετά το κόστος συντήρησης (σχήμα 1.5.2).

- Η κατασκευή να έχει γίνει με υλικά καλής ποιότητας σε ικανά πάχη, η λειτουργικότητα του οδοστρώματος να μειώνεται αρκετά αργά με το πέρασμα του χρόνου και την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων, με αποτέλεσμα οι επισκευές να γίνονται πιο σπάνιες και να μην επιβαρύνουν ουσιαστικά το φορέα που τις έχει αναλάβει. Σ' αυτήν την περίπτωση το κόστος κατασκευής είναι μεγάλο και το κόστος συντήρησης μικρό.



Σχήμα 1.5.1: Μείωση της λειτουργικότητας του οδοστρώματος με το χρόνο



Σχήμα 1.5.2: Επίδραση της συντήρησης στη λειτουργικότητα του οδοστρώματος

1.6 Μέθοδοι υπολογισμού των οδοστρωμάτων

Οι μέθοδοι υπολογισμού ενός οδοστρώματος, διακρίνονται σε :

1. Εμπειρικές ή ημ εμπειρικές .
2. Αναλυτικές ή θεωρητικές .

1. Εμπειρικές Μέθοδοι

Σ' αυτές κατατάσσονται οι περισσότερο εθνικές μέθοδοι καθορισμού του πάχους, που προδιαγράφονται από εθνικούς κανονισμούς ή προδιαγραφές. Ο καθορισμός αυτός γίνεται με χρήση πινάκων και διαγραμμάτων που έχουν συνταχθεί με τη βοήθεια της πείρας, από κατασκευές που ήδη έχουν γίνει στην εκάστοτε χώρα, και λαμβάνουν υπ' όψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κλίματος, των υλικών, καθώς και της κυκλοφορίας της χώρας αυτής. Στις μεθόδους αυτές προδιαγράφονται και ορισμένες εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές του εδάφους και των υλικών οδοστρώσεως.

Η πιο γνωστή απ' αυτές τις μεθόδους, είναι η μέθοδος CBR, η οποία μετά από τροποποιήσεις, έχει βρει επιβεβαίωση σε πολλές χώρες. Μια ακόμη γνωστή μέθοδος, είναι η μέθοδος AASHTO, που προήλθε από την ανάλυση μεγάλου οδικού πειράματος που έλαβε χώρα από το 1956 έως το 1960 στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Το μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι, ότι η χρήση τους περιορίζεται στις περιπτώσεις όπου οι κλιματικές συνθήκες, η κυκλοφορία και τα υλικά, είναι ίδια με αυτά που ελήφθησαν υπ' όψη κατά την ανάπτυξη της μεθόδου. Έτσι, με δεδομένο ότι οι παραπάνω παράγοντες διαφέρουν από χώρα σε χώρα, αλλά και από περιοχή σε περιοχή της ίδιας χώρας, θεωρείται παρακινδυνευμένο να χρησιμοποιηθούν, αν δεν υπάρχουν τρόποι αξιολόγησης των τοπικών διαφορών και των συνεπειών που θα έχουν στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων.

2. Αναλυτικές Μέθοδοι

Στην περίπτωση αυτή, ακολουθείται η εξής μεθοδολογία [10] :

1. Γίνεται εκλογή ενός στατικού μοντέλου το οποίο αντιπροσωπεύει το σύστημα οδόστρωμα-έδαφος. Εδώ μπορεί να γίνει αποδεκτή και κάποια αιτιολογημένη απλοποίηση της κατασκευής.
2. Καθορίζονται οι φορτίσεις και γενικότερα οι επιπονήσεις.

3. Επιλέγονται τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε στρώση και γίνεται μια πρώτη εκτίμηση του πάχους της κάθε μιας.
4. Καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών υπό τις δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίσεων.
5. Υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε ορισμένα κρίσιμα σημεία. Για παράδειγμα, στα εύκαμπτα οδοστρώματα κρίσιμο σημείο και εντασιακά μεγέθη είναι οι οδηγούντες κρισιμιστικές τάσεις στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, καθώς και οι κατακορυφές τάσεις στη στρώση έδρασης.
6. Συγκρίνονται οι υπολογισμένες τάσεις και παραμορφώσεις με τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες τιμές για κάθε στρώση και υλικό.
7. Αν οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι μικρότερες ή ίσες με τις επιτρεπόμενες, τότε η κατασκευή είναι αποδεκτή, άλλως επαναλαμβάνονται τα στάδια υπολογισμού (3)-(7) με αυξημένα πάχη ορισμένων στρώσεων ή βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών.

Ακολουθεί σύντομη ανάλυση για τον τρόπο εκλογής του στατικού μοντέλου και τις παραδοχές που γίνονται προς διευκόλυνση του υπολογισμού του οδοστρώματος.

Ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από τρεις στρώσεις, όπως παρουσιφέρθηκε. Η κατασκευή αυτή αποτυπώνεται ως τρεις επίλληλες στρώσεις, πεπρωσμενόν πάχους, με άπειρες διαστάσεις κατά την οριζόντια έννοια, που εδράζονται σε μία στρώση απείρου πάχους και απειρόριστες οριζόντιες διαστάσεις. Έτσι προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων στρώσεων. Αν όμως τα υλικά της βάσης και της υπόβασης είναι παρόμοια, ή αν το αμμοχάλικο της βάσης είναι καταρτησμένο με ασφαλτό, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι βάση και υπόβαση, στην πρώτη περίπτωση, ή βάση και ασφαλτική στρώση στη δεύτερη, αποτελούν μία στρώση, άρα προκύπτει σύστημα τριών στρώσεων. Ακόμα, αν το οδόστρωμα που μελετάται είναι εύκαμπτο, τότε η βάση, η υπόβαση και η στρώση έδρασης μπορούν να θεωρηθούν ως μία στρώση, με σημαντική μείωση της ακρίβειας των υπολογισμών. Συνεπώς, η τελευταία απλούστευση δε συστήνεται. Αντίθετα συστήνεται το σύστημα τριών στρώσεων για τα εύκαμπτα, καθώς και το τεσσάρων για τα ημιάκαμπτα.

Καθώς τα υλικά των στρώσεων θεωρούνται κατά τους υπολογισμούς, ελαστικά, ομογενή και ισότροπα, το στατικό μοντέλο μπορεί πλέον να ορισθεί, εφόσον είναι

γνωστά τα πάχη των στρώσεων , το μέτρο ελαστικότητας E , και ο λόγος του Poisson (μ).

1.7 Λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό

Κατά τον υπολογισμό ενός οδοστρώματος υπάρχουν κάποιες παράμετροι που αν δεν τους δοθεί η προεπουσα προσοχή, ίσως δημιουργήσουν μικρά ή μεγάλα προβλήματα στο έργο.

Ένα λάθος κατά τον υπολογισμό του οδοστρώματος μπορεί να επέλθει λόγω της μικρής σχετικά ακρίβειας με την οποία εκτιμάται η μελλοντική κυκλοφορία σ' αυτό . Για παράδειγμα ένα λάθος κατά 50% στην παραπάνω εκτίμηση , θα προκαλέσει μικρές σχετικά διαφορές στο απαιτούμενο πάχος των στρώσεων του αμισχάλικου μεταξύ 5 και 10 cm. Η διάρκεια, όμως, λειτουργίας του οδοστρώματος, θα διαφέρει κατά 50% από την απαιτούμενη , συνεπώς θα χρειαστεί να δαπανηθούν αρκετά ακόμη χρήματα για τη συντήρησή ή επιδιόρθωσή της κατασκευής.

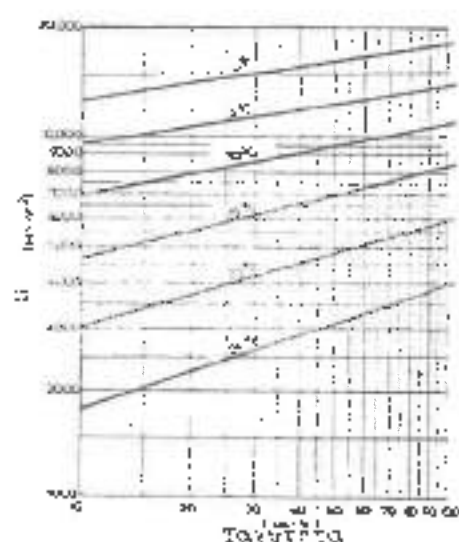
Μεγάλη σημασία, επίσης, πρέπει να δοθεί στην ταχύτητα των οχημάτων που κανουν χρήση του οδοστρώματος, καθώς επηρεάζει τη δυσκαμψία των ασφαλικών στρώσεων. Όντας γνωστές, από τη μηκοτομή της οδού, οι κατά μήκος κλίσεις αυτής, μπορεί να εντοπιστούν τα σημεία στα οποία, λόγω ανωφέρειας, τα βαριά, κυρίως, οχήματα , θα αντιμετωπίσουν δυσκολίες, με αποτέλεσμα να μειωθεί η ταχύτητα τους, άρα σύμφωνα και με τον παρακάτω τύπο να αυξηθεί ο χρόνος φόρτισης του οδοστρώματος [10] .

$$t_{xx} = l/v \text{ (sec)}$$

όπου v η μέση ταχύτητα των φορτηγών σε Km/h

Είναι γνωστό, ότι ο χρόνος φόρτισης επηρεάζει σημαντικά το μέτρο δυσκαμψίας των υλικών των ασφαλικών στρώσεων, και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν μέθοδοι ακριβέστερου προσδιορισμού του χρόνου φόρτισης συνάρτησε του πάχους της στρώσης και της μέσης ταχύτητας των φορτηγών οχημάτων. Ο Barksdale υπολόγισε, για οδοστρώμα με βάση από θριμματικό αμισχάλικο, το χρόνο επενέργειας των κατακόρυφων τάσεων, και ο Brown το μέσο χγκίνο επενέργειας των κατακόρυφων ακτινικών και εφαπτομενικών τάσεων .

Επίσης, όπως προαναφερθήκε, η θερμοκρασία επηρεάζει και αυτή σε σημαντικό βαθμό το μέτρο δυσκαμψίας της ασφάλτου. Γενικά θεωρείται ότι η θερμοκρασία της ασφαλτικής στρώσης είναι η ίδια με αυτή του αέρα (ή λίγο υψηλότερη), αλλά υπάρχουν θεωρητικές μέθοδοι για την εκτίμηση της ημερήσιας κατανομής της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο και το βάθος της στρώσης. Στο σχήμα 1.7.1 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας των οχημάτων στο μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτομίγματος [10]



Σχήμα 1.7.1: Επίδραση θερμοκρασίας και ταχύτητας στο μέτρο δυσκαμψίας S [10]

Παρατηρείται ότι το μέτρο δυσκαμψίας ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, πράγμα που σημαίνει ότι στην Ελλάδα, με δεδομένη την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η ελάττωση του μέτρου δυσκαμψίας θα είναι αρκετά υπολογίσιμη. Η μείωση αυτή επιφέρει αύξηση της επιπόνησης των στρώσεων που βρίσκονται κάτω από την μηχανική στρώση κυλίνδρου και της στρώσης έδρασης.

Γι' αυτό, επομένως, με κάποιο τρόπο κατά τον υπολογισμό, να ληφθεί υπόψη το μέτρο δυσκαμψίας, με μία μέση τιμή του, έτσι ώστε να μην παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της αναμενόμενης απόκρισης του οδοστρώματος στις επιπλοήσεις και της πραγματικής, οι οποίες να οφείλονται στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Ένις άλλος τρόπος είναι να ληφθούν δύο μέσες τιμές, μια για την περίοδο του καλοκαιριού και μια για την περίοδο του χειμάνου, με ανάλογο επιμερισμό της κυκλοφορίας. Για

μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών μπορούν να λαμβάνονται μέσες θερμοκρασίες για μικρότερες χρονικές περιόδους (εποχές, μήνες). Ακόμα πρέπει όταν τι πάχη των στρώσεων του ασφαλτομίγματος είναι μεγάλα, να χωρίζεται η στρώση σε ζώνες, γιατί η θερμοκρασία μεταβάλλεται με το βάθος. Στη συνέχεια να καθορίζεται το μέτρο διασκαμψιάς κάθε ζώνης, και να υπολογίζεται μία ισοδύναμη θερμοκρασία, απο άποψης καταπόνησής του οδοστρώματος, για όλο το πάχος της ασφαλτικής στρώσης.

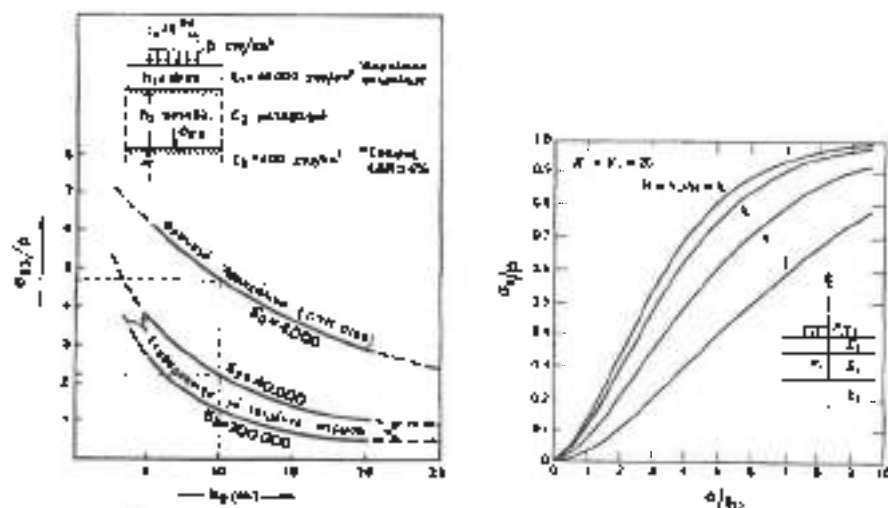
Υπενθυμίζεται ότι τα αρμοχαλικά και τα εδαφικά υλικά ελάχιστα επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Οι ιδιότητες αυτών εξαρτώνται κυρίως από την υγρασία τους.

Γι' αυτό, είναι αναγκαίο να γίνονται γνωστές οι περιεκτικότητες υγρασίας στα υλικά του οδοστρώματος, των οποίων η συμπεριφορά επηρεάζεται απ'αυτήν. Το ποσοστό υγρασίας που ενδιέφεται, είναι αυτό που θα έχει το υλικό στις συνθήκες που θα βρίσκεται μετά την κατασκευή του οδοστρώματος (συνθήκες λειτουργίας), ή σε ακόμη δυσμενέστερες, όπως π.χ. σε συνθήκες κορεσμού. Όσο ακριβέστερη είναι η εκτίμηση της υγρασίας που θα επικρατεί τόσο και ο υπολογισμός του οδοστρώματος θα γίνεται πιο ακριβής.

Στα κοκκιοδη υλικά η υγρασία επηρεάζει, σύμφωνα με την έως τώρα έγκριση, την ολική παραμενούσα περιτμήκρυσση.

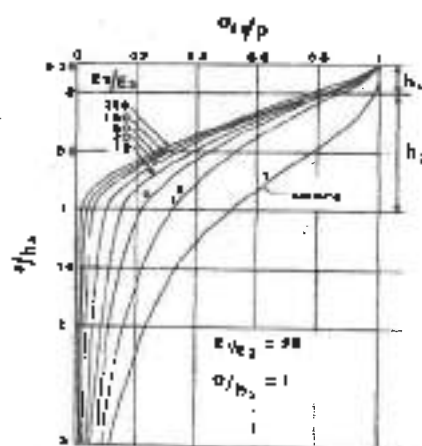
1.8 Η επιρροή του λόγου E_1/E_{1+1} .

Με την ανάλυση διαφόρων συστημάτων επάλληλων στρώσεων είναι δυνατόν να εξαχθούν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα, σχετικά με την επίδραση διαφόρων παραμέτρων (πάχος στρώσης, μέτρο ελαστικότητας κ.λ.π.), στις αναπαραστώμενες στο οδόστρωμα τάσεις και παραμορφώσεις. Έτσι προκύπτει μια καλύτερη εικόνα της εντατικής καταπόνησης της κατασκευής. Στο σχήμα 1.8.1 φαίνεται η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας (E_2) της βάσεως, και του πάχους των στρώσεων κυκλοφορίας (h_1) και βάσης (h_2), στην κυματώδη θλιπτική τάση σ_z που αναπτύσσεται στην επιφάνεια έδρασης της 2^{ης} στρώσης.

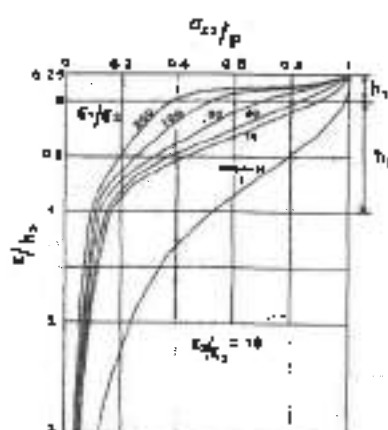


Σχήμα 1.8.1: Επιρροή διαφόρων παραμέτρων στις αναπτυσσόμενες κατακόρυφες τάσεις σ_z στη στρώση έδρασης [10]

Στο σχήμα 1.8.2 φαίνεται η επιρροή των λόγων E_1/E_2 και E_2/E_1 στην κατανομή των τάσεων σε ένα σύστημα τριών στρώσεων. Στο σχήμα 1.8.2 α παρατηρείται ότι για σταθερή τιμή του λόγου E_1/E_2 , ο λόγος E_2/E_1 με τιμή από 20, προσφέρει σαφώς αυξημένο ρυθμό μείωσης των κατακόρυφων θλιπτικών τάσεων σ_z στη στρώση έδρασης. Περαιτέρω αύξηση του λόγου επιφέρει σχετικά μικρή αύξηση στο ρυθμό μείωσης της τάσης. Αντίστοιχα στο σχήμα 1.8.2 β, όπου αλλάζει το E_1/E_2 , η μεγάλη μείωση της τάσης συμβαίνει μέσα στα βάθος h_1 και έχει ρυθμό απομείωσης της τάσης ανάλογο με το λόγο των μέτρων ελαστικότητας των δύο στρώσεων. Παρατηρείται ότι σε περίπτωση ύπαρξης δύο στρώσεων, όσο πιο μεγάλο E έχει η πάνω στρώση από την κάτω, τόσο μικρότερες τάσεις της μεταβιβάζει.



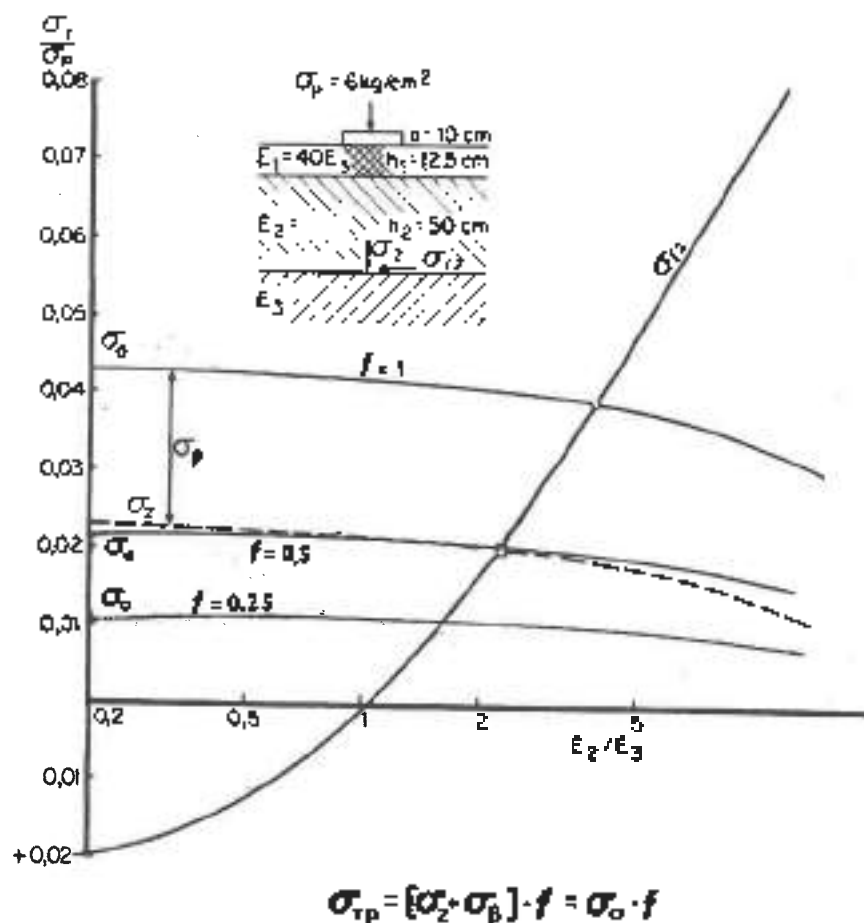
Σχήμα 1.8.2.α



Σχήμα 1.8.2.β

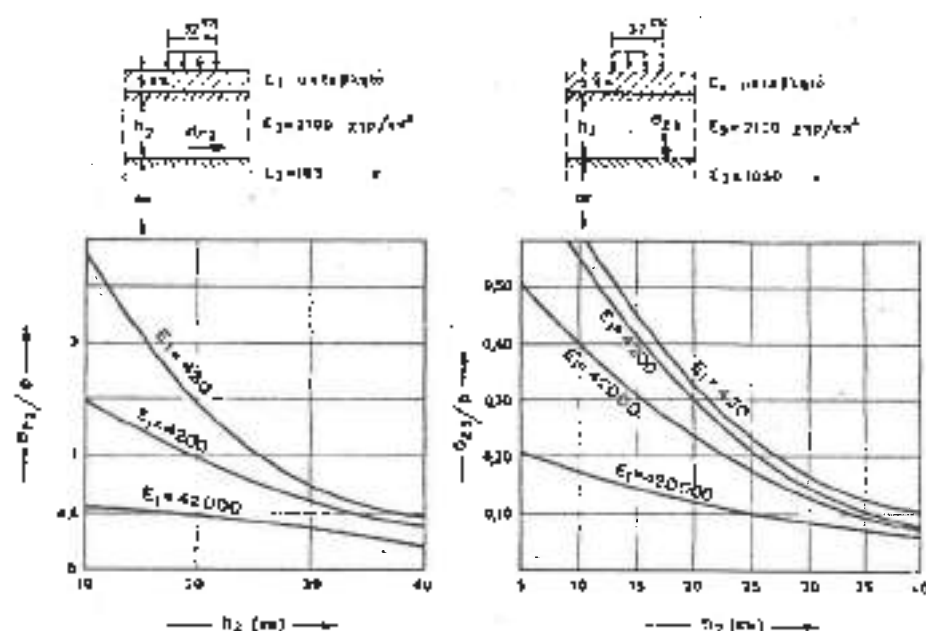
Σχήμα 1.8.2: Μεταβολή τάσεων σ_z συναρτήσει του λόγου E_1/E_2 και του βάθους [10]

Στο σχήμα 1.8.3, φαίνεται η επίδραση του λόγου E_2/E_1 στις αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα της δεύτερης στρώσης (σ_{i2}). Παρατηρείται ότι οι τάσεις σ_{i1} είναι θλιπτικές για $E_2 < E_1$, μηδενικές για $E_2 = E_1$, και εφελκυστικές για $E_2 > E_1$. Η παρατήρηση αυτή έχει μεγάλη σημασία σε περίπτωση που το υλικό της 2^{ης} στρώσης είναι αμμοχάλικο, που σημαίνει ότι δεν μπορεί να αναλάβει παρά πολύ μικρές εφελκυστικές τάσεις, εξαιτίας των τριβών που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων. Έτσι, αν η τιμή σ_{i2} γίνει μεγαλύτερη από τις τάσεις τριβής που εξαρτώνται από τα βάρη υπερκείμενων στρώσεων και του φορτίου του τροχή, τότε υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να συμβεί απομάκρυνση κόκκων και αποσυμπίκνωση του υλικού.



Σχήμα 1.8.3: Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας E_2 (λόγου E_2/E_1) στις αναπτυσσόμενες τάσεις σ_{i2} [10]

Το σχήμα 1.8.4 δείχνει την επιρροή της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλιστικής στρώσης, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, στις αναπτυσσόμενες στην στρώση εδράσης κατακόρυφες τάσεις και στις οριζόντιες τάσεις σ_{x2} για διάφορα πάχη h_2 . Διαπιστώνεται, έτσι, η σημασία που έχει ο λόγος E_1/E_{11} για τη λειτουργία του οδοντρήματος, και οι αλλαγές που προκύπτουν σε περίπτωση που ο λόγος αυτός μεταβληθεί (π.χ. όπως λόγω θερμοκρασίας στο τελευταίο παγκόσμιο), ή ακόμη και η βοήθεια που μπορούν προσφέρουν τέτοιου είδους διαγράμματα στην προσπάθεια για οικονομική κατασκευή με την κατάλληλη επιλογή των υλικών οδοντρήσεως.



Σχήμα 1.8.4: Επίδραση της μεταβολής του E_1 στις τιμές των τάσεων σ_{x2} και σ_{z2} για διάφορα h_2 [10]

Κεφάλαιο 2

Παρεμποδιζόμενη θερμική συστολή βάσεων οδοστρωμάτων υπό ισχνό σκυρόδεμα

Το κείμενο αναφέρεται στη χρήση βάσεων οδοστρωμάτων από ισχνό σκυρόδεμα, οι οποίες υπό παρεμποδιζόμενη θερμική συστολή γίνονται ευπαθείς στην ρηγμάτωση εξ' αναδύσεως. Το ισχνό σκυρόδεμα είναι το μόνο μη ασφαλικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βάσεις οδοστρωμάτων σε οδούς βαριάς κυκλοφορίας. Οι κανόνες που ισχύουν για τις βάσεις ισχνού σκυροδέματος μπορούν να εφαρμοστούν και για τα υλικά που είναι σταθεροποιημένα με τσιμέντο και έχουν μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού, και τα οποία έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα συστολής.

2.1 Κατασκευές από ισχνό σκυρόδεμα

Τα μίγματα ισχνού σκυροδέματος περιέχουν μικρή ποσότητα τσιμέντου και ποσότητα νερού τέτοια ώστε να δίνει χαμηλή εργασιμότητα. Οι βάσεις διαστρώνονται μόνο με τους κατασκευαστικούς υμνούς, επιτρέποντας γρήγορη κατασκευή και μετά από περίοδο συντήρησης 7 ημερών, παρέχουν μια βολική πλατφόρμα εργασίας για την κυκλοφορία κατά την κατασκευή.

Σημαντικό ρόλο στα μίγματα, παίζει ο καθορισμός του ανώτατου και κατωτατού ορίου αντοχής, αλλά και της επιτόπου πυκνότητας, που δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 95% της θεωρητικής πυκνότητας με μηδέν κενά αέρος. Εξίσου σημαντικός είναι ο καθορισμός της αναλογίας αδρανών προς τσιμέντο. Η κανονική αναλογία θα έπρεπε να είναι μεταξύ 15 και 20. Όμως, μερικοί ασβεστόλιθοι με υψηλή αναλογία λεπτών, μπορούν με κατάλληλη ανάμιξη και συχνό έλεγχο ποιότητας, να παράγουν σταθερό ομογενές μίγμα με υψηλές αντοχές, και έτσι να επιτραπούν αναλογίες μεγαλύτερες των 20. Παρόλα αυτά, αναλογίες μεγαλύτερες των 24 αποκλείονται (μη ομογενές μίγμα).

Ένα ελάχιστο όριο αντοχής είναι απαραίτητο για την εξασφάλιση κατάλληλων ιδιοτήτων κατανομής φορτίου, ενώ ένα ανώτερο για να εμποδίσει την κανονική ρηγμάτωση που αναδύεται τελικά στην επιφάνεια. Όμως, το ανώτερο όριο δεν πρέπει να χρησιμοποιείται όταν οδηγεί σε μίγματα φτωχότερα από 20%.

Για τον καθορισμό της επίδρασης των επιπέδων αντοχής πρέπει να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα και οι αιτίες ρηγματώσης της βάσης οδοστρώματος

2.2 Αποτελέσματα ρηγματώσης στη βάση οδοστρώματος

Είναι αποδεκτό ότι κάποια ρηγματικότητα, η οποία δημιουργείται κυρίως κατά την περίοδο των πρώτων ημερών, συμβαίνει στις βάσεις οδοστρώματων από τσιμέντο, οι οποίες δεν έχουν δυνατότητα κίνησης (άνογμα-κλείσιμο) αρμών. Ωστόσο, η ιρθυρία του οδοστρώματος δεν αποτελεί άμεσο αποτέλεσμα της ρηγματώσης, αλλά εξαρτάται από το εύρος και την απόσταση των ρωγμών, αλλά και τον υπολογισμό του οδοστρώματος.

Οι αρμές ρωγμές στη βάση τείνουν να γίνουν καλύτερες εξ' αιτίας της συστολής και το εύρος τους κυμαίνεται ανάλογα με τις θερμοκρασιακές αλλαγές. Η επιφάνεια στη γειτνίαση των αρμών υπερπυκνώνεται και προκύπτουν τελικά ρηγματώσεις εξ' αναδύσεως, οι οποίες επιτρέπουν τη διείσδυση νερού-εκτός αν σφραγιστούν-και άρα συντελούν στη φθορά του οδοστρώματος σε σχήμα "τρίπαζ".

Αφού οι αρμές ρωγμές αντιστοιχούν σε μεγάλες πλάκες και με την προϋπόθεση ότι τα ομολόγημα των αδρανών στις ρωγμές είναι κατάλληλοι ώστε να εμποδίσουν τη σχετική κίνηση όταν τα φορτία τροχού μεταφέρονται από τη μία πλάκα στην άλλη, τότε δε θα έπρεπε να καταστρέφουν τις ιδιότητες κατανομής φορτίου της βάσης, σε αντίθεση με τις πολύ πυκνές ρωγμές που θα μπορούσαν να το κάνουν, οδηγώντας σε υπερπυκνότητες της στρώσης έδρασης.

Η συχνότητα εμφάνισης των αναδύομενων, κυρίως, ρωγμών, μπορεί να μειωθεί με την πρόβλεψη παχύτερων επιφανειών, κάτι που θα μειώσει επίσης τις τάσεις στη βάση, που οφείλονται στα φορτία κυκλοφορίας.

2.3 Αιτίες ρηγματώσης

Οι αιτίες της ρηγματικότητας μπορούν γενικά να διαχωριστούν σε αυτές που έχουν σχέση με τη φόρτιση και, σε ένα πιο πρώιμο στάδιο στη ζωή της βάσης του οδοστρώματος, σε αυτές που έχουν σχέση με την ανταπόκριση του οδοστρώματος στο περιβάλλον του.

Η συμπεριφορά της βίσης οδοστρώματος εξαρτάται από τα πάχη και την ακαμψία των άλλων συστατικών του οδοστρώματος, επιπρόσθετα με τις ιδιότητες και το πάχος του υλικού της βίσης. Η κατασκευαστική αστοχία της βάσης οφείλεται τουλάχιστον εν μέρει στις επιδράσεις της κόπωσης, που επιφέρει εκτεταμένη ρηγμάτωση. Σε μια τέτοια κατάσταση, το μέτρο ελαστικότητας μιας λεπτής, αδυναμής βάσης, σταθεροποιημένης με τσιμέντο, θα μπορούσε να συγκριθεί με αυτό μιας βάσης από θραυστό υλικό. Όμως, εκτεταμένη ρηγμάτωση τέτοιας έντασης δεν θα έπρεπε να εμφανίζεται σε κατάλληλα σχεδιασμένες βάσεις.

Η ρηγμάτωση που σχετίζεται με τη φύρτιση, αναφέρεται ως “τελική” ρηγμάτωση, ώστε να διαχωριστεί από την “αρχική” ρηγμάτωση που προκαλείται από περιβαλλοντικές επιδράσεις. Τέτοια είναι η ρηγμάτωση από παρεμποδιζόμενη συστολή, από θερμότητα ενυδάτωσης, από διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία και από παρεμποδιζόμενη θερμική παραμόρφωση.

Η συστολή στο σκυρόδεμα είναι συνδεδεμένη με τη μείωση του όγκου του τσιμέντου, και άρα μια μικρή συστολή θα αναμενιταν στο ισχνό σκυρόδεμα, αφού το πυκνότερο κ.ό. του τσιμέντου είναι μικρό, ενώ το ποσοστό των αδρανών υψηλό. Είναι μάλλον απίθανο να υπεργιστεί η συστολή, ειδικά για τις ρωγμές που μορφοποιούνται στα πρώιμα στάδια στις βάσεις ισχνού σκυροδέματος, αλλά πάντως αυτή θα αύξανε το βάθος ή το εύρος των ρωγμών, ειδικά σε ένα πιο προχωρημένο στάδιο ζωής της βίσης οδοστρώματος.

Η θερμότητα της ενυδάτωσης κανονικά επιφέρει μια μέγιστη θερμοκρασία στις πλάκες σκυροδέματος από 12 ως 24 ώρες μετά τη διάστρωση, η οποία πρακτικά δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη κατά 2 ως 4 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αφού η κορύφωση αυτή αναμένεται να συμβεί κατά τη διάρκεια της πρώτης νύχτας μετά τη διάστρωση, θα έπρεπε να εξοικετρωθεί από την αναμενόμενη μείωση της θερμοκρασίας κατά τη νύχτα. Όμως είναι πιθανό ότι αν η θερμοκρασία της ενυδάτωσης επιφέρει μία υψηλότερη θερμοκρασία όπου το υλικό γίνεται άκαμπτο, τότε η θερμοκρασιακή μείωση της νύχτας θα επιφέρει μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις από τις αναμενόμενες.

Οι θερμοκρασιακές διαφορές διαμέσου των πλακών, προκαλώντας τάσεις, αν η παραμόρφωση παρεμποδίζεται από το ίδιο βάρος τους. Οι τάσεις αυτές ενισχύονται από εσωτερικές τάσεις λόγω ανομοιομορφίας κλίσης της θερμοκρασίας. Τυπικές θερμικές μήνες οι διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες και λόγω της διαστολής αναμένεται ανάπτυξη μιας καθολικής θλιπτικής τάσης, ειδικά στα πρώιμα

στάδια ζωής της βάσης. Τη νύχτα οι επιφανειακές στρώσεις των πλακών ψύχονται γρήγορα και προκαλούν καμπύλωση προς τα πάνω, η οποία παρεμποδίζομενη παράγει εφελκυστική τάση στην επιφάνεια των πλακών, που αυξάνεται από τις εσωτερικές τάσεις. Παρόλο που οι διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας είναι μικρότερες τη νύχτα, είναι σημαντικές στις βάσεις ισχυρού σκυροδέματος, αφού η παραμόρφωση και οι εσωτερικές τάσεις έρχονται μαζί παράγοντας εφελκυσμό στην επιφάνεια, κάτι που οδηγεί στην καθολική ρηγμάτωση.

Η παρεμποδίζομενη θερμική κίνηση συμβαίνει σε βάσεις σκυροδέματος μεγάλης έκτασης, χωρίς αρμούς, αφού η παρεμπόδιση της υποκείμενης υπόβασης είναι ουσιαστική. Η θερμική συστολή προκαλεί εφελκυστικές τάσεις στη βάση και γι' αυτό λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, υποθέτοντας ότι η παρεμπόδιση είναι απόλυτη, ομοιόμορφη και μεταβάλλεται με την μετατόπιση των πλακών.

2.4 Επίδραση των θερμοκρασιακών μειώσεων

Θα υποτεθεί αρχικά ότι:

- (α) Δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ επιφανείας και πυθμένα της στρώσεως
- (β) Ο ερπυσμός είναι αμελητέος
- (γ) Η τάση που προκαλείται από την παρεμπόδιση της στήικτης έδρασης είναι ομοιόμορφη
- (δ) Η παρεμπόδιση της στρώσεως έδρασης περιμρίζεται στην κατά μήκος διεύθυνση
- (ε) Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος δεν μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη τάση

(1) Απόλυτη παρεμπόδιση

Σε μία τέτοια κατάσταση, η αστήχια συμβαίνει όταν η αρνητική θερμική παραμόρφωση, είναι ίση με την ικανότητα εφελκυστικής παραμόρφωσης. Σε μία πλάκα βάσης οδοστρώματος μεγάλης έκτασης, όπου το κατά μήκος φαινίο αστοχίας είναι μικρό, συγκρινόμενο με το ίδιο βάρος της πλάκας, η παρεμπόδιση στο κεντρικό τμήμα της, προσεγγίζει αριθικά το απόλυτο επίπεδο, αφού η εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται λόγω τριβής, αυξάνεται αθροιστικά με την απόσταση από κάθε άκρο. Στην κατάσταση αυτή φαίνεται η σπουδαιότητα της αναλογίας της εφελκυστικής

αντοχής προς το μέτρο ελαστικότητας (f_b/E_c), για τον καθορισμό της θερμοκρασιακής μείωσης, ιδιαιτέρως στην αρχική ρηγματώση

(II) Διμορφική παρεμπόδιση της στρώσης έδρασης

Σε μία πλάκα που τα βάρη της είναι συγκρίσιμα με το εφελκυστικό φορτίο αστοχίας της, κάποια κίνησή της αναμένεται να συμβεί πριν την αστοχία, που αυξάνει τη δύναμη τριβής με τη στρώση έδρασης. Υποθέτοντας ότι η δύναμη αυτή είναι σταθερή (σταθερός συντελεστής τριβής), προκύπτει ότι η μέγιστη απόσταση ρωγμών είναι ανεξάρτητη από την πτώση της θερμοκρασίας και εξαρτάται μόνο από την εφελκυστική αντοχή του υλικού και τα χαρακτηριστικά τριβής, ενώ τα υψόμενα των ρωγμών αυξάνονται γραμμικά με την πτώση της θερμοκρασίας.

(III) Ανομοιόμορφη παρεμπόδιση της στρώσης έδρασης

Η απόκλιση της συμπίκνωσης των βασεων από ισχνό σκυροδέμα, προκαλεί ένα ποσοστό θηλυκωματος μεταξύ των υλικών της βίας και της υπόβας, και συνεπώς, η οριζόντια κίνηση της βίας αιχμαίνει τις κατά μήκος πιέσεις σ' αυτήν την τραχεία διεπιφάνεια. Η αρχική αντίσταση στην οριζόντια κίνηση είναι μικρή και αυξάνεται σταδιακά σε μία μέγιστη τιμή, ώστε να προκύπτει τελικά μια περυσό-σταθερή παρεμπόδιση τριβής, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της στρώσης έδρασης. Με διαδοχικές αποδείξεις σχέσεων, προκύπτει ότι ο συντελεστής τριβής σε συγκεκριμένη απόσταση από το άκρο της πλάκας, ο οποίος εξαρτάται από την μετατόπιση της πλάκας, σχετίζεται με το μέγιστο συντελεστή τριβής, για ρωγμή δοσμένου πλάτους. Έτσι υποδεικνύεται πόση η απόσταση ρωγμών εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή και τα χαρακτηριστικά τριβής, ενώ το πλάτος των ρωγμών αιχμαίνεται γραμμικά με την θερμοκρασιακή πτώση

2.5 Μηχανισμός θραύσης

Η φόρτιση μιας αρχικώς σκέραιας στρώσης από υλικό κατεργασμένο με τσιμεντοκονίδιο, (βασισμένη σε γραμμική ελαστική ανάλυση), θα επιφέρει μια διαδοχική ρηγματώση που μπορεί να διαχωριστεί ως εξής (σχήμα 2.1):

Α) Αρχική σκέραια κατάσταση. Διάρκει μόνο λίγες μέρες μετά τη συμπίκνωση, αφού οι κυρίες εγκάρσιες ρωγμές αναπτύσσονται εξ' αιτίας της παρεμπόδισης της κίνησης

Β) Αρχικό στάδιο ρηγματώσεως. Μετά την εγκάρσια ρηγματώση των πλάκων, και με την επιβολή της κυκλοφοριακής φόρτισης, αυτές θα παρουσιάσουν επιπρόσθετες ρωγμές υπό κόπωση, οι οποίες θα είναι κατά μήκος της πλάκας. Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται εξ' αιτίας των εφελκυστικών τάσεων στα άκρα των εγκάρσιων ρωγμών, οι οποίες αναδύονται στην επιφάνεια και εξαπλώνονται σε όλο το μήκος της πλάκας

Γ) Τέλειο στάδιο ρηγματώσεως. Οι κατά μήκος ρωγμές που δημιουργήθηκαν στο αρχικό στάδιο, δημιουργούν νέες κρίσιμες συνθήκες φόρτισης και νέες εγκάρσιες ρωγμές αναπτύσσονται, με συνέπεια την περαιτέρω μείωση των διαστάσεων των πλάκων. Αυτή η προοδευτική ρηγματώση, οφειλόμενη στις σταδιακές αποτοχές από κόπωση, οδηγεί σε σπάσιμο της πλάκας σε μορφή σκάλας, ώστε να αποτελείται από πολλά μικρά τετράγωνα, κάτι που μειώνει την φέρουσα ικανότητα της στρώσης ώστε οριστικά να φτύσει σε αυτήν του πρότυπου ασυνδέτου υλικού.

Από τα παραπάνω είναι σαφές ότι για το σωστό υπολογισμό μιας στρώσης, και την αποφυγή της ρηγματώσεως από κόπωση, είναι απαραίτητη η κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού στις άκρες των ρωγμών και του μηχανισμού φθοράς, και άρα η γνώση των επίδοτου ιδιοτήτων των υλικών. Εξίσου σημαντική όμως είναι και η γνώση του μηχανισμού μεταφοράς φορτίου, ειδικά όταν η ακεραιότητα της στρώσης δεν υπάρχει πια.

Στα επόμενα γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης του κύκλου ζωής του οδοστρώματος που περιγραφίκε παραπάνω, χρησιμοποιώντας την μέθοδο υπολογισμού που προτάθηκε στη Ν. Αφρική. Η μέθοδος αυτή παρατίνει τη διάρκεια ζωής των οδοστρώματων από υλικά συνδεδεμένα με τσιμεντοκονίες χαμηλής αντοχής, πέρα από την αρχική ρηγματωμένη κατάσταση λαμβάνοντας υπόψη την τελική σταδιακή ρηγματώση, μέχρι η συμπεριφορά της στρώσης να γίνει ισοδύναμη με του ασυνδέτου υλικού.

Ετσι, υποθέτονται 4 στάδια δομικής ζωής μιας τέτοιας στρώσης

Στάδιο 1. αέρια στρώση

Στάδιο 2 η στρώση αποτελείται από μεγάλες πλάκες λόγω ρηγματώσεως από αυστιαλή (εγκάρσια ρηγματώση)

Στάδιο 3· τα μεγάλα τετράγωνα έχουν μειωθεί σε μικρά, εξ' αιτίας της ρηγματώσεως από κόπωση

Στάδιο 4· η στρώση έχει σταδιακά μετατραπεί σε κοκκώδη στρώση

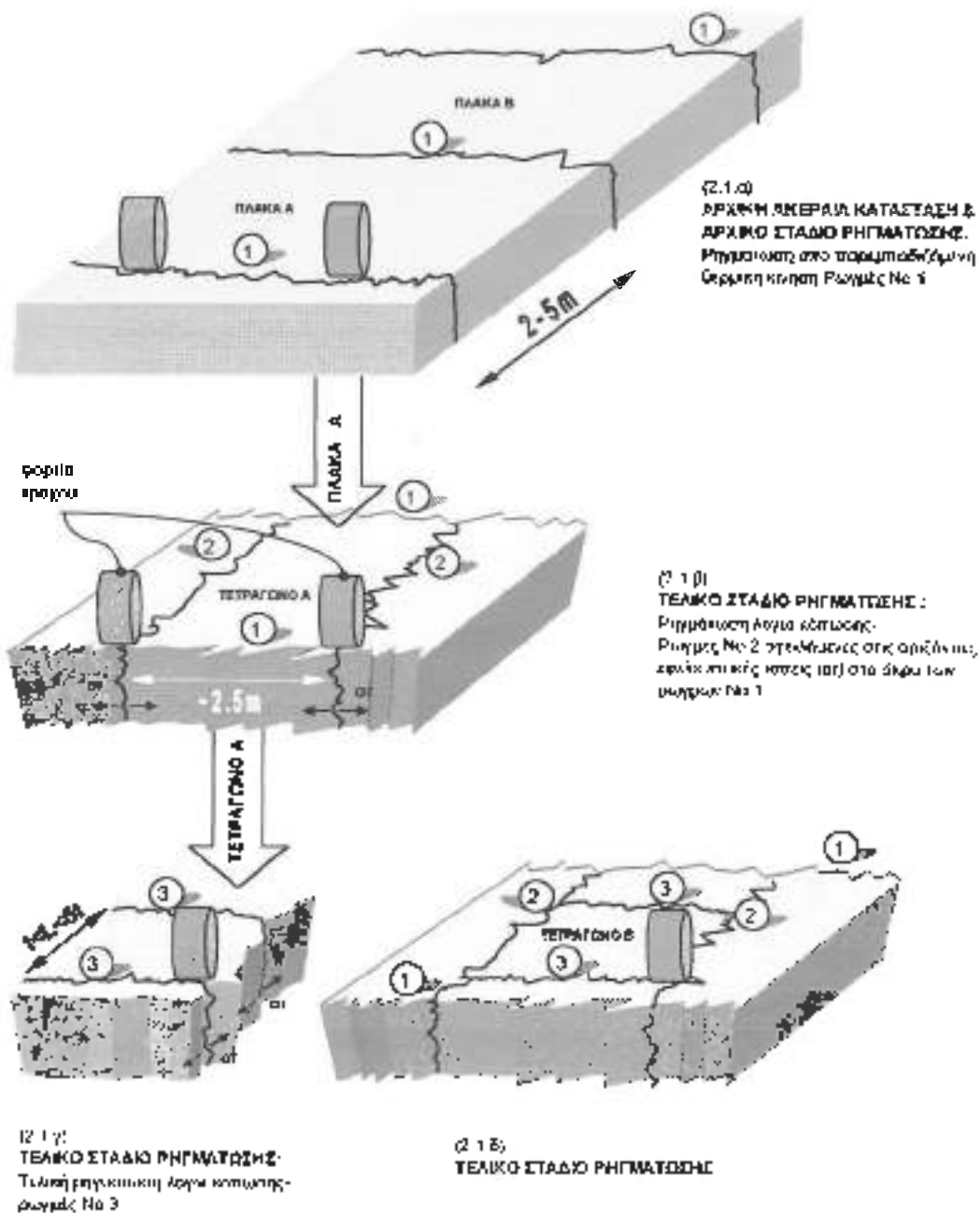
Με γραμμική ελαστική ανάλυση, στην οποία όμως εφαρμόζονται “ενεργά” μέτρα ελαστικότητας, η αστοχία διαχειρίζεται ως εξής:

A) Το τέλος της ζωής υπό κόπωση της στρώσης από υλικά συνδεδεμένα με υδραυλικές κονίες, επέρχεται όταν σχηματισθούν οι ρωγμές από κόπωση. Ο υπολογισμός των επαναλήψεων φόρτισης μέχρι την αστοχία, γίνεται με βάση το λόγο σ/ε. Με αυτόν τον υπολογισμό, καμία παράταση ζωής δεν αναγνωρίζεται μετά την αρχική ρηγματώση, και η όποια παραμένουσα ζωή θα μπορούσε να υπολογιστεί μόνο αν υποθεθεί ότι η φερουσα ικανότητα της στρώσης μειώνεται σ’ αυτήν των ασύνδετου κοκκώδους υλικού, και εφαρμόζοντας τα κριτήρια αστοχίας της στρώσης έδρασης.

B) Η ολοκληρωτική αστοχία του οδοστρώματος, επέρχεται μετά την ύπαρξη μιας σειράς διαδοχικών αστοχιών, τα στάδια 2, 3 και 4. Ο νόμος της κόπωσης δεν βασίζεται πλέον στην αναλογία της επιβαλλομένης τάσης προς τη στατική αντοχή (σ/ε), αλλά στην αναλογία της ανηγμένης παραμόρφωσης στην κορυφή της στρώσης προς την ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη θραύση (ε/ε_κ). Στο τελευταίο στάδιο το υλικό έχει υποστεί υπερβολική καταπόνηση και θεωρείται ότι συμπεριφέρεται σαν ασύνδετο κοκκώδες υλικό.

Με βάση την ανάλυση με την μέθοδο των Ν.Αφρικανών, και με επιφυλάξεις όσον αφορά τα χρησιμοποιηθέντα κριτήρια αστοχίας, κόπωσης σε κόμηση και θραύσης από θλίψη, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης πριν η στρώση εισέλθει στη δευτερεύουσα φάση ρηγματώσης, είναι πολύ μικρός.
- 2) Το μέγεθος του φορτίου τροχού καθώς και η διαμόρφωσή του είναι πολύ κρίσιμα.
- 3) Όταν αυξάνεται το πάχος της ασφαλτικής στρώσης, αυξάνεται ο αριθμός των επιτρεπόμενων επαναλήψεων φόρτισης.
- 4) Το κριτήριο αστοχίας από θραύση, δεν φαίνεται να είναι κρίσιμο.
- 5) Η παραμένουσα ζωή του οδοστρώματος στην “ισοδύναμη κοκκώδη κατάσταση”, δεν φαίνεται να είναι υφιστάμενη.



Σχήμα 2.1: Διαδοχική ρηγματώση στρώσης που περιλαμβάνει υλικά κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες με χαμηλή αντοχή [1]

2.6 Φυσικές ιδιότητες

Οι κρίσιμες παράμετροι για τα υλικά των βίσεων ισχνού σκυροδέματος, είναι ο συντελεστής θερμικής κίνησης, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας.

Θερμική κίνηση

Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι η θερμική κίνηση ενός σκυροδέματος με μικρό ποσοστό τσιμέντου, είναι όμοια με αυτήν ενός σκυροδέματος με υψηλότερο ποσοστό, και καμία σημαντική αλλαγή στο συντελεστή δεν παρατηρείται για δοκίμια ηλικίας από 1 ως 28 ημερών

Εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας

Η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ίδια δοκίμια ηλικίας 16 ημερών ως 28 ημερών. Η αναλογία f_t/E_t , είναι υψίστης σημασίας για τον υπολογισμό της ευπάθειας σε ρηγμάτωση καθώς και των μαντέλων ρηγμάτωσης, και από τα πειράματα προέκυψε ότι αυξάνεται με την ηλικία, παρόλο που πρακτικά αναμένονται τιμές μεγαλύτερες των εργαστηριακών εξ' αιτίας της μη γραμμικότητας και του ερπυσμού σε υψηλότερα επίπεδα τάσης. Πάντως η ρηγμάτωση είναι μεγαλύτερη στις πρώιμες ηλικίες και γι' αυτό θα ήταν πολύτιμο να αποκτηθούν τιμές της αναλογίας f_t/E_t σε δοκίμια ηλικίας μικρότερης των 16 ημερών, αλλά αυτό είναι πρακτικά αδύνατο αφού αυτά είναι ευπαθή στο τριψίμο ώστε να αντέξουν χωρίς να πάθουν ζημια.

Δοκιμή παρεμποδιζόμενης θερμικής συστολής

Με σκοπό να ερευνηθεί η αλληλεξάρτηση των σχετικών ιδιοτήτων του ισχνού σκυροδέματος στην προκαλούμενη ρηγμάτωση υπό παρεμποδιζόμενη θερμική συστολή, επινοήθηκε μια πρότυπη συσκευή που προκαλούσε ρηγμάτωση με τον ίδιο τρόπο στο εργαστήριο. Για έναν αριθμό μιγμάτων διαφόρων ηλικιών, προσδιορίστηκαν οι θερμοκρασιακές μειώσεις σε μια κατάσταση απόλυτης παρεμπόδισης και σχεδιάστηκαν γραφικά μαζί τις θεωρητικές πτώσεις της θερμοκρασίας κατά την αστοχία. Οι υπολογιζόμενες θερμοκρασιακές μειώσεις υπερβαίνουν τις θεωρητικές κατά ένα περίπου σταθερό περιθώριο, διαφορές των αποδίδονται, τουλάχιστον εν μέρει, στο φαινόμενο του ερπυσμού, το οποίο είναι

πιθανό να είναι μεγαλύτερο στις πρώιμες ηλικίες. Σε κάθε περίπτωση πάντως, είναι φανερό ότι η ρηγμάτωση στις βάσεις οδοστρωμάτων συμβαίνει σαν αποτέλεσμα των μικρών θερμοκρασιακών μειώσεων στις πρώιμες ηλικίες και των ελαφρώς μεγαλύτερων στα επόμενα στάδια ζωής του οδοστρώματος.

2.7 Συμπεράσματα

Το πρόβλημα της παγεμπαδίζουσας θερμικής συστολής είναι μεγάλης πολυπλοκότητας και από τα παραπάνω επιχειρήματα εξαγονται τα εξής συμπεράσματα:

- (1) Η θερμική συστολή που προκύπτει από τις καθημερινές θερμοκρασιακές μειώσεις είναι αρκετή για να προκαλέσει ρηγμάτωση στις βάσεις ισχνού σκυροδέματος.
- (2) Το αποτέλεσμα των διαφοροποιήσεων της θερμοκρασίας είναι πιο έντονο τη νύχτα και τείνει να επιταχύνει την υστέρηση που προκαλείται από θερμική συστολή.
- (3) Η πιο κρίσιμη περίοδος είναι θεωρητικά, η πρώτη νύχτα μετά την τοποθέτηση του ισχνού σκυροδέματος και περαιτέρω ρηγμάτωση οφειλόμενη στη θερμική συστολή θα ήταν απίθανη μετά από αυτήν την περίοδο σε κλιματικές καιρικές συνθήκες.
- (4) Προτείνεται μια ελάχιστη απόσταση ρωγμών (περίπου 5m), αλλά η τιμή, πρακτικά, εξαρτάται από παράγοντες όπως η επικρατούσα παρεμπόδιση της στρώσης έδρασης, η ανακούφιση τάσης υπό ερπυσμό, κλίση που αφορά το σκυρόδεμα, η τιμή του λόγου E_2/E_1 σε διάφορες ηλικίες και ο συντελεστής θερμικής κίνησης.
- (5) Η απόσταση των ρωγμών εξαρτάται από το θερμοκρασιακό καθεστώς στο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια των πρώιμων σταδίων σκλήρυνσης.

Η ύπαρξη κατάλληλης αντοχής στις βάσεις ισχνού σκυροδέματος, όπως και η παραγωγή μιας αποδοκτής κλιματικής ρωγμών, έχει πολύ μεγάλη σημασία, όμως αν τα μοντέλα ρηγμάτωσης είναι καθορισμένα, τουλάχιστον εν μέρει, από περιβαλλοντικές αλλαγές, μη ικανοποιητικές αποστάσεις ρωγμών θα μπορούσαν να προξηγηθούν, παρά τα όρια που έχουν επιβληθεί στην αντοχή. Αν ήταν δυνατό να κανονικοποιηθεί η ρηγμάτωση με τρόπο άλλον από την αβέβαιη επίδραση των θερμοκρασιακών αλλαγών, δύο σπουδαία πλεονεκτήματα θα προέκυπταν. Η συχνότητα εμφάνισης της ρηγμάτωσης εξ' αναπόφευκτου θα μπορούσε να μεταθεί και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ισχνό σκυρόδεμα με υψηλότερη αντοχή. Αυτό θα

επηρεάζει αυξημένη εκμετάλλευση των ενδεχομένως άριστων ιδιοτήτων κατανομής φορτίου του υλικού και θα αύξανε τη σταθερότητα της μεταφοράς φορτίου με το θηλίκωμα των αδρανών στις ρωγμές

2.8 Έλεγχος της ρηγμάτωσης εξ' αναδύσεως

Έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνητές μέθοδοι ελέγχου της απόστασης των ρωγμών που συνοψίζονται ως εξής:

Χρήση σπλισμού στις βάσεις ισχυρού σκυροδέματος

Ο σπλισμός συμβατικού τύπου πλέγματος είναι αποτελεσματικός, αλλά περιπλέκει την κατασκευή. Επίσης έχει προταθεί η προσθήκη ενών χάλυβα ή πολυπροπυλενίου, που βελτιώνουν την καμπτική αντοχή και τις μετά τη ρηγμάτωση ιδιότητες.

Τροποποίηση του ισχυρού σκυροδέματος

Η ασφαλική επάλειψη με χονδρόκοκκα αδρανή, καθώς και η χρήση ισιφυλικών γαλακτωμάτων στα μίγματα φαίνεται να αυξάνουν την ολκιμότητα των βάσεων ισχυρού σκυροδέματος. Σκοπός είναι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας, χωρίς όμως να μειωθεί η αντοχή του υλικού, και παρ'όλα αυτά, η αύξηση της αντοχής σε ρηγμάτωση

Διάπτιμη προρηγμάτωση της βάσης αδοστρώματος

Με ελεγχόμενη προφορτίση, δημιουργούνται ρωγμές ή , πιο επιθυμητά, ενθαρρύνεται η δημιουργία των ρωγμών σε προκαθορισμένα διαστήματα.

Ανεστραμμένη κατασκευή

Μια στρώση από ασυνδεδετο υλικό (χαλίκι) προϋποθέτεται ανάμεσα στη βάση ισχυρού σκυροδέματος και την ασφαλική επιφάνεια, για απομόνωση των κινήσεων και αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων πάνω από τις ρωγμές

Ενδοίμεση στρώση

Έχει προταθεί, πριν τις ασφαλικές στρώσεις, η κατασκευή μιας στρώσης απορρόφησης των τάσεων, που περιέχει 3 ως 6mm τριμμένων ελαστικών υλικών, μαζί με ορυκτό φίλτρο και ασφαλικό γαλάκτωμα.

2.9 Σχόλια

Από όλα τα παραπάνω επιχειρήματα, διαφαίνεται ότι η συχνότητα εμφάνισης της ρηγματώσεως εξ' αναδίφσεως, δεν μπορεί να ελεγχθεί με την επιβολή ενός ανώτατου ορίου αντοχής της βάσης ισχνού σκυροδέματος, όπως είχε υποτεθεί αρχικά, και χρειάζεται περαιτέρω μελέτη των μεθόδων ελέγχου των ρωγμών, ιδιαίτερα αυτών που διατηρούν τις ιδιότητες κατανομής φορτίου της βάσης.

Κεφάλαιο 3

Ασφαλτικά γαλακτώματα

3.1 Γενικά

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα, είναι ρευστά ασφαλτικά υλικά, αποτελούμενα από σωματίδια ασφάλτου, μεγέθους 1-10μm, που βρίσκονται σε μόνιμη αιώρηση μέσα στο νερό. Δηλαδή, τα ασφαλτικά γαλακτώματα είναι προϊόντα γαλακτωματοποίησης της ασφάλτου με νερό. Το νερό είναι η συνεχής η εσωτερική φάση, και η ασφάλτος η ασυνεχής ή εξωτερική φάση. Η τυπική αναλογία ασφάλτου και νερού είναι 60%/40%, κατά βάρος, αντίστοιχα.

Η ιμάνηση των σωματιδίων της ασφάλτου επιτυγχάνεται με την ομοιομορφία φόρτιση ιονίων κατά το στάδιο της γαλακτωματοποίησης, με την προσθήκη χημικού προσθέτου, που ονομάζεται γαλακτωματοποιητής.

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή έργων οδοποιίας και αεροδρομίων. Με τη διανομή τους στην επιφάνεια των οδοστρωμάτων ή των αδρανών, διασπάνται, καταλείποντας επί αυτών έναν ασφαλτικό υμένιο, που αποτελεί την συνδετική ύλη.

3.2 Παραγωγή ασφαλτικών γαλακτωμάτων

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα παράγονται σε ειδική βιομηχανική μονάδα που αποτελείται από αποθήκες πρώτων υλών, αντλίες παροχής και δίκτυο σωληνώσεως, σύστημα γαλακτωματοποίησης, και δεξαμενές, με δυνατότητα ανάδευσης, για την αποθήκευση του τελικού προϊόντος.

Ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται ασφαλτος (συνήθως τύπου 80/100 ή 60/70pen), νερό, γαλακτωματοποιητής, χημικό για την επίτευξη υδατοδιαλυτότητας του γαλακτωματοποιητή, σταθεροποιητής, και πολύ μικρή ποσότητα ειδικών ελαίων και διαλυτών.

3.3 Ταξινόμηση και τύποι γαλακτωμάτων

Με βάση το είδος της επιφανειακής φόρτισης των σωματιδίων της ασφάλτου, τα ασφαλτικά γαλακτώματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα κατιονικά ή

οξίνα, όπου τα σωματίδια είναι φορτισμένα θετικά, και τα ανιονικά ή αλκαλικά, όπου τα σωματίδια είναι φορτισμένα αρνητικά. Τα θετικά φορτισμένα σωματίδια, όταν διέλθει ηλεκτρικό ρεύμα, οδεύουν και επικάθονται στην Kathodo, εξ' ου και η ονομασία κατιονικά. Αντίστοιχα, τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια, όταν διέλθει ηλεκτρικό ρεύμα, οδεύουν και επικάθονται στην αναδο, εξ' ου και η ονομασία ανιονικά. Η αναλυτική ονομασία οξίνα ή αλκαλικά, προέρχεται από το γεγονός ότι τα σωματίδια βρίσκονται σε αιώρηση αντίστοιχα σε οξίνο ($pH < 7$) ή αλκαλικό ($pH > 7$) υδατικό περιβάλλον.

Ανάλογα με το ρυθμό διάσπασης, τα ασφαλτικά γαλακτώματα διακρίνονται και σε τρεις άλλες κατηγορίες. Αυτές είναι τα γαλακτώματα βραδείας, μέσης και ταχείας διάσπασης. Επίσης τα γαλακτώματα χαρακτηρίζονται από το ποσοστό της ασφάλτου που περιέχουν, από το ιξώδες αυτών, και από τη σκληρότητα της ασφάλτου.

Τα γαλακτώματα προδιαγράφονται σε κάθε χώρα από τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα, τα ασφαλτικά γαλακτώματα προδιαγράφονται από την ΠΤΠ Α202, για ανιονικού τύπου, και από την ΠΤΠ Α203, για κατιονικού τύπου. Για την ευκολότερη διάκριση των γαλακτωμάτων, χρησιμοποιείται συνδυασμός γραμμμάτων και αριθμών. Έτσι, με ΑΕ συμβολίζονται τα ανιονικά γαλακτώματα, ενώ με ΚΕ τα κατιονικά. Ο αριθμός που ακολουθεί, δηλώνει το βαθμό διάσπασης αυτών, τις περιοχές εφαρμογής αλλά και την περιεκτικότητα σε άσφαλτο. Οι αριθμοί είναι από το 1 ως το 5, με το 1 να δηλώνει γαλακτώμα ταχείας διάσπασης, και το 5 γαλακτώμα βραδείας διάσπασης.

3.4 Χρήσεις και πλεονεκτήματα γαλακτωμάτων

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα χρησιμοποιούνται, διεθνώς, σε όλο το φάσμα των έργων οδοποιίας, όπως παραγωγή ψυχρών ασφαλτομιγμάτων παντός τύπου, ασφατικές και συγκολλητικές επαλλειψες, προεπάλειψη, εμποτισμό σκυρωτών, ψυχρά ασφαλτομίγματα με δυνατότητα αποθήκευσης για πλήρωση λάκκων, πλήρωση επιφανειακών ρεγμάτων οδοστρωμάτων, σταθεροποίηση κρηνών, κλπ.

Η εφαρμογή των αντίστοιχου τύπου γαλακτωμάτων, ταχείας, μέσης ή βραδείας διάσπασης, είναι κυρίως συνάρτηση του μίγματος των αδρανών που χρησιμοποιείται και ειδικότερα της σχετικής επιφάνειας αυτών. Έτσι, κατά κανόνα, με ανοικτού τύπου μίγματα αδρανών (μικρή σχετική επιφάνεια αδρανών), χρησιμοποιούνται ταχείας διάσπασης γαλακτώματα. Με κλειστού τύπου μίγματα αδρανών (μεγάλη σχετική

επιφάνεια αδρανών), χρησιμοποιούνται βραδείας διάσπασης γαλακτώματα. Ενώ για ημίκλειστου τύπου μίγματα αδρανών, χρησιμοποιούνται γαλακτώματα μέσης διάσπασης.

Στην Ελλάδα, η χρήση των ασφαλτικών γαλακτωμάτων υπολείπεται πολύ σε σχέση με τη χρήση της ασφάλτου σε έργα οδοποιίας, παρόλα που αυτά συγκρινόμενα με τα ασφαλτικά διαλύματα αλλά και την ασφάλτο, έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- σημφέρουν περισσότερα από άποψη εξοικονόμησης και δαπάνης ενέργειας
- συμβάλλουν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- καθιστούν τις ασφαλτικές εργασίες ασφαλέστερες και πιο γρήγορες
- επικαλύπτουν, επιτυχώς, με ασφάλτο υγρά αδρανή και υγρές επιφάνειες
- αποτρέπουν κατασκευαστικές αστοχίες οφειλόμενες σε παρατεταμένη θερμομυση της ασφάλτου
- δρουν καλύτερα σε εργασίες συγκολλητικής επάλαιψης και προεπάλαιψης

Όλα αυτά οφείλονται στο πολύ χαμηλό ιξώδες των γαλακτωμάτων, σε σύγκριση με της ασφάλτου και των ασφαλτικών διαλυμάτων (τα οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη νερού, και όχι διαλύτη), κάτι που δεν προϋποθέτει τη χρήση θερμότητας σε κανένα στάδιο εφαρμογής

3.5 Γαλακτωματοποιητές

Οι γαλακτωματοποιητές, ή παράγοντες γαλακτάσεως, είναι χημικά πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να αποφευχθεί η συνένωση των σωματιδίων της ασφάλτου και άρα ο διαχωρισμός των δύο φάσεων (ασφάλτου και νερού), δηλαδή για να μην διασπαστεί το γαλάκτωμα.

Για τα ανιονικά γαλακτώματα, οι γαλακτωματοποιητές είναι λιπαρά άξια, ενώ για τα κατιονικά, αμίνες. Κάθε μόριο γαλακτωματοποιητή έχει δύο ομάδες, την υδροφοβό, που είναι μη πολική και διαλύεται στην ασφάλτο, και την υδροφιλική, που είναι πολική και διαλύεται στο νερό. Κατά τη γαλακτωματοποίηση τα μόρια του γαλακτωματοποιητή, επικάθονται στα σφαιρίδια της ασφάλτου, φορτίζοντας την επιφάνειά τους πωύλογα. Έτσι αναπτύσσονται ωστικές δυνάμεις μεταξύ των σφαιριδίων, που εξασφαλίζουν την μόνιμη ιωύρηση αυτών μέσα στο νερό, και συνεπώς τη σταθερότητα του ασφαλτικού γαλακτώματος. Ανάλογα με την πολικότητα του υδροφιλικού μέρους, τα γαλακτώματα χαρακτηρίζονται ως ανιονικά ή κατιονικά

3.6 Διάσπαση γαλακτώματος

Τα γαλακτώματα, όταν έρθουν σε επαφή με το μίγμα των αδρανών ή την επιφάνεια του οδοστρώματος, αρχίζουν να διασπώνται. Δηλαδή τα σωματίδια της ασφάλειν παύουν να αιωρούνται και αρχίζουν να επικάθονται πάνω στην επιφάνεια των αδρανών. Η διατάραξη αυτή του συστήματος, μπορεί να επέλθει είτε από απώλεια ύδατος, (μυροδότηση γαλακτώματος), είτε λόγω μείωσης της περιεκτικότητας του γαλακτωματοποιητή κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο. Η διάσπαση του γαλακτώματος υποδεικνύεται από την αλλαγή του χρώματος του από καφέ σε μαύρο.

Στα αλκαλικά γαλακτώματα η διάσπαση οφείλεται κυρίως στην αφυδάτωση αυτών. Το νερό αρχικά απορρινφάται από τα αδρανή και κινούνται εξιτρίζεται. Έτσι επέρχεται συσσωμάτωση, φυσική αναπόθεση και τέλος συγκόλληση και πρόσφυση των μικυλίων (σωματίδια ασφάλειν) στην επιφάνεια των αδρανών, και διάσπαση του γαλακτώματος. Πλήρης διάσπαση επέρχεται μόνο μετά την ολική, ή την κατά πολύ μεγάλο ποσοστό, μηχανική απομάκρυνση του νερού από το σύστημα γαλακτωματοποιήση. Αλλιώς αυτό μπορεί να επαναγαλακτωματοποιηθεί με την παρουσία νερού, πχ εξαιτίας βροχής.

Στα κατιονικά γαλακτώματα η διάσπαση οφείλεται αρχικά σε χημική αντίδραση και κατοπιν στην αφυδάτωση αυτών, ενώ γίνεται σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση, τα πλεονάζοντα μόρια του γαλακτωματοποιητή και τα μικύλια, προσροφώνται επί της επιφάνειας των αδρανών, λόγω ηλεκτροστατικής έλξης. Στη δεύτερη φάση, λαμβάνει χώρα βίαιη συσσωμάτωση και φυσική αναπόθεση των σωματιδίων, λόγω διατάραξης της ισορροπίας του συστήματος, και στην τρίτη φάση, αφυδάτωση του γαλακτώματος και τελική διάσπαση αυτού. Οι τρεις φάσεις συμβαίνουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, μερικων λεπτών, και έτσι εκμηδενίζεται ο κίνδυνος επαναγαλακτωματοποίησης του συστήματος. Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα των κατιονικών, έναντι των ανιονικών γαλακτωμάτων. Ο μηχανισμός διάσπασης των κατιονικών γαλακτωμάτων είναι ίδιος, είτε χρησιμοποιούνται πυριτικά (ηλεκτραρνητικά) αδρανή, είτε παβεστολιθικά (ηλεκτροθετικά) αδρανή, αφού έχουν το προσθετο πλεονέκτημα ότι μπορούν να προσφίονται σε όλα τα αδρανή, σε αντίθεση με τα ανιονικά που προσφύονται μόνο στα ηλεκτροθετικά αδρανή.

3.7 Ιδιότητες ασφαλιστικού γαλακτώματος

Το παραγόμενο ασφαλιστικό γαλάκτωμα θα πρέπει να είναι σταθερό ώστε να μπορεί να αποθηκευθεί για κάποιο χρονικό διάστημα, αλλά και να μεταφερθεί στο έργο χωρίς να διασπασθεί. Επίσης πρέπει να έχει το κατάλληλο ιξώδες για τον ηρεασμό του. Τέλος θα πρέπει να επικολλύεται καλά επι των αδρανών και να διασπάται με τον επιθυμητό ρυθμό διάσπασης. Η “ευστάθεια” και η “διάσπαση” είναι ιδιότητες που έρχονται σε αντίθεση, αλλά απαιτούνται σε διαφορετικά στάδια χρήσης του γαλακτώματος. Η πρώτη κατά την αποθήκευση ενώ η δεύτερη κατά την εφαρμογή αυτού.

α) Αποθηκευτική ευστάθεια γαλακτώματος

Η αποθηκευτική ευστάθεια του γαλακτώματος έχει ιδιαίτερη σημασία, διότιλλιώς το γαλάκτωμα δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά ή θα ήταν ακατάλληλο για χρήση. Επηρεάζεται κυρίως από το μέγεθος των σφαιριδίων της ασφάλτου αλλά και από την κατανομή μεγέθους αυτών. Έτσι, μεγάλο μέγεθος σφαιριδίων, και σε συνδυασμό με ανομοιόμορφη κατανομή αυτού, συνεπάγεται καθίζηση και συσώρευση αυτών στον πυθμένα της δεξαμενής ή του βαρελιού, και μάλιστα με μεγάλη ταχύτητα καθίζησης. Κατά την πτώση τους τα μικύλια παρασύρουν και άλλα σωματίδια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στον πυθμένα μια περιοχή πλούσια σε άσφαλο και μια πιο πάνω, φτωχότερη. Το φαινόμενο αυτό της συσώρευσης είναι αναστρέψιμο, αφού μια απλή ανάδευση επαναφέρει το σύστημα στην αρχική του μορφή. Όμως, με την περαιτέρω συσώρευση των ασφαλισκών σωματιδίων στον πυθμένα, επέρχεται συγκόλληση και συγχώνευση αυτών σε μία ενιαία ασφαλισκή μάζα, φαινόμενο μη αναστρέψιμο. Στην περίπτωση αυτή, το γαλάκτωμα είναι ακατάλληλο για χρήση, αφού, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η άσφαλτος, σχεδόν στο σύνολό της, βρίσκεται συγκολλημένη στον πυθμένα του βαρελιού ή της δεξαμενής, εκτός η περιεκτικότητα του γαλακτώματος σε άσφαλο έχει μειωθεί.

Η αποθηκευτική ευστάθεια του γαλακτώματος επηρεάζεται επίσης από το ιξώδες του, από το ειδικό βάρος της ασφάλτου, και από την περιεκτικότητά του γαλακτώματος σε γαλακτωματοποιητή. Έτσι, γαλακτώματα με μικρό ιξώδες και με άσφαλο μεγάλου ειδικού βάρους, είναι πιο επιρρεπή σε καθίζηση ενώ αυτά με υψηλό ιξώδες και με άσφαλο μικρότερου ειδικού βάρους. Η παρουσία μεγαλύτερης

ποσότητας γαλακτωματοποιητή στο σύστημα, επιβραδύνει το ρυθμό καθίζησης. Όμως αυξάνει τόσο το κόστος, όσο και το χρόνο διάσπασης του γαλακτώματος, γι' αυτό και δεν προτιμάται ως λύση.

Κατά την αποθήκευση ή μεταφορά των γαλακτωμάτων, δε θα πρέπει να παραβλέπεται η καθαρότητα των δεξαμενών ή βαρελιών, τα οποία θα πρέπει να είναι ερμητικά κλεισμένα ή πλήρως γεμισμένα. Αυτό γιατί με την επαφή με το αέριό της ατμόσφαιρας αλλά και την μερική εξάτμιση του υδάτος στην επιφάνεια, επέρχεται επιφανειακή διάσπαση του γαλακτώματος, η οποία εμφανίζεται με τη δημιουργία "κρούστας" ασφάλτου.

Ένα τελευταίο σημαντικό σημείο προσοχής είναι η μη ανάμιξη ανιονικού και κατιονικού γαλακτώματος, διότι λόγω της αντίθετης ηλεκτροστατικής τους φόρτισης, επέρχεται στιγμιαία διάσπαση αυτών.

β) Ιξώδες γαλακτώματος

Το ιξώδες του γαλακτώματος επηρεάζει κυρίως την ικανότητά του να ψεκάζεται επιτυχώς σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, στις οποίες χρησιμοποιούνται τα ασφαλτικά γαλακτώματα, αλλά και να επικαλύπτεται επιτυχώς τα αδρανή με ασφάλτο. Επίσης επηρεάζει την εργασιμότητα του ψυχρού ασφαλτομίγματος στο στάδιο της ανάμιξης και της συμπίκνωσης.

Το ιξώδες αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας της ασφάλτου στο γαλάκτωμα, καθώς και με την πτώση της θερμοκρασίας. Η αύξηση αυτή είναι πιο ισοηθική στα γαλακτώματα με περιεκτικότητα ασφάλτου πάνω από 65%. Το ιξώδες του γαλακτώματος αυξάνεται ελαφρώς, με τη μείωση του ιξώδους της ασφάλτου κατά τη γαλακτωματοποίηση. Επίσης σχετική μείωση του ιξώδους παρατηρείται με τη μείωση της αξότητας του υδατικού διαλύματος και την αύξηση της περιεκτικότητας του γαλακτωματοποιητή. Ο τύπος (σκληρότητα) της ασφάλτου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του γαλακτώματος, επηρεάζει το ιξώδες αυτού, σε μικρότερο βαθμό, ανάλογα με τον τύπο του γαλακτωματοποιητή.

γ) Συγκολλητικότητα γαλακτώματος : ισχύριση

Σε όλες τις περιπτώσεις χρήσης ασφάλτου, η ανάγκη καλής συγκόλλησης αυτής με την επιφάνεια των αδρανών είναι αρκετίως σημαντική. Στα γαλακτώματα, με την έναρξη της διύσπωσης, αρχίζει η εναπόθεση της ασφάλτου πάνω στα αδρανή, και ακολούθως η πρόσφυσή της. Τα κατιονικά γαλακτώματα προσφύονται ισχυρότερα

από τα ανιονικά, και επίσης, στα κατιονικά γαλακτώματα η συνεκτικότητα τόσο μεταξύ της ασφάλτου και των αδρανών όσο και του ασφαλτομίγματος, αναπτύσσεται πολύ πιο γρήγορα.

Οι παράγοντες, που επηρεάζουν τη συγκολλητικότητα του γαλακτώματος, και κατ'επέκταση, και της ασφάλτου με τα αδρανή, είναι: ο τύπος και η ποσότητα του γαλακτωματοποιητή, η ποιότητα και ο εύρος της ασφάλτου, το pH του υδατικού διαλύματος του γαλακτωματοποιητή, και ο πίεσης των αδρανών. Όσον αφορά την ποιότητα των αδρανών, έχει προαναφερθεί ότι τα κατιονικά γαλακτώματα προσφύονται άριστα με όλα τα αδρανή κατάλληλα για ασφαλτομίγματα, ενώ τα ανιονικά προσφύονται καλύτερα σε ασβεστολιθικά αδρανή.

δ) Ρυθμός διάσπασης γαλακτώματος

Ο ρυθμός διάσπασης του γαλακτώματος είναι ένας από τους σοβαρότερους παράγοντες για την καλή συμπεριφορά του γαλακτώματος και την επιτυχία της κατασκευής. Θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε, στην περίπτωση παραγωγής ψυχρών ασφαλτομιγμάτων, ή στην περίπτωση που το ασφαλτικό γαλάκτωμα ψεκάζεται, να αναπτύσσεται όσο το δυνατόν συντομότερα η συνεκτικότητα ασφάλτου και αδρανών, έτσι ώστε να αποδίδεται το έργο σε κυκλοφορία το ταχύτερο. Ειδικά για την πρώτη περίπτωση, θα πρέπει επιπλέον να παρέχει τον απαιτούμενο χρόνο για την ομοιόμορφη και πλήρη διασπορά της ασφάλτου στην επιφάνεια των αδρανών. Ανάλογες είναι οι απαιτήσεις του ρυθμού διάσπασης και για τις άλλες επιφυγές:

Ο ρυθμός διάσπασης του γαλακτώματος εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- τη σύνθεση του γαλακτώματος. Ιδιαίτερα στα κατιονικά γαλακτώματα, η αλλαγή του ποσοστού του γαλακτωματοποιητή, της ασφάλτου και του οξέως στο γαλάκτωμα, καθώς και της αναλογίας οξέως / γαλακτωματοποιητή, επιφέρει μεταβολές στο ρυθμό διάσπασης. Επίσης, μείωση των διαστάσεων των σφαιριδίων της ασφάλτου και της κατανομής των κόκκων, μειώνει το χρόνο διάσπασης.

- το ρυθμό εξάτμισης και ύδατος-κλιματολογικές συνθήκες. Επειδή ο ρυθμός εξάτμισης συνδυάζεται με τις κλιματολογικές συνθήκες, ο ρυθμός διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, την αύξηση της έντασης του ανέμου, ή τη μείωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Πιο ευαίσθητα στις παραπάνω μεταβολές είναι τα κατιονικά γαλακτώματα.

- την απορροφητικότητα των αδρανών. Σχετίζεται με την απώλεια ύδατος από το γαλάκτωμα. Όταν χρησιμοποιούνται πορώδη αδρανή, ο ρυθμός διάσπασης είναι

τιχύτερος. Εξαιρετικό παρόδη αδρανή (μεγαλύτερη του 3% απορρόφηση σε νερό), είναι καλό να αποφεύγονται.

- τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των αδρανών: Αυτά είναι, η κοκκομετρική διαβάθμιση και ο μέγιστος κοκκος του μίγματος των αδρανών (σχετική επιφάνεια αδρανών), το ποσοστό και το είδος του φίλλερ, η σχετική υγρασία, η υφή της επιφανείας και το είδος του μητρικού πετρώματος. Ο ρυθμός διάσπασης αυξάνει με την αύξηση της ειδικής επιφάνειας των αδρανών (υπαρξη περισσότερων λεπτόκοκκων υλικών), καθώς και με την αύξηση του ποσοστού του φίλλερ. Αύξηση της σχετικής υγρασίας των αδρανών επιβραδύνει το ρυθμό διάσπασης του γαλακτώματος. Σχεδόν πάντα, επιβιάζεται η διαβροχή των αδρανών με μικρή ποσότητα νερού (1-3% περίπου), ώστε να ουδετεροποιούνται κατά ένα βαθμό, τα επιφανειακά ιόντα του πετρώματος και έτσι να αποφεύγεται η βίαιη διάσπαση του γαλακτώματος, που οδηγεί στην ανομοιόμορφη διανομή της ασφάλτου στο μίγμα.

- την παρενόχληση του σκευήματος γαλακτώμα / αδρανή κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του ασφαλτομίγματος και τη διάστρωση του τασητά. Αν η παραγωγή και διέστρωση γίνει με ειδικό μηχάνημα, και όχι επί της οδού με grader, εξασκούνται περισσότερες δυνάμεις στο σύστημα και ο ρυθμός διάσπασης αυξάνεται. Ομοίως και όταν το σύστημα υποβάλλεται σε κυλίνδρωση, γι' αυτό και συνιστάται κυλίνδρωση οποιασδήποτε κατασκευής.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο ρυθμός διάσπασης του γαλακτώματος μπορεί να τροποποιηθεί και από επιπρόσθετες χημικές ουσίες, που έχουν στόχο να επιταχύνουν τη διάσπαση του γαλακτώματος και να βελτιώσουν περαιτέρω την πρόσφυση ασφάλτου και αδρανών.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 4

Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Τα τσιμεντόδετα αμμοχαλικά (κατεργασμένα ή σταθεροποιημένα με τσιμέντο, αδρανή υλικά), χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και από ρηγμάτωση λόγω παρεμπόδισης των μετακινήσεων. Η ρηγμάτωση αυτή αποδίδεται στη μικρή δυνατότητα παραμόρφωσης, που έχουν τα υλικά αυτά, όπως αναλυτικότερα αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.

Τα οδοστρώματα που περιλαμβάνουν τσιμεντόδετες στρώσεις, έχουν το μειονέκτημα να αναδύεται η αναπόφευκτη ρηγμάτωση των στρώσεων αυτών, στην επιφάνεια των ασφαλτοτάπητα. Για την ελάττωση ή ελαχιστοποίηση του μειονεκτήματος αυτού, έχουν προταθεί διάφορα μέτρα, εκ των οποίων, το πλέον αποδοτικό φαίνεται ότι είναι η προρηγμάτωση των τσιμεντόδετων στρώσεων. Ένας άλλος τρόπος θα μπορούσε να ήταν η μεταβολή των χαρακτηριστικών των τσιμεντόδετων υλικών, εκτετα να μειωθεί η επιρρέπειά τους σε ρηγμάτωση.

Στην εργασία αυτή, διερευνώνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά μιγμάτων κατεργασμένων με τσιμέντο και γαλάκτωμα σε μικρό ποσοστό, σε μία προσπάθεια να εκτιμηθεί η επίδραση της περιεκτικότητας σε γαλάκτωμα, στην επιρρέπεια για ρηγμάτωση, των τσιμεντόδετων αμμοχαλικών.

Για το σκοπό αυτό, πειρασκανυλάστηκαν επτά μίγματα με ποσοστά, 2% τσιμέντο με 2% γαλάκτωμα, 3% τσιμέντο με 0%, 1% και 2% γαλάκτωμα, και 4% τσιμέντο με 0%, 1% και 2% γαλάκτωμα, και προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας σε κοπή και θλίψη, καθώς και οι αντίστοιχες αντοχές τους.

Κεφάλαιο 5

Υλικά, παρασκευή και συντήρηση δοκιμίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την παρασκευή των μγμάτων και εν συνεχεία των δοκιμίων.

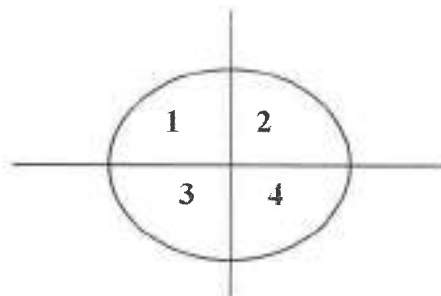
5.1 Υλικά

Για την παρασκευή των μγμάτων χρησιμοποιήθηκε ανιονικό ασφαλτικό γαλάκτωμα ΑΕ-5, τσιμέντο Η Α 32.5 , θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι) και νερό

5.2 Δειγματοληψία

Αρχικά κοσκινίζεται το διαθέσιμο χαλίκι έτσι ώστε οι κόκκοι να έχουν μέγεθος μικρότερο ή ίσο των 19mm. Η απαίτηση αυτή προκύπτει από το γεγονός, ότι αν ο κόκκος είναι μεγάλος σε σχέση με την ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου τότε τυχόν παρουσία ενός ή περισσότερων μεγάλων κόκκων στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου θα επηρεάσει σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού.

Γίνεται τετραμερισμός σε δείγματα από ύμνο, γαρμπίλι και χαλίκι με την εξής διαδικασία. Λαμβάνεται κάθε δείγμα χωριστά, διαστρώνεται σε μέρος καθαρό, ώστε να μην έχει τυχόν πηκισίμεις, και χωρίζεται σε 4 ίσα μέρη, όπως φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.2.1: Τετραμερισμός δείγματος

Γίνεται ένωση του 1 με το 4, ξεχωρίζεται από τη σειρά και στρώνεται ξανά με ομοιο τρόπο. Ενώνονται το 1 με το 4 και πετιούνται τα 2 και 3. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το δείγμα που μένει να αντιστοιχεί στην επιθυμητή ποσότητα. Λαμβάνονται έτσι 3 δείγματα άμμου (4000 gr το κάθε ένα), 2 δείγματα από γαρμπίλι (3000 gr το κάθε ένα) και 3 δείγματα από χαλίκι (4000 gr το κάθε ένα).

Μετά τον τετραμερισμό της άμμου, τα δείγματα που λαμβάνονται, πλένονται και τοποθετούνται σε φούρνο σπυς 105 °C για μία ημέρα, ώστε να ξηρανθούν. Το πλύσιμο της άμμου γίνεται χρησιμοποιώντας ένα κόσκινο Νο 200 , και ένα με μεγαλύτερες οπές. Το νερό που διέρχεται μέσα από τα κόσκινα με την άμμο πρέπει να είναι διαυγές, ώστε να θεωρηθεί η διαδικασία του πλυσίματος της άμμου τελειωμένη.

5.3 Κοκκομετρική ανάλυση

Μετά την ξήρανση των αδρανών, τα δείγματα αυτών τοποθετούνται ένα ένα στην ηλεκτρική κοσκινίστρα (ειδικό μηχάνημα στο οποίο τα κόσκινα τοποθετούνται με φθίνουσα σειρά μεγέθους οπής από πάνω προς τα κάτω) και κοσκινίζονται για 10 έως 15 λεπτά. Στη συνέχεια ζυγίζεται το υλικό που έχει συγκρατήσει κάθε κόσκινο, και προκύπτει η κοκκομετρική διαβάθμιση κάθε δείγματος, αλλά και του τελικού μίγματος (πίνακας 5.3.1).

Πίνακας 5.3.1: Προσδιορισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών

πρότυπο μέγεθος κόσκινου σε mm	Συγκρατούμενο βάρος gr			Συγκρατούμενο βάρος %		
	άμμος	γαρμπίλι	χαλίκι	άμμος	γαρμπίλι	χαλίκι
	4000gr	3000gr	4000gr			
19	0	0	112,15	0	0	2,80
16	0	0	1505,90	0	0	37,65
12,5	0	60,30	1740,85	0	2,01	43,52
9,5	0	1389,40	557,25	0	46,31	13,93
8,3	0	1340	48,95	0	44,87	1,22
4,75	7,55	166,35	7,25	0,19	5,55	0,18
2,36	703,50	25,75	0	17,59	0,86	0
1,18	915,20	0	0	22,88	0	0
0,8	833,35	0	0	20,83	0	0
0,3	427,95	0	0	10,70	0	0
0,15	297,10	0	0	7,43	0	0
0,08	179,80	0	0	4,50	0	0
Παιπάλη	635,55	18,20	0	15,89	0,61	0,69

Πίνακας 5.3.1: (συνέχεια)

Διερχόμενο βάρος %			Διερχόμενο βάρος %	πρότυπο μέγεθος
άμμος	γαρμπίλι	χαλίκι	Μίγμα	κόσκινου mm
100	100	97,20	99,44	19
100	100	59,55	91,91	16
100	97,99	18,03	82,80	12,5
100	51,68	2,10	70,75	9,5
100	7,01	0,87	61,58	6,3
99,81	1,47	0,69	60,32	4,75
82,22	0,61	0,69	49,59	2,36
59,34	0,61	0,69	35,87	1,18
38,51	0,61	0,69	23,37	0,6
27,61	0,61	0,69	16,95	0,3
20,38	0,61	0,69	12,49	0,15
15,89	0,61	0,69	9,79	0,08
0	0	0	0	Παιπάλη

Προκύπτει η κοκκομετρική καμπύλη που κρίνεται κατάλληλη για την παρασκευή των μεγμάτων (σχήμα 5.3.1)



Η αναλογία των υλικών προκύπτει

- 60% άμμος
- 20% γαρμπίλι
- 20% χαλίκι

5.4 Δοκιμή Proctor

Η δοκιμή συμπύκνωσης (Proctor) γίνεται ώστε να υπολογιστεί το απαιτούμενο ποσοστό υγρασίας στα μίγματα που θα παρασκευαστούν. Για τον σκοπό αυτό θα παρασκευαστούν 5 διαφορετικά μίγματα (των 3000gr το κάθε ένα), με αναλογίες 60% άμμο, 20% γαλμαλάι, 20% χαλίκι, όπως προσαρμόστηκε πριν. Σε κάθε ένα από τα οποία θα διαφοροποιείται το ποσοστό υγρασίας, δηλαδή η ποσότητα γαλακτώματος και νερού (αναλογία 1:1).

Για την παρασκευή των δοκιμών, χρησιμοποιείται η μήτρα Proctor, της οποίας τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 5.4.1

Πίνακας 5.4.1 : Χαρακτηριστικά μήτρας Proctor

ύψος	διάμετρος	βάρος	όγκος
116mm	91,4mm	4534,4gr	$7,611 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

Η συμπύκνωση του μίγματος γίνεται με ηλεκτρώσφυρα, σε 2 στρώσεις, και με τρόπο ώστε τα πιο χονδροκκοκκώδη να βρίσκονται στον πυρήνα των δοκιμών.

Προκύπτουν τα άκρια που φαίνονται στον πίνακα 5.4.2, όπου

$B_{\text{μίσμα}}$ είναι το βάρος του μίγματος, νερό και γαλακτώμα, που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μίγμα.

$B_{\text{ολικό}}$ είναι το βάρος κάθε δοκιμίου μαζί με την μήτρα.

$B_{\text{καθαρό}}$ είναι το βάρος κάθε δοκιμίου αν από το ολικό αφαιρεθεί το βάρος της μήτρας Proctor.

$m_{\text{ξηρό}}$ είναι το ξηρό βάρος των αδρανών για το οποίο ισχύει η σχέση

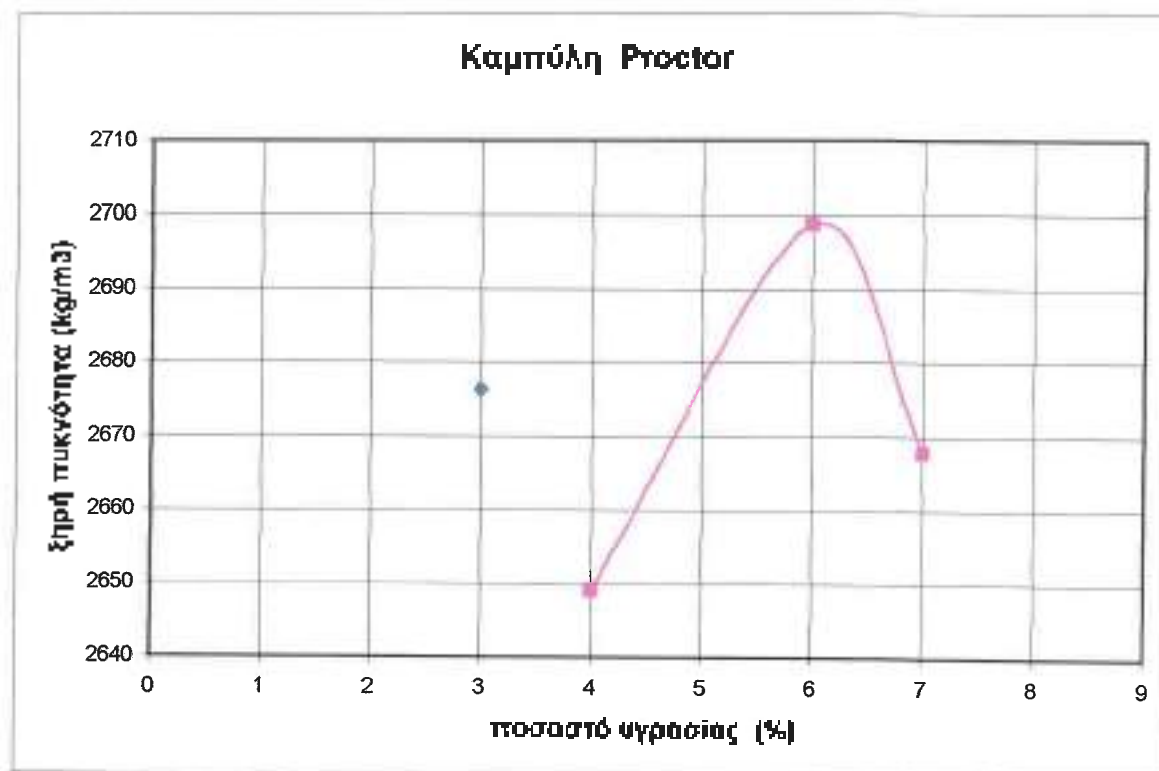
$$m_{\text{ξηρό}} = (\% \text{ υγρασία}) \times m_{\text{μίσμα}} - B_{\text{μίσμα}}$$

$P_{\text{ξηρό}}$ είναι η ξηρή πυκνότητα κάθε δοκιμίου που προκύπτει αν διαφραθεί το ξηρό βάρος αυτών με τον όγκο τους (που είναι ίσος με τον όγκο της μήτρας Proctor).

Πίνακας 5.4.2 : Χαρακτηριστικά δοκιμών Proctor

α/α μίγμα	υγρασία (%)	B υγρού (gr)	B ολικό (gr)	B καθαρό (gr)	m ξηρό (gr)	P ξηρό (kg/m ³)
1	3	90	6632,5	2098,1	2036,99	2676,38
2	4	120	6631,3	2096,9	2016,25	2649,13
3	6	180	6711,6	2177,2	2053,96	2698,67
4	7	210	6707	2172,6	2030,47	2667,81
5	8	240	6755,2	2220,8	2056,3	2701,75

Κατασκευάζεται η καμπύλη Proctor (σχήμα 5.4.1), από την οποία προκύπτει βέλτιστη υγρασία 5,8%. Για τα μίγματα που θα παρασκευαστούν λαμβάνεται υγρασία 6%.



Σχήμα 5.4.1: Καμπύλη Proctor

5.5 Παρασκευή μιγμάτων

Όπως ήδη αναφέρθηκε (κεφ. 5.3), τα μίγματα που θα παρασκευαστούν θα περιέχουν άμμο, γαρμπύλα και χαλίκι σε αναλογίες 60%, 20% και 20% αντίστοιχα. Η ποσότητα του τσιμέντου που προστίθεται συμπεριλαμβάνεται στη συνολική ποσότητα ξηρού υλικού του μίγματος. Η ποσότητα της υγρασίας σε κάθε μίγμα θα είναι 6% επί του ξηρού υλικού. Σε αυτήν περιέχεται η ποσότητα του γαλακτίμματος (που αποτελείται από 40% νερό και 60% άσφαλτο) και η ποσότητα καθαρού νερού.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, αποφασίστηκε να παρασκευαστούν 7 μίγματα με διάφορες αναλογίες τσιμέντου και γαλακτίμματος, σε μικρά ποσοστά. Οι αναλογίες αυτές φαίνονται στον πίνακα 5.5.1.

Πίνακας 5.5.1 : Αναλογίες γαλακτώματος και τσιμέντου για όλα τα μίγματα

α/α μίσμα	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντο (%)
1	2	2
2	1	3
3	0	3
4	0	4
5	2	3
6	1	4
7	2	4

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής κάθε μίγματος. Αρχικά ζυγίζονται τα αδρανή (άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι), με τη βοήθεια ζυγαριάς ακριβείας 20gr. Τοποθετείται το άδειο δοχείο με το οποίο θα διεξάγεται η μέτρηση πάνω στη ζυγαριά, μηδενίζεται η ένδειξη και στη συνέχεια προστίθεται σε αυτό το υλικό και ζυγίζεται. Με τον ίδιο τρόπο γίνεται το ζύγισμα του νερού, του τσιμέντου και του ασφαλικού γαλακτώματος, με χρήση ζυγαριάς ακριβείας 0.1gr. Για το ζύγισμα του νερού το δοχείο που χρησιμοποιείται έχει προηγουμένως βλαχτεί.

Αφού ζυγιστούν όλα τα αδρανή ρίχνονται στον αναμικτήρα, ο οποίος από πριν έχει αλειφθεί με γαλάκτωμα, ώστε να αποφευχθεί η επικόλληση μέρους του γαλακτώματος του μίγματος σε αυτόν. Προστίθενται διαδοχικά οι ποσότητες νερού, γαλακτώματος και τσιμέντου με ολιγόλεπτες διακοπές στη λειτουργία του αναμικτήρα, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ομοιομορφία στο μίγμα. Μετά την ανάμιξη των υλικών ακολουθεί δεκάλεπτη αναμονή πριν την παρυσκίαση των δοκιμίων, ώστε να ομογενοποιηθεί το μίγμα από πλευράς υγρασίας. Κατά τη διάρκεια της αναμονής αυτής ο αναμικτήρας πρέπει να παραμένει σκεπασμένος για να μη χάνεται υγρασία από το μίγμα.

Στον πίνακα 5.5.2 φαίνονται οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή κάθε μίγματος.

Πίνακας 5.5.2 : Παρασκευή μιγμάτων

α/α μίσμα	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντο (%)	άμμος (gr)	γαρμπίλι (gr)	χαλίκι (gr)	γαλάκτωμα (gr)	τσιμέντο (gr)	νερό (gr)
1	2	2	30000	10000	10000	1020	1000	2652
2	1	3	33000	11000	11000	566,5	1650	2889,15
3	0	3	33000	11000	11000	0	1650	3115,75
4	0	4	33000	11000	11000	0	2200	3146
5	2	3	33000	11000	11000	1133	1650	2882,55
6	1	4	33000	11000	11000	572	2200	2917,2
7	2	4	34200	11400	11400	1185,6	2280	2755,16

Στις φωτογραφίες 5.5.1 και 5.5.2 φαίνεται ο αναμικτήρας.



Φωτογραφία 5.5.1: Αναμικτήρας



Φωτογραφία 5.5.2: Αναμικτήρας με το υλικό

5.6 Παρουσκευή συμπίκνωση δοκιμίων

Από κάθε μίγμα παρασκευάστηκαν 3 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100mm x 100mm x 500mm και 3 κυλινδρικά διαμέτρου 100mm και ύψους 240mm

Για την παρουσίαση των δοκιμίων χρησιμοποιούνται καλούπια τα οποία πριν έχουν καθαριστεί από τυχόν κολλημένα κομμάτια τσιμέντου και επαλειφθεί με ορυκτέλαιο για εύκολο ξεκαλούπωμα. Το υλικό του μίγματος τοποθετείται μέσα στα καλούπια μέχρι τη μέση του εσωτερικού τους ύψους και αρχίζει η συμπίκνυσή του μέχρι αρνήσεως, με τη βοήθεια ηλεκτρόσφυρας (φωτογραφία 5.6.1). Στη συνέχεια χρασσεται η επιφάνεια με ένα μυστρί ή ένα κατσαβίδι ώστε να γίνει καλύτερη η συναρμογή της πρώτης με την δεύτερη στρώση (φωτογραφία 5.6.2). Ρίχνεται το υπερίσχυτο υλικό (φωτογραφία 5.6.3) και συμπεκνώνεται ξανά μέχρι αρνήσεως (φωτογραφία 5.6.4). Στη συνέχεια, επαλειφίνεται η επιφάνεια του δοκιμίου με τη βοήθεια μεταλλικής πλάκας, η οποία τοποθετείται πάνω στο καλούπι και δέχεται φορτίσεις από την ηλεκτρόσφυρα (φωτογραφία 5.6.5). Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για τα κυλινδρικά δοκίμια (φωτογραφίες 5.6.6 και 5.6.7).



Φωτογραφία 5.6.1: Συμπύκνωση πρώτης στρώσης



Φωτογραφία 5.6.2: Χάραξη ενδιώμεσης επιφάνειας



Φωτογραφία 5.6.3: Ρίψη υλικού δεύτερης στρώσης



Φωτογραφία 5.6.4: Συμπύκνωση δεύτερης στρώσης



Φωτογραφία 5.6.5: Επιπέδωση επιφάνειας δοκιμίου

Φωτογραφίες 5.6.1 έως 5.6.5 : Εισαγωγική πρισματικών δοκιμίων



Φωτογραφία 5.6.6: Συμπύκνωση πρώτης στρώσης



Φωτογραφία 5.6.7: Ρίψη υλικού δεύτερης στρώσης

Φωτογραφίες 5.6.6 και 5.6.7 : Παρασκευή κυλινδρικών δοκιμίων

5.7 Συντήρηση – ζύγισμα δοκιμίων

Μετά την παρασκευή τους τα δοκίμια τοποθετούνται στο θάλαμο συντήρησης, αφού σκεπαστούν με νάιλον και υγρή λινάτσα. Η υγρασία του θαλάμου είναι ανώ του 95%. Τα δοκίμια παραμένουν εκεί για 20 τουλάχιστον ώρες, ώστε να αναπτύξουν αντοχές που να επιτρέπουν το ασφαλές ξεκαλούπωμά τους (φωτογραφίες 5.7.1, 5.7.2, 5.7.3).

Μετά το πέρασμα του χρόνου ανάπτυξης ικανοποιητικής αντοχής τα δοκίμια βγαίνουν από το θάλαμο, ξεκαλουπώνονται και ζυγίζονται σε ζυγαριές ακριβείας 20gr για τα πρισματικά και 0,10gr για τα κυλινδρικά, αφού προηγουμένως εχουν τοποθετηθεί πάνω σε προζυγισμένες ξύλινες ή γυάλινες πλάκες ώστε να αποφευχθεί πιθανή θραύση τους (φωτογραφίες 5.7.4, 5.7.5).

Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται σε νάιλον σακούλας, ερμητικό κλειστής για αποφυγή απώλειας υγρασίας, και οδηγούνται ξανά στο θάλαμο συντήρησης, όπου παραμένουν μέχρι ανάπτυξης του μεγαλύτερου μέρους της αντοχής τους (φωτογραφία 5.7.6)



Φωτογραφία 5.7.1: Τοποθέτηση δοκιμίων στο θάλαμο συντήρησης



Φωτογραφία 5.7.2: Κάλυψη δοκιμίων με πλαστική φιλμ



Φωτογραφία 5.7.3: Κάλυψη δοκιμίων με υγρή λαντάσα



Φωτογραφία 5.7.4: Ζύγιση πρισματικού δοκιμίου



Φωτογραφία 5.7.5: Ζύγιση κυλινδρικού δοκιμίου



Φωτογραφία 5.7.6: Συντήρηση δοκιμίων στο θάλαμο, μετά τη ζύγιση

Στον πίνακα 5.7.1 παραρτηούνται για κάθε μίγμα, τα βάρη των αντίστοιχων δοκιμών και ο χρόνος παραμονής τους στο θάλαμο συντήρησης,εώς το ξεκαλούπωμά τους. Με "Α" συμβολίζονται τα πρισματικά δοκίμια, ενώ με "α" τα κυλινδρικά.

Πίνακας 5.7.1: Βάρη δοκιμών και χρόνος παραμονής στο θάλαμο συντήρησης

α/α μίσμα	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντιο (%)	α/α δοκίμιο	βάρος (gr)	συντήρηση στο θάλαμο
1	2	2	A1	11960	28h
			A2	12020	
			A3	12100	
			α1	3778,1	
			α2	3724,7	
			α3	3953,3	
2	1	3	A4	12300	24h
			A5	12300	
			A6	12360	
			α4	3814,3	
			α5	3788,9	
			α6	3774,8	
3	0	3	A7	12560	21,5h
			A8	12460	
			A9	12540	
			α7	3887,8	
			α8	4085,3	
			α9	3869,4	
4	0	4	A10	12600	19,5h
			A11	12520	
			A12	12580	
			α10	3884,5	
			α11	3911,4	
			α12	3801,8	
5	2	3	A13	12080	92,5h
			A14	12100	
			A15	12280	
			α13	3712,7	
			α14	3746	
			α15	3777,7	
6	1	4	A16	12340	90,5h
			A17	12380	
			A18	12300	
			α16	3840,9	
			α17	3804,3	
			α18	4010,2	
7	2	4	A19	12100	20h
			A20	12140	
			A21	12180	
			α19	3721	
			α20	3747,4	
			α21	3740,1	

Κεφάλαιο 6

Δοκιμές

Μετά τη συντήρηση των δοκιμίων στο θάλαμο συντήρησης του εργαστηρίου και την ωρίμανσή αυτών, ακολούθησαν εργαστηριακές δοκιμές για τον υπολογισμό των μετρων ελαστικότητας και των αντοχών των μιγμάτων από τα οποία προέρχονται. Με τη σειρά που πραγματοποιήθηκαν αυτές είναι, η κάμψη (στατικής και επαναλαμβανόμενης φόρτισης), η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η δοκιμή ισοδύναμου κύβου και η δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης.

6.1 Δοκιμή κάμψης

Στη δοκιμή κάμψης υποβλήθηκαν τα 21 πρισματικά δοκίμια των 7 διαφορετικών μιγμάτων (3 δοκίμια ανά μίγμα), διαστάσεων 100mm x 100mm x 500mm.

Ως μηχανή δοκιμής χρησιμοποιήθηκε η μηχανή M.T.S. (Material Test System) του E.M.H., ικανή να επιβάλλει στατική ή δυναμική φόρτιση

Οι μεταβολές του επιβαλλόμενου φορτίου, όπως και οι αντίστοιχες ενδείξεις των δύο ηχοσημιωμένων, στο μέσο κάθε δοκιμίου, ηλεκτρομηκυνσιόμετρα, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), καταγράφονται από Η/Υ.

6.1.1 Στατική φόρτιση

Τα πρώτα από τα τρία πρίσματα κάθε μίγματος υποβλήθηκε σε στατική φόρτιση έως τη θραύση του, με σταθερή ταχύτητα φόρτισης 0,20 kN/s. Τα άλλα δυο δοκίμια του ίδιου μίγματος, αφού υποβλήθηκαν σε δυναμική φόρτιση (κεφ.6.1.2), φορτίστηκαν στατικά με τον ίδιο ρυθμό, 0,20 kN/s έως τη θραύση τους.

Καταγράφηκαν οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις των ηλεκτρομηκυνσιόμετρων, και μετά την επεξεργασία τους στο ms excel, προέκυψαν τα διαγράμματα μεταβολής της τάσης με το βέλος κάμψης για κάθε ένα δοκίμιο.

Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, για στατική φόρτιση, υπολογίζεται από τη σχέση: $E = (23 \cdot P \cdot l^3) / (108 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta)$, όπου, P είναι το 1/3 του φορτίου θραύσης, δ είναι το βέλος κάμψης που αντιστοιχεί σε αυτό το φορτίο, l είναι η απόσταση των εφεδράνων στήριξης του δοκιμίου (300mm), b το πάχος του δοκιμίου (100mm) και h το ύψος αυτού (100mm).

6.1.2 Δυναμική φόρτιση

Παράλληλα με τη στατική φόρτιση στα πρίσματα πραγματοποιήθηκε και δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε κάμψη (δυναμική φόρτιση). Για κάθε δοκίμιο που υποβλήθηκε σε στατική φόρτιση, σημειώθηκε η τιμή του φορτίου θραύσεως του, P_{max} . Πριν υποβληθούν τα άλλα δύο δοκίμια του ίδιου μγματος στην ίδια δοκιμή, υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση 100 κύκλων (0 έως 99), στην οποία η τιμή του φορτίου μεταβάλλεται ημικανονικά και έχει μέγιστη τιμή $P_{max}/3$, ώστε να βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή.

Κάθε πλήρης κύκλος φόρτισης - αποφόρτισης διαρκεί 1 sec (συχνότητα 1 Hz) και καταγράφονται οι τιμές φορτίου - βέλους κάμψης για τους κύκλους 0 έως 4, 47 έως 51 και 94 έως 99. Η ταχύτητα φόρτισης δεν είναι σταθερή για όλα τα δοκίμια και ο αναλυτικός υπολογισμός αυτής γίνεται στο κεφάλαιο 7.8.

Η μέγιστη τιμή $P_{max}/3$ επιλέγεται επειδή εκτιμάται ότι το υλικό δεν έχει υποστεί σημαντική φθορά μετά από 100 κύκλους φόρτισης με αυτό το φορτίο. Με δεδομένο όμως, ότι η αντοχή σε κάμψη έχει μεγάλη μεταβλητότητα, ιδιαίτερα σε αυτά τα υλικά, μπορεί σε επόμενα δοκίμια του ίδιου μγματος να νομίζουμε ότι η μέγιστη τιμή του φορτίου κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης ήταν ίση με $P_{max}/3$, ενώ στην πραγματικότητα να έχουμε φτάσει σε τιμή που για κάποιο δοκίμιο να αντιστοιχεί στο ήμισυ του φορτίου θραύσεώς του ή και πιο ηπιό. Αυτό το γεγονός προφανώς ισοδυναμεί με σημαντικά μεγαλύτερες φθορές για το δοκίμιο. Ακόμη πρέπει να ληφθεί υπ όψη ότι η επανάλληψη των φορτίσεων, έστω και στο $P_{max}/3$, σημαίνει ότι επιφέρονται ορισμένες παραμορφώσεις. Ένα μέρος των οποίων μπορεί να είναι μόνιμο. Συνεπώς αξίζει να ερευνηθεί κατά πόσο η δοκιμή σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση επηρεάζει τις τιμές που θα ληφθούν μετά τη στατική φόρτιση και αν η επίρροη αυτή θεωρείται σημαντική.

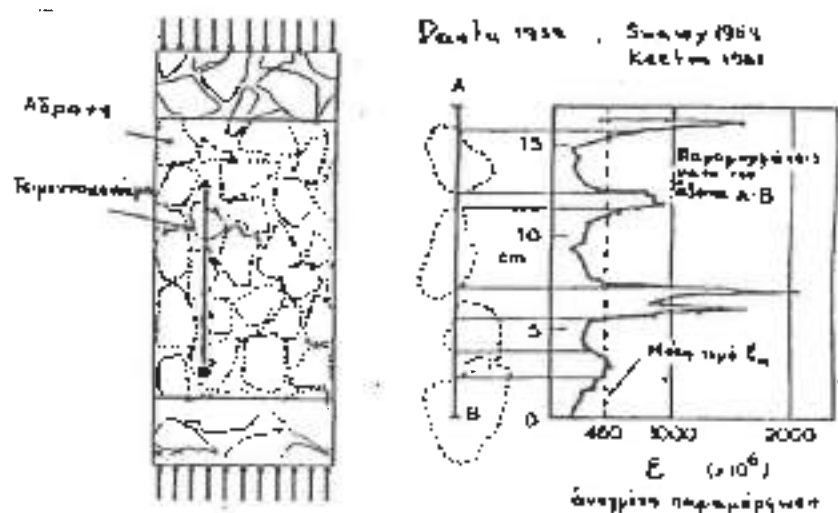
Θεωρητικά, μια δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης, η οποία προηγείται μιας στατικής φόρτισης σε ένα δοκίμιο, ενδέχεται να επηρεάσει και αρνητικά αλλά και θετικά τις τιμές της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου.

Για παράδειγμα, μπορεί οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις να δημιουργήσουν φθορές στο δοκίμιο, στις οποίες να οφείλεται στη συνέχεια η μειωμένη τιμή της αντοχής σε κάμψη (σε σχέση με άλλα δοκίμια που υπέστησαν μόνο στατική φόρτιση). Η μείωση της ποιότητας του υλικού θα είναι αποτέλεσμα των ραγισμών που

μπορεί να δημιουργηθούν, αλλά και των παραμενουσών παραμορφώσεων στη μάζα του.

Αντίθετα, θετική επίδραση στη συμπεριφορά του υλικού θα υπήρχε στην περίπτωση μιας καμπτόμενης δοκού, προερχόμενης από κύκλιο από το μίγματι που παρασκευάστηκαν στην παρούσα εργασία, με τάσεις που αναπτύσσονται στη διατομή που βρίσκεται στο μέσο της. Με δεδομένο ότι το υλικό είναι στην πραγματικότητα τριών φάσεων (αδριακή, τσιμεντοπαλτός, ασφαλτός) θα ήταν δυνατόν, κατά αναλογία των ερευνών του Dantu [10], να θεωρηθεί ότι στις περιοχές μεταβολών από αδρανές υλικό σε ασφαλτό ή σε τσιμεντοπαλτό, θα παρουσιάζονται μεγάλες μεταβολές των παραμορφώσεων, δηλαδή μεγάλες μεταβολές συγκέντρωσης τάσεων. Επομένως, θα ήταν δυνατόν να θεωρηθεί ότι οι τάσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες, αλλά παρουσιάζουν μέγιστες τιμές στα σημεία που αντιστοιχούν μεγάλοι σχετικά κόκκοι υλικού (σχήμα 6.1.2.1). Μετά τη δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης υπάρχει, λόγω ερυσισμού / χαλάρωσης, μια εξομαλυνση των ακραίων αυτών τιμών. Συνεπώς, συμπεριίνεται ότι το υλικό, σε αυτήν την περίπτωση, θα συμπεριφερθεί στη άκυτερή του στατική φόρτιση ως περισσότερο ομογενές από πριν.

Στη συνέχεια, θα ερευνηθεί στα μίγματα που παρασκευάστηκαν το κατά πόσον επηρέασε η επαναλαμβανόμενη φόρτιση και προηγήθηκε τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών.



Σχήμα 6.1.2.1: Κατανομή παραμορφώσεων στη μάζα σκυροδέματος [10]

Για τη δυναμική φόρτιση το μέτρο ελαστικότητας, για κάθε κύκλο φόρτισης, υπολογίζεται από τη σχέση : $E = (23 \cdot P \cdot l^3) / (108 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta)$, όπου, P είναι το μέγιστο φορτίο κάθε κύκλου, ενώ για τις υπόλοιπες παραμετρους της σχέσης, ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν στην στατική φόρτιση (κεφ.6.1.1). Υπενθυμίζεται ότι η σχέση αυτή ισχύει για ελαστική συμπεριφορά του υλικού.

Στις παρακάτω φωτογραφίες (6.1.1, 6.1.2) φαίνεται η διάταξη της δοκιμής κάμψης (στατικής και επαναλαμβανόμενης φόρτισης).



Φωτογραφία 6.1.1: Διάταξη δοκιμής κάμψης



Φωτογραφία 6.1.2: Κάμψη πρισματικού δοκιμίου

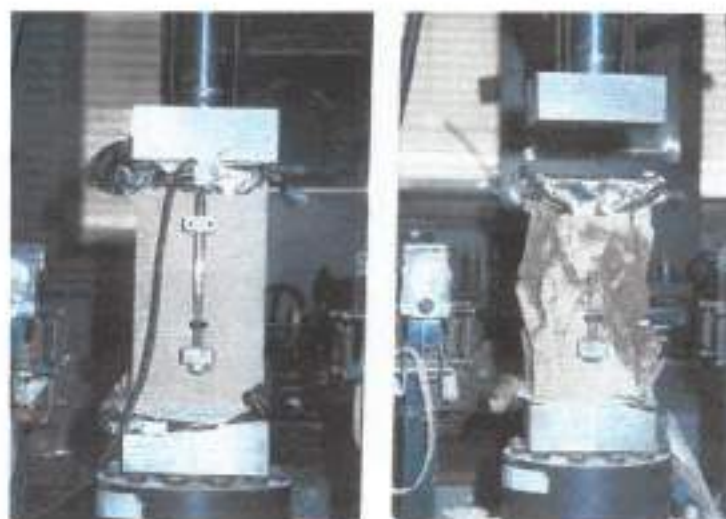
6.2 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης

Από κάθε πρισματικό δοκίμιο που έσπασε σε κόμμη, ελήφθησαν δύο κομμάτια το ένα εκ των οποίων υποβλήθηκε σε δοκιμή ισοδυναμίου κύβου (κεφ.6.3), και το άλλο, το μεγαλύτερο εκ των δύο, σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, αφού πρώτα κόπηκε και επεξευχθήκε από τη μεριά που είχε σπάσει. Δημιουργήθηκαν έτσι πηισματικά δοκίμια μεγέθους 100mm x 100mm x 200mm

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στη μηχανή M.T.S. του Ε.Μ.Π., με σταθερή ταχύτητα φορτίσης 0,58 kN/s, και σ' αυτήν υποβλήθηκαν συνολικά 14 δοκίμια (2 από κάθε μίγμα). Καταγράφηκαν οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου και οι αντίστοιχες ενδείξεις των LVDT και μετά την επεξεργασία τους προέκυψαν τα διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για κάθε ένα δοκίμιο.

Για δυο μίγματα (0% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο και 1% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο), δεν επήλθε θραύση των δοκίμιων στη μηχανή M.T.S. Αυτό συνέβη γιατί η μηχανή έφτασε στο μέγιστο φορτίο που μπορούσε να ασκήσει χωρίς όμως να επέλθει θραύση. Τα δοκίμια αυτά μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, και η δοκιμή επαναλήφθηκε με χρήση της μηχανής TONI PACF 3000, που δεν είχε δυνατότητα καταγραφής των παραμορφώσεων, αλλά μόνο του φορτίου θραύσης, υπό όπου και υπολογίστηκε η τελική αντοχή αυτών.

Το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη υπολογίζεται από τον νόμο του Hooke : $E = \sigma / \epsilon$, όπου, σ είναι η τάση που αντιστοιχεί στο 1/3 του φορτίου θραύσης. Στη φωτογραφία 6.2.1 φαίνεται η διάταξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης



Φωτογραφία 6.2.1: αριστερά: Διάταξη δοκιμής μονοαξονικής θλίψης
δεξιά: Θλίψη δοκιμίου

6.3 Δοκιμή ισοδύναμου κύβου

Μερικές φορές, η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος καθορίζεται με χρήση μάρκους ενός δοκιμίου που έχει σπάσει σε προηγούμενη δοκιμή. Τα τελικά μέρη της δοκού πρέπει να έχουν παραμείνει άθικτα μετά την αστοχία σε δοκιμή κάμψης, και από τη στιγμή που το πρίσμα είναι συνήθως τετραγωνικής διατομής, ένας ισοδύναμος ή τροποποιημένος κύβος μπορεί να ληφθεί, με επιβλαή φικρτίου μέσω τετραγωνικών ασιόλινων πλάκων ίδιου μεγέθους με τη διατομή της δοκού. Είναι σημαντικό οι δυο πλάκες να έχουν ταποθετηθεί η μία πάνω από την άλλη με τις αντίστοιχες κατακόρυφες πλευρές τους να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Το δοκίμιο πρέπει να ταποθετηθεί έτσι ώστε η πάνω του επιφάνεια (όπως αυτή προέκυψε κατά την παρασκευή), να μην βρίσκεται σε επαφή με καμία από τις πλάκες.

Η αντοχή αυτού του τροποποιημένου κύβου είναι περίπου ίδια με αυτήν ενός πραγματικού, ίδιου μεγέθους και υλικού, κύβου. Στην πραγματικότητα, ο περιορισμός από τα προεξέχοντα μέρη του "κύβου", ίσως έχει σαν αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της απόλυτης αντοχής. Γίνεται η υπόθεση (BS 1881:1952) ότι η αντοχή του ισοδύναμου κύβου είναι κατά 5% μεγαλύτερη από αυτή ενός πραγματικού κύβου ίδιου μεγέθους [9].

Στη δοκιμή ισοδύναμου κύβου υποβλήθηκε ένα από τα δύο κομμάτια κάθε δοκιμίου που πριν είχε σπάσει σε κάμψη (συνολικά 21 δοκίμια, 3 από κάθε μίγμα). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη μηχανή TONI PACT 3000 στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος. Η ταχύτητα φόρτισης ήταν 0,58kN/s, και για κάθε δοκίμιο καταγράφηκε το φορτίο θραύσης του και βρέθηκε η αντοχή του. Στη φωτογραφία 6.3.1 φαίνεται η διάταξη της δοκιμής ισοδύναμου κύβου.



Φωτογραφία 6.3.1: Δοκιμή ισοδύναμου κύβου

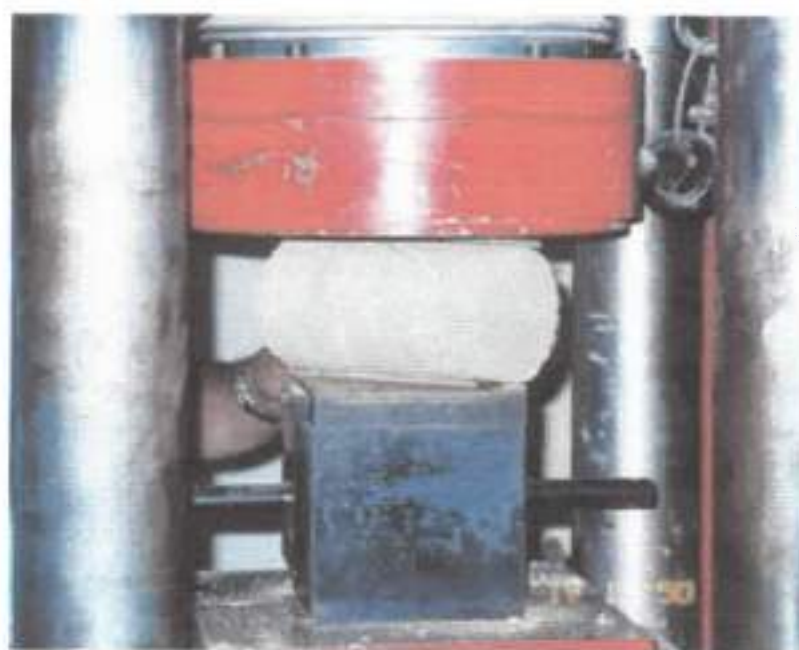
6.4 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων

Για να εκτιμηθεί η αντοχή σε εφελκυσμό των δοκιμίων των κάθε μίγματος, λαμβάνει χώρα η δοκιμή της αντιδιαμετρικής θλίψης (δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού σε θλίψη). Στη δοκιμή αυτή, γνωστή και ως Brazilian test ή *splitting test*, υποβλήθηκαν 21 κυλινδρικά δοκίμια (3 από κάθε μίγμα), και έγινε χρήση της μηχανής θραύσης TONI PACT 3000.

Τα κυλινδρικά δοκίμια τοποθετούνται στη μηχανή, έτσι ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο να ασκείται σε δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες του δοκιμίου και κατά το ίδιο αξονικό επίπεδο. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετούνται δύο ξύλινες πρισματικές ράβδοι, πλάτους 1,5 cm, με μήκος λίγο μεγαλύτερο από αυτό του δοκιμίου, μεταξύ αυτού και των πλακών φόρτισης. Το δοκίμιο τοποθετείται μαζί με τις ξύλινες ράβδους, έτσι ώστε το αξονικό επίπεδο φόρτισής του να συμπίπτει με το αξονικό επίπεδο φόρτισης της μηχανής.

Το φορτίο επιβάλλεται ομοιά με σταθερή ταχύτητα ίση με 0,58 kN/s. Καταγράφεται το φορτίο θραύσης και υπολογίζεται η τάση θραύσης υπό εφελκυσμό με αντιδιαμετρική θλίψη, από τη σχέση: $\sigma = 2P/\pi Ld$, όπου, L το μήκος της γενέτειρας του κυλίνδρου (200mm), d η διάμετός του (100mm), και P το φορτίο θραύσης του.

Στη φωτογραφία 6.4.1 φαίνεται η διάταξη της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης.



Φωτογραφία 6.4.1: Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων

Κεφάλαιο 7

Παρουσίαση, ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση, ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

7.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Αρχικά παρατίθενται πίνακες με στοιχεία από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές. Ο πίνακας 7.1.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της στατικής δοκιμής κάμψης για κάθε ένα από τα 21 δοκίμια. Παρατίθενται τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη καθώς και οι αντιστοιχές αντοχές τσιπς, όπως, επίσης και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, με σπιννοπαλογισμό των διατμητικών τάσεων (E_{cm} , διορθωτικός συντελεστής 1,28). Ο πίνακας περιέχει, επίσης, για κάθε μίγμα, την μεση τιμή της αντοχής σε κάμψη (των τριών δοκιμών του μίγματος, $\mu\sigma$), καθώς και την τυπική απόκλιση (σ) και το συντελεστή μεταβλητότητάς του (σ/μ).

Στα περισσότερα μίγματα, με εξαίρεση αυτά με 4% τσιμέντο και 1% και 2% γαλάκτωμα, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στα μέτρα ελαστικότητας, όπως και στις αντοχές, ανάμεσα στα δοκίμια ίδιου μίγματος, οι οποίες αποδίδονται στις πειραματικές συνθήκες. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάζονται στα μίγματα με 0% γαλάκτωμα και 3% και 4% τσιμέντο.

Σύμφωνα με το ASTM C78 [13], ο συντελεστής μεταβλητότητας σε σκυροδέματα, βρέθηκε ίσος με 5,7%, για τη δοκιμή κάμψης. Επειδή από τη φύση τους τα υλικά παρασκευής των μιγμάτων δεν είναι ομοιομορφα, γίνονται δεκτοί και μεγαλύτεροι συντελεστές μεταβλητότητας, έως και 9%. Στο μίγμα με 0% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο, ο σ/μ είναι ίσος με 17%, που θεωρείται πολύ μεγάλος

Πίνακας 7.1.1: Αποτελέσματα στατικής δοκιμής κάμψης

α/α δοκίμιο	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντο (%)	E κάμψης (MPa)	E διατ. (MPa)	αντοχή (MPa)	μ.σ. (MPa)	σ (MPa)	σ.μ.
1	2	2	13000	17000	0,8	0,83	0,05	0,06
2			16000	20500	0,9			
3			13000	16500	0,8			
4	1	3	32500	42000	1,9	1,83	0,05	0,03
5			22000	28000	1,8			
6			25000	32000	1,8			
7	0	3	32000	41000	1,7	1,8	0,08	0,04
8			27500	35000	1,9			
9			28500	34000	1,8			
10	0	4	36500	47000	2,9	2,63	0,45	0,17
11			29500	38000	2,3			
12			31000	39500	2,7			
13	2	3	19000	24500	1,8	1,93	0,12	0,06
14			19500	25000	1,9			
15			23500	30500	2,1			
16	1	4	28500	36500	2,9	2,73	0,24	0,09
17			28500	36500	2,9			
18			30000	38500	2,4			
19	2	4	30000	38000	3	2,93	0,05	0,02
20			30500	39000	2,9			
21			30500	39000	2,9			

Στον πίνακα 7.1.2, παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη ($E_{δυν.}$), όπως αυτά προέκυψαν από τους 6 τελευταίους κύκλους φόρτισης της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης, στην οποία υποβλήθηκαν 14 δοκίμια (2 από κάθε μίγμα). Παρουσιάζεται επίσης, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, με συνυπολογισμό των διατμητικών τάσεων ($E_{δυν.}$, διορθωτικός συντελεστής 1,28), για κάθε δοκίμιο.

Παρατηρούνται διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων του ίδιου μίγματος, οι οποίες είναι μεγαλύτερες στα μίγματα με 2% γαλάκτωμα και 2% τσιμέντο και 0% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο. Για το δοκίμιο 21 (2% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο), το μέτρο ελαστικότητας είναι ασυνήθιστα μεγάλο, γεγονός που αποδίδεται σε λανθασμένη μέτρηση των παραμορφώσεων, και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπ' όψη στους περαιτέρω σχολιασμούς.

Πίνακας 7.1.2: Αποτελέσματα δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης

α/α δοκίμιο	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντιο (%)	E δυν. (MPa)	E διάτ (MPa)
2	2	2	14000	18000
3			10500	13500
5	1	3	25000	32000
6			28500	38500
8	0	3	27000	34500
9			28000	36000
11	0	4	30000	38000
12			38500	49500
14	2	3	19000	24000
15			17000	22000
17	1	4	32000	41000
18			27500	35500
20	2	4	31000	40000
21			68000	87000

Στον πίνακα 7.1.3 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας και οι αντοχές των 14 δοκιμίων (2 από κάθε μίγμα) που υποβλήθηκαν στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Ο πίνακας περιέχει, επίσης, για κάθε μίγμα, την μέση τιμή της αντοχής σε θλίψη (των 2 δοκιμίων του μίγματος, μ.ο.), καθώς και την τυπική απόκλιση (σ) και το συντελεστή μεταβλητότητάς του (σ/μ). Υπενθυμίζεται ότι τα δοκίμια 10 και 11 (0% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο), και 16 και 17 (1% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο), δεν έσπασαν στη μηχανή M T S και στον πίνακα παρατίθεται το φορτίο θρίψής τους, όπως προέκυψε από τη μηχανή TONI PACT 3000, από το οποίο και υπολογίστηκε η αντοχή τους.

Σύμφωνα με το ASTM C39 [12], ο συντελεστής μεταβλητότητας σε σκυροδεματα, βρέθηκε ίσος με 2,4%, για τη δοκιμή θλίψης. Παρόλο που τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι πιο επιρρεπή σε ανομοιογένειες, από ότι το σκυρόδεμα, ανιχνεύοντας στα δοκίμια ίδιου μίγματος δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις στα μέτρα ελαστικότητας και τις αντοχές, κάτι που φαίνεται και από τις μικρές τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας, που μόνο στην περίπτωση του μίγματος με 2% γαλάκτωμα και 3% τσιμέντο, είναι 4%.

Πίνακας 7.1.3: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

α/α δοκίμιο	γαλάκτωμα (%)	τοιμέντο (%)	Ε θλίψης (MPa)	φορτίο θραύσης (kN)	αντοχή (MPa)	μ.ο. (MPa)	σ (MPa)	σ.μ
1	2	2	11000		1,9	1,9	0	0
2			10500		1,9			
4	1	3	21500		5,8	5,85	0,15	0,03
5			21500		5,5			
7	0	3	23500		7,2	7,05	0,15	0,02
8			25000		6,9			
10	0	4	32000	120,3	12,03	12,2	0,19	0,02
11			31500	124,1	12,41			
13	2	3	20000		5,7	5,5	0,2	0,04
14			18500		5,3			
16	1	4	31000	112,2	11,22	11,16	0,06	0,01
17			28500	111	11,1			
20	2	4	26000		8,5	8,5	0	0
21			26000		8,5			

Στον πίνακα 7.1.4 παρουσιάζονται για όλα τα δοκίμια, το φορτίο θραύσης αυτών για τη δοκιμή σε ισοδύναμο κύβο καθώς και η αντοχή τους, και για κάθε μίγμα η μέση τιμή της αντοχής αυτής (μ.ο.), όπως επίσης η τυπική αποκλίση (σ) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (σ.μ.).

Πίνακας 7.1.4: Αποτελέσματα δοκιμής ισοδύναμου κύβου

Δοκιμή ισοδύναμου κύβου							
α/α δοκίμιο	γαλάκτωμα (%)	τοιμέντο (%)	φορτίο θραύσης (kN)	αντοχή (MPa)	μ.ο. (MPa)	σ (MPa)	σ.μ.
1	2	2	38,73	3,87	3,78	0,07	0,02
2			37,06	3,71			
3			37,69	3,77			
4	1	3	93,6	9,36	9,77	0,31	0,03
5			98,4	9,84			
6			101,1	10,11			
7	0	3	138,1	13,81	13,31	0,46	0,03
8			134,2	13,42			
9			127	12,7			
10	0	4	187,5	18,75	18,87	0,3	0,02
11			185,8	18,58			
12			192,8	19,28			
13	2	3	91	9,1	8,87	0,38	0,04
14			81,7	8,17			
15			87,4	8,74			
16	1	4	163,2	16,32	15,67	0,47	0,03
17			152,3	15,23			
18			154,7	15,47			
19	2	4	131,1	13,11	12,42	0,51	0,04
20			118,9	11,89			
21			122,6	12,26			

Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις αναμεσα στις αντοχές των δοκιμίων του ίδιου μίγματος, οπότε ο μέσος όρος αυτών είναι αντιπροσωπευτικός κάθε μίγματος. Οι τιμές του σ.μ. θεωρούνται αποδεκτές [12]. Για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στο μίγμα, παρατηρείται μεγάλη αύξηση της αντοχής σε ισοδύναμο κύβο, ενώ για αύξηση του ποσοστού του γαλκτωμάτος, παρατηρείται μεγάλη μείωση της αντοχής.

Ο πίνακας 7.1.5 παρουσιάζει για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο το φορτίο θραύσης του από τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης και την αντίστοιχη αντοχή του σε εφελκυσμό. Επίσης, παρουσιάζεται για κάθε μίγμα η μέση τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό ($\mu\sigma$) καθώς και η τυπική αποκλίση (σ) και ο συντελεστής μεταβλητότητας του ($\sigma\mu$). Το δοκίμιο 11 (0% γαλκτωμα με 4% τσιμέντο) έσπασε στη μέση, και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπ' όψη στους υπολογισμούς.

Σύμφωνα με το ASTM C496 [14] ο συντελεστής μεταβλητότητας για τη δοκιμή εφελκυσμού, βρέθηκε ίσος με 5% σε σκυροδέματα. Επειδή από τη φύση τους τα υλικά παρασκευής των μιγμάτων δεν είναι ομοιόμορφα γίνονται δεκτές και μεγαλύτερες τιμές συντελεστή μεταβλητότητας. Στο μίγμα με 1% γαλκτωμα και 3% τσιμέντο, παρατηρείται αυξημένη τιμή του $\sigma\mu$ (13%).

Πίνακας 7.1.5: Αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης

Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (εφελκυσμός)							
α/α δοκίμιο	γαλκτωμα (%)	τσιμέντο (%)	φορτίο θραύσης (kN)	αντοχή (MPa)	$\mu\sigma$ (MPa)	σ (MPa)	$\sigma\mu$
1	2	2	12	0,38	0,37	0,01	0,03
2			11,39	0,36			
3			11,4	0,36			
4	1	3	31,19	0,99	0,9	0,12	0,13
5			30,89	0,98			
6			23	0,73			
7	0	3	30,98	0,99	1,01	0,02	0,02
8			31,72	1,01			
9			32,29	1,03			
10	0	4	52	1,66	1,66	0	0
11			37,28 *	1,19			
12			52	1,66			
13	2	3	27,22	0,87	0,9	0,03	0,03
14			29,22	0,93			
15			28,51	0,91			
16	1	4	43,75	1,39	1,49	0,09	0,06
17			46,3	1,47			
18			50,43	1,61			
19	2	4	42,24	1,35	1,37	0,05	0,04
20			41,8	1,33			
21			45,32	1,44			

* έσπασε στη μέση

Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις αντοχές των δοκιμών του ίδιου μίγματος, οπότε ο μέσος όρος των είναι αντιπροσωπευτικός κάθε μίγματος. Για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στο μίγμα παρατηρείται μικρή αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό, ενώ για αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος, παρατηρείται μικρή μείωση αυτής.

Ακολουθεί σχολιασμός για τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής ξεχωριστά.

7.2 Κάμψη

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σχολιασμός των διαγραμμάτων τάσης – βέλους κάμψης, τα οποία προέκυψαν από τη στατική δοκιμή κάμψης, με τη βοήθεια της οποίας προσδιορίστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε κάμψη, σε MPa.

Στη δοκιμή υποβλήθηκαν συνολικά 21 δοκίμια από 7 διαφορετικά μίγματα (3 δοκίμια ανά μίγμα). Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – βέλους κάμψης για κάθε ένα δοκίμιο ξεχωριστά, με τις μετρήσεις κάθε μηχανοσυστήματος και το μέσο όρο αυτών, που τελικά χρησιμοποιείται ως το διάγραμμα κάθε δοκιμίου.

Παρακάτω, παρατίθενται αρχικά, τα διαγράμματα τάσης – βέλους κάμψης για κάθε μίγμα ξεχωριστά, όπου παρουσιάζονται οι τιμές των 3 δοκιμών κάθε μίγματος, καθώς και ο μέσος όρος αυτών, που είναι και το διάγραμμα που τελικά λαμβάνεται υπ' όψη. Αυτό προκύπτει ως ο μέσος όρος των επιβαλλόμενων τάσεων και των αντίστοιχων βέλων κάμψης των 3 δοκιμών ανά μίγμα.

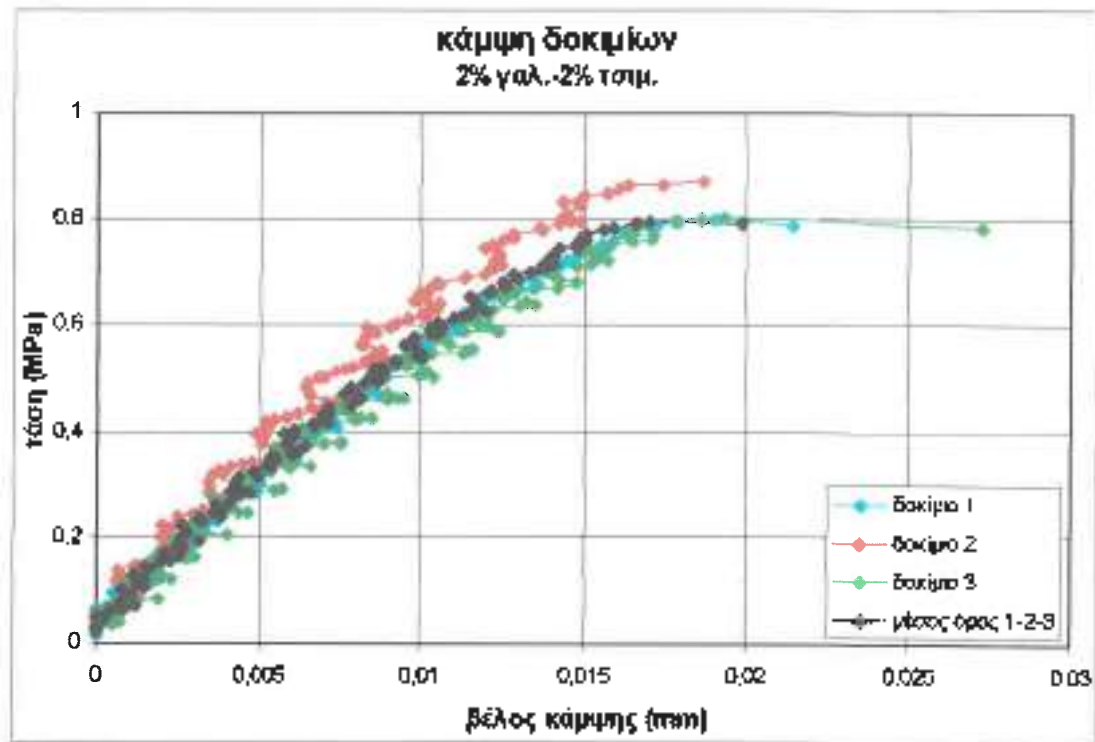
Απο τα διαγράμματα αυτά (σχήματα 7.2.1 έως 7.2.7), παρατηρείται ότι οι τιμές τάσης – βέλους κάμψης των 3 δοκιμών ανά μίγμα, διαφοροποιούνται ελάχιστα, ώστε ο μέσος όρος αυτών να είναι αντιπροσωπευτικός για κάθε μίγμα. Μία δεύτερη σημαντική παρατήρηση, είναι η διασπορά των μετρήσεων ("θόρυβος"), κάτι που οφείλεται σε πλείστες της πειραματικής διάταξης μέτρησης των βέλων κάμψης. Ωστόσο, η διασπορά αυτή είναι αρκετά μικρή, ώστε να θεωρηθεί αμελητέα και να μην επηρεάσει τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας.

Στο σχήμα 7.2.8 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της τάσης με το βέλος κάμψης για όλα τα μίγματα. Παρατηρείται μια ομαδοποίηση αυτών, ανάλογη με την περιεκτικότητα του τσιμέντου στο μίγμα. Με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3% και 4%, παρατηρείται σταδιακή αύξηση της κλίσης των διαγραμμάτων (λόγος τάση/βέλος κάμψης), άρα και του μέτρου ελαστικότητας. Το

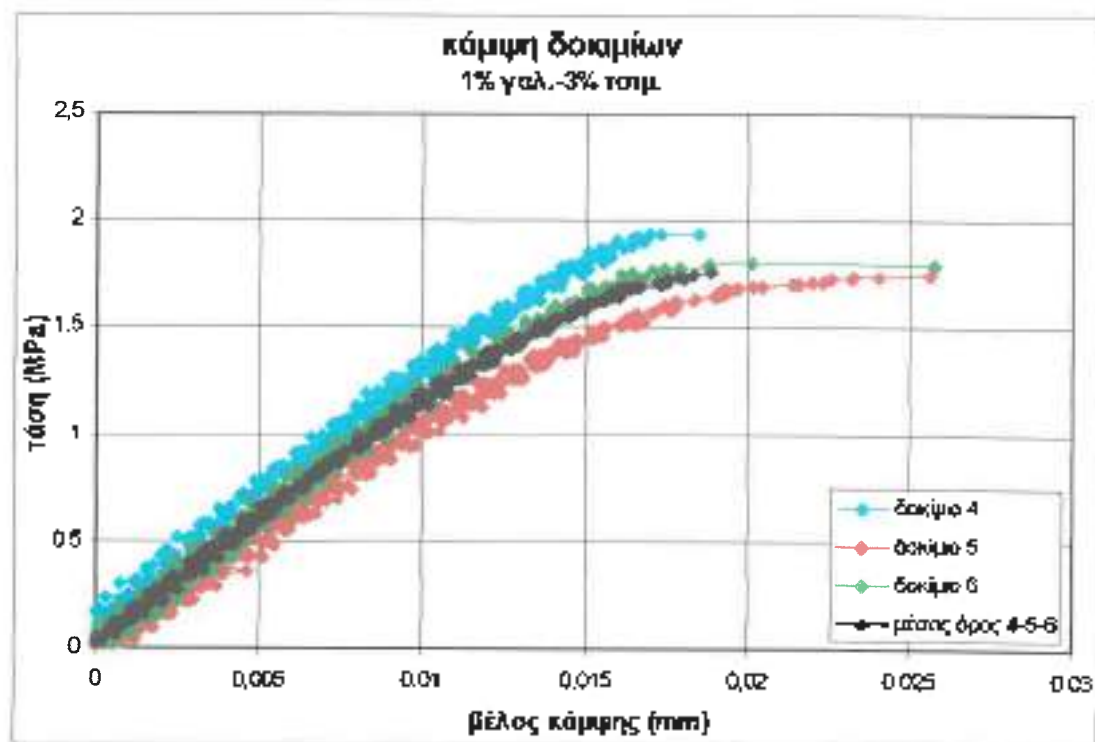
μέγιστο βέλος κάμψης δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά, αφού οι τιμές κατά τη θρηπύση δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους. Η μεταβολή του βέλους κάμψης με την τάση, είναι πρακτικά ευθύγραμμη, και μόνο στο μίγμα με 2% γαλακτώμα και 2% τσιμέντο, παρουσιάζει μια μικρή καμπυλότητα. Η αντοχή σχεδόν διπλασιάζεται με αύξηση 1% στο ποσοστό του τσιμέντου, ενώ το ποσοστό του γαλακτώματος δεν έχει ιδιαίτερες επιδράσεις σε αυτήν. Η μεγέθυνση του σχήματος αυτού στο 1/3 της μέγιστης αντοχής, παριστοιχεί καλύτερα τις παρατηρούμενες παρατηρήσεις (σχήμα 7.2.9).

Στα σχήματα 7.2.10 και 7.2.11, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης - βέλους κάμψης για σταθερά ποσοστά τσιμέντου 3% και 4% αντίστοιχα, με σταδιακή αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος από 0% σε 1% και 2%. Παρατηρείται ότι με την αύξηση του γαλακτώματος ο λόγος τάση/βέλος κάμψης (ήρω και το μέτρο ελαστικότητας), μειώνεται ελάχιστα, ενώ η αντοχή παραμένει σχεδόν σταθερή. Για 4% τσιμέντο, παρατηρείται και μια μικρή αύξηση της παραμόρφωσης.

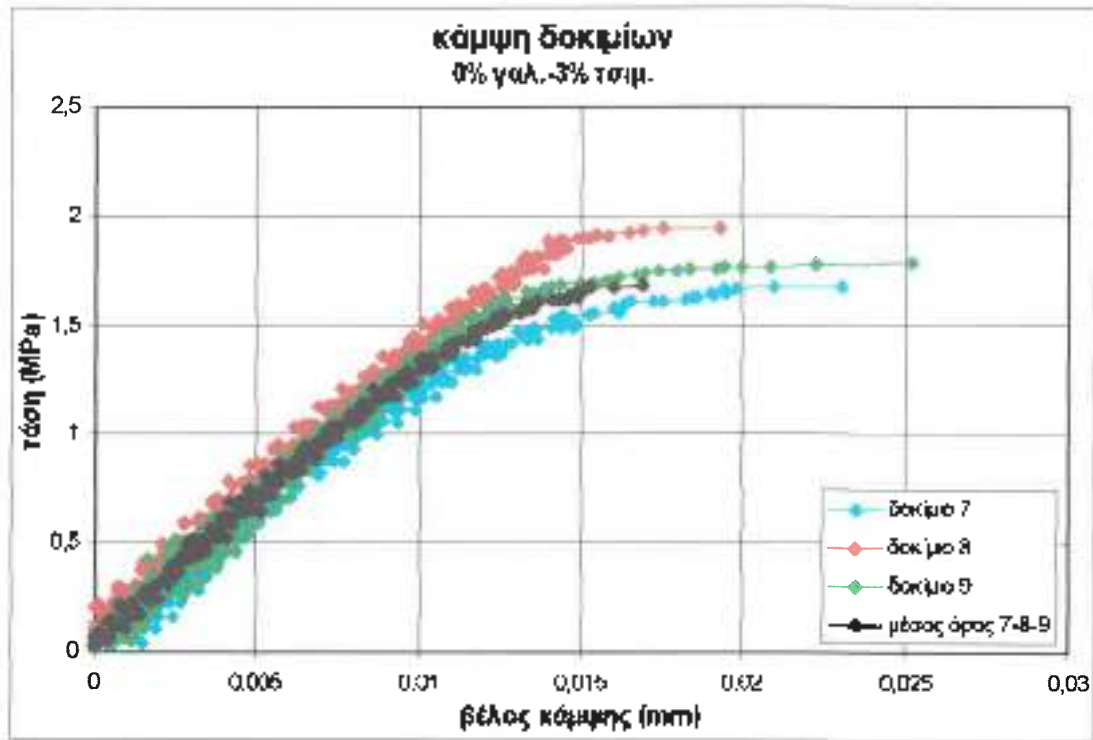
Στα σχήματα 7.2.12, 7.2.13 και 7.2.14, παρουσιάζεται αναλυτικότερα η επίδραση του ποσοστού του τσιμέντου στο μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή, όταν αυτό αυξάνεται από 2% σε 3% και 4%, με το ποσοστό του γαλακτώματος να παραμένει σταθερό σε ποσοστά 0%, 1% και 2% αντίστοιχα. (Ποσοστό τσιμέντου 2%, υπάρχει μόνο σε 1 μίγμα με ποσοστό γαλακτώματος 2% (σχήμα 7.2.14)). Παρατηρείται αύξηση του λόγου τάση/βέλος κάμψης (και του μέτρου ελαστικότητας), για αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο, και πολύ μικρή αύξηση της παραμόρφωσης. Σχετικά με την αντοχή, παρατηρείται αύξηση αυτής με την αύξηση του τσιμέντου, η οποία είναι πιο αισθητή στα μίγματα με 2% γαλακτώμα (σχήμα 7.2.14), όπου σχεδόν διπλασιάζεται για 1% αύξηση στο ποσοστό του τσιμέντου.



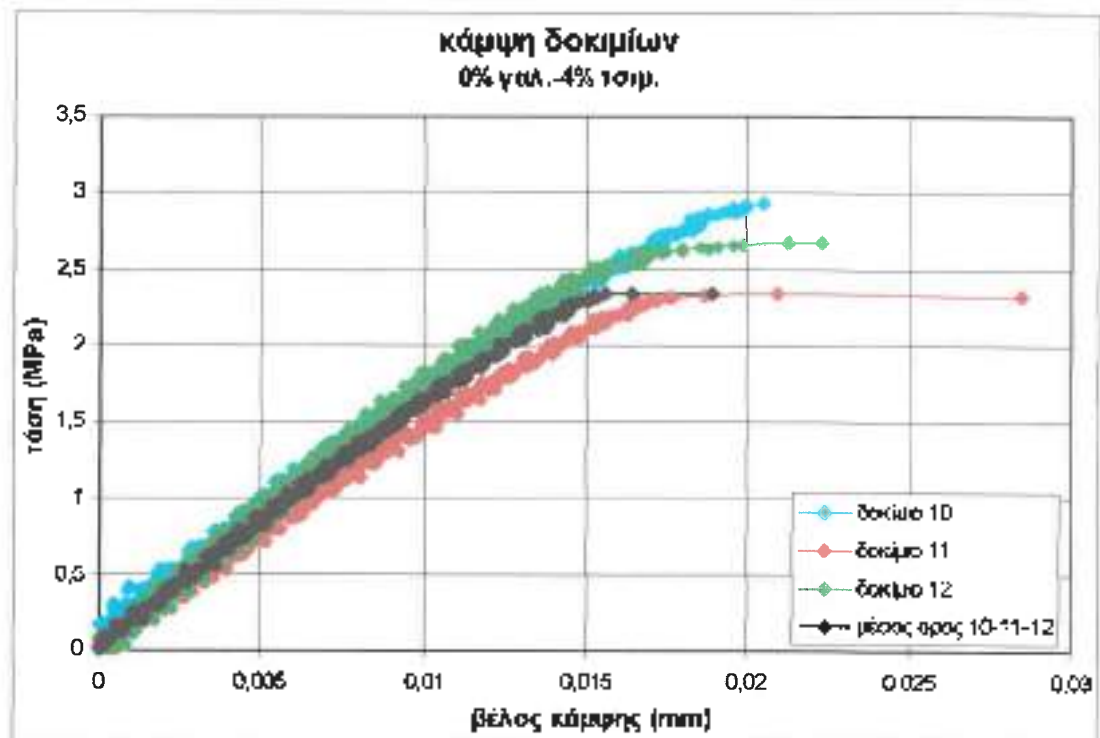
Σχήμα 7.2.1: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 2% τσιμεντό (δοκίμια 1, 2, 3)



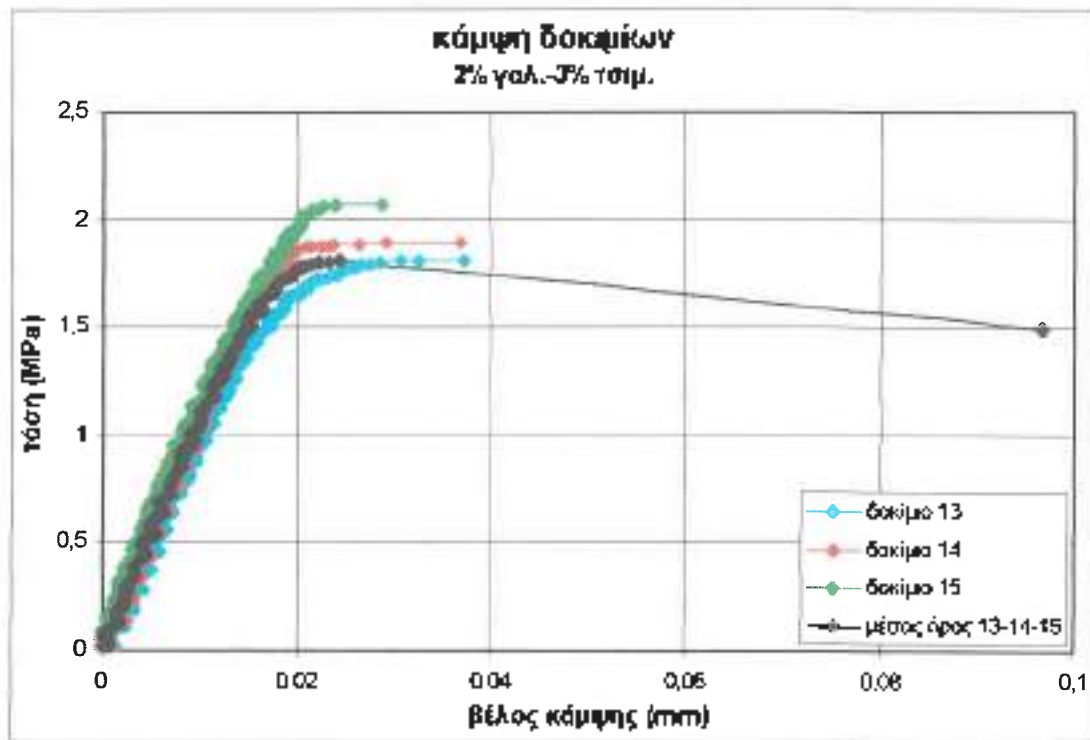
Σχήμα 7.2.2: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 1% γαλάκτωμα – 3% τσιμεντό (δοκίμια 4, 5, 6)



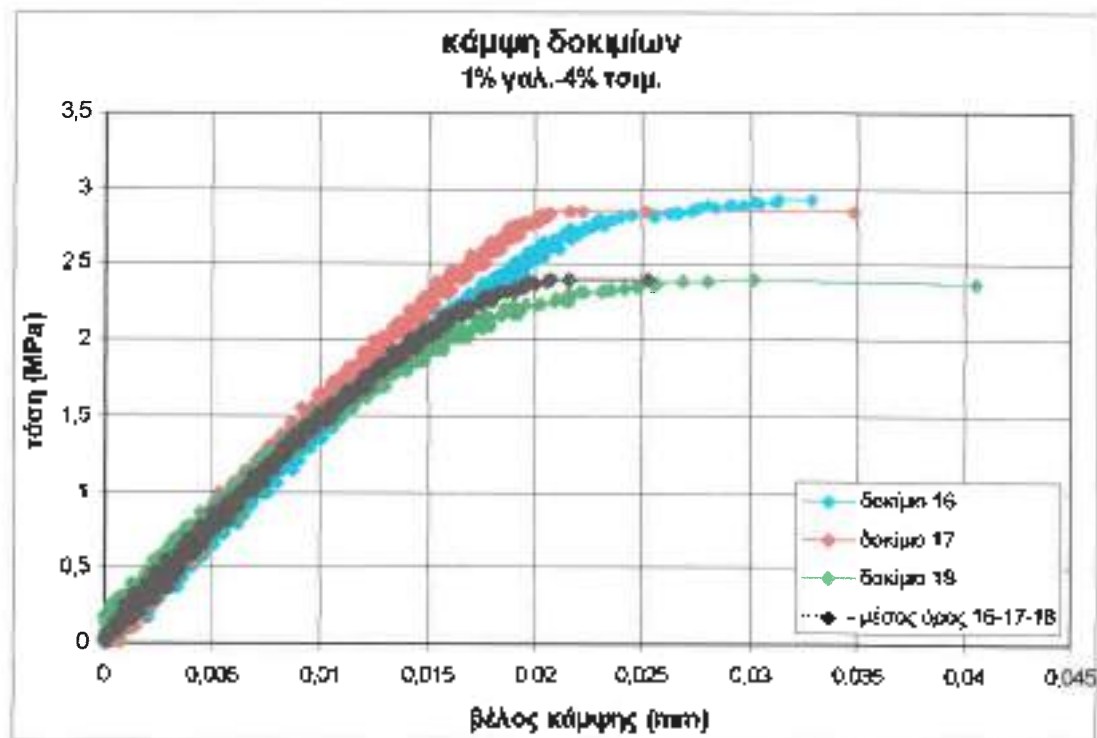
Σχήμα 7.2.3: Τάση βέλος κάμψης για το μίγμα 0% γαλακτίωμα – 3% τσιμέντο (δοκίμια 7, 8, 9)



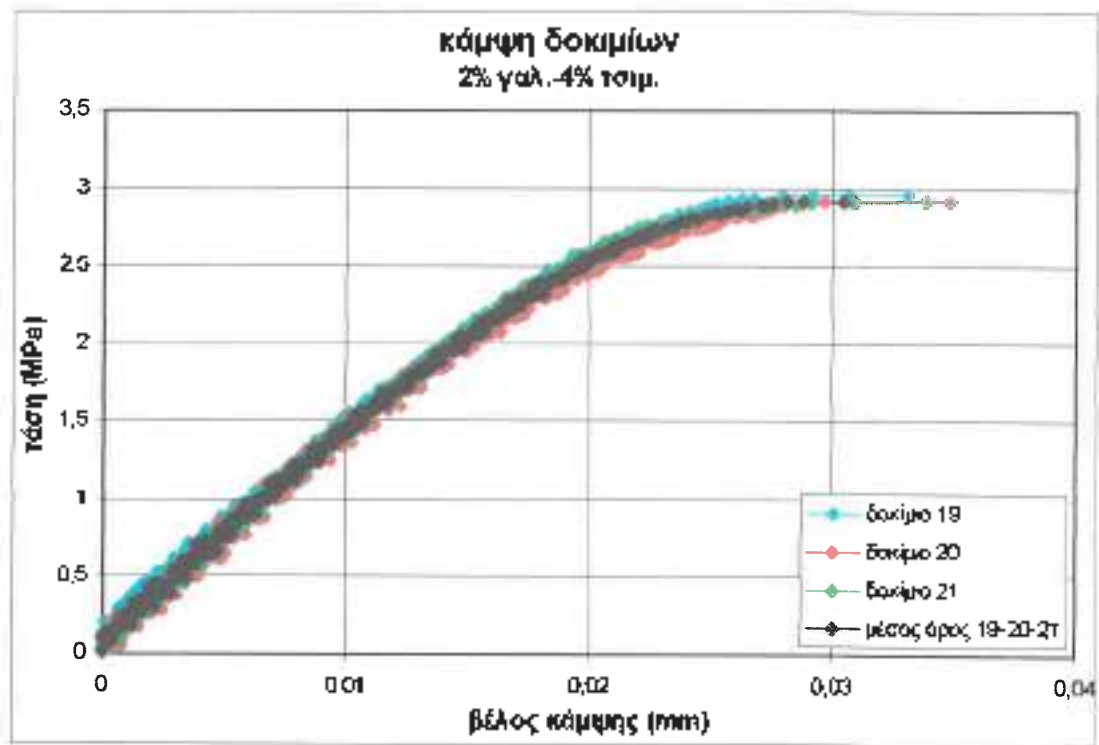
Σχήμα 7.2.4: Τάση βέλος κάμψης για το μίγμα 0% γαλακτίωμα – 4% τσιμέντο (δοκίμια 10, 11, 12)



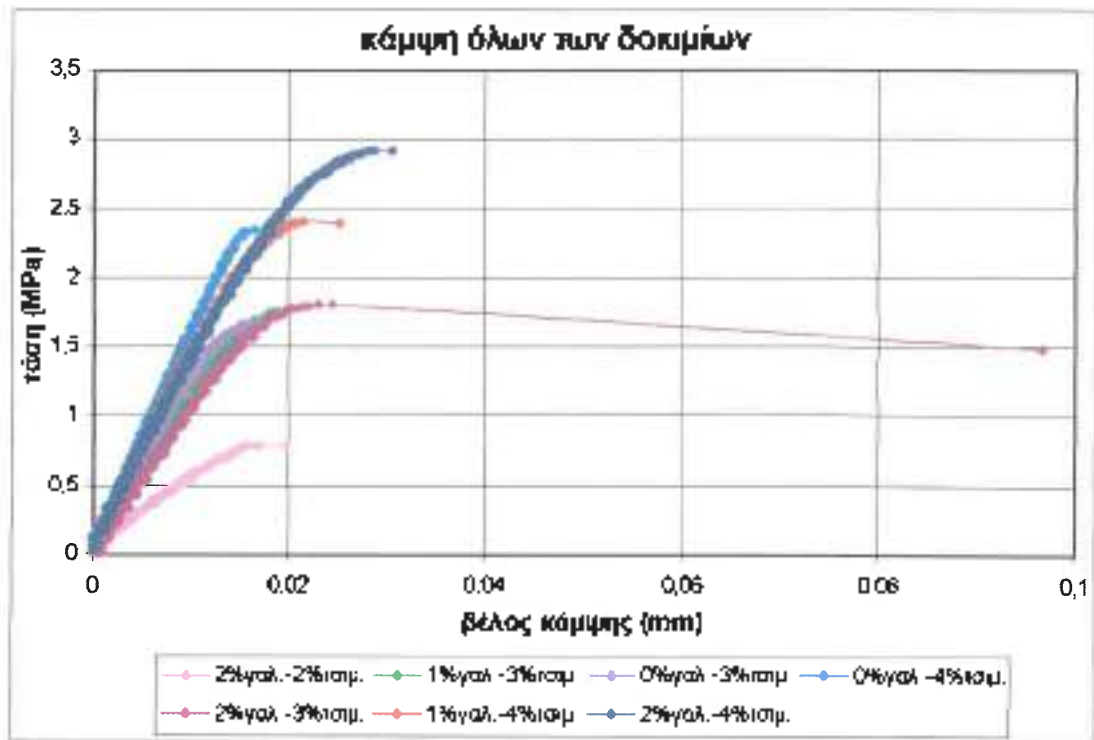
Σχήμα 7.2.5: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 3^η τσιμέντο (δοκίμια 13, 14, 15)



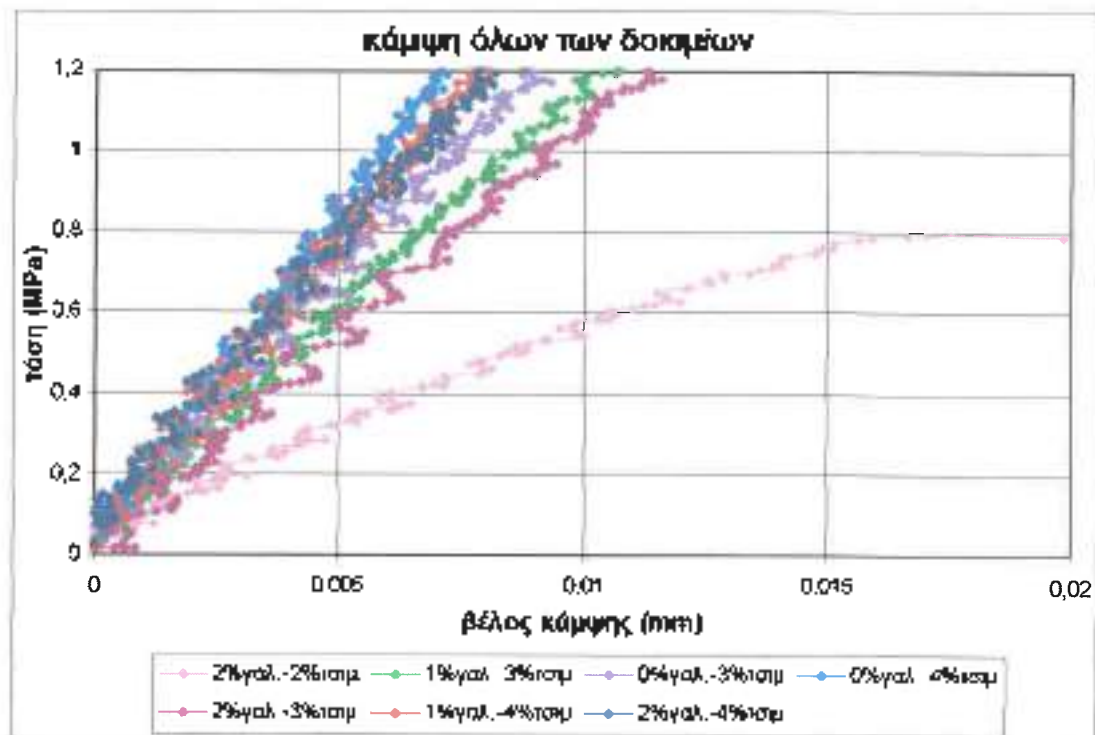
Σχήμα 7.2.6: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 1% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο (δοκίμια 16, 17, 18)



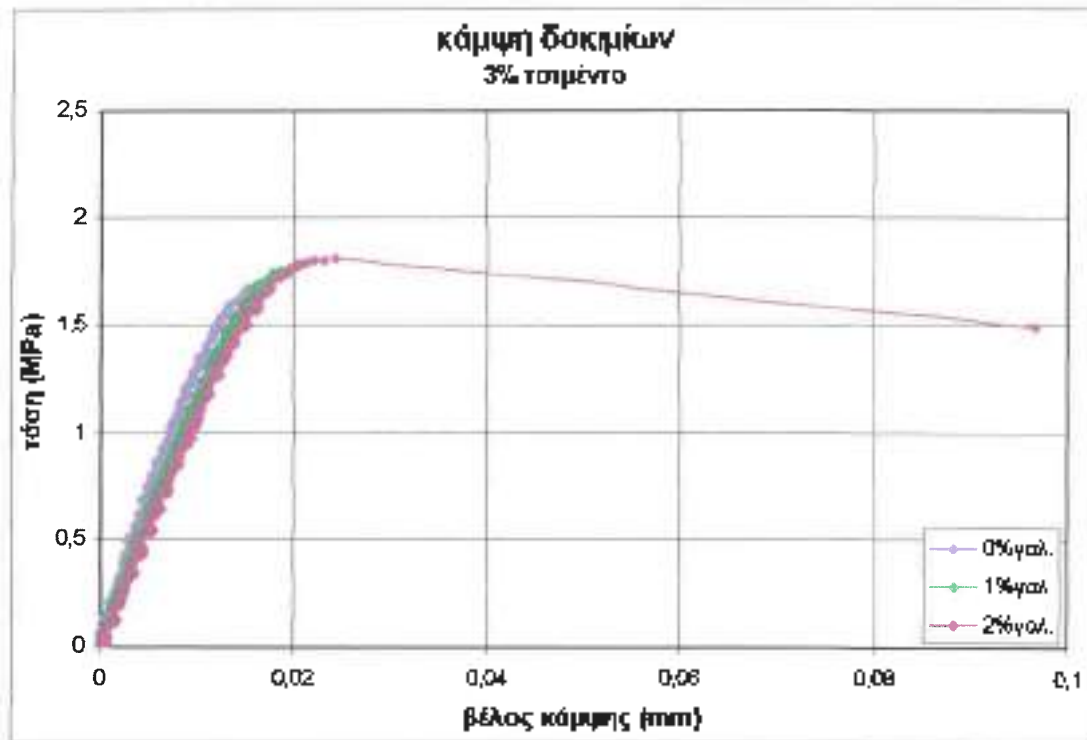
Σχήμα 7.2.7: Τάση βέλος κάμψης για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο (δοκίμια 19, 20, 21)



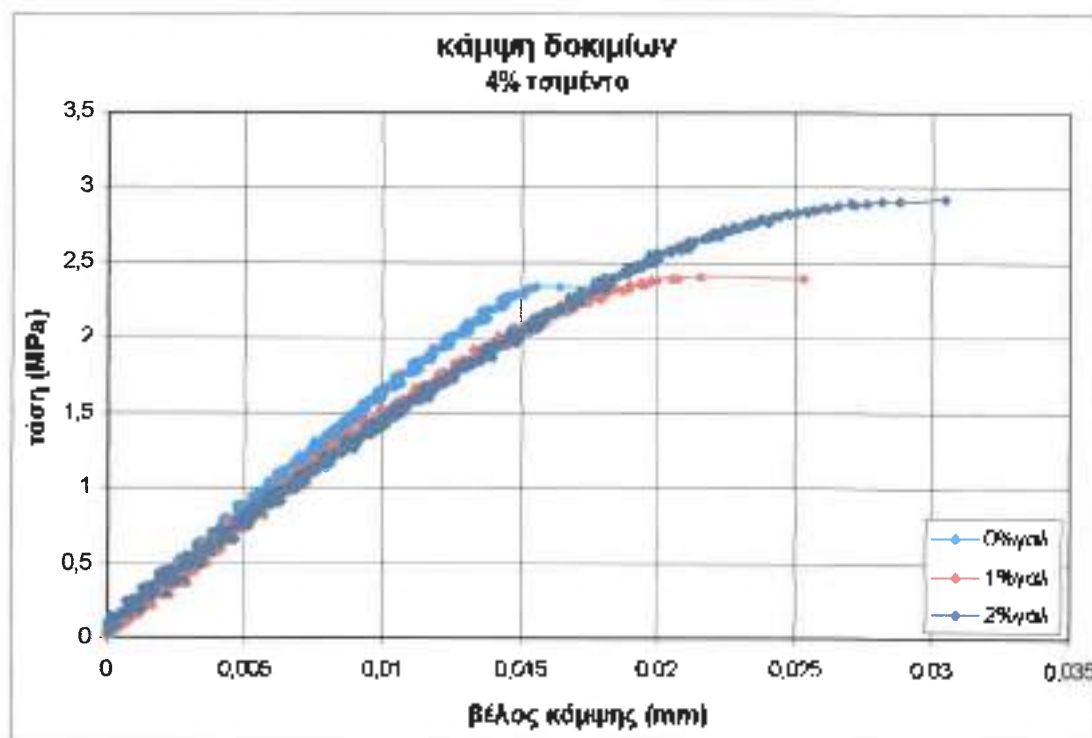
Σχήμα 7.2.8: Τάση – βέλος κάμψης για όλα τα μίγματα



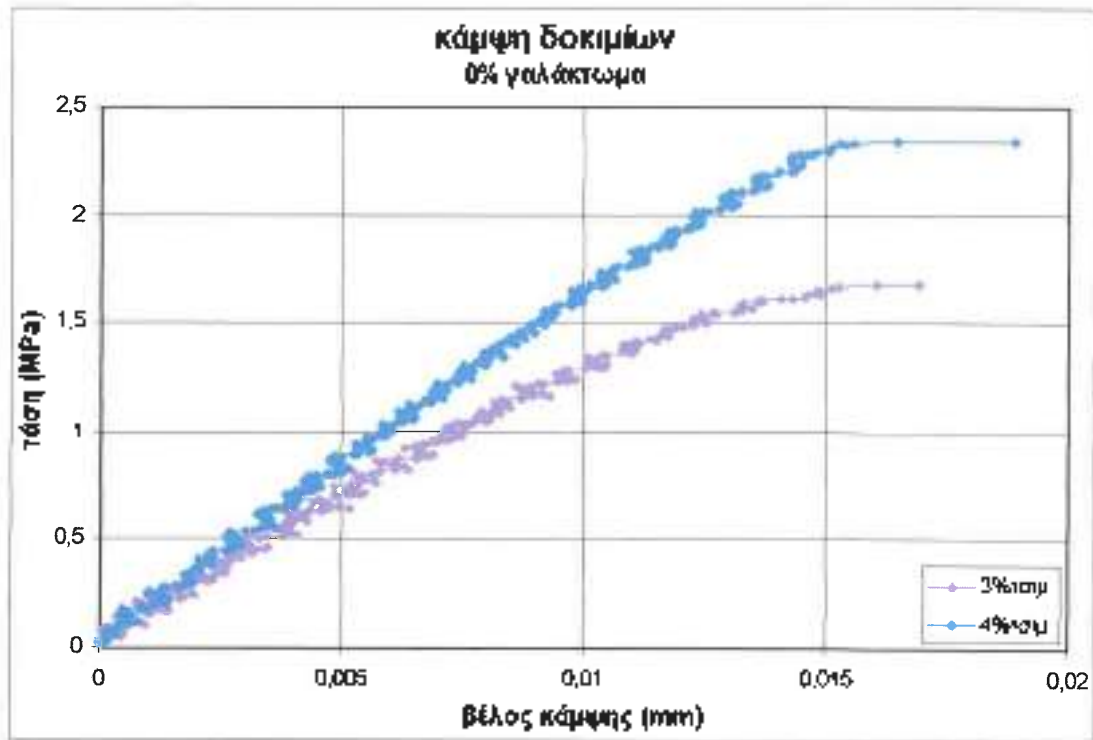
Σχήμα 7.2.9: Τάση – βέλος κάμψης για όλα τα μίγματα (μεγέθυνση του σχήματος 7.2.8 στο 1/3 της μέγιστης αντοχής)



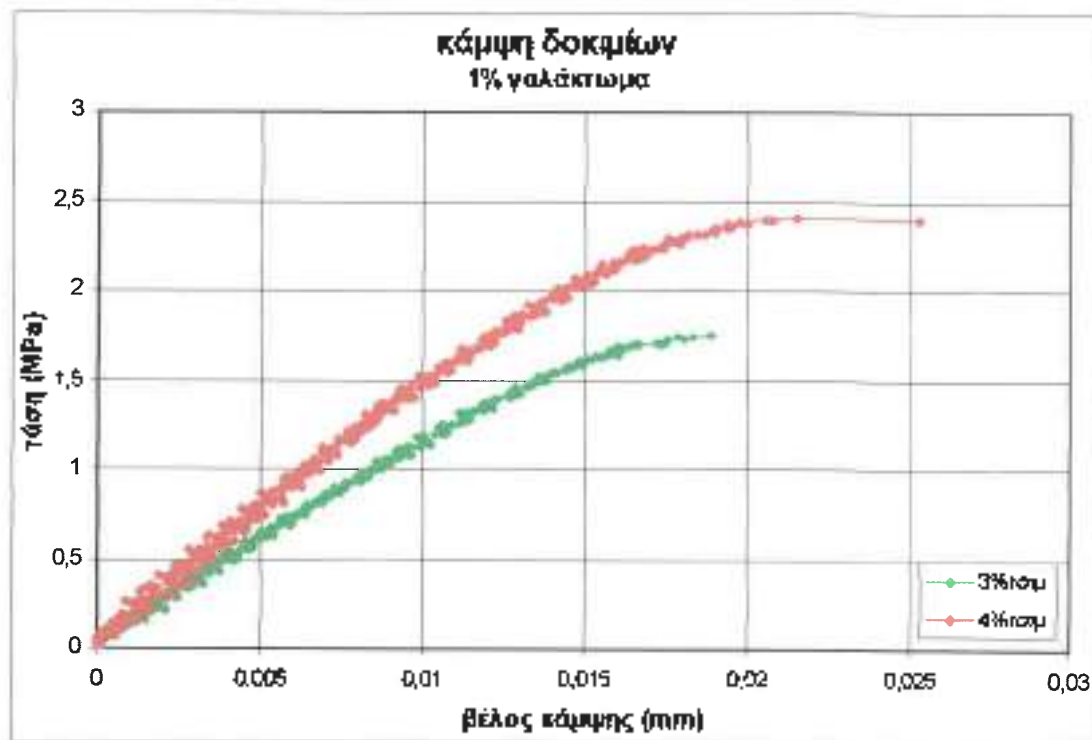
Σχήμα 7.2.10: Τάση – βέλος κάμψης για τα μίγματα με ποσοστό τσιμέντου 3% (0%, 1%, 2% γαλακτομα)



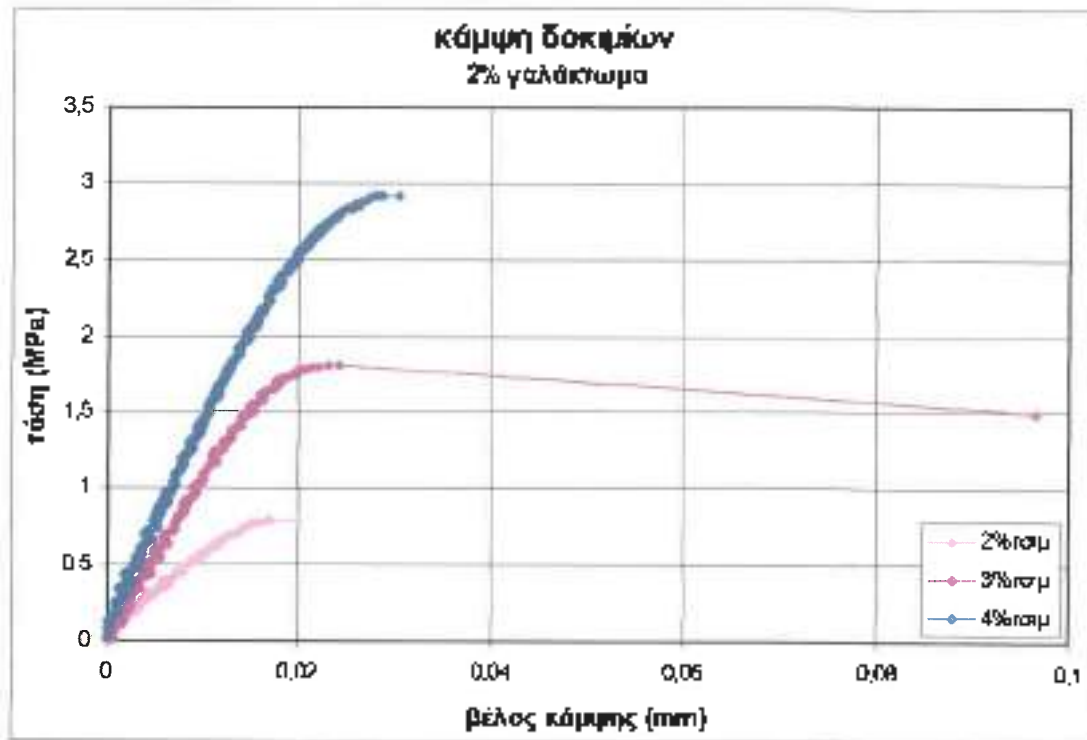
Σχήμα 7.2.11: Τάση – βέλος κάμψης για τα μίγματα με ποσοστό τσιμέντου 4% (0%, 1%, 2% γαλακτομα)



Σχήμα 7.2.12: Τάση βέλος κάμψης για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 0% (3%, 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.2.13: Τάση βέλος κάμψης για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 1% (3%, 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.2.14: Τάση – βέλος κάμψης για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 2% (2%, 3%, 4% τσιμέντο)

7.3 Θλίψη

Στην παραγραφο αυτή, σχολιάζονται τα διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης, που προέκυψαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, με τη βοήθεια της οποίας προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε θλίψη.

Στη δοκιμή υποβλήθηκαν συνολικά 14 δοκίμια (2 από κάθε μίγμα). Στο παράρτημα Β παριστάνονται τα διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμορφωσης για κάθε ένα δοκίμιο ξεχωριστά, με τις μετρήσεις κάθε μηχανομετρου και το μέσο όρο αυτών, που τελικά χρησιμοποιείται ως το διάγραμμα κάθε δοκιμίου.

Παρακάτω, αρχικά παριστάνονται τα διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για κάθε μίγμα ξεχωριστά, όπου παρυσιάζονται οι τιμές των 2 δοκιμίων κάθε μίγματος, και ο μέσος όρος αυτών, που είναι και το διάγραμμα που τελικά λαμβάνεται υπ' όψη. Αυτό προκύπτει ως ο μέσος όρος των επιβαλλόμενων τάσεων και των αντίστοιχων ανηγμένων παραμορφώσεων των δύο δοκιμίων ανά μίγμα.

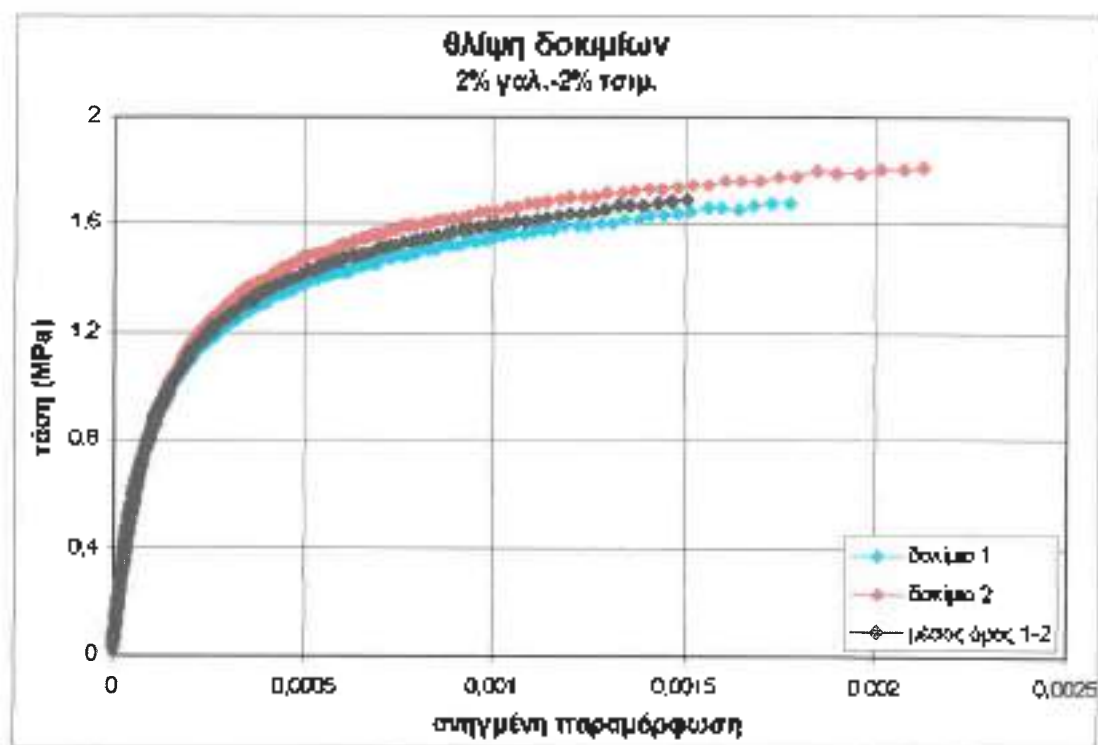
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα αυτά (σχήματα 7.3.1 έως 7.3.7), δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις τιμές τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης ανάμεσα στα δοκίμια ίδιου μίγματος, οπότε ο μέσος όρος αυτών αντιπροσωπεύει με μεγάλη ακρίβεια το μίγμα. Παρατηρείται επίσης, ότι έχει ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο διασποράς των μετρήσεων, που παρατηρήθηκε στα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης (κεφ. 7.2). Υπενθυμίζεται ότι για τα δοκίμια 10 και 11 (μίγμα με 0% γιλάκτωμα και 4% τσιμέντο) και 16 και 17 (μίγμα με 1% γιλάκτωμα και 4% τσιμέντο), δεν επήλθε θραύση. Για το λόγο αυτό, από τα διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τα μέτρα ελαστικότητας, όχι όμως και για τις αντοχές αυτών.

Στο σχήμα 7.3.8 παρυσιάζονται οι διακυμάνσεις της τάσης με την ανηγμένη παραμόρφωση για όλα τα μίγματα. Μια πρώτη παρατήρηση, είναι η ομαδοποίηση των διαγραμμάτων, ανάλογα με την περιεκτικότητα του τσιμέντου στο μίγμα, κάτι που παρατηρήθηκε και στα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης - βέλους κάμψης. Με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3% και 4%, παρατηρείται σταδιακή αύξηση του λόγου σ/ϵ (δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας), η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη κατά την μετάβαση από 2% σε 3% από ότι από 3% σε 4%. Η αντοχή σχεδόν τριπλασιάζεται για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3%, ενώ

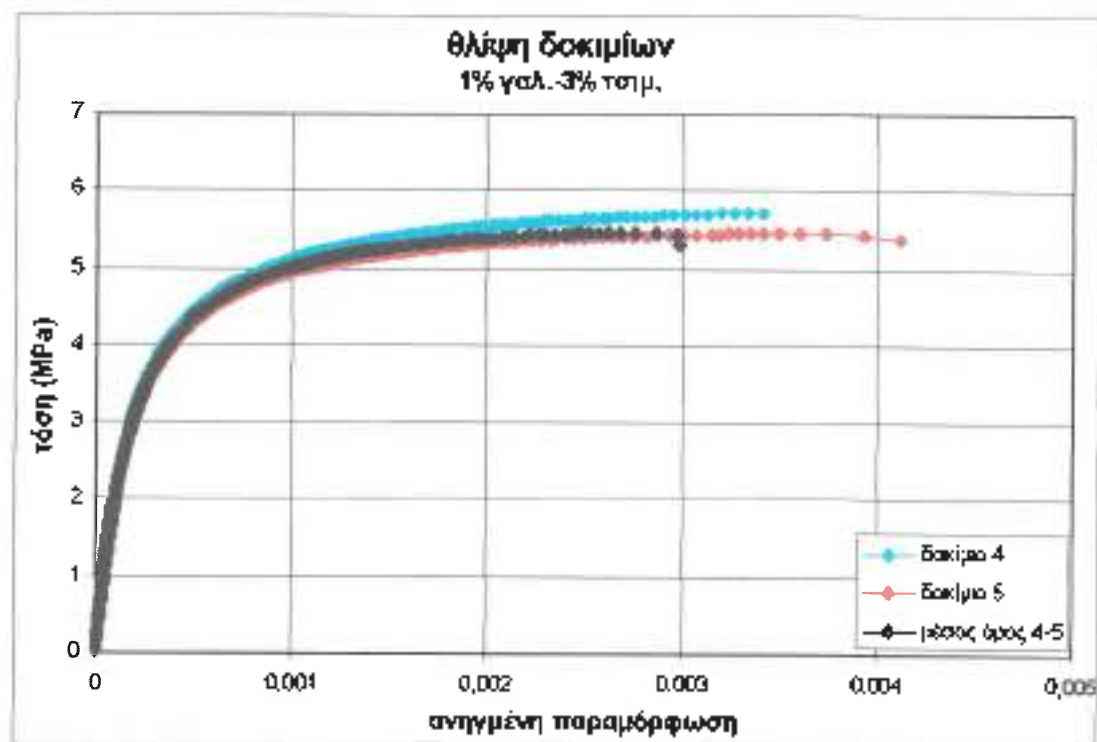
γίνεται 4 φορές μεγαλύτερη για μετάβαση από 2% σε 4% τσιμέντο. Για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 3% σε 4% η αντοχή γίνεται περίπου 1,5 φορές μεγαλύτερη. Ο ρόλος του ποσοστού του γαλακτώματος στην μεταβολή της αντοχής δεν είναι σημαντικός. Όσο αφορά την μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση, οι τιμές της κυμαίνονται ανεξάρτητα από τα ποσοστά του τσιμέντου ή του γαλακτώματος στο μίγμα. Βέβαια, για τα μίγματα με 0% και 1% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο, δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα, λόγω έλλειψης στοιχείων. Η μεγέθυνση του σχήματος αυτού στο 1/3 της μέγιστης αντοχής, παρουσιάζει καλύτερα την παγκάτηρηση της ομαδοποίησης (σχήμα 7.2.9).

Στα σχήματα 7.3.10 και 7.3.11, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για σταθερά ποσοστά τσιμέντου 3% και 4% αντίστοιχα, με σταδιακή αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος από 0% σε 1% και 2%. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την μείωση του γαλακτώματος. Για ποσοστό τσιμέντου 3%, τα μέτρα ελαστικότητας δεν διαφοροποιούνται σημαντικά με τις μεταβολές του ποσοστού του γαλακτώματος. Η αντοχή, όμως, φαίνεται να επηρεάζεται από την παρουσία του γαλακτώματος, αφού η τιμή της είναι αισθητά διαφορετική ανάμεσα στα μίγματα με 1% και 2% γαλάκτωμα και στο μίγμα με 0% γαλάκτωμα. Στα μίγματα με 4% τσιμέντο, τα μέτρα ελαστικότητας διαφοροποιούνται όταν το γαλάκτωμα βρίσκεται σε ποσοστό 2%, ενώ είναι σχεδόν ίσα όταν αυτό βρίσκεται σε ποσοστά 0% και 1%. Για τις αντοχές δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα.

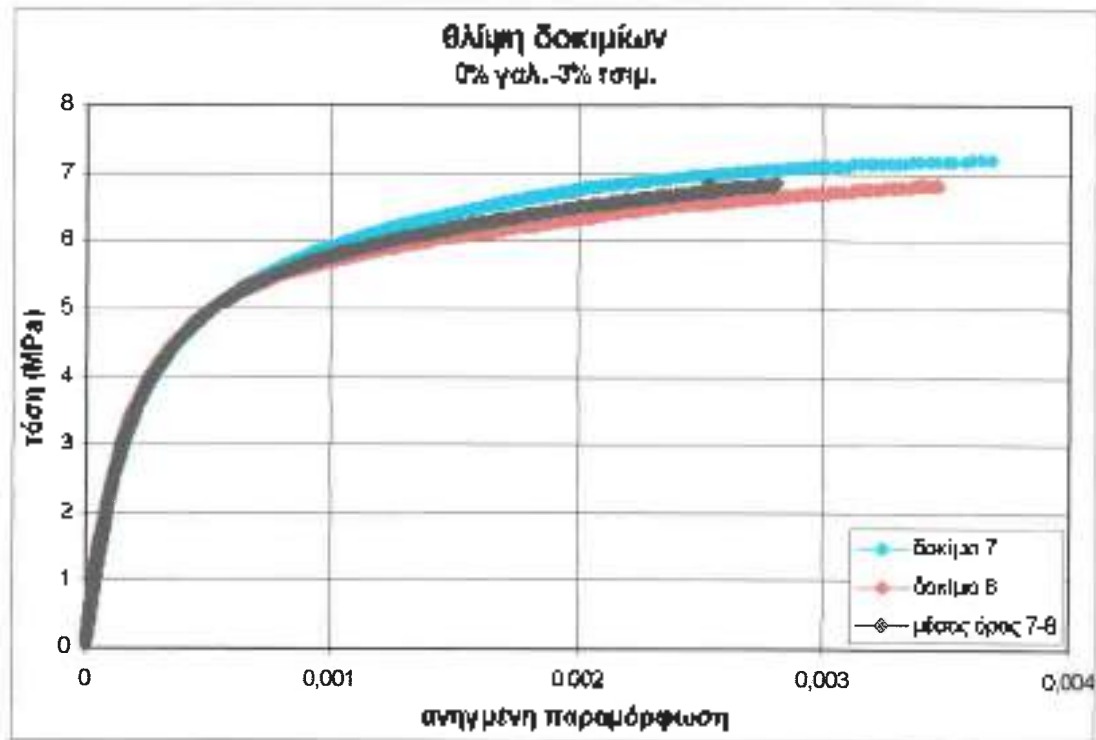
Στα σχήματα 7.3.12 έως 7.3.14, φαίνεται αναλυτικότερα, η επίδραση του ποσοστού του τσιμέντου στο μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή, όταν το ποσοστό του γαλακτώματος παραμένει σταθερό. Για 0% και 1% γαλάκτωμα (σχήματα 7.3.12 και 7.3.13, αντίστοιχα), η αύξηση του τσιμέντου από 3% σε 4%, επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 30% και 40% αντίστοιχα. Στο σχήμα 7.3.14, για 2% γαλάκτωμα, η αντοχή τριπλασιάζεται για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3%, τετραπλασιάζεται για αύξηση του τσιμέντου από 2% σε 4%, ενώ διπλασιάζεται για μετάβαση από 3% σε 4%. Αντίστοιχες είναι και οι μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας. Η μέγιστη παραμόρφωση αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση του τσιμέντου. Η παρατήρηση αυτή είναι ενδιαφέρουσα, γιατί αναμένεται ότι, γενικά, η αύξηση του τσιμέντου, δημιουργεί υλικά πιο ψαθυρά. Εντούτοις, αυτό δεν φαίνεται να ισχύει για τα μίγματα που εξετάστηκαν, και θα χρειαστεί περαιτέρω έρευνα για πλήρη διερεύνηση του θέματος.



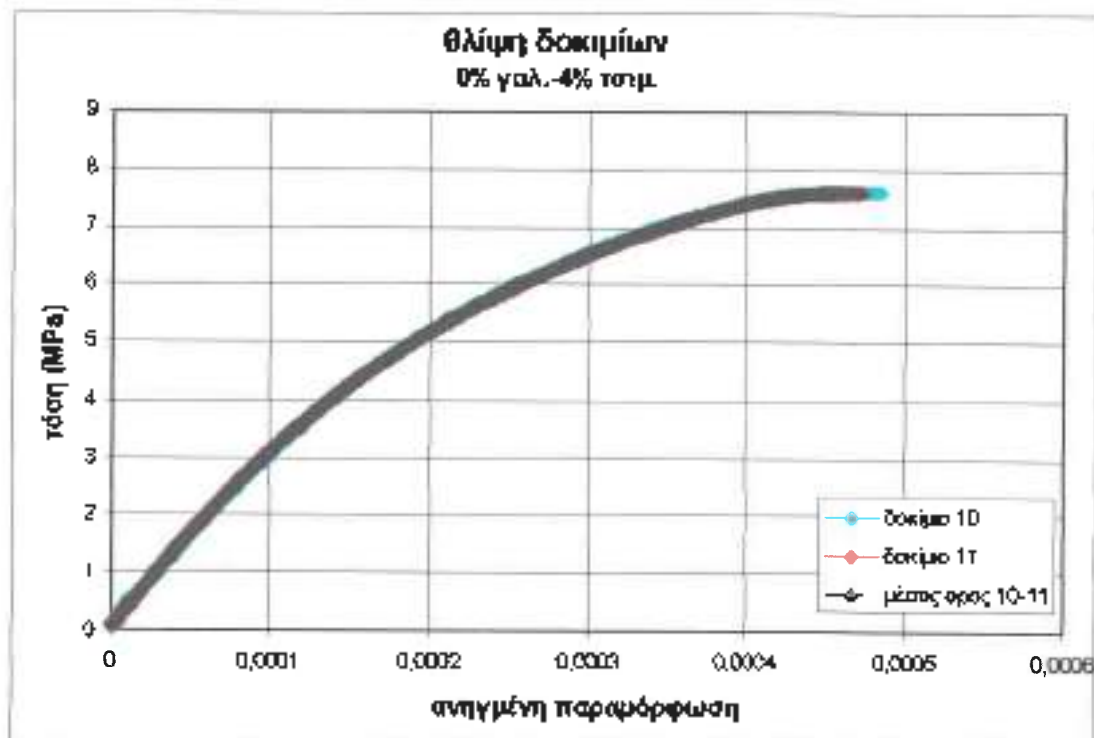
Σχήμα 7.3.1: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μέγμα 2% γαλάκτωμα – 2% τσιμέντο (δοκίμια 1, 2)



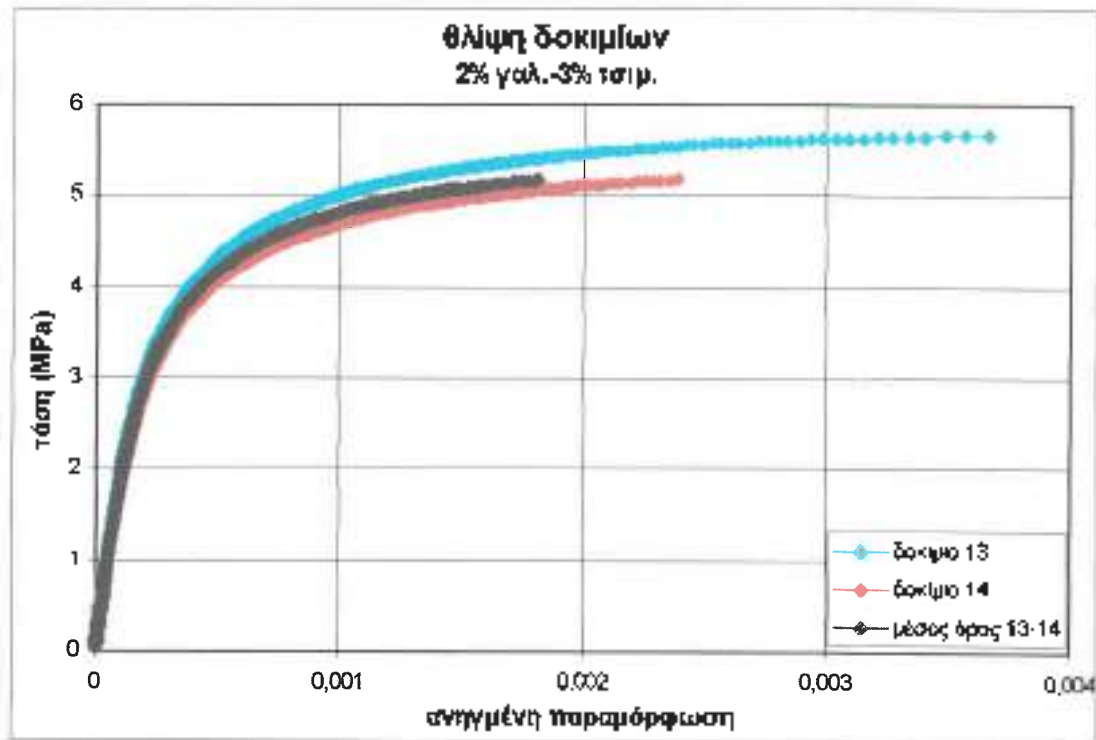
Σχήμα 7.3.2: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μέγμα 1% γαλάκτωμα – 3% τσιμέντο (δοκίμια 4, 5)



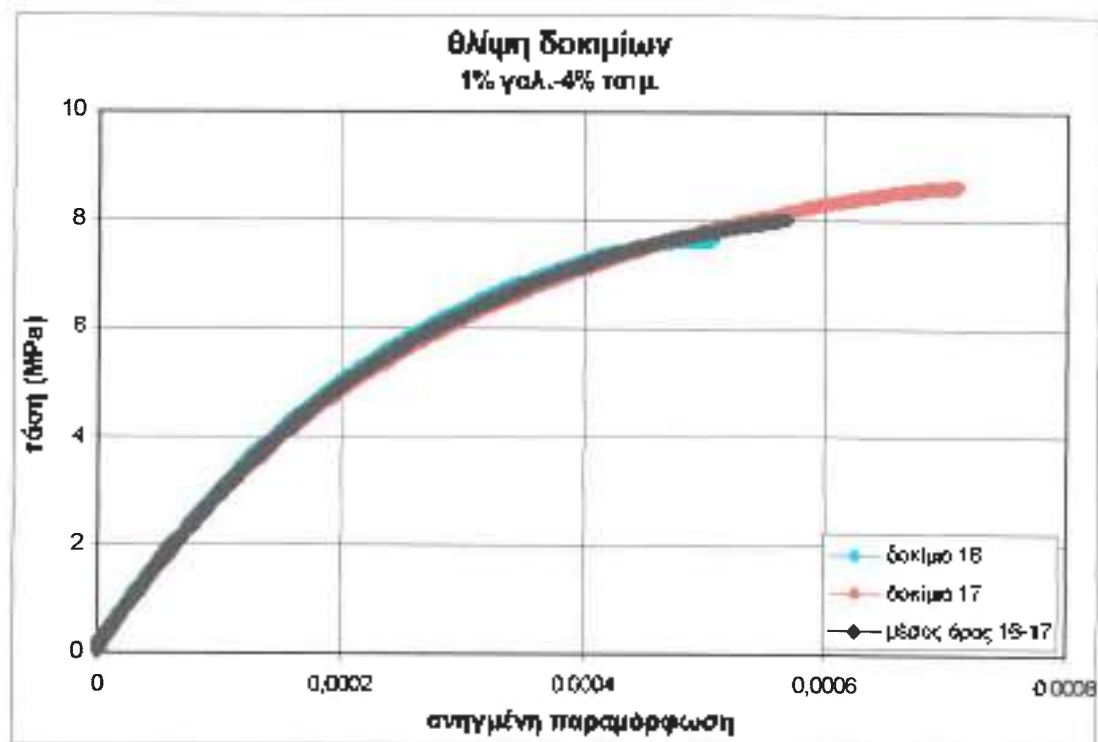
Σχήμα 7.3.3: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 0% γαλιόκτινιμ – 3% τσιμέντο (δοκίμα 7, 8)



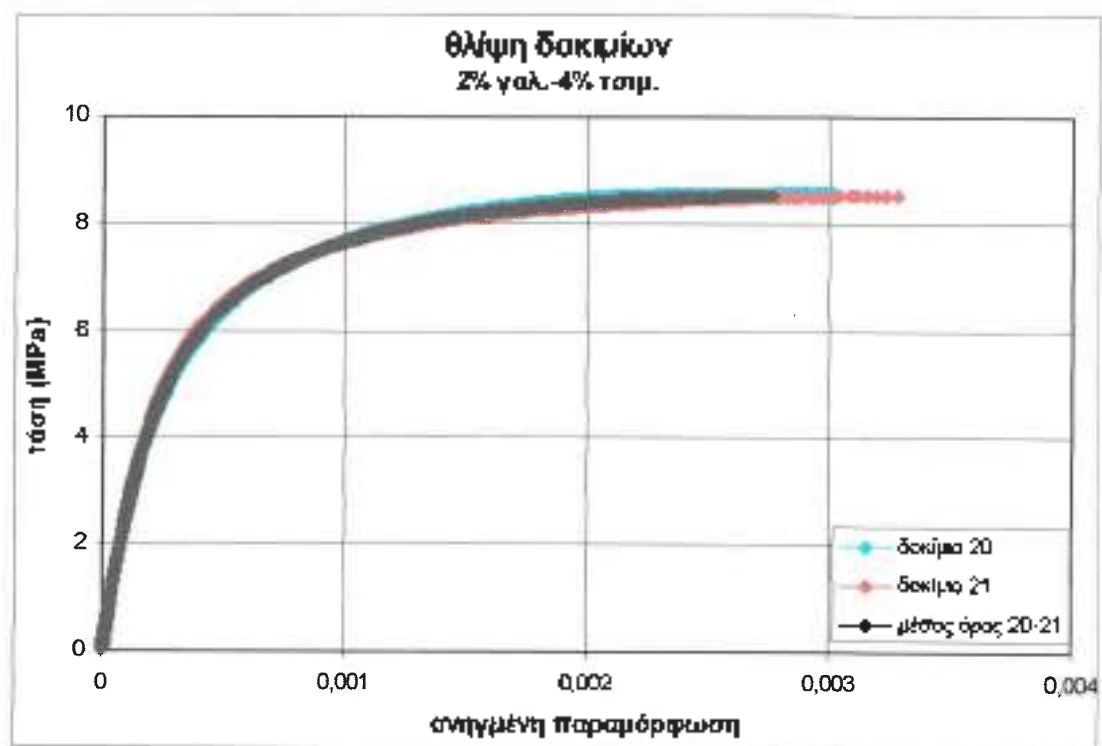
Σχήμα 7.3.4: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 0% γαλιόκτινιμ – 4% τσιμέντο (δοκίμα 10, 11)



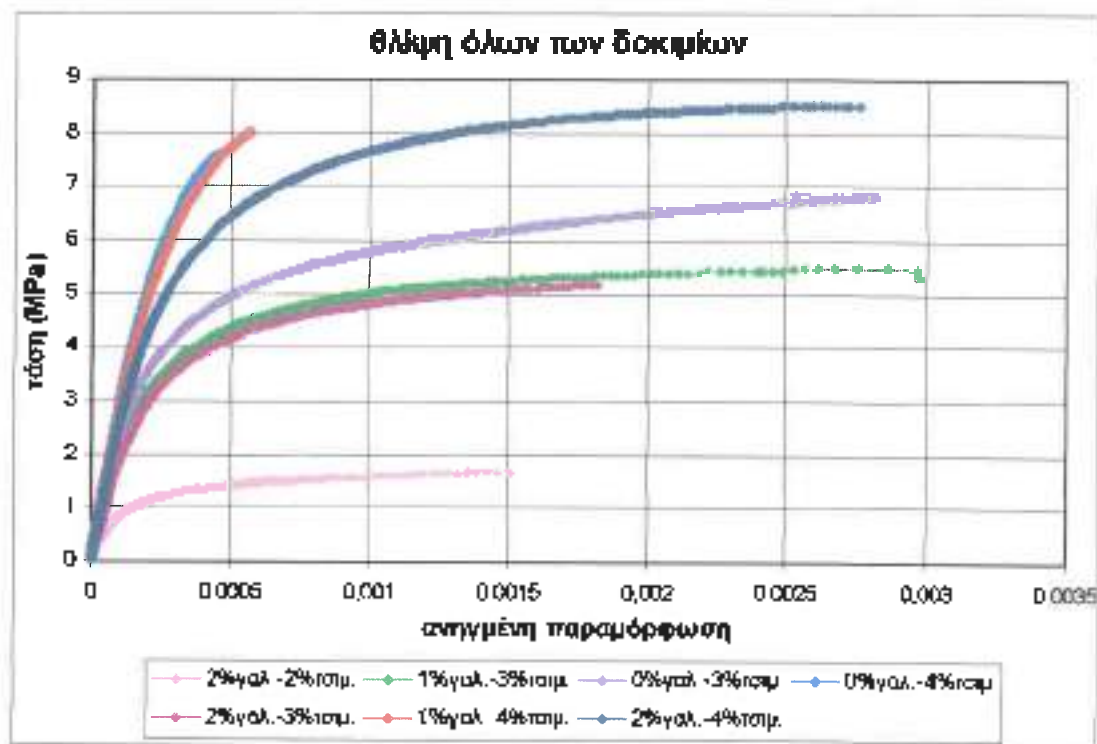
Σχήμα 7.3.5: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 2% γαλιέκτωμα – 3% τσιμεντο (δοκίμια 13, 14)



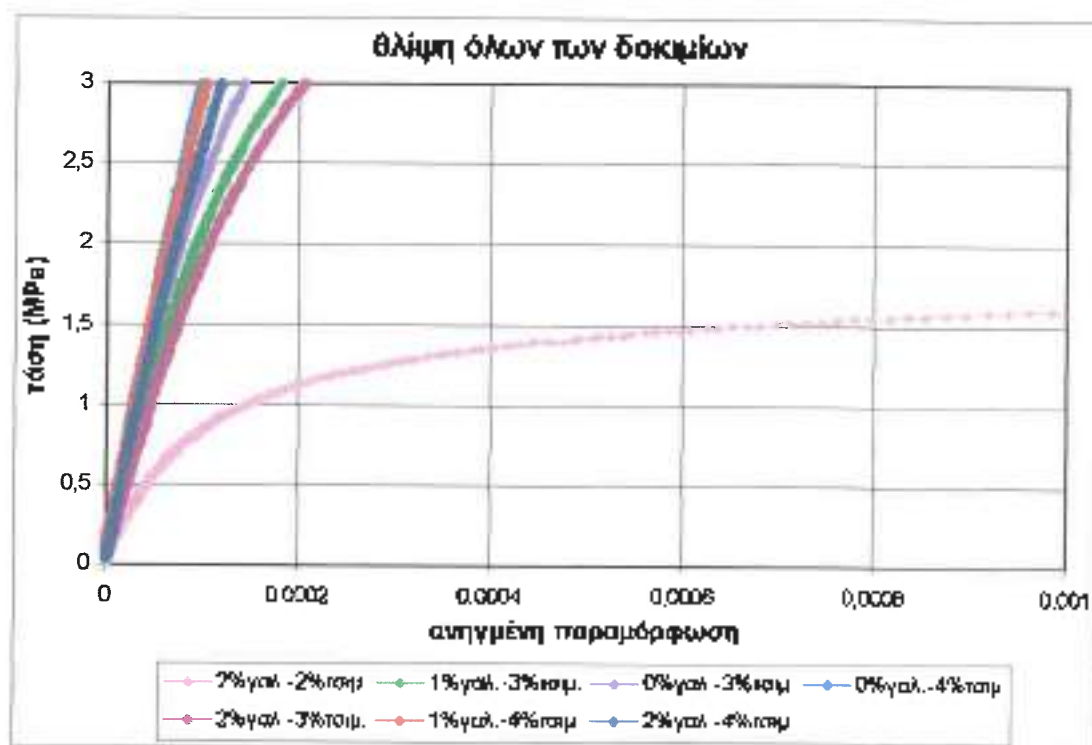
Σχήμα 7.3.6: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 1% γαλιέκτωμα – 4% τσιμεντο (δοκίμια 16, 17)



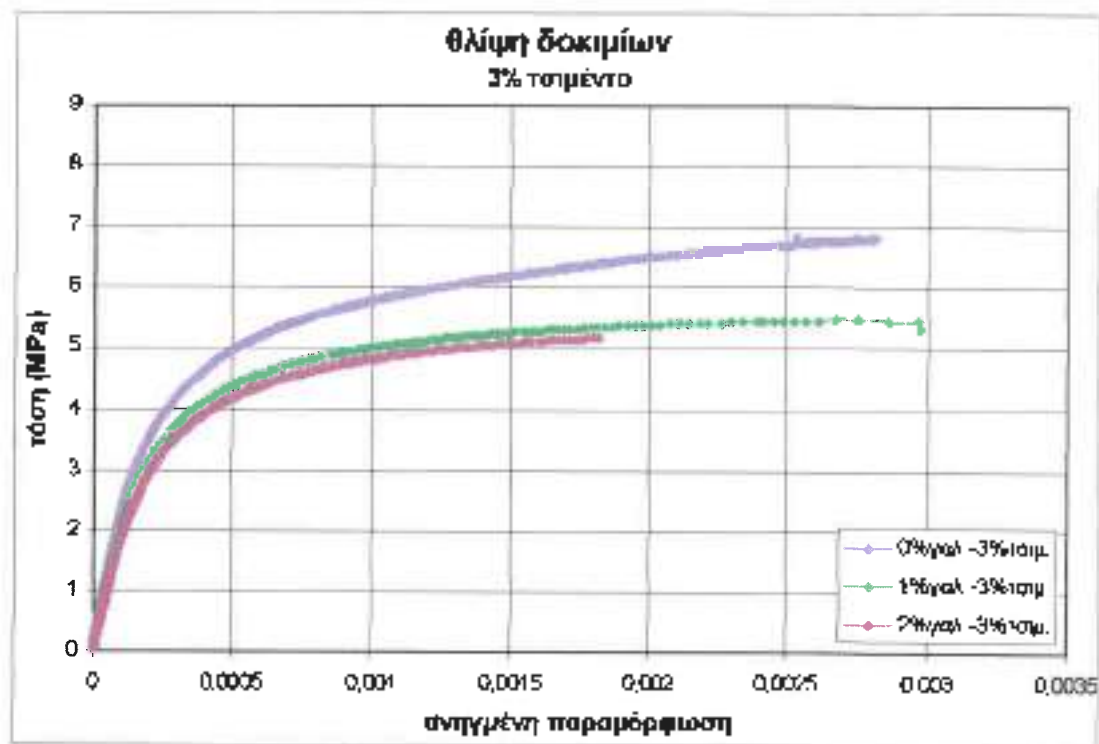
Σχήμα 7.3.7: Τάση - ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 2% γαλιόκτομα - 4% τσιμέντο (δοκίμια 20, 21)



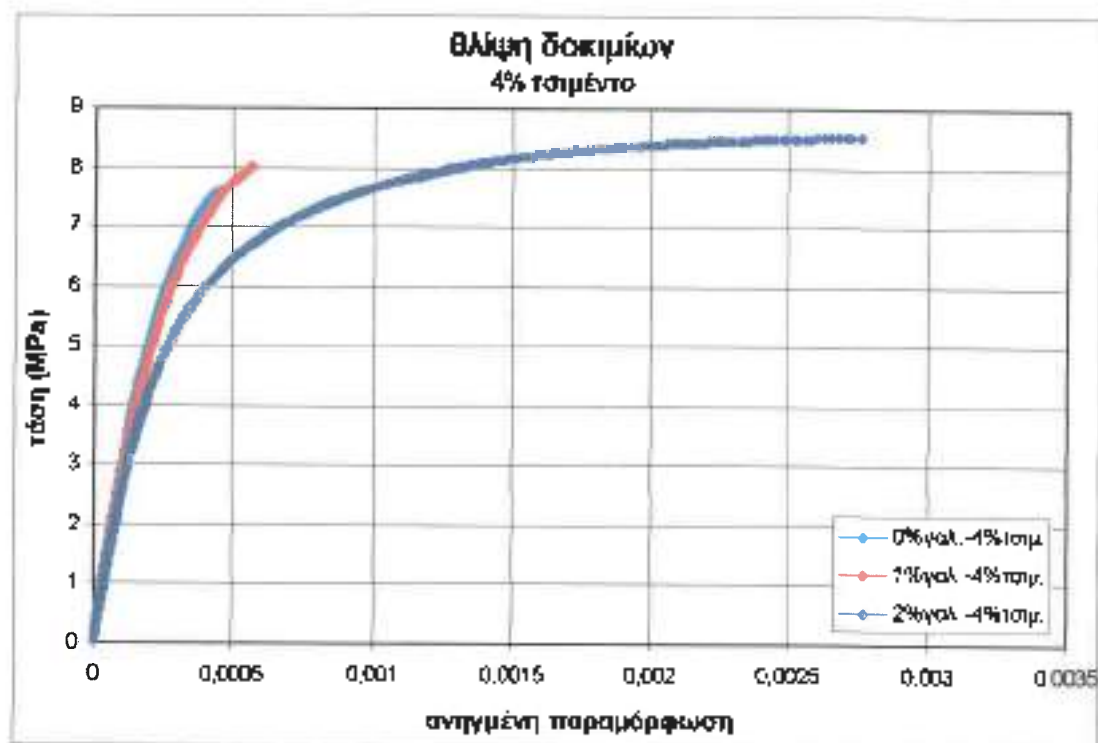
Σχήμα 7.3.8: Τύση – ανηγμένη παραμόρφωση για όλα τα μίγματα



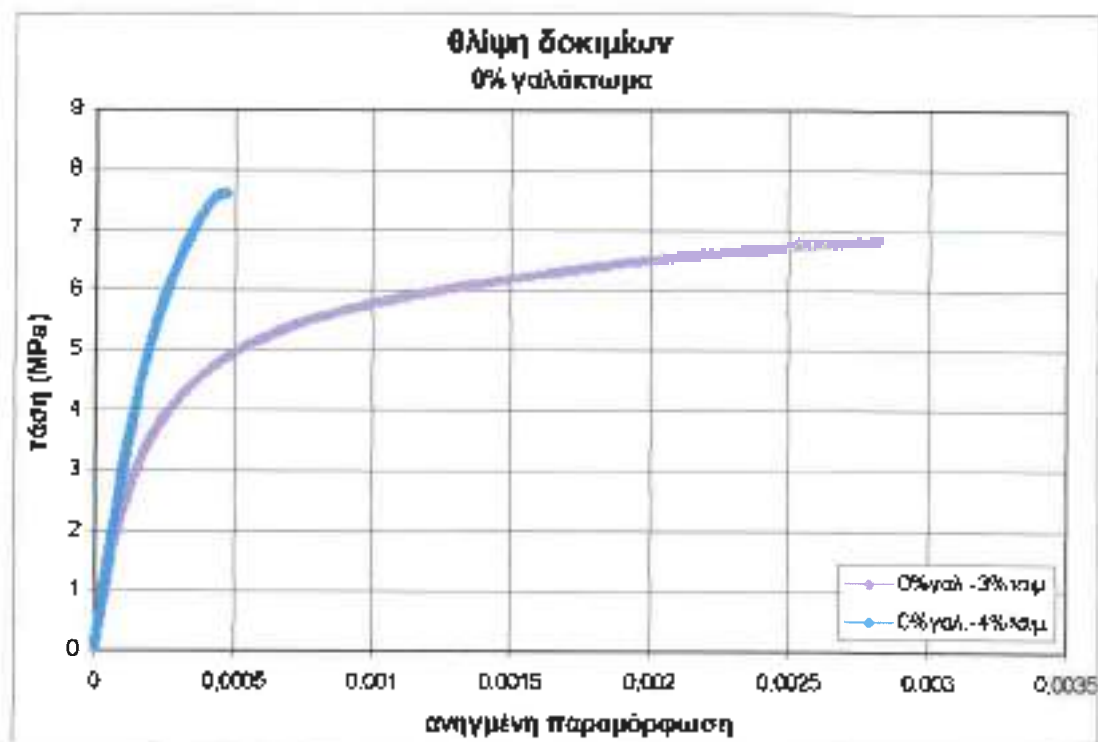
Σχήμα 7.3.9: Τύση – ανηγμένη παραμόρφωση για όλα τα μίγματα (μεγέθυνση του σχήματος 7.3.8 στα 1/3 της μεγίστης αντοχής)



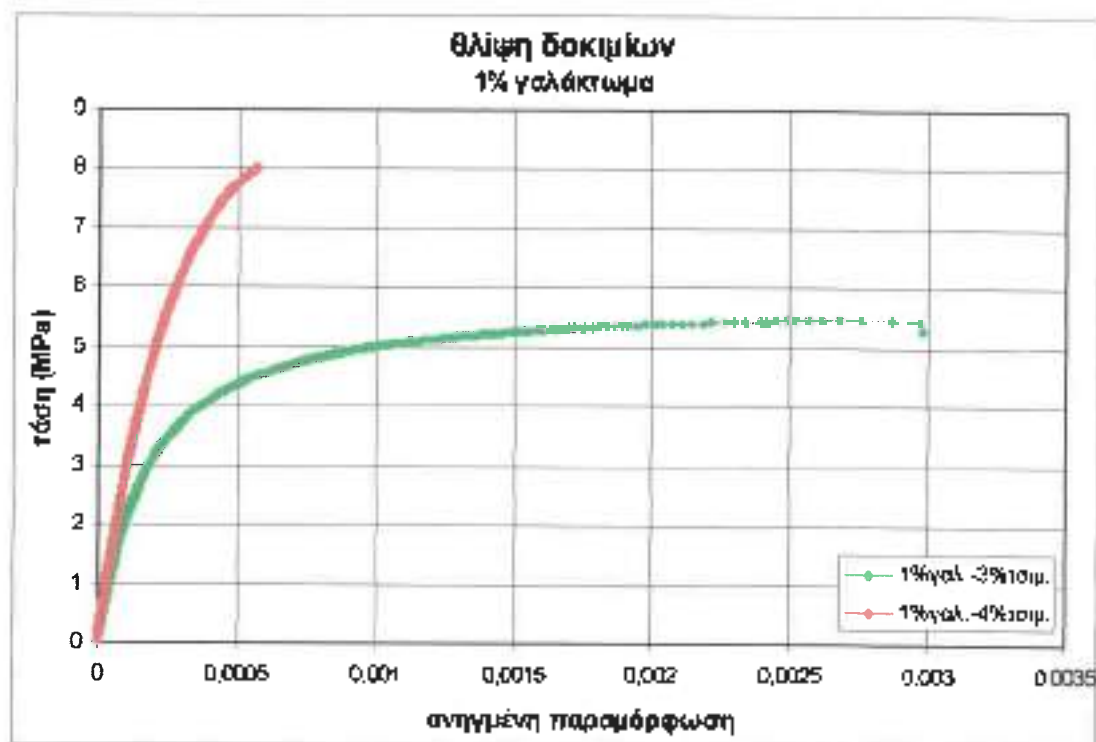
Σχήμα 7.3.10: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για τα μίγματα με ποσοστό τσιμέντου 3% (0%, 1%, 2% γαλάκτωμα)



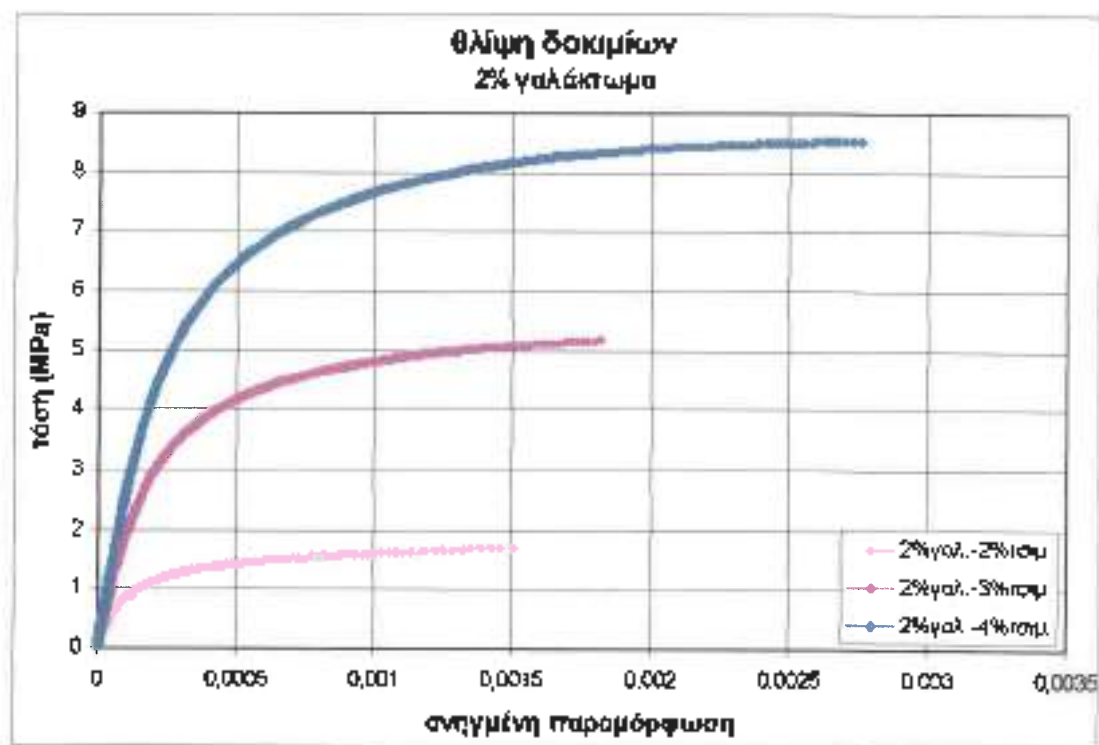
Σχήμα 7.3.11: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για τα μίγματα με ποσοστό τσιμέντου 4% (0%, 1%, 2% γαλάκτωμα)



Σχήμα 7.3.12: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 0% (3%, 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.3.13: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 1% (3%, 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.3.14: Τάση -συνηγμένη παραμόρφωση για τα μίγματα με ποσοστό γαλακτώματος 2% (2%, 3%, 4% ιππέντο)

7.4 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη

Στο παρακάτω σχήμα (7.4.1) γίνεται σύγκριση των τιμών των μετρων ελαστικότητας των δοκιμίων, που προέκυψαν από τις δοκιμές κίμυης και μονοαξονικής θλίψης.

Στον πίνακα 7.4 1, παρατίθενται για το κάθε δοκίμιο, το αντίστοιχο παροστό γυλισκώματος και τσιμέντου, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη σε MPa (Ε κάμψης και Ε θλίψης, αντίστοιχα)

Κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί σε ένα δοκίμιο, του οποίου ο αριθμός αναγράφεται δίπλα στο σημείο αυτό. Τα δοκίμια ίδιου μίγματος παρουσιάζονται με το ίδιο χρώμα. Για καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων κατασκευάζεται η γραμμή ισότητας καθώς και η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης, της οποίας αναγράφεται η εξίσωση και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R^2).

Μια άμεση παρατήρηση είναι ότι με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στο μίγμα, αυξάνεται το Ε κάμψης και το Ε θλίψης, ενώ η αύξηση του ποσοστού του γυλισκώματος, επιφέρει μείωση στα μέτρα ελαστικότητας. Επίσης παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε θλίψη, όπως άλλωστε έχει βρεθεί και σε άλλες εργασίες [7].

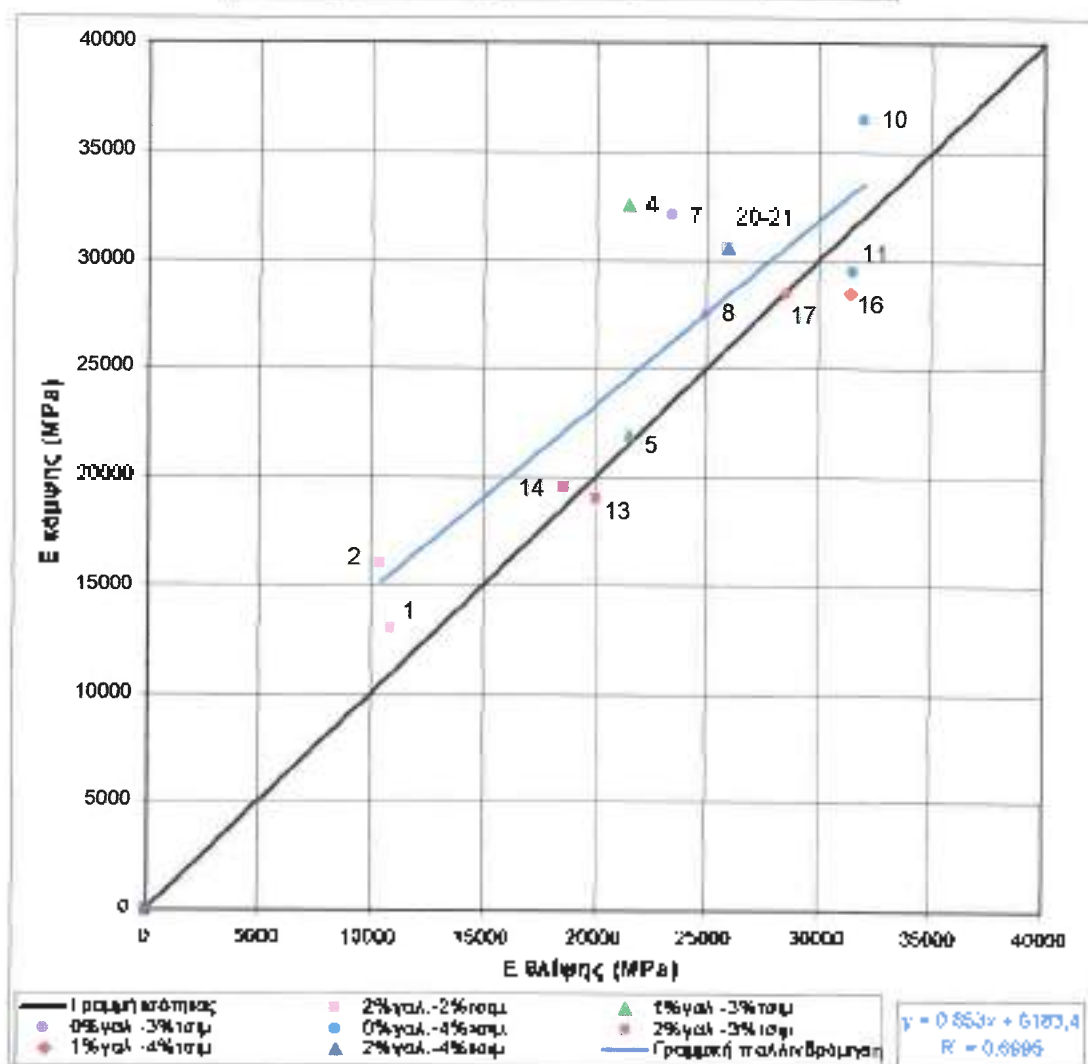
Η διαφορά μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη, γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αν ληφθεί υπ'όψη και η διόγκωση λόγω διάτμησης, που πρέπει να συνευλογίζεται στα δοκίμια μεγέθους 100mm x 100mm x 500mm (διορθωτικός συντελεστής 1,28)

Η διαφορά αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στο ότι για τον υπολογισμό του μετρου ελαστικότητας σε κάμψη, θεωρείται ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι τελείως ελαστική και ανεξάρτητη από το πεδίο των αναπτυσσόμενων τάσεων. Έχει όμως βρεθεί για το σκυρόδεμα [8], ότι η έντονη μεταβολή του πεδίου των τάσεων από εφελκυσμό σε θλίψη, διαφοροποιεί σημαντικά τη συμπεριφορά του, από εκείνη με μονοαξονικό θλιπτικό πεδίο τάσεων. Κάτι ανάλογο θα πρέπει να συμβαίνει και για τα δοκίμια της παρούσας εργασίας.

Οι οποιες εξαιρέσεις, που φαίνονται στο διάγραμμα, αποδίδονται στις πειραματικές συνθήκες, στις οποίες, επίσης, αποδίδονται και οι διαφορές μεταξύ των μετρων ελαστικότητας που προέκυψαν από την ίδια δοκιμή στα διαφορετικά δοκίμια του ίδιου μίγματος.

Πίνακας 7.4.1: Τιμές του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη, για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν

α/α Δοκίμια	Γαλάντωμα (%)	Τσιμέντο (%)	E κάμψης (MPa)	E θλίψης (MPa)
1	2	2	13000	11000
2			16000	10500
4	1	3	32500	21500
5			22000	21500
7	0	3	32000	23500
8			27500	25000
10	0	4	36500	32000
11			29500	31500
13	2	3	19000	20000
14			19500	18500
16	1	4	28500	31000
17			28500	28500
20	2	4	30500	26000
21			30500	26000



Σχήμα 7.4.1: Σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη, για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν

7.5 Διαγράμματα τάσης βέλους κάμψης για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται σχολιασμός των διαγραμμάτων τάσης βέλους κάμψης, τα οποία προέκυψαν από τη δοκιμή επανιλαμψιγόμενης φόρτισης (ημιπνοειδούς μορφής) των δοκιμίων, με τη βοήθεια της οποίας προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (Εδυν.) σε MPa

Ως γνωστόν, η δοκιμή αποτελείται από 100 κύκλους φόρτισης (0 έως 99), κάθε ένας από τους οποίους διαρκεί 1 sec. Ο χρόνος φόρτισης είναι 0,5 sec. και ο χρόνος αποφόρτισης, επίσης 0,5 sec. Για να υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία στην εύρεση του Εδυν., παρακολουθούμε όλη τη φάση διακύμανσης των τάσεων και των βελών κάμψης, γι' αυτό κατασκευάζουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους 5 πρώτους (0 έως 4), τους 5 μεσαίους (47 έως 51), και τους 6 τελευταίους (94 έως 99) κύκλους φόρτισης.

Στη δοκιμή υποβλήθηκαν συνολικά 14 δοκίμια (2 από κάθε μίγμα), και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης – βέλους κάμψης για κάθε δοκίμιο, για κάθε κύκλο και για κάθε ομάδα κύκλων χωριστά (0 έως 4, 47 έως 51, 95 έως 99. Ο κύκλος 94 περιλήφθηκε για λόγους ομοιομορφίας στην παρουσίαση των διαγραμμάτων, και μόνο γι' αυτό). Εδώ παρατίθενται ως αντιπροσωπευτικά, τα διαγράμματα του δοκιμίου 15 (2% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο), ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται στα παραρτήματα Γ και Δ.

Στα διαγράμματα παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα τα σημεία που αντιστοιχούν στην φόρτιση και αποφόρτιση. Όπως φαίνεται από τη μορφή τους, υπάρχει σημαντική διασπορά στις μετρήσεις, η οποία αποδίδεται σε "θόρυβο" που πιθανόν να προκλήθηκε από χαλαρή στήριξη (ταλάντωση) των συνδέσμων της γεφυρας στην οποία προσαρμόζονταν τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα (LVDT). Ως γνωστόν, η στήριξη αυτή των LVDT, είναι επιβεβλημένη λόγω της υποχρέωσης των δοκιμίων στα σημεία στήριξης και στα σημεία φόρτισης. Η ύπαρξη του "θορύβου" αυτού, γίνεται πιο κατανοητή στο σχήμα 7.5.1 (κύκλος 2, δοκίμιο 9, 0% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο), όπου κατασκευάζοντας τις νοητές γραμμές που ενώνουν τα σημεία φόρτισης και αποφόρτισης, παρατηρείται η μνηρή του σχήματος και όχι ο αναμενόμενος βρόχος στήριξης.

Εντούτοις, έγινε παρακείμε μια προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις, παρά τη διασπορά τους, για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας. Για το σκοπό αυτό, μέσω του προγράμματος H/Y excel, υπολογίστηκε για κάθε κύκλο φόρτισης και για κάθε κύκλο αποφόρτισης, η γραμμή της ευθύγραμμης παλινδρόμησης, μεταξύ βέλους κάμψης και επιβαλλόμενης τάσης, της οποίας παρουσιάζεται η εξίσωση και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R^2).

Επειδή το πέρας του κύκλου φόρτισης και η έναρξη του κύκλου αποφόρτισης δεν μπορούσαν σαφώς να προσδιοριστούν, λόγω μεγάλης διασποράς των μετρήσεων, οι καμπύλες γραμμικής παλινδρόμησης δεν έχουν κοινό σημείο στη μέγιστη τάση. Εντούτοις, η κλίση τους θεωρείται ότι δίνει μια καλή εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας στη φόρτιση και αποφόρτιση. Όσο οι γραμμές αυτές είναι παράλληλες, σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας στη φόρτιση, είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας στην αποφόρτιση. Αν, δε, υπάρχει μετατόπιση προς το δεξιά, ο βρόχος υστέρησης έχει κάποιο εμβαδό, ενώ αν όχι, το εμβαδό του βρόχου υστέρησης είναι μηδέν. Οπότε δεν παρουσιάζονται παραμένουσες παραμορφώσεις. Επειδή οι διαφοροποιήσεις που άνωπώθηκαν μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας κατά τη φόρτιση και του μέτρου ελαστικότητας κατά την αποφόρτιση, είναι ελάχιστες έως και μηδαμινές, στις περισσότερες των περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκε το $E_{δυν}$ που προσδιορίστηκε από τη φόρτιση.

Σε μια δεύτερη προσπάθεια εκτίμησης του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, υπολογίστηκε για κάθε κύκλο φόρτισης και για κάθε κύκλο αποφόρτισης, η καμπύλη της πολυωνυμικής παλινδρόμησης, μεταξύ βέλους κάμψης και επιβαλλόμενης τάσης, της οποίας παρουσιάζεται επίσης η εξίσωση και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R^2). Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκε βρόχος υστέρησης, ο οποίος, λόγω της μεγάλης διασποράς των μετρήσεων, δεν κλείνει πάντα στη μέγιστη τάση, αλλά κάποιες φορές και σε τιμές μικρότερες αυτής.

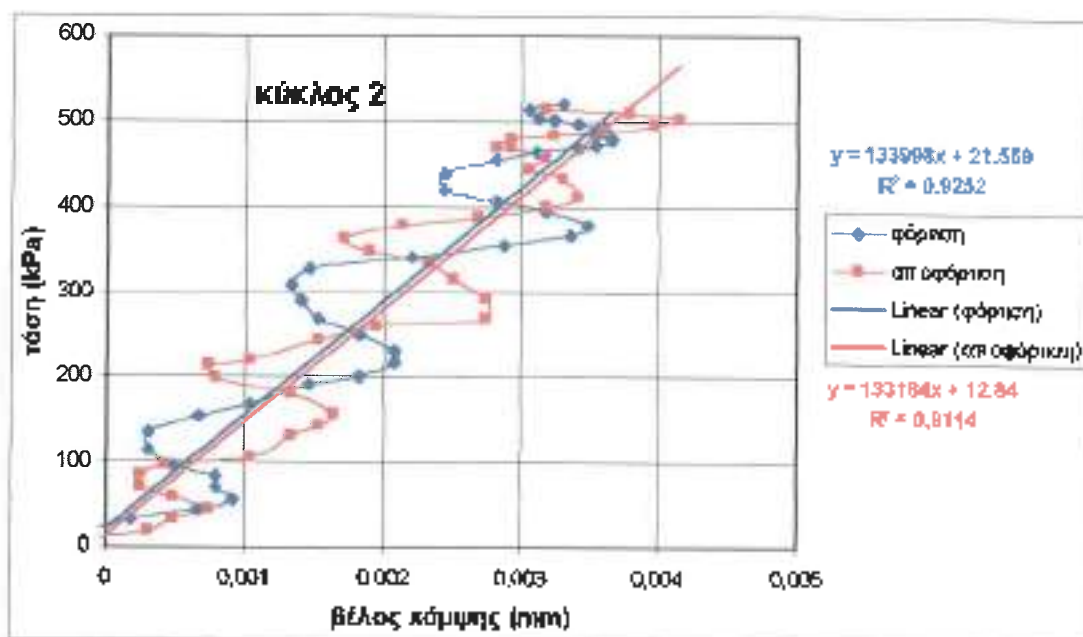
Μέσω των καμπυλών πολυωνυμικής παλινδρόμησης, υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Στον πίνακα 7.5.1 παραρτηούνται οι τιμές του $E_{δυν}$, σε MPa, (για κάθε κύκλο φόρτισης), για το δοκίμιο 15 (2% γαλάντωμα - 3% τσιμέντο), που βρέθηκαν με τις καμπύλες γραμμικής παλινδρόμησης (E_1) και με τις καμπύλες πολυωνυμικής παλινδρόμησης (E_2). Στα σχήματα 7.5.2 και 7.5.3 που παραρτηάζουν τις τιμές των E_1 και E_2 , είναι εμφανής η ελάχιστη διαφοροποίηση αυτών ανά κύκλο φόρτισης. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η περιττέρω ανάλυση να γίνει με χρήση του

Εδών που βρέθηκε με την καμπύλη γραμμικής παλινδρόμησης, και τα σχήματα που ακολουθούν αναφέρονται σε αυτήν.

Παρατηρείται ότι οι διαφοροποιήσεις στην κλίση της γραμμής παλινδρόμησης από κύκλο σε κύκλο, για ένα δοκίμιο, δεν είναι σημαντικές, κυρίως όσον αφορά τις ομάδες των κύκλων, δηλαδή 0 ως 4, 47 ως 51 και 95 ως 99, ξεχωριστά. Άρα ο μέσος όρος των Εδών από κάθε ομάδα κύκλων ξεχωριστά, θεωρείται ότι δίνει μια καλή εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας.

Όσον αφορά τις παραμένουσες παραμορφώσεις, θα αναμενόταν μια προοιουσα αύξηση αυτών, μέχρις ενός αριθμού επαναλήψεων φορτίσεων, και ύστερα μια κρυσταλλική μείωση και σταθεροποίηση αυτών, μετά από αυτόν τον αριθμό φορτίσεων.

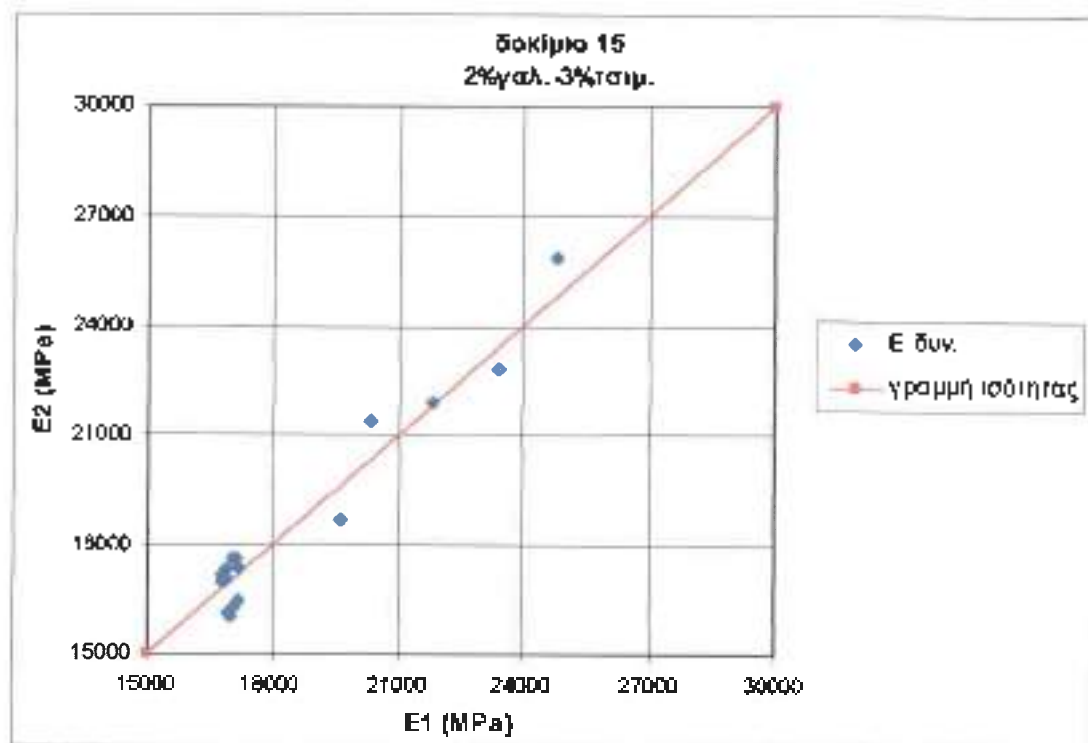
Και τέτοιο πράγματι παρατηρήθηκε, σε σχετικά μεγάλη έκταση στο δοκίμιο 15, που περιέχει 2% γαλάκτωμα και 3% τσιμέντο, και σε λιγότερη έκταση στα δοκίμια υπ'αριθμόν 3, με 2% γαλάκτωμα και 2% τσιμέντο, όπου παρατηρείται σταδιακή αύξηση αυτών, καθώς εξελίσσεται το πείραμα, και υπ'αριθμόν 17 και 18, με 1% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο, όπου οι παραμένουσες παραμορφώσεις, περιορίζονται στους τελευταίους κύκλους. Για τα υπόλοιπα δοκίμια δεν μπορεί να διαπιστωθεί με ακρίβεια τί ακριβώς πραγματοποιείται. Έτσι, δεν μπορούν να εξαχθούν βασικά συμπεράσματα σχετικά με την ολικότητα των υλικών και για το κατά πόσο η προσθήκη γαλακτώματος σε ένα μίγμα, επηρεάζει αυτήν.



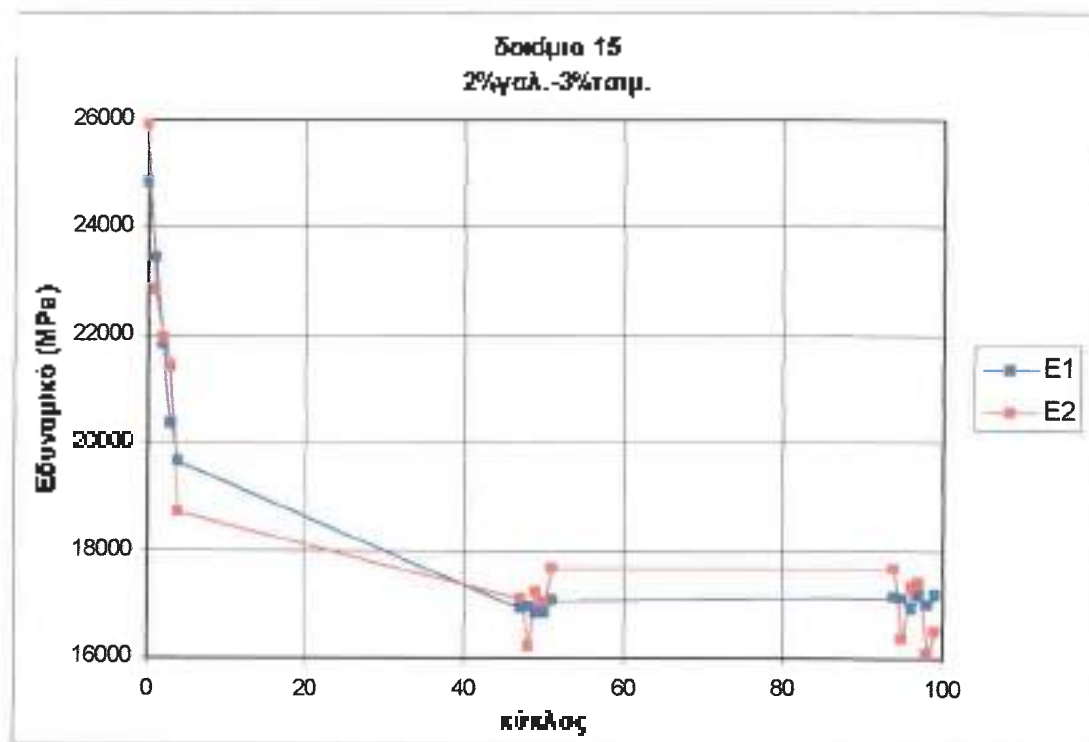
Σχήμα 7.5.1: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απφόρτιση (ευθεία παλινδρόμησης), κύκλος 2, για το δοκίμιο 9 (0% γαλάκτωμα – 3% τσιμέντο)

Πίνακας 7.5.1: Τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, σε MPa, για όλους τους κύκλους φόρτισης του δοκιμίου 15 (2% γαλ - 3% τσιμ.), για γραμμική (E_1) και πολυωνυμική (E_2) παλινδρόμηση

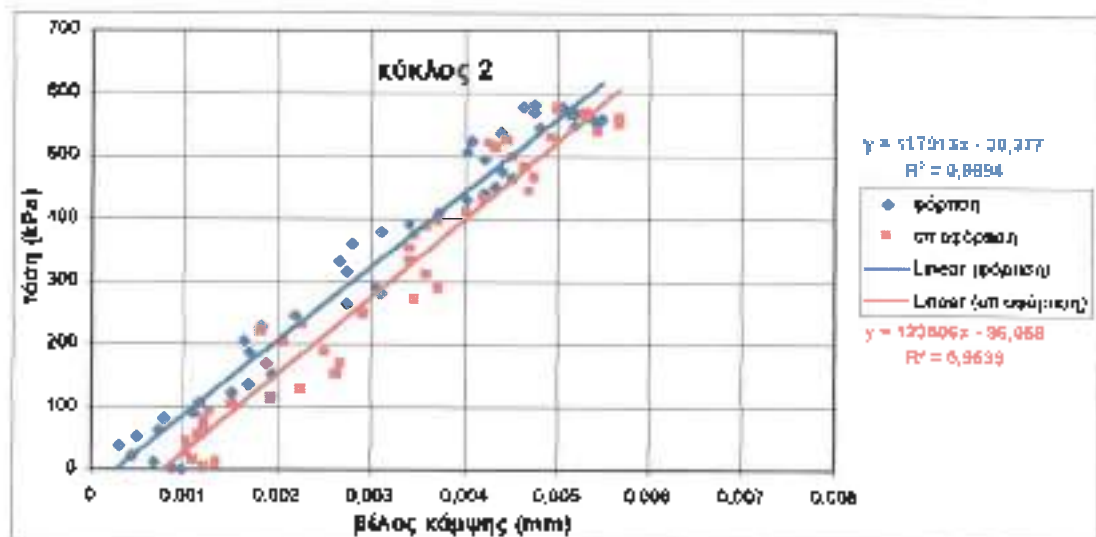
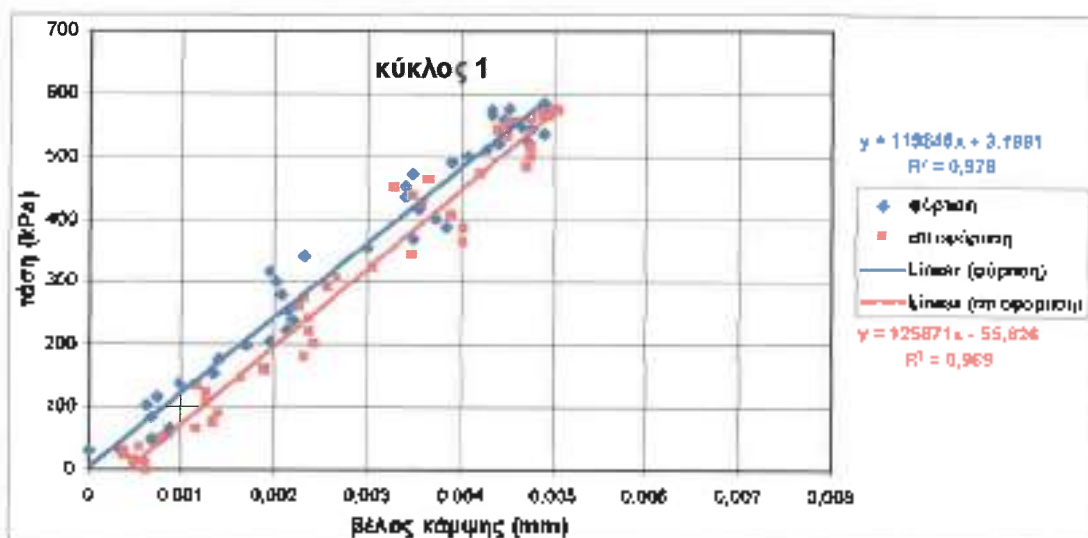
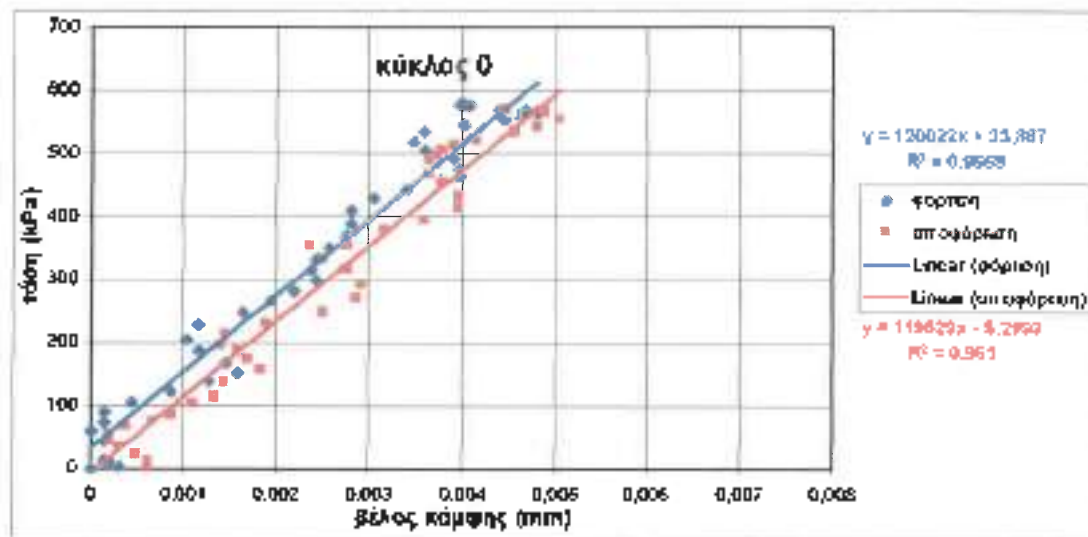
α/α κύκλος	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)
0	24815,04	25680,67
1	23402,57	22809,98
2	21803,66	21909,44
3	20346,49	21388,43
4	19615,51	18700,96
47	16896,93	17071,28
48	16948,15	16184,78
49	16815,51	17189,83
50	16816,05	16992,72
51	17044,37	17656,22
94	17123,42	17645,07
95	17094,88	16345,52
96	16889,8	17310,7
97	17172,85	17397,22
98	16970,18	16080,17
99	17153,32	16503,39



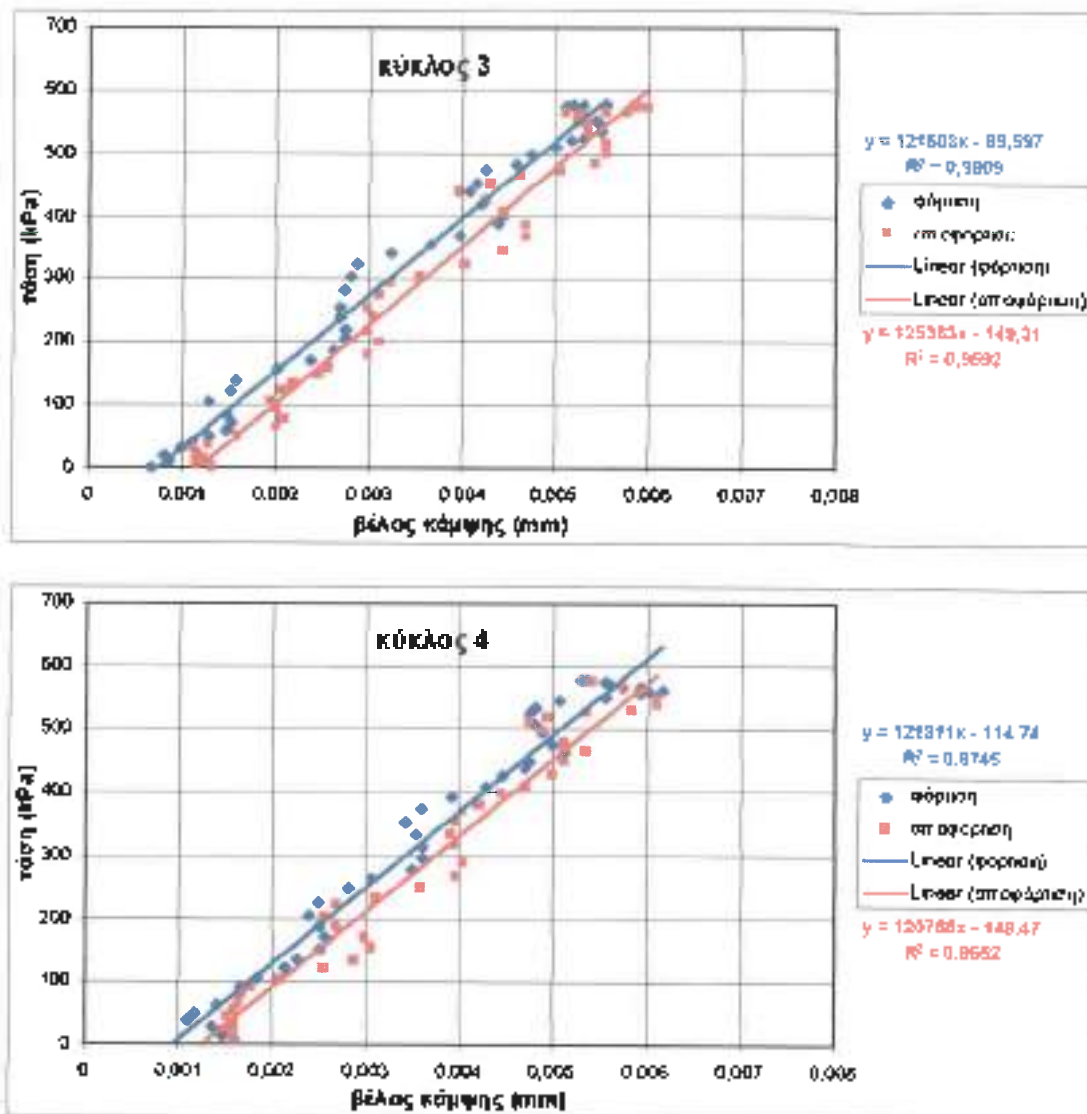
Σχήμα 7.5.2: Σύγκριση των δυναμικών μέτρων ελαστικότητας E_1 και E_2 (γραμμική και πολυωνυμική παλινδρόμηση), για το δοκίμιο 15 (2% γαλ - 3% τσιμ.), για όλους τους κύκλους φόρτισης. Παρουσιάζεται και η γραμμή ισότητας



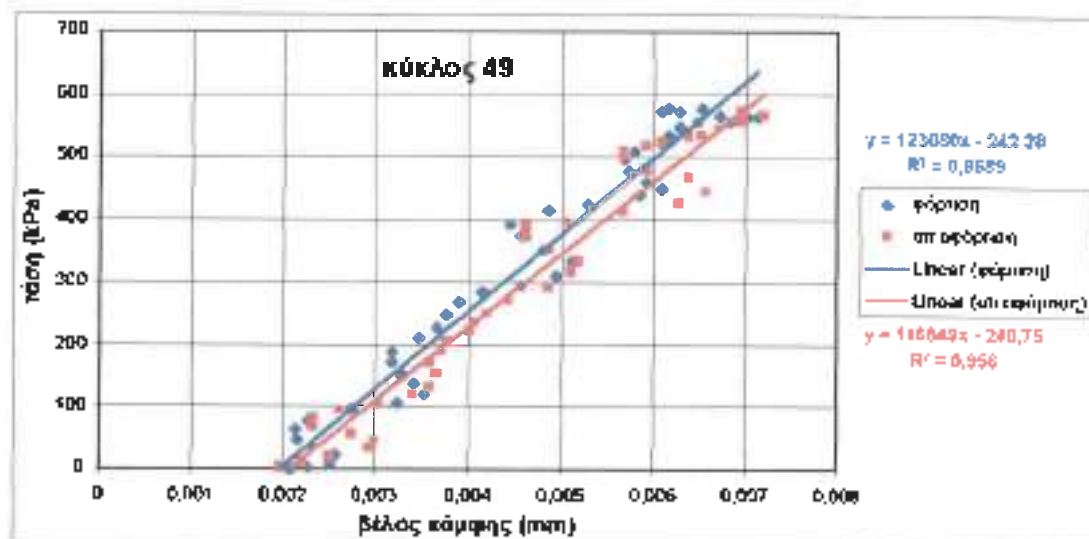
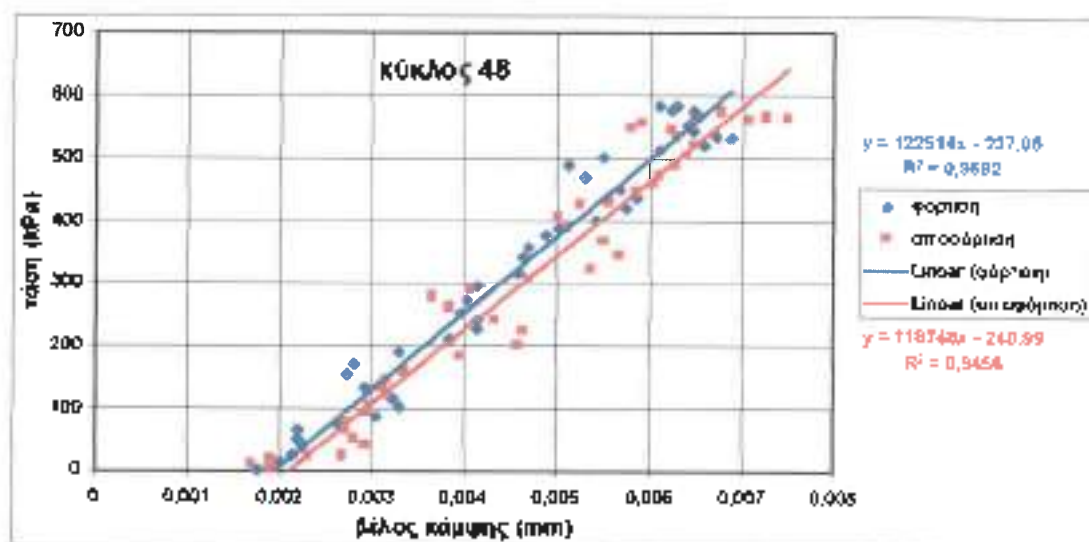
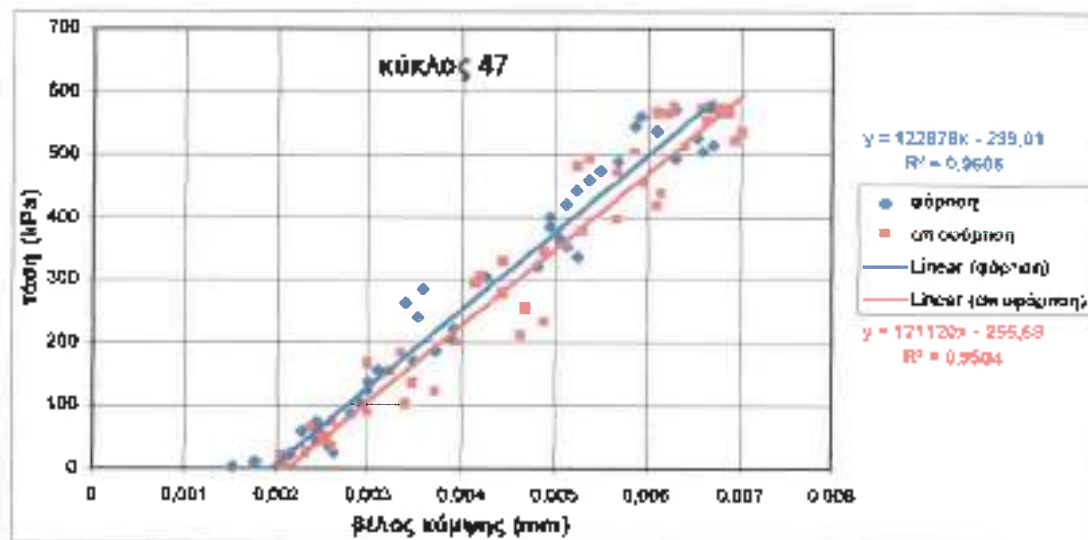
Σχήμα 7.5.3: Σύγκριση των δυναμικών μέτρων ελαστικότητας E_1 και E_2 (γραμμική και πολυωνυμική παλινδρόμηση), για κάθε κύκλο φόρτισης, για το δοκίμιο 15 (2% γαλ. - 3% τσιμ.)



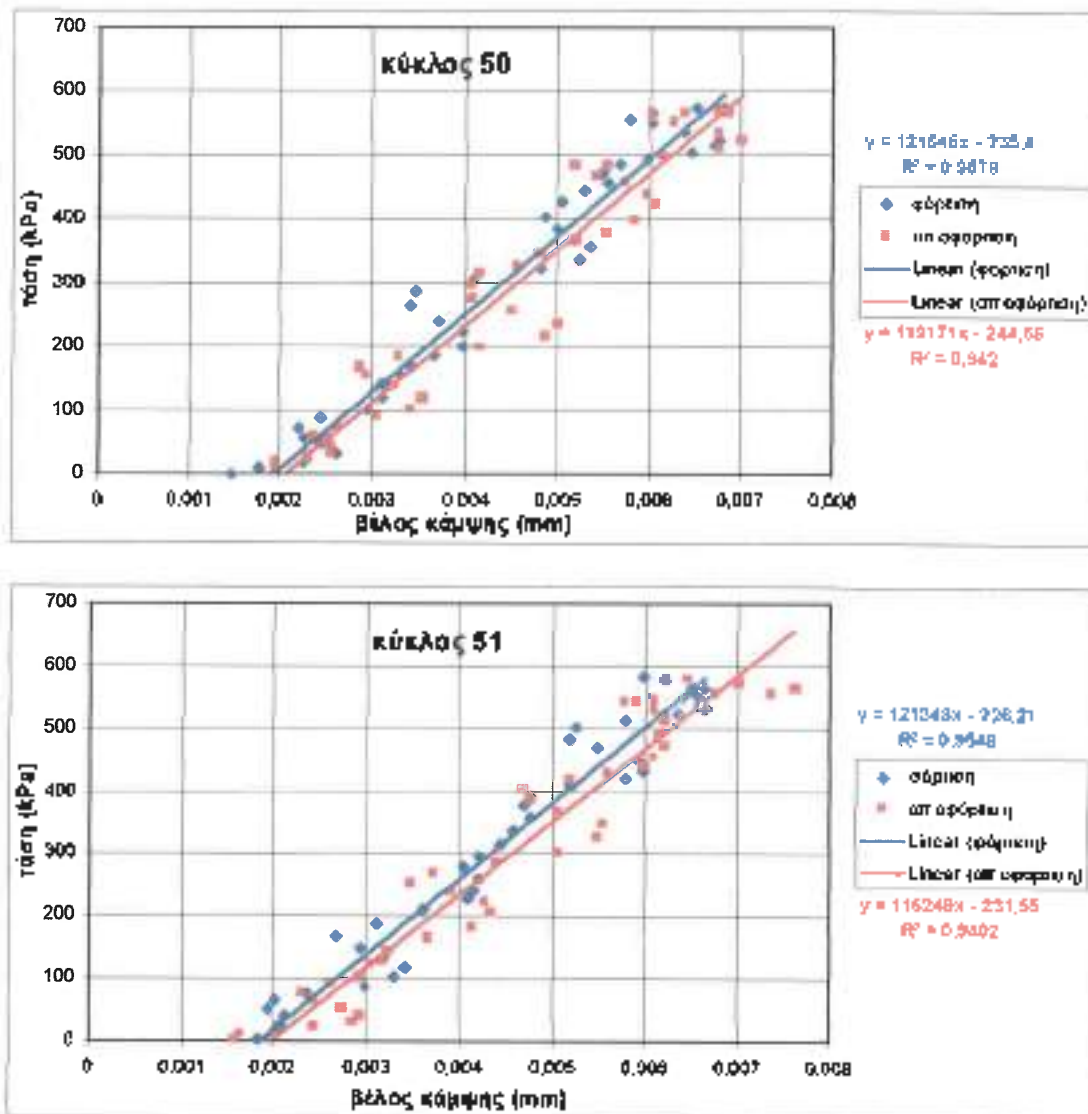
Σχήμα 7.3.4: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυκλούς παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο I5 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



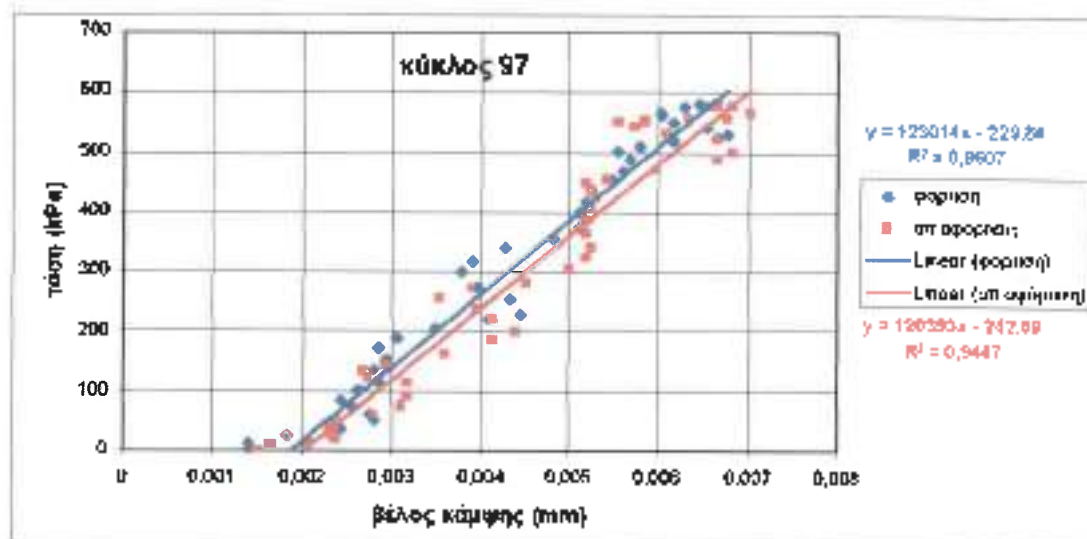
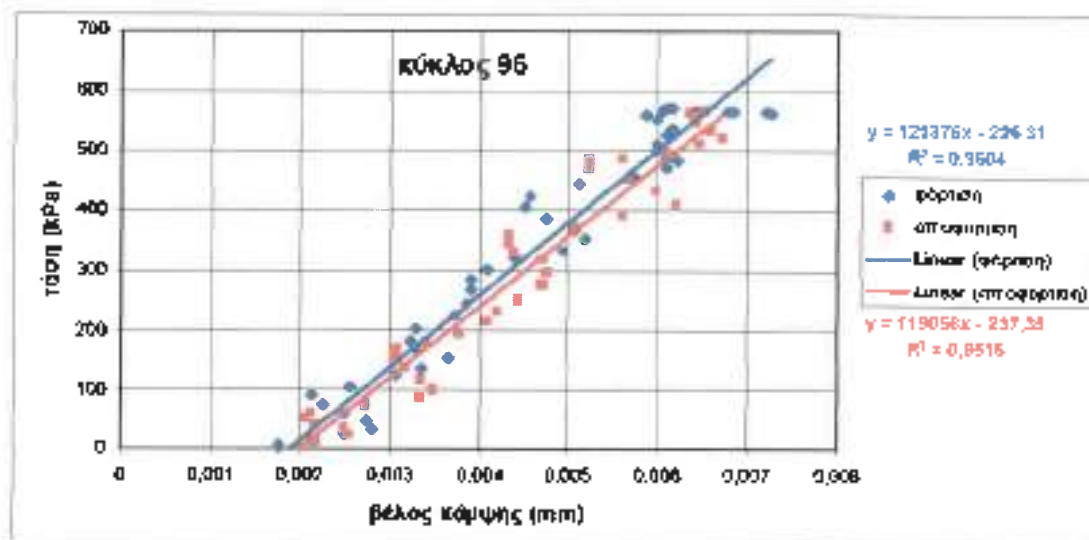
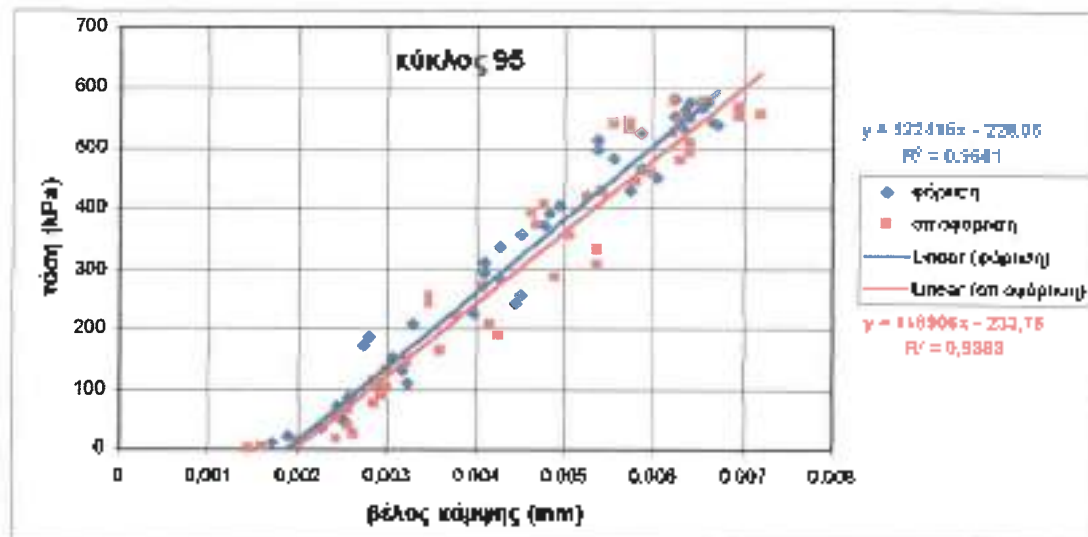
Σχήμα 7.5.5: Πάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



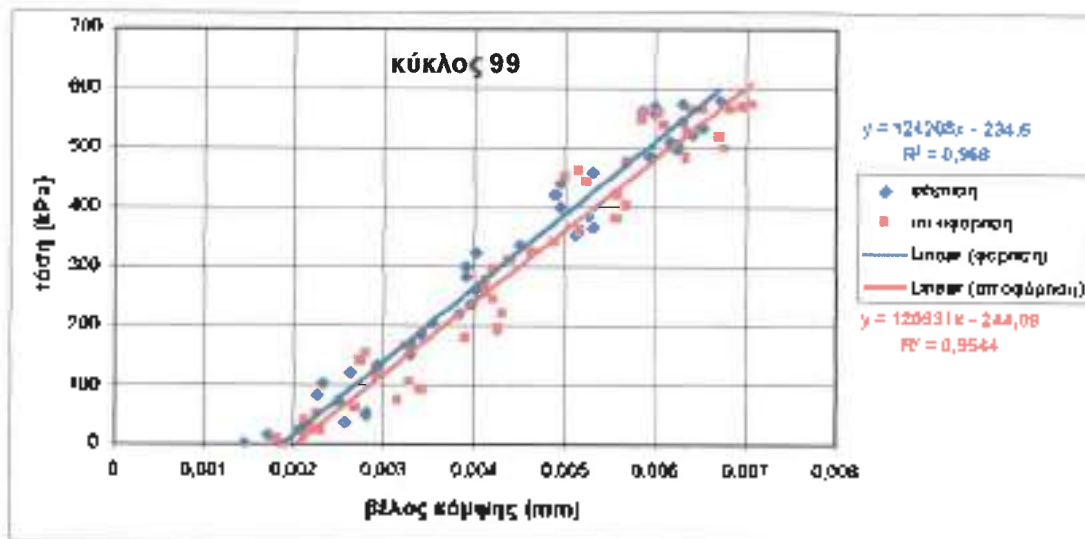
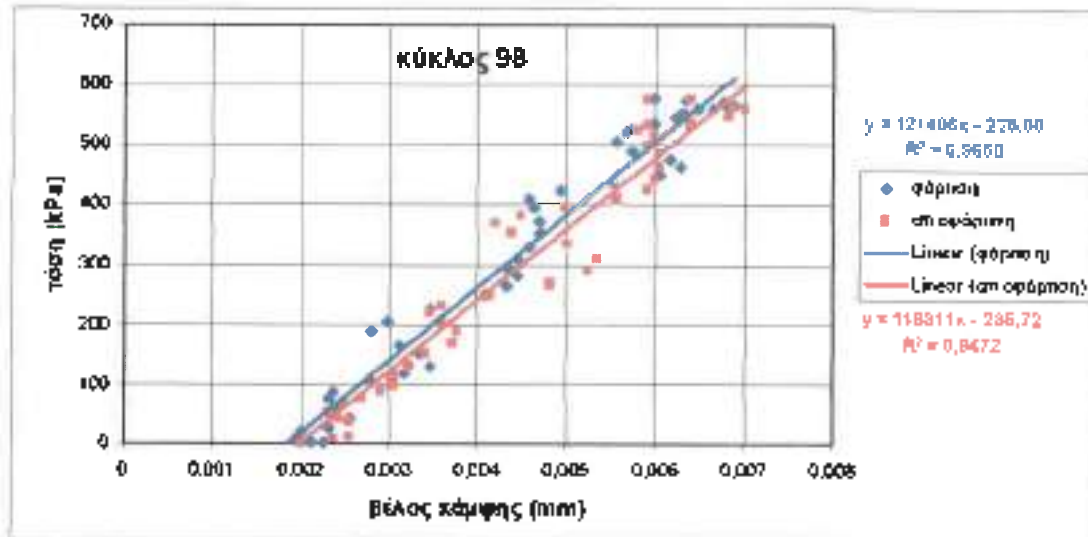
Σχήμα 7.5.6: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία παλινδρομησης), κυκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτεμα 2% - τσιμέντο 1^ο)



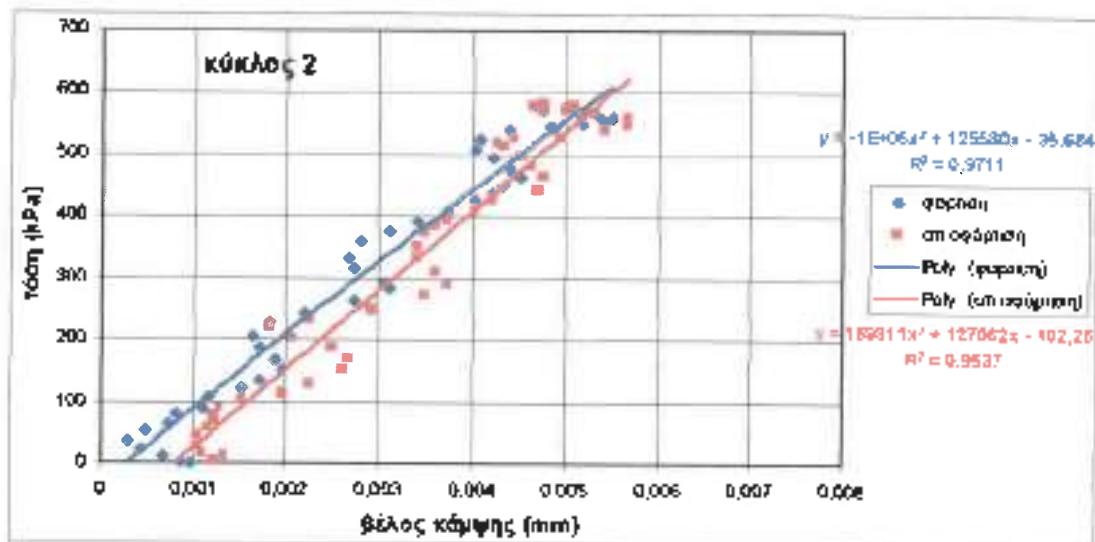
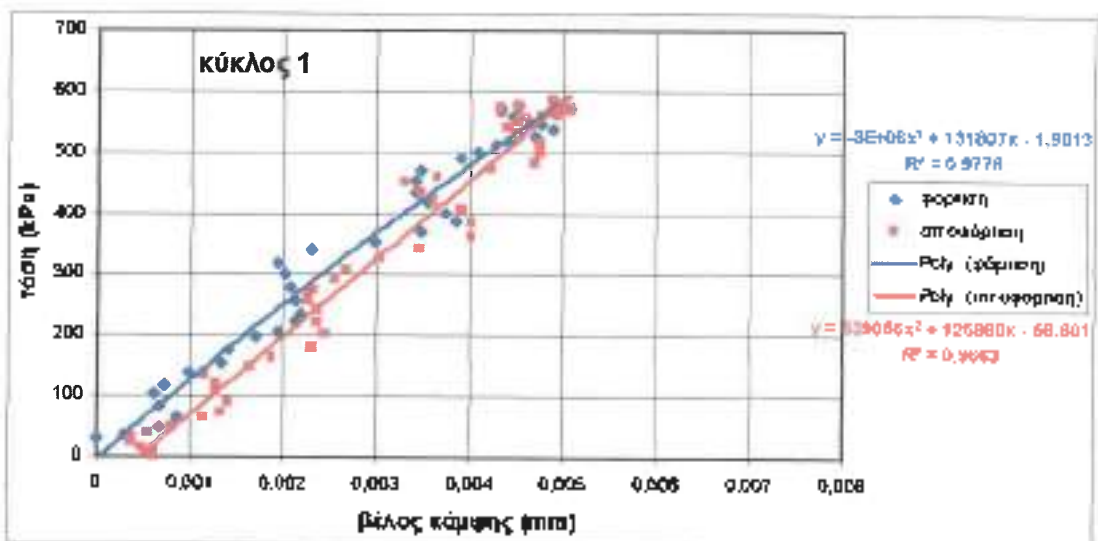
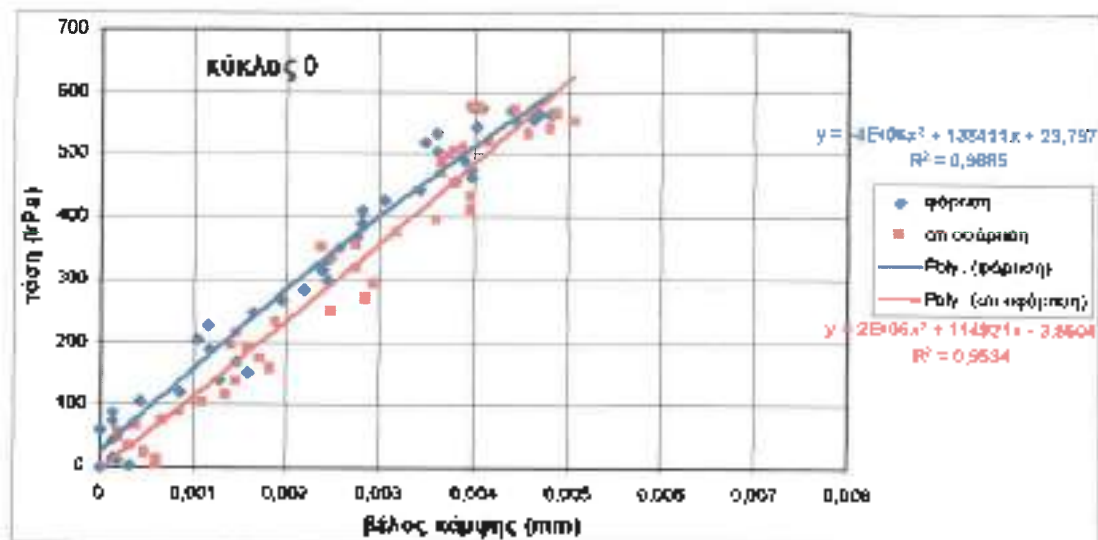
Σχήμα 7.5.7: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυθείες παλινδρομησιές), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



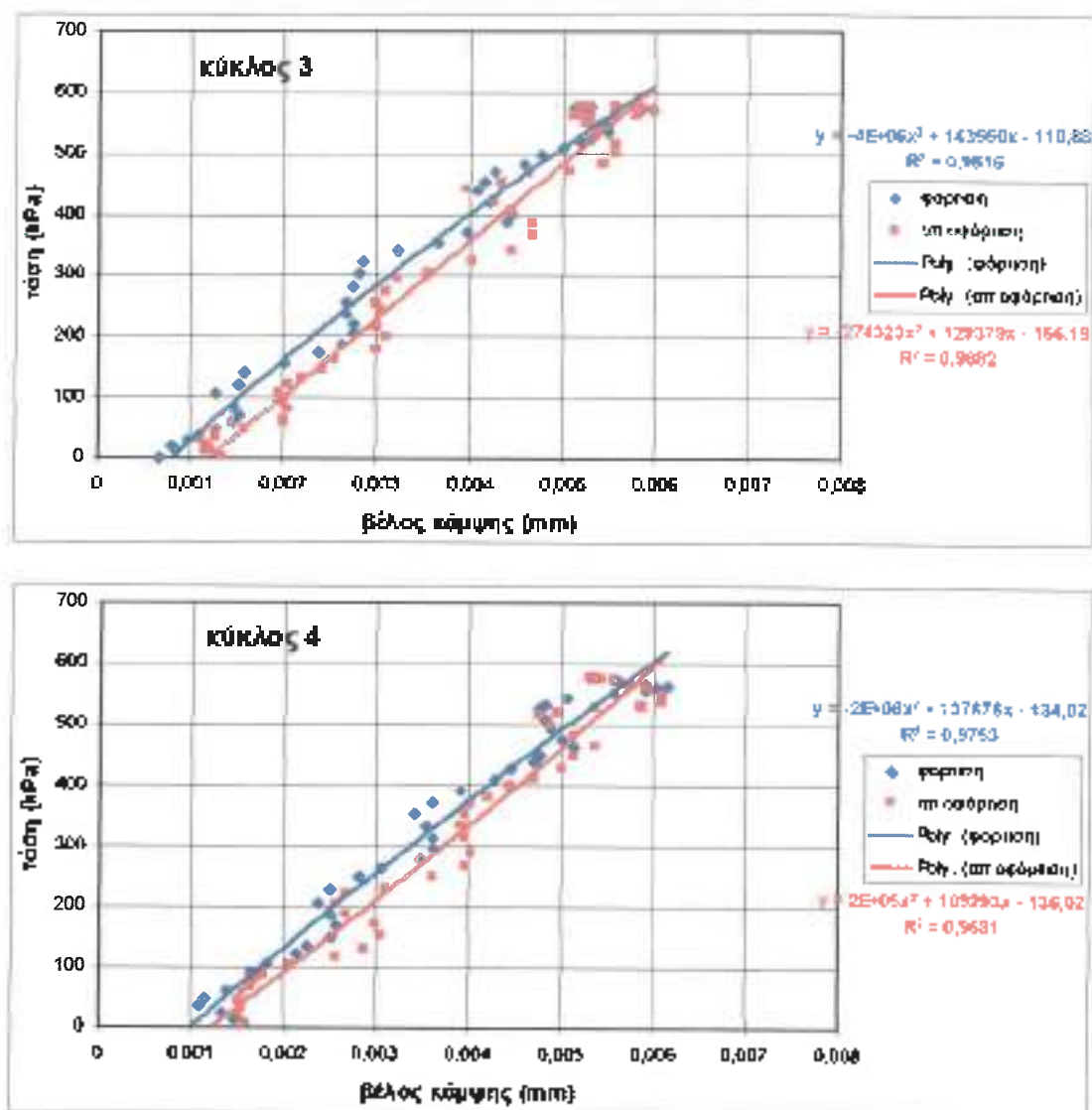
Σχήμα 7.5.8: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ειδικές παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτομα 2% - τσιμέντο 3%)



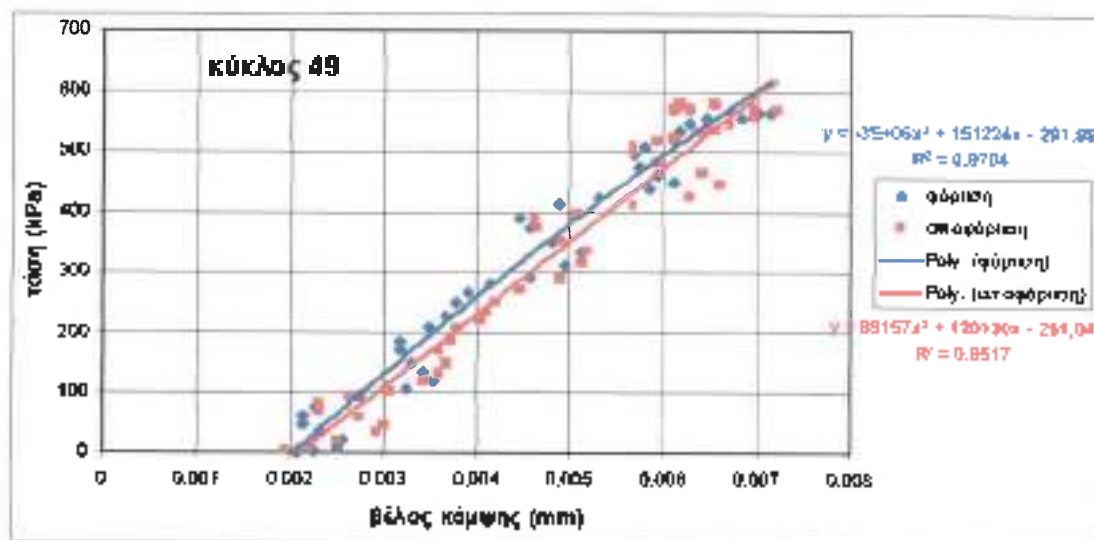
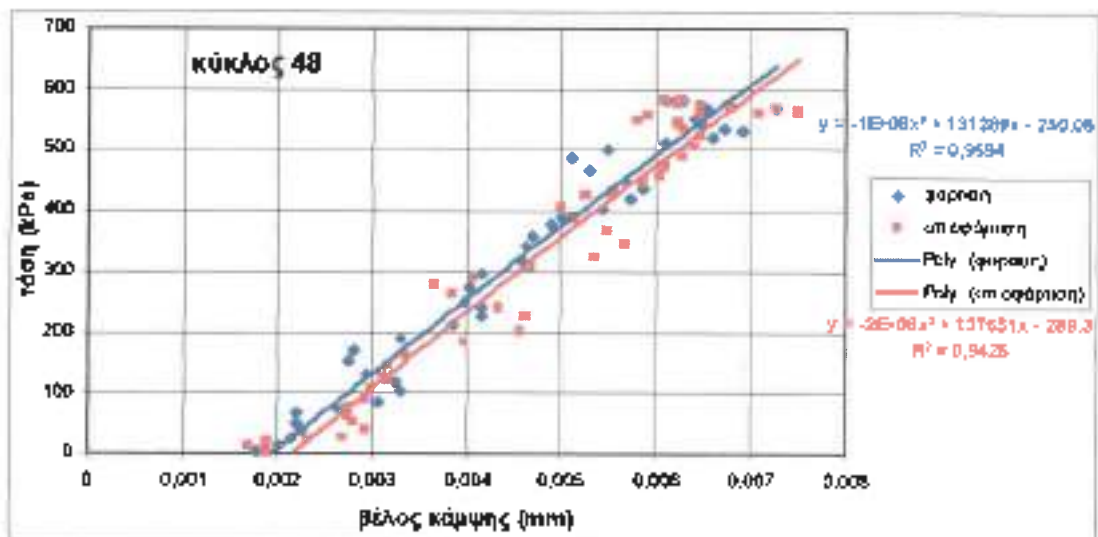
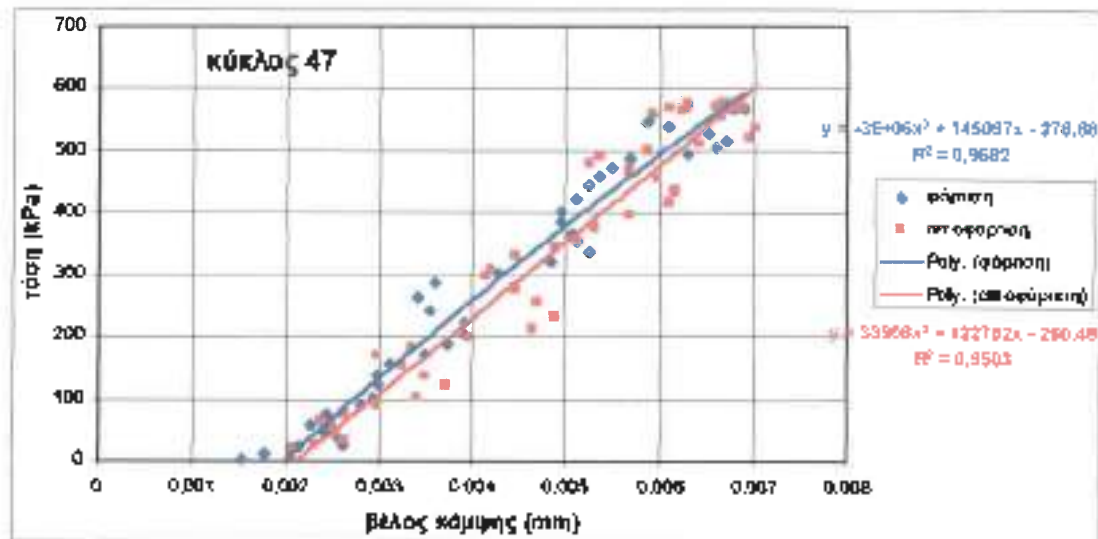
Σχήμα 7.8.9: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



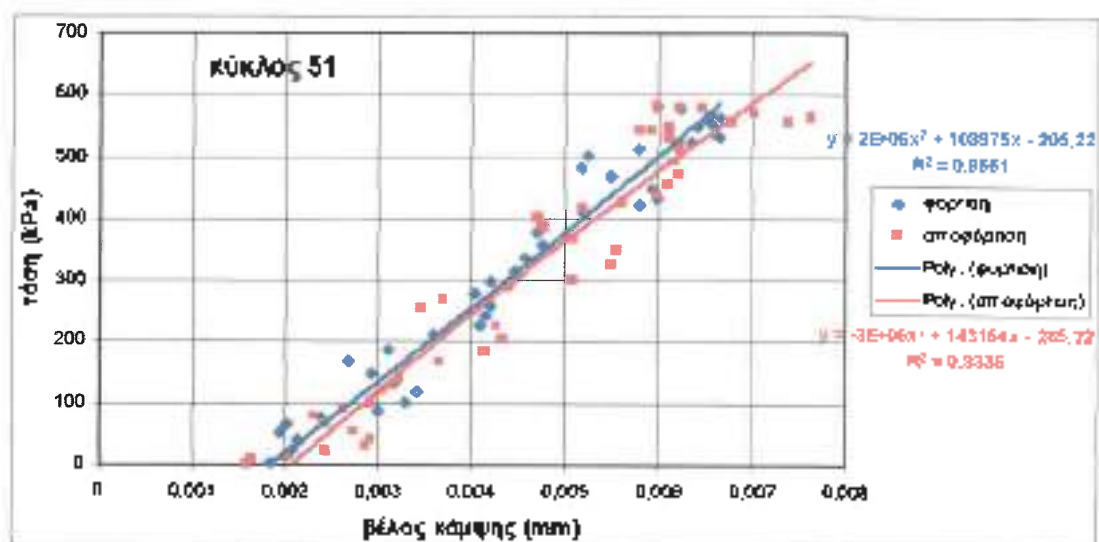
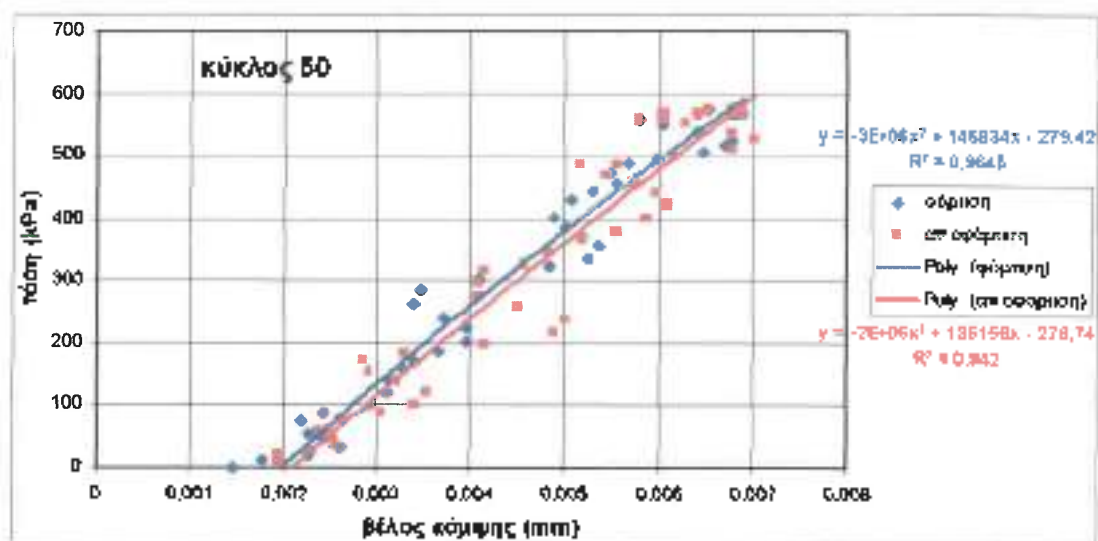
Σχήμα 7.5.10: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλώσεις παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο 15 (γαλιέκτιομα 2% - τσιμέντο 3%)



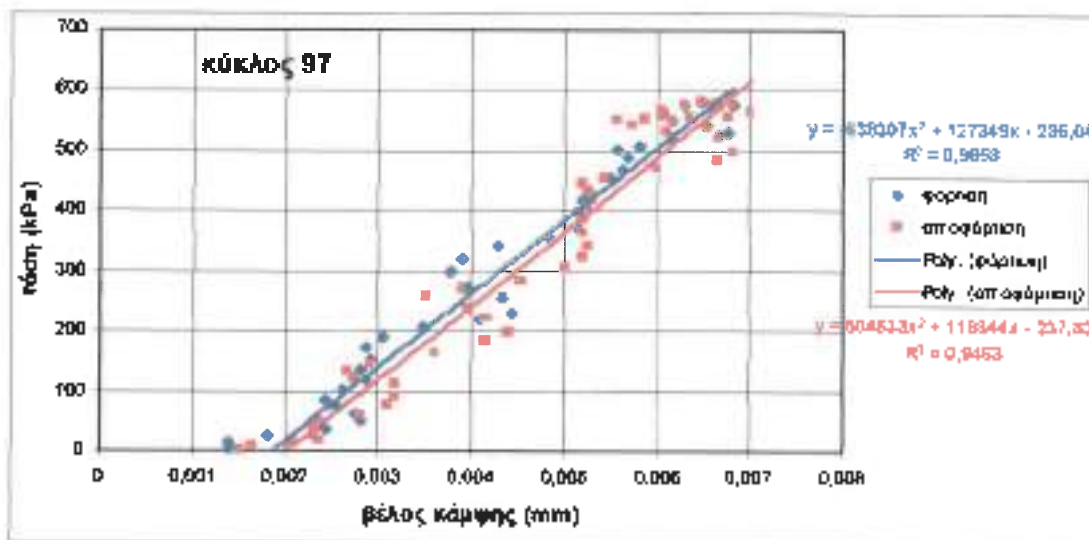
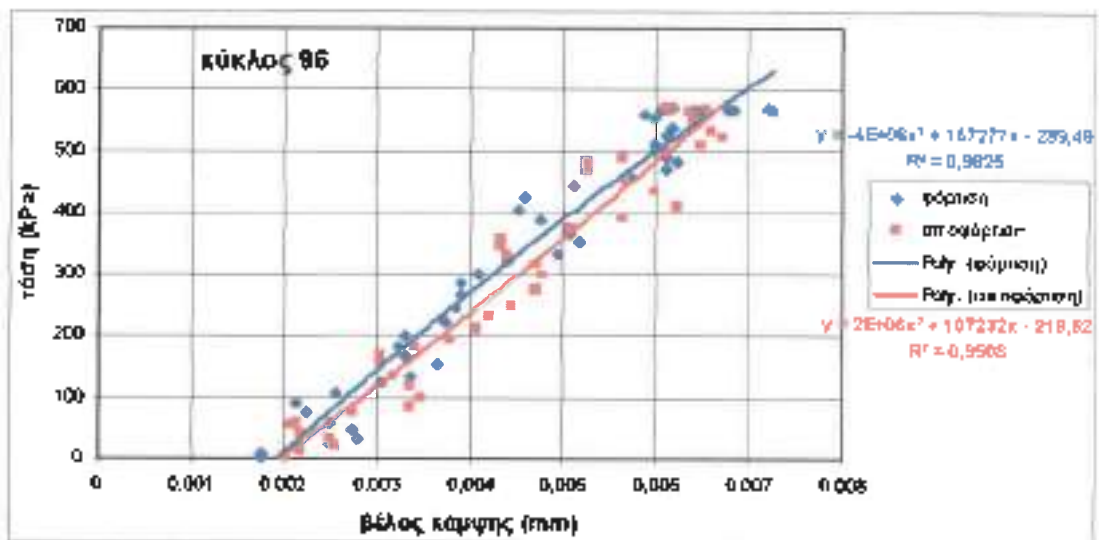
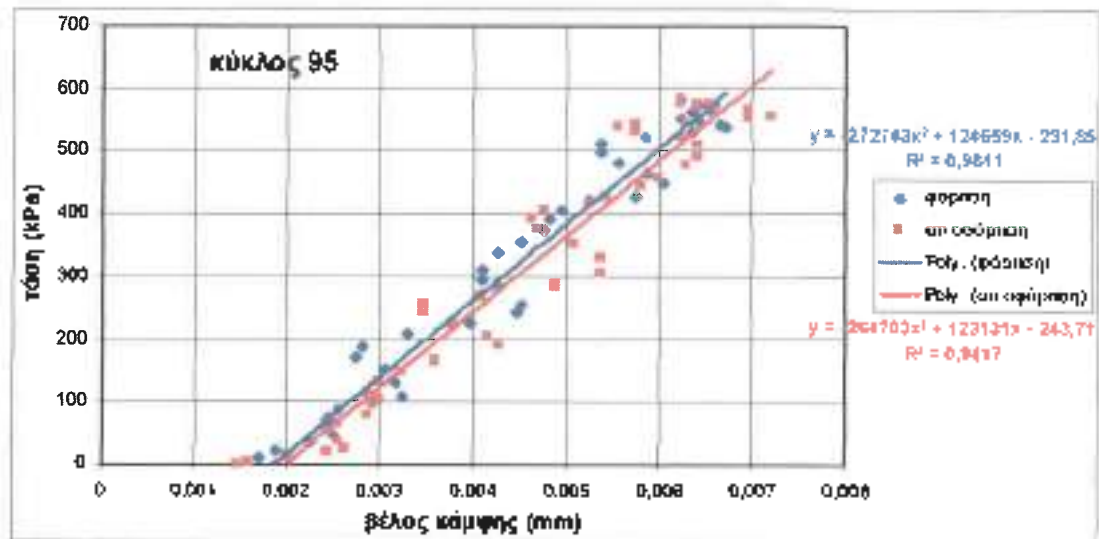
Σχήμα 7.5.11: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πηλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



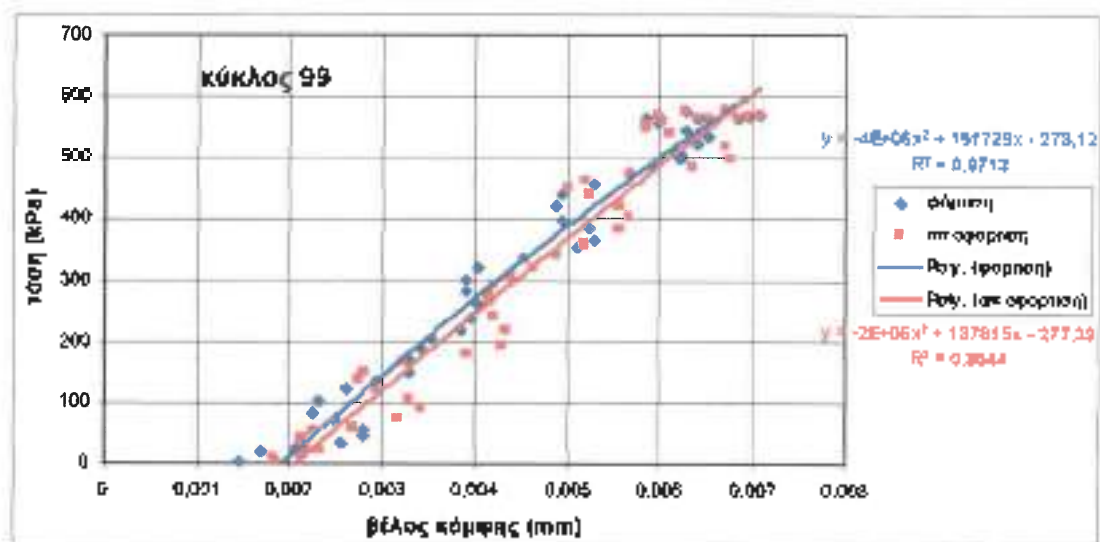
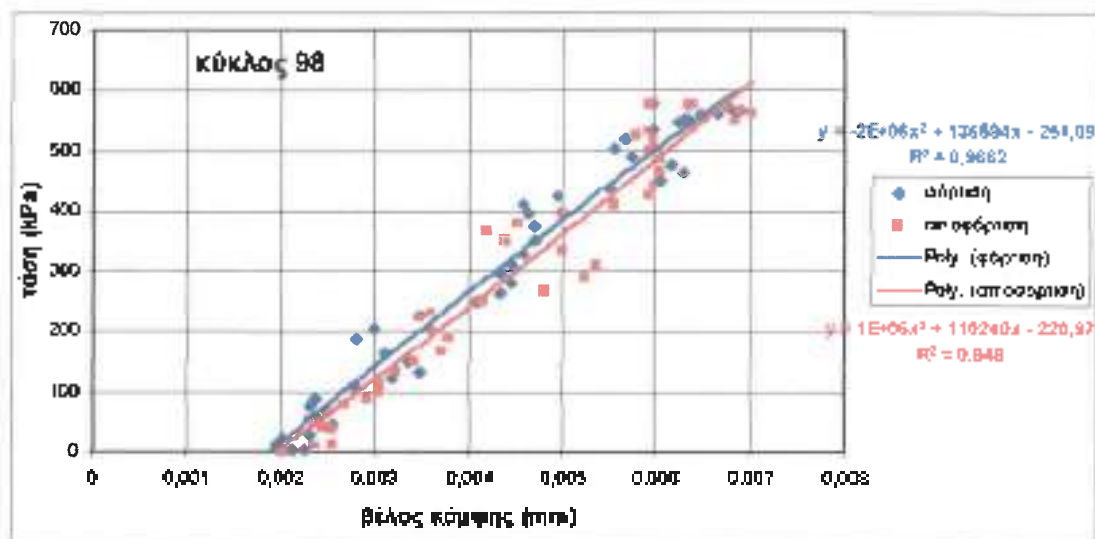
Σχήμα 7.5.12: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτιο 2% - τσιμέντο 3%)



Σχήμα 7.5.13: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



Σχήμα 7.5.14: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης): κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 15 (γαλακτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



Σχήμα 7.5.15: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κιμπύλες πωλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 15 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντο 3%)

7.6 Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται για κάθε δοκίμιο που υποβλήθηκε σε δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης, τα διαγράμματα που αφορούν στη διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (E_{dyn} , σε MPa), για το σύνολο των κύκλων φόρτισης (σχήματα 7.6.1 έως 7.6.7).

Για κάθε δοκίμιο και κάθε κύκλο φόρτισης, παρουσιάζεται με διαφορετικό χρωματισμό η τιμή του E_{dyn} που αντιστοιχεί στον κύκλο αυτό.

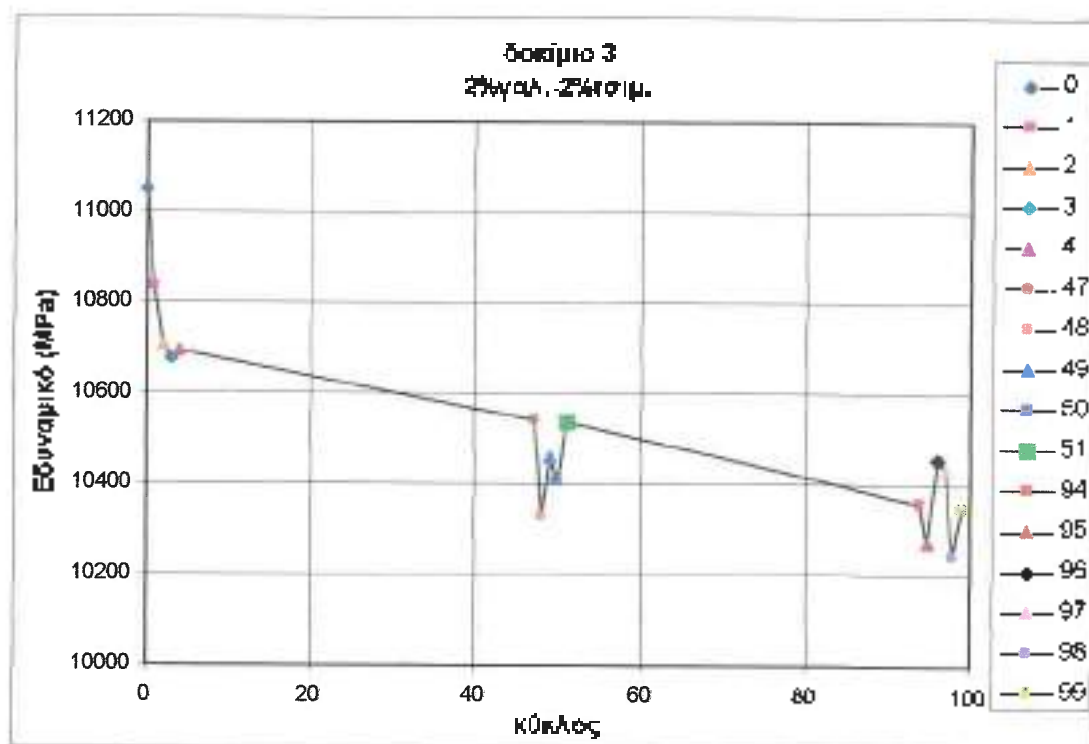
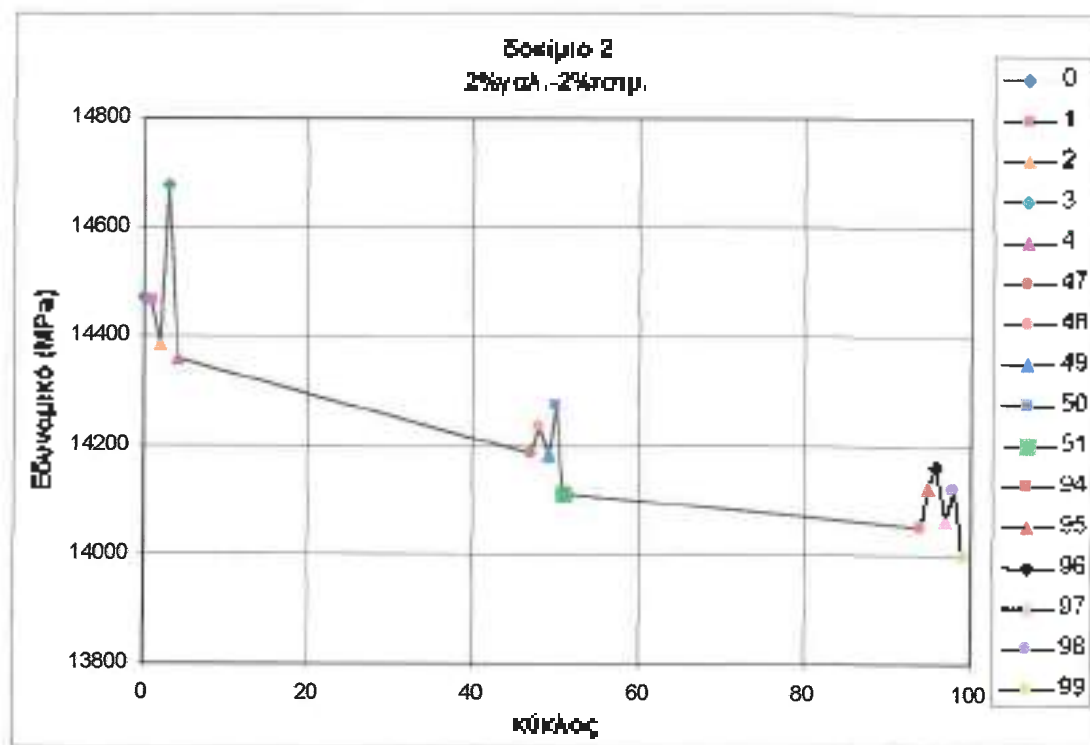
Μια πρώτη παρατήρηση, που αφορά σε όλα τα δοκίμια, είναι ότι το E_{dyn} δεν είναι σταθερό ανάμεσα στις ομάδες κύκλων (0 έως 4, 47 έως 51 και 94 έως 99). Ειδικότερα, η πρώτη ομάδα κύκλων (0 έως 4), παρουσιάζει σε όλες τις περιπτώσεις διαφορά σε σχέση με τις άλλες δύο ομάδες, ενώ το E_{dyn} δείχνει σταθεροποιητικές τάσεις ανάμεσα στις ομάδες αυτές (47 έως 51 και 94 έως 99).

Επίσης, παρατηρείται γενικά, μια σταθεροποίηση του E_{dyn} ανάμεσα στους κύκλους της ίδιας ομάδας, ειδικότερα για τους κύκλους 47 έως 51 και 94 έως 99. Για τους κύκλους 0 έως 4 παρατηρείται, στα περισσότερα δοκίμια, μια μεγαλύτερη διασπορά αποτελεσμάτων.

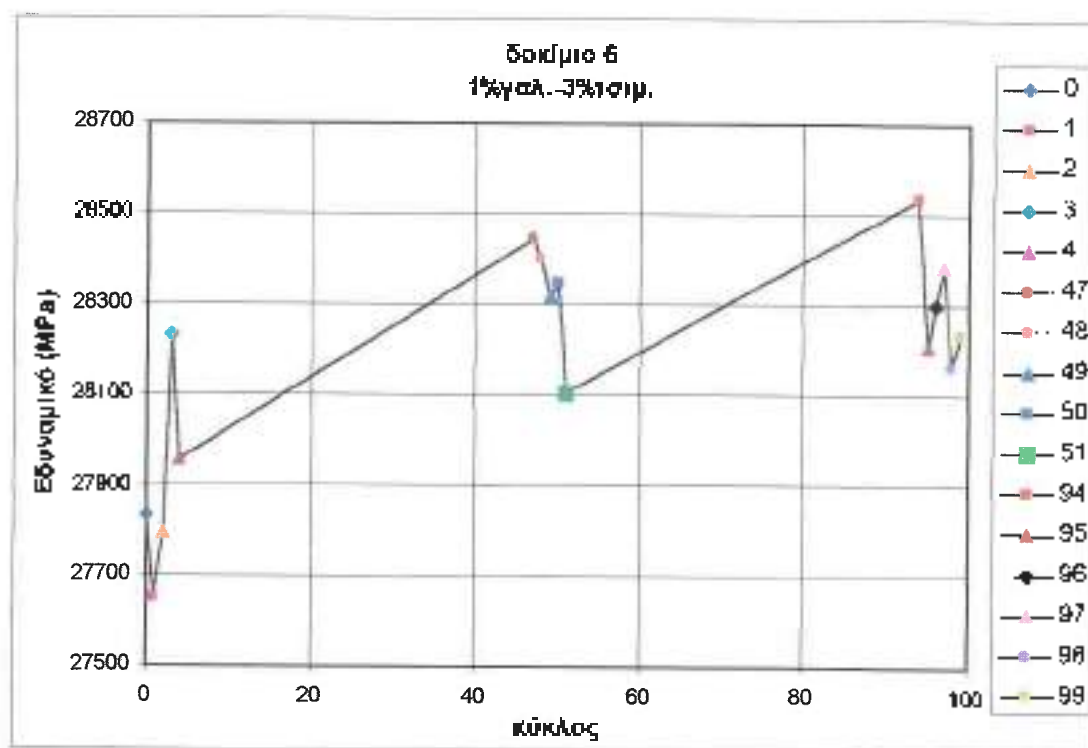
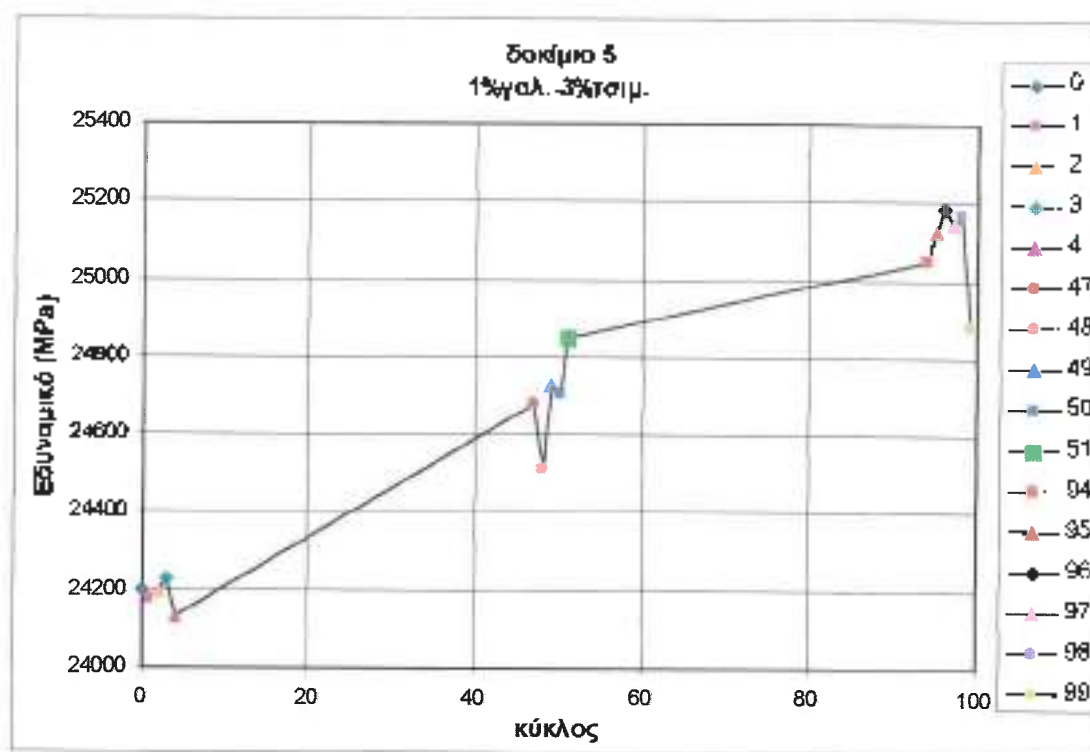
Για κάθε δοκίμιο, η μεταβολή του E_{dyn} , κατά τη διάρκεια της φόρτισης, είναι είτε αυξητική είτε μειωτική, και μόνο στο δοκίμιο 12 (με 0% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο) παρατηρείται αύξηση του E_{dyn} από τους κύκλους 0 έως 4 στους κύκλους 47 έως 51, και στη συνέχεια ελαφριά μείωση αυτού στους κύκλους 94 έως 99.

Ανάμεσα στα δοκίμια ίδιου μίγματος, παρατηρείται είτε αύξηση είτε μείωση του E_{dyn} , και μόνο στις περιπτώσεις των μιγμάτων με 0% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο (δοκίμια 11 και 12, σχήμα 7.6.4), και 1% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο (δοκίμια 17 και 18, σχήμα 7.6.6), παρατηρείται στο ένα δοκίμιο μείωση του E_{dyn} (δοκίμιο 11 και 17) και στο άλλο αύξηση αυτού (δοκίμιο 12 και 18).

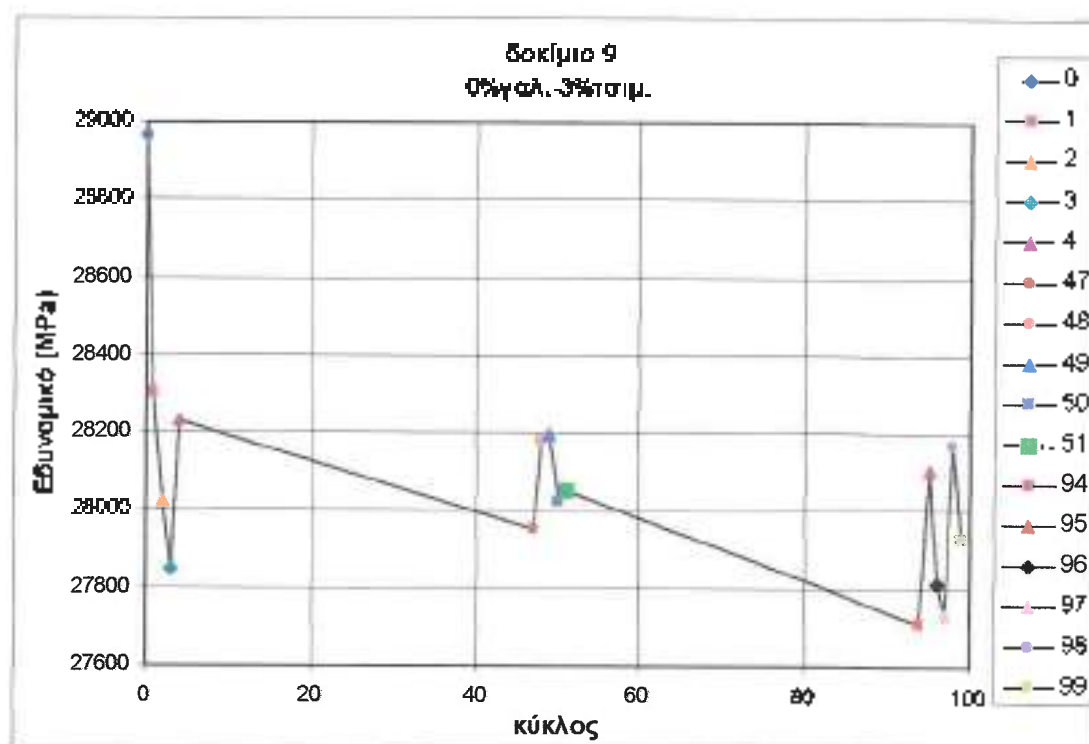
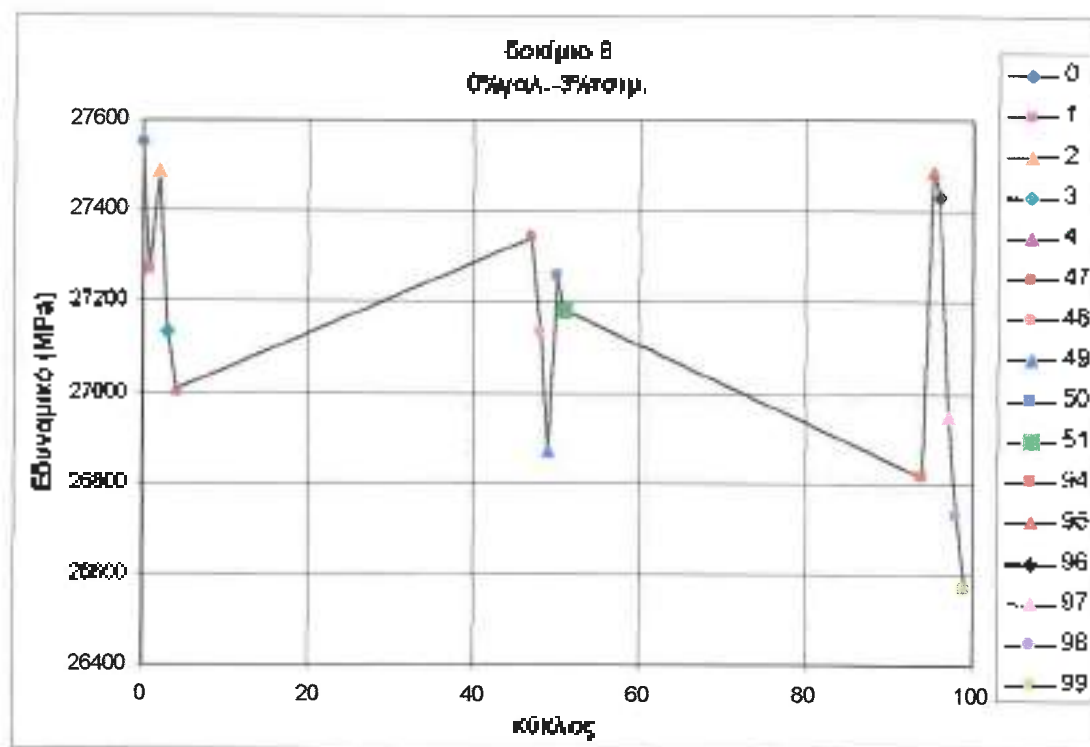
Οι μεταβολές του E_{dyn} κατά τη διάρκεια της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης, δεν παρουσιάζουν συσχέτιση ανάμεσα στα μίγματα, οφείλονται σε πειραματικές ανακρίβειες, και από αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το υλικό κατασκευής.



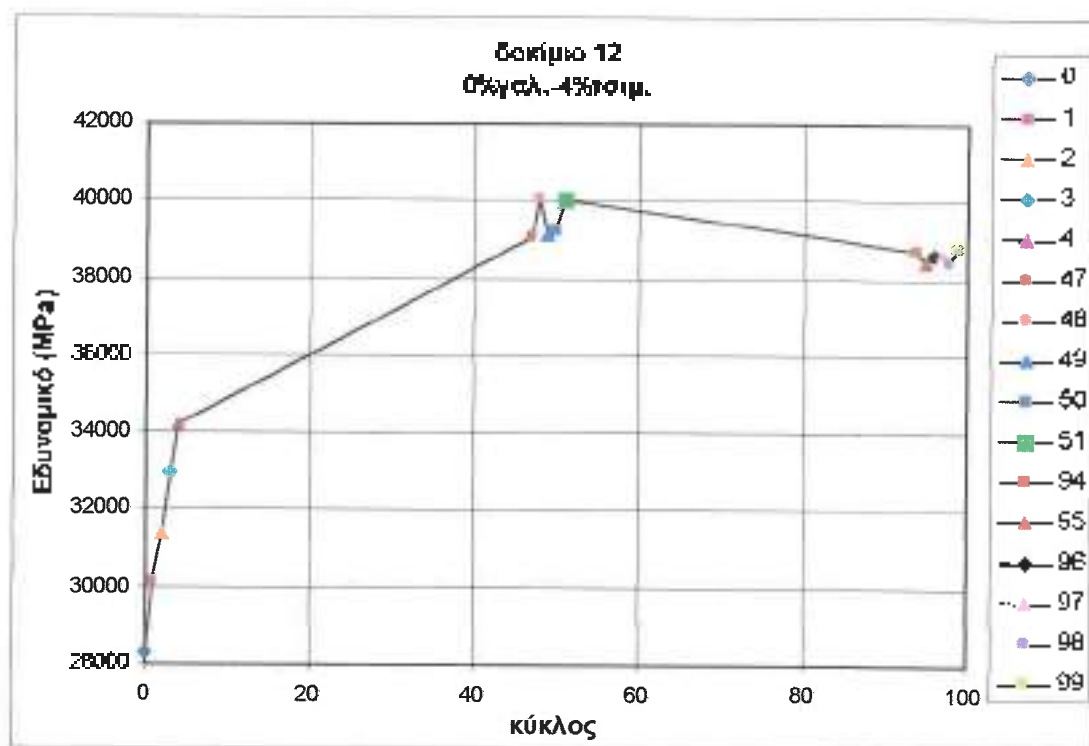
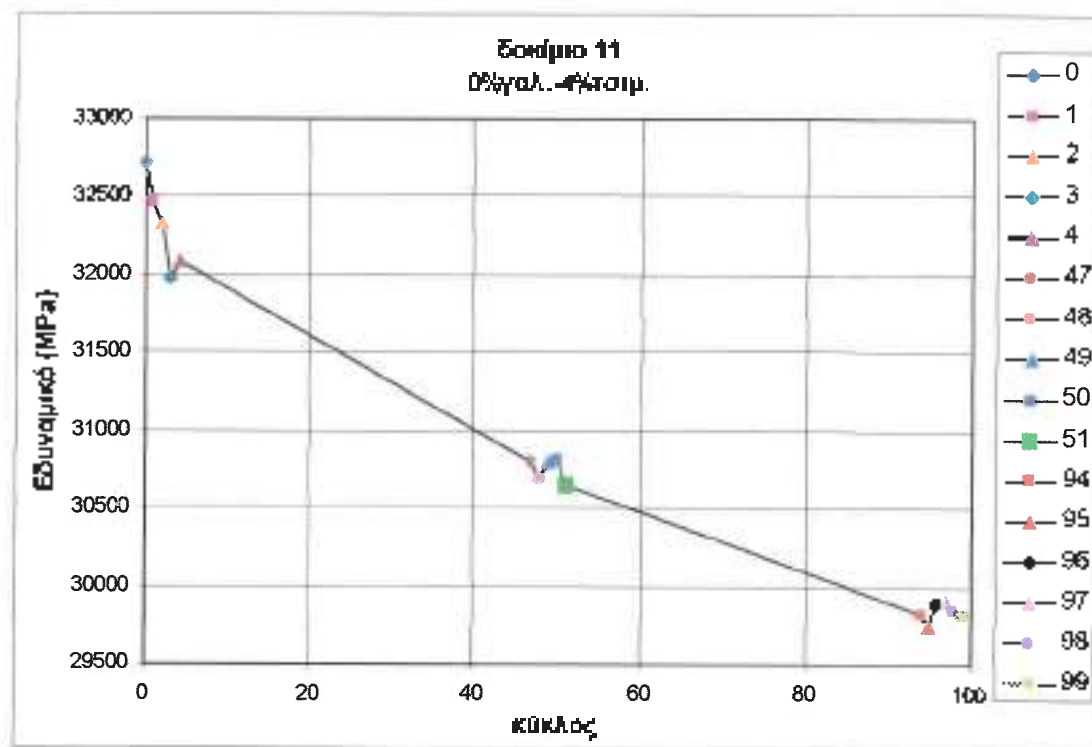
Σχήμα 7.6.1: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μείγμα 2% γαλάκτωμα - 2% τσιμέντο (δοκίμιο 2 και 3)



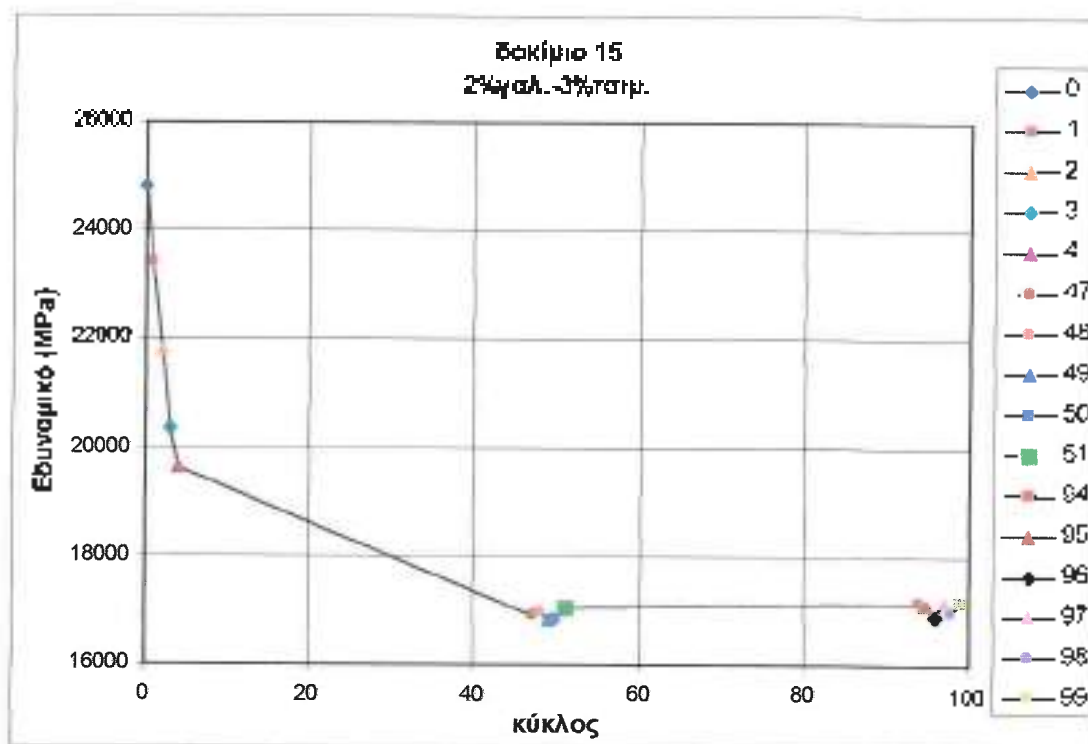
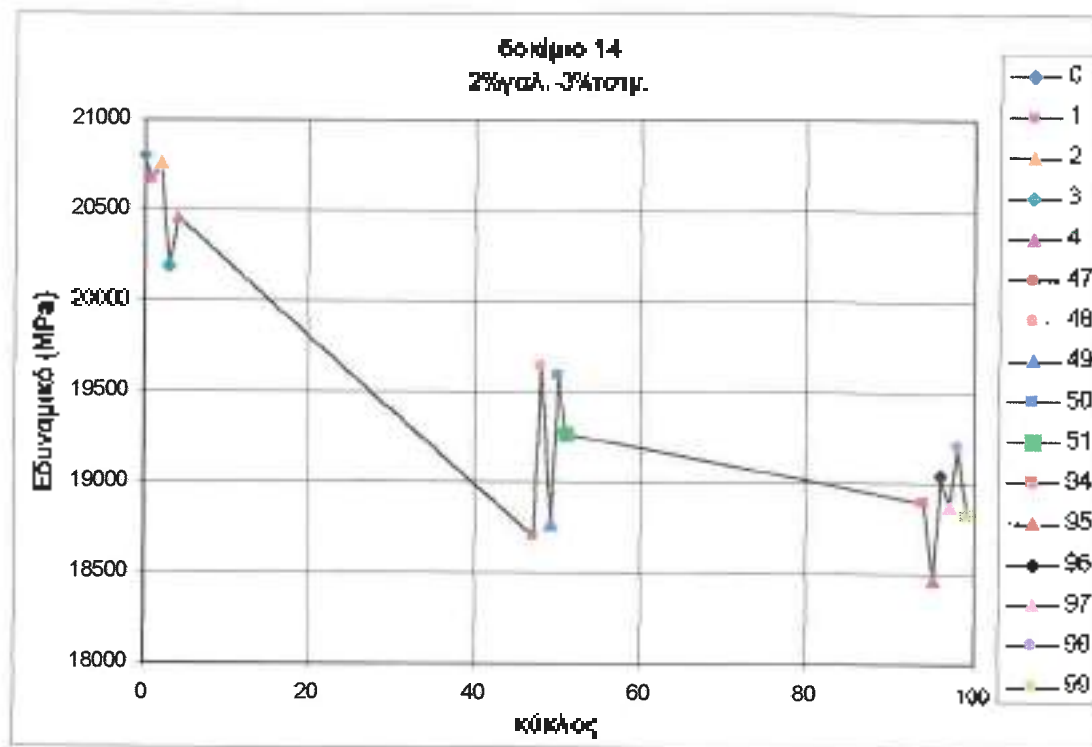
Σχήμα 7.6.2: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 1% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο (δοκίμια 5 και 6)



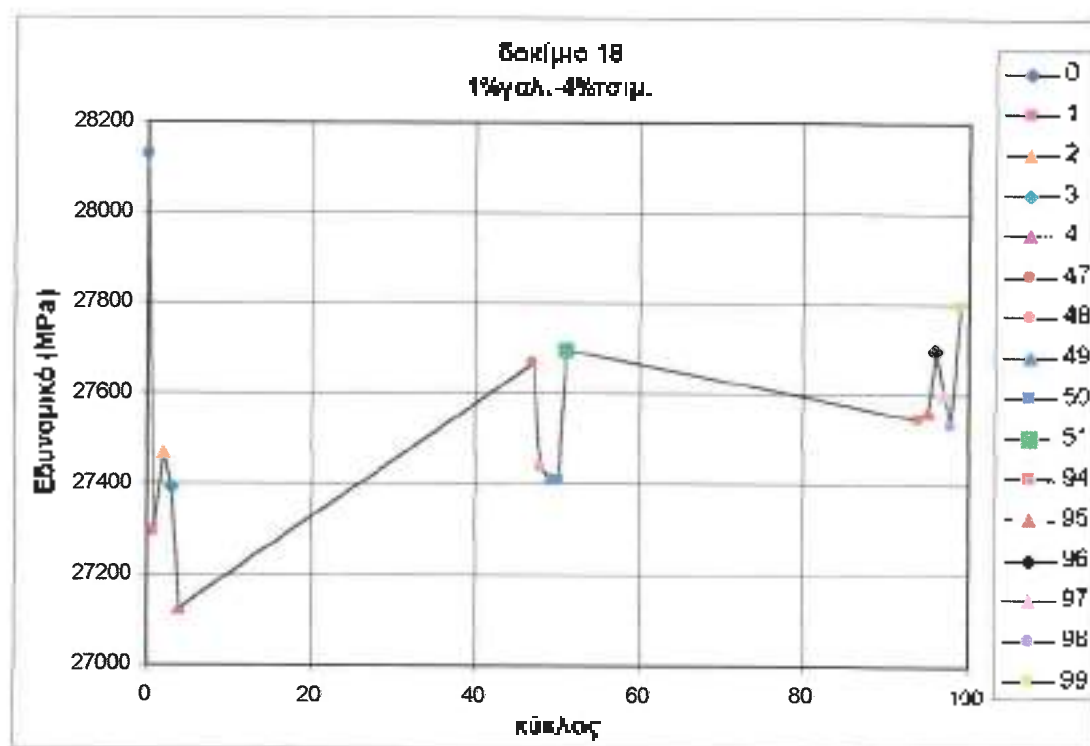
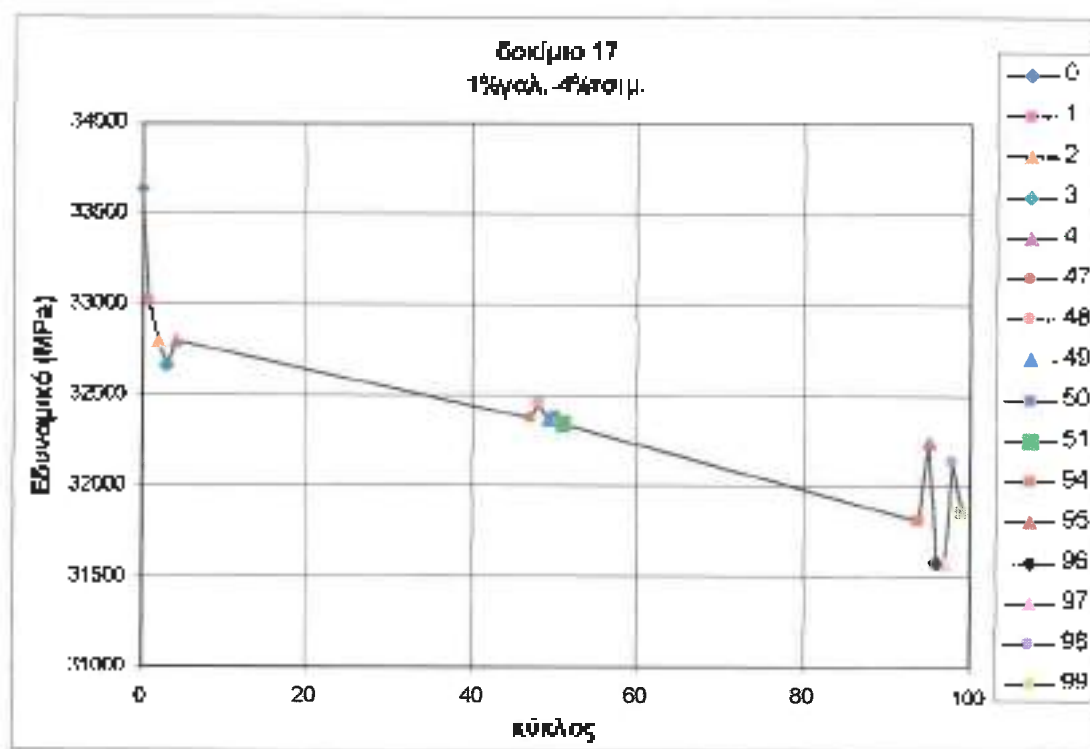
Σχήμα 7.6.3: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 0% γαλάκτωμα – 3% τσιμέντο (δοκίμια 8 και 9)



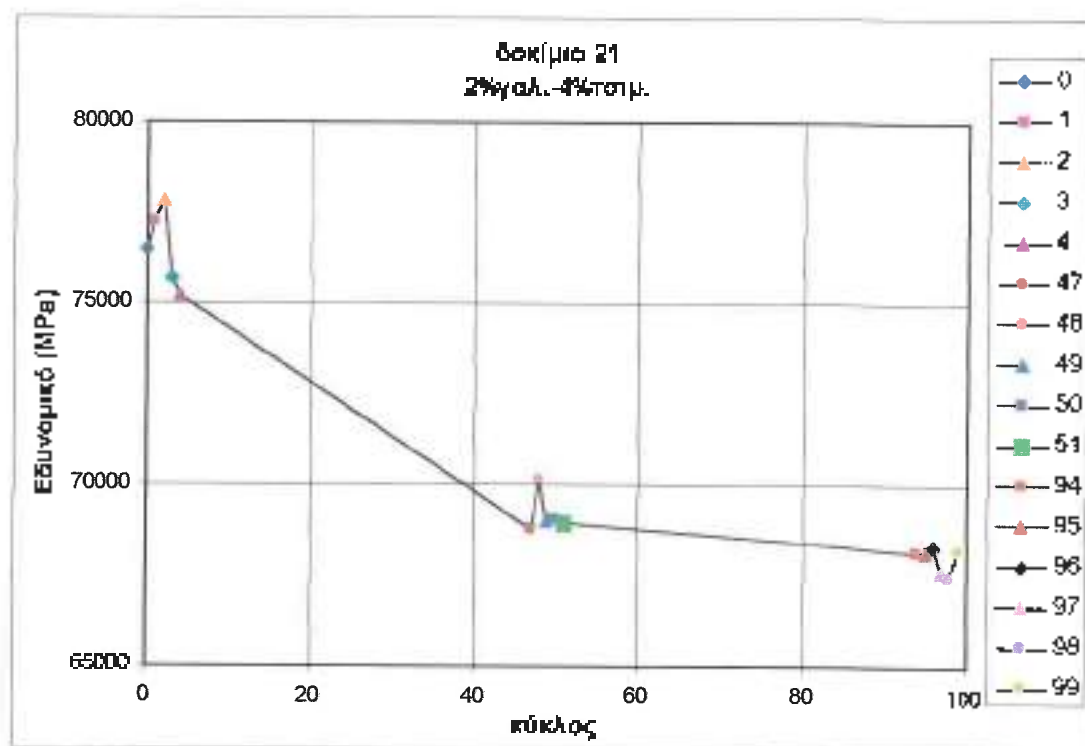
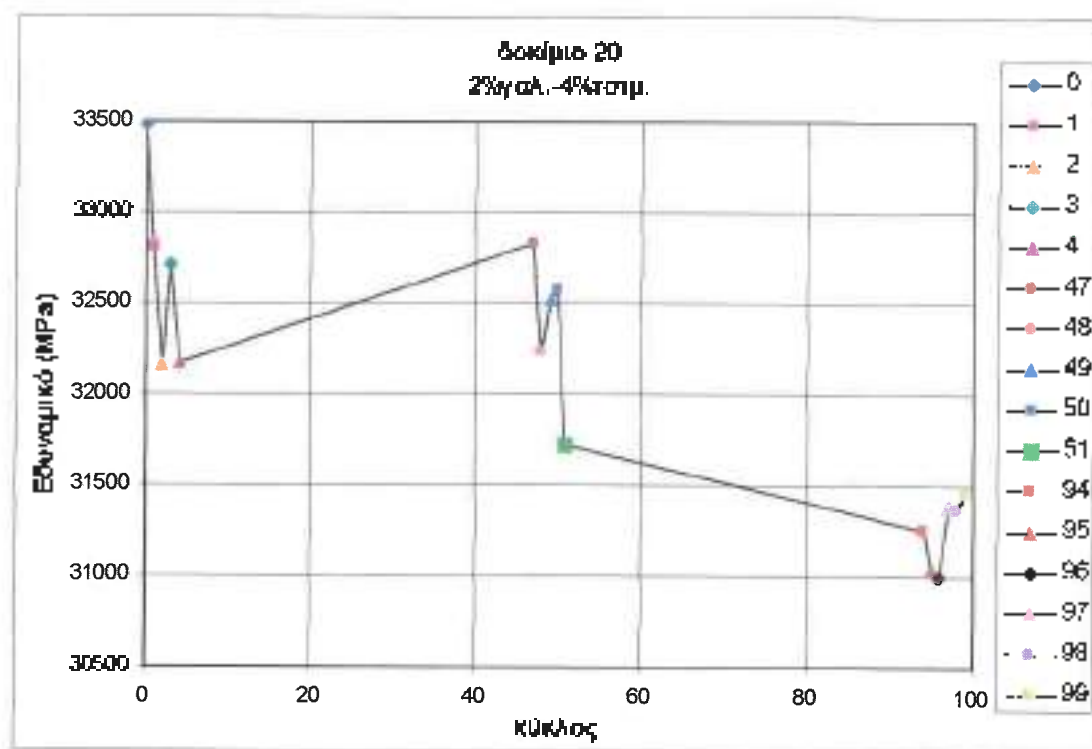
Σχήμα 7.6.4: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 0% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο (δοκίμια 11 και 12)



Σχήμα 7.6.5: Μεταβολή του δυναμικού μετράνι ελαστικότητας συνιερτίσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 2% γαλόςκτωμα - 3% τσιμέντο (δοκίμια 14 και 15)



Σχήμα 7.6.6: Μεταβολή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 1% γαλ-4%τσιμ. (δοκίμια 17 και 18)



Σχήμα 7.6.7: Μεταβολή του δυναμικού μετρου ελαστικότητας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης, για το μίγμα 2% γαλάκτομα - 4% τσιμέντο (δοκίμιο 20 και 21)

7.7 Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, ανά κύκλο φόρτισης

Στην παράγραφο αυτή σχολιάζονται οι τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε καμψη (Εδυν), σε MPa, οι οποίες προήρθαν από τους πρώτους (0 έως 4), τους μεσοίους (47 έως 51) και τους τελευταίους κύκλους φόρτισης (94 έως 99), της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης.

Στα διαγράμματα παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο, με διαφορετικό χρωματισμό, η τιμή του Εδυν, για κάθε κύκλο, καθώς και ο μέσος όρος των τιμών αυτών, που είναι το Εδυν που τελικά λαμβάνεται υπ' όψη.

Θεωρήθηκε ότι οι τελευταίοι κύκλοι φόρτισης (94-99), αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ως υλικό οδοστρώματος. Γι' αυτό επιλέχθηκαν αυτοί ως καταλληλότεροι για την εκτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας κάθε δοκιμίου.

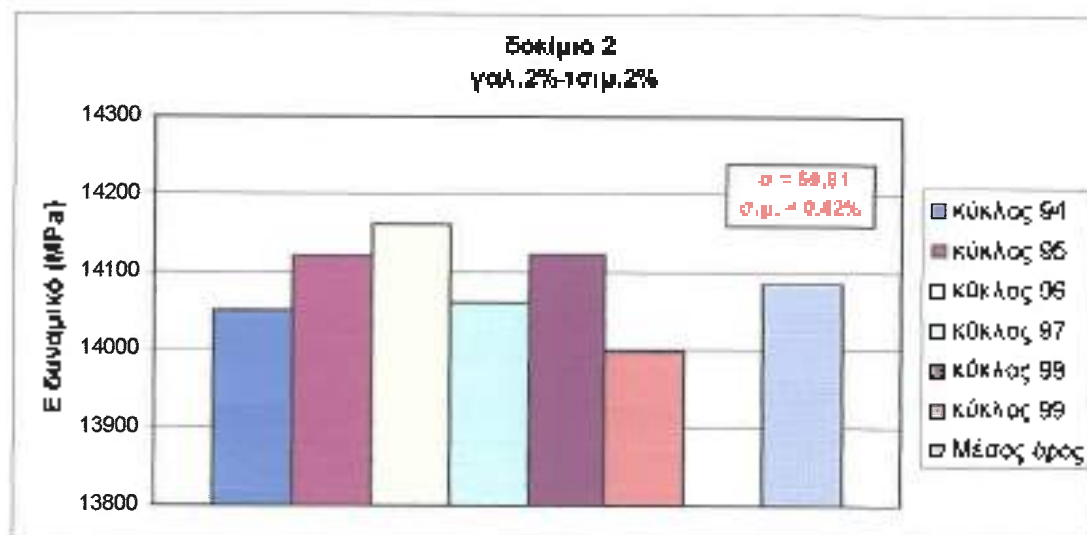
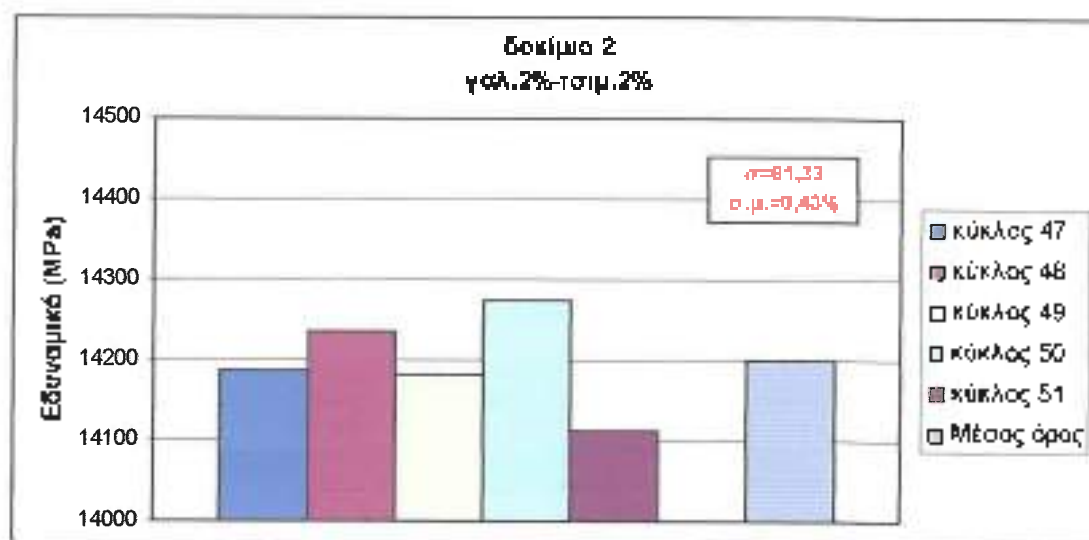
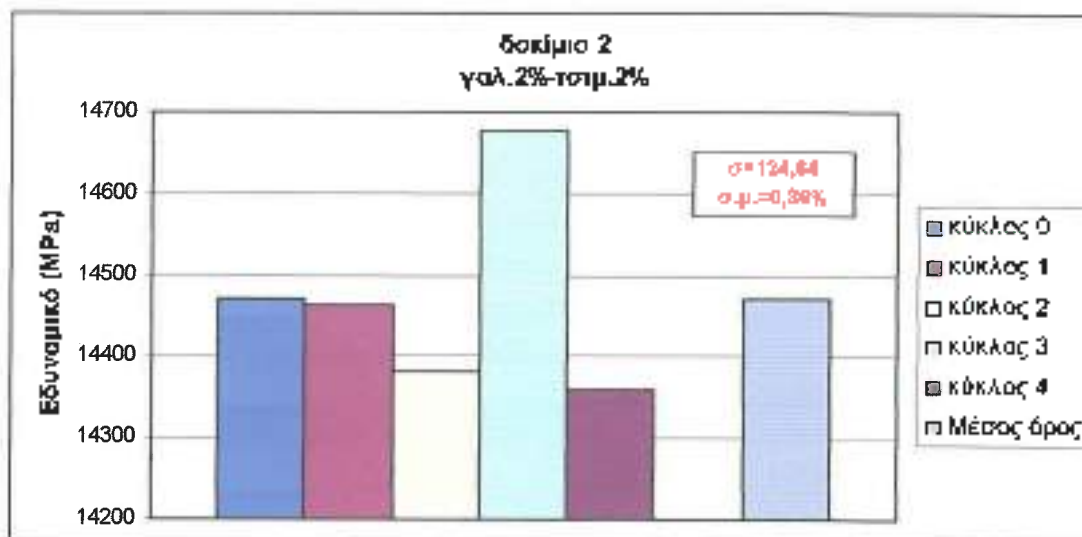
Όπως φαίνεται στα σχήματα 7.7.1 έως 7.7.14, η διακύμανση των Εδυν από κύκλο σε κύκλο, της ίδιας ομάδας είναι μικρή, κάτι που δείχνει ότι παρα το θόρυβο που παρουσιάστηκε και τον υπολογισμό του Εδυν με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης, η ακρίβεια εκτίμησής του μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική, ειδικά για τους τελευταίους κύκλους. Αυτό διαπιστώνεται και από την τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας του δείγματος των κυκλών, για κάθε δοκίμιο, που είναι εξαιρετικά μικρή, όσο αφορούν τους κύκλους 94 έως 99, και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά το 1,5%. Για τους κύκλους 0 έως 4, η τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας κυμαίνεται από 0,15% έως 1,8%, αλλά σε δύο περιπτώσεις φτάνει το 7,37% (για το δοκίμιο 12, με 0% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο, σχήμα 7.7.8) και το 9,74% (για το δοκίμιο 15, με 2% γαλάκτωμα και 3% τσιμέντο, σχήμα 7.7.10). Στους μεσαίους κύκλους (47 έως 51), η τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας είναι μικρή, και μόνο σε μία περίπτωση (για το δοκίμιο 14, με 2% γαλάκτωμα και 3% τσιμέντο, σχήμα 7.7.9), φτάνει το 2,31%.

Επίσης, δεν παρατηρείται σταθερότητα στη μεταβολή του Εδυν (αύξηση ή μείωση), μεταξύ των κύκλων της ίδιας ομάδας. Επομένως, οι διαφορές στο μέτρο ελαστικότητας οφείλονται σε πειραματικές ανακρίβειες, κυρίως στη μέτρηση των παραμορφώσεων.

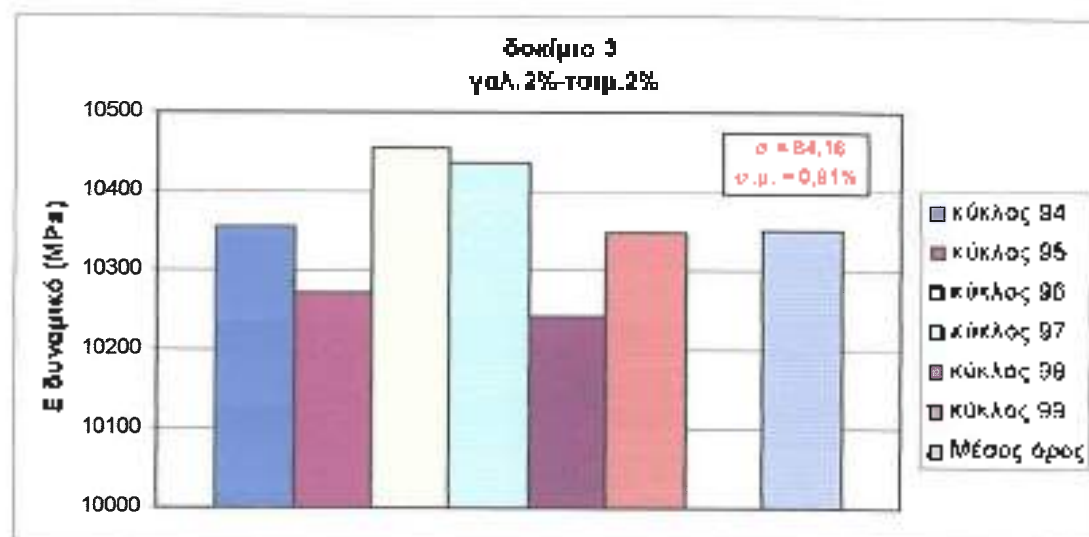
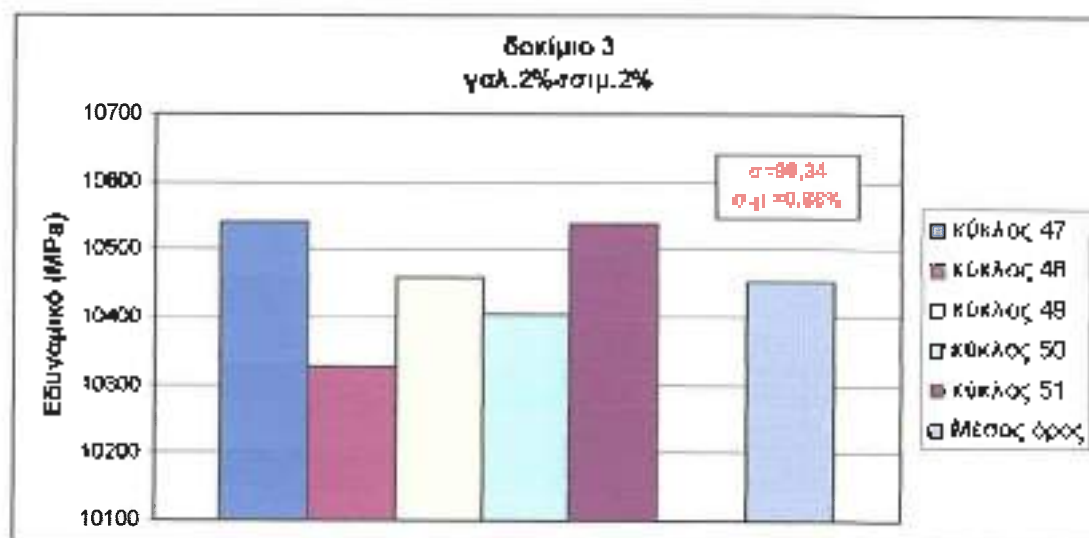
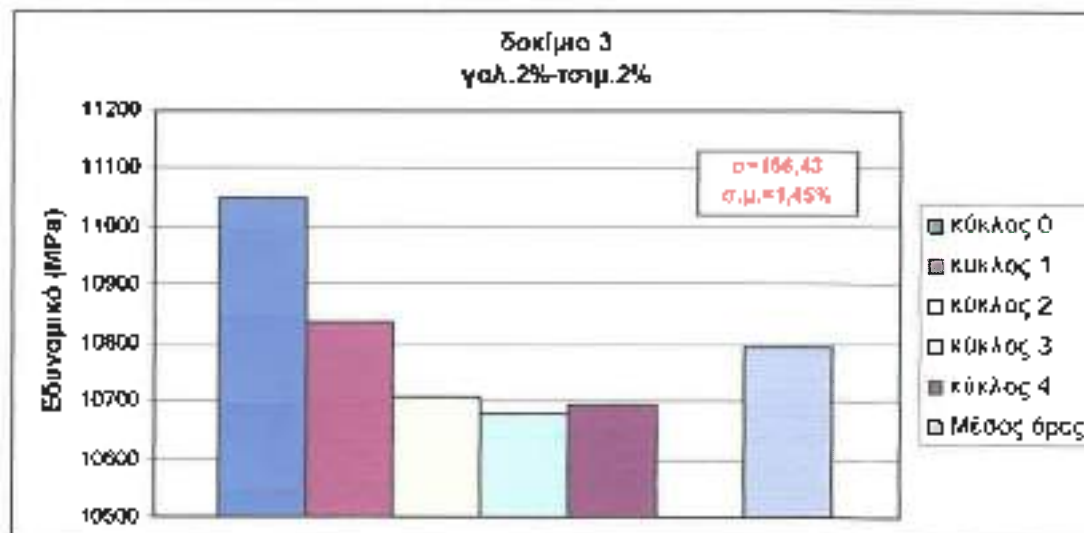
Ανάμεσα στα δοκίμια ίδιου μίγματος παρουσιάζονται, όσο αφορά τους τελευταίους κύκλους, διαφοροποιήσεις στους μέσους όρους του Εδυν, οι οποίες είναι

σημαντικότερες στα μίγματα με 2% γαλάκτωμα και 2% τσιμέντο, (δοκίμια 2 και 3), όπου υπάρχει διαφορά της τάξης του 36%, με 4% γαλάκτωμα και 4% τσιμέντο, (δοκίμια 11 και 12), με διαφορά 29,5%, και 1% γαλάκτωμα με 4% τσιμέντο όπου η διαφορά κυμαίνεται στα 15%.

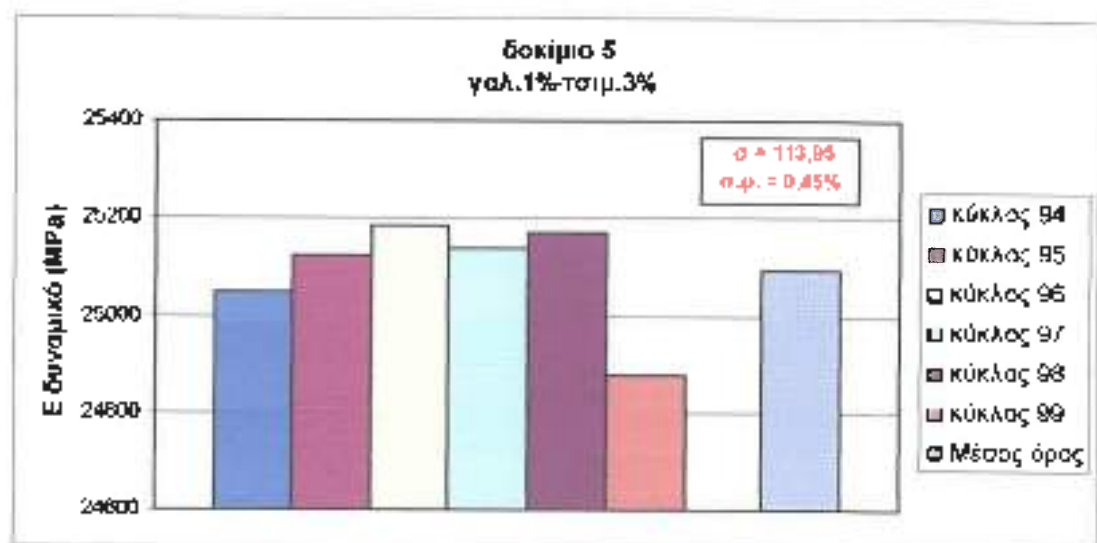
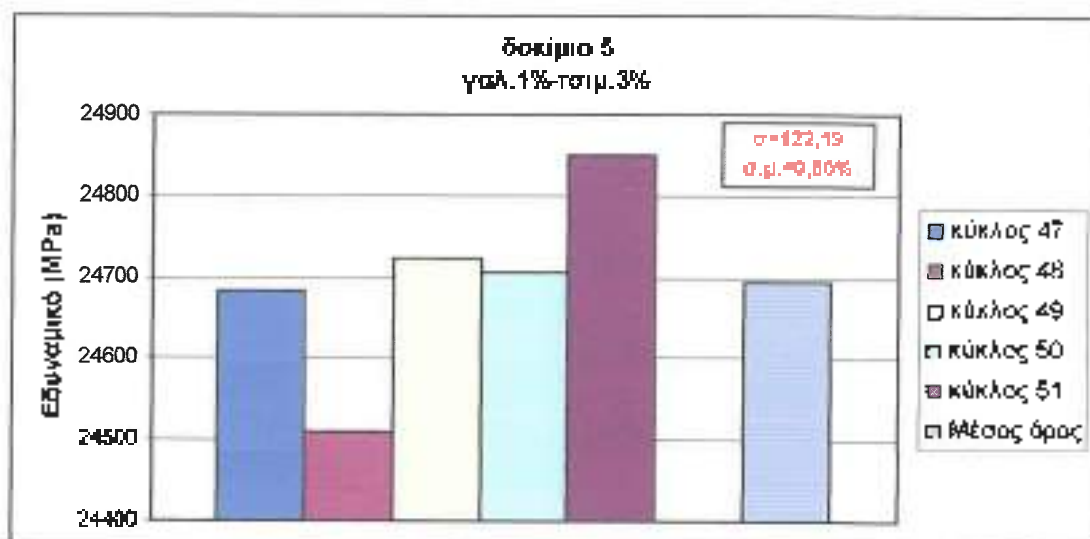
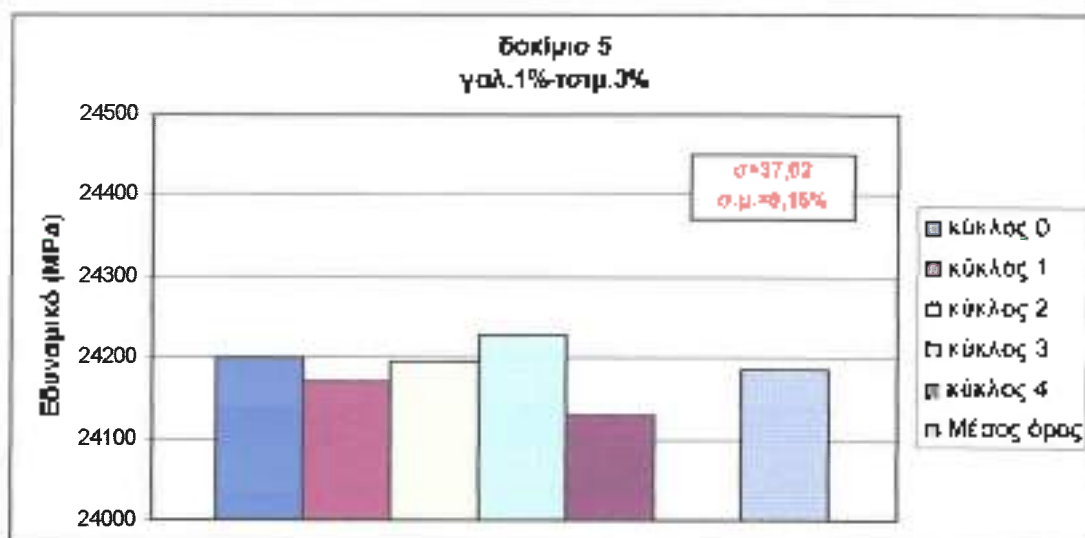
Οι διαπιστώσεις αυτές, όπως και η σύγκριση των μέσων όρων των Εδών για όλα τα μίγματα, γίνονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 7.8. και σε συνδυασμό με το στατικό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη.



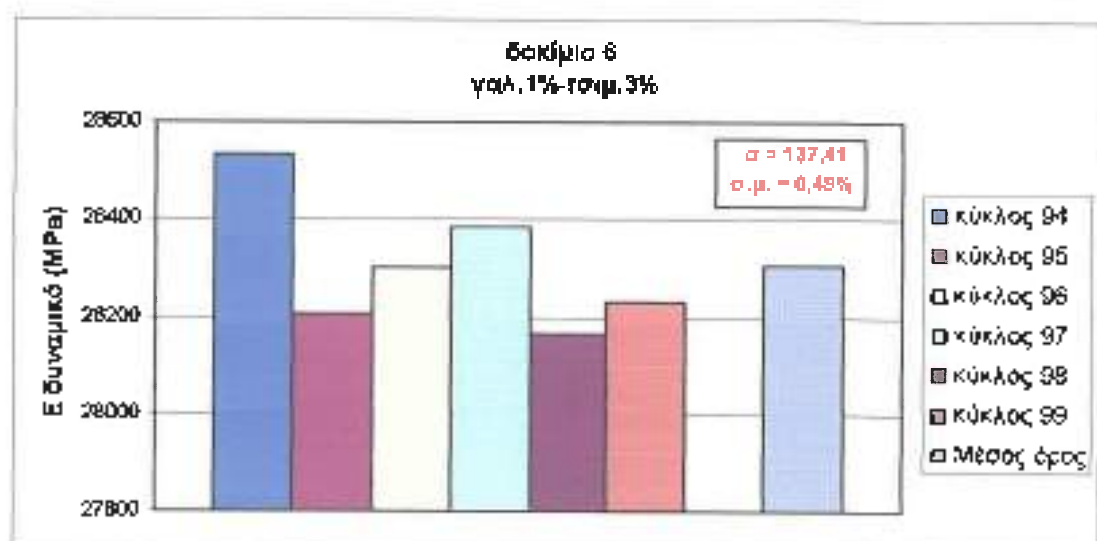
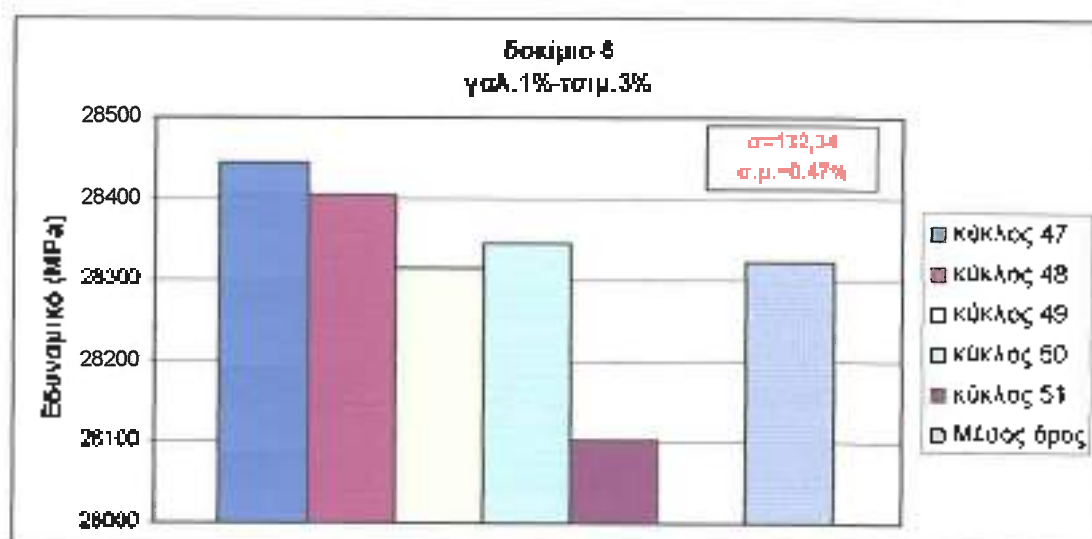
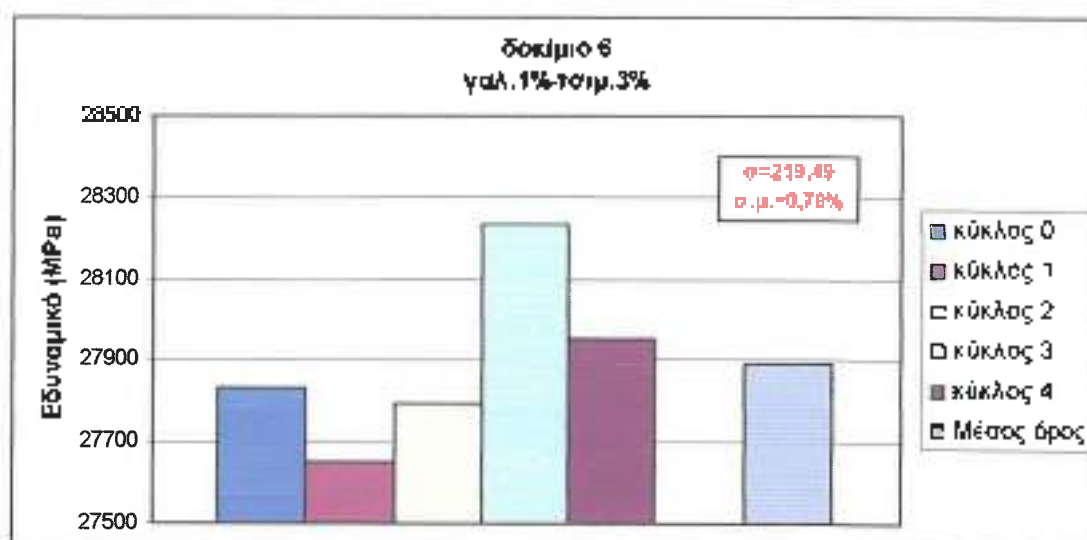
Σχήμα 7.7.1: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 2 (2% γαλακτώμα - 2% τσιμέντο)



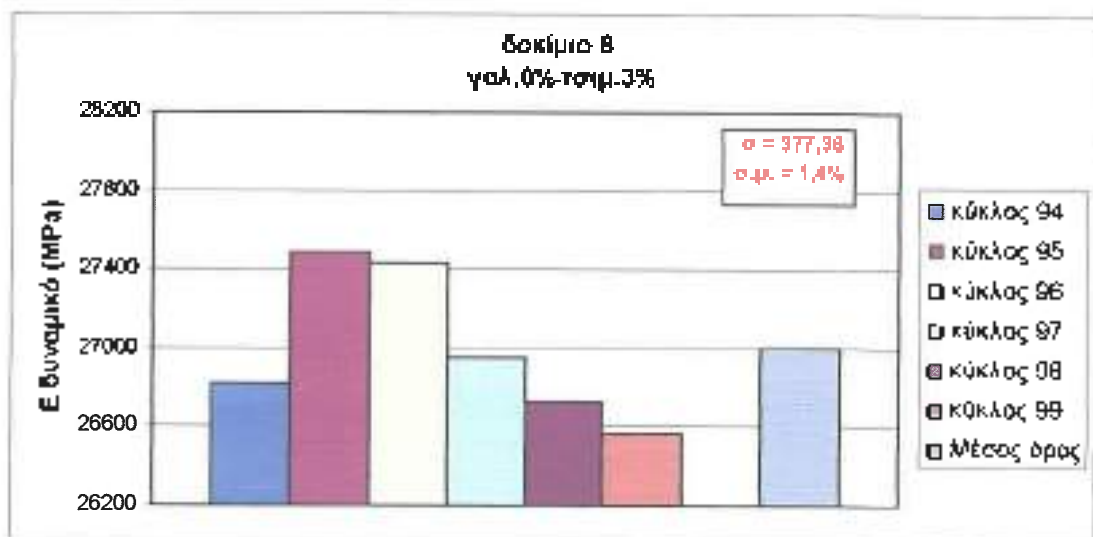
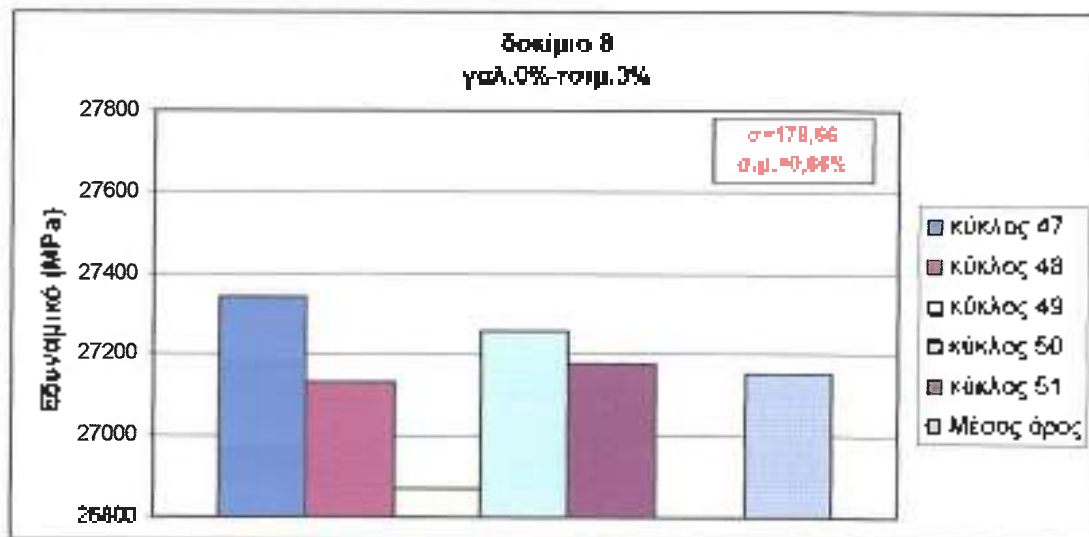
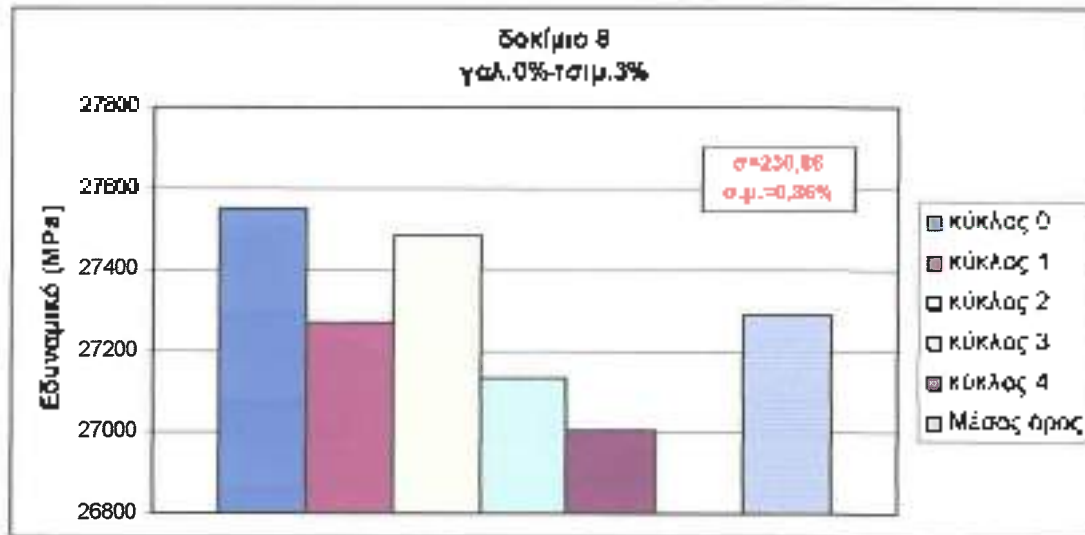
Σχήμα 7.7.2: Συγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φορτίσης για το δοκίμιο 3 (2% γαλάκτωμα - 2% τσιμέντο)



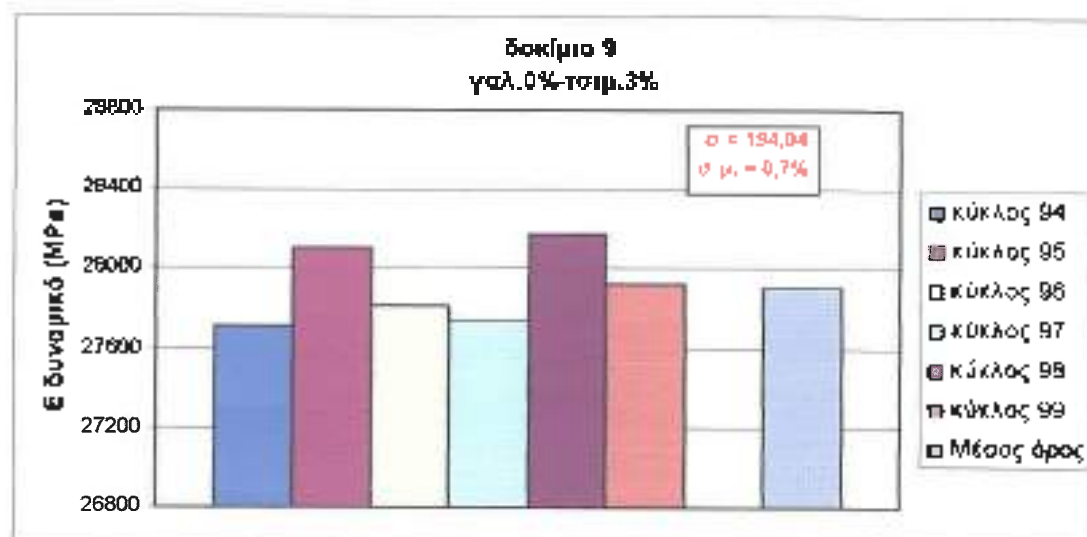
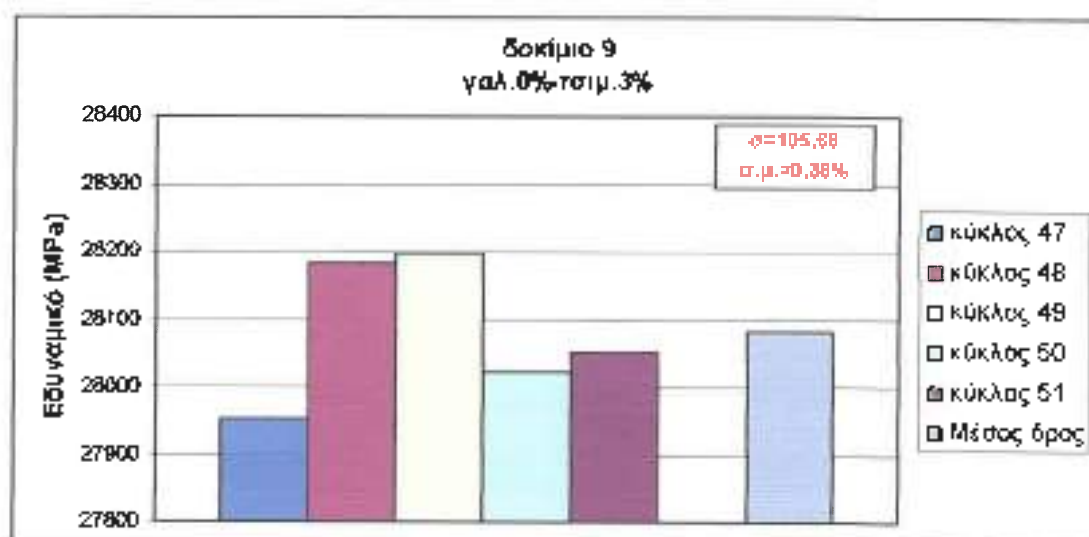
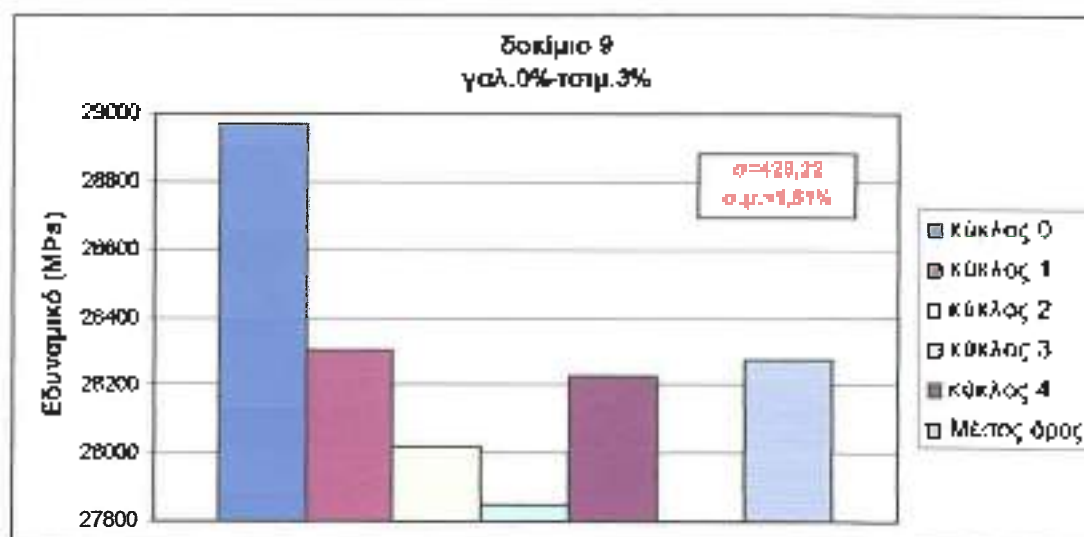
Σχήμα 7.7.3: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανα κύκλοι φόρτισης για το δοκίμιο 5 (1% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο)



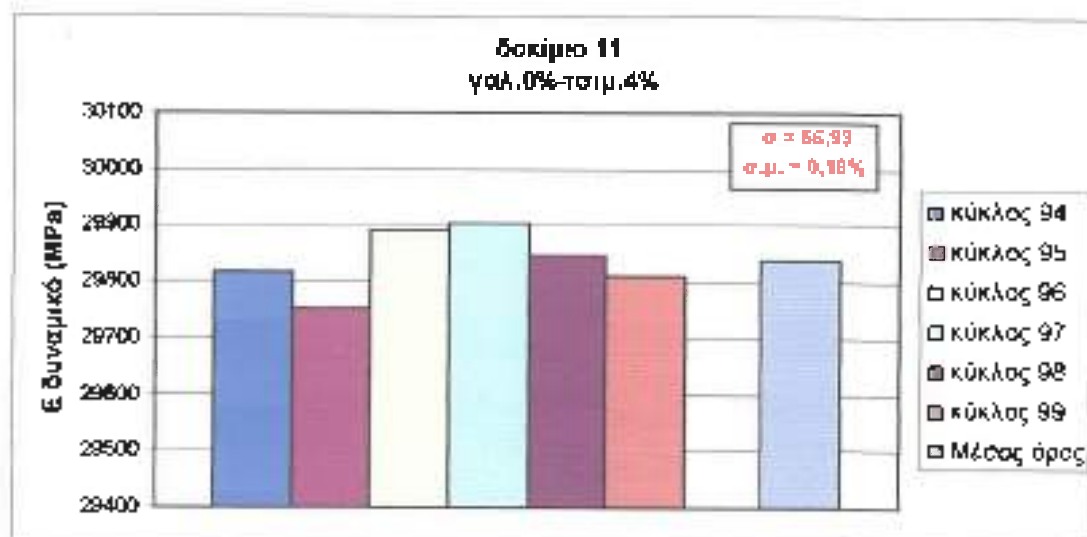
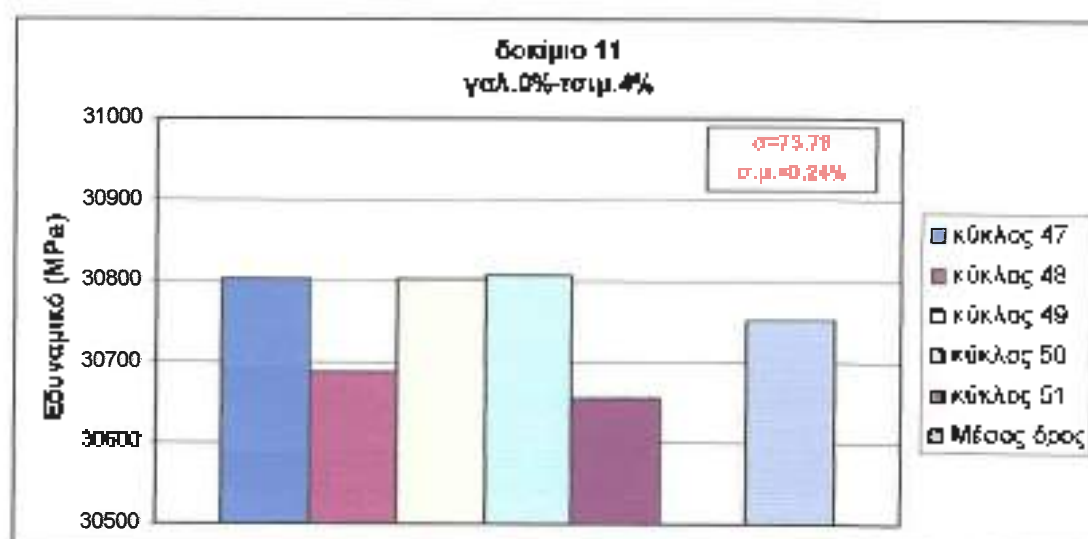
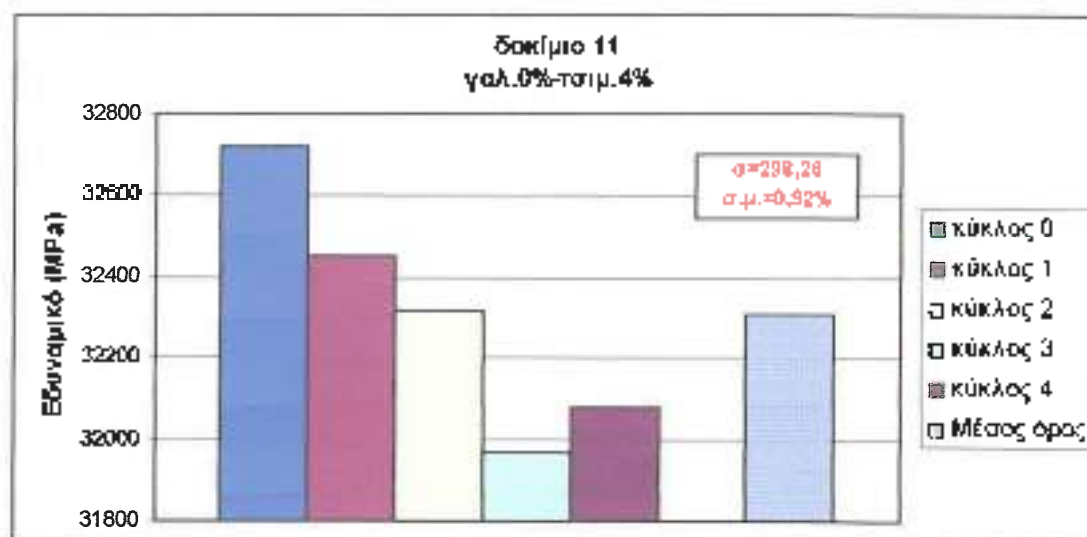
Σχήμα 7.7.4: Σύγκριση του δυναμικού μέτρη ελαστικότητας ανά κύκλο φορτίσης για το δοκίμιο 6 (1% γαλακτώμα - 3% τσιμέντο)



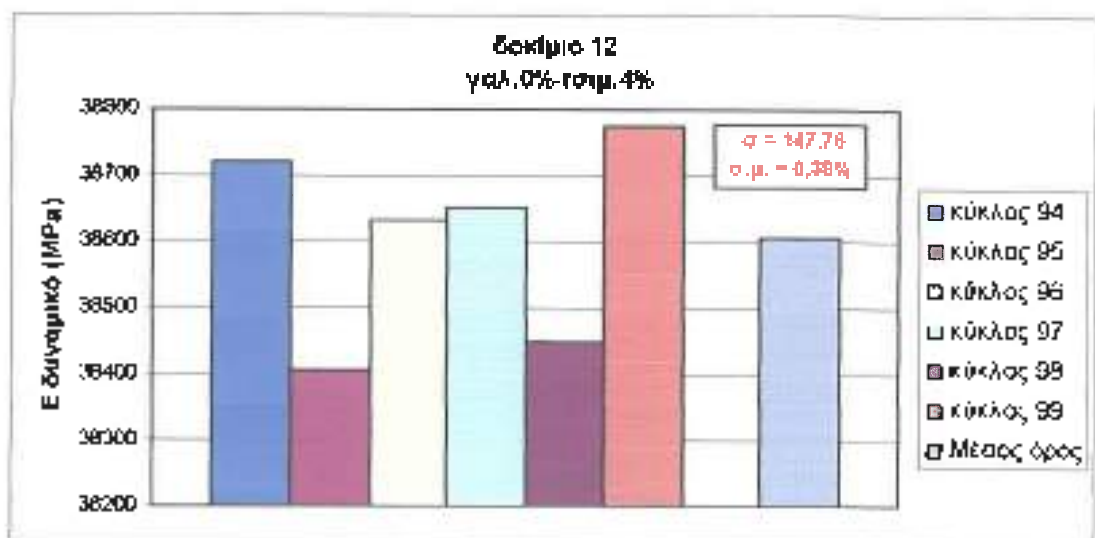
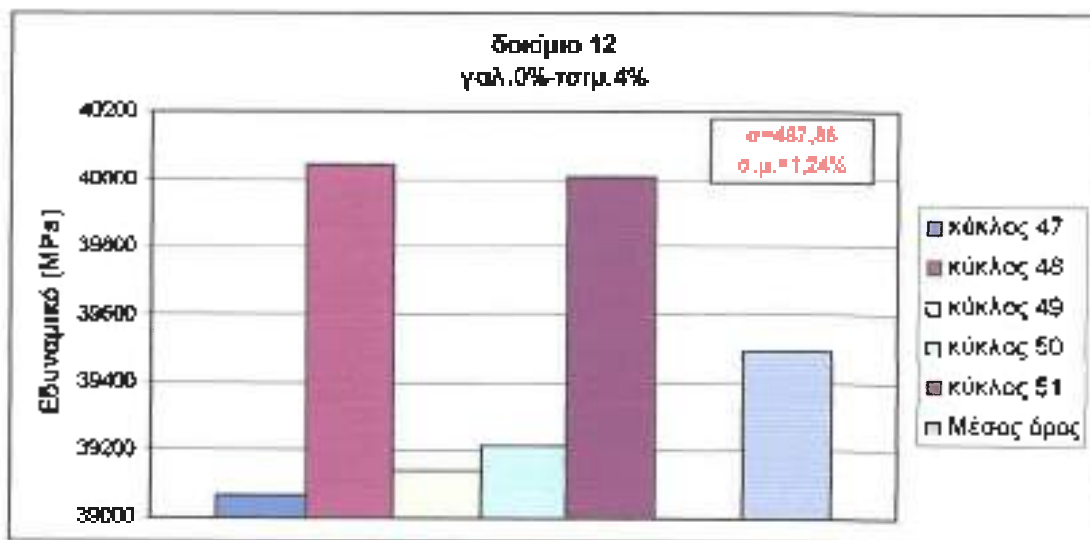
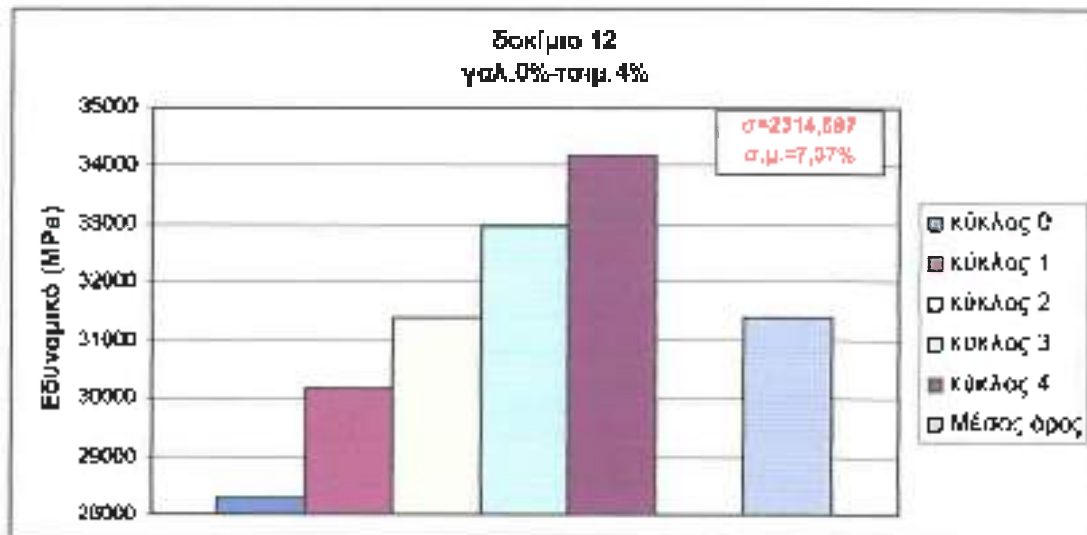
Σχήμα 7.7.5: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 8 (0% γαλάκτωμα – 3% τσιμέντο)



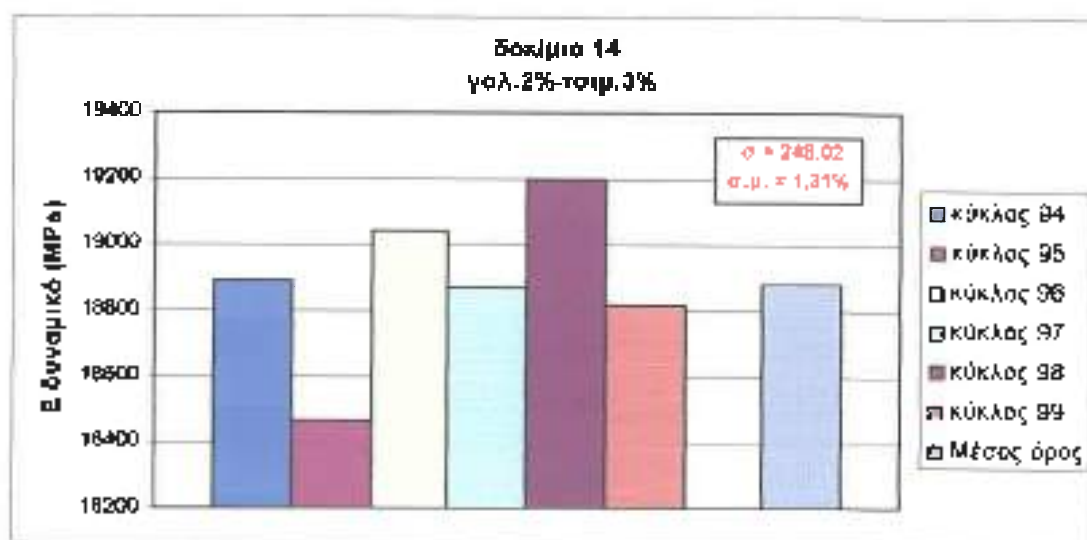
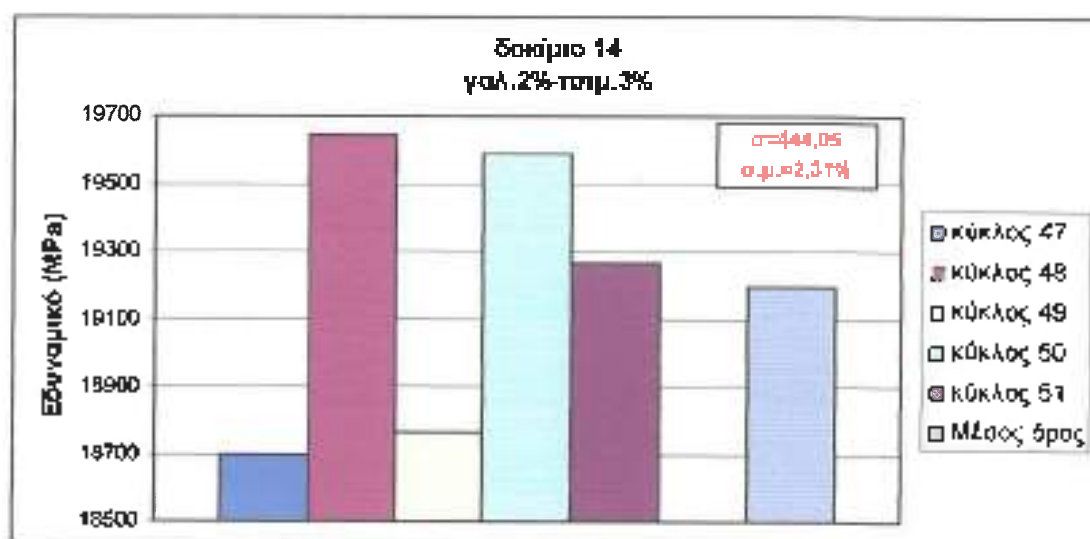
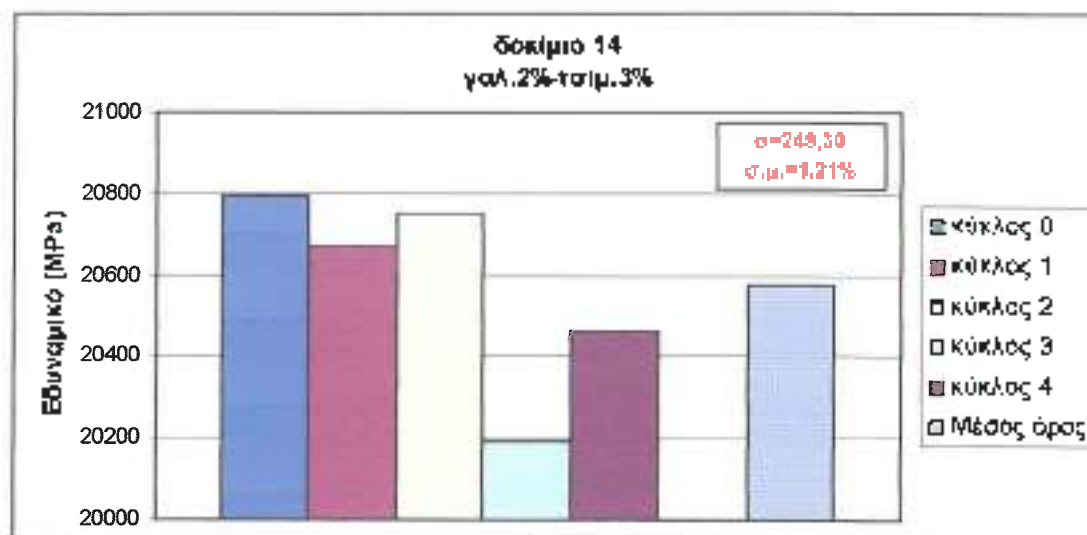
Σχήμα 7.7.6: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανα κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 9 (0% γαλάκτωμα – 3% τσιμέντο)



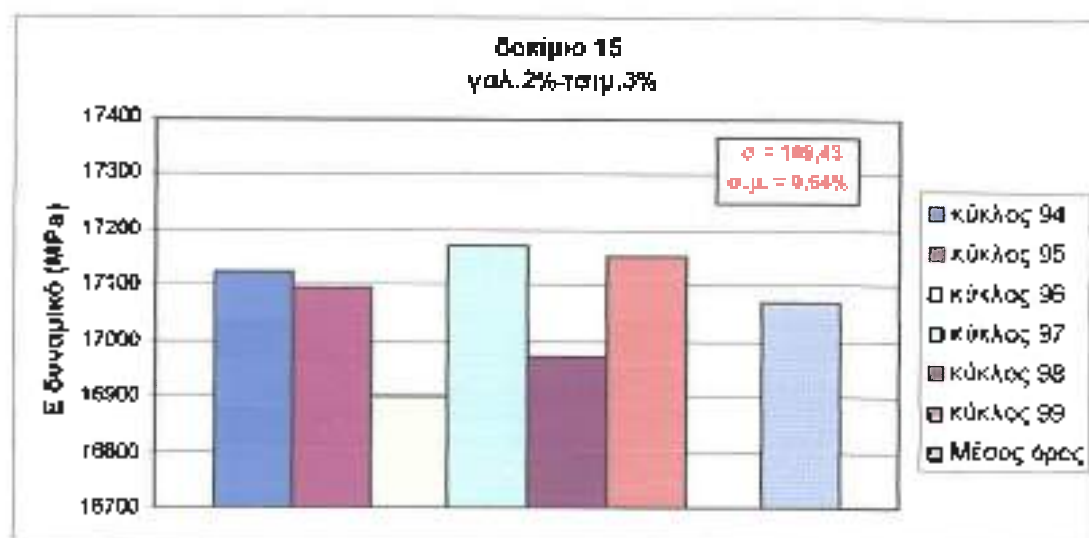
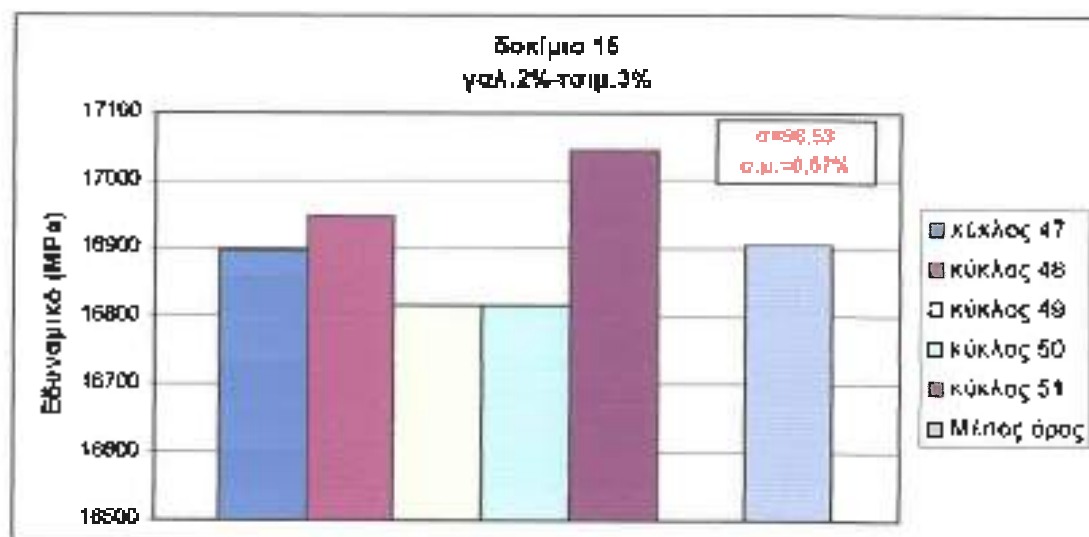
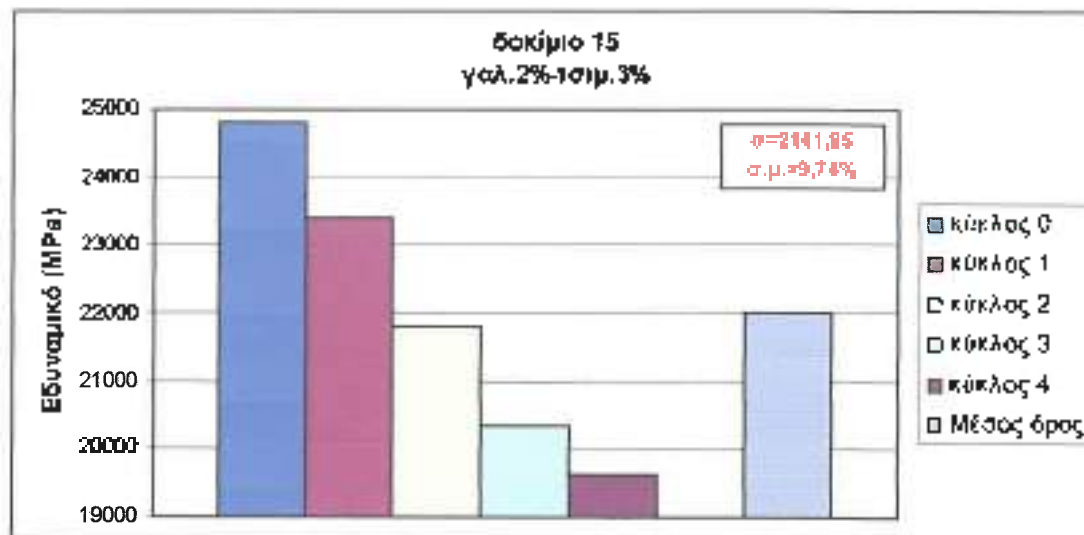
Σχήμα 7.7.7: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φορτίσης για το δοκίμιο 11 (1% γαλάκτωμα 4% τσιμέντο)



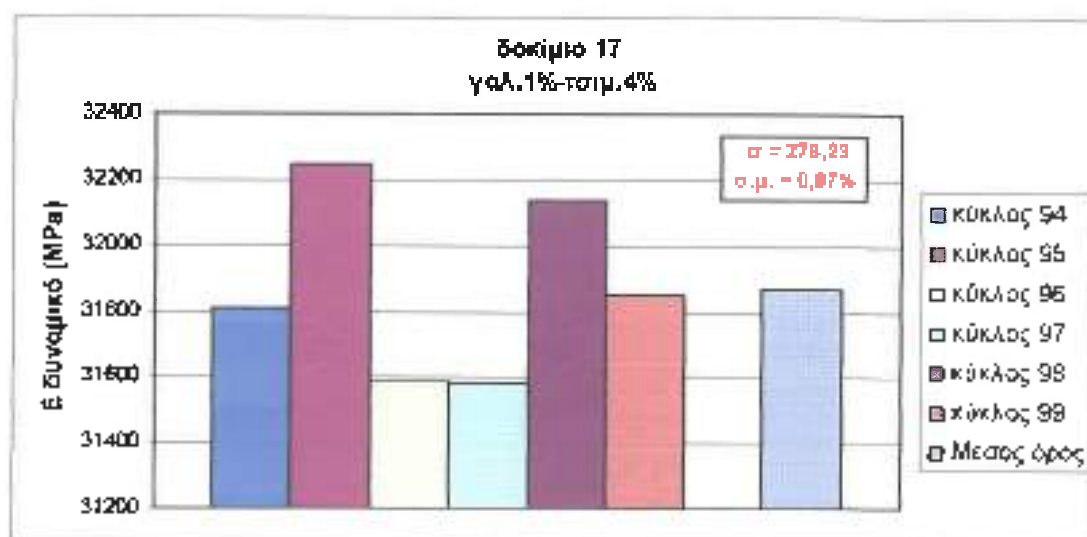
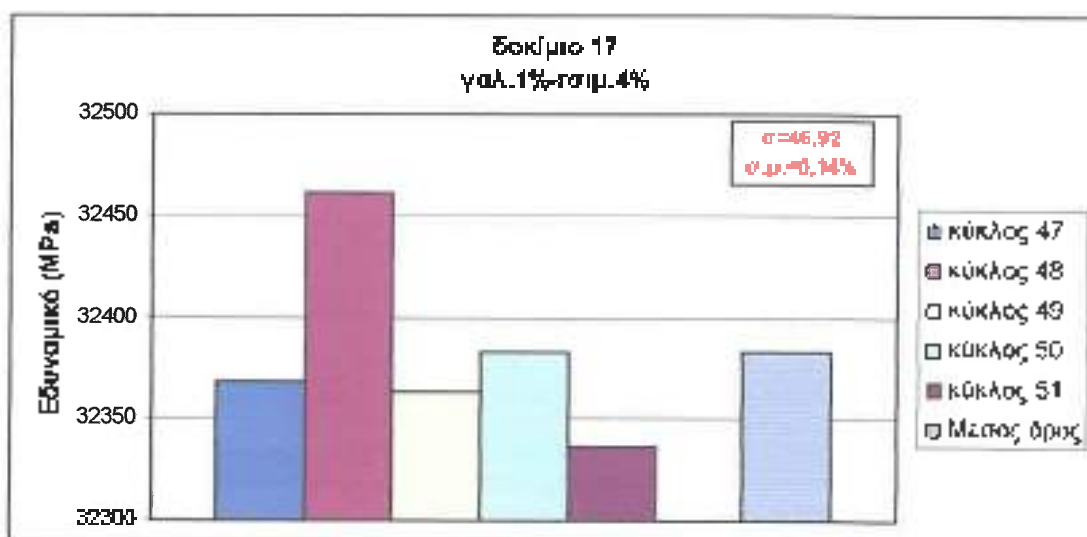
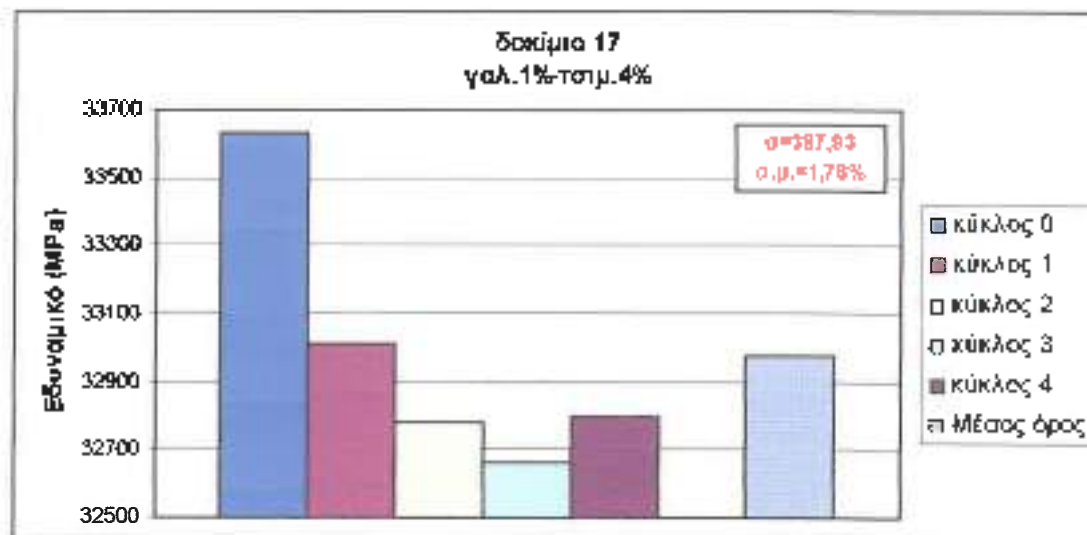
Σχήμα 7.7.8: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 12 (0% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο)



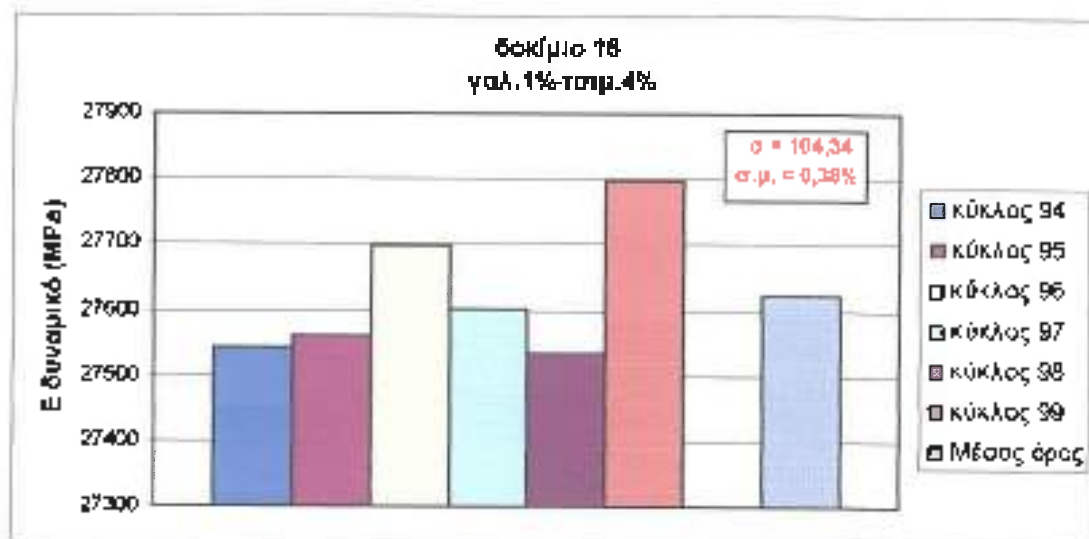
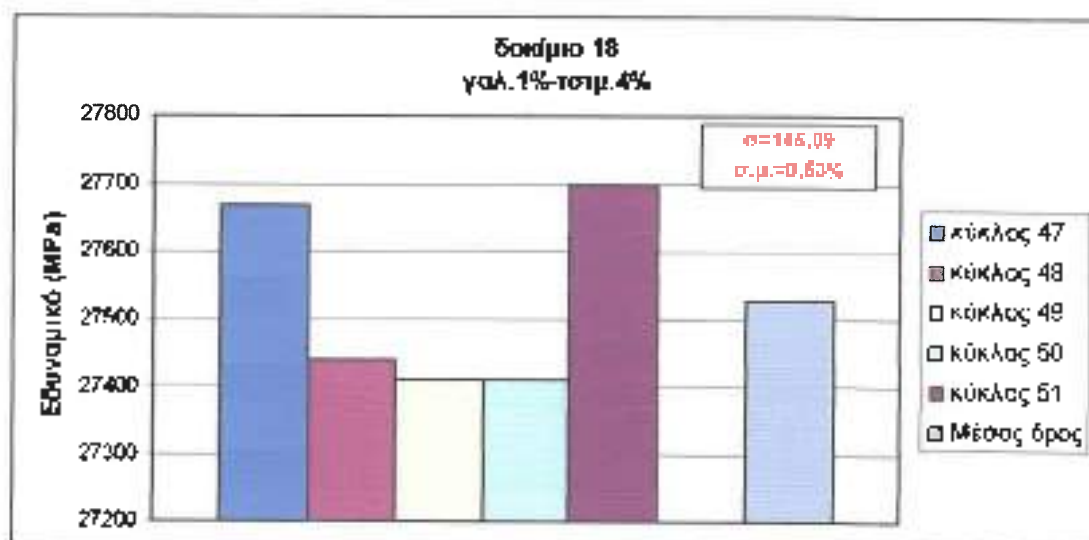
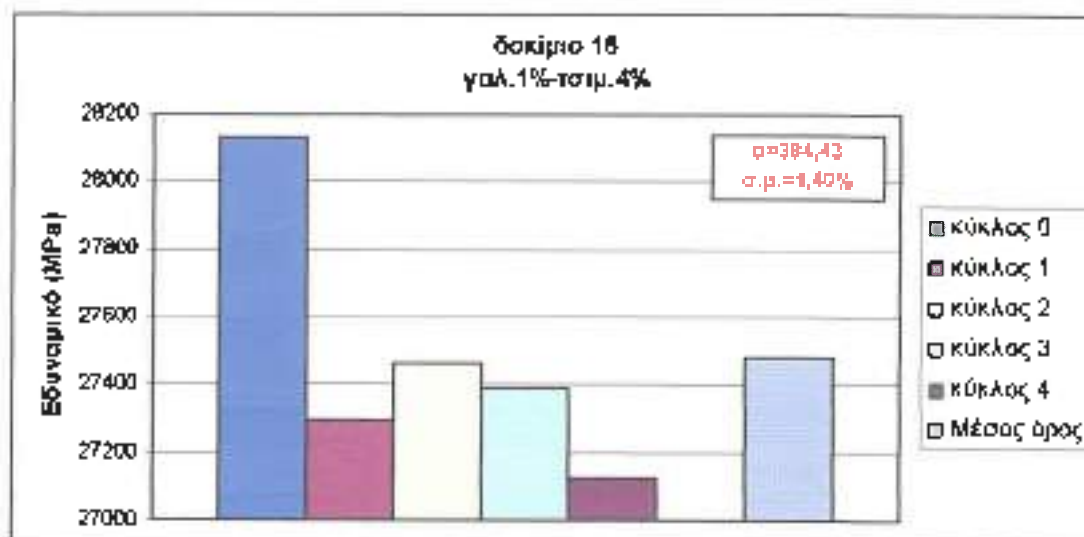
Σχήμα 7.7.9: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο ιμφορτισής για το δοκίμιο 14 (2% γαλάντωμα - 3% τσιμέντο)



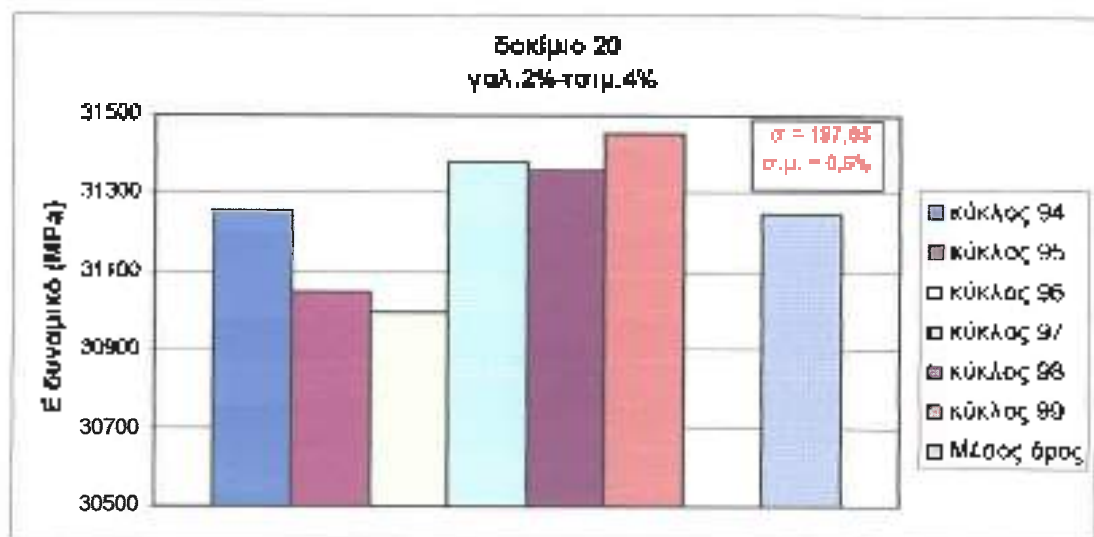
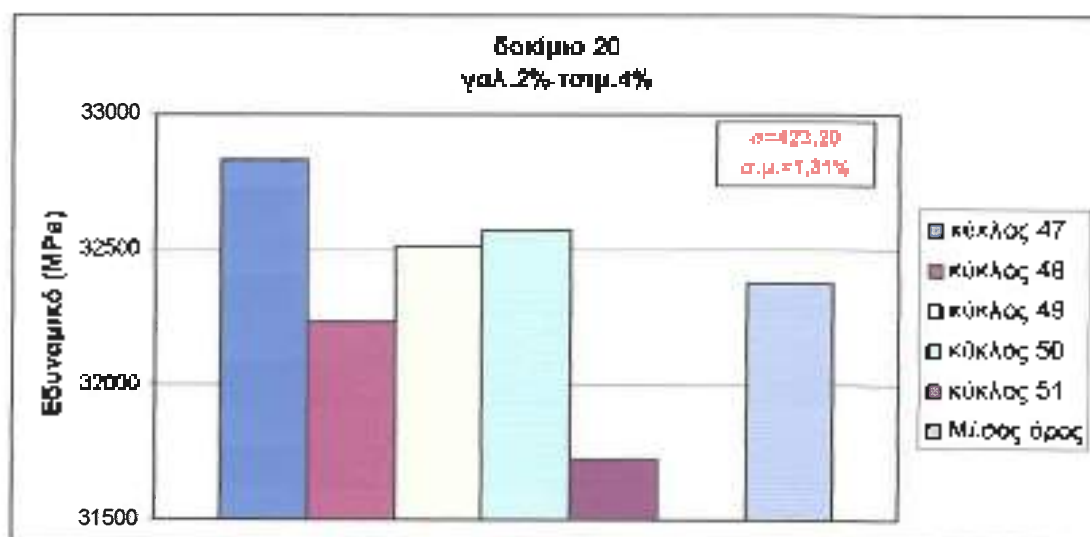
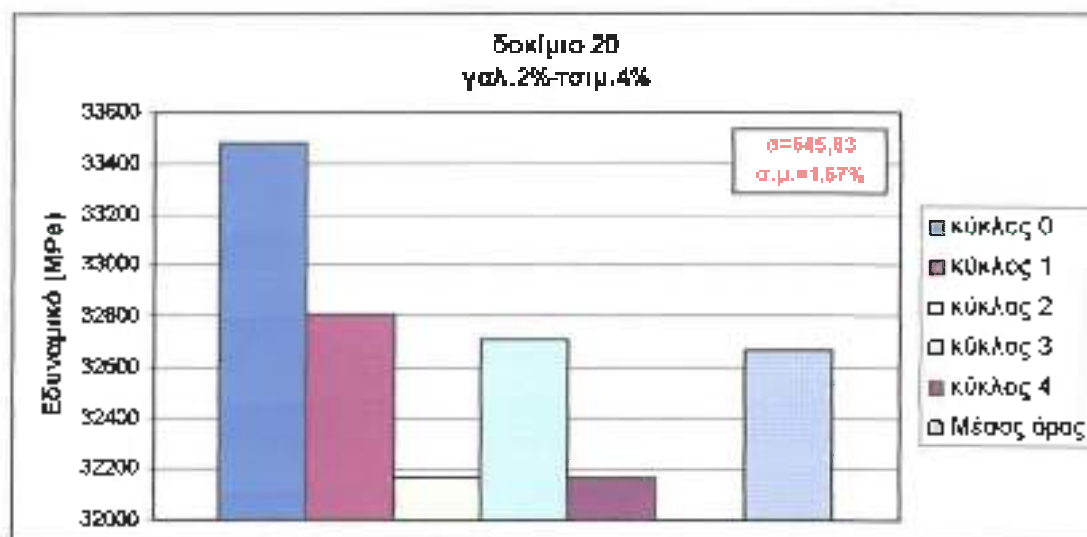
Σχήμα 7.7.10: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 15 (2% γαλάνισμα - 3% τσιμέντο)



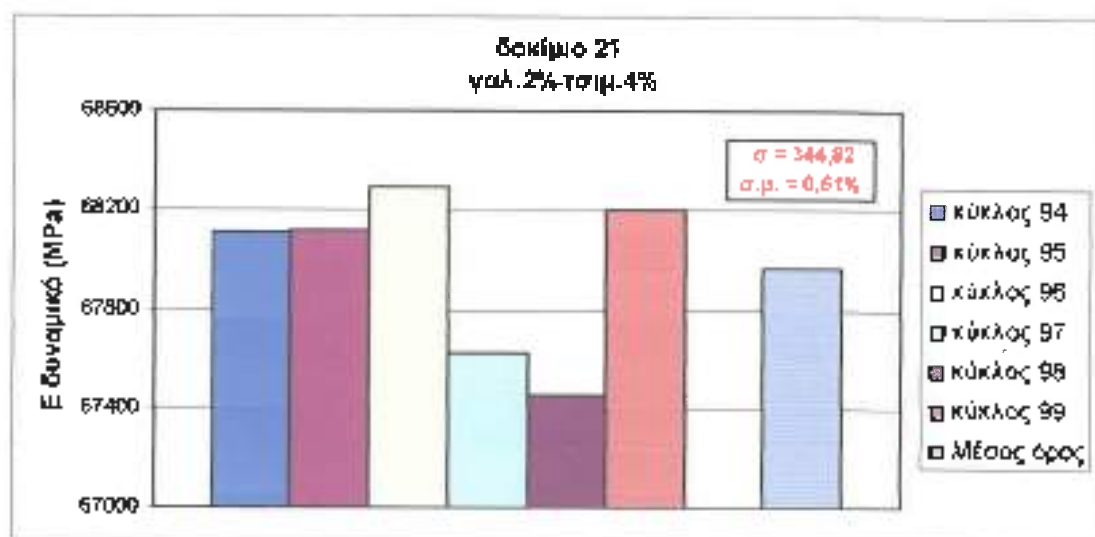
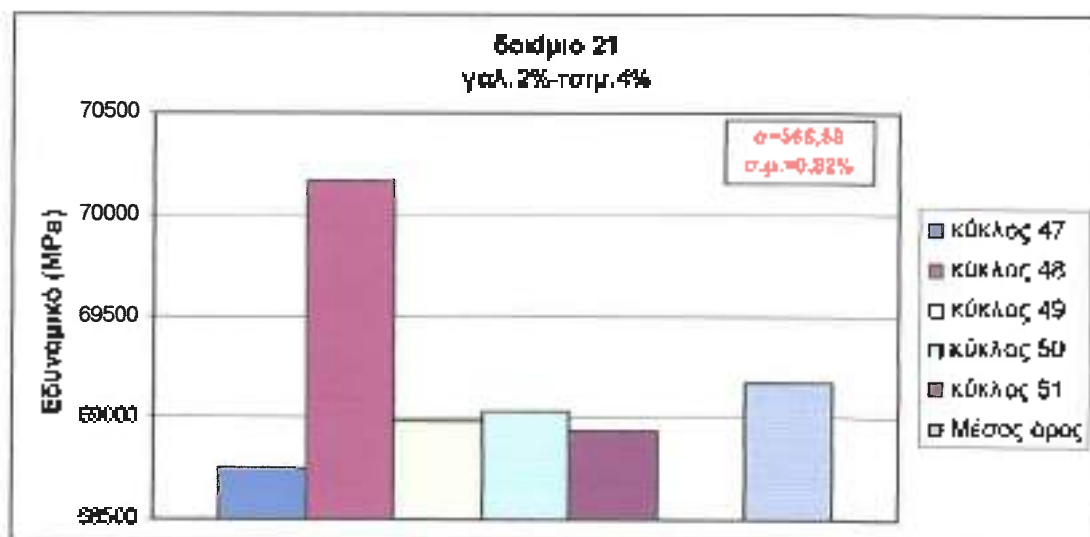
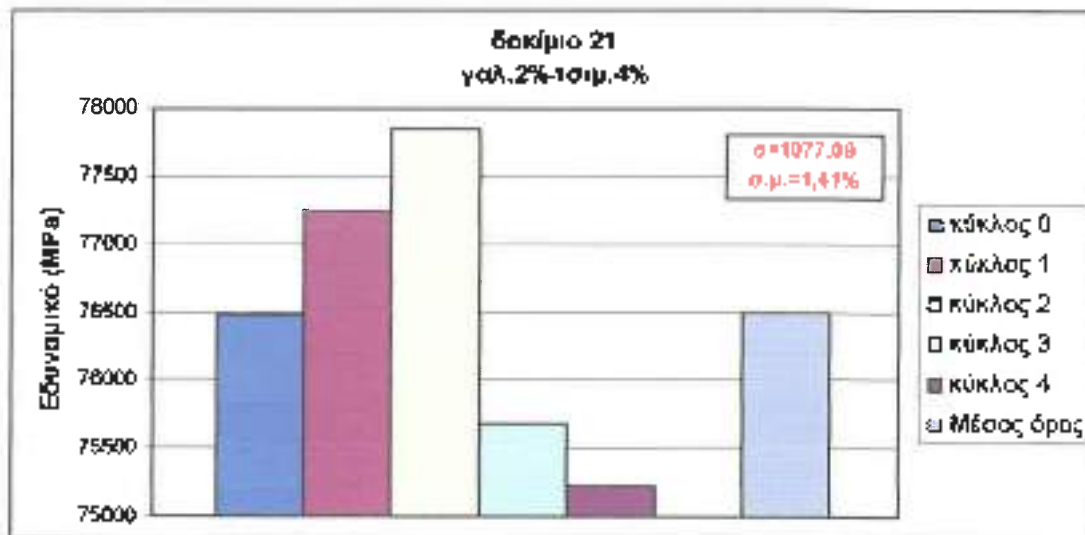
Σχήμα 7.7.11: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 17 (1% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.7.12: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 18 (1% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.7.13: Σύγκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά κύκλο οθρπσης για το δοκίμιο 20 (2% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο)



Σχήμα 7.7.14: Σήκκριση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανα κύκλο φόρτισης για το δοκίμιο 21 (2% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο)

7.8 Σύγκριση στατικών και δυναμικών μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη

Στην παράγραφο αυτή γίνεται η σύγκριση της μεταβολής των στατικού (Εστατ.) ή δυναμικού (Εδυν.) μέτρων ελαστικότητας σε κάμψη, σε σχέση με τη μεταβολή της περιεκτικότητας των μιγμάτων σε τσιμέντο ή γαλάκτωμα. Ταυτόχρονα, γίνεται και σύγκριση μεταξύ του Εστατ. και Εδυν. για κάθε μίγμα.

Για ποσοστό τσιμέντου 2%, υπήρχε μόνο ένα μίγμα, οπότε δε γίνεται συγκριτικό διάγραμμα. Επίσης, το δοκίμιο 21 παρουσίασε υπερβολικά υψηλά Εδυν., σε σχέση και με το δοκίμιο 20 του ίδιου μίγματος, 2% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο, γι' αυτό δε λαμβάνεται υπ' όψη στους σχολιασμούς. Τα Εστατ. και Εδυν., που παρουσιάζονται στα διαγράμματα με διαφορετικό χρωματισμό, είναι ο μέσος όρος αυτών ανα μίγμα. Για τα αντίστοιχα ποσοστά γαλακτώματος και τσιμέντου, δίπλα σε κάθε σημείο αναγράφεται ο αριθμός των αντίστοιχων δοκιμών.

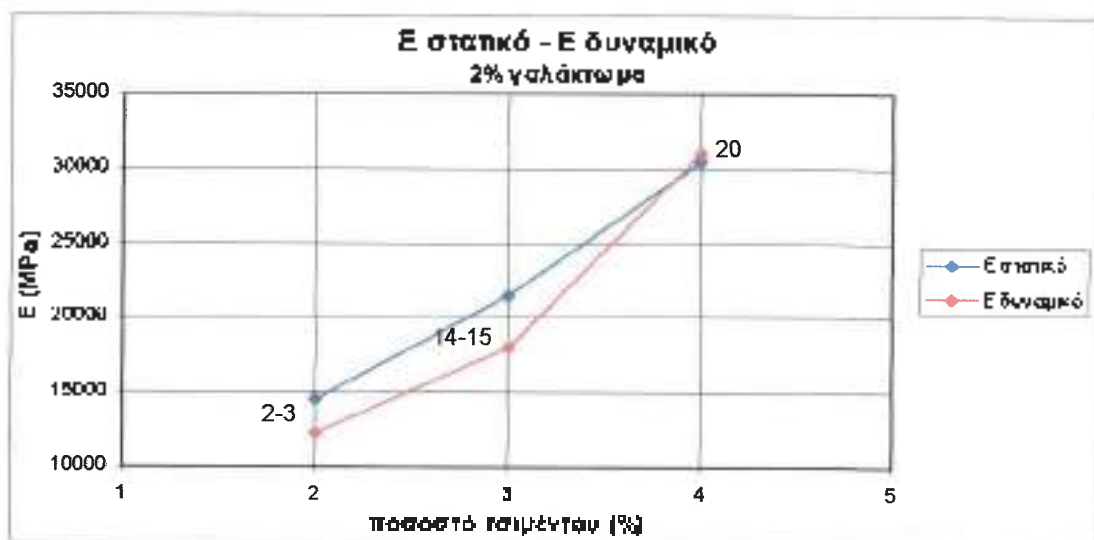
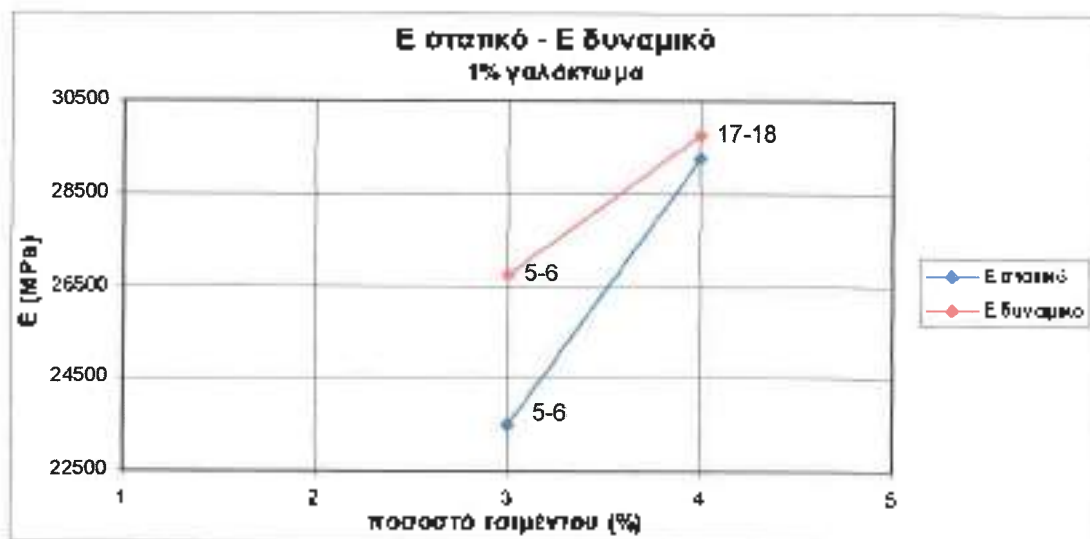
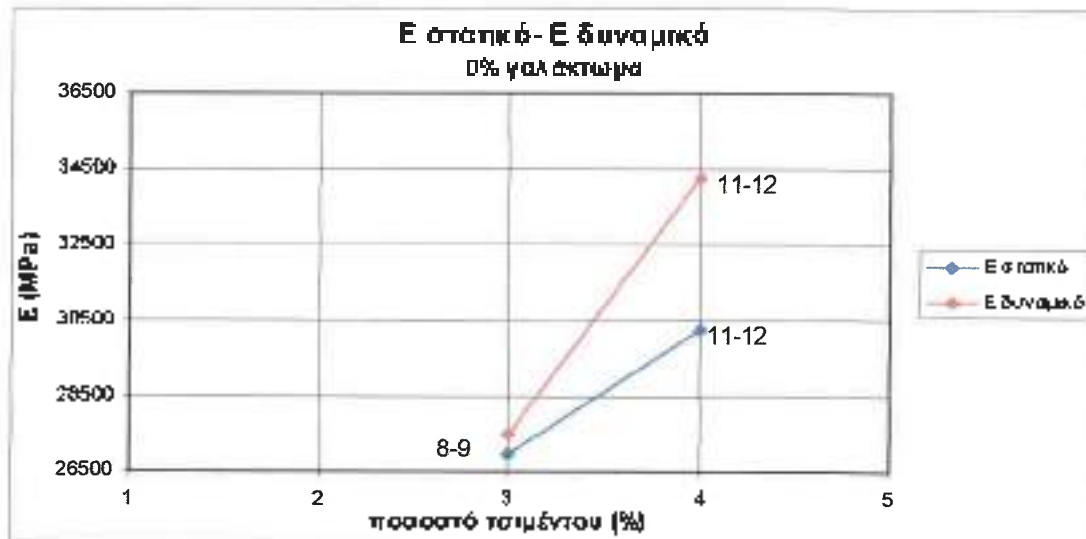
Μια άμεση παρατήρηση, είναι ότι το μέτρο ελαστικότητας σε στατική φόρτιση, είναι μικρότερο από αυτό που προκύπτει από τη δυναμική φόρτιση, κάτι που πρέπει να συμβαίνει για τους ακόλουθους λόγους. Στην απλή άγκυρή κάμψης, η ταχύτητα φόρτισης είναι σταθερή για όλα τα δοκίμια και ίση με 0,2 kN/s. Στη δυναμική δοκιμή, προκύπτει ως το πηλίκο του 1/3 του φορτίου θραύσης της στατικής άγκυρης σε κάμψη, δια του χρόνου φόρτισης, που είναι ίσος με 0,5 sec (αφού όλος ο κύκλος φόρτισης και αποφόρτισης διαρκεί 1 sec). Έτσι, για τα δοκίμια 2, 3 προκύπτει ταχύτητα φόρτισης ίση με 1,78 kN/s, για τα δοκίμια 5, 6 ταχύτητα 4,3 kN/s, για τα δοκίμια 8, 9 ταχύτητα 3,72 kN/s, για τα δοκίμια 11, 12 ταχύτητα 6,52 kN/s, για τα δοκίμια 14, 15 ταχύτητα 4,02 kN/s, για τα δοκίμια 17, 18 ταχύτητα 6,52 kN/s, και τέλος για το δοκίμιο 20 ταχύτητα 6,58 kN/s. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η ταχύτητα φόρτισης είναι μεγαλύτερη στη δυναμική δοκιμή. Όταν έχει ανασταθεί και στην ανασκόπηση της υπάρχουσας γνώσης (κεφ.1.7), η αύξηση της ταχύτητας φόρτισης, επιφέρει αύξηση και στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Επομένως είναι λογικό να αναμένεται Εδυν. μεγαλύτερο του Εστατ. .

Μια άλλη παρατήρηση, είναι ότι με σταθερό ποσοστό γαλακτώματος και αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στα μίγματα, το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται, είτε πρόκειται για στατικό, είτε για δυναμικό, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8.1. Αντιθέτως, το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται, όταν αυξάνεται το ποσοστό του γαλακτώματος, με το ποσοστό του τσιμέντου να παραμένει σταθερό, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8.2.

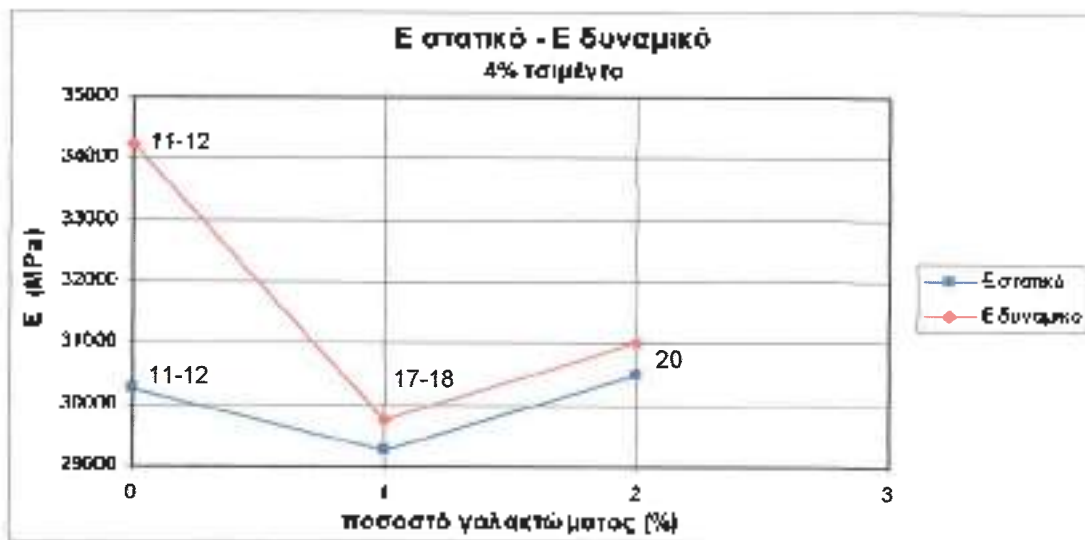
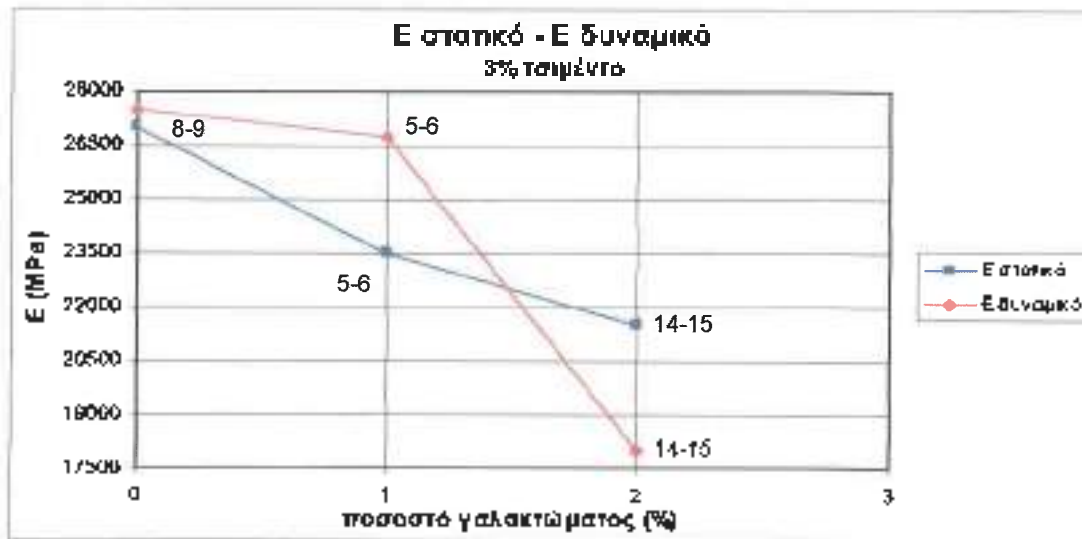
Όλα τα παραπάνω φαίνονται αναλυτικότερα και συγκεντρωτικά, στο σχήμα 7.8.3, όπου γίνεται σύγκριση του στατικού με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, για όλα τα μίγματα που εξετάστηκαν, και στο οποίο παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια μαζί. Στον πίνακα 7.8.1 που συνοδεύει το διάγραμμα, παρατίθεται για το κάθε δοκίμιο, το αντίστοιχο ποσοστό γαλακτώματος και τσιμέντου, καθώς και οι τιμές του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, σε MPa.

Κάθε σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί σε ένα δοκίμιο, του οποίου ο αριθμός αναγράφεται δίπλα στο σημείο αυτό. Τα δοκίμια ίδιου μίγματος παρηνικιάζονται με το ίδιο χρώμα. Για καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων κατασκευάζεται η γραμμή ισότητας καθώς και η ευθεία γραμμικής καλινδρόμησης, της οποίας αναγράφεται η εξίσωση και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης (R^2).

Λόγω της προαναφερθείσας (καφ. 7.5) ελαττωματικής στήριξης των μηχανοστομέτρων, κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης, οι τιμές του E_{dyn} , σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι ακριβείς. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στο σχήμα 7.8.3, όπου παρατηρείται ότι σε 6 συνολικά περιπτώσεις, αυτές που αφορούν τα δοκίμια 2 και 3, για μίγμα 2% γαλάκτωμα - 2% τσιμέντο, τα δοκίμια 14 και 15, για μίγμα 0% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο, το δοκίμιο 8, για μίγμα 0% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο, και το δοκίμιο 18, για μίγμα 1% γαλάκτωμα - 4% τσιμέντο, το στατικό μέτρο ελαστικότητας είναι λίγο μεγαλύτερο από το δυναμικό. Το γεγονός αυτό, δεν μπορεί παρά να αποδοθεί σε σφάλματα καθαρώς εργαστηριακά, και δεν είναι δυνατόν από τον μικρό αυτό αριθμό δοκιμών να εξαχθούν συμπεράσματα για την έρευνά μας.



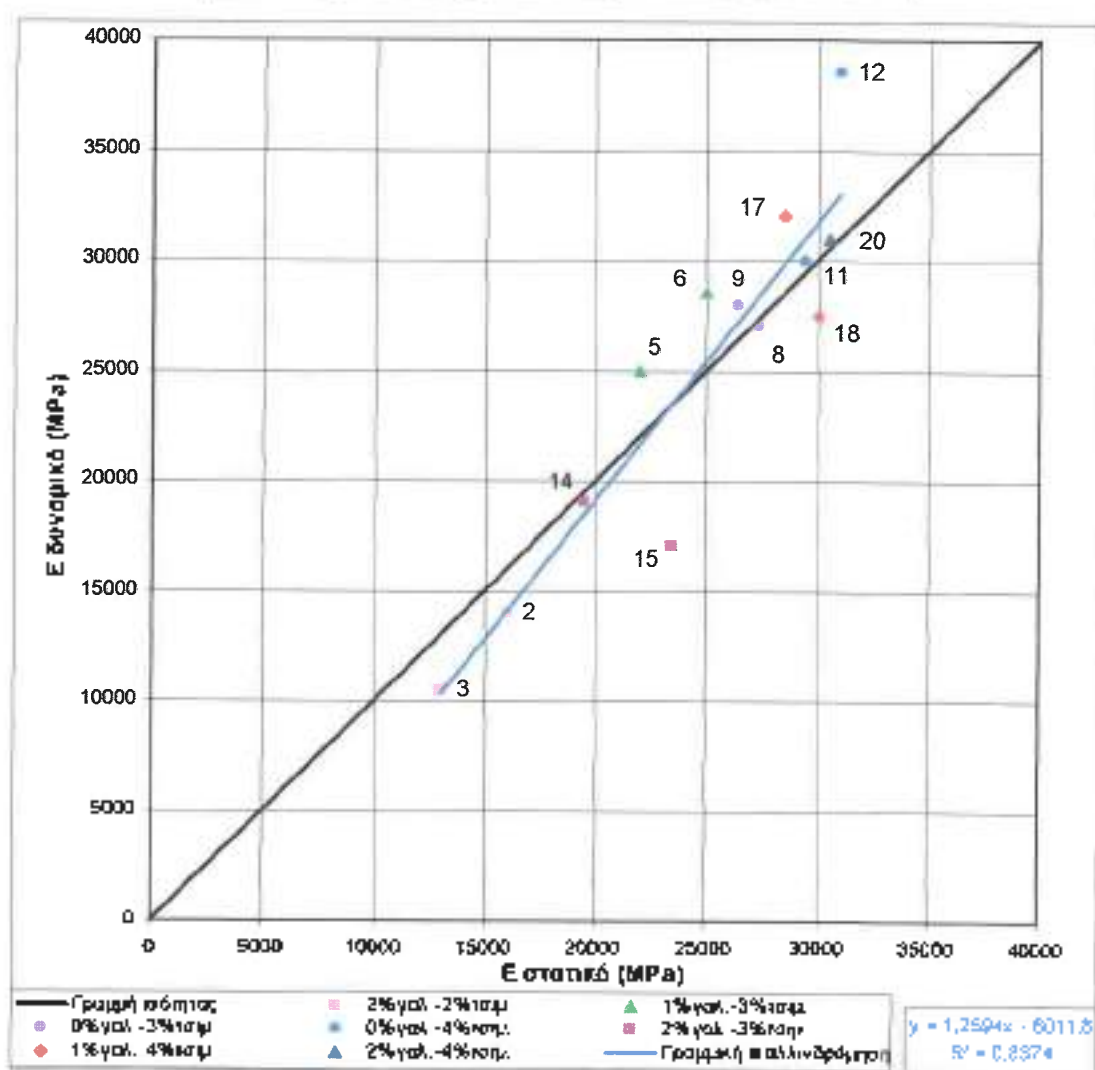
Σχήμα 7.8.1: Επίδραση του ποσοστού του τσιμέντου στο στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, για διάφορα ποσοστά γαλακτώματος



Σχήμα 7.8.2: Επίδραση του ποσοστού του γαλακτώματος στο στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, για διάφορα ποσοστά τσιμέντου

Πίνακας 7.8.1: Τιμές του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη, για όλα τα μείγματα που εξετάστηκαν

α/α Δοκίμιο	Γαλάκτωμα (%)	Τσιμέντο (%)	Ε κάμψης (MPa)	
			Ε στατικό (MPa)	Ε δυναμικό (MPa)
2	2	2	16000	14000
3			13000	10500
5	1	3	22000	25000
6			25000	28500
8	0	3	27500	27000
9			26500	28000
11	0	4	29500	30000
12			31000	38500
14	2	3	19500	19000
15			23500	17000
17	1	4	28500	32000
18			30000	27500
20	2	4	30500	31000
21			30500	36000



Σχήμα 7.8.3: Σύγκριση του στατικού με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, για όλα τα μείγματα που εξετάστηκαν

7.9 Σχόλια επί των αντοχών

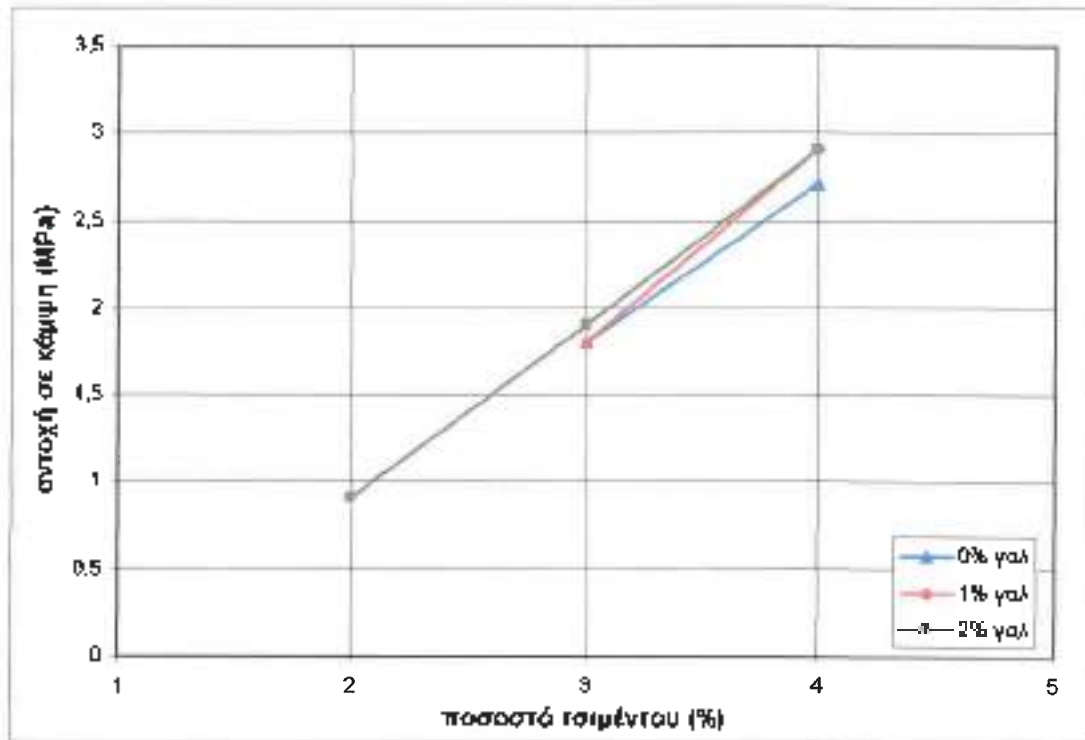
Παρακάτω σχολιάζεται η συσχέτιση των αντοχών των μιγμάτων, που προέκυψαν από τις διάφορες δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια.

Παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής σε κάμψη (σχήματα 7.9.1 και 7.9.2), και σε θλίψη (σχήματα 7.9.3 και 7.9.4), σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου και το ποσοστό γαλακτώματος στο μίγμα.

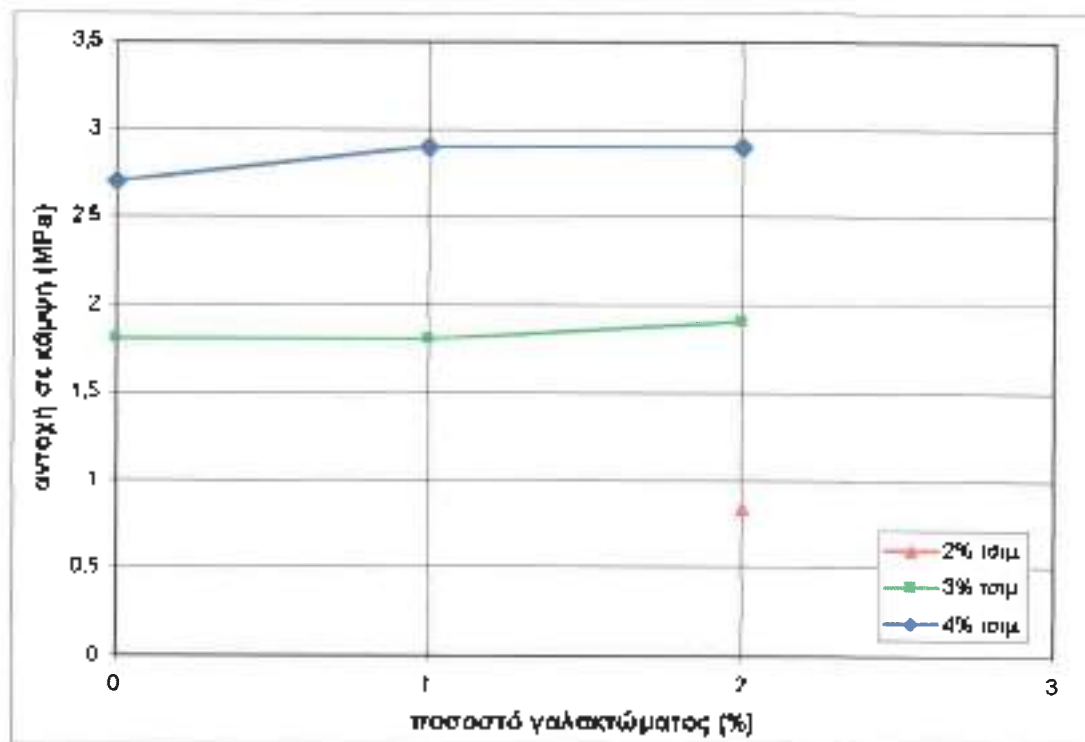
Όσον αφορά την αντοχή σε κάμψη, παρατηρείται μια τεράστια αύξηση αυτής, όταν αυξάνεται το ποσοστό του τσιμέντου στα μίγματα, από 2% σε 3% και 4%, ενώ η αύξηση είναι ασήμαντη για αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος από 0% σε 1% και 2%.

Αναφορικά με την αντοχή σε θλίψη παρατηρείται σημαντική αύξηση αυτής με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3% και 4%. Ενώ για αύξηση του ποσοστού γαλακτώματος από 0% σε 1% και 2% η αντοχή αυτή μειώνεται σταδιακά.

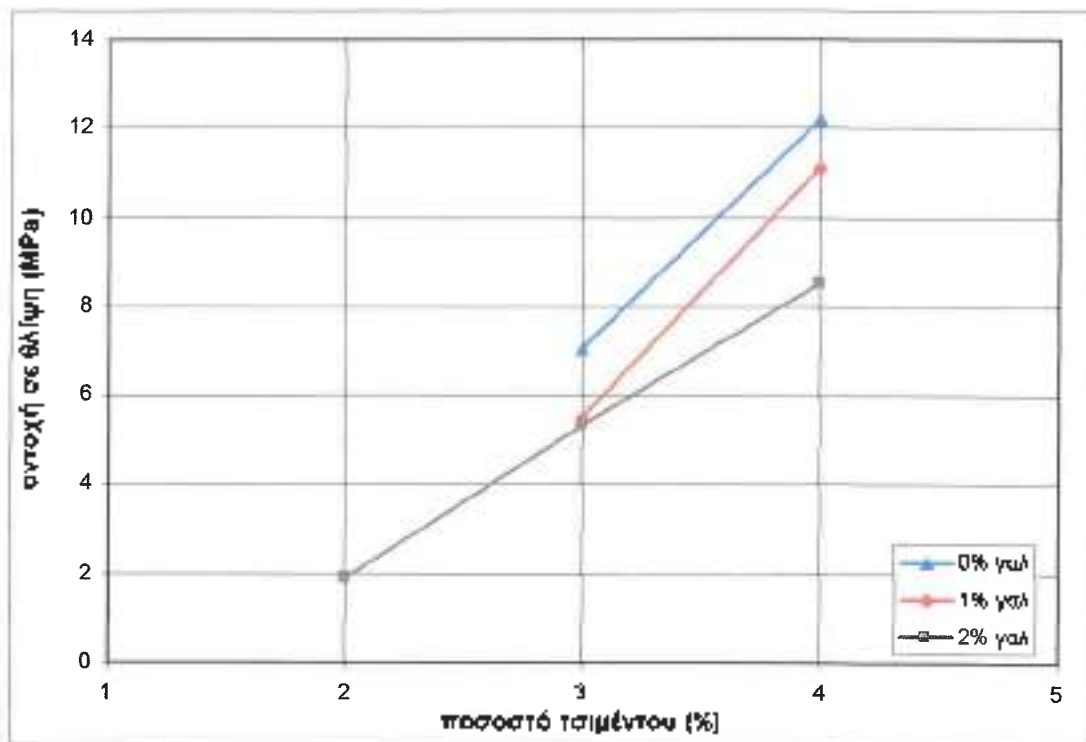
Στα σχήματα 7.9.5 έως 7.9.10 γίνεται συσχέτιση των διαφόρων αντοχών (σε κάμψη, σε θλίψη, σε ισοδύναμο κύβο και σε επέλκυση σε διάρρηξη). Παρ'όλο που τα υλικά που εξετάστηκαν έχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους ως προς τη σύνθεση, ο συσχετισμός των διαφόρων αντοχών μεταξύ τους παρουσιάζει καλό συντελεστή R^2 (από 0,82 έως 0,97), εκτός από την περίπτωση της αντοχής σε κάμψη προς την αντοχή ισοδύναμου κύβου που παρουσιάζει μειωμένο συντελεστή ($R^2 = 0,66$).



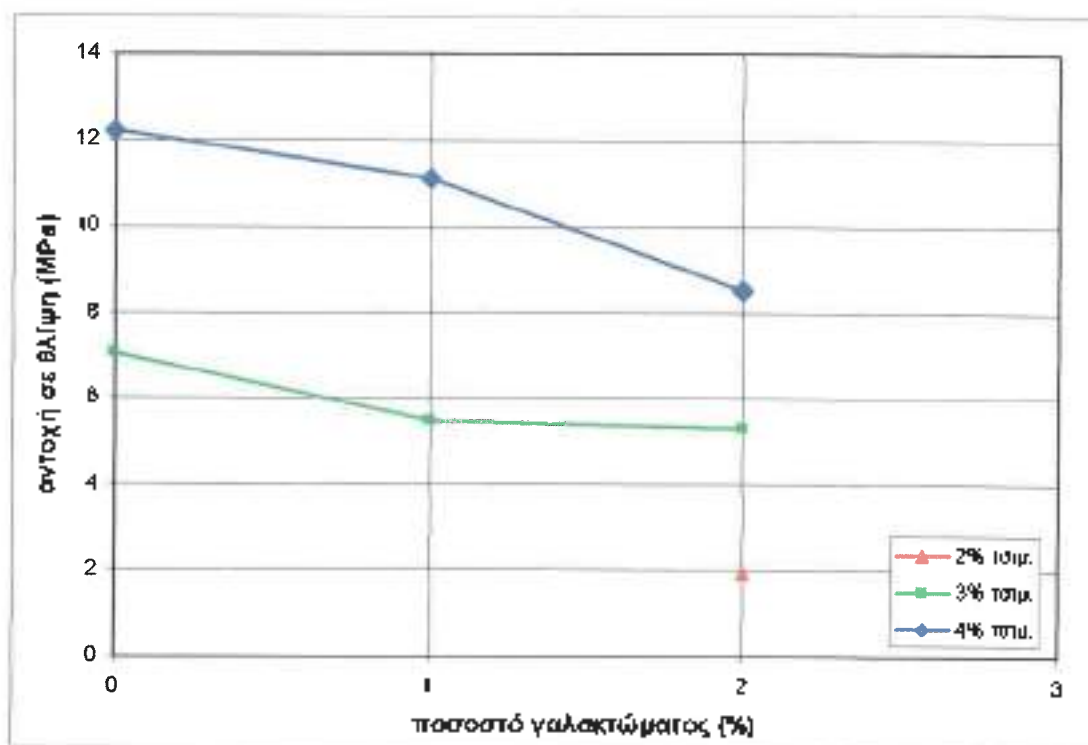
Σχήμα 7.9.1: Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα



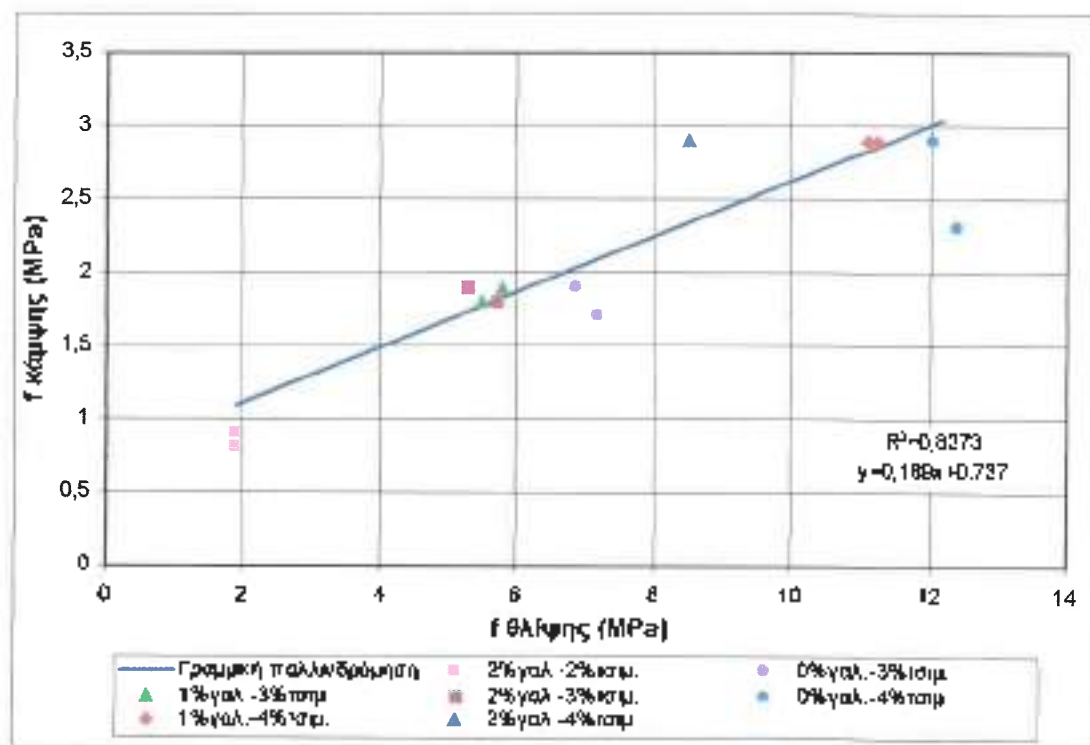
Σχήμα 7.9.2: Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του γαλακτώματος στο μίγμα



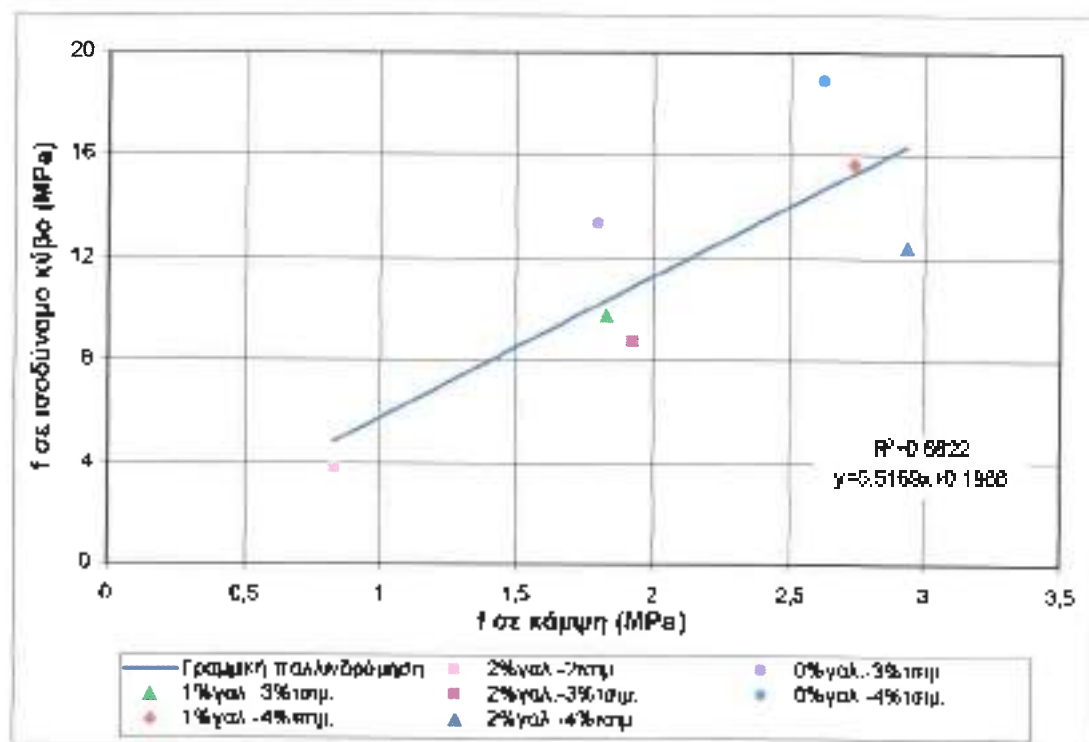
Σχήμα 7.9.3: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα



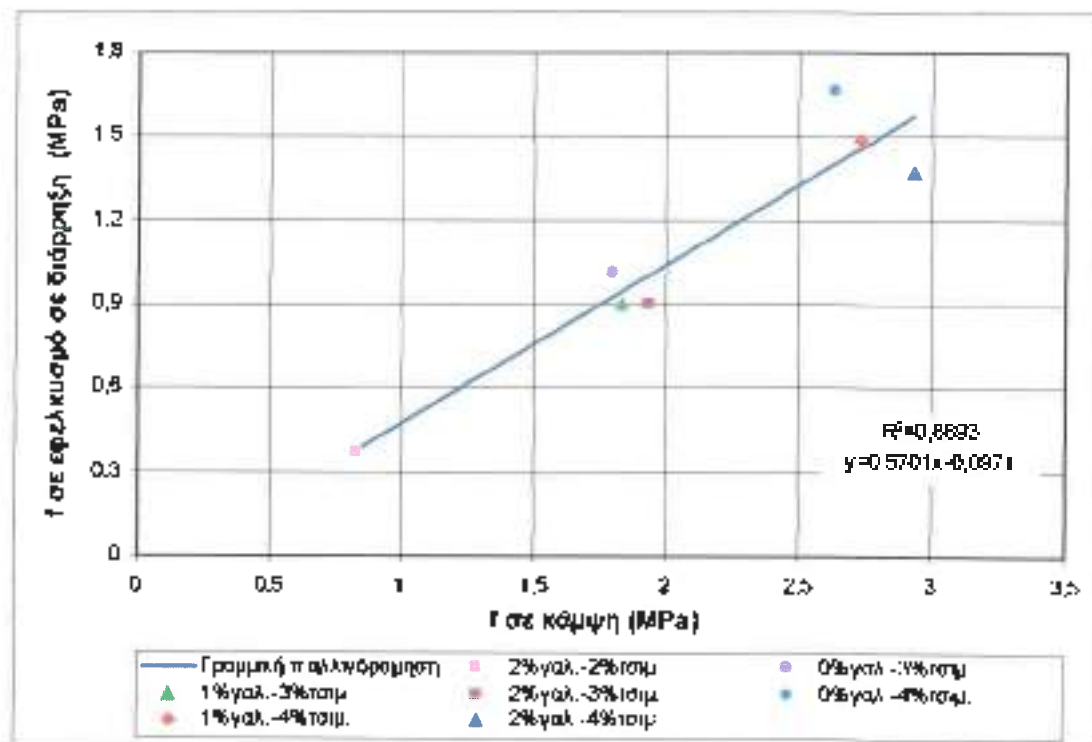
Σχήμα 7.9.4: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό των γαλακτοπρωτεϊνών στο μίγμα



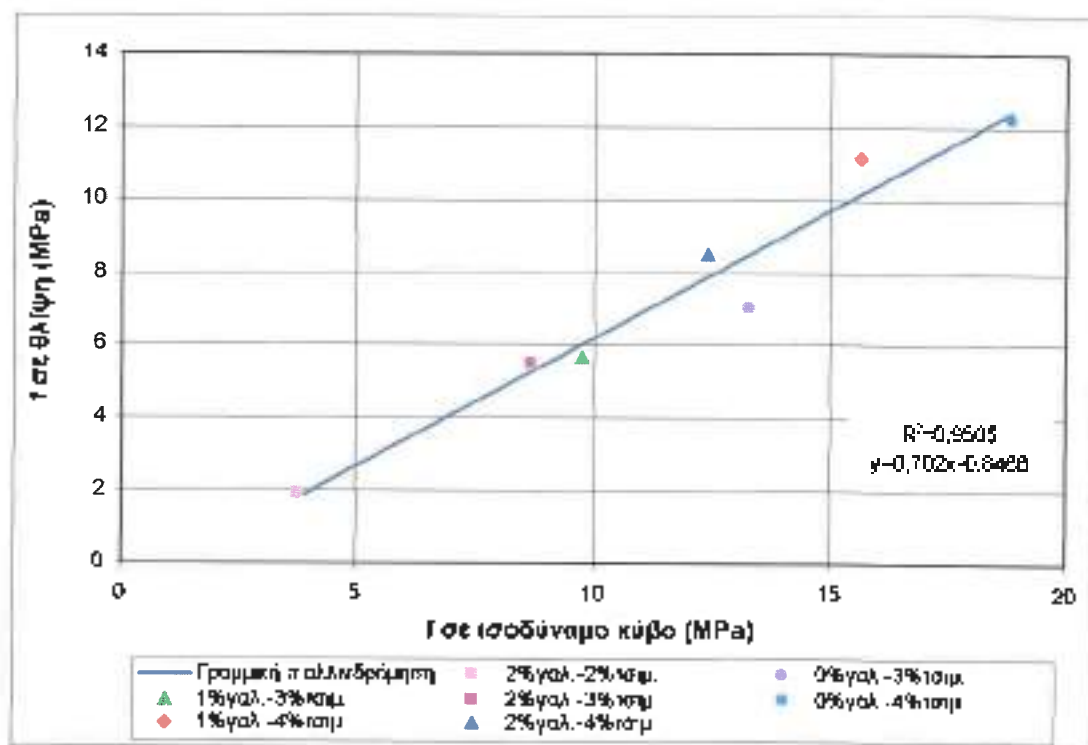
Σχήμα 7.9.5: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη για όλα τα μίγματα



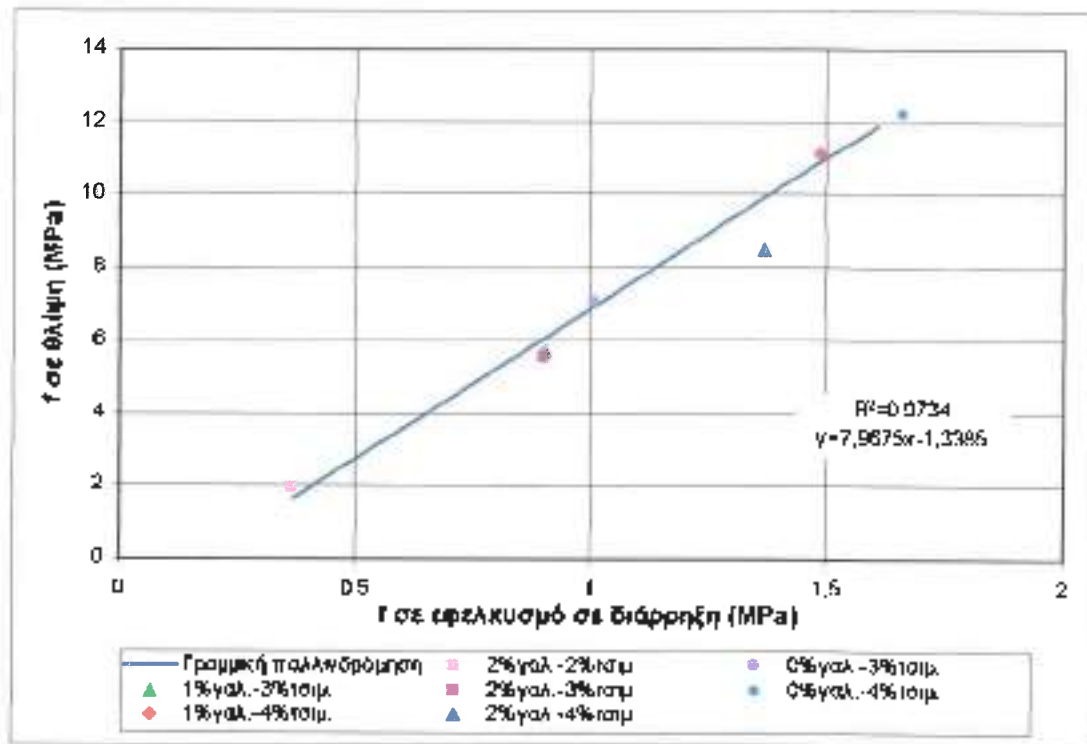
Σχήμα 7.9.6: Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με την αντοχή σε ισόδυναμο κύβο για όλα τα μίγματα



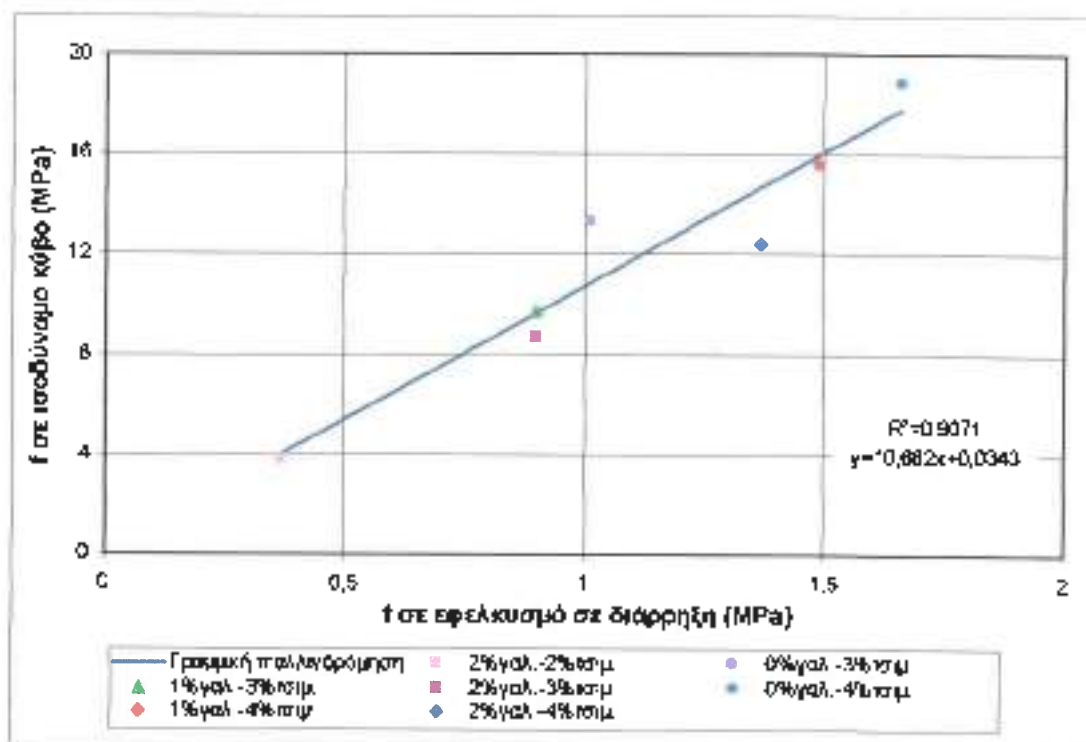
Σχήμα 7.9.7: Μεταβολή της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με την αντοχή σε εφελκυσμό σε διάρρηξη για όλα τα μίγματα



Σχήμα 7.9.8: Μεταβολή της αντοχής σε ισοδύναμο κύβο σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη για όλα τα μίγματα



Σχήμα 7.9.9: Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό σε διάρρηξη σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη για όλα τα μίγματα



Σχήμα 7.9.10: Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό σε διάρρηξη σε σχέση με την αντοχή σε ισοδύναμο κύβο για όλα τα μίγματα

7.10 Επιρρέπεια σε ρηγματώση

Έχει βρεθεί από μελέτες [3], ότι ο συντελεστής που δίνει την πτώση της θερμοκρασίας (ΔT) σε ένα υλικό είναι ανάλογος του λόγου αντοχή / μέτρο ελαστικότητας (E) του υλικού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, οι πτώσεις της θερμοκρασίας, ακόμη και όταν είναι μικρές, προκαλούν ρηγματώση του υλικού, ειδικά στα πρώτα στάδια της ζωής του. Επομένως, όταν σε ένα υλικό συμβαίνουν θερμοκρασιακές μειώσεις, αυτό γίνεται πιο επιρρεπές σε ρηγματώση. Όταν όμως μειώνεται η θερμοκρασία, τότε μειώνεται και ο λόγος $E/\Delta T$, και άρα όσο πιο μικρός είναι ο λόγος αυτός, τόσο πιο επιρρεπές σε ρηγματώση γίνεται το υλικό.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, σχολιάζοντας τα σχήματα 7.10.1 και 7.10.2 που δίνουν τη μεταβολή του λόγου $E/\Delta T$ σε κάμψη και θλίψη, σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου για κάθε μίγμα που περιέχει 0%, 1%, 2% γαλακτώμα, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρρέπεια σε ρηγματώση των υλικών.

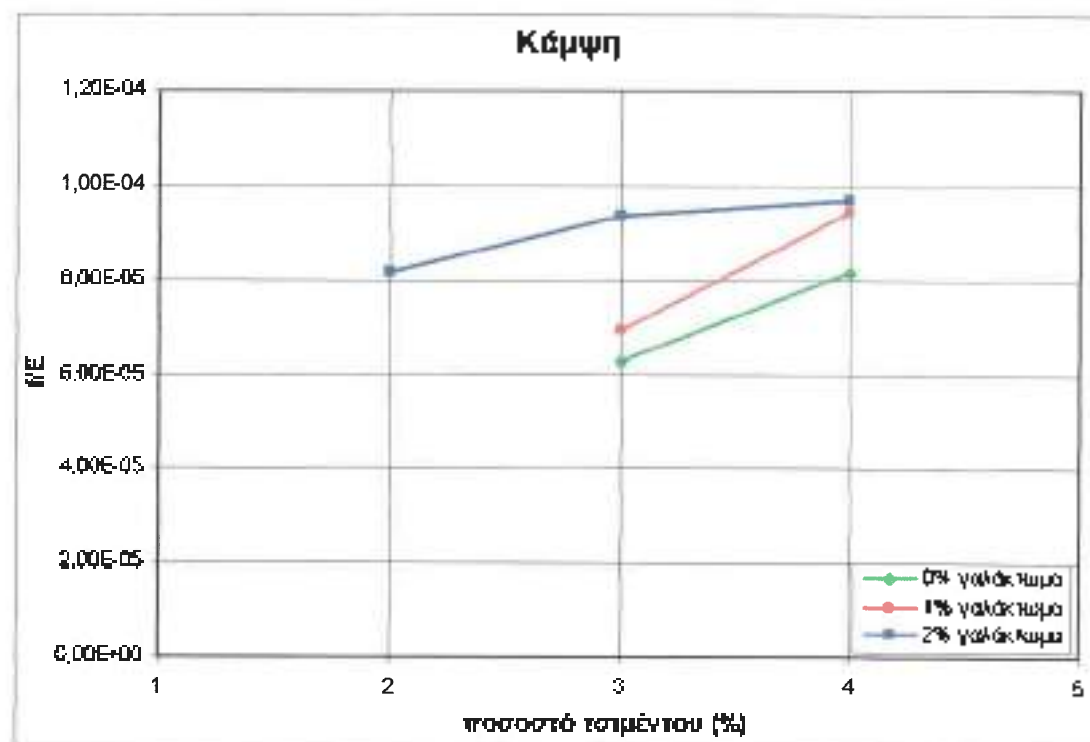
Στο σχήμα 7.10.1 φαίνεται η μεταβολή του λόγου $E/\Delta T$ σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου σε κάθε μίγμα. Είναι φανερό, ότι ο λόγος αυτός αυξάνεται όσο αυξάνεται το τσιμέντο, όπως επίσης αυξάνεται με την αύξηση του γαλακτώματος. Σε σχέση με τα ποσοστά του γαλακτώματος, φαίνεται ότι για 0% και 1% γαλακτώμα, ο λόγος $E/\Delta T$ αυξάνεται σημαντικά για αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 3% σε 4%, ενώ για 2% γαλακτώμα και σταδιακή αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου από 2% σε 3% και 4%, η αύξηση του $E/\Delta T$ είναι μικρότερη και πιο ήπια.

Στο σχήμα 7.10.2 φαίνεται η μεταβολή του λόγου $E/\Delta T$ σε θλίψη, σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου για κάθε μίγμα. Ο λόγος αυτός αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου, ενώ μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού γαλακτώματος, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με όσα συμβαίνουν στην κάμψη.

Γενικά η αντοχή σε θλίψη δεν είναι αντιπροσωπευτική της επιρρέπειας σε ρηγματώση των υλικών, σε αντίθεση με την αντοχή σε κάμψη, ή ακόμα και την αντοχή σε εφελκυσμό. Επομένως, το συμπέρασμα που θα μπορούσε να εξαχθεί από τα στοιχεία της κάμψης, είναι ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του τσιμέντου, μειώνεται η επιρρέπεια σε ρηγματώση των υλικών, αφού αυξάνεται ο λόγος $E/\Delta T$, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση του γαλακτώματος (πυκνότητα αυτού σε μικρά ποσοστά).

Πίνακας 7.10.1: Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη και λόγος f/E για όλα τα μίγματα

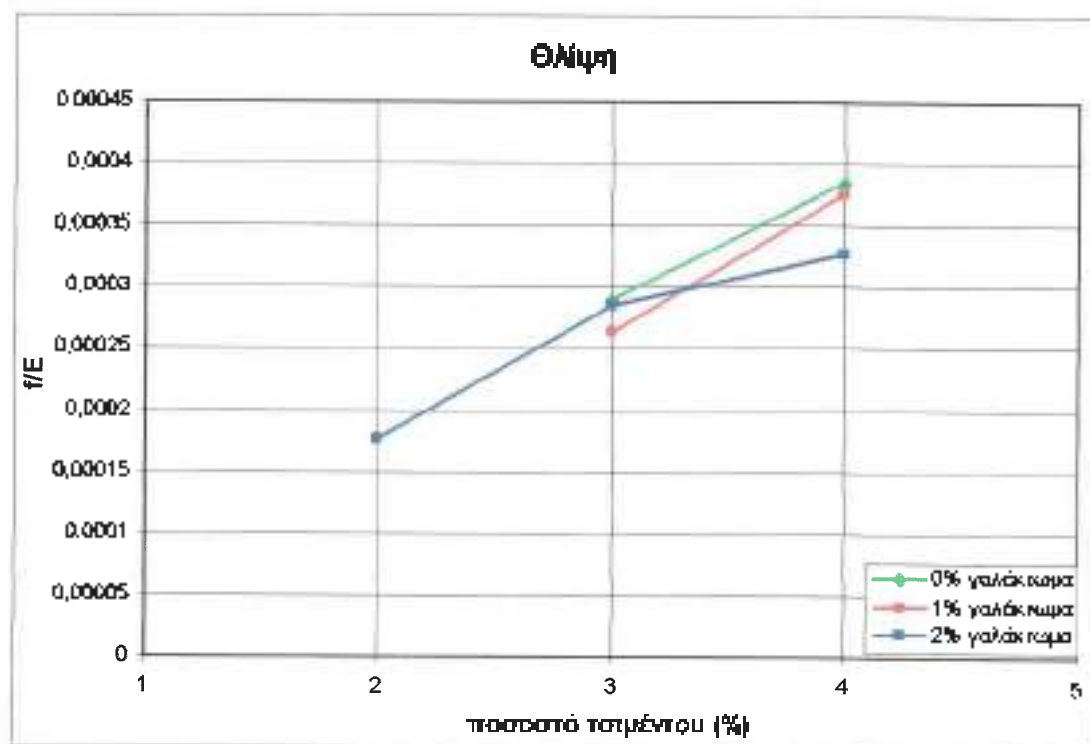
σ/α μίσμα	γαλάντωμα (%)	ισιμέντο (%)	$f_{καμψ}$ (MPa)	$E_{καμψ}$ (MPa)	f/E
1	2	2	0,83	10200	8,14E-05
2	1	3	1,83	26500	6,91E-05
3	0	3	1,8	28700	6,27E-05
4	0	4	2,63	32300	8,14E-05
5	2	3	1,83	20700	9,32E-05
6	1	4	2,73	29000	9,41E-05
7	2	4	2,93	30300	9,67E-05



Σχήμα 7.10.1: Μεταβολή του λόγου f/E σε κάμψη σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα

Πίνακας 7.10.2: Αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη και λόγος f/E για όλα τα μίγματα

α/α μίσμα	γαλάκτωμα (%)	τσιμέντιο (%)	$f_{θλ.μξ}$ (MPa)	$E_{θλ.μξ}$ (MPa)	f/E
1	2	2	1,9	10800	1,76E-04
2	1	3	5,85	21500	2,63E-04
3	0	3	7,05	24300	2,90E-04
4	0	4	12,22	31800	3,84E-04
5	2	3	5,5	19300	2,85E-04
6	1	4	11,18	29800	3,74E-04
7	2	4	8,5	26000	3,27E-04



Σχήμα 7.10.2: Μεταβολή του λόγου f/E σε θλίψη σε σχέση με το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα γενικά συμπεράσματα από την έρευνα συνοψίζονται ως εξής:

- Η αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στο μίγμα επιφέρει σημαντική αύξηση στα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη, και πολύ μεγάλη αύξηση στις αντίστοιχες αντοχές. Στην ίδια περίπτωση, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα μέγιστα βέλη κάμψης των μεγμάτων (αμελητέα αύξηση αυτών), ενώ αυξάνονται οι μέγιστες παραμορφώσεις, όπως αυτές προέκυψαν από τη δοκιμή θλίψης.
- Η αύξηση του ποσοστού του ασφαλικού γαλακτώματος στο μίγμα επιφέρει μικρή μείωση στα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη και θλίψη. Στην ίδια περίπτωση, η αντοχή σε κάμψη παρουσιάζεται σχεδόν σταθερή (με αμελητέα αύξηση), ενώ η αντοχή σε θλίψη παρουσιάζει ελαχίστη μείωση. Παρατηρείται, επίσης, μικρή αύξηση των μέγιστων βελών κάμψης.
- Γενικά, τα μέτρα ελαστικότητας σε κάμψη είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα σε θλίψη, ενώ οι αντοχές σε θλίψη προέκυψαν πολύ μεγαλύτερες των αντίστοιχων σε κάμψη.
- Για το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, δεν παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις αυτού ανάμεσα στη φόρτιση και στην αποφόρτιση, για τον ίδιο κύκλο, και χρησιμοποιήθηκε αυτό που προέκυψε από τους κύκλους φόρτισης.
- Παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις στις τιμές του E_{dyn} ανάμεσα στους κύκλους της ίδιας ομάδας, οι οποίες δεν είναι σταθερές, και μεγαλύτερη διασπορά διαπιστώθηκε στην πρώτη ομάδα (κύκλοι 0 έως 4).

Το E_{dyn} μεταβάλλεται ανάμεσα στις ομάδες κύκλων, είτε αυξητικά είτε μειωτικά για το ίδιο δοκίμιο, με πιο σταθεροποιητικές τιμές ενήμεσα στις δύο τελευταίες ομάδες (κύκλοι 47 έως 51 και 94 έως 99).

Οι μεταβολές του E_{dyn} κατά τη διάρκεια της δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης, δεν παρουσιάζουν συσχέτιση ανάμεσα στα μίγματα, οφείλονται σε πειραματικές ανακρίβειες, και από αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη διακύμανση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το υλικό κατασκευής.

- Κατά την επαναλαμβανόμενη φόρτιση παρατηρήθηκε, για μικρό αριθμό δοκιμών, μια προϊούσα αύξηση των παραμενισών παραμορφώσεων κατά τους πρώτους κύκλους και μετά μείωση και σταθεροποίηση αυτών.
- Γενικά, προέκυψε ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από το στατικό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη.
- Παρατηρήθηκε καλός συσχετισμός μεταξύ των αντοχών των διαφόρων δοκιμών (κάμψη, Ολίσθη, ισοδύναμος κύβος, αντιδιαμετρική θλίψη), παρά το εύρος των διαφορετικών ποσοστών των συνδετικών υλικών (τσιμέντο, γαλακτώμα), στα μίγματα που εξετάστηκαν. Οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης (R^2) που λήφθηκαν ήταν από 0,82 ως 0,97 και μειωμένος R^2 (0,66) παρατηρήθηκε μόνο στη συσχέτιση αντοχής σε κάμψη με αντοχή σε ισοδύναμο κύβο.
- Ο λόγος $E_{\text{κάμψη}}/E_{\text{κύβος}}$ που είναι παράγοντας που επηρεάζει την επηρεασιμότητα σε ρηγμάτωση, διαπιστώθηκε ότι αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου στο μίγμα, και συνεπώς μειώνεται η επηρεασιμότητα σε ρηγμάτωση του υλικού, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση του ποσοστού του γαλακτώματος. Σε κάθε περίπτωση απαιτούνται περισσότερες δοκιμές για να δοθούν αξιόπιστα συμπεράσματα.

Προτείνεται για τη συνέχεια, η βελτίωση του συστήματος καταγραφής του βέλους κάμψης στη δοκιμή κάμψης, και κυρίως η βελτίωση της γέφυρας στήριξης των μηχανοσυστημάτων. Η κατεργασία θραυστών αδρανών υλικών με συνδυασμό τσιμεντού και μικρών, σχετικά ποσοτήτων ασφαλτικού γαλακτώματος δημιουργεί υλικά με ιδιότητες οι οποίες πιστεύεται ότι πρέπει να μελετηθούν λεπτομερέστερα σε ένα μεγαλύτερο εύρος σταθεροποιητών (τσιμέντου, γαλακτώματος) και με διερεύνηση της επιρροής της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της θερμοκρασίας.

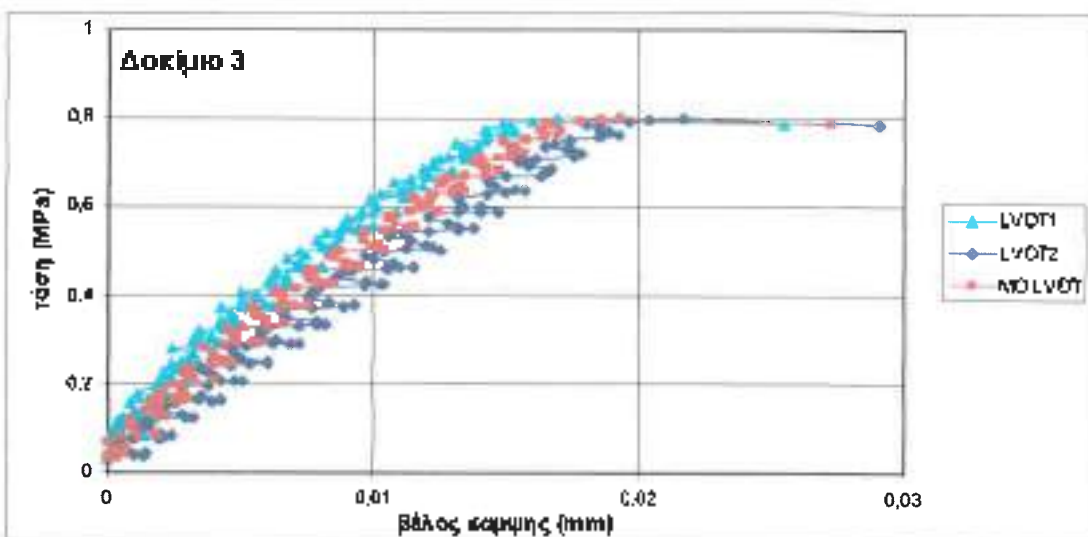
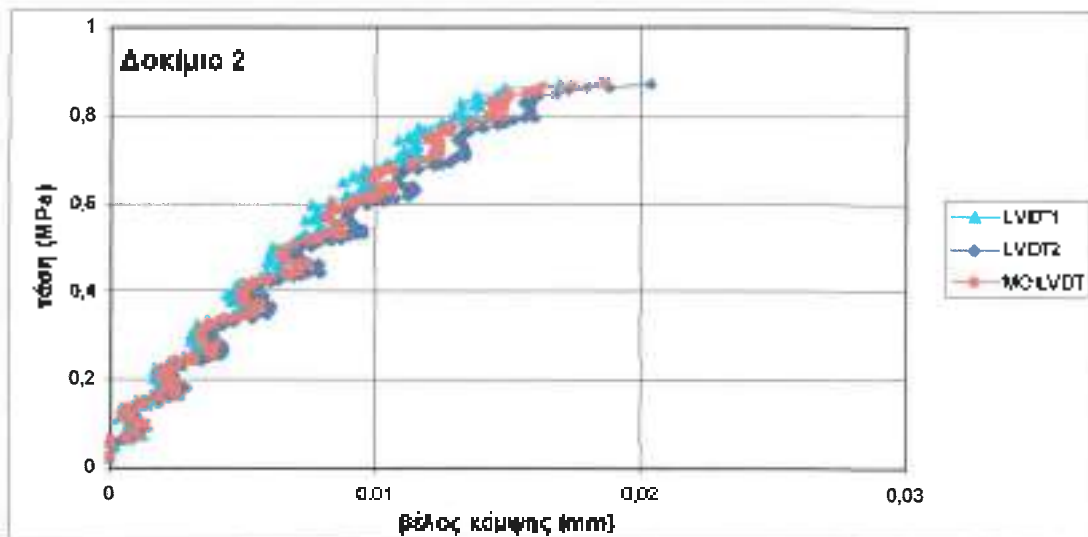
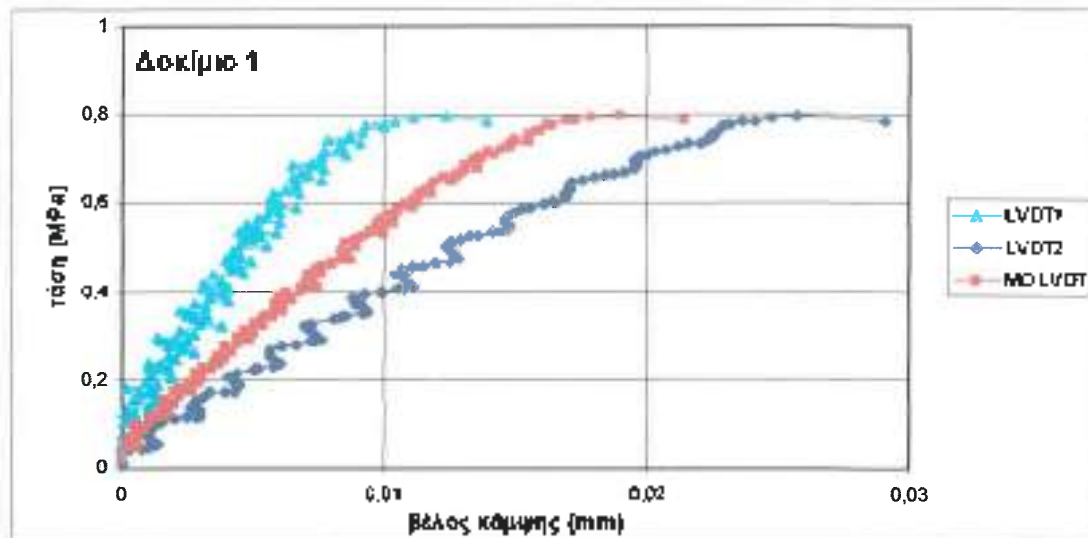
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. S. Kolias, The performance of pavements incorporating layers of hydraulically bound granular materials of low strength., Induced cracking of cement - bound bases, International workshop, Vienna, Febr. 3, 2000
2. G. D. Taylor and R. I. T. Williams, Restrained thermal contraction in lean concrete roadbases. , Highways & Public Works, July 1981
3. R. I. T. Williams, Cement treated pavements, Elsevier applied science publishers, 1986.
4. Αθ. Φ. Νικολαΐδης , Οδοποιία – Οδοστρώματα Υλικά Έλεγχος ποιότητας , 1996
5. ΠΠΠ Α 202 , Ασφαλτικά αλκαλικά γαλακτωματα (Ψυχραί ασφάλτοι) , ΥΠΕΧΩΔΕ.
6. ΠΠΠ Α 203 , Ασφαλτικά όξινα γαλακτωματα (Αντιοξείδωτου τύπου) , ΥΠΕΧΩΔΕ.
7. Σ. Κόλιας , Α. Αντωνίου , Μ. Κατσάκου , Μηχανικά χαρακτηριστικά κατεργασμένων με τσιμέντο μιγμάτων σιμσχαλικού και φρεζαρισμένου ασφαλτομίγματος, 3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικά μίγματα και οδοστρώματα, Θεσσαλονίκη, 21-22 Νοεμβρίου 2002
8. C. Avram et. al. , Concrete strength and strains, Elsevier, 1981
9. A. Neville Properties of Concrete, Longman 1995.
10. Σημειώσεις οδοστρώματων, Σ. Κόλιας-Α. Λοΐζος, Αθήνα 1999.
11. S. Kolias and R. I. T. Williams, Cement-bound road materials: strength and elastic properties measured in the laboratory, Transport and Road Research Laboratory, department of environment, department of transport, supplementary report 344, Crowthorne-Berkshire 1978.
12. ASTM C 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
13. ASTM C 78, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third – point loading).
14. ASTM C 496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.

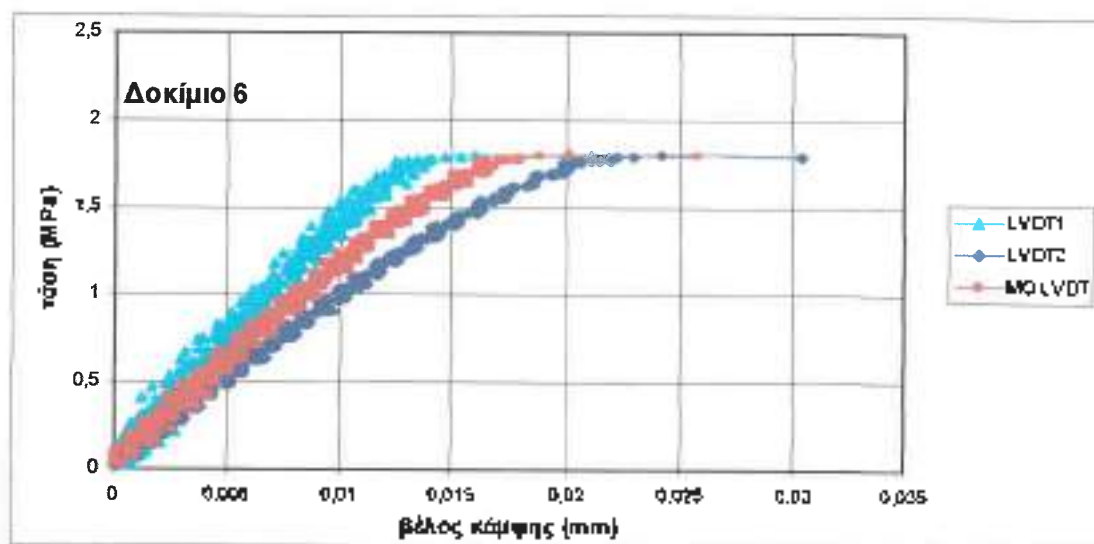
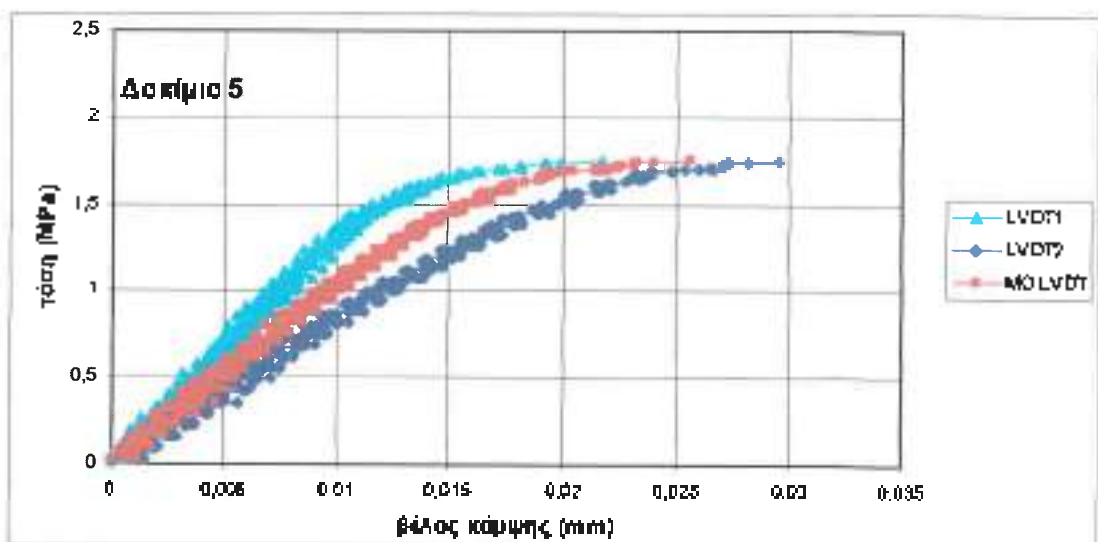
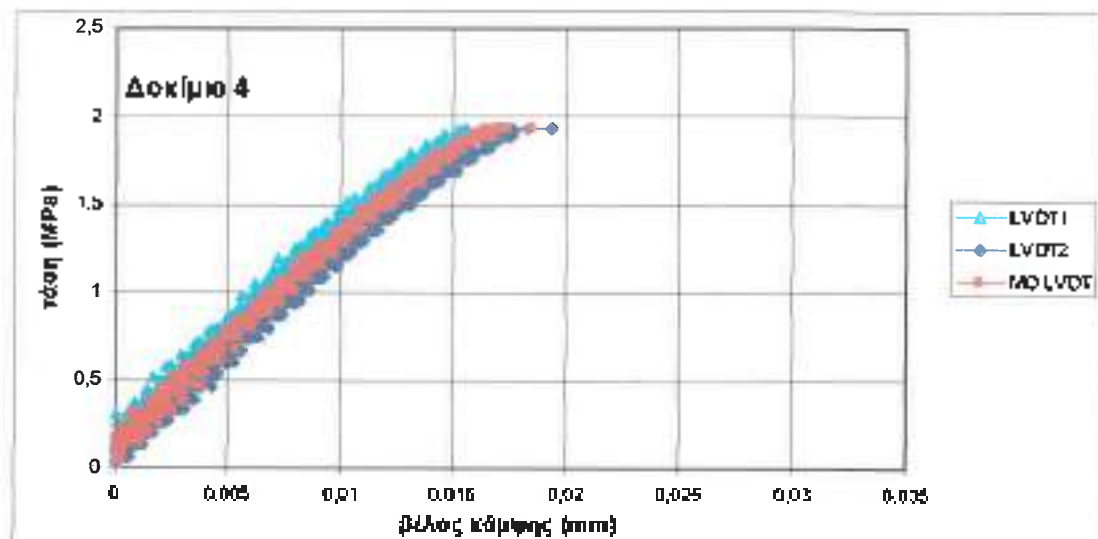
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Α

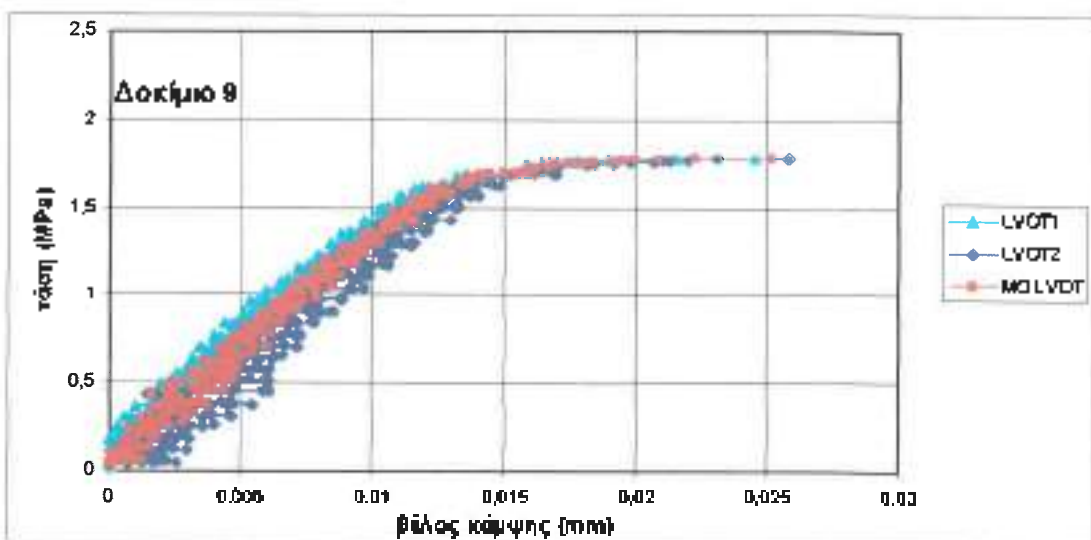
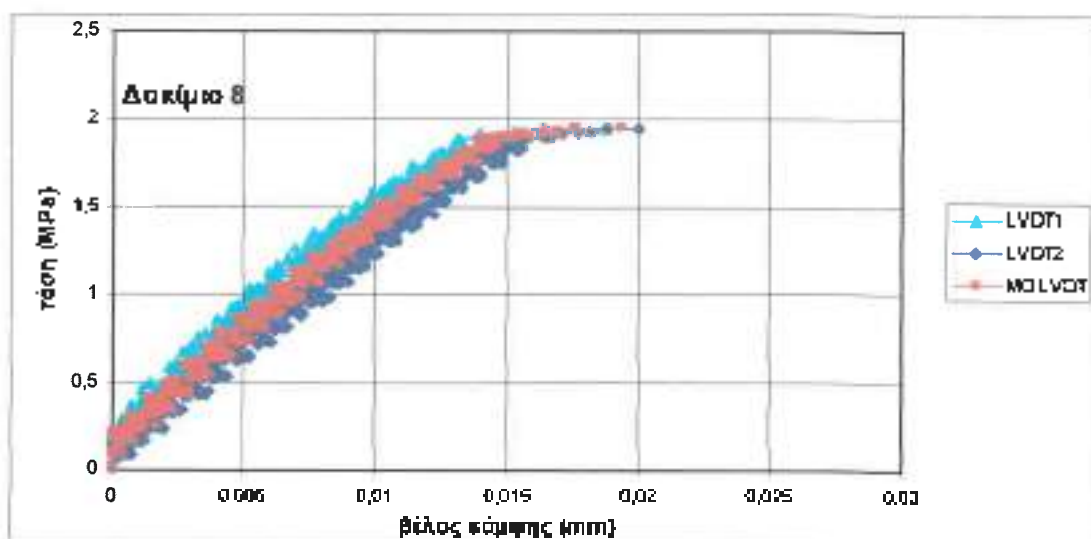
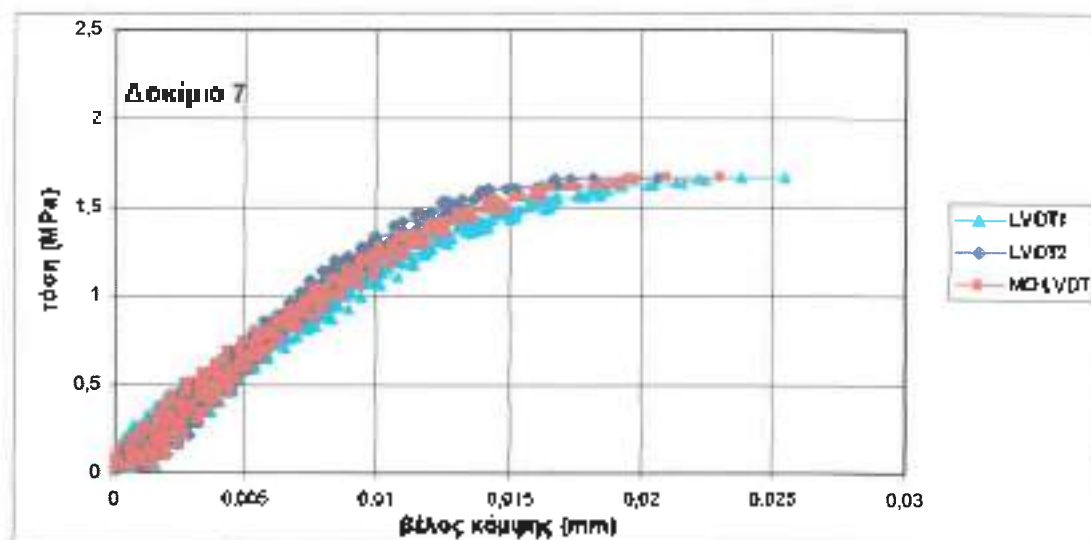
Στο παράρτημα αυτό, παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης - βέλους κάμψης για κάθε μίγμα (3 δοκίμια σε κάθε μίγμα), που προήρθαν από τη δοκιμή κάμψης. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανομέτρου (LVDT), καθώς και ο μέσος όρος αυτών.



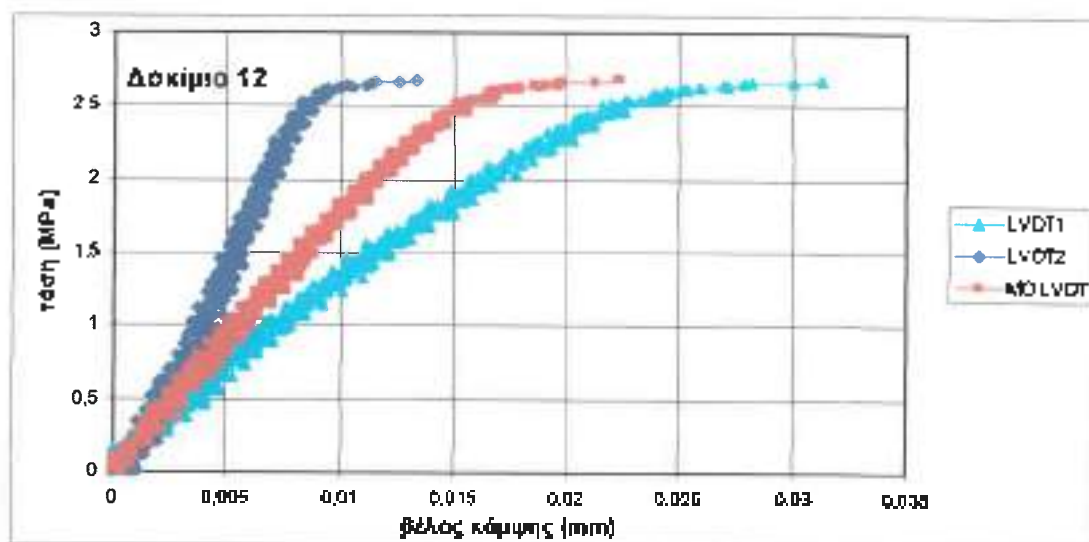
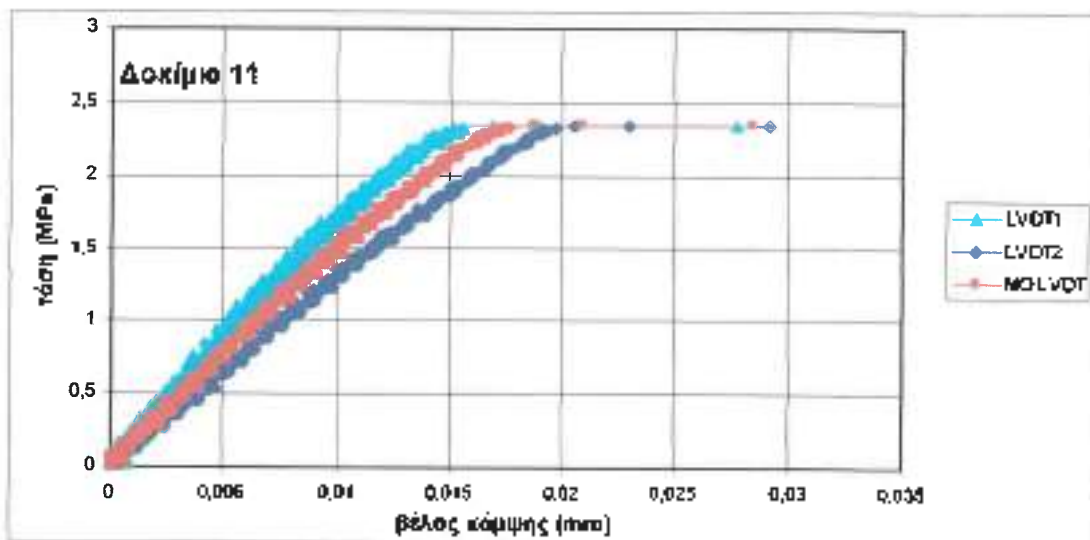
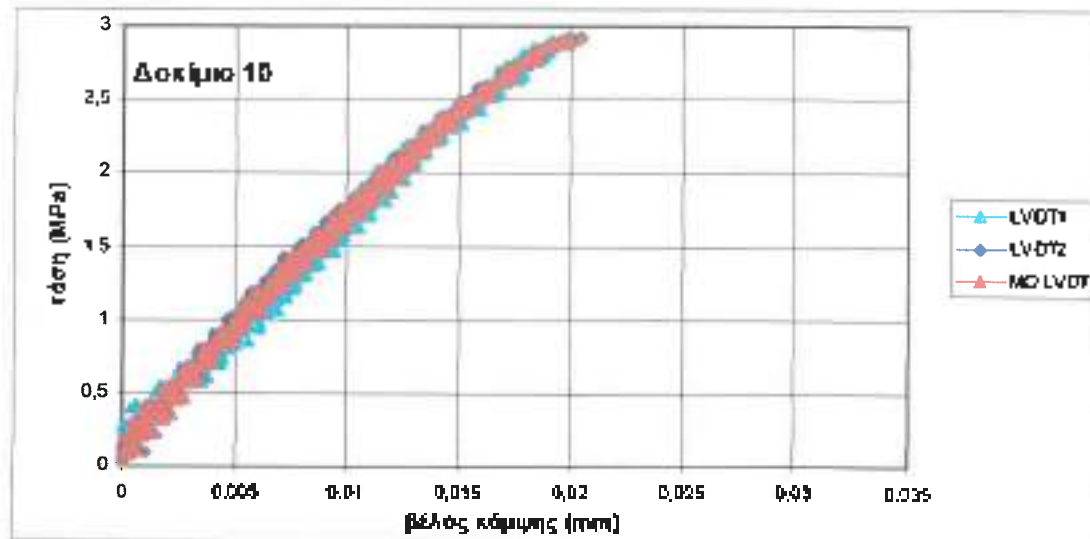
Σχήμα Α-1: Τάση – βέλος κάμψης για το μήγμα 2% γαλάκτωμα – 2% τσιμεντίο
Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοσυνδέστρου, καθώς και ο μέσος όρος τους



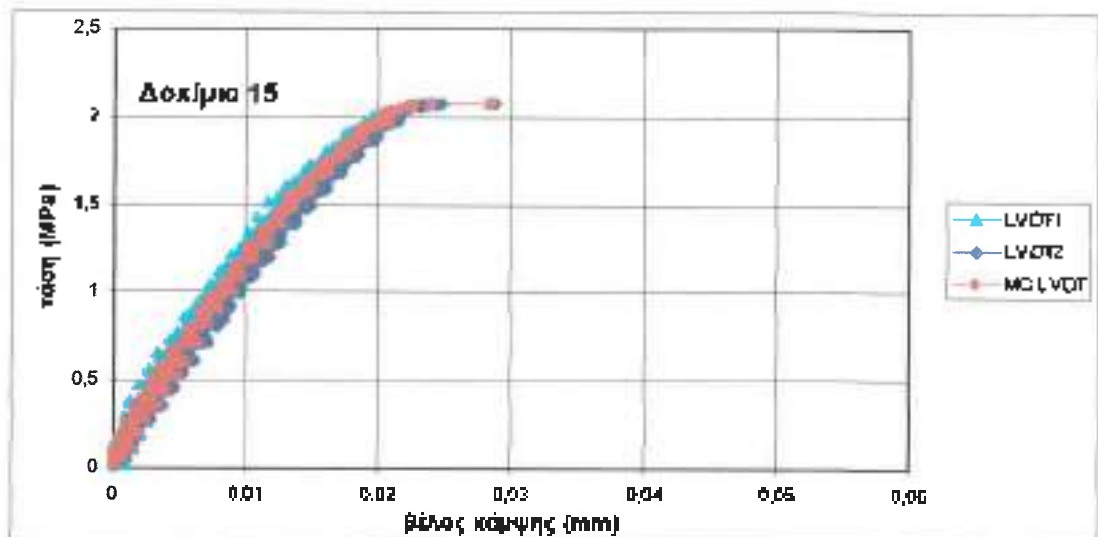
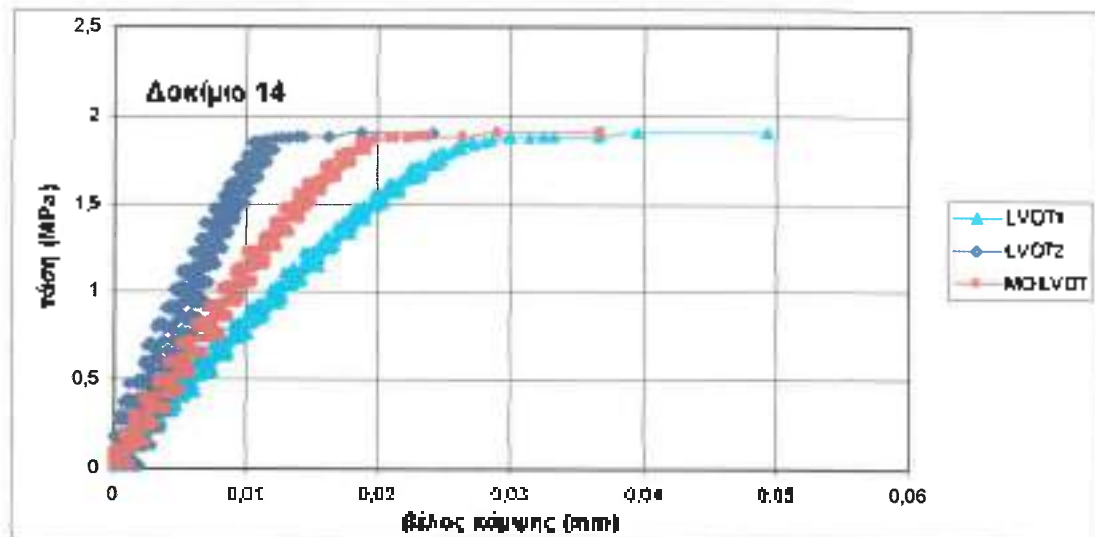
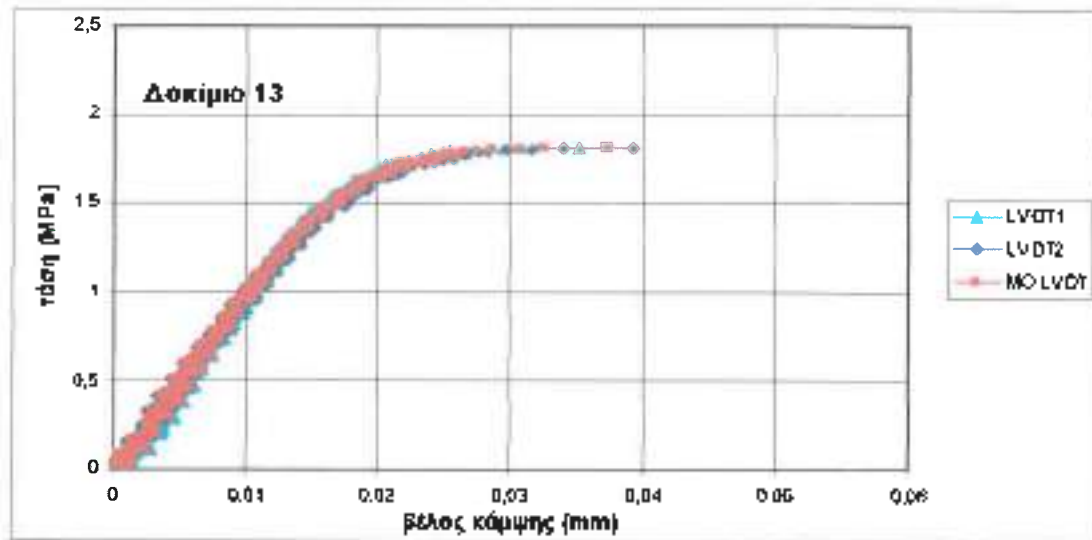
Σχήμα Α-2: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 1% γαλάκτιομα – 3% τσιμέντου. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοσυστήματος, καθώς και ο μέσος όρος τους.



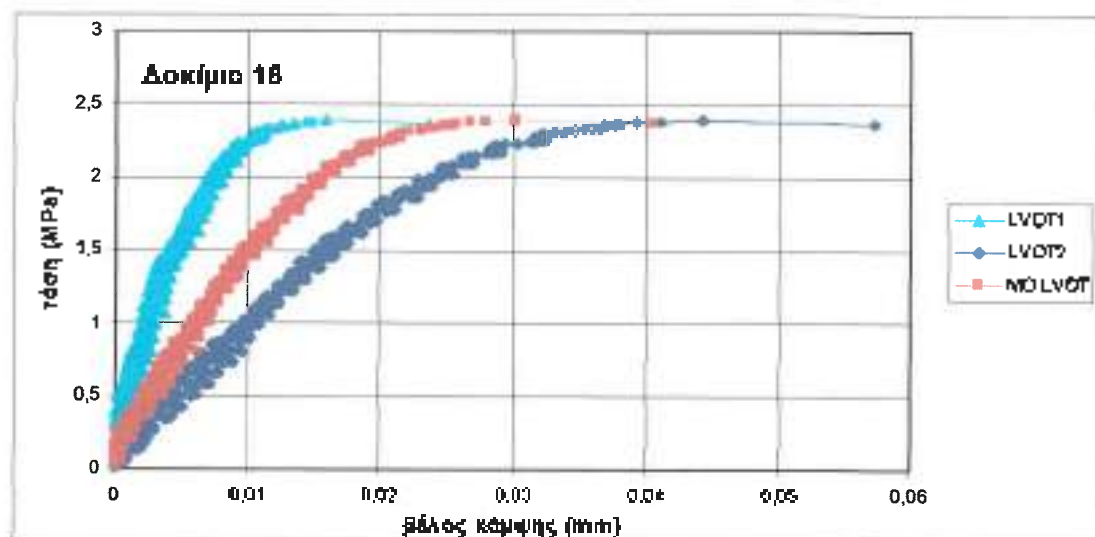
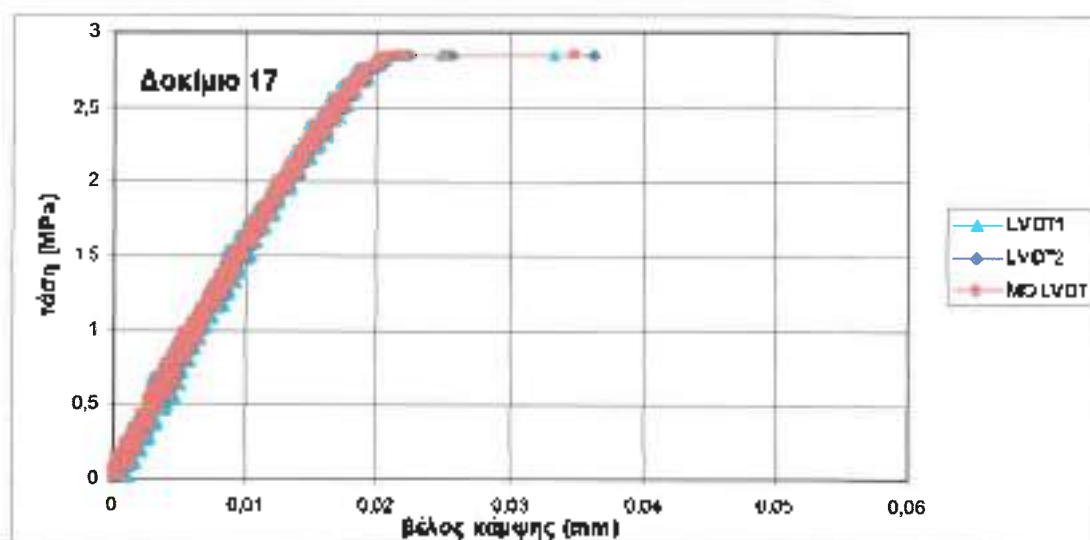
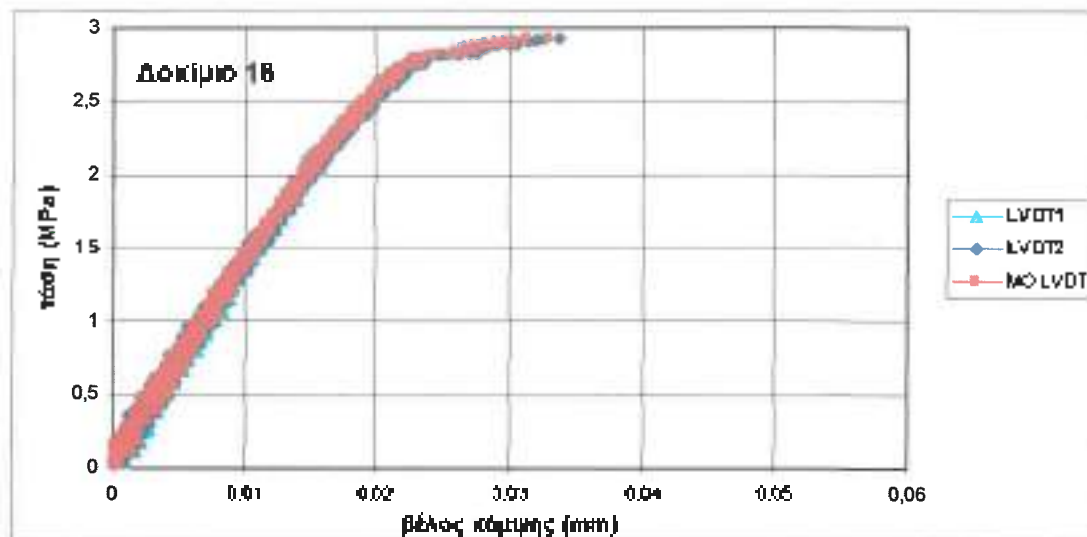
Σχήμα Α-3: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 0% γυαλόκτομα – 3% τσιμέντο
Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστομίου, καθώς και ο μέσος όρος τους



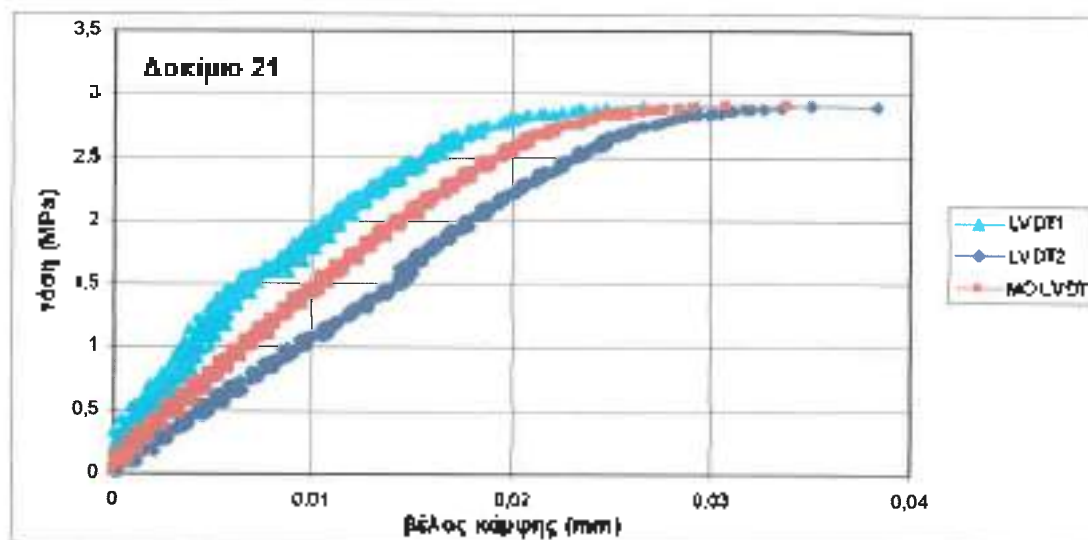
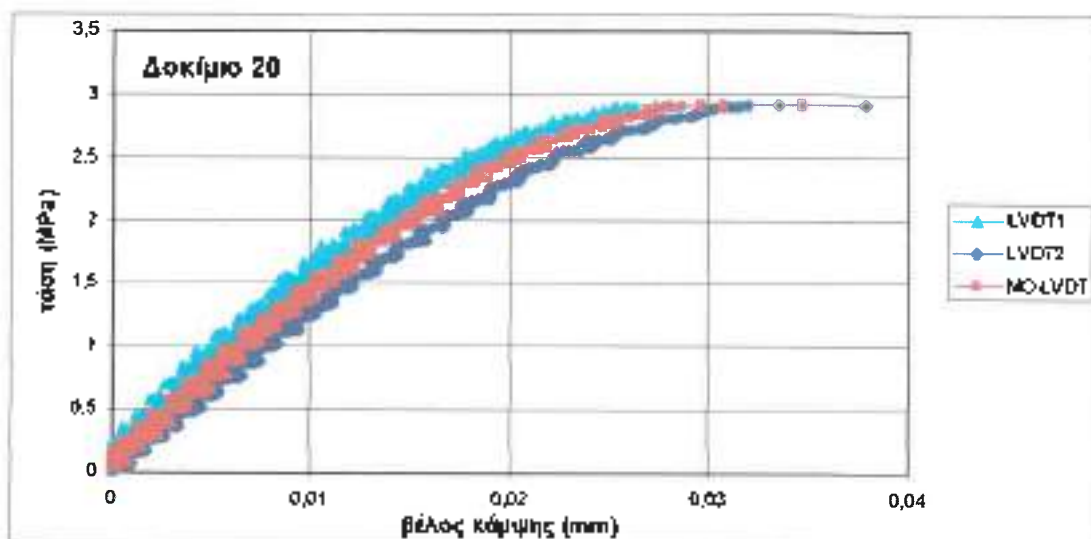
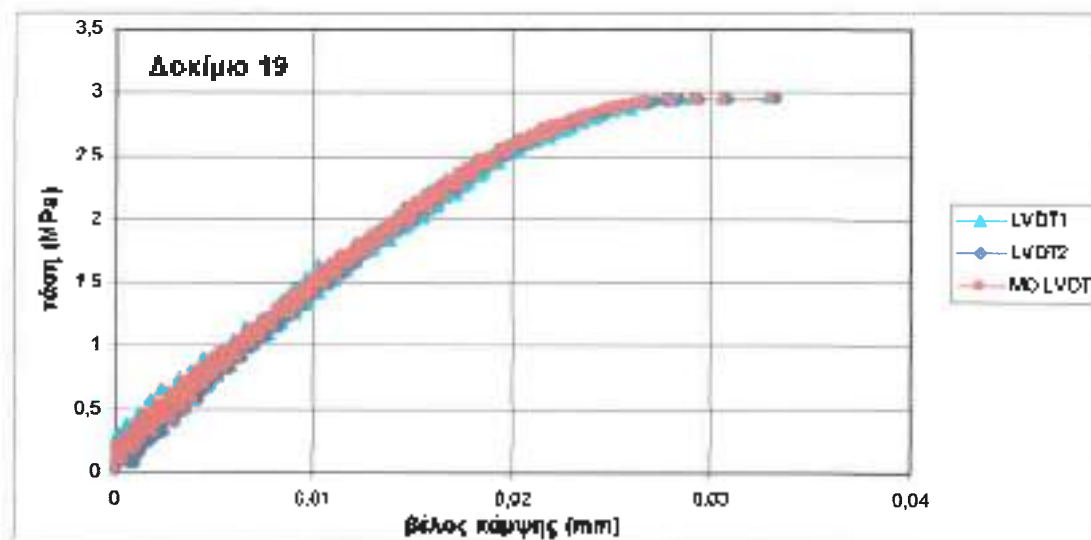
Σχήμα Α-4: Τάση – βέλος κάμψης για το μέγμα 0% γάλακτος – 4% τσιμέντου. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστοιχείου, καθώς και ο μέσος όρος τους.



Σχήμα Α-5: Τάση – βέλος κάμψης για τη μίγμα 2% γυαλάκτωμα – 3% τσιμέντο
Παραρτηούνται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστοιχείου, καθώς και ο μέσος όρος τους



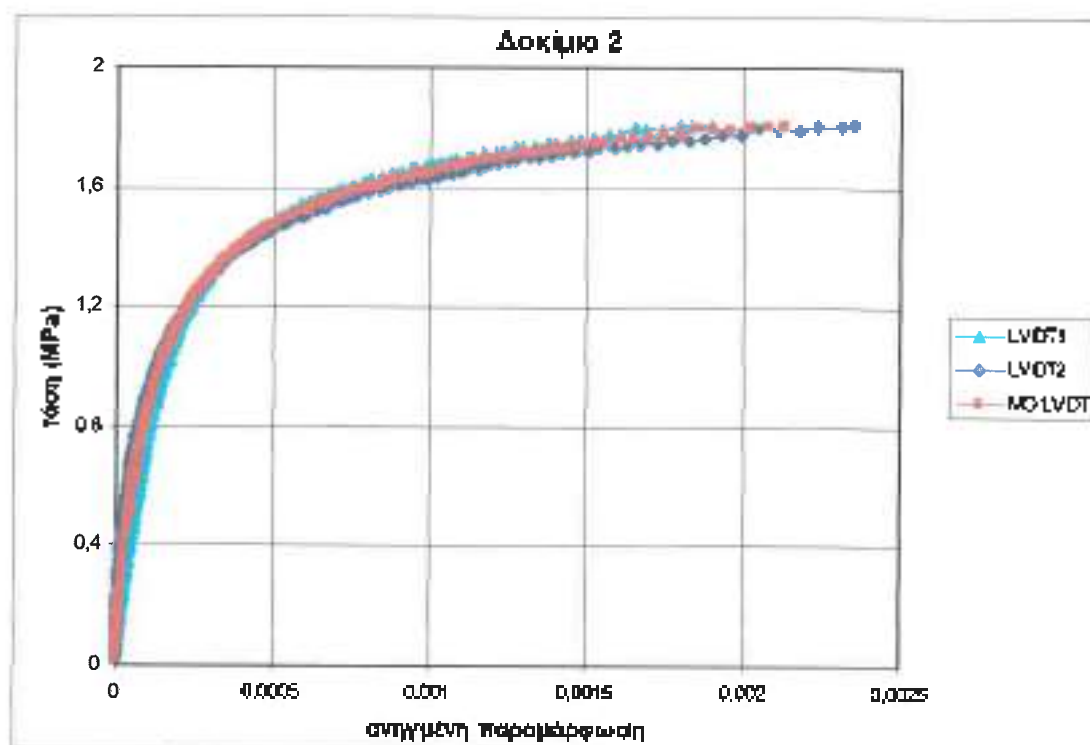
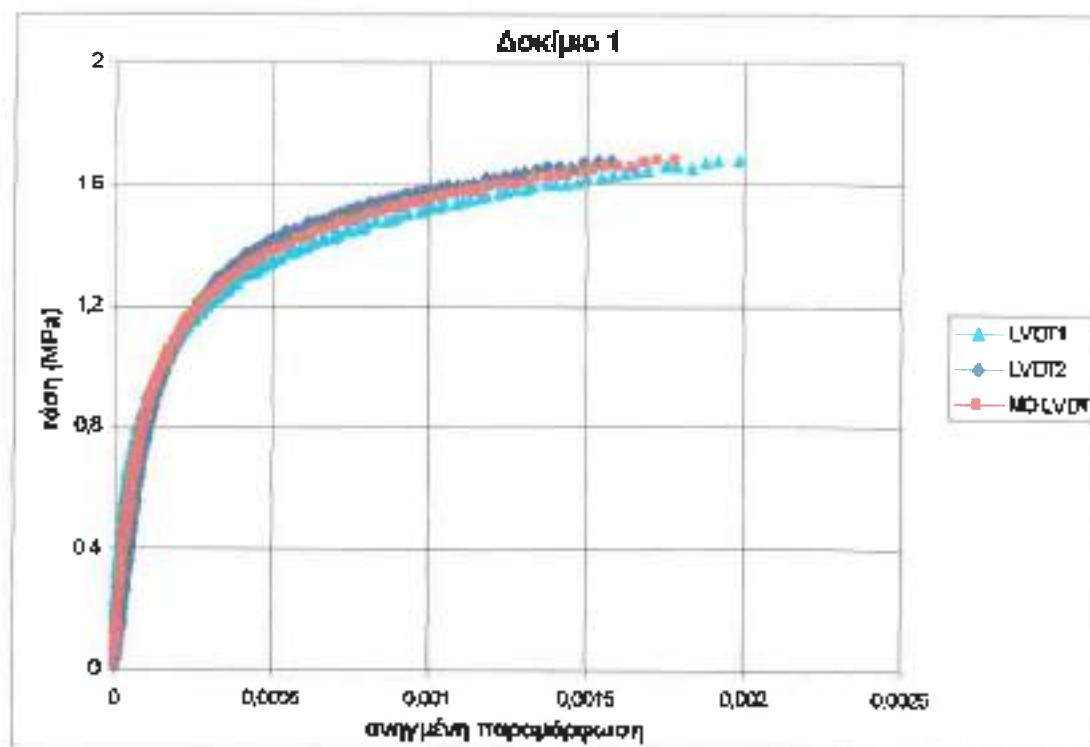
Σχήμα Α-6: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 1% γαλάκτωμα – 4% τσιμεντο
Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανογράφησης, καθώς και ο μέσος όρος τους



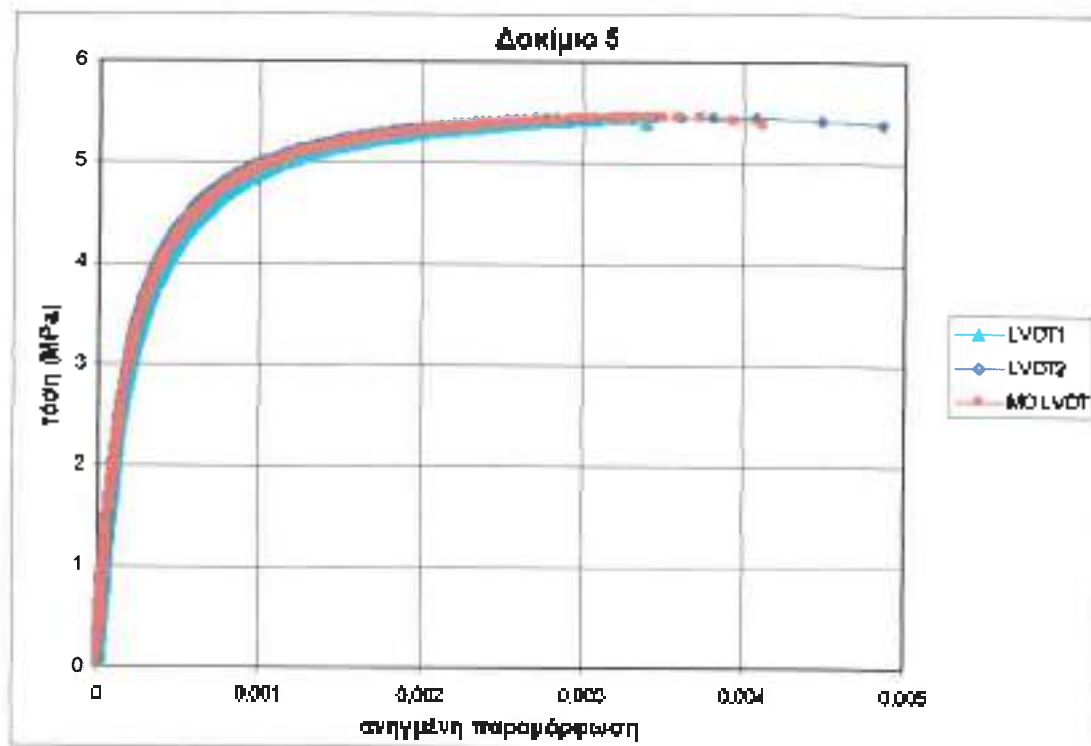
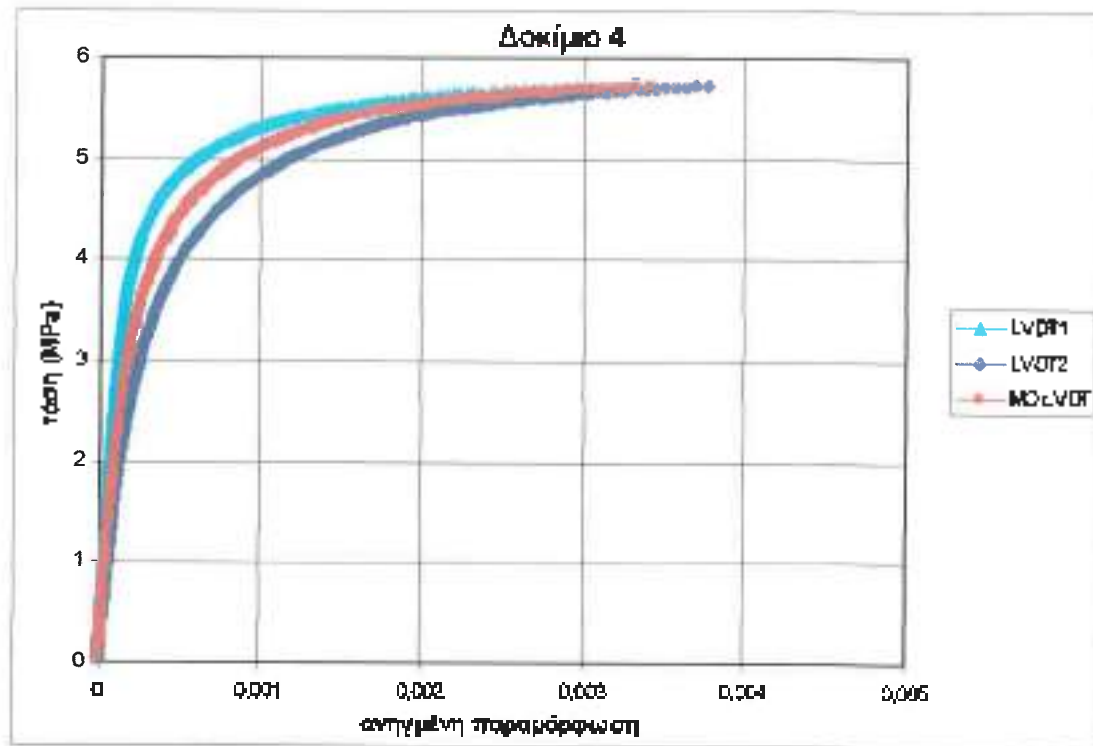
Σχήμα Α-7: Τάση – βέλος κάμψης για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο
Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστοιχείου, καθώς και ο μέσος όρος τους

Παράρτημα Β

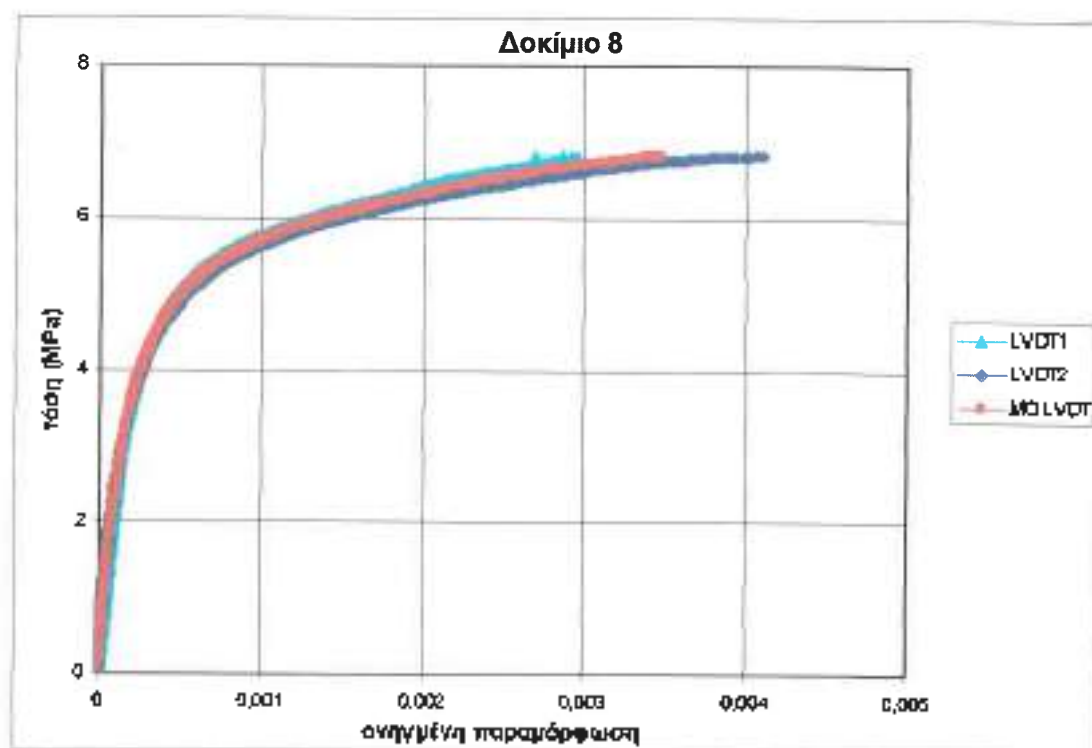
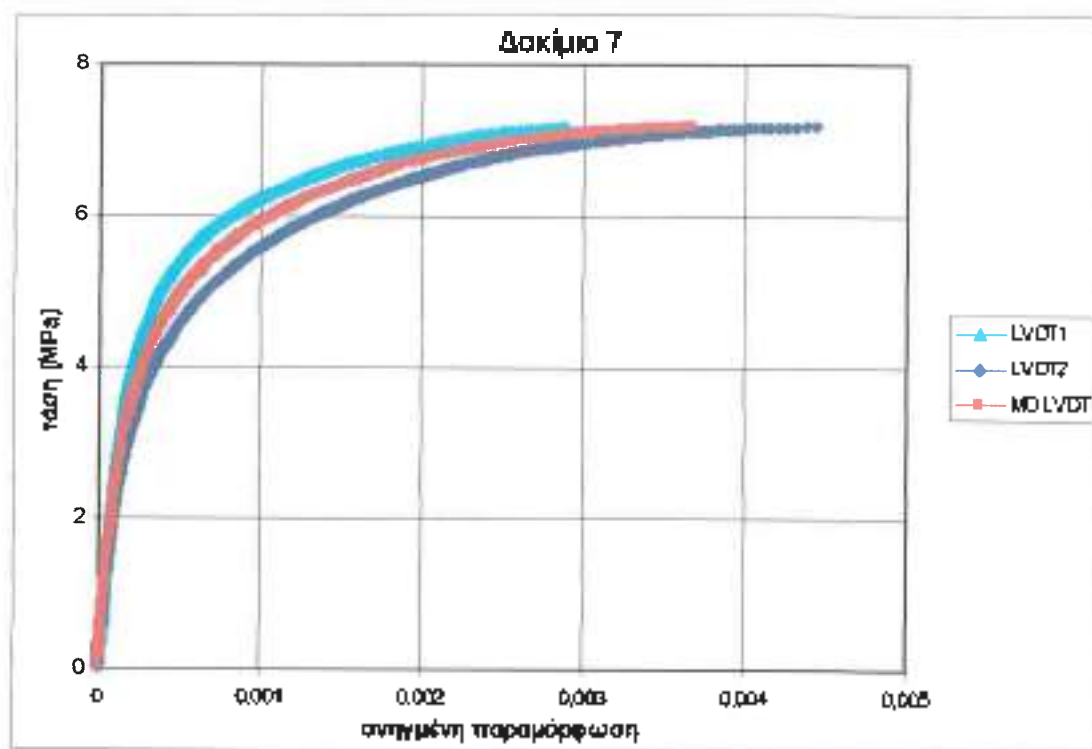
Στο παράρτημα αυτό, παρατίθενται τα διαγράμματα πίεσης – ανηγμένης παραμόρφωσης (ε), για κάθε μίγμα (2 δοκίμια από κάθε μίγμα), που προήρθαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανομέτρου (LVDT), καθώς και ο μέσος όρος αυτών.



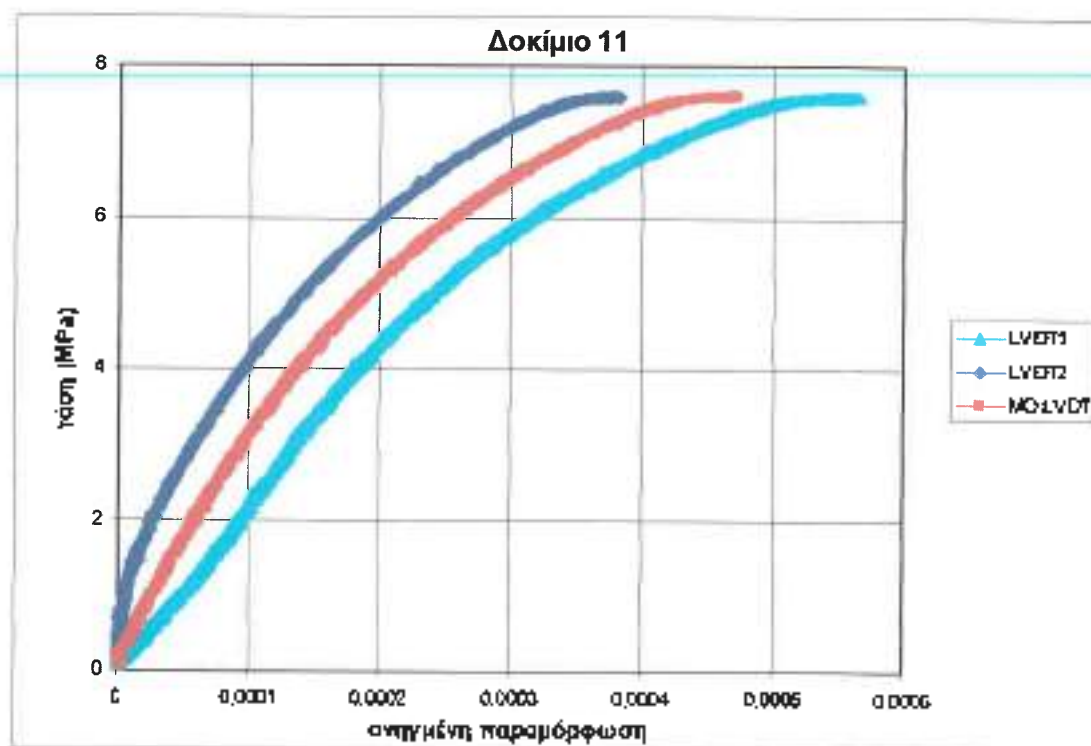
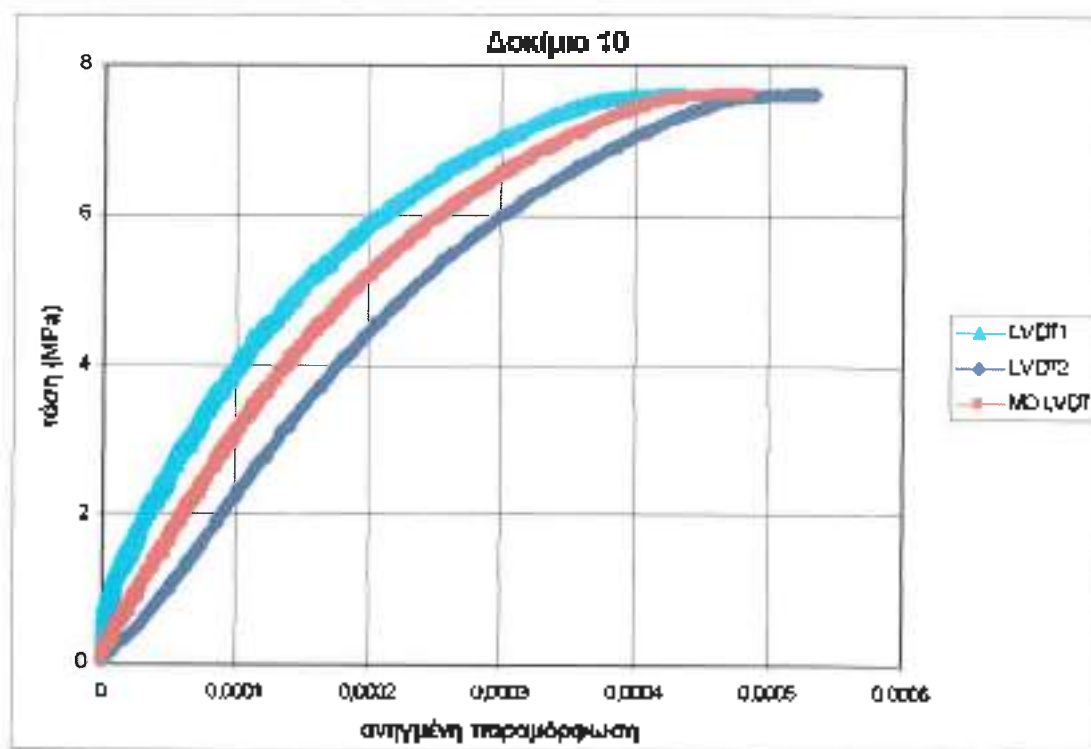
Σχήμα Β-1: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 2% τσιμέντο. Παρατηρούνται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστομίου, καθώς και ο μέσος όρος τους



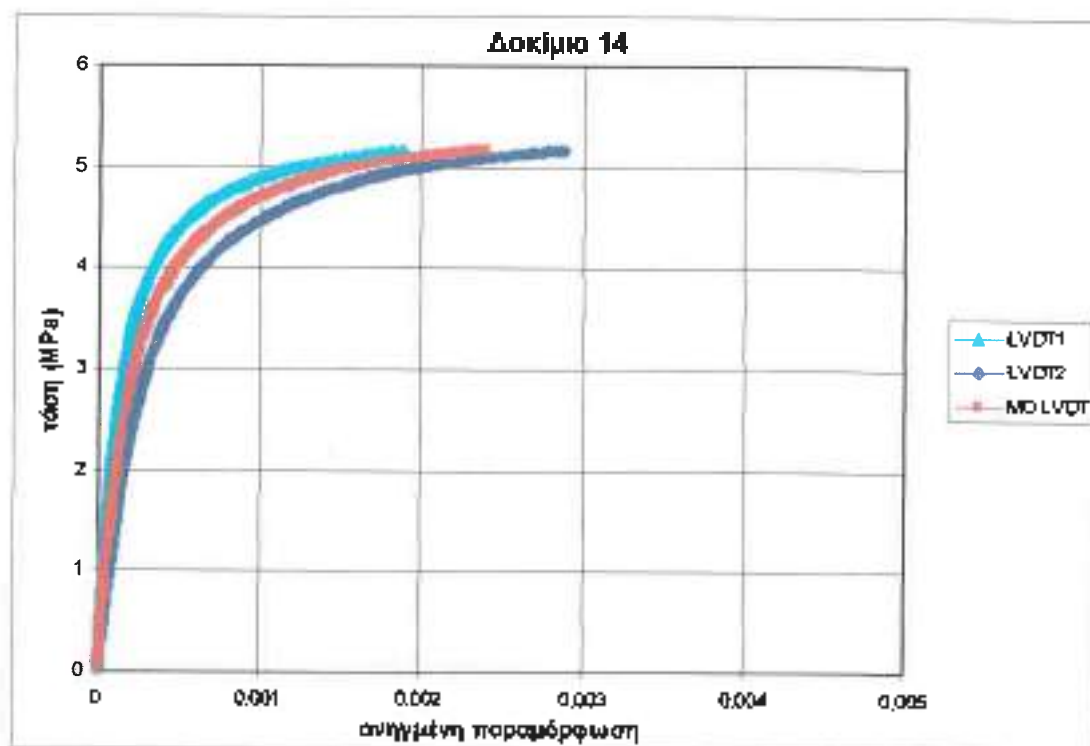
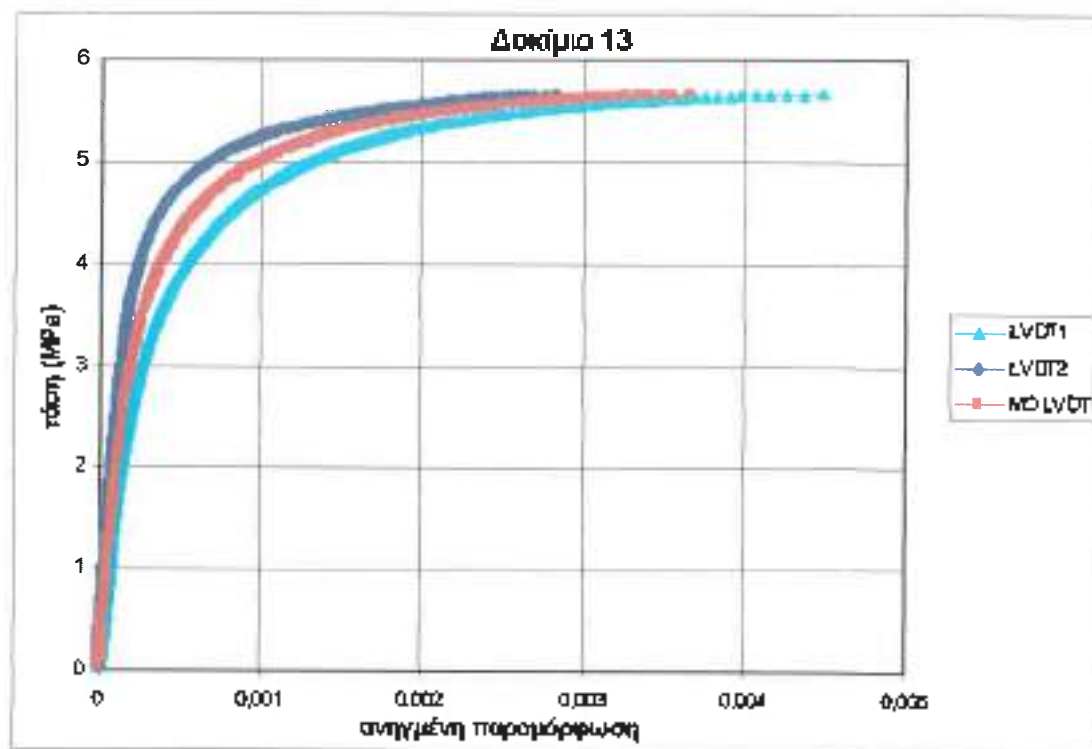
Σχήμα Β-2: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 1% γυάλινο 3% τοξάντο. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστοιχείου, καθώς και ο μέσος όρος τους



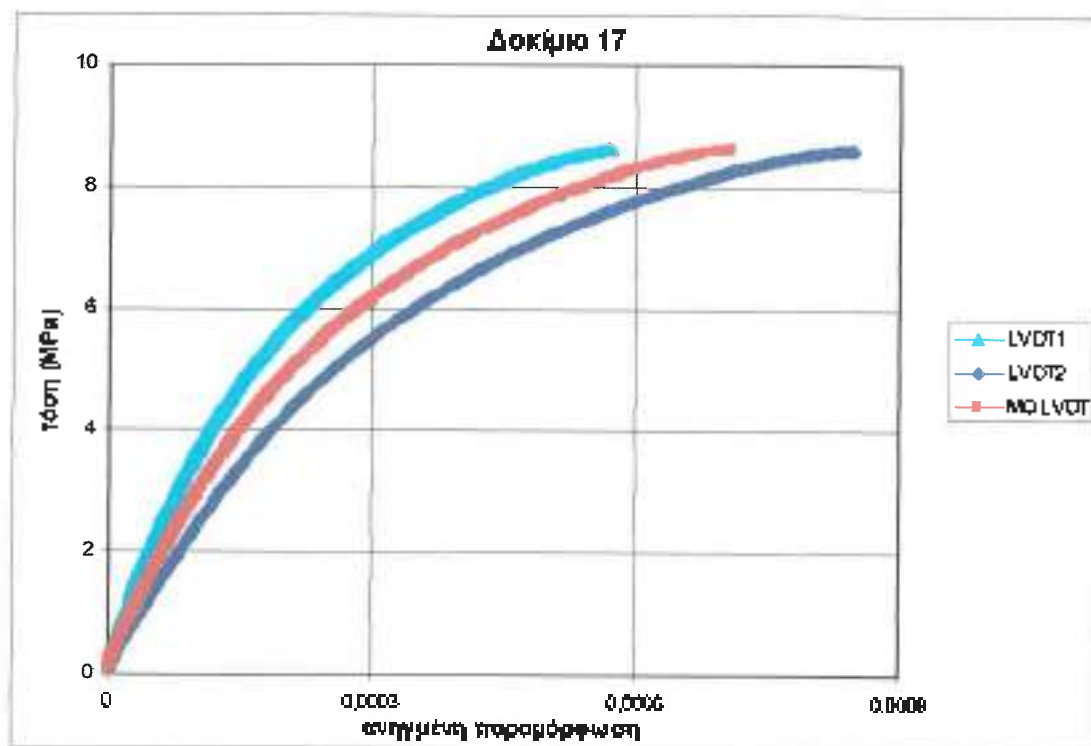
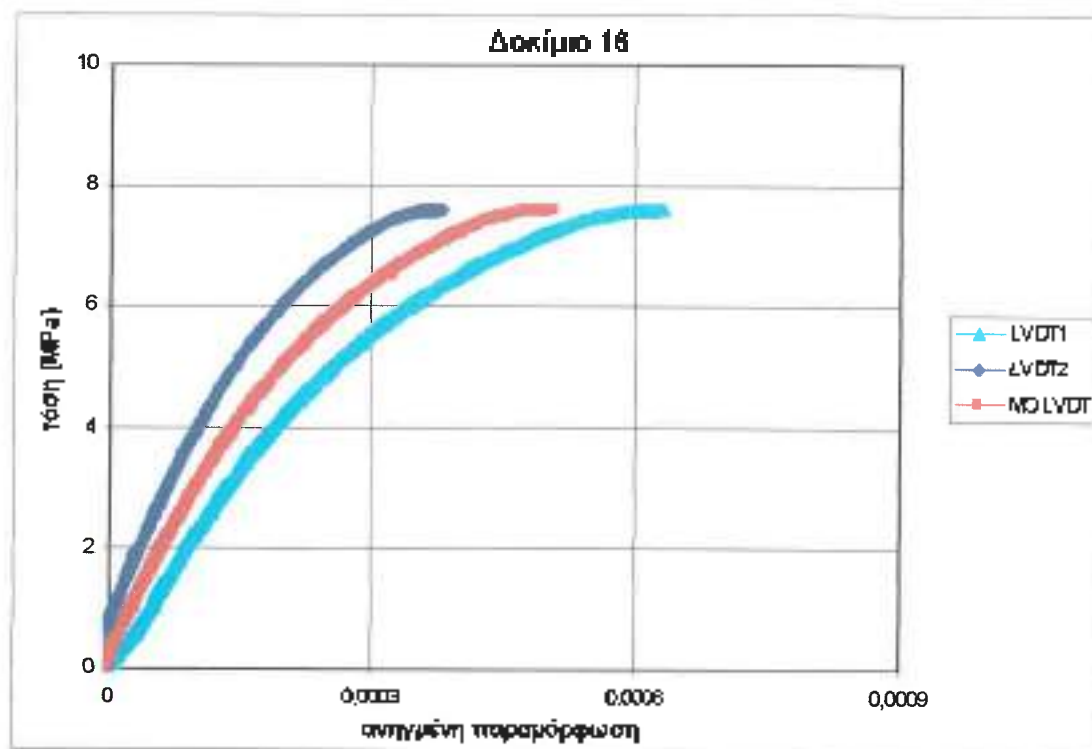
Σχήμα Β-3: Τάση - ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 0% γαλακτωμα - 3% τσιμέντου. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστοιχείου, καθώς και η μέση τους.



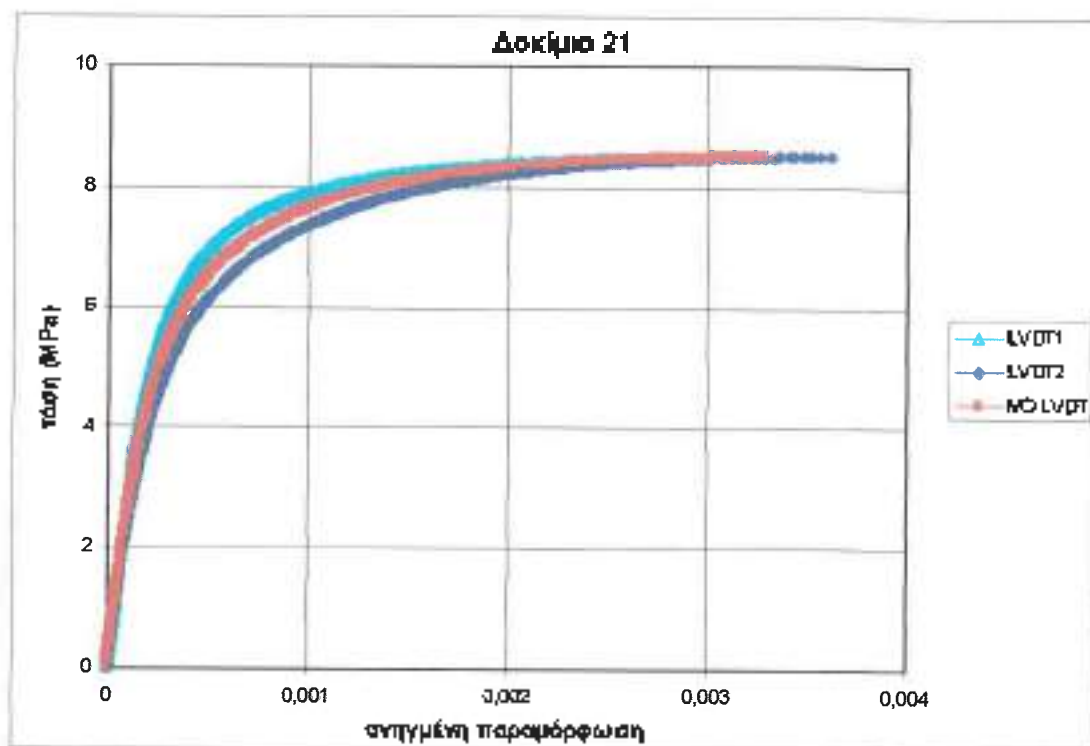
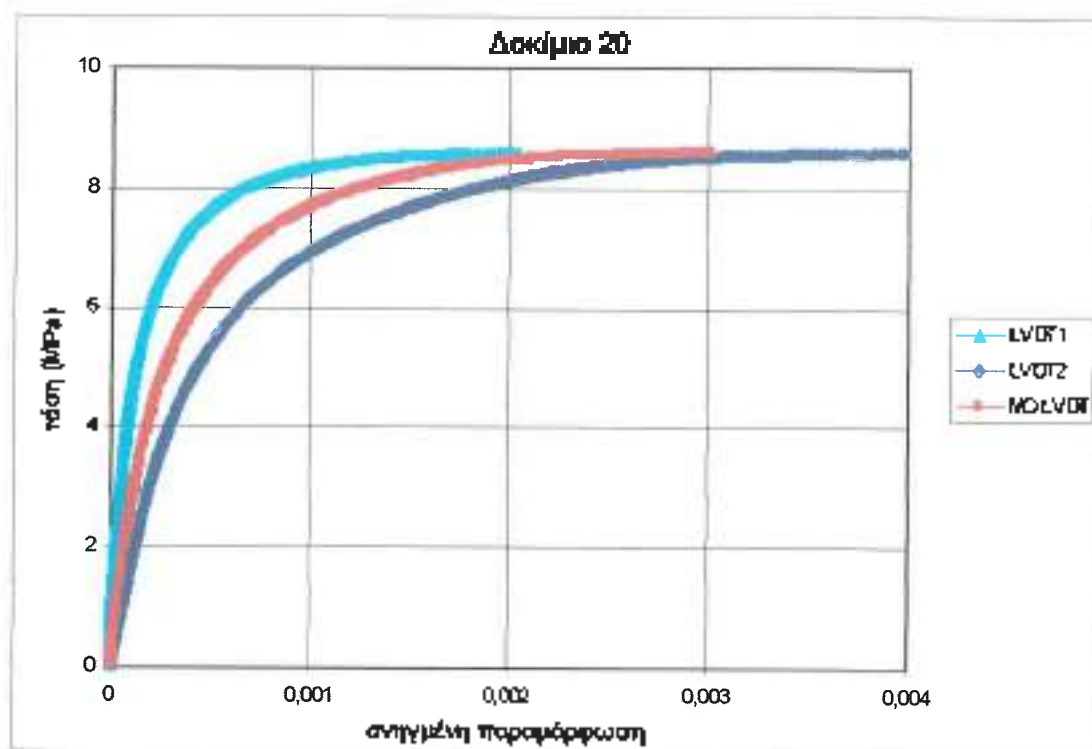
Σχήμα Β-4: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 0% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοστομέτρου, καθώς και ο μέσος όρος τους



Σχήμα Β-5: Τάση - ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 2% γαλάκτωμα - 3% τσιμέντο. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηκυνσιόμετρου, καθώς και ο μέσος όρος τους



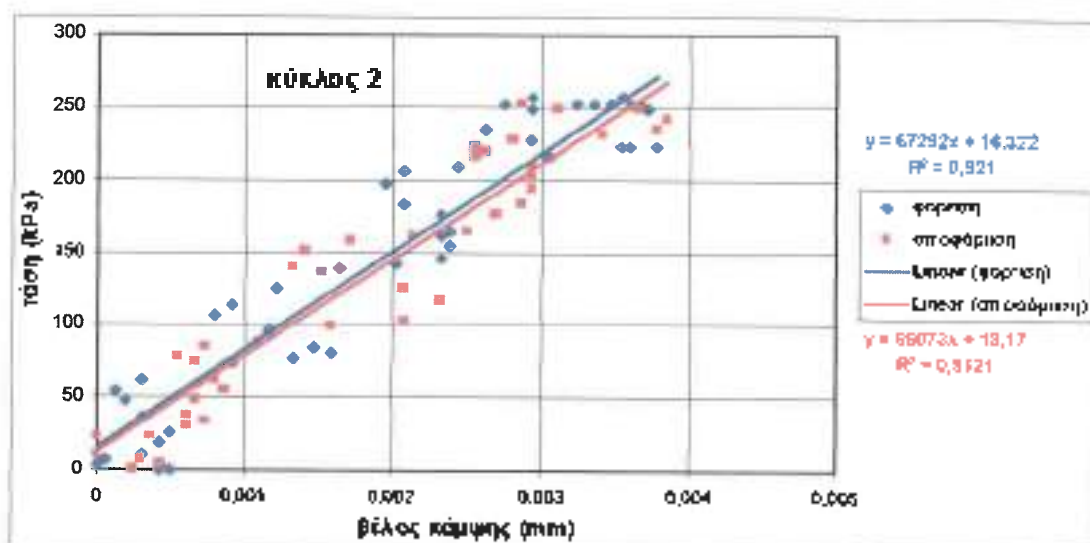
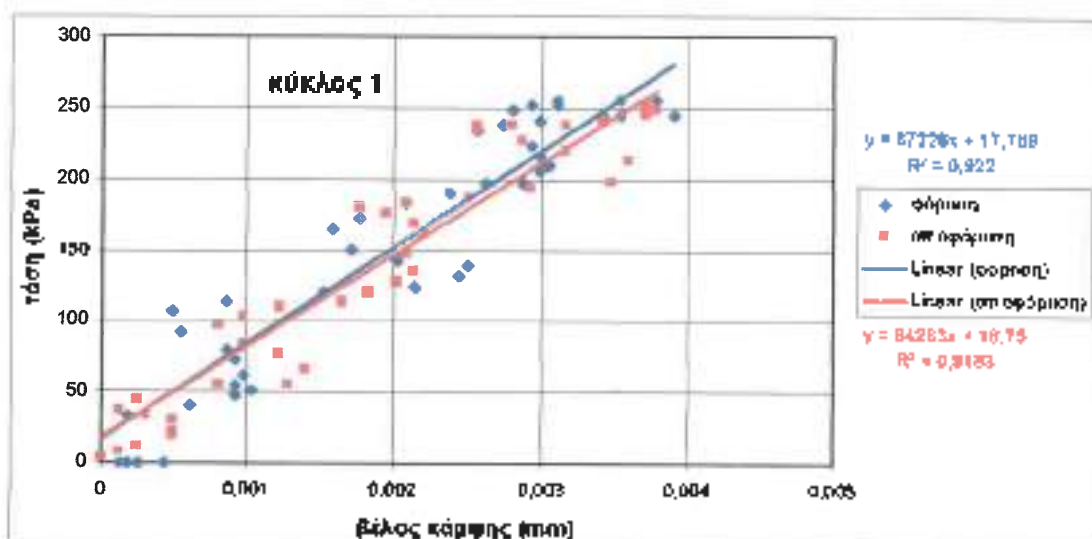
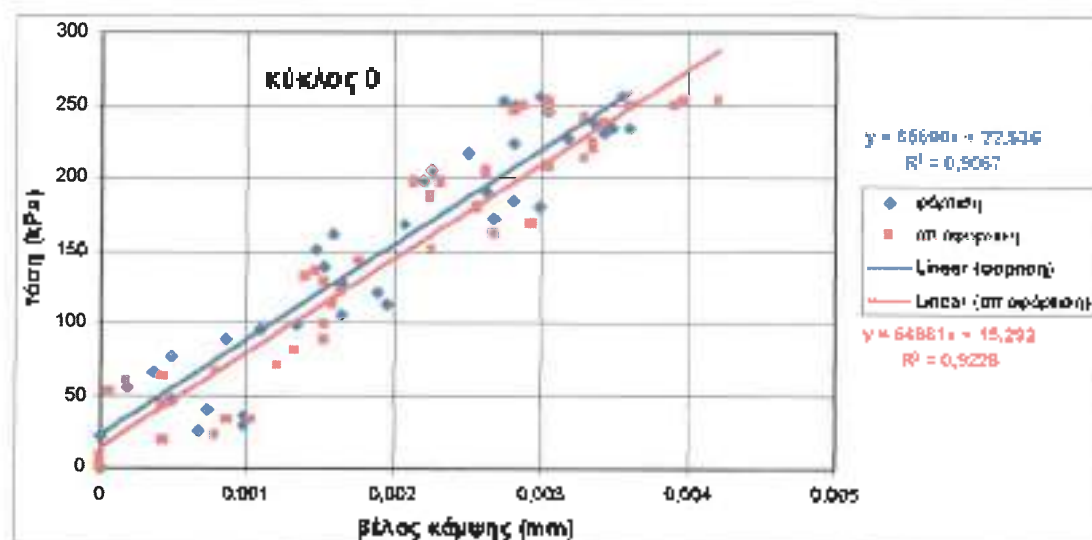
Σχήμα B-6: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 1% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηκυνσιομέτρου, καθώς και ο μέσος όρος τους.



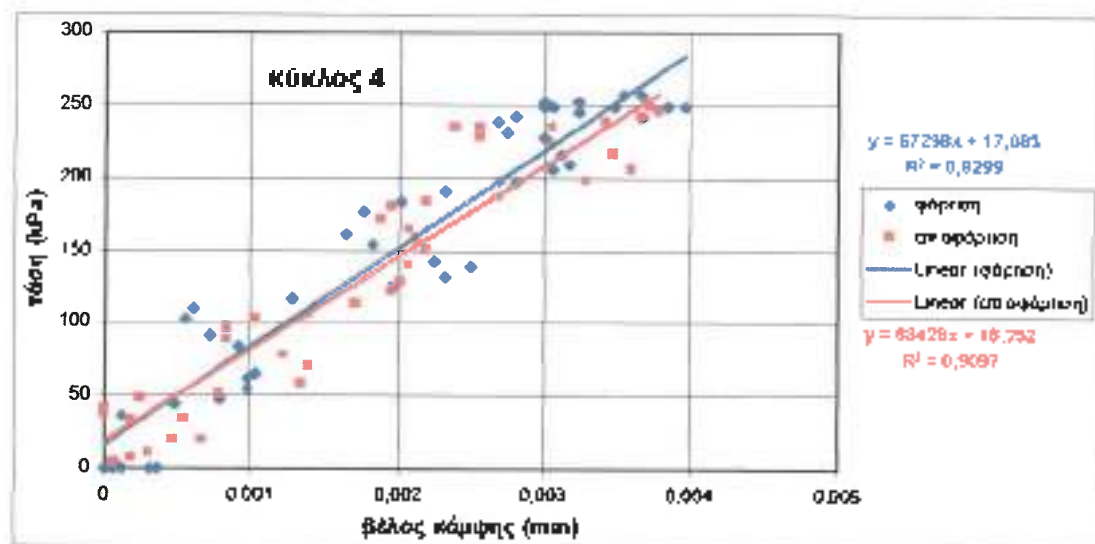
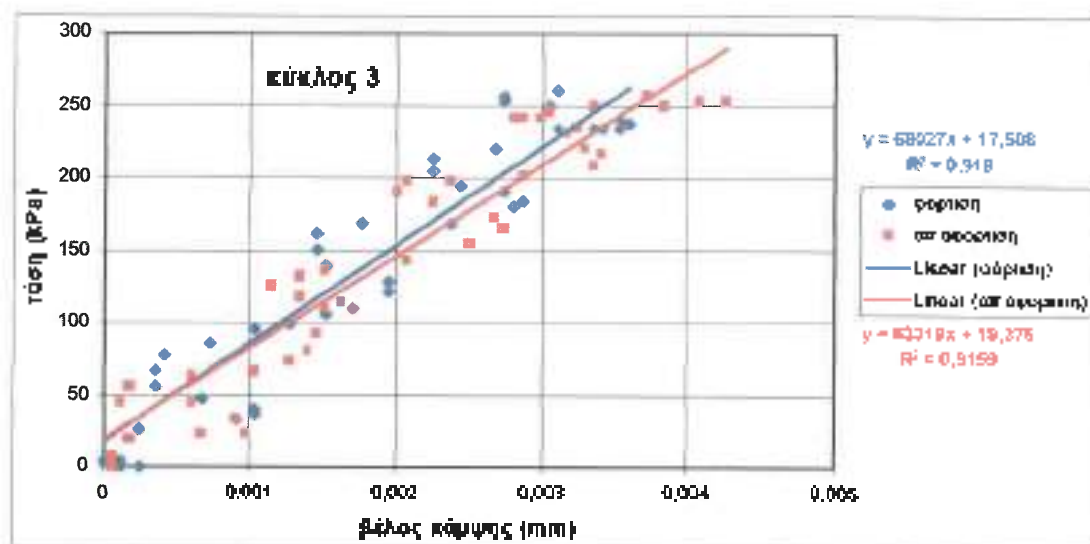
Σχήμα Β-7: Τάση – ανηγμένη παραμόρφωση για το μίγμα 2% γαλάκτωμα – 4% τσιμέντο. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις κάθε μηχανοσταθμέτρου, καθώς και ο μέσος όρος τους

Παράρτημα Γ

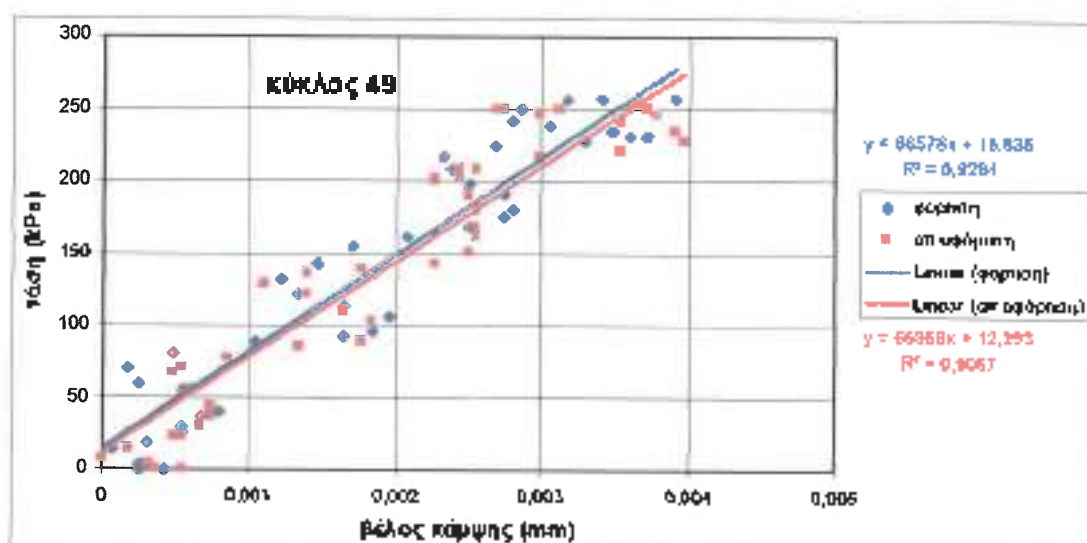
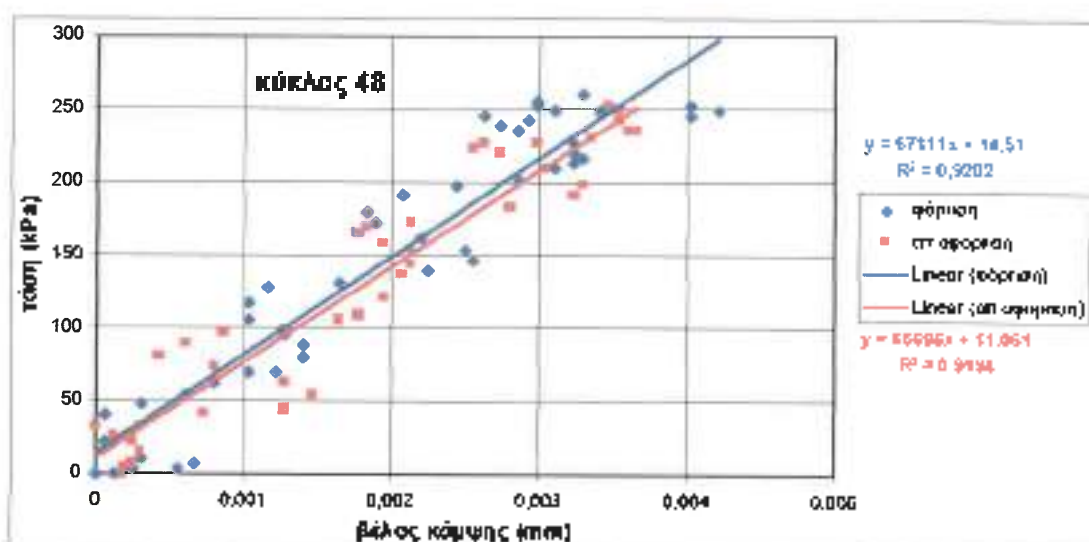
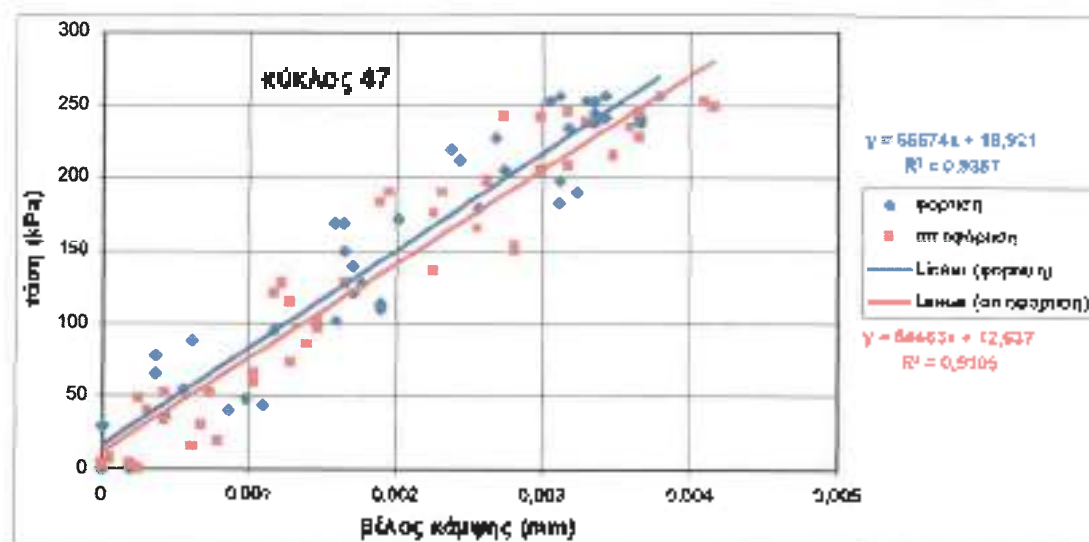
Στο παράρτημα αυτό, παρατίθενται τα διαγνηστικά τύπη – βέλουσ καμης για φόρτιση και αποφόρτιση (με τις ευθείες παλλινόρμησης), για κάθε κύκλο φόρτισης, για όλα τα δοκίμια όλων των μιγμάτων. Παρατυσάζονται τα δοκίμια 2 και 3 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%), 5 και 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%), 8 και 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%), 11 και 12 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%), 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%), 17 και 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%) και 20 και 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%).



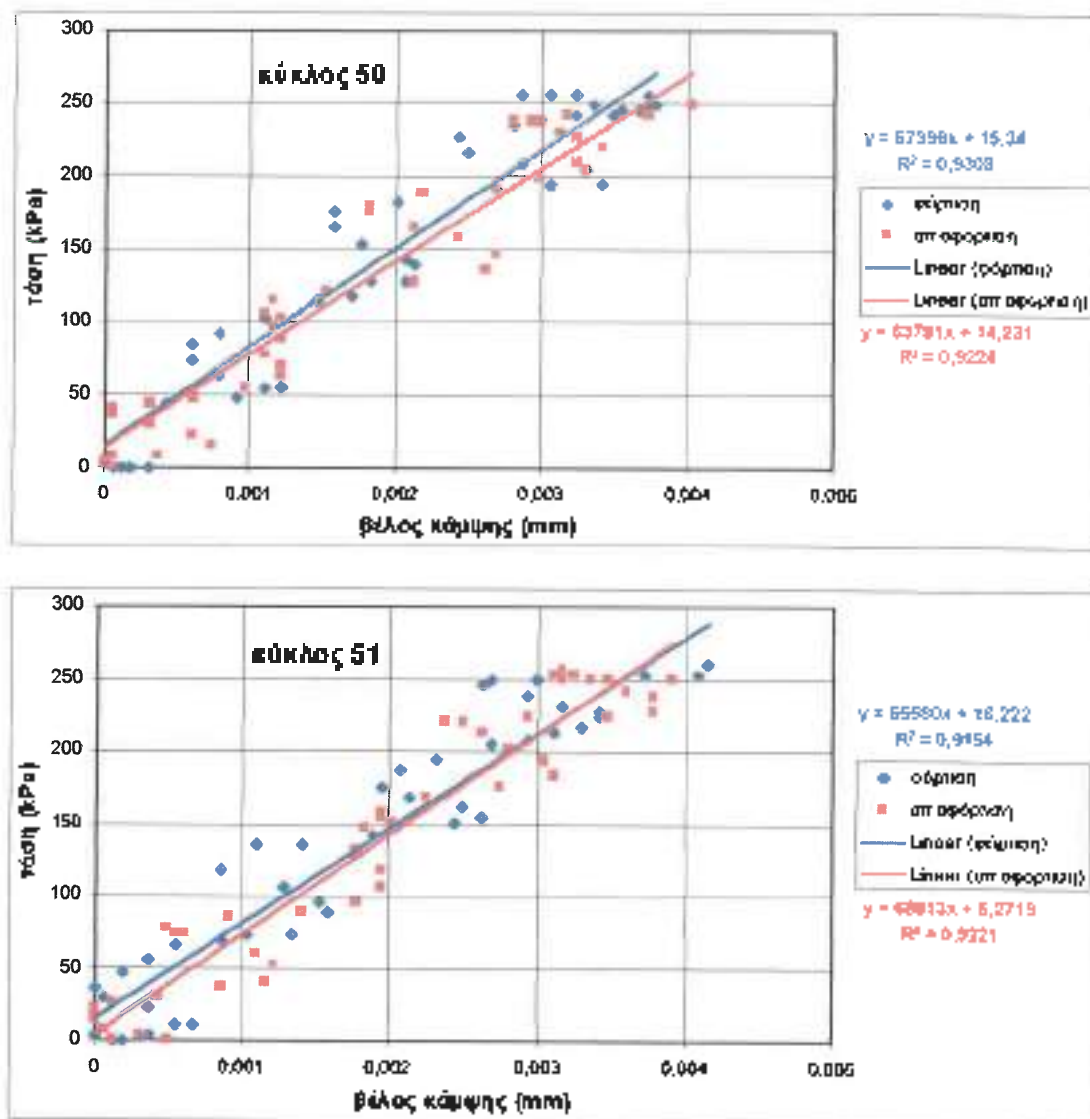
Σχήμα Γ-1: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο 2 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%)



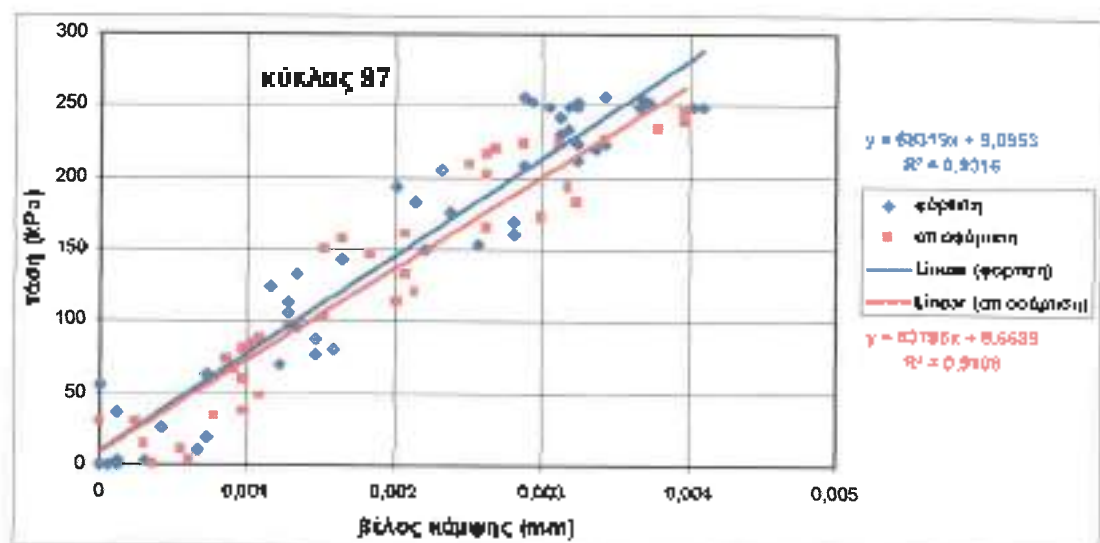
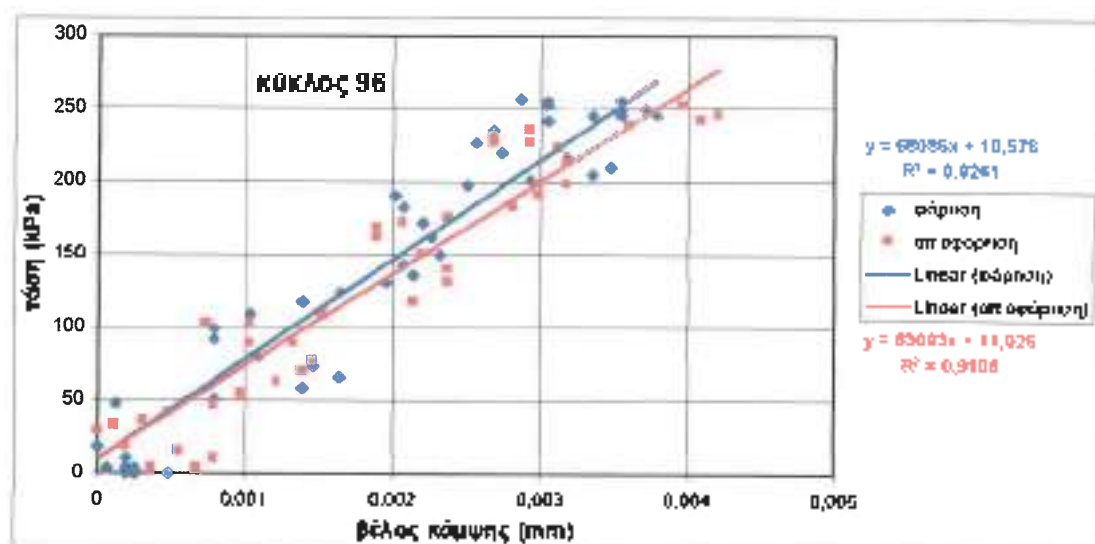
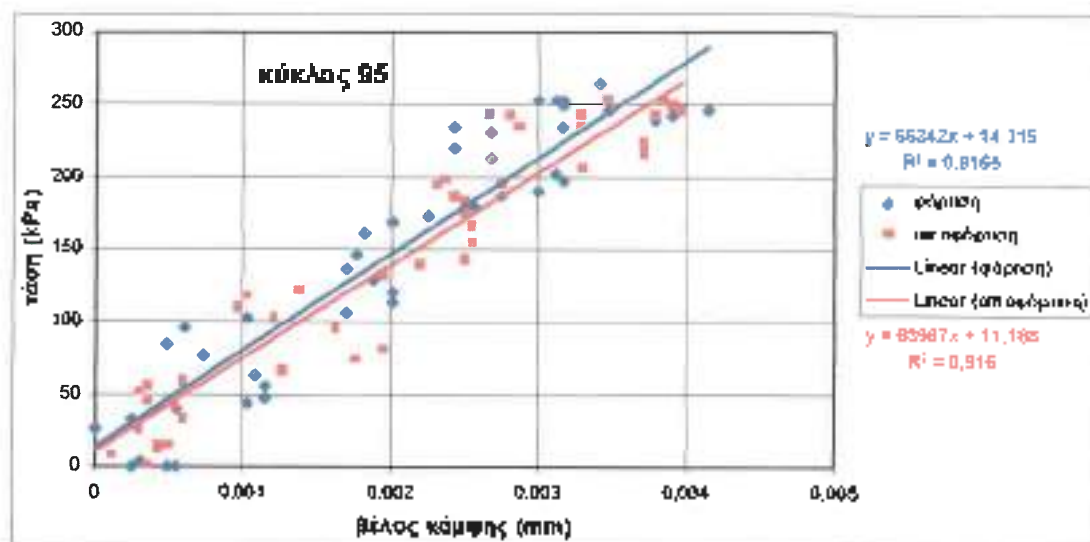
Σχήμα F-2: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθεία, παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4, για το δοκίμιο 2 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%)



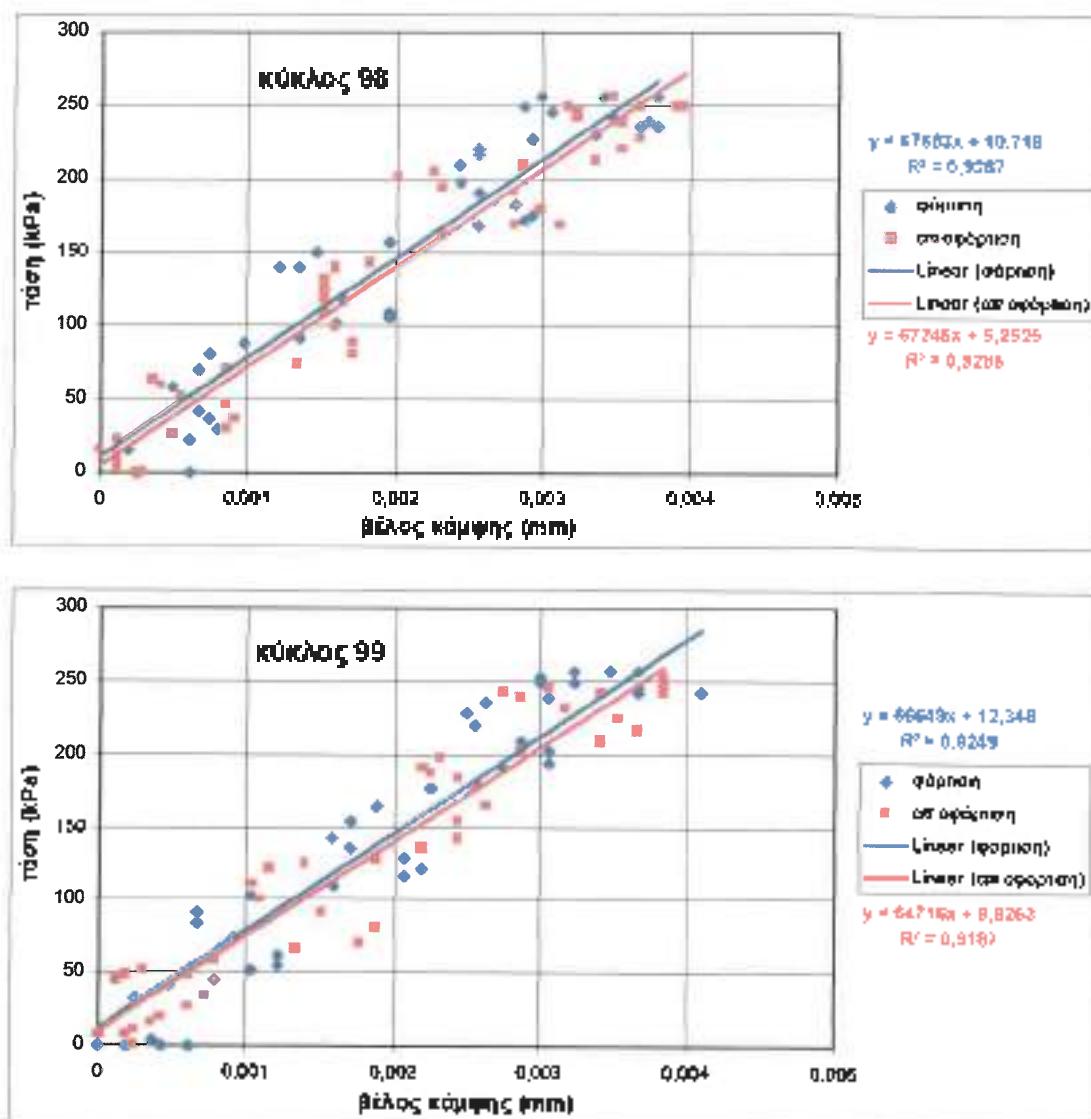
Σχήμα Γ-3: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καθίστα παλλινδρόμησις), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 2 (γυάλινομα 2% - τσιμέντο 2%)



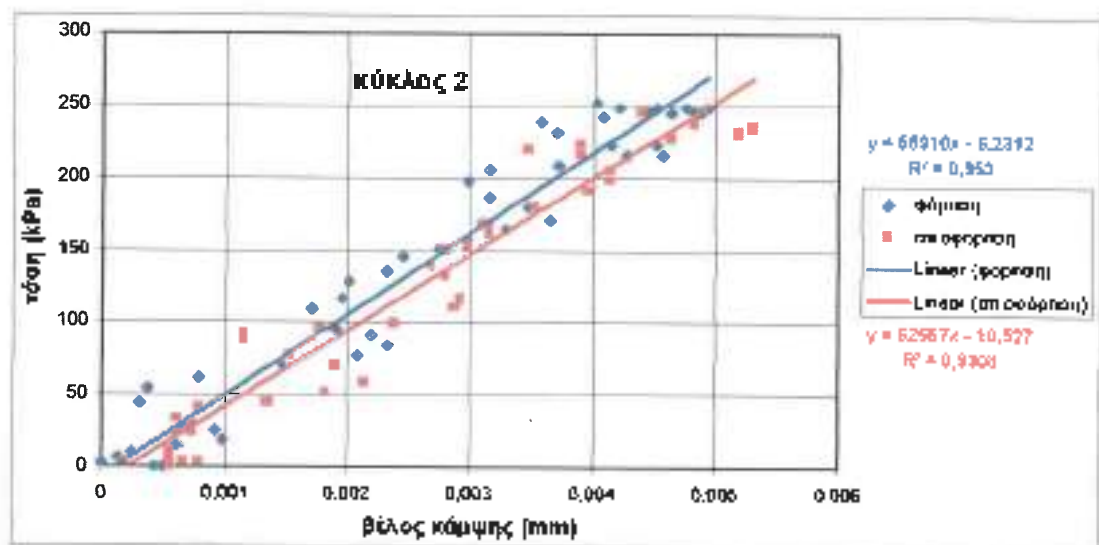
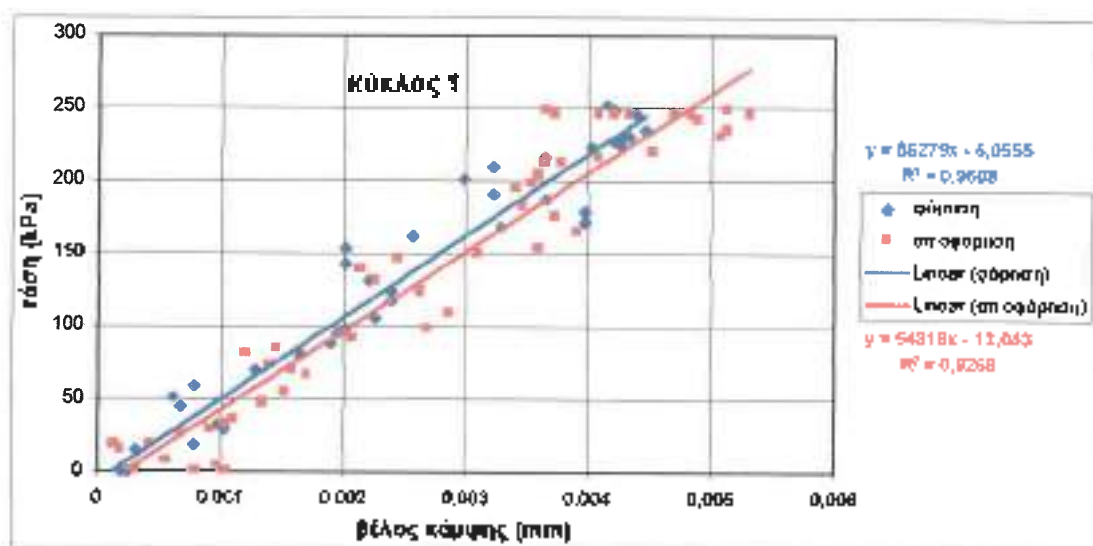
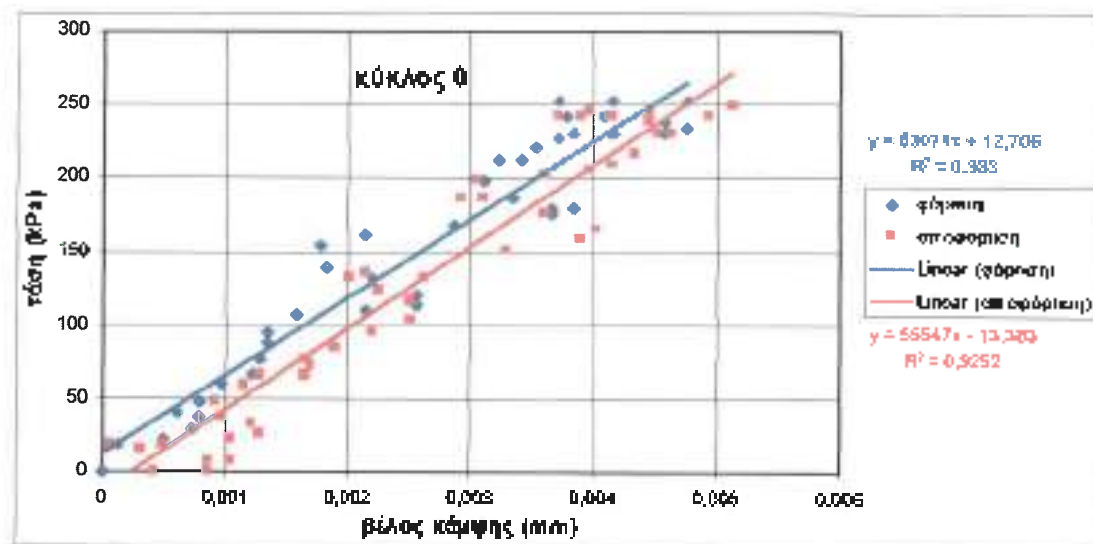
Σχήμα Γ-4: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51, για το δοκίμιο 2 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 2%)



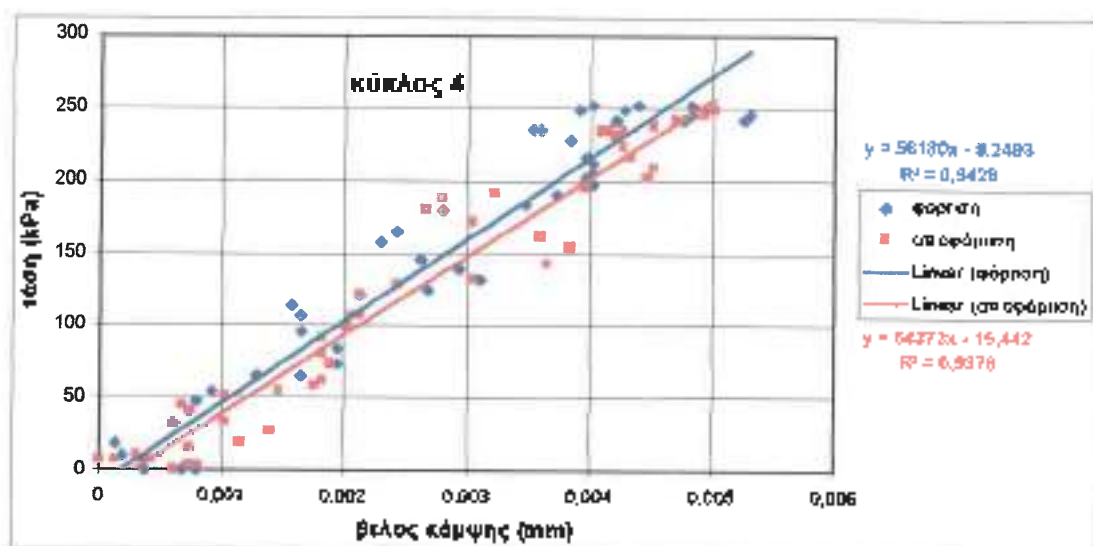
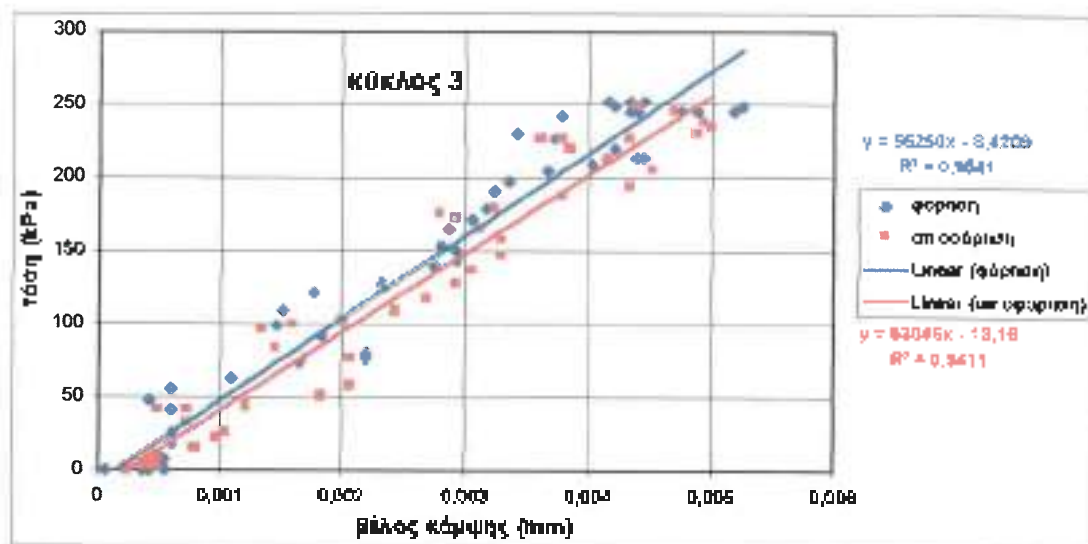
Σχήμα Γ-5: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97, για το δοκίμιο 2 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντά 2%)



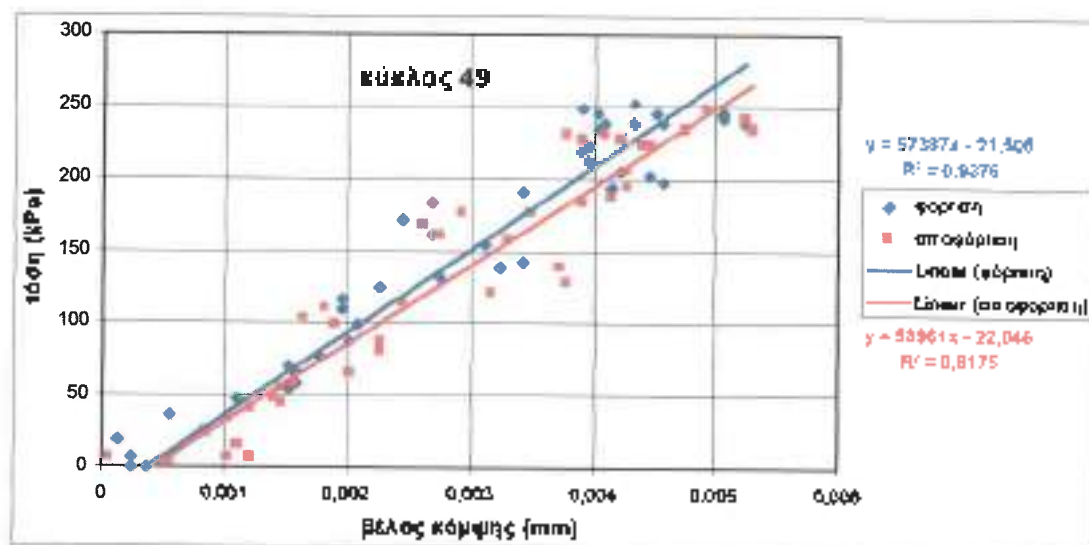
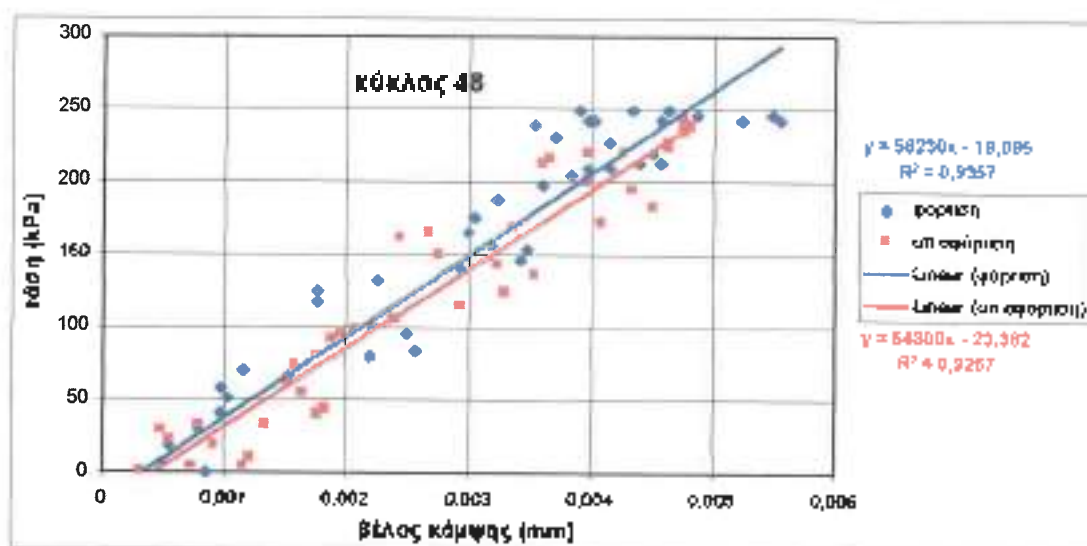
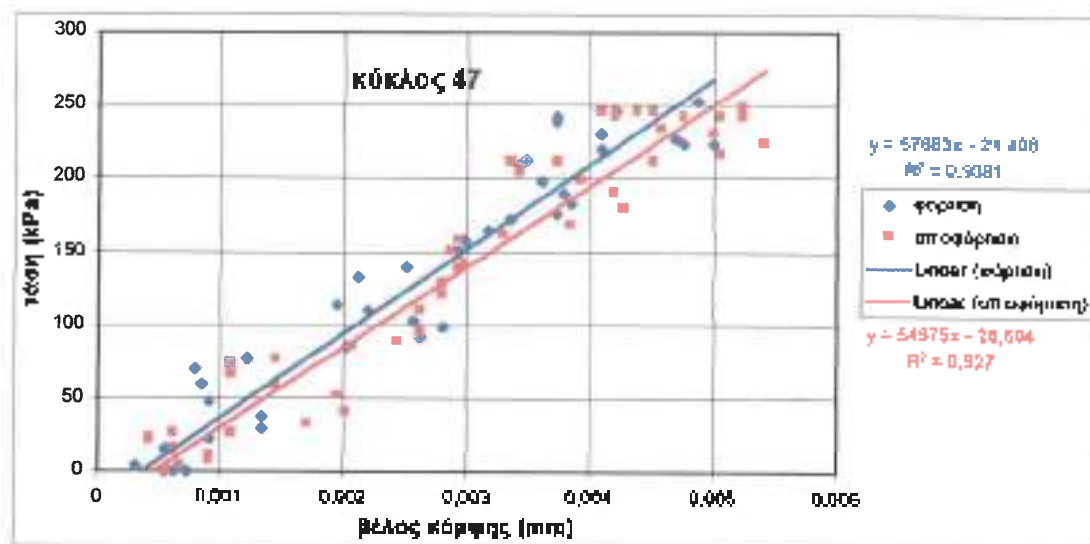
Σχήμα Γ-6: Τάση βέλος κάμψης για φορτίση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99, για το δοκίμιο 2 (γαλάκτιμη 2% - τσιμέντο 2%)



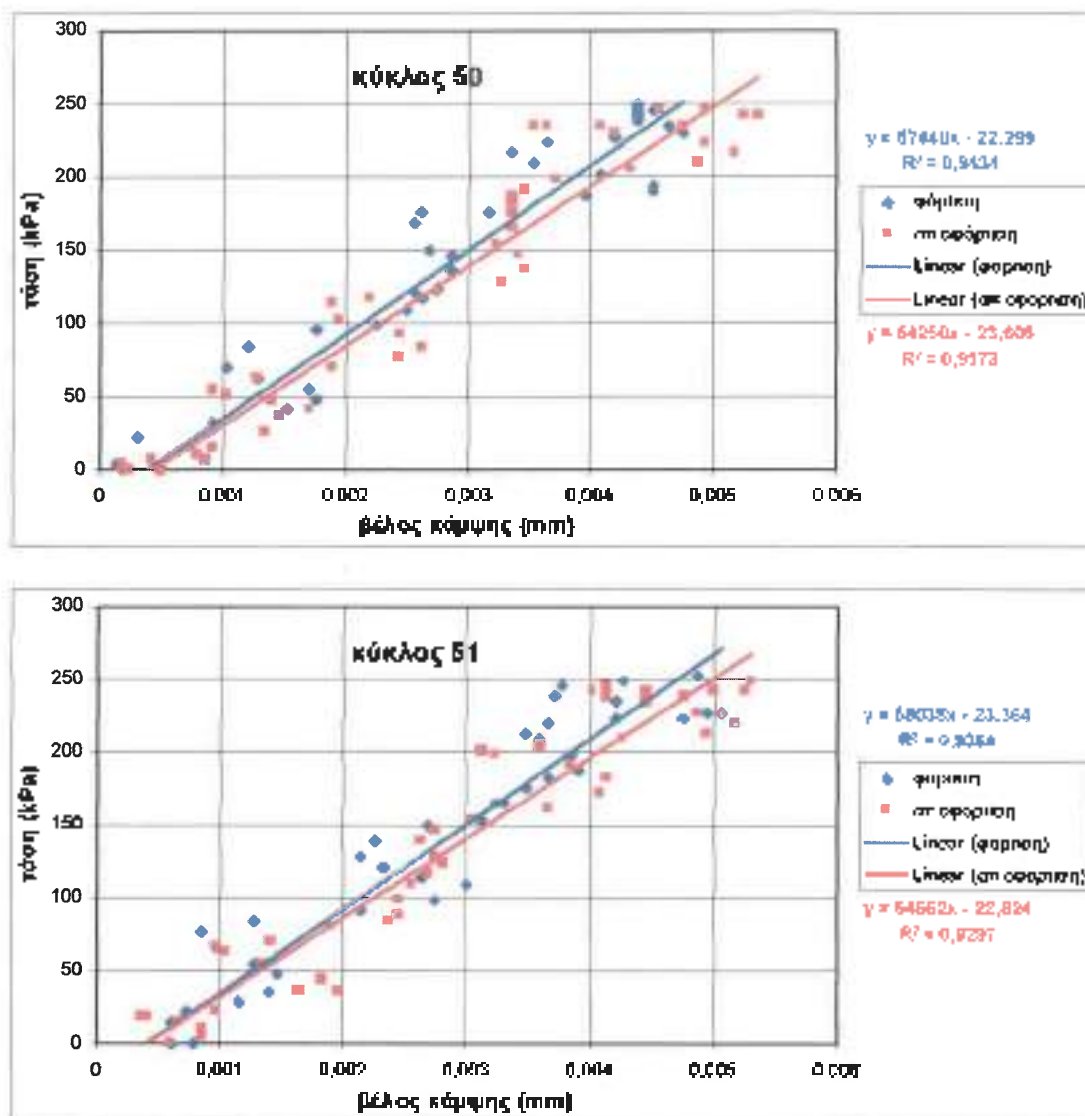
Σχήμα Γ-7: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο 3 (υλικό 2% - τσιμέντα 2%)



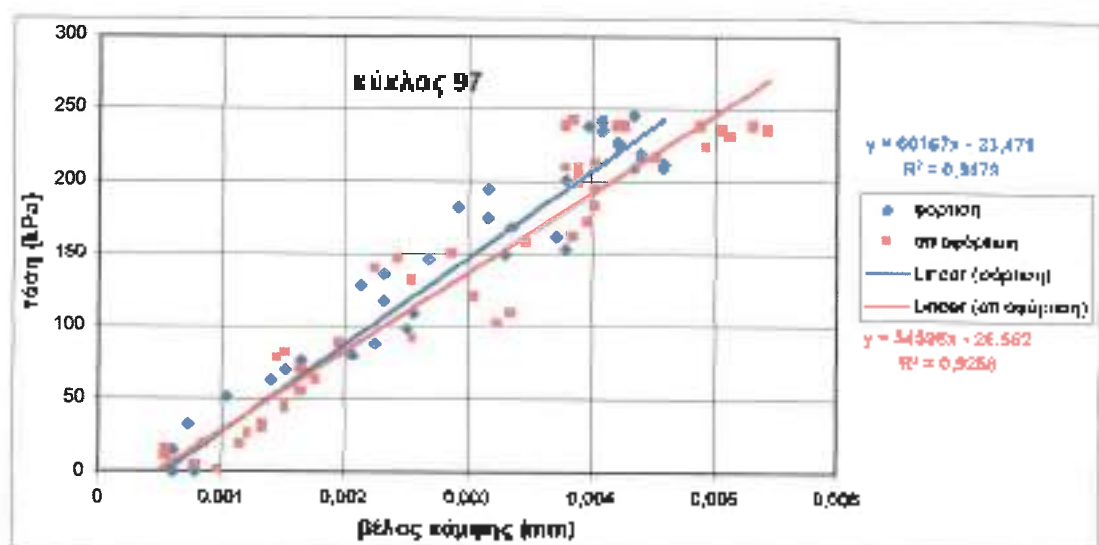
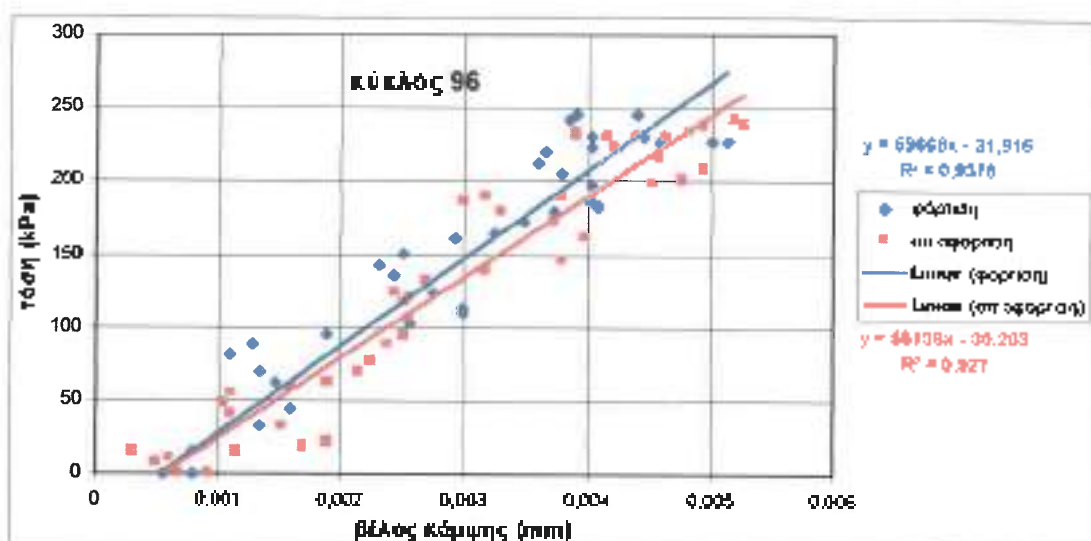
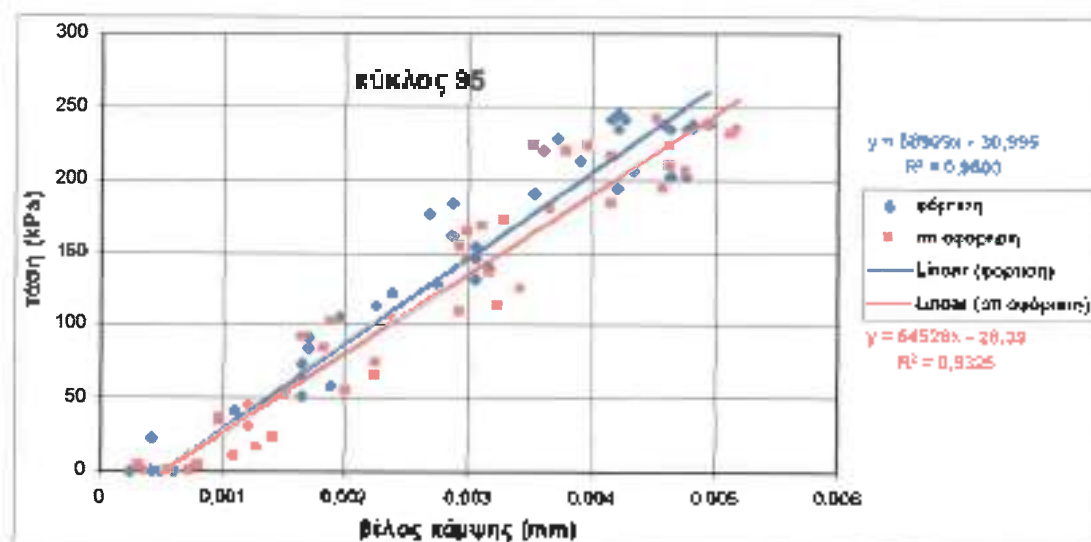
Σχήμα Π-8: Πάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία παλινδρομησης), κύκλοι 3, 4, για το δοκίμιο 3 (γινώστωμα 2% - τσιμέντο 2%)



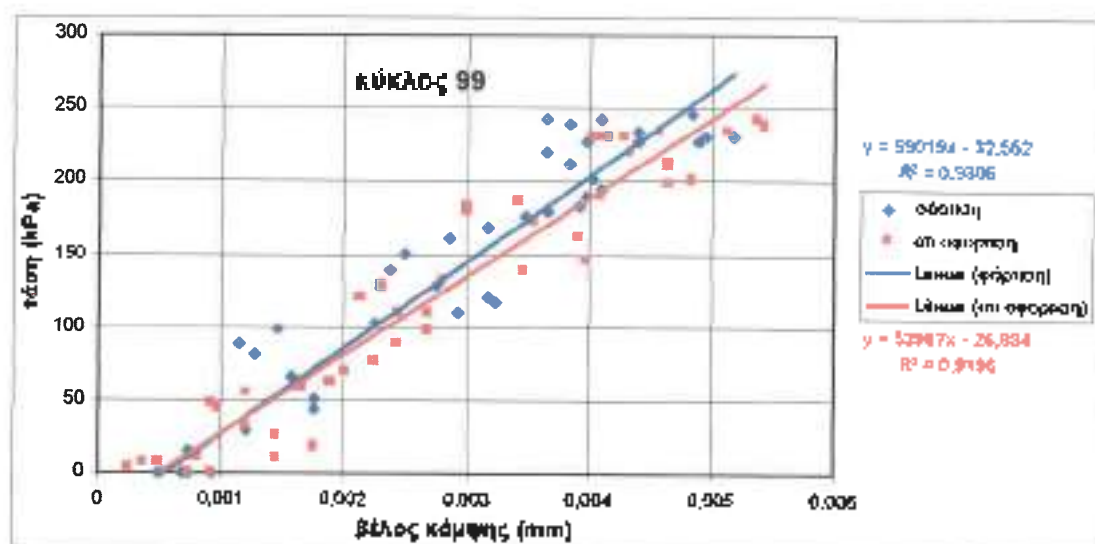
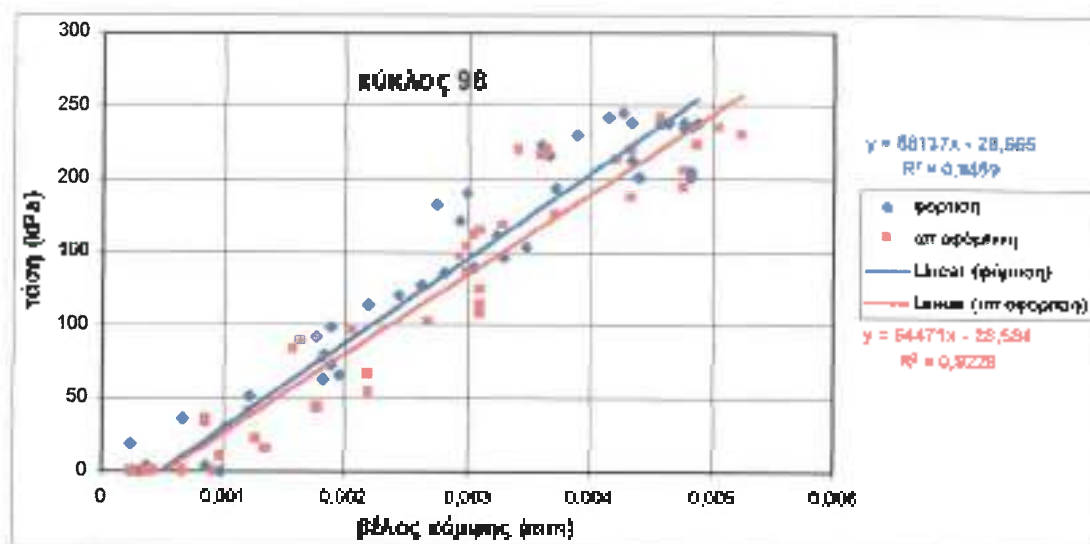
Σχήμα Γ-9: Τάση βέλος κάμψης για φορτίση και αποφόρτιση (αυθαιρέτως παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 7 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%)



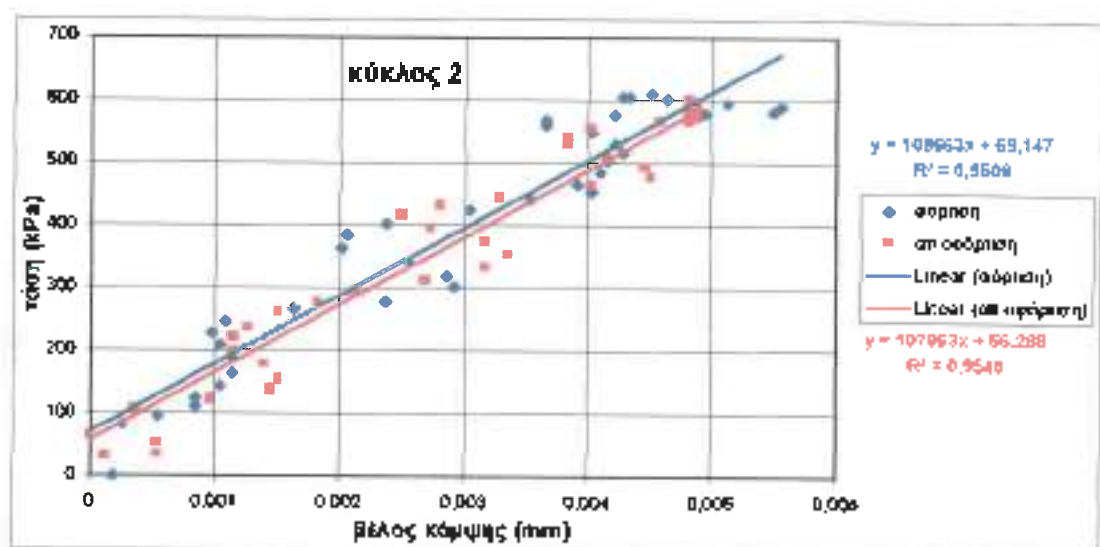
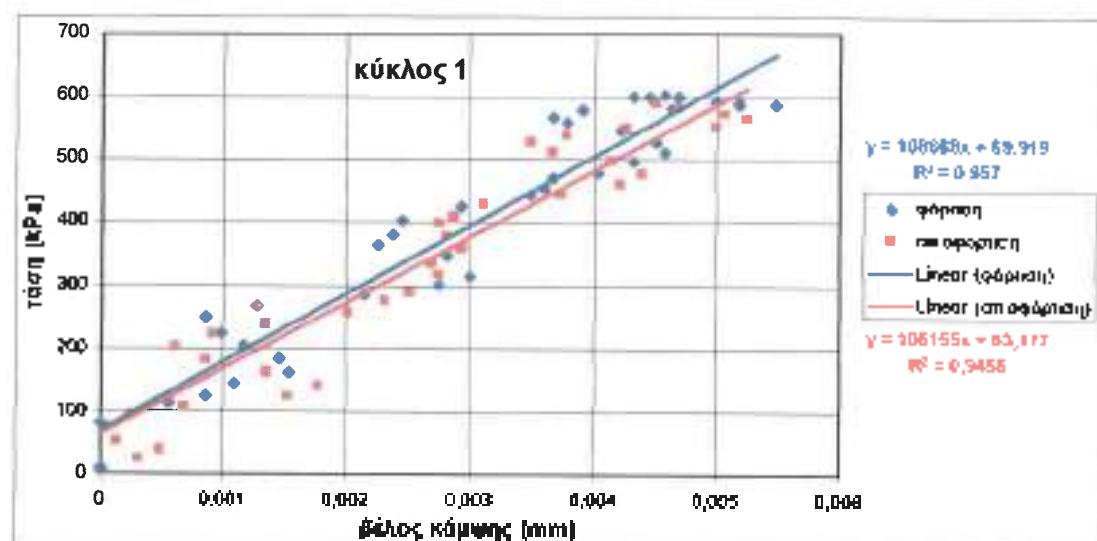
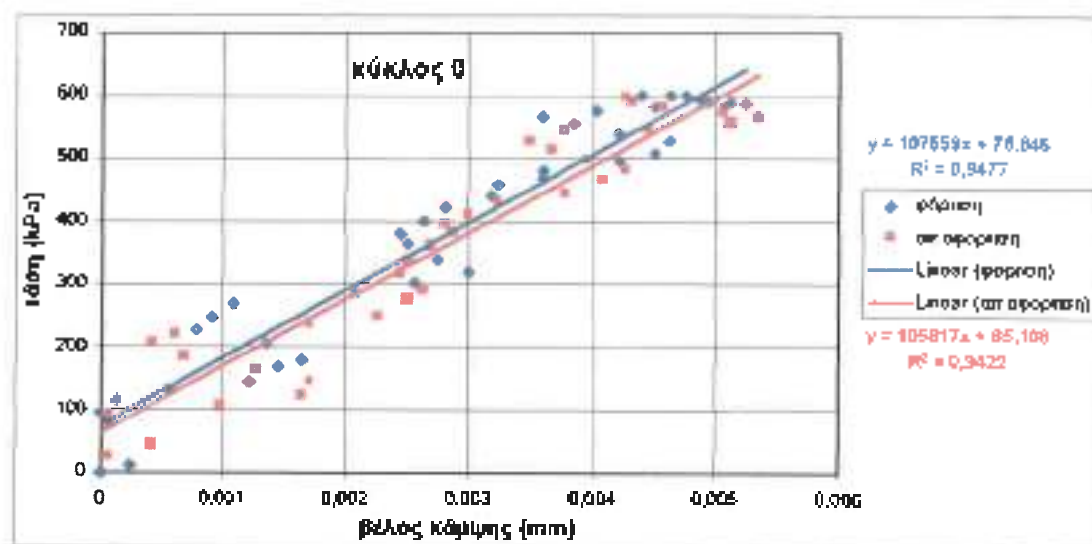
Σχήμα Γ-10: Τάση – μέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυλινδρικός παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51, για το δοκίμιο 3 (γυαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%)



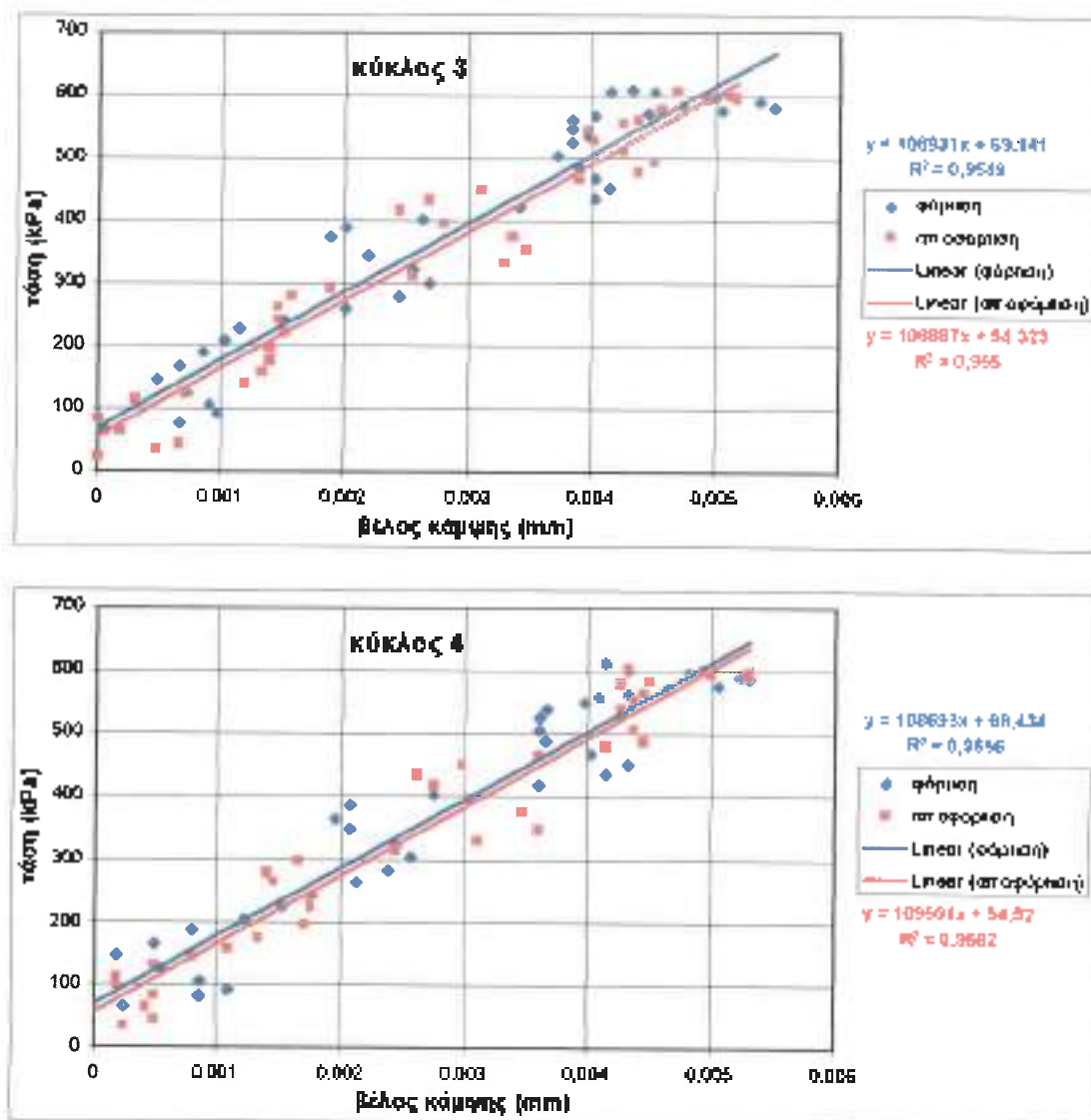
Σχήμα Γ-11: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97, για το δοκίμιο 3 (γαλακτώμα 2% + τσιμέντου 2%)



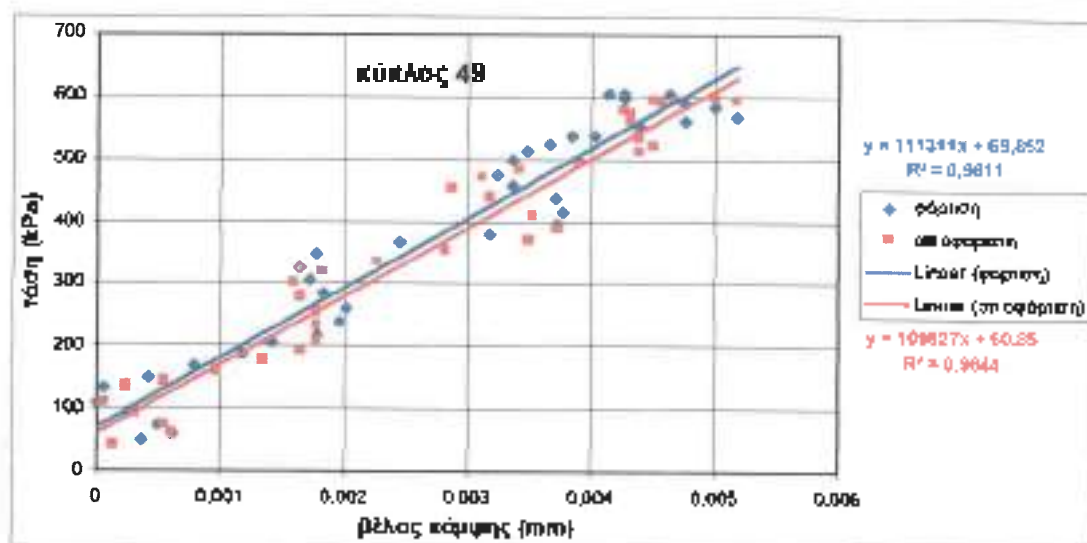
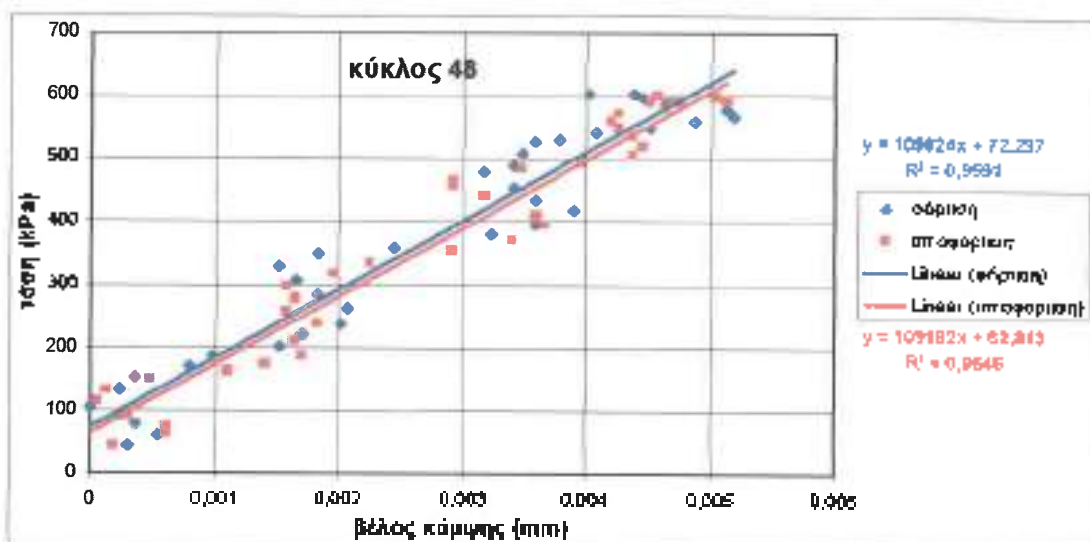
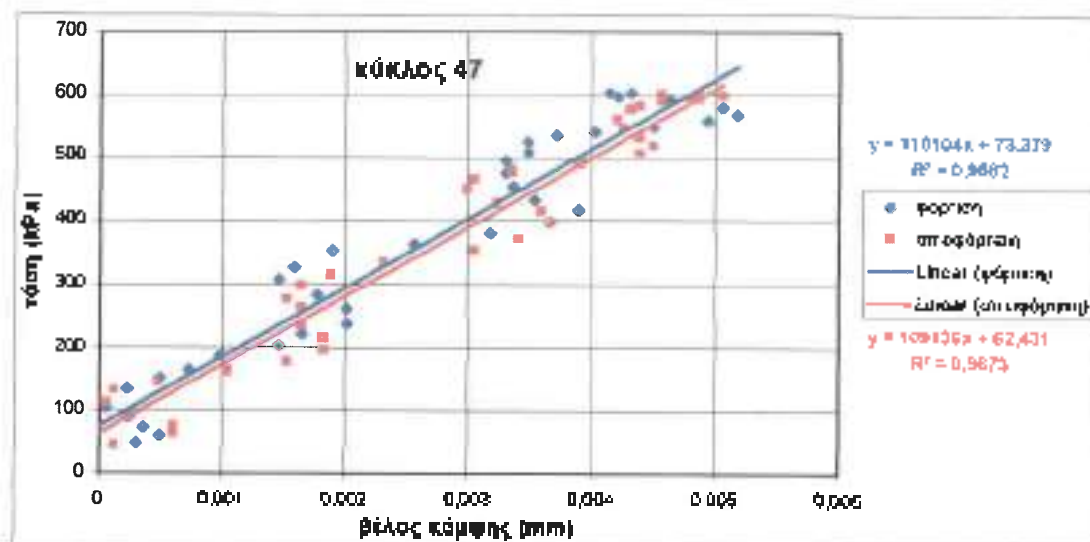
Σχήμα Γ-12: Τάση -- βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99, για το δοκίμιο 3 (γαλάκτωμα 2%- τοιμέντο 2%)



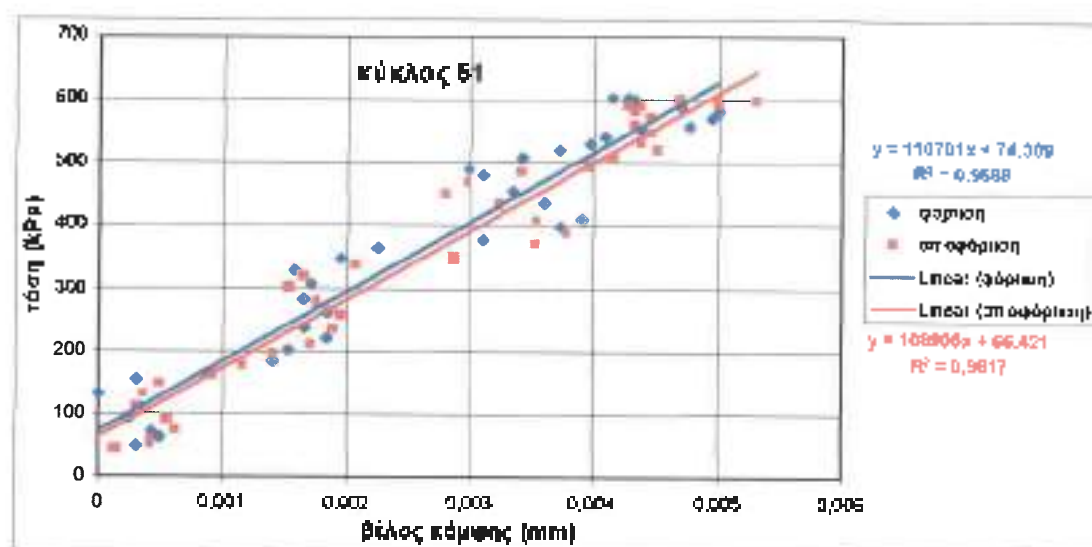
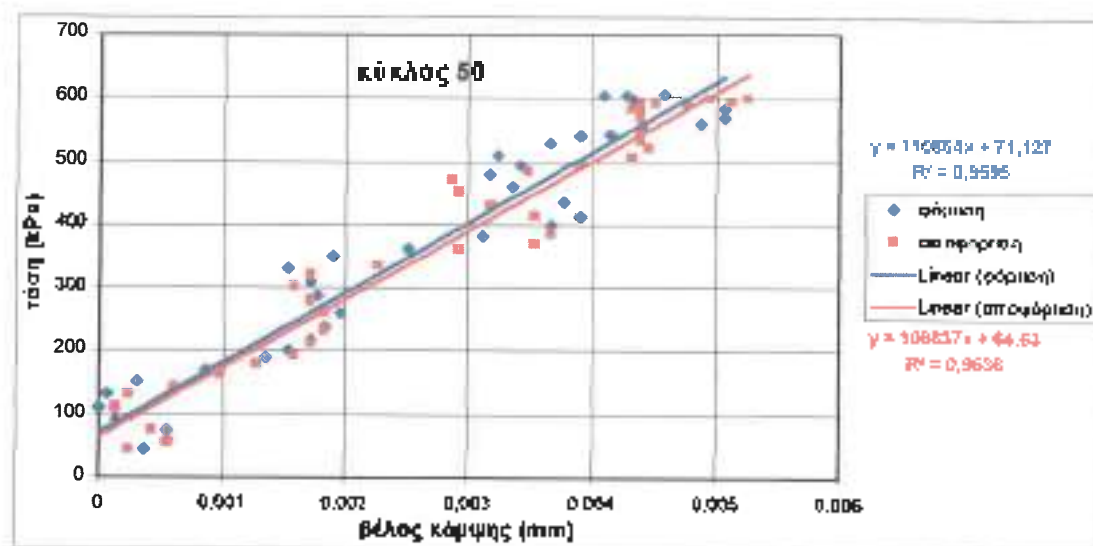
Σχήμα Γ-13: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (επιδείξις πάλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



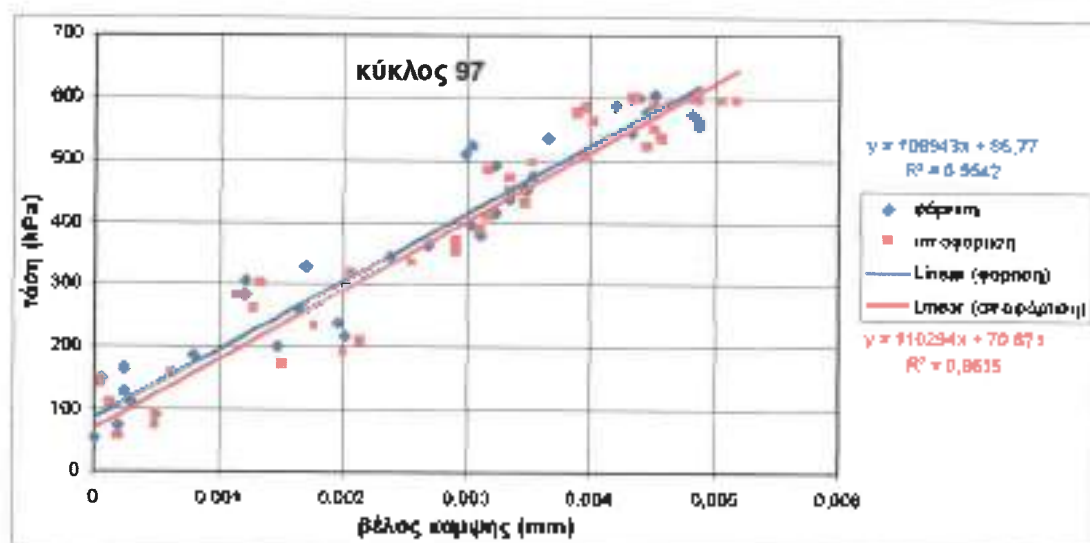
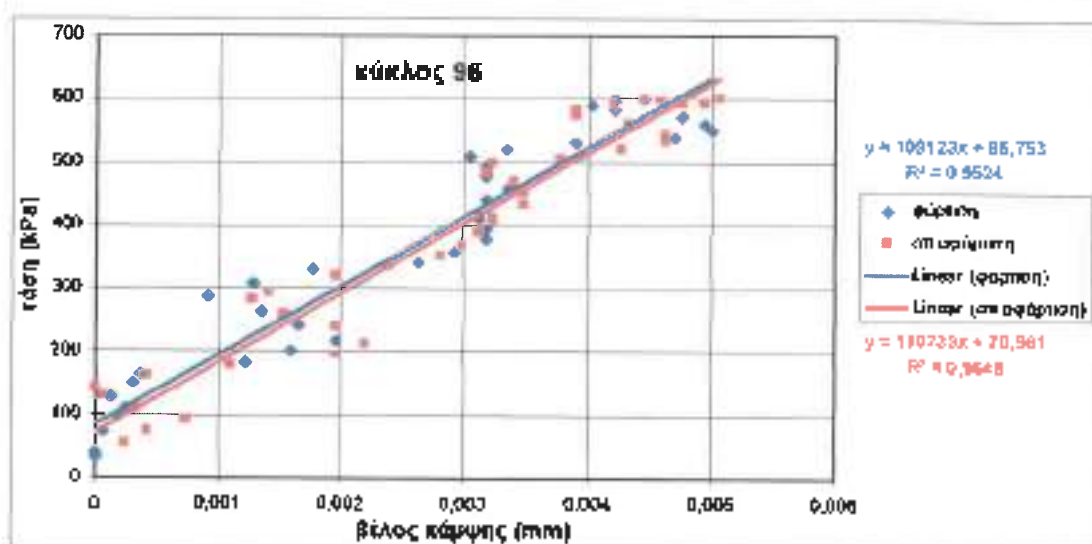
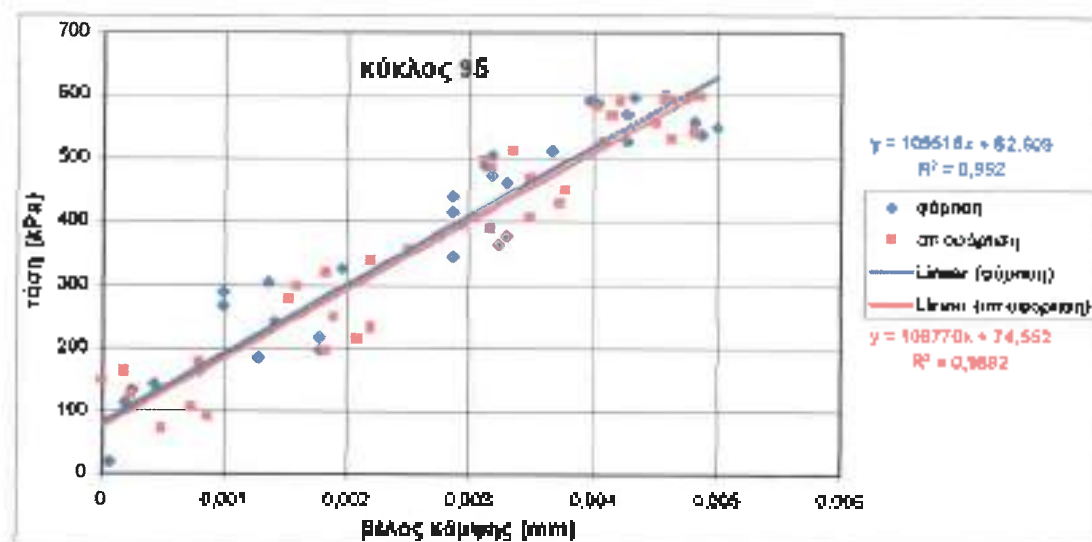
Σχήμα Γ-14: Τάση - μέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



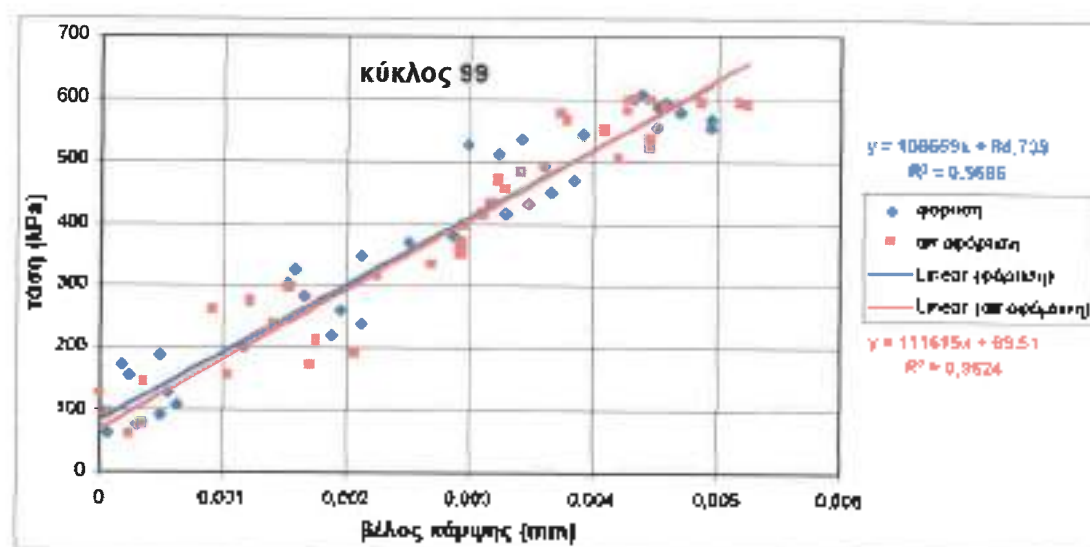
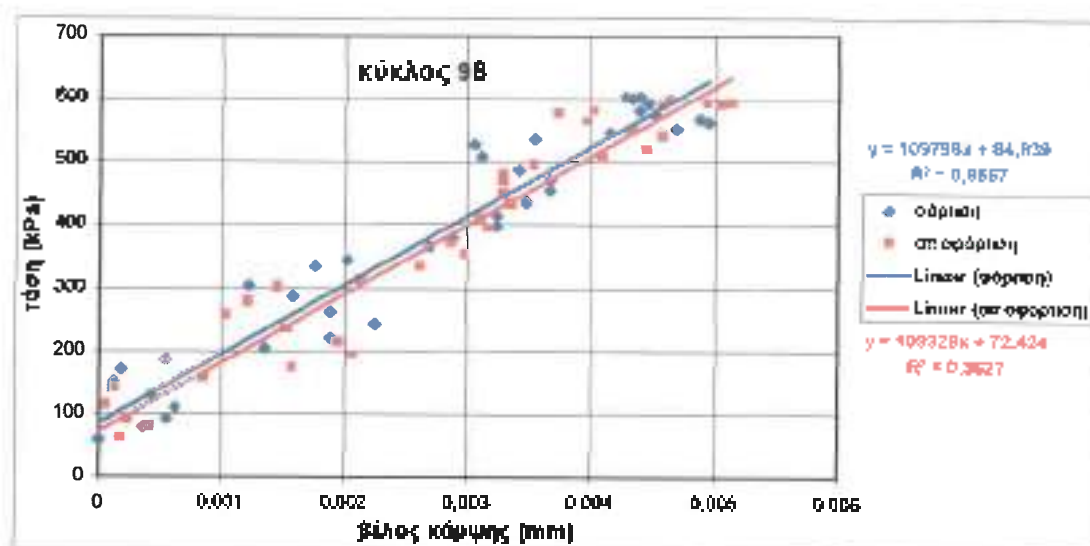
Σχήμα Γ-15: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 5 (γυάλινημη 1% - τσιμέντι 3%)



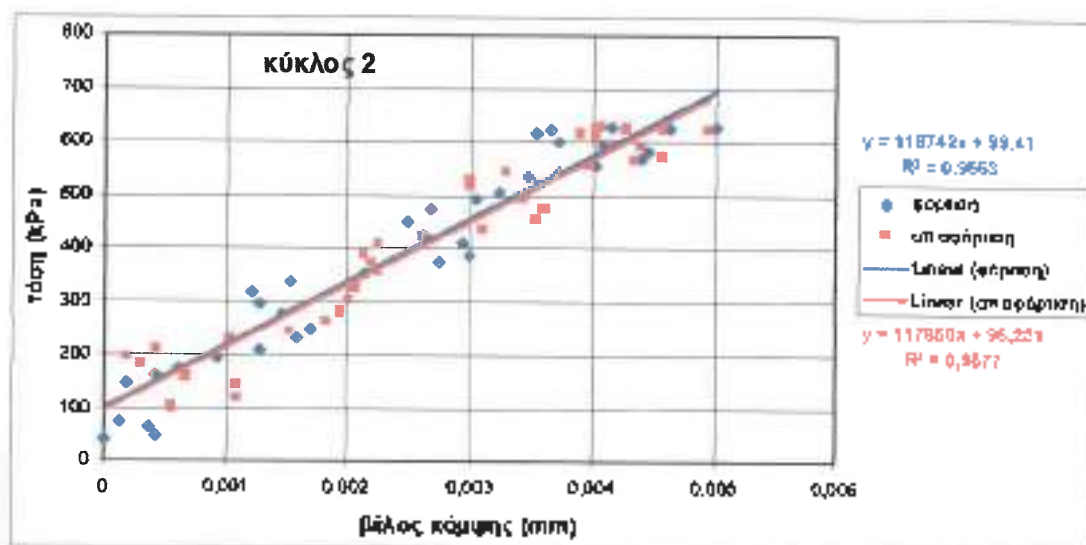
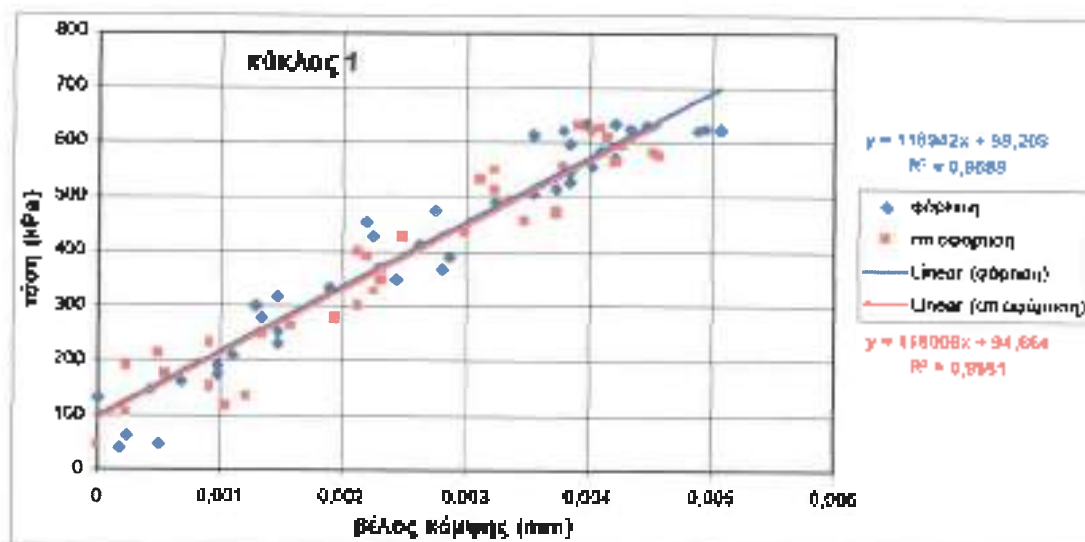
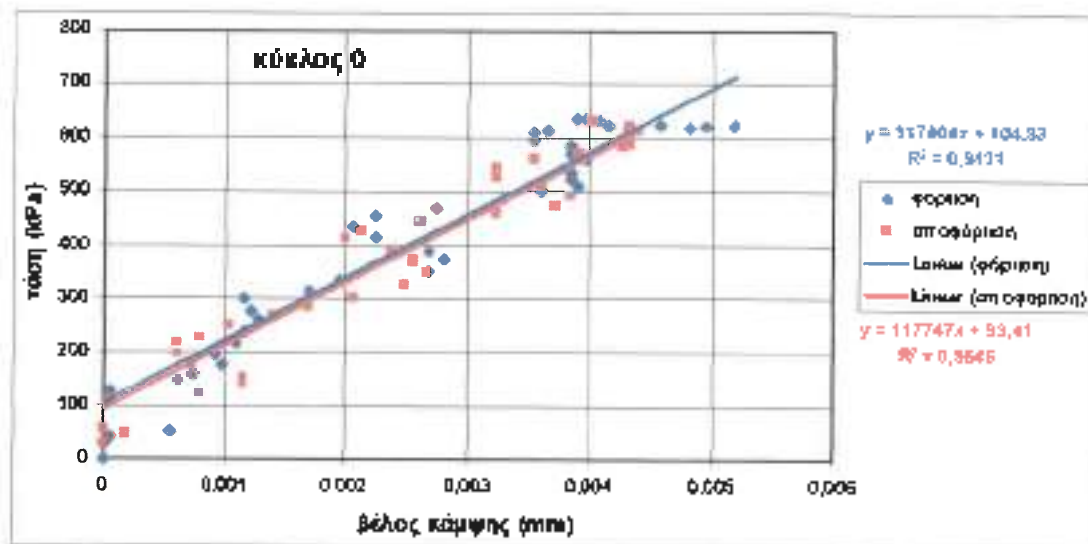
Σχήμα Γ-16: Τάση βέλος κόμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 5 (γπλκτωμα 1% - τημέντο 3%)



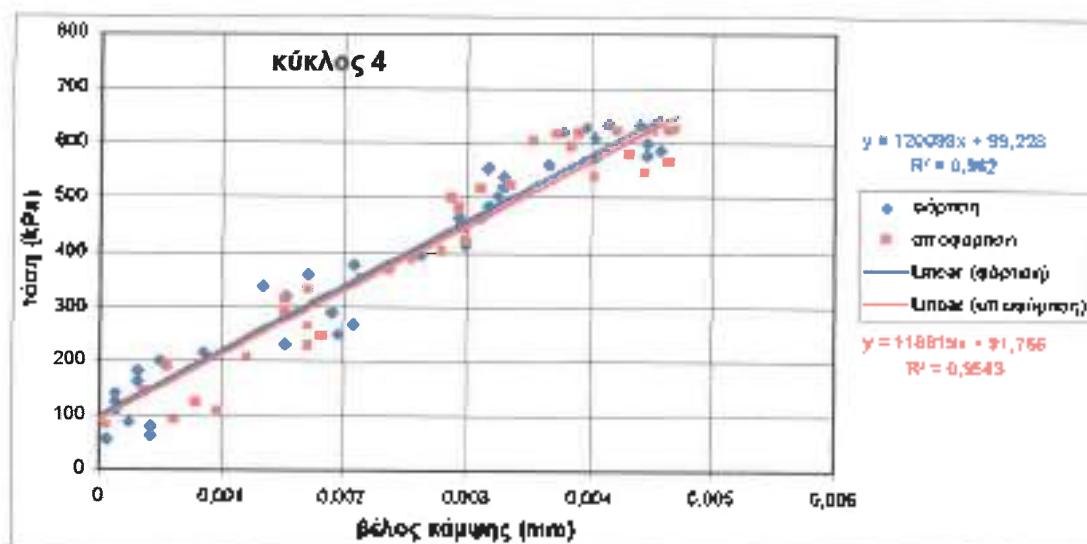
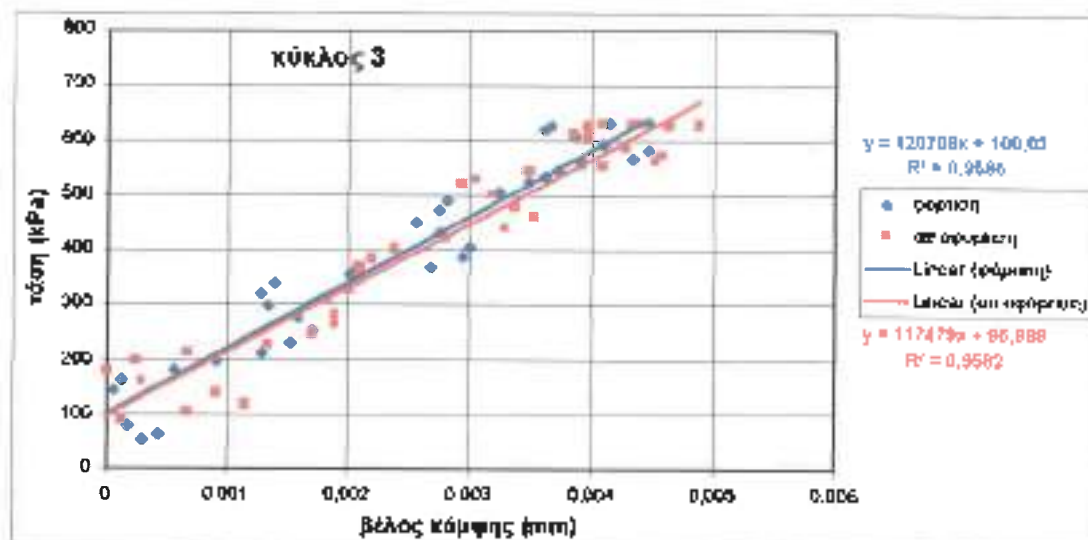
Σχήμα Γ-17: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 5 (γαλβανισμός 1% - τσιμέντο 3%)



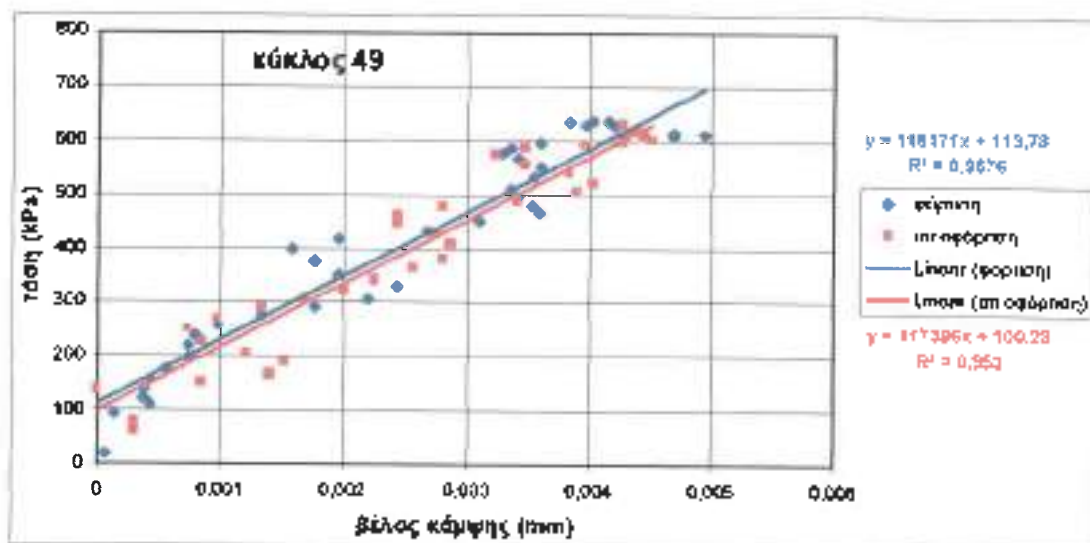
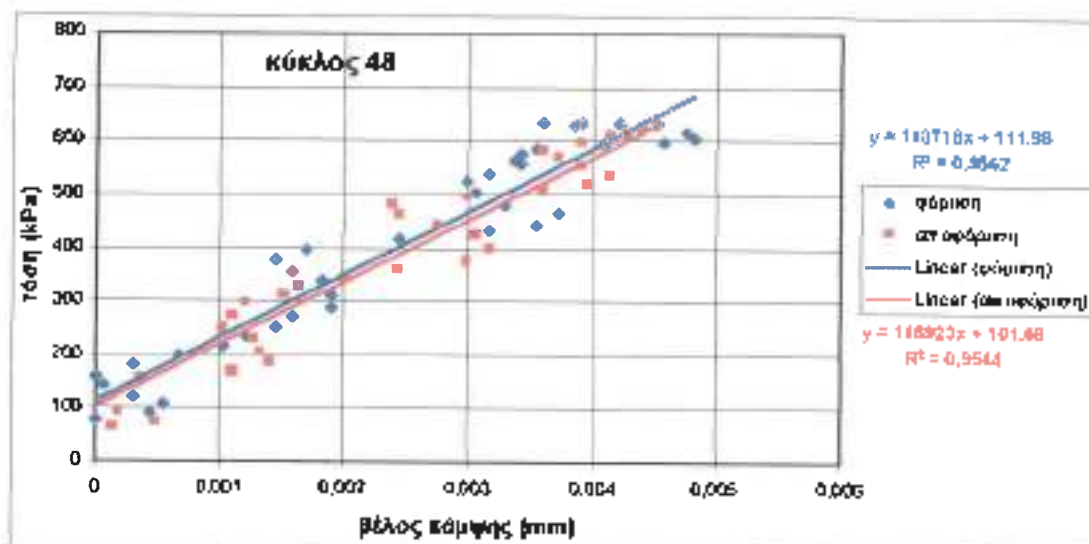
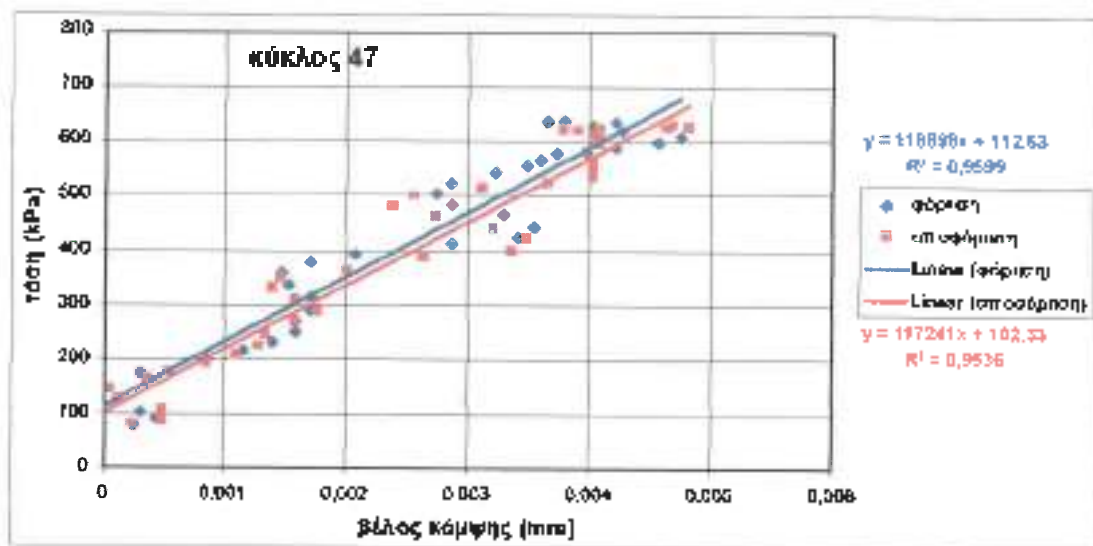
Σχήμα Γ-18: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



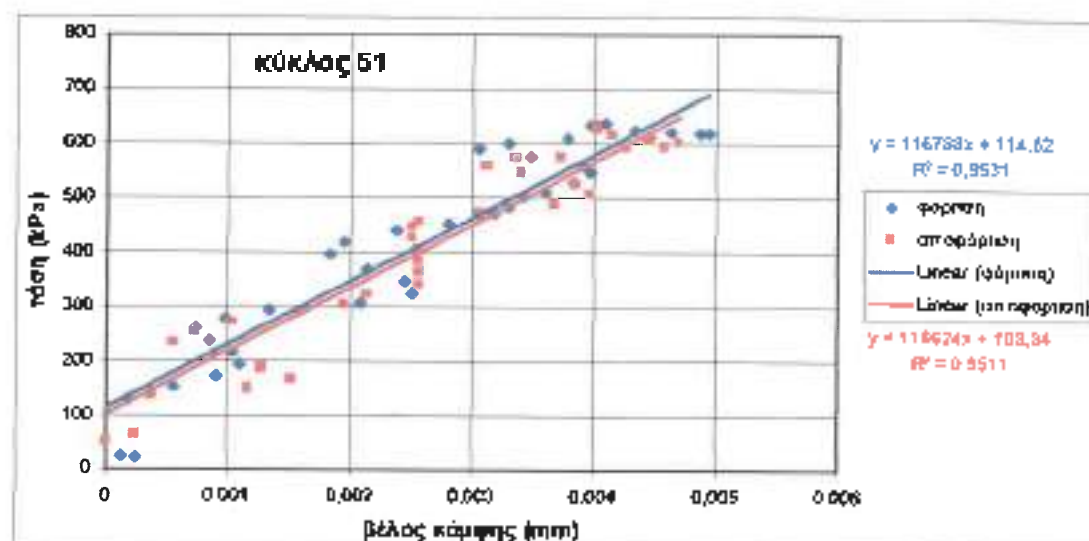
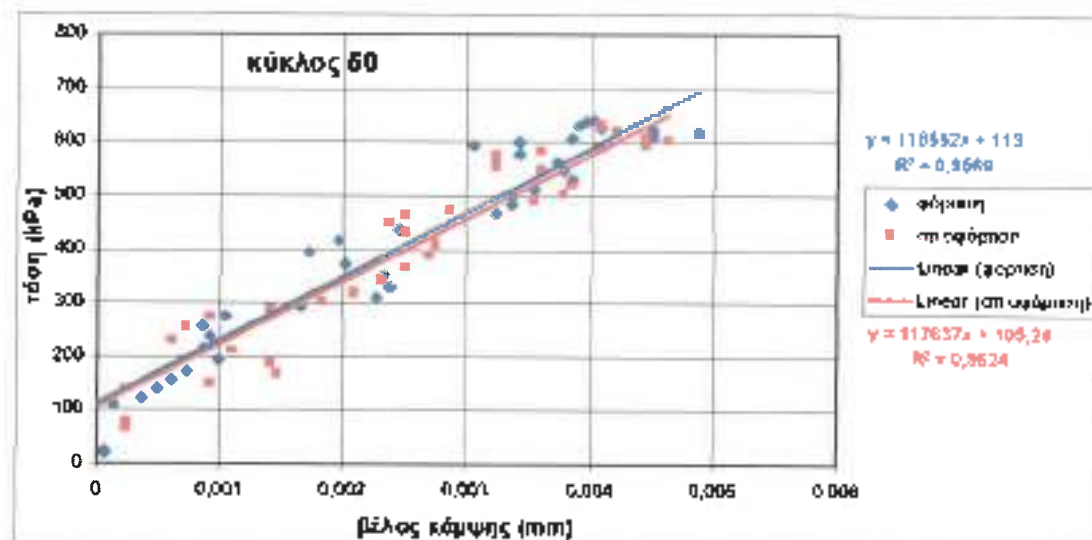
Σχήμα Γ-19: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



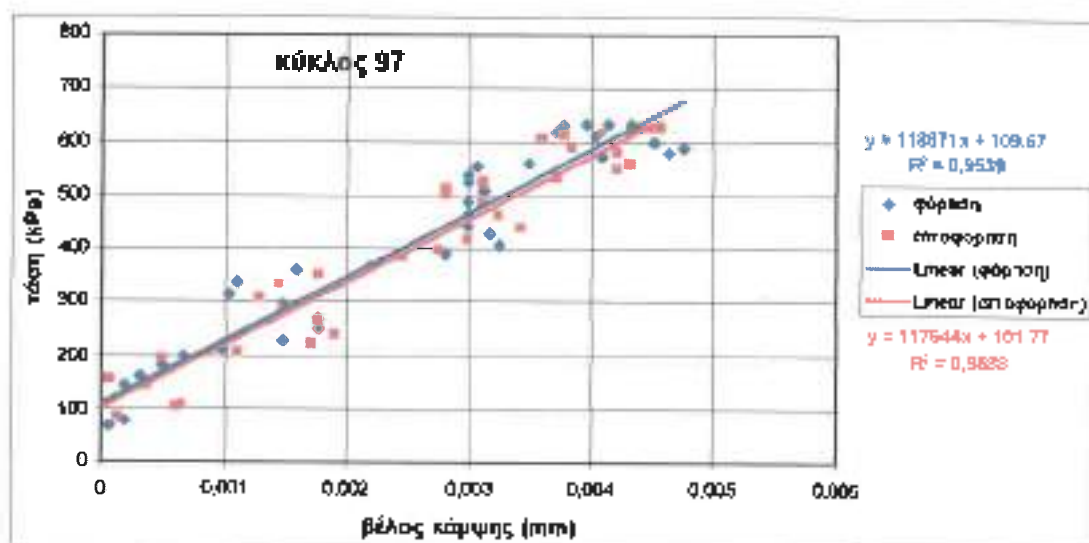
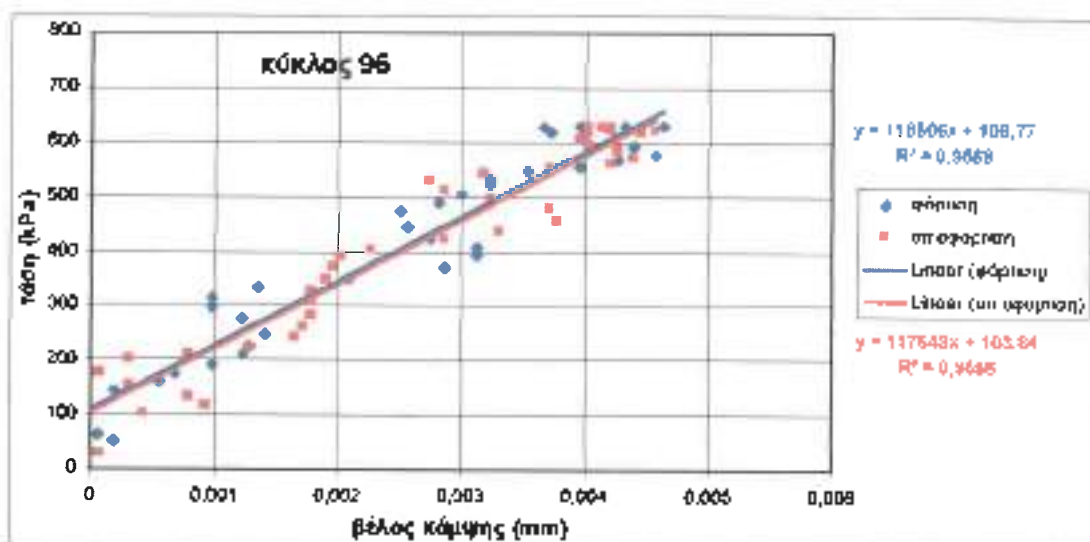
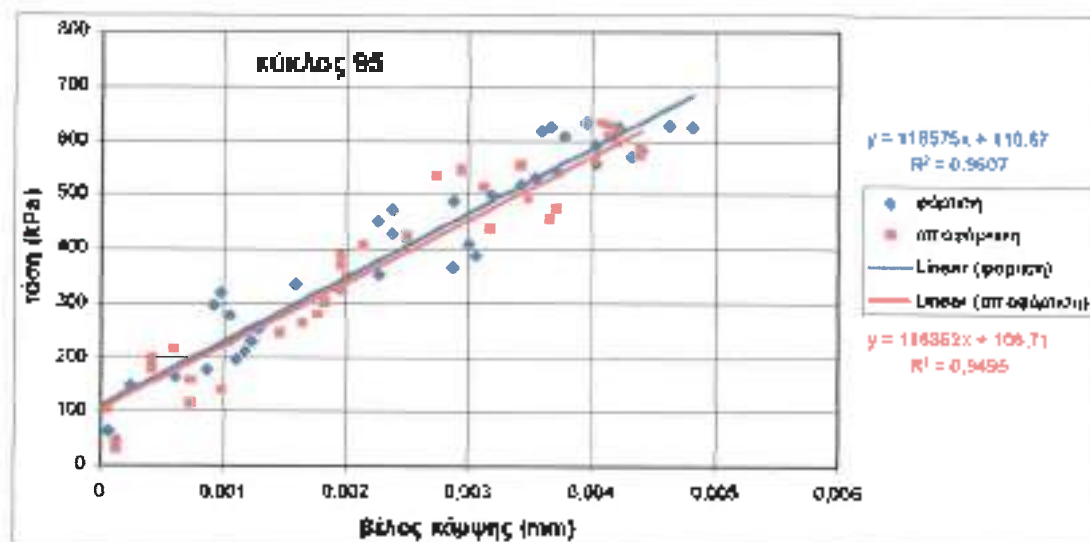
Σχήμα Γ-20: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



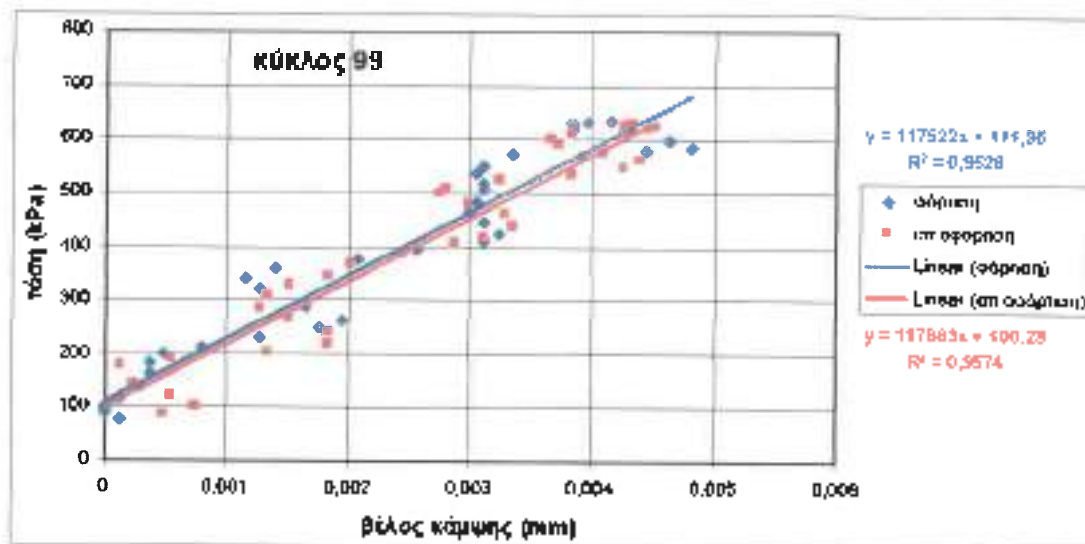
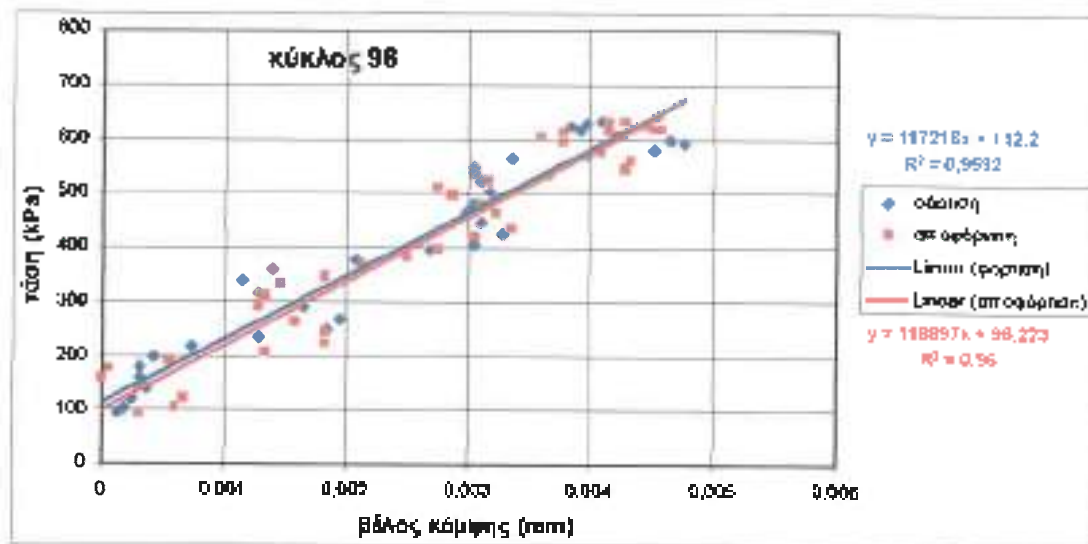
Σχήμα Γ-21: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλικές παλινδρομήσεις), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο δ (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



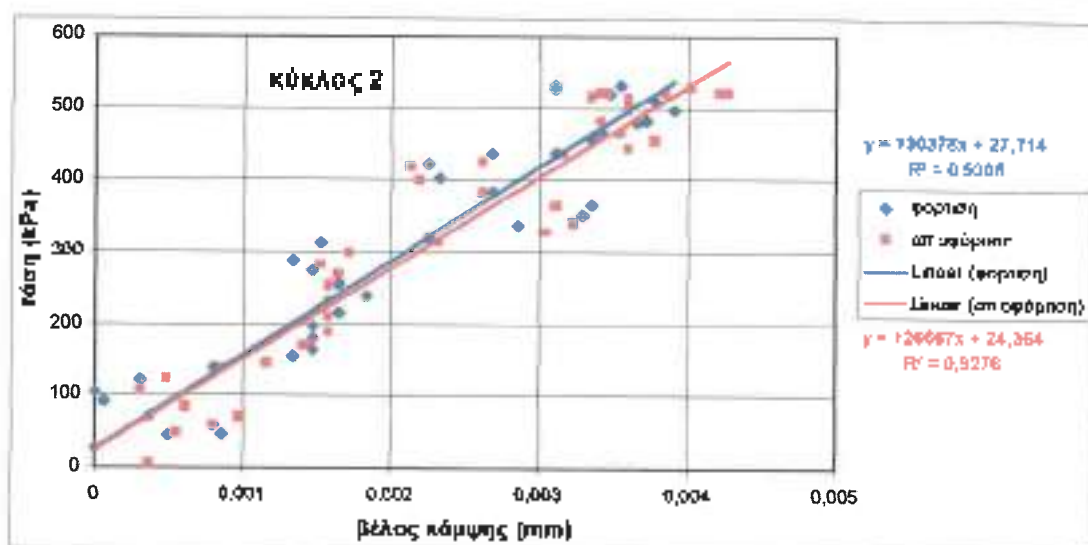
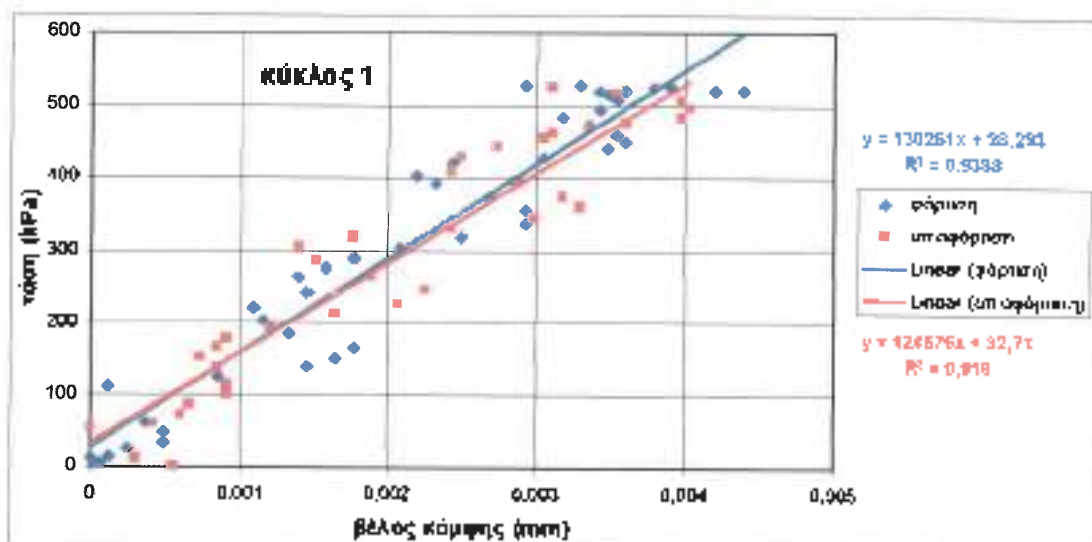
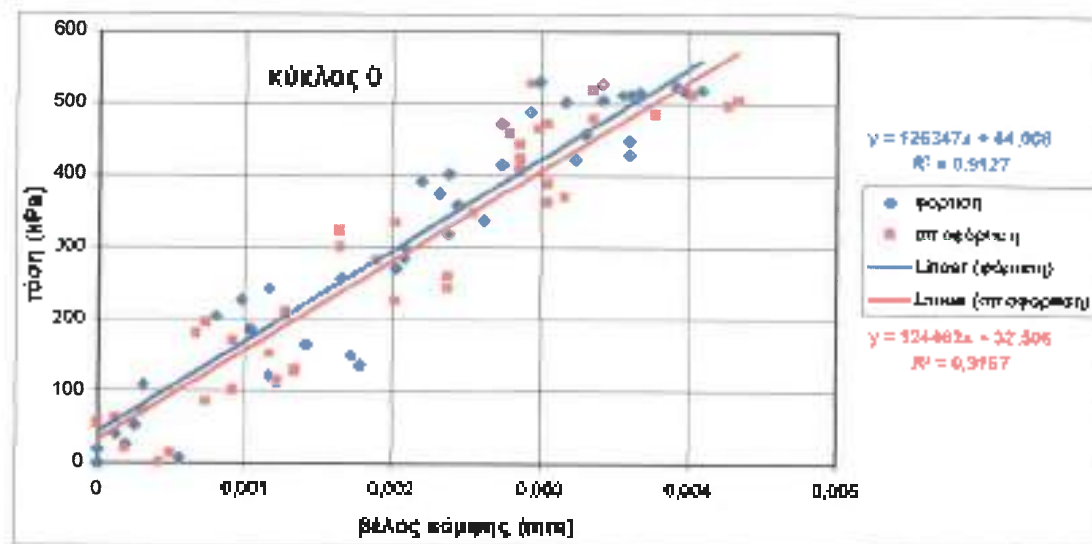
Σχήμα 5-22: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες πλάγινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



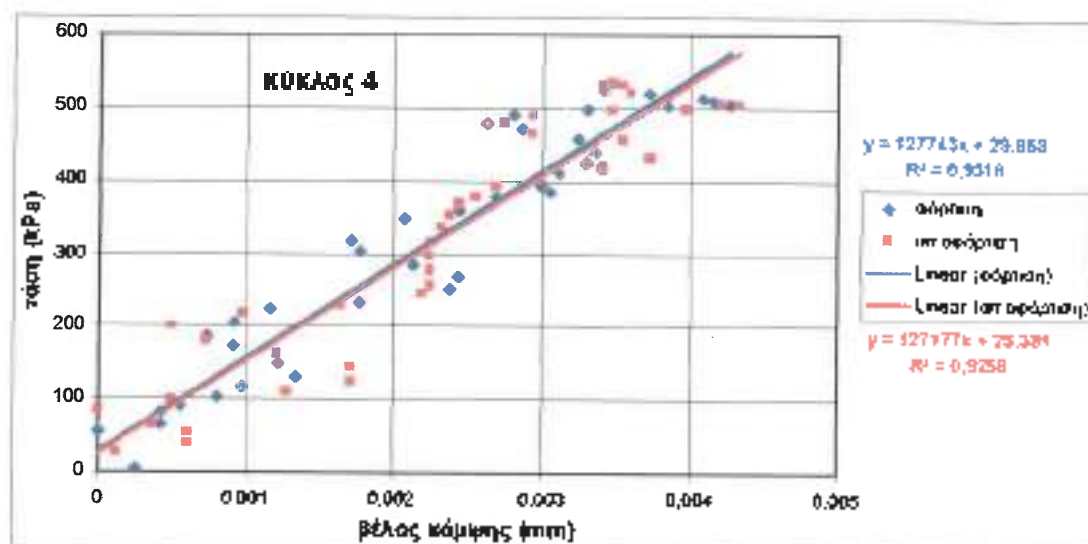
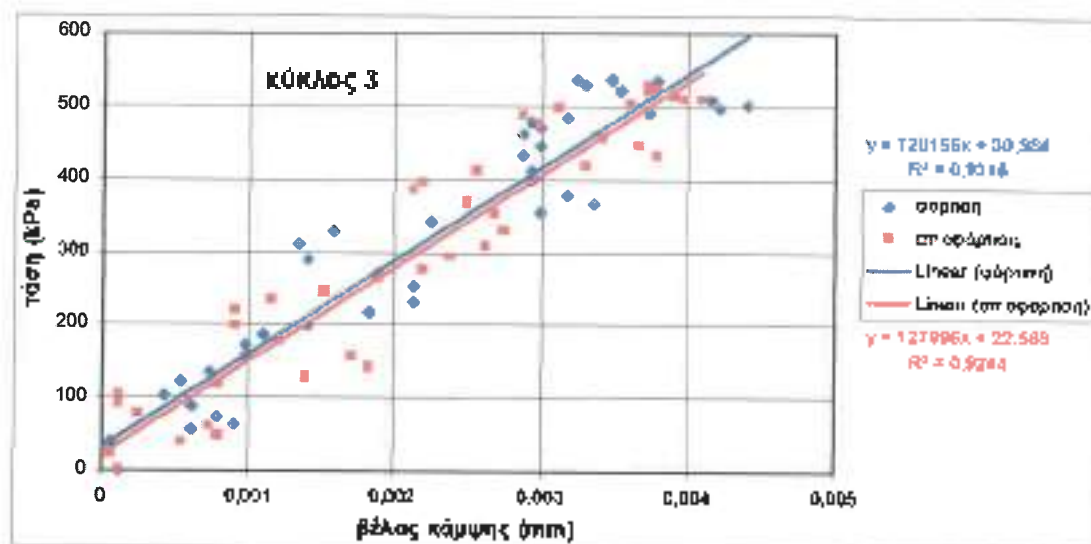
Σχήμα Γ-23: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και υποφόρτιση (επιβίες πολυνδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντου 3%)



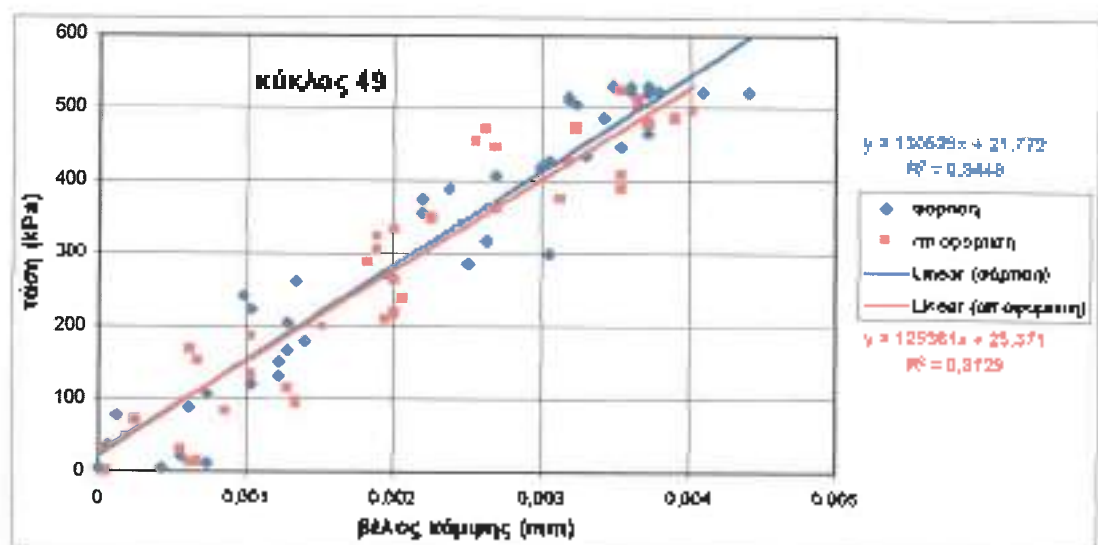
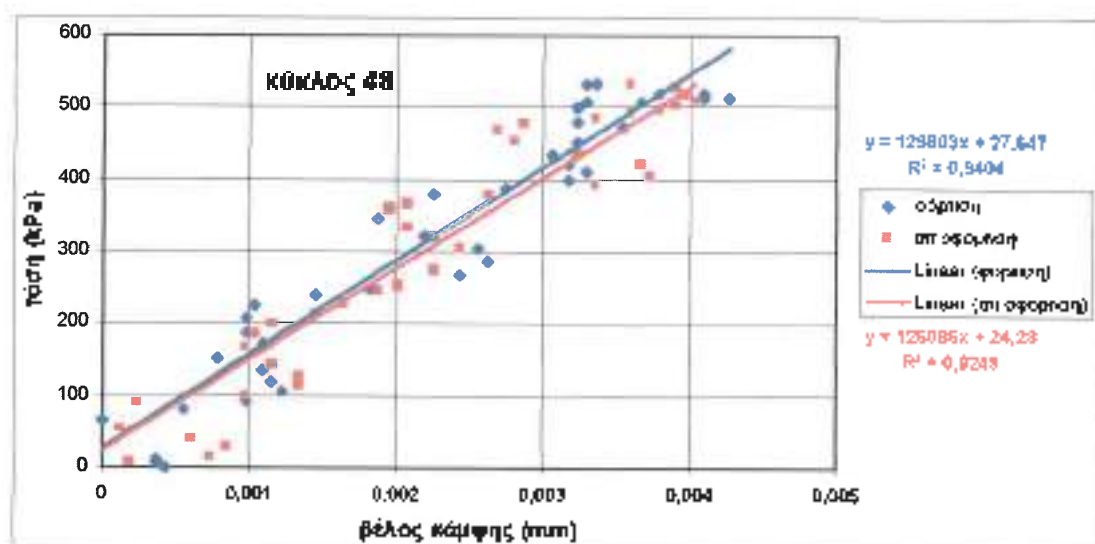
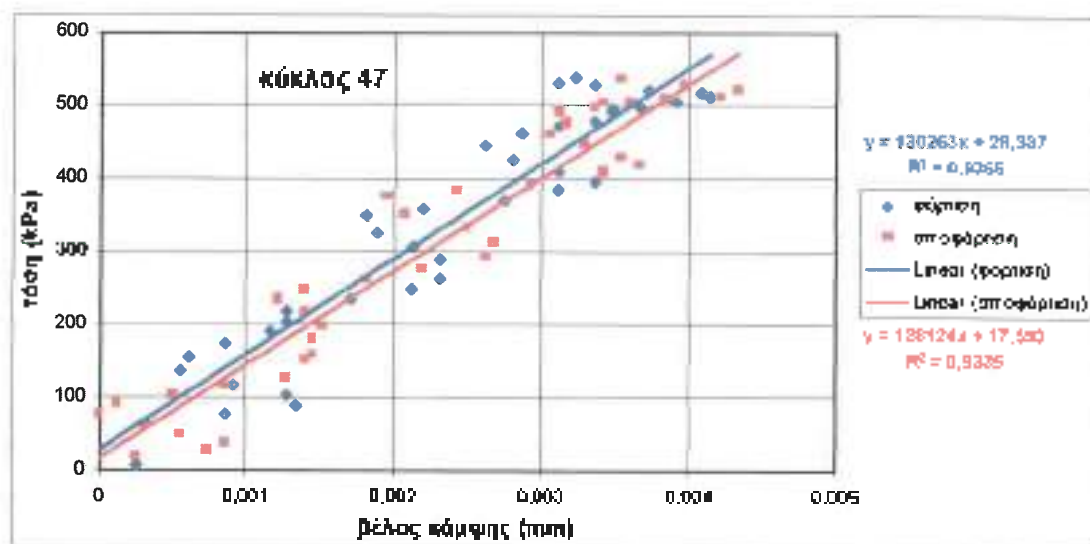
Σχήμα Γ-24: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 6 (γυάλινο 1% - τιμάντο 3%)



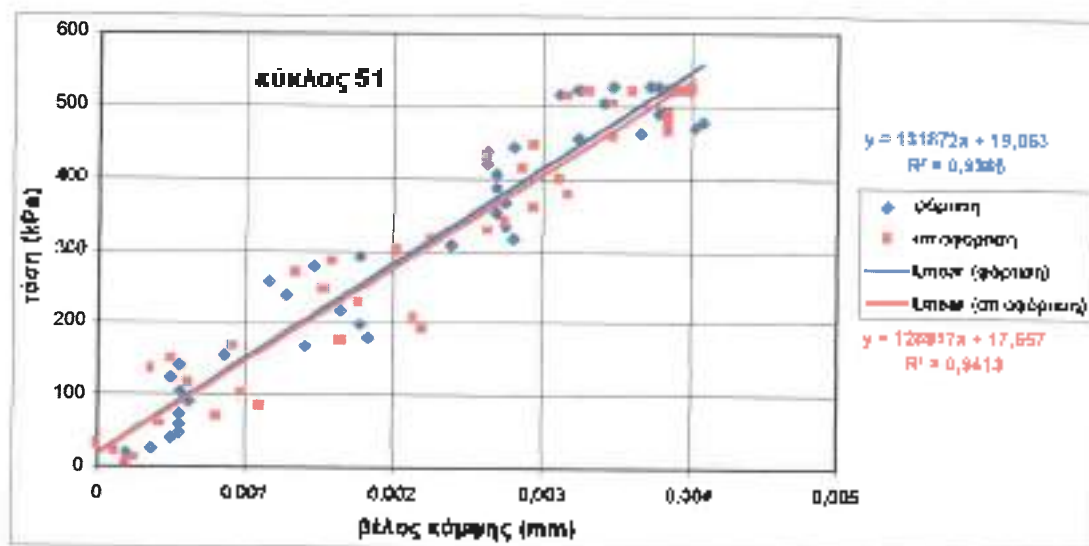
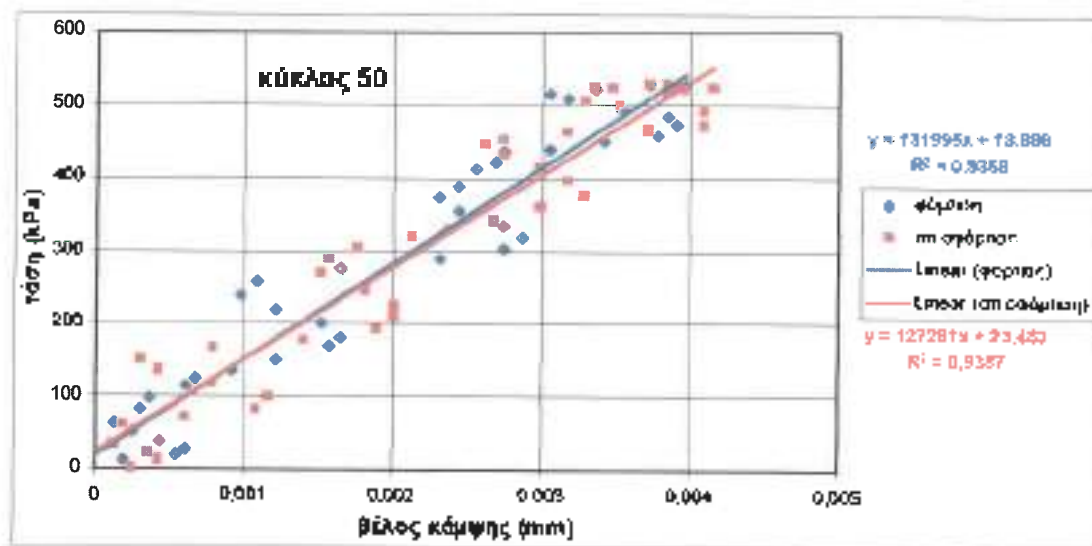
Σχήμα Γ-25: Τάση βέλος κάμψης για φορτίση και υποφόρτιση (κιθελές: πυλώνδρομησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



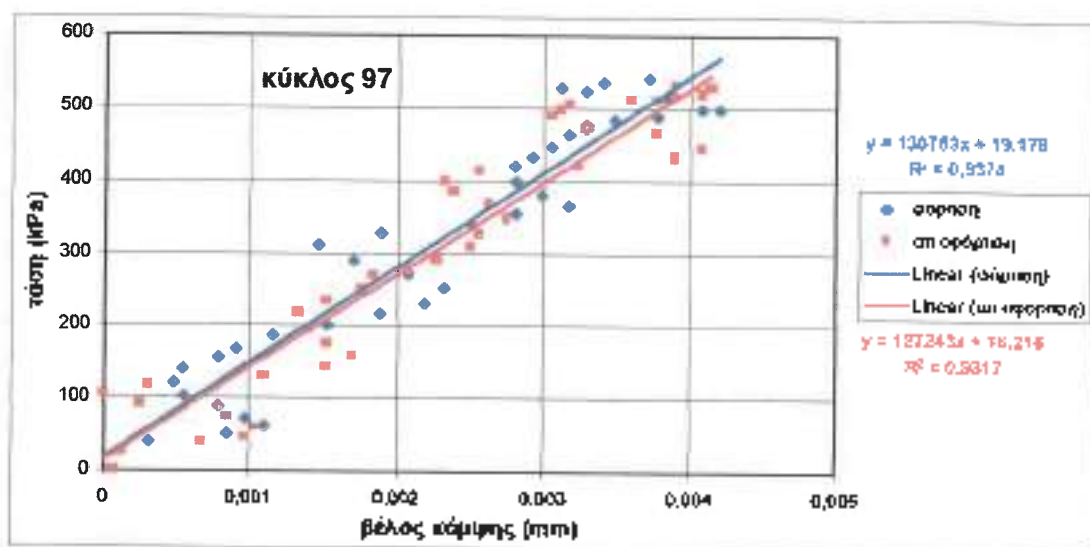
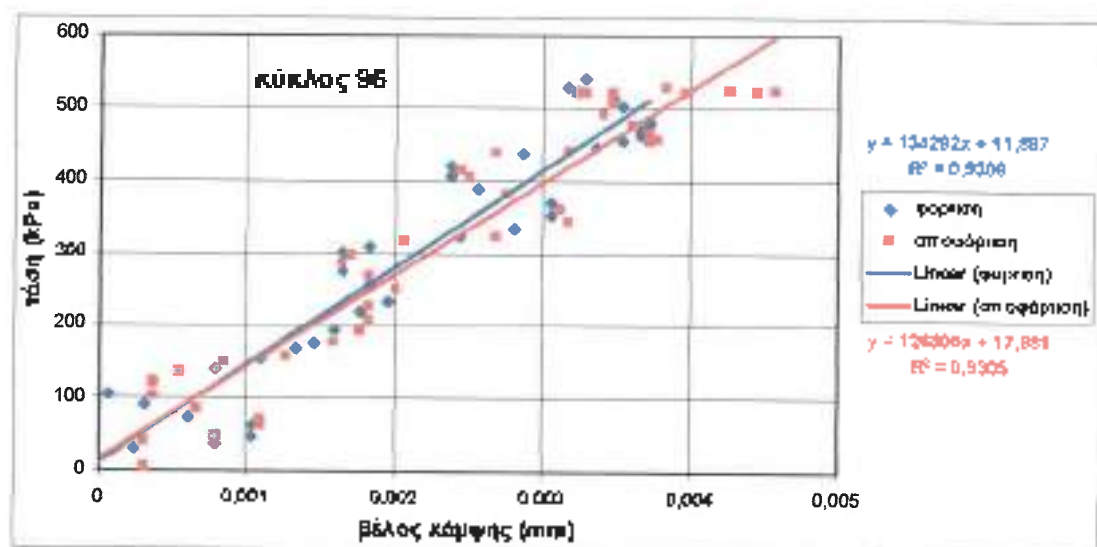
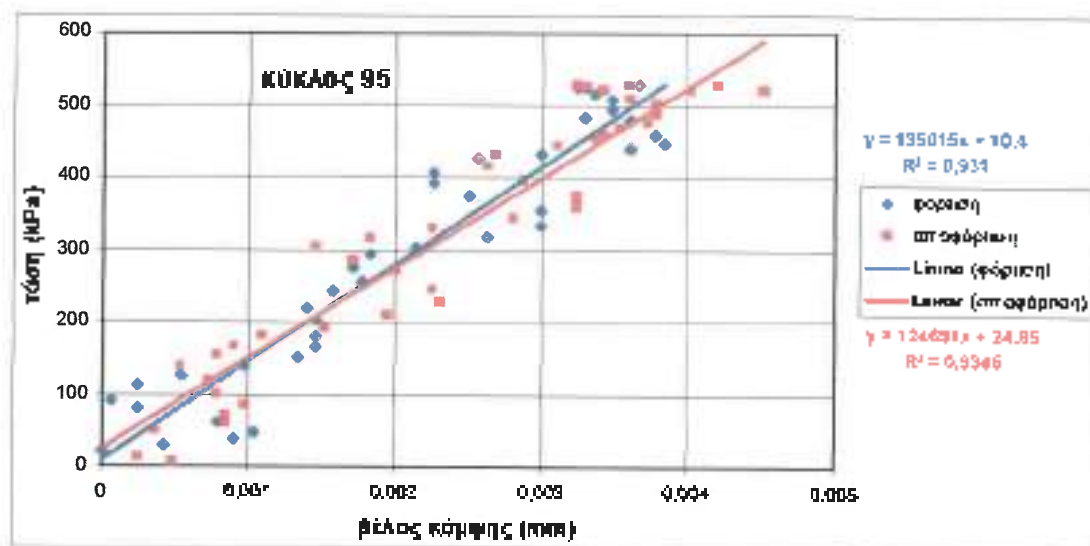
Σχήμα Γ-26: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης). κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



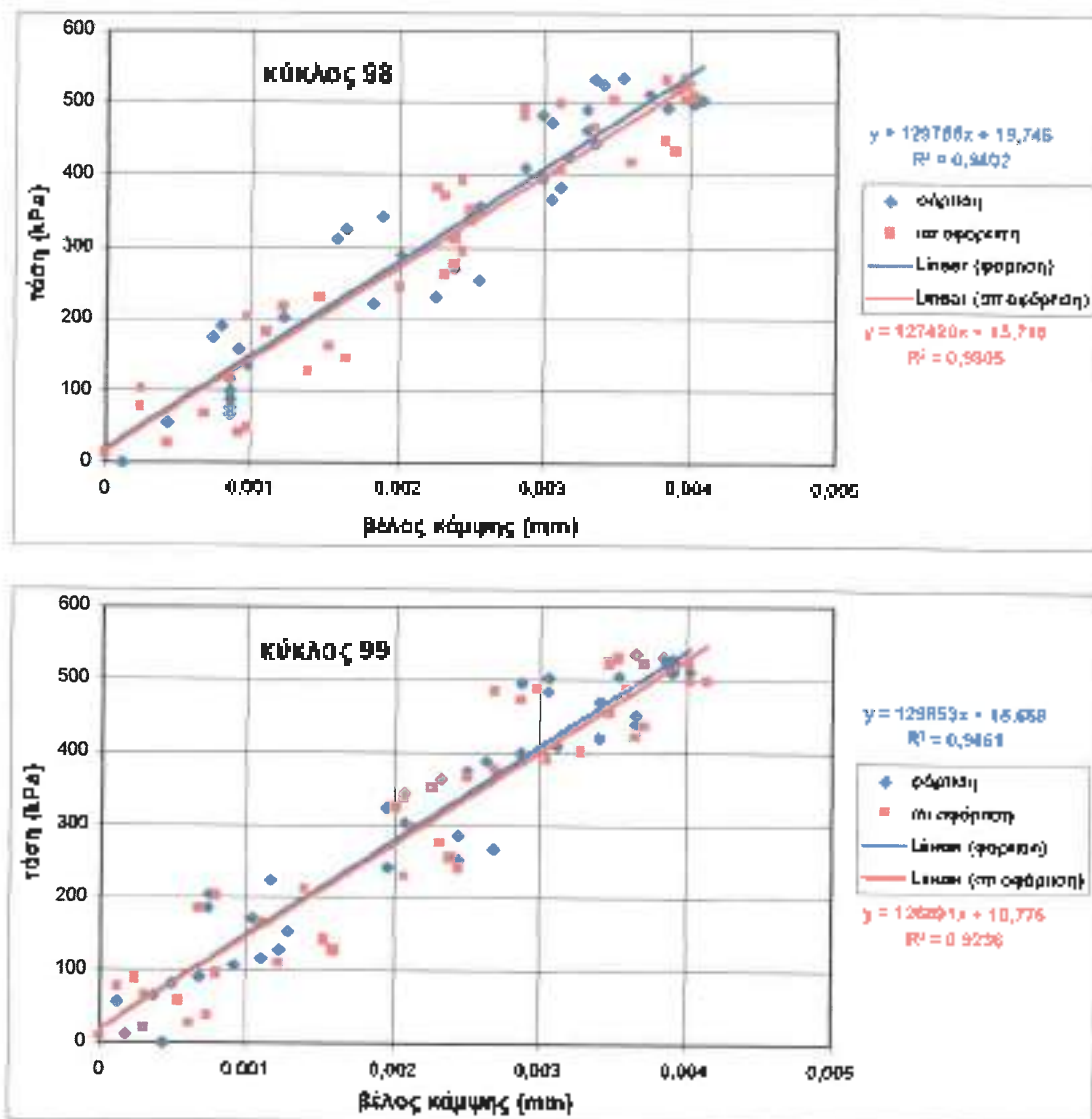
Σχήμα Γ-27: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθύως παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτομα 0% - τιμνέντο 3%)



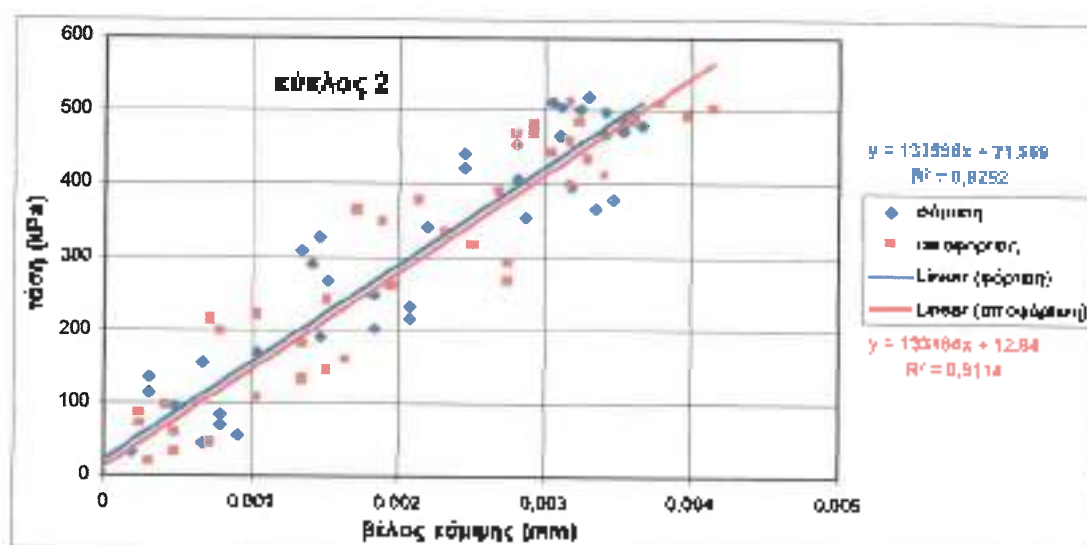
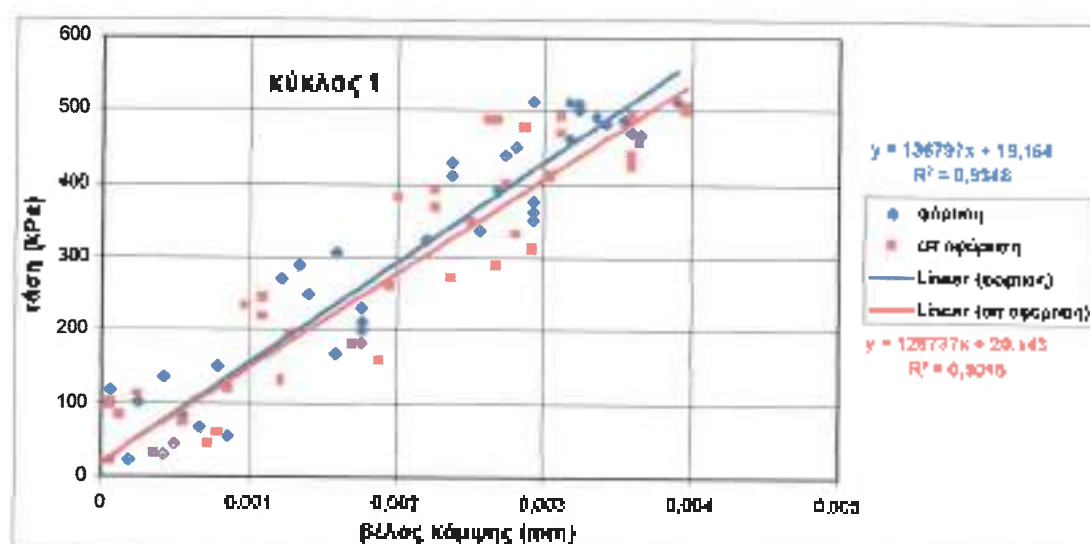
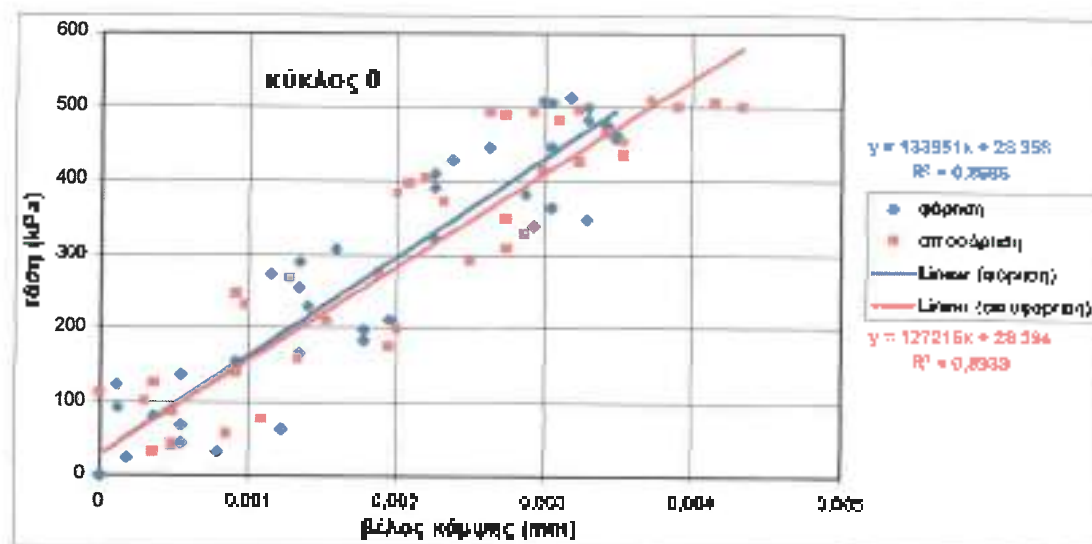
Σχήμα Γ-28: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες πύλινδρομησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 8 (γυάλινο 0% - τσιμέντο 3%)



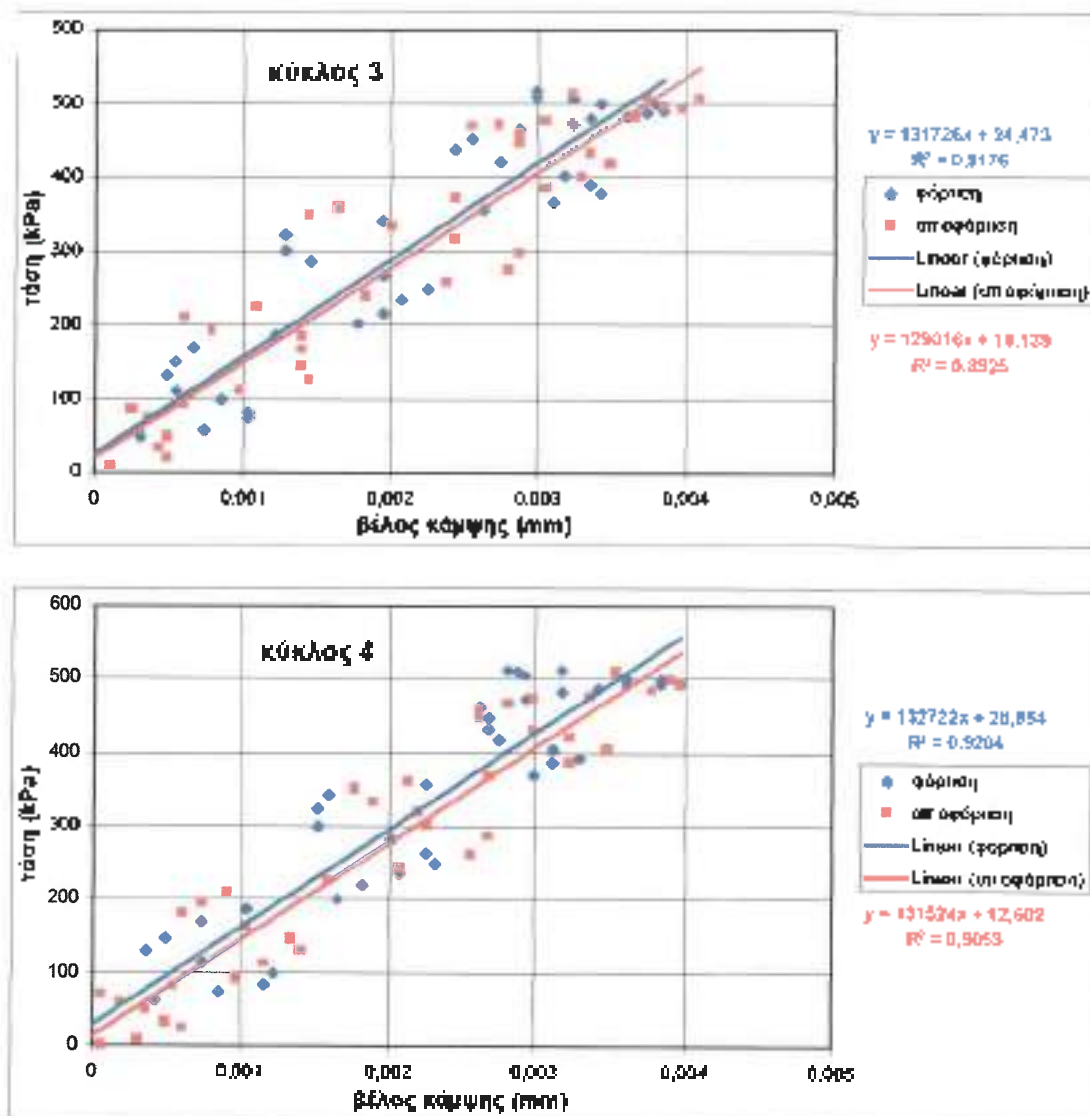
Σχήμα Γ-29: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



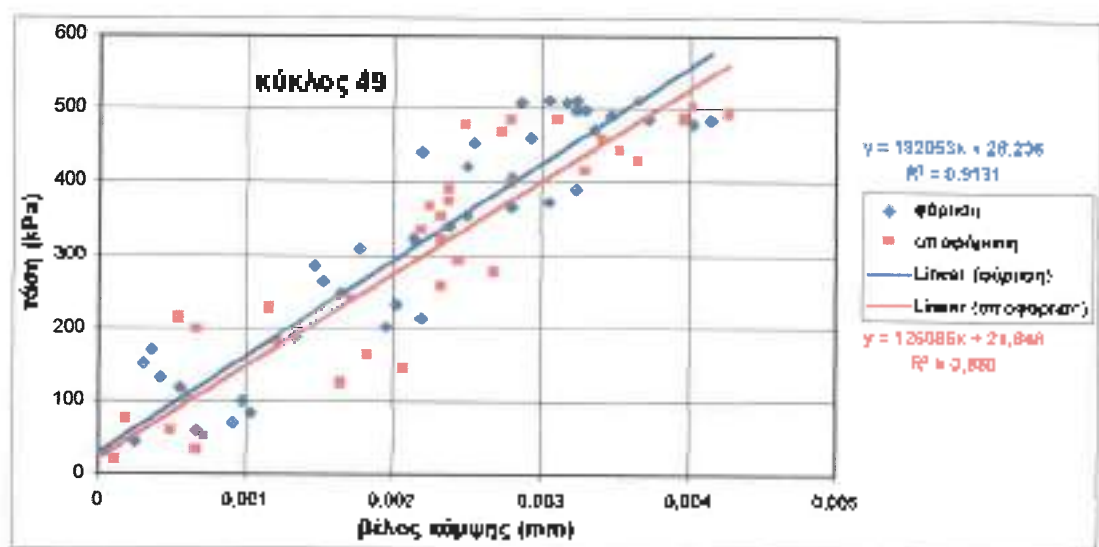
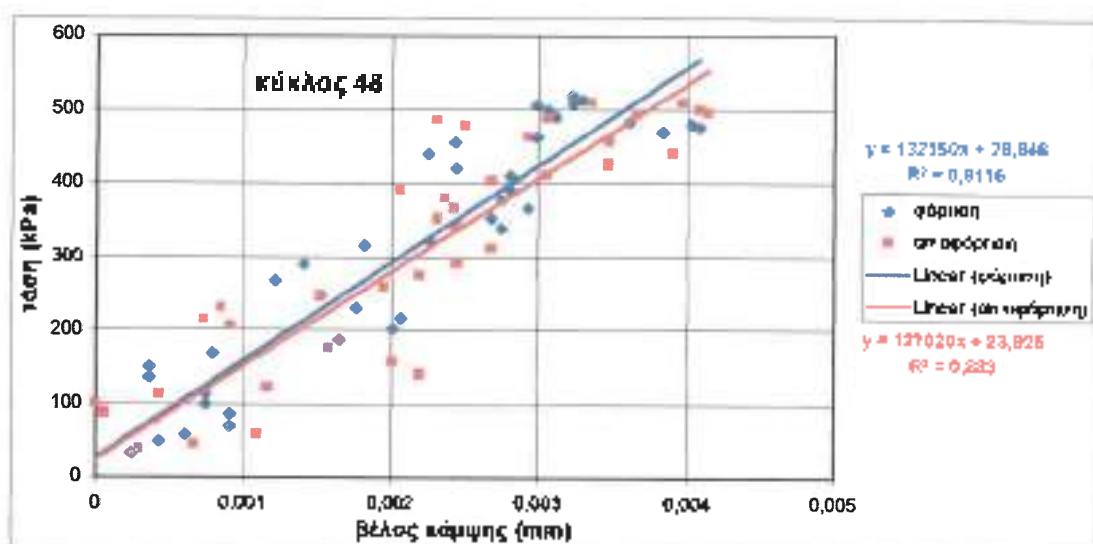
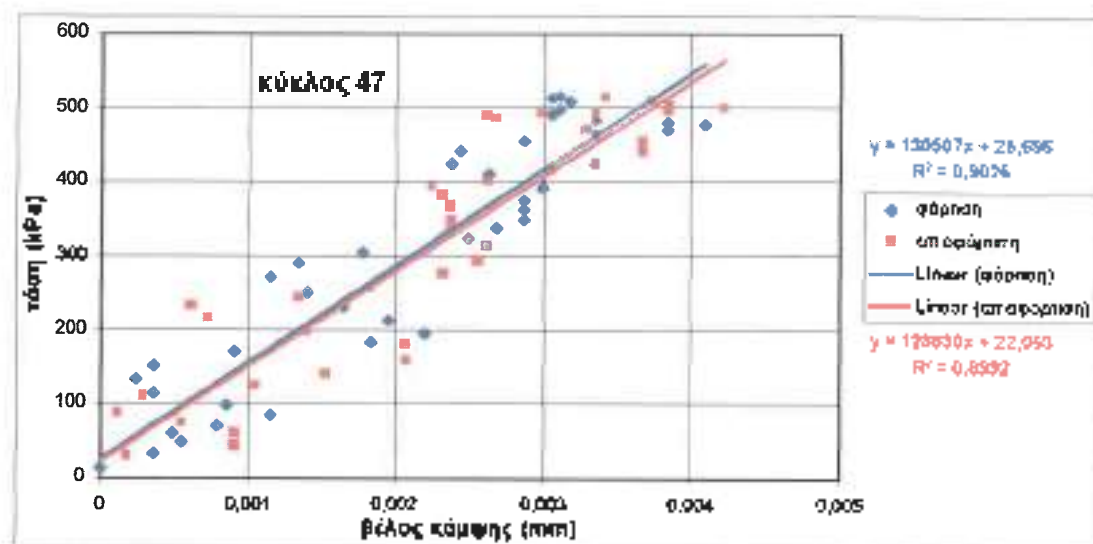
Σχήμα 1-30: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρομήσεις), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 0% - τοιμένο 3%)



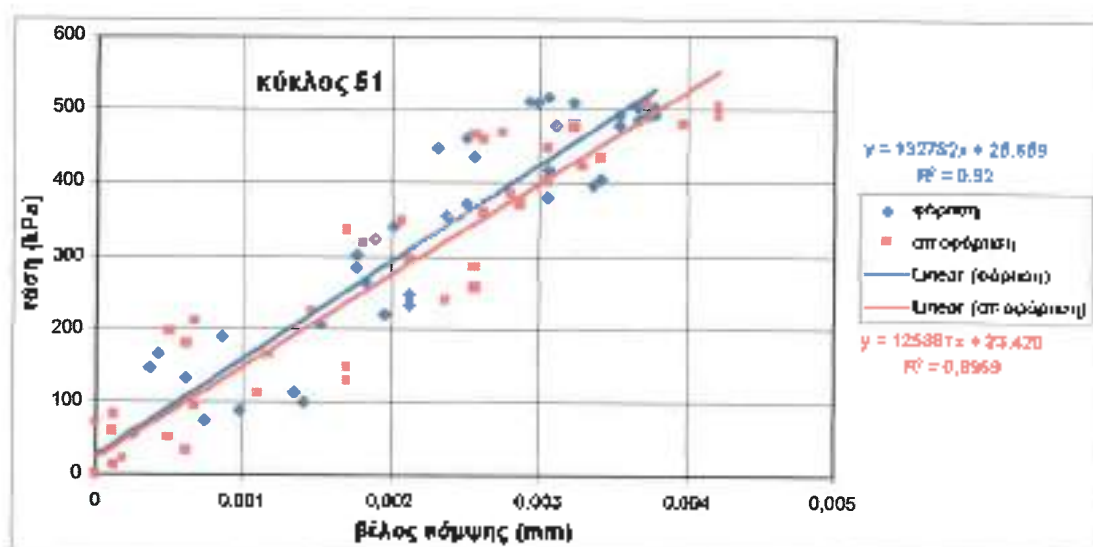
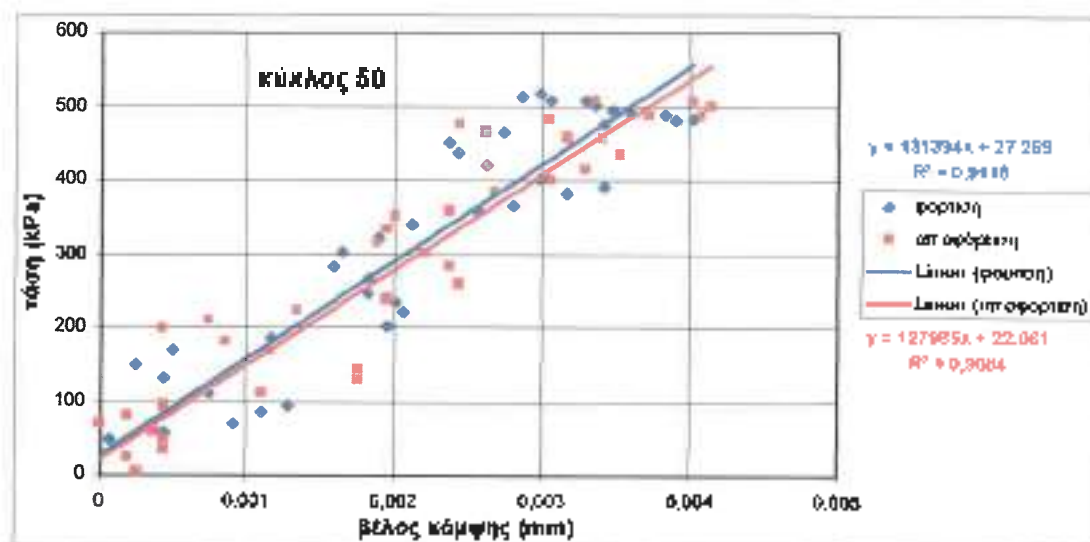
Σχήμα Γ-31: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (επόμειας κυλινδρική), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



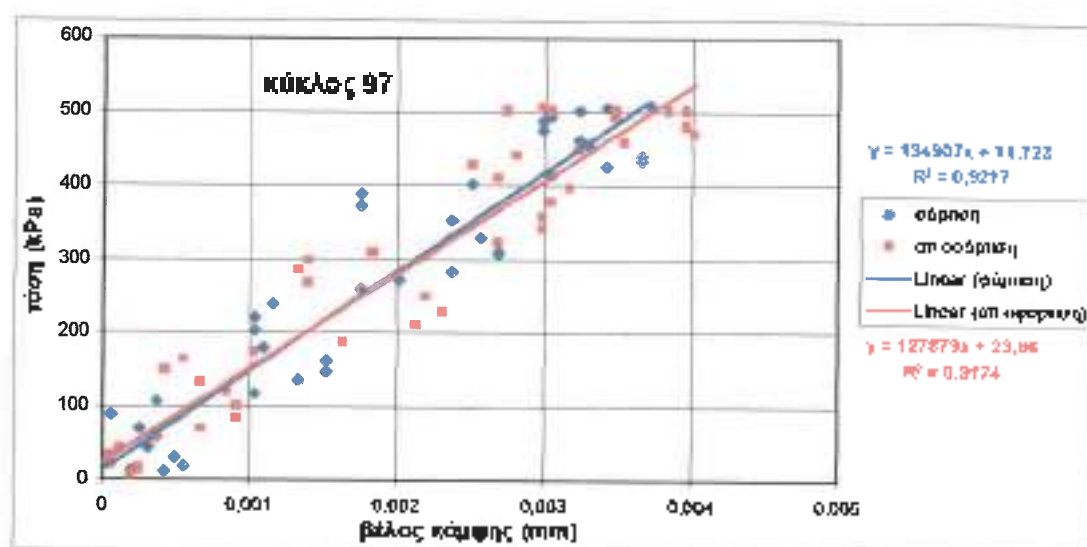
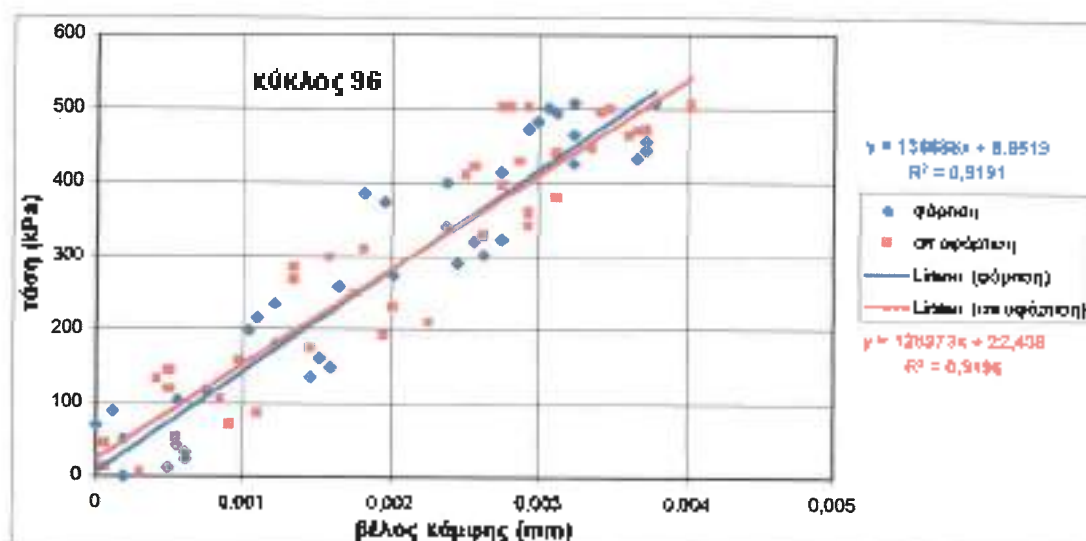
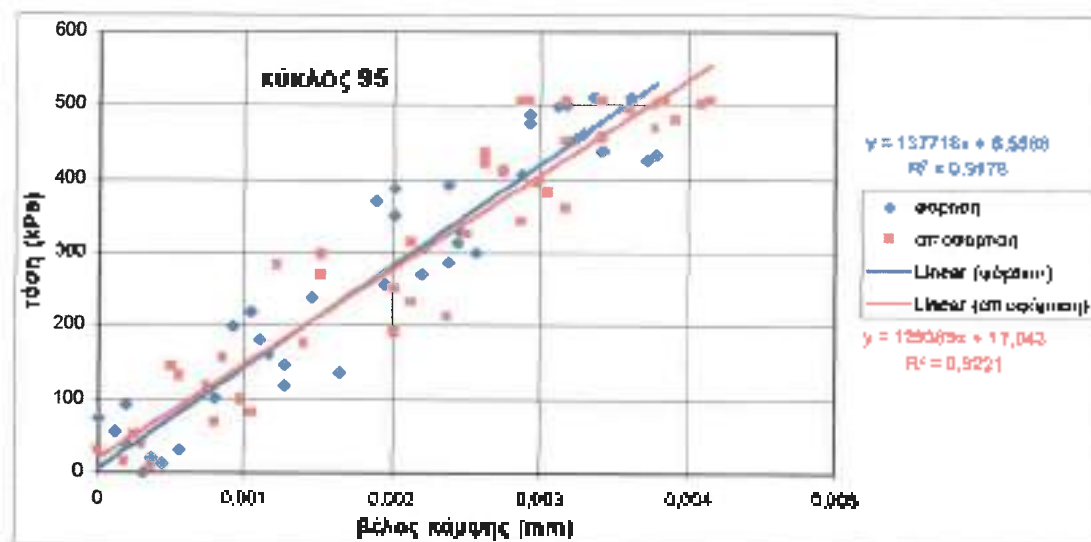
Σχήμα Γ-32: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



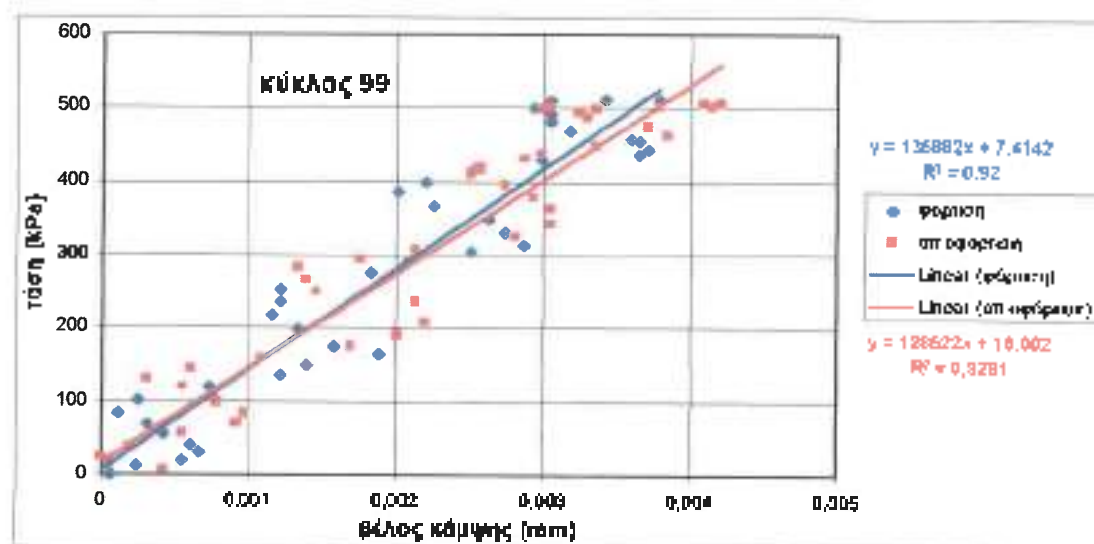
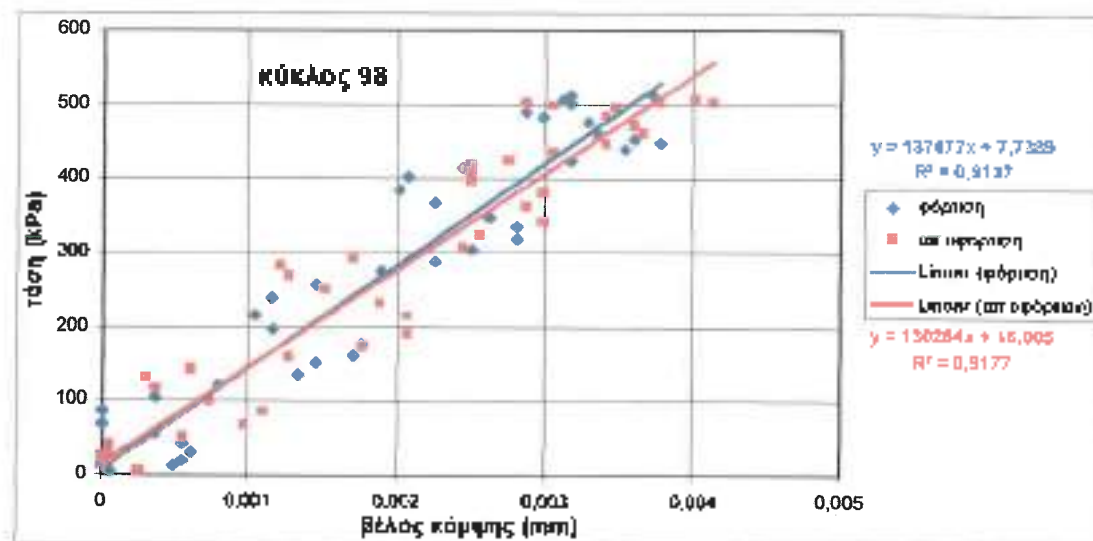
Σχήμα Π-33: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 1% + τσιμέντο 3%)



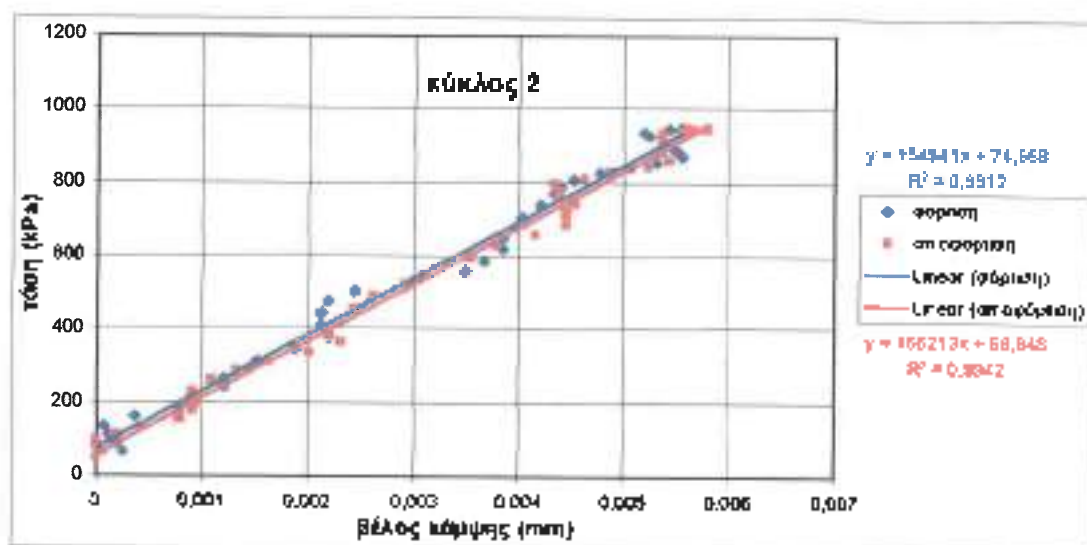
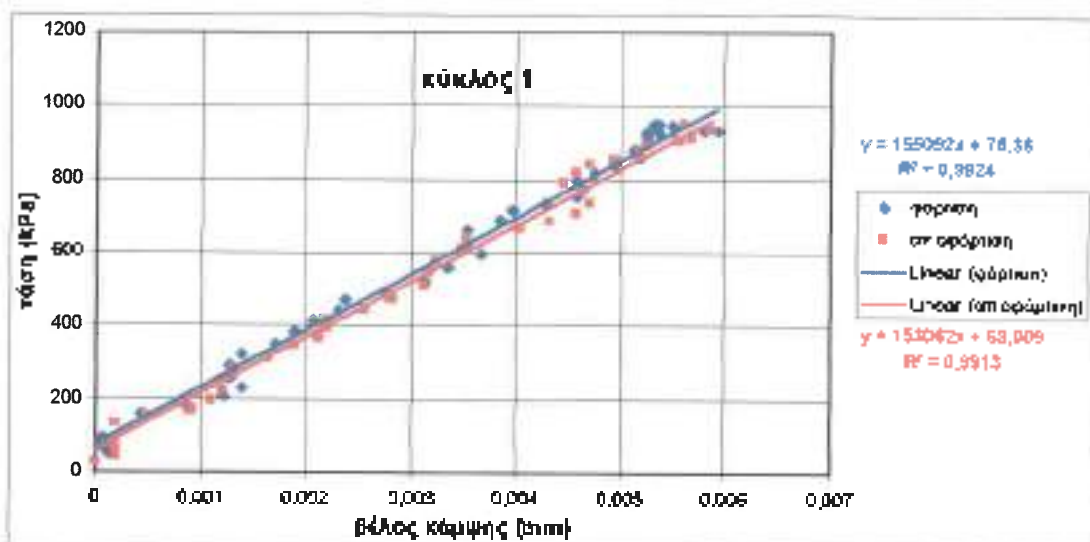
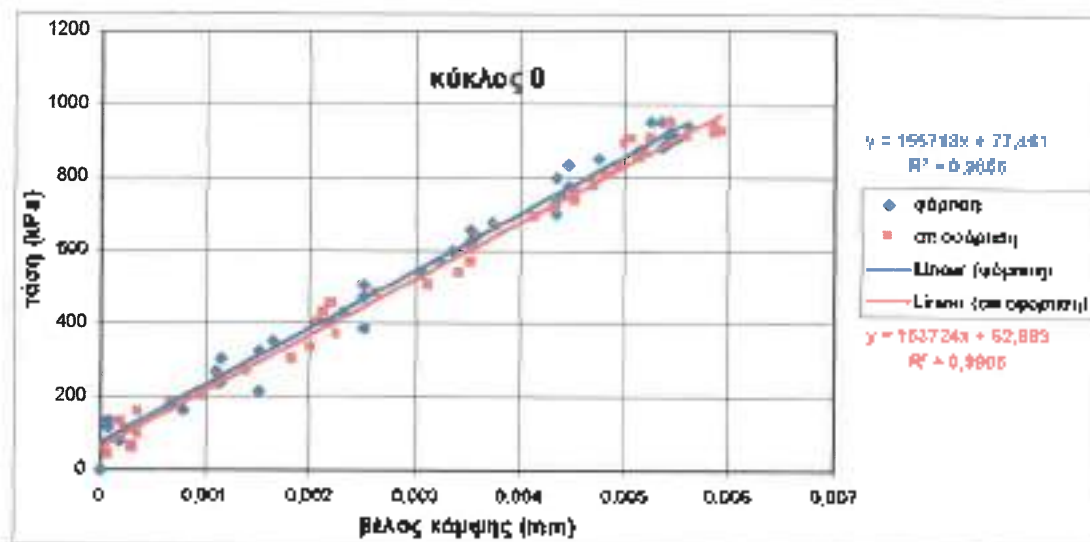
Σχήμα Γ-34: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες πολλυδρόμησης). κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τοιμίντο 3%)



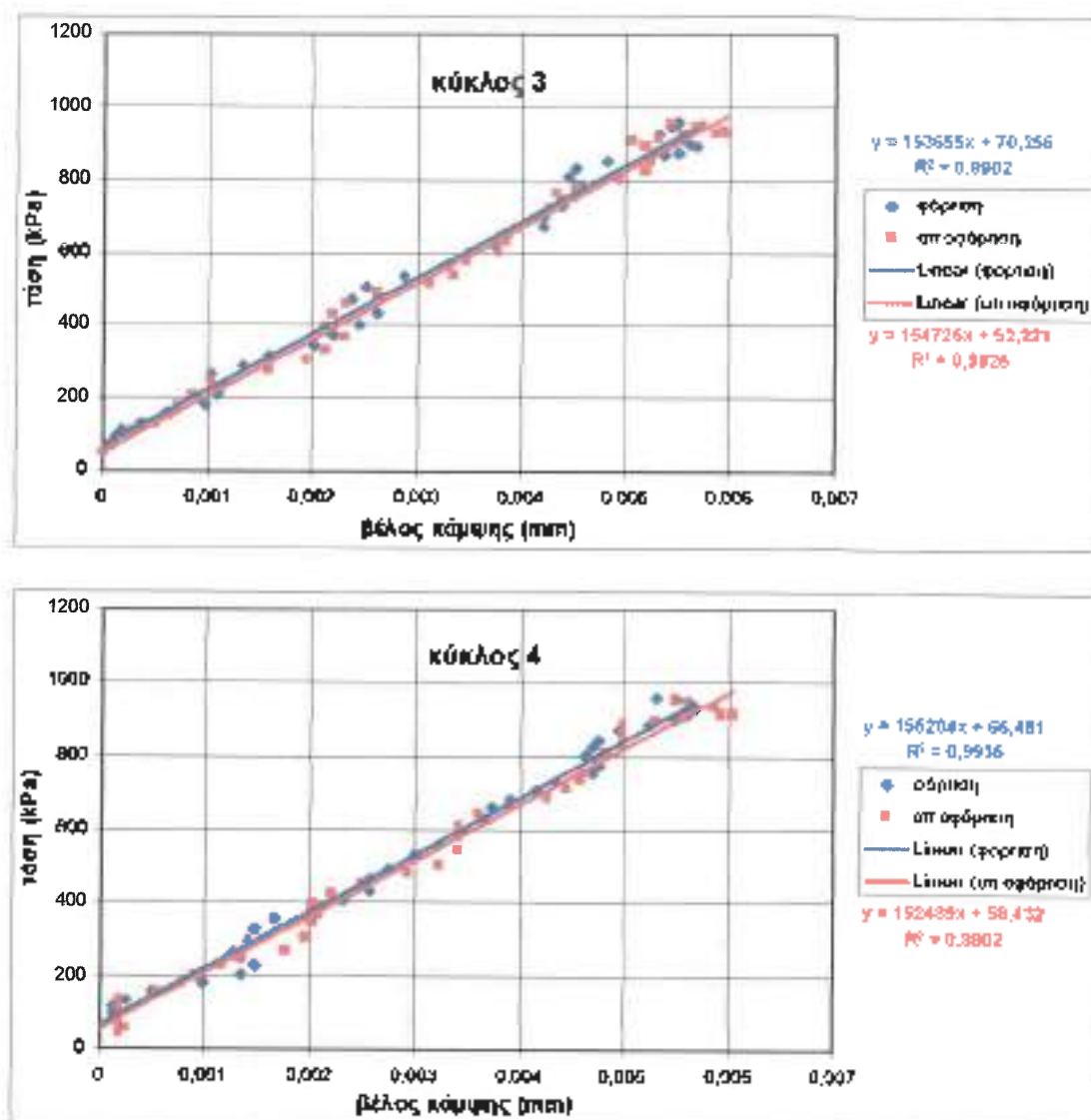
Σχήμα Γ-35: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρομησης). κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 9 (γαλάντασμα 0% + τσιμέντο 3%)



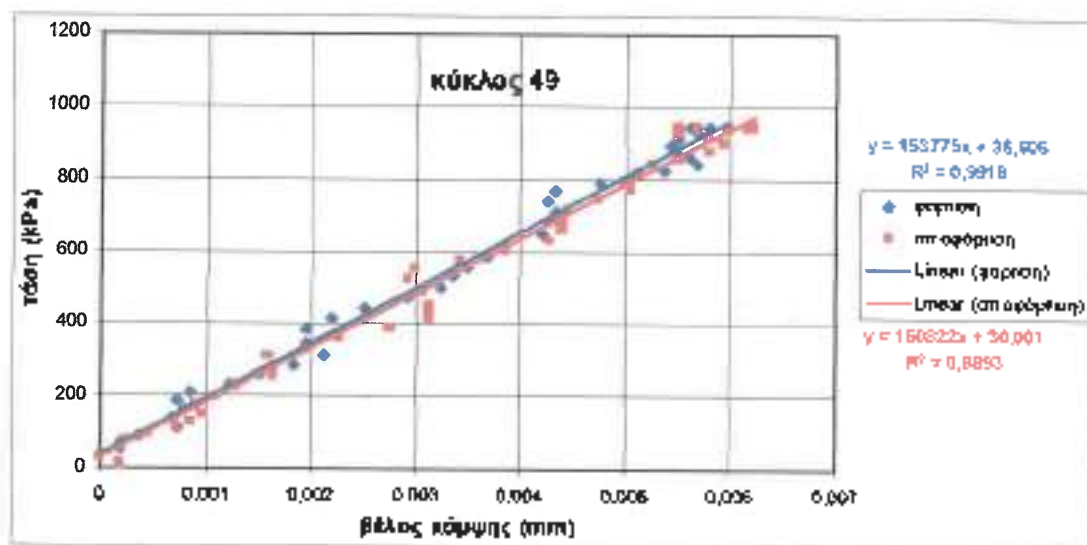
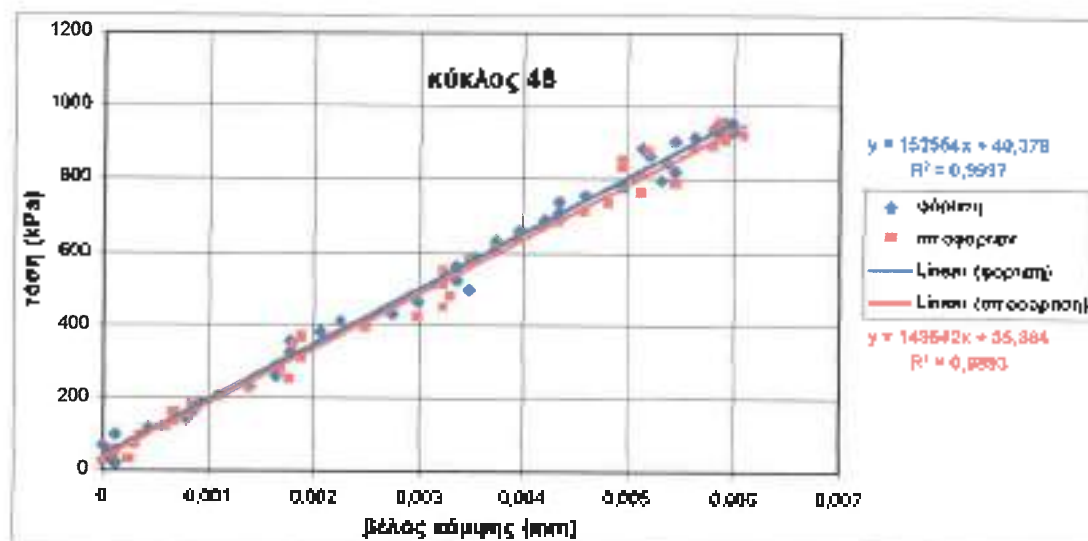
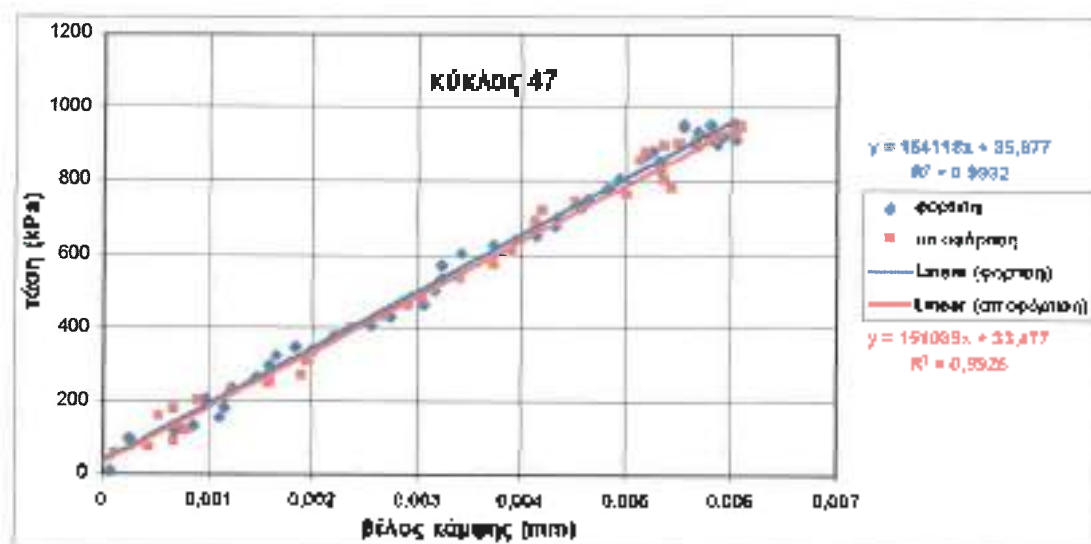
Σχήμα Γ-36: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



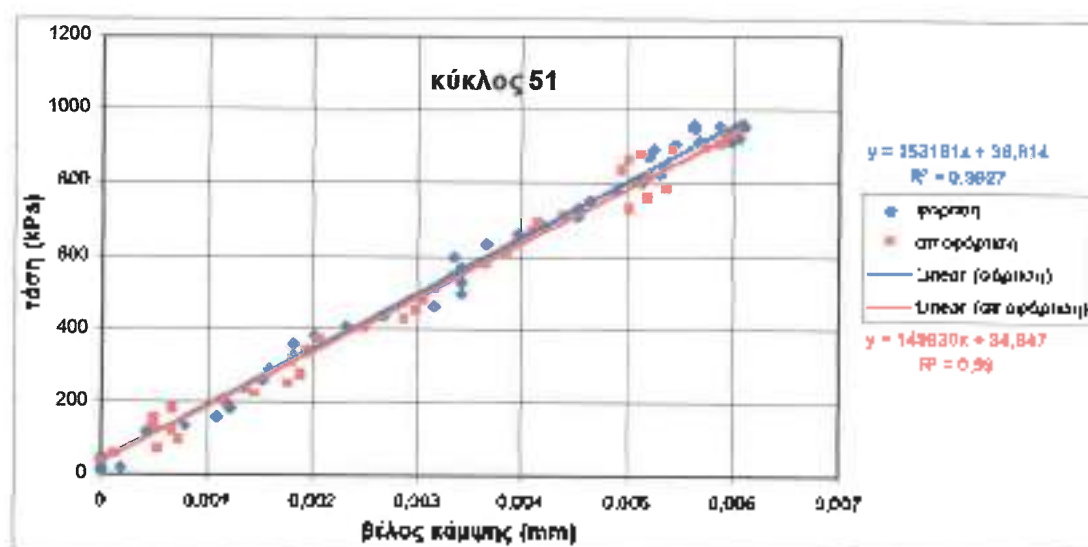
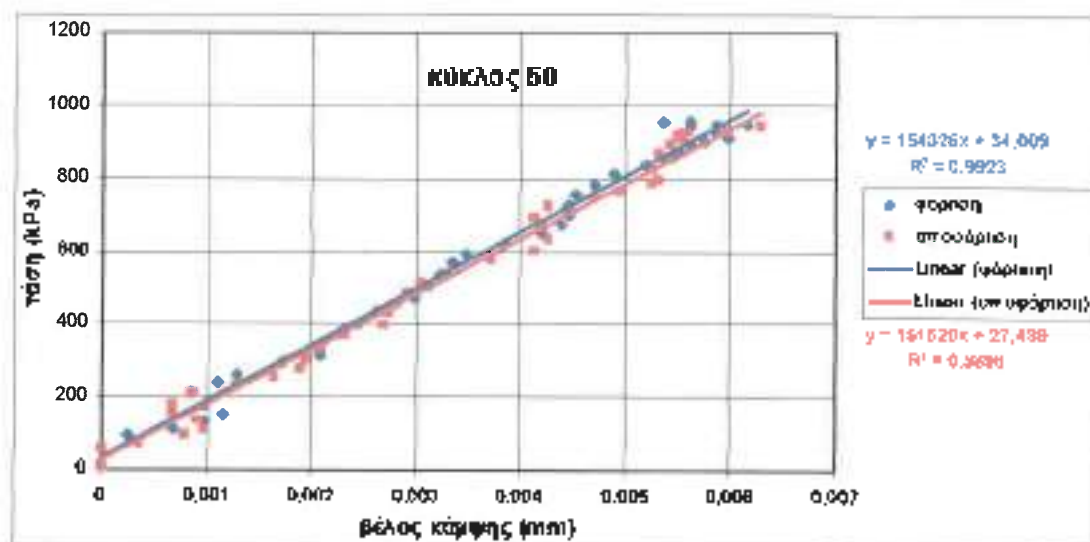
Σχήμα Γ-37: Γάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



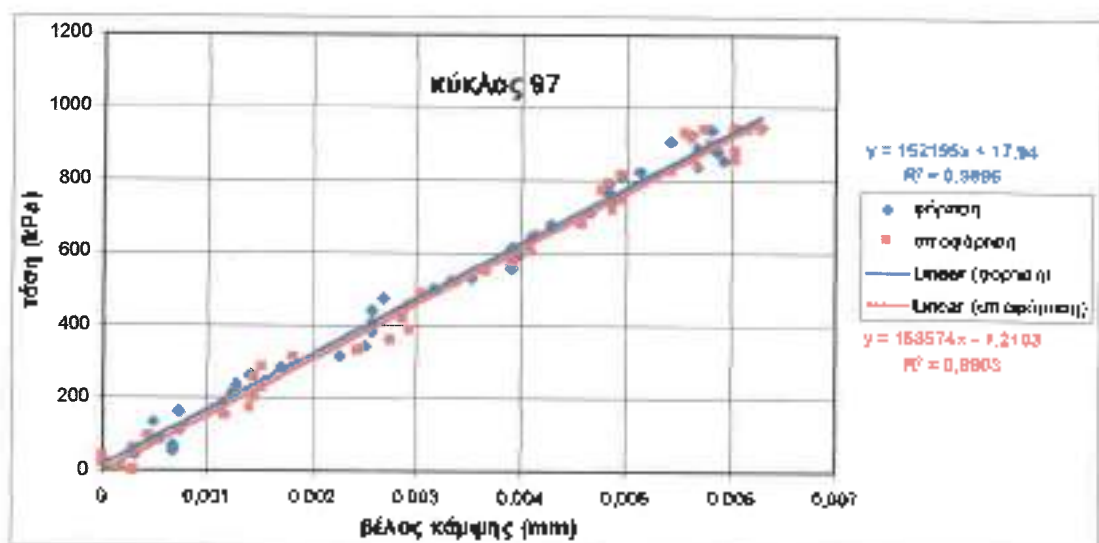
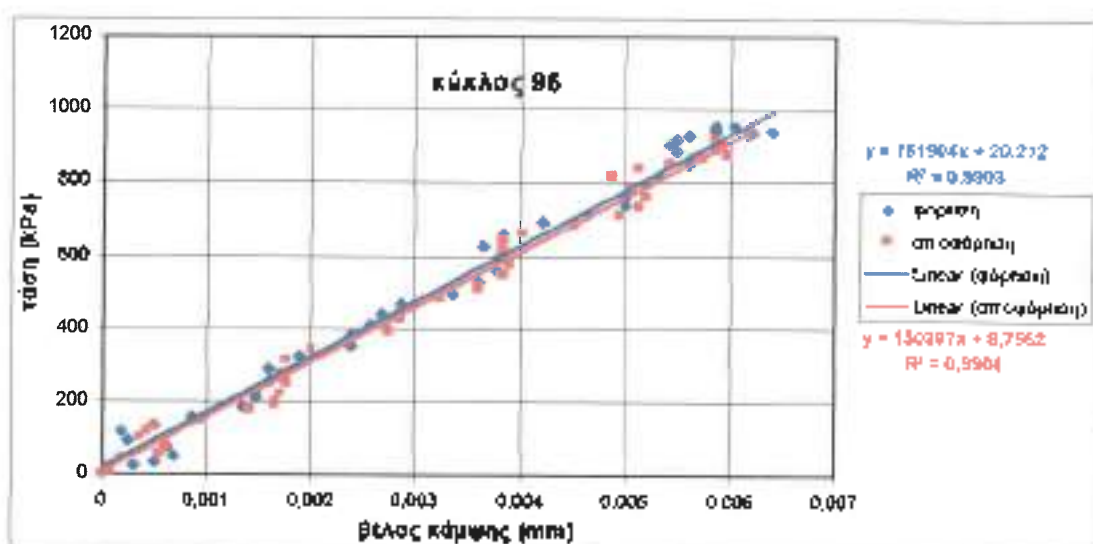
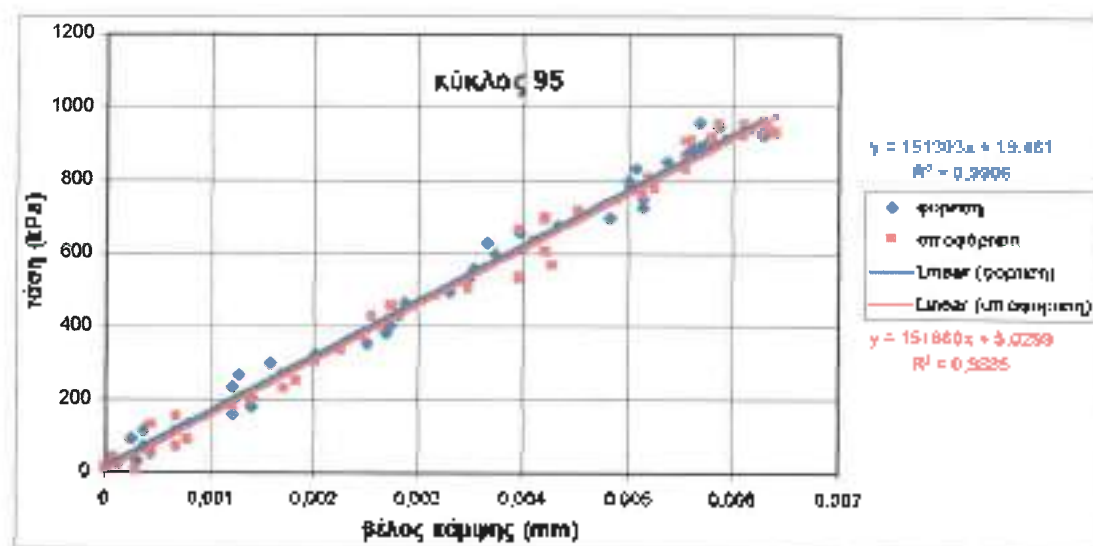
Σχήμα Γ-38: Τάση βέλος κάμψης για φορτική και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



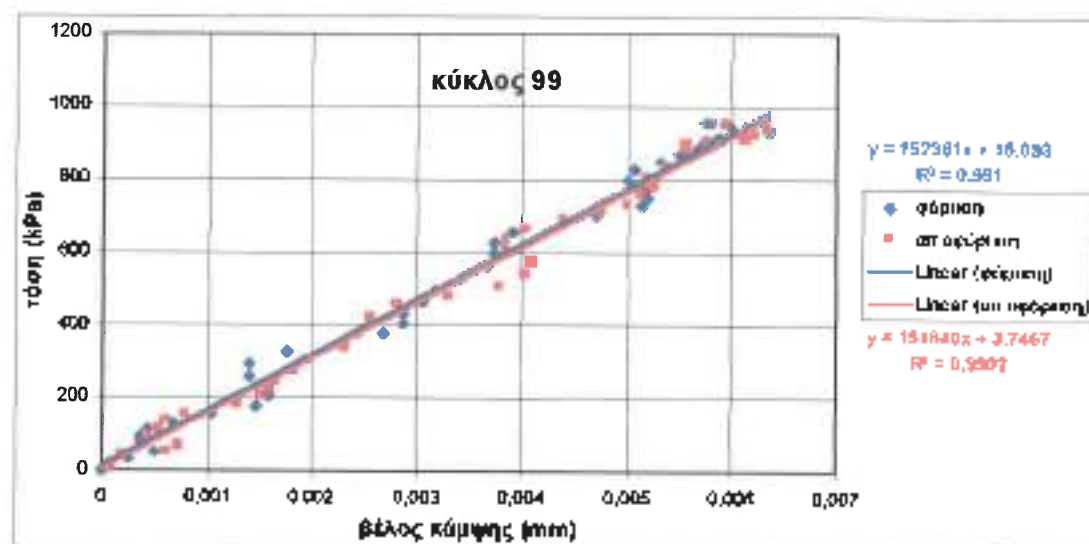
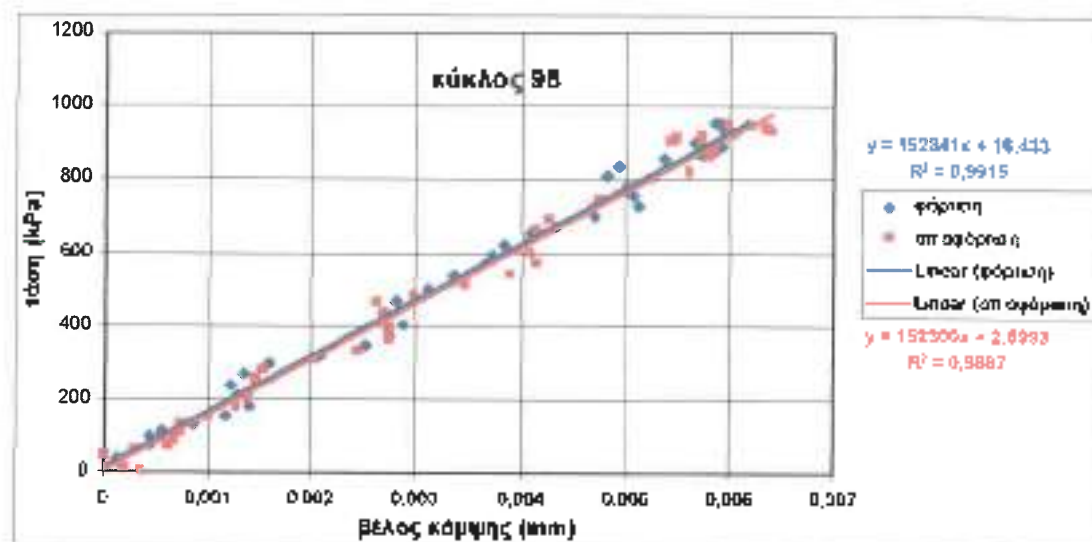
Σχήμα Γ-39: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία: παλλινόδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο II (γαλάκτωμα 0% - τοιμέντο 4%)



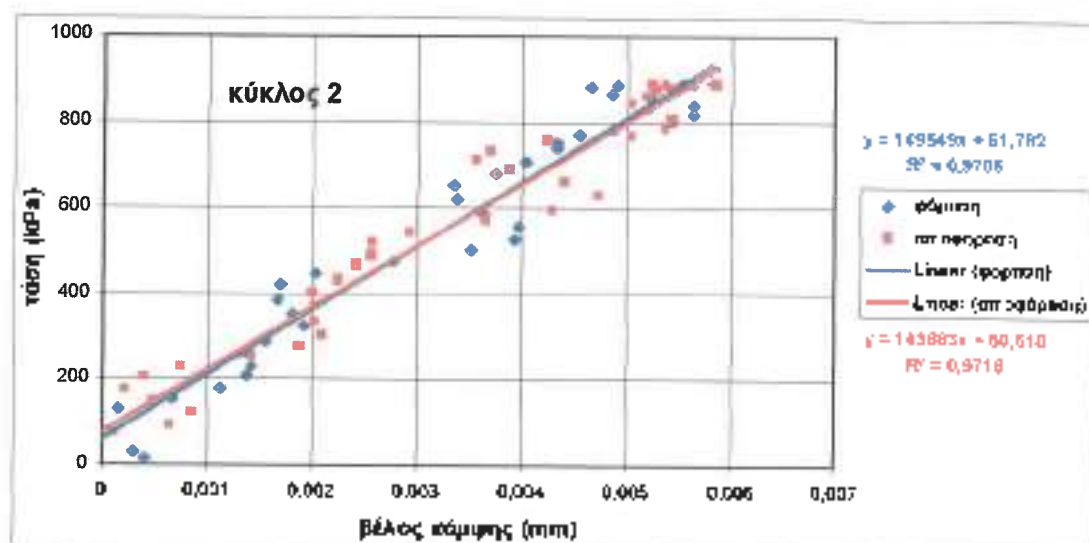
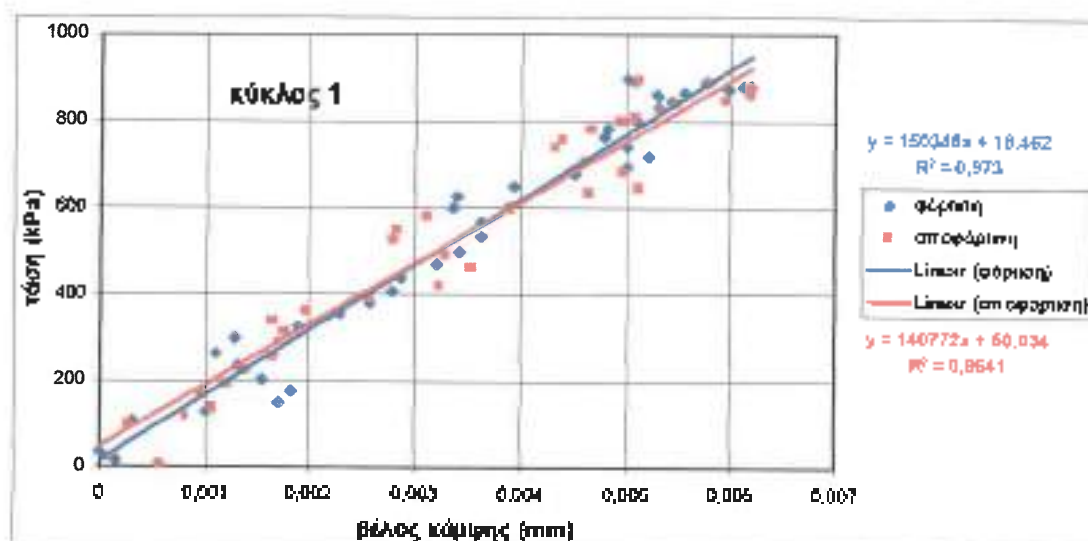
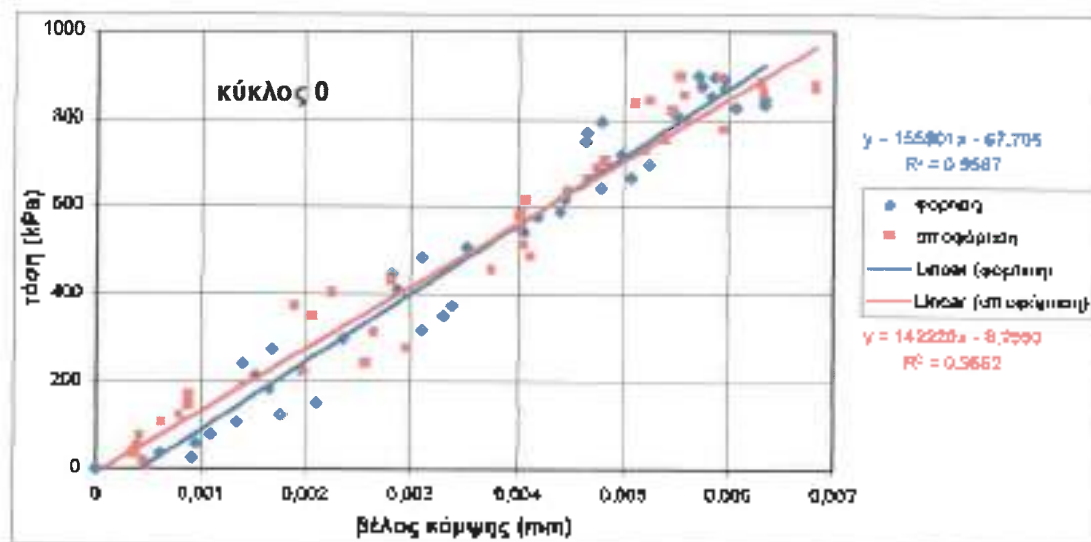
Σχήμα Γ-40: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 1%)



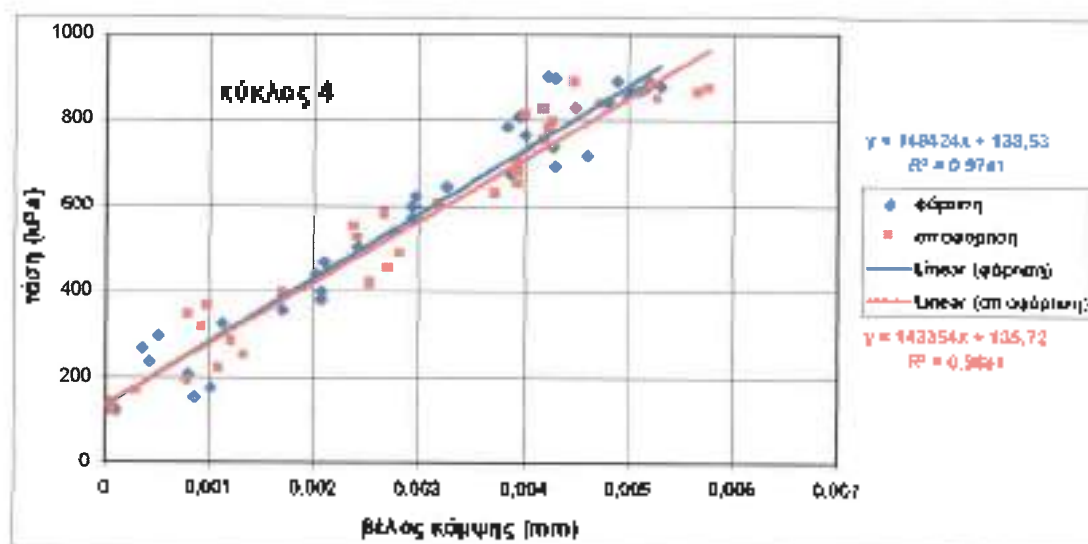
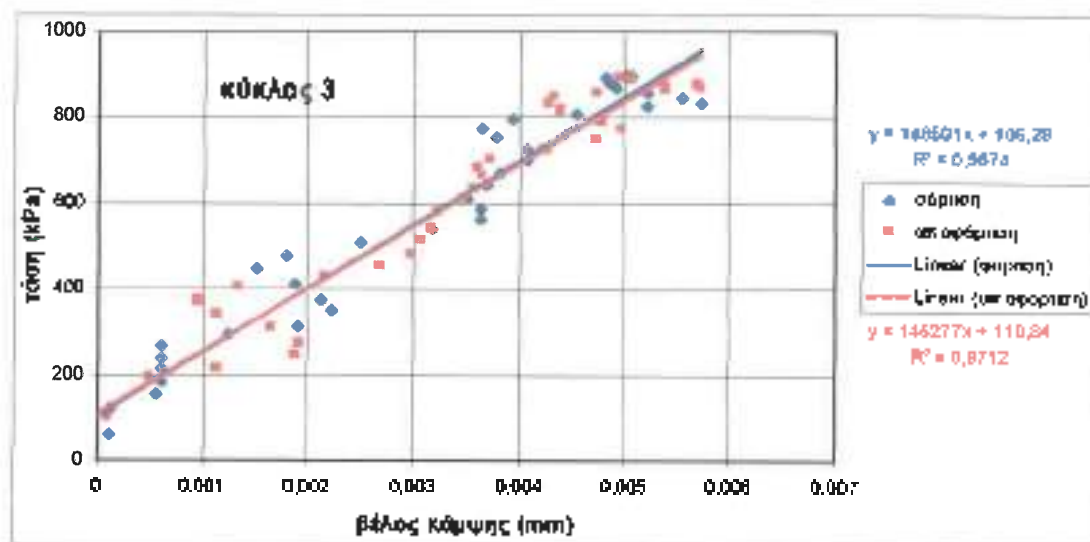
Σχήμα Γ-41: Τάση βέλος κάμψης για φέωση και αποσφύρτιση (κυθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο II (γαλβανισμός 0% + επιμέντο 4%)



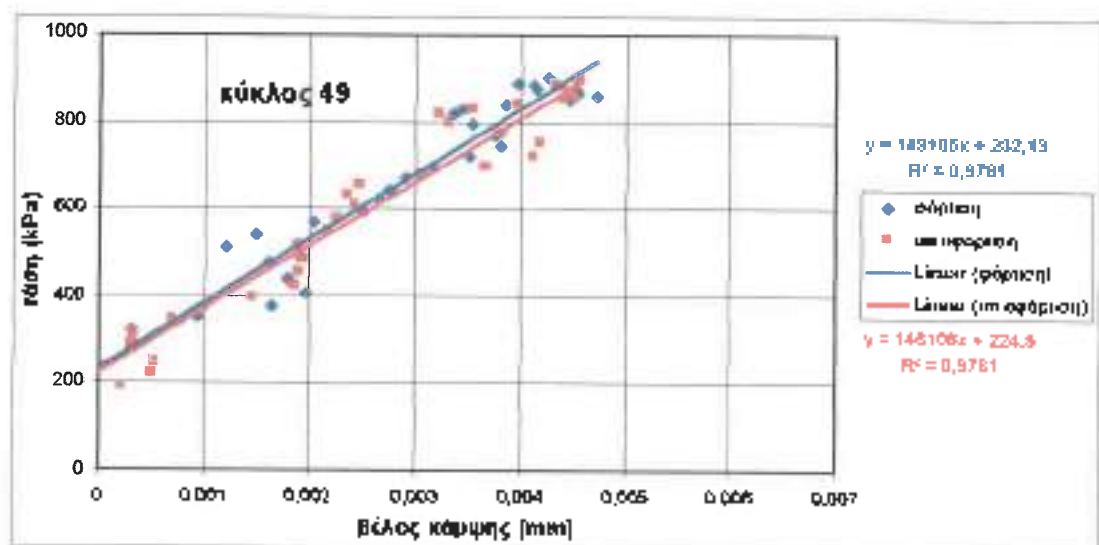
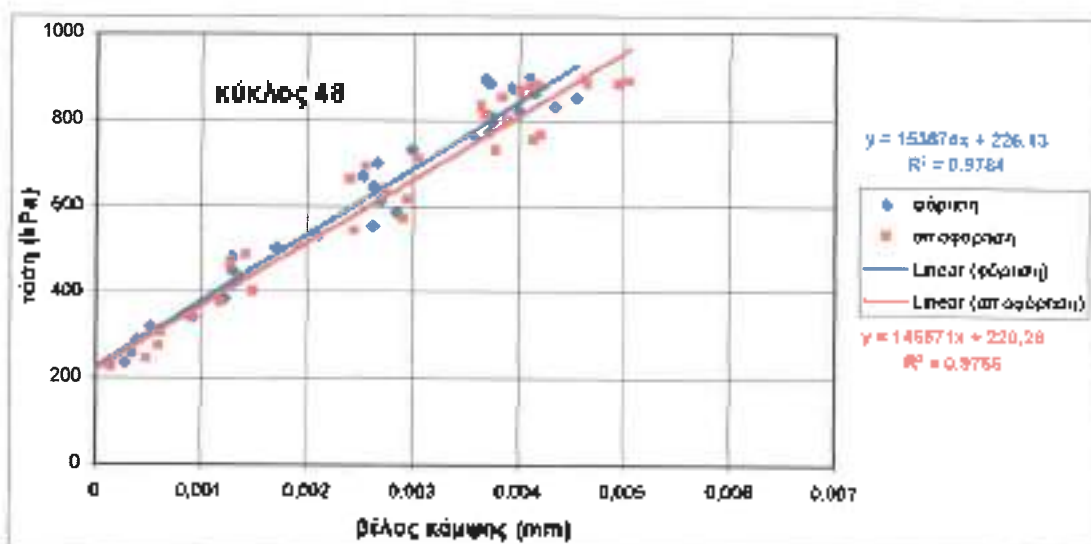
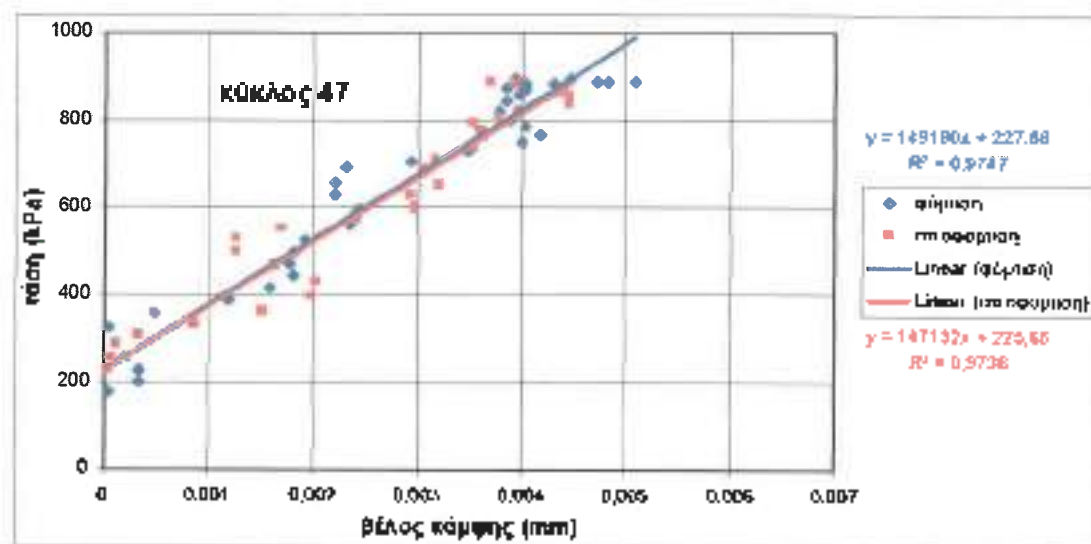
Σχήμα Γ-42: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία, κυλινδρική), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



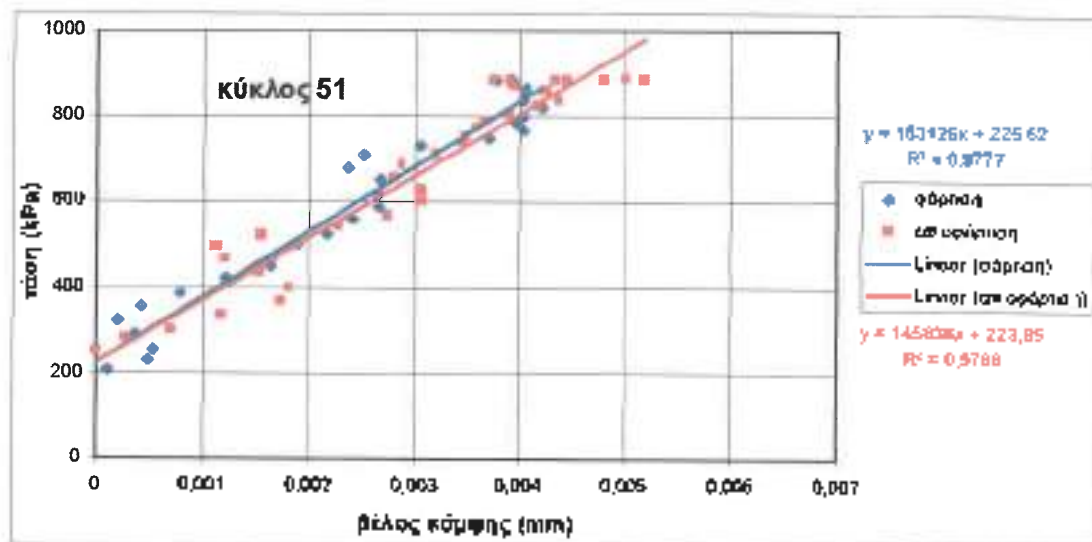
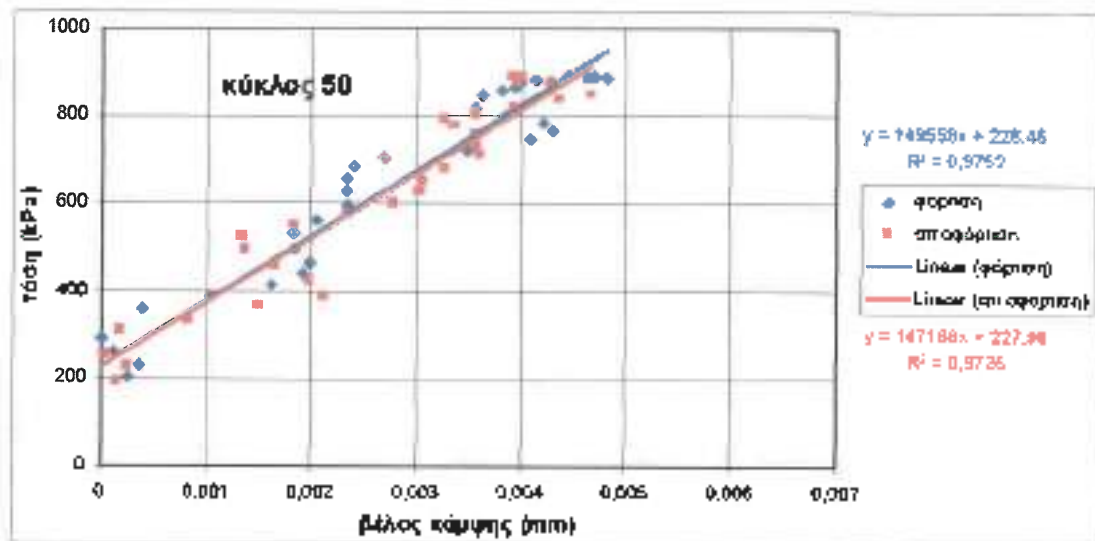
Σχήμα Γ-43: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καθιερώς παλινδρομησης). κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 0% + τσιμέντο 4%)



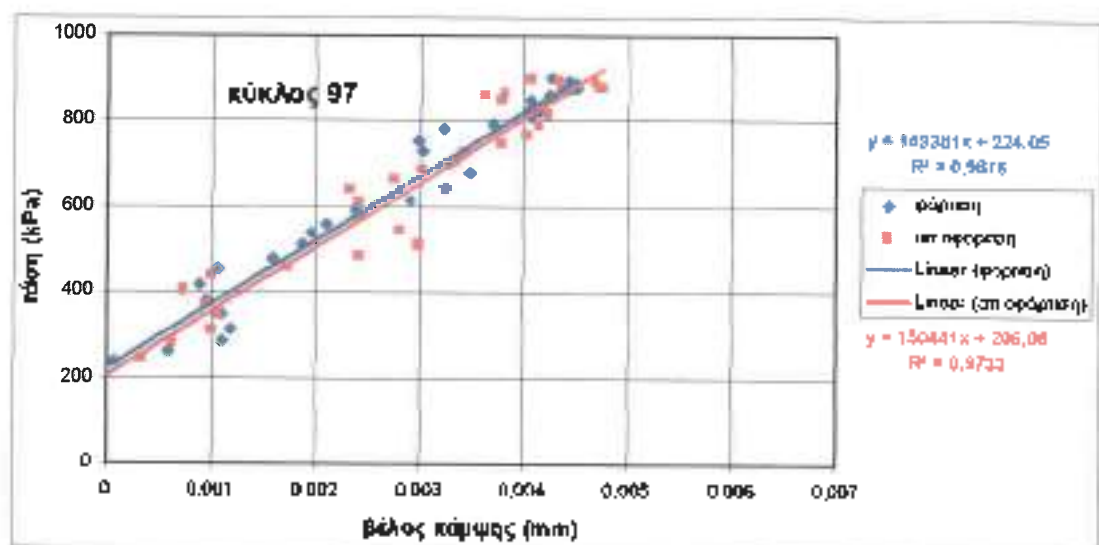
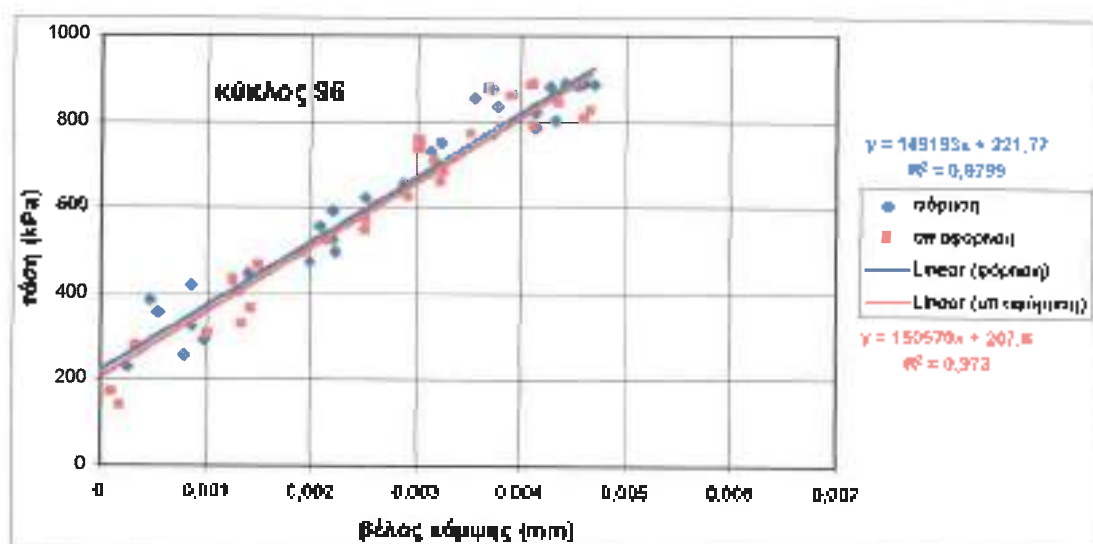
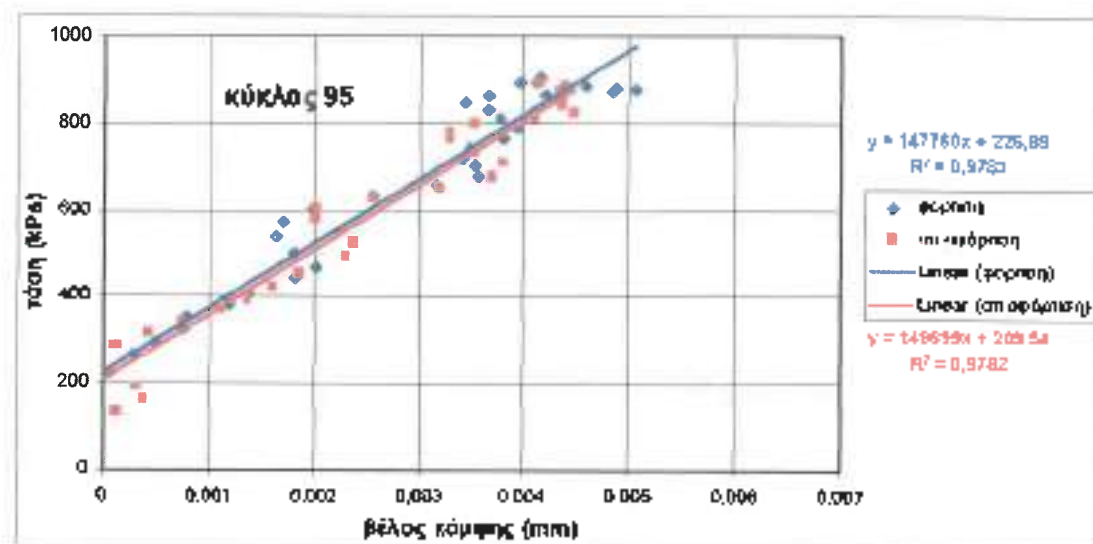
Σχήμα Γ-44: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



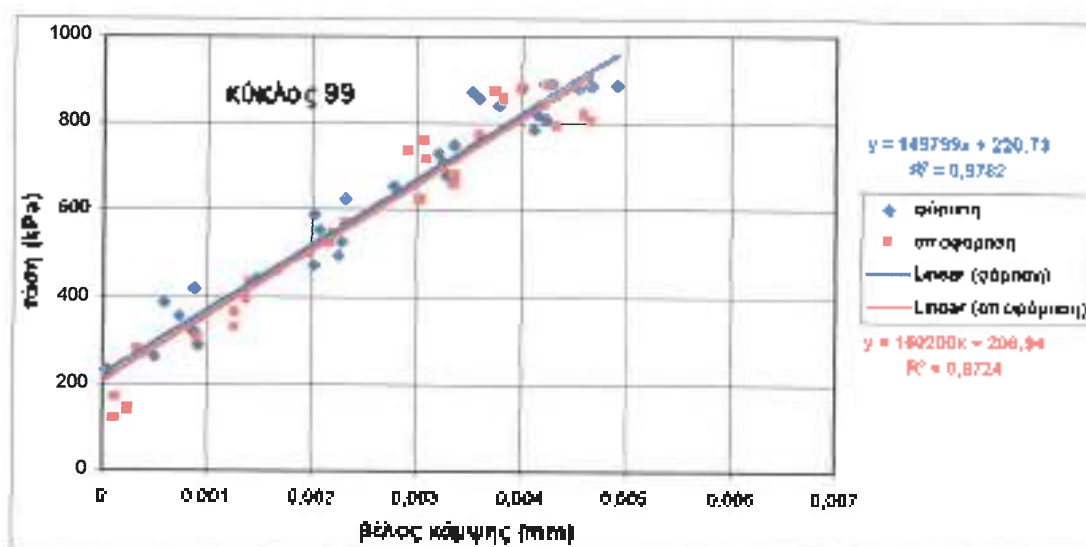
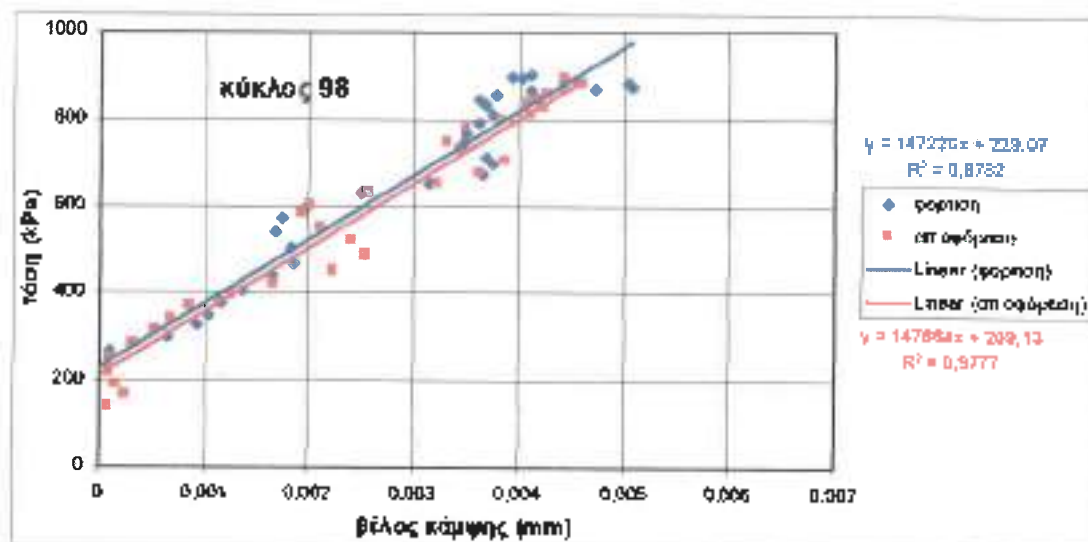
Σχήμα Γ-45: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινεξόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 12 (γαλακτωμα 0% - τιμμέντο 4%)



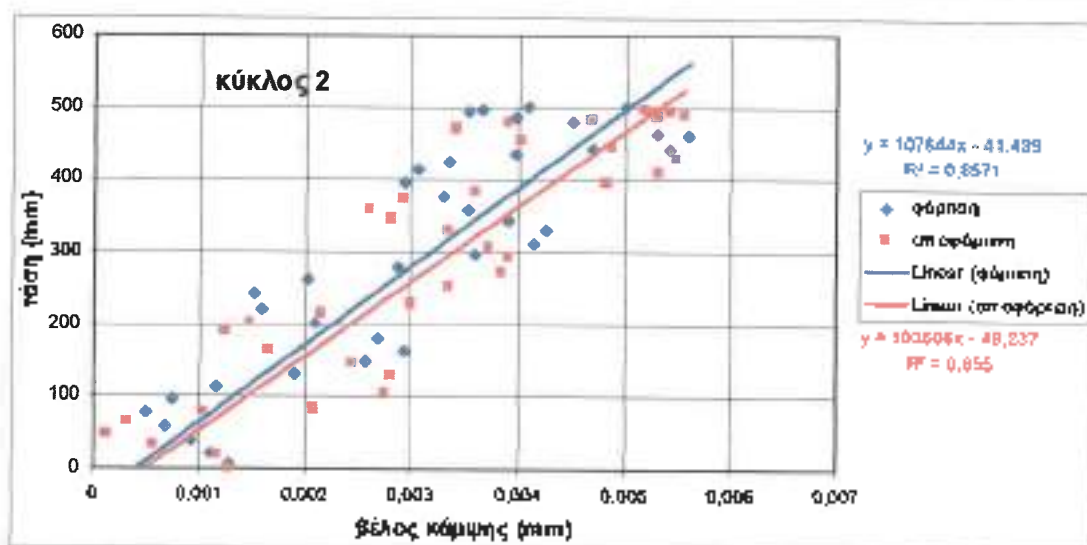
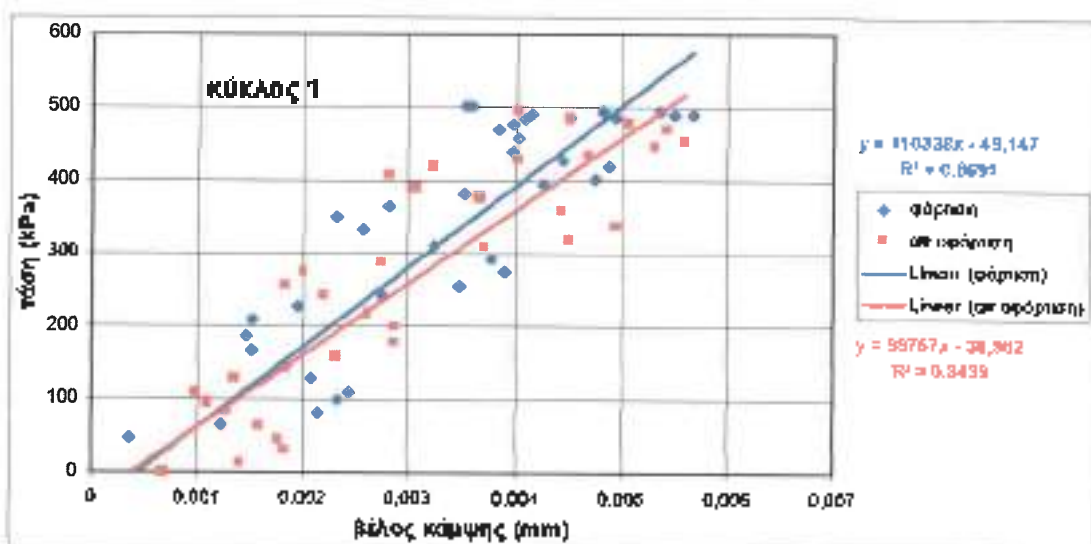
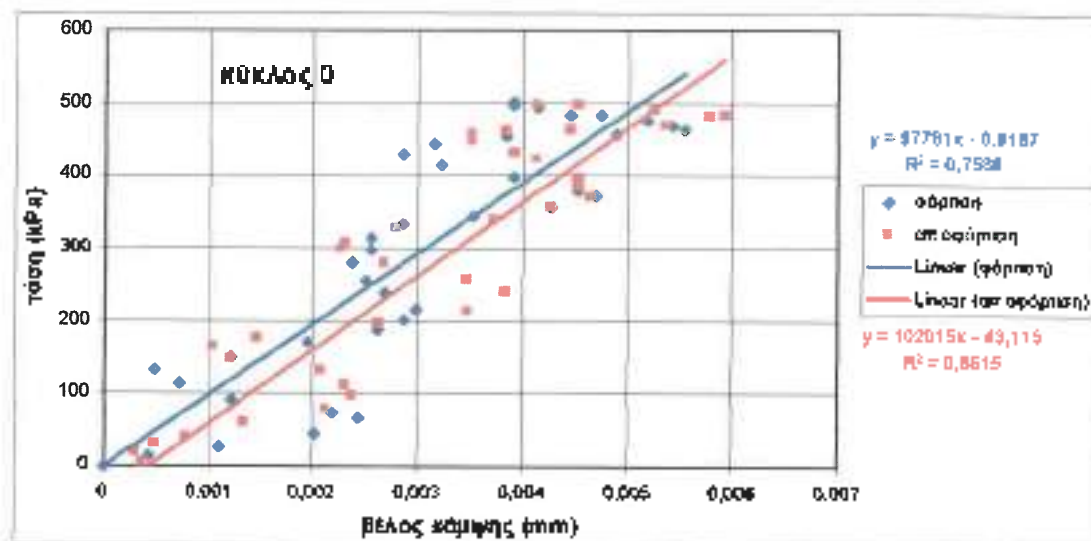
Σχήμα Γ-46: Πάση βέλος κόμησης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο I2 (γαλάκτωμα 0% - πασιμέντο 4%)



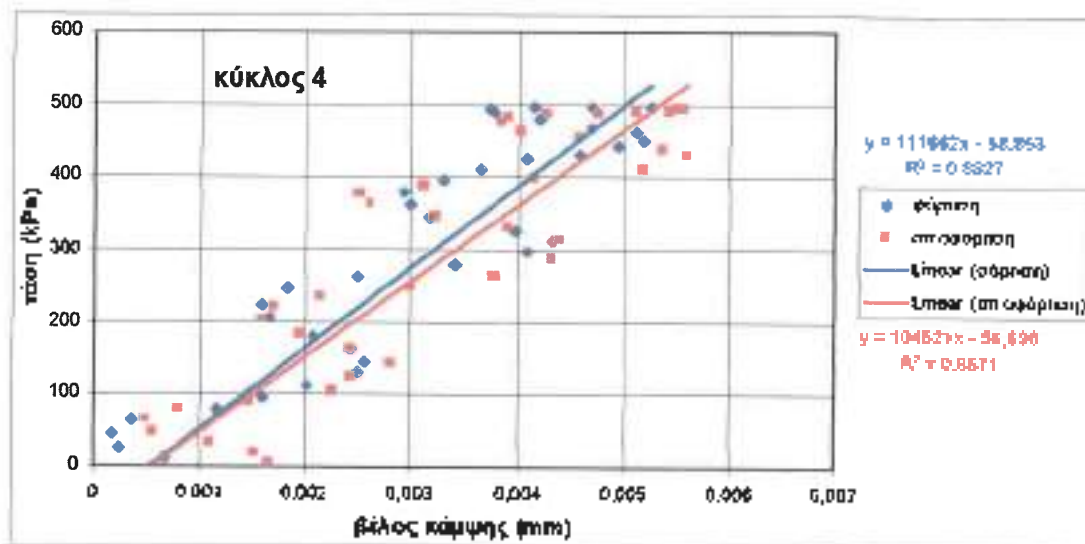
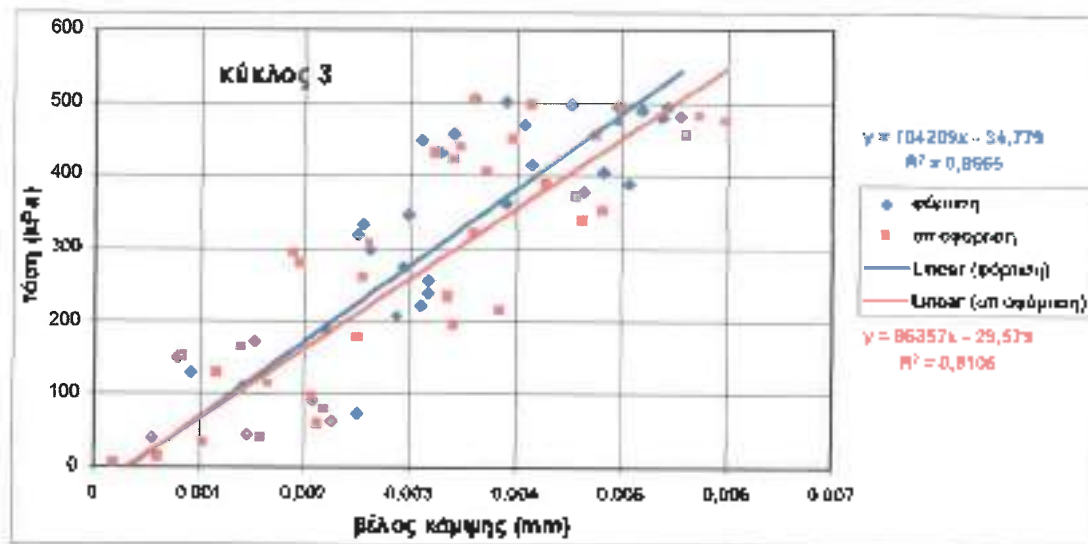
Σχήμα Γ-47: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθεία; παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο I2 (γαλακτώμα 0% - ισιζόμενο 4%)



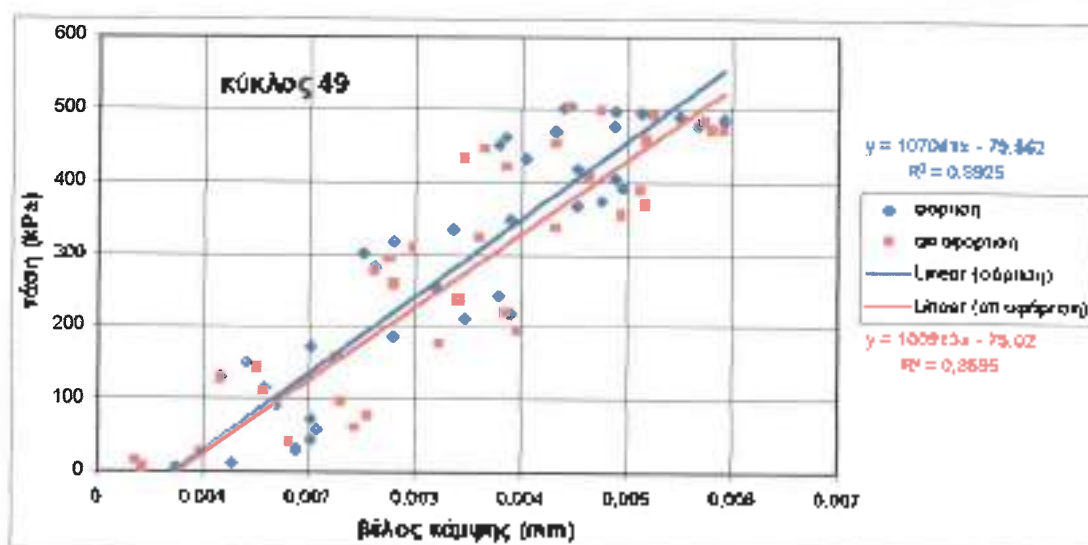
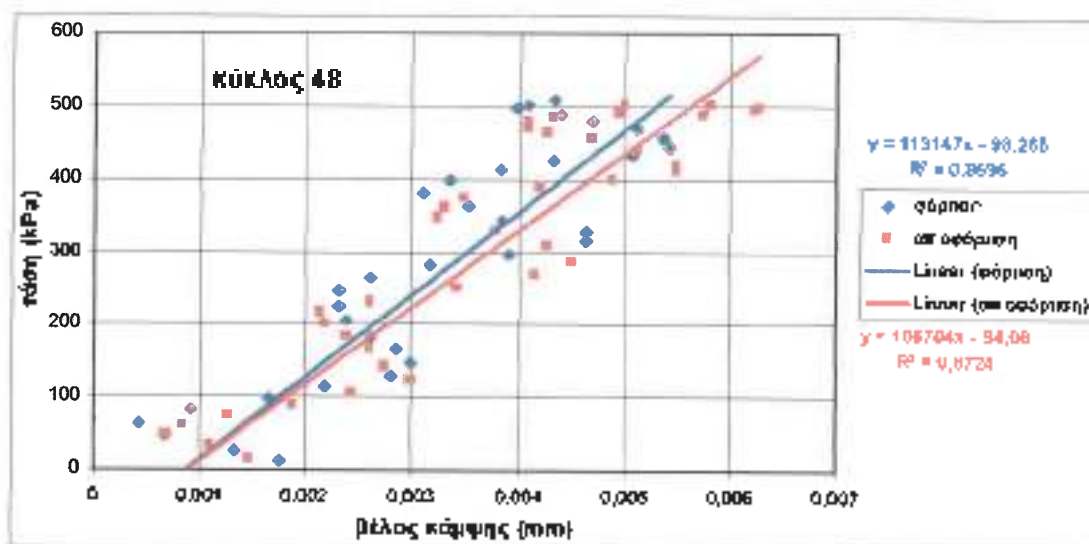
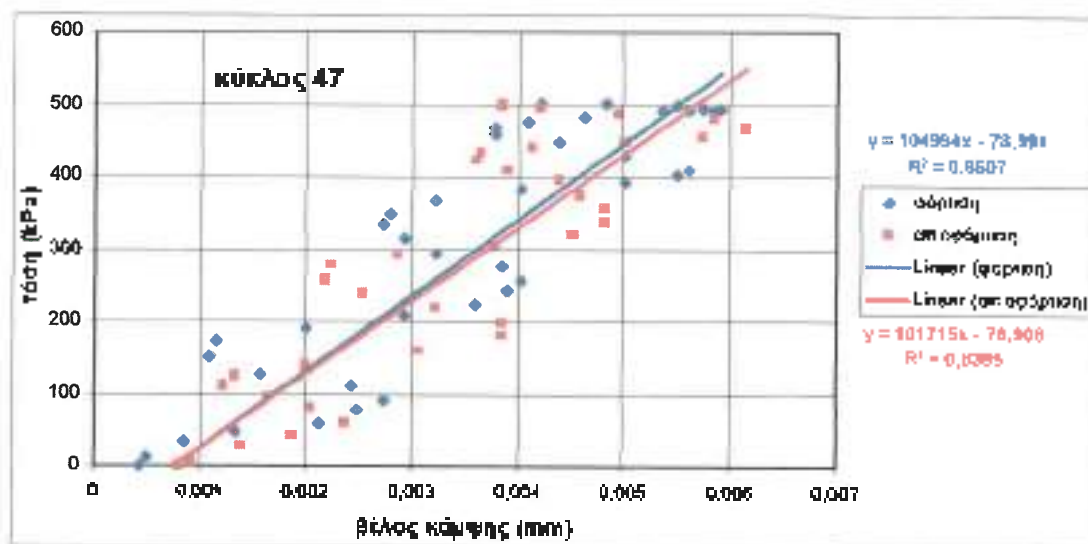
Σχήμα Γ-48: Τύση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθεία παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 0% - τεμνέντο 4%)



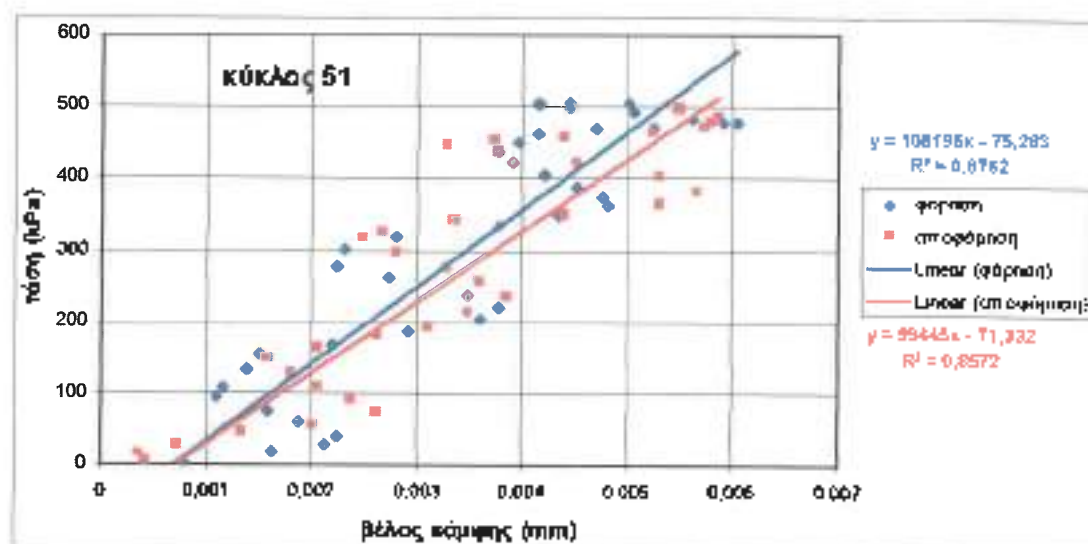
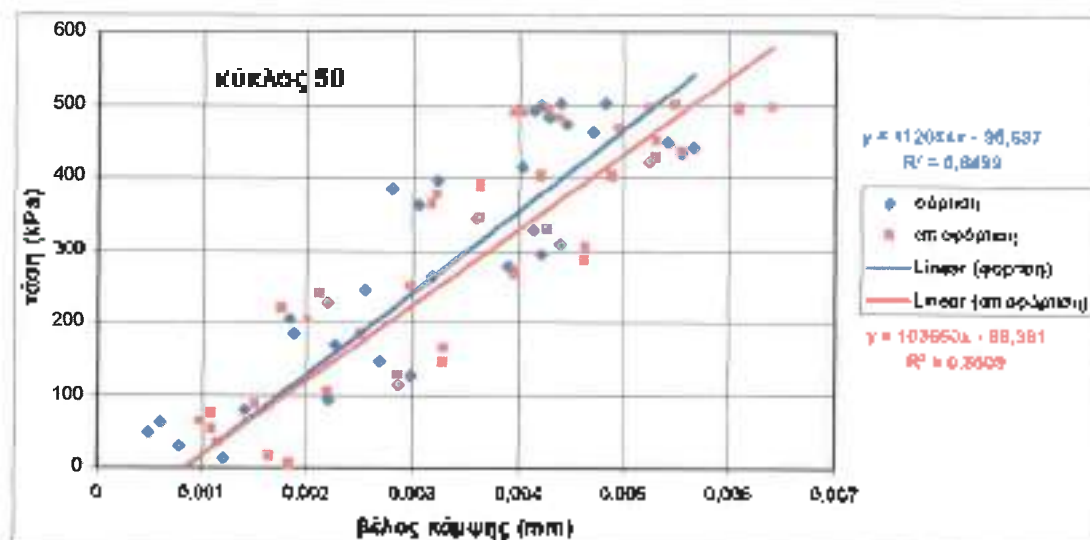
Σχήμα Γ-49: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθεία παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντό 3%)



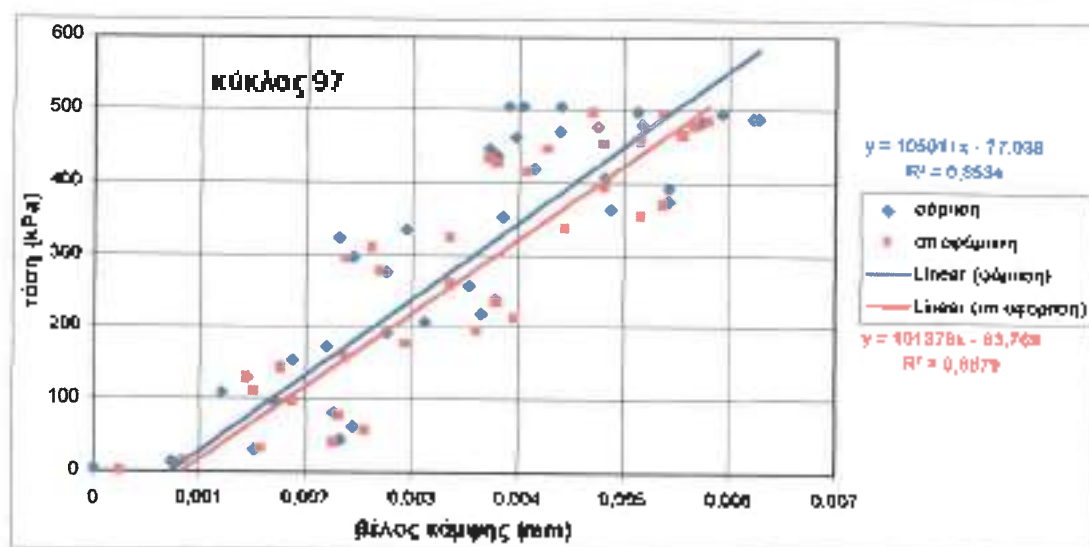
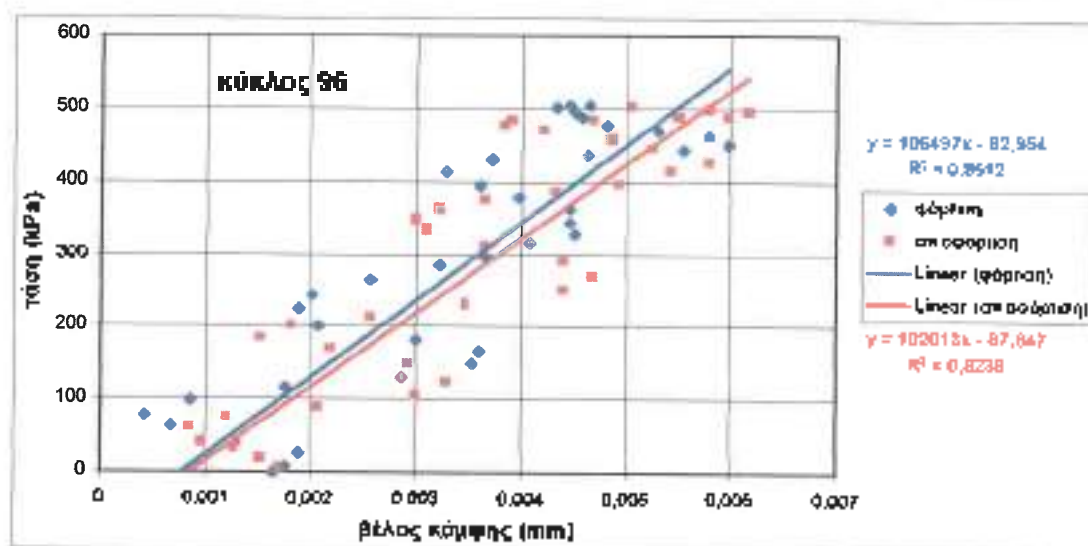
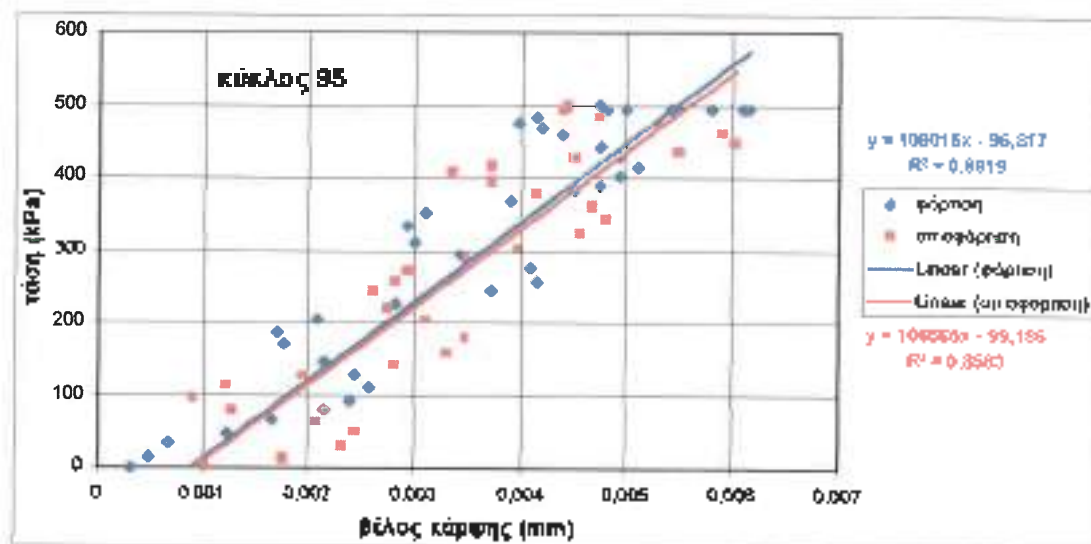
Σχήμα Γ-50: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



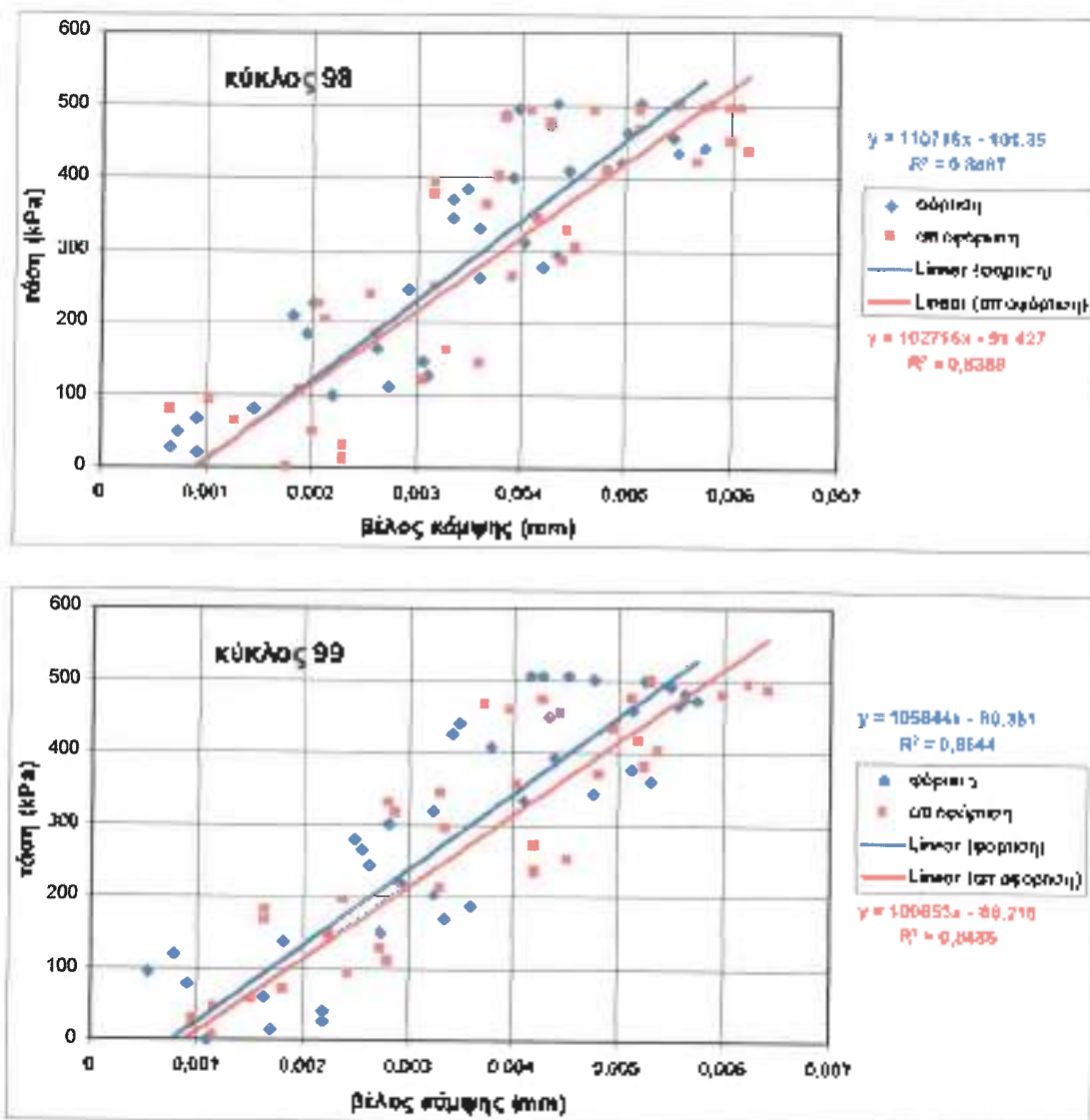
Σχήμα Γ-5ε: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ειδικές παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτιομα 2% - ισιμάντο 3%)



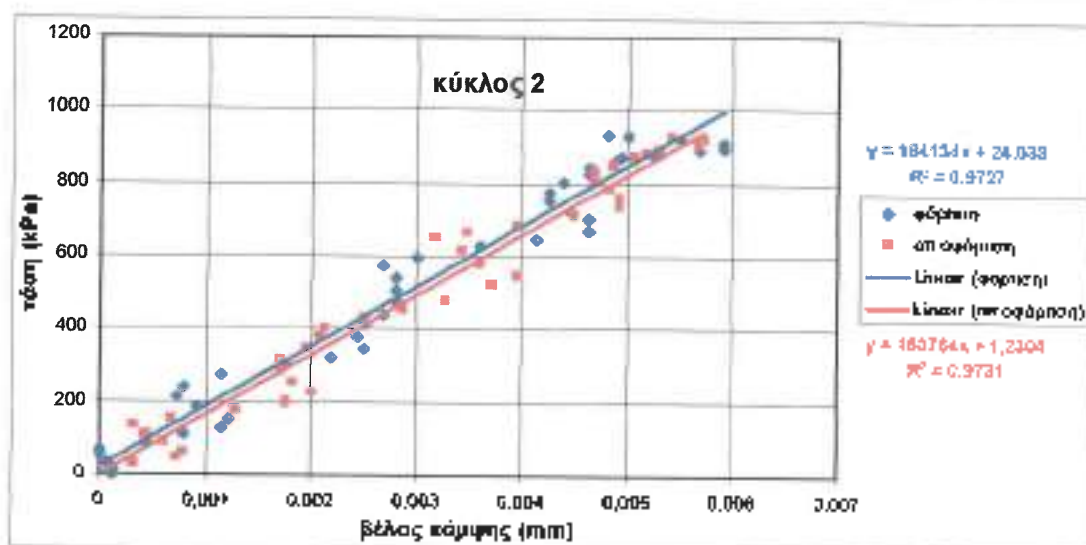
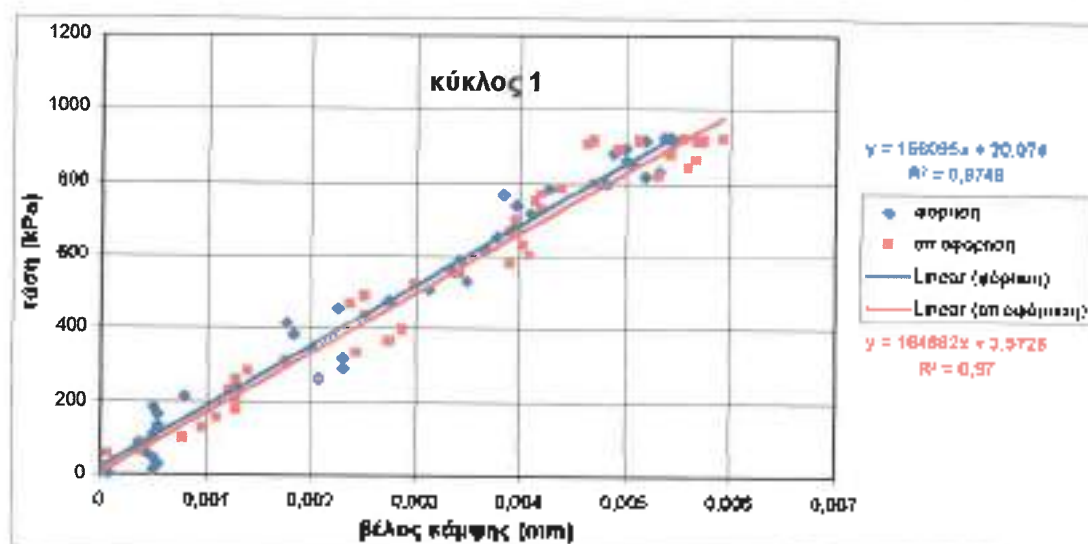
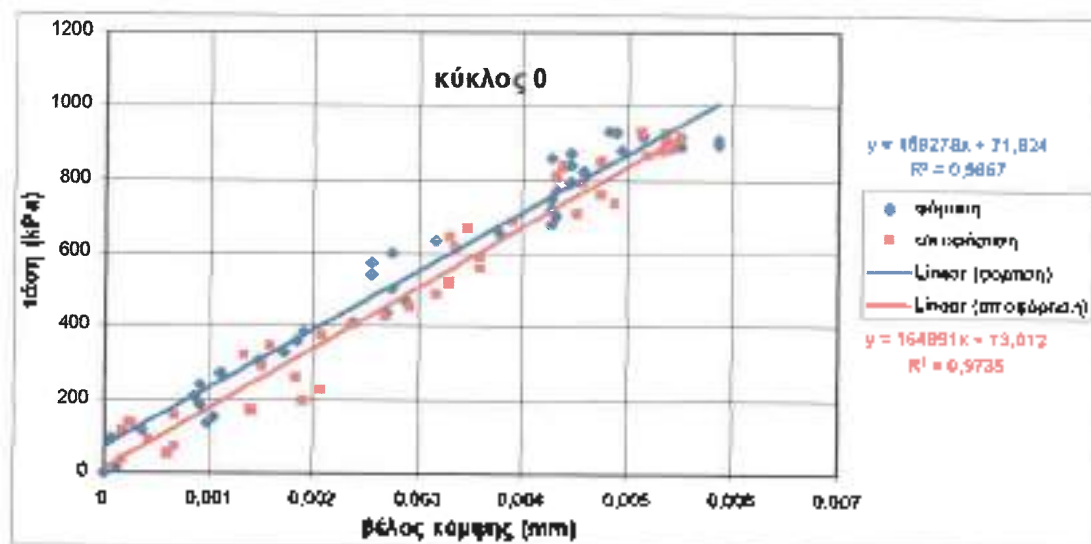
Σχήμα Γ-52: Τάση βέλος κόμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



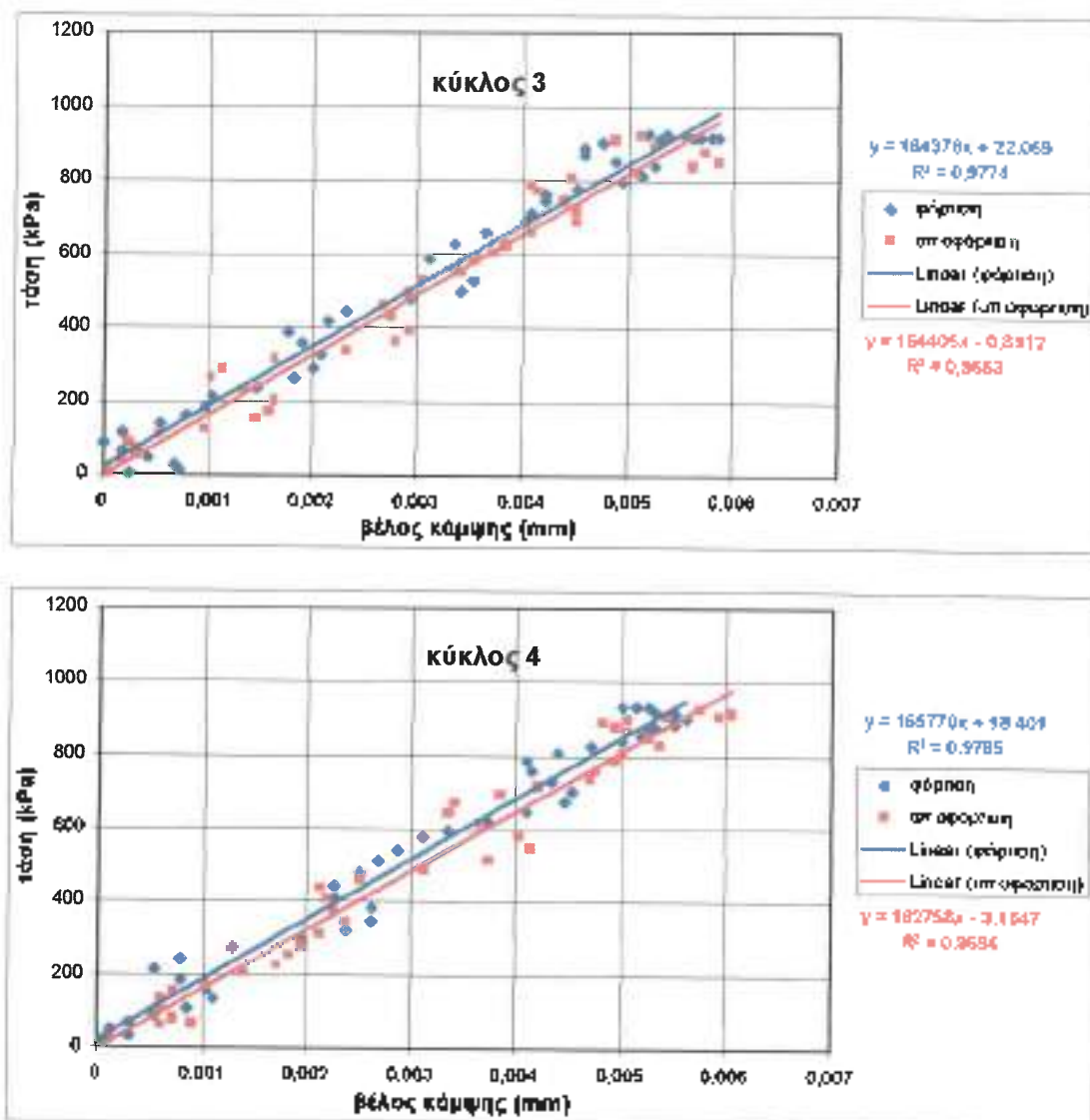
Σχήμα Γ-53: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρομησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 14 (μετάπτωση 2% - τσιμέντο 3%)



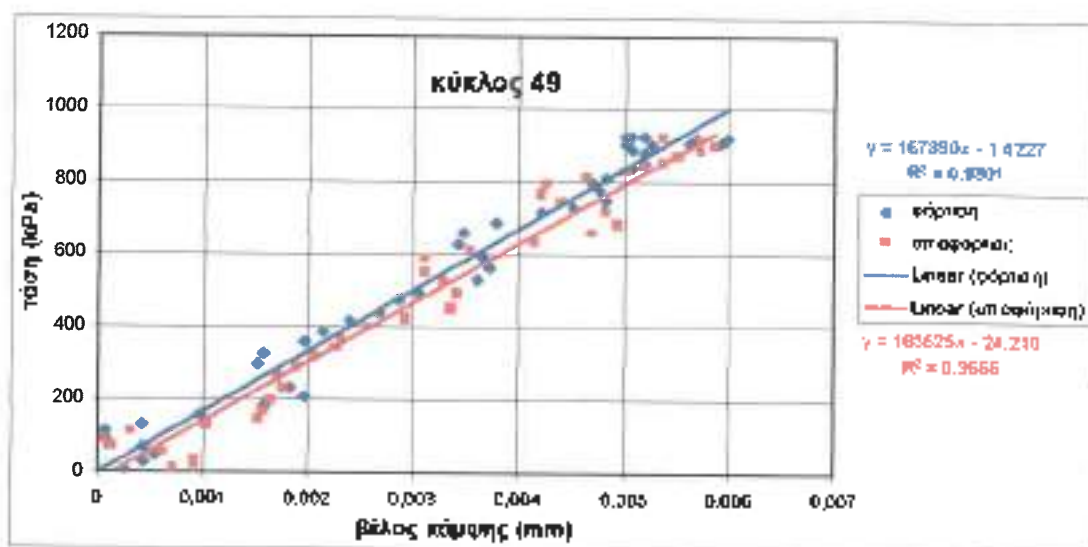
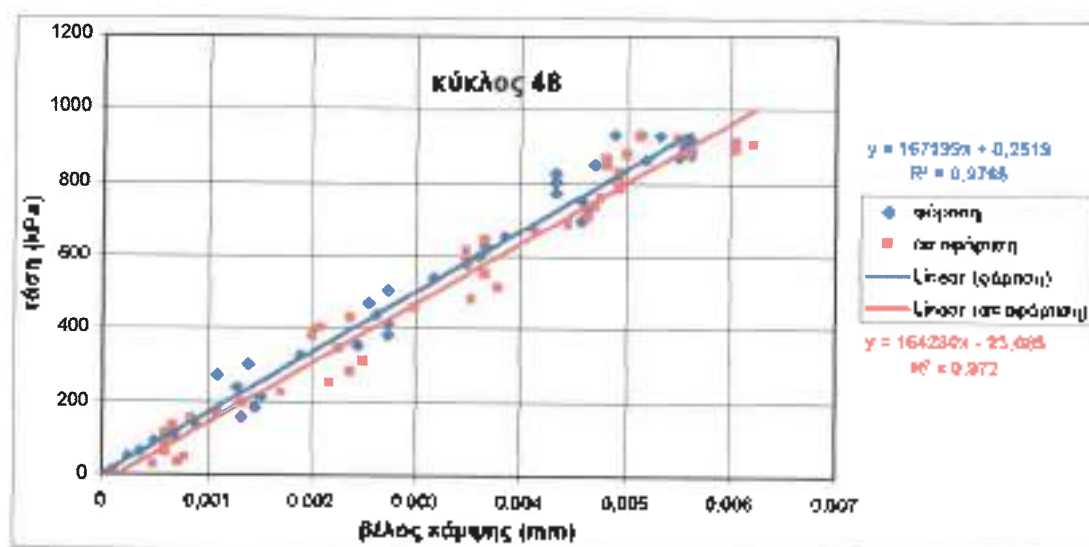
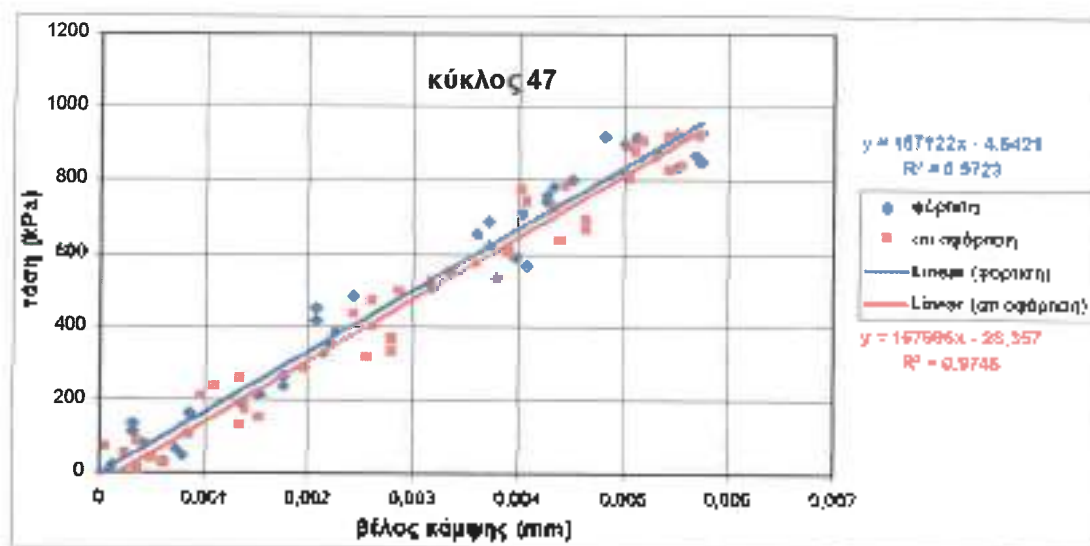
Σχήμα Γ-54: Τάση - μέγος κάμψης για φόρτιση και απαφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



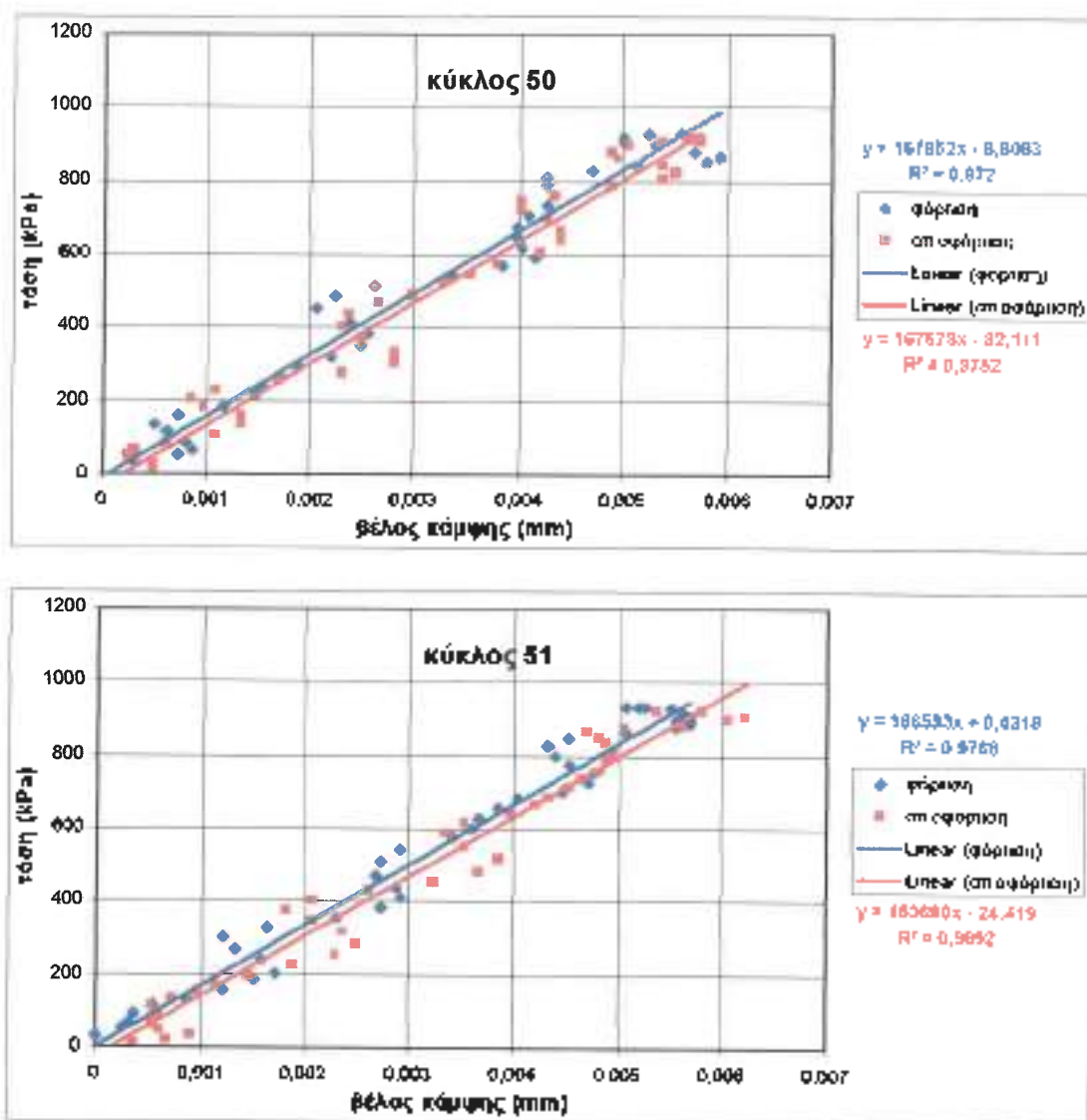
Σχήμα Γ-55: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



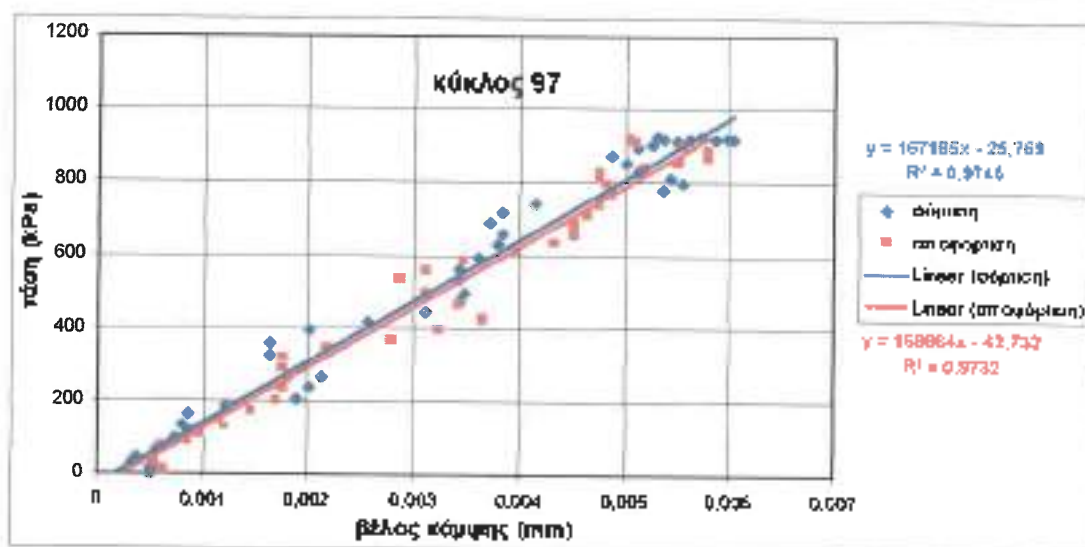
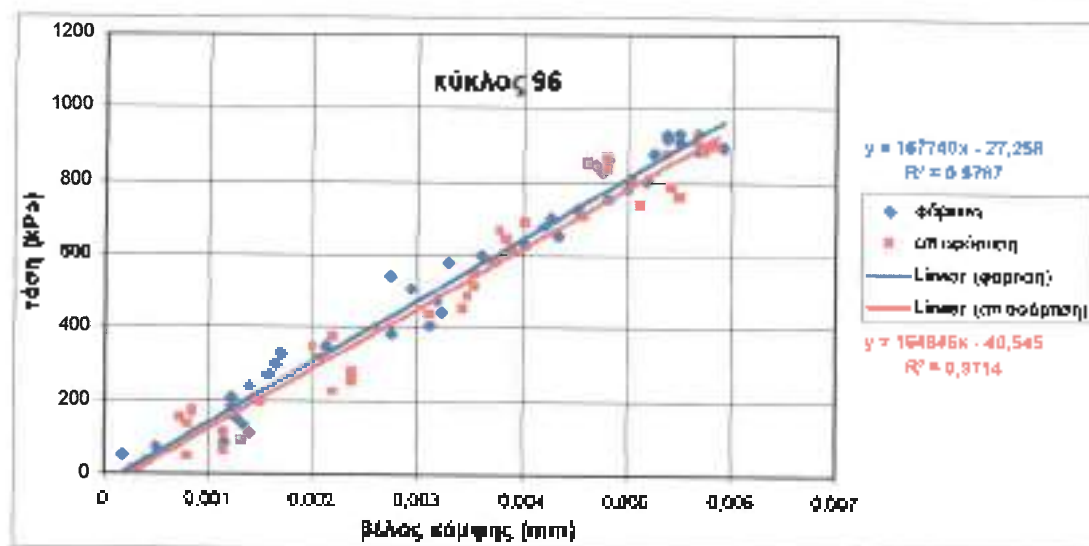
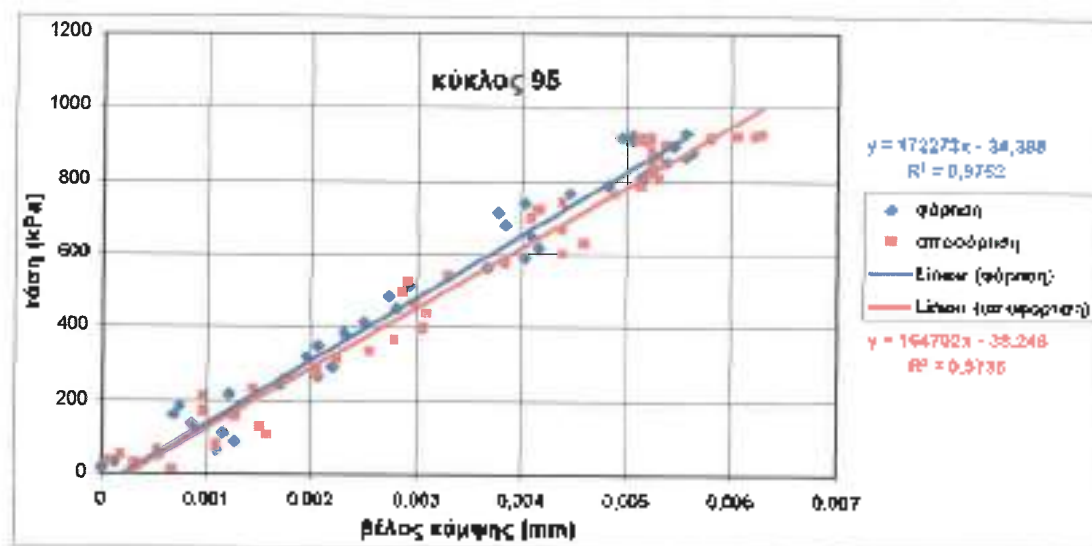
Σχήμα F-56: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



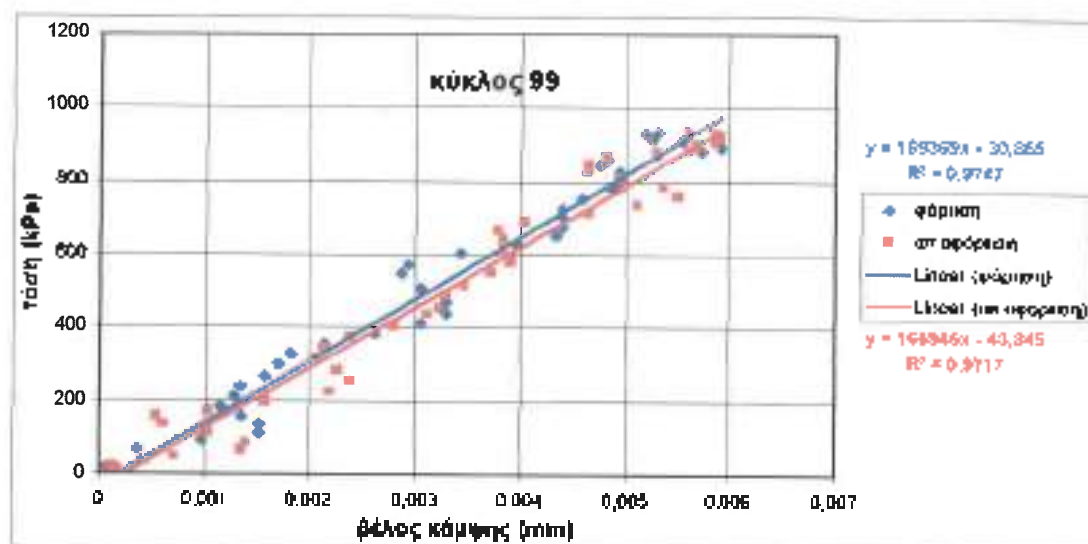
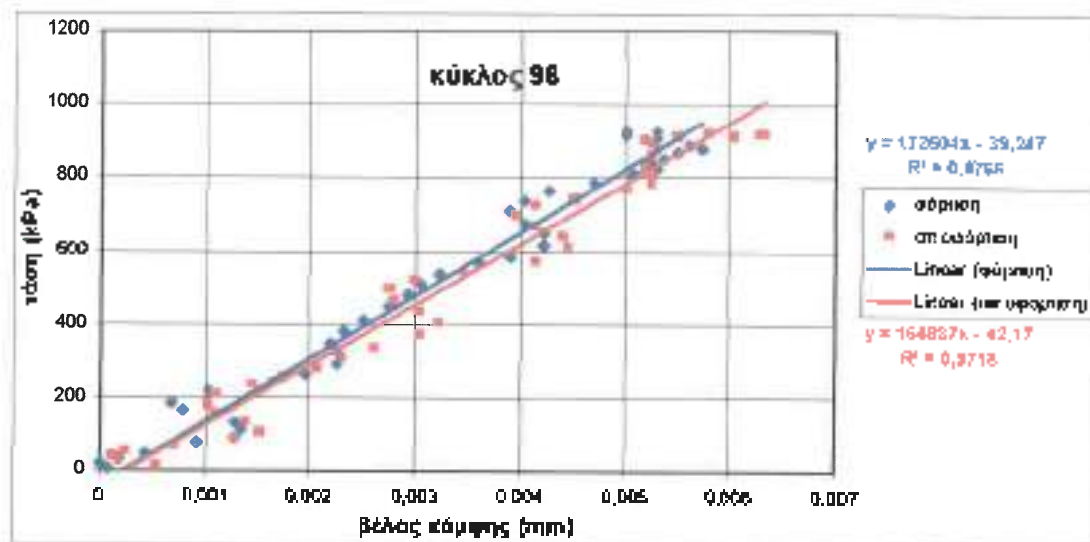
Σχήμα Γ-57: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% + τσιμέντο 4%)



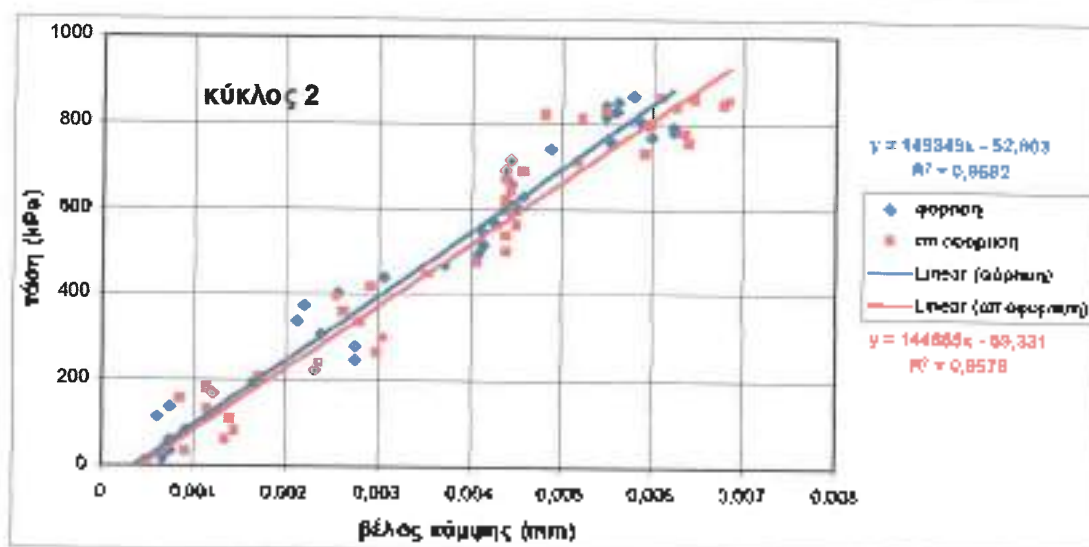
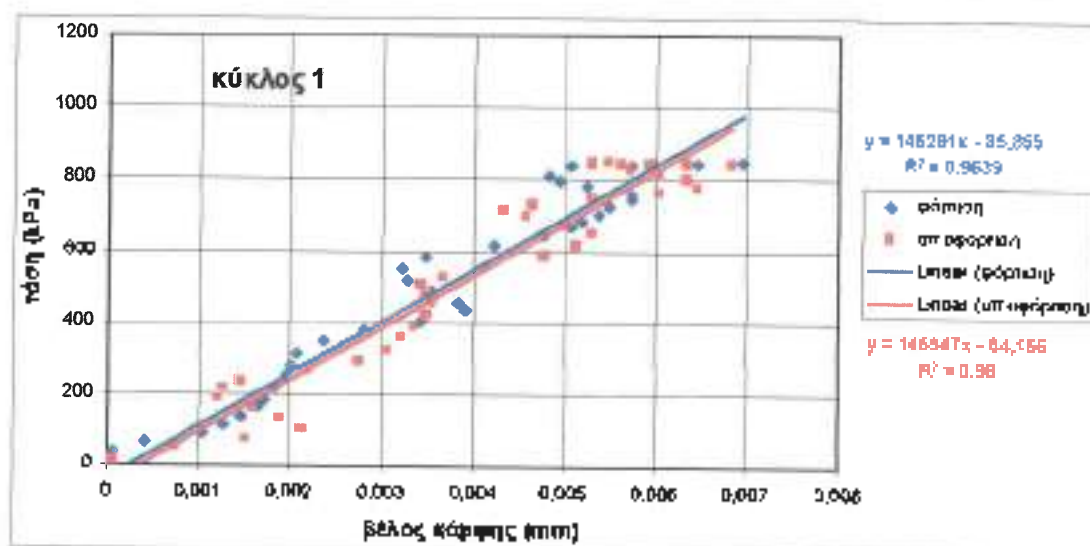
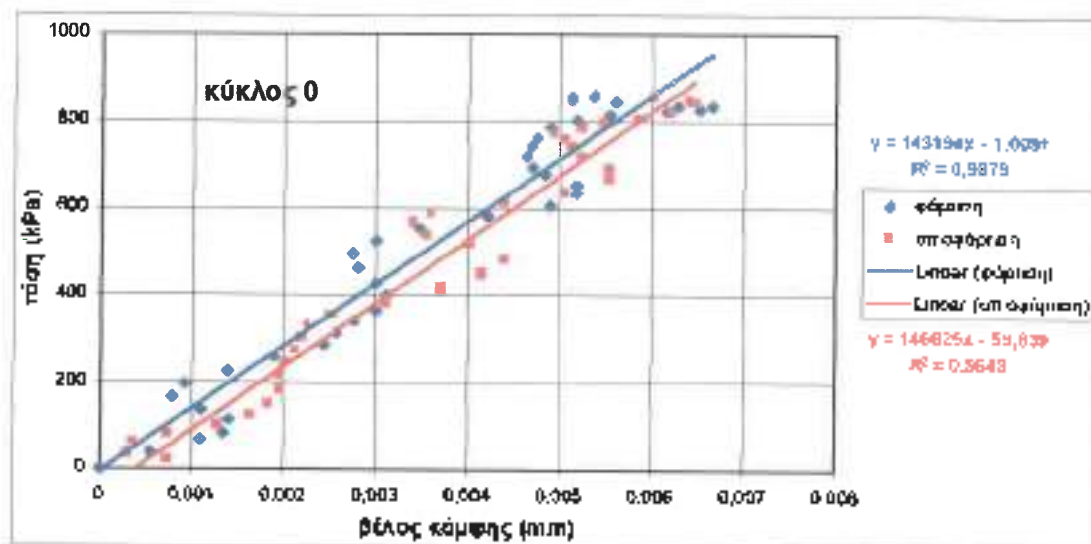
Σχήμα Γ-58: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



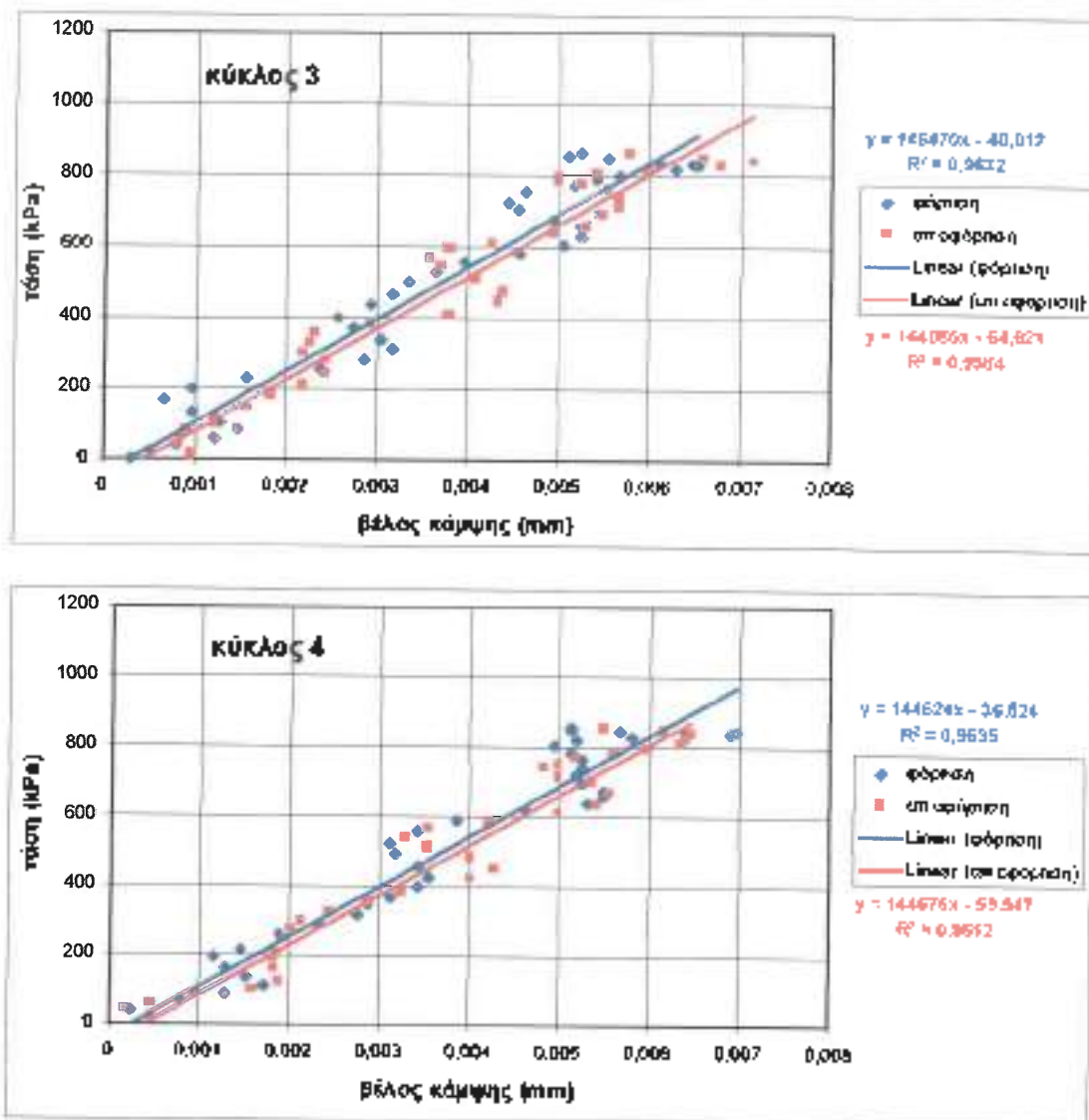
Σχήμα Γ-59: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% + τσιμεντό 4%)



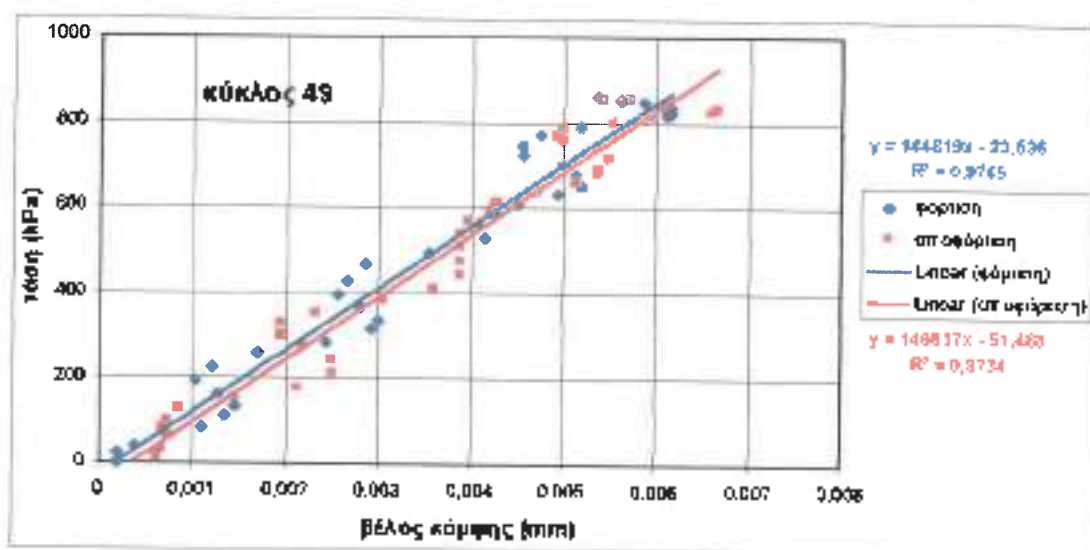
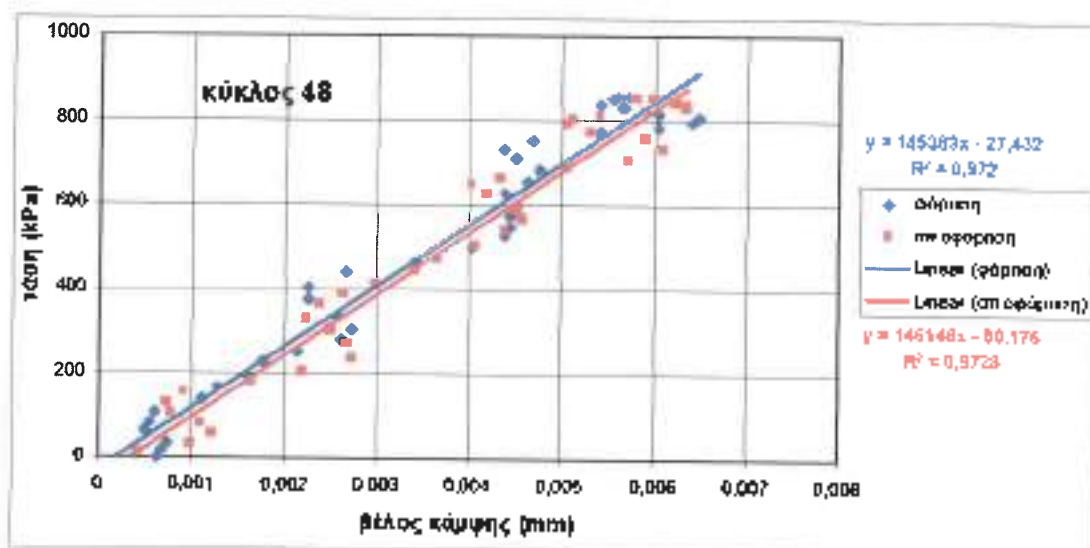
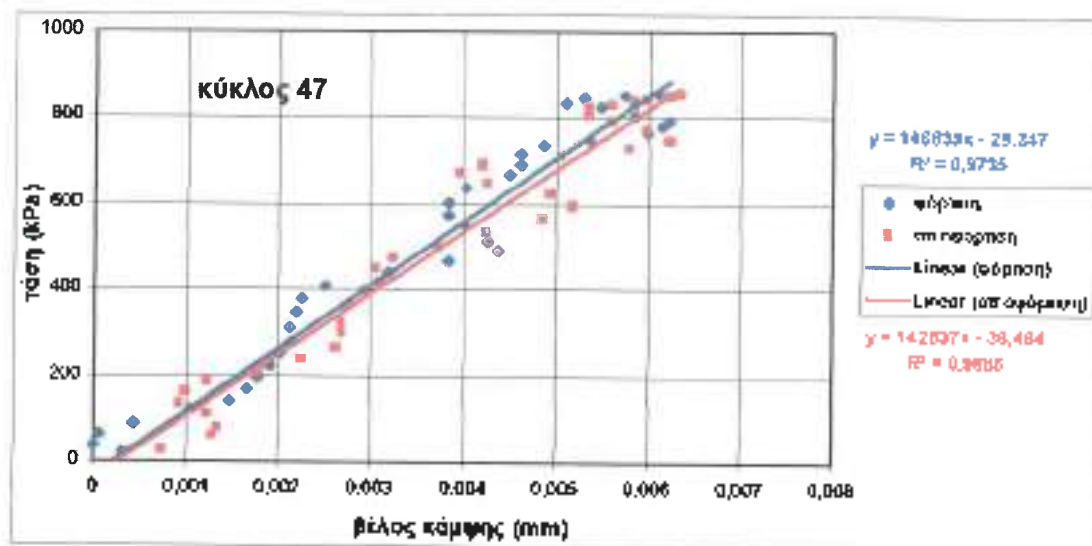
Σχήμα Γ-60: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυλινδρικές παλλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



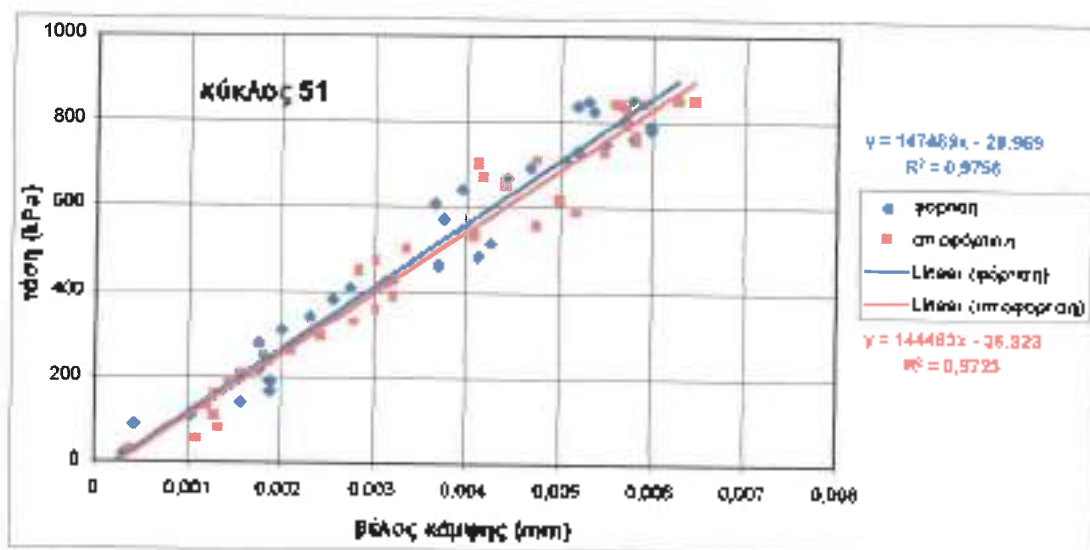
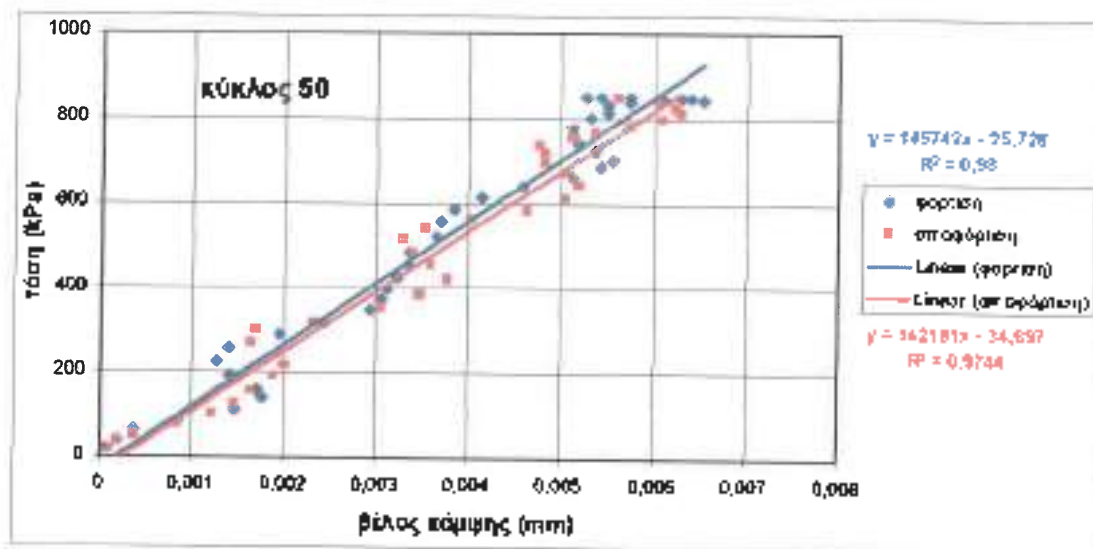
Σχήμα Γ-61: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (επιβεβαιώνει πωλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



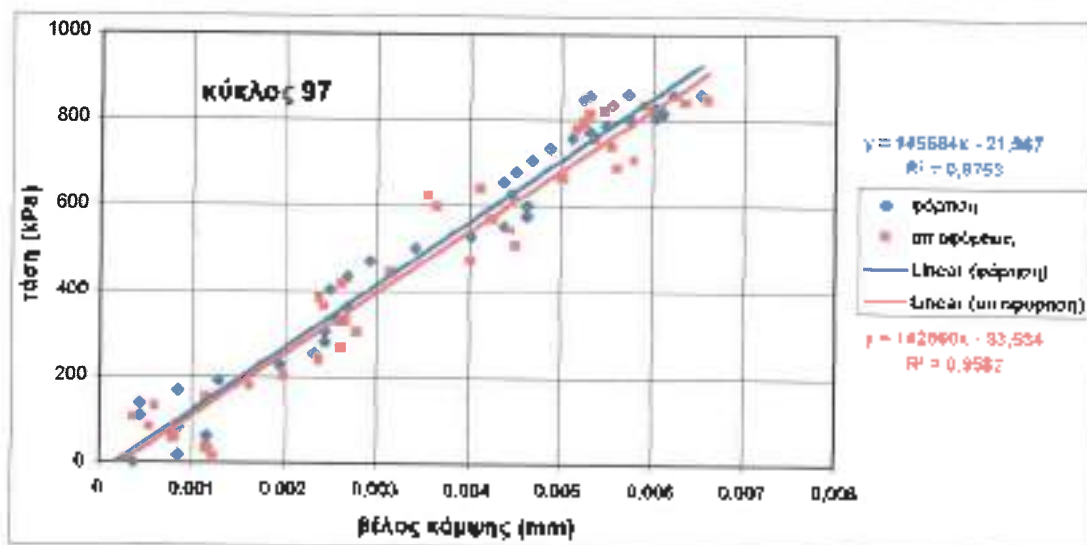
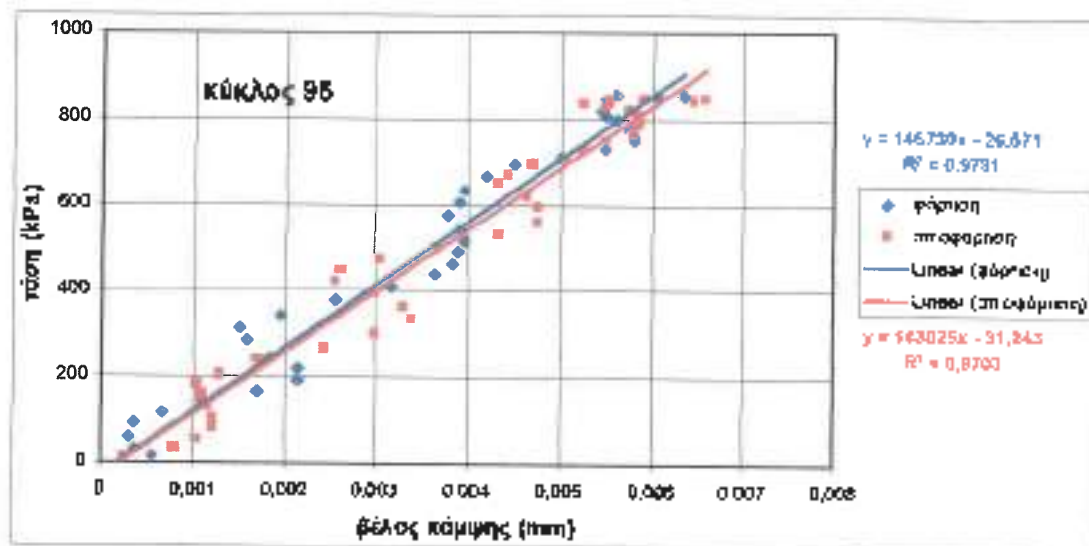
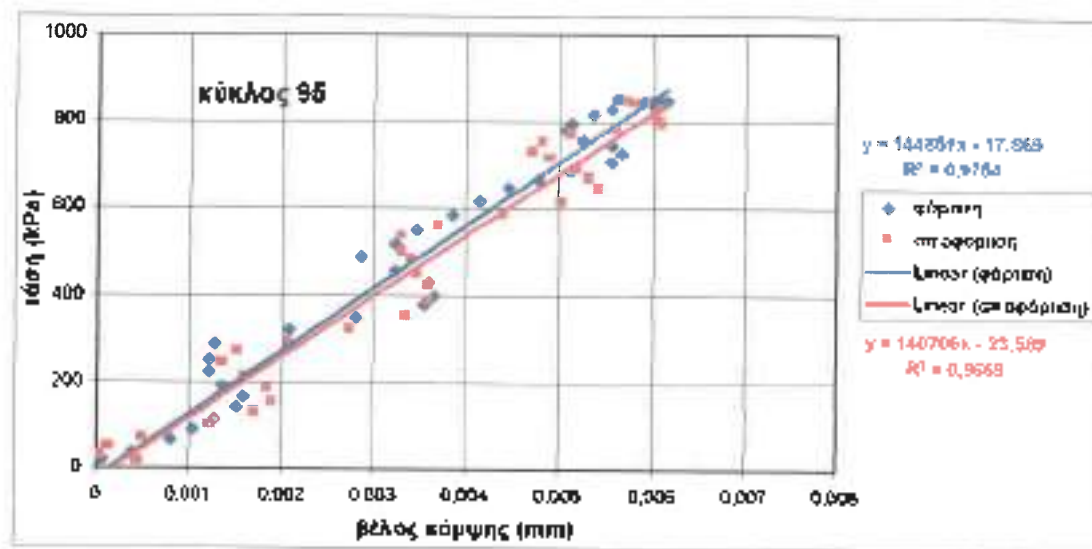
Σχήμα Γ-62: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία πωλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



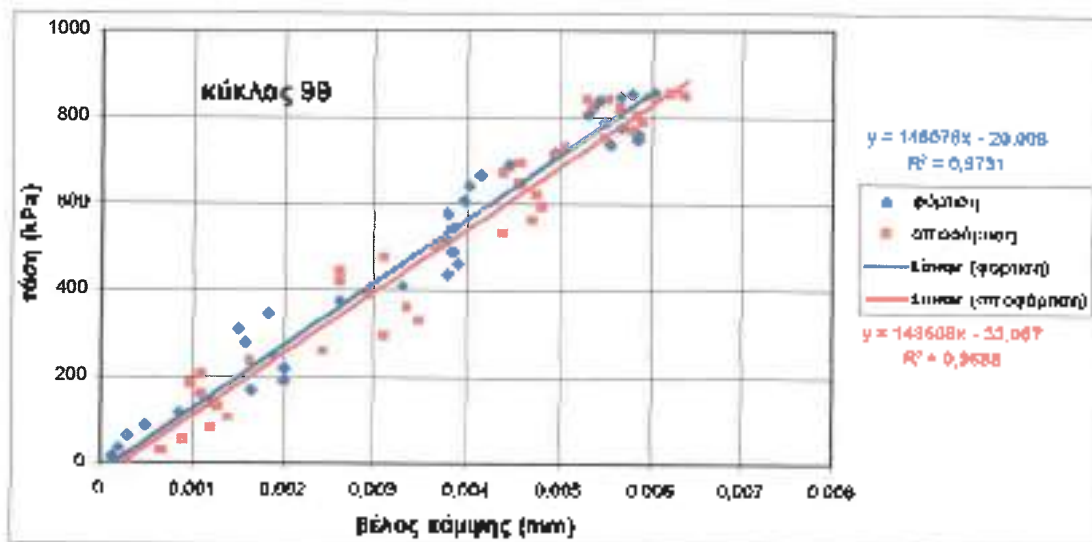
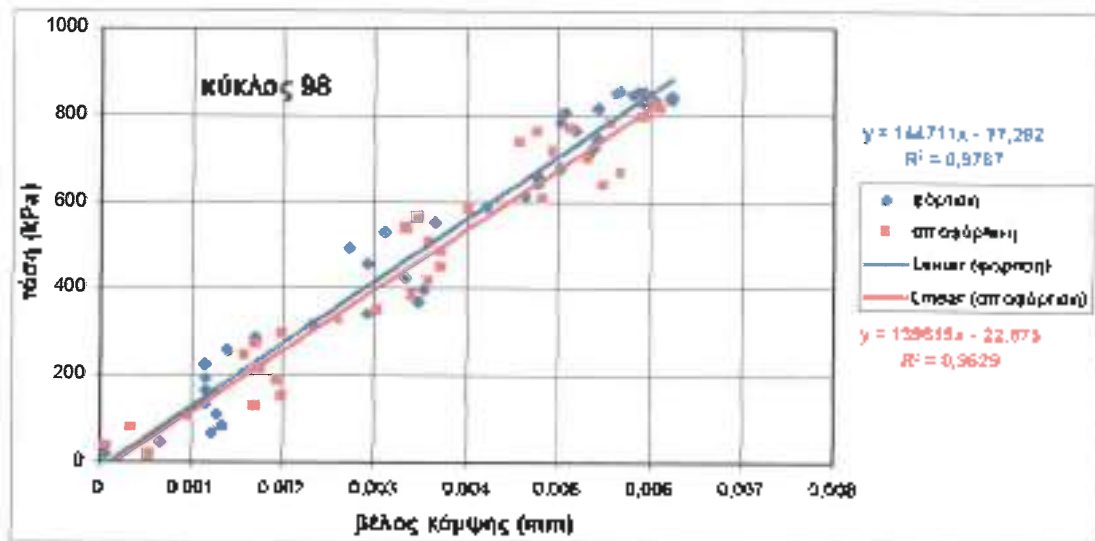
Σχήμα Γ-63: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες πύλλινδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμεντό 4%)



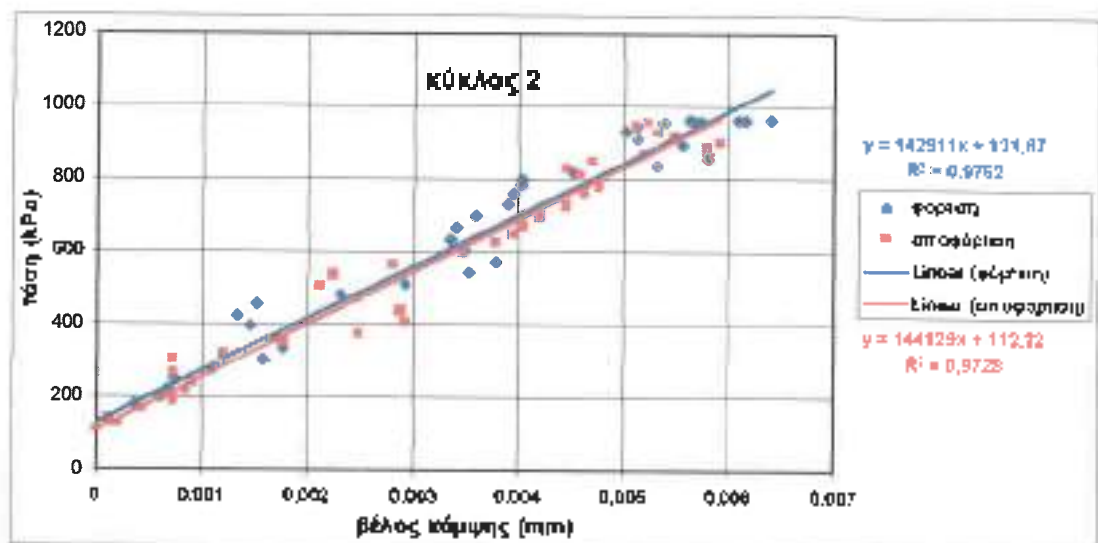
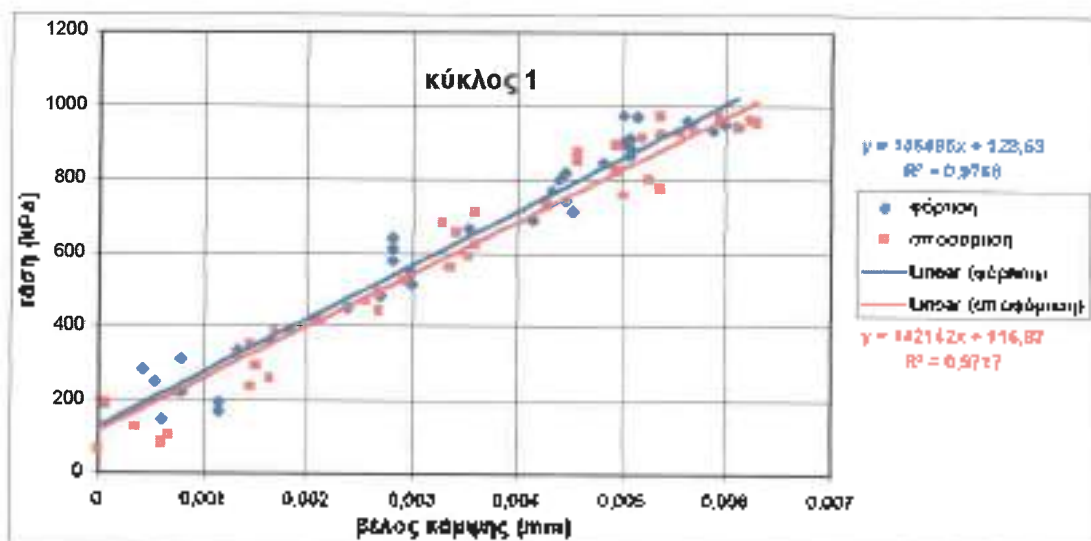
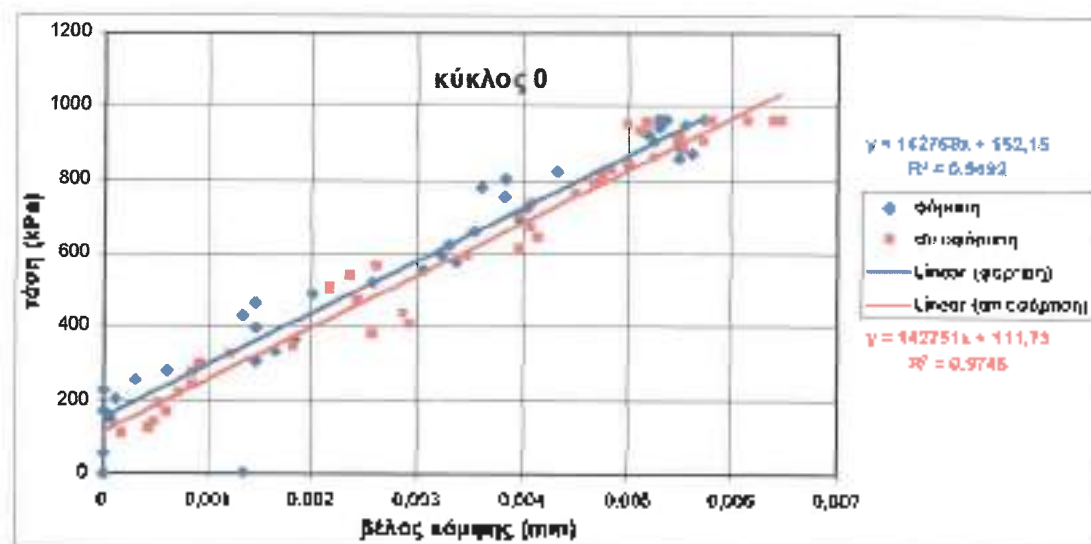
Σχήμα Γ-64: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυλινδρική παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο F8 (γαλάκτωμα 1% - τοιμέγντο 4%)



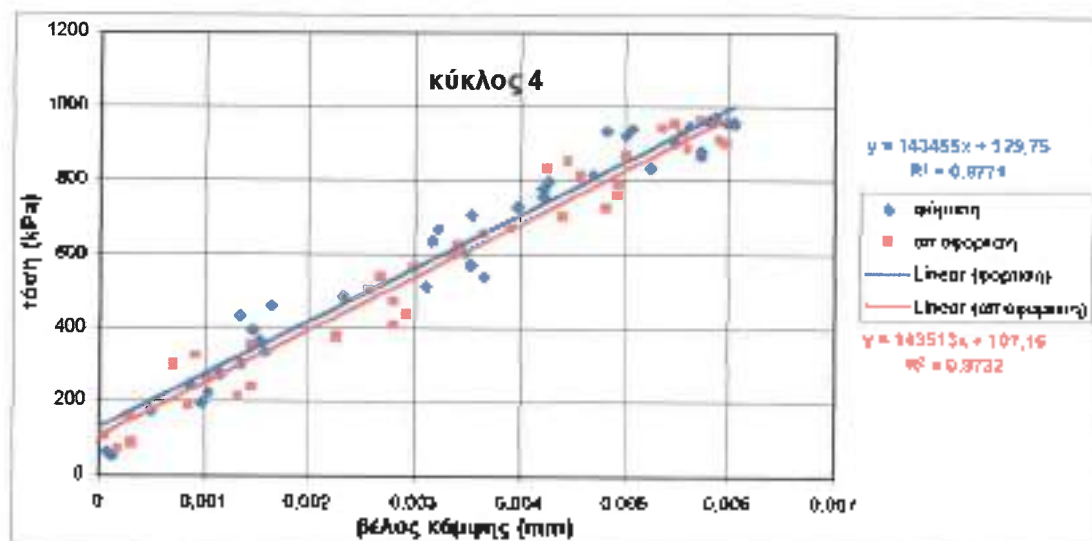
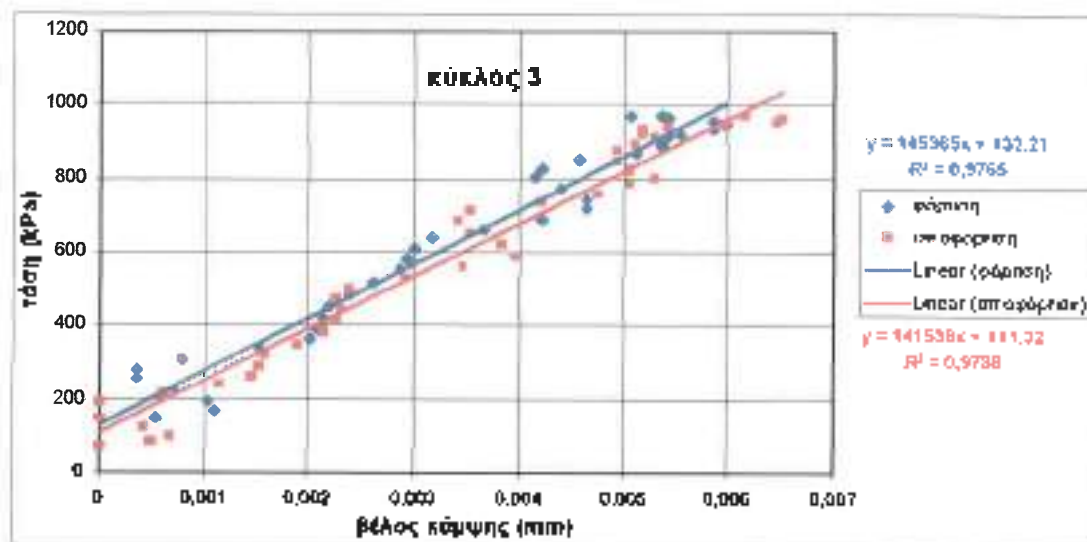
Σχήμα Γ-65: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθέτες καλλιγνήμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δεικνύμενο 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



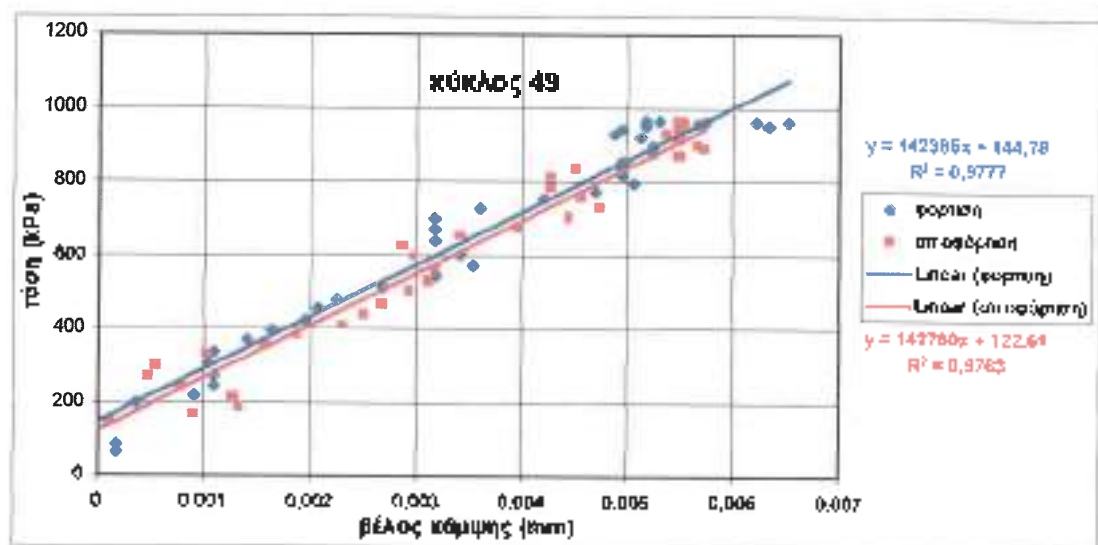
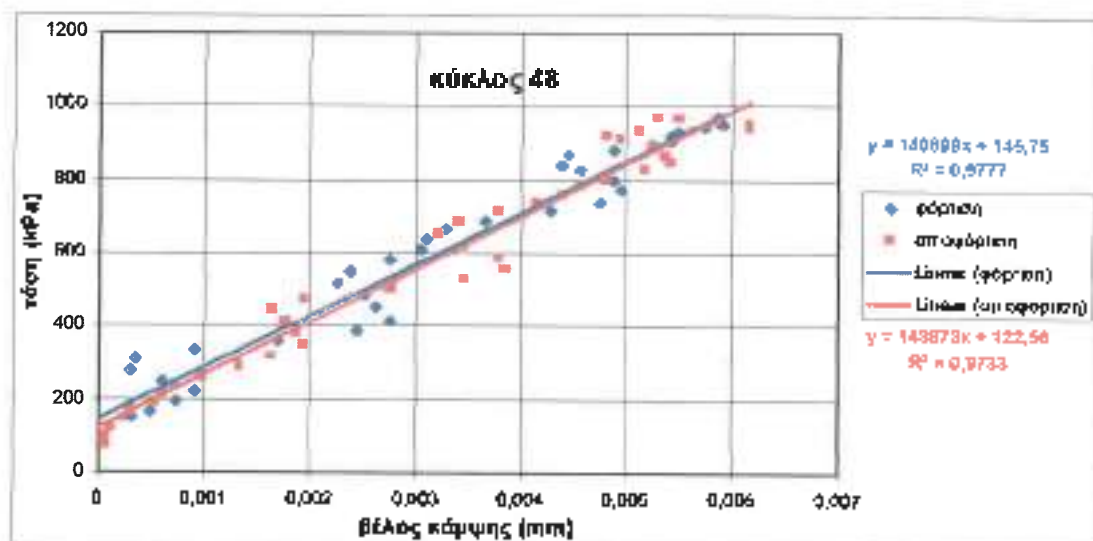
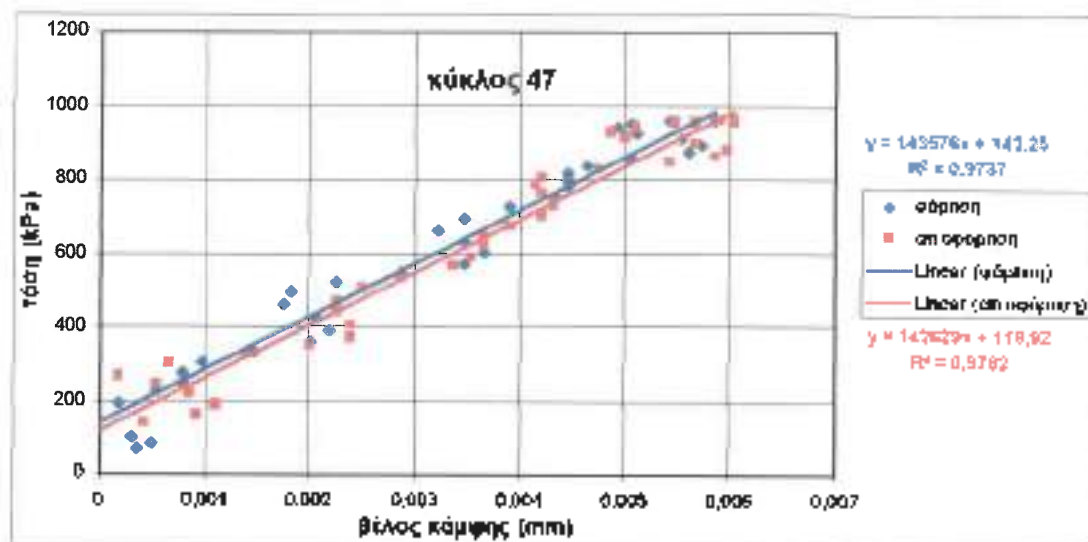
Σχήμα Γ-66: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το άκτιμο 18 (γαλακτώμα 1% - τσιμέντο 4%)



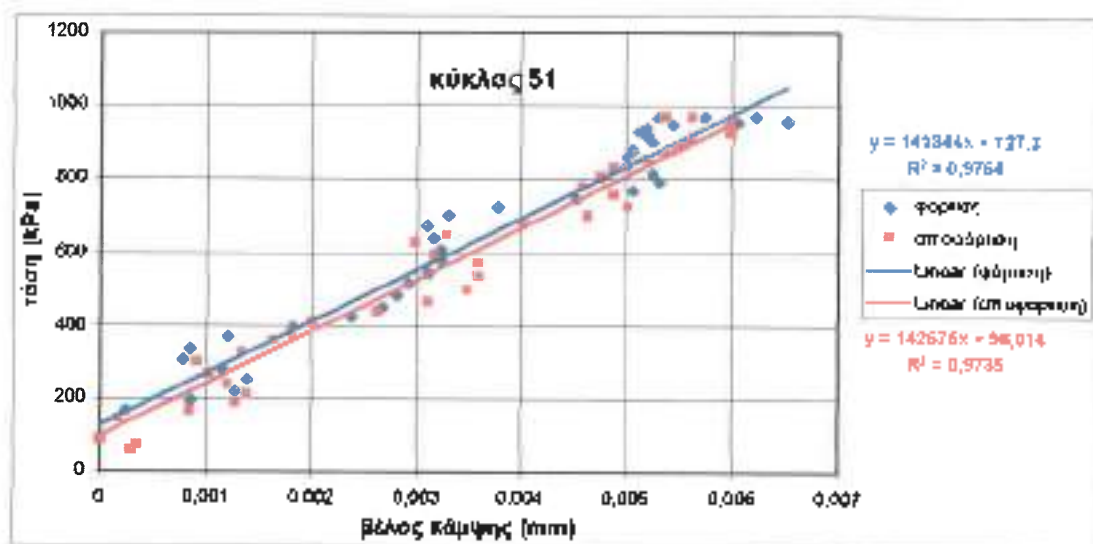
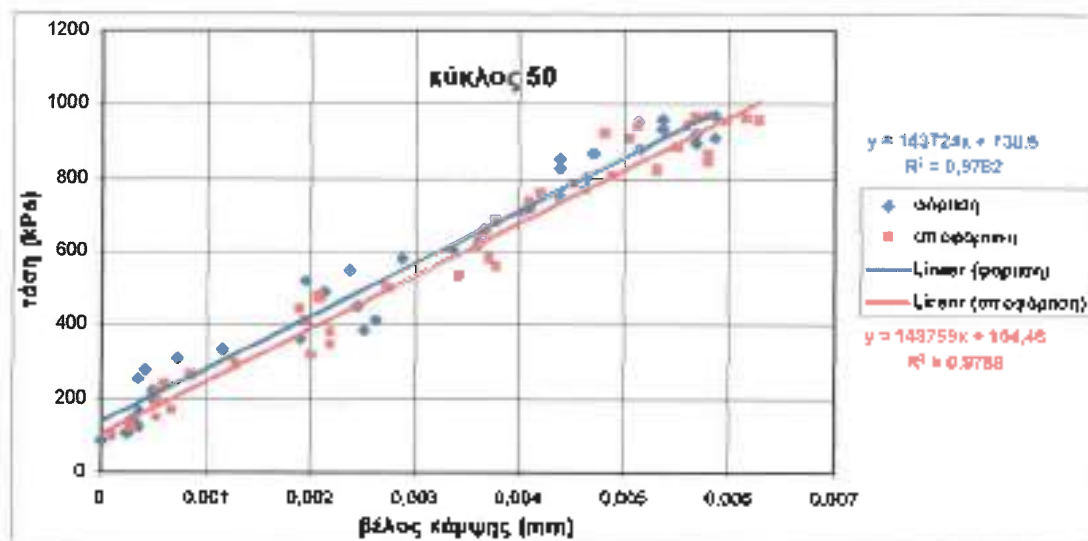
Σχήμα Γ-67: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλός πολυανδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για τη δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



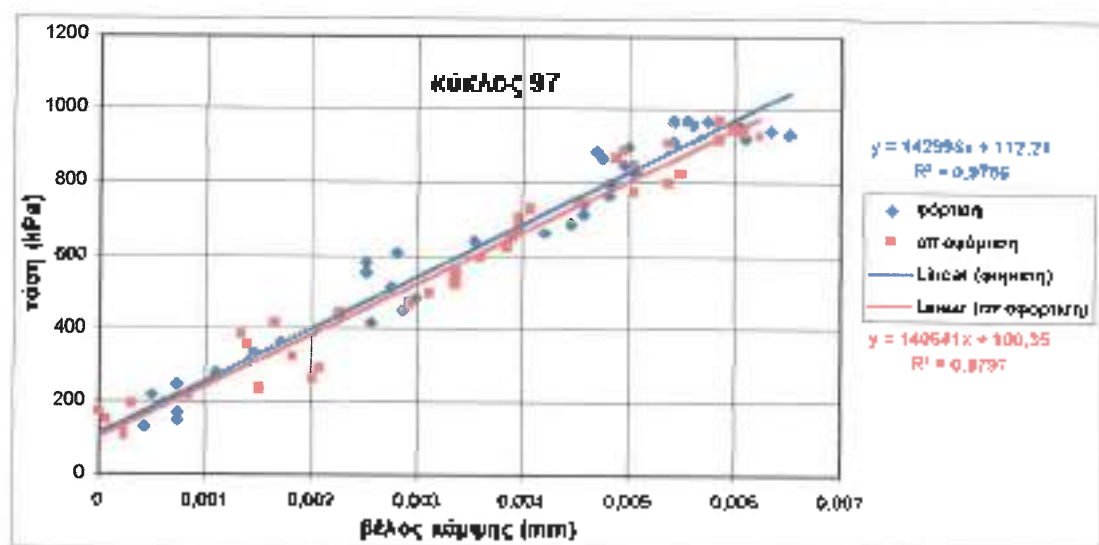
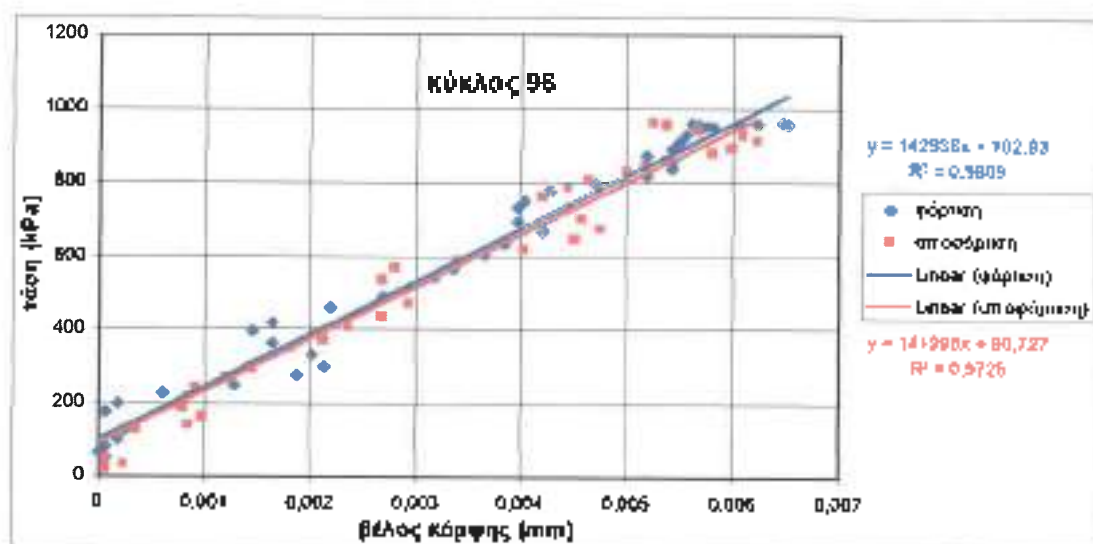
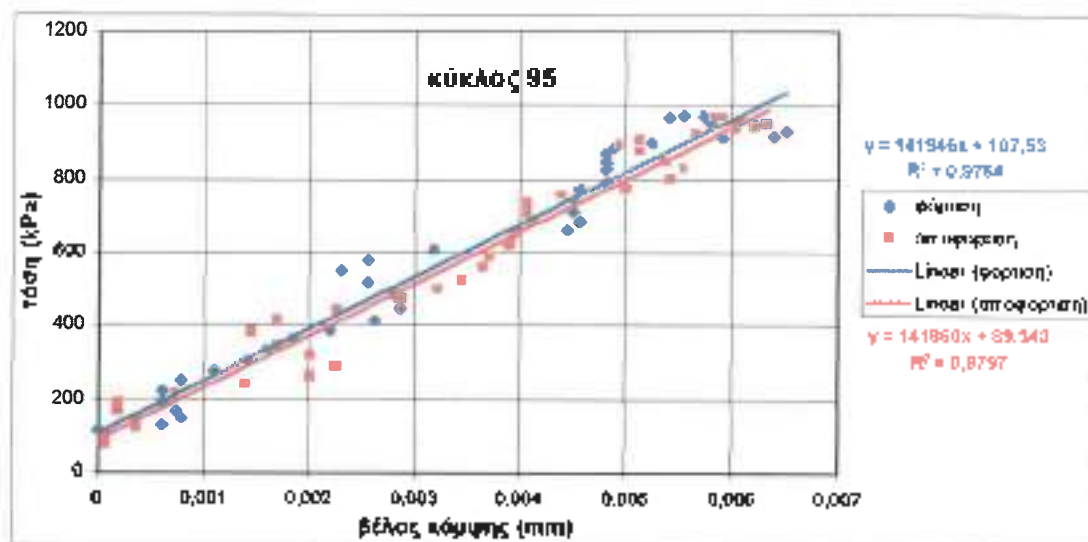
Σχήμα Γ-68: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες καλλιγνόμενης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



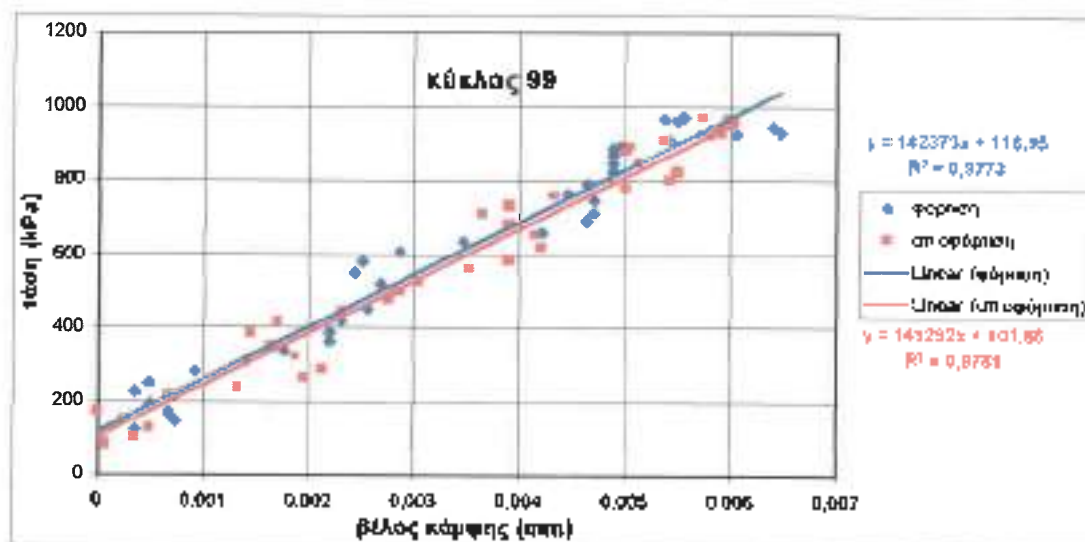
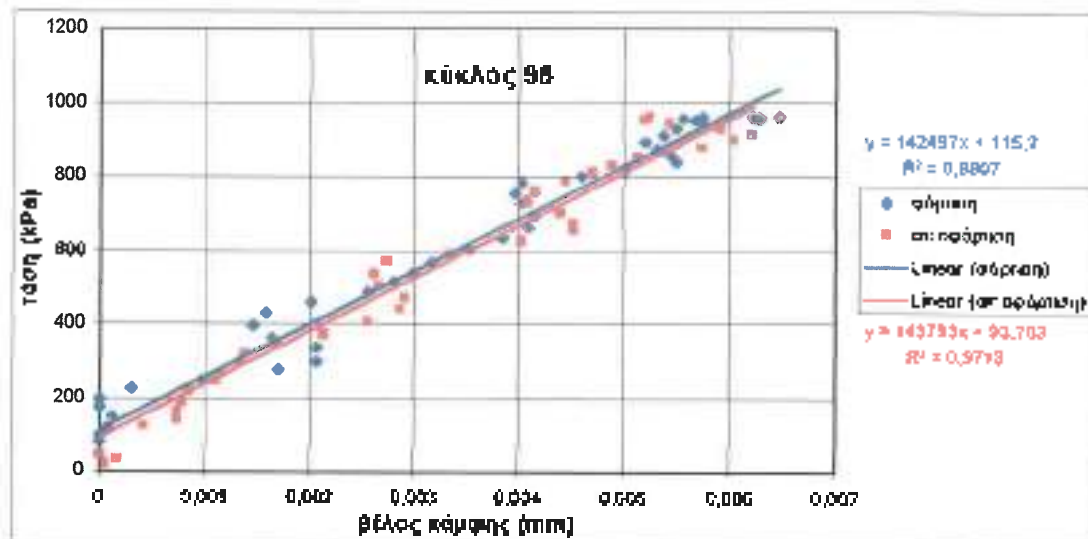
Σχήμα Γ-69: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και υποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτεμα 2% - τσιμέντο 4%).



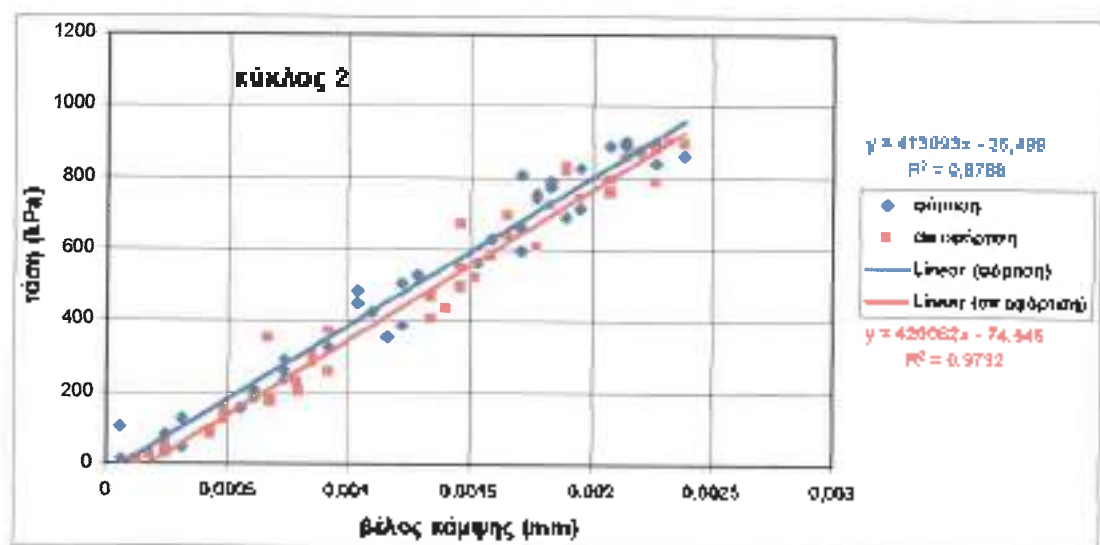
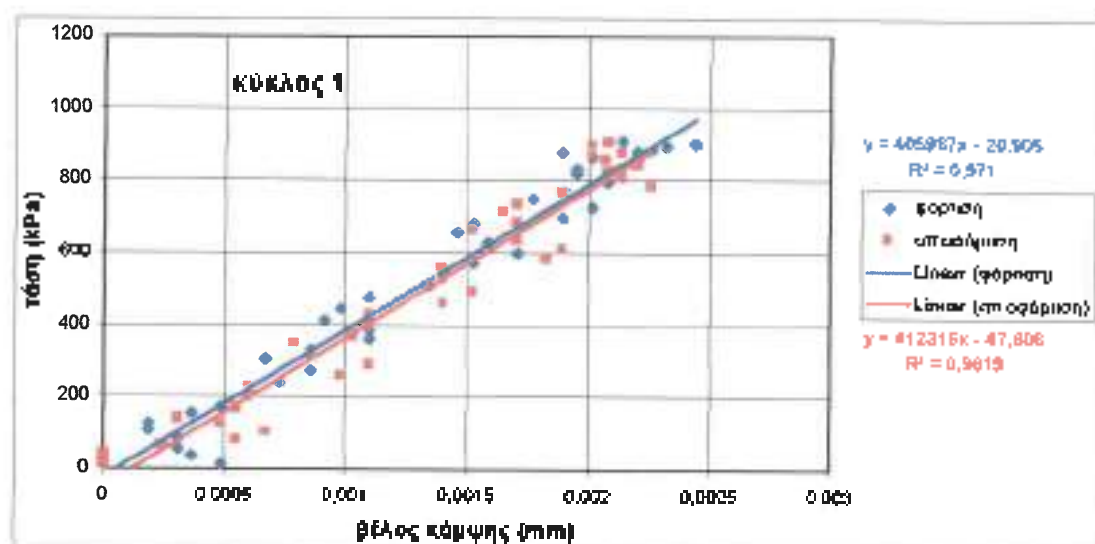
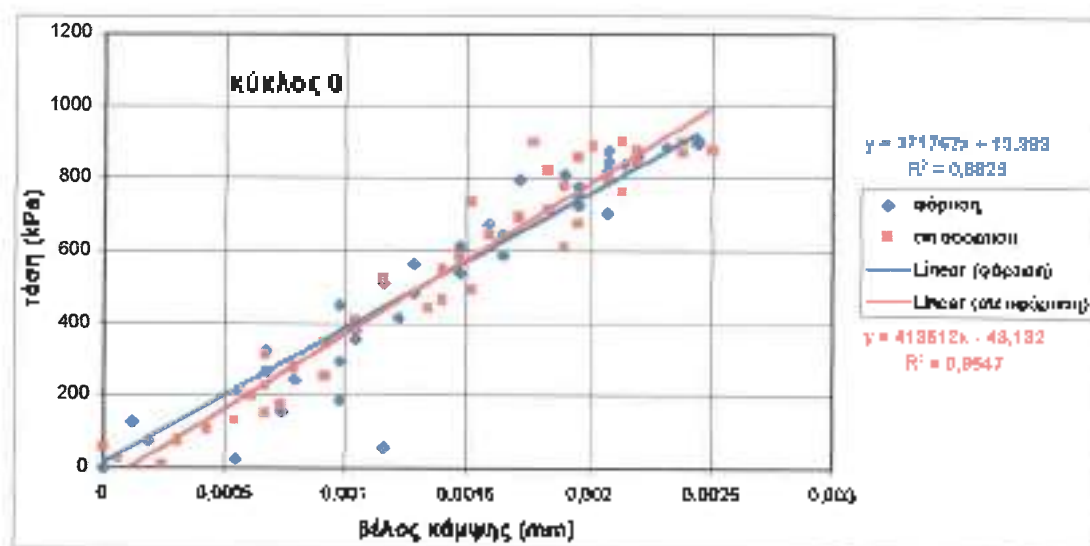
Σχήμα Γ-70: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες πωλινωρύμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



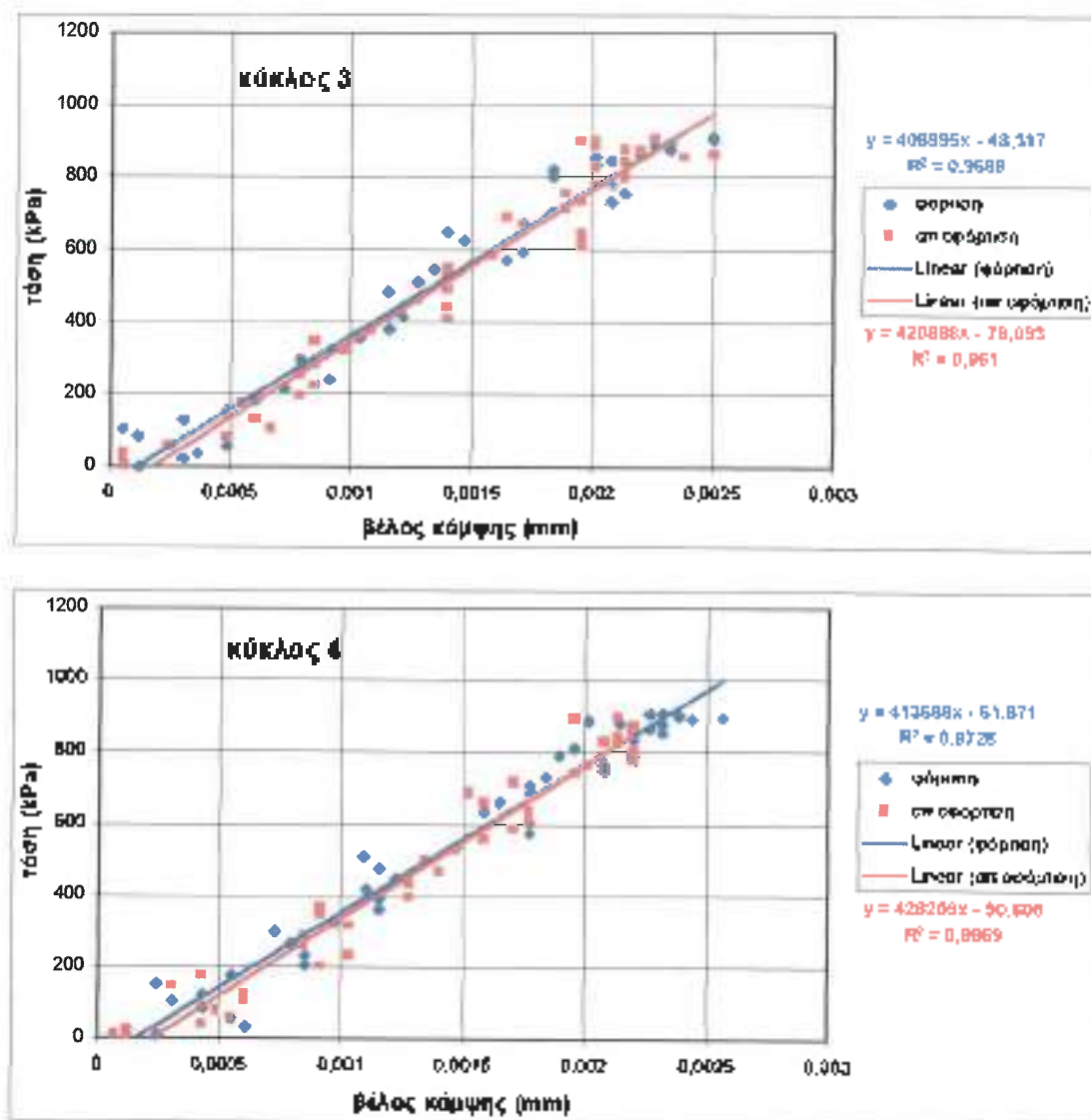
Σχήμα Γ-74: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία παλινδρομησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 20 (γαλακτώμα 2%η – τοιμέντο 4%)



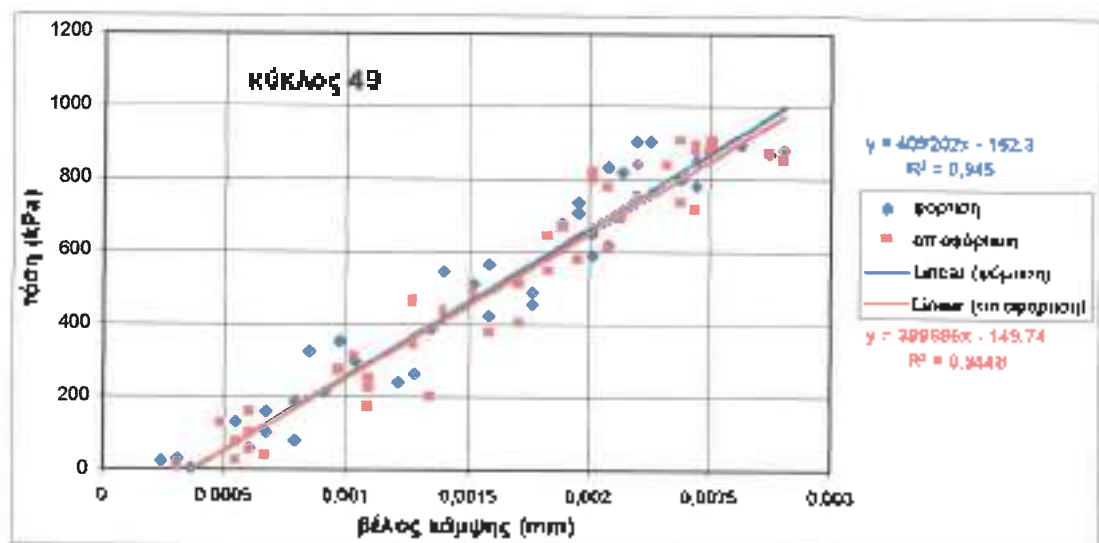
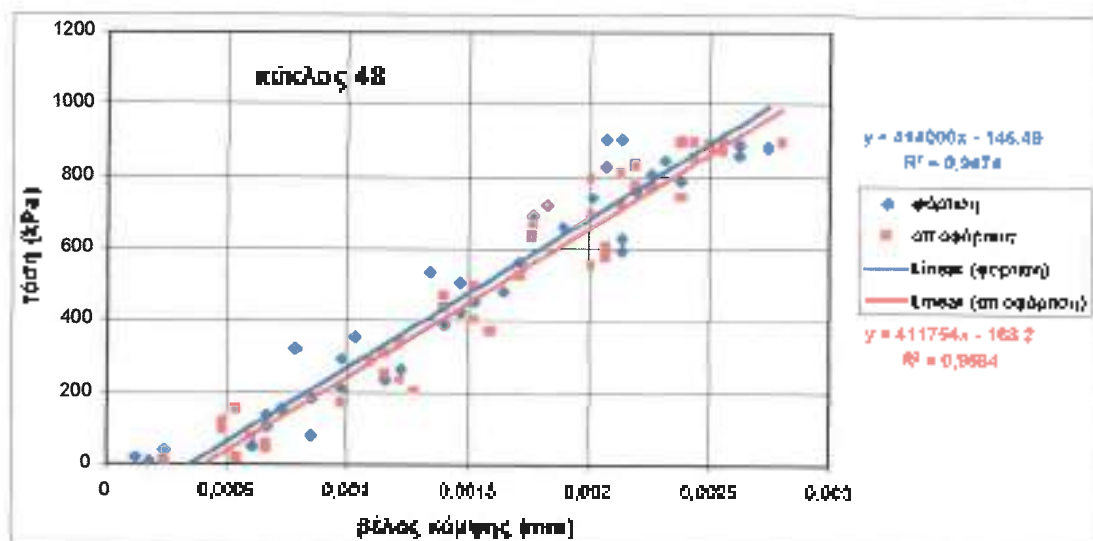
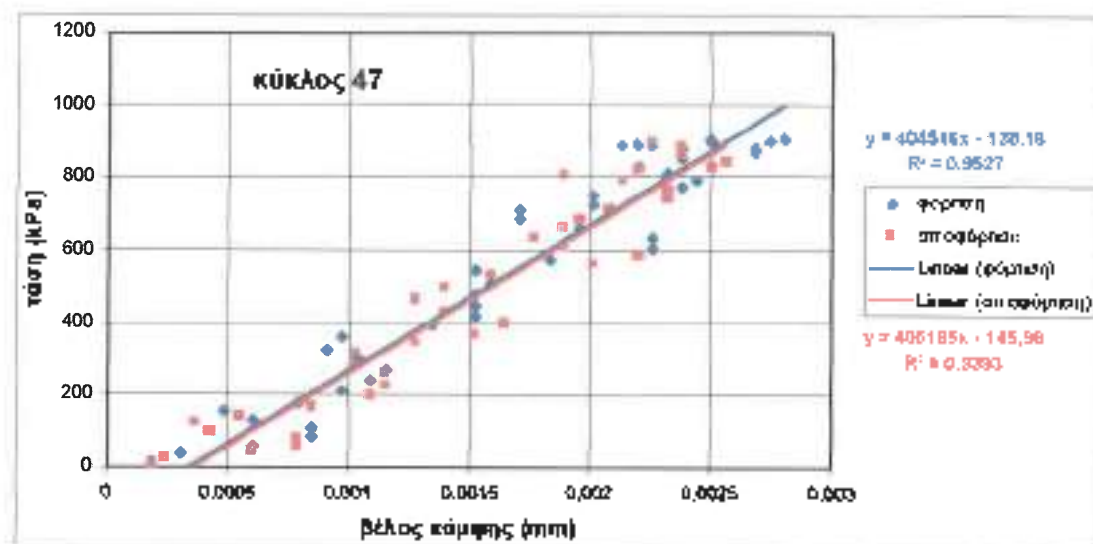
Σχήμα Γ-72: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντό 4%)



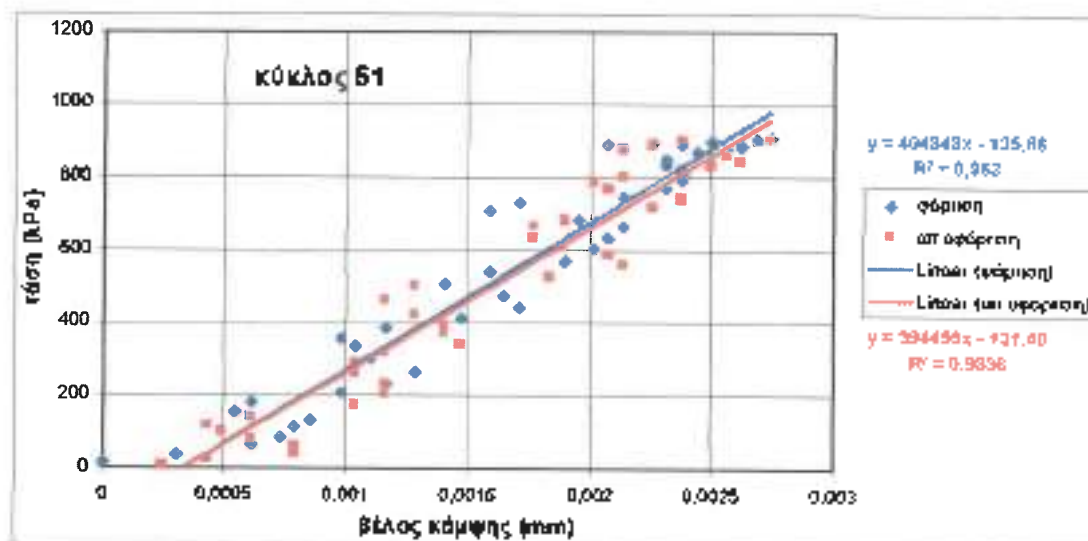
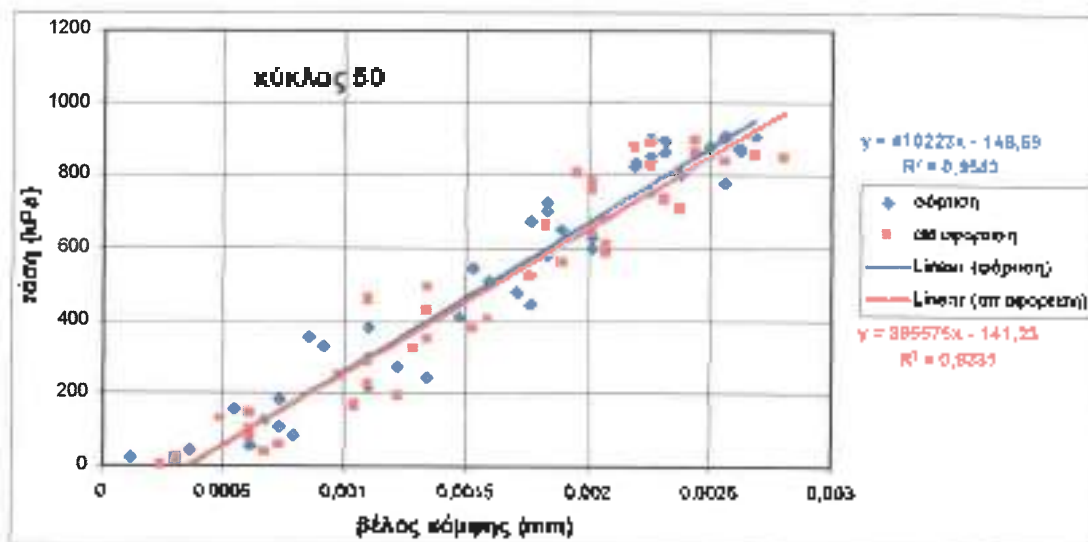
Σχήμα Γ-73: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (επιθετική παλινδρομική), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 2i (γαλάκτωμα 3% - πεισμένο 4%)



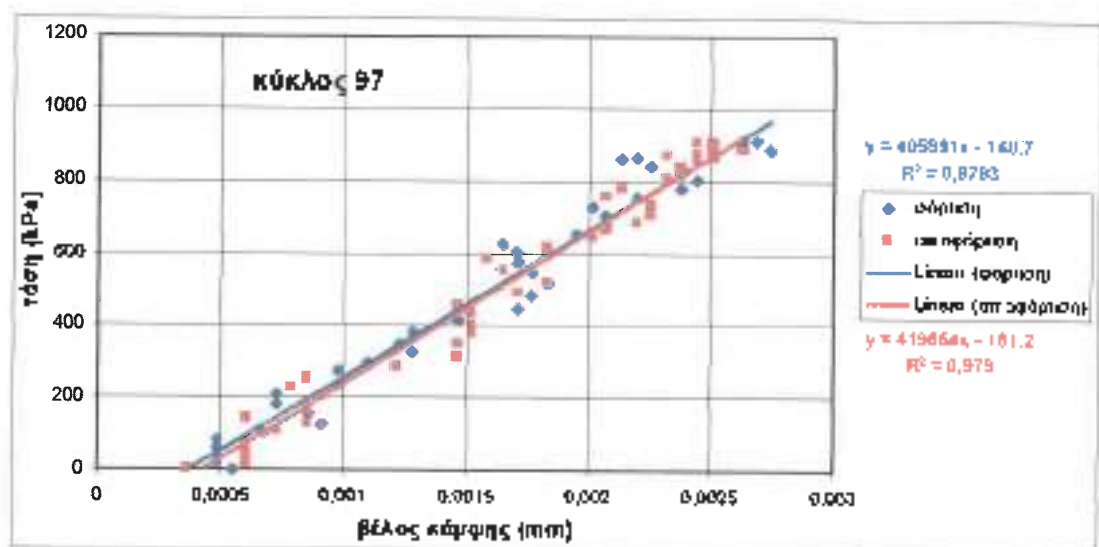
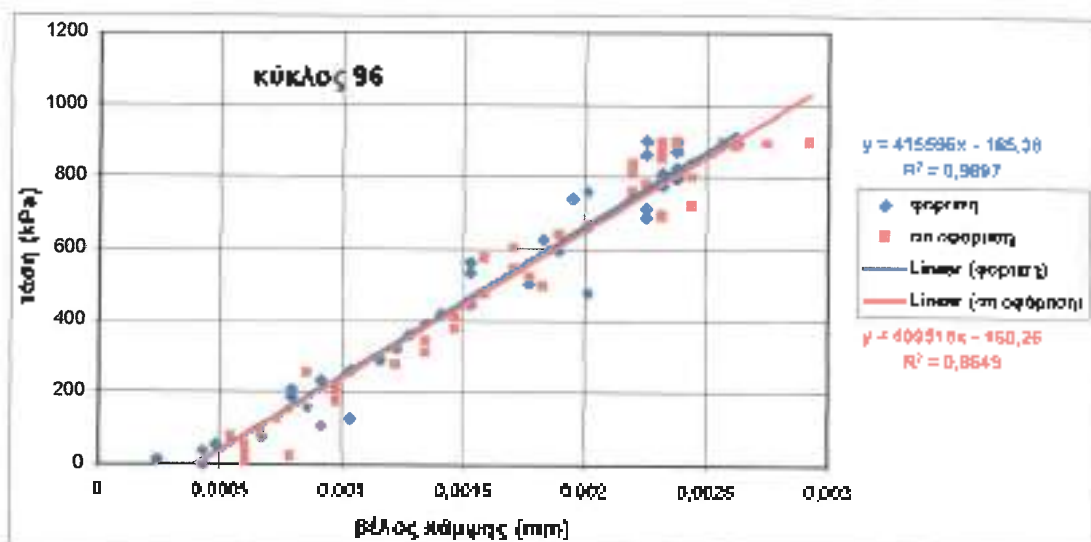
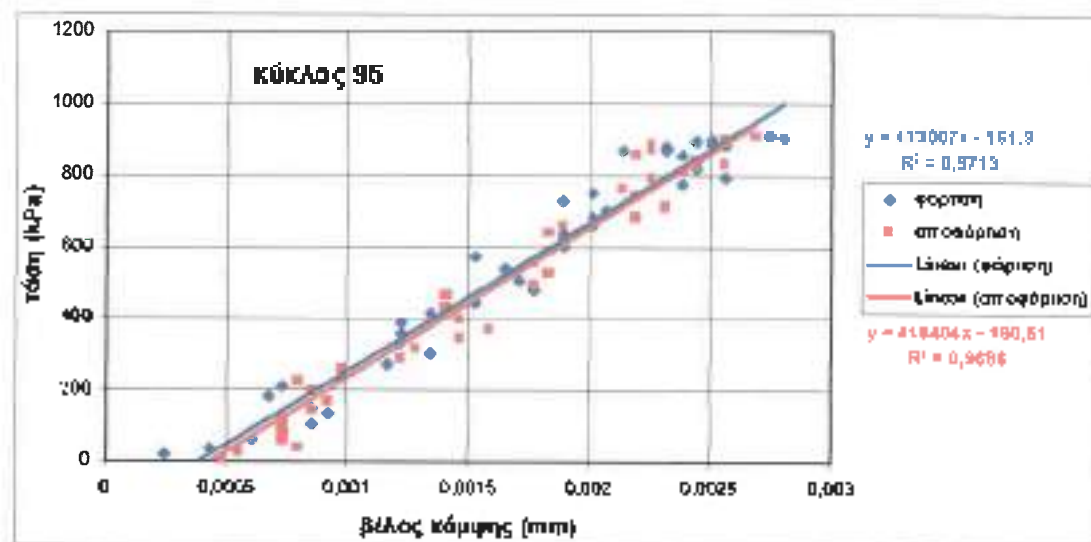
Σχήμα Γ-74: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 21 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 4%)



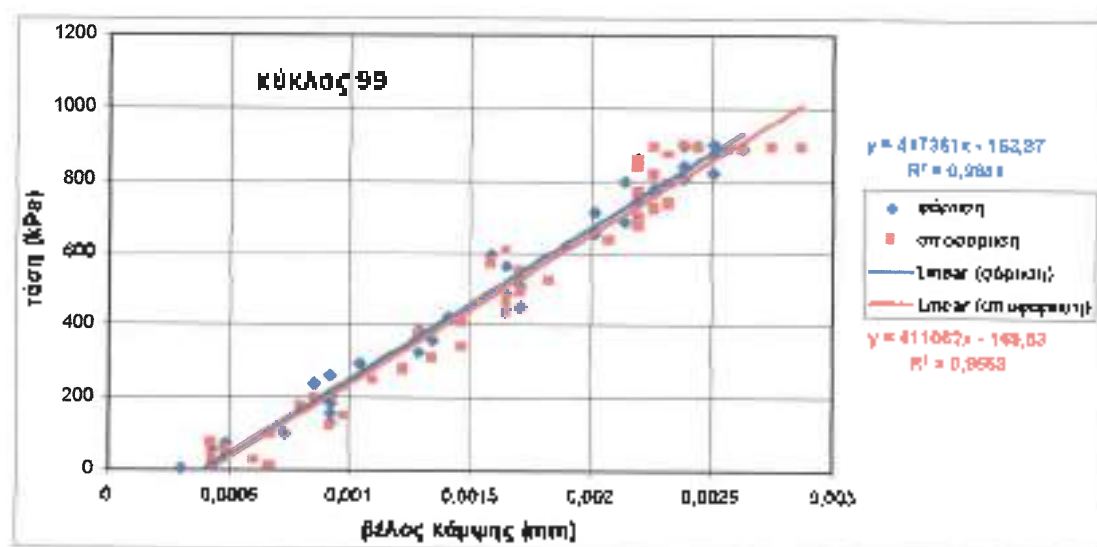
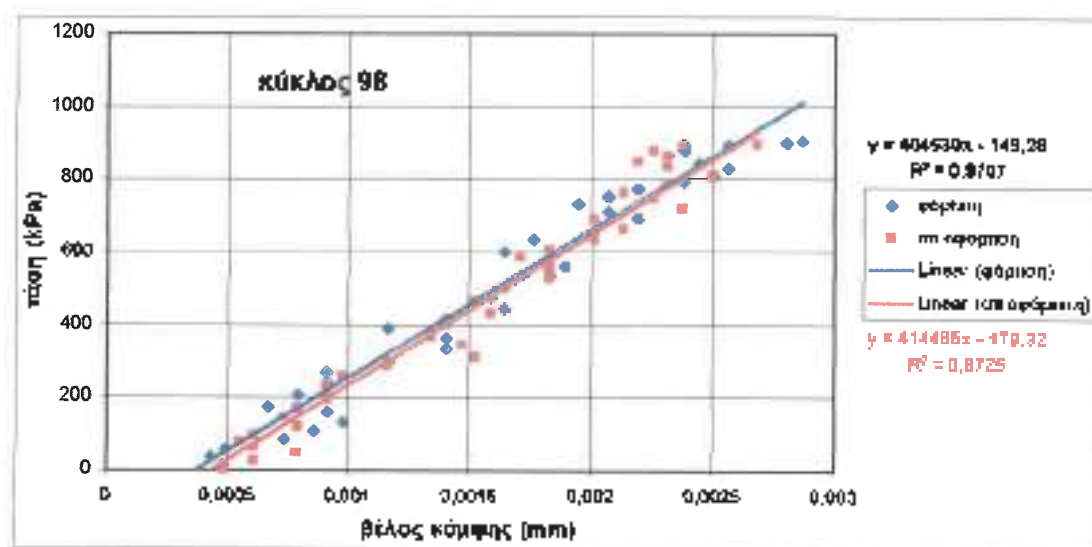
Σχήμα Γ-75: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυλινδρική παλινδρόμησης). κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 21 (γυάλινο 2% - τιμμένο 4%)



Σχήμα Γ-76: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες, παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



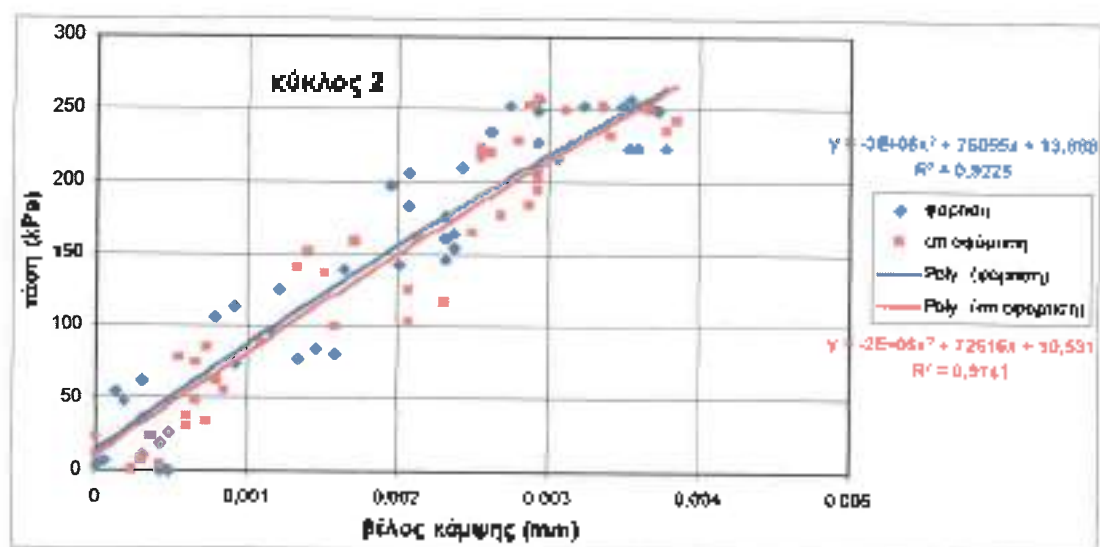
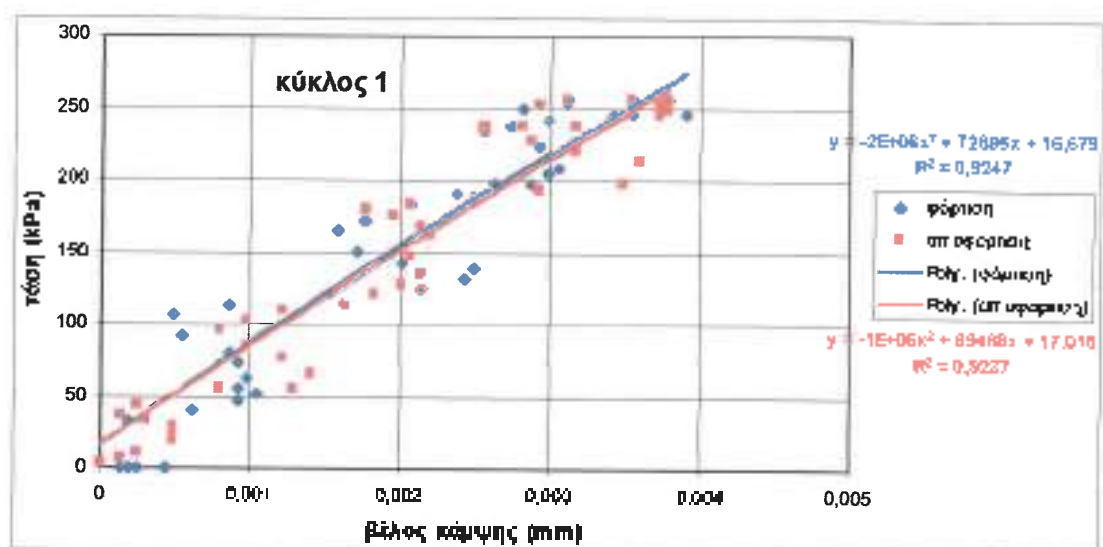
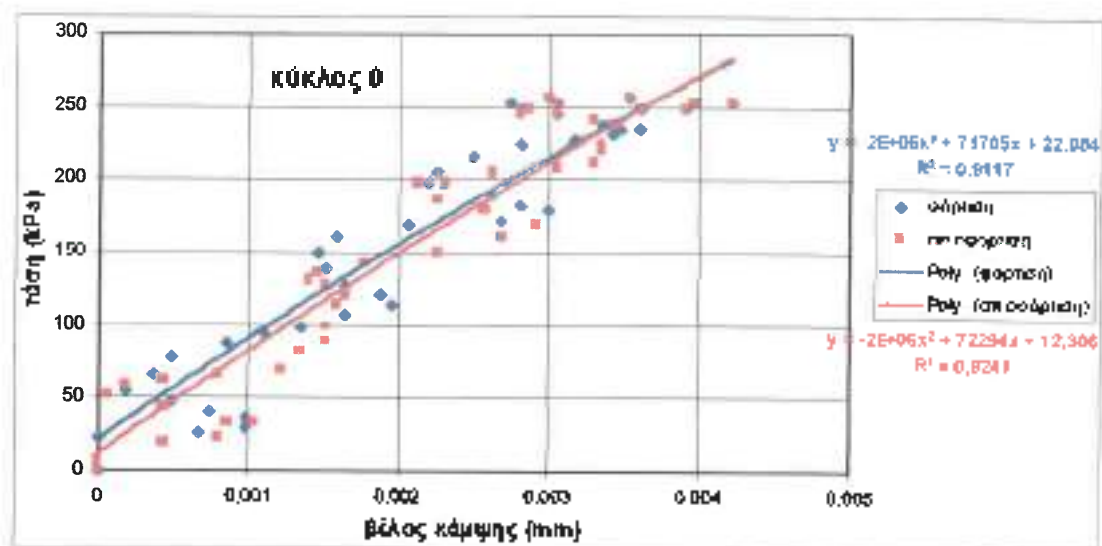
Σχήμα J-77: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθεία: παλινδρομησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δείγμα 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντό 4%)



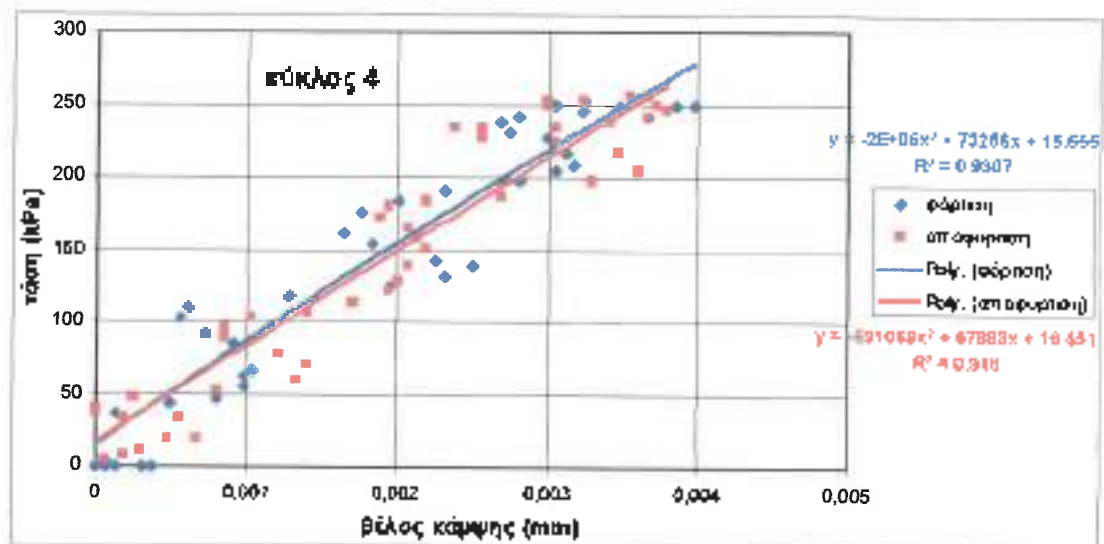
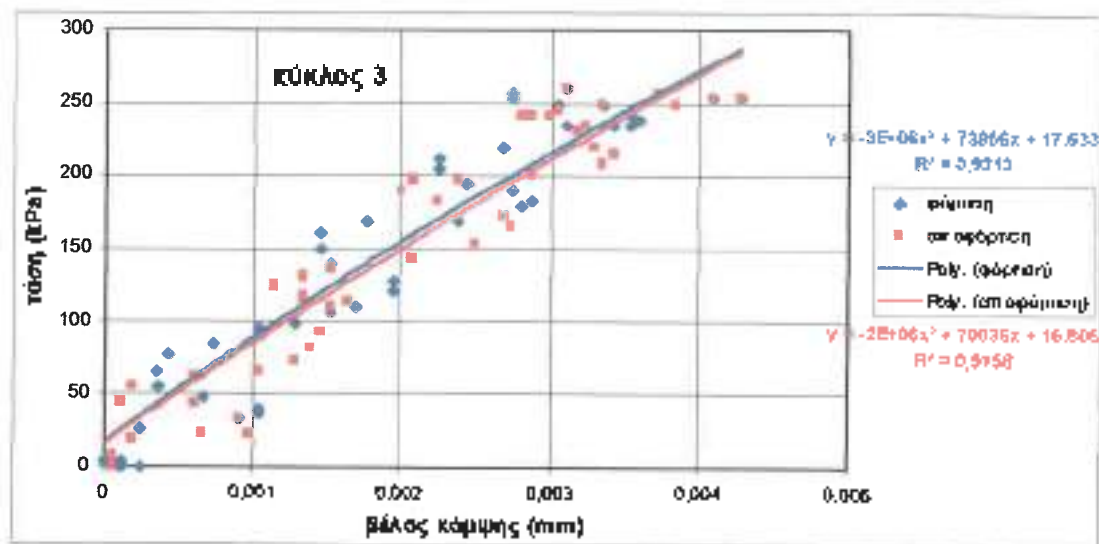
Σχήμα Γ-78: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (ευθείες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)

Παράρτημα Δ

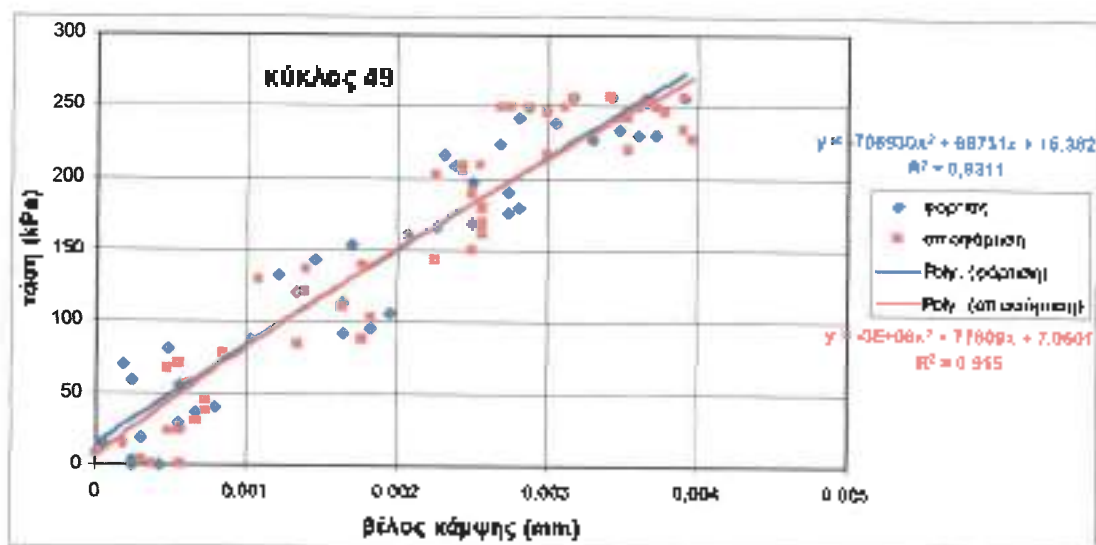
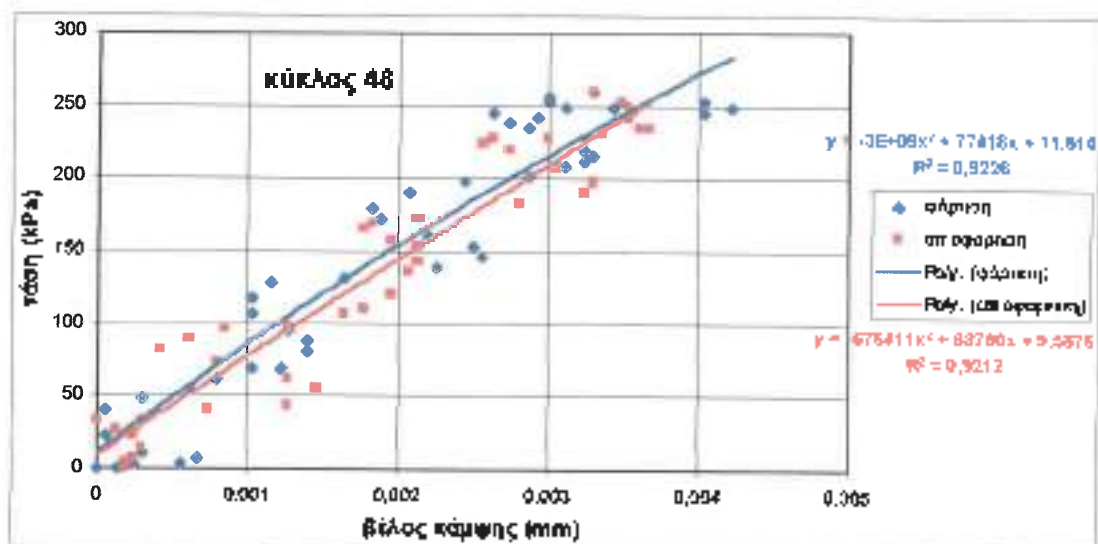
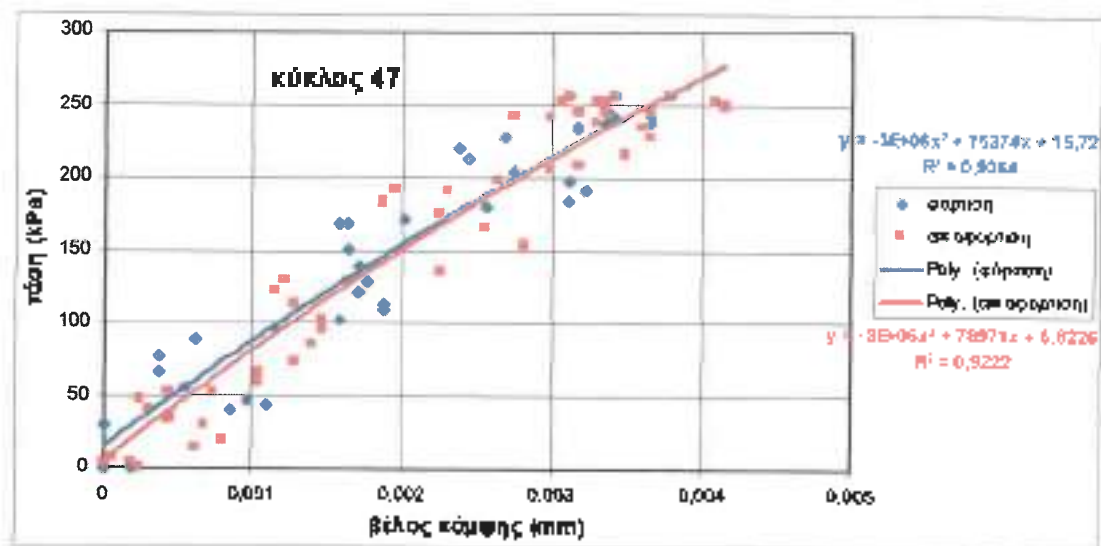
Στο παράρτημα αυτό, παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης – βόλτας, κύμησης για φόρτιση και αποφόρτιση (με τις καμπύλες παλινδρόμησης), για κάθε κύκλο φόρτισης, για όλα τα δοκίμια όλων των μιγμάτων. Παρουσιάζονται τα δοκίμια 2 και 3 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%), 5 και 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%), 8 και 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%), 11 και 12 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%), 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%), 17 και 18 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%) και 20 και 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%).



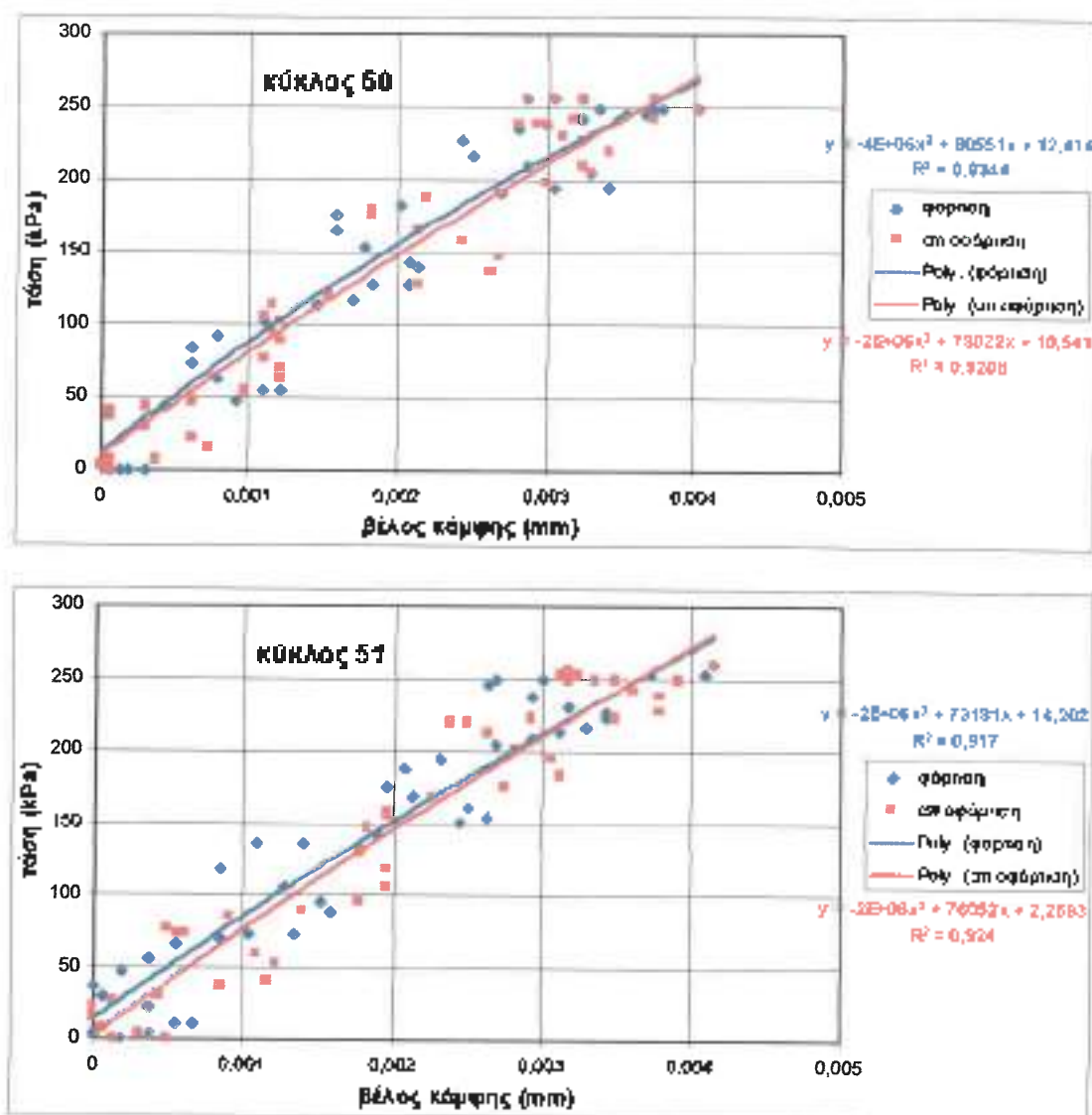
Σχήμα Δ-1: Πάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυκλοπλάγες παλλανδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο 2 (γαλάντωμα 2% - τοιμμένο 2%)



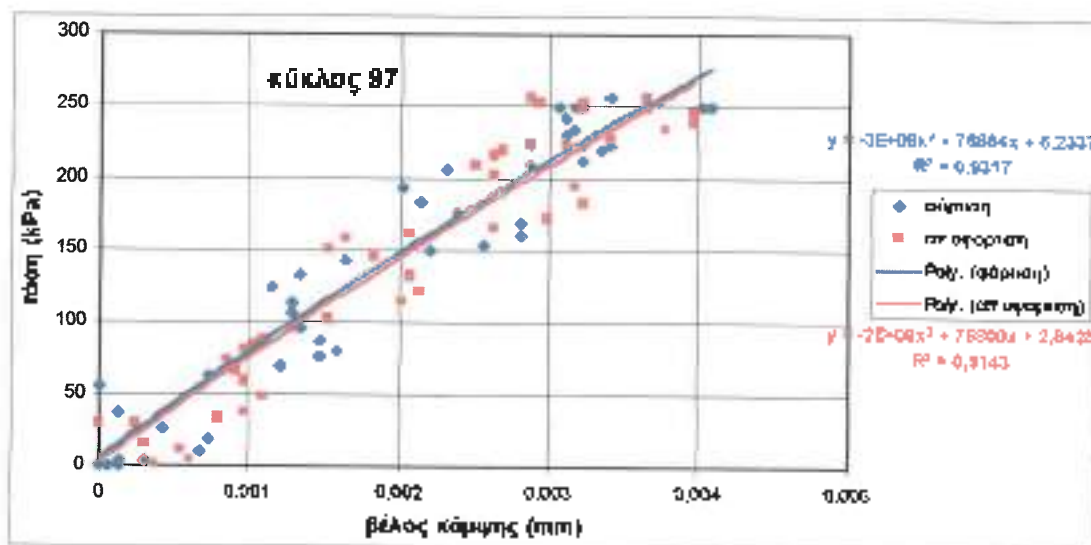
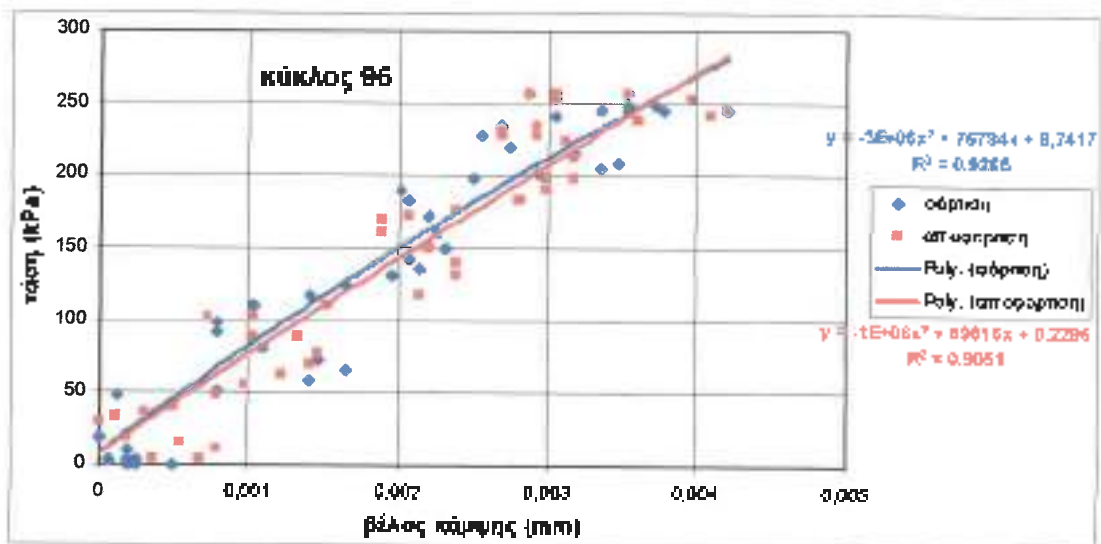
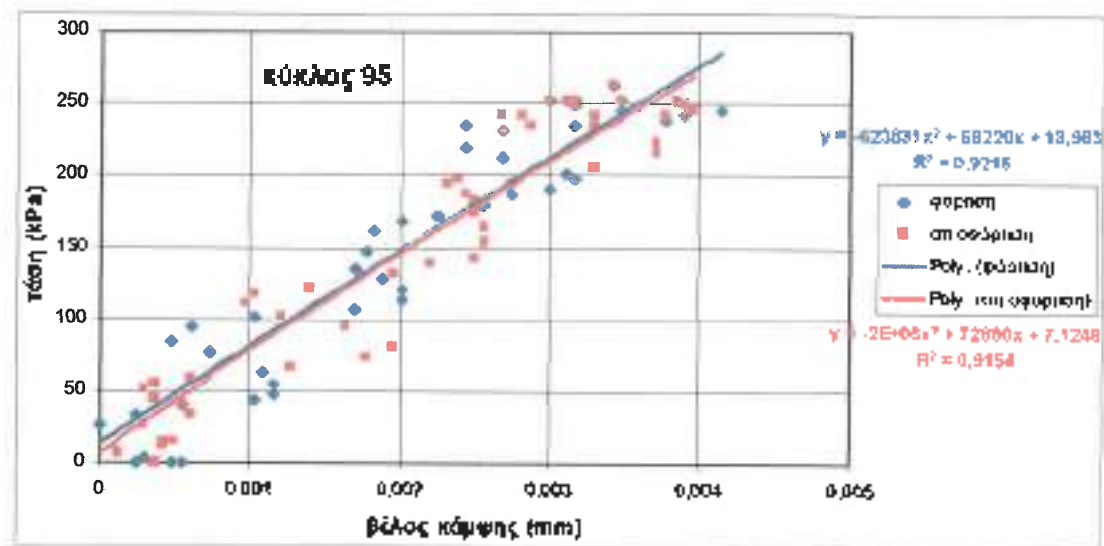
Σχήμα Δ-2: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρομησης), κύκλοι 3, 4, για το δοκίμιο 2 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 3%)



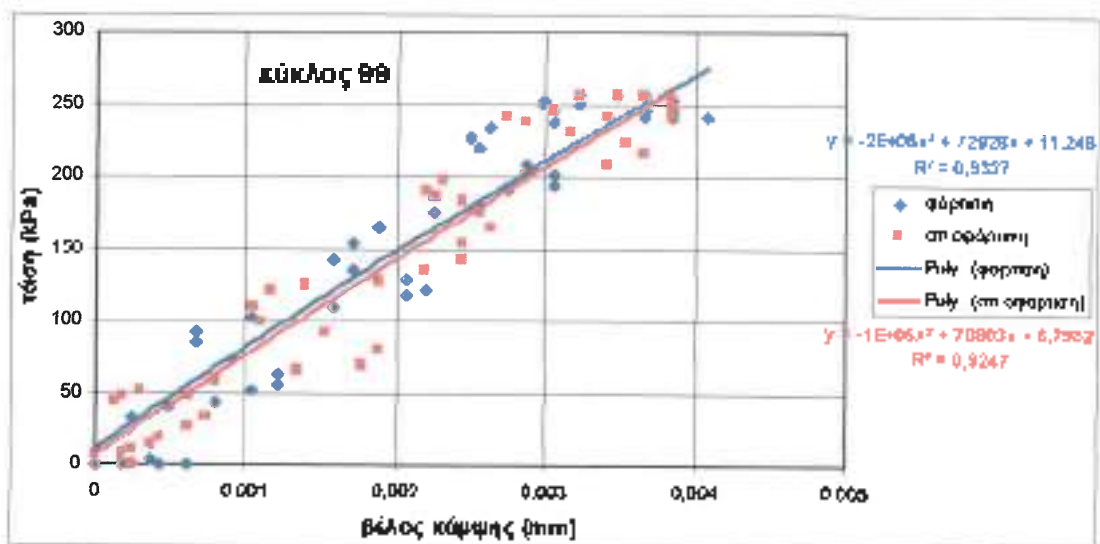
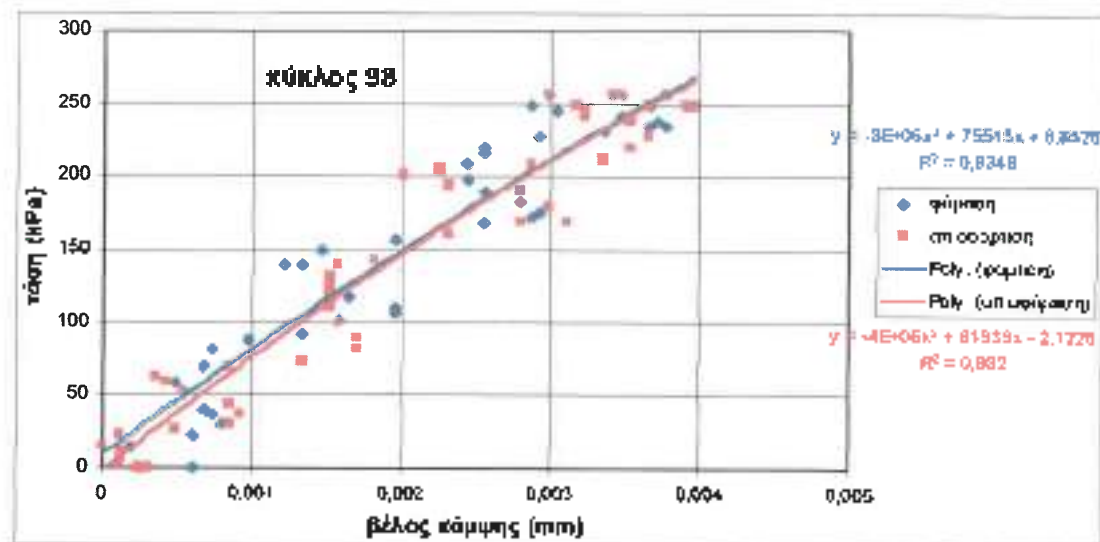
Σχήμα Δ-3: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 2 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντο 2%)



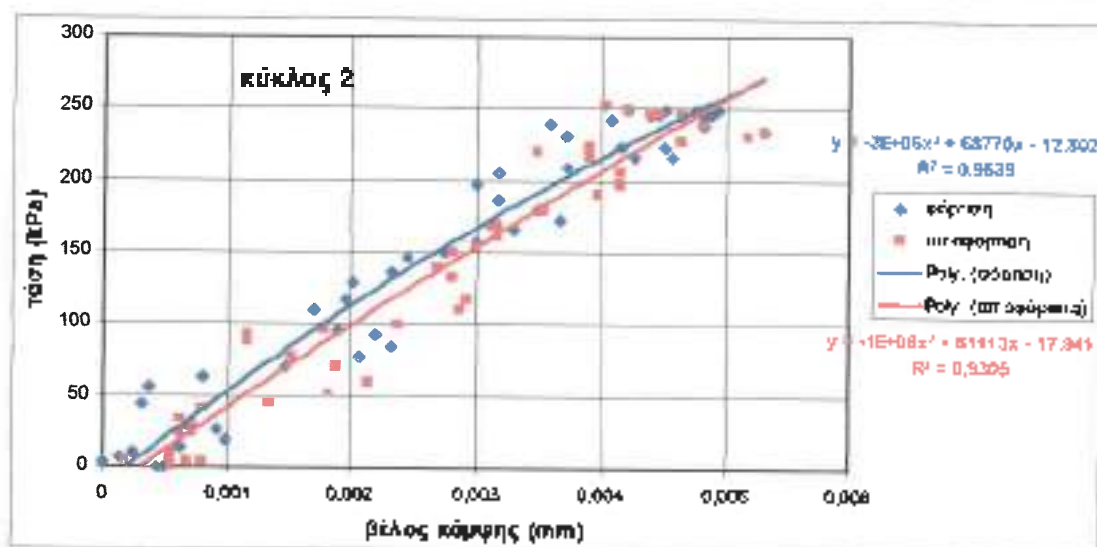
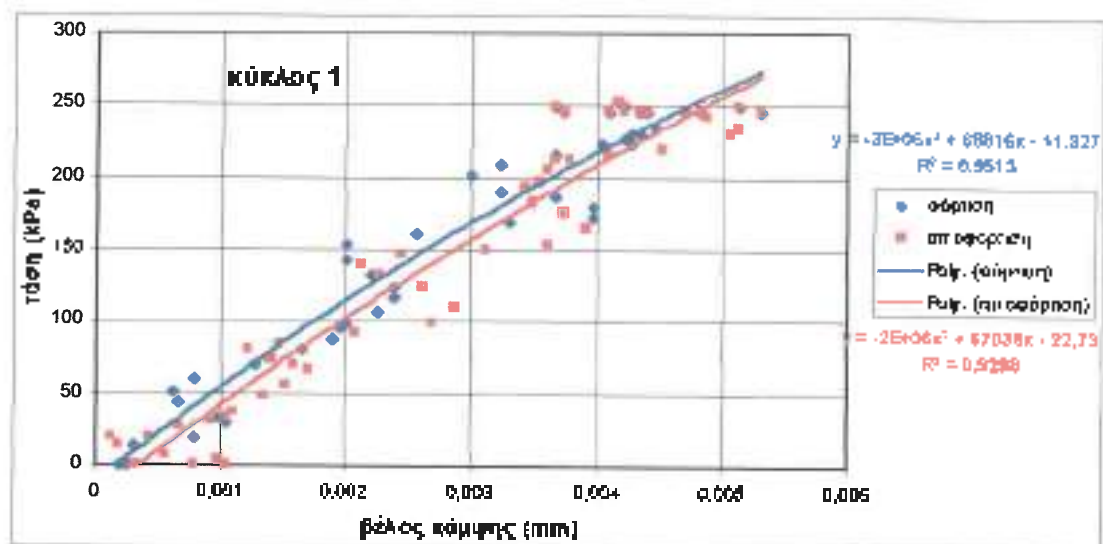
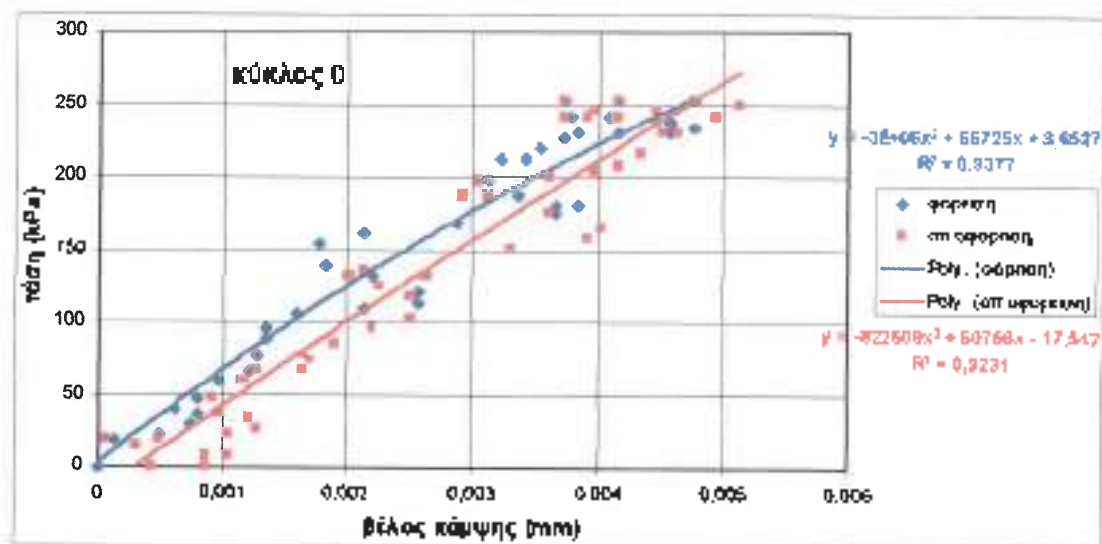
Σχήμα Α-4: Πάση – μέγας κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51, για το δοκίμιο 2 (γαλάντωμα 2% - τσιμέντο 2%)



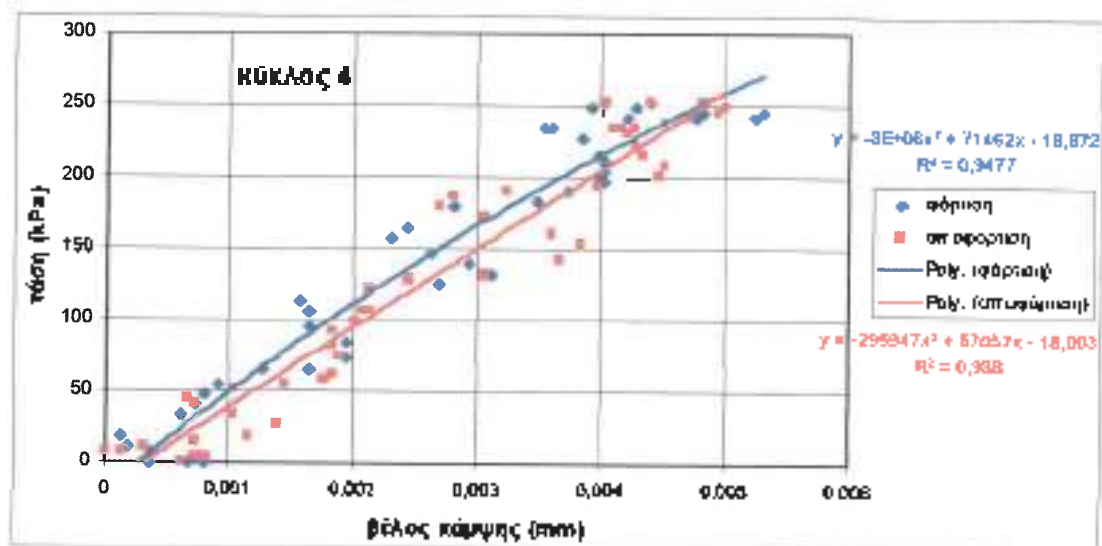
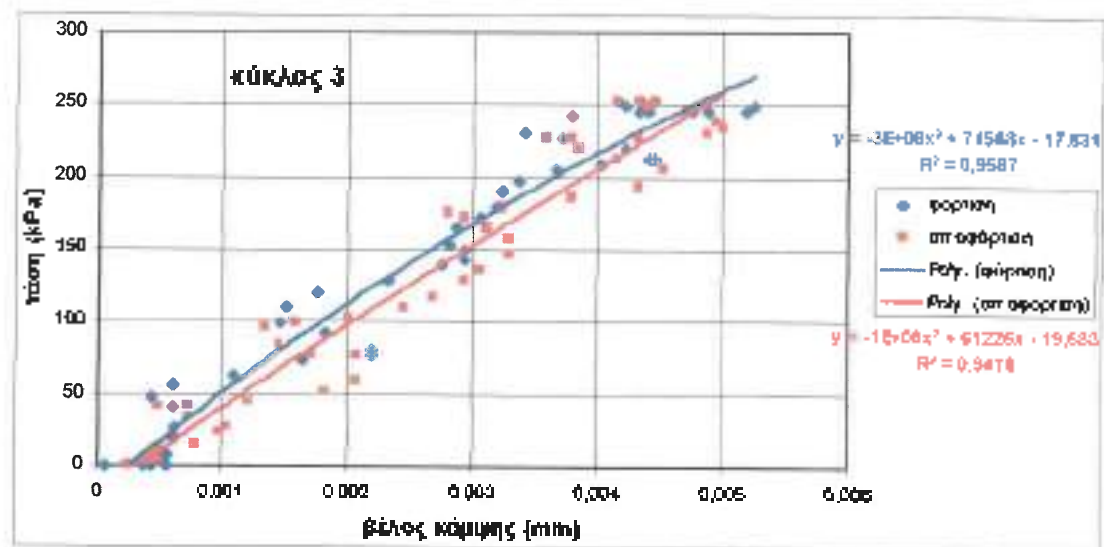
Σχήμα Δ-5: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97, για το δοκίμιο 2 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 2%)



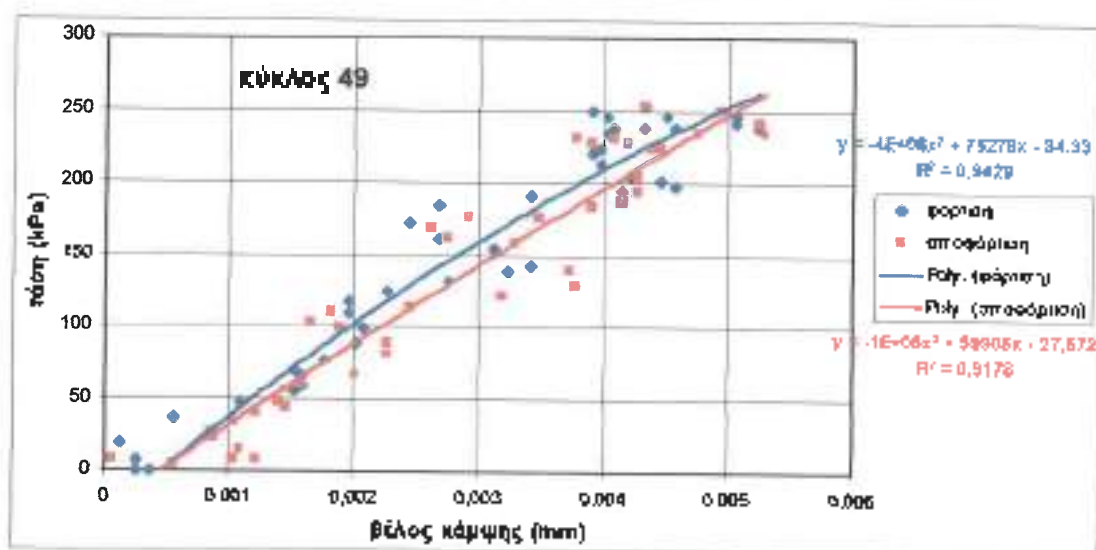
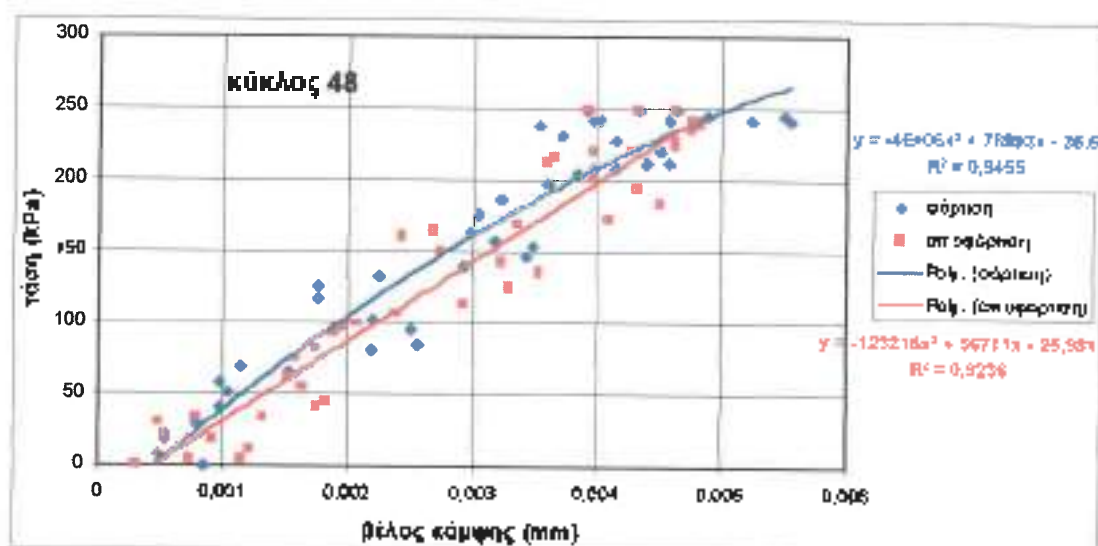
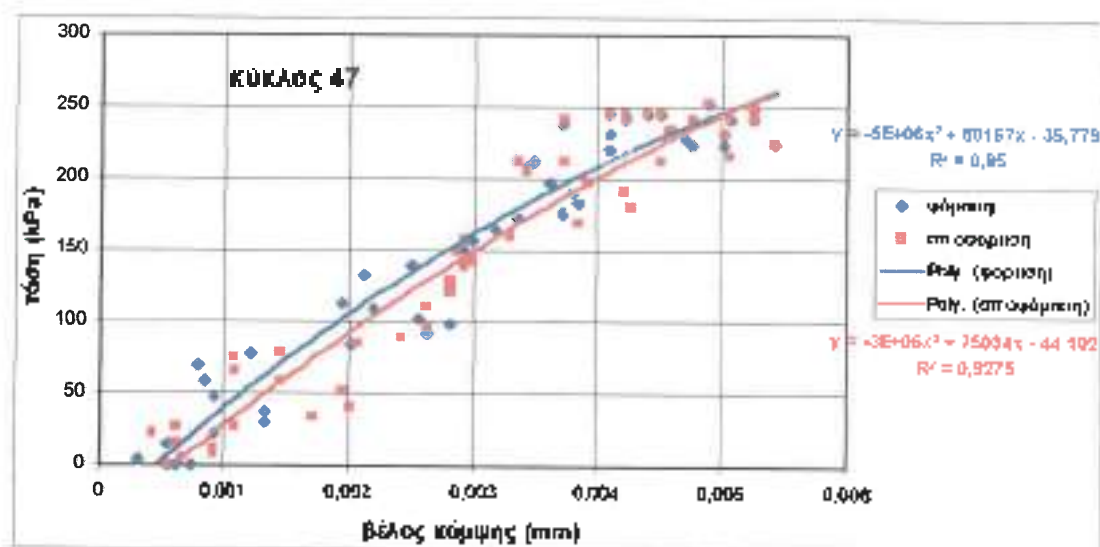
Σχήμα Δ-6: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99, για το δόκιμο 2 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 2%)



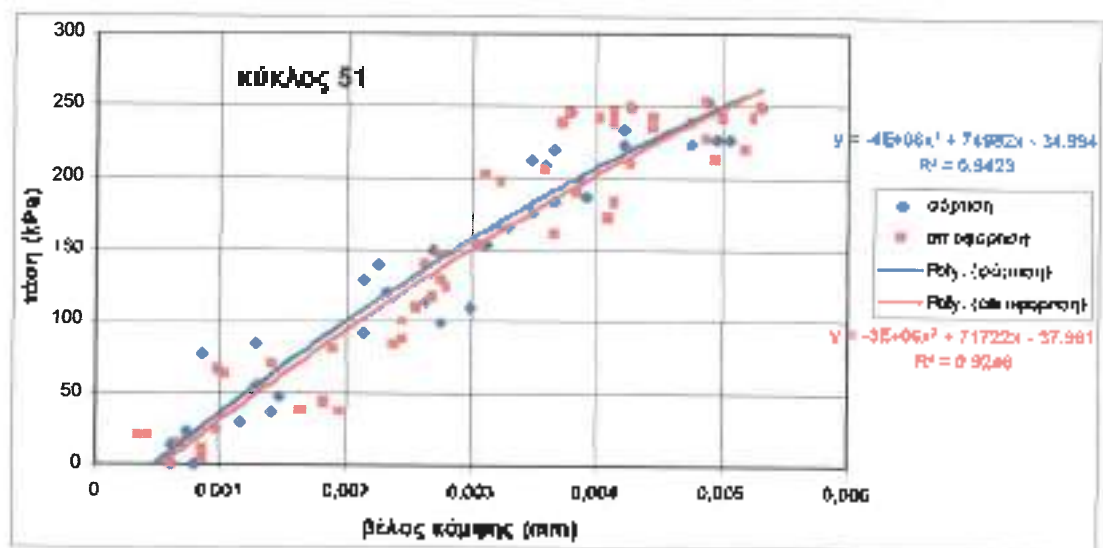
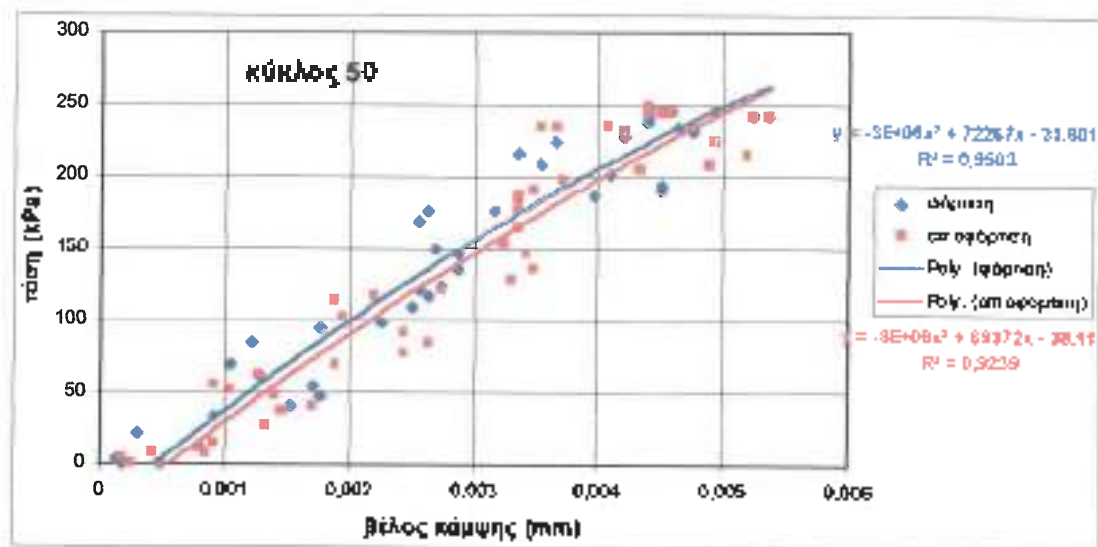
Σχήμα Δ-7: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2, για το δοκίμιο 3 (γινώσκτομα 2% - τσιμέντο 2%)



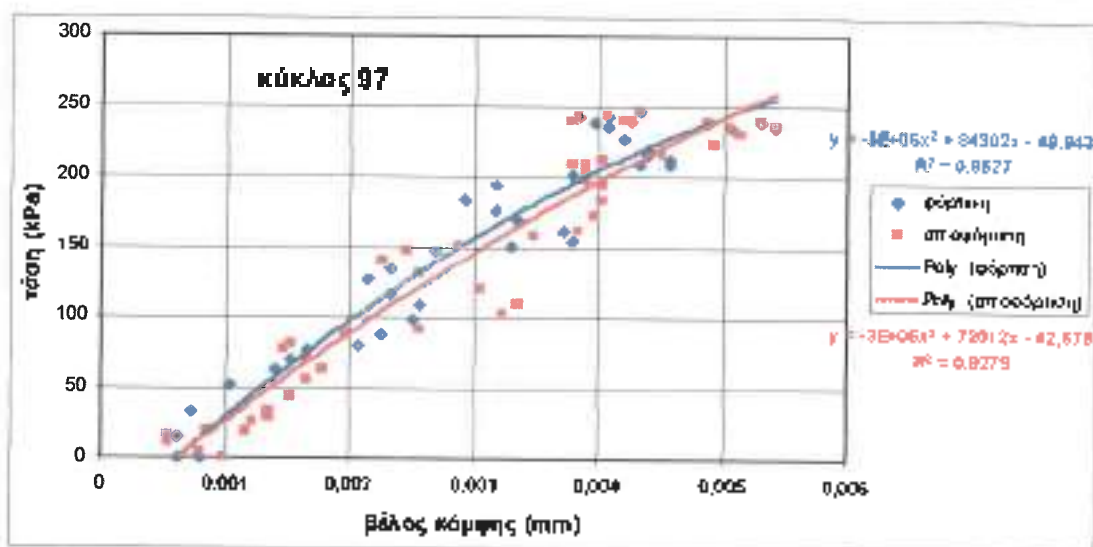
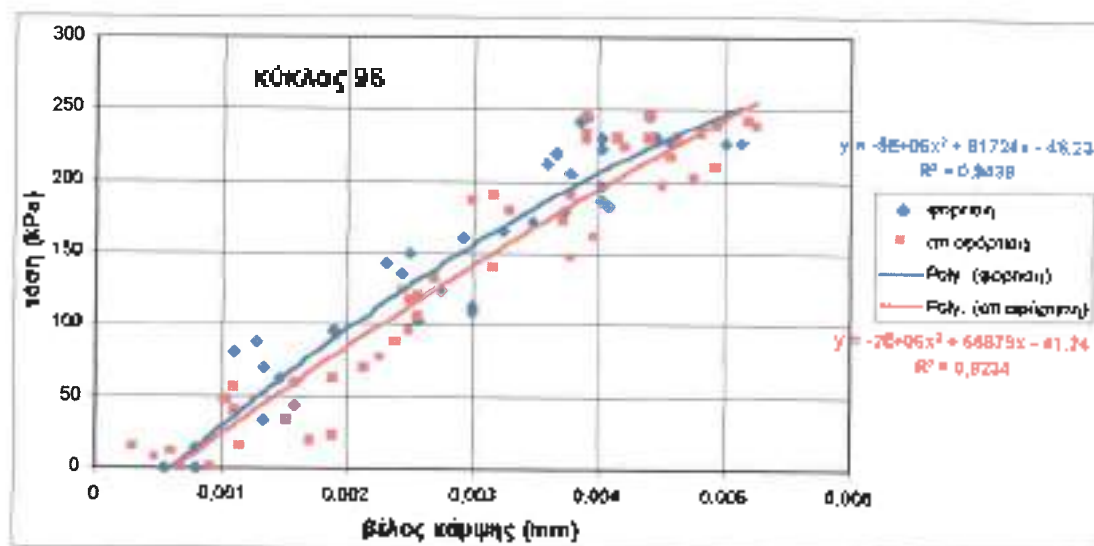
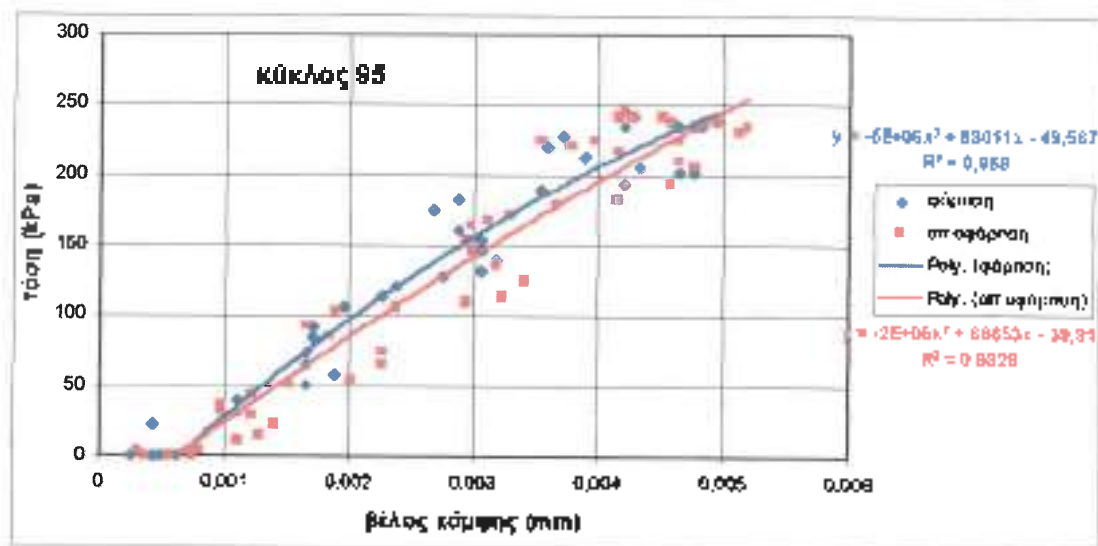
Σχήμα Α-8: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4, για το δοκίμιο 3 (γυάλινο 2% - ταμμένο 2%)



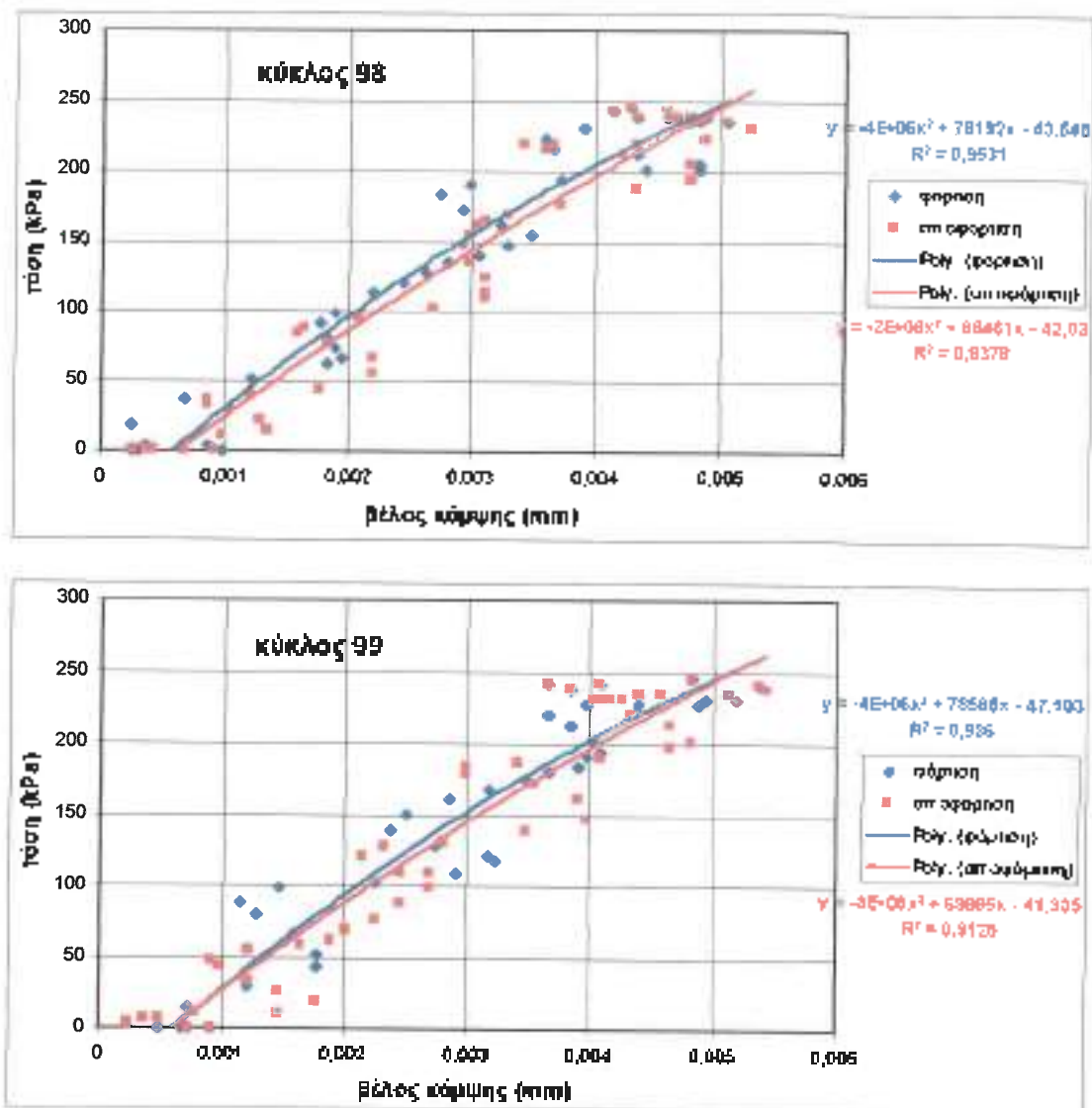
Σχήμα Δ-9: Τύση – βέλος κάμψης για φόρτιση και ισοφόρτιση (καμπύλες πύλινδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκμίο 3 (γαλάκτωμα 2% + τσιμέντο 2%)



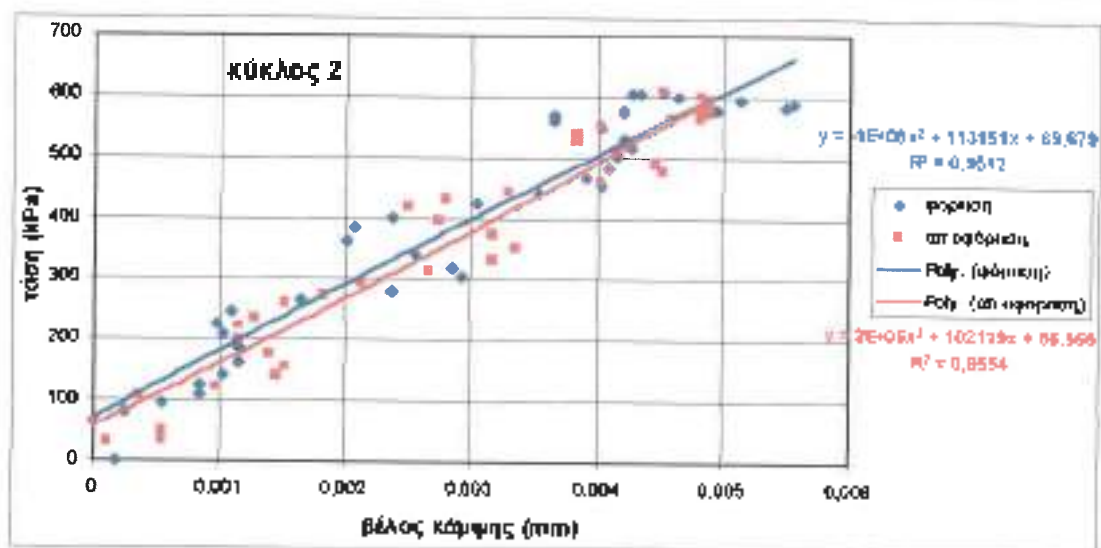
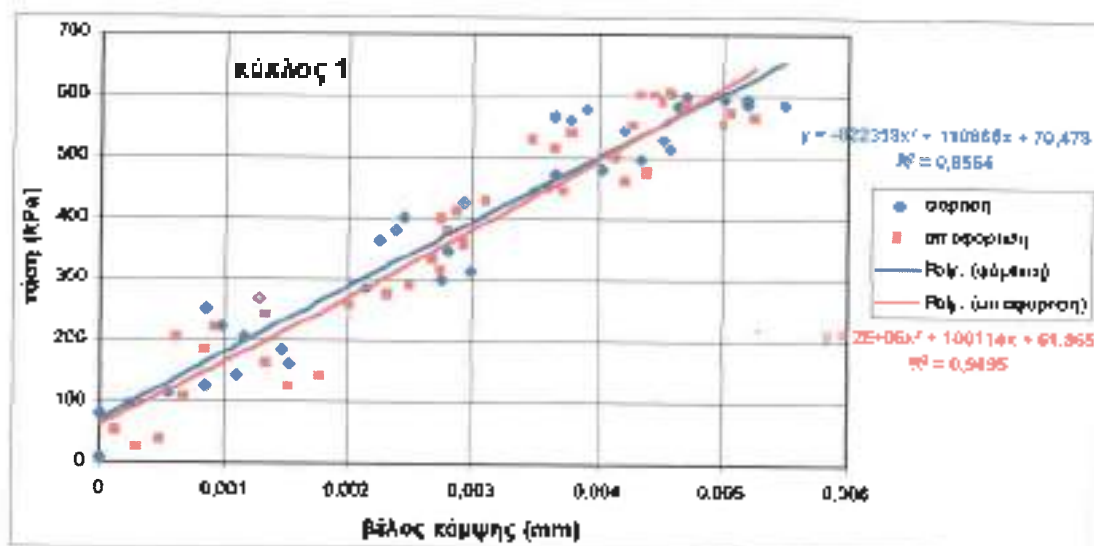
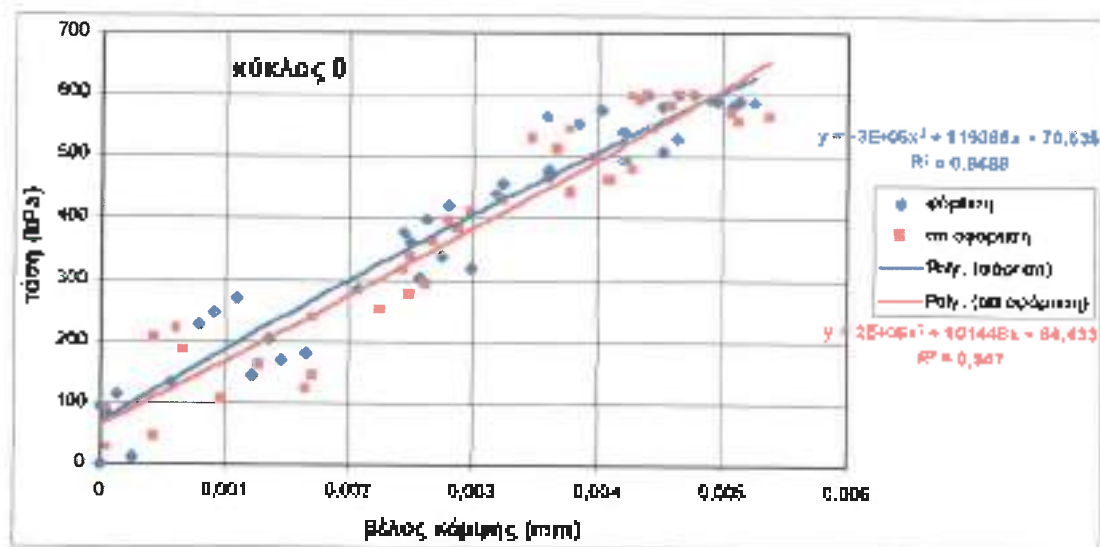
Σχήμα Α-10: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες πηλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51, για το δοκίμιο 3 (γαλακτέμα 2% - τσιμέντο 2%)



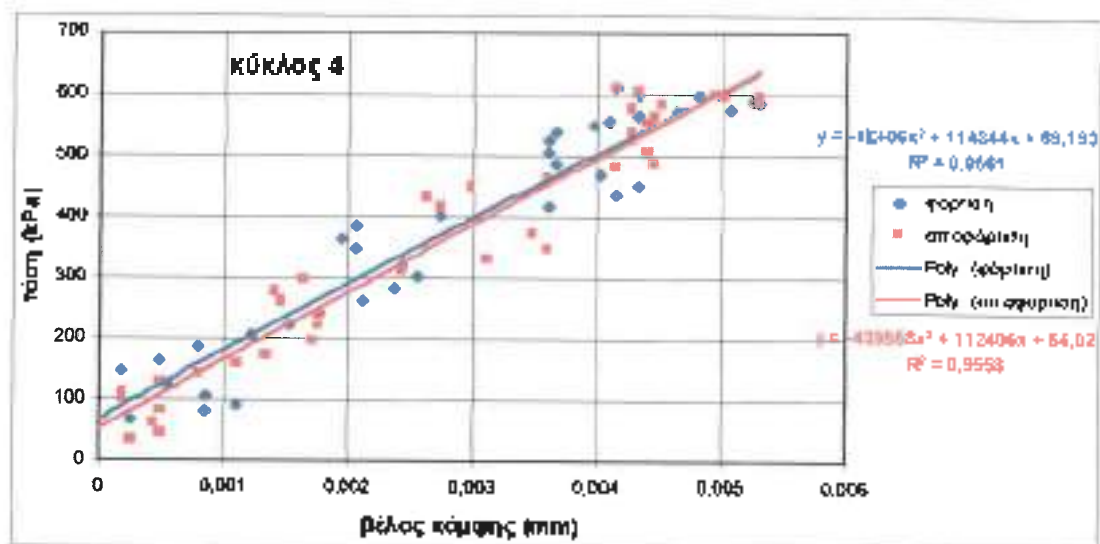
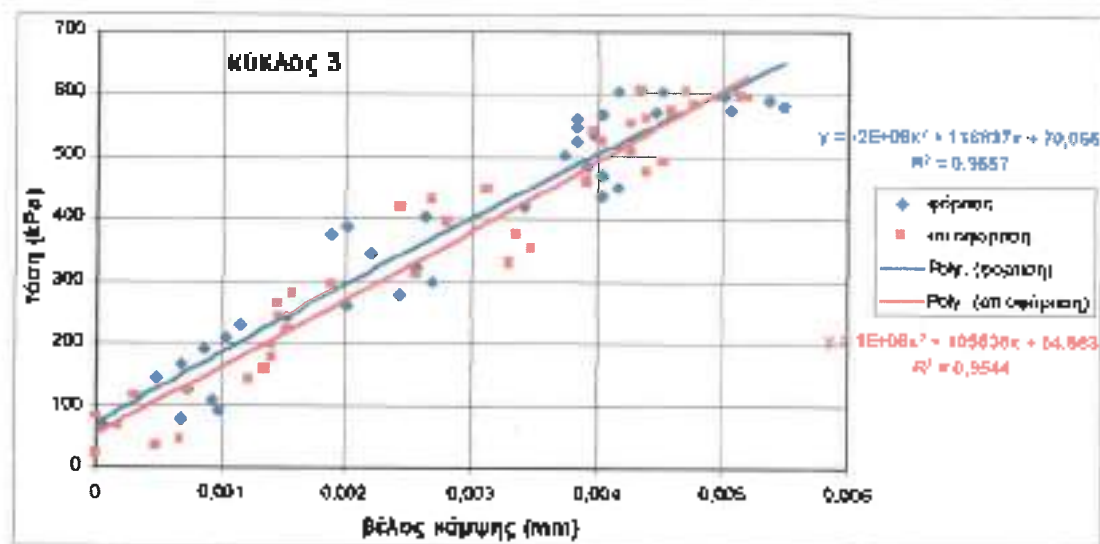
Σχήμα Δ-11: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και υποφόρτιση (κυκλός παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97, για το δοκίμιο 3 (γαλακτώμα 2% - τσιμεντό 2%)



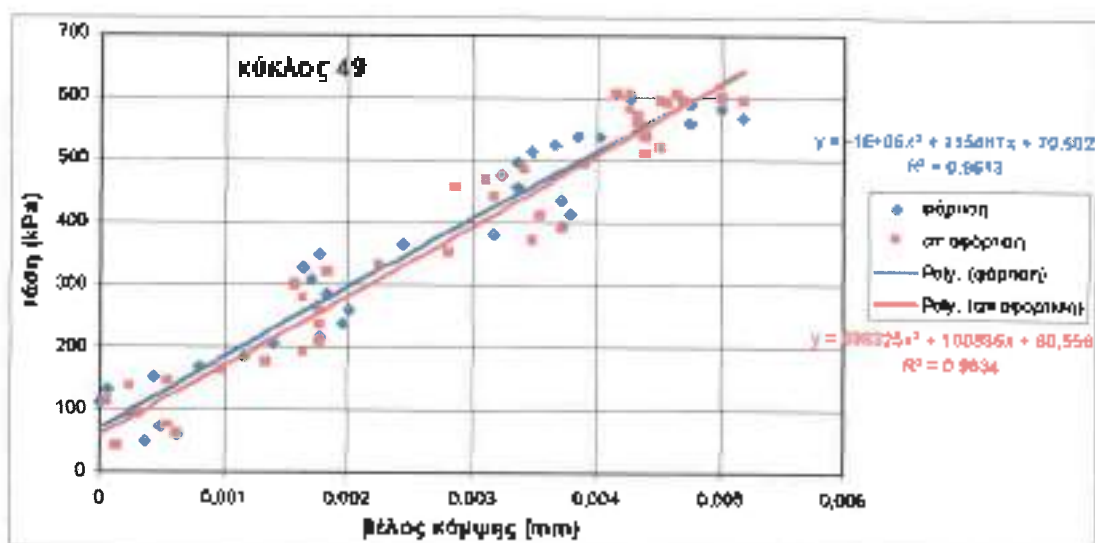
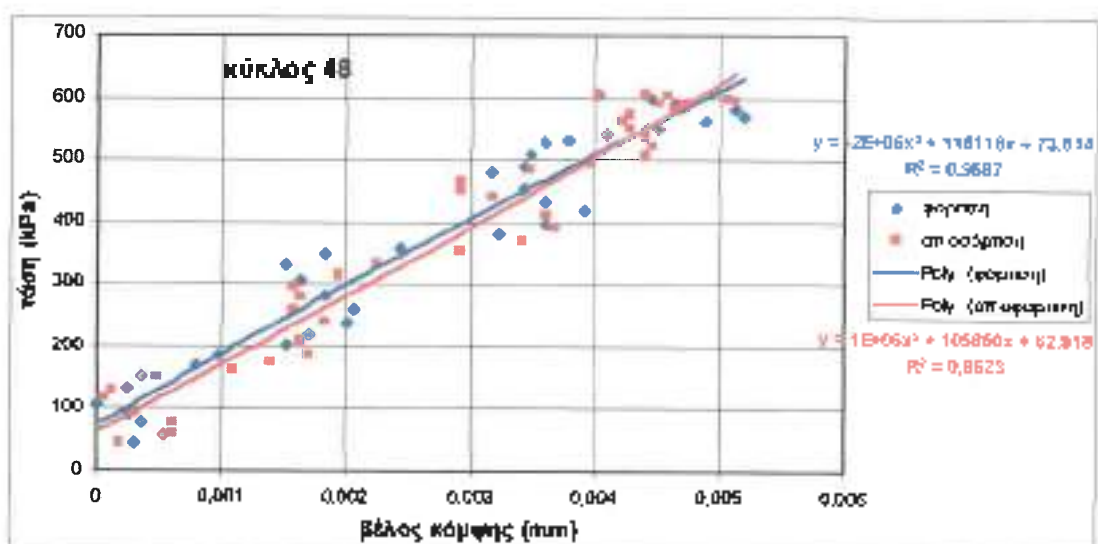
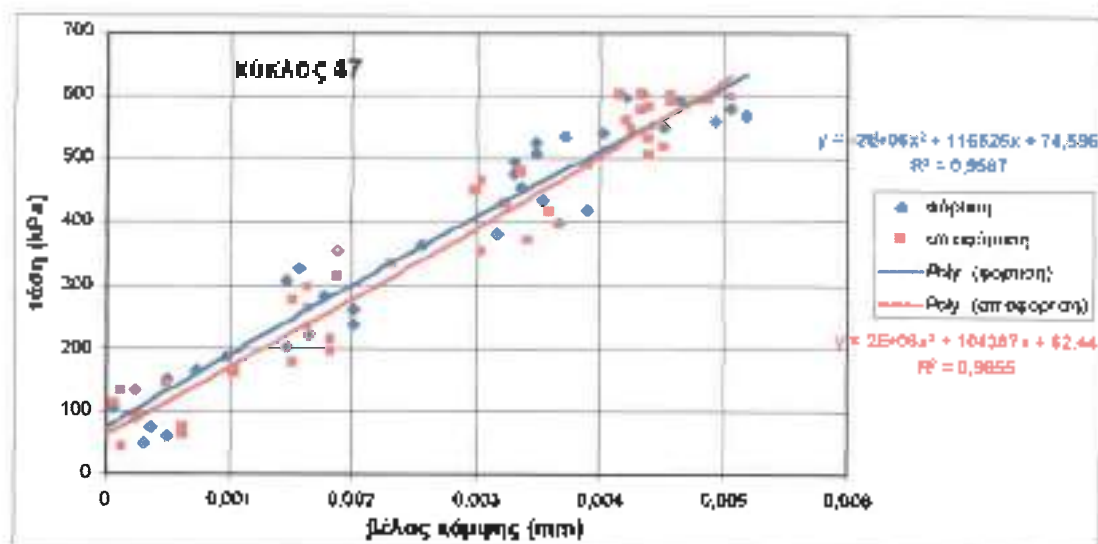
Σχήμα Δ-12: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλλενδρόμησης), κύκλοι 98, 99, για το δοκίμιο 3 (γάλακτιμα 2% - τσιμέντο 2%)



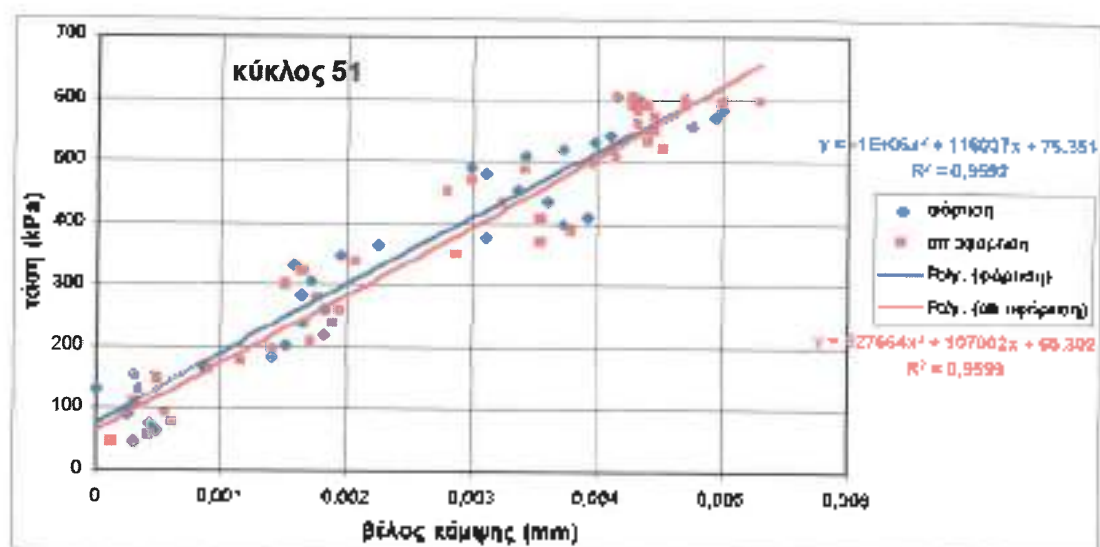
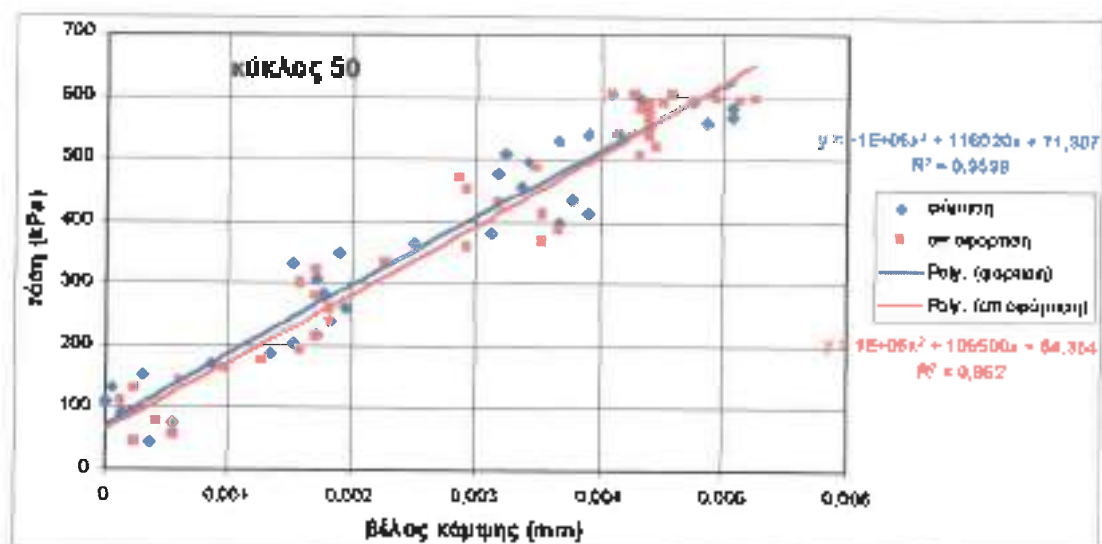
Σχήμα Δ-13: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρομησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



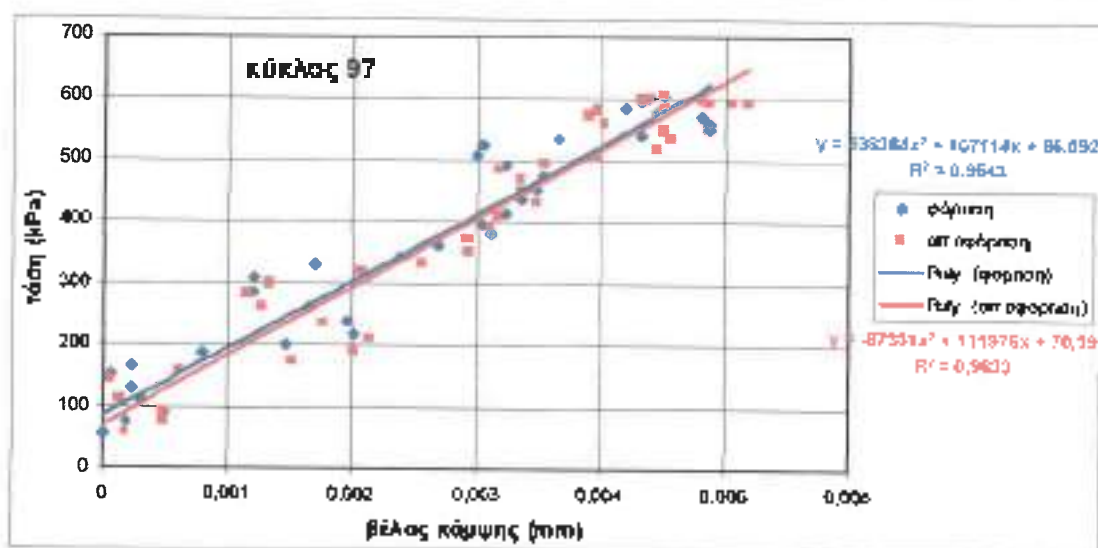
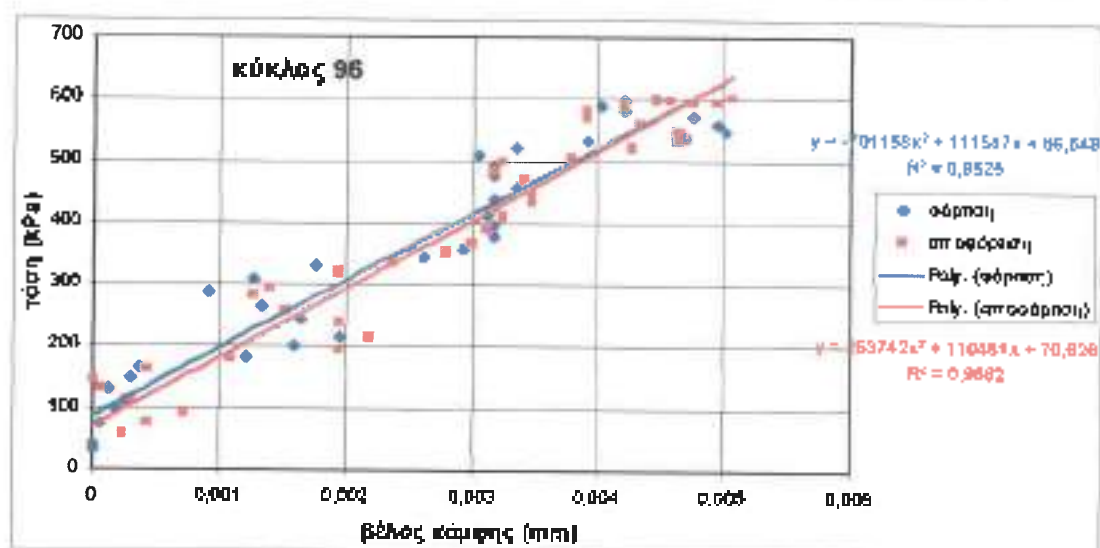
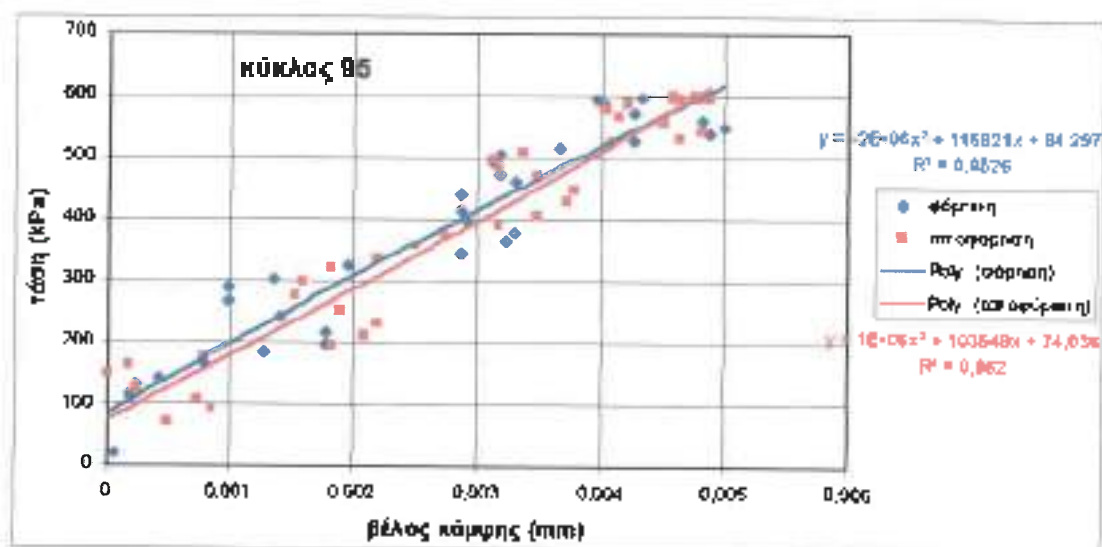
Σχήμα Α-14: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 5 (γαλακτερίνα 1% - τσιμέντο 3%)



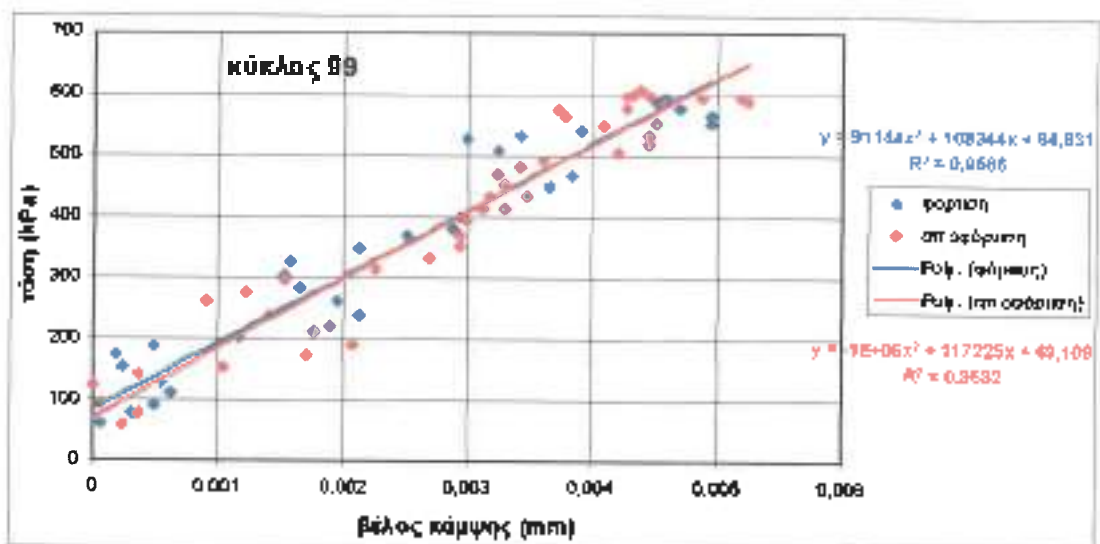
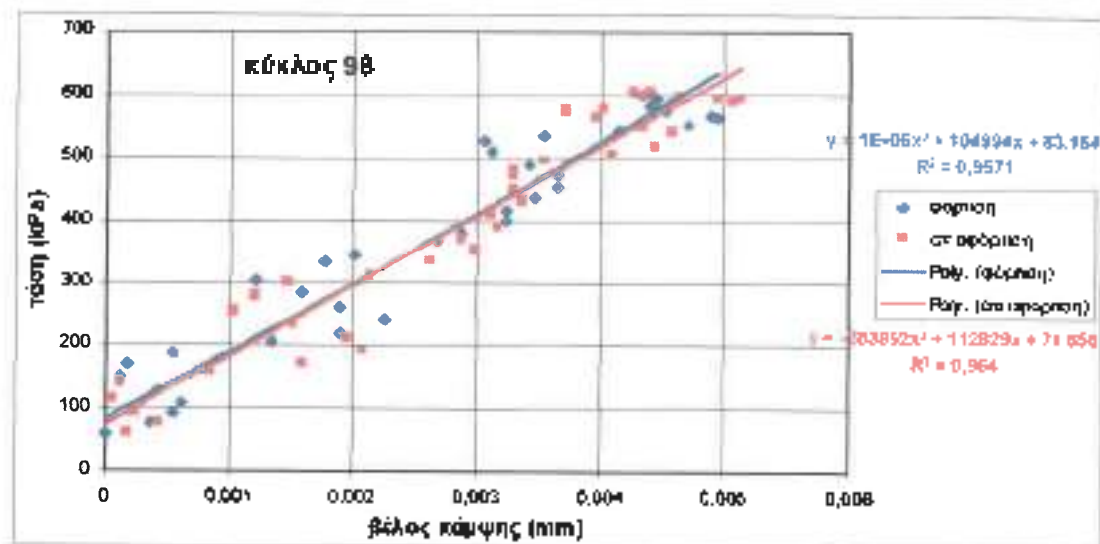
Σχήμα Δ-15: Τάση βέλος κόμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυκλούς πεδαινοδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



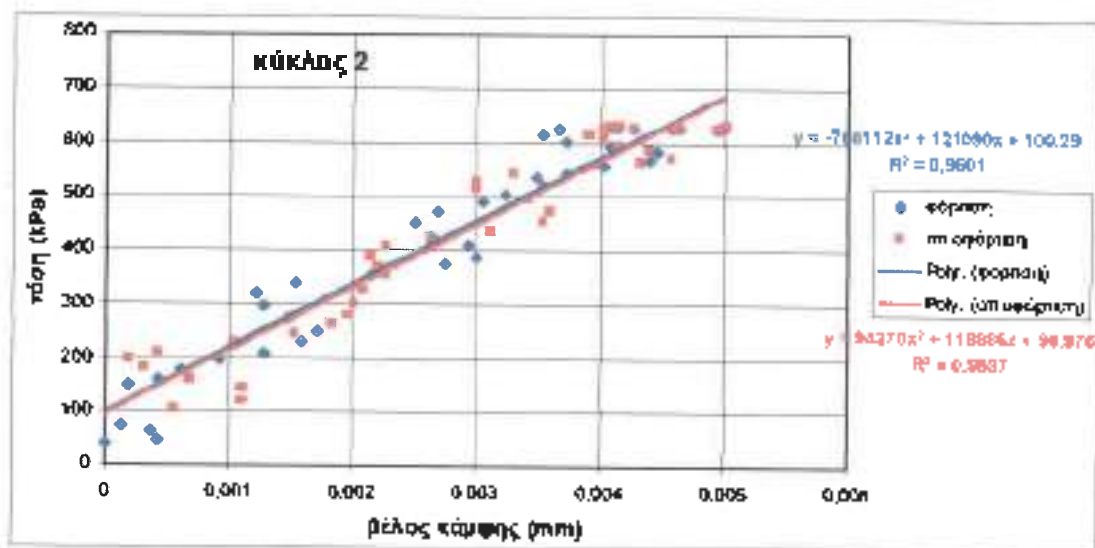
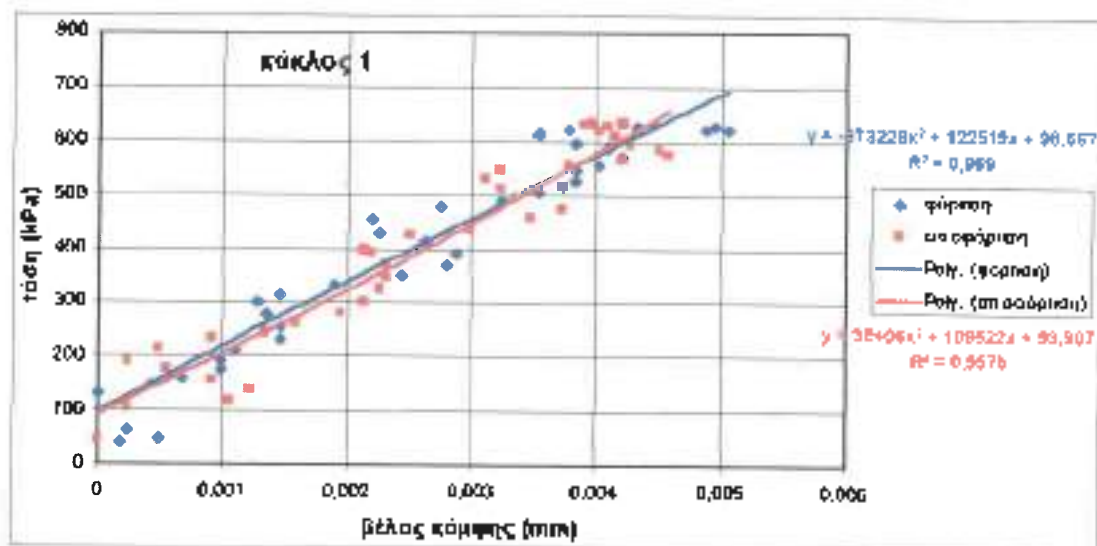
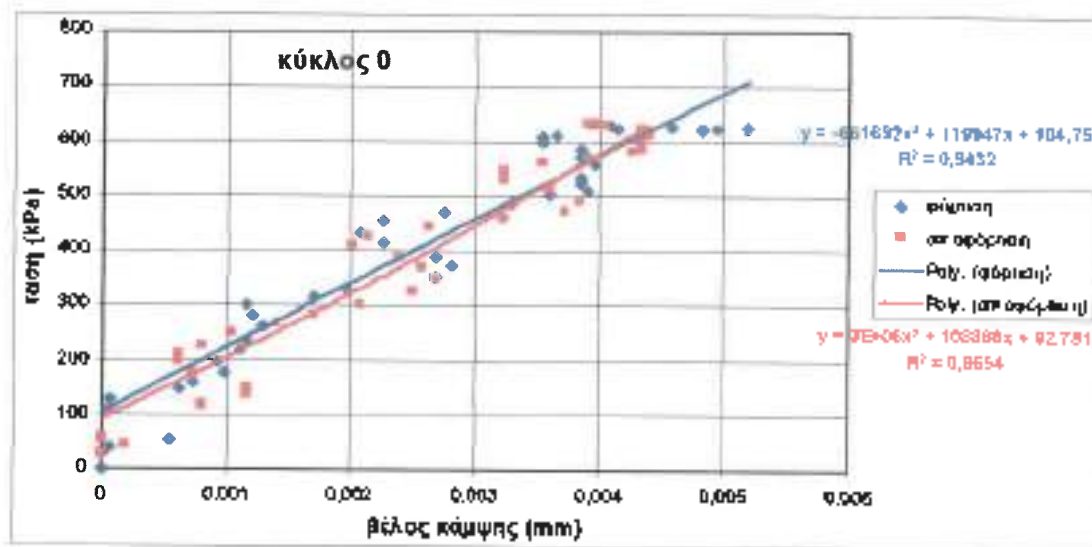
Σχήμα Δ-16: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλότητες πολυανδρόμεσης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 5 (γυάλινο 1% - τσιμέντο 3%)



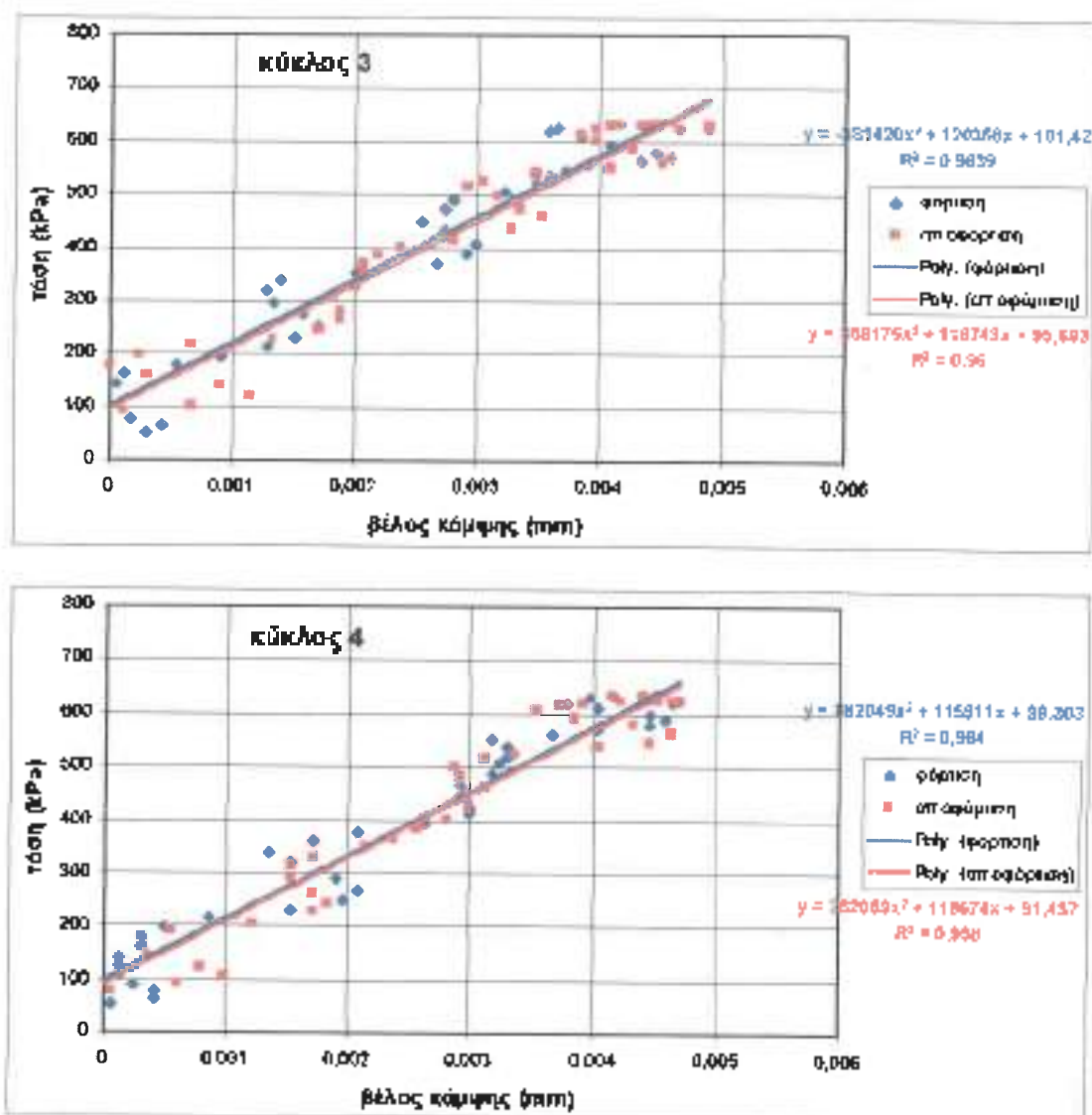
Σχήμα Α-17: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο S (γεωτόνημα 1% - τσιμέντο 3%)



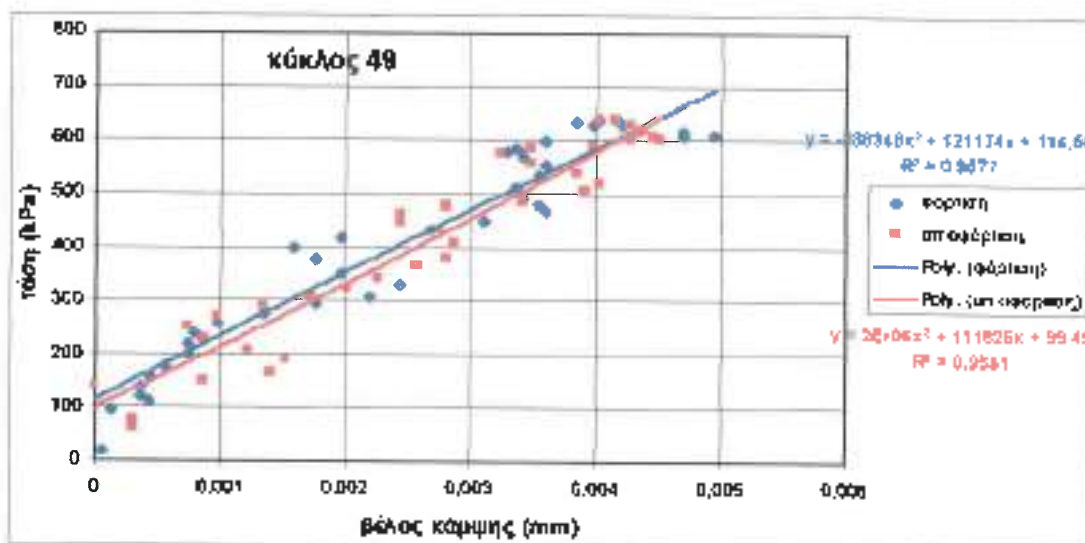
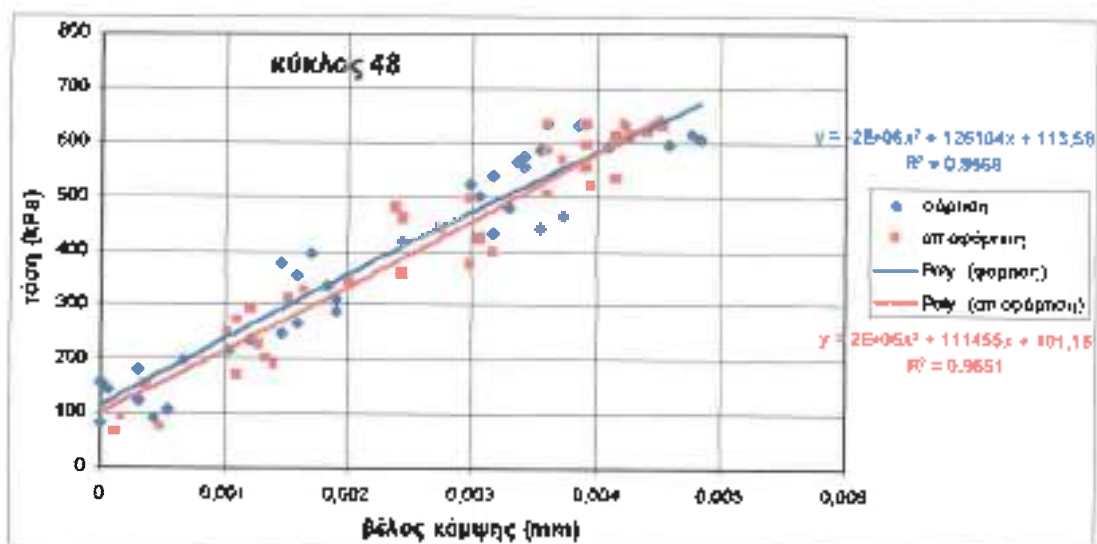
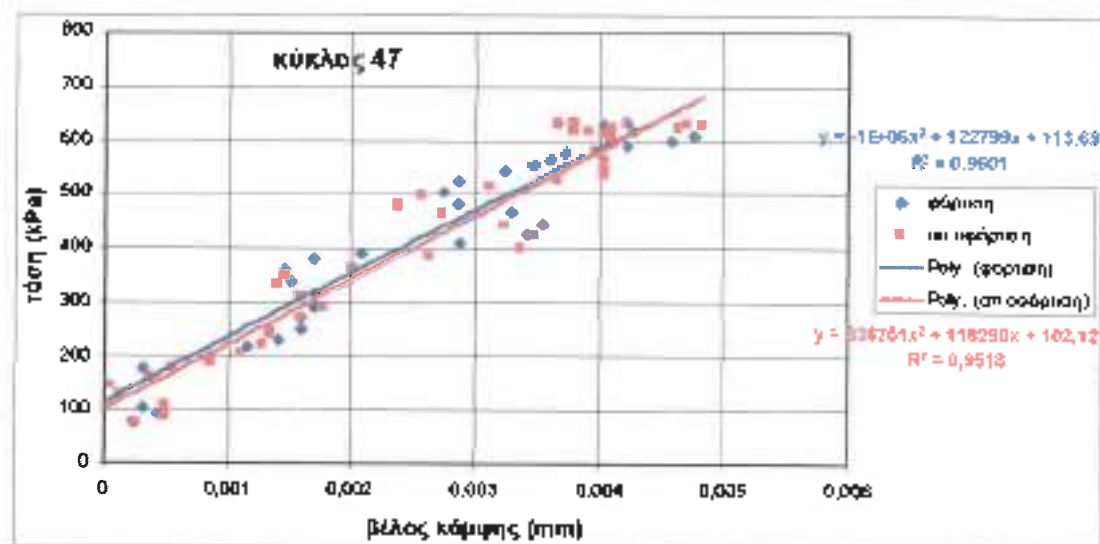
Σχήμα Α-18: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλιννόρμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 5 (γαλάκτωμα 1% - τιμέντρο 3%)



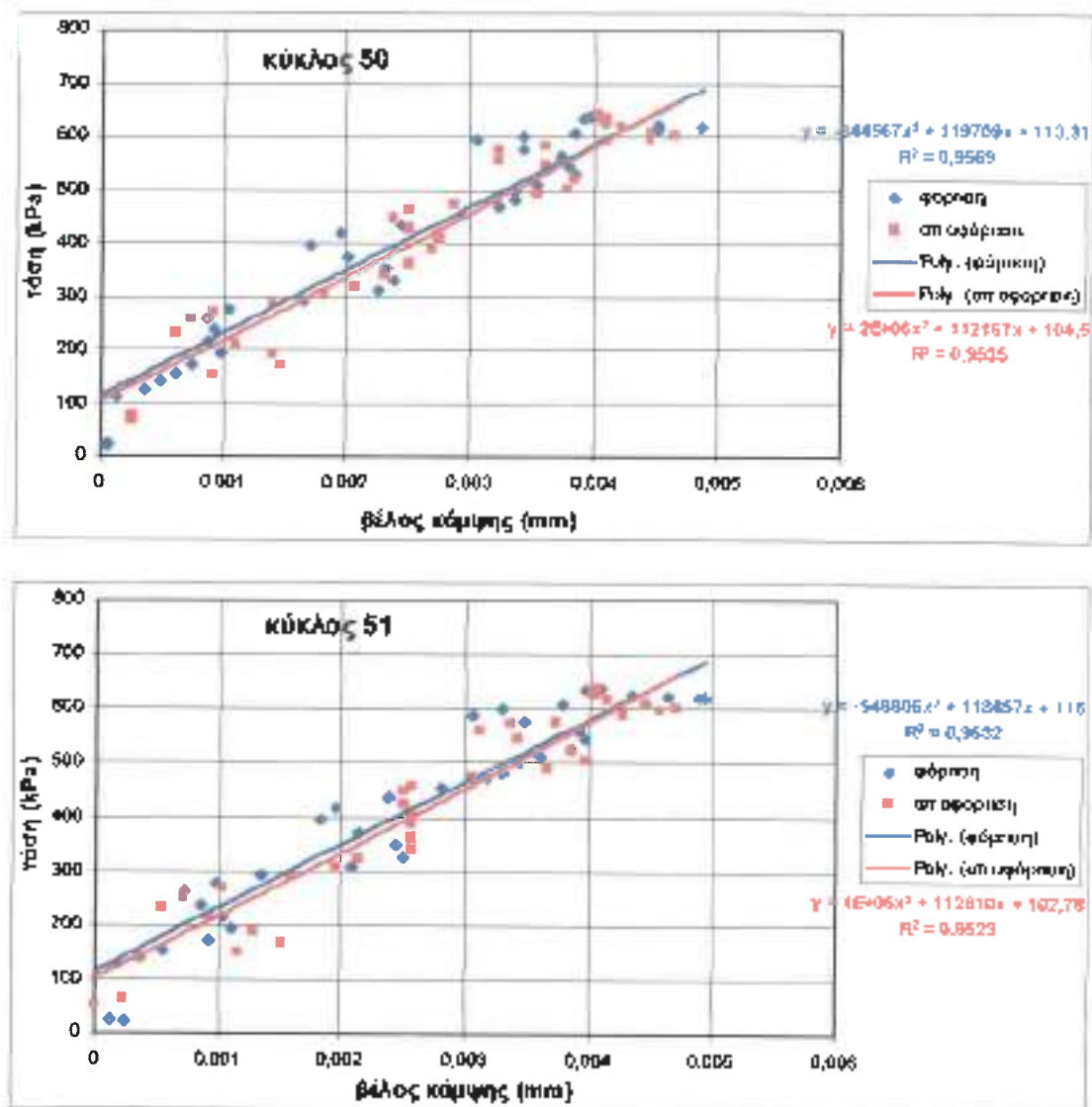
Σχήμα Δ-19: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης). κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



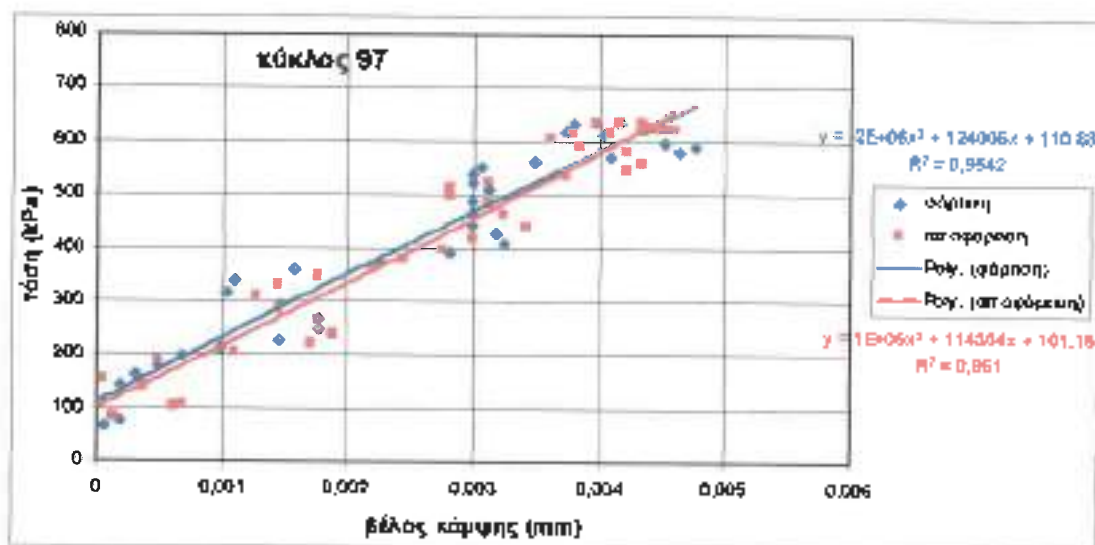
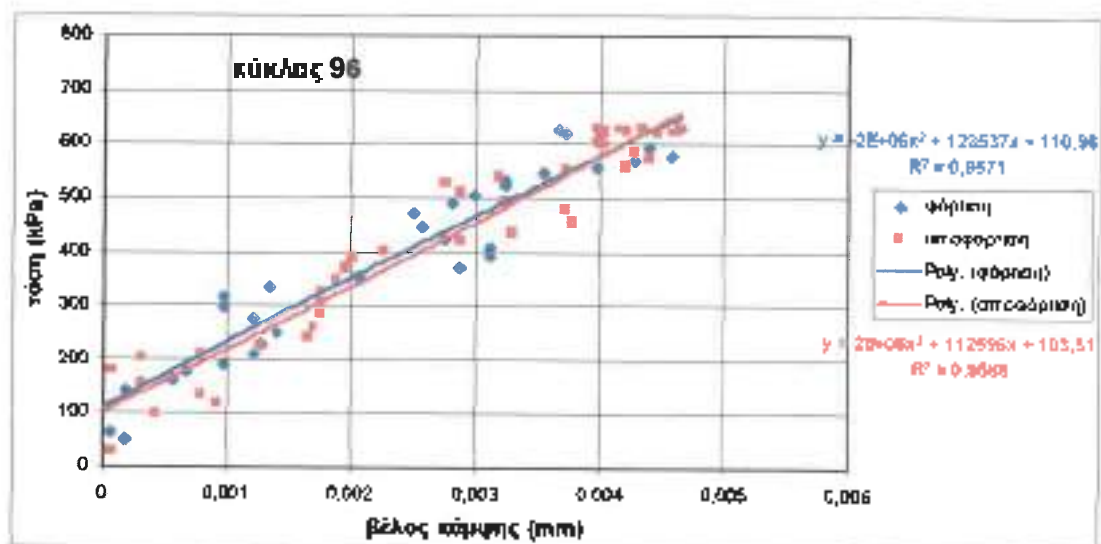
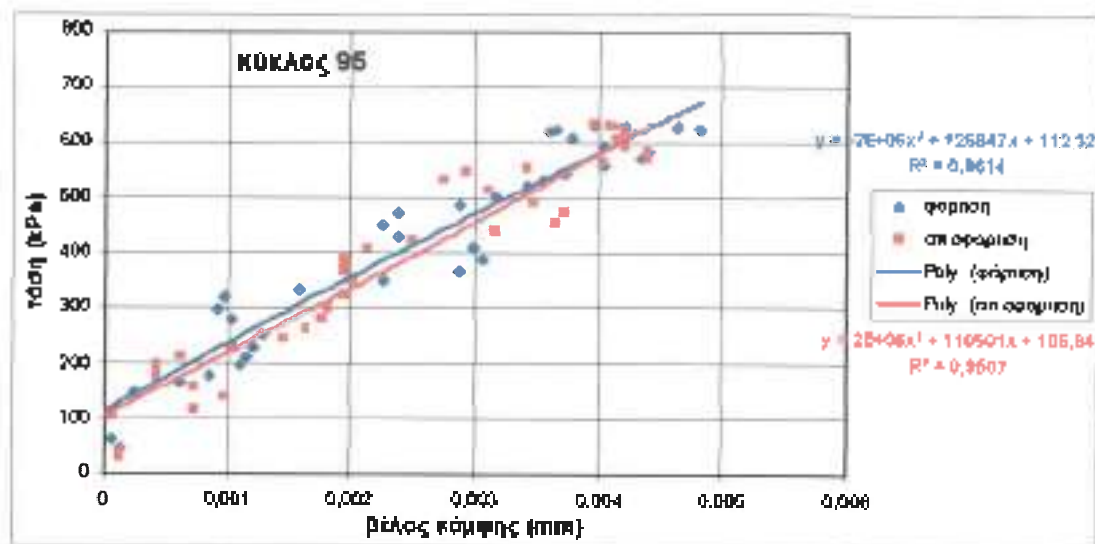
Σχήμα Δ-20: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες κυλινδρικής), κυκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



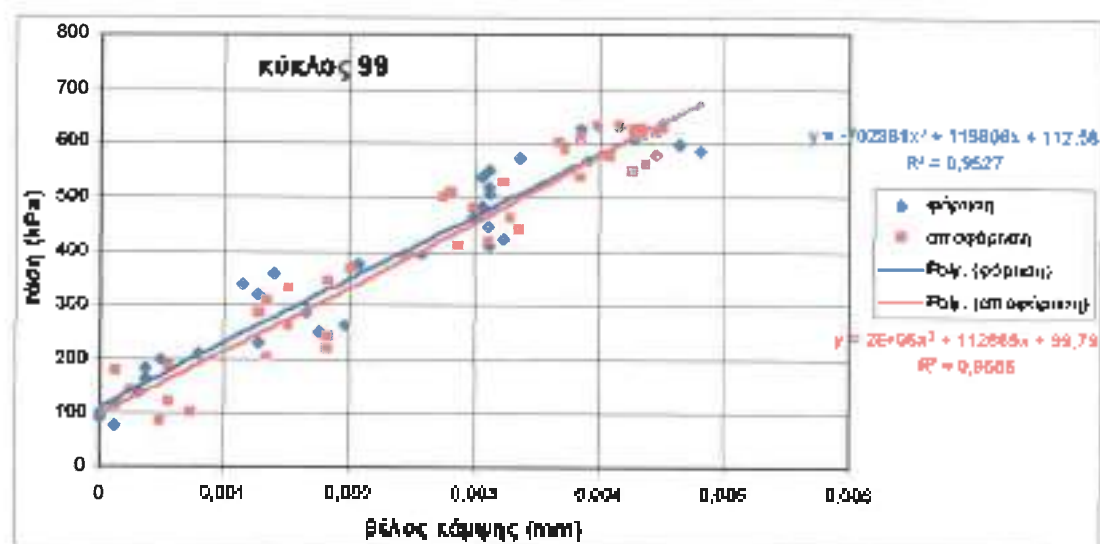
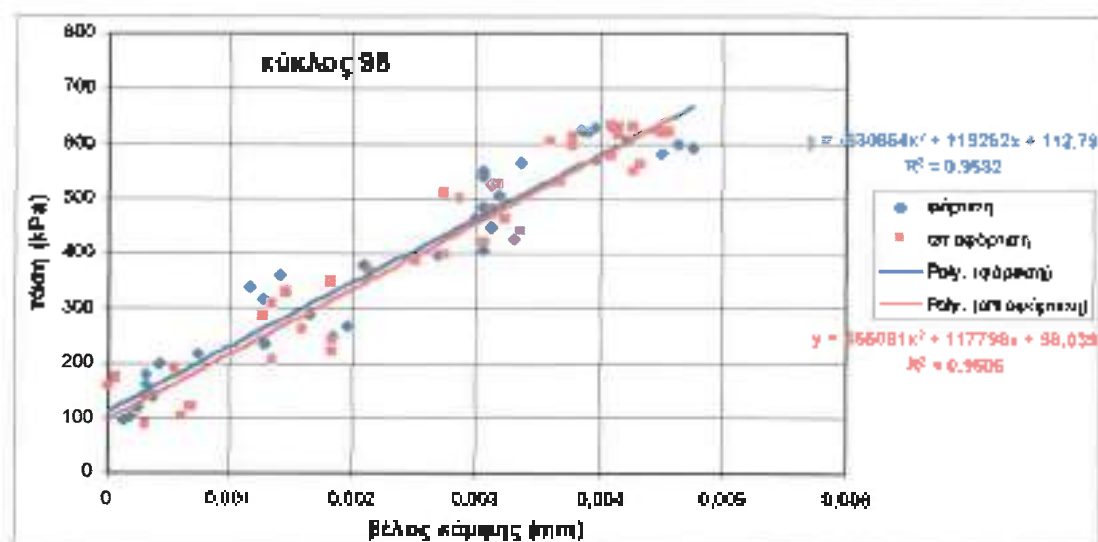
Σχήμα Δ-21: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρομήσεως), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο ή (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



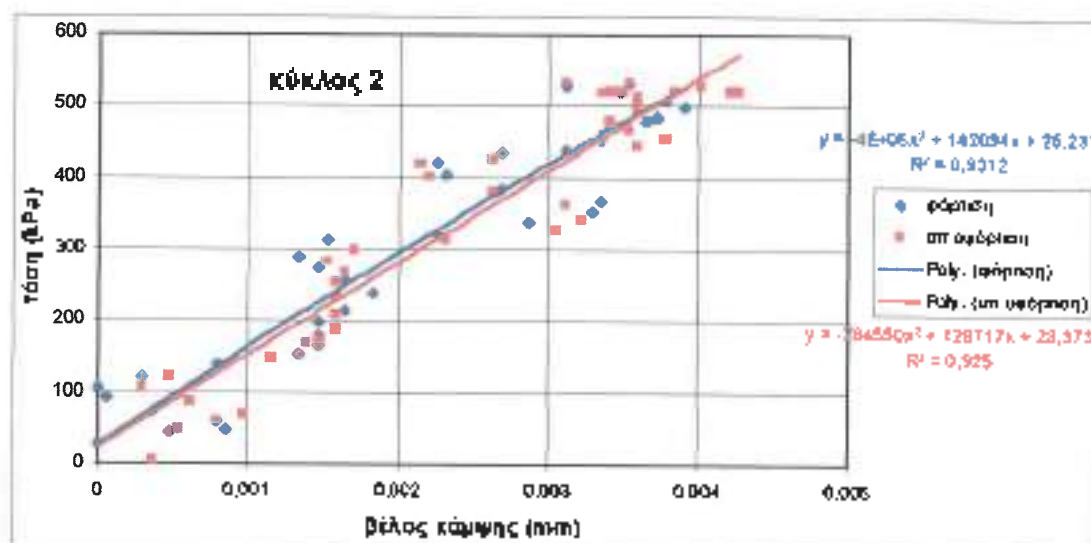
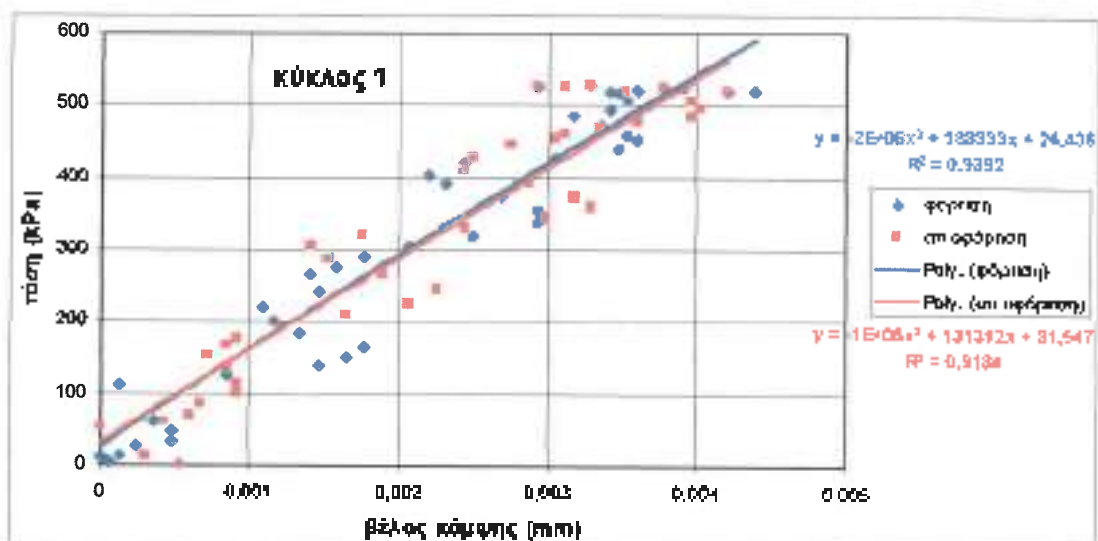
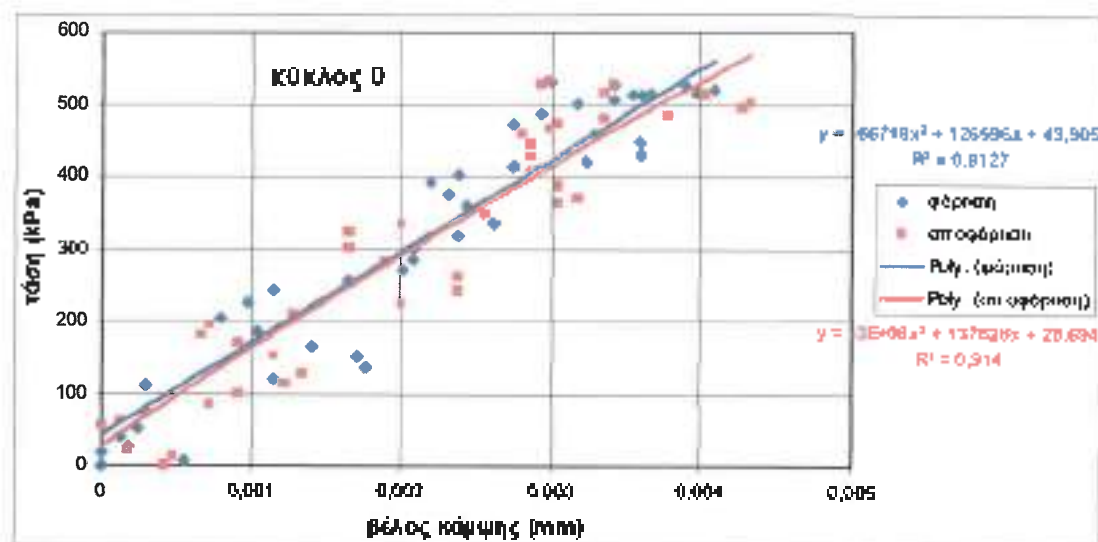
Σχήμα Δ-22: Πάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες, πολυωνομιοποίησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 3%)



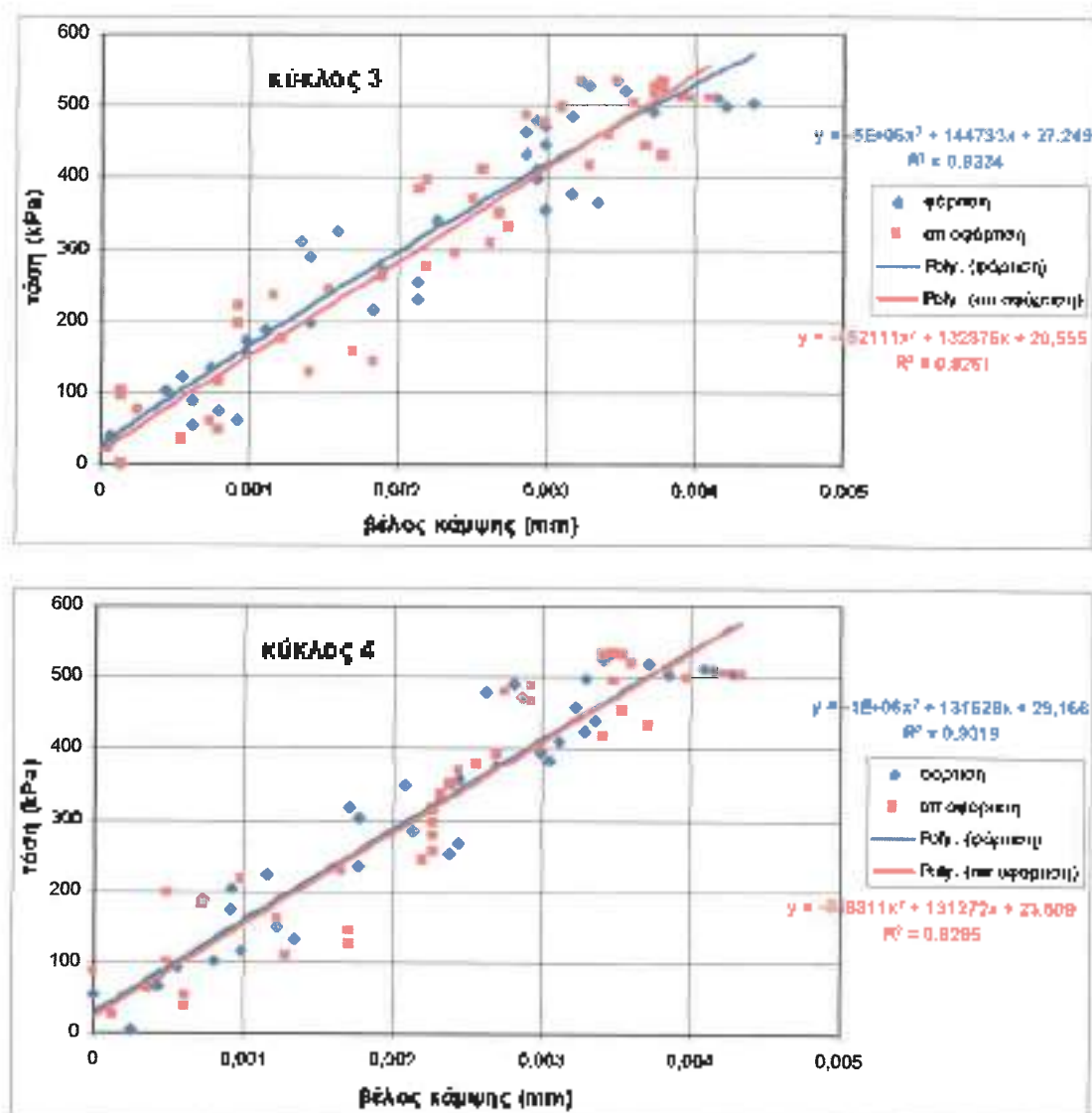
Σχήμα Δ-23: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες πελάινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 6 (γαλνέκτημα 1% - τσιμέντο 3%)



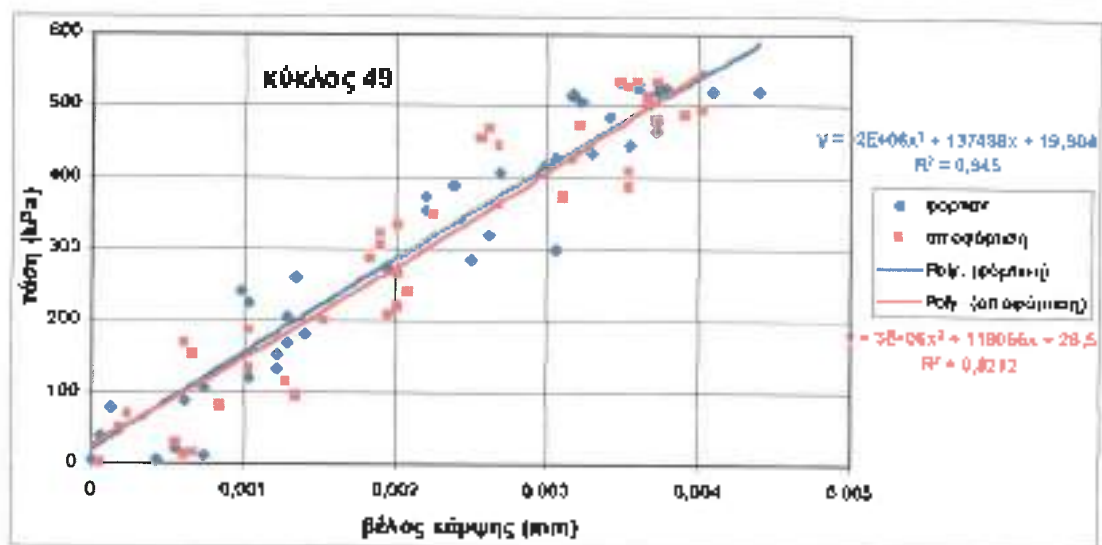
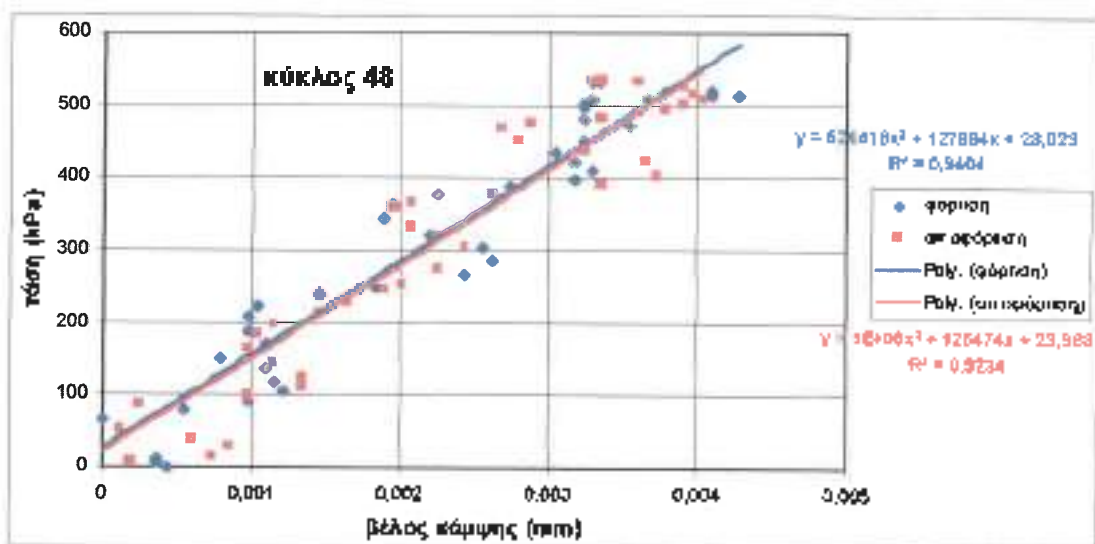
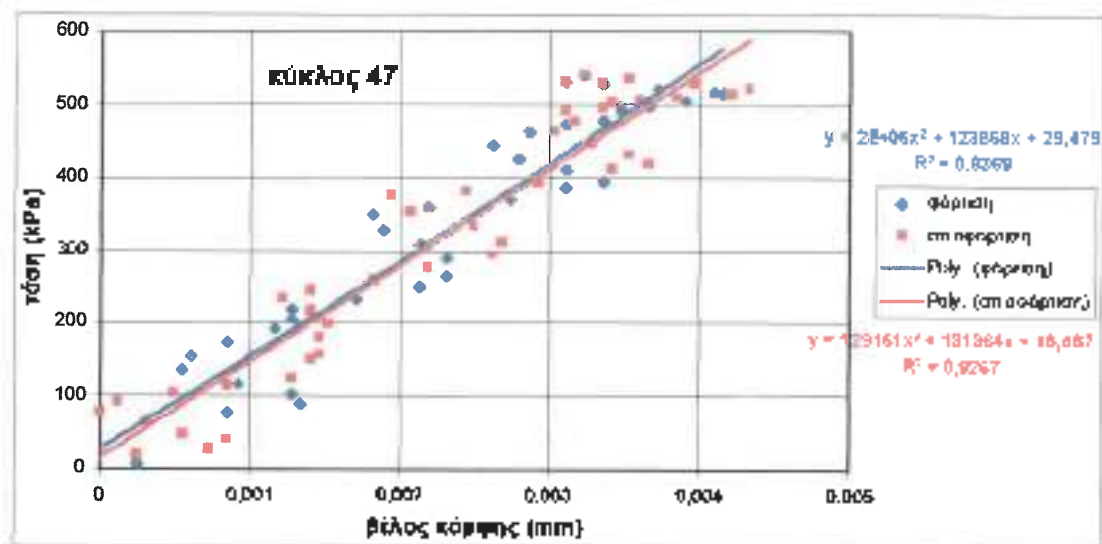
Σχήμα Δ-24: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πολλαπλοποίησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 6 (γαλάκτωμα 1% - περιμέντο 3%)



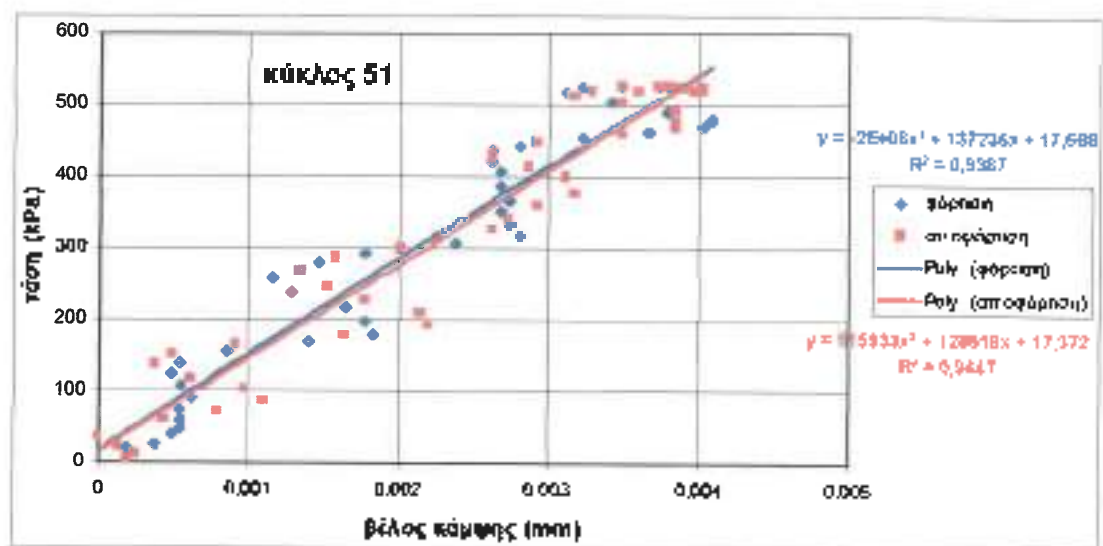
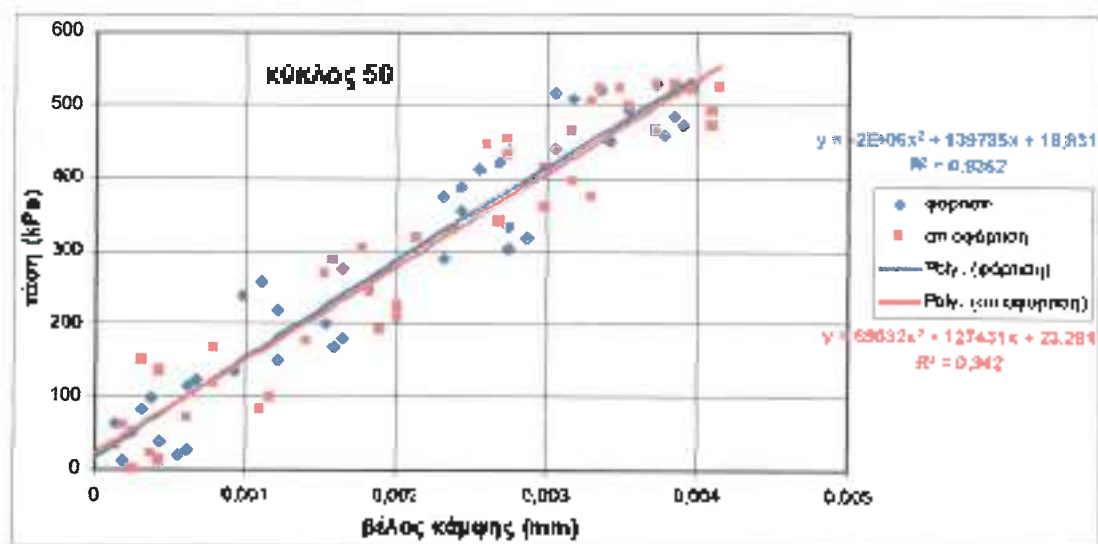
Σχήμα Δ-25: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλούς παλινδρομησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο B (γαλάκτωμα 6% - τσιμέντο 3%)



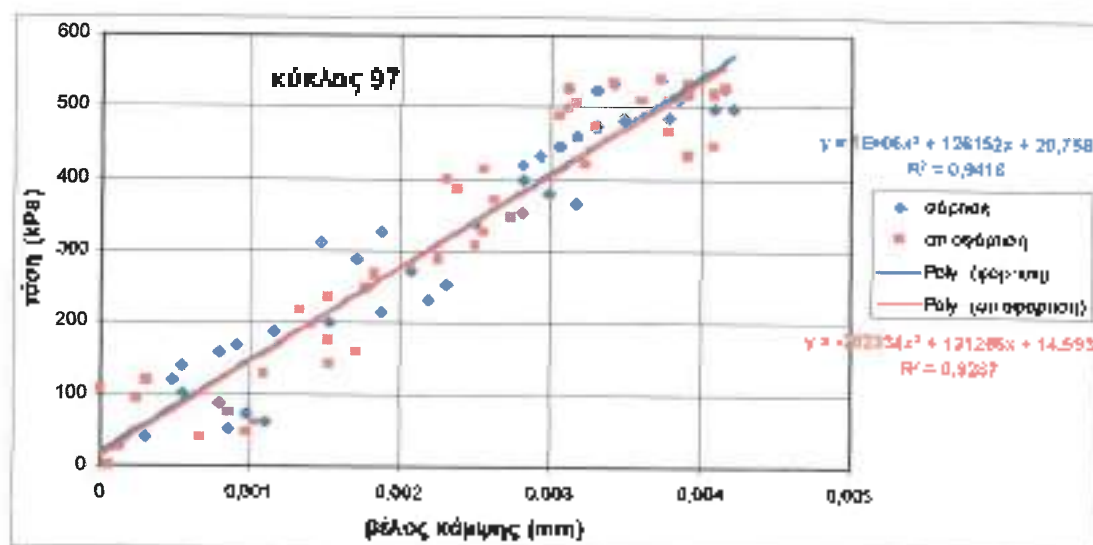
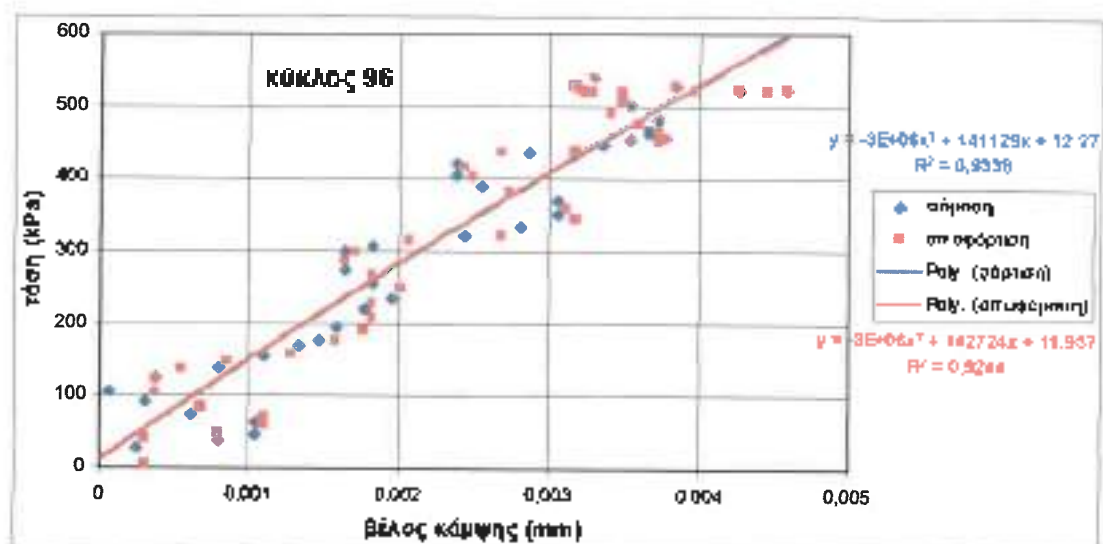
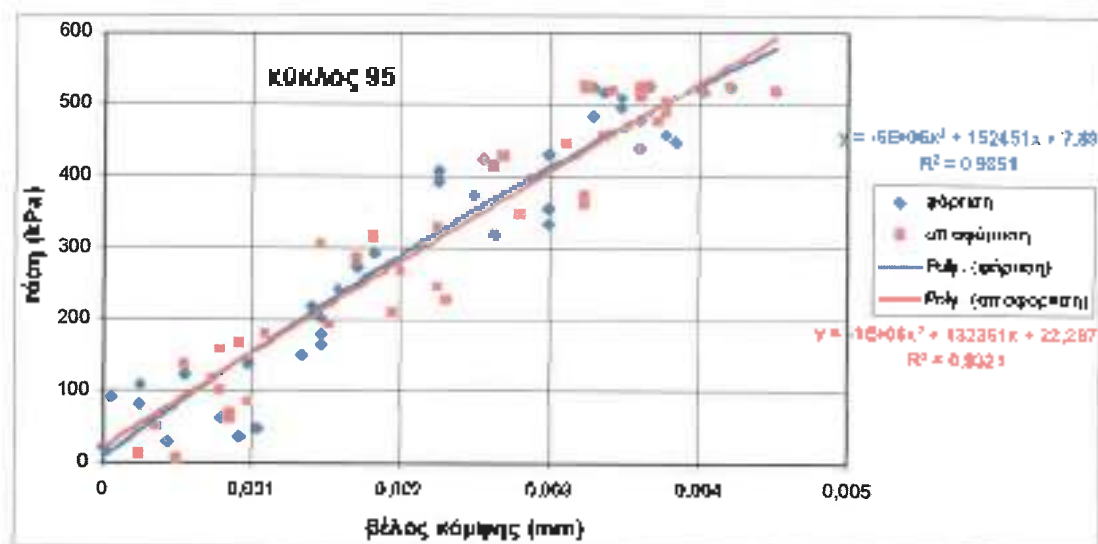
Σχήμα Δ-26: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυματογράφος παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 8 (γυάλινο 0% - τσιμέντο 3%)



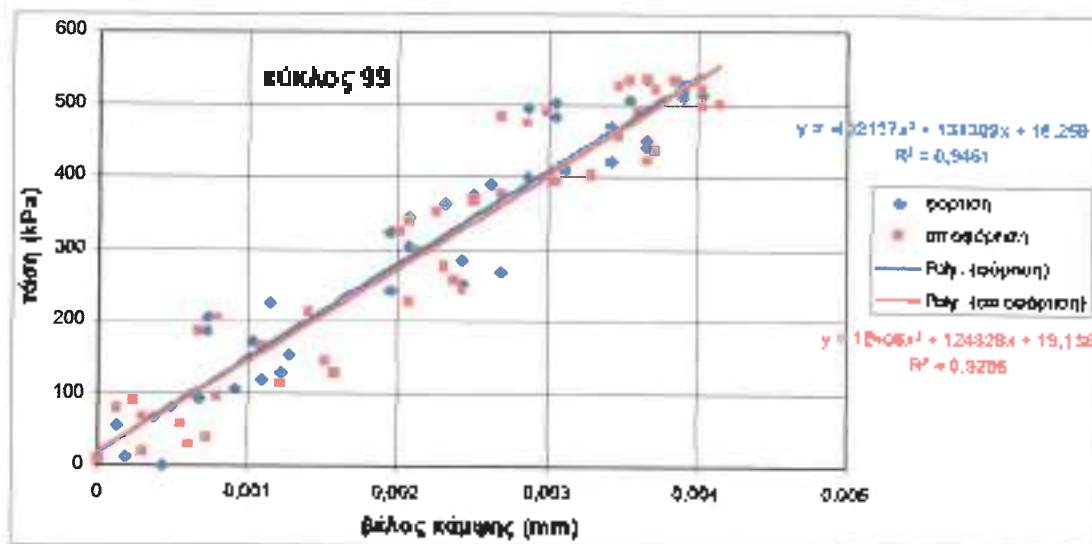
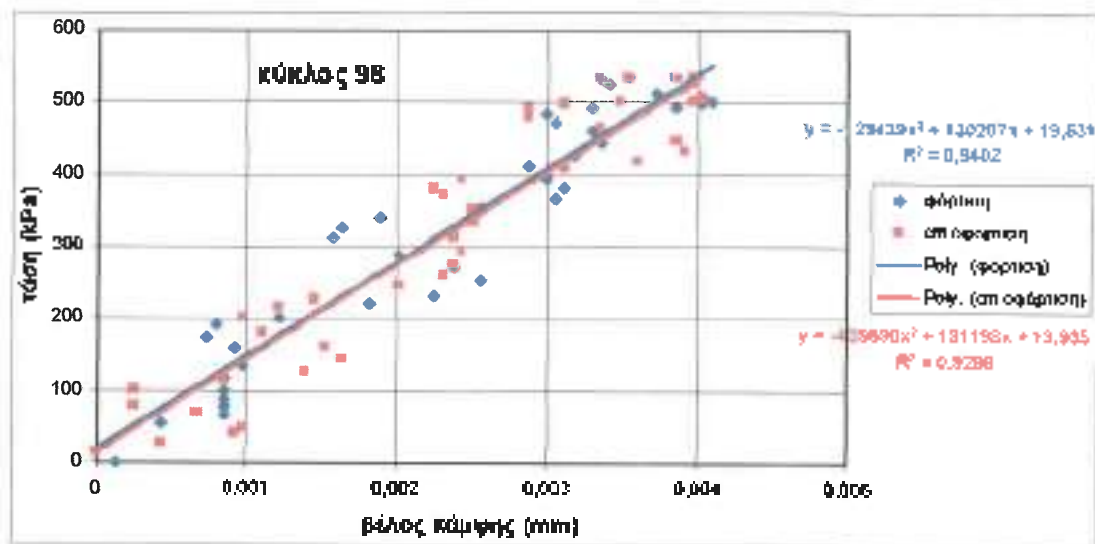
Σχήμα Δ-27: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες πολυανδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 0% + τσιμέντο 3%)



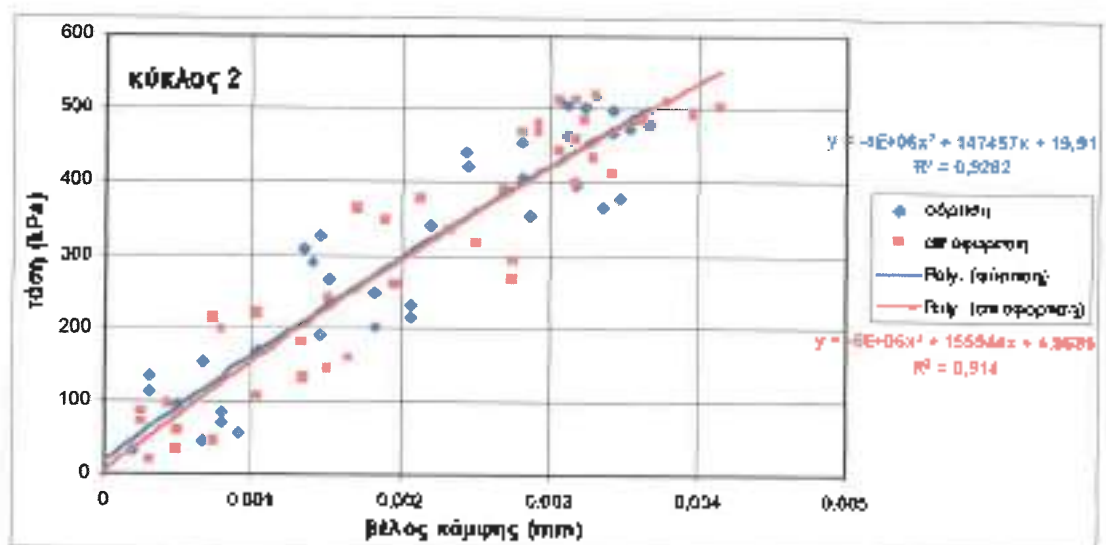
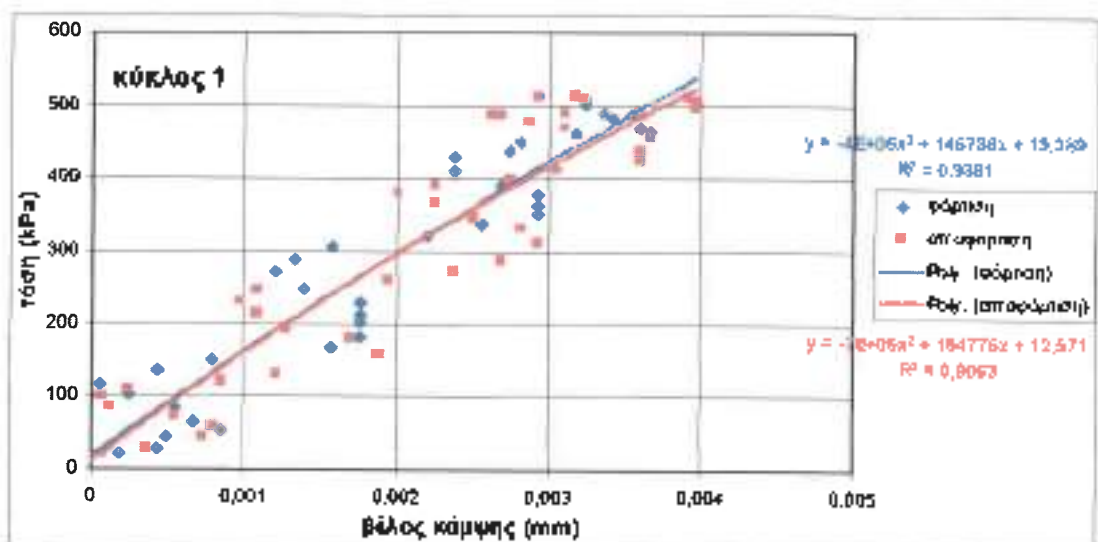
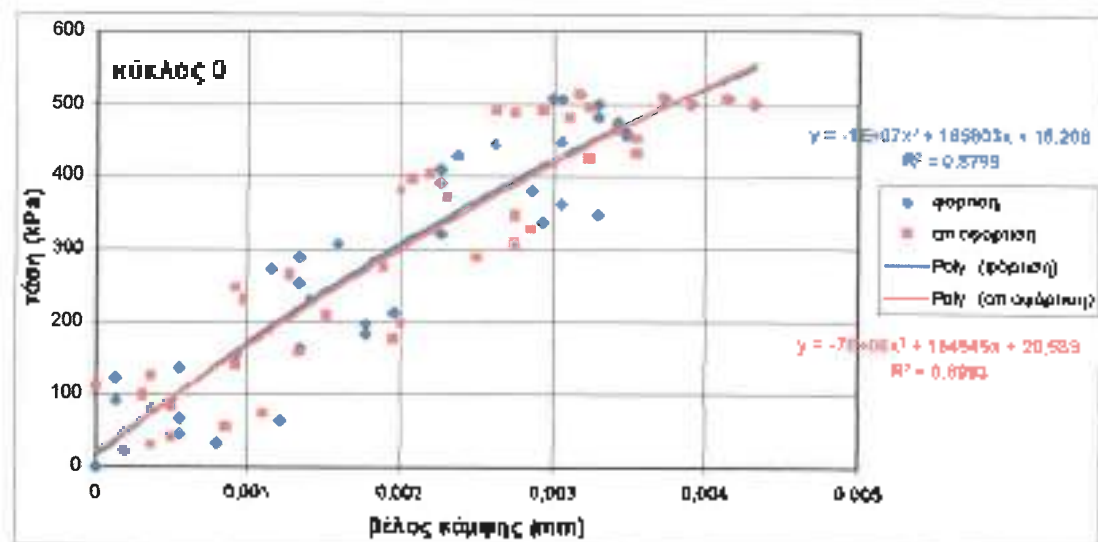
Σχήμα Δ-28: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 8 (γυάλινο 10% - τοιμένο 3%)



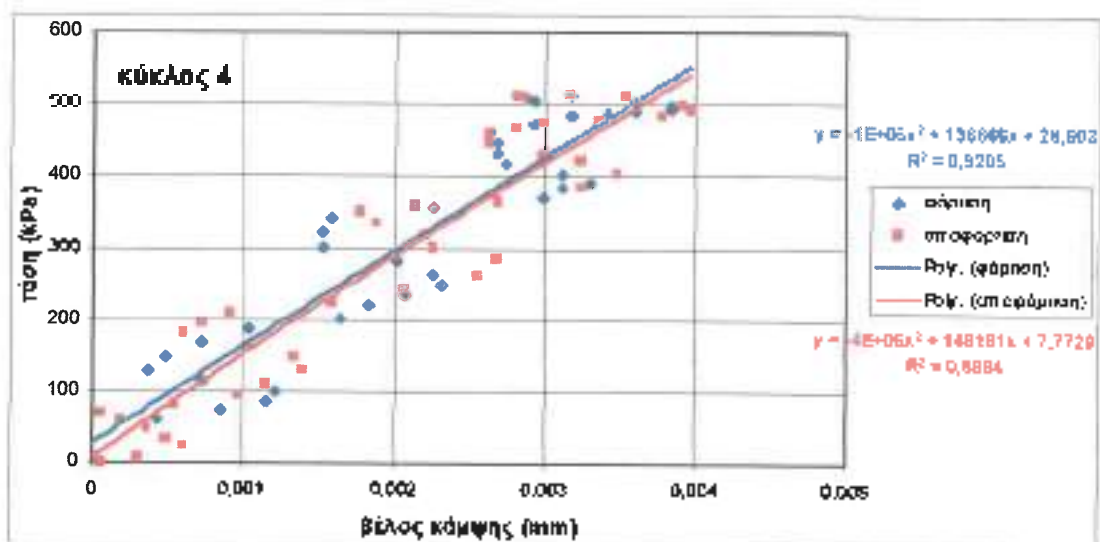
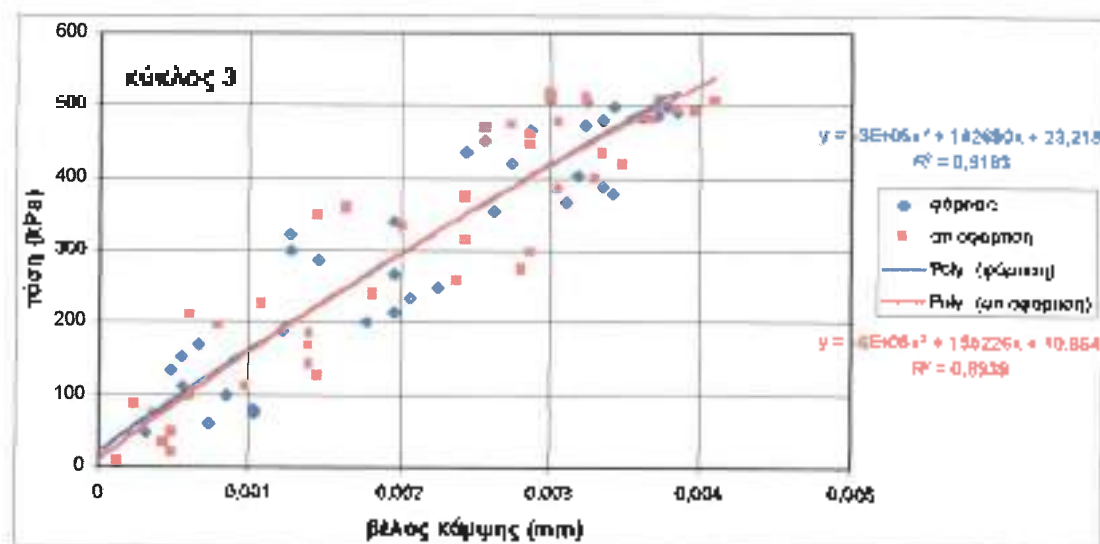
Σχήμα Δ-29: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για τη δοκιμή 8 (γαλάκτωμα 0% + τσιμέντο 3%)



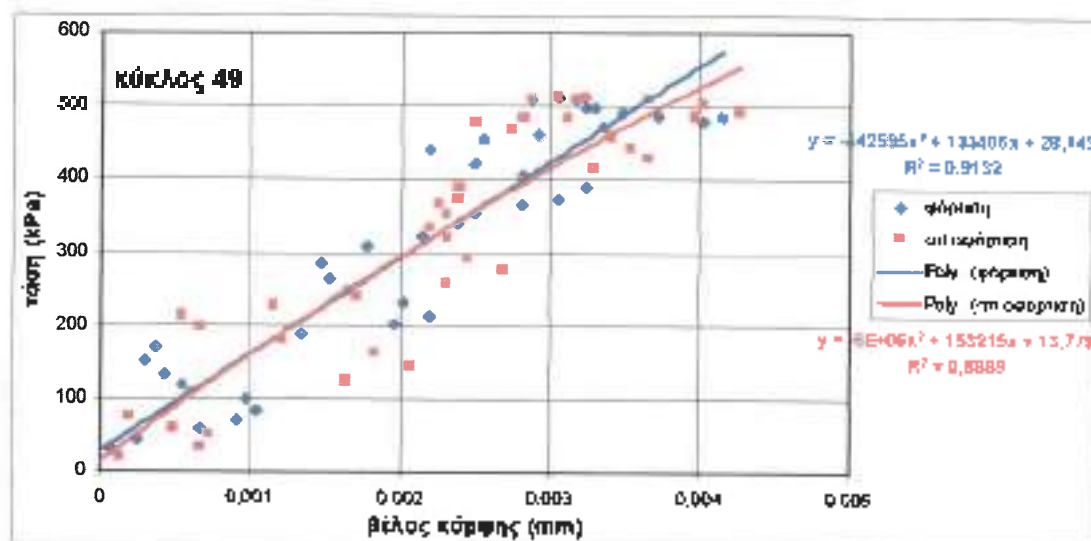
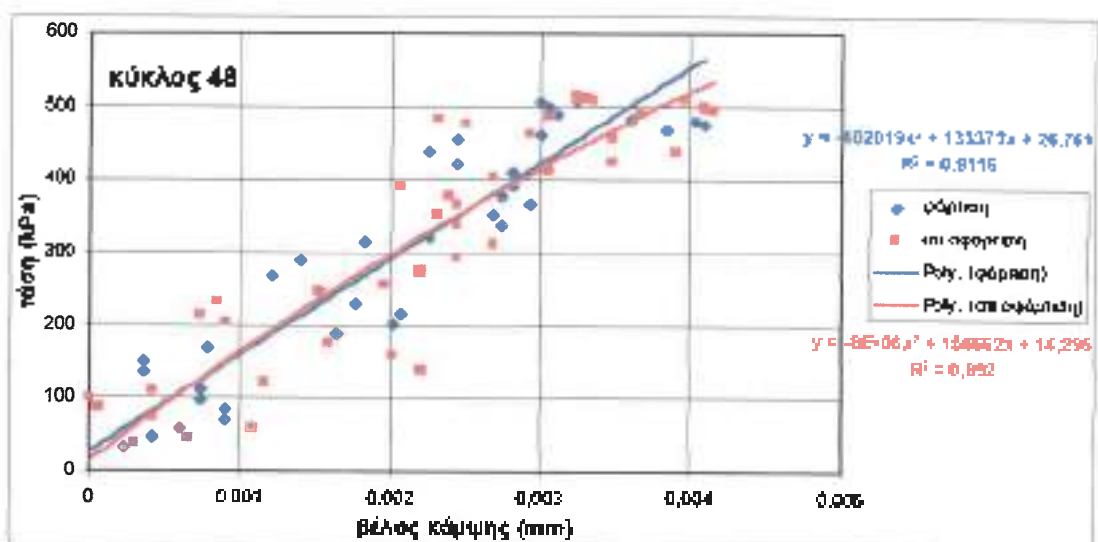
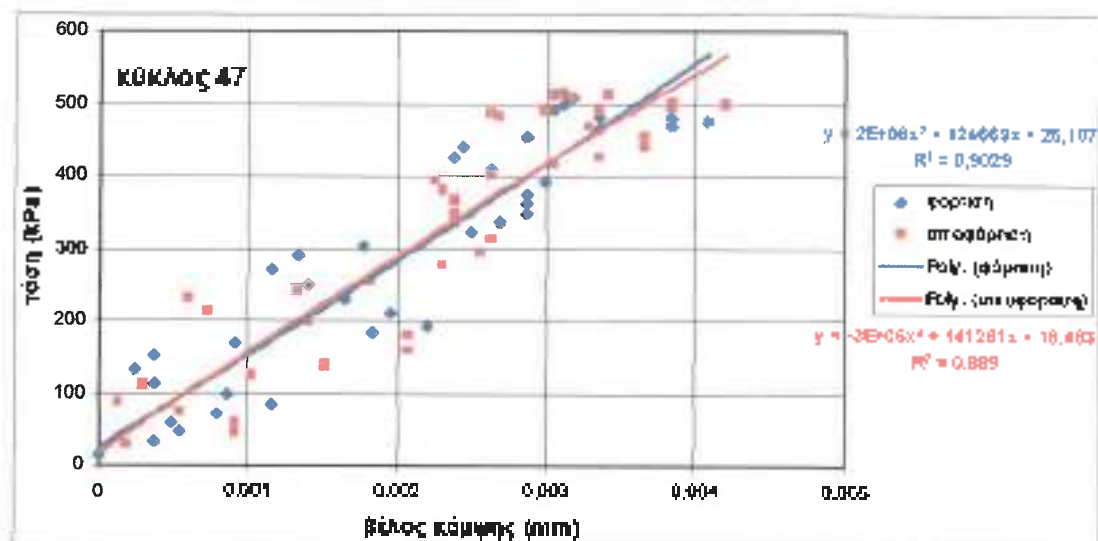
Σχήμα Δ-30: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 8 (γαλάκτωμα 10% - τσιμέντο 3%)



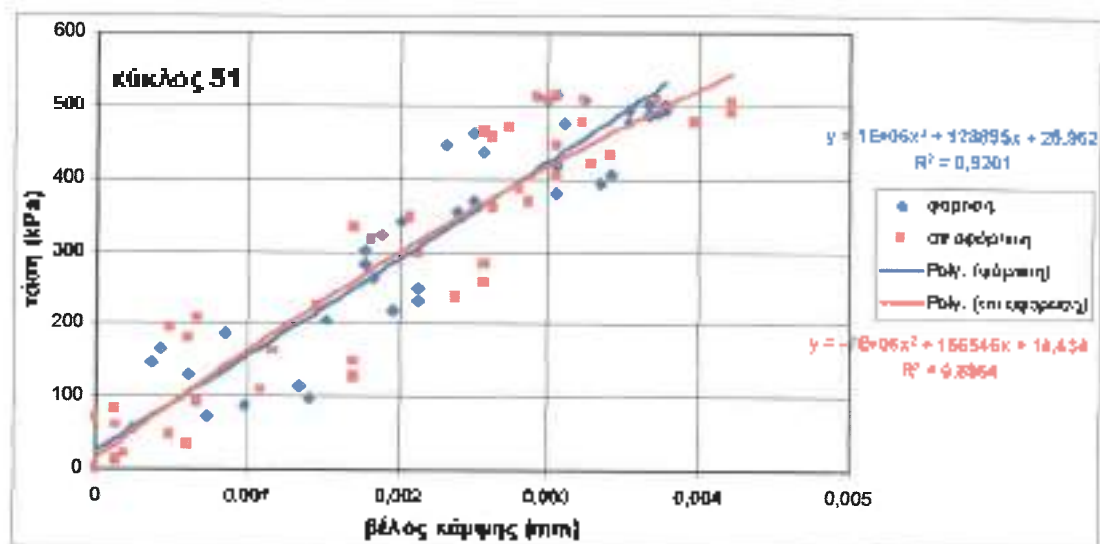
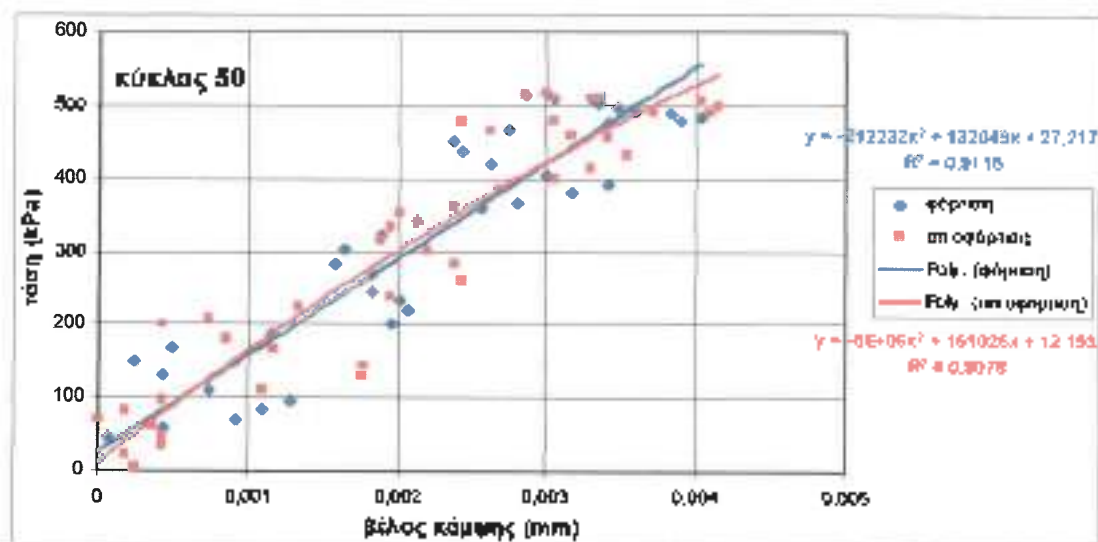
Σχήμα Α-31: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 3%)



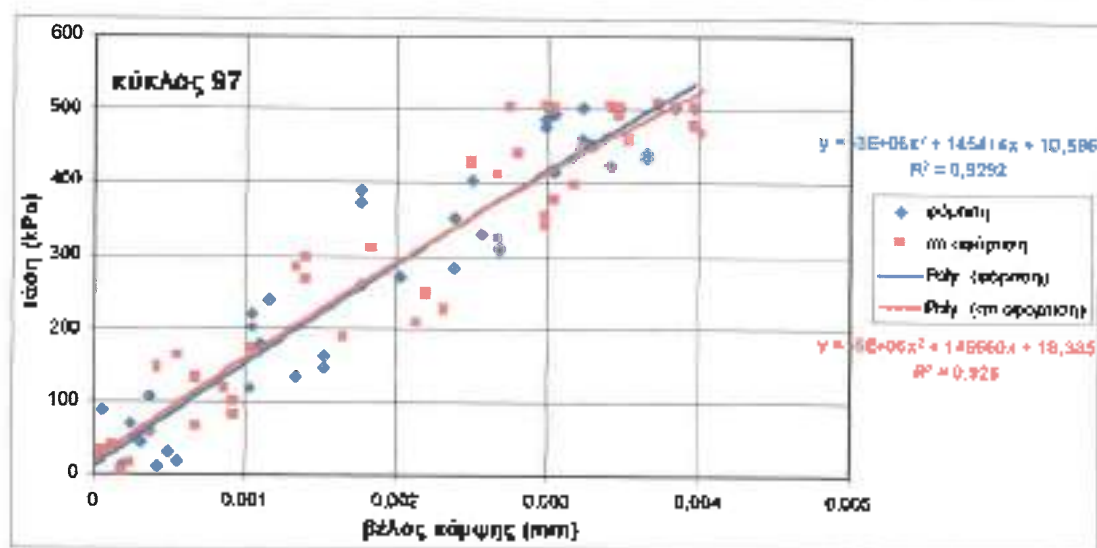
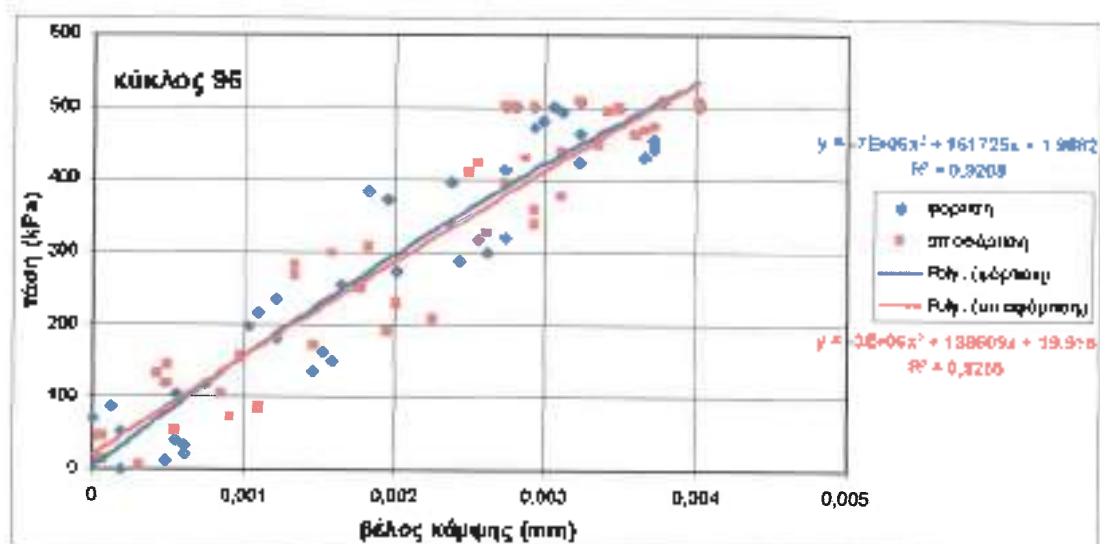
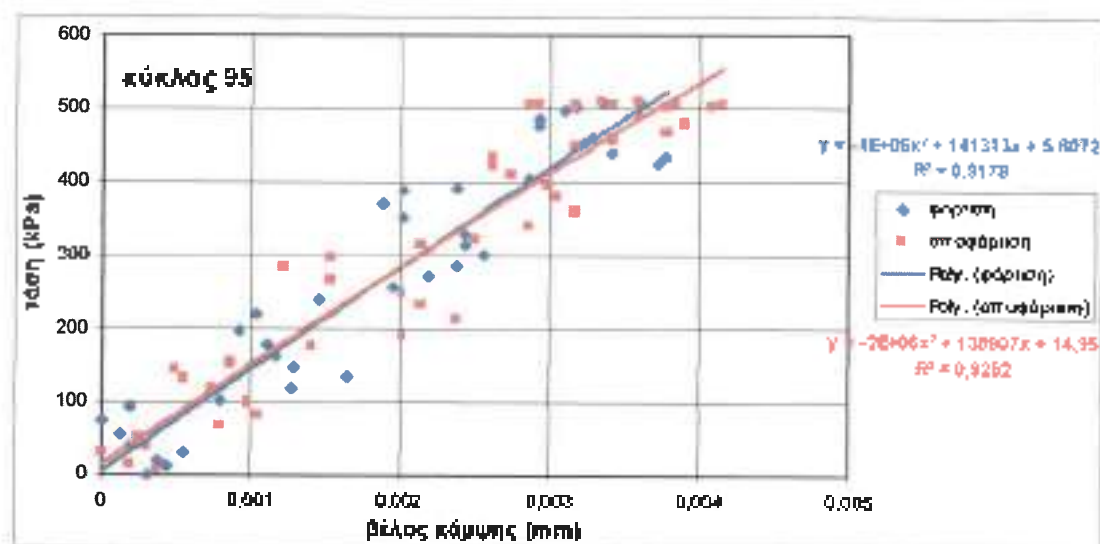
Σχήμα Δ-32: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τεμνέντο 3%)



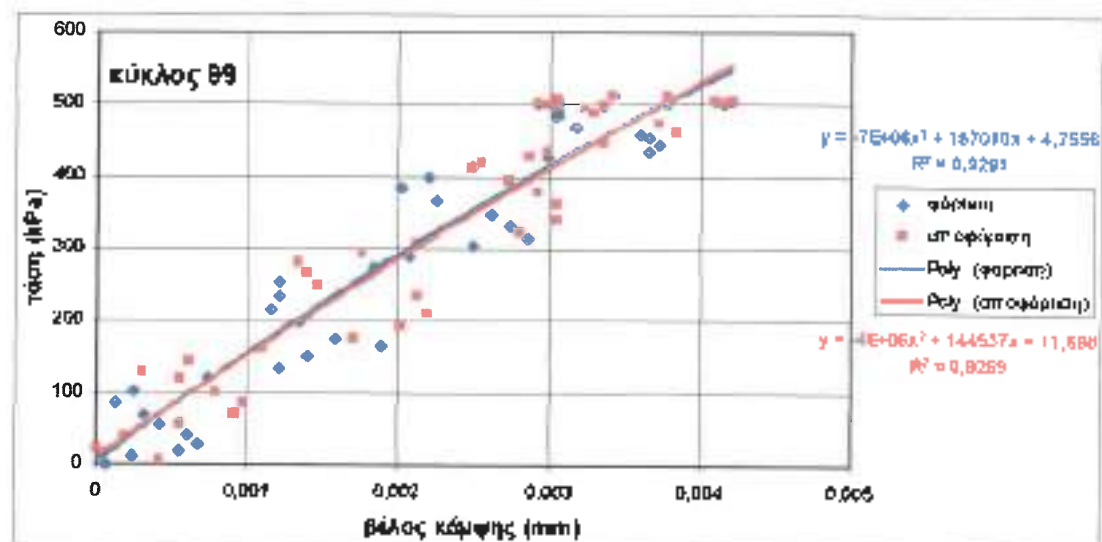
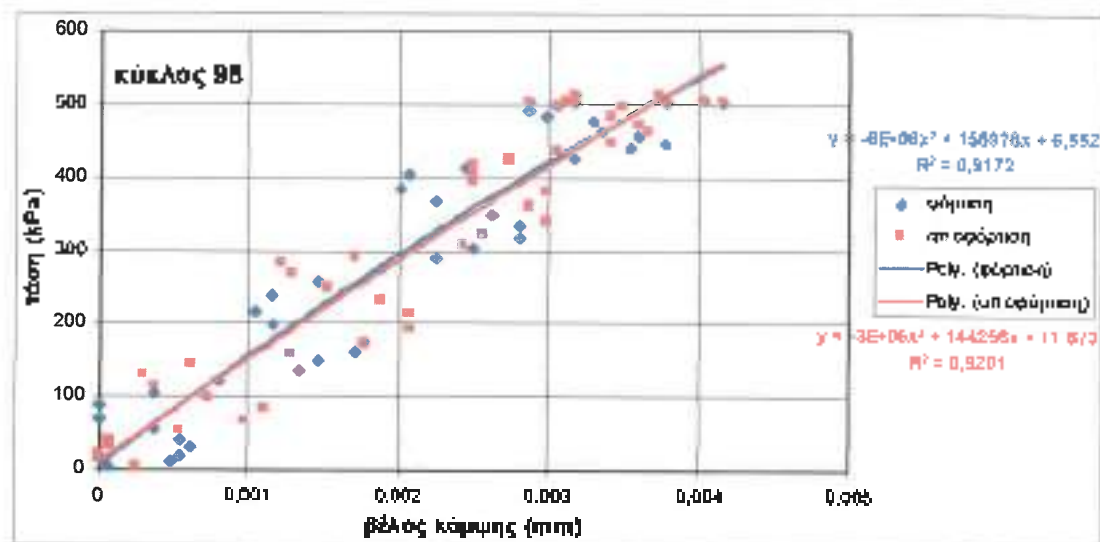
Σχήμα Δ-33: Ένταση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρομησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 9 (γιαλνέκτωμα 1% - τσιμεντό 3%)



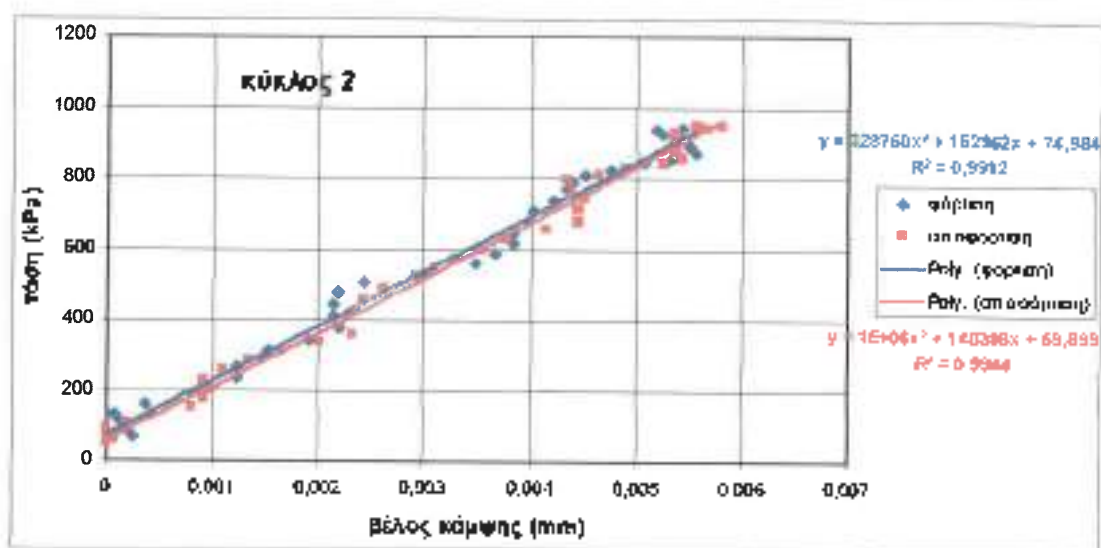
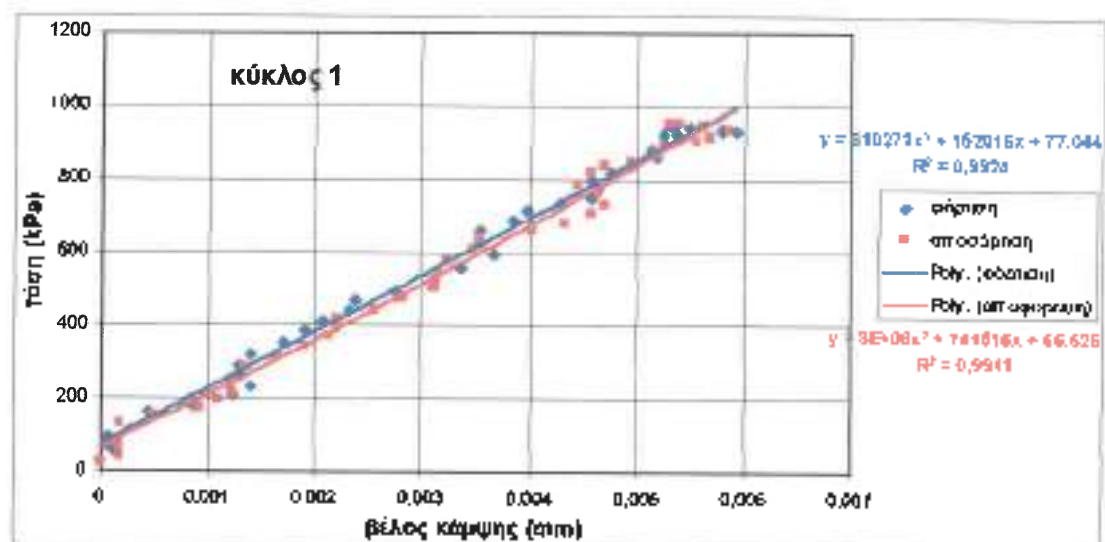
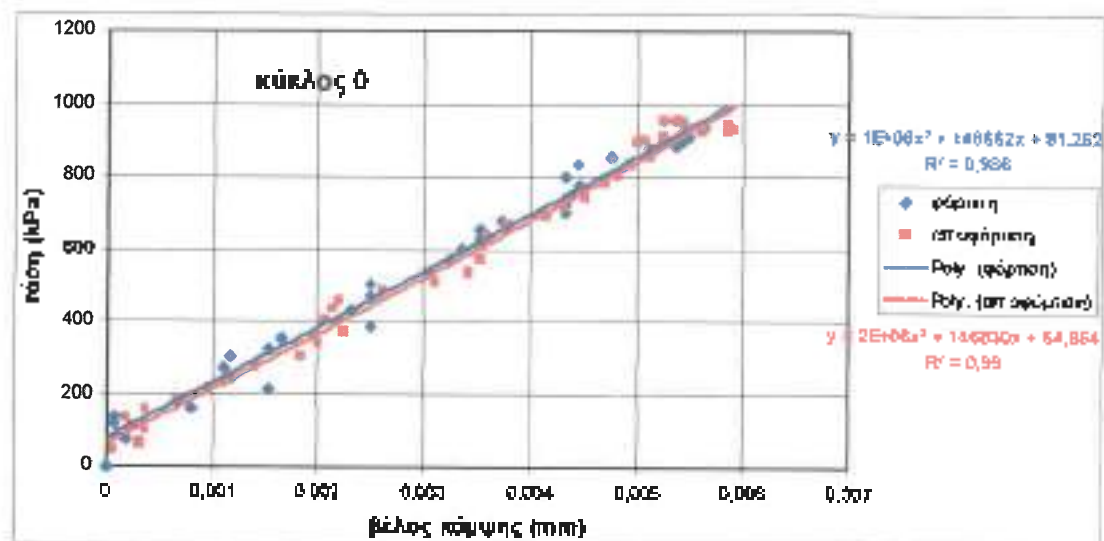
Σχήμα Α-34: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλώδες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - πεισμένο 3%)



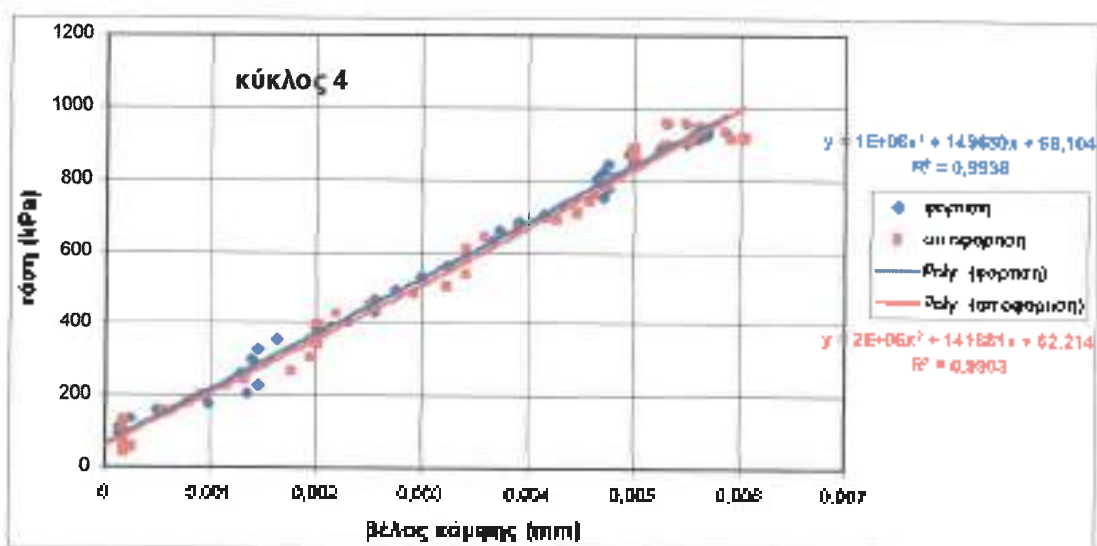
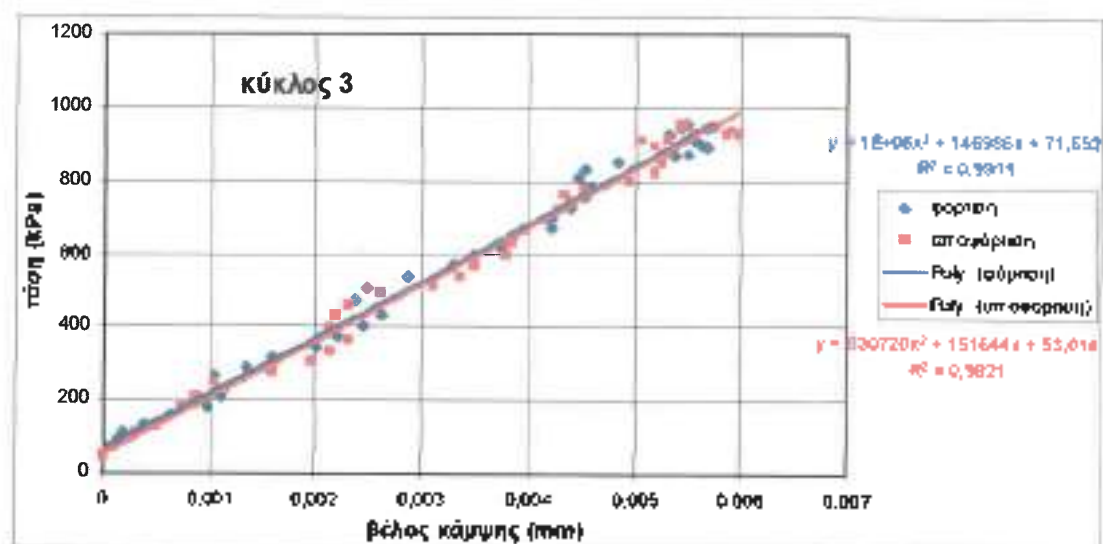
Σχήμα Α-35: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτοιμη 12% - τσιμέντο 3%)



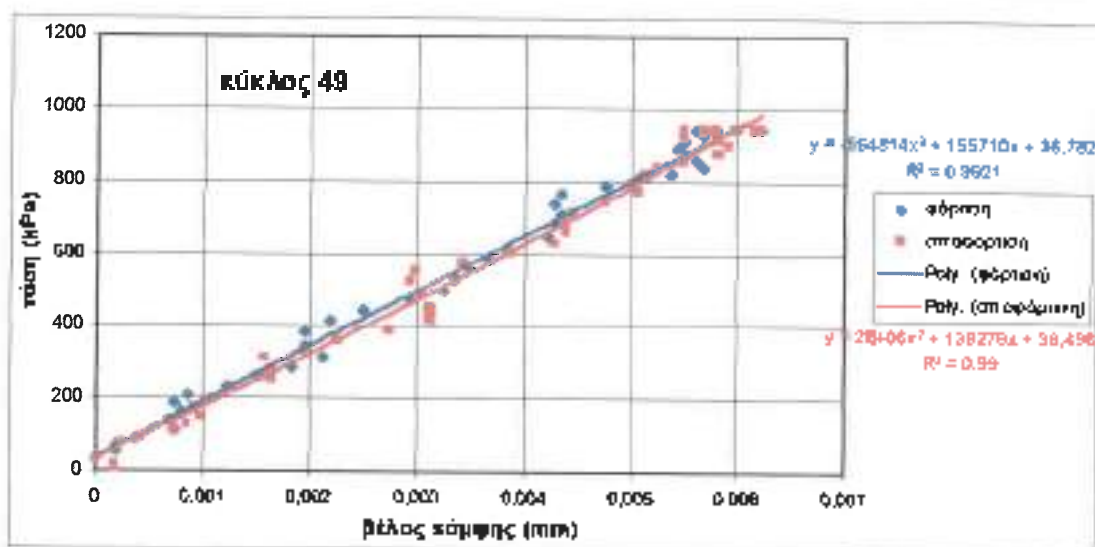
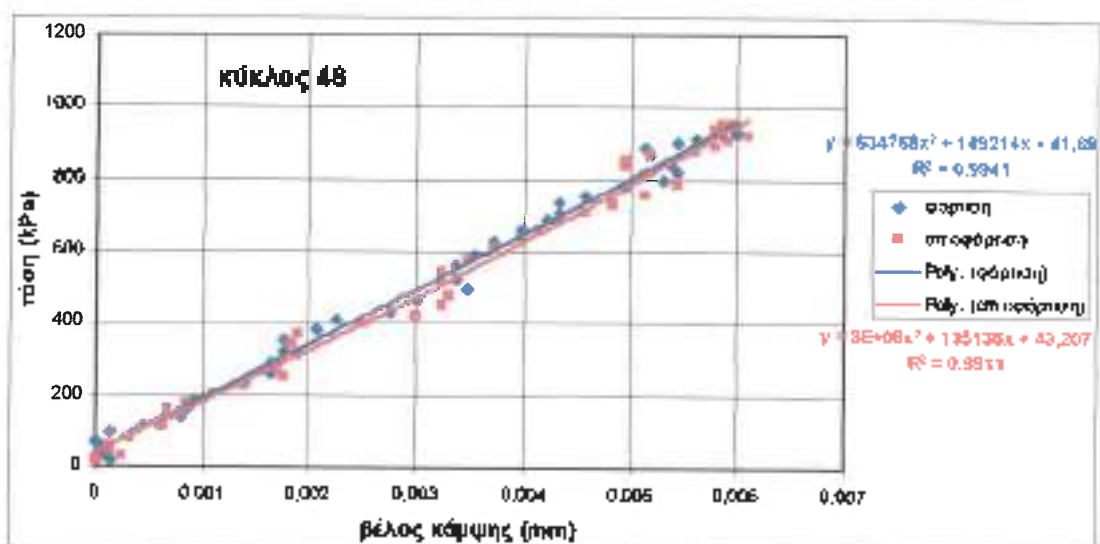
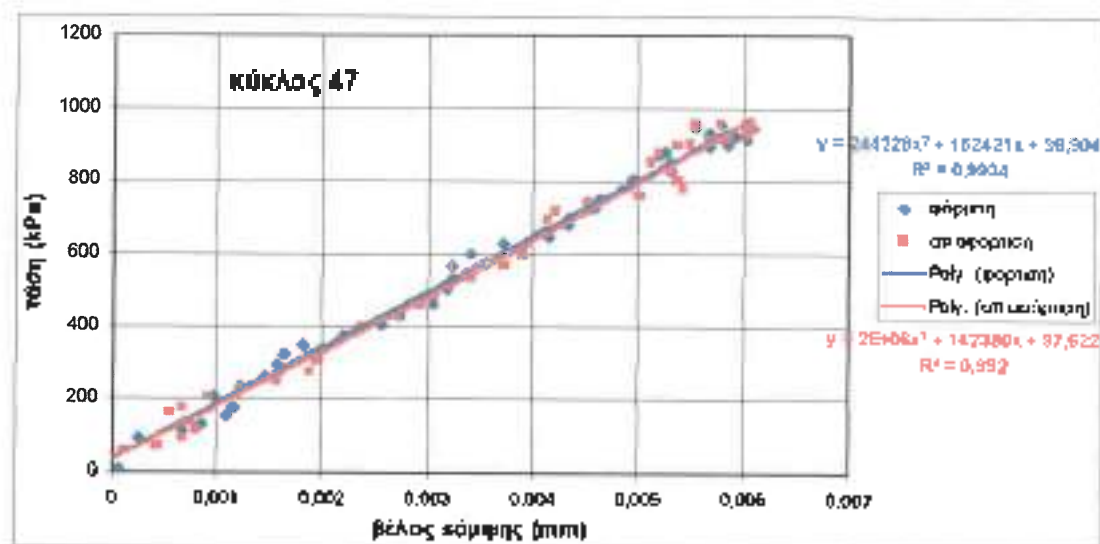
Σχήμα Δ-36: Πάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρομησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 9 (γαλάκτωμα 0% - τιμάντο 3%)



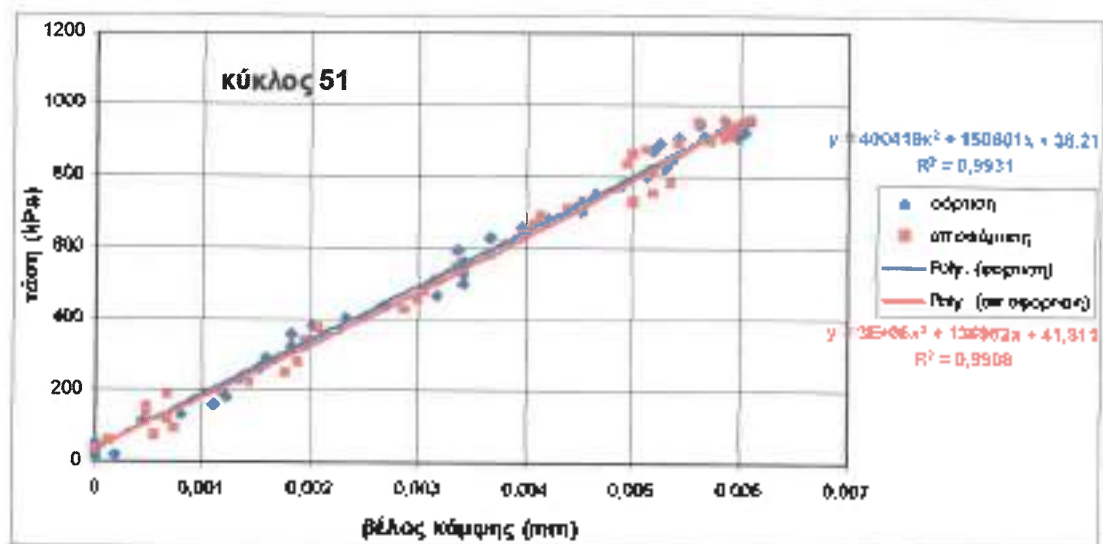
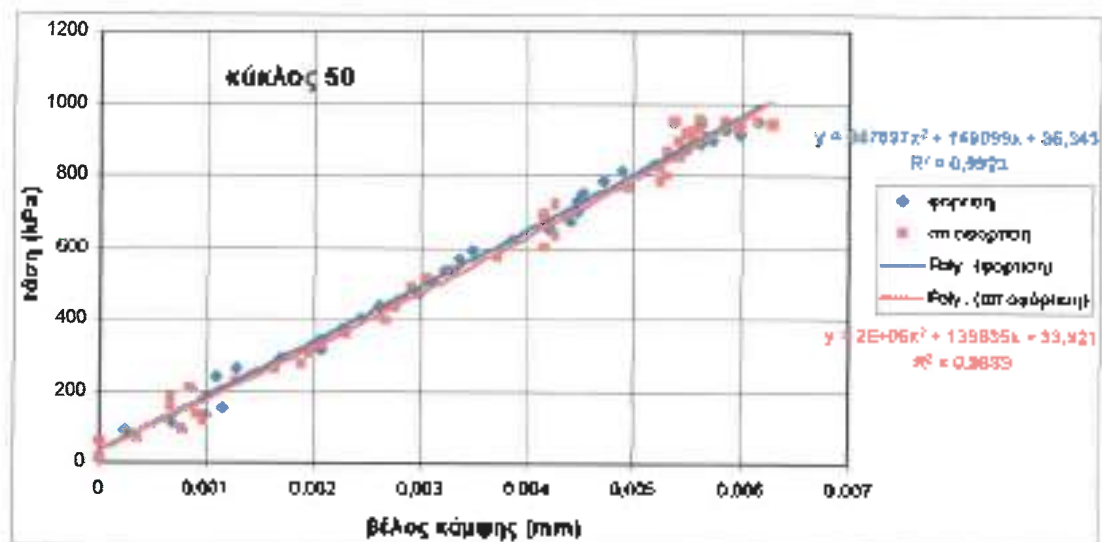
Σχήμα Δ-37: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης). κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτιο 0% - τιμωμένο 4%)



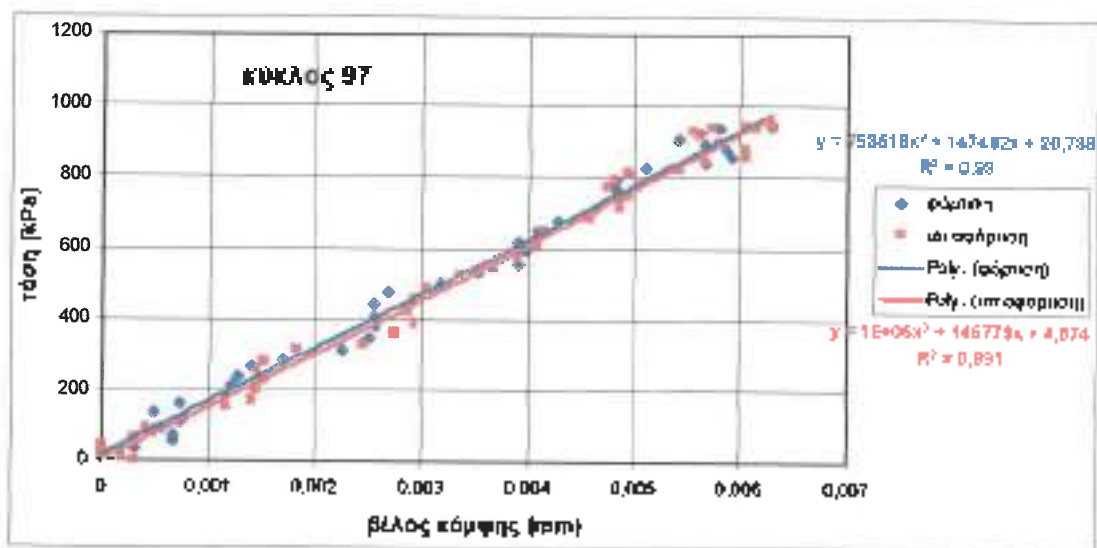
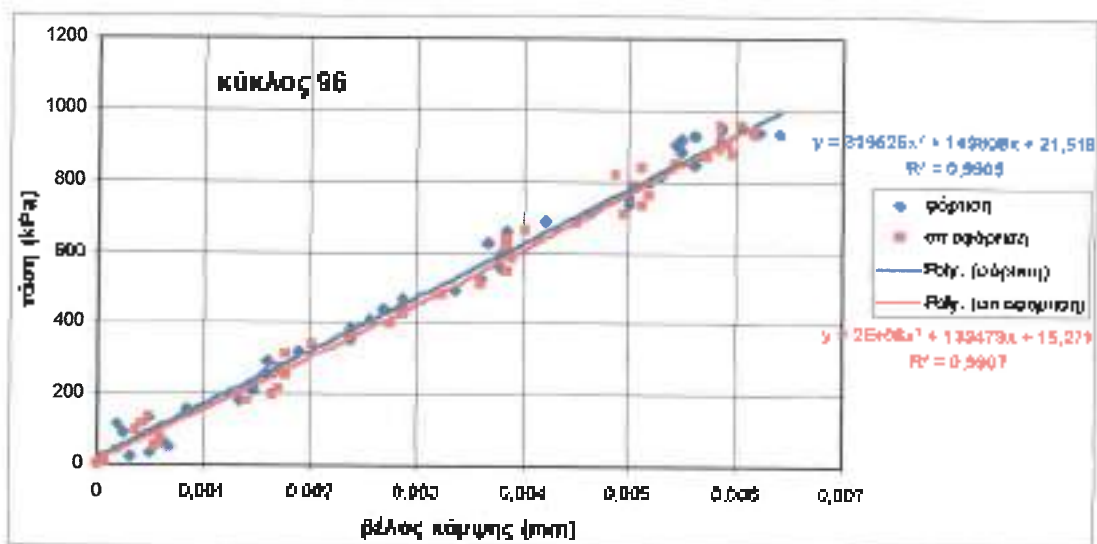
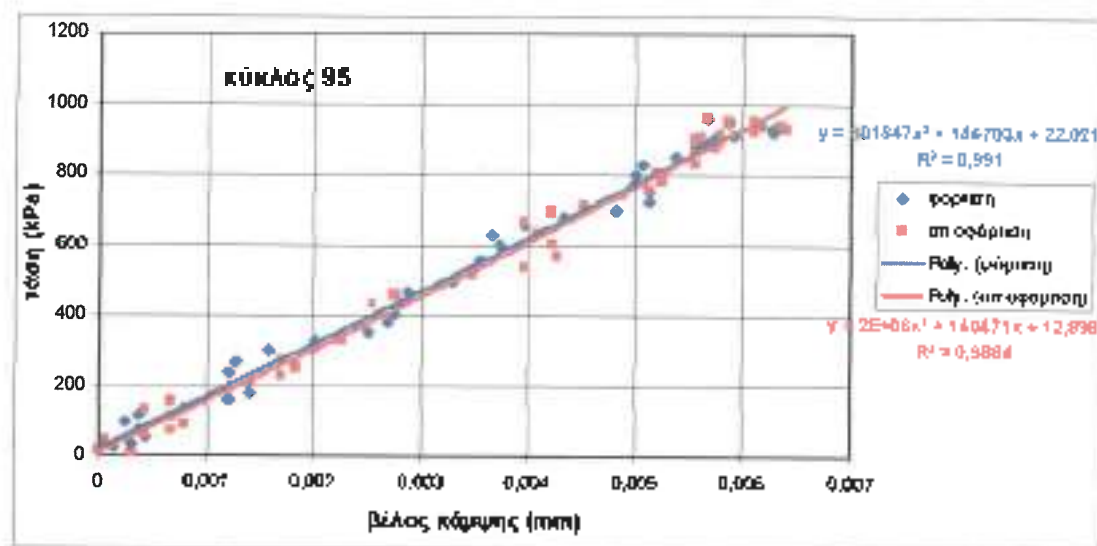
Σχήμα Δ-38: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και υποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



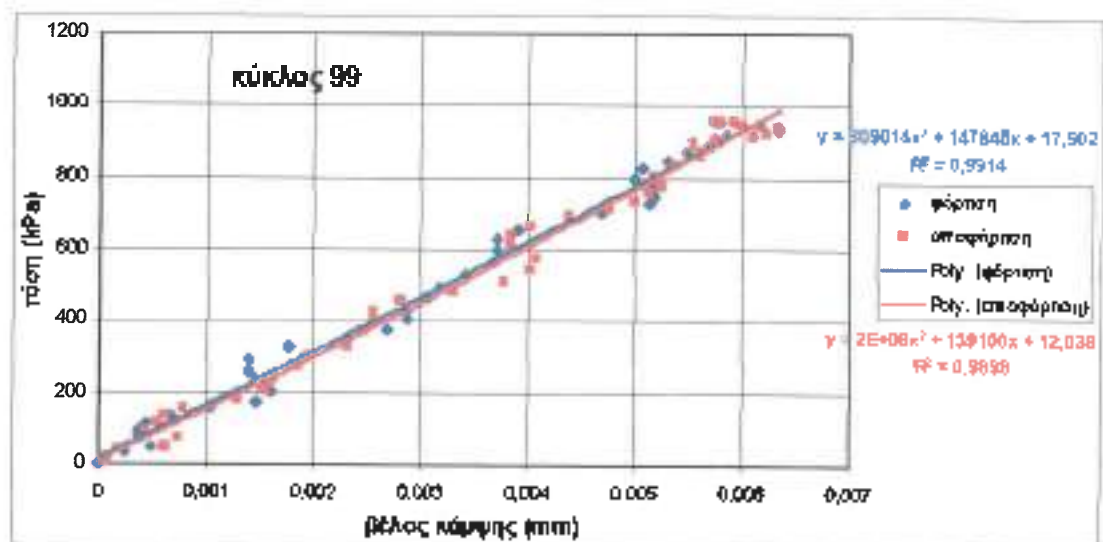
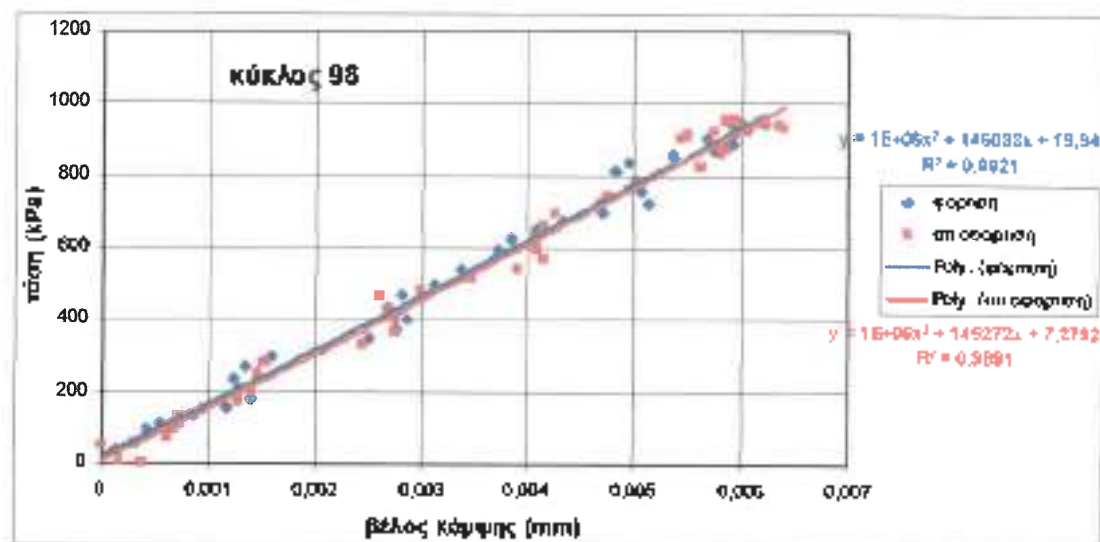
Σχήμα Δ-39: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλλινδρομικής), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτωμα 0% - τσιμεντώ 4%)



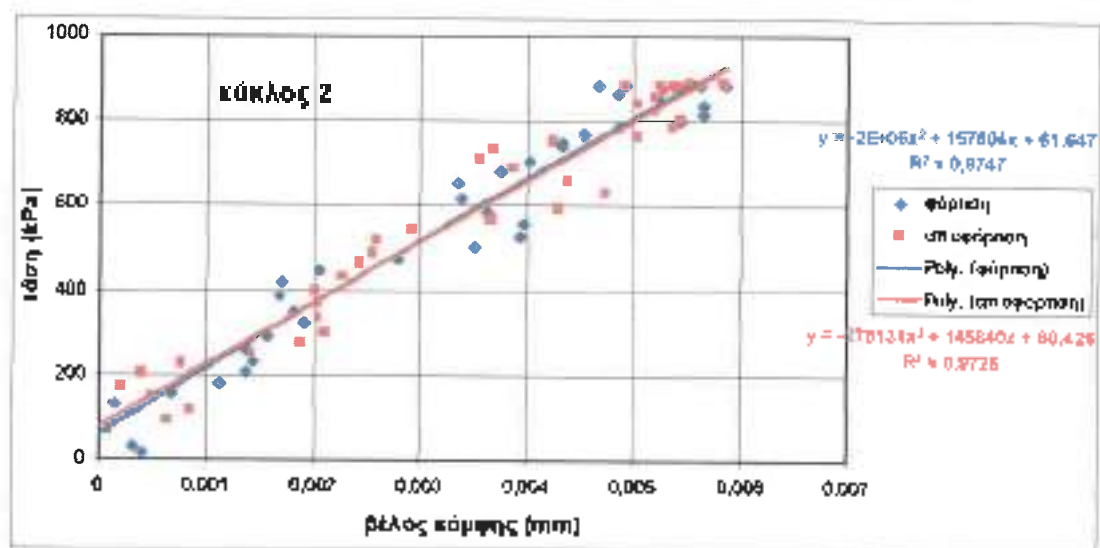
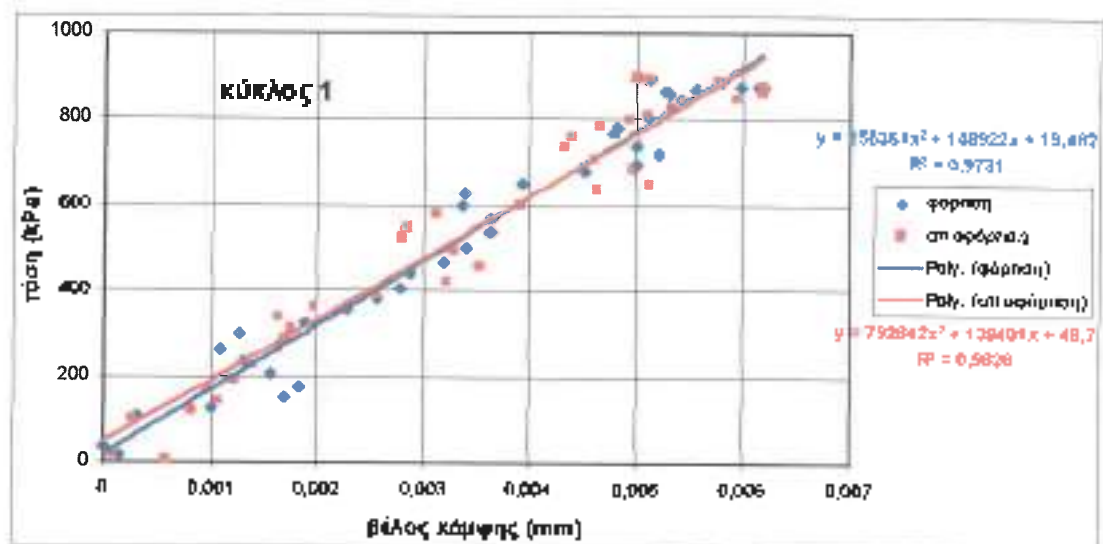
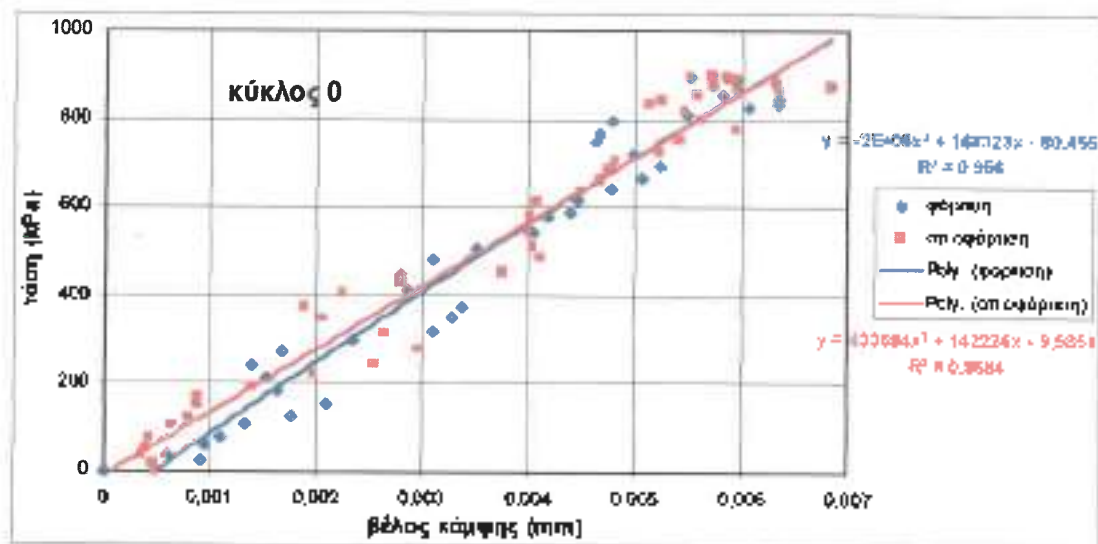
Σχήμα Δ-40: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 11 (γαλάκτοιμα 0% - τσιμέντου 4%)



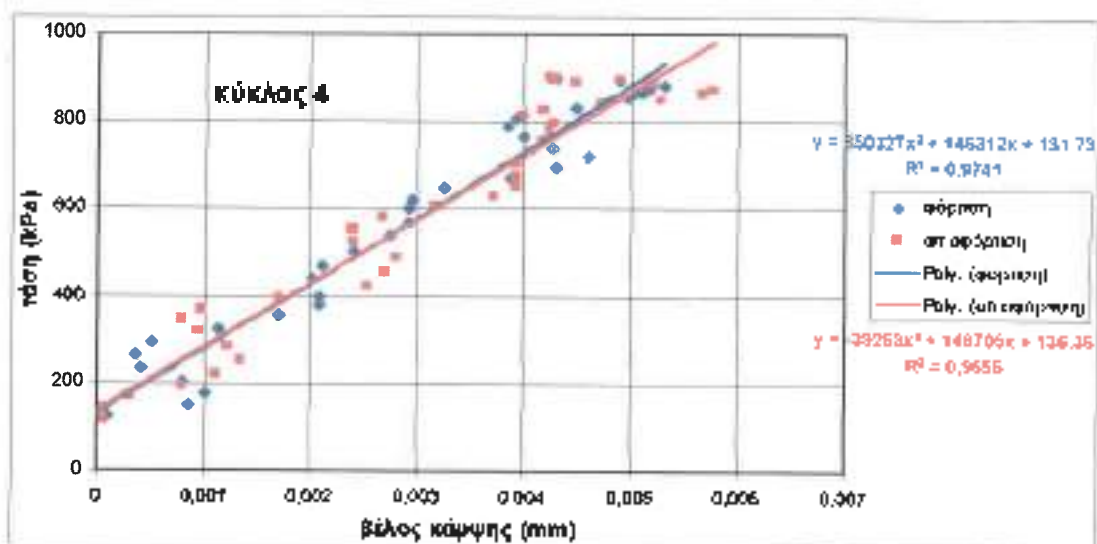
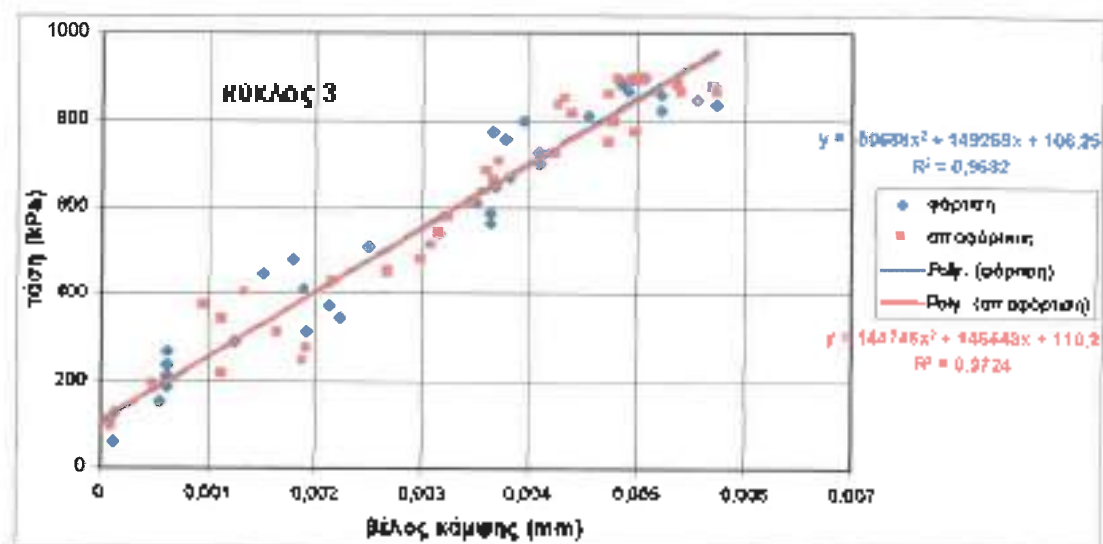
Σχήμα Δ-41: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δείγμα II (γαλάκτωμα 6% - τσιμέντου 4%)



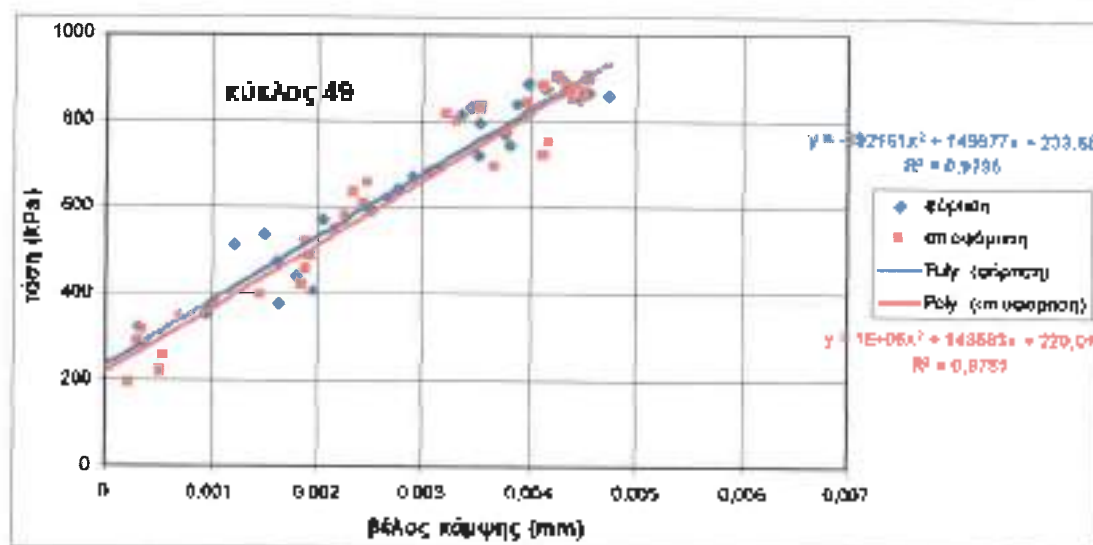
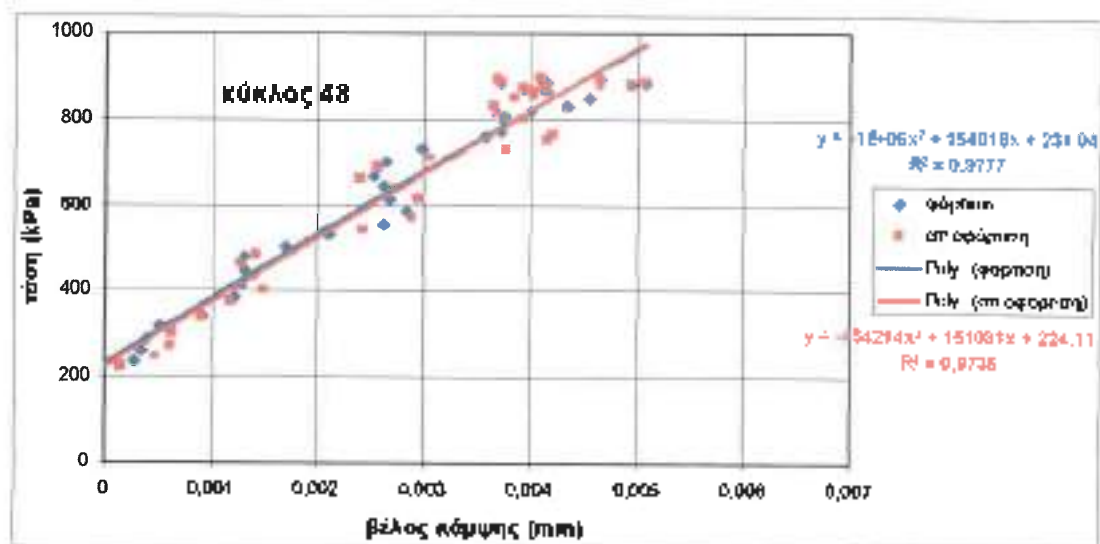
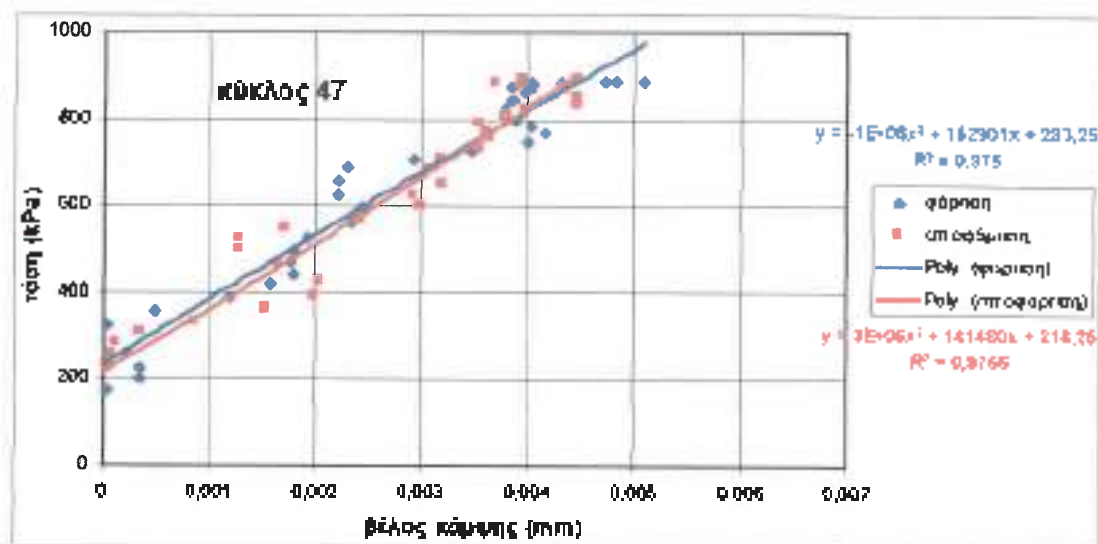
Σχήμα Α-42: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κιτριπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο ΙΙ (γαλάκτωμα 0% - τσιμεντό 4%)



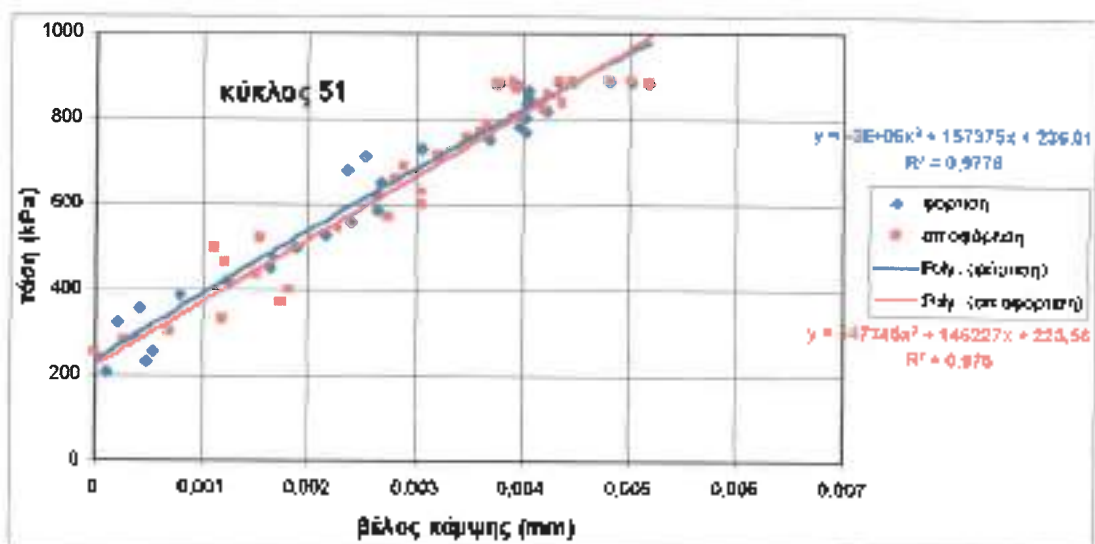
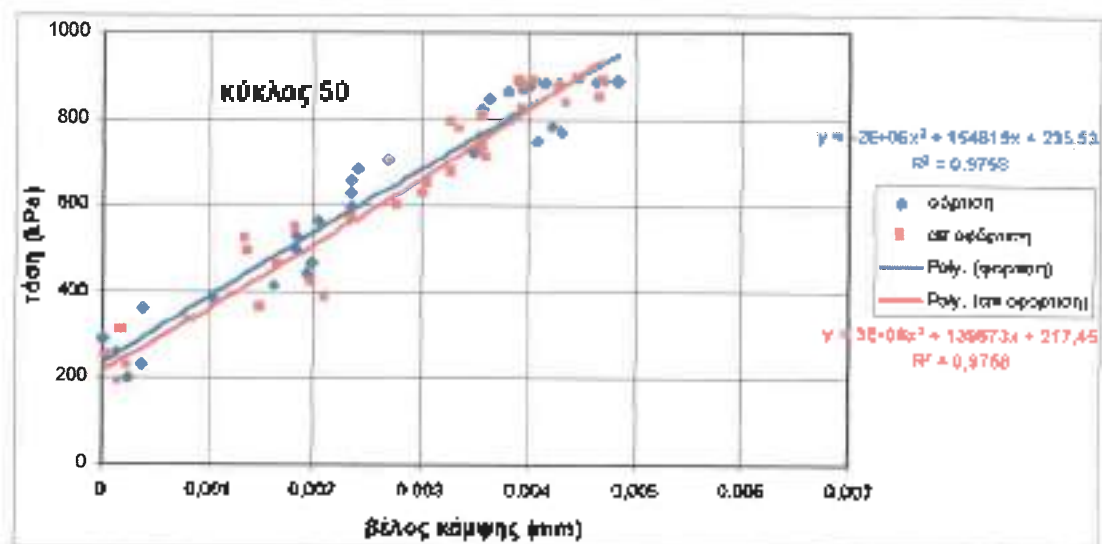
Σχήμα Δ-43: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυμινάδες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 0% - τσιμεντό 4%)



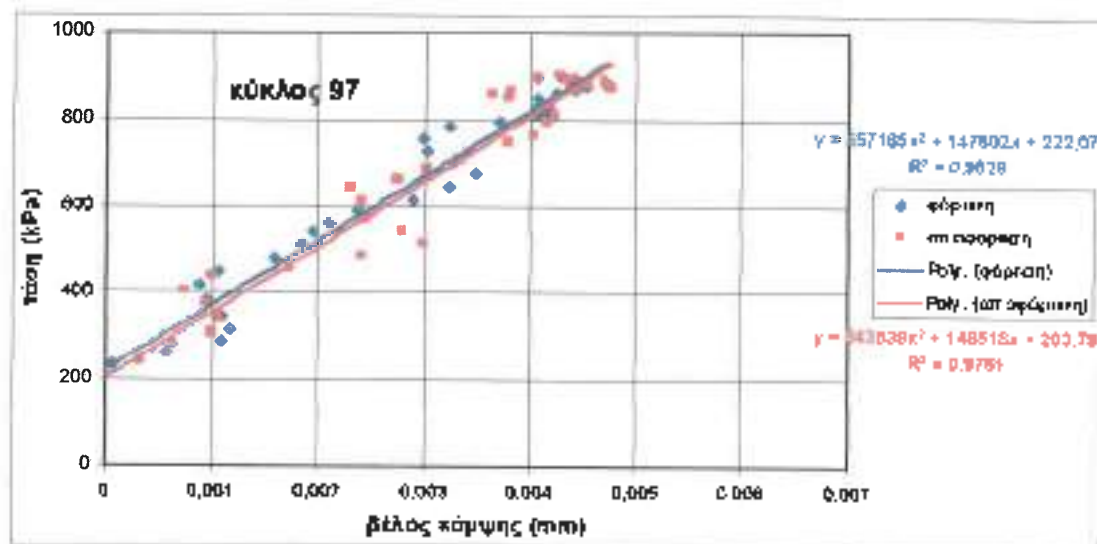
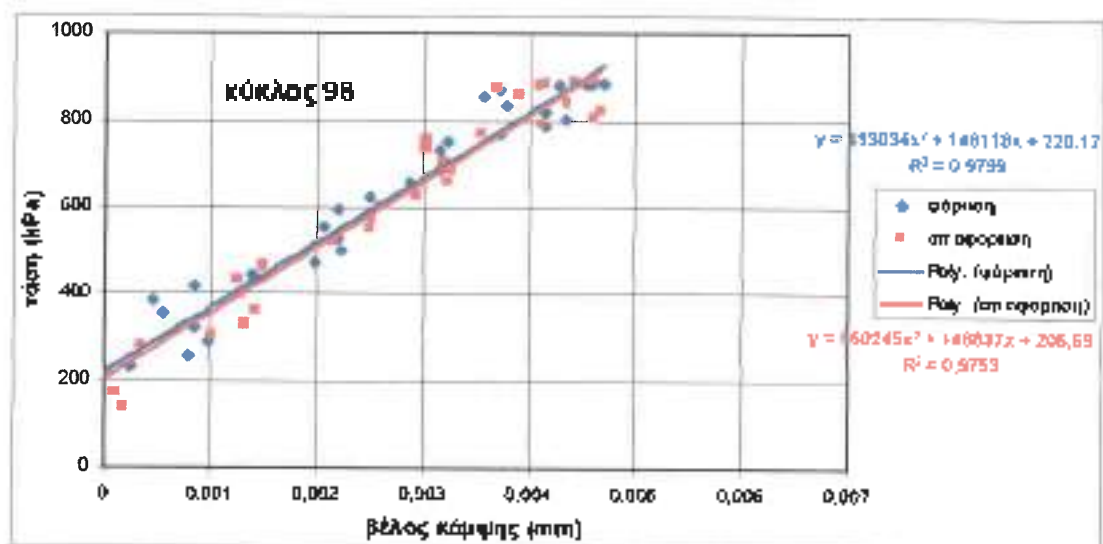
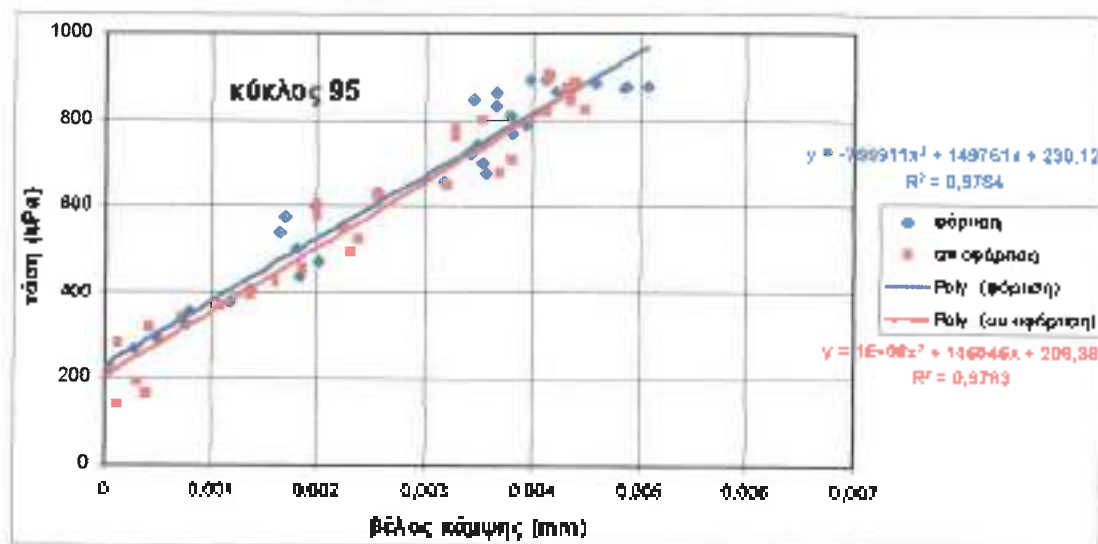
Σχήμα Δ-44: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 12 (γυαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



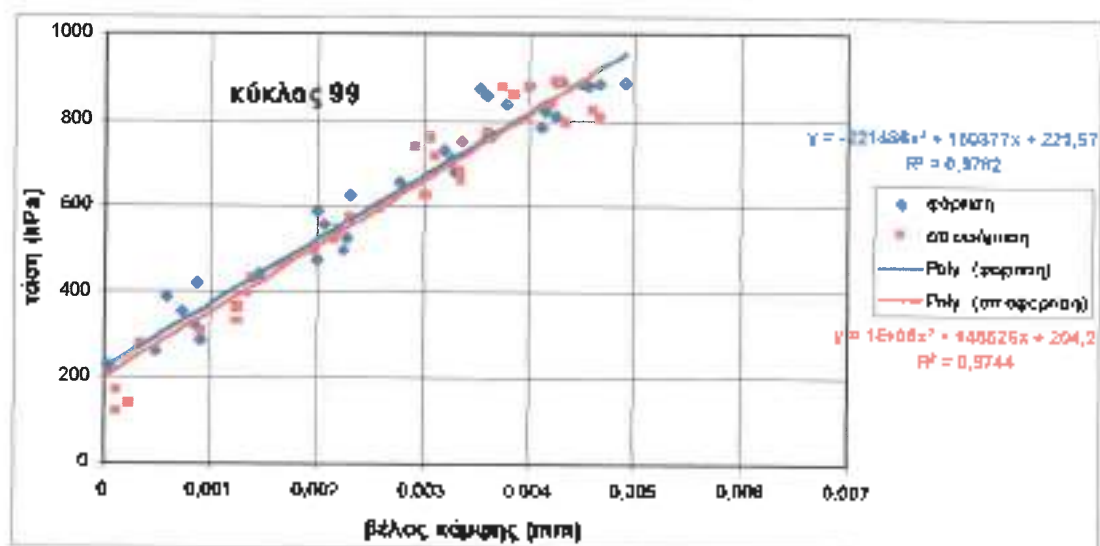
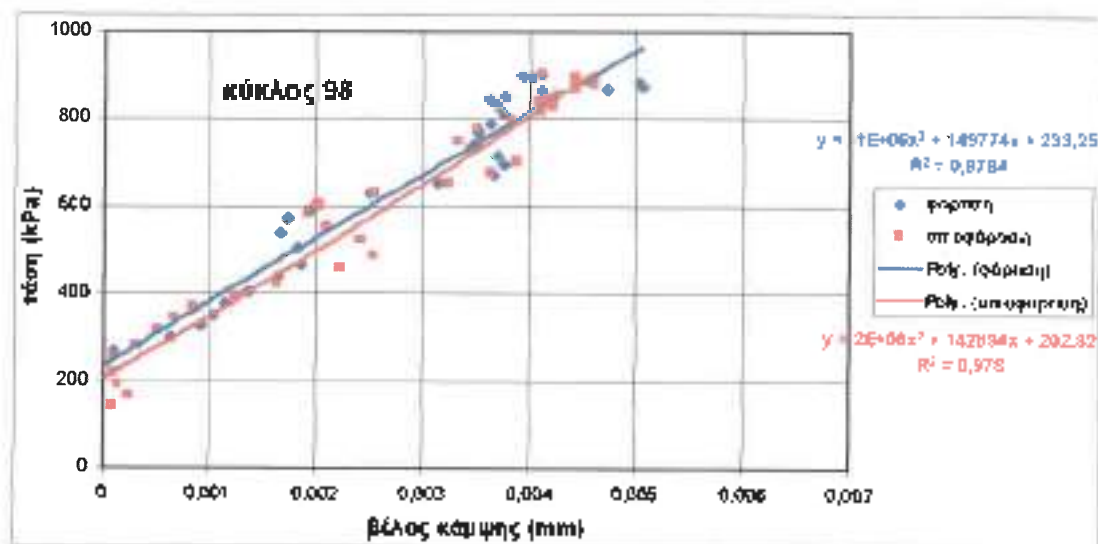
Σχήμα Δ-45: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 9% - τσιμέντο 4%)



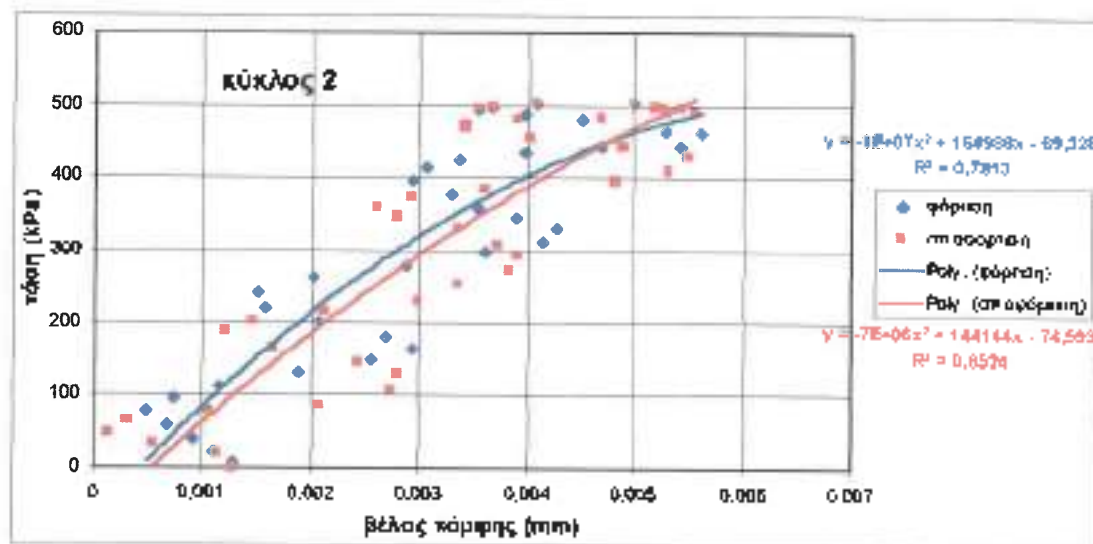
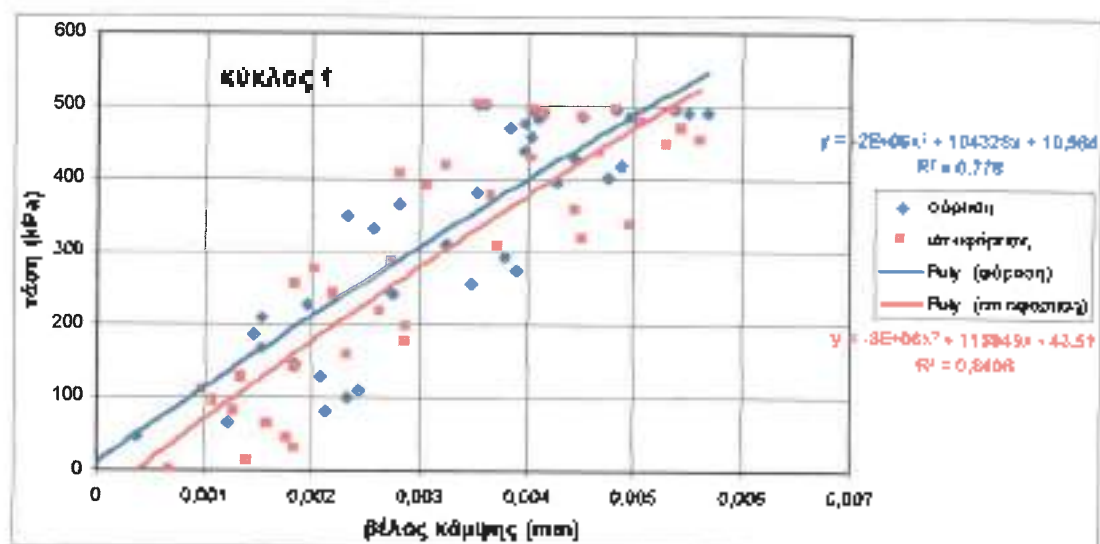
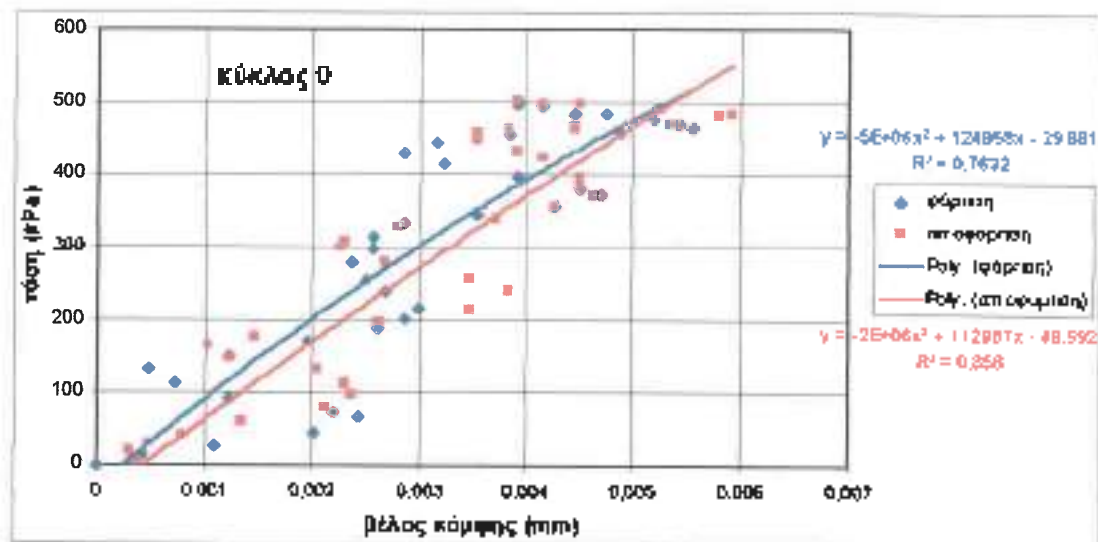
Σχήμα Δ-46: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 12 (γαλνέτωμα 4% - τσιμέντο 4%)



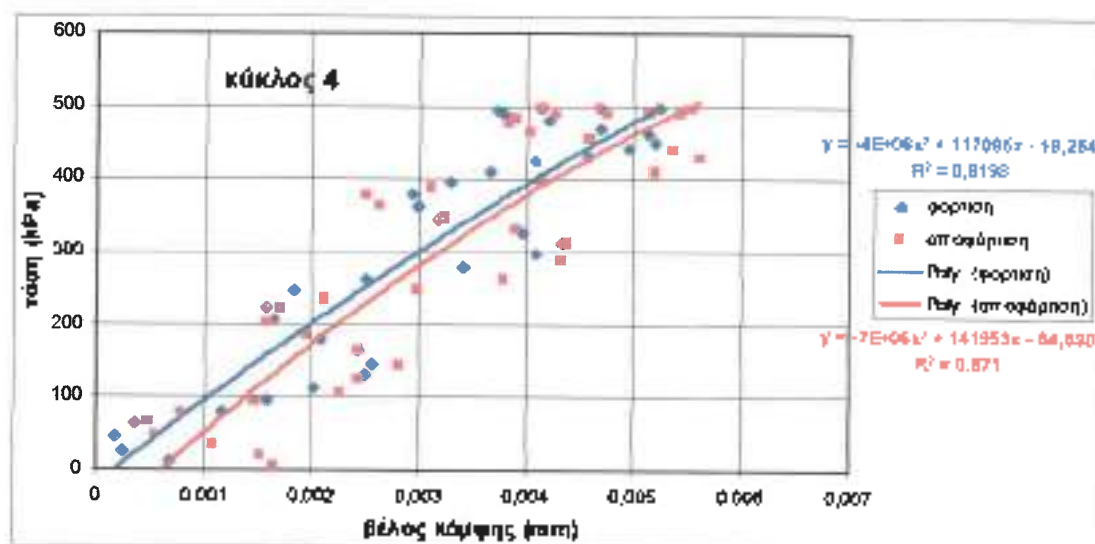
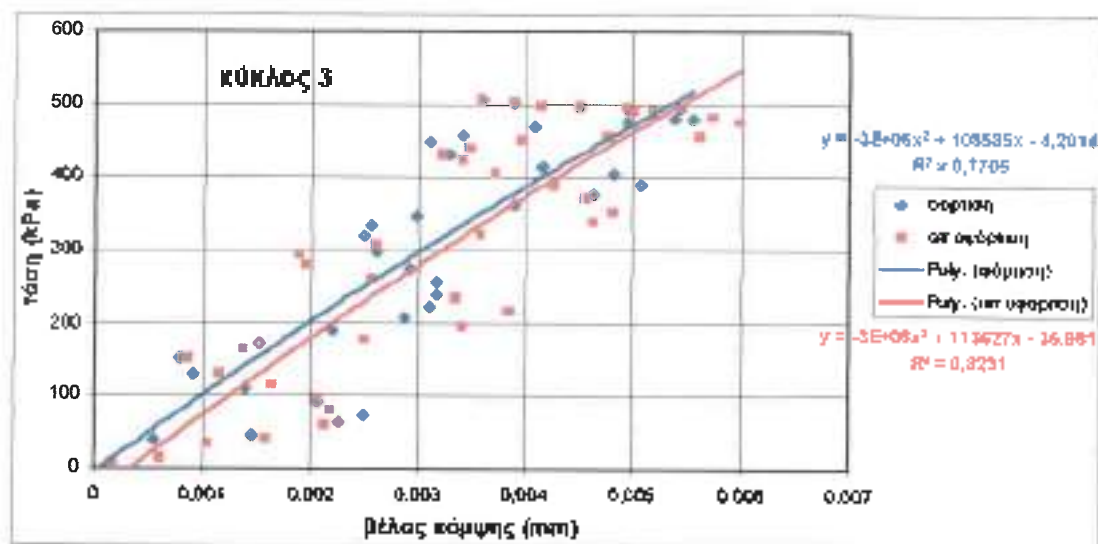
Σχήμα Δ-47: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινελάτρευσης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 12 (γαλάκτωμα 0% - τσιμέντο 4%)



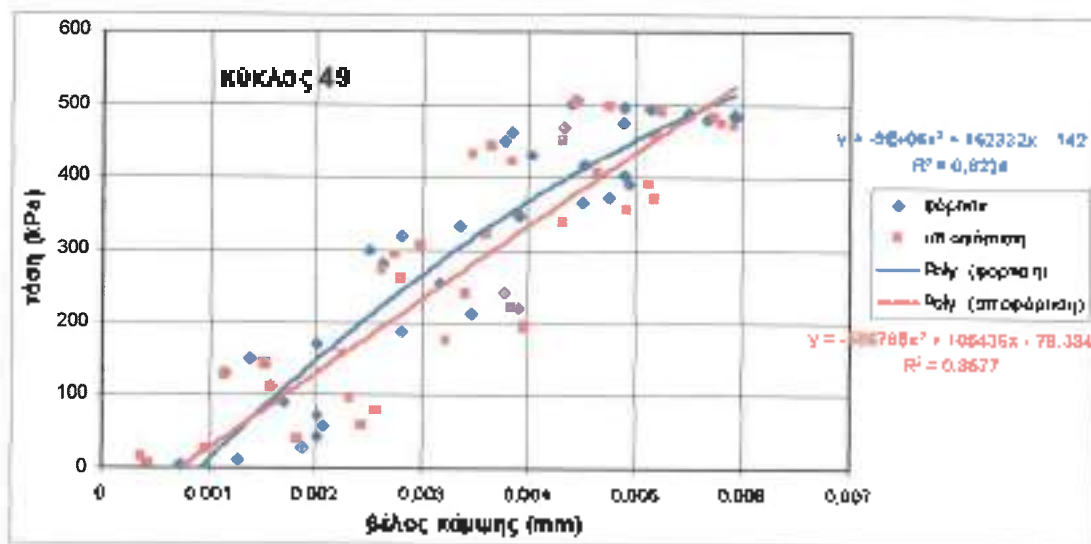
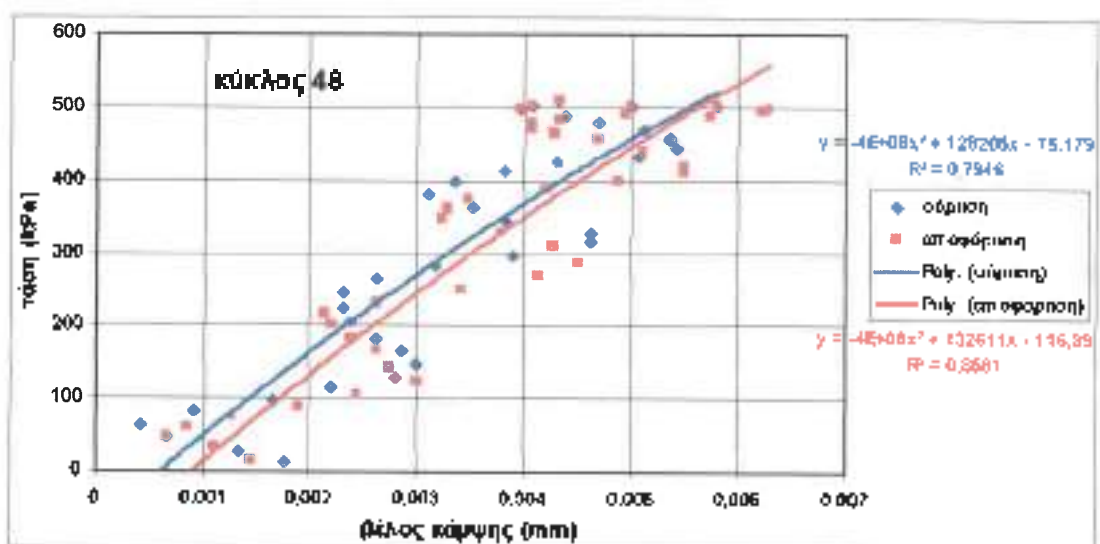
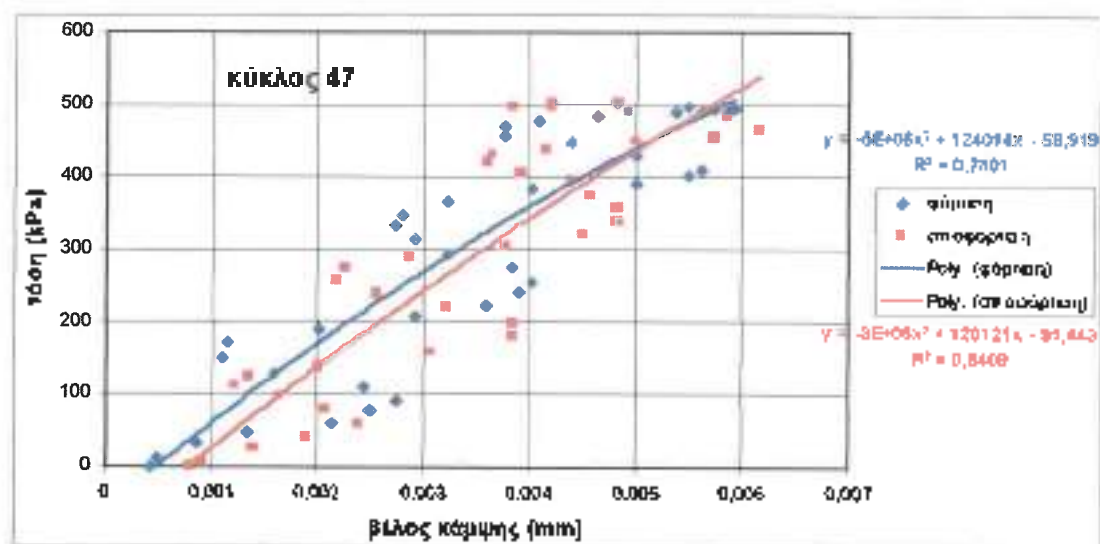
Σχήμα Δ-48: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες πολυωνόμοισης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 12 (γαλάνο 4% - τσιμέντο 4%)



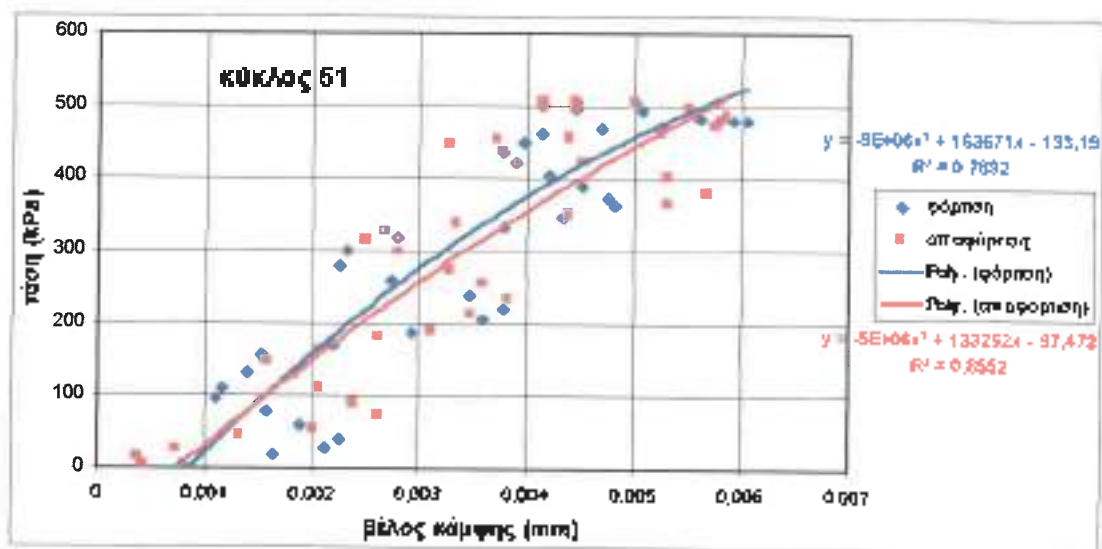
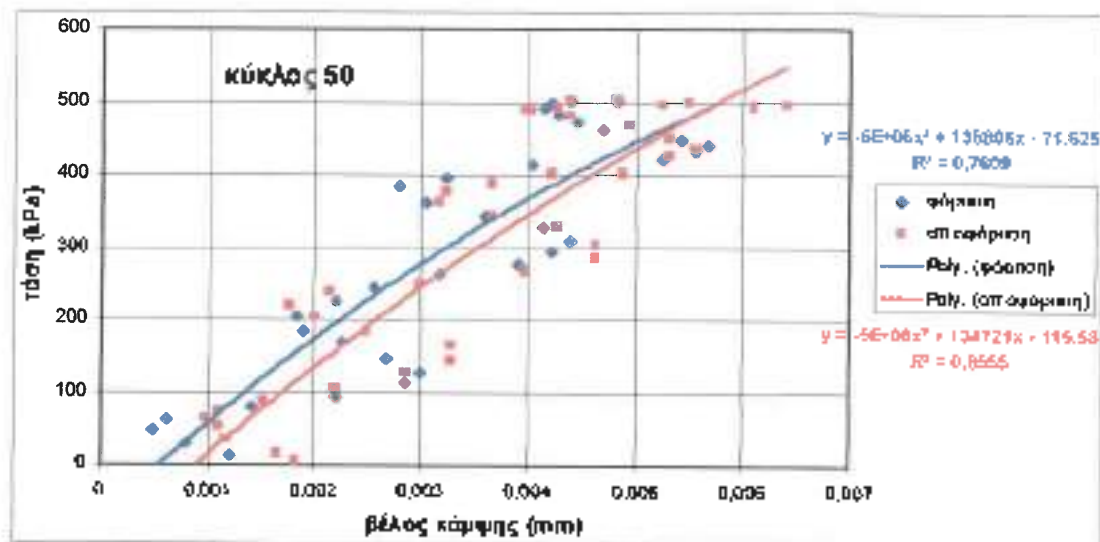
Σχήμα Δ-49: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πηλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



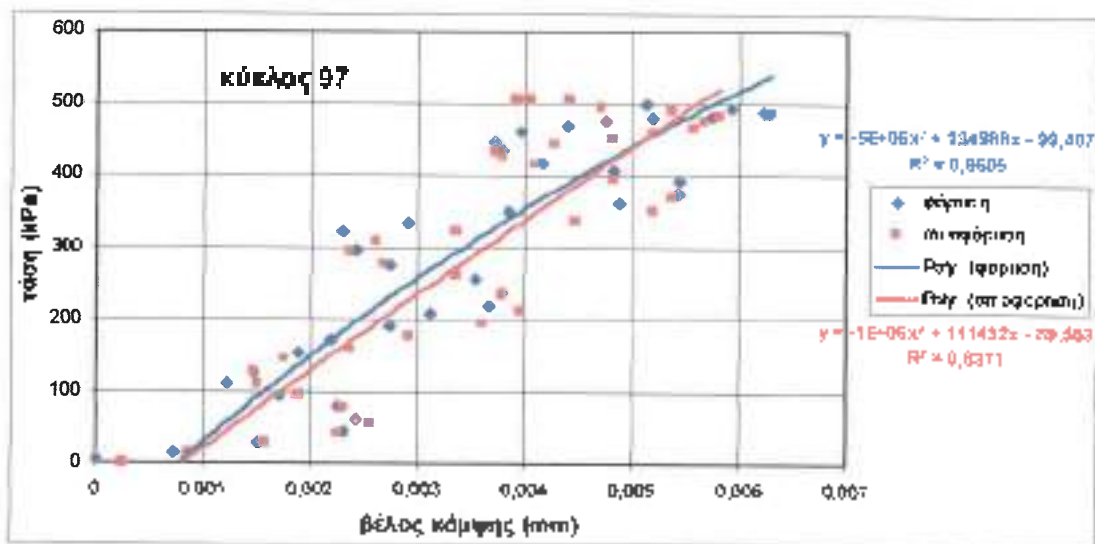
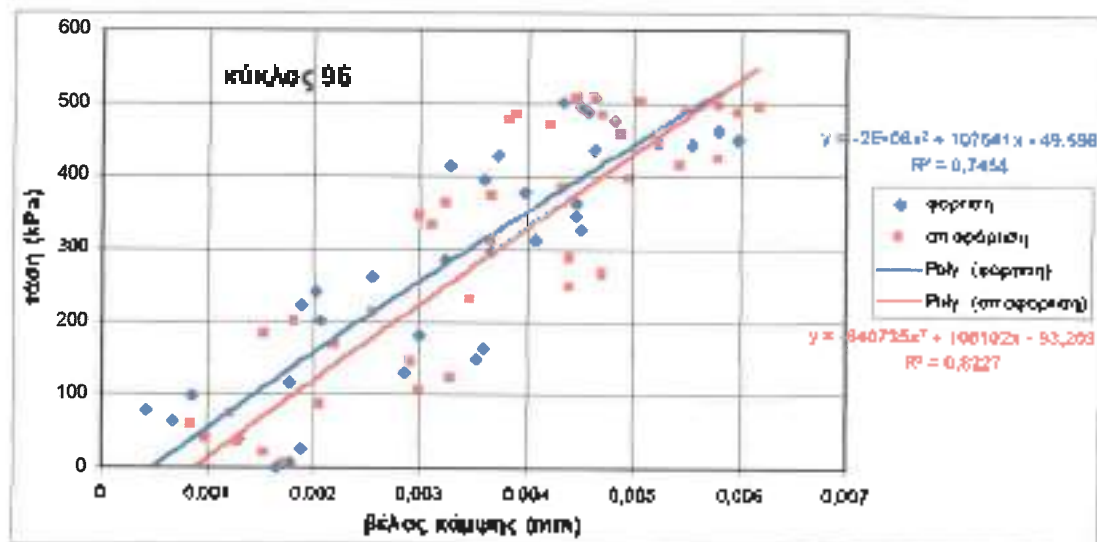
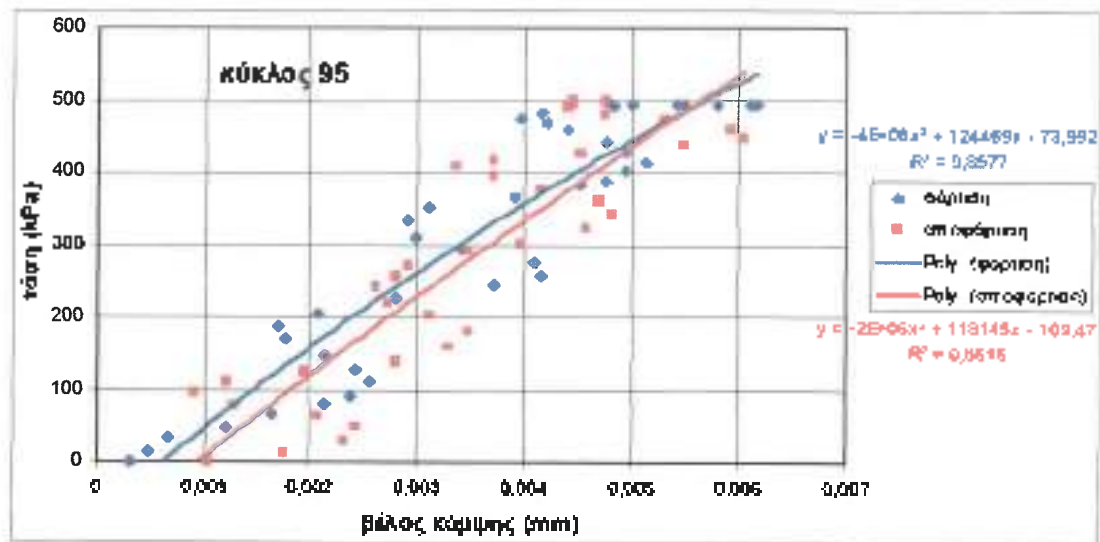
Σχήμα Δ-50: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντο 3%)



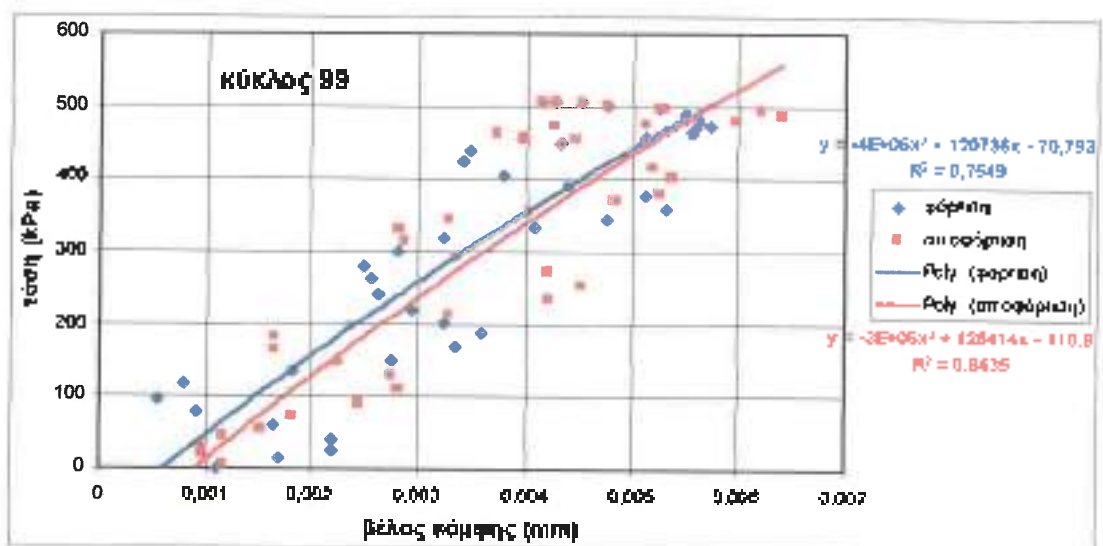
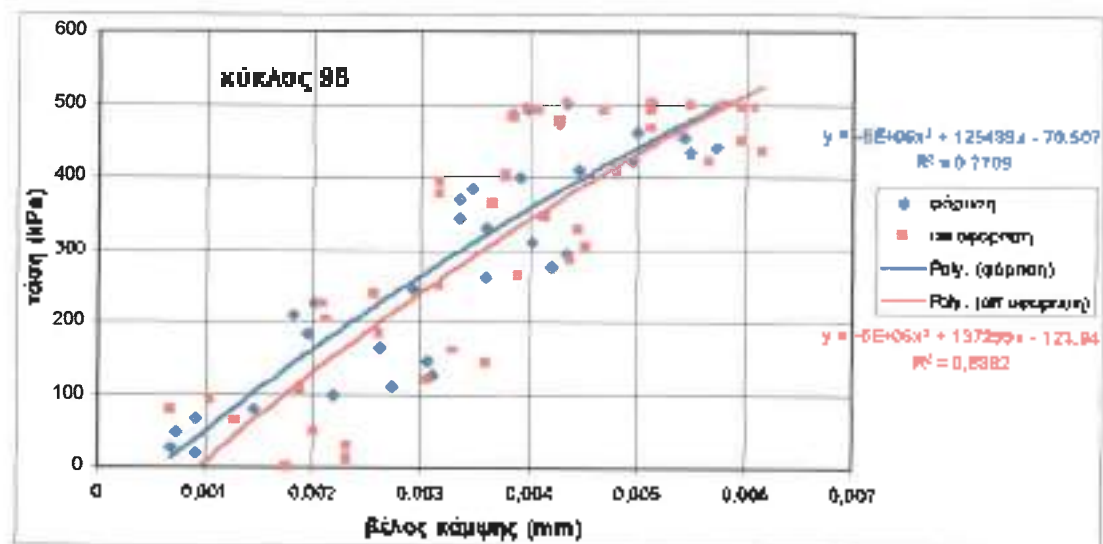
Σχήμα Α-51: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πλάγινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τοιμάντο 3%)



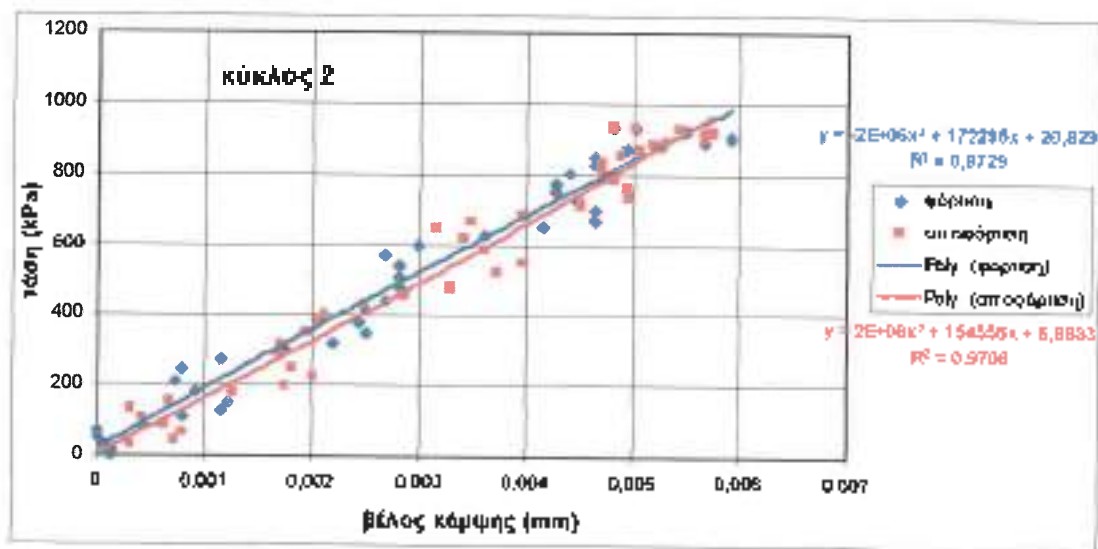
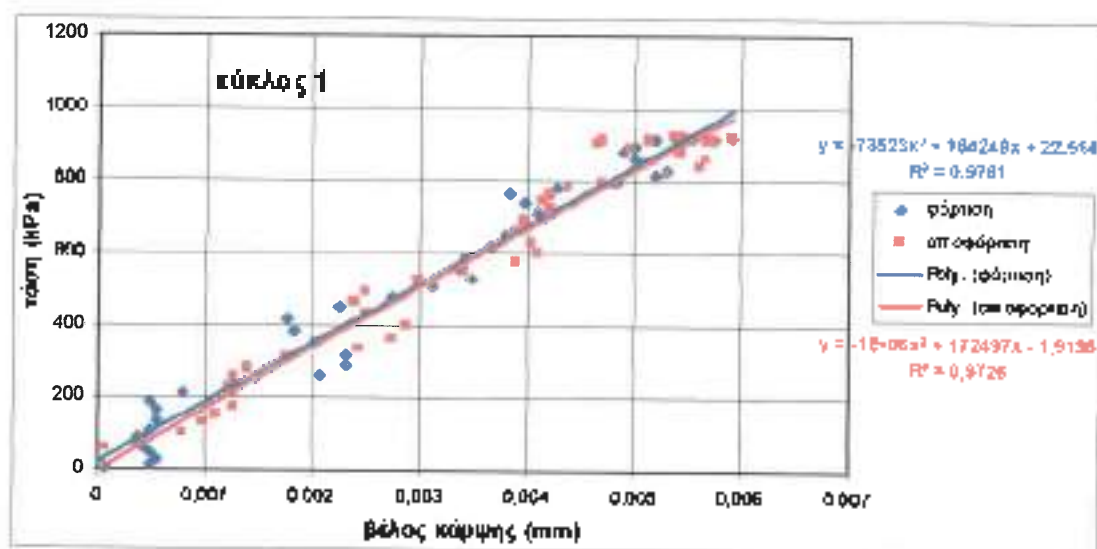
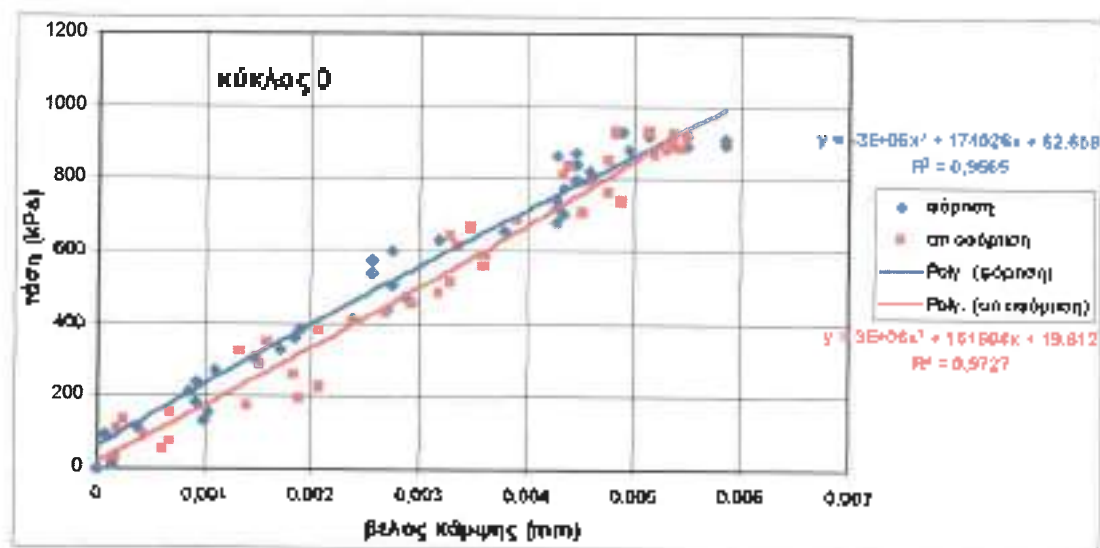
Σχήμα Δ-52: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



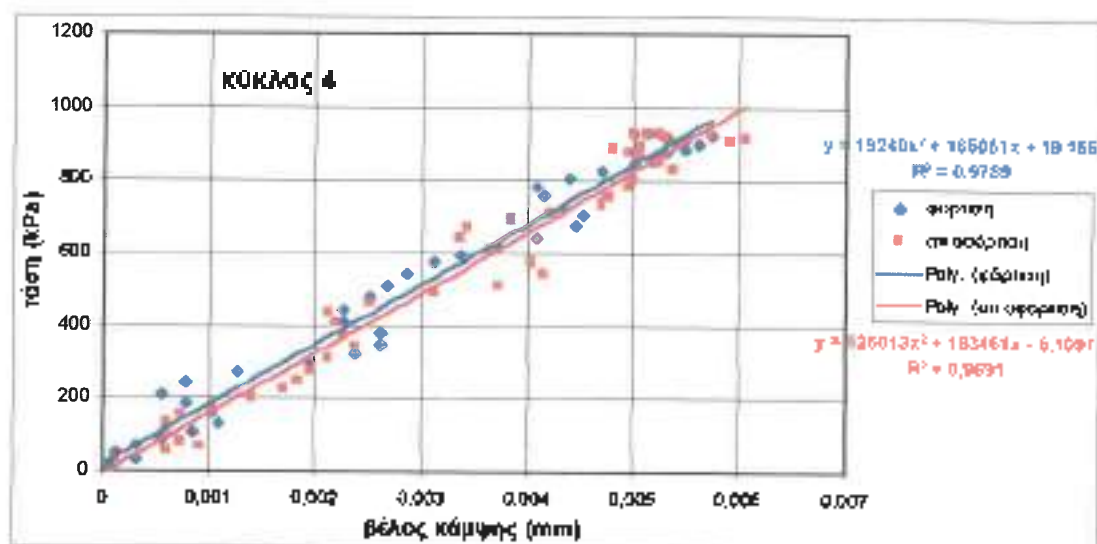
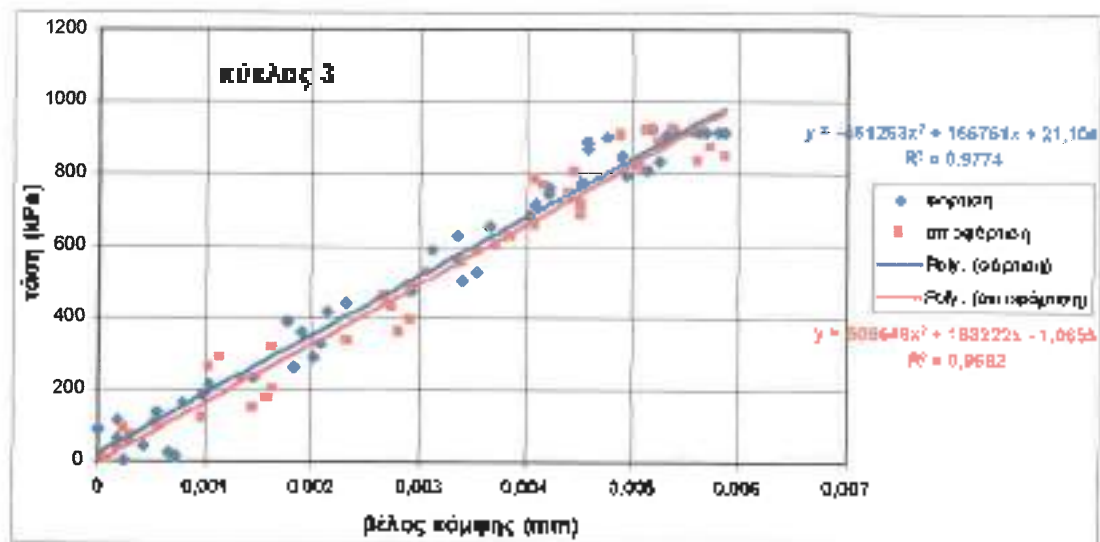
Σχήμα Α-53: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πλάγινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο i4 (γαλακτίομα 2% - τσιμέντο 3%)



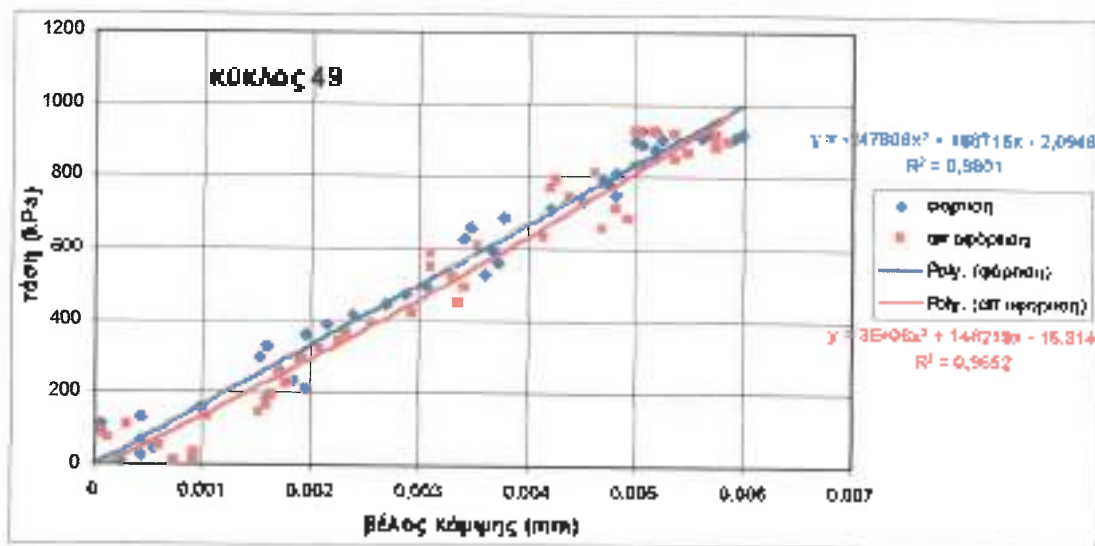
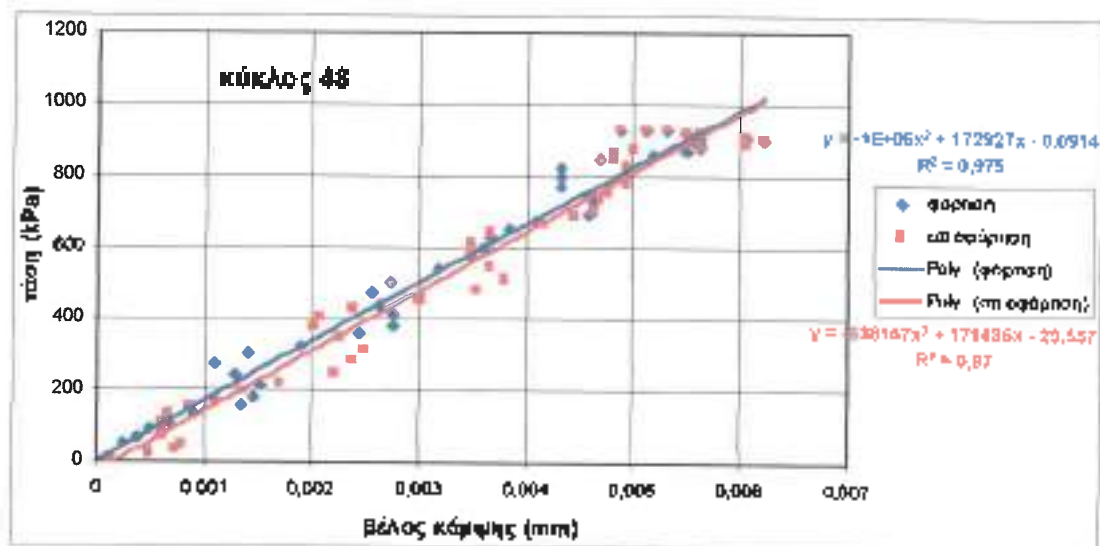
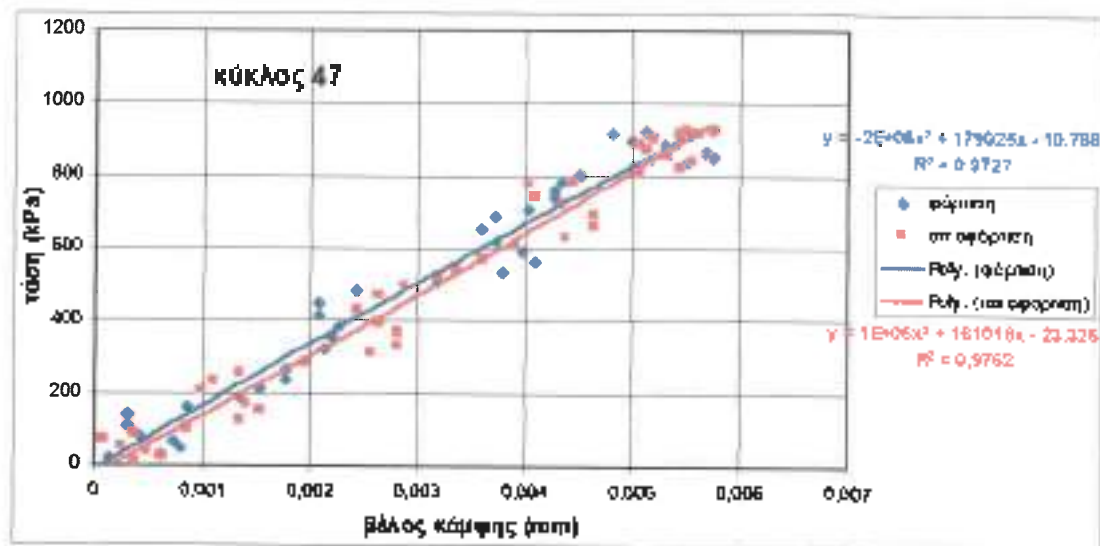
Σχήμα A-54: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλιν-δρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 14 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 3%)



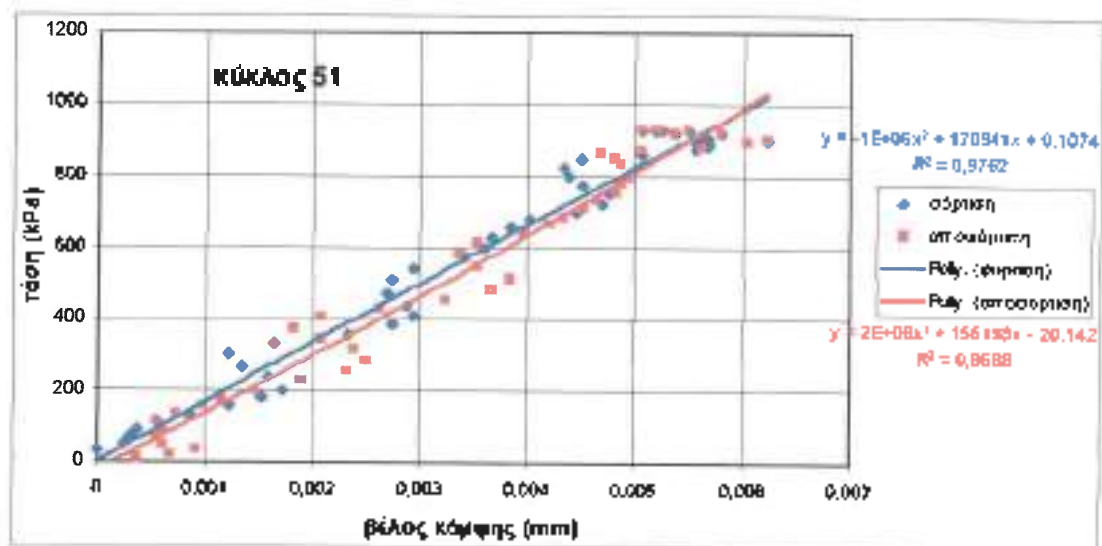
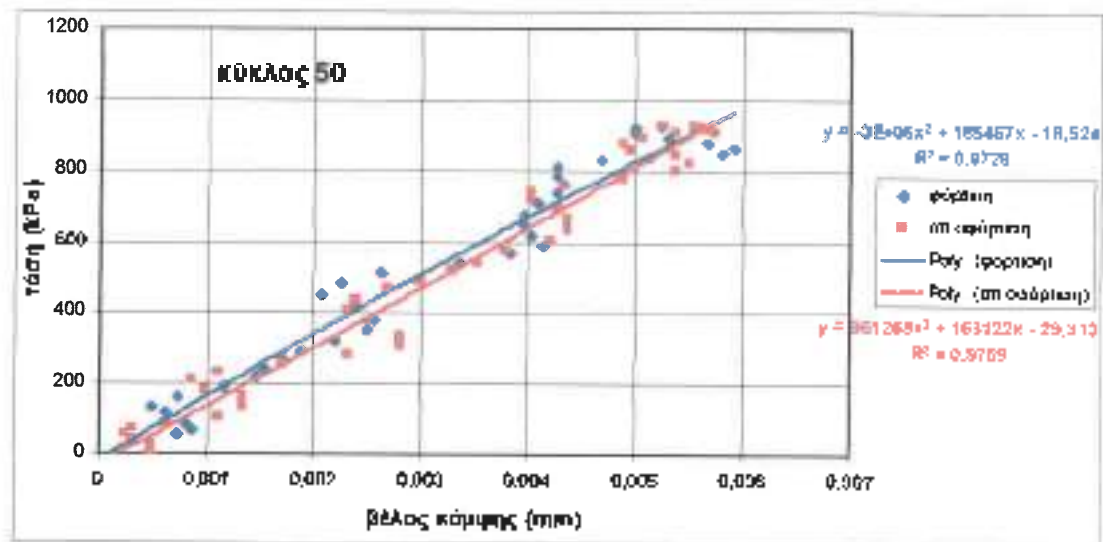
Σχήμα Δ-55: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 17 (γυαλοκίμα 3% - τσιμέντο 4%)



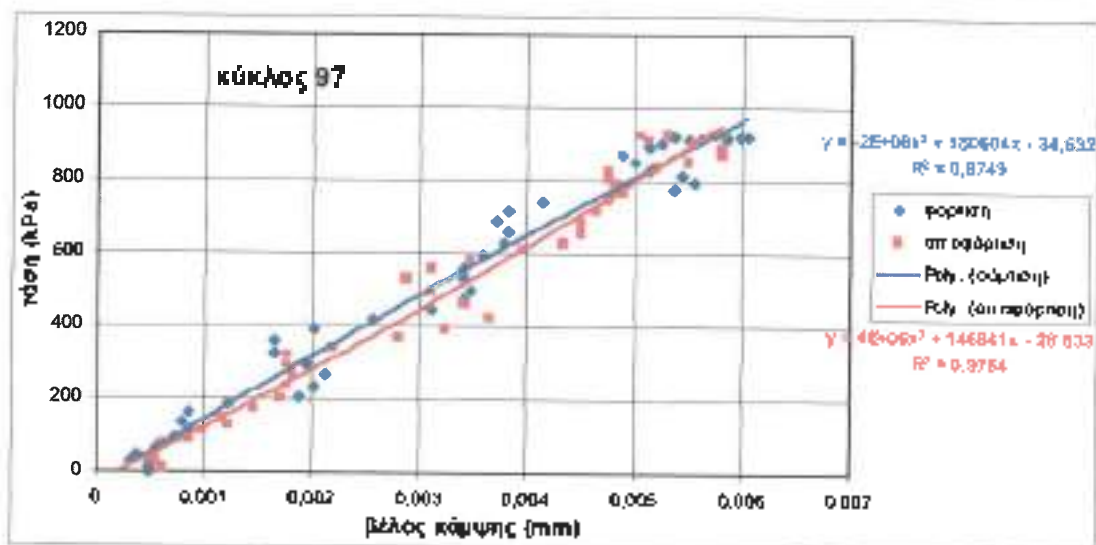
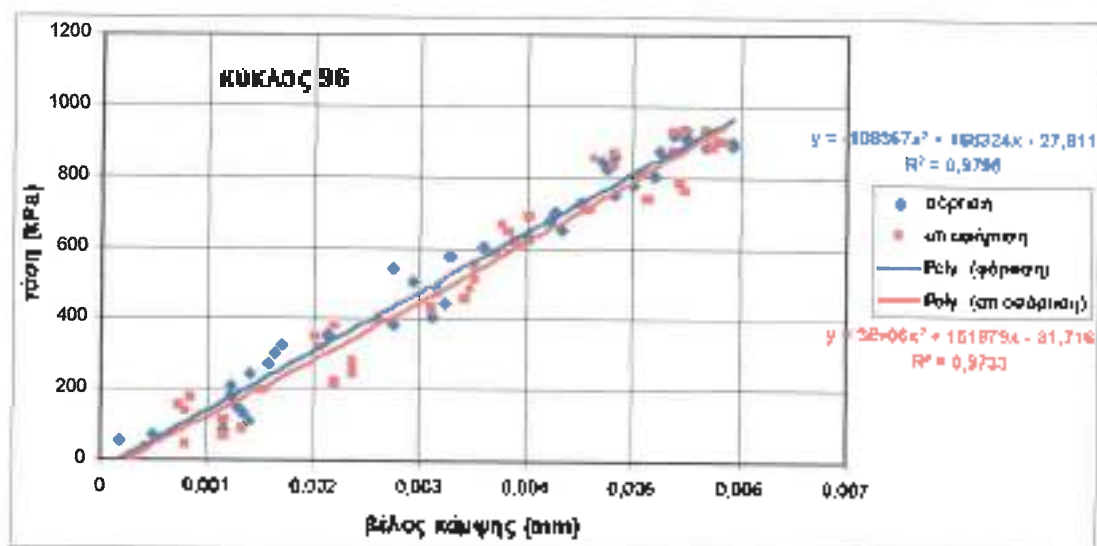
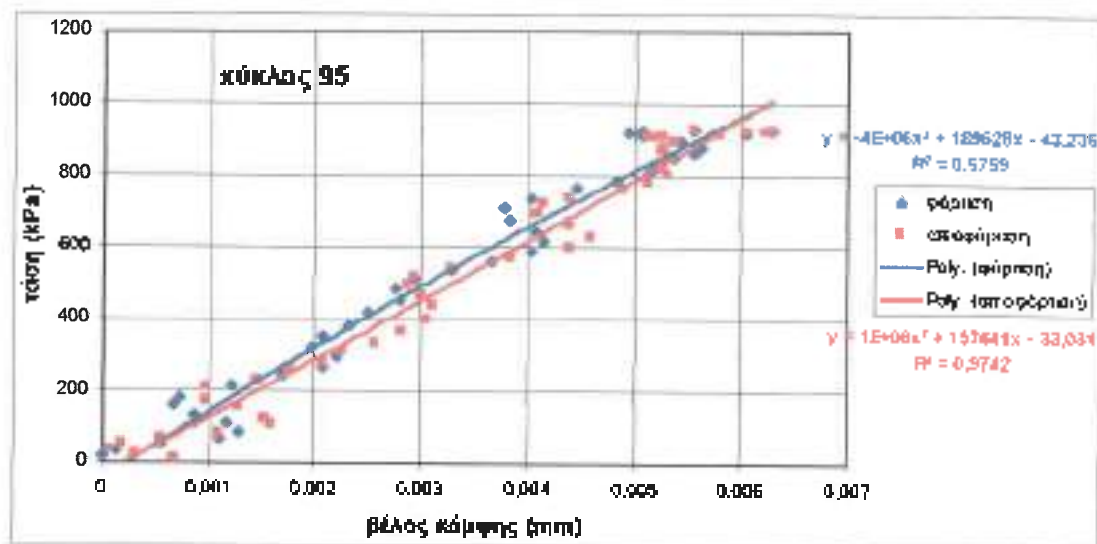
Σχήμα Α-56: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινεξήγησης), κύκλοι 3, 4 για το δοχείο Γ7 (γυάλινο 1% - τσιμέντο 4%)



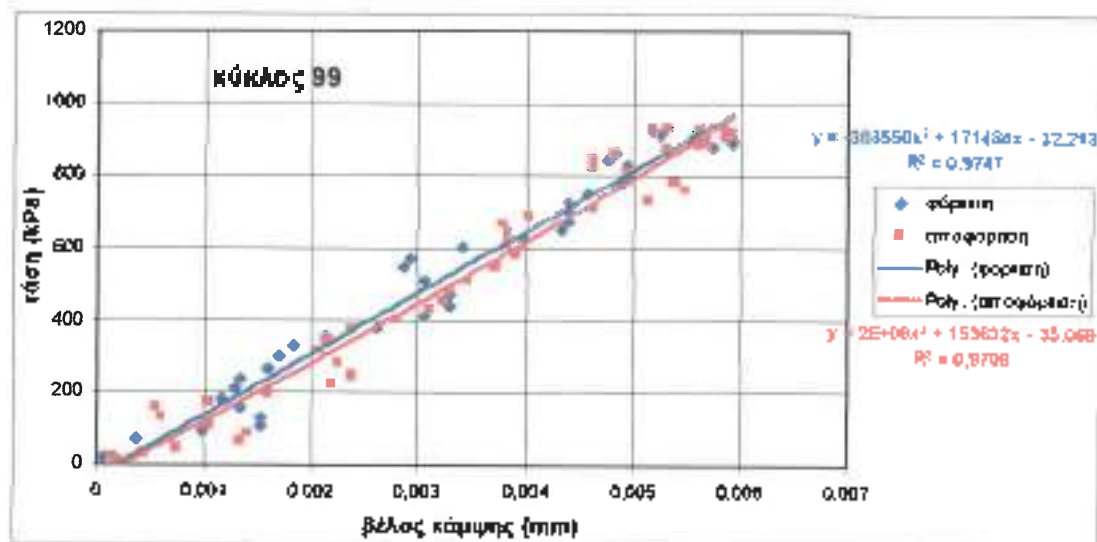
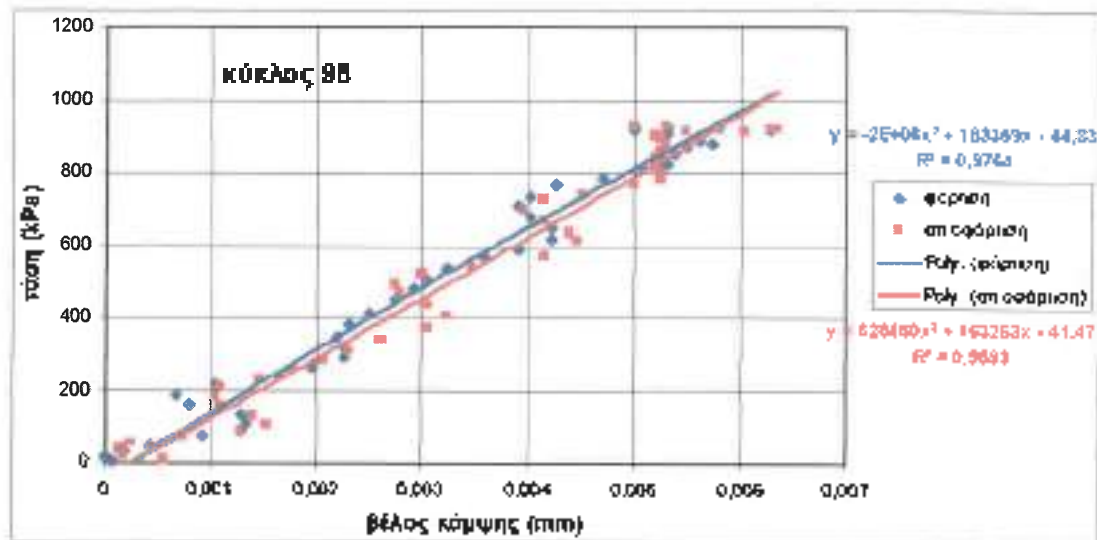
Σχήμα Α-57: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κυμπάλι, πωλινδρόμεσης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντου 1%)



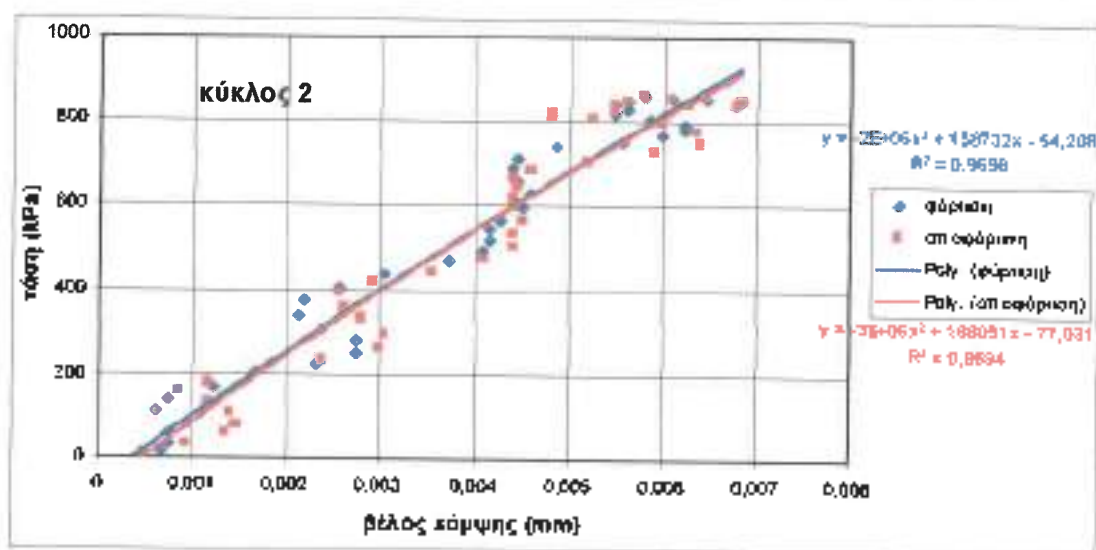
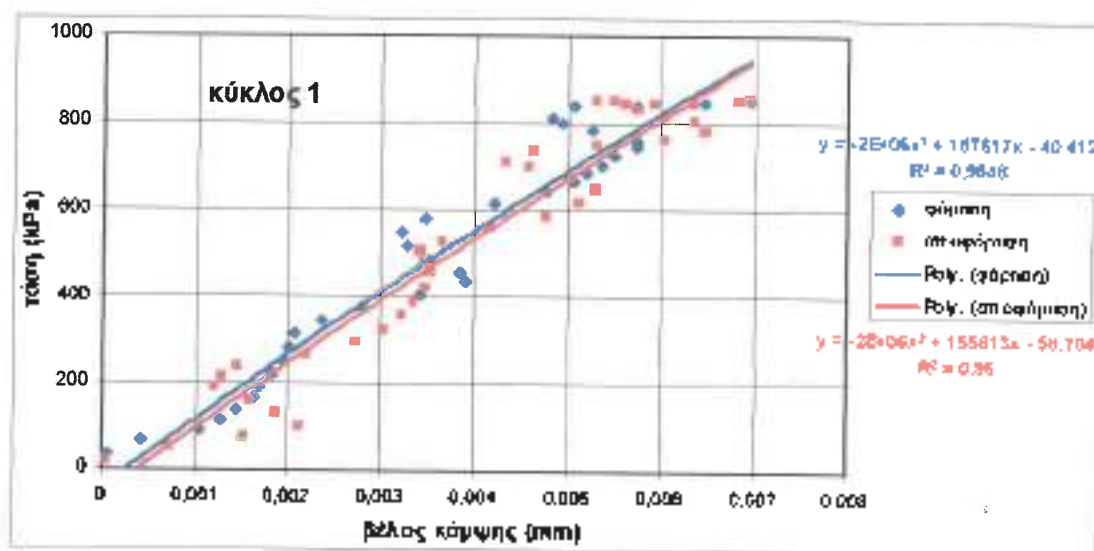
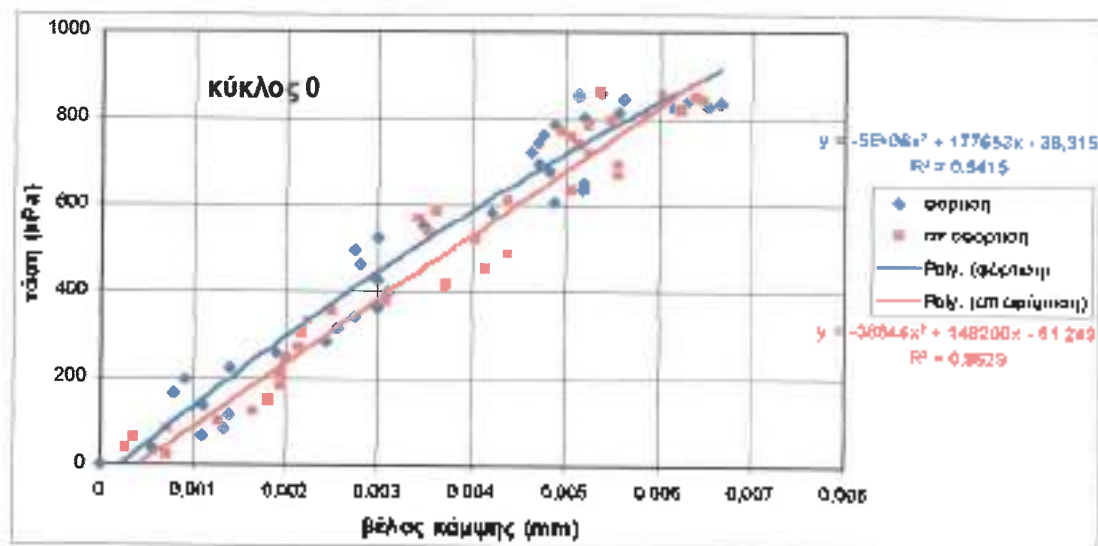
Σχήμα Δ-58: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και ισοφόρτιση (καμπύλες πολυωνομικής), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τσιμέντο 4%)



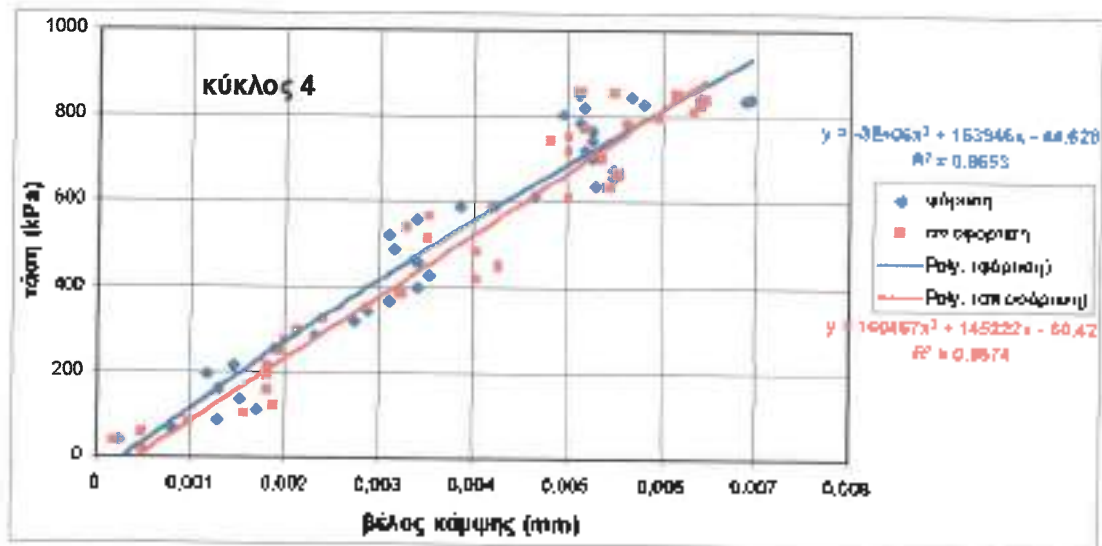
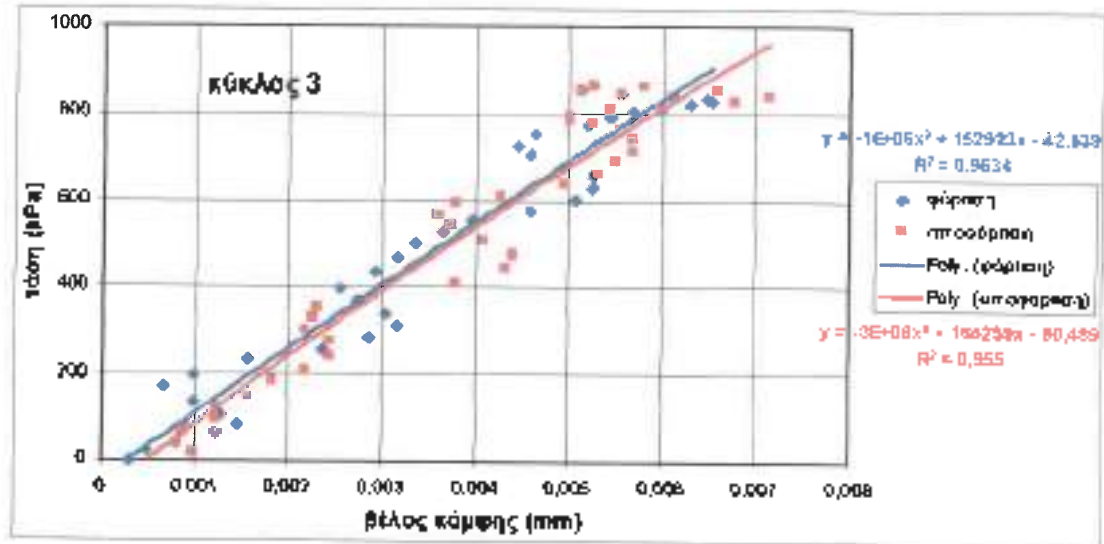
Σχήμα Δ-59: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες πλάγινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 17 (γαλακτωμα 1% + τσιμέντο 4%)



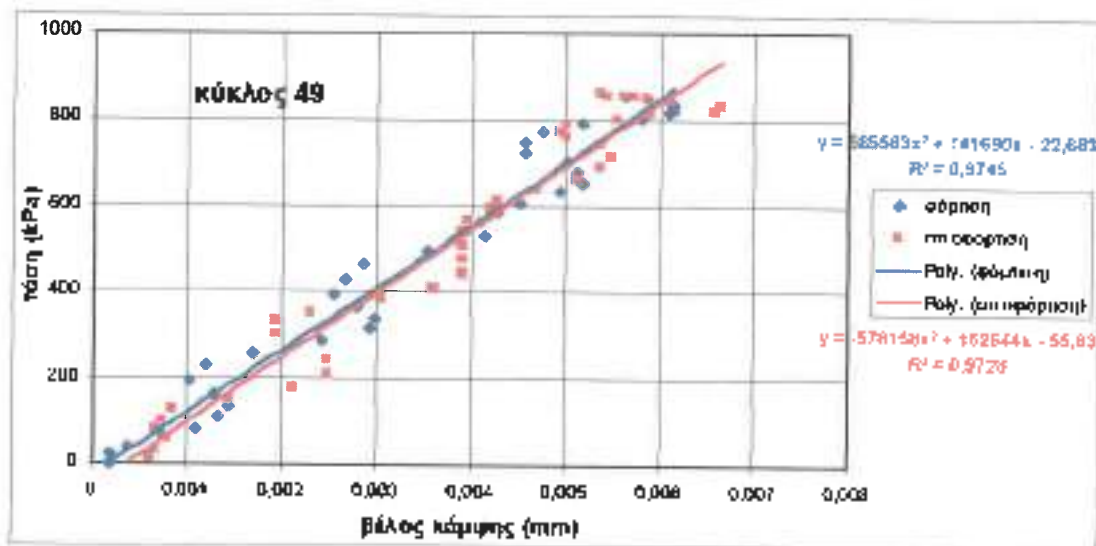
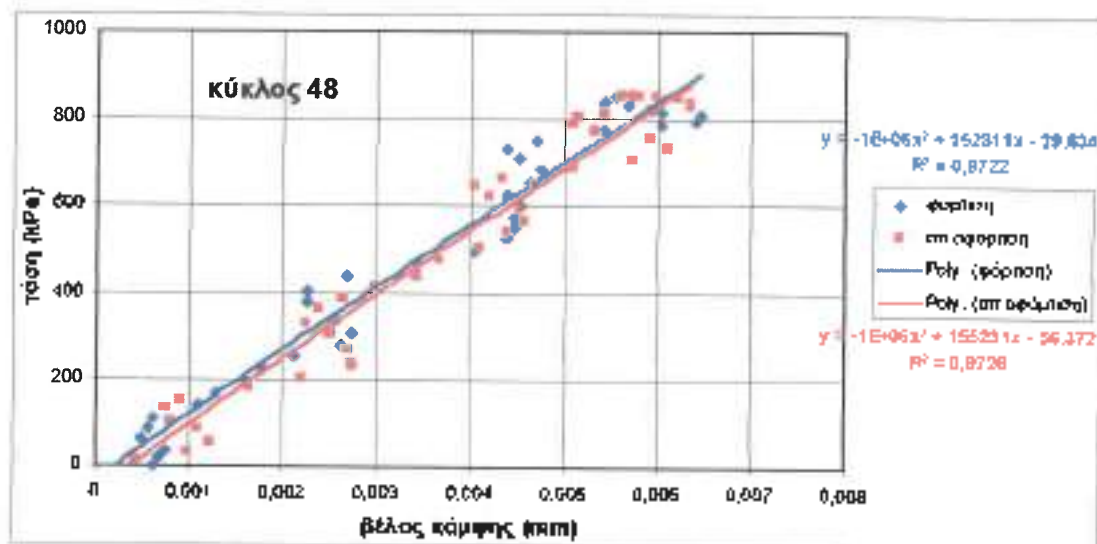
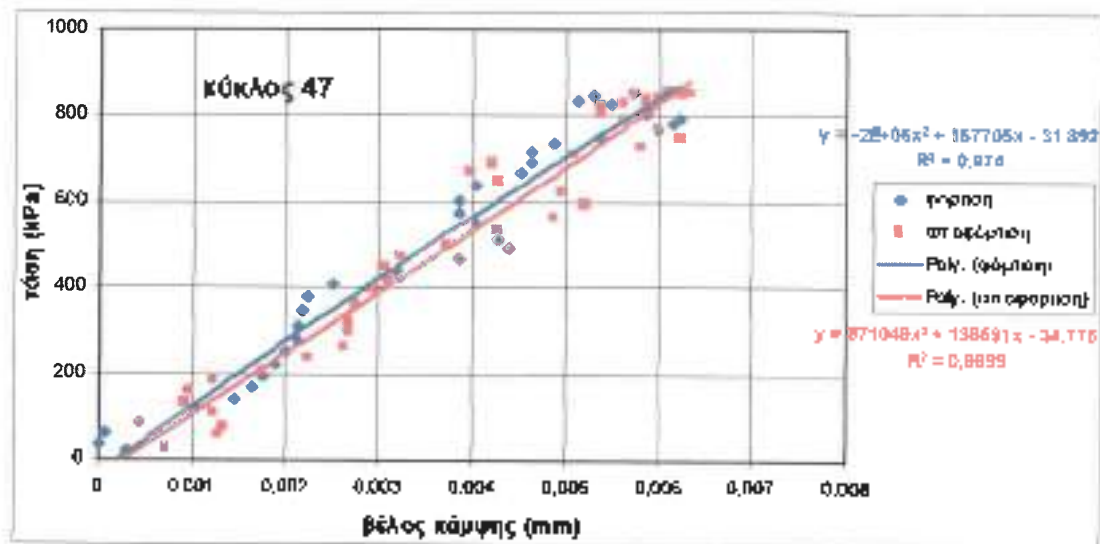
Σχήμα Α-60: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 17 (γαλάκτωμα 1% - τοιμέντο 4%)



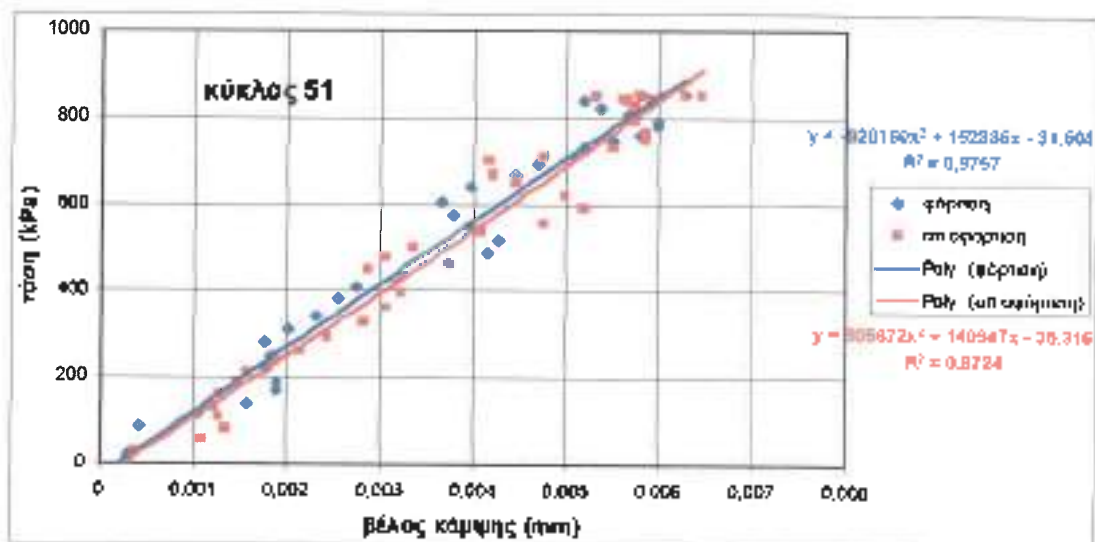
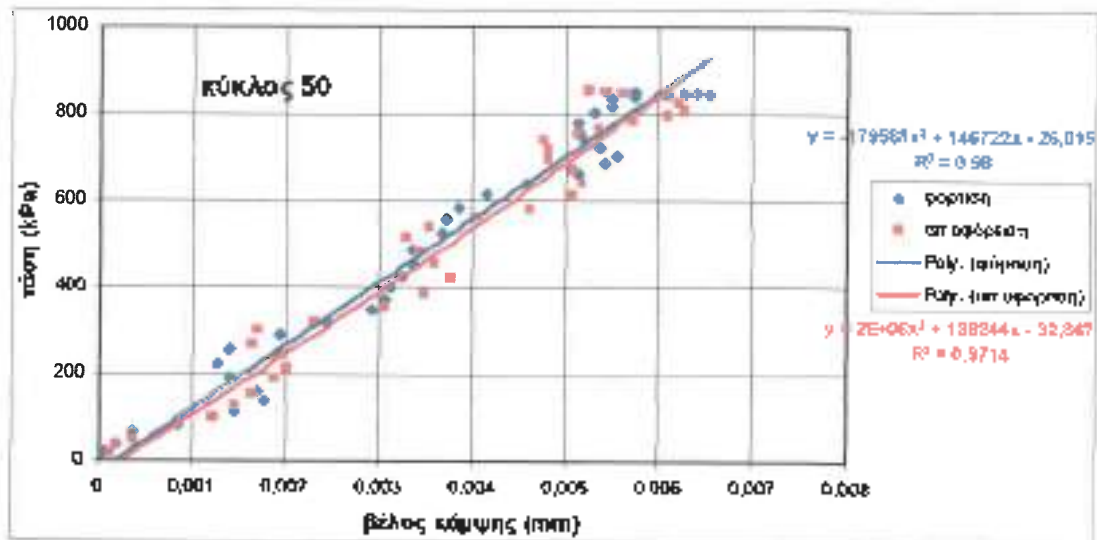
Σχήμα Α-61: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 18 (γυάλινο 1% + τσιμέντο 4%)



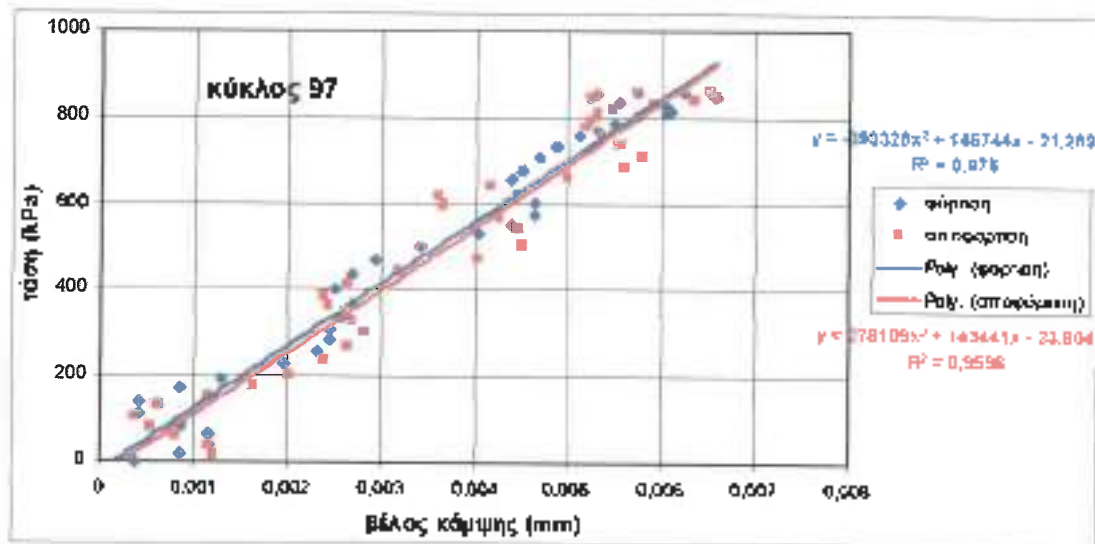
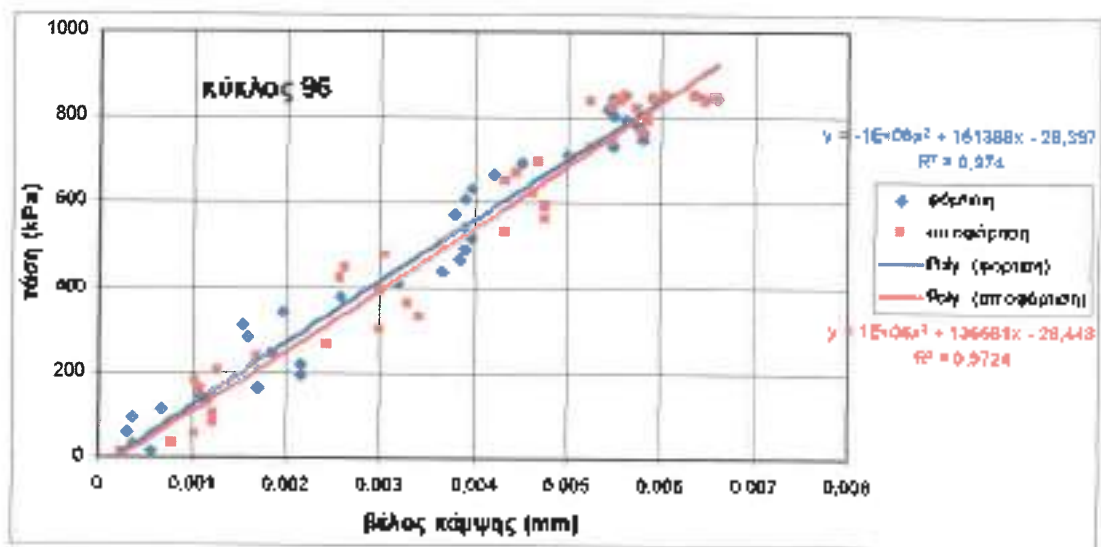
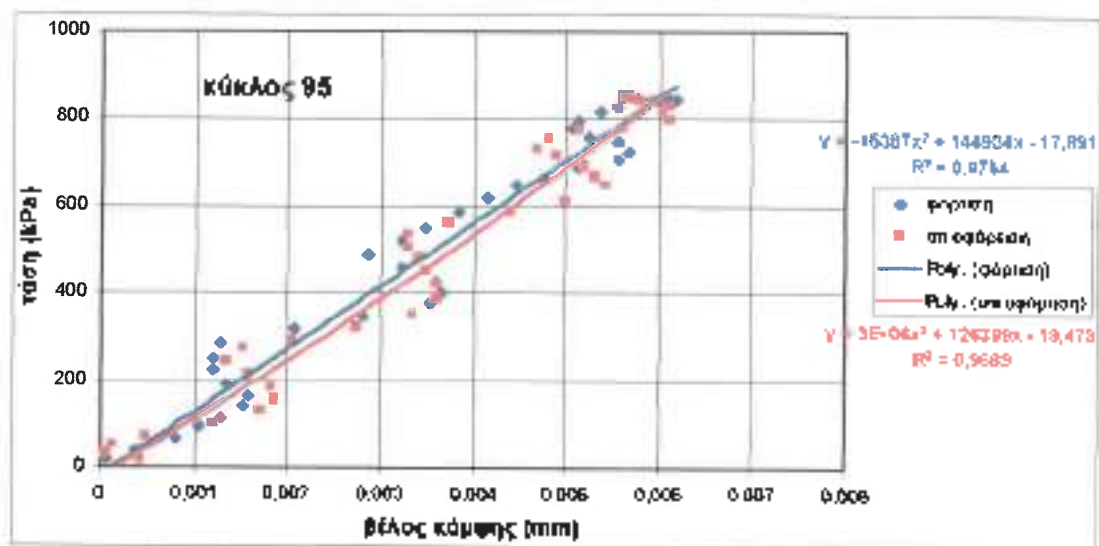
Σχήμα Α-62: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 18 (γαλάντωμα 1% - τσιμέντο 4%)



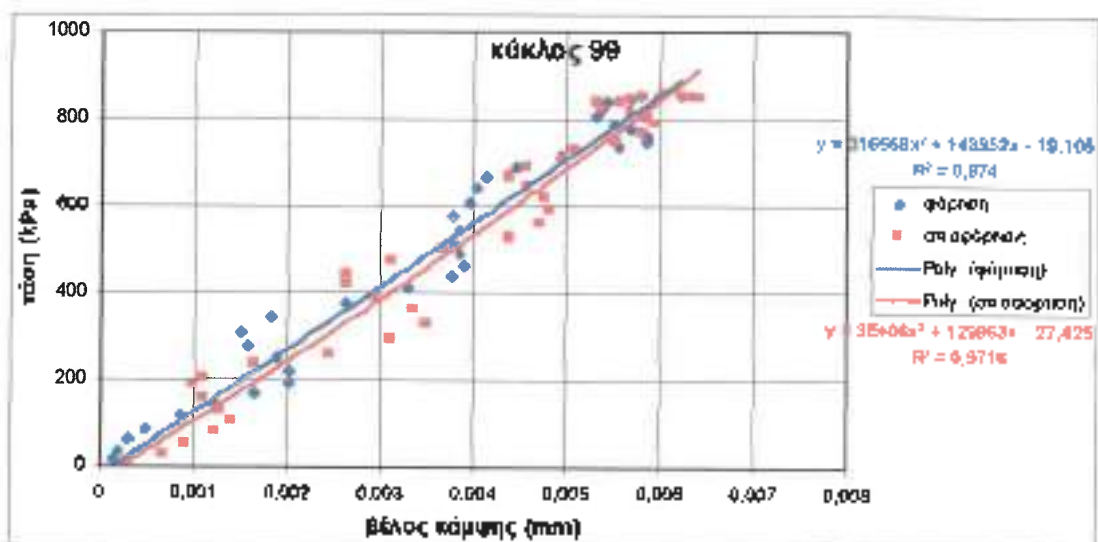
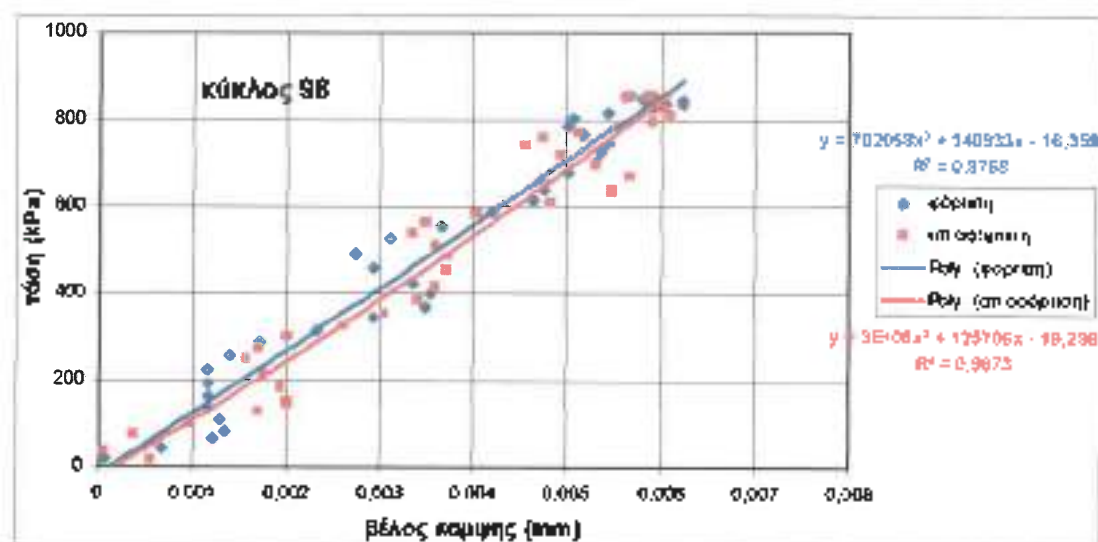
Σχήμα Δ-63: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 18 (γαλάκτεμα 1% - τοιμέντο 4%)



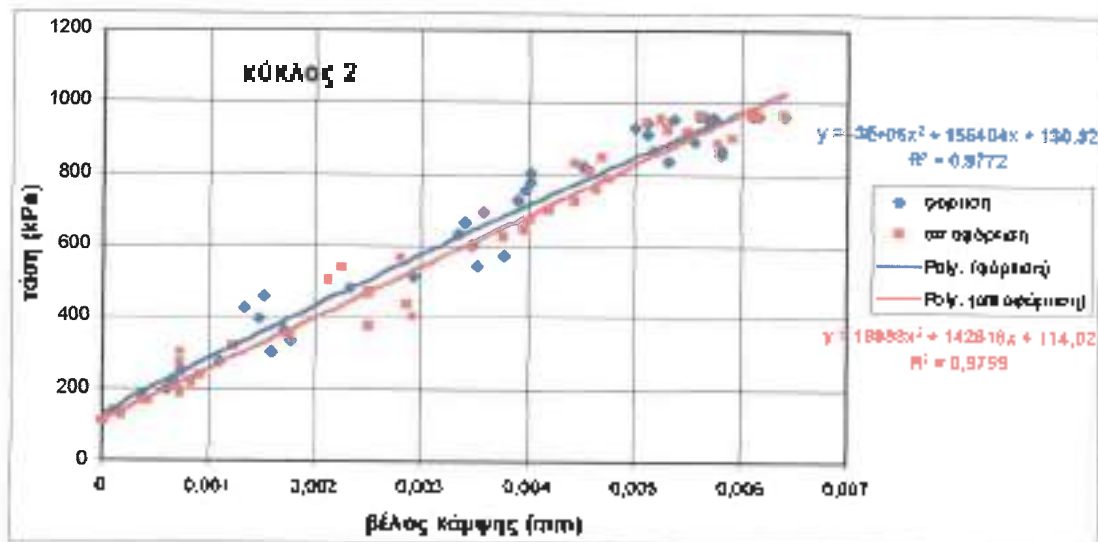
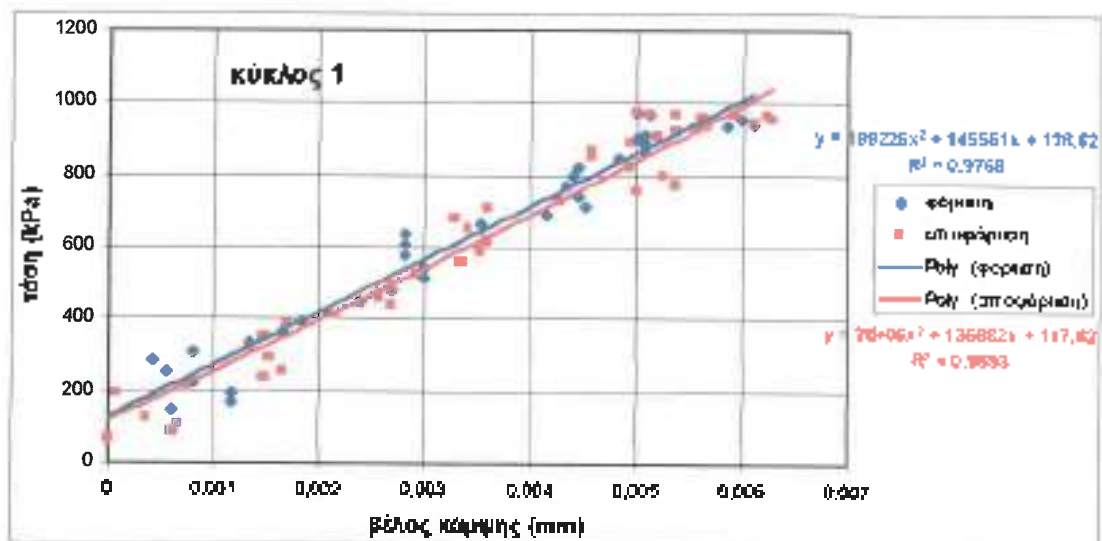
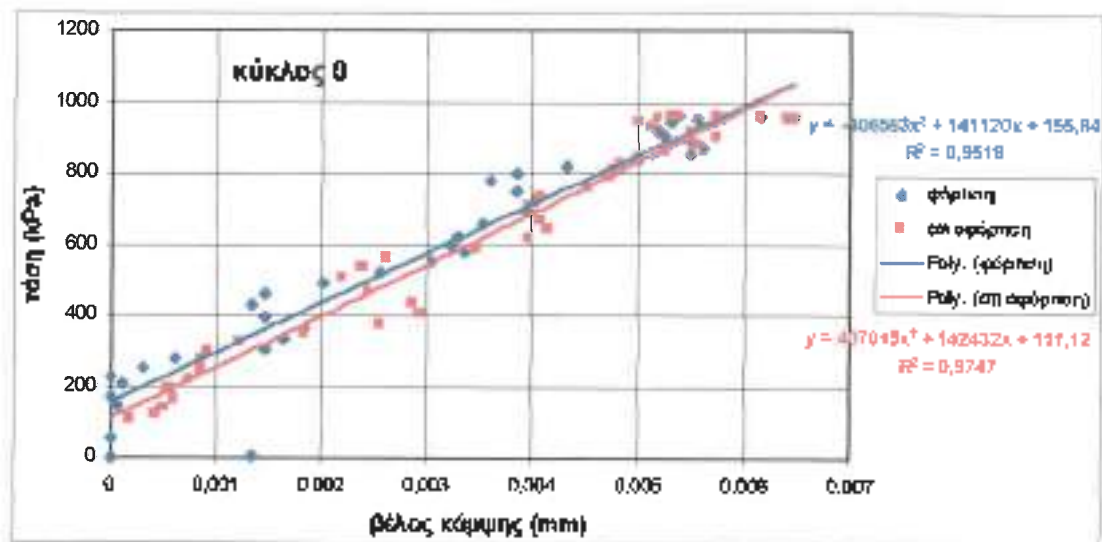
Σχήμα Δ-64: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (κινητὸς πάλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 18 (γαλάκτωμα 1% - εσιμέντο 4%)



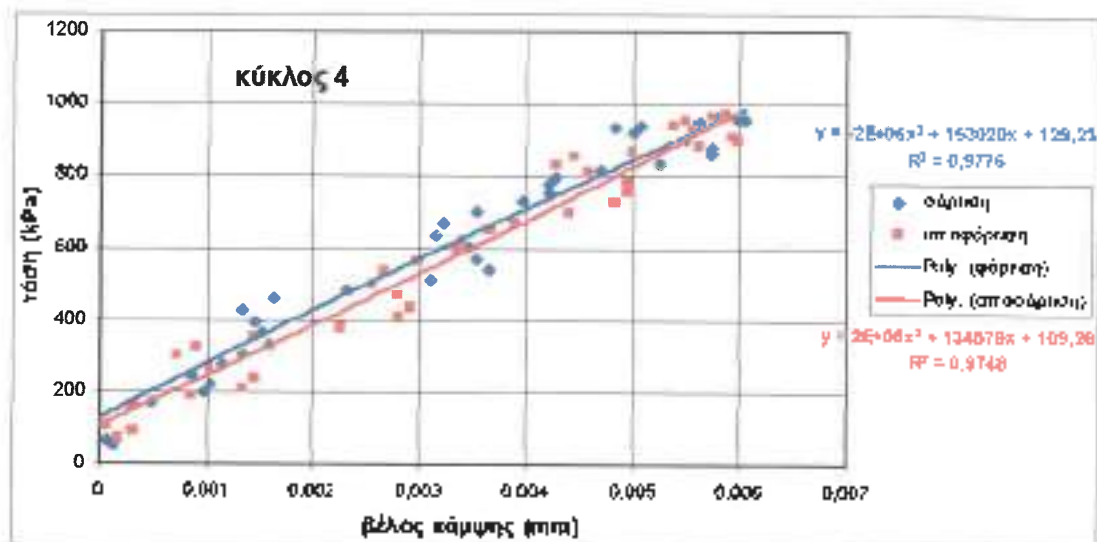
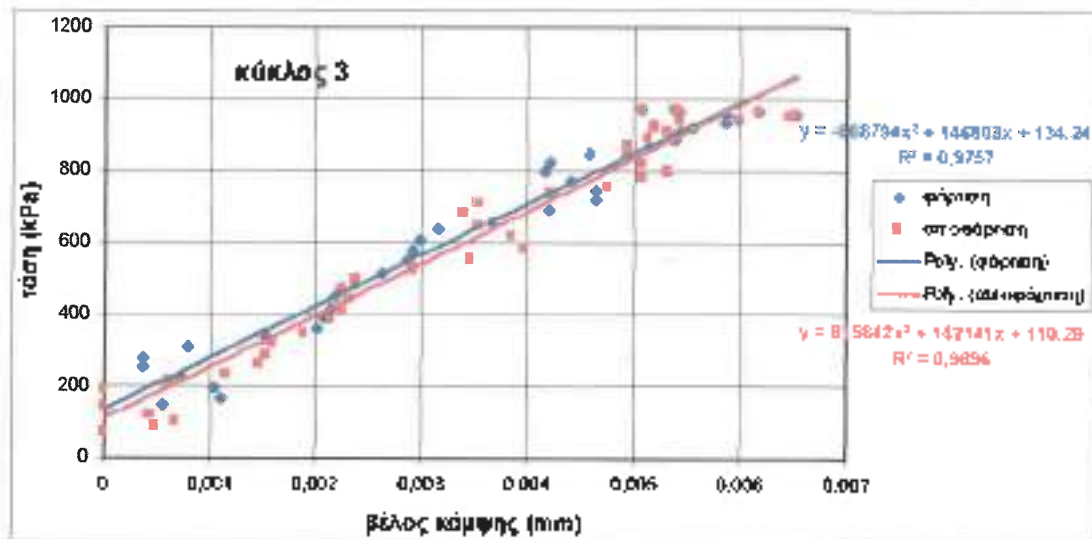
Σχήμα Δ-65: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 18 (γαλακτώμα 1% - τσιμέντο 4%).



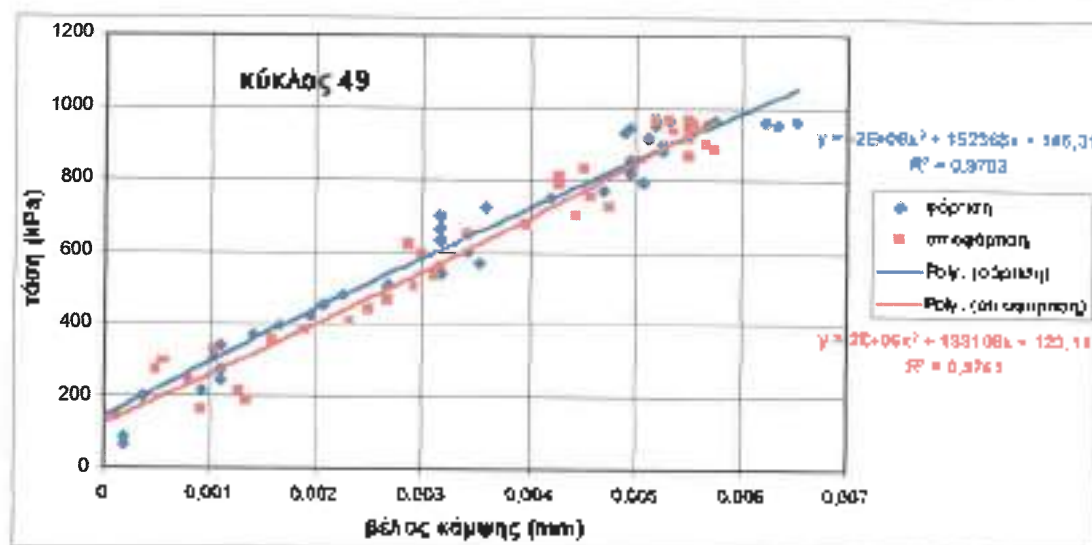
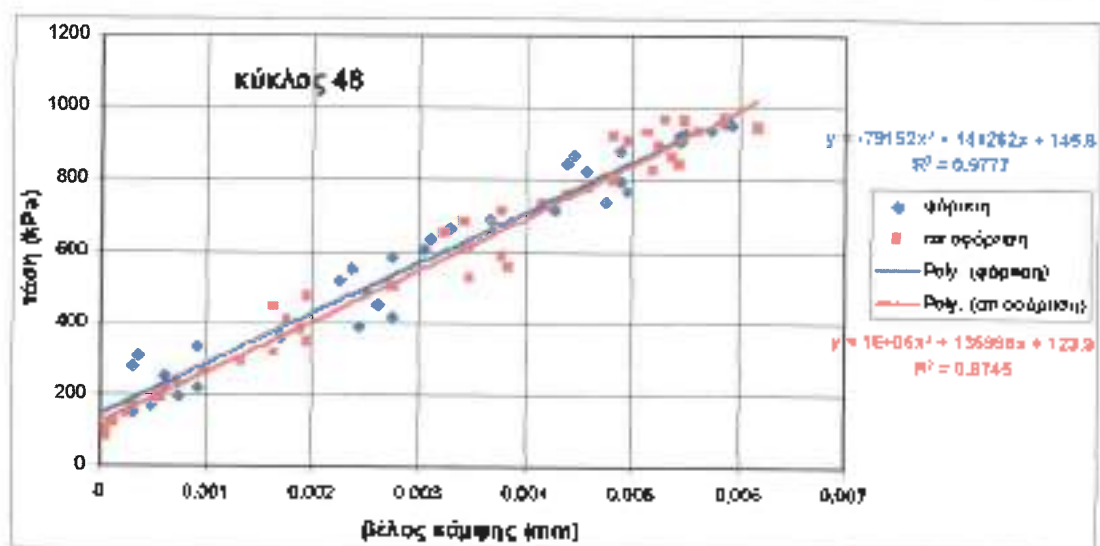
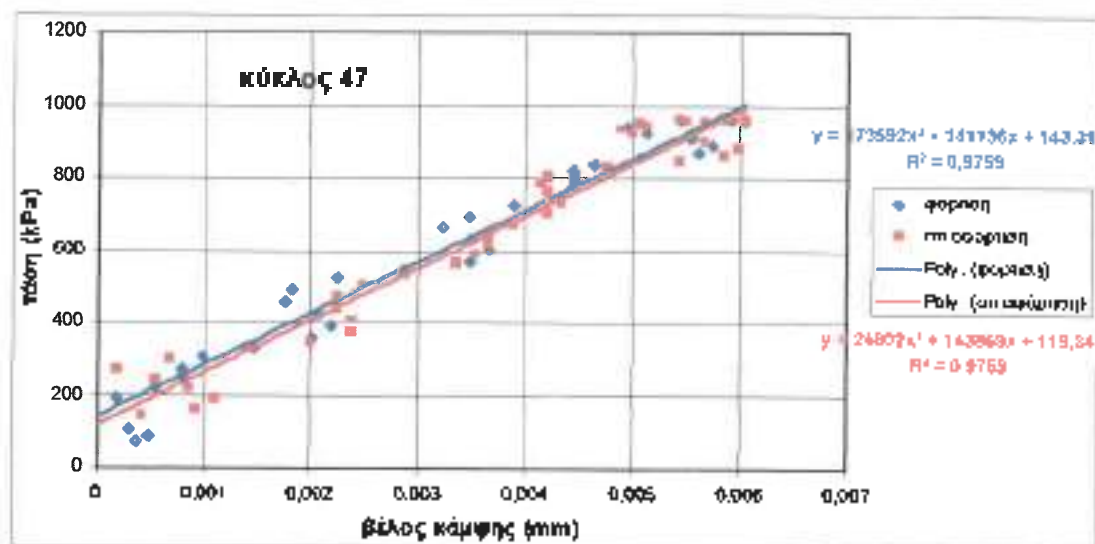
Σχήμα Δ-66: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρομησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 18 (μελάστεμα 1% - τσιμέντο 4%)



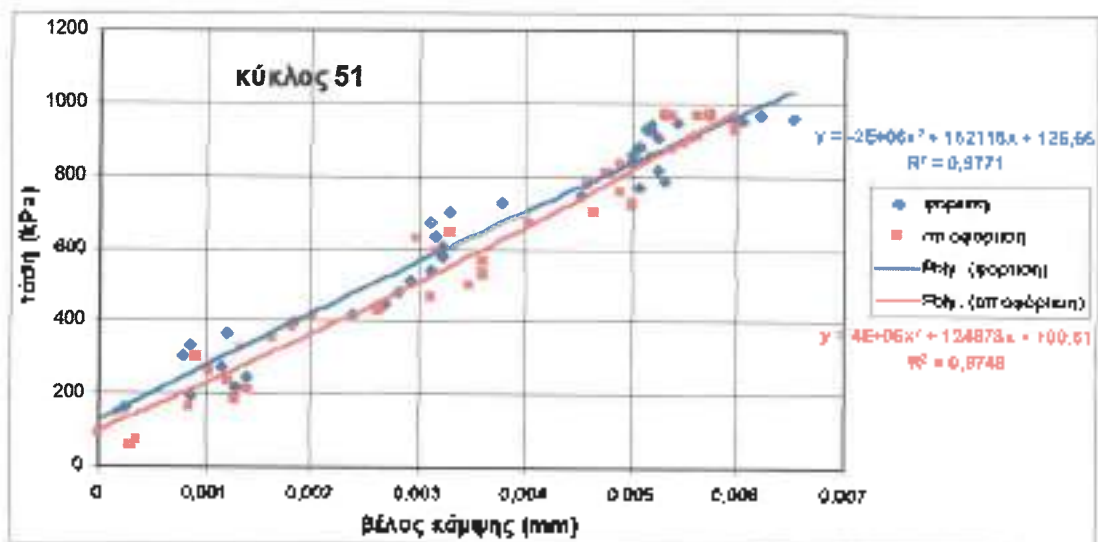
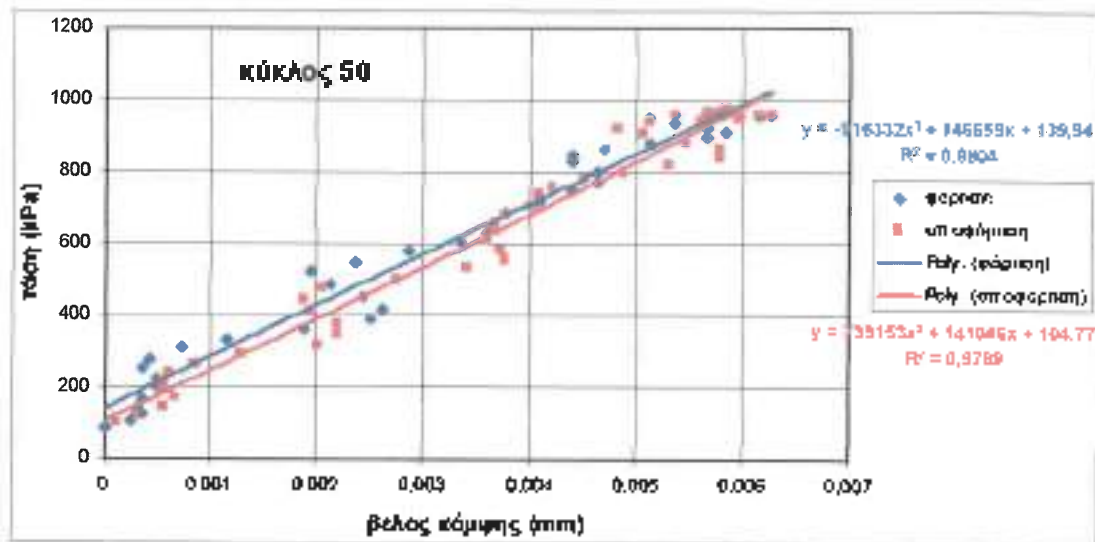
Σχήμα Α-67: Τάση - βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% + τσιμέντο 4%)



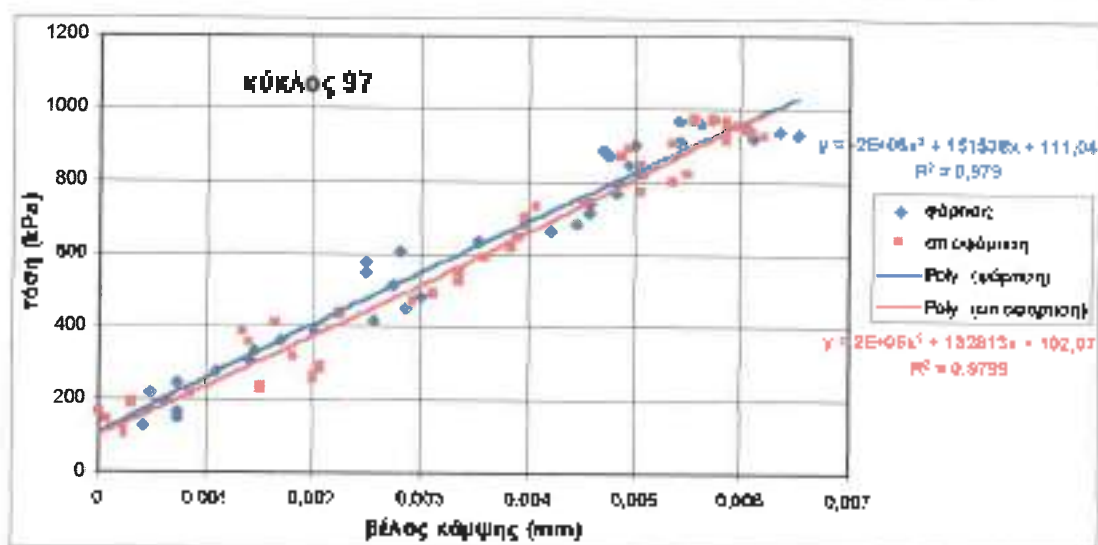
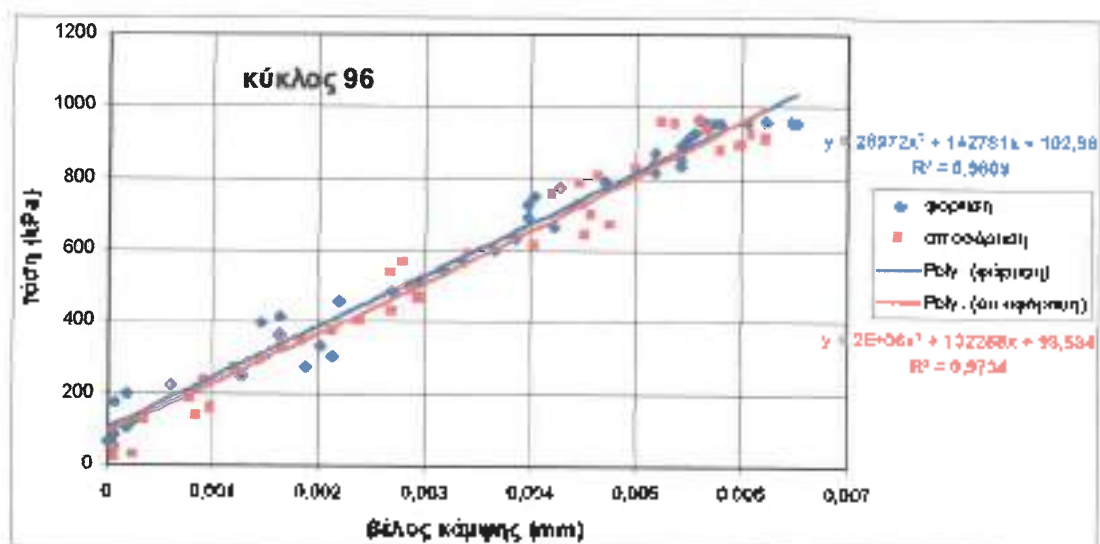
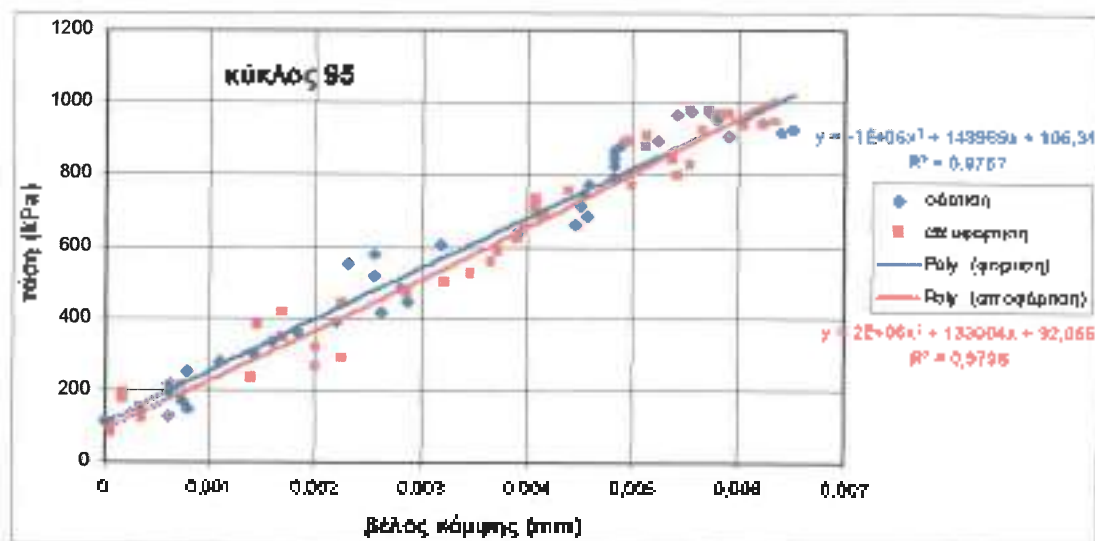
Σχήμα Δ-68: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πολλυδρόμησης), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 20 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 4%)



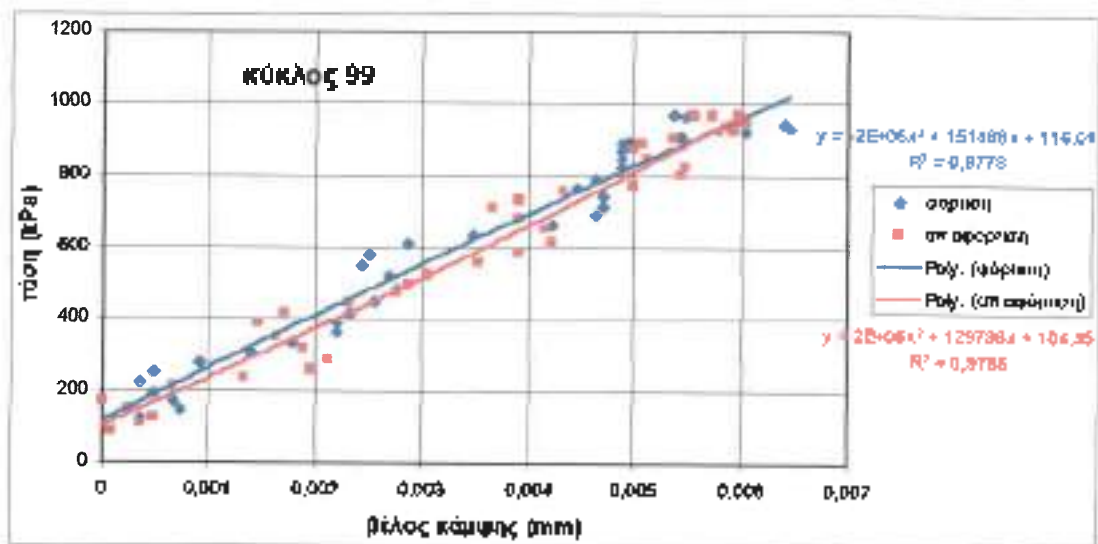
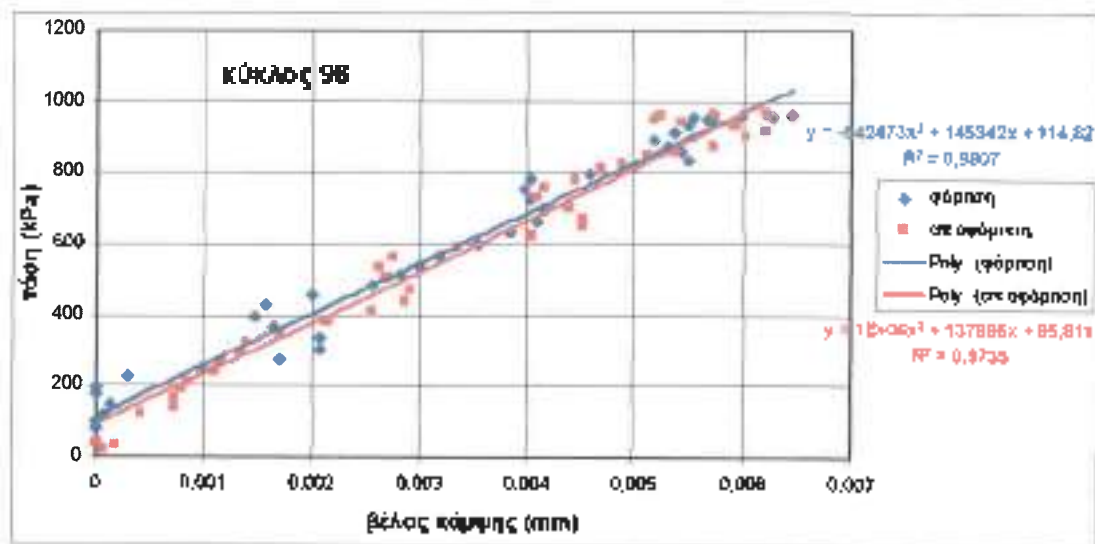
Σχήμα Δ-69: Τάση — βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (κυκλούς παλινδρόμησης), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - ταπνέντο 4%)



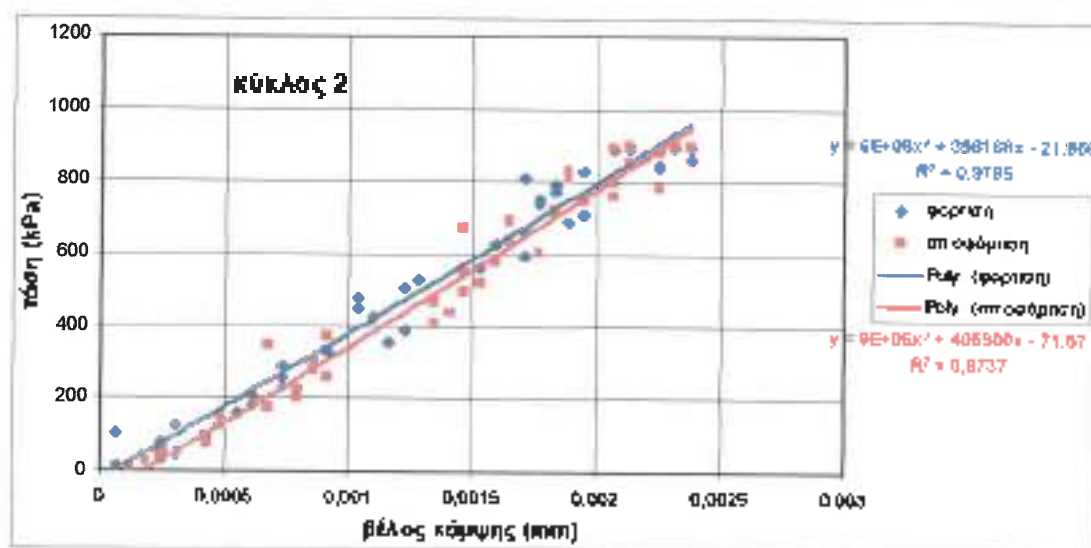
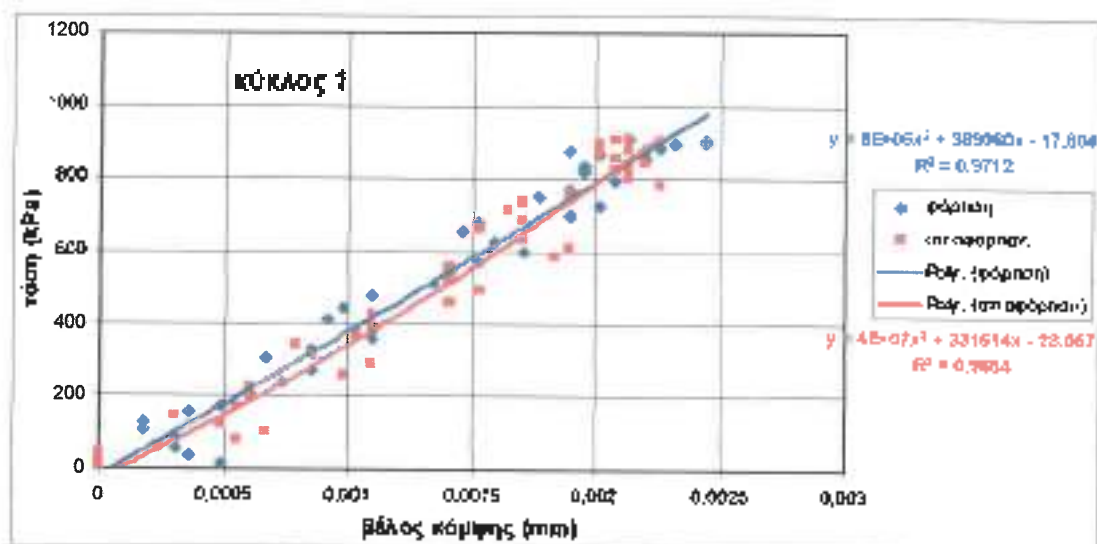
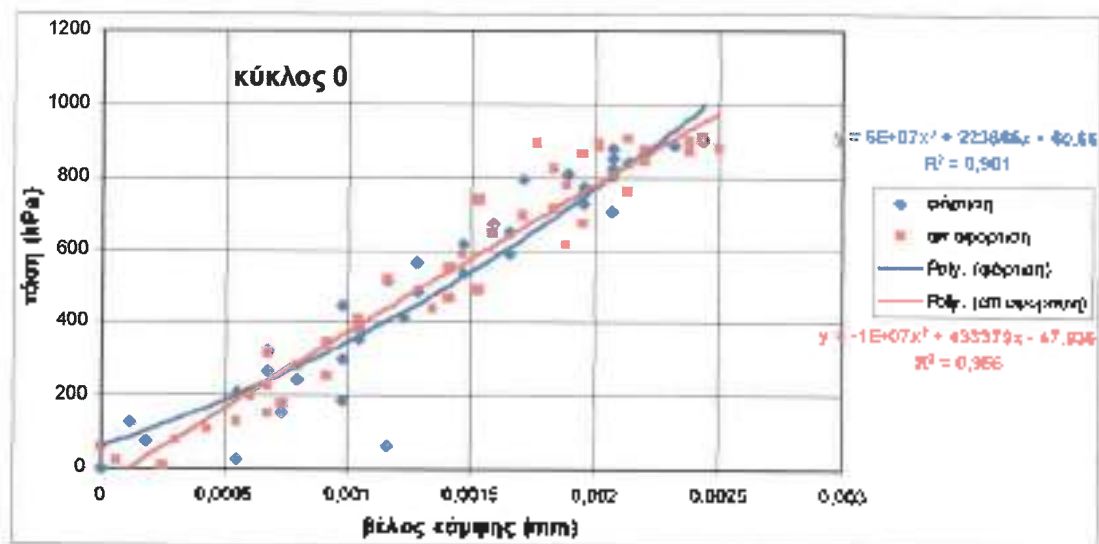
Σχήμα Δ-70: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - πεπιγμένο 4%)



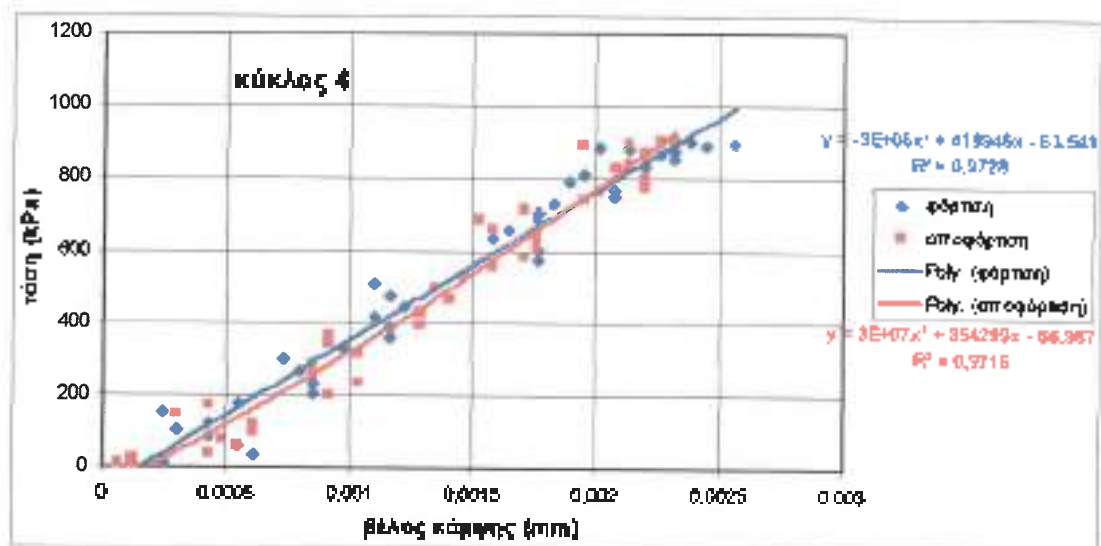
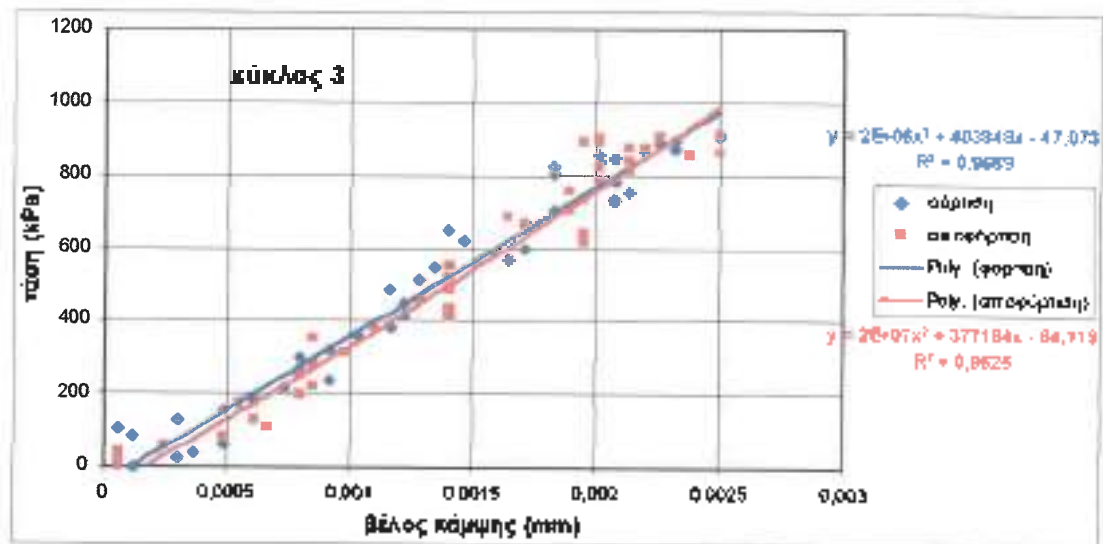
Σχήμα Δ-71: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης). κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 3% - τιμνέντο 4%)



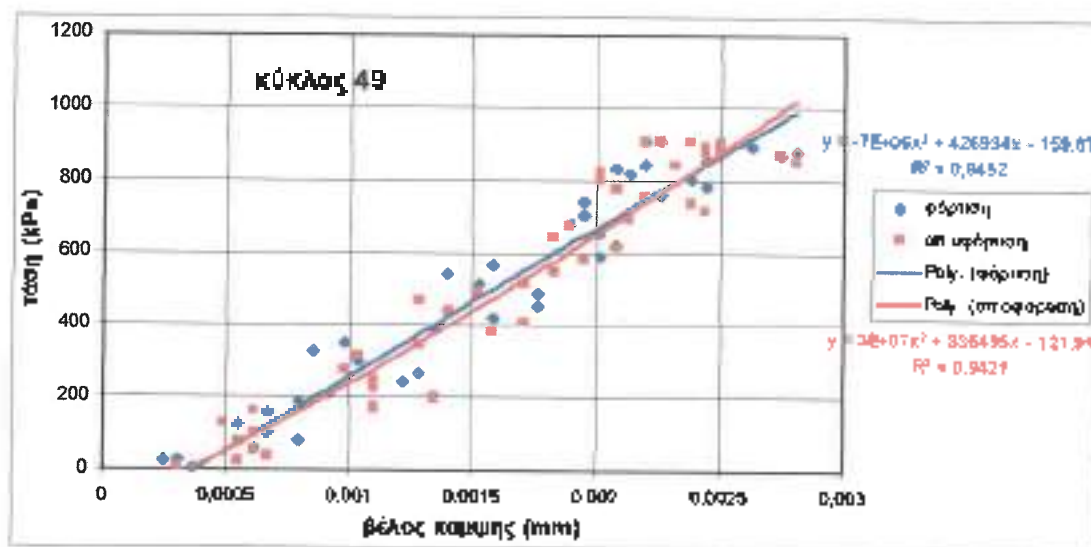
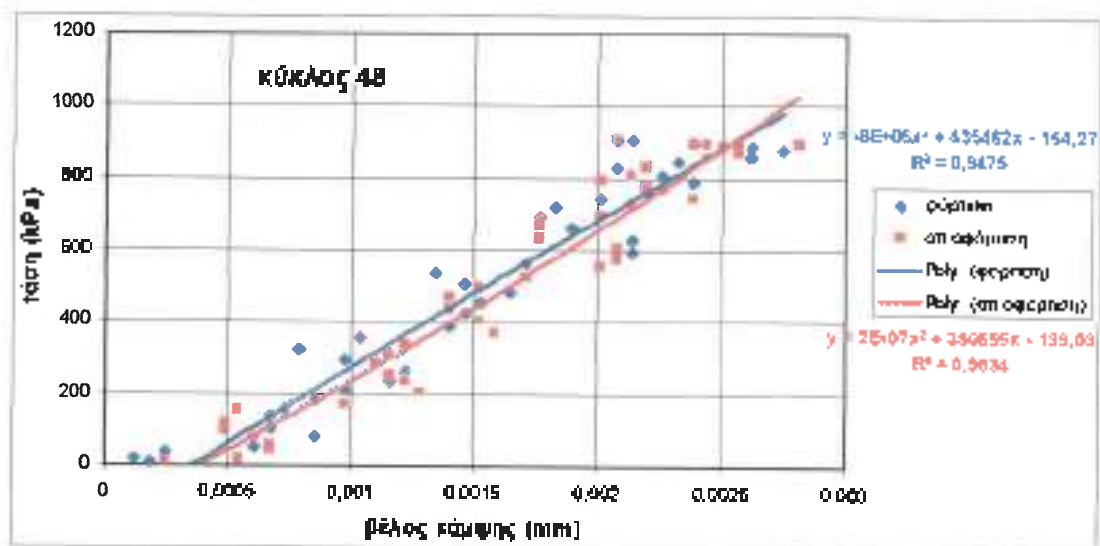
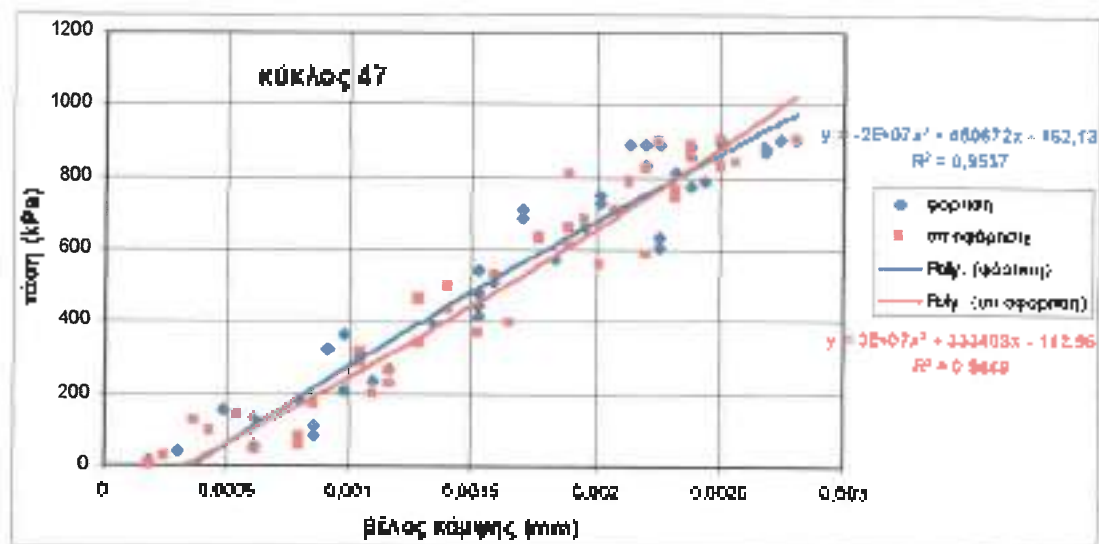
Σχήμα Δ-72: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πολλυνοδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 20 (γαλάκτωμα 2% - τσιμεντο 4%)



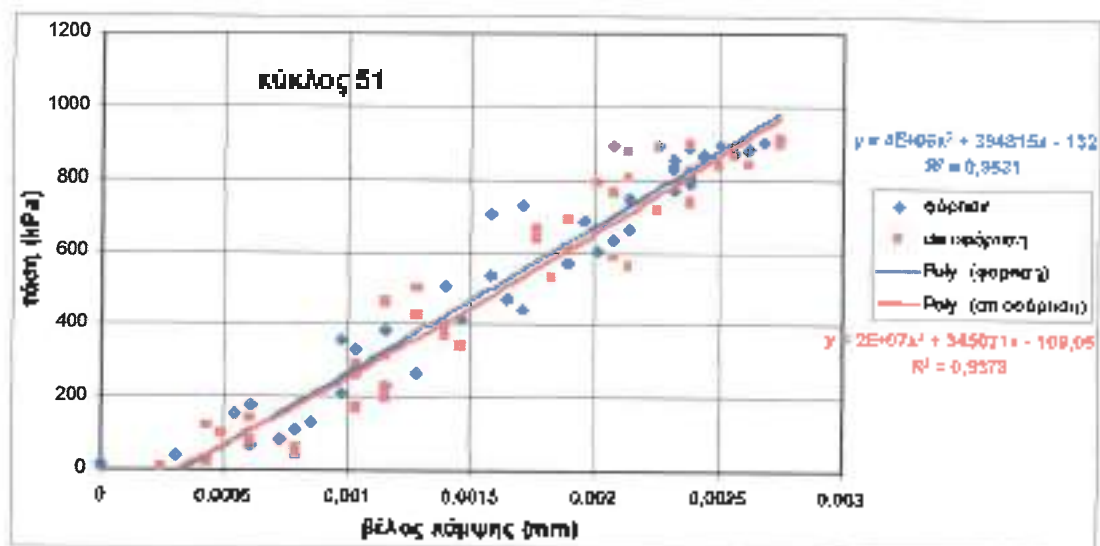
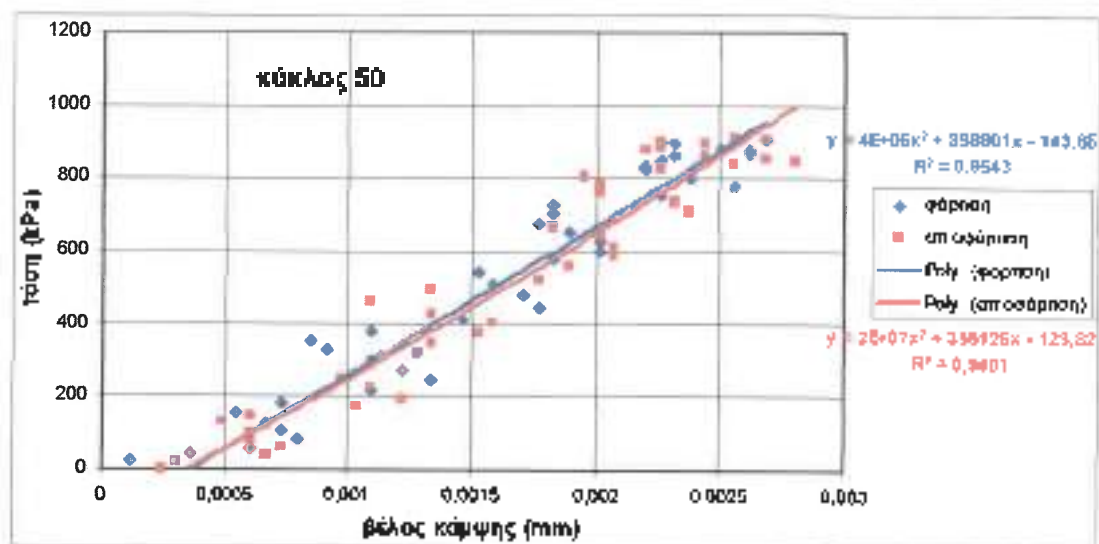
Σχήμα Α-73: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 0, 1, 2 για το δοκίμιο 2I (γεφυκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



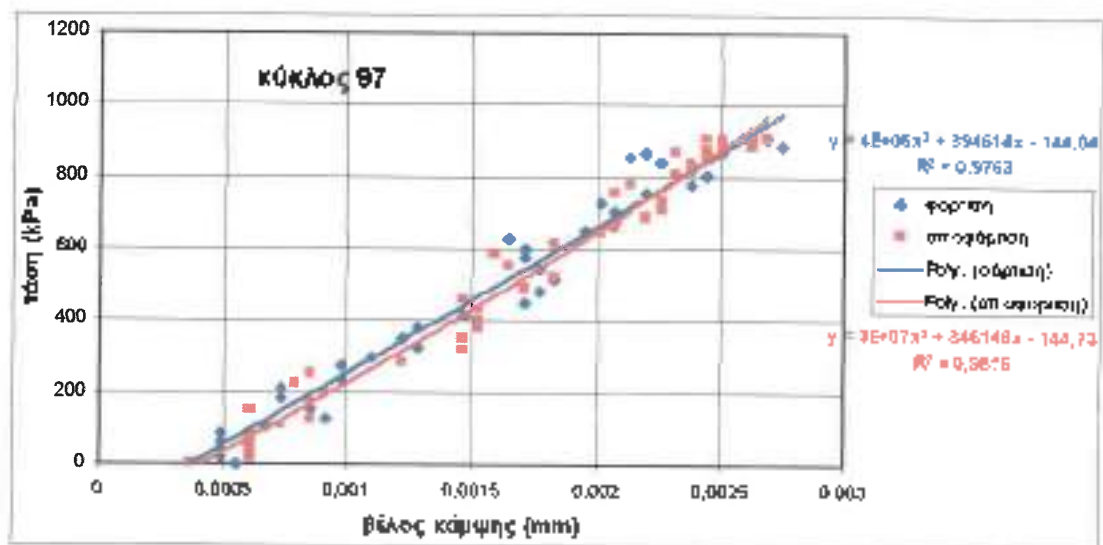
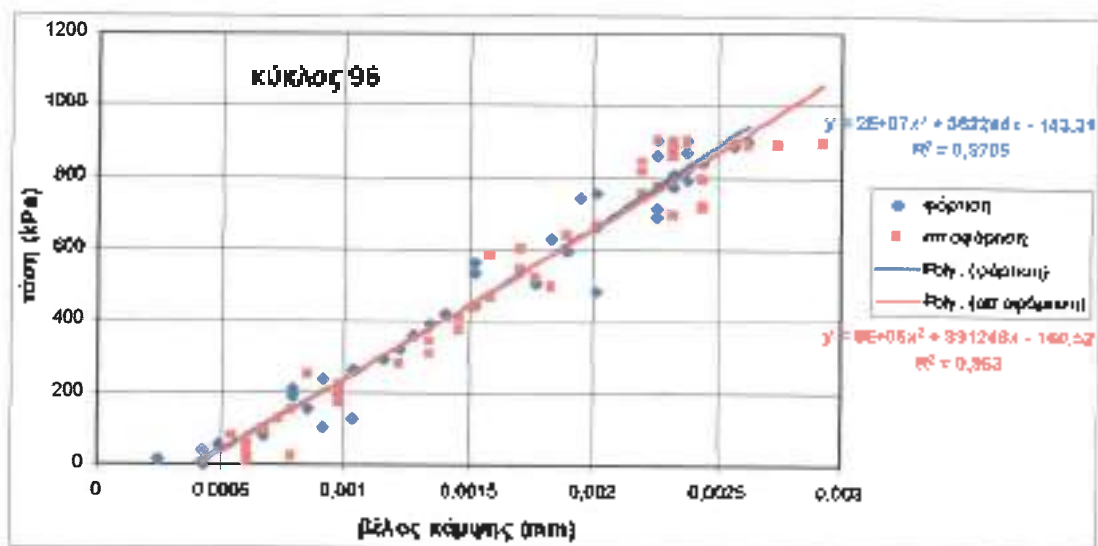
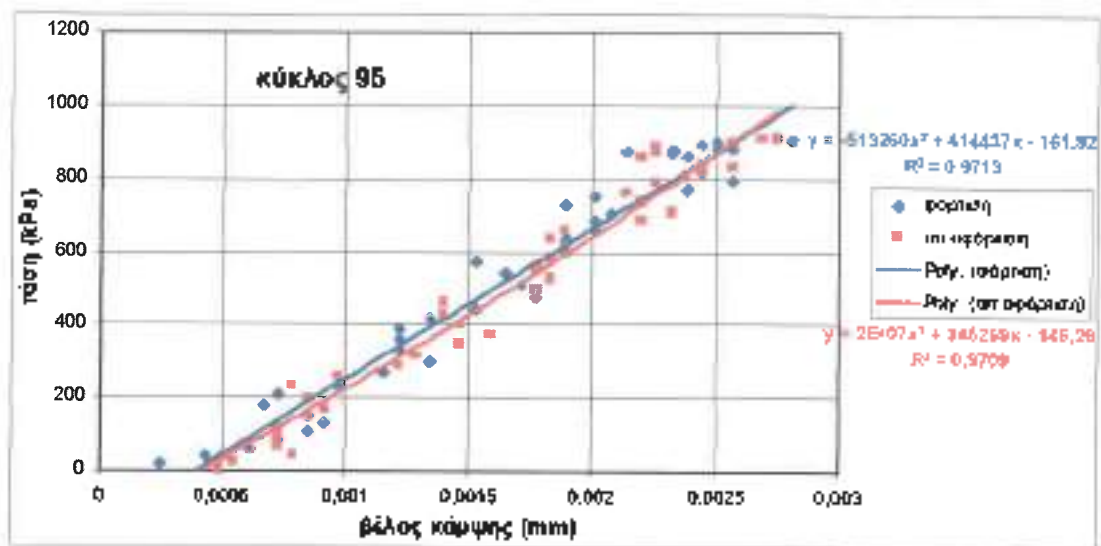
Σχήμα Δ-74: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες πηλινδρομότητας), κύκλοι 3, 4 για το δοκίμιο 21 (γυάλινο 2% - τσιμέντο 4%)



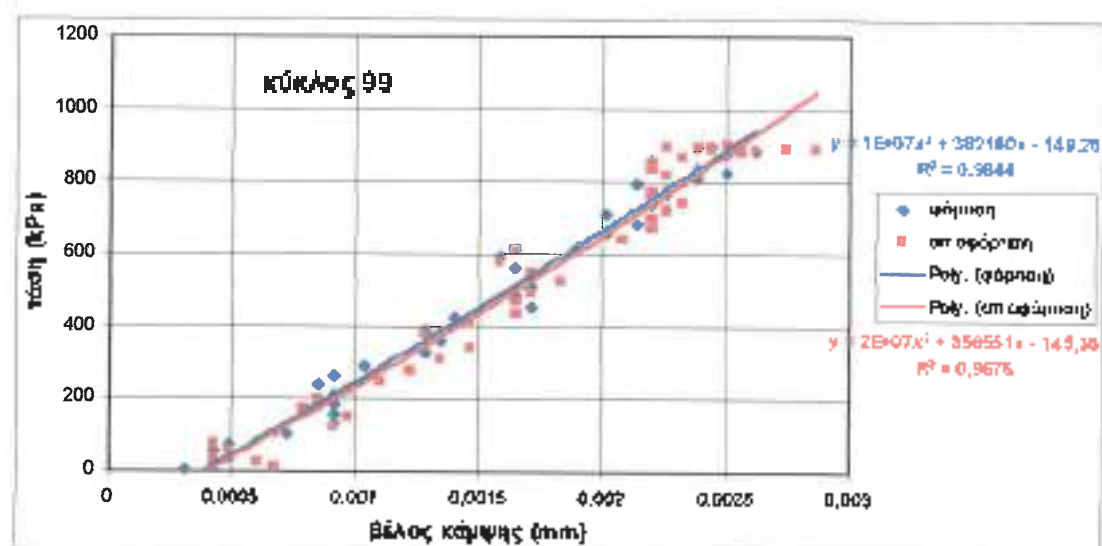
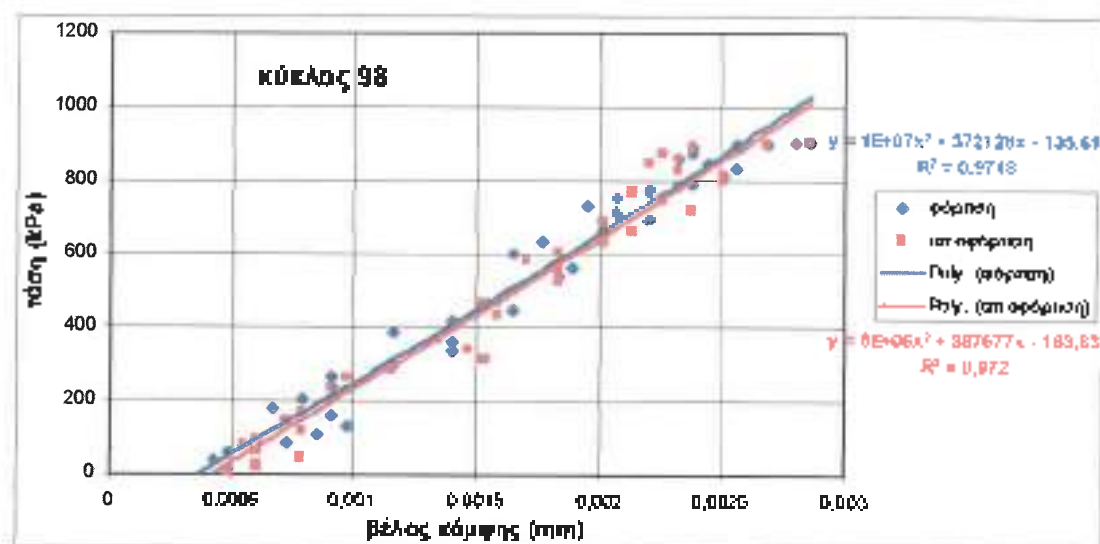
Σχήμα Δ-75: Τύση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλινδρομητικής), κύκλοι 47, 48, 49 για το δοκίμιο 21 (γαλάκωμα 2% - τσιμέντο 4%)



Σχήμα Α-76: Τάση βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες κυλινδρoδρόμησης), κύκλοι 50, 51 για το δοκίμιο 21 (γυάλκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



Σχήμα Δ-77: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και αποφόρτιση (καμπύλες παλλανδρόμησης), κύκλοι 95, 96, 97 για το δοκίμιο 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)



Σχήμα Δ-78: Τάση – βέλος κάμψης για φόρτιση και απεφόρτιση (καμπύλες παλινδρόμησης), κύκλοι 98, 99 για το δοκίμιο 21 (γαλάκτωμα 2% - τσιμέντο 4%)